



2011 도로포장 구조 설계 해설서



2011. 11



국토해양부

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs

목 차

1. 총론	3
1.1 도로 포장	3
1.2 포장 형식	4
1.2.1 아스팔트 콘크리트 포장	5
1.2.2 시멘트 콘크리트 포장	7
2. 도로 포장의 시스템 구성 및 계획	15
2.1 포장 설계 시스템	15
2.1.1 포장 설계 시스템 처리 과정	15
2.1.2 포장 시스템의 주요 인자	17
2.2 설계 구간의 결정	24
2.3 도로 포장 형식 선정	25
2.3.1 도로포장 구조 설계의 포장 형식 결정	26
2.4 도로 포장의 설계 수준	29
2.4.1 도로포장 구조 설계의 설계 수준	30
2.5 도로포장 구조 설계의 전체 흐름도	32
2.5.1 아스팔트 포장의 전반적인 설계로직	32
2.5.2 콘크리트 포장의 전반적인 설계로직	36
3. 교통 하중	41
3.1 차량 및 교통 흐름 특성	41
3.1.1 차량의 특성	42
3.1.2 교통 흐름 특성	54
3.2 교통하중 정량화 방법	65
3.2.1 도로포장 구조 설계의 교통하중 정량화	66

3.3 교통하중 정량화 로직	68
4. 환경 하중	75
4.1 도로포장 구조 설계의 온도예측	79
4.1.1 Input data 분석 및 계수 값 결정	80
4.1.2 Input file의 생성	83
4.1.3 포장체 온도 예측결과 분석	84
4.2 도로포장 구조 설계의 함수비 예측 모형	87
4.2.1 1단계 모형	87
4.2.2 2단계 모형	88
4.2.3 3단계 모형	89
4.2.4 현장 측정값과 예측모형에 의한 함수비의 비교	90
4.2.5 노상 함수비 변화와 탄성계수와의 상관성	92
5. 입상재료	97
5.1 입상재료의 물성 시험법	97
5.1.1 경험적인 시험법	98
5.1.2 역학적인 시험법	101
5.2 하부 재료의 물성 모형	102
5.2.1 도로포장 구조 설계의 입상층 물성	103
5.3 동상	128
5.3.1 동결지수	128
5.3.2 동결심도 모형	129
5.3.3 동상 방지법의 종류 및 두께 설계	130
6. 아스팔트 재료	139
6.1 아스팔트 재료 물성	139
6.1.1 사용되는 아스팔트 재료의 물성	140
6.1.2 도로포장 구조 설계의 아스팔트 재료 물성	144

6.2 아스팔트 재료 물성 시험법	162
6.2.1 직접법	163
6.2.2 간접법	173
7. 콘크리트 재료	179
7.1 콘크리트의 재료 물성 및 시험법	180
7.1.1 탄성계수	180
7.1.2 콘크리트 강도	185
7.1.3 건조수축	189
7.1.4 열팽창계수	195
7.1.5 각 물성값 간의 상관관계	198
7.1.6 포아송 비와 단위중량	199
7.2 새로운 재료에 대한 물성 정량화 방안	200
7.2.1 탄성계수	200
7.2.2 압축강도	202
7.2.3 휨강도	202
7.2.4 쪼갬인장강도	202
7.2.5 열팽창계수	203
7.2.6 건조수축변형률	203
7.2.7 단위중량	205
7.2.8 포아송 비	206
7.3 설계관련 물성 및 시험	206
7.3.1 철근	206
7.3.2 불연속면	209
8. 포장체 구조해석	229
8.1 도로포장 구조 설계의 구조해석 모형	230
8.1.1 아스팔트 포장	230
8.1.2 콘크리트 포장	237

9. 공용성 모형	253
9.1 도로 포장의 설계	262
9.2 포장 설계 기준	265
9.2.1 IRI (International Roughness Index)	266
9.2.2 구조적 파손 형태 기준	273
9.3 현장 공용성 자료	302
9.3.1 아스팔트 포장	303
9.3.2 콘크리트 포장	310
9.4 현장 자료를 이용한 공용성 모형의 보정	320
9.4.1 방법론	320
9.4.2 보정계수 및 전이함수를 이용한 모형 보정	323
10. 덧씌우기	329
10.1 도로포장 구조 설계의 덧씌우기 설계	329
10.1.1 아스팔트 포장에서의 아스팔트 덧씌우기 설계	329
11. 경제성 분석	343
11.1 최적대안을 위한 논리	344
11.1.1 분석기간 동안 포장 설계 대안의 수립	344
11.1.2 공용성 기간과 유지 보수 시기의 결정	346
11.1.3 도로기관 비용의 산정	346
11.1.4 사용자 비용의 산정	347
11.1.5 지출 흐름도의 작성	347
11.2 포장의 경제성 분석을 위한 항목 결정 및 모형	349
11.2.1 생애주기 경제성 분석의 기본 구성	349
11.2.2 현재가치 환산법	352
11.2.3 국내 연구의 각 항목의 변수 결정방법	354
11.2.4 경제성 분석 모형의 각 변수 결정 방법	354
11.3 각 공법별 보수시점 제시 및 현 공법의 잠정 기준 제시	377

11.3.1 국내 자료	378
11.3.2 외국 자료	378
11.4 경제성 평가 비용 D/B 구축	381
11.4.1 아스팔트 포장	381
11.4.2 콘크리트 포장	388

표 목 차

〈표 1.1〉 포장 형식간의 장단점 비교	5
〈표 2.1〉 포장 형식별 공용성 모형 종류	23
〈표 2.2〉 정량적 선정요인 및 선정 절차 항목	27
〈표 2.3〉 포장형식 선정을 위한 지수 결정	27
〈표 2.4〉 국외 포장 설계 등급 및 방법	31
〈표 2.5〉 도로포장 구조 설계에서의 설계 등급 구분	31
〈표 2.6〉 도로포장 구조 설계에서 설계 등급에 따른 포장 설계 방법	32
〈표 3.1〉 설계 등급별 교통 관련 인자 산정 방법	42
〈표 3.2〉 고속국도 차종 분류 체계	43
〈표 3.3〉 일반 국도-12종 분류 체계	44
〈표 3.4〉 각 도로의 AADT(2008)	56
〈표 3.5〉 도로등급별 차종 비율 (%)	57
〈표 3.6〉 월별 교통량 비율	58
〈표 3.7〉 도시지역의 시간별 교통량 변동 계수	58
〈표 3.8〉 지방지역의 시간별 교통량 변동 계수	59
〈표 3.9〉 차종별 도로폭에 따른 원더링	61
〈표 3.10〉 시간에 따른 교통량 추정 방법	63
〈표 3.11〉 방향 및 차로 분배 계수 범위 값	64
〈표 4.1〉 계절에 따른 declination angle	82
〈표 4.2〉 열평형 방정식 입력변수	83
〈표 4.3〉 Input file 생성	84
〈표 4.4〉 1단계 모형의 노상토의 평균 함수비 및 계절별 함수비 변화 가중치 ..	88
〈표 4.5〉 2단계 함수비 예측 모형	89
〈표 4.6〉 개선된 함수비 예측모형	89
〈표 4.7〉 대표 3구간의 함수비 예측모형에 사용된 정보	90

〈표 5.1〉 노상토의 기초특성 조사항목 및 조사결과 일례	109
〈표 5.2〉 입상보조기층 재료 기초특성 조사항목 및 조사결과 일례	110
〈표 5.3〉 설계입력변수 결정 구성모델 검토에 사용된 다양한 회귀분석 모형	112
〈표 5.4〉 상관모형 탄성계수의 최대값 및 최소값의 범위 (단위, MPa)	114
〈표 5.5〉 인공신경망 이론에 사용되는 weight와 biases (노상토)	115
〈표 5.6〉 입력 기초물성치(p)의 최대 및 최소값(노상토)	115
〈표 5.7〉 경험모형을 적용하여 얻어진 노상토의 탄성계수 일례	116
〈표 5.8〉 상관모형 탄성계수의 최대값 및 최소값의 범위 (단위, MPa)	118
〈표 5.9〉 인공신경망 이론에 사용되는 weight와 biases (보조기층 재료)	118
〈표 5.10〉 입력 기초물성치(p)의 최대 및 최소값(보조기층)	119
〈표 5.11〉 경험모형을 적용하여 얻어진 보조기층 재료의 탄성계수 일례	119
〈표 5.12〉 쇄석기층 재료의 품질 기준	120
〈표 5.13〉 쇄석기층 재료의 탄성계수, k ₁ 계수, k ₂ 계수의 범위	121
〈표 5.14〉 포장 거동에 적용하는 노상토 및 입상 보조기층 재료의 포아송비	122
〈표 5.15〉 보조기층의 탄성계수가 가장 작은(ESUB-MIN)일 경우 복합지지력계수 영역	126
〈표 5.16〉 보조기층의 탄성계수가 중간값(ESUB-MED)일 경우 복합지지력계수 영역	126
〈표 5.17〉 보조기층의 탄성계수가 최대(ESUB-max)일 경우 복합지지력계수 영역	126
〈표 5.18〉 각 하부 재료에 따른 하부 지지력 저감식	127
〈표 5.19〉 국내의 동결 심도 추정식	130
〈표 6.1〉 아스팔트 종류별 점성특성	148
〈표 6.2〉 아스팔트 혼합별 기본 물성치	149
〈표 6.3〉 표층용 화강암 13mm+AP-3(PG58-22)	150
〈표 6.4〉 표층용 화강암 13mm+AP-5(PG64-22)	151
〈표 6.5〉 표층용 화강암 19mm+AP-3(PG58-22)	152
〈표 6.6〉 화강암 밀입도 19mm+AP-5(PG64-22)	153
〈표 6.7〉 화강암 기층용 아스팔트 25mm+AP-3(PG58-22)	154
〈표 6.8〉 화강암 기층용 아스팔트 25mm+AP-5(PG64-22)	155
〈표 6.9〉 화강암 SMA 13mm+AP-3(PG58-22)	156
〈표 6.10〉 화강암 SMA 13mm+AP-5(PG64-22)	157

〈표 6.11〉 화강암 개질아스팔트 13mm+슈퍼팔트(PG76-22)	158
〈표 6.12〉 동탄성계수 추정식 파라미터	159
〈표 6.13〉 동탄성계수 마스터곡선 파라미터	162
〈표 6.14〉 회복탄성계수 시험결과 (밀입도 19mm, PG 64-22)	169
〈표 6.15〉 SPT 시험항목 및 시험조건	172
〈표 6.16〉 하중주파수 및 결과측정범위	173
〈표 6.17〉 마샬 시험에 대한 기준치	174
〈표 7.1〉 굽은 골재별 콘크리트 탄성계수 예측상수	184
〈표 7.2〉 굽은 골재별 콘크리트 압축강도 예측상수	186
〈표 7.3〉 굽은 골재별 콘크리트 휨강도 예측상수	188
〈표 7.4〉 굽은 골재별 콘크리트 쪼캠인장강도 예측상수	189
〈표 7.5〉 KS와 ASTM 건조 수축 시험 차이점	190
〈표 7.6〉 굽은 골재별 콘크리트 슬래브의 건조수축 예측상수	192
〈표 7.7〉 재령 20년에서의 응력감소가 고려된 부등건조수축 등가온도차이 예측결과	194
〈표 7.8〉 굽은 골재별 콘크리트의 열팽창계수	196
〈표 7.9〉 콘크리트 강도 및 탄성계수간의 상관관계식	199
〈표 7.10〉 포아송 비 제안값	199
〈표 7.11〉 단위중량 제안값	200
〈표 7.12〉 설계수준에 따른 탄성계수 산정방법	201
〈표 7.13〉 설계수준에 따른 기존 콘크리트 탄성계수 추정방법	201
〈표 7.14〉 FWD로부터 역계산된 PCCP 탄성계수 자료	201
〈표 7.15〉 설계수준에 따른 휨강도 산정방법	202
〈표 7.16〉 설계수준에 따른 쪼캠인장강도 산정방법	203
〈표 7.17〉 설계수준에 따른 쪼캠인장강도 산정방법(기존포장)	203
〈표 7.18〉 설계 수준에 따른 열팽창계수 산정방법	203
〈표 7.19〉 설계수준에 따른 건조수축변형률 산정방법	204
〈표 7.20〉 설계수준에 따른 단위중량 산정방법	205
〈표 7.21〉 설계 수준에 따른 단위중량 산정방법(기존포장)	205
〈표 7.22〉 부착실험 결과	207

〈표 7.23〉 예비단면에 사용되는 권역별 줄눈간격	211
〈표 7.24〉 줄눈채움재별 형상계수	213
〈표 7.25〉 타이바의 사양	213
〈표 7.26〉 수정 타이바의 길이	215
〈표 7.27〉 줄눈간격별 수정 타이바 간격 설정	217
〈표 7.28〉 슬래브 폭에 따른 다웰바 최적배치안	219
〈표 7.29〉 슬래브 두께에 따른 일반적인 다웰바 설치 기준	219
〈표 7.30〉 88 고속도로 하중전달효율(LTE)	224
〈표 7.31〉 최종 Joint Stiffness 산정식	226
〈표 8.1〉 슬래브 두께에 따른 커링 온도의 범위	240
〈표 8.2〉 월별 커링의 시작 및 종료시간의 예	241
〈표 8.3〉 축 종류별 슬래브 하부 최대 인장응력 회귀식 상수	244
〈표 8.4〉 온도하중에 의한 슬래브 하부 최대 인장응력 회귀식 상수	245
〈표 8.5〉 단륜 단축과 단륜(복륜) 복축에 의한 슬래브 하부 최대 인장응력 회귀식 상수	247
〈표 8.6〉 단륜 단축과 복륜 단축에 의한 슬래브 하부 최대 인장응력 회귀식 상수	248
〈표 8.7〉 길어깨 너비에 따른 한계 응력 지점의 응력 분포도	249
〈표 9.1〉 혼합물별 동탄성계수 마스터 곡선 계수 (기준온도 21°C)	278
〈표 9.2〉 혼합물별 피로수명 Nf에 사용되는 변수	280
〈표 9.3〉 혼합물별 영구변형모형에 사용되는 변수	288
〈표 9.4〉 입상보조기층 재료에 대한 시험절차(안)	290
〈표 9.5〉 노상토에 대한 응력조합단계	290
〈표 9.6〉 입상보조기층에 대한 모형별 회귀분석계수(경상도 화강암)	293
〈표 9.7〉 국내 입상재료에 대한 VESYS 모델 영구변형 매개변수 수정값	294
〈표 9.8〉 시험방법 및 굽은 골재 종류별 피로 모형	296
〈표 9.9〉 스팔링 모형의 개발을 위한 자료	300
〈표 9.10〉 스팔링 모형에 사용된 변수의 평균값	302
〈표 9.11〉 가속실험에 사용된 하중 및 온도조건	309
〈표 9.12〉 미국 LTPP 콘크리트포장 수집자료 총 현황	318
〈표 9.13〉 KPRP 콘크리트 포장의 전이함수 개발에 사용된 현장포장자료	324

〈표 10.1〉 기존 포장체의 상태 평가 기법 요약	333
〈표 10.2〉 평균 역산 탄성계수 (ER)와 실내시험 탄성계수 (MR)와의 비	336
〈표 11.1〉 생애주기를 고려한 비용 구성	350
〈표 11.2〉 국내 LCC분석 시 사용 자료	354
〈표 11.3〉 미국 각 주에서 예상하는 아스팔트와 콘크리트 수명	355
〈표 11.4〉 소비자 물가상승율 및 은행 시중금리(1996~2005)	356
〈표 11.5〉 아스팔트 포장1km/lane 비용(폭 3.5m)	358
〈표 11.6〉 콘크리트 포장 1km/lane 비용(폭 3.5m)	359
〈표 11.7〉 단위 km당 유지보수 비용 집계표(단위 : 천원/6,700m ²)	360
〈표 11.8〉 일반국도 대비 고속도로의 연료소비율 향상을 비교 (국토연구원, 1999)	361
〈표 11.9〉 유류비 세전 공장도 가격(2006. 6월) (대한석유협회, 2006)	361
〈표 11.10〉 속도·차종별 엔진오일 소모량(한국개발 연구원, 2001) (단위 : L / 1,000km)	362
〈표 11.11〉 속도·차종별 타이어 마모율(한국개발 연구원, 2001)(단위 : % / 1,000km)	362
〈표 11.12〉 속도·차종별 차종별 유지정비비 비율(한국개발 연구원, 2001)(단위 : % / 1,000km)	363
〈표 11.13〉 속도·차종별 감가상각비 비율(한국개발 연구원, 2001) (단위 : % / 1,000km)	363
〈표 11.14〉 승용차의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)	364
〈표 11.15〉 소형버스의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)	364
〈표 11.16〉 대형버스의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)	365
〈표 11.17〉 소형트럭의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)	365
〈표 11.18〉 중형트럭의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)	366
〈표 11.19〉 대형트럭의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)	366
〈표 11.20〉 VOC 회귀식의 차종별 계수 값	367
〈표 11.21〉 3차식 회귀분석식과 영국식 분석식의 상관도 비교	367
〈표 11.22〉 임금율법에 의한 업무통행의 시간가치 산출결과(2005년, 2004년 기준)	379
〈표 11.23〉 승용차와 버스의 통행 시간가치	379
〈표 11.24〉 100km/h에서 80km/h로 속도를 조정할 경우 추가금액(원/대)	371
〈표 11.25〉 공사시 평균 차선 용량 (James Walls III, 1998)	371
〈표 11.26〉 차선통제에 따른 사고수의 변화(FHWA/JHRP, 95)	374
〈표 11.27〉 차선통제에 따른 사상자수의 변화(FHWA/JHRP, 95)	374

〈표 11.28〉 도로 유형별 교통사로로 인한 사망자 및 부상자수	375
〈표 11.29〉 교통사고 사망자 1인당 교통사고 비용(교통개발연구원, 2002) (단위 : 만 원)	375
〈표 11.30〉 교통소음에 대한 사용자 비용의 정량화 (건설교통부, 2004)	376
〈표 11.31〉 2005년 7월 29일 기준 해체비용 및 폐기 처분비용 (자료 : 폐기물처리 공제조합)	376
〈표 11.32〉 비용산정방식의 요약	377
〈표 11.33〉 미국 각주의 보수 시기 및 보수 공법의 정의	379
〈표 11.34〉 아스팔트 관련 협회에서 제시하는 보수 시기 및 보수 공법의 정의	380
〈표 11.35〉 콘크리트 협회에서 조사한 보수 시기 및 보수 공법의 정의	381
〈표 11.36〉 일반 아스팔트 평균 가격	382
〈표 11.37〉 일반아스팔트 부피 환산 가격	382
〈표 11.38〉 SMA아스팔트 평균 가격	383
〈표 11.39〉 SMA 아스팔트 부피 환산 가격	383
〈표 11.40〉 아스콘포장/표층/포설및다짐 시공비용	384
〈표 11.41〉 아스콘포장/중간층/포설및다짐 시공비용	384
〈표 11.42〉 아스콘포장/기층/포설및다짐 시공비용	384
〈표 11.43〉 동상방지층 및 보조기층 포설 및 다짐 시공비용	385
〈표 11.44〉 표층 포설 및 다짐 시공량	385
〈표 11.45〉 기층 포설 및 다짐(BB층) 시공량	386
〈표 11.46〉 동상방지층 및 보조기층 포설 및 다짐 시공량	386
〈표 11.47〉 아스팔트 포장 유지보수 비용	387
〈표 11.48〉 절삭 후 아스팔트 덧씌우기 작업량	388
〈표 11.49〉 시멘트 콘크리트 가격 (도착가)	388
〈표 11.50〉 기계식 콘크리트 포장/포설 시공비용	389
〈표 11.51〉 린콘크리트 포설 및 다짐 시공비용	389
〈표 11.52〉 시멘트 콘크리트 포장 기계시공 작업량	390

그 림 목 차

〈그림 1.1〉 도로의 발전사	3
〈그림 1.2〉 국내 포장 대표 단면 및 응력 분포도	4
〈그림 1.3〉 콘크리트 포장의 종류 및 특성	9
〈그림 1.4〉 콘크리트 포장의 종류 및 특성	11
〈그림 2.1〉 역학적-경험적 설계 기본모형	16
〈그림 2.2〉 도로 포장 형식 선정 절차	28
〈그림 2.3〉 경제성 분석에 의한 포장 형식 선정 절차	28
〈그림 2.4〉 아스팔트 포장 설계 로직	34
〈그림 2.5〉 각 층의 분할	35
〈그림 2.6〉 콘크리트 포장 설계 로직	37
〈그림 2.7〉 설계 지역에 따른 줄눈 간격 산정 로직	38
〈그림 3.1〉 축하중 조사방법(이동식 및 검문소)	45
〈그림 3.2〉 차종별 축하중 분포(지방도)	46
〈그림 3.3〉 축별 축하중 분포(지방도)	48
〈그림 3.4〉 축별 축하중 분포(일반 국도)	49
〈그림 3.5〉 단축 및 복축복륜의 축하중(톤) 비교	50
〈그림 3.6〉 콘크리트 포장의 상향 컬링시 하향 균열 예측 위한 구조해석 형태	51
〈그림 3.7〉 앞축 하중 부담비율	52
〈그림 3.8〉 축하중 크기에 따른 접지 면적의 변화	53
〈그림 3.9〉 차량 바퀴 접지면적의 환산	53
〈그림 3.10〉 차종에 따른 Wandering 분포 및 중첩효과	60
〈그림 3.11〉 교통량 수요 예측의 방법 및 한계	63
〈그림 3.12〉 도로포장 구조 설계의 교통량 산출 개념도	66
〈그림 3.13〉 도로포장 구조 설계 교통하중 로직 (1)	70
〈그림 3.14〉 도로포장 구조 설계 교통하중 로직 (2)	71

〈그림 3.15〉 아스팔트 포장의 하중주파수 계산 로직	72
〈그림 4.1〉 커링(Curling)에 의한 슬래브의 거동	76
〈그림 4.2〉 계절 변화에 따른 노상의 함수비 및 탄성계수 변화	76
〈그림 4.3〉 콘크리트 포장 온도하중 로직	78
〈그림 4.4〉 온도예측모형 개발 흐름도	79
〈그림 4.5〉 계절에 따른 declination angle	81
〈그림 4.6〉 진부령지역의 온도예측 결과(겨울)	85
〈그림 4.7〉 진부령지역의 온도예측 결과(봄)	85
〈그림 4.8〉 충주지역의 온도예측 결과(겨울)	86
〈그림 4.9〉 충주지역의 온도예측 결과(봄)	86
〈그림 4.10〉 실측값과 모형값 함수비 비교	91
〈그림 4.11〉 함수비 변화에 따른 탄성계수 변화 비교(남해안)	92
〈그림 4.12〉 함수비 변화에 따른 탄성계수 변화 비교(서해안)	93
〈그림 5.1〉 회복탄성계수 측정 장비	102
〈그림 5.2〉 회복탄성계수 시험에서의 탄성계수 결정	102
〈그림 5.3〉 노상 탄성계수 결정 로직	104
〈그림 5.4〉 보조기층 탄성계수 결정 로직	106
〈그림 5.5〉 아스팔트 안정처리기층(블랙 베이스) 탄성계수 결정 로직	107
〈그림 5.6〉 콘크리트 포장 복합 지지력 산정 로직	108
〈그림 5.7〉 쇄석기층 입도분포	120
〈그림 5.8〉 쇄석기층의 일반적인 탄성계수	122
〈그림 5.9〉 시멘트 콘크리트 포장 구조해석 모형	123
〈그림 5.10〉 복합지지력 저하 함수	126
〈그림 5.11〉 동결지수 산정 방법	129
〈그림 5.12〉 동결 관입 깊이와 설계 동결지수 상관 도표	133
〈그림 5.13〉 노상동결 관입허용법에 의한 설계 비동결성 재료층 두께결정 도표	134
〈그림 6.1〉 경험적인 물성과 역학적인 물성의 차이점	140
〈그림 6.2〉 마스터 곡선 (화강암 밀입도 13mm + PG 58-22)	142
〈그림 6.3〉 아스팔트 층의 동탄성계수 결정 로직	145

〈그림 6.4〉 형상계수(Shape parameter)의 정의	160
〈그림 6.5〉 회복탄성계수 시험에서 하중과 변형곡선	166
〈그림 6.6〉 반복재하에 의한 수평변형	168
〈그림 6.7〉 구속반복하중 크리프 시험	170
〈그림 6.8〉 최대입경 13mm 골재(화강암) + PG 64-22 비언더 혼합물의 크리프 시험결과·	171
〈그림 6.9〉 FWD 를 이용한 아스팔트 층의 물성 역산 과정	176
〈그림 7.1〉 콘크리트 재료물성 산정로직	179
〈그림 7.2〉 응력과 변형률 곡선	181
〈그림 7.3〉 콤프레소미터를 이용한 탄성계수 측정	182
〈그림 7.4〉 콘크리트 탄성계수 산출을 위한 ‘재하 압력-변형율’ 그래프 ..	183
〈그림 7.5〉 Impact Echo 시험 장면	184
〈그림 7.6〉 도로포장 구조 설계에 적용된 탄성계수 감소 모형	185
〈그림 7.7〉 휨강도 시험방법 (단순보의 3등분점 하중법)	187
〈그림 7.8〉 쪼掴인장강도 실험	188
〈그림 7.9〉 콤퍼레이터 방법의 측정기	190
〈그림 7.10〉 다이얼 게이지를 이용한 건조수축 측정 장면	191
〈그림 7.11〉 재령에 따른 응력감소가 고려된 부동건조수축 등가온도차이 예측 결과·	194
〈그림 7.12〉 열팽창계수 실험 개념도 (LVDT 실험방법)	196
〈그림 7.13〉 PNC (Permeable Non Stress Cylinder)와 INC(Impermeable Non Stress Cylinder)	198
〈그림 7.14〉 Tie-Bar의 콘크리트내 매립모습과 지그 및 LVDT 설치개념도 ..	207
〈그림 7.15〉 재령 28일의 P- δ Curve	208
〈그림 7.16〉 다양한 불연속면 처리 형태	209
〈그림 7.17〉 줄눈채움재 단면	212
〈그림 7.18〉 다웰바 설치도 및 시공 사진	218
〈그림 7.19〉 Friberg의 Dowel Group Action	220
〈그림 7.20〉 FWD 측정 시 센서의 위치	221
〈그림 7.21〉 줄눈부의 FWD 측정	222
〈그림 7.22〉 실내의 하중전달 장치 성능평가 실험 개념도	224

〈그림 7.23〉 공용 년수에 따른 줄눈부 강성 저감도 평가 결과	225
〈그림 8.1〉 구조해석을 이용한 포장체의 거동 분석의 역할	229
〈그림 8.2〉 KICTMLE에서 고려하는 하중조건과 중첩방법	231
〈그림 8.3〉 단축단륜(SS) 조건에서의 하중조건과 측점의 위치	233
〈그림 8.4〉 Case 4에서의 x, y 방향 응력 결정방법	234
〈그림 8.5〉 단축단륜 조건에서의 원더링에 따른 대상 측점의 변화	234
〈그림 8.6〉 단축복륜 조건에서의 원더링에 따른 대상 측점의 변화	235
〈그림 8.7〉 아스팔트 포장의 구조해석결과	236
〈그림 8.8〉 콘크리트포장 구조해석 개념도	238
〈그림 8.9〉 슬래브 상하부 간의 온도 차이에 의한 커링형태	239
〈그림 8.10〉 24시간 동안의 커링 사이클	240
〈그림 8.11〉 상향균열을 유발하는 커링 및 차륜하중 재하상태	243
〈그림 8.12〉 상향균열을 유발하는 온도 및 차륜하중에 기인한 응력선도	243
〈그림 8.13〉 하향균열을 유발하는 커링 및 차륜하중 재하상태	246
〈그림 8.14〉 하향균열을 유발하는 온도 및 차륜하중에 기인한 응력선도	246
〈그림 8.15〉 길어깨의 하중 전달율이 50% 일 경우의 응력 분포도	249
〈그림 9.1〉 포장의 공용성 모형의 역할	253
〈그림 9.2〉 아스팔트 포장층의 피로균열 산정 로직	256
〈그림 9.3〉 아스팔트 포장층의 영구변형 산정 로직	257
〈그림 9.4〉 아스팔트 포장층의 평탄성지수 산정 로직	258
〈그림 9.5〉 콘크리트 포장의 피로균열 산정 로직	260
〈그림 9.6〉 콘크리트 포장의 평탄성지수 산정 로직	261
〈그림 9.7〉 시간별 손상 계산	264
〈그림 9.8〉 1일 손상 계산	264
〈그림 9.9〉 전체누적 손상 계산	265
〈그림 9.10〉 IRI와 포장 상태와의 관계	270
〈그림 9.11〉 시편을 시험장비에 거치한 광경	275
〈그림 9.12〉 간접인장 시험 순서	275
〈그림 9.13〉 균열 예측 순서도	276

〈그림 9.14〉 상향 균열의 두께 영향 변수 k의 변화	280
〈그림 9.15〉 하향 균열의 두께 영향 변수 k의 변화	282
〈그림 9.16〉 영구 변형률과 하중재하 횟수의 전형적 관계	283
〈그림 9.17〉 영구변형 시험용 시편의 제작	283
〈그림 9.18〉 RaTT(Rapid Triaxial Testing system) 셀	284
〈그림 9.19〉 영구변형 예측 순서도	285
〈그림 9.20〉 아스팔트 층 두께에 따른 K값의 변화	287
〈그림 9.21〉 대형삼축압축 시험장치 전경	292
〈그림 9.22〉 휨인장 피로시험 개념도	295
〈그림 9.23〉 쪼개인장 피로실험에 사용된 시험체 및 실험장치	296
〈그림 9.24〉 최소응력()이 고려되지 않은 하중재하	298
〈그림 9.25〉 최소응력()이 고려된 하중재하	298
〈그림 9.26〉 개발 모형의 R에 대한 민감도	298
〈그림 9.27〉 현장 자료를 이용한 모형 보정의 필요성	303
〈그림 9.28〉 아스팔트 포장 설계의 현장 데이터 수집 구간	304
〈그림 9.29〉 공용성 자료	305
〈그림 9.30〉 아스팔트 포장 표층 입력자료	306
〈그림 9.31〉 아스팔트 포장 표층 골재입도 입력자료	307
〈그림 9.32〉 하부지반 물성 입력자료	307
〈그림 9.33〉 교통하중 입력자료 예	307
〈그림 9.34〉 가속실험에 사용된 개질(좌) 및 밀입도 혼합물의 포장 단면	309
〈그림 9.35〉 하중재하 횟수에 따른 실험 조건별 영구 변형량의 변화	310
〈그림 9.36〉 자동조사장비의 사진 자료(좌) 및 LTPP 조사대장(우)	311
〈그림 9.37〉 일반국도(좌) 및 고속국도(우) 공용성 조사 현황	312
〈그림 9.38〉 공용성 자료 수집 예	313
〈그림 9.39〉 국내 지질도 및 석산의 암종 분포	313
〈그림 9.40〉 교통하중 입력자료 예	315
〈그림 9.41〉 재령에 따른 국내 콘크리트 포장의 슬래브 두께별 피로균열 현황	316
〈그림 9.42〉 재령에 따른 국내 콘크리트 포장의 슬래브 두께별 스팔링 현황	317

〈그림 9.43〉 미국 LTPP 콘크리트 포장 자료수집 결과	319
〈그림 9.44〉 교통량에 따른 국내 및 미국의 콘크리트 포장 피로균열율 분포	319
〈그림 9.45〉 일반적 균열발생률과 누적 피로손상과의 관계	321
〈그림 9.46〉 상향균열에 대한 전이함수	323
〈그림 9.47〉 하향균열에 대한 전이함수	324
〈그림 9.48〉 피로누적손상 vs 피로균열율	325
〈그림 10.1〉 기존 포장의 덧씌우기 설계 시점(좌) 및	330
〈그림 10.2〉 아스팔트 포장 상부 아스팔트 덧씌우기 포장설계 절차	331
〈그림 10.3〉 포장 쳐짐량 측정	334
〈그림 10.4〉 포장층 탄성계수 역산 절차	334
〈그림 10.5〉 아스팔트 덧씌우기 설계 단면의 예	336
〈그림 10.6〉 아스팔트 덧씌우기 포장 구조해석	336
〈그림 10.7〉 아스팔트 덧씌우기 포장에서 피로균열 예측 흐름도	337
〈그림 10.8〉 아스팔트 덧씌우기 포장 설계에서 영구변형 예측 흐름도	339
〈그림 10.9〉 덧씌우기 설계 포함된 신설 포장 설계 흐름도	340
〈그림 11.1〉 LCC(Life Cycle Cost)의 개념(Kaan Ozbay, 2003)	343
〈그림 11.2〉 FHWA에서 제안하는 8단계 분석절차	344
〈그림 11.3〉 분석기간의 개념(James Walls III, 1998)	345
〈그림 11.4〉 대안별 포장상태 비교의 도식화(James Walls III, 1998)	345
〈그림 11.5〉 사용자 비용 구성요소	347
〈그림 11.6〉 지출흐름도의 작성 예 (James Walls III, 1998)	348
〈그림 11.7〉 계산에 적용된 포장 단면	357
〈그림 11.8〉 공사시 개방 차선수와 신뢰도에 따른 도로 용량(HCM, 1994) ..	372
〈그림 11.9〉 평균속도와 V/C와의 관계(LOS(Level Of Service) F일 때(HCM, 1994) ..	372
〈그림 1.1〉 역학적 경험적 연속철근 콘크리트 포장 설계의 아키텍쳐	1
〈그림 2.1〉 하부지지력 산정 로직	8
〈그림 3.1〉 구조해석 모형	9
〈그림 3.2〉 슬래브 두께의 영향	10
〈그림 3.3〉 종방향 철근비의 영향	11

〈그림 3.4〉 하부 복합지지력의 영향	11
〈그림 3.5〉 콘크리트 온도 변화에 따른 영향	11
〈그림 3.6〉 열팽창계수의 영향	12
〈그림 3.7〉 최종건조수축의 영향	12
〈그림 3.8〉 슬래브와 하부층의 마찰력의 영향	12
〈그림 4.1〉 전이함수를 이용한 파손율과 편치아웃과의 상관관계	15



1

총 론

1. 총론

1.1 도로 포장

도로는 인류가 물물교환의 경제구조를 가지면서 잉여 생산물의 이동수단으로 이용되었다. 인류가 이동시킬 생산물의 양이 증가하면서 운송수단은 사람에서 마차로 발전하였고, 보다 빠르고 편리하게 운송하기 위해 도로의 폭을 넓히고, 평坦하게 만드는 작업이 진행해 왔다. 로마시대에 이르러 전쟁을 위한 물자 운송과 통행로 확보를 위해 돌을 이용하여 총연장 90,000km에 달하는 29개의 포장도로를 건설하였다. 그 후 10세기가 지난 18세기 말에는 증기차가 발명되었고, 19세기 말에 공기 타이어와 가솔린 자동차가 발명됨에 따라 도로 포장에 대한 새로운 관심을 가지게 되었다. 이는 포장도로의 양적인 확대뿐만 아니라 도로 및 포장 관련 학문의 발전을 가져왔다.



<비포장도로>



<구한말도로>



<로마도로>



<경부고속도로>

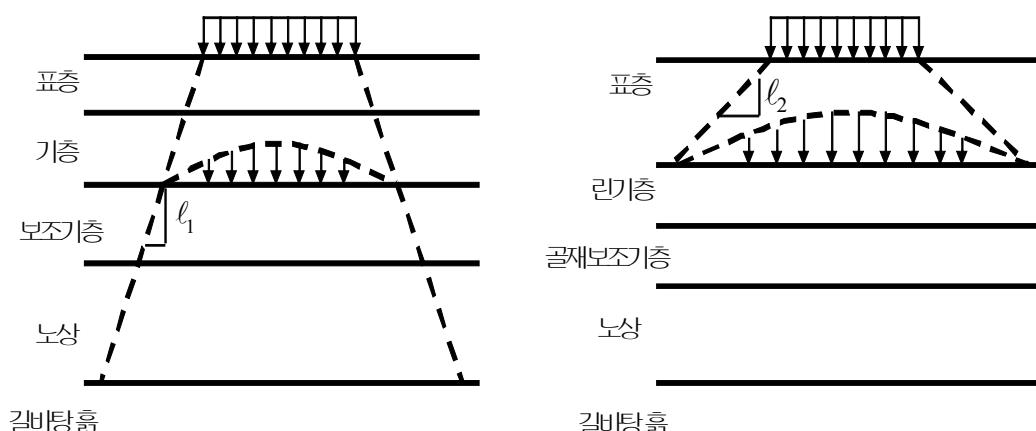
〈그림 1.1〉 도로의 발전사

아스팔트 포장은 1712년 스위스에서 의사인 다이리니스(D'yrinys) 박사에 의해 발견된 락 아스팔트(Rock Asphalt)를 시초로 하여 레온말로(Leon Malo)가 락 아스팔트를 분쇄, 가열하여 만든 현재의 쉬트 아스팔트(Sheet

Asphalt)와 같은 포장을 프랑스 파리에 시공하면서 시작되었다. 이후 영국에서는 이 포장을 도입, 개선하여 쇄석위에 아스팔트를 뿐어서 도로 포장을 만드는 머캐덤 공법(Macadam method)을 개발하여 널리 사용하였다. 콘크리트 포장은 시멘트가 19세기 말에 개발되면서부터 도로에 적용되었다. 초창기에 콘크리트는 보도블록 형태나 나무블록 도로에 시공하기 위한 보조 재료로 사용되었다. 1905년에는 현대의 포장 개념인 콘크리트 포장이 최초로 건설되었다. 1920년대 이르러 유럽에서는 일반 도로 포장에 콘크리트 포장을 널리 사용하였으며, 1940년경에는 중하중이 재하되는 공항 포장에 처음으로 도입되었다. 20세기 중반에 들어서면서 자동차의 대량생산과 도로의 물자 수송 분담률이 증가함에 따라 도로 포장의 질적 개선을 추구하게 되었다. 도로 포장의 수명을 증가시키기 위해 포장 층의 두께와 재료 구성을 최적화하는 연구에서부터 도로 이용자의 편의성을 향상시키기 위한 기능성 포장기술까지 도입되고 있다.

1.2 포장 형식

도로의 포장 형식은 크게 아스팔트 포장, 콘크리트 포장 및 기타 포장 형식으로 구분할 수 있다. 이 중 아스팔트 및 콘크리트 포장의 특성을 정리한 것이 <그림 1.2>와 <표 1.1>이다.



<그림 1.2> 국내 포장 대표 단면 및 응력 분포도

〈표 1.1〉 포장 형식간의 장단점 비교

구분	콘크리트 포장	아스팔트 포장
장점	<ul style="list-style-type: none"> ■ 긴 공용 수명 ■ 높은 미끄럼 저항성 ■ 유지보수 미미 ■ 야간 시인성이 우수 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 소음/진동이 적고 평탄성 양호. ■ 짧은 양생 기간으로 인해 조기 교통개방 가능 ■ 유지보수 간편
단점	<ul style="list-style-type: none"> ■ 소음/진동 발생 ■ 양생 기간 및 초기 균열 발생 가능성 ■ 보수 작업의 두려움 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 수명이 짧고 잦은 유지보수가 필요 ■ 낮은 미끄럼 저항성 ■ 낮은 야간 시인성
비교	최근에는 두 포장 형식간의 단점을 극복하려는 노력이 진행되어 장·단점 구분의 경계가 희미해짐	

1.2.1 아스팔트 콘크리트 포장

아스팔트 콘크리트 포장은 〈그림 1.2〉의 좌측 그림과 같이 표층을 골재와 아스팔트 바인더(Asphalt Binder)로 결합하여 만든 것으로 일반적으로 표층, 기층 및 보조기층으로 이루어진다. 아스팔트 포장은 차량 하중에 의해 발생하는 응력이 포장을 구성하는 각 층으로 전달되어 하부층으로 갈수록 점차 넓은 면적에 적게 작용하는 포장이다($l_1 > l_2$). 아스팔트 포장 각 층의 구성과 두께는 교통 하중에 의해 발생한 응력에 충분히 견딜 수 있어야 한다. 아스팔트 포장의 구분은 다음과 같다.

(1) 아스팔트 시멘트(Asphalt Cement)

원유에 포함된 혼합물들은 끓는점이 서로 달라 종류를 하고 난 후 맨 마지막에 남는 갈색의 점탄성 재료를 아스팔트 시멘트라고 한다. 수천종 이상의 고분자 탄화수소(90 % 이상)로 구성되어 있으며, 아직까지 정확한 화학적 구조가 규명되지 않았다. 아스팔트 생산 시 온도를 높이거나 진공 조건이 변할 경우, 포화 탄화수소는 그대로 있지만, 수지나 방향족 성분은 아스팔텐으로 변하며, 아스팔텐 함량이 높을수록 딱딱한 재료가 된다. 재료의 특성을 정의하기 위

해서 침입도(Penetration) 특성, 점도(Viscosity) 특성, PG(Performance Grade) 등급의 기준을 적용하여 구분하고 있다.

(2) 웜믹스 아스팔트(Warm Mix Asphalt)

최근 핫믹스 아스팔트 포장의 생산 및 시공시 많은 에너지 소비와 함께 대량의 탄소 배출로 인해 환경 문제의 주범으로 인식되었다. 중온화 재료를 첨가하여 핫믹스 아스팔트보다 약 30~50 °C 정도 낮은 온도에서 생산 및 시공함으로써 에너지 절감 및 유해가스 배출 저감 등의 효과를 목적으로 하고 있다.

(3) 콜드믹스 아스팔트(Cold Mix Asphalt)

콜드믹스 아스팔트는 일반적으로 대규모의 포장 건설에 사용하지 않고 소규모 소파 보수나 포장 표면 보수 재료로 사용한다. 예를 들어, 아스팔트 포장에 포트홀(Pothole)과 같은 파손이 발생할 때 긴급 보수재료 사용하거나 실코트(Seal Coat), 슬러리씰(Surry Seal), 포그씰(Fog Seal)과 같은 표면 보수용 재료로 이용한다.

개질아스팔트는 포장용 석유아스팔트의 성질을 포장의 내구성 향상을 목적으로 개선한 것이다. 이들에는 아스팔트에 고무, 수지 등의 고분자재료를 첨가해서 성능을 개선시킨 아스팔트 및 촉매제를 이용한 개질아스팔트가 있다. 아스팔트를 개질하는 방법은 여러 가지가 있으며 사용하는 개질재의 종류와 개질방식에 따라 개질아스팔트의 특성변화가 매우 크다. 개질아스팔트 종류에는 개질방식에 따라 고분자 개질 아스팔트와 화학적 개질 아스팔트, 그리고 산화 아스팔트로 크게 구분할 수 있으며, 생산방식에 따라서도 사전 배합(Pre-Mix) 생산형태와 현장배합(Plant-Mix)생산형태로 구분할 수 있다.

1) 고분자 개질아스팔트(PMA ; Polymer Modified Asphalt)

기존 아스팔트에 SBS, PE, EVA 등의 고분자를 혼합하여 성능을 향상시킨 제품으로 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 개질아스팔트이며 개질

재료에 의해 두 가지로 분류될 수 있다. 그 중의 하나는 개질재료로서 고무 계의 고분자재료를 첨가한 개질아스팔트 I형은 아스팔트의 감온성 및 저온시의 취성의 개량을 위해 유동 및 마모에 대한 저항성을 높인 재료이다. 다른 하나는 열가소성 수지와 고무를 병용한 것, 혹은 열가소성 수지를 단독으로 사용한 고분자 재료인 개질아스팔트 II형으로 유동저항성이 높다.

2) 화학적 개질아스팔트

금속원소가 함유된 촉매제를 사용하여 아스팔트를 화학적으로 산화시키거나 또는 시공 후 대기와의 산화를 촉진시키는 형태이다. 아스팔트의 경화를 급속히 진전시키는 개질방식으로 영구변형에 대한 저항성은 우수하나 균열에 취약한 특성과 사용시에 악취 발생 등의 문제점을 갖고 있어 현재에는 제한적인 용도에서만 사용되고 있다.

3) 산화 아스팔트

아스팔트를 고온에서 공기와 접촉시킴으로써 재료의 스티프니스(Stiffness)가 증가시켜 영구변형에 대한 저항성을 향상시킨 재료로써 세미블로운 아스팔트라고도 한다. 상대적으로 딱딱하기 때문에 연약지반상의 포장 등 기층의 국부적인 변형이 예상되는 장소에 적용하면 균열발생이 쉽다. 생산 시 점도가 높기 때문에 다짐작업을 할 때 온도관리에 특히 주의하고 충분히 다져야 한다.

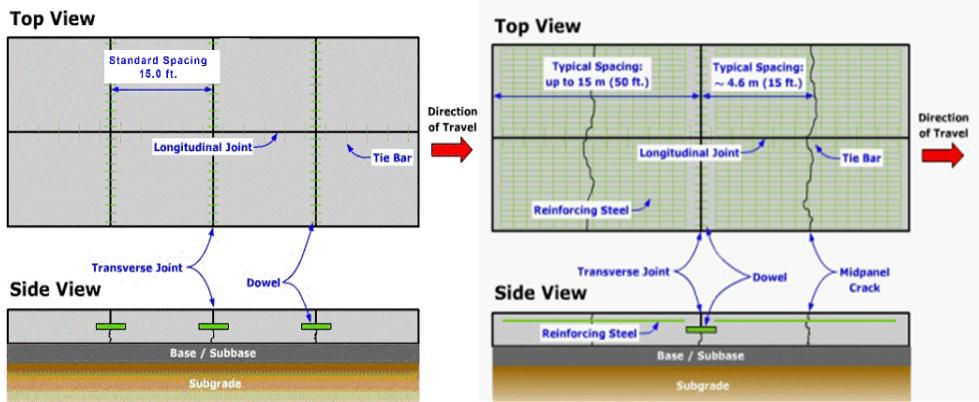
1.2.2 시멘트 콘크리트 포장

시멘트 콘크리트 포장은 시멘트 콘크리트 슬래브가 교통 하중으로 인한 전단이나 휨에 저항하여 하중을 하부층의 지지력 이하로 약화시킴으로써 구조적 안정성을 유지하는 포장형식이다. 일반적으로 표층 및 보조기층으로 구성되어 있는데, 보조기층의 역할은 슬래브에 균등한 지지력을 주고 펌핑(Pumping) 등의 파손을 사전에 방지하며, 콘크리트 슬래브를 타설하기 위한 안전한 작업 지반을 조성해 준다. 시멘트 콘크리트 포장 종류는 일반적으로

철근 보강 및 줄눈 간격에 따라 무근 줄눈 콘크리트 포장(JPCP : Jointed Plain Concrete Pavement), 줄눈 철근 콘크리트 포장(JRCP : Jointed Reinforced Concrete Pavement), 연속철근 콘크리트포장(CRCP : Continuously Reinforced Concrete Pavement), 포스트 텐션 콘크리트 포장(PTCP : Post-Tensioned Concrete Pavement) 등이 있다.

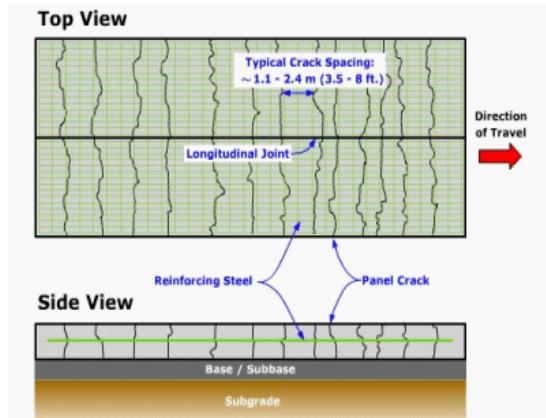
(1) 무근 줄눈 콘크리트 포장

무근 줄눈 콘크리트 포장은 다월바나 타이바를 제외하고는 일체의 철근 보강이 없는 포장형태로서, 일정한 간격의 줄눈을 설치함으로써 균열의 발생 위치를 인위적으로 조절하고, 필요에 따라 줄눈부에 다월바를 사용하여 하중 전달을 돋기도 한다. 국내는 6 m, 미국의 텍사스는 4.5 m 간격으로 줄눈을 시공한다. 무근 콘크리트 포장에서는 줄눈 이외의 부분에서는 철근 보강이 없으므로 줄눈부 외에 발생한 균열이 과대하게 벌어지는 것을 막을 수가 없기 때문에 균열 발생을 허용하지 않는다. 따라서 적절한 시기에 줄눈을 일정한 깊이로 시공하여야 줄눈부 이외에서 균열이 발생하는 것을 예방할 수 있다. 줄눈 콘크리트 슬래브와 보조기층 사이에 분리막을 설치하는데, 이는 마찰력을 줄임으로써 온도변화 및 진조수축에 의한 콘크리트 슬래브의 움직임을 억제하는 구속력을 감소시킨다. 구속력이 줄어들면 콘크리트에 발생되는 응력도 줄어들고 따라서 균열의 발생도 줄일 수 있다.



(a) 무근 줄눈 콘크리트 포장

(b) 줄눈 철근 콘크리트 포장



(c) 연속 철근 콘크리트 포장

〈그림 1.3〉 콘크리트 포장의 종류 및 특성

(2) 줄눈 철근 콘크리트 포장

무근 줄눈 콘크리트 포장의 구조적 취약부는 줄눈부이다. 시간이 경과함에 따라 줄눈부위의 파손(단차, 우각부 균열, 펌핑 등)으로 승차감의 저하를 초래할 수 있기 때문에 시멘트 콘크리트 슬래브 하부에 일정량의 종방향 철근을 설치하는 형태가 줄눈 철근 콘크리트 포장이다. 종방향 철근은 슬래브의 하부의 인장력에 의해 발생하는 균열이 과대하게 벌어지는 것을 구속하는 역할을 한다. 이 때문에 줄눈 간격을 무근 줄눈 콘크리트보다 더 길게 할 수

있으며, 미국의 경우 약 9~18 m마다 줄눈을 설치한다. 하지만 철근 콘크리트 포장의 경우 무근 콘크리트 포장에 비해 줄눈간격이 길어지지만, 줄눈부 및 횡방향 균열부에서 구조적 파손들이 발생하는 문제점들은 여전히 안고 있다.

(3) 연속철근 콘크리트 포장

연속철근 콘크리트 포장은 종방향 철근은 줄눈 철근 콘크리트 보다 더 많은 양을 설치하여 횡방향 줄눈을 완전히 제거한 포장의 형태이다. 일반적으로 종방향 철근량은 콘크리트 단면적의 0.6~0.85% 정도까지 사용한다. 철근의 위치는 각 나라, 각 지역에 따라 다르며, 미국의 일리노이에서는 슬래브 표면에서 약 1/3 위치에 설치하고, 텍사스는 슬래브의 중앙에 설치한다. 연속철근 콘크리트 포장은 가능한 한 온도변화 및 건조수축에 의한 콘크리트 슬래브의 움직임을 막아야 하므로 콘크리트 슬래브와 보조기층 사이에 분리막을 사용하지 않는다. 하지만 일부의 경우 얇은 아스팔트층(Bond Breaker)을 시공하여 층을 분리하는 경우도 있다. 연속철근 콘크리트 포장은 줄눈이 없으므로 승차감이 좋고, 많은 중차량 교통량 하에서도 포장 수명이 다른 포장형태보다 길기 때문에 세계적으로 각광을 받고 있다.

(4) 포스트 텐션 콘크리트 포장

외부 하중에 의해 콘크리트 슬래브의 하부에 발생하는 인장응력은 콘크리트 포장의 균열 및 잠재적 파손이 원인이 된다. 포스트 텐션 콘크리트 포장의 개념은 슬래브 하부의 인장응력을 상쇄시킬 압축력을 재하하여 슬래브에서 균열이 발생 가능성을 사전에 차단하는 것이다. 이로써 줄눈 간격을 90~100 m 간격으로 늘릴 수 있을 뿐만 아니라 콘크리트 슬래브의 두께를 감소시키는 효과가 있다. 크리트 타설 후 슬래브에 압축력을 가하기 쉽게 하기 위해 콘크리트 슬래브와 보조기층 사이에는 비닐막을 설치하여 층을 분리시킨다. 이 공법은 비교적 최근에 소개된 공법으로써 미국 텍사스의 경우 1985년에 처음 시공되었으며, 국내에도 현재 일부 구간에 시공되었다.



(a) 연속철근 콘크리트 포장 시공



(b) 포스트 텐션 콘크리트 포장 시공

〈그림 1.4〉 콘크리트 포장의 종류 및 특성



2

도로 포장의 시스템 구성 및 계획

2. 도로 포장의 시스템 구성 및 계획

본 장에서는 도로 포장 시스템을 이해하고 계획 단계에서 필요한 설계 구간, 포장 형식 및 설계 등급을 결정하는 방법에 대해 기술하였다.

2.1 포장 설계 시스템

포장이란 그 자체로써 의미가 성립하는 단순한 토목 구조물이 아니다. 주위의 여러 환경과 포장 상태, 하중, 노상 조건, 포장 상태 등에 따라 매우 다양하게 변화할 수 있는 토목의 종합 작품이다. 이와 같이 각 요소들간에 복잡한 관계를 맺고 있는 포장 설계 시스템을 이해해야 할 것이다.

2.1.1 포장 설계 시스템 처리 과정

포장 설계 시스템은 크게 계획, 설계 입력 변수, 구조해석, 공용성 분석, 대안 선정과 같이 크게 다섯 부분으로 구분할 수 있다. 먼저 포장 형식 및 설계 조건에 맞는 입력변수의 실험값, 예측값 등을 산출한다. 설계 입력값들을 사용하여 구조해석모형을 통해 응력, 변형률 및 처짐 등과 같은 구조적 거동을 예측한다. 포장체의 구조적 거동에 근거하여 포장체가 받는 손상을 계산하고, 설계기간 동안 누적된 손상으로 포장체에 발생할 파손을 예측한다. 공용성의 기준이 모두 만족될 때까지 피트백 과정을 통해 반복계산 한다. 공용성 기준이 만족되는 설계단면과 재료기준이 결정되면 구조적 및 기능적 측면에서 실행 가능하다는 판단이 내려지며, 생애주기비용분석을 수행하고 최적의 포장 시스템을 선정하게 된다.

〈그림 2.1〉은 포장 설계의 설계 시스템을 요약한 그림이다. 포장 설계 시스템에 과정을 보다 더 자세히 살펴보자.



〈그림 2.1〉 역학적-경험적 설계 기본모형

- 1) 계획한 대상 지역에 적합한 포장 형식이 시멘트 콘크리트 포장인지 아스팔트 콘크리트 포장인지를 선택한다. 설계 대상 지역의 교통 조건, 설계할 도로가 고속도로인지 일반국도인지 등의 구분을 고려하여 설계 등급을 결정한다.
- 2) 포장 설계하는 지역의 상태에 적합한 시험 설계 (trial design) 을 개발한다. 지역의 상태에 적합한 조건이란 교통량, 기후조건, 토질조건, 포장층의 조합, 포장재료물성, 그리고 설계 및 시공 조건 등을 고려 하는 것을 말한다.
- 3) 설계 시 목표한 공용 기간 동안 유지되어야 할 공용성에 대한 기준을 정한다. 즉, 스플링, 균열, IRI, 영구변형(러팅), 등의 허용기준을 선정한다.

- 4) 공용성 인자에 대한 신뢰 수준을 결정한다.
- 5) 전체 설계기간에 대한 해석에 필요한 교통량, 재료 및 기후입력 인자들의 단위 기간에 해당하는 값을 얻기 위하여 주어진 입력값들을 산정한다.
- 6) 정해, 수치해석, 유한요소법 등과 같은 방법을 이용하여 포장의 구조적 거동(structural responses)을 계산한다. 이 계산은 전체의 설계기간에 대하여 교통 및 환경 하중에 따른 각각의 손상을 누적하도록 한다.
- 7) 전체의 설계기간에 대하여 일정 시간간격으로 누적된 손상을 계산한다.
- 8) 실내시험 및 현장실험, 역학적인 방법 등으로 개발된 공용성 모형을 이용하여 설계 기간 동안의 포장 파손을 예측한다.
- 9) 예비설계의 기대 공용성을 주어진 신뢰도 수준에서 적합한지를 평가한다.
- 10) 예비설계가 공용성 기준을 만족하지 못하면, 설계를 변경한 후 다시 위의 5)부터 9)까지의 과정을 반복하여 그 설계가 공용성 기준을 만족할 때까지 수행한다.
- 11) 목표한 공용성 기준을 만족시키는 설계는 구조 및 기능적 측면에서 실행 가능한 것으로 인정된다. 대안이 선정이 되면 추가 대안들을 작성하여 여러 대안들을 도출한다.
- 12) 생애주기비용분석과 같은 경제성 분석과 현장 적용성과 같은 문제를 고려하여 최적 대안을 선정한다.

2.1.2 포장 시스템의 주요 인자

(1) 포장 형식 및 설계 수준 결정

설계 대상 지역에 적합할 것으로 판단되는 형식을 선정하기 위해서는 그 지역의 기후, 차량, 재료의 특성, 지역 여론, 정책 선호도 등이 있다. 신설 포장의 경우는 중차량이 많고 여름철 온도가 높은 지역, 고성토 지역에서는 아스팔트 콘크리트 보다는 시멘트 콘크리트 포장 형식이 더 유리할 것이다. 반면 사용자들의 주행성, 도심부 도로 등에는 아스팔트 콘크리트 포장 형식이 보다 적합하다. 또한 환경친화적인 포장 및 심미적인 포장을 만들기

위해서는 배수성 혹은 블록 포장을 선정한다. 덧씌우기 포장의 경우는 파손 특성 및 원인을 고려하여 아스팔트 콘크리트 및 시멘트 콘크리트 포장의 형식을 결정해야 한다. 이와 같이 지역의 특성을 고려한 포장 형식을 결정한다.

포장 형식과 함께 중요한 것이 설계 수준의 결정이다. 도로 포장을 설계 할 때 시골의 농로를 입력 변수 하나하나를 실험하고 통행하는 자동차 및 농업용 동력기들이 몇 대 지나가는지를 조사하여 설계하는 것은 비경제적이다. 반대로 왕복 8차료의 대교통량이 운행할 것으로 예상되는 도로를 현장 조사나 실험없이 기존 자료를 이용하여 설계한다면 공용수명이 예상과 많이 달라지게 될 것이다. 이러한 것을 예방하기 위해 해당 지역에 설계할 도로의 등급을 정의하고 설계를 실시하도록 한다.

(2) 문제 정량화 및 입력 변수

포장체의 입력 변수는 크게 교통하중, 환경하중, 재료 물성, 불연속면(시멘트 콘크리트 포장) 등으로 나뉜다. 정확한 포장의 거동을 분석하기 위해서 이들을 정량적으로 나타내고 설계에 반영해야 한다. 포장 설계시 필요한 입력 변수의 값을 얻기 위해서 경우에 따라 매번 실험을 하는 경우도 있지만 효율성, 경제성 등이 낮기 때문에 간단한 모형에서부터 복잡한 수식을 사용한 모형 등을 개발하여 사용하는 경우가 많다. 모형은 많은 회수의 실험을 하지 않고도 기본 실험을 통해서 필요한 데이터를 획득할 수 있는 장점이 있다. 하지만 모형자체가 실제와 상이한 결과가 보인다면 포장 설계에 사용하기는 불가능할 것이다.

교통하중은 포장 설계 및 해석에 가장 민감한 영향을 주는 입력 변수로서 포장 파손의 주요 원인이 된다. 교통하중을 정량화하는 방법에는 등가단축하중(Equivalent Single Axle Load : ESAL)을 이용하는 것과 실제 축하중을 포장 해석에 사용하는 방법이 있다. 기존의 경험적인 설계에서는 등가 단축하중은 일반 승용차의 복륜의 단축에 80 kN(18,000 lb)의 축하중이 재하될 때를 기준으로 하여 축하중 및 축 종류에 따른 상대적인 포장의 영향 정도를 나타내었다. 이는 AASHO Road Test에서 만들어진 경험적인 방법으로써, 국한된 재료와 환경 조건에서 이뤄진 실험의 결과를 다른 환경과 조

건의 포장체에 적용시 예상하지 못한 결과를 유발할 수 있다. 실제 축하중은 최근에 사용하는 방법으로 도로를 주행하는 차량의 축하중을 직접 측정하여 설계에 이용하는 것이다. 이와 같은 방법은 많은 인력을 투입하여 실제 현장에서 축하중을 조사하고, 이를 DB화 작업이 필요하다. 현재 진행중인 포장 설계 개발에서도 이와 같은 방법을 채택하여 연구를 수행하였으며 많은 자료를 축적하였다. 교통하중은 직접 조사 혹은 누적된 데이터를 사용하고 있기 때문에 관련 모형식은 개발하지 않고 있다.

가. 환경하중

환경하중은 온도와 함수비 변화에 따라 포장체 거동에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 온도 변화는 아스팔트 콘크리트 포장에서 표층 및 기층의 물성 변화에 영향을 주며, 시멘트 콘크리트 포장에서는 슬래브의 수평 및 수직 방향의 거동에 영향을 미친다. 하부 구조의 동결에도 영향을 준다. 온도 변화를 예측하기 위해서 다양한 방법들이 제안되었는데 중요 인자를 선정하여 요인 설계를 통해 회귀식을 만들어내는 경험적인 방법과 열전달 이론을 이용하여 대기 온도를 포장체의 온도 변화에 직접 적용하는 모형도 있다. 함수비 변화는 표층 및 기층의 함수비 변화에 따른 물성 변화를 일으키며 잠재적인 포장 파손의 원인이 된다. 계절에 따른 하부 구조의 함수비 변화에 따라 포장의 지지력이 달라지는 특성이 있으며, 특히 봄철 융해거나 여름철 장마기에는 하부층의 지지력 약화로 인해 포장 파손이 다른 기간에 비해 더 많이 발생할 가능성이 높다. 이러한 함수비 변화는 실제 계측기를 매립하고 시간에 따른 변화 추이를 관찰하여 모형을 개발하는 것이 일반적인 방법이다.

환경 하중 모형을 개발하는 방법은 경험적인 것과 이론적인 것으로 구분 할 수 있다. 경험적인 방법은 위도, 경도, 포장형식, 하부 조건, 기상 조건 등을 고려하여 실제 계측기(온도계, 함수량계)를 매립하고 1년 혹은 그 이상을 모니터링 한다. 계측 데이터를 각 인자들로 구분하고 회귀분석을 통해 하나의 온도 및 함수량 변화 예측 모형을 개발한다. 이러한 방법으로 개발한 애측 모형은 개발 방법 자체는 쉽지만 다른 접근 방법이 제안되었을 경우 수 정을 하기가 어렵다. 이러한 경험적인 모형의 단점을 개선하기 위해 열전달

및 열평형 이론을 이용하여 포장체의 온도를 예측하기도 한다. 역학적 이론에 근거한 모형은 새로운 이론이나 개선된 사항이 있을 시 이를 반영할 수 있는 장점이 있다. 하지만 실제와의 거동 차이가 있을 경우 항상 현장 데이터를 이용한 보정이 필요하다.

나. 재료 물성

포장재료 물성은 포장의 구조해석에 필요한 입력변수로서 모형에서 포장 층의 거동을 분석하기 위해 사용된다. 기존에는 포장층에 따라, 포장 형식에 따라 각각 다른 값을 사용하였다. 흙이나 입상 재료들은 기존의 CBR, MR, R 값, N 값 등 다양한 물성으로 정량화하였다. 기존 설계('93 AASHTO GUIDE)에서 아스팔트 포장에서는 M_R 값을 사용하여 물성을 정의한 반면 콘크리트 포장에서는 M_R 값을 근거로 복합 지지력 계수를 산정하여 설계에 사용하였다. 최근의 하부구조의 물성을 M_R 과 포아송 비로 정의하여 설계에 적용하는 추세이다.

아스팔트 혼합물의 경우 일반적으로 사용되는 물성은 동탄성계수이며, 이는 혼합물, 온도와 하중재하속도 등의 함수이므로 이에 대한 고려가 필요하다. 동탄성계수시험으로는 일축인장/압축시험, 간접인장시험 등이 있으며 이론적으로 한 종류의 혼합물에 대해 어떤 방식을 통해 산정하여도 동일한 동탄성계수 값을 얻을 수 있다. 시멘트 콘크리트 포장의 경우는 슬래브의 강도, 탄성계수, 건조수축, 열팽창 계수 등이 있다. 슬래브의 강도는 교통 개방 및 피로식에 사용되며 일반적으로 공시체의 일축압축 강도 시험을 통해 얻을 수 있다. 탄성계수는 구조해석에 사용되며 변형률과 하중과의 관계로 구하거나 비파괴 시험을 통해서 구할 수 있다. 건조수축이나 열팽창 계수는 콘크리트 포장의 초기 거동이나 온도에 의한 슬래브의 거동을 추정하기 위한 물성값이다. 아스팔트나 콘크리트의 재료 물성을 예측하기 위한 모형은 탄성 모형, 점성 모형, 점탄성 모형, 점소성 모형으로 세분화된다. 이러한 구분은 시간 의존 및 과거 이력의 영향 여부에 따라 각각 달라진다.

출눈 및 연속 철근 콘크리트 포장에서는 하중 전달 장치 및 철근을 사용하는데 이는 일반적으로 탄성계수와 포아송 비로 그 물성을 정의한다.

다. 불연속면

불연속면은 줄눈 콘크리트 포장에 있는 것으로 콘크리트 포장이 건설초기 수화 반응이 진행됨에 따라 슬래브가 수축되고 이로 인해 무작위 균열이 발생한다. 이러한 균열들은 포장 수명을 단축시키는 주요 원인이 되므로 이를 최소화하기 위해서 슬래브의 소요 강도가 발현이 되고 수축이 시작되기 직전에 인위적인 줄눈을 만들어 균열을 유도하는 것이 불연속면이다. 불연속면은 줄눈 절삭 깊이, 하중전달 장치 관련 설치 기준, 줄눈 간격 등에 대한 고려가 필요하다. 불연속면은 경험적이거나 역학적으로 해석하여 관련 물성을 제안하거나 카탈로그 식으로 간격이나 설계 단면을 제시하는 방법을 사용하고 있다.

(3) 포장체 거동 분석

앞에서 살펴본 것은 포장을 해석하기 위한 변수들의 정의하는 단계이며 이를 바탕으로 포장체가 어떻게 거동할 것인가를 분석하는 것이 본 단계이다. 포장체는 포장형식, 사용재료, 하중 조건 등에 따라 거동(응력, 변형률, 척짐량)이 다양하게 변화한다. 이러한 거동을 재료역학 측면에서 단순 가정 하에 접근하는 정해 방법(closed form solution)에서부터 수치해석적인 기법, FEM을 이용하는 방법 등이 있으며 해석 결과를 공용성 예측 모형에 직접 입력하여 포장의 수명을 예측한다.

아스팔트 콘크리트 포장의 경우 처음 Boussinesq 이론을 이용하여 포장의 깊이에 따른 응력을 해석하였다. 하지만 포장은 1층 구조가 아니라 다층 구조이기 때문에 더 복잡한 거동을 한다. 이를 개선하기 위해서 Burmister의 다층탄성론이 개발되었다. 다층 구조해석은 포장 각 층의 물성을 대입하여 포장체의 각 층의 거동을 살펴볼 수 있으며 컴퓨터의 발달과 함께 ELSYM5, BISAR, DAMA, KENLAYER와 점탄성해석 프로그램인 VESYS, KENLAYER과 같은 다양한 프로그램들이 개발되었다. FEM이 보편화 되면서부터 아스팔트 콘크리트 포장 해석도 관련 프로그램들을 사용하여 보다 정확하게 거동을 예측할 수 있게 되었다.

시멘트 콘크리트 포장의 경우 처음에는 아스팔트에 사용한 Boussinesq 이

론을 하였으나 문제점을 인식하면서 Goldbeck, Burmister, Pickett, Spangler 등에 의해서 포장을 좀 더 정확하게 해석하는 방법을 찾아갔다. 하지만 이러한 것은 경험에 근거하여 개발한 것이기 때문에 한계가 있었다. 마찬가지로 FEM 이론이 정립되면서 판요소와 스프링 요소로 포장을 단순화 하여 해석하는 기법이 연구되었다. 이는 기존의 방법보다 더 정확하며 컴퓨터에서 빠른 시간안에 알아볼 수 있는 장점이 있다. 그러나 이론상의 단순화 과정에서 실제 포장의 거동과의 차이가 발생하여 지금은 3차원 요소를 이용하는 경우가 많다. 3차원 요소를 이용한 포장 해석은 2차원 요소에 비해 정확하지만 시간이 오래 소요된다는 단점이 있어 2차원 요소를 이용하여 해석한 결과를 3차원 해석 결과로 보정하는 경우가 많다.

(4) 공용성 예측

가. 공용성 기준

공용성 예측 모형은 포장의 거동 분석을 통해 나온 결과(응력, 변형률, 쳐짐량)를 바탕으로, 혹은 실제 공용중인 포장의 상태 조사를 통해 향후 포장이 어떠한 상태로 변화해 갈 것인가를 예측하는 것이다. 포장의 공용성은 크게 구조적인 공용성과 기능적인 공용성으로 나눈다.

구조적인 공용성은 포장의 물리적인 파손과 관계가 있다. 피로 균열, 스플링, 단차, 저온 균열, 러팅 등 다양한 파손들이 있으며, 실제 설계자는 다양한 파손에 대하여 제어할 파손 형태를 규정해야 한다. 파손 형태 전부를 고려하는 것은 고비용이 들며 비효율적, 비경제적이기 때문이다. 기능적인 공용성은 도로 이용자들의 입장에서 포장을 평가한 것이다. 대표적인 것으로 PSI(Present Serviceability Index), IRI(International Roughness Index), 미끄럼 저항, 소음 등이 있다. PSI 는 도로 포장의 물리적 상태와 이용자들의 평가를 조합하여 하나의 지수로 만든 것이다. IRI 는 포장의 프로파일을 자동측정 장비로 조사하여 각 파손들과의 포장 상태를 회귀식으로 만든 것이다. 미끄럼 저항이나 소음 등은 도로 이용자들 측면에서 안전성 및 도로 환경을 평가한 것이다. 기존의 설계에서는 고려되지 않았으나, 최근 도로 포장에서 큰 이슈로 떠오르고 있는 인자이다.

나. 공용성 예측 및 평가

포장에서 발생하는 파손의 형태를 정량화를 바탕으로 공용성의 기준(균열, 스팔링, IRI)을 정립한다. 설계 과정에 따라 시험 단면을 설계하고, 설계 기간에 대하여 포장의 공용성을 예측하여 이미 정립된 설계기준과 비교한다. 설계기준에 맞으면 다음 단계로 진행되지만 그렇지 않을 경우 시험설계를 개정하여 다시 공용성을 예측하고 설계기준이 모두 만족될 때까지 반복해야 할 것이다.

〈표 2.1〉 포장 형식별 공용성 모형 종류

포장 형식	종류
시멘트 콘크리트 포장	피로 파손, 스팔링, 단차, IRI, 편치 아웃, 소음, 미끄럼 저항 등
아스팔트 콘크리트 포장	피로 파손, 저온 균열, 러팅, 블리딩, 코루게이션, 포트 홀, IRI, 소음, 미끄럼 저항 등

다. 설계 신뢰도

도로포장의 설계는 크게 설계입력변수 결정과 공용성 예측 모형의 적용으로 나뉜다. 전자는 재료물성, 교통하중 및 환경인자 등이고, 후자는 구조해석 모형, 파손예측 모형 등이다. 이를 모두 정확히 예측되는 것이 아니기 때문에 상당한 불확실성과 가변성이 존재한다. 따라서 이러한 점을 고려하여 신뢰 수준은 안전계수의 개념으로써 교통량이 많거나 기능적 분류상 중요도가 큰 시설물 설계에 있어서 높은 신뢰도를 적용하는 반면, 상반된 경우에는 상대적으로 낮은 신뢰도를 적용한다.

(5) 대안 평가

가. 생애주기비용분석(LCCA:Life Cycle Cost Analysis)

예비설계가 구조적, 기능적 기준을 만족시키면 그 설계는 기술적으로 실행 가능한 설계가 된다. 하지만 설계는 포장 설계는 다양한 방법이 있고 이에 대해 LCCA 분석을 통하여 보다 경제적이고 타당한 대안을 선정하여 포

장 설계에 사용하기 위한 기초 자료를 제공한다. 이러한 비교 분석 방법으로는 〈표 2.1〉 와 같은 방법들이 있다.

나. 의사 결정 기준

의사 결정 기준은 다양한 포장 형식 및 경제성 분석에 근거하여 최적의 공법을 선택하는 잣대이다. 일반적으로 포장의 구조해석을 통해 포장의 파손을 예측하고 이에 따른 유지보수 비용을 산정하여 설계 기간 동안의 전체 소요 비용을 산정한다. 그 결과 최소의 비용이 소요되는 공법을 선택하는 기준이 된다. 하지만 기존의 건설측면에서는 경제성 논리가 지배하여 저렴한 공법을 채택하였지만 요즘은 비록 건설 비용은 비싸지만 사용자들에게 쾌적한 환경을 조성해 줄 수 있는 공법을 선호하고 있다. 따라서 의사 결정 기준은 그 사회가 포장에 대해 요구하는 기능이 무엇에 따라 달라질 수 있다.

다. 비교 및 최적화

앞에서 살펴본 전 과정을 통해서 설계 대상에 가장 적합한 최적 대안을 선택하는 것이다. 이 과정에서 최적 대안의 취약점에 대한 보완책을 찾을 수 있으며 현장 적용을 위한 최종 마무리 단계에 해당한다.

라. 적용

실제 현장에 도로의 포장을 건설하는 것으로 최적의 공법으로 선정한 것이 설계한 재료, 구조, 비용 등이 계획대로 작업되는지를 검토하고 현장에서 발생하는 문제들을 해결하는 것이다. 이때 예상치 못했던 현장의 문제점으로 설계변경 등의 상황이 발생할 수 있으므로 면밀한 시공 검토가 필요하다.

2.2 설계 구간의 결정

설계구간은 동일한 설계단면이 적용되는 구간을 의미하며 설계 구간이 달라지면 포장 설계도 달라진다. 설계구간은 기본적으로 교차로와 교차로 사

이 또는 인터체인지와 인터체인지 사이와 같이 교통량이 변하는 지점에서 변경한다. 본 도로포장 구조 설계에서는 기본적으로 재료의 탄성계수에 기반하고 있다. 따라서 하부지반의 물성 즉, 하부지반의 탄성계수가 2배 이상 차이가 발생하는 경우 설계구간을 변경한다.

포장설계 단면을 너무 짧은 구간에서 변경시키는 것은 설계 및 시공에 효과적이지 못하다. 따라서 설계구간의 길이는 깍기부의 경우 최소 200m, 쌓기부의 경우 최소 500m로 한다. 깍기부 길이가 200m 미만인 경우는 인접 쌓기부 구간에 연장시켜 쌓기부 또는 깍기부 설계단면 중에서 더 보수적인(일반적으로 더 두꺼운) 단면을 적용한다. 쌓기부 길이가 500m 미만인 경우 역시 마찬가지로 인접 쌓기부 또는 깍기부 설계단면 중에서 더 보수적인(일반적으로 더 두꺼운) 단면을 적용한다. 단, 터널과 교량은 독립된 설계구간으로 한다.

2.3 도로 포장 형식 선정

도로 포장의 형식을 결정하는 것은 포장을 설계하는 것과 더불어 매우 중요한 사안이다. 앞서 설명한 바와 같이 설계 대상 구간에 적합한 포장 형식을 선정하기 못한다면 공용 수명의 단축, 국가 예산의 낭비 및 도로 이용자들의 불만을 야기할 수 있다. 때문에 도로 포장 형식이 설계 최고 책임자의 단독 혹은 일반적인 결정 과정에 준하여 결정된다면 많은 경제적 또는 구조적 문제점을 야기하게 된다. 따라서, 포장 형식결정은 이성적이고 비용효율적인 절차를 따라 결정해야한다.

최근 건설분야에서 생애주기비용 등과 같은 경제성 분석의 중요성이 대두되면서 포장분야에도 활발하게 활용되고 있다. 이는 경제적이고 공학적인 측면에도 가장 우수한 포장 형식을 결정하기 위한 유용한 도구이다. 하지만, 경제성 분석이 내재하고 있는 필수 불가결한 미래에 대한 가정, 즉 할인율, 분석기간, 유지보수 방법 등이 보다 신뢰성 있는 결정을 방해하는 요인이다. 포장형식결정은 기술적인, 경제적, 혹은 기타 요인들을 고려해야하는 매우

복잡한 절차를 필요로 한다. 도로포장 구조 설계자들에게 사업자 비용, 사용자비용, 포장 공용성 등이 포장형식 결정에 중요한 역할을 담당한다.

본 장에서는 포장형식 선정 과정을 알아보았으며, 그 기초가 되는 경제성 분석에 대한 자세한 내용은 본서의 제 11장에서 자세히 기술되어 있다.

2.3.1 도로포장 구조 설계의 포장 형식 결정

앞서 국외 사례를 살펴본 바와 같이 포장 형식을 결정하는 것은 다양한 요인들에 의해 영향을 받는다. 본 포장설계에서는 형식선정에 영향을 미치는 요인을 선정하고, 그 영향정도에 따라 정해진 포장형식지수를 비교함으로써 포장형식을 선정한다.

포장형식 선정을 위한 정량화된 평가항목으로는 경제적 선정요인과 기능적 선정요인으로 구분하고, 설계자의 의사결정을 위해 각 요인간의 가중치는 설계자가 결정할 수 있게 하였다. 포장형식 선정요인 결정 항목으로는 <표 2.2>와 같이 정량적인 분석이 가능한 요인을 고려하였다. 정성적인 요인은 배제하였으며, 각 세부 요인별 점수를 합산(100점 만점)하여 최종 결정하도록 하였다. 설계자는 <표 2.3>과 같이 설계 전 경제적인 인자의 전체 지수의 비중 (40 ~ 60%)을 결정해야 한다.

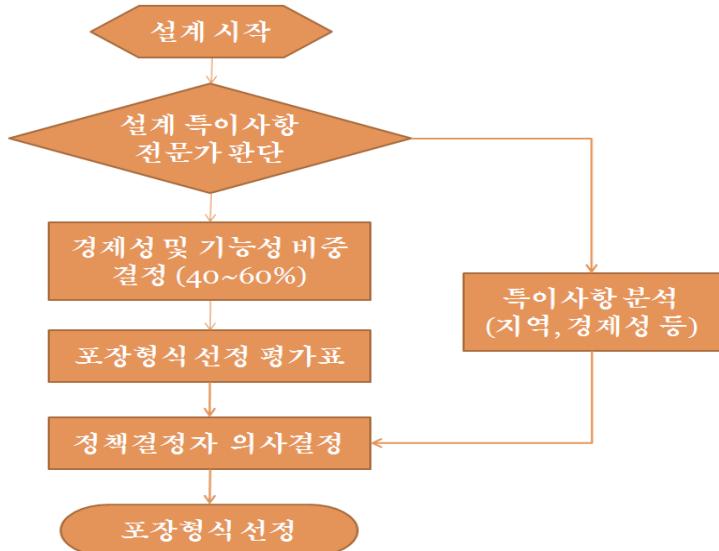
시공연속성, 도로 기능, 현장 혹은 인접도로의 공용성 자료, 재료 수급 상황, 시공장비 조달, 현장 환경조건, 현재 및 장래 예산, 특이구간(지반) 등에 설계 특이사항이 생길 경우는 <그림 2.2> 또는 <그림 2.3>과 같이 지역 전문가의 판단에 따르도록 한다.

〈표 2.2〉 정량적 선정요인 및 선정 절차 항목

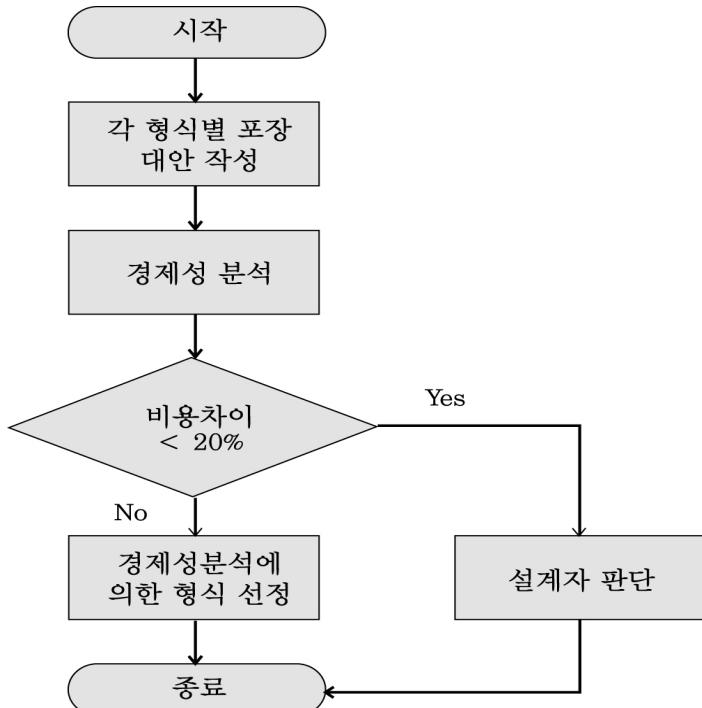
구분	경제적 선정요인 (40 ~ 60%)	기능적 선정요인 (40 ~ 60%)
항목	초기 공사비	주행 쾌적성 (IRI 개선 비용 고려)
	중차량 대수 (중차량에 따른 유지보수 비용 포함)	소음도 (소음 저감에 따른 비용 포함)

〈표 2.3〉 포장형식 선정을 위한 지수 결정

고려 사항	세부 선정인자	고려사항	포장선정지수		비고
			아스팔트 포장	콘크리트 포장	
경제적	초기공사비 (30 점)	10 % 이내	30	30	콘크리트 포장을 비교 우위 대상으로 가정
		10~20 %	25.5	30	
		20 % 이상	21	30	
	중차량대수 (20 점)	10000 대 이하	18	20	
		10001대~ 20000 대	16	20	
		20001 대 이상	14	20	
기능적	주행 쾌적성 (20 점)		20	14	
	소음도 (30 점)	도심부	30	21	
		지방부	30	30	
계	100 점				



〈그림 2.2〉 도로 포장 형식 선정 절차



〈그림 2.3〉 경제성 분석에 의한 포장 형식 선정 절차

또한 경제성 분석을 통해 살펴본 비용의 차이가 각 포장 형식별로 큰 차이가 없을 경우 이에 대한 전문가 판단을 할 수 있도록 하였다. 토목공사에서 다양한 재료의 표준 비용을 제시하는 데는 한계가 있다. 경제성 분석을 근거로 한 포장형식 선정에서 비용만 가지고 판단한다면 가격의 변동으로 인해 신뢰성 있는 결정이 불가능하다. 현재 국내외에서는 대안의 결정을 경제성 분석을 바탕으로 결정하는 경우 5~20% 내외의 비용 차이는 재료 및 시공비의 불확실성에 따른 판단 실수를 줄일 수 있는(위험관리) 안전 범위로 사용되고 있다. 비용차이의 회색구간을 많은 기관에서 이용하고 있으며, 본 도로포장 구조설계에서는 20%의 경제성 분석 판단 위험관리 구간을 제안하였다.

2.4 도로포장 구조 설계 수준

도로포장 구조 설계에 있어 모든 것을 동일한 노력과 시간을 투자하여 설계를 한다면 앞서 살펴본 바와 같이 비효율적인 사례가 발생할 수 있다. 때문에 도로의 중요도에 따라 차등화하여 포장 설계를 진행하는 것이 합리적이다. <표 2.4>는 미국과 프랑스의 포장 설계 등급 및 설계 방법을 나타낸 것이다. 설계 등급은 도로의 서비스 수준에 따라 3단계로 나뉜다. 설계 등급 1은 교통량이 많을 것으로 예상되는 고속도로 등과 같이 서비스 수준이 “상”인 도로에 적용된다. 이때 교통 관련 입력 변수를 직접 조사하고 포장 재료 물성을 실험을 통해 설계에 반영한다. 이렇게 구체적으로 입력 변수들을 도출하여 설계를 한다면 보다 정확한 공용 수명 예측이 가능할 것이다. 설계 등급 2는 서비스 수준이 “중”인 도로에 해당하며 입력 변수는 설계를 개발하기 위해 만들어 놓은 많은 데이터 베이스에서 추출하거나 간단한 실험과 예측 모형을 통해 구한다. 설계 등급 3은 교통량이 적은 지방부 도로 등과 같이 서비스 수준이 “하”인 도로에 적용한다. 미국의 경우 데이터 베이스의 기본 자료를 이용하여 설계를 진행한 반면 프랑스에서는 카다로그 단면을 사용하여 포장 두께를 산출한다.

2.4.1 도로포장 구조 설계의 설계 수준

도로포장 구조 설계에서도 도로의 중요도와 교통량 등을 감안하여 도로포장의 설계등급을 <표 2.4>와 같이 세 등급으로 구분하였다. 설계등급 1의 경우 고속국도 및 일반국도와 같이 교통량 및 중차량이 많은 도로의 포장설계에 적용되며, 기존의 교통량 통계자료 중 도로 등급별 연평균일교통량(AADT, Annual Average Daily Traffic)과 5종 이상의 중차량 교통량 분석을 통하여 <표 2.5>와 같이 구분한다. 설계등급 3의 경우는 고속국도를 제외한 도로의 설계 시 설계 차로 당 일평균 교통량이 7,000대 미만의 저 교통량 도로의 포장설계 시 적용된다.

기본적으로 국외 도로포장 구조 설계에서와 같이 유사한 개념에 의해 설계를 수행하지만 도로의 중요도에 따라 설계에 필요한 설계입력변수(교통, 환경 및 재료물성)를 결정하는 방식에 차이가 있다. 도로의 중요도가 상대적으로 낮은 경우에는 재료물성시험이나 교통량 정보수집 등에 있어 상대적으로 간편하게 입력변수를 결정하게 되고, 도로의 중요도가 높을수록 보다 많은 실내시험과 교통특성에 대한 세밀한 정보를 필요로 한다. <표 2.6>은 설계등급별 포장재료의 물성 및 교통량 정량화 및 설계방법을 정리한 것이다. 설계등급 1과 2에서는 설계 프로그램을 사용하며, 설계등급 3에서는 국내의 대표적인 포장재료와 교통특성에 따른 표준 설계단면을 사용한다. 단 설계등급 1의 경우 포장 재료의 물성결정 시 실내시험을 원칙으로 하나 실내시험기구축 및 포장 전문 인력의 공급이 부족한 국내조건을 감안하여, 잠정적으로 설계 지침서에 제시되어 있는 포장재료에 한하여 동일한 조건의 경우라면 DB(데이터베이스, Data Base)화 된 제안 값 및 예측방정식을 사용한다.

〈표 2.4〉 국외 포장 설계 등급 및 방법

설계 등급	서비스 수준	설계 방법	
		미국 AASHTO 2002	프랑스 LCPC
1	상	교통자료조사, 재료물성실험 실시	교통자료조사, 재료물성실험 실시
2	중	DB화된 일반적인 입력 값과 기초 물성실험자료 혼용	DB화된 일반적인 입력 값과 기초 물성실험자료 혼용
3	하	DB화된 일반적인 입력값으로 설계	카다로그 단면 사용

〈표 2.5〉 도로포장 설계에서의 설계 등급 구분

설계 등급	도로등급	일평균교통량 /차로	비고
1	고속국도	150,000대 이상	5종 이상의 연평균 설계 중차량 대수가 50,000대 이상일 경우 설계등급 1로 설계
	일반국도	35,000대 이상	5종 이상의 연평균 설계 중차량 대수가 12,000대 이상일 경우 설계등급 1로 설계
2	고속국도	150,000대 이하	
	일반국도	7,000대 ~ 35,000대	
	지방도 및 국가지원지방도	7,000대 이상	
3	일반국도, 지방도 및 국가지원 지방도	7,000대 이하	

〈표 2.6〉 도로포장 설계에서 설계등급에 따른 포장 설계 방법

설계 등급	물성 측정	교통량 측정	설계방법
1	실내시험을 통한 재료의 물성 측정	차종별 교통량 분포 및 축하중 분포 측정	설계 프로그램 사용
2	재료의 종류에 따라 간단한 물성 D/B 및 예측방정식을 사용	축하중과 종류별 교통량 분포나 중차량 교통량에 따라 설계 DB의 축하중별 교통량 분포	설계 프로그램 사용
3	포장재료의 일반적인 물성 사용	중차량 교통량에 따라 설계DB의 축하중별 교통량 분포	표준 설계단면 사용

2.5 도로포장 구조 설계의 전체 흐름도

본장은 도로포장 구조 설계의 전체로직을 아스팔트 콘크리트와 시멘트 콘크리트 포장의 설계로 나누어 간략히 설명하고 각 로직에 대한 자세한 설명은 이후의 각 장에서 구체적으로 검토하고자 한다.

2.5.1 아스팔트 콘크리트 포장의 전반적인 설계로직

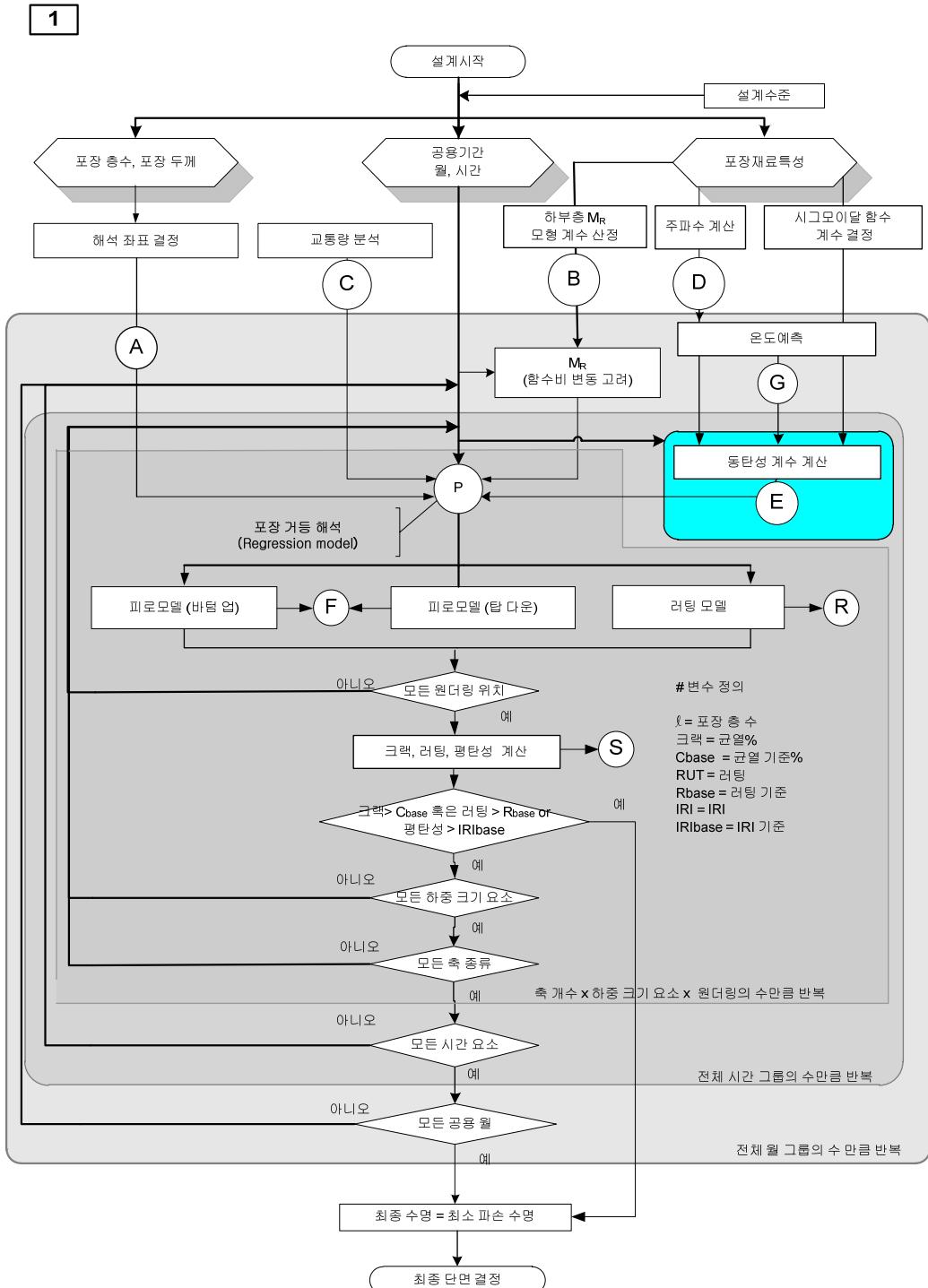
아스팔트 콘크리트 포장에 대한 전반적인 설계로직은 〈그림 2.4〉에 나타나 있으며, 설계과정은 다음과 같다.

- (1) 시공 대상지역과 해당 지역 조건에 적합한 포장단면을 선정한다. 이 때 포장층의 수 및 각 층의 두께를 입력한다. 그리고 설계한 포장의 설계 공용년수를 입력한다. 설계기간 동안 유지되어야 할 공용성 기

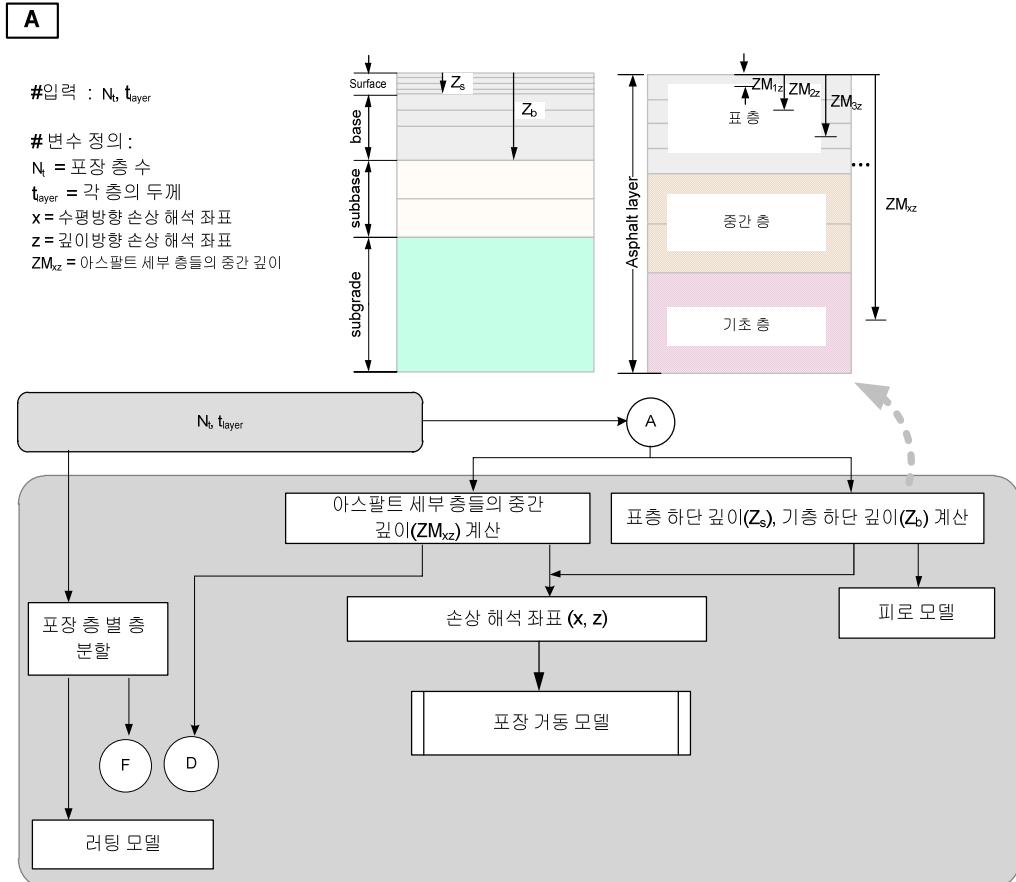
준을 설정한다. 즉, 아스팔트 포장의 피로균열, 영구변형 및 국제평탄성지수(IRI)의 허용기준을 설정한다.

- (2) 교통량, 환경조건 및 재료물성과 관련된 입력 변수들을 선정한다. 기본 입력 변수들을 이용하여 설계에 필요한 각 교통 정보, 온도 정보, 각 층의 재료 물성을 계산한다.
- (3) 각 입력 변수들을 바탕으로 설계프로그램 내 구조해석프로그램에 의해 포장의 구조적 거동(Structural Responses)을 계산한다.
- (4) 설계프로그램 내 공용성 모델을 이용하여 포장 손상을 계산하고, 전체 설계기간에 대하여 누적된 손상을 계산한다.
- (5) 예비설계의 결과가 공용성(피로균열, 영구변형, IRI) 기준에 적합한지를 평가한다.
- (6) 예비설계가 공용성 기준을 만족하지 못하면, 포장단면을 변경한 후 다시 위의 (2)항부터 (5)항까지의 과정을 반복하여 그 설계가 공용성 기준을 만족할 때까지 수행한다.
- (7) 목표한 공용성 기준을 만족시키는 설계는 구조 및 기능적 측면에서 실행 가능하여야 하며, 다른 대안단면들을 추가로 작성한다. 이 대안들에 대한 생애주기비용분석을 통한 경제성 평가를 실시하여 최적 대안을 선정한다.

충분할은 포장의 공용성 해석을 위해 좌표를 결정하는 과정으로, 포장 층수와 각 층의 포장 두께를 입력하면 <그림 2.5>에서 보는 바와 같이 포장 표면으로부터 표층과 기층의 하단 깊이, 각 세부층의 중간 깊이를 ZM_{kz} 로 정의하고 위치를 계산한다. 이는 아스팔트층 혼합물이 온도에 민감하게 거동하는 재료이므로 해석시 온도에 따른 탄성계수를 보다 정확히 결정하기 위함이다. 아스팔트 포장의 표면으로부터 10cm 정도의 깊이까지는 포장의 온도 변화가 크기 때문에 2~3cm 정도의 두께로, 기층은 3~5cm 정도의 간격으로 분할한다. 여기서, 아스팔트 중간층은 표층으로 간주하여 층을 분할한다. 보조기층의 경우에는 2개의 세부층으로, 노상은 단일 층으로 간주한다.



<그림 2.4> 아스팔트 포장 설계 로직



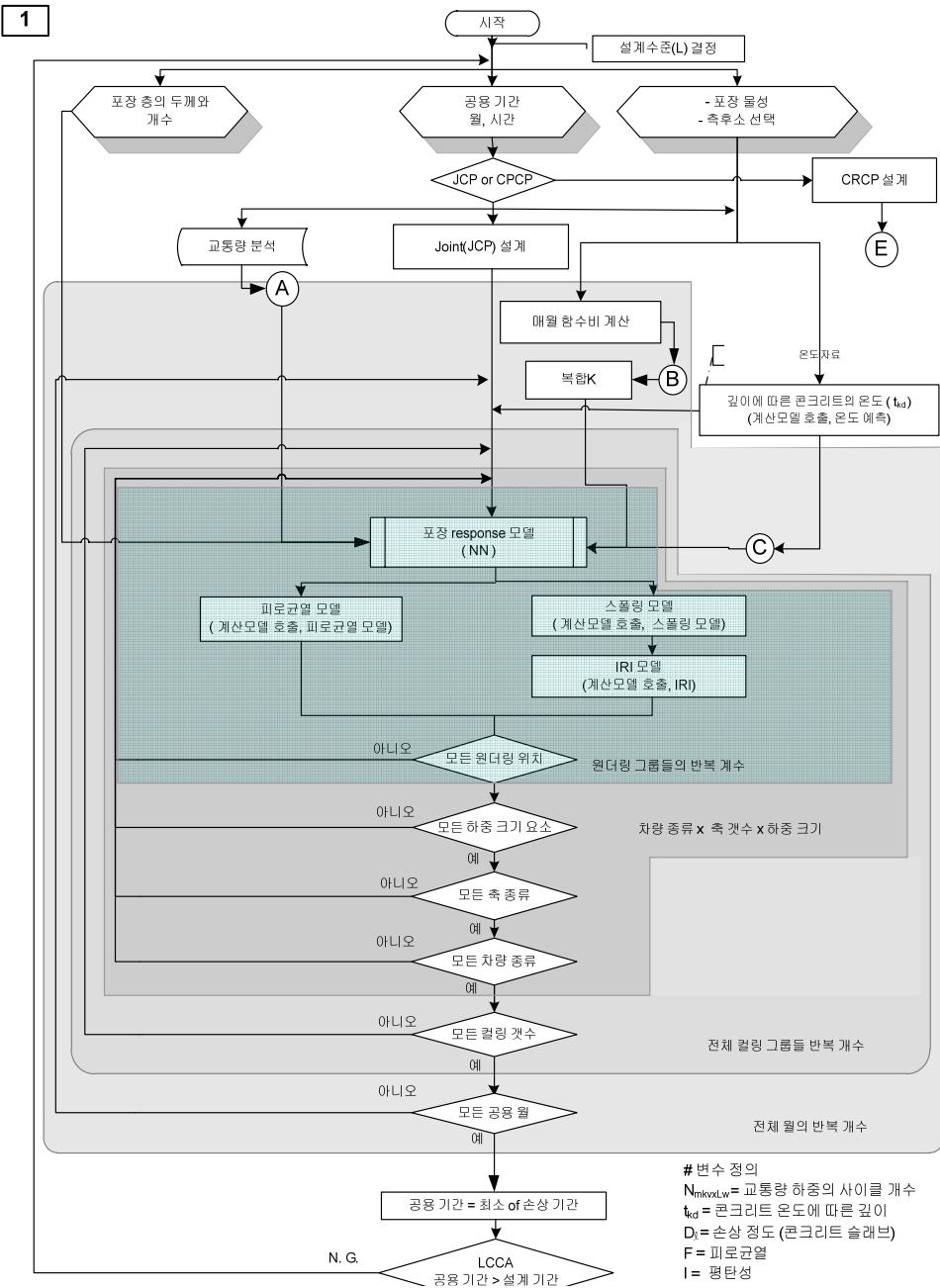
〈그림 2.5〉 각 층의 분할

2.5.2 콘크리트 포장의 전반적인 설계로직

콘크리트 포장에 대한 전반적인 설계로직은 <그림 2.6>에 나타나 있으며, 설계과정은 다음과 같다.

- (1) 시공 대상지역과 해당 지역 조건에 적합한 포장단면을 선정한다. 이 때 교통량, 기후조건, 토질조건, 포장층의 조합, 콘크리트 및 다른 재료물성, 그리고 설계 및 시공 조건 등을 고려한다. 그리고 설계한 포장의 설계 공용년수를 입력한다. 설계기간 동안 유지되어야 할 공용성 기준을 설정한다. 즉, 콘크리트 포장의 피로균열 및 국제평탄성 지수(IRI)의 허용기준을 설정한다.
- (2) 교통량, 환경조건 및 재료물성과 관련된 입력 변수들을 선정한다. 기본 입력 변수들을 이용하여 설계에 필요한 각 교통 정보, 온도 정보, 각 층의 재료 물성을 계산한다.
- (3) 불연속면 설계를 수행한다. 줄눈간격, 타이바/다웰바, 줄눈채움재 설계를 진행하고 초기 단면설계 시 가정한 불연속면 설계와 허용 범위 내에 있을 시 다음 단계로 진행되는 반면 범위 외에 있을 경우, 다시 줄눈 설계로 되돌아가서 (2)항, (3)항을 반복 수행한다.
- (4) 구조해석을 통해 제안한 응력 예측식을 통해 포장의 구조적 거동 (Structural Responses)을 계산한다. 전체의 설계기간에 대하여 각 축 형태 및 하중에 따른 각각의 한계응력을 반복 계산한다.
- (5) 설계프로그램 내 공용성 모형을 이용하여 포장 손상을 계산하고, 전체 설계기간에 대하여 누적된 손상을 계산한다.
- (6) 예비설계의 결과가 공용성(피로균열, IRI) 기준에 적합한지를 평가한다.
- (7) 예비설계가 공용성 기준을 만족하지 못하면, 포장단면을 변경한 후 다시 위의 (2)항부터 (6)항까지의 과정을 반복하여 그 설계가 공용성 기준을 만족할 때까지 수행한다.
- (8) 목표한 공용성 기준을 만족시키는 설계는 구조 및 기능적 측면에서 실행 가능하여야 하며, 다른 대안단면들을 추가로 작성한다. 이 대안

들에 대한 생애주기비용분석을 통한 경제성 평가를 실시하여 최적 대안을 선정한다.



〈그림 2.6〉 콘크리트 포장 설계 로직

불연속면 설계 로직을 나타낸 것이 <그림 2.7>이다. 그림에서와 같이 설계 대상 지역에 가장 인접한 기상 관측소를 선택하면, 그 곳의 환경 영향을 고려한 권역별 줄눈 간격을 산정한다. 적정 줄눈 간격은 6~8 m 간격으로 제시되어 있다. 보다 자세한 줄눈설계는 “7장 콘크리트 재료”와 “9장 공용성 모형”에서 설명된다.



<그림 2.7> 설계 지역에 따른 줄눈 간격 산정 로직



3

교통 하중

3. 교통 하중

포장 설계와 밀접한 관련이 있는 교통류 특성으로는 속도, 교통량, 그리고 교통 하중이 있다. 차량의 속도는 동역학적 특성으로 인해 포장 구조 해석 및 재료 거동 분석에 많은 영향을 미친다. 기존의 포장 해석 및 설계는 정역학적 특성을 이용하였으므로 차량의 속도에 대한 고려가 미비하였다. 미국의 SHRP (Superior Highway Research Program)의 연구에서는 동적인 특성을 고려하기 위해 재료 선택 시 속도에 따라 강성을 한 단계 높은 재료를 선택하는 등의 보조적인 수단으로만 사용되어 왔다. 그러나 최근의 아스팔트 포장에 관한 연구에서는 아스팔트 재료의 물성에 영향을 미치는 재하 속도를 반영하기 위한 노력을 진행하였다. 최근에는 아스팔트 재료에 대한 동적 해석을 수행하기도 한다. 교통량은 포장 설계에 있어 가장 중요한 인자로 주어진 지점에서 단위 시간 동안 통과하는 차량의 수로 정의한다. 교통량을 구하는 방법은 기존의 수동식 방법에서 WIM (Weigh in Motion) 등의 자동 측정장비 이용하는 방식에 이르기까지 다양하다. 그러나 차량의 통행 패턴에 따라 교통량은 변화하므로 좀 더 정확한 분석을 위해서 차두 시간을 이용하여 교통량을 추정하기도 한다. 교통 하중은 포장체에 재하된 차량의 바퀴를 통해 포장체 내에 발생한 응력의 크기와 상관이 있다. 교통 하중을 측정하기 위해서 앞서 설명한 WIM 장비, 이동식 측정 장비, 검문소 등을 이용한다. 본 장에서는 이와 같은 교통 하중과 관련된 인자들에 대해 자세히 살펴보고 포장 설계에서는 이를 어떻게 표준화 하였는지를 살펴보도록 하자.

3.1 차량 및 교통 흐름 특성

포장체의 거동 및 파손에 가장 큰 영향을 주는 요소 중의 하나는 교통하중이다. 교통하중 정량화 방법에 있어 설계에 반영하기 위해서 주로 고려되는 사항은 하중크기, 하중재하 위치, 바퀴 및 축수, 교통량 및 시간대별 분포 등이 있다. 하중 크기는 차량에 따라 모두 다르기 때문에 정량화하기가 쉽지 않다. 그러나 하중의 크기에 따라 포장에 누적되는 손상 정도가 크기

때문에 설계 인자로서 고려되어야 한다. 국내의 경우 축 하중 10톤, 총 중량 40톤이라는 법적 제한이 있어 이를 초과하는 차량은 주행할 수 없다. 그러나 일반국도나 지방도의 경우 과적차량이 주행하는 경우가 있어 차종별 하중 자료는 설계에 있어 필수적이다. 포장의 파손 형상은 누적손상개념에서 볼 때, 포장체에 재하되는 반복 차량하중에 의해 발생하므로 설계기간 동안에 통과 차량 대수 또한 중요하다. 그 예로 중차량 비율이 높을수록, 일평균 교통량 (AADT)이 많을수록 포장 파손은 가속화되는 것을 들 수 있다.

도로포장 구조 설계에 차량 및 교통 흐름 특성을 각 설계 등급별로 차등화하여 산정하도록 하였으며, <표 3.1>과 같다. 중요도가 높은 “설계 등급 1”은 인근 지점에서 직접 조사를 하거나 인접 지역 교통량 자료를 이용하여 설계를 한다. “설계 등급 2, 3”은 도로 등급별로 제시한 값을 사용한다.

<표 3.1> 설계 등급별 교통 관련 인자 산정 방법

설계 등급	산정 방법
1	인근 지점 직접 조사 또는 인접지역 교통량 자료 이용
2	도로 등급별 제시값 사용
3	도로 등급별 제시값 사용

3.1.1 차량의 특성

(1) 국내 차종 분류 체계

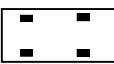
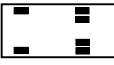
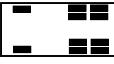
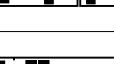
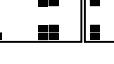
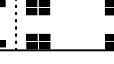
차량의 분류는 통상 각 도로 관련 공공기관의 법적인 제한에 따라 이루어지거나 교통 자료의 수집 편의성에 따라 이루어진다. 국내 차종분류는 고속국도와 지방도는 8종으로 분류하고 일반국도는 12종으로 구분한다. 외국의 경우 포장 설계를 위해 차종 구분은 크게 승용차와 트럭 두 종류로 구분되며 세분화하면 15종까지 상세하게 함으로서 분석의 정확성을 향상시키기도 한

다. 고속국도 차종분류 체계는 <표 3.2>와 같다. 고속국도는 전체 차량을 승용차, 버스, 트럭, 트레일러 4종류로 구분하였다. 일반국도 차종분류 체계는 <표 3.3>과 같다. 일반국도는 버스와 3축 이하의 차량에 대해서는 중량을 기준으로 분류하고 4축 이상의 트럭에 대해서는 축 수와 축 형태를 기준으로 분류하고 있다. 본 도로포장 설계에서는 12종으로 차량을 구분하고 있다.

<표 3.2> 고속국도 차종 분류 체계

차종 분류	차축 구성	정 의
1종 (승용차)	2축 4륜	2축 4륜 구조의 1단위(Single Unit) 차량
2종 (소형버스)	2축 4륜	버스 형식의 2축 4륜 또는 2축 6륜 구조의 1단위 차량
	2축 6륜	
3종 (보통버스)	2축 6륜	중형 버스 형식의 2축 6륜 구조의 1단위 차량으로 17인승 이상의 버스
4종 (소형트럭)	2축 4륜	적재 중량 1톤 미만의 2축 4륜 구조의 트럭
5종 (보통트럭)	2축 6륜	적재 중량 8톤 미만의 2축 6륜 구조의 트럭
6종 (대형트럭)	3축 10륜	적재 중량 8톤 이상의 3축 10륜 구조의 트럭
7종 (세미트레일러)	4축 이상	견인차와 피견인차로 조합된 차량으로 견인차는 2축이상, 피견인차도 2축이상 으로 구성된 차량
	4축 이상	
	4축 이상	
8종 (풀 트레일러)	4축 이상	견인차와 피견인차로 조합된 차량으로 견인차는 2축이상, 피견인차도 2축이상 으로 구성된 차량
	4축 이상	

〈표 3.3〉 일반 국도-12종 분류 체계

차종 분류	차축 구성	정의
1종	2축 4륜 	‘경차’로 불리는 모든 차량 일반 세단형식 차량 16인승 미만 SUV, RV, 승합차량
2종	2축 6륜 	중, 대형 버스
3종	2축 6륜 	화물 수송용 트럭으로 2축의 최대 적재량 1~2.5톤 미만의 1단위 차량
4종	2축 6륜 	화물 수송용 트럭으로 2축의 최대 적재량 2.5톤 이상의 1단위 차량
5종	3축 10륜 	화물 수송용 트럭으로 3축 1단위 차량
6종	4축 12륜 	화물 수송용 트럭 형식으로 4축 1단위 차량
7종	5축 16륜 	화물 수송용 트럭 형식으로 5축 1단위 차량
8종	4축 14륜 	화물 수송용 세미 트레일러형식으로 4축 2단위 차량
9종	4축 14륜 	화물 수송용 풀 트레일러형식으로 4축 2단위 차량
10종	5축 18륜 	화물 수송용 세미 트레일러형식으로 5축 2단위 차량
11종	5축 18륜 	화물 수송용 풀트레일러 형식으로 5축 2단위 차량
12종	6축 22륜 	화물 수송용 세미 트레일러 형식으로 6축이상 2단위 차량

(2) 차량의 하중 크기

차량 하중은 차종, 축, 상재하중 등에 따라 큰 차이를 나타낸다. 이러한 특성은 실제 공용중인 도로의 축하중 조사 결과를 보면 그 형태를 알 수 있다. 본 도로포장 구조 설계 연구에서는 도로를 주행하는 차량의 축하중을 조사하여, 차량의 하중 특성을 정량화하였으며, 세부 내용은 다음과 같다.

가. 축하중 조사 방법

국내에서 차량의 축하중 정보를 얻을 수 있는 방안은 다음의 네 가지이다.

첫째는 과적 차량 단속을 위해 차량의 중량을 측정하고 있는 검문소의 기록을 이용하는 방안이다. 그러나 과적 검문소 기록은 일반적으로 과적으로 판단되는 차량의 중량만을 측정함으로 차종별 대표성을 지니고 있다고 말할 수 없다. 이를 바탕으로 교통하중을 정량화할 경우 매우 보수적인 접근 방법이 되며, 현실과 동떨어질 수 있는 문제점이 있다.

둘째는 일반국도에 설치되기 시작한 WIM 을 이용하는 것으로, 많은 수의 표본을 짧은 시간에 획득할 수 있는 장점이 있다. 비교적 정확한 하중 분포를 파악할 수 있고 연속적인 하중 정보의 획득이 가능하다.

셋째는 고속국도를 진·출입하는 화물 차량의 하중 측정치를 이용하여 차량의 중량 정보를 얻는 방안이다. 고속국도를 진·출입하는 모든 대형 차량의 중량이 진입할 당시에 측정되므로 고속국도 차량들만의 중량 정보를 획득할 수 있다. 이 방법은 고속국도의 중량 분포를 파악하는 것을 주목적으로 채택되었으나 승용차 및 9인승 이하의 소형 버스들의 중량 자료를 얻는 것이 어렵고, 과적 차량의 통행이 허용되지 않으므로 모든 도로를 대표하는 자료로 사용하는데 어려움이 따른다.

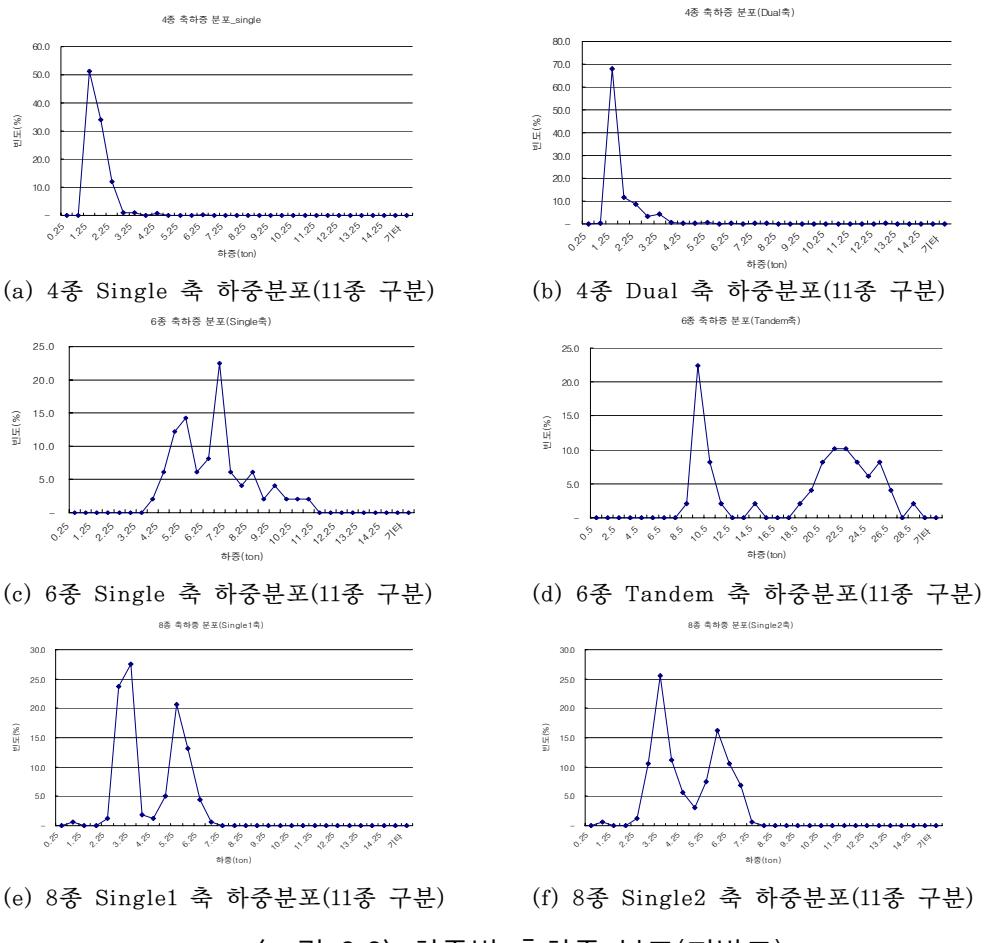


〈그림 3.1〉 축하중 조사방법(이동식 및 검문소)

넷째는 이동식 축하중 측정 장비를 이용하여 차량의 축하중을 조사하는 방법이다. 이 방법은 비교적 차량의 대표 축하중을 측정할 수 있는 방안 중에 하나이다. 하지만 조사에 따른 인력과 비용이 많이 소요되며 사고발생 위험성이 높다.

나. 차종별 하중 분포

동일한 축이라 할지라도 차종에 따라 포장에 가해지는 하중 크기는 다르고 일반적으로 차량이 대형화 될수록 그 영향은 크다. 다음은 전국 27개의 지방도 축하중 조사를 실시하여 이에 대한 각 차종에 따른 축별 분포를 분석하였다.

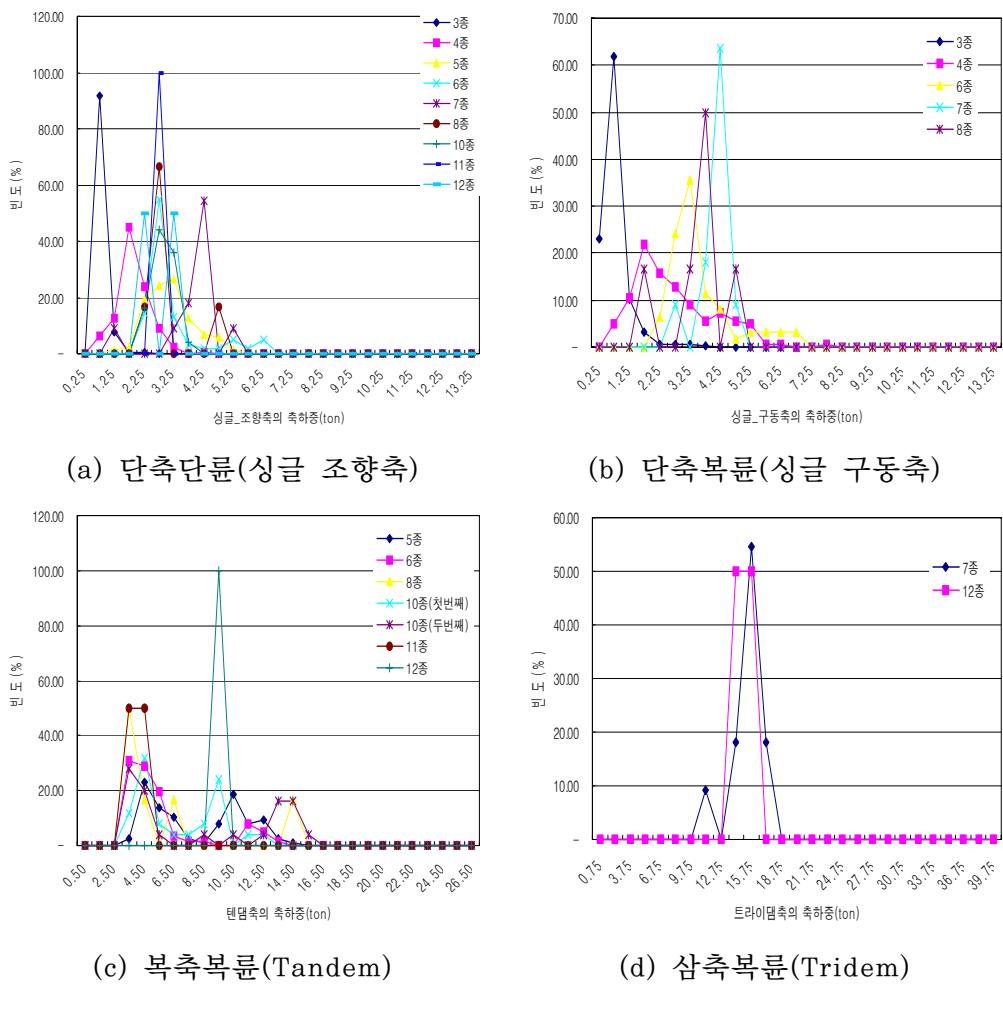


〈그림 3.2〉 차종별 축하중 분포(지방도)

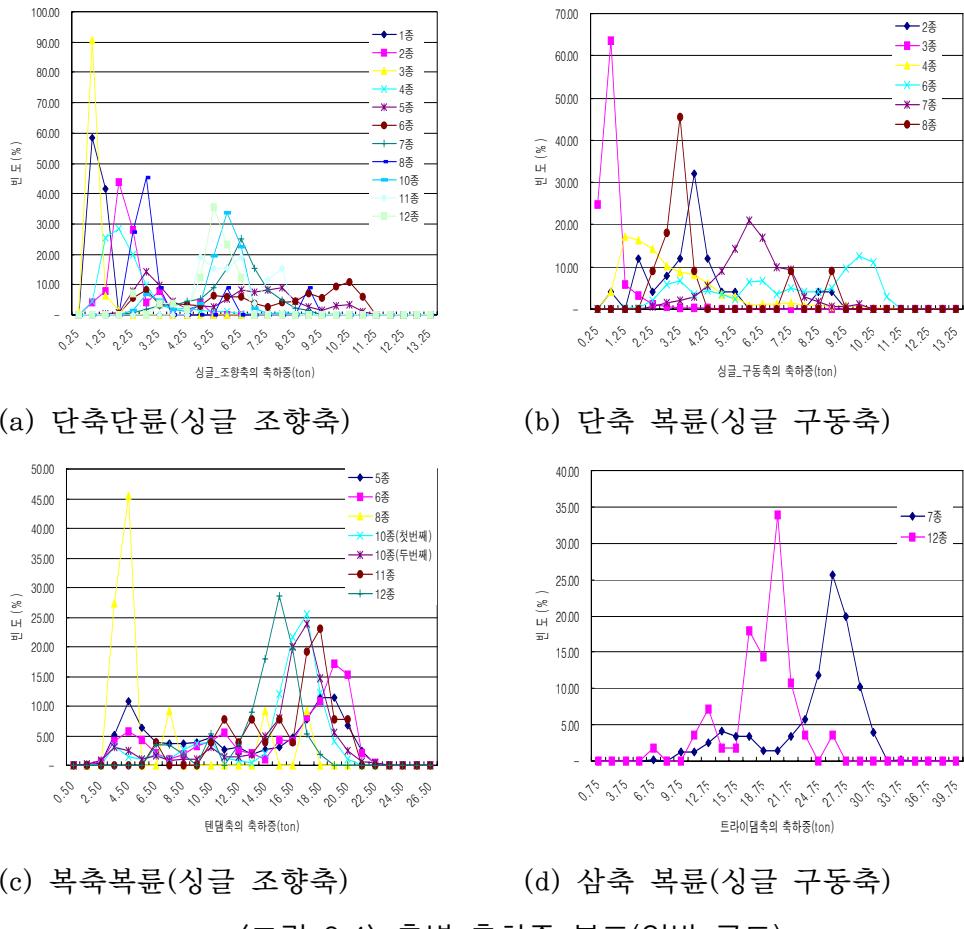
4종 차종의 경우 <그림 3.2>의 a 와 b 에 따르면 앞뒷바퀴 모두 축하중이 약 2.75 톤인 경우가 50% 이상을 차지하였다. 축 위치에 따른 축하중 분포상의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 중형 트럭을 대표하고 있는 6종 트럭의 경우 <그림 3.2>의 c 와 d에서 보인 것과 같이 하중 분포 특성은 단축과 복축의 중량 분포가 다르다. 단축의 경우는 5~6톤 부근을 제외하면 정규 분포 형태를 보여주고 있다. 그러나, 복축의 경우는 차량에 화물이 가득 찬 상태와 빈 상태의 무게 변화로 인해서 8~12톤 사이와 18~26 톤 사이에서 최대값을 각각 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 <그림 3.2>의 e와 f 인 8종 트럭에서도 나타나고 있는데 전축의 경우에는 3.75톤과 5.75톤에서, 후축의 경우는 3.75톤 그리고 6.25톤에서 각각 최대값을 보이고 있다. 기본적으로 대형 차종의 중량 분포는 정규 분포 양상을 띤다고 볼 수 없다. 특히 화물 트럭의 경우 통계학에서 제시하고 있는 기본적인 분포로는 설명하기 어려운 일종의 쌍봉 낙타 등과 같은 분포를 보여주고 있다. 또한 단축만의 하중 제한 규정으로 인해 복축의 하중이 외국에 비해 상대적으로 높으며, 동일한 복축이라 하더라도 트레일러의 경우 King pin이 위치한 곳의 하중이 제일 높았다.

다. 축별 하중 분포

각 차종의 축별 하중 분포를 분석한 결과, <그림 3.3>~<그림 3.4>와 같다. 전체적으로 차종이 커질수록 축하중도 커지는 경향이 나타났으며 지방도 보다는 일반 국도의 축하중이 크게 조사되었다. 단축단륜의 경우는 분포 폭이 좁은 반면 일반국도에서는 넓게 분포하였으며 4.25톤을 기준으로 두 개의 그룹으로 구분 지을 수 있었다. 이는 일반국도에 상재하중이 큰 차량이 많이 다닌다는 것을 의미한다. 단축복륜의 경우도 단축단륜과 유사한 경향을 나타났으나, 일반국도의 경우에는 그룹을 나눌 수가 없었으며 넓게 분산되어 있었다. 복축복륜의 경우 지방도에서는 4.25톤 근처에 많이 분포한 반면 일반국도는 14~20톤 사이에 많이 분포하였다. 삼축복륜의 경우는 많이 조사가 되지 않았으며, 지방도에서는 차종별로 큰 차이가 없었으나 일반국도에서는 12종 차종의 축하중이 더 크게 나타났다.



〈그림 3.3〉 축별 축하중 분포(지방도)

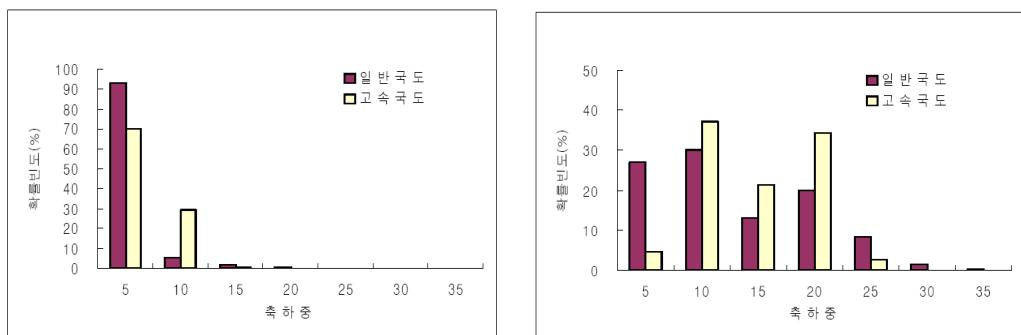


라. 도로 등급별 축하중 분포

〈그림 3.5〉는 고속국도와 일반국도 두 도로상에서 측정된 단축의 중량 분포를 비교한 결과로 단축의 절대 다수가 5톤 미만의 하중임을 알 수 있다. 일반국도의 경우 주행하는 차량의 약 90% 이상이 5톤 미만이지만 고속국도의 경우는 약 70% 정도이다. 10톤으로 정해진 법적 하중을 초과하는 경우가 일반국도는 약 1.8% 정도로 보고되었으나 고속국도는 법적인 처벌이 가해지는 최대 11톤을 초과하는 경우가 거의 없었다.

복축복륜의 하중을 비교해보면 고속국도나 일반국도 모두 일반적인 정규 분포나 포이손 분포 형태를 따르지 않고 쌍봉 분포를 보여주고 있다. 법적

제한 하중인 20톤 이상 되는 차종이 일반국도의 경우 11%로 매우 높은 값을 보여주고 있으나 고속국도의 경우는 거의 0% 가깝다. 그러나 고속국도의 경우, 법적 제한 하중 근처에 해당하는 15~20톤의 무게로 주행하는 축이 전체의 34%로 높은 비중을 차지하였으나, 일반국도는 19%에 불과하였다. 한편으로 공차에 해당하는 10톤 미만의 복축은 일반국도가 높은 값을 보여주고 있다.

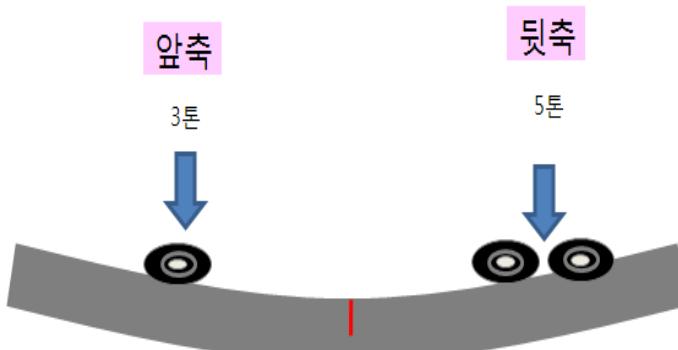


〈그림 3.5〉 단축 및 복축복률의 축하중(톤) 비교

마. 앞뒷축 축하중 분포

도로포장 구조 설계 내 아스팔트 콘크리트 포장 해석시에서는 교통하중에 대한 고려를 축단위로 포장의 거동을 파악한다. 이에 따라서 교통하중에 대한 축하중 분포가 필요하다. 이와는 달리 시멘트 콘크리트 포장에서 구조 해석시에는 축단위가 아닌 차량단위로 하중을 고려하여 거동을 파악하며, 특히 〈그림 3.6〉과 같이 온도차에 의한 슬래브의 상향 컬링 상태에서는 차량의 앞뒷축의 하중 분포가 필요하다.

이러한 앞뒷축의 하중은 실제 운행하고 있는 화물차의 개별 차량 자료를 이용하는 것이 가장 정확하나, 현실적으로 적용하기에는 어렵다. 이러한 화물차의 앞뒤 하중 분포 관계는 화물 차량 종류, 화물칸내 화물의 적재 위치, 적재량에 따라 다르게 나타난다. 실측한 축하중 자료를 이용하여 이를 정량화하였다.



〈그림 3.6〉 시멘트 콘크리트 포장의 상향 컬링시
하향 균열 예측 위한 구조해석 형태

a. 승용차(1종)

승용차에 대한 앞뒤 축 상관관계를 분석한 결과, 총중량 대비 앞축의 하중 분담 비율은 〈그림 3.7〉에서 보는 바와 같이 최소 45%에서 최대 65%로 나타났으며, 총중량이 변화함에 따라 하중 분담 비율이 변화하는 경향이 보이지 않았다. 이러한 원인으로는 인원 탑승시 앞 또는 뒤좌석에 타는 것은 임의적으로 발생되기 때문이다.

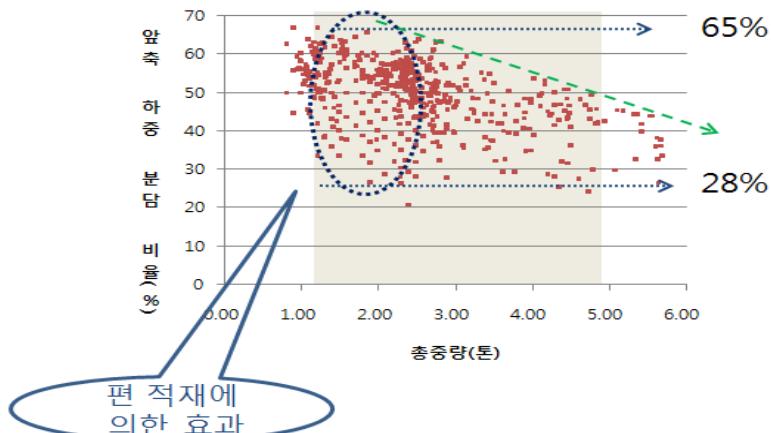
b. 버스(2종)

버스에 대한 앞뒤 축 상관관계를 분석한 결과, 총중량 대비 앞축의 하중 분담 비율은 크게 중형버스(콤비버스)와 대형버스에 따라 앞축 하중 분담 비율이 변동하였다. 전자는 평균적으로 앞축의 하중분담 비율이 약 50 %, 후자는 약 35% 정도로 나타났다. 승용차와 마찬가지로, 버스는 인원 수송을 목적으로 하고 있어 총하중에 대한 하중변동 관계가 뚜렷하게 나타나지 않았다.

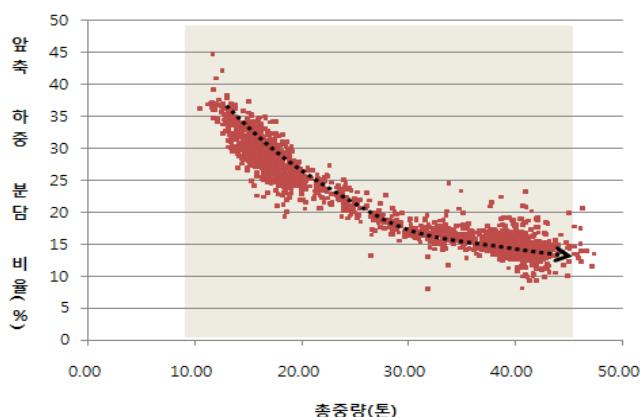
c. 단일트럭(3~7종)

단일 트럭에 대한 앞뒤 축 상관관계를 분석한 결과, 총중량 대비 앞축의 하중 분담 비율은 〈그림 3.7〉의 (a)와 같이 나타났다. 총중량이 변화함에 따라 앞축의 하중 분담 비율은 감소하였으며, 총중량이 공차중량일 경우에는 하중분담비율의 변동 폭이 크며, 만적중량으로 갈수록 수렴되는 경향을 보였

다. 이는 공차 중량 부근에서는 화물의 편적재로 인한 하중 분담 비율의 변동때문으로 판단된다.



(a) 단일트럭의 앞축 하중 분담율



(b) 10종 트레일러 트럭의 앞축 하중 분담율

〈그림 3.7〉 앞축 하중 분담비율

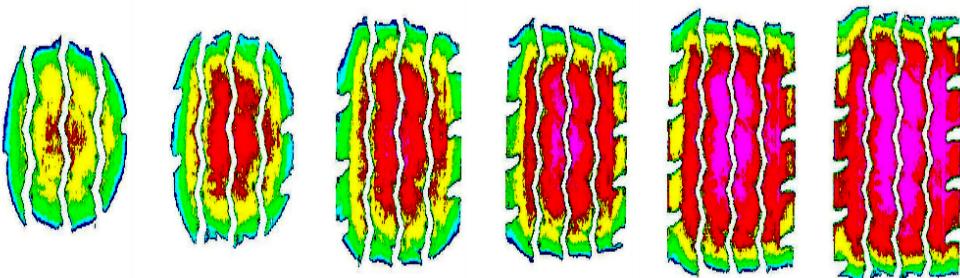
d. 트레일러 트럭(8~12종)

트레일러 트럭에 대한 앞뒤 축 상관관계를 분석한 결과, 총중량 대비 앞축의 하중 분담 비율은 〈그림 3.7〉의 (b)와 같다. 그림에서 보는 바와 같이, 총중량이 변화함에 따라 앞축의 하중 분담 비율은 곡선 형태로 감소됨을 알

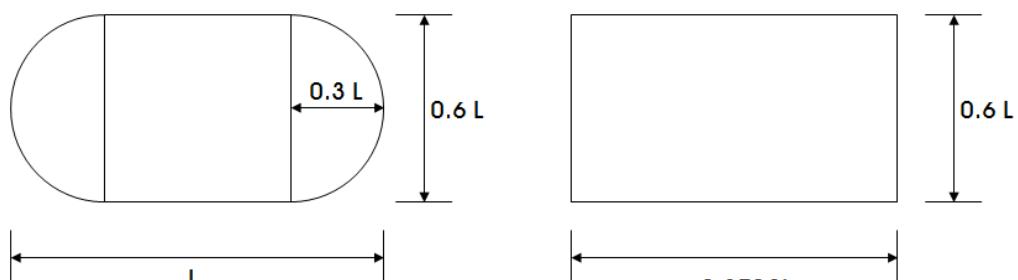
수 있다. 특징적으로 단일 트럭에서 나타났던 공차 중량 부근에서 하중 분담 비율의 큰 변동은 보이지 않았다. 즉, 총하중이 증가함에 따라 일정한 변동 폭내에서 하중비율이 감소되고 있는 형태로 나타났다.

(3) 타이어 압력 및 접지 면적

포장 설계를 하기 위해 타이어와 포장면 사이의 접지 면적을 알아야 한다. 일반적으로 차량의 하중이 증가함에 따라 타이어 접지 면적은 원형에서 타원형으로 넓어지며 그 추세를 나타내면 <그림 3.8>과 같다. 그러나 일반적으로 포장 해석시 접지면적은 축하중을 타이어 압력으로 나눈 값을 사용하는데 이는 포장 거동의 개략적 형태를 알아보는 것이다.



<그림 3.8> 축하중 크기에 따른 접지 면적의 변화



<실제 타이어 접지면적>

<증가 타이어 접지면적>

<그림 3.9> 차량 바퀴 접지면적의 확산

PCA 설계에서는 타원형의 접지 면적을 유한 요소 해석하기에 쉬운 직사각형 면적으로 환산하는 식을 제안하였다.

$$Ac = \pi^*(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L) = 0.52273L^2 \quad \langle \text{식 3.1} \rangle$$

여기서, Ac = 타이어 접지 면적

L = 타원형 장축 길이

따라서 위 식을 L 에 대하여 정리하면

$$L = \sqrt{\frac{Ac}{0.5227}} \quad \langle \text{식 3.2} \rangle$$

이 되며 이를 도시한 것이 <그림 3.9>이다.

3.1.2 교통 흐름 특성

차량은 한 지점을 연속적으로 통과하지 않기 때문에 시간대 및 날씨별로 교통량의 차이가 발생한다. 이러한 도로상의 차량의 움직임을 나타내는 동적인 특성, 예를 들어 교통량 속도, 지체 등의 분포를 알면 포장 거동을 설명하는 데 많은 도움이 된다. 그리고 차량의 바퀴는 일정한 분포를 띠며 바퀴 중심값을 축으로 좌우로 변동하며 포장위를 지나게 된다. 따라서 교통 흐름을 예측하고 주행 특성을 정량화하는 것은 중요하다.

(1) 교통량 분포

교통량은 도로 포장의 공용성에 많은 영향을 미치는 설계 입력 변수 중에 하나이다. 같은 도로에 축하중 분포가 동일하다고 가정한다면 교통량이 많은 도로의 포장이 조기에 파손되는 것은 당연하다. 교통량은 일반적으로 이동성에 초점을 맞춘 주간선 도로인 고속국도나 일반국도가 마을이나 동네

이면도로의 교통량보다 더 많다. 즉 도로의 기능성에 따라 교통량은 차이가 있다. 2008년도 교통량 통계자료에서 얻은 각 도로별 교통량을 나타낸 것이 <표 3.4>와 같다.

도로 전체를 나타낸 것이기 때문에 세부 구간으로 나눈 것과는 다소 차이가 있다. 즉, 도로가 도심지역을 지나갈 경우 그 곳의 교통량은 상대적으로 많은 반면, 지방부 지역을 지날 경우에는 적을 것이다. 고속국도의 경우 서울외곽선의 교통량이 가장 많았으며, 경인선이 다음으로 나타났다. 경부선의 경우는 약 7만 5천대로 서울외곽선의 절반 이하의 수준이다. 일반국도의 경우 목포-파주 구간의 평균 교통량이 2만2천여대였으며, 부산-고성, 거제-포항 순이었다. 지방도의 경우는 경기도의 교통량이 가장 많았으며, 강원지역이 가장 적었다.

〈표 3.4〉 각 도로의 AADT(2008)

고속국도	교통량	일반국도	교통량	지방도	교통량	지방도(국가지원)	교통량
경부선	75,954	목포 - 파주	22,740	경기	11,065	고흥 - 고창	9,723
남해선	48,067	거제 - 포항	20,382	강원	2,457	포항 - 영덕	4,541
88선	9,956	고흥 - 담양	4,574	충북	3,685	대구 - 창원	8,119
서해안선	38,213	여수 - 용인	15,827	충남	5,055	남원 - 거창	1,440
울산선	43,581	산청 - 포항	5,434	전북	4,782	해남 - 금산	6,827
익산포항선	13,955	진해 - 청주	9,425	전남	3,592	무안 - 부산	4,794
논산천안선	27,480	부안 - 대구	4,396	경북	2,995	여수 - 순천	4,961
호남선	32,061	부산 - 강릉	6,523	경남	5,097	천안 - 파주	75,793
당진상주선	20,333	거창 - 파주	6,730	제주	8,138	대전 - 문경	5,622
중부 대전통영선	31,275	예산 - 공주	4,737			의정부 - 동두천	11,314
제2 중부선	61,329	서산 - 가평	19,531			김포 - 인제	12,346
음성평택선	28,165	신안 - 부산	17,407			나주 - 부산	3,705
중부내륙선	30,956	남해 - 철원	15,251			통영 - 칠곡	5,230
영동선	61,521	군산 - 경주	14,450			창녕 - 안동	3,206
신대구부산선	28,630	마산 - 철원	9,637			화성 - 평창	10,063
동해선	12,400	인천 - 강릉	12,063			하남 - 영양	3,706
서울외곽선	160,315	부산 - 고성	20,421			해남 - 원주	3,063
남해제1지선	41,112	완도 - 금산	7,121			대전 - 안양	17,582
남해제2지선	72,230	진도 - 구례	2,948			서천 - 경주	5,701
제2경인선	86,685	남해 - 홍천	4,648			부산 - 울진	4,569
경인선	124,415	남원 - 이천	14,445			서산 - 춘천	5,820
인천국제공항선	42,480	정읍 - 순천	9,903			김포 - 포천	8,215
호남선지선	29,612	강진 - 천안	7,747			강화 - 원주	21,943
대전남부선	25,474	신안 - 울산	5,255			남양주 - 춘천	6,482
구마선	64,351	군산 - 대구	6,976			태안 - 청원	5,828
고창담양선	9,032	고흥 - 군산	8,150			제주 - 남제주	13,750
중앙선지선	70,345	영주 - 포항	8,016			수도권 순환선	17,548

(2) 차종별 분포

〈표 3.5〉은 국도 1호선의 차종에 따른 분포를 나타낸 것이다. 포장에 영향을 가장 크게 미치는 1종 차량이 도로 종류에 상관없이 약 60% 이상을 차지하였으며, 다음으로 화물 수송용 소형 트럭인 3종 차량이 많다. 또한 9종 이상의 대형 차량의 빈도는 매우 적었다. 이러한 경향은 각 도로의 특성에 따라 달라진다.

(3) 월별 분포

교통량은 〈표 3.6〉과 같이 매월 변화하며 이는 포장의 누적 손상을 계산하기 위한 기초 자료가 된다. 아스팔트의 경우 여름철 교통량 분포가 많을

경우 고온으로 인한 포장 파손이 심화되는 반면 겨울철에는 강성이 높아져 여름철보다 상대적으로 파손이 적게 발생한다. 콘크리트 포장에서 슬래브 상 하부 온도차가 큰 시기에 교통량이 많을 경우 환경하중과의 복합 영향으로 인해 포장 파손이 가속화 될 것이다. 이러한 의미에서 월별 교통량 분포는 중요하다.

표에서 월별 교통량 비율은 각 월별로 월 평균 교통량을 연평균교통량으로 나눈 값을 의미한다. 그 특징을 살펴보면 도심지역의 경우는 10 월과 11 월에 가장 교통량이 많았다. 반면 지방의 경우에는 여름철 휴가철인 8월과 행락객들이 많은 봄철 4, 5월 및 가을철 10, 11월의 교통량이 다소 많은 것으로 나타났다.

〈표 3.5〉 도로등급별 차종 비율 (%)

고속국도													
구분		1종	2종	3종	4종	5종	6종	7종	8종	9종	10종	11종	12종
도시	4차로	63.04	3.88	12.22	10.23	3.03	1.89	1.68	0.65	0.11	2.54	0.13	0.60
	6차로 이상*	69.83	3.37	11.42	8.21	2.33	1.46	1.05	0.43	0.06	1.55	0.06	0.24
지방	4차로 이상	61.98	5.41	10.12	10.09	3.47	2.05	2.42	0.69	0.05	2.98	0.15	0.60

* : 지방 6 차로 이상의 경우 도심 비율을 사용가능함

일반국도													
구분		1종	2종	3종	4종	5종	6종	7종	8종	9종	10종	11종	12종
도시	2차로	71.98	2.05	14.13	4.80	2.89	1.64	0.25	0.18	0.02	2.01	0.02	0.03
	4차로이상	73.10	2.40	15.00	6.07	1.51	0.97	0.23	0.16	0.02	0.46	0.01	0.05
지방	2차로	66.12	2.67	17.73	7.08	1.92	2.22	0.54	0.37	0.04	1.14	0.04	0.13
	4차로 이상	69.82	2.87	15.62	6.13	1.96	1.55	0.47	0.37	0.04	1.03	0.04	0.10

지방도													
구분		1종	2종	3종	4종	5종	6종	7종	8종	9종	10종	11종	12종
도시	2차로	65.34	3.61	18.88	5.94	3.04	1.69	0.58	0.24	0.10	0.40	0.11	0.07
	4차로 이상	78.44	2.89	11.79	3.80	1.35	0.61	0.29	0.10	0.07	0.37	0.19	0.11
지방	2차로	59.03	3.69	26.36	4.85	3.00	2.12	0.41	0.12	0.04	0.29	0.04	0.05
	4차로 이상	71.36	2.84	17.00	3.73	2.19	1.61	0.51	0.13	0.10	0.40	0.07	0.07

〈표 3.6〉 월별 교통량 비율

구분		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
도시	2차로	0.91	0.88	0.99	1.03	1.02	0.99	0.92	1.01	1.08	1.10	1.08	0.99
	4차로이상	0.92	0.93	0.99	1.02	1.03	1.01	0.93	1.01	1.06	1.03	1.07	1.00
지방	2차로	0.94	0.85	0.95	1.03	1.03	0.98	0.96	1.11	1.03	1.12	1.03	0.97
	4차로이상	0.92	0.85	0.92	1.00	1.02	0.99	0.97	1.16	1.05	1.12	1.03	0.97
평균값		0.92	0.88	0.96	1.02	1.03	0.99	0.95	1.07	1.06	1.09	1.05	0.98

(4) 시간대별 분포

시간대별 분포는 월별 분포와 마찬가지로 온도하중과 교통하중의 중첩으로 인한 포장 파손과 누적 손상 계산시 해석 시간을 줄이기 위한 그룹화의 근거가 된다. 아스팔트 콘크리트 포장의 경우, 밤과 낮동안의 포장체 온도가 달라지면, 결국 재료의 탄성계수에 영향을 미친다. 시멘트 콘크리트 포장은 시멘트 콘크리트 슬래브의 깊이별 온도차에 의해 발생하는 컬링의 방향이 달라져 파손을 예측하는 방법이 달라지게 된다. 따라서 시간대별 교통량을 구분하여 설계에 반영하여 보다 정확한 포장 설계를 할 수 있을 것이다.

〈표 3.7〉 도시지역의 시간별 교통량 변동 계수

시간대	시간별 교통량 변동 계수		시간대	시간별 교통량 변동 계수	
	2차로	4차로이상		2차로	4차로이상
00:00 ~ 01:00	1.12	1.43	12:00 ~ 13:00	6.12	5.27
01:00 ~ 02:00	0.75	0.94	13:00 ~ 14:00	6.55	5.69
02:00 ~ 03:00	0.58	0.69	14:00 ~ 15:00	7.02	6.00
03:00 ~ 04:00	0.53	0.58	15:00 ~ 16:00	7.29	6.09
04:00 ~ 05:00	0.70	0.65	16:00 ~ 17:00	7.43	6.20
05:00 ~ 06:00	1.25	1.18	17:00 ~ 18:00	7.48	6.80
06:00 ~ 07:00	2.53	2.92	18:00 ~ 19:00	7.13	7.09
07:00 ~ 08:00	4.14	5.84	19:00 ~ 20:00	5.49	5.89
08:00 ~ 09:00	5.13	6.49	20:00 ~ 21:00	4.14	4.73
09:00 ~ 10:00	5.12	5.36	21:00 ~ 22:00	3.30	3.97
10:00 ~ 11:00	5.90	5.55	22:00 ~ 23:00	2.40	3.04
11:00 ~ 12:00	6.24	5.50	23:00 ~ 24:00	1.65	2.10

〈표 3.8〉 지방지역의 시간별 교통량 변동 계수

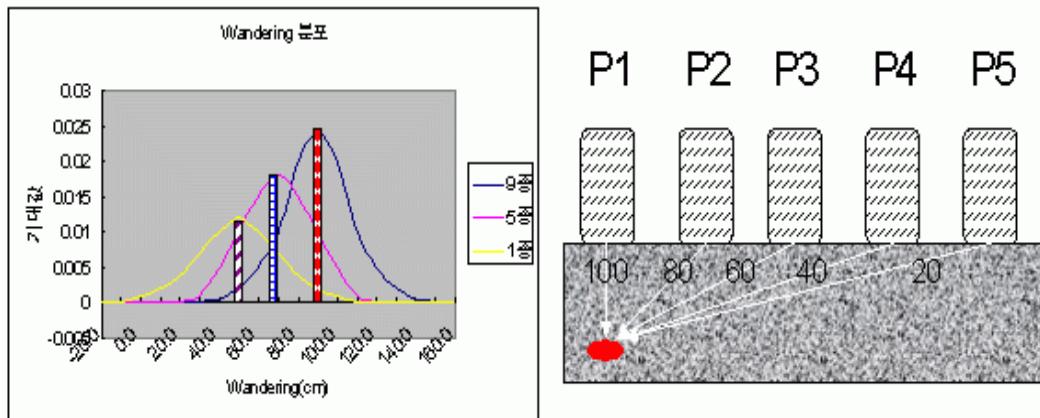
시간대	시간별 교통량 변동 계수		시간대	시간별 교통량 변동 계수	
	2차로	4차로이상		2차로	4차로이상
00:00 ~ 01:00	0.87	1.11	12:00 ~ 13:00	6.51	6.03
01:00 ~ 02:00	0.57	0.74	13:00 ~ 14:00	7.06	6.46
02:00 ~ 03:00	0.41	0.56	14:00 ~ 15:00	7.47	6.86
03:00 ~ 04:00	0.36	0.5	15:00 ~ 16:00	7.57	6.99
04:00 ~ 05:00	0.47	0.62	16:00 ~ 17:00	7.53	7.02
05:00 ~ 06:00	0.91	1.17	17:00 ~ 18:00	7.42	7.18
06:00 ~ 07:00	2.32	2.59	18:00 ~ 19:00	7.11	7.08
07:00 ~ 08:00	4.13	4.55	19:00 ~ 20:00	5.07	5.44
08:00 ~ 09:00	5.66	5.67	20:00 ~ 21:00	3.64	4.15
09:00 ~ 10:00	5.65	5.44	21:00 ~ 22:00	2.82	3.32
10:00 ~ 11:00	6.42	6.12	22:00 ~ 23:00	2.01	2.43
11:00 ~ 12:00	6.67	6.3	23:00 ~ 24:00	1.34	1.67

〈표 3.7〉과 〈표 3.8〉는 도시지역과 지방지역의 시간대별 교통량 분포 비율을 나타낸 것이다. 시간별 교통량 변동률은 일일 교통량을 100%로 가정하였을 때, 각 시간대별로의 비율을 나타낸다. 시간대별 교통량은 앞서 산출한 차종별 연평균일교통량에 시간별 교통량 변동계수를 곱해서 계산한다. 표에서와 같이 교통량은 새벽과 심야에는 적은 반면 출퇴근 시간 및 주간에 집중되어 있다. 이러한 경우 3 그룹으로 나눌 수 있을 것이다.

(5) 차량의 Wandering

도로를 주행하는 차량은 주행하면서 좌우 바퀴를 통해서 포장체와 상호 작용을 한다. 차량이 주행할 때 좌측 차선 표시와 좌측바퀴, 우측 차선 표시와 우측바퀴 사이에는 각각 여유폭들이 발생한다. 이 여유폭들은 모든 차량들이 동일 궤적을 갖고서 이동하지 않기 때문에 차량마다 서로 다른 값들을 갖는다. 이와 같이 통과하는 차량들이 서로 다른 차량궤적을 갖는 것을 혹은

차량바퀴의 횡방향 변동을 원더링(Wandering 혹은 Lateral placement)이라 정의하고 있다. 이런 현상은 차량하중의 분산 효과로 이어지므로 포장체에 가해지는 손상정도가 달라지게 된다. <그림 3.10>은 차량의 Wandering 개념을 설명한 것이다.



<그림 3.10> 차종에 따른 Wandering 분포 및 중첩효과

차량 Wandering 현상은 차량종류, 차량 바퀴사이의 거리, 차선폭에 따라 수평방향으로 일정한 폭을 가지고 정규분포 형상을 나타내는 특성이 있다. 따라서, 교통량을 보다 합리적으로 정량화하기 위해서는 지금까지의 차량이 동일한 궤적을 주행한다는 가정하에서 수행된 교통량 정량화 개념에서 벗어나 차량 Wandering 현상에 대한 고려가 필요하다. <그림 3.10>에서 좌측의 그래프는 차종별 차량 궤적 변동이 일정폭을 기준으로 정규분포를 나타내고 있음을 보여주고 있다. 또한, <그림 3.10>의 우측그림은 동일 슬래브에서 바퀴하중이 P1에서 P5로 이동함에 따라 P1 하부의 한 지점(A)에 미치는 영향을 나타내고 있다. 바퀴하중 P1이 지점 A의 발생 응력에 미치는 영향을 100으로 가정했을 때 P2는 80, P3는 60과 같이 A 지점에 영향을 미친다는 것을 하나의 예로 나타낸 것이다.

도로포장 설계에서는 차량 궤적 변동을 고려하기 위해서는 국내 차종별 바퀴간 거리를 조사하고 차종별 주행성향 및 차량 궤적 변동을 조사하였다.

조사된 자료를 근거로 주행차로를 기준으로 차종별 차량 궤적 변동 범위를 구하고 통계적 방법을 이용하여 차종별 차량 궤적 변동 분포를 제시하였다. 이때의 차종별 통계적 분포 비율을 산정하여 교통량 정량화에 적용한다. <표 3.9>은 12종 차종분류에 따른 차량의 바퀴의 위치와 표준편차를 나타낸 것이다.

<표 3.9> 차종별 도로폭에 따른 원더링

차로폭(m)	차종	전폭	좌측 바퀴		우측 바퀴	
			위치(cm)	표준편차	위치(cm)	표준편차
3.25m	1종	171.8	65.63	19.76	232.42	18.07
	2종	243.6	19.66	11.14	256.84	9.45
	3종	172.9	64.94	19.63	232.79	17.94
	4종	225.3	31.38	13.34	250.61	11.65
	5종	249.4	15.99	10.46	258.79	8.77
	6종	249.2	16.08	10.47	258.74	8.78
	7종	247.8	17.03	10.65	258.24	8.96
	8종	249.0	16.23	10.50	258.66	8.81
	9종	249.0	16.23	10.50	258.66	8.81
	10종	249.5	15.91	10.44	258.83	8.75
	11종	249.5	15.91	10.44	258.83	8.75
	12종	249.5	15.91	10.44	258.83	8.75
3.50m	1종	171.8	77.52	26.61	244.34	26.11
	2종	243.6	44.47	16.55	283.13	15.33
	3종	172.9	77.02	26.45	244.92	25.95
	4종	225.3	52.90	19.11	273.23	18.08
	5종	249.4	41.84	15.75	286.22	14.47
	6종	249.2	41.91	15.77	286.14	14.50
	7종	247.8	42.59	15.98	285.35	14.72
	8종	249.0	42.01	15.80	286.02	14.53
	9종	249.0	42.01	15.80	286.02	14.53
	10종	249.5	41.78	15.73	286.29	14.46
	11종	249.5	41.78	15.73	286.29	14.46
	12종	249.5	41.78	15.73	286.29	14.46
3.60m	1종	171.8	90.91	23.89	258.32	24.31

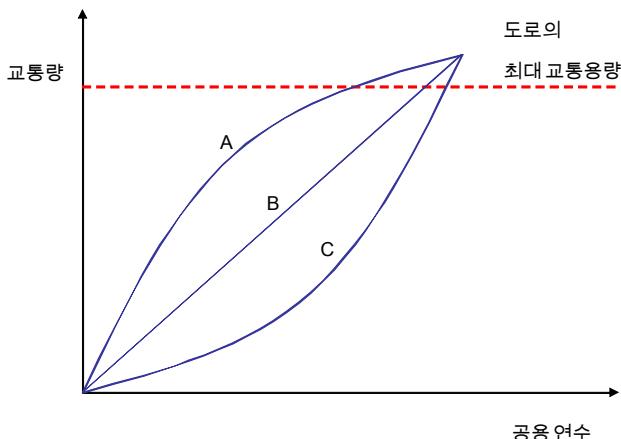
2종	243.6	65.05	13.83	302.14	14.25
3종	172.9	90.52	23.73	258.99	24.15
4종	225.3	71.64	16.39	290.97	16.81
5종	249.4	62.99	13.03	305.64	13.45
6종	249.2	63.04	13.05	305.55	13.47
7종	247.8	63.57	13.26	304.65	13.68
8종	249.0	63.12	13.08	305.41	13.50
9종	249.0	63.12	13.08	305.41	13.50
10종	249.5	62.94	13.01	305.72	13.43
11종	249.5	62.94	13.01	305.72	13.43
12종	249.5	62.94	13.01	305.72	13.43

(6) 교통수요 예측

교통 수요 예측 방법에는 4단계 추정법(4 steps Method), 개략 수요 추정법, 직접 수요 추정법, 개별형태별 수요 추정법 등이 있다. 이 방법 중 가장 많이 사용되고 있는 예측 모형으로 대표되는 것이 4단계 추정법이다. 이 방법은 통행 발생(Trip Generation), 통행 분포(Trip Distribution), 수신 분담(Mode Choice), 통행 배정(Assign Trips) 의 4단계로 나누며 각 과정 및 사용되는 모형을 살펴보면 다음과 같다. 통행 발생은 단위 지역에서 발생하는 통행과 도착되는 통행을 추정하는 단계로 증감률법, 원단위법, 분류분석법, 교통분석법, 회귀 분석법을 사용한다. 통행 분포는 추정된 통행 발생량을 단위 지역간의 통행으로 배분하는 단계로 성장인자모형, 중력모형, 확률배분모형 등이 있다. 수단 분담은 단위 지역간에 배분된 기종점 통행을 이용자가 선택 가능한 교통 수단별 비율로 자정하는 단계로 통행단 모형, 통행 교차 모형 등이 있다. 마지막으로 통행 배정은 각 교통 수단별 기종점 통행을 대상지역 내 교통망에 배정하는 것으로 전량 노선 배정기법, 용량 제약 통행 배정 방법 등이 있다. 요즘에는 ITS와 관련되어 보다 정확한 예측 방법들이 개발되고 있다. 이러한 교통수요 예측은 장래의 교통수요를 합리적으로 예측할 수 있도록 한다.

〈표 3.10〉 시간에 따른 교통량 추정 방법

교통량 추정 방법	계산식
증가율 미적용	'a' 년 후의 교통량 = 1.0 * 기준년도 교통량
선형 증가율 적용	'a' 년 후의 교통량 = 증가율 * a * 기준년도 교통량
비선형 증가율 적용	'a' 년 후의 교통량 = 기준년도 교통량 * (증가율) ^a
5년 추정교통량 적용	기준년도에서 5년 주기의 추정 교통량을 사용자가 입력한 후 보간법을 사용하여 연도별 추정.



〈그림 3.11〉 교통량 수요 예측의 방법 및 한계

하지만 위와 같은 교통수요 예측 방법들에도 문제가 있다. 일반적으로 도로의 최대 교통용량은 한계가 있다. 즉, 〈그림 3.11〉에서와 같이 실제 교통량은 도로가 감당할 수 있는 최대 교통량에 도달한 후부터는 더 이상 증가하지 않는 것이다. 하지만 교통수요 예측 모형을 통해 계산된 결과가 도로의 최대 교통용량 이상일 경우가 있으며 이를 설계에 반영할 경우 포장은 과다 설계가 될 것이다. 따라서 이와 같은 예측모형의 한계를 분명히 인식하고 포장 설계에 적합하게 수정해야 할 것이다.

(7) 방향 및 차로분배계수

앞서 살펴본 차종별 연평균 일교통량은 도로 내 방향 및 모든 차선을 포

합한 교통량으로 설계 시 방향 및 차로에 대한 교통량으로 환산하여야 한다. 설계차로 교통량은 차종별 연평균일교통량에 방향분배계수(Directional Distribution Factor, DD)와 차로분배계수(Lane Distribution Factor, DL)를 곱하여 계산한다. <식 3.3>은 차종별 설계차로 교통량 환산식이다.

$$W_i = AADT_i \times D_D \times D_L \quad \langle \text{식 } 3.3 \rangle$$

여기서, W_i = i 차종에 대한 설계차로 연평균 일교통량

$AADT_i$ = i 차종에 대한 연평균 일교통량

D_D = 방향분배계수

D_L = 차로분배계수

위 식에서 사용되고 있는 방향분배계수는 중방향 교통량을 전체 교통량으로 나누어 계산하고, 차로분배계수는 2차로 이상(1방향)일 경우에 차로 간 교통량 분담율로 계산한다. 도로포장 설계에서는 방향 및 차로 분배 계수의 적용 값은 설계자의 판단 하에 <표 3.11>와 같은 범위 내에서 결정하도록 하였다. 설계 신뢰도를 높이기 위한 교통량 현황조사를 실시할 때는 방향 및 차로에 대한 교통량을 추가적으로 수집하여 설계에 반영할 수도 있다.

<표 3.11> 방향 및 차로 분배 계수 범위 값

구분	방향 분배 계수 제시값	구분	편도 차로수	차로분배계수 제시값
고속국도 일반국도 지방도	0.5~0.55	고속국도	4	0.35~0.45
			3	0.45~0.55
			2	0.7~0.9
		일반국도, 지방도	4	0.5~0.8
			3	0.6~0.7
			2	0.8~0.9

3.2 교통하중 정량화 방법

실제 교통량은 혼합 교통량으로 각각의 차량을 설계에 직접 사용하기에는 컴퓨터가 보편하게 적용되기 전에는 문제가 있었다. 따라서 교통량을 포장 설계에 적합하게 만들기 위한 다양한 접근 방법이 이뤄졌다.

- 축하중법 : 가장 단순한 경우로 축하중의 선형 비율에 따라 등가치를 구하는 경우 혹은 지수승으로 정의하였다. 개념이 단순하다는 장점이 있지만 실제 포장의 거동이나 공용성에 근거하지 않은 값이므로 현실적으로 타당하지 않다.

예 : 10톤 축하중이 한번 통과시 20톤 축하중은 10톤 축하중이 두 번 통과한 것으로 정량화

- 거동법 : 포장체에 발생하는 응력 혹은 변형률이나 치짐을 기준으로 하여 등가치를 구하는 방법은 개념적으로 단순하지만 사용 목적에 따라 온도 영향을 고려하는 경우 그 결과가 달라지는 단점이 있다. 다음은 혼합 교통량을 단일 교통하중으로 바꾸어 주는 등가치를 구하는 것은 다양한데 정리하면 다음과 같다.

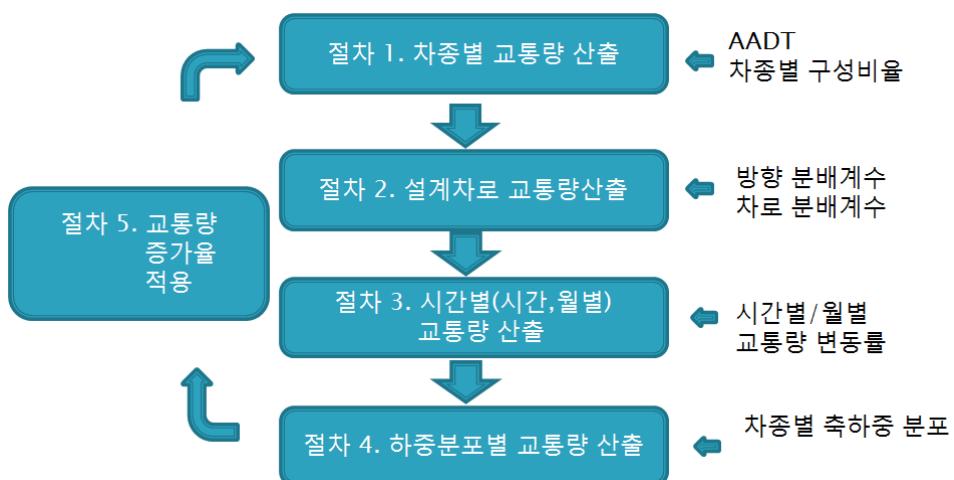
예 : 10톤의 기준 축하중이 10cm 포장위를 통과할 때 발생응력이 “1”이라고 하면 15 톤 축하중이 통과시 ”2“라는 응력이 발생했다. 이때 15톤 축하중의 등가치는 ”2“이다.

- 공용성에 근거한 개념 : 기준 축하중의 차량이 한번 통과시 포장이 경험하는 공용성 저감에 근거하여 다른 차종에 대한 상대적인 상수값을 만들어 사용하는 정량화 방법이다. 대표적인 것으로는 기존의 1993 AASHTO 설계지침에서 사용하는 등가단축하중(ESAL: Equivalent Single Axle Load)이 있다.

- 축하중을 직접 이용: 실제 현장에서 차량의 축하중을 고정식 혹은 이동식 축중계를 이용하여 직접 축하중과 접지압 등의 입력하는 방법으로 2002 AASHTO 설계 지침에서 사용하고 있다.

3.2.1 도로포장 구조 설계의 교통하중 정량화

도로포장 구조 설계에서는 교통 하중을 정량화하기 위해 계층적 접근 방법을 이용한다. 계층적 접근 방법은 각 설계수준별로 입력변수를 구분하고 설계수준별 입력변수에 대해서는 서로 독립적으로 고려한다는 개념이다. 도로포장 구조 설계에서 교통하중을 정량화하여 포장 설계에 사용하는 개념도는 다음과 같다.



〈그림 3.12〉 도로포장 설계의 교통량 산출 개념도

(1) 연평균일교통량(AADT)

해당 설계 지역의 연평균일교통량(AADT)을 조사 및 예측하여 예상되는 교통량을 산정한다. 포장 설계에 사용되는 연평균일교통량은 도로 계획에서 산출된 초기년도부터 계획목표년도까지의 매년 평균일 교통량 중 초기년도 값을 기준으로 사용한다.

(2) 차종별 구성 비율

국내 차종 분류 기준인 12종 차량의 각 교통량 비율을 산정한다. 이 자료는 실측하여 사용하거나 도로포장 설계 프로그램 내에 탑재된 자료를 이용한다. 차종별 구성 비율이 필요한 이유는 차종형태별로 포장에 미치는 영향이 다르기 때문에, 이에 대한 차종별 교통량을 산출하여 포장의 파손률을 계산하여야 하기 때문이다.

(3) 설계차로 교통량 산출

앞에서 산출된 차종별 연평균 일교통량에 방향 및 차로에 대한 교통량으로 환산하여야 한다. 그 방법은 앞서 살펴본 식 (3.3)과 같이 각 차종별 교통량에 차로 및 방향 분배계수를 곱하여 산출한다.

(4) 시간별 교통량 변동률

도로포장 설계에서는 각 시간대별 교통량을 고려하여 포장 파손을 예측한다. 각 차종별 시간대별 교통량은 차종별 설계 교통량에 시간별 교통량 변동계수를 곱해서 계산한다.

(5) 월별 교통량 변동률

각 월별로 월 평균 교통량을 연평균교통량으로 나눈 값으로 매달 해당 도로를 통과하는 교통량이 다른 점을 고려하기 위함이다.

(6) 차종별 축하중 분포에 따른 교통량 산정

동일 차종, 시간대, 월 등이 동일하더라도 축하중 분포가 다르기 때문에 이를 고려한다. 앞서 살펴본 바와 같이 도로포장 구조 설계에는 각 차종 및 축에 따른 축하중 분포 자료가 내장되어 있다.

(7) 원더링 분포

원더링 효과를 고려하기 위해 정규분포형태의 이격 거리를 설계에 고려한다.

(8) 교통량 증가 추정

교통량 증가 추정 방법은 앞서 살펴본 바와 같이 4가지 방법이 있으며, 설계 기간 동안의 예상되는 교통량 증가율을 결정한다.

3.3 교통하중 정량화 로직

도로포장 구조 설계에서 교통 하중관련 일반 로직을 표현한 것이 <그림 3.13>과 <그림 3.14>이다. 세부로직에 대한 설명은 다음과 같다.

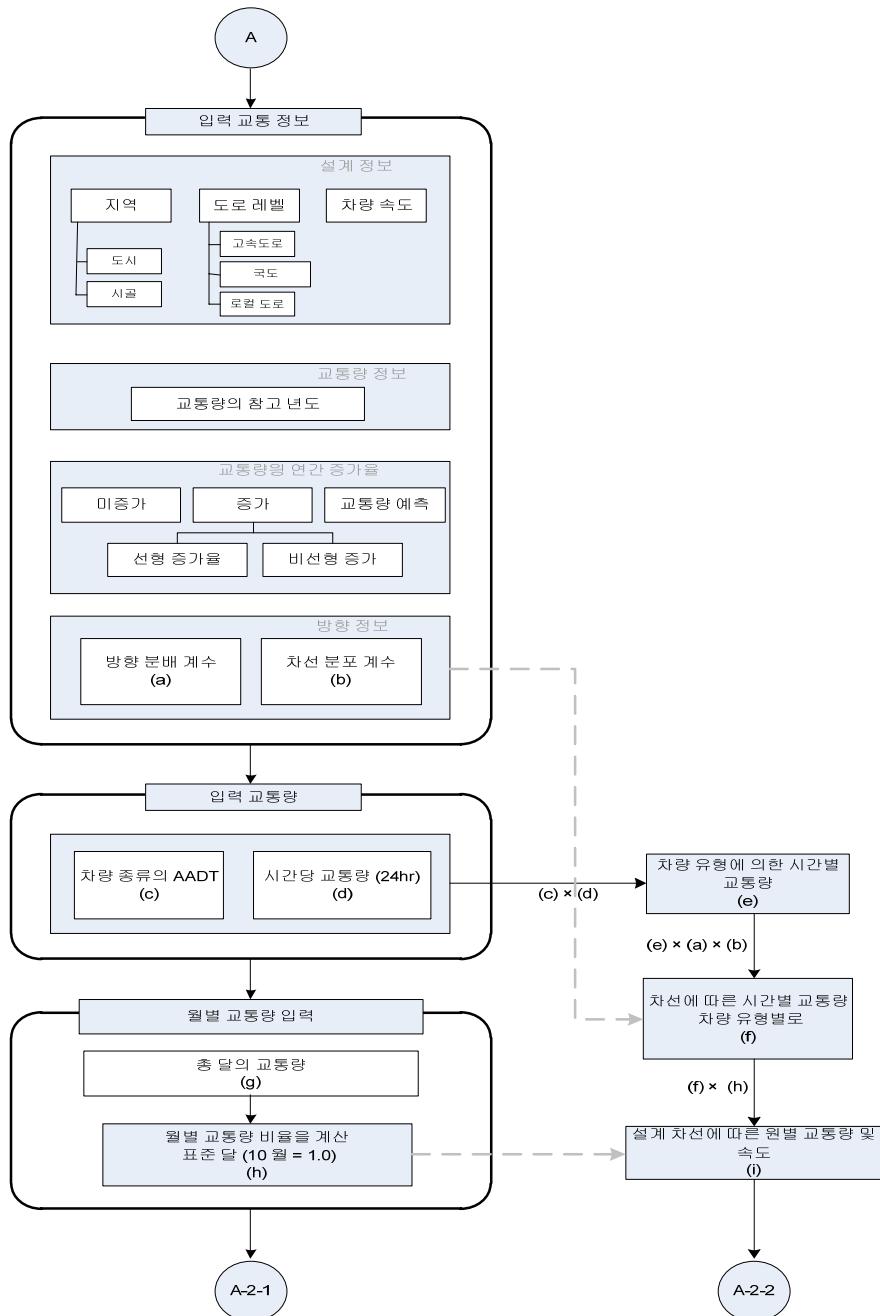
- (1) 설계 지역을 도심부, 지방부로 구분한다. 설계 대상 지역의 도로 등급을 설정하고 해당 등급에 따른 설계 속도 정보를 입력한다. 그리고 하루의 교통량 중 유사한 패턴 및 포장체 온도를 나타낼 것으로 예상되는 시간들을 그룹화한다.
- (2) 연평균 교통량 정보를 입력하고 교통량 증가율을 4가지 옵션 중에서 선택한다.
- (3) 방향 계수 및 차로 계수를 데이터 베이스에서 불러오거나 입력한다.
- (4) 각 차종별 구성비, 시간에 따른 교통량, 월별 교통량 변화율 데이터 베이스에서 불러오거나 직접 입력한다.
- (5) 각 입력 변수들을 이용하여 설계 차로의 각 차종별의 시간 및 월별 교통량을 계산한다.
- (6) 각 차종별 축하중 정보를 데이터 베이스에서 불러 들이고 이를 정보화한다.
- (7) 차종별 축하중을 각 축종류로 다시 재분류한다.
- (8) 시간에 따른 교통량 정보를 바탕으로 시간대 그룹에 해당하는 통과 축수, 하중 정보를 계산한다. 매월에 대한 정보를 산정한다.
- (9) 교통량 증가율을 고려하여 1년 단위로 교통량 증가율을 고려하여 (8)번 과정을 재계산한다. 이를 통해 설계 기간 동안의 교통량 정보 전체를 계산한다.
- (10) 설계 기간 동안의 교통량 정보를 구조해석의 입력 변수로 사용한다.

시멘트 콘크리트 포장의 경우는 (10)의 과정이후에 다음과 같은 과정을 거쳐 시멘트 콘크리트 포장 설계에 적용할 교통입력 변수를 구한다.

- (11) 시간 및 컬링 시간에 따른 교통량 정보를 바탕으로 컬링 그룹에 해당하는 각 차종의 통과 대수, 하중 정보를 계산한다. 매월에 대한 정보를 산정한다.
- (12) 상향 컬링일 경우 차량의 앞축과 뒷축의 상관관계 정보를 호출한다.
- (13) 원더링 데이터를 불러 들여 차량 및 차로폭에 따른 원더링 계수를 곱한다.
- (14) 교통량 증가율을 고려하여 1년 단위로 교통량 증가율을 고려하여 교통량을 재계산한다. 이를 통해 설계 기간 동안의 교통량 정보 전체를 계산한다.
- (15) 설계 기간 동안의 교통량 정보를 구조해석의 입력 변수로 사용한다.

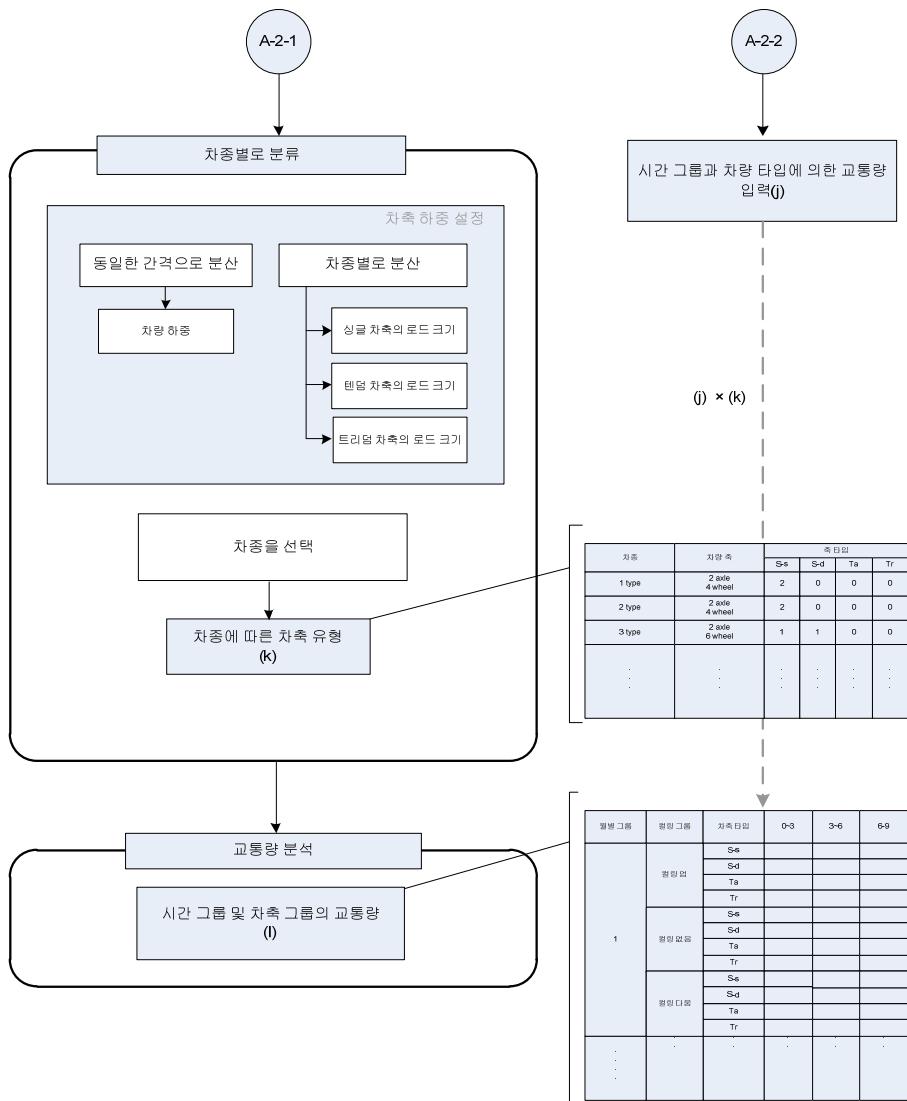
시멘트 콘크리트 포장과 달리 아스팔트 콘크리트 포장의 경우는 하중재하 속도에 따라 물성이 변화하기 때문에 이를 고려하기 위해서 (1)에서 입력한 설계속도 정보를 바탕으로 <그림3.15>에서 보여지듯이 아스팔트 각 층에서의 하중 주파수를 계산한다. 그 정보를 아스팔트 재료의 동탄성계수를 예측하는 모듈로 보낸다.

A-1



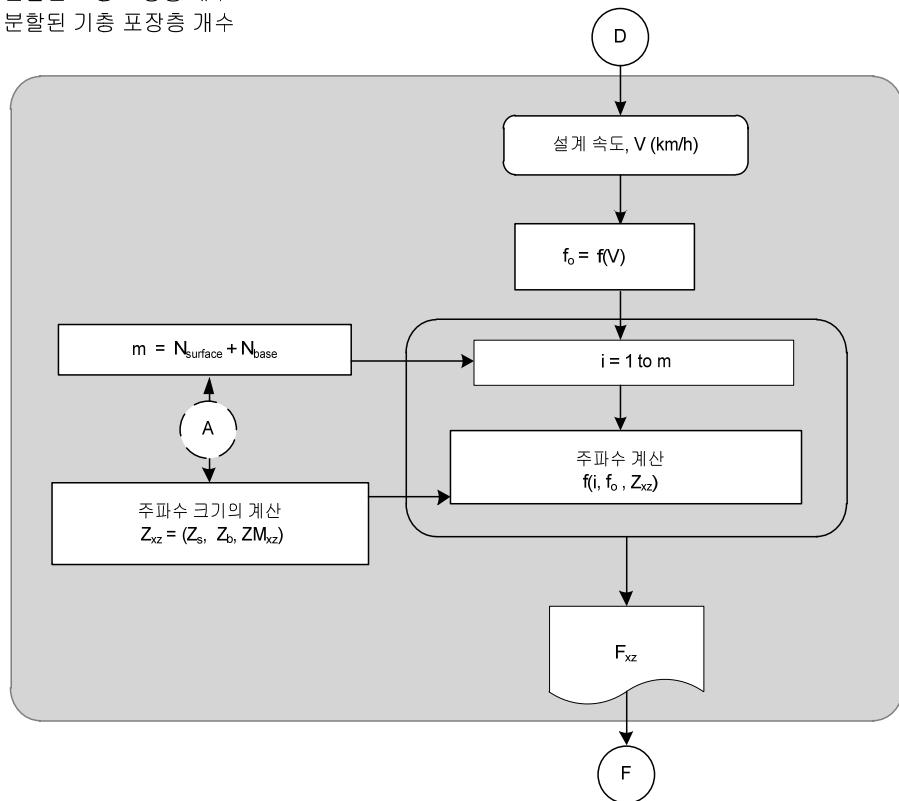
〈그림 3.13〉 도로포장 구조 설계 교통하중 로직 (1)

A-2



D

변수 정의 :

 V = 설계 속도(km/h) $F_{xz} = ZM_{xz}$ 에 의한 하중주기 $N_{surface}$ = 분할된 표층 포장 층 개수 N_{base} = 분할된 기층 포장 층 개수

〈그림 3.15〉 아스팔트 포장의 하중주파수 계산 로직



4

환경 하중

4. 환경하중

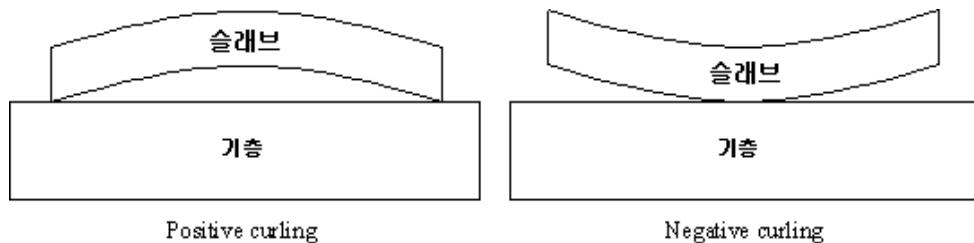
환경하중은 포장체의 온도 및 함수비 변화에 따라 포장체의 강도 저하, 노상 지지력 감소 등과 같은 포장체 물성 변화와 함께 포장체의 거동에 영향을 주는 원인이다. 이러한 환경하중을 어떻게 포장 설계에 적용하였는지를 알아보도록 하자.

포장은 건설을 시작함과 동시에 환경하중의 영향을 받는다. 이러한 환경하중은 교통하중과 같이 포장의 파손을 일으키는 직·간접적인 요인이 되므로 이와 관련된 정량화 방안은 매우 중요하다. 환경하중이 포장체에 미치는 영향은 크게 표층 및 기층 재료의 온도 변화, 하부 구조의 온도 및 함수비 영향으로 나뉜다.

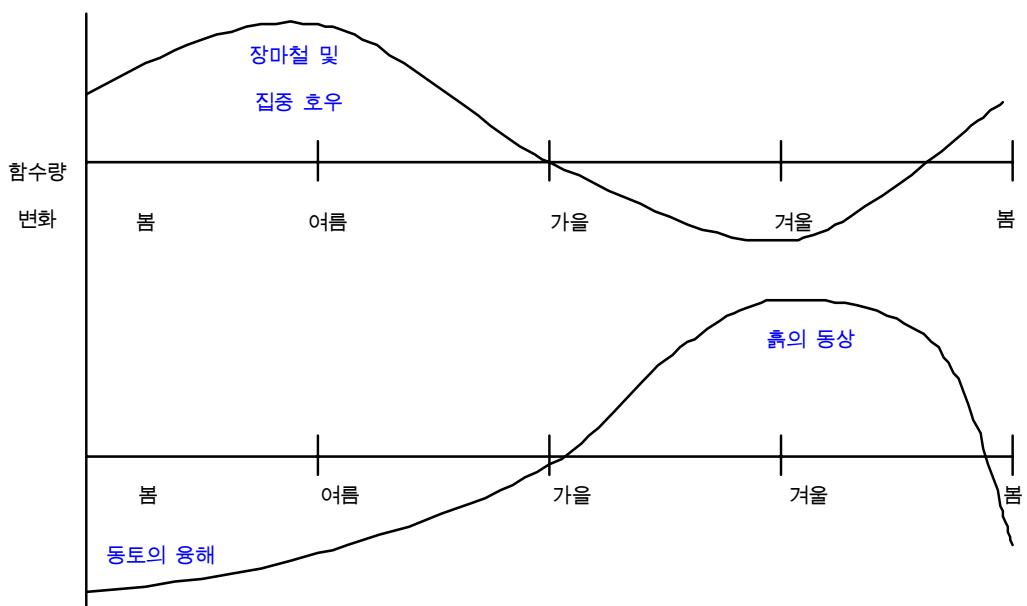
아스팔트 콘크리트 포장은 온도 변화에 따라 재료의 물성이 민감하게 변화하는 포장 형식이다. 여름철 대기 온도가 상승함에 따라 포장체 내부의 온도가 상승한다. 이에 따라 아스팔트 재료의 탄성계수가 낮아지고 포장체의 처짐량이 증가하며 혼합물의 전단 저항을 약화시켜 포장체의 파괴를 유발시킨다. 시멘트 콘크리트 포장에서는 시멘트 콘크리트 슬래브의 상·하부 온도 차 및 습도 변화에 의해 발생하는 커링 (Curling) 및 와핑(Warping)과 슬래브 전체의 평균 온도 변화에 따른 수평방향의 변위를 살펴보아야 한다. 예를 들어 <그림 4.1>에서 보듯이 낮 시간대에 양방향(+) 커링이 발생하면 종방향의 단부가 기층에서부터 들려 슬래브 중앙의 하부에 높은 응력을 발생한다. 밤 시간대에 발생하는 음방향(-) 커링은 반대로 모서리 부분이 들려 올라가 슬래브 중앙의 상부에 높은 인장응력이 유발된다. 온도 변화는 커링과 같은 수직 변화와 함께 수평 방향의 슬래브 거동을 유발시킨다. 여름철에는 슬래브 팽창으로 인해 줄눈부의 여유가 없을 시 불로우업(Blow Up)과 같은 구조적인 파손을 일으키고 겨울철에는 수축으로 인해 줄눈부 간격이 넓어져 승차감이 나빠지는 원인이 된다. 또한 슬래브의 수평 변위는 입상재료와의 마찰력으로 인해 양 끝단에서는 낮은 응력이 발생하지만 중앙부로 갈수록 큰 하중이 유발되어 중앙부에서 포장 파손을 가속화 시킨다. 따라서 시멘트 콘크리트 포장은 슬래브 상하부 온도차 및 전체의 온도 변화를 고려하여 설계에

적용해야 한다.

온도하중과 함께 포장체에 영향을 주는 또 다른 요인은 함수비로 하부층인 보조기층, 및 노상토의 지지력에 영향을 미친다. <그림 4.2>에서와 같이 겨울철에는 포장의 하부까지 동결되는 원인을 제공하고, 봄철에는 융해되어 포장 하부구조의 지지력을 약화시킨다. 또한, 짧은 기간의 집중적인 강수는 포장하부구조의 함수비 변화를 초래하여 포장 파손을 일으키는 주요인으로 작용하기도 한다.



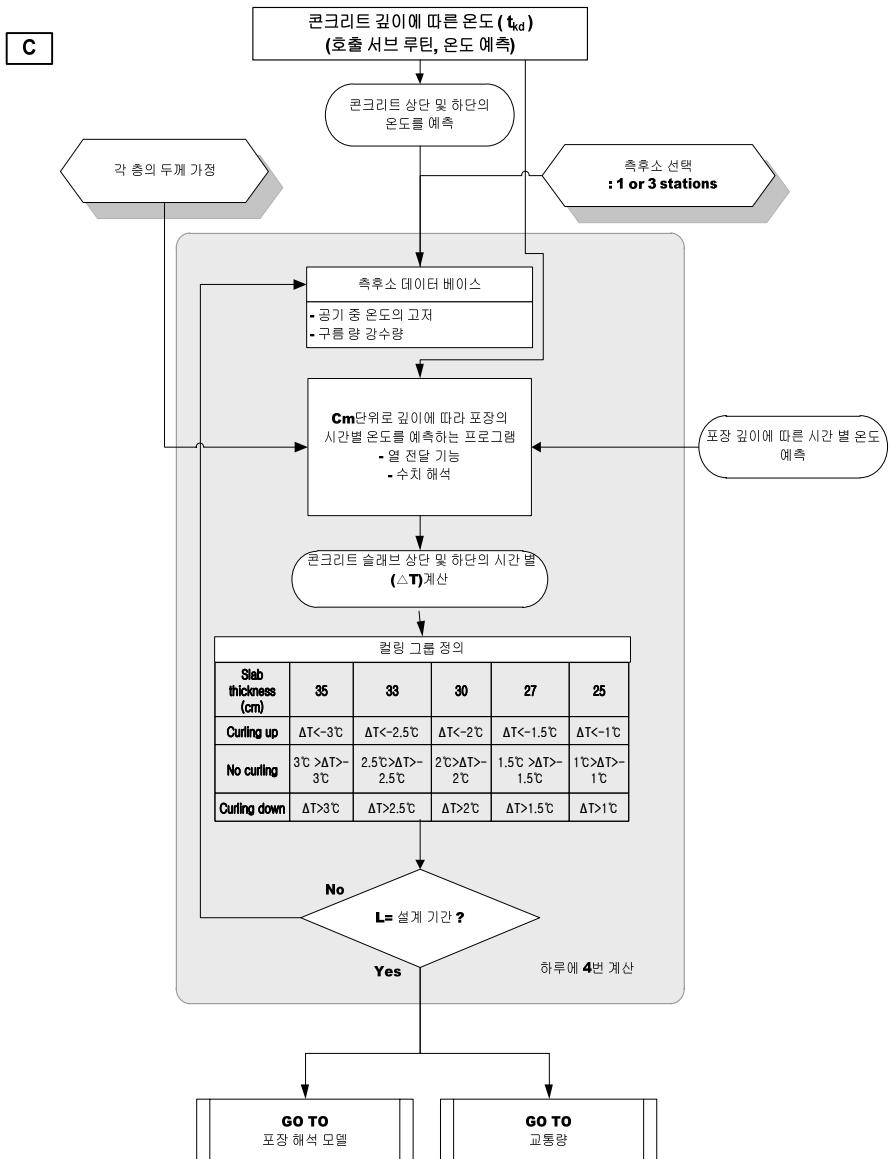
<그림 4.1> 커링(Curling)에 의한 슬래브의 거동



<그림 4.2> 계절 변화에 따른 노상의 함수비 및 탄성계수 변화

도로포장 설계에서는 환경하중의 영향은 설계수준 1과 2 모두 같은 방법을 적용하고 있으며 환경 하중을 포장체 온도와 노상 함수비 변화로 구분하여 적용한다. 포장체의 온도 예측은 “4.1 도로 포장 구조 설계의 온도 예측” 편에 기술된 바와 같이 열전도 이론과 열평형 방정식을 이용하여 개발한 온도 예측 프로그램을 통해 이뤄진다. 다음은 도로포장 구조 설계의 온도 및 함수비 예측 로직을 설명하며 보다 자세한 설명은 이후 각장에서 이루어진다.

- (1) 설계 대상 지역과 인접한 기상관측소 정보를 입력한다. 측후소 정보를 입력하면 자동으로 기상관측소의 데이터 베이스를 불러오게 된다. 매월 최고, 최저 온도, 평균 온도, 강수량을 포함한다.
- (2) 입력 변수를 이용하여 자동으로 시간대별로 포장체의 깊이에 따른 온도를 예측한다.
- (3) 아스팔트 포장의 경우 충분할 정보를 바탕으로 해당 깊이의 온도를 산정한다. 콘크리트 포장의 경우는 상하부 온도차를 근거로 하여 각 두께 조건에 따른 컬링 그룹을 구분한다.
- (4) 반복 작업을 통해 매월 포장체 온도를 계산하고 그 결과를 구조해석 모듈로 보낸다.



〈그림 4.3〉 콘크리트 포장 온도하중 로직

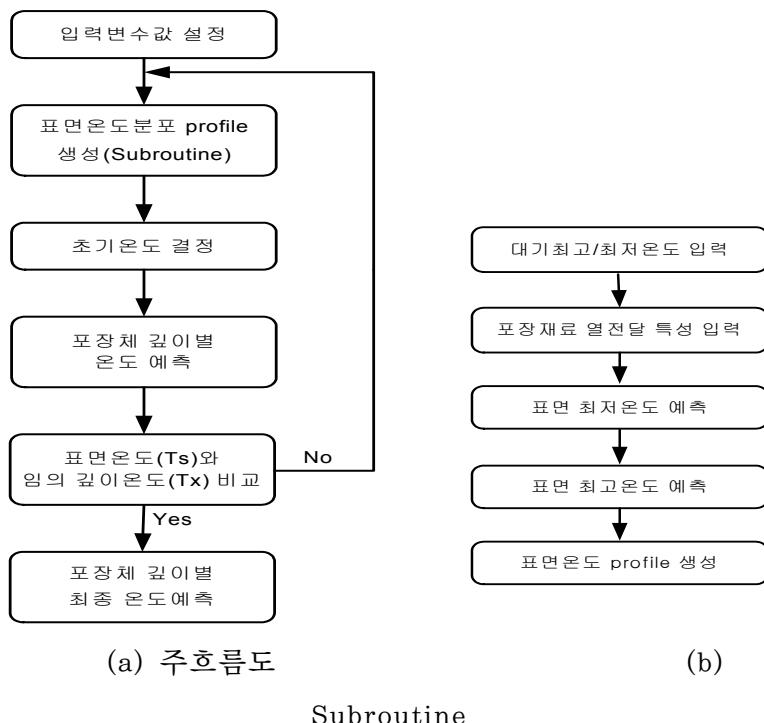
노상 함수비 변화는 “4.2 도로 포장 구조설계의 함수비 예측모형”에 기술된 3단계 함수비 모형을 이용하여 예측하며 그 일반적인 과정은 다음과 같다.

- (1) 월평균 온도, 년평균 강수량, 하부 재료의 특성을 입력한다.
- (2) 노상의 함수비를 예측한다.

- (3) 반복 작업을 통해 매월 노상의 합수비를 계산하고 그 결과를 노상탄성계수 결정 모듈로 보낸다.

4.1 도로포장 구조 설계의 온도예측

본 설계에서는 정확한 포장의 온도예측 모형을 개발하고자 포장체의 깊이별 온도분포를 고려하는 열전도이론과 열평형 방정식을 이용하여 온도예측 모형을 개발하였다. 〈그림 4.4〉는 온도예측모형의 개발 흐름도를 나타내고 있다.



〈그림 4-4〉 온도예측모형 개발 흐름도

이와 같은 방법으로 개발되는 모형의 온도예측 절차는 먼저 대기온도로부터 포장표면의 최고/최저온도를 예측하고, 이 값을 이용하여 시간변화에 따른 표면온도 Profile을 생성한다. 이렇게 생성된 Profile을 통하여

Crossing Time에서의 초기온도를 결정하고 포장 깊이별, 시간별로 포장체의 온도를 예측한다. 그리고 예측된 포장체 온도를 이용하여 표면온도(T_s)와 임의의 깊이온도(T_x)의 편차를 비교한 후 오차범위를 만족할 경우에 최종적으로 포장체 온도를 예측한다. 만일 오차범위를 만족하지 않는다면 오차범위를 만족할 때까지 앞의 과정을 반복한다.

온도 예측에 프로그램에서는 온도예측을 위한 기본 입력변수 모듈, 포장체 온도예측을 위한 main 모듈의 구성, 온도예측 결과 모듈로 구성되어 있다.

4.1.1 Input data 분석 및 계수 값 결정

온도예측모형을 개발하는데 앞서 모형에 입력되는 기본 입력자료에 대한 분석이 필요하다. 도로포장 구조 설계의 온도 예측에 이용되는 열평형방정식에 입력되는 기본 변수는 태양흡수율, Emissivity, 열확산계수, 열전도율, 전달계수, 대기복사계수, 표면열전달계수, 태양상수, 천정각 등이 있다. 기본 입력변수의 값들은 기본 범위 값에서 결정하였다. 태양에 의해 흡수되는 에너지(q_s)를 계산함에 있어 변수로 작용하는 천정각(Zenith Angle)에 대해서 다음과 같이 정리하였다. 천정각이란 태양이 위의 위치에 수평면과 어떤 각(알파)의 각도에 위치하고 있을 때 그 여각을 천정각이라고 하는데, 이 천정각은 시간에 따라서 변화하게 된다. 즉, 지구는 지축이 약 23.5° 을 어져 있으므로 지표면이 받는 일사량은 위도와 계절에 따라 변화되고, 시간에 따라 지표면과 태양광선과의 각도 또한 변하게 된다. 이러한 점을 고려하기 위해 천정각(Z)을 계산해야 하는데, 본 도로포장 구조 설계에서는 천정각에 대해서 계절별로 결정하여 모형을 개발하였다. 천정각은 (식 4.11)과 같이 결정된다.

$$\text{천정각}(Z) = \text{위도} - \text{declination angle} \quad \text{식 (4.11)}$$

여기서, 위도 : 설계하고자 하는 지역의 위도

declination angle : 태양 각도가 90° 에서의 위도

Declination angle은 (식 4.12)로 계산된다.

$$DA = \Phi_r \cos \left[\frac{2\pi(d - 173)}{d_y} \right] \quad \text{식 (4.12)}$$

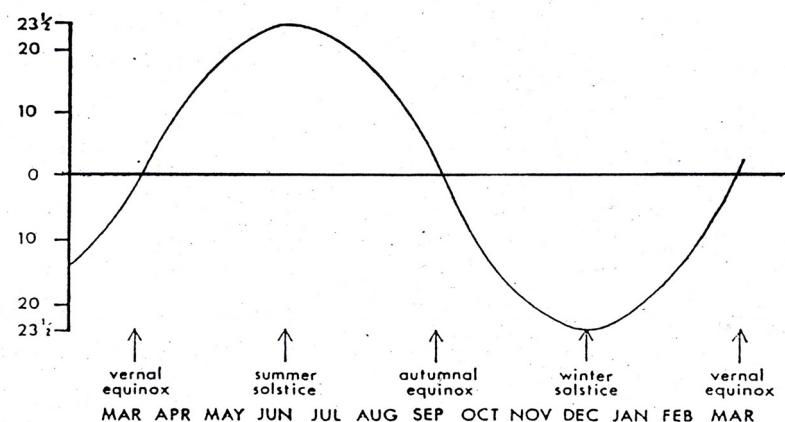
여기서, DA : Declination angle

Φ_r : 지구의 회전축의 기울기 각도

d : 지정한 날이 그 해에서 해당되는 날짜

d_y : 그 해의 총 날짜

〈그림 4.5〉는 월별로 변화되는 Declination Angle을 보여주고 있다. 본 설계에서는 〈그림 4.5〉를 바탕으로 〈표 4.1〉와 같이 계절별로 Declination Angle을 결정하였다.



〈그림 4.5〉 계절에 따른 declination angle

〈표 4.1〉 계절에 따른 declination angle

계절 항목	봄	여름	가을	겨울
Declination Angle	9.12	22.46	-12.32	-21.15

각 입력변수들에 대해 기존 값의 범위 내에서 수치를 변경하면서 계측된 자료와 가장 유사한 값을 도출할 수 있는 값을 모형을 개발하는데 적용하였다. 이 중 전달계수(τ_a)는 그 날의 기후조건(운량)에 따라서 변화되는 값으로 포장체 온도에 영향을 많이 준다. 그러나 현재 우리나라의 운량에 대해서 계측하는 곳을 조사한 결과, 2000년 이후에는 많은 지역에서 측정하고 있지 않기 때문에 현실적으로 측정하기가 곤란하다. 따라서 본 도로포장 구조 설계에서는 이 값을 중간값인 0.7을 적용하였다. 기본 입력변수들을 변경하면서 모형에 이용될 값을 분석한 결과 각 입력변수들의 값은 〈표 4.2〉과 같이 나타났다.

〈표 4.2〉 열평형 방정식 입력변수

구분	범위	적용된 입력값	
		아스팔트포장	콘크리트포장
태양 흡수율(α_1)	0.85–0.93	0.85	0.85
Emissivity(ε)	0.85–0.93	0.93	0.93
열확산계수 (m^2/hr)	아스팔트	0.0035–0.0055	0.0037
	콘크리트	0.002–0.006	
열전도율(k) (Btu/hr ft ² F)	아스팔트	0.43–1.67	1.3
	콘크리트	0.8–2.1	
전달계수(τ_a)	clear : 0.81	0.7	0.7
	cloudy : 0.62		
대기복사계수(ε_a)	day : 0.53–0.72	0.7	0.55
	night : 0.61–0.83		
표면열전달계수(h_c) (Btu/hr ft ² F)	day : 3.0–4.0	3.5	3.5
	night : 1.4–2.5		
태양상수(Btu/hr ft ²)	442	442	442

4.1.2 Input file의 생성

포장체 온도를 예측하기 위해서는 입력문의 생성이 필요하다. 프로그램에 사용되는 입력문은 〈표 4.3〉과 같이 구성된다. Input File은 총 12줄로 구성된다. 여기에서 포장층내의 온도를 예측하고자 하는 지점 수는 사용자가 설계를 위해 필요한 지점의 온도를 사용할 수 있도록 유연하게 구성하였으며, 예측 지점수에 따라서 온도가 예측되는 포장층의 깊이가 결정된다. 또한 프로그램을 운영하면 어제의 Crossing Time에서부터 오늘의 최고온도 시점 까지 온도가 예측되는데 이를 위해서 대기 최고온도(어제)와 대기 최저온도

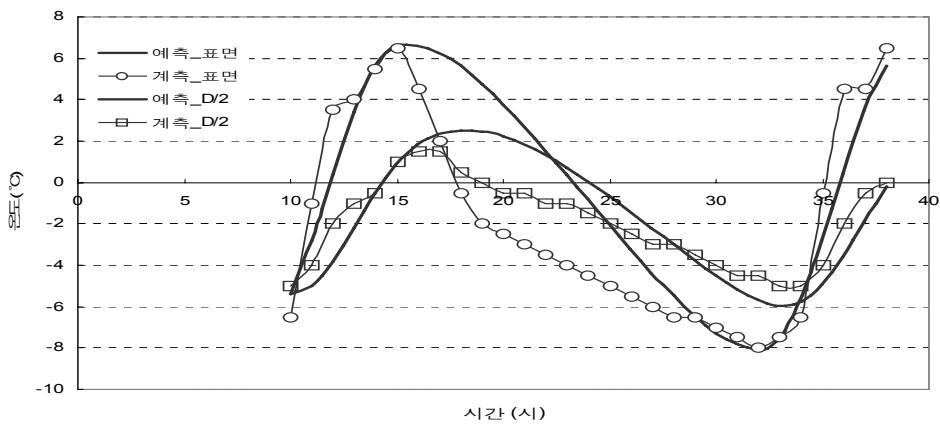
(오늘), 표면 최저온도에서의 시간(오늘)과 표면 최고온도에서의 시간(어제), 최고 표면온도에서의 시간(오늘)이 필요하다. 7줄의 포장체 임의의 깊이는 전체 포장두께(D)의 중간지점인 $D/2$ 를 입력값으로 하였으며, 초기의 온도편차 값은 최고온도는 8°C , 최저온도는 2°C 로 하였다. 이 값은 프로그램의 Iteration에 따라서 계속적으로 변경된다.

〈표 4.3〉 Input file 생성

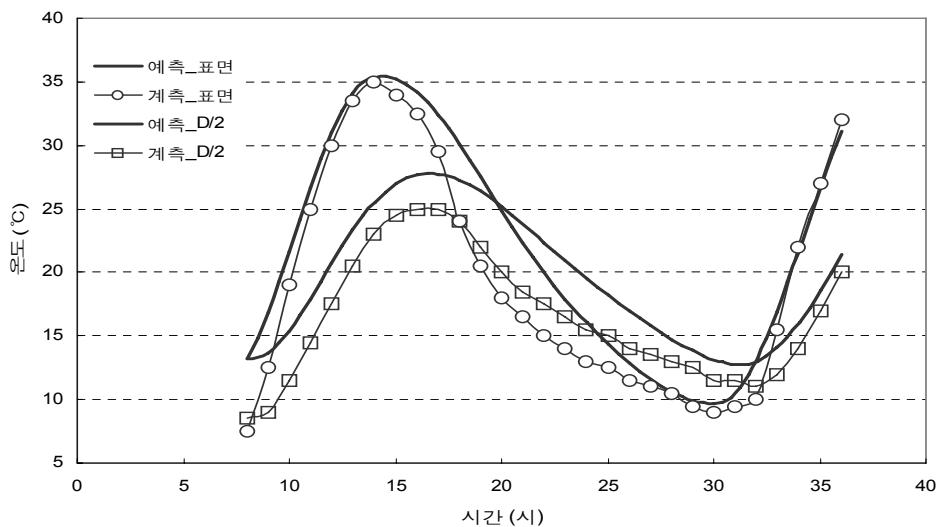
줄수	설명
1	일반정보
2	포장층내의 온도를 예측하고자하는 지점 수
3	온도가 예측되는 포장층 깊이(m)
4	Crossing time(일)
5	열확산계수
6	대기 최고온도(어제)와 대기 최저온도(오늘)($^{\circ}\text{C}$)
7	대기온도가 최고/최저인 시점에서 표면과 임의의 깊이에서의 초기 온도차
8	천정각
9	전달계수
10	태양흡수율, Emissivity, 열전도율, 표면열전달계수, 대기복사계수
11	표면 최저온도에서의 시간(오늘)과 표면 최고온도에서의 시간(어제)
12	최고 표면온도에서의 시간(오늘)

4.1.3 포장체 온도 예측결과 분석

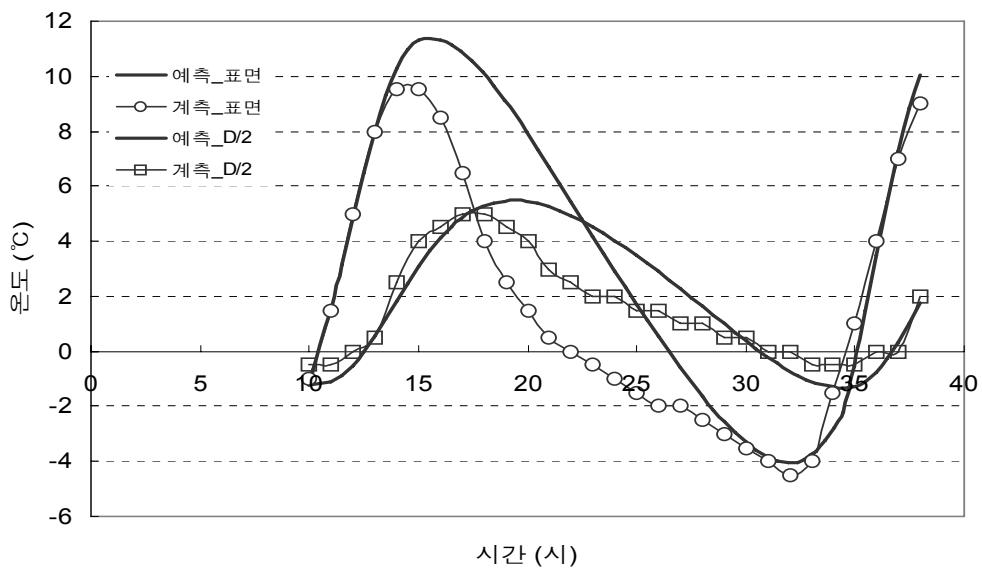
본 설계에서는 포장 표면의 최고/최저온도를 예측하기 위해 열평형 방정식을 이용하였다. 아스팔트 포장의 진부령, 충주, 성전지역에 대한 현장 실측값과 예측값은 〈그림 4.6〉 ~ 〈그림 4.9〉에서 보는 바와 같다.



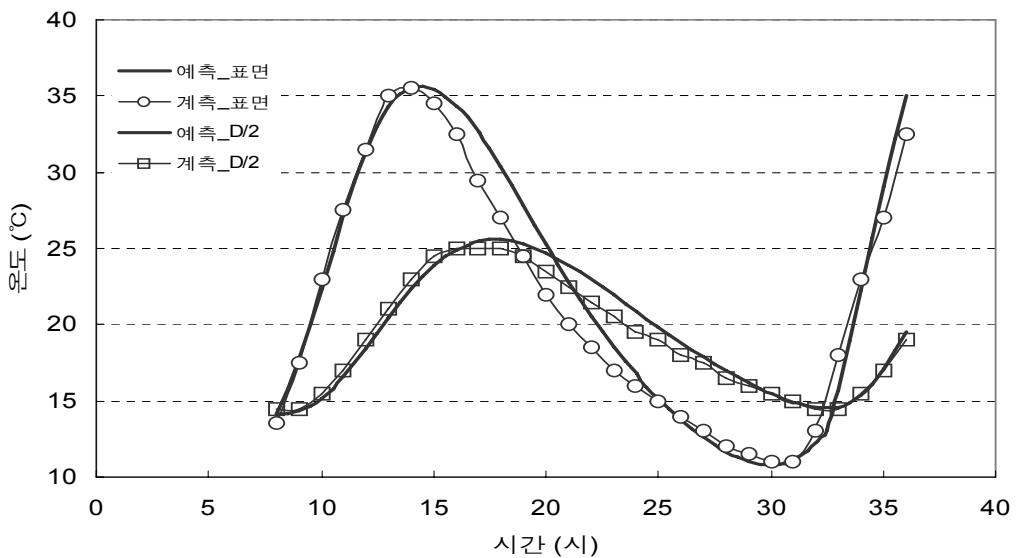
〈그림 4.6〉 진부령지역의 온도예측 결과(겨울)



〈그림 4.7〉 진부령지역의 온도예측 결과(봄)



〈그림 4.8〉 충주지역의 온도예측 결과(겨울)



〈그림 4.9〉 충주지역의 온도예측 결과(봄)

4.2 도로포장 구조 설계의 함수비 예측 모형

앞서 살펴본 바와 같이 강수량, 흙의 종류, 절·성토 여부가 노상토의 함수비 변화에 가장 큰 영향을 준다. 그러나, 우리나라처럼 산지지형이 많은 지역에서 설계시 1개 노선에서도 절·성토 구간이 계속 반복되므로 절·성토 여부에 따른 노상토의 함수비변화를 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 또한, 흙의 분류에 따른 노상토의 함수비변화도 제한된 범위의 측정 자료를 토대로 상관관계를 구하기 힘들다. 도로포장 구조 설계에서는 노상토의 함수비 변화에 가장 영향을 많이 미치는 강수량과 온도에 국한하여 함수비 영향인자로 삼고 이들 사이의 회귀분석을 실시함으로서 함수비 예측모형을 제시하였다.

4.2.1 1단계 모형

1단계 모형에서는 <표 4.4>와 같이 년간 강수량을 고려하여 각 지역을 1200mm이하, 1200mm ~ 1400mm, 1400mm이상인 3개의 지역으로 구분하고 계절별로 노상토의 함수비 변화를 계산할 때 함수비변화 가중치를 (식 4.14)와 같이 고려하도록 하였다. 이때 지역별 평균함수비는 <표 4.4>에서와 같이 3그룹으로 크게 구분($\omega_{average} = 6.7\%, 9.9\%, 14.8\%$)하였으며, 이 값에 지역별 예상 함수비증분(각각 $\Delta\omega=2\%, 4\%, 2\% \times$ 변화가중치를 더하면 예측 함수비가 계산된다. 따라서 1단계 모형은 연간 강수량, 평균함수비 및 계절별 함수비 변화가중치를 사용하여 노상의 함수비를 예측하도록 한 것이다. 그러나, 온도의 변화를 계절로 묶어서 고려함으로서 함수비의 온도에 대한 변화가 민감하지 못한 한계점을 갖고 있다.

$$\omega = \omega_{average} + (\Delta\omega \times \text{변화가중치}) \quad \text{식 (4.14)}$$

4.2.2 2단계 모형

2단계 모형에서는 우리나라의 강수지역을 1) 연강수량 1000mm이하, 2) 1000mm ~ 1500mm, 3) 1500mm이상의 3개 지역으로 구분하고 온도와 강수량을 고려하여 함수비를 구할 수 있는 모형을 아래 <표 4.5>과 같이 제시하였다. 본 모형은 1단계 모형에 비하여 온도의 영향을 함수비 예측모형에 직접 고려한 장점이 있으나, 실측한 LTPP 데이터와 예측값의 오차가 상대적으로 커졌다. 즉, 실측 함수비의 변화 대역폭이 최적함수비(OMC)대비 크게 변화하는 반면, 2단계 모형에서는 ±2% 정도로 작게 예측되었다.

<표 4.4> 1단계 모형의 노상토의 평균 함수비 및 계절별 함수비 변화 가중치

년간 강수량	$\omega_{average}$	$\Delta\omega$	계절별 함수비 변화 가중치				비 고
			3~5월 (봄)	6~8월 (여름)	9~11월 (가을)	12~2월 (겨울)	
1200mm 이하	6.7%	2%	0.25	0.3	-0.4	-0.35	월누적 강수량 250mm이하에서 적용
1200mm~ 1400mm	9.9%	4%	0.4	0.45	-0.45	-0.5	월누적 강수량 350mm이하에서 적용
1400mm 이상	14.8 %	2%	0.35	0.4	-0.3	-0.5	월누적 강수량 450mm이하에서 적용

〈표 4.5〉 2단계 함수비 예측 모형

강수량에 따른 구분	함수비 예측식
년 강수량 > 1500mm	$W = 20.1021 + 0.18354Tavg + 0.91230\log(Pmonth)$
1000mm < 년 강수량 < 1500mm	$W = 17.7475 + 0.1163Tavg + 0.79537\log(Pmonth)$
년 강수량 < 1000mm	$W = 14.3066 + 0.0654Tavg + 0.61668\log(Pmonth)$

여기서, W : 함수비, $Tavg$: 월평균 온도, $Pmonth$: 월평균 강수량

4.2.3 3단계 모형

3단계 모형은 기존의 예측모형에 비하여 정확한 예측함수비를 추출하기 위하여 한반도 남부(남한지역)를 대전을 기점으로 하여 남부지방과 북부지방으로 나누고 각 지역에 적용할 수 있는 개선된 함수비 예측모형을 제시하였다. 함수비에 영향을 미치는 영향요소 중 온도, 강수량, 노상토의 토질특성(200번체 통과량 등)등을 이용하여 비선형 회귀모형분석, 다중선형회귀모형분석 등을 거쳤으며, 이중 가장 실계측값에 가까운 분석식을 채택하였다. 그 결과, 최종적으로 〈표 4.6〉와 같은 예측식을 제안하였다.

〈표 4.6〉 개선된 함수비 예측모형

구간	함수비 예측식
남부지방	$\omega = 21.84699 + 0.09598 \times temp + 0.00064287 \times prec + 0.29130 \times P_{200}$
북부지방	$\omega = 23.54759 + 0.15216 \times temp + 0.00070721 \times prec + 0.17990 \times P_{200}$

여기서, ω : 예측함수비 (%), $temp$: 온도 ($^{\circ}\text{C}$), $prec$: 년강수량 (mm)
 P_{200} : 200번째 통과량

〈표 4.7〉 대표 3구간의 함수비 예측모형에 사용된 정보

지 역	측후소	연도별 총강수량 (mm)	최적함수비 OMC(%)	# 200 통과량(%)
개정-성산	군산	2007년 - 1655.5 2008년 - 901	11.31	19.44
두촌-어론	홍천	2007년 - 2140.8 2008년 - 2140.8	9.7	4.4
신북-양구	춘천	2007년 - 1374.9 2008년 - 1439.4	12.1	24.6

4.2.4 현장 측정값과 예측모형에 의한 함수비의 비교

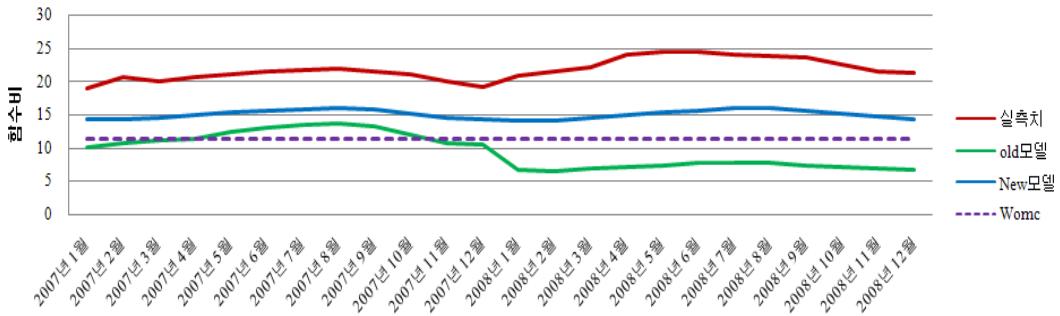
기존모형과 개선된 함수비 예측모형의 정확도를 분석하기 위하여 국도 LTPP구간에서 획득된 함수비 계측데이터와 비교하였다. 수집된 함수비는 시간별로 누적된 것으로서 월평균함수비를 구한 후 이를 2007년 1월 ~ 2008년 12월까지 총 2년간 함수비 변화를 지역별로 설정된 대표 구간별로 검토하였다. 〈표 4.7〉는 해당구간 노상토의 시공시 최적함수비 및 200번체 통과량을 근접 측후소의 정보 및 연도별 총강수량을 나타낸 것이다.

〈그림 4.10〉은 2단계(Old 모형) 및 3단계(New 모형)의 함수비 예측모형을 통해 예측한 결과와 대표구간으로 선정된 노상토의 함수비를 실측값을 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 국내 대부분의 LTPP 구간에서 획득된 함수비 측정 자료는 시공이후 함수비가 최적함수비 보다 증가하였으며, 증가후 일정 변화대역에 도달하였다. 계측값의 분석결과 대표구간을 포함한 대부분의 국도구간에서 함수비의 변화 대역폭은 시공시의 최적함수비 대비 최소 (-) 0.8 % ~ 최대 16%(+)의 변화를 보였다. 따라서 시공시의 최적함수비 보다 감소되는 경우는 매우 드물었고 대부분 증가하고 증가한 이후 일정 싸이클을 따라 변화하는 특징을 보였다.

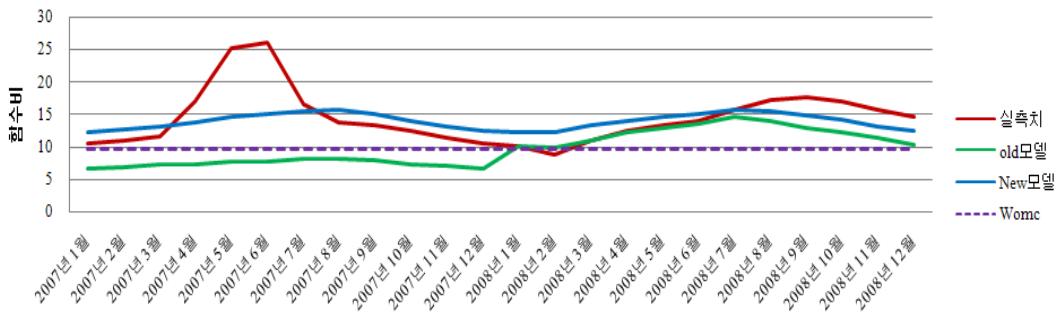
전체적으로 3단계 함수비 예측모형이 모든 구간에 대해서 실측값에 가까운 예측결과를 보인 반면, 2단계 예측모형은 최적함수비 보다 작게 예측하는

경우도 발견되며 전체적으로 실측값에 비하여 크게 작은 예측결과를 보였다.

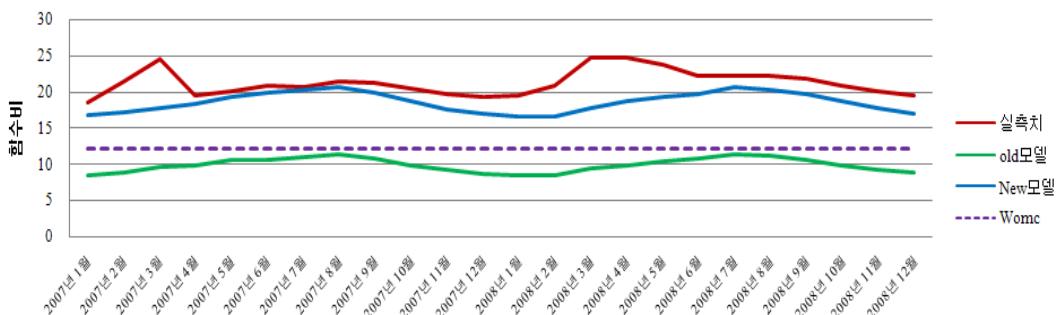
개정-성산간



두촌-여론간



신북-양구간



〈그림 4.10〉 실측값과 모형값 함수비 비교

4.2.5 노상 함수비 변화와 탄성계수와의 상관성

노상 함수비 변화에 따른 노상탄성계수의 변화정도를 파악하기 위하여 2단계(KICT 모형 함수비) 및 3단계(NEW 모형 함수비) 함수비 예측 결과를 탄성계수 예측식(식 4.15)에 반영하여 그 결과를 비교하였다. 대상 도로 현장은 남해안(부산), 서해안(목포)에 위치한 국도이며, LTPP자료에 나타난 하부층의 재료물성값을 이용하였다. 예측식에 따른 함수비 변화 및 탄성계수 변화는 <그림 4.11>, <그림 4.12>과 같다.

$$E = k_1 \theta^{k_2} \sigma_d^{k_3} 10^{k_w(\omega - \omega_{opt})} \quad \text{식 (4.15)}$$

여기서, k_1, k_2, k_3 = 탄성계수 결정모형의 모형계수

θ = 체적응력(= $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa)

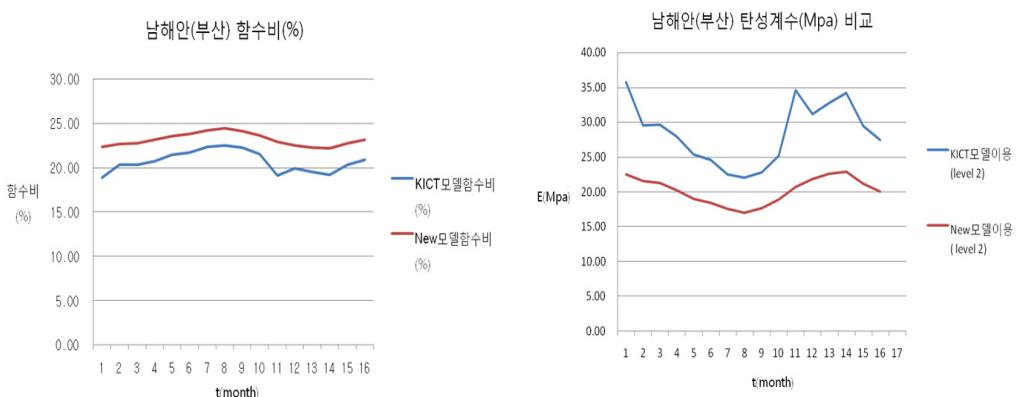
σ_d = 축차응력(= $\sigma_1 - \sigma_3$) (kPa)

w_{opt} = 최적함수비 (%)

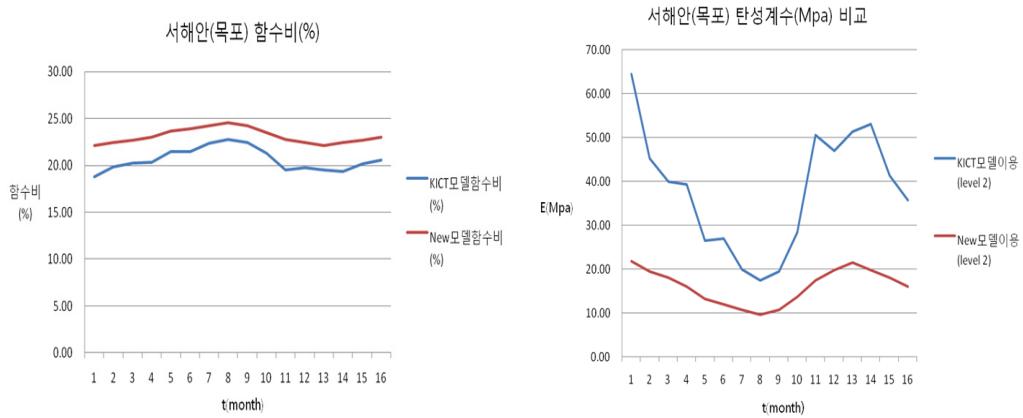
w = 함수비 (%)

$k_w = -0.1417$ (조립질 노상토)

-0.0574(세립질 노상토)



<그림 4.11> 함수비 변화에 따른 탄성계수 변화 비교(남해안)



〈그림 4.12〉 함수비 변화에 따른 탄성계수 변화 비교(서해안)

그림에서 알 수 있듯이 2단계 예측 모형의 함수비가 상대적으로 낮게 평가되어 3단계 예측 모형보다 탄성계수를 과대평가하는 것으로 나타났다.



5

입상재료

5. 입상재료

입상재료 혹은 흙은 도로 건설의 기초가 되는 것으로 매우 중요한 기초 재료이며 종류에 따라 그 특성 또한 다양하게 정의된다. 포장체 일반적으로 흙 위에 놓이는 토목 구조물이므로 흙의 특성은 도로의 성능과 공용성에 영향을 준다. 실제로 흙의 건조, 포화 상태에 따라 포장 거동에 미치는 영향은 다르다. 따라서 관련 연구를 통해 흙의 종류를 액성지수, 소성지수 등과 같은 경험적인 시험법을 통해 구분하고 있으며, 대표적인 구분 방법으로는 AASHTO 흙분류와 통일 분류법이 있다.

포장 구조 설계에서는 흙에 대한 시험법을 고안하여 이를 바탕으로 흙의 종류 및 기타 변수에 따른 흙의 물성 정의 및 모형을 개발하여 반영하고 있다. 대표적인 흙의 물성값으로 CBR, M_R , R, K, 탄성계수 등을 사용하고 있으며 기타 방법으로 N 값, 군지수 등이 있다. 실제 기준의 AASHTO 설계에서는 포장형식마다 포장 두께 산정을 위한 각각 다른 물성값을 사용하고 있다. 아스팔트 콘크리트 포장은 M_R (회복탄성계수)값을 설계에 사용하는 반면 시멘트 콘크리트 포장에서는 K(노상 지지력계수) 값을 사용하고 있다. 최근에는 기존의 경험적인 물성에 대한 한계를 인식하고 역학적인 접근 방법이 시도되고 있다. 도로포장 구조 설계에서는 흙을 정량화하는데 있어 설계 수준에 관계없이 역학적 방법을 이용하여 물성을 정량화하였고, 그 값을 간접적으로 추정할 수 있는 예측식을 사용하고 있다.

5.1 입상재료의 물성 시험법

포장의 상부 구조를 지지하는 흙의 물성을 정의하는 것은 매우 중요하다. 본 교재에서는 과거의 경험적인 흙의 물성 정량화 시험법에서부터 현재 사용되고 있는 역학적 이론에 근거한 시험법에 이르기까지 살펴보았다. 경험적인 시험법은 구성 방정식이 없으며 흙의 상태, 재료, 시료 크기 등에 따라 그 값이 달라진다. 반면 역학적인 시험법은 물성에 대한 기본 구성 방정식이

있으며 이 식의 변수들을 결정하기 위해 시험을 수행한다.

5.1.1 경험적인 시험법

(1) California Bearing Ratio(CBR)

CRB은 일반 CBR, 수정 CBR, 설계 CBR로 대분된다. 일반 CBR 시험은 O.J Porter 가 최초로 연구하고 그 후 미국 캘리포니아 주의 도로국 및 미 공병단을 거쳐 정립된 토질 시험법이다. 이 시험법은 시공 기술자들의 경험을 바탕으로 현장에서 간단한 시험 도구를 이용하여 흙의 지지력 및 특성을 정의하는 경험적인 방법으로 직경 50 mm의 철재 원형 관입봉을 1 mm/분의 속도로 시험토에 관입시킨다. 최종 2.5mm 관입될 때까지의 하중과 관입 깊이와의 관계로부터 표준 하중에 대한 백분율로 나타낸다.

$$\text{CBR}(\%) = \frac{\text{시험 하중}}{\text{표준 하중}} \times 100 \quad \langle \text{식 5.1} \rangle$$

CBR 산정 방법은 AASHTO에서 제안한 방법과 국내에서 사용하는 방법이 다르다. 시험 방법의 차이로 인해 시험 결과도 다르게 나타나기 때문에 AASHTO에서 제안한 흙의 CBR 값을 국내에 직접 적용하는 것은 문제가 있다. CBR 시험은 현장의 토지 조건, 다짐방법 등을 반영하기 어려워 현장에서 직접 적용하기 힘들다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 고안된 것이 수정 CBR 시험으로 다짐 에너지에 따른 CBR 값을 설계에 이용하는 방법이다. 수정 CBR 을 결정하기 위해서는 일반 CBR 시험을 바탕으로 최적함수비와 다짐 건조밀도의 그래프, 다짐 건조밀도와 다짐도에 따른 CBR 그래프를 작성한다. 시료의 다짐 건조밀도에 상응하는 다짐곡선 그래프의 교점에서 CBR 값에 선을 그은 값이 수정 CBR 이다. 설계 CBR 시험은 현장에서 아스팔트 포장의 두께 설계를 결정하기 위해 사용되는 노상의 지지력 평가 시험법이다. 시험 방법은 노상이 완성되어 있는 상태에서 지지력을 평가하는 것으로 자연함수비 상태에서, 노상에 사용할 토취장일 경우에는 다짐 최적 함

수비 상태에서 입경 40mm 이상은 제거하고 몰드에 3층으로 나누어 각층을 67 회씩 다진다. 다짐한 시편을 4일간 침수한 후에 CBR 값을 구한다. 극단적인 토질변화가 없는 범위 내에서 설계 대상구간 내의 CBR 측정 지점수나 혹은 시험 개소수로서 설계 CBR을 결정한다. 표준 편차를 모르거나 적은 수의 시료에 대한 측정시, 즉 n 개의 측정 CBR 개수에 대해서는 통계적 상수 (C)를 이용하여 설계 CBR 값을 결정하기도 하며, 이러한 경우는 포장층의 두께를 과대 설계할 수 있는 문제가 있다. 이상 CBR 값은 경험적으로 흙의 물성을 정량화하는 시험법으로 비교적 간단하고 저렴하다는 장점이 있지만 흙의 전단력은 파악하지 못하고 실험자의 숙련도에 따라 그 결과가 달라지는 단점이 있다.

(2) 노상 지지력 계수(K 값)

노상 지지력 계수는 일반 노상 지지력 계수와 수정 노상 지지력 계수로 구분된다. 평판재해 실험은 AASHTO 설계에서 콘크리트 포장의 하부 지지력 계수를 산정하는 일반적인 방법이다. 시험 절차는 다음과 같다. 먼저 휨에 의한 영향을 최소화하기 위해서 직경 30, 40, 76 cm 평판을 쌓는다. 그 위에 현장의 장비를 이용하여 하중을 재하하고 평판 끝단의 3위치에서 처짐을 측정한다. 1분 동안의 처짐량이 3회 연속 0.025 cm (0.01 in) 이하가 될 때 까지 압력이 69 KPa (10 psi)의 하중을 가한 후 다이얼 게이지 3개의 평균을 측정하여 처짐량을 결정하고 <식 5.2>와 같이 일반 K 값을 산출한다.

$$k = \frac{P}{d} \quad \langle \text{식 } 5.2 \rangle$$

여기서, P : 평판에 재하한 압력(KPa)

d : 평판의 처짐량 (cm)

평판재하시험 K 값을 얻기 위해 실시하는 현장에서 직접 수행하기 때문에 일회성 측정법이며 공용기간 동안 발생하는 흙의 지지력 변화를 측정하지

못한다. 즉, 포장 공용기간 동안에 발생하는 가장 나쁜 토질 상태 및 토질의 특성 변화, 함수비 변화 등을 고려하지 못한다. 국내에서는 평판의 하중 재하판의 반경이 다른 경우 다음과 같은 식을 이용한다.

$$K_{75} = \frac{1}{2.2} K_{30} = \frac{1}{1.7} K_{40} = \frac{1}{1.3} K_{50} \quad \langle \text{식 5.3} \rangle$$

하지만 위 식은 하중재하시 재하판의 휨에 의해 평판에 동을 크기의 압력이 재하되지 않아 실제 흙의 지지력을 과소 평가할 수 있는 단점이 있다. 일반 K 값은 앞에서 언급한 바와 같이 공용기간 동안 흙의 변화를 모사할 수 없기 때문에 포장 구조 설계에 사용하기 위해 흙의 상태변화를 모사하는 시편을 제작하여 K 값을 산출하고 현장의 값을 보정한 수정 K 값을 사용하여야 한다. 시편은 69 KPa 의 압력하에 침하 및 크리프 시험을 하고 처짐이 공학적 판단하에 매우 작게 발생할 때까지 각 시간 및 시료 상태에 따른 다양한 처짐 d 를 구한다. K 값의 보정은 다음과 같은 방법으로 보정한다.

$$k_s = \frac{d_u}{d_s} k_u \quad \langle \text{식 5.4} \rangle$$

여기서, d_u : 불포화토 혹은 현장 상태의 처짐량

d_s : 포화토의 처짐량

K_u : 불포화토 혹은 현장 상태의 노상 지지력 계수

K_s : 포화토의 노상 지지력 계수

하지만 평판 재하 시험은 흙사이의 전단력을 고려하지 못하고 자연 상태의 흙과 현장의 흙의 흐트러진 정도를 고려하지 못하며 암반의 위치에 따른 영향이 크다는 단점이 있다. 또한 시험 시간이 오래 걸리고 비용이 많이 들기 때문에 CBR 값으로부터 유추하여 사용하기도 한다.

5.1.2 역학적인 시험법

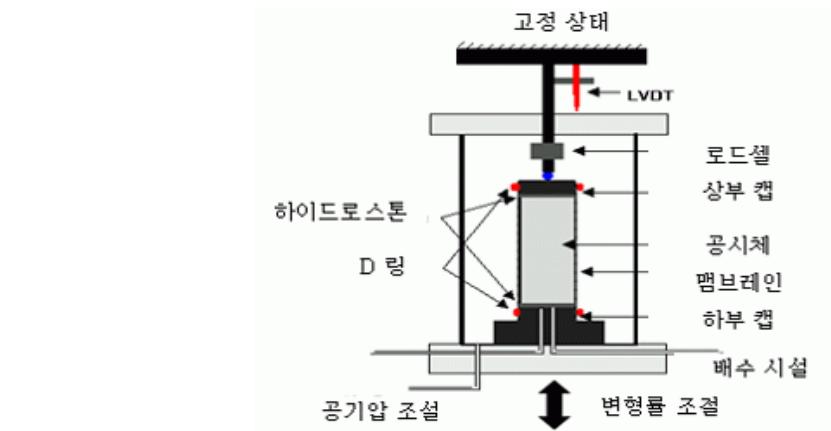
흙의 역학적인 대표 물성은 탄성계수이다. 탄성계수는 포장재료의 응력-변형 상태를 반영한 특성값으로서, 역학적인 포장설계 및 해석에 기본이 되는 물성값이며, 포장재료의 특성을 가장 합리적으로 반영할 수 있다고 평가한다. AASHTO 포장 설계에서 탄성계수를 입력 물성값으로 적용한 이후, 포장 구조 설계 및 해석뿐 아니라 포장 평가, 유지관리 등에도 이를 이용하는 방법이 보편화 되어가고 있다.

(1) 회복탄성계수시험

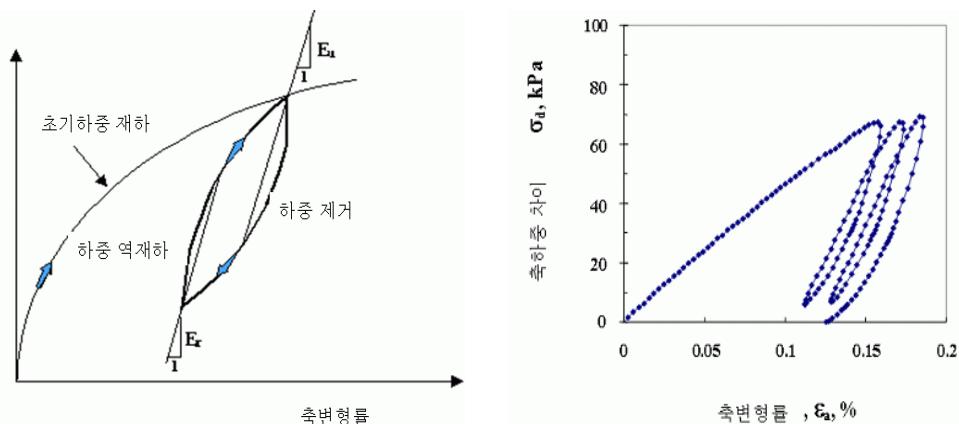
회복탄성계수시험은 실제 포장체가 경험하는 응력조건 중 수평방향의 응력은 일정하고 축방향 응력이 차량의 통과에 따라 일정한 주기를 갖는 반정현파형의 축차응력으로 모사하는 시험 방법이다. 노상토 및 보조기층 재료가 경험하는 변형율 크기는 $10^{-2} \sim 10^{-1}\%$ 범위에 있으므로 $10^{-2}\%$ 변형률 범위까지 신뢰성 있는 시험이 가능하도록 전기식 LVDT 와 로드셀(Load Cell)을 사용하여 하중과 변위를 측정한다. <그림 5.1>은 회복탄성계수 측정 시험의 개념도를 나타낸 것이다.

하중 재하-역재하를 포함한 일반적인 회복탄성계수시험에서는 <그림 5.2>와 같은 응력-변형률 곡선을 얻게 된다. 응력-변형률 곡선에서 재하가 시작되는 점을 기준으로 한 응력-변형률 곡선의 기울기로부터 재하 단계의 변형률 크기에 따른 할선탄성 계수(Er)를 결정할 수 있다. 마찬가지로 역재하가 시작되는 점을 기준으로 역재하 단계의 변형률 크기에 따른 할선탄성 계수(Eu)를 결정할 수 있다. 이때 변형률 크기는 재하가 시작되는 점 또는 역재하가 시작되는 점으로부터 할선탄성 계수가 결정된 점 사이의 변형률 차이이다. 일반적으로 약 1000 회 하중 재하를 반복했을 때 고정된 기울기가 나오며 이를 바탕으로 회복탄성계수를 산출 할 수 있다.

일반적으로 반복재하식 회복탄성계수 시험기는 축차하중 파형의 엄밀한 재하를 위하여 폐합식(Closed Loop)으로 하중신호를 제어하기 때문에 장비의 가격이 고가이고, 시험장치를 다루는데 고도의 숙련된 기술을 필요로 하는 단점이 있다.



〈그림 5.1〉 회복탄성계수 측정 장비



〈그림 5.2〉 회복탄성계수 시험에서의 탄성계수 결정

5.2 하부 재료의 물성 모형

국내도로포장의 입상재료는 일반적으로 널리 사용되는 노상토 및 보조 기층재료를 이용하였으며 삼축압축시험을 통해 각 재료의 물성모형을 개발하였다.

5.2.1 도로포장 구조 설계의 입상충 물성

양질의 국내 입상충 재료를 정량하여 도로포장 구조 설계에 반영하기 위해서는 크게 두 가지 부분으로 나뉜다. 포장 거동해석을 위한 설계입력변수와 하부구조 환경영향 평가를 위한 입력변수로 대별된다. 도로포장 구조 설계에서는 역학적 포장 거동해석을 기본으로 하고 있으며, 따라서 포장 거동해석을 위한 기본 설계입력변수는 탄성계수와 포아송비이다. 탄성계수는 도로포장 구조 설계에서 새롭게 제안하고 있는 시험기법 또는 경험 모형을 통하여 결정할 수 있다. 한편 포아송비는 실험을 통하여 결정하기 매우 까다로울 뿐 아니라 포장 구조해석에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 설계에서 제안하는 일정한 값을 사용한다. 포장 하부구조의 특성을 변화시키는 환경요인은 온도와 함수비이다. 본 도로포장 구조 설계는 동상방지층의 사용, 노상토로물의 유입 차단, 또는 노상토에 비동상성 재료 적용 등의 방법으로 노상토의 동결 자체를 억제하거나 동결이 발생한 경우에도 동상이 발생되지 않는 조건을 전제로 개발되었다. 따라서 포장 구조 설계에서는 하부구조 재료의 환경적인 요인으로 함수비 변화만을 고려하고 있다.

입상재료는 노상, 보조기층, 쇄석기층에 대한 물성으로 구분되며 이후 각장에서 세부적으로 설명될 것이다. 재료 물성 산정은 “5.2 입상재료의 물성 모형”에 세부적으로 설명된 내용으로 노상의 탄성계수 산정식을 계산하는 과정은 〈그림 5.3〉 및 다음 내용과 같다.

- (1) 체가름시험, 다짐시험, 최적함수비, 최대건조단위중량, 균등계수, #200 통과량 시험을 한다.
- (2) 탄성계수를 결정하고자 하는 응력단계 설정
- (3) (1)의 결과를 통해 정규화 입력물성치 계산한다.
- (4) 인공신경망 이론을 통해 정규화탄성계수를 계산한다.
- (5) 해당 응력 단계의 탄성계수 계산한다.
- (6) 다음 응력단계를 선정하고 (3)~(5) 과정을 반복한다.
- (7) 예측결과를 회귀분석하여 구성모델의 계수를 결정한다.

- (8) 결정된 계수들을 바탕으로 최적의 탄성계수를 결정한다.
- (9) 최적 탄성계수를 기본으로 하여 함수비와 흙 조건에 따른 물성을 고려하여 노상탄성계수를 최종적으로 결정한다.
- (10) 반복 계산을 통해 매월로 노상 탄성계수를 산정하고, 그 결과를 구조해석 모듈로 보낸다.

B1Inputs : OMC, r_{dmax} , C_u , #200 pass, σ_o , σ_d

변수 정의

OMC = 최적 함수비

 r_{dmax} = 골재의 최대 건조 단위 중량 C_u = 골재의 곡률계수

#200 pass = 골재의 #200체 통과 백분율(%)

 $E_{subgrade,m}$ = 보조기층 탄성 계수(MPa) k_i = 탄성 계수 모델에서의 계수

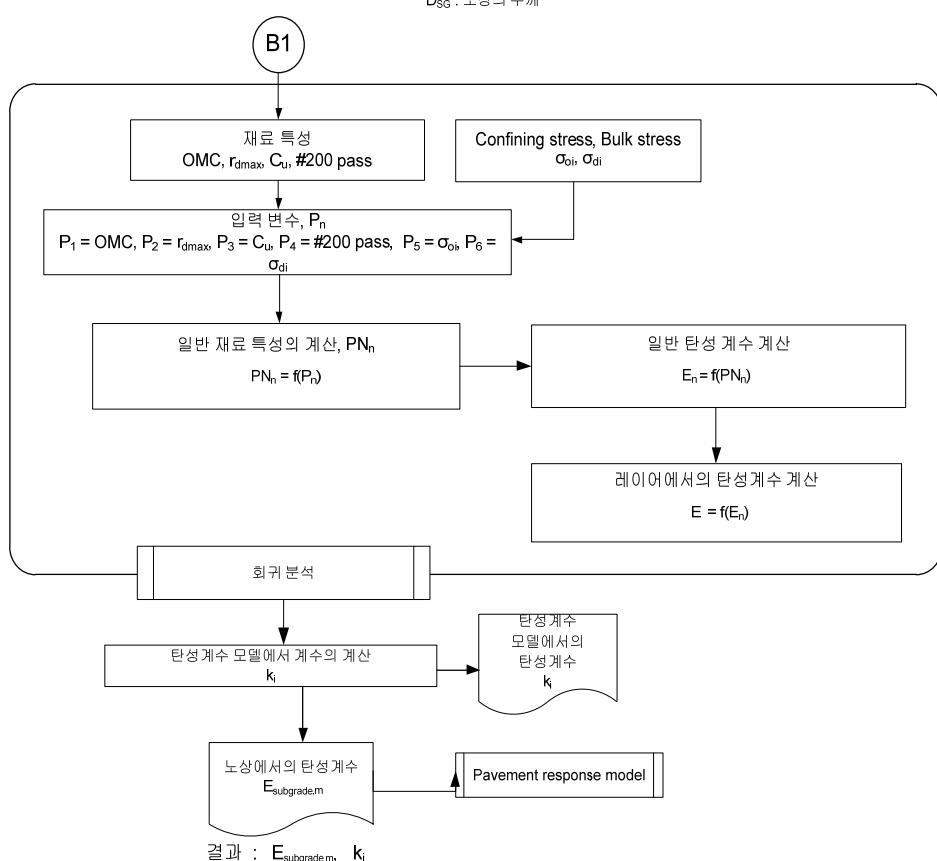
DSURF : 콘크리트 슬래브의 두께

DLEAN : 틴 콘크리트의 두께

DBB : 블랙베이스의 두께

DSB : 보조기층의 두께

DSG : 노상의 두께



〈그림 5.3〉 노상 탄성계수 결정 로직

〈그림 5.4〉의 보조기층의 탄성계수 산정식을 계산하는 과정은 다음과 같다.

- (1) 체가름시험, 다짐시험, 최대건조단위중량, 균등계수, #4 통과량 시험을 한다.
- (2) 탄성계수를 결정하고자 하는 응력단계 설정
- (3) (1)의 결과를 통해 정규화 입력물성치 계산한다.
- (4) 인공신경망 이론을 통해 정규화탄성계수를 계산한다.
- (5) 해당 응력 단계의 탄성계수 계산한다.
- (6) 다음 응력단계를 선정하고 (3)~(5) 과정을 반복한다.
- (7) 예측결과를 회귀분석하여 구성모델의 계수를 결정한다.
- (8) 결정된 계수들을 바탕으로 최적의 탄성계수를 결정한다.
- (9) 보조기층은 월별 변동성을 고려하지 않기 때문에 한번만 계산한 후 그 결과를 구조해석 모듈로 보낸다.

쇄석기층의 경우는 인공신경망 이론을 사용하지 않고 직접 예측식을 이용하여 물성을 평가한다. 이때 필요한 입력 변수로는 “최대건조단위중량, 최적함수비, 곡률계수, 균등계수, #4체 및 #200체 통과률, 50% 통과률에 해당하는 입경, 95% 통과률에 해당하는 입경”이 있다.

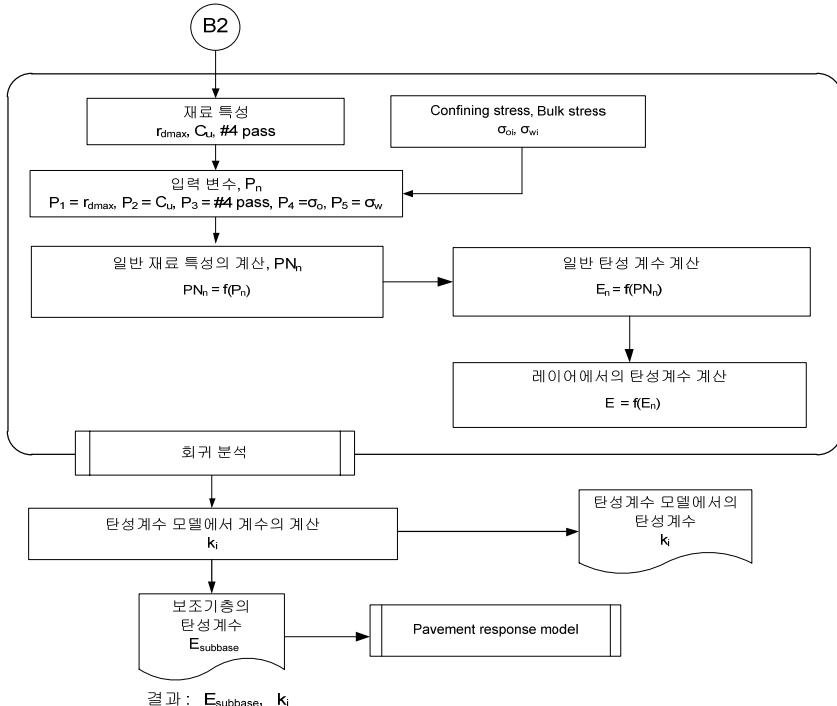
B2

입력 : r_{dmax} , C_u , #4 pass, σ_o , σ_w

변수 정의

 r_{dmax} = 골재의 최대 건조 단위 중량 C_u = 골재의 곡률계수

#4 pass = #4체를 통과하는 누적통과 백분율 (%)

 $E_{subbase}$ = 보조기층의 탄성계수 (Mpa) k_i = 탄성계수 모델에서의 탄성계수

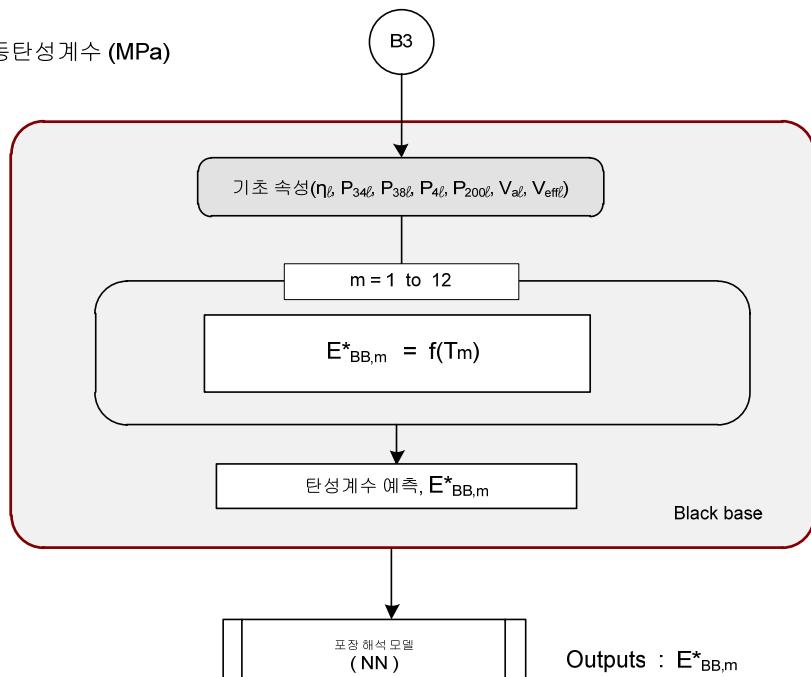
〈그림 5.4〉 보조기층 탄성계수 결정 로직

아스팔트 안정처리기층의 물성을 〈그림 5.5〉과 같이 아스팔트 콘크리트 포장 설계의 로직을 도입하였다.

- (1) 아스팔트 바인더 점도, 하중주파수, 공극률, 유효아스팔트바인더의 함량, 20 mm, 10 mm, 5 mm 체의 누가잔류량 및 0.08mm 체의 통과량을 실험을 통해 산정한다. 교통하중에서 설계속도에 따른 각 층의 하중 주파수를 계산한다.
- (2) 각 입력 변수들을 예측식에 대입하여 동탄성계수를 예측한다.
- (3) 동일한 방법으로 1년 동안의 매월 동탄성계수를 예측한다.

B3

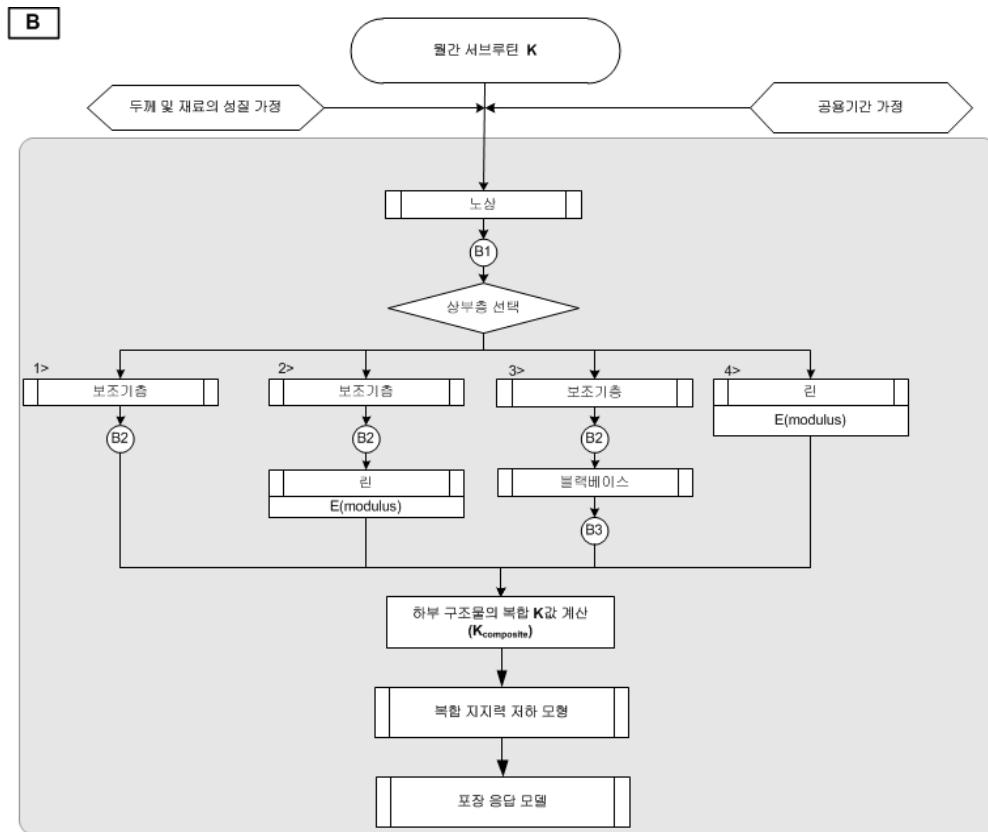
변수 정의

 $E^*_{BB,m}$ = 월별 예측 동탄성계수 (MPa) T_m = 월별 평균 기온

〈그림 5.5〉 아스팔트 안정처리기층(블랙 베이스) 탄성계수 결정 로직

아스팔트 콘크리트 포장과 달리 시멘트 콘크리트 포장에서는 각 층의 탄성계수를 직접 사용하는 것이 아니라 〈그림 5.6〉과 같이 복합 지지력 계수로 환산하여 구조적 거동을 해석하는데 사용한다.

- (1) 설계 시 입력한 각 층의 조합, 두께 정보를 불러들이고 각 층의 계산된 탄성계수를 불러온다.
- (2) “5장 입상재료”에 기술된 4가지 하부 층조합 조건에 대하여 해당 설계에 맞는 복합 지지력을 자동 산출한다.
- (3) 노상 지지력 저하모형을 이용하여 해석 기간이 증가함에 따라 하부 층의 구조적 지지력이 저하되는 것을 고려한다.
- (4) 설계 기간동안의 하부 지지력을 계산하여 구조해석 모듈로 전달한다.



D_{LEAN} : 리엔 콘크리트 두께
 D_{AP} : 블랙층의 두께
 D_{SB} : 서브레이스의 두께
 D_{SG} : 노상의 두께
 E_{LEAN} : 린 콘크리트 탄성계수
 E_{BB} : 블랙레이스의 탄성계수
 E_{SB} : 서브레이스의 탄성계수
 M_R : 노상 탄성계수

변수 정의
 K_i = 면수
 od = deviator 응력
 Θ = 풀물 응력
 L = 디자인 레벨

〈그림 5.6〉 콘크리트 포장 복합 지지력 산정 로직

국내 하부구조 재료의 품질에 대한 요구조건을 시방서에서 규정하고 있기 때문에 대체적으로 매우 우수한 재료가 사용된다. 노상토의 품질 기준은 소요의 다짐도에서 요구되는 역학적 특성치를 확보하기 위한 입도분포의 기준, 시공성의 확보를 위한 최대치수 규정 및 시공시의 함수비 기준, 한층 다짐층 내부의 균등한 다짐도 및 소요의 다짐도 확보를 위한 시공층 두께의 기준을 포함하고 있다. 또한 포장설계의 기초 입력 물성치로 적용되는 CBR의 기준을 포함하고 있어서 설계 CBR을 기준에 설정된 하한 값으로 적용하는 경우 어떠한 경우에도 안정측의 설계가 되도록 하고 있다. 전체적으로 검토

할 때 국내의 노상토의 품질기준은 대단히 엄격하게 설정되어 있는데, 이러한 엄격한 기준임에도 불구하고 주변에서 노상토 재료의 확보에 큰 문제점이 없는 것은 국내의 지반이 대부분 화강풍화토로서 역학적으로 대단히 우수한 특성을 보이기 때문이다. <표 5.1> 및 <표 5.2>은 국내 노상토의 특성을 나타낸 예이다.

<표 5.1> 노상토의 기초특성 조사항목 및 조사결과 일례

위치	도로구분	포장형식	흙분류		입도특성					Atterberg Limit		역학적 특성		다짐 특성	
			통일 분류	AAS HTO 분류	최대 입경 (mm)	4.7 5mm 통과량 (%)	#20 0체통과량 (%)	균등계수 (Cu)	곡률계수 (Cc)	액성한계 (%)	소성지수 (PI, %)	CB R (%)	지지력계수 K30 (kg/cm³)	최대 건조 단위 중량 (t/m³)	최적 함수비 (%)
전남화순군읍	주간선도로	AP	SP-SM	A-2	25	69.3	24.7	50	4.7	29.0	9.0	12.8	25.0	1.953	10.7
전남장흥군	주간선도로	AP	MC	A-2	40	80.5	15.1	12.7	6.3	33.12	10.0	11.0	25.0	1.946	13.4
영주~감천	주간선도로	AP	SW-SM	A-1-b	9.5	99.3	7.3	8.0	1.0	NP	NP	34.8	23.2	1.952	10.1
경주시양남면	주간선도로	AP	SM	A-2	25	43.3	6.9	11.5	3.4	28.0	15.0	41.0	37.5	2.011	10.4

〈표 5.2〉 입상보조기층 재료 기초특성 조사항목 및 조사결과 일례

위치	도로 구분	포장 사용 층	흙분류		골재특성				입도특성					Atterberg Limit		역학적 특성		다짐 특성				
			통일 분류	AAS HT O 분류	굵은골재		잔골재		마모 감량 (%)	모래 당량 (%)	기본 입도	최대 입경 (mm)	4.7	#20 0체 통과 량 (%)	균등 계수 (Cu)	곡률 계수 (Cc)	액성 한계 (%)	소성 지수 (PI, %)	CBR (%)	지지력 계수 K30 (kg/cm³)	최대 진조 단위 중량 (t/m³)	최적 함수비 (%)
					종류	쇄석 종류	종류	혼합 비(%)					5mm 통과 량 (%)	20mm 통과 량 (%)								
전남 화순 군	주간 선 도로	AP 보조 기층	GW	A-1-a	쇄석	357	강모 래	20	12.3	80	SB-2	50.0	36.8	4.1	-	-	-	NP	77.0	36.4	2.13	6.5
전북 순창 군	주간 선 도로	AP 보조 기층	GW	A-1-a	쇄석	407	강모 래	10	22.1	79	SB-2	40.0	39.4	4.8	72.8	2.5	-	NP	58.0	33.8	2.19	6.4
전남 순천 시	국내로	AP 보조 기층	SW	A-1-a	쇄석	467	해사	20	13.0	80	SB-2	40.0	52.8	3.1	24.2	0.4	NP	NP	52.0	30.0	2.12	8.3
전남 장흥 군	주간 선 도로	AP 보조 기층	GW	A-1-a	쇄석	467	강모 래	30	18.1	84	SB-2	50.0	57.8	5.4	66.7	1.5	-	NP	53.0	34.5	2.14	7.8
경주 시 양남 면	주간 선 도로	AP 보조 기층	GW	A-1-a	쇄석	467	부순 모래	30	14.1	-	SB-2	40.0	50.5	2.5	14.3	1.8	-	NP	58.0	36.5	2.081	9
울산 시 울주 군	주간 선 도로	AP 보조 기층	GW	A-1-a	쇄석	357	-	-	18.7	72	SB-2	53.0	35.8	3.7	-	-	-	NP	68.0	-	2.221	5.8
영주 - 감천	주간 선 도로	AP 보조 기층	GP	A-1-a	쇄석	357	-	-	10.3	73	SB-2	50.0	44.4	8.3	75.0	7.1	NP	NP	49.5	35.6	2.166	6.6
영주 - 감천	주간 선도로	AP 동상 방지 층	GP	A-1-a	쇄석	357	-	-	10.3	73	SB-2	50.0	44.4	8.3	75.0	7.1	NP	NP	49.5	34.0	2.166	6.6
경북 경산 시	주간 선 도로	AP 보조 기층	GW	-	쇄석	-	-	-	22.0	93	SB-2	40.0	20.0	2.1	-	-	-	-	83.0	32.0	2.234	7.9
울산 시 울주 군	주간 선 도로	AP 보조 기층	GW	A-1-a	쇄석	357	-	-	18.7	72	SB-2	53	35.8	3.7	-	-	-	NP	68	-	2.221	5.8

(1) 노상

국내 노상토의 탄성계수는 함수비와 건조단위중량으로 대표되는 재료적 요인과 변형률 크기(또는 축차응력), 체적응력(또는 구속응력)에 큰 영향을 받고 있고, 하중증파수의 영향은 다소 미미한 것으로 평가되고 있다. 따라서, 노상토의 탄성계수 예측 모형은 함수비(환경변화), 구속응력(체적응력), 축차응력(변형률 크기), 하중주파수를 기본 독립변수로 한 모형을 <식 5.8> 과 같이 결정할 수 있다.

$$E = f(w) + g(\theta) + h(\sigma_d) + i(r_d) + j(freq) \quad <\text{식 } 5.8>$$

여기서, E:탄성계수

$f(w)$: 함수비의 함수

$g(\theta)$: 체적응력의 함수

$h(\sigma_d)$: 축차응력의 함수

$i(r_d)$: 건조단위중량의 함수

$j(freq)$: 하중주파수의 함수

포장 하부구조의 건조단위중량은 다짐시공의 건설단계에서 변화가 심하지만, 포장이 완성된 후 공용단계에서는 거의 변화가 없이 일정한 값을 갖게 된다. 따라서 탄성계수에 대한 건조단위중량의 영향은 하부구조의 다짐시공 관리에는 매우 중요한 고려 요소이지만 설계입력변수 결정에서는 일정한 건조단위중량을 적용하므로 고려하지 않는다. 국내 포장 하부구조 재료에서 하중주파수의 영향은 다소(최대 $10\% / \log(freq)$) 있는 것으로 나타나고 있으나, 포장에서 차량특성에 따른 하중주파수의 변화 범위를 고려하면 탄성계수에 대한 영향 정도는 크지 않다. (식 5.11)에서 설계입력변수 결정조건의 특이성과 편의성을 고려하여 건조단위중량과 하중주파수의 영향을 삭제하면, (식 5.9)와 같은 최종적인 설계입력변수 결정을 위한 구성모델의 구성이 가능하다.

$$E = f(w) + g(\theta) + h(\sigma_d) + i(r_d)$$

〈식 5.9〉

18 개의 시료에 대한 삼축압축시험 결과에서 결정된 탄성계수에 대하여 〈표 5.3〉에 나타난 바와 같이 다양한 회귀분석 모형을 적용하여 모형계수와 상관계수를 결정하였다. 그 결과를 바탕으로 하여 노상토의 탄성계수 예측모형은 〈식 5.10〉

〈표 5.3〉 설계입력변수 결정 구성모델 검토에 사용된 다양한 회귀분석 모형

구분	모델형태	모델의 특징
모형 1	$E = k_1 + k_2 \theta$	체적응력만을 변수로 한 선형모델
모형 2	$E = k_1 \theta k_2$	체적응력만을 변수로 한 대수모델
모형 3	$E = k_1 + k_2 \sigma_d$	축차응력만을 변수로 한 선형모델
모형 4	$E = k_1 \sigma_d k_2$	축차응력만을 변수로 한 대수모델
모형 5	$E = k_1 + k_2 \log(\sigma_d)$	축차응력만을 변수로 한 반대수모델
모형 6	$E = k_1 \theta k_2 \sigma_d k_3$	체적응력과 축차응력을 변수로 한 대수모델
모형 7	$E = k_1 + k_2 \theta + k_3 \sigma_d$	체적응력과 축차응력을 변수로 한 선형모델
모형 8	$E = k_1 + k_2 \theta + k_3 \log(\sigma_d)$	체적응력과 축차응력을 변수로 한 복합모델

과 같은 함수를 채택하였다.

$$E_{opt} = k_1 \times \theta^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \quad \langle \text{식 5.10.a} \rangle$$

$$E = E_{opt} \times 10^{kw(w - OMC)} \quad \langle \text{식 5.10.b} \rangle$$

여기서, E_{opt} = 최적함수비 조건에서의 탄성계수 (MPa)

$$\theta = \text{체적응력} (= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \text{ (kPa)}$$

$$\sigma_d = \text{축차응력} (= \sigma_1 - \sigma_3) \text{ (kPa)}$$

$$k_1, k_2, k_3, = \text{모델계수}$$

$$k_w = -0.1417 \text{ (조립질 노상토)}$$

$$-0.0574 \text{ (세립질 노상토)}$$

$$w_{opt} = \text{최적함수비 (\%)}$$

$$w = \text{함수비 (\%)}$$

이 모형을 이용하여 노상토의 탄성계수 예측하는 과정은 인공 신경망 이론을 적용하여 개발되었다. 그 세부 절차는 다음과 같다.

step 1) 체가름시험, 다짐시험 수행

OMC, 최대건조단위중량, 균등계수, #200 통과량 결정

step 2) 탄성계수를 결정하고자 하는 응력단계 설정

step 3) 정규화 입력물성치 계산

: 정규화된 물성치는 step 1에서 산출한 재료의 실험값이다.

step 4) 정규화탄성계수를 다음과 같은 과정을 거쳐 계산

$$E = \frac{1}{2}(E_{max} - E_{min}) \times (E_n - 1) + E_{min} \quad \langle \text{식 5.11} \rangle$$

여기서, E = 탄성계수 (Mpa)

E_{max} , E_{min} = 상관모형 탄성계수의 최대값 및 최소값 사이의 범위: <표 5.4>

E_n = 정규화된 탄성계수 (식 5.12)

$$E_n = \frac{1}{2}[W_2] \times \log(\sin([W_1] \times [PN_n] + [b_1])) + b_2 \quad \langle \text{식 5.12} \rangle$$

$$\text{여기서, } \log(\sin(x)) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$$

W_1 , W_2 , b_1 , b_2 = 인공신경망 이론에 사용된 weight 와 biases : <표 5.5>

PN_n = 정규화된 입력물성치 <식 5.13>

$$PN_n = \frac{2(P_n - \min P_n)}{(\max P_n - \min P_n)} - 1 \quad \langle \text{식 5.13} \rangle$$

여기서, P_n = 정규화된 입력물성치

P = 입력물성치

$\max P$, $\min P$ = 상관모형 입력물성치의 최대값 및 최소값의 범위 : 〈표 5.6〉

step 5) 해당 응력 단계의 탄성계수 계산

step 6) 다음 응력단계를 선정하고 step 3)~5) 과정 반복

step 7) 예측결과를 회귀분석하여 구성모델의 계수 결정

step 8) 결정된 계수들을 바탕으로 탄성계수 결정

국내 노상토의 탄성계수는 개략적으로 30~300 MPa 범위에 존재한다.

〈표 5.4〉 상관모형 탄성계수의 최대값 및 최소값의 범위 (단위, MPa)

구분	Emin	Emax
노상토	39.0	276.0

〈표 5.5〉 인공신경망 이론에 사용되는 weight와 biases (노상토)

1st layer					2nd layer	Input		
W1 weight	1.6802	-6.3186	6.663	-4.0641	b1 bias	1. 최적함수비(%)		
	1.4511	-0.9576	4.1434	-0.2054		2. 최대건조단위중량(kN/m ³)		
	-0.5022	-2.5796	2.5069	-6.948		3. 균등계수 (Cu)		
	2.855	1.3243	-0.0565	11.6866		4. #200 통과량 (%)		
	0.3869	-0.3452	0.1749	0.1086		5. 구속응력 (kPa)		
	-0.2358	0.8948	0.1077	-0.2584		6. 축차응력 (kPa)		
W2 Weight	6.6223				b2 bias			
	-1.4545							
	-4.5847							
	-6.1669							

〈표 5.6〉 입력 기초물성치(p)의 최대 및 최소값(노상토)

구분	항목	최소값(Min.)	최대값(Max.)
노상토	최적함수비(OMC, %)	6.2	19.0
	최대건조단위중량(kN/m ³)	1.65	2.34
	균등계수(Cu)	0	40.74
	#200체 통과량 (%)	1.28	29.5
	구속응력 (kPa)	0	41
	축차응력 (kPa)	14	69

위와 같은 전체 절차가 도로포장 구조 설계에는 프로그램화 되었다. 설계자는 체가름시험과 다짐시험을 수행하여 최적함수비, 최대건조단위중량, 균등계수, #200 통과량 결정한 후 프로그램에 입력하면 모든 결과를 얻을 수 있다. 〈표 5.7〉은 OMC = 10.2%, 최대건조단위중량 = 2.01, 균등계수(Cu) = 6.5, #200 통과량 = 5.5의 경우 얻어진 결과이다.

〈표 5.7〉 경험모형을 적용하여 얻어진 노상토의 탄성계수 일례

구속응력(kPa)	축차응력(kPa)	체적응력(kPa)	탄성계수(MPa)
0	14	14	114.047509
0	28	28	101.3358959
0	51	51	87.14548737
0	55	55	85.36678648
0	69	69	80.34256691
10	14	44	127.1740384
10	28	58	112.4403745
10	51	81	95.40945637
10	55	85	93.2187529
10	69	99	86.93782416
21	14	77	144.0217195
21	28	91	126.9176328
21	51	114	106.3847651
21	55	118	103.6720658
21	69	132	95.78009769
41	14	137	181.8825914
41	28	151	160.2391779
41	51	174	132.3983807
41	55	178	128.5441715
41	69	192	117.0563688

(2) 보조기총

국내 보조기총 재료의 탄성계수는 변형률 크기, 체적응력(또는 구속응력)에 대단히 큰 영향을 받고 있고, 하중증파수의 영향과 하중반복횟수의 영향은 미미하다. 따라서 보조기총 재료의 구성모델은 구속응력(체적응력) 및 축차응력(변형률 크기)을 기본 독립변수로 한 탄성계수 예측 모형을 <식 5.14>와 같이 결정하였다.

$$E = g(\theta) + h(\sigma_d \text{ 또는 } \varepsilon) \quad \langle \text{식 5.14} \rangle$$

여기서, E : 탄성계수

$g(\theta)$: 체적응력의 함수

$h(\sigma_d \text{ 혹은 } \varepsilon)$: 축차 응력 또는 변형률의 함수

13개의 시료에 대한 삼축압축시험 결과에서 결정된 탄성계수에 대하여 노상과 같은 방법으로 <표 5.7>에 나타난 예상 모형에 적용하여 모형의 계수와 상관계수(R2)를 결정하였다. 각 모형들을 검토한 결과, 선형모델의 적용성이 우수한 것으로 평가되었다. 따라서 모형의 통일성을 고려하여 설계입력변수 결정을 위한 예측 모형은 <식 5.18>과 같이 체적응력의 영향만을 고려한 선형 모형으로 결정하였다.

$$E = k_1 + k_2 \times \theta \quad \langle \text{식 5.15} \rangle$$

이 모형을 이용하여 보조기총의 탄성계수 예측하는 과정은 노상토에서와 같이 인공 신경망 이론을 적용하여 개발되었다. 그 세부 절차는 다음과 같다.

step 1) 체가름시험, 다짐시험 수행

최대건조단위중량, 균등계수, #4 통과량 결정

step 2) 탄성계수를 결정하고자 하는 응력단계 설정

step 3) 정규화 입력물성치 계산

: 정규화된 물성치는 step 1에서 산출한 재료의 실험값이다.

step 4) 정규화탄성계수를 노상토와 같은 과정으로 계산

단, 1. 상관모형 탄성계수의 최대값 및 최소값은 〈표 5.8〉 이용

2. W_1, W_2, b_1, b_2 = 인공신경망 이론에 사용된 weight 와 biases 은 〈표 5.9〉 이용

3. $\max P, \min P$ = 상관모형 입력물성치의 최대값 및 최소값의 범위는
〈표 5.10〉 이용

step 5) 해당 응력 단계의 탄성계수 계산

step 6) 다음 응력단계를 설정하고 ③-⑤ 과정 반복

step 7) 예측결과를 회귀분석하여 구성모델의 계수 결정

step 8) 결정된 계수들을 바탕으로 탄성계수 결정

국내 보조기층의 탄성계수는 개략적으로 $50\text{MPa} \sim 400\text{MPa}$ 범위에 존재한다.

〈표 5.8〉 상관모형 탄성계수의 최대값 및 최소값의 범위 (단위, MPa)

구분	Emin	Emax
보조기층	60.0	422.0

〈표 5.9〉 인공신경망 이론에 사용되는 weight와 biases (보조기층 재료)

1st layer					2nd layer		Input			
W_1 weight	2.5306	-2.5049	1.3288	-0.4681	b_1 bias	-0.6961	1. 최대건조단위중량 (kN/m ³)			
	1.0101	-3.6679	-1.9622	3.9715		2.2825	2. 균등계수 (Cu)			
	-0.0239	-2.6243	1.3707	4.0762		2.0352	3. #4 통과량 (%)			
	-0.0802	-0.0469	-0.5607	0.4445		-1.8119	4. 구속응력 (kPa)			
	0.4588	-0.054	-0.1679	-0.08			5. 체적응력 (kPa)			
W_2 weight	3.3153				b_2 bias	-4.9906				
	5.5505									
	-2.07									
	4.1523									

〈표 5.10〉 입력 기초물성치(p)의 최대 및 최소값(보조기층)

구분	항목	최소값(Min.)	최대값(Max.)
보조기층 재료	최대건조단위중량(kN/m ³)	2.04	2.423
	균등계수(Cu)	9.8	63.7
	#4체 통과량 (%)	26.2	54.4
	구속응력 (kPa)	21	138
	체적응력 (kPa)	84	690

〈표 5.11〉 경험모형을 적용하여 얻어진 보조기층 재료의 탄성계수 일례

구속응력(kPa)	축차응력(kPa)	체적응력(kPa)	탄성계수(MPa)
21	21	84	69.91168117
21	41	104	72.11225807
21	61	124	74.36377924
35	35	140	78.13220165
35	69	174	82.07905659
35	104	209	86.29980451
69	69	276	100.6944762
69	138	345	109.7649415
69	207	414	119.4825892
104	69	381	123.5323168
104	104	416	128.3727591
104	207	519	143.5949995
138	104	518	155.2708768
138	138	552	160.4505567
138	276	690	183.0909087

노상토와 같이 보조기층의 경우에도 모든 전체 절차가 도로포장 구조 설계 프로그램에 내장되어 있다. 〈표 5.11〉은 최대건조단위중량 = 2.23, 균등계수 (Cu) = 20.5, #4 통과량 = 45.0의 경우 얻어진 결과이다.

(3) 쇄석기층(입도조정기층)

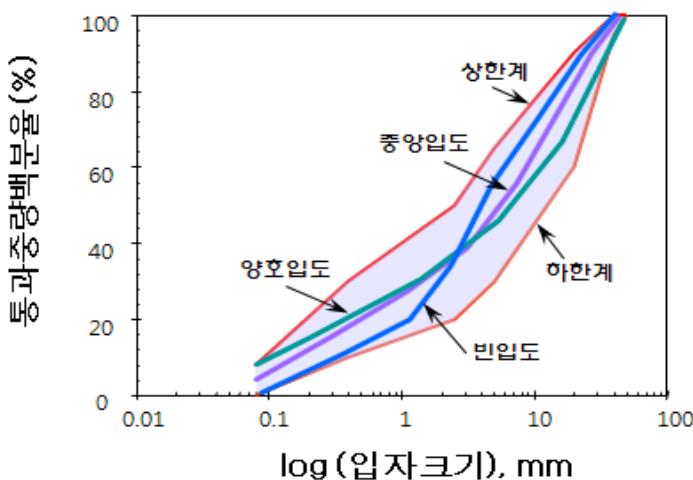
쇄석기층의 최대입경은 40mm 이하이며, 또한 1층의 마무리 두께의 1/2 이하이어야 한다. 입도조정을 한 재료(쇄석기층)는 수정 CBR이 80이상이고, 0.425mm (No.40)체 통과분의 소성지수는 4 이하이어야 한다. 입도조정재료

의 수정 CBR을 구하는 경우에 사용되는 다짐도는 KSF 2320에 규정하는 시험방법에 의한 최대건조밀도의 95%로 한다.

쇄석기층의 재료는 내구적인 부순돌, 부순자갈 등을 모래 혹은 기타 적당한 재료와 혼합한 것, 스크리닝스(Screenings), 슬래그(Slag), 기타 감독자가 승인한 재료로서 점토, 유기불순물, 먼지 등 유해물을 함유하여서는 안 된다. 재료는 5mm 체에 남는 것 중 중량으로 70% 이상의 것이 적어도 2개의 파쇄면을 가져야 하며, <표 5.12>에서 표시하는 품질기준에 맞는 것이어야 한다. 쇄석기층의 입도분포는 다음 <그림 5.7>과 같다.

<표 5.12> 쇄석기층 재료의 품질 기준

구분	시험방법	기준
소성지수(%)	KS F 2303	4 이하
수정CBR(%)	KS F 2320	80 이상
마모감량(%)	KS F 2508	40 이하
안정성(%)	KS F 2507	20 이하



<그림 5.7> 쇄석기층 입도분포

설계입력변수 결정을 위한 경험모형 구성모델은 보조기층과 같은 체적응

력모형을 적용한다. 하지만 보조기층에서는 모형의 계수를 결정하기 위해 인공신경망을 사용한 반면, 쇄석기층에서는 <식 5.19>와 <식 5.20>을 사용한다. 이때 다양한 재료의 입력 변수들은 체가름시험 및 다짐시험(D Type 또는 E Type)을 통해 결정한다. 국내 시료에 대한 실험결과의 일반적인 모형 계수와 탄성계수의 범위는 <표 5.13>와 <그림 5.8>과 같다.

$$k_1 = 11680.1 - 137.0(MDEN) - 6.4(OMC) - 65.4(CC) + 14.0(CU) \quad <\text{식 } 5.16>
- 412.8(D_{50}) - 133.0(D_{95}) - 81.7(P_{200}) - 110.8(P_4)$$

$$k_2 = 5.1045 + 1.2414(MDEN) - 0.0535(CC_c) + 0.008(CU_U) \quad <\text{식 } 5.17>
- 0.2208(D_{50}) - 0.0947(D_{95}) - 0.0769(P_4)$$

여기서, MDEN = 최대건조단위중량 (t/m^3)

OMC = 최적함수비 (%)

CC = 곡률계수

CU = 균등계수

P₄ = #4체 통과률 (%)

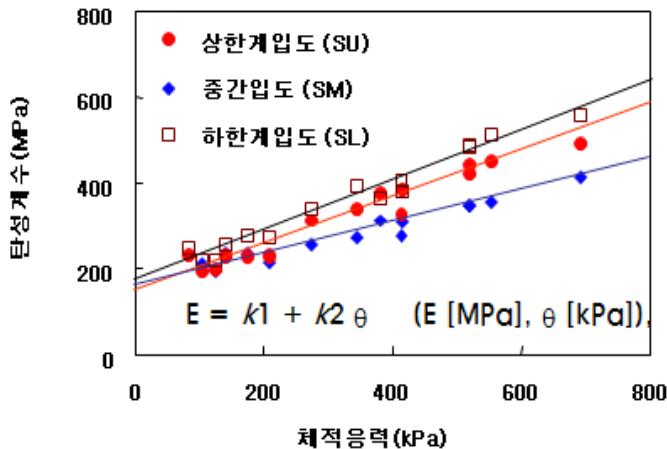
P₂₀₀ = #200체 통과률 (%)

D₅₀ = 50% 통과률에 해당하는 입경 (mm)

D₉₅ = 95% 통과률에 해당하는 입경 (mm)

<표 5.13> 쇄석기층 재료의 탄성계수, k₁ 계수, k₂ 계수의 범위

구분	범위
탄성계수 (MPa)	$100 \leq E \leq 600$
k ₁ 계수	$80 \leq k_1 \leq 270$
k ₂ 계수	$0.1 \leq k_2 \leq 0.6$



〈그림 5.8〉 쇄석기층의 일반적인 탄성계수

〈표 5.14〉 포장 거동에 적용하는 노상토 및 입상 보조기층 재료의 포아송비

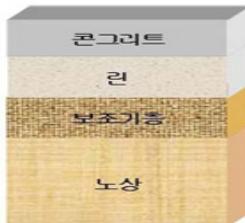
구분	재료특성	포아송비 범위	대표 포아송비
노상토	모래질 점토	0.2 ~ 0.3	0.25
	실트	0.3 ~ 0.35	0.325
	조밀한 모래	0.2 ~ 0.4	0.3
	조립 모래	0.15	0.15
	세립 모래	0.25	0.25
입상 보조기층 재료	조립 사질토 또는 입상재료	0.15	0.15

(4) 시멘트 콘크리트 포장의 복합 지지력 산정

아스팔트 콘크리트 포장과 달리 시멘트 콘크리트 포장의 거동을 예측하기 위해 스프링 위에 슬래브가 놓인 것을 가정하고 구조해석을 수행해 왔다. 최근에는 3차원 모형으로 해석하는 경우도 있지만, 아직까지 2차원으로 해석하여 그 경향을 분석하는 경우도 많다. 도로포장 구조 설계에서도 〈그림 5.9.a〉에 보이는 실제 포장 구조체를 슬래브는 평면쉘로 모델을 하고, 그 이하 하부 구조체는 각 층의 두께 및 탄성계수를 이용하여 〈그림 5.9.b〉와 같이 복합지지력으로 변환하여 스프링 계수를 재료 물성으로 사용한다. 도로 포장 구조 설계에서는 다양한 조합의 하부구조를 해석한 결과를 바탕으로 하

부구조의 두께 및 탄성계수에 따른 복합지지력 변환식을 도출하였다.

복합지지력계수 산정식의 주요 구성요소는 노상의 탄성계수(E_{sg})와 두께 또는 기반암까지의 깊이(t_{sg}), 입상(보조)기층의 탄성계수(E_{agg})와 두께(t_{agg}), 린콘크리트 기층의 탄성계수(E_{lean})와 두께(t_{lean}) 등이다. 콘크리트 포장단면은 국내 포장현실을 고려하여 아래와 같이 3개의 대표단면으로 설정하고 각 대표단면에서의 복합지지력계수 산정식인 <식 5.18>에서부터 <식 5.19>까지를 사용하여 복합지지력계수를 구하게 된다.



(a) 콘크리트 포장 구조체



(b) 구조해석 모형

<그림 5.9> 시멘트 콘크리트 포장 구조해석 모형

가. 노상 + 입상 기층 구성시

$$\begin{aligned} \text{Log}K = & 0.01266 + 0.19547 \text{Log}(E_{sg}) - 0.63393 \text{Log}(t_{sg}) + 0.88261 \text{Log}(E_{agg}) - 0.67172 \text{Log}(t_{agg}) \\ & + 0.324 [\text{log}(E_{sg}) \times \text{Log}(t_{sg})] + 0.855 [\text{Log}(E_{agg}) \times \text{Log}(t_{agg})] \\ & - 0.587 [\text{Log}(E_{sg}) \times \text{Log}(t_{agg})] - 0.113 [\text{Log}(E_{agg}) \times \text{Log}(t_{sg})] \end{aligned}$$

<식 5.18>

나. 노상 + 린콘크리트 기층 구성시

$$\begin{aligned} \text{Log}K = & 0.46522 + 0.01117 \text{Log}(E_{sg}) - 1.22834 \text{Log}(t_{sg}) \\ & - 0.71942 \text{Log}(E_{lean}) - 0.07781 \text{Log}(t_{lean}) \\ & - 0.237 [\text{Log}(t_{sg})]^2 + 0.451 [\text{Log}(E_{lean}) \text{Log}(t_{lean})] \\ & - 0.487 [\text{Log}(E_{sg}) \text{Log}(t_{lean})] + 0.494 [\text{Log}(E_{sg}) \text{Log}(t_{sg})] \end{aligned}$$

<식 5.19>

다. (노상 + 입상 보조기층 (동상방지층) + 린콘크리트 기층 구성시

이 경우는 일반노상의 경우와 반무한 노상의 경우로 나누어 산정식을 적용한다. 일반노상의 경우, 노상두께는 절토시 암반층까지의 거리가 되고 성토시 최대 4.0m까지 적용할 수 있다. 반무한 노상의 경우, 노상두께는 4.0m이상의 고성토이거나 풍화토의 깊이가 4.0m 이상으로 매우 깊을 경우에 한하여 적용한다.

■ 일반 노상 두께를 가정한 경우 :

$$\begin{aligned} \text{Log}K = & 0.00951 + 0.85105 \text{Log}(E_{sg}) - 0.92038 \text{Log}(t_{sg}) + 0.15314 \text{Log}(E_{agg}) \\ & - 0.02810 \text{Log}(t_{agg}) + 0.47855 \text{Log}(E_{lean}) + 0.06484 \text{Log}(t_{lean}) \\ & + 0.358 [\text{Log}(E_{sg}) \text{Log}(t_{sg})] + 0.366 [\text{Log}(E_{agg}) \text{Log}(t_{agg})] + 0.3 [\text{Log}(E_{lean}) \text{Log}(t_{lean})] \\ & - 0.27 [\text{Log}(E_{agg}) \text{Log}(t_{lean})] - 0.379 [\text{Log}(E_{sg}) \text{Log}(t_{agg})] \\ & - 9.66 \times 10^{-2} [\text{Log}(t_{sg})]^2 - 0.181 [\text{Log}(E_{sg})]^2 \end{aligned}$$

〈식 5.20〉

■ 반무한 (half-infinite)노상을 가정한 경우

$$\begin{aligned} \text{Log}K = & 0.48762 + 0.61011 \text{Log}(E_{sg}) + 0.24247 \text{Log}(E_{agg}) \\ & + 0.26799 \text{Log}(E_{lean}) + 0.00423 \text{Log}(t_{agg}) + 0.13185 \text{Log}(t_{lean}) \\ & - 0.107 [\text{Log}(E_{agg}) \text{Log}(t_{lean})] + 0.259 [\text{Log}(E_{agg}) \text{Log}(t_{agg})] \\ & - 0.257 [\text{Log}(E_{sg}) \text{Log}(t_{agg})] + 0.168 [\text{Log}(E_{lean}) \text{Log}(t_{lean})] \end{aligned}$$

〈식 5.21〉

여기서, K : 복합 지지력계수(MPa/m)

E_{sg} : 노상흙의 탄성계수 (MPa)

E_{lean} : 린콘크리트 기층의 탄성계수 (MPa)

E_{agg} : 입상 (보조)기층의 탄성계수 (MPa)

t_{sg} : 노상토의 깊이 (m)

단, 원지반 절토의 경우 기반암까지의 거리, 성토의 경우
최대 4.0m 사용

t_{lean} : 린콘크리트 기층의 두께 (m)

t_{agg} : 입상 (보조)기층의 두께 (m)

(5) 콘크리트 포장 하부 지지력 저하 모형

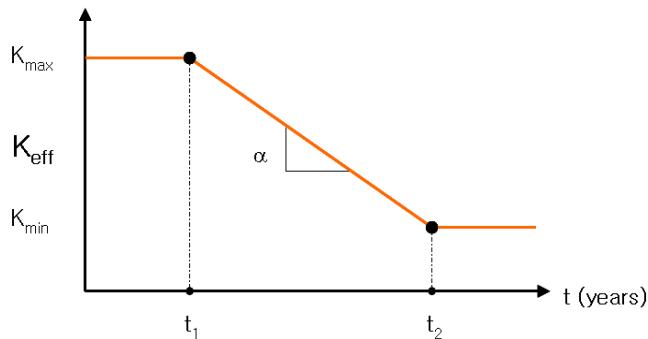
콘크리트 포장하부의 지지력감소 모형은 복합지지력의 저하 모형을 이용하여 개발하게 된다. 도로포장 구조 설계 중 콘크리트 포장설계의 기본 입력값이 복합지지력을 사용하기 때문이며 이를 위하여 아래와 같이 복합지지력 저하 모형 개발을 위한 다음과 같은 기본 가정을 설정하였다.

- 1) 복합지지력은 최대값(K_{\max}) 및 최소값(K_{\min})이 존재하며 공용초기 일정시점(t1)까지 최대값(K_{\max})을 유지하며 t2이후에는 최소값(K_{\min}) 유지
- 2) 복합지지력은 초기 공용후 일정시점(t1)부터 저하가 발생하기 시작하며 복합 K값의 저하율(α)은 일정 공용시점(t2)까지 균등한 값 유지
- 3) 복합지지력의 초기값은 최대값(K_{\max})으로 간주

복합지지력 저하모형을 개발하기 위한 기본 가정을 이용하면, <그림 5.10>와 같은 복합지지력 저하 함수를 완성할 수 있다.

복합지지력의 저하가 완료되는 시점은 포장의 구성에 따라 달라질 수 있으며 있으며, 감소시점(t1)과 감소종료시점(t2) 및 감소율 (α)의 정확한 산출을 위해서는 FWD를 이용하여 기존 콘크리트 포장에 대해 장기간 실시한 LTPP 측정 자료의 분석이 필요하다. 따라서, 도로포장 구조 설계에서의 복합지지력 저하모형은 다음과 같은 사용 제한이 있다.

- 1) 복합지지력 저하모형은 하부층의 구성에 따라 감소율(α) 및 감소시점(t1)과 감소종점(t2)을 각각 달리 적용
- 2) 하부층의 구성은 기본 복합지지력 산정모형에서와 같이 4가지 대표단면으로 국한



〈그림 5.10〉 복합지지력 저하 함수

〈표 5.15〉 보조기층의 탄성계수가 가장 작은($E_{SUB-MIN}$)일 경우 복합지지력계수 영역

(1 pci = 0.2714 MPa/m)

단면구성	최대값 (K_{max}) (MPa/m)	최소값 (K_{min}) (MPa/m)
노상+보조기층	355.97	59.33
노상+린콘크리트	1220.15	154.55
노상+보조기층+린콘크리트	958.43	144.7

〈표 5.16〉 보조기층의 탄성계수가 중간값($E_{SUB-MED}$)일 경우 복합지지력계수 영역

단면구성	최대값 (K_{max}) (MPa/m)	최소값 (K_{min}) (MPa/m)
노상+보조기층	439.9	95.02
노상+린콘크리트	1220.15	154.55
노상+보조기층+린콘크리트	1006.4	165.55

〈표 5.17〉 보조기층의 탄성계수가 최대($E_{SUB-max}$)일 경우 복합지지력계수 영역

단면구성	최대값 (K_{max}) (MPa/m)	최소값 (K_{min}) (MPa/m)
노상+보조기층	582.73	79.65
노상+린콘크리트	1220.15	154.55
노상+보조기층+린콘크리트	1038.92	180.61

복합지지력 산정식을 이용하여 보조기층 및 린콘크리트의 탄성계수를 고

정한 후, 노상의 탄성계수값을 최소값부터 최대값의 영역내에서 변화시킬 때에 복합지지력(K^∞)의 변화폭을 검토하였다. 그 결과 <표 5.15>~<표 5.17>과 같다. 국내 노상토의 탄성계수 영역에서 가장 복합지지력계수가 작게 산출되는 것은 노상+보조기층의 단면구성인 경우로 확인되었으며, 이는 AASHTO '93에서 제시한 복합지지력계수와 비슷한 영역이었다. 반면 노상+린콘크리트, 노상+보조기층+린콘크리트 단면의 경우에는 복합지지력계수의 최대값이 크게 증가하였다. 본 설계에서는 동일 시멘트 콘크리트 포장에 대한 동일위치에서의 장기간 측정된 FWD 데이터는 국내에 아직 수립된 바가 없어 이와 같이 국외 자료를 수집, 분석하여 장기간에 걸친 지지력계수의 변화추이를 확인하였다. 그 결과, 시멘트 처리기층이 사용된 경우 다년간의 공용에도 불구하고 하부지지력의 감소(최소 0.1MPa/m/년~최대 0.42MPa/m/년)는 매우 적었으며, 입상기층이 직접 사용된 경우에는 하부지지력의 감소율이 크게 증가(최소 1.1MPa/m/년~최대 1.7MPa/m/년)하였다. 위의 그림에서 산출된 복합지지력의 감소율을 근거로 하여 포장구성별 복합지지력의 순 감소기간과 감소시작시기 및 종료시기 등을 종합하여 <표 5.18>와 같이 포장구성별 복합지지력 저하 모형을 제안하였다.

<표 5.18> 각 하부 재료에 따른 하부 지지력 저감식

하부층 재료	Loss of support	LS 변화식	
		최대지지력(MAX)	최소지지력(MIN)
시멘트처리기층 (CTB)	LS=0 (1)	$y = y$	$y = y$
	LS=중간값(2)	$y = -5.56X + 361.53$	$y = -0.52X + 59.851$
	LS=1 (3)	$y = -11.12X + 367.09$	$y = -1.04X + 60.37$
아스팔트 처리기층 (BB)	LS=0 (1)	$y = y$	$y = y$
	LS=중간값(2)	$y = -5.56X + 361.53$	$y = -0.52X + 59.851$
	LS=1 (3)	$y = -11.12X + 367.09$	$y = -1.04X + 60.37$
비처리 입상기층	LS=1 (1)	$y = -17.3X + 373.27$	$y = -1.62X + 60.65$
	LS=중간값(2)	$y = -24.34X + 380.31$	$y = -2.54X + 61.87$
	LS=3 (3)	$y = -31.382X + 387.35$	$y = -3.45X + 62.78$
세립성 및 자연상태 노상토 재료	LS=2 (1)	$y = -59.209X + 415.18$	$y = -5.36X + 64.69$
	LS=중간값(2)	$y = -64.9X + 420.88$	$y = -6.56X + 65.89$
	LS=3 (3)	$y = -70.61X + 426.58$	$y = -7.77X + 67.10$

5.3 동상

흙의 동상(Frost Heaving)작용은 토사 공극 내의 간극수가 얼음으로 변하면서 연속적으로 얼음 결정(Ice Lenese), 얼음층, 얼음 덩어리를 형성하여 팽창함으로써 발생하는 것이다. 이와 같이 상당한 크기의 얼음 덩어리로 성장하는 현상을 얼음 분정 작용(Ice Segregation)이라 부른다. 동상작용은 지반의 하부의 지하수의 수분 공급이 정지될 때까지 또는 동결접촉면(Freezing Interface)에서 동결 조건상 더 이상의 결정상태 (Crystallization)를 유지할 수 없을 때까지 열 전달 방향으로 더 낮은 위치에서 새로운 얼음 결정을 형성시키면서 상당한 두께로 성장하기 때문에 발생한다. 흙이 얼음 결정(Ice Lense)을 형성하게 되는 과정(Mechanism)을 미시적으로 보면 대단히 복잡하다. 동결토의 물의 흡입은 지반내의 온도, 지반의 열전도율, 융해잠열, 흙입자의 피막수층 등 열역학적인 인자들에 의해 결정되기 때문이다. 국내에서 포장의 동상 피해를 막기 위해서 포장체의 깊이가 동결심도보다 얕을 경우 동상방지층을 설치하여 노상이 동결심도보다 깊은 곳에 위치하도록 설계한다.

5.3.1 동결지수

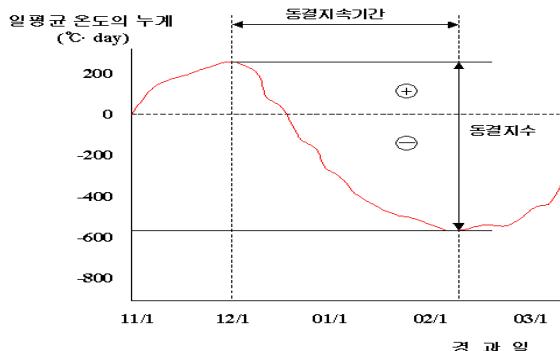
동결지수(Frost Index)는 포장내의 동결심도를 산정하기 위한 대표적 척도로서, 포장구조와 노상토를 동결시키는 대기온도의 강도와 지속기간의 누가영향(Cumulative Effect)으로 정의한다. 현재 국내에서는 도로포장의 동결심도를 결정하기 위하여 1949년부터 1978년까지 도로 조사단(1980)에서 작성한 동결지수선도를 이용하고 있으나 지구 온난화로 인한 기온상승이 계속되면서 수십년 사이에도 기상자료가 많이 달라지고 있다. 따라서 현재 동상방지층을 설계할 때는 최근의 기상자료를 사용하여 동결지수를 산정해야 한다. 동결지수의 단위는 온도·일($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$)이며, <그림 5.11>에서와 같이 어느 동결 계절동안의 누가 온도·일에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 결정한다. 도로포장의 동결심도를 결정하는데 사용하는 값을 설계동결지수라고 하는데 설계동결지수의 산정은 대상 지역의 인근 측후소에서 관측

한 월 평균 대기온도의 크기와 지속기간에 대한 30년간의 기상자료에서 추위가 가장 심하였던 3년간(즉 동결지수의 최대 3년치)의 평균동결지수로 정한다. 만일 30년간의 기상자료가 없으면 최근 10년간의 최대동결지수를 설계동결지수로 산정한다. 동결지수는 측후소 위치에서 관측한 값을 토대로 한 것이므로, 설계노선의 표고에 대한 보정은 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\text{수정 동결지수 } (\text{°C} \cdot \text{일}) = \text{동결지수} + 0.9 \times \text{동결기간} \times \frac{\text{표고차 } (m)}{100} \quad \langle \text{식 5.22} \rangle$$

여기서, 표고차(m): 설계노선 최고 표고(m) - 측후소 지반고(m)

이와 같이 산출된 수정동결지수를 기준의 동결심도 산정모형을 적용하여 해당지역이 설계 동결깊이를 결정하게 된다.



〈그림 5.11〉 동결지수 산정 방법

5.3.2 동결심도 모형

국내의 개발된 대부분의 식들도 실제 현지에서 관측한 동결관입 깊이와 설계 동결지수를 토대로 해서 개발하였다. 다음 〈표 5.19〉는 4가지 국내 예측 모형을 나열한 것이다.

〈표 5.19〉 국내의 동결 심도 추정식

구분	모형식	비고
모형 1	$Z = C\sqrt{F}$	C : 지역 및 토군별 보정계수 (3~5)
모형 2	$Z = 14F^{0.33}$	
홍원표, 김명환	$z = 50 \log \left(\frac{F}{10 \cdot w \cdot r_d} \right)$	r_d : 흙의 건조단위중량 (g/cm^3) w: 흙의 함수비 (%)
건설기술연구원	$z = 31.86 \ln(F) - 84.632$	

5.3.3 동상 방지법의 종류 및 두께 설계

동결작용은 흙 중에 포화되어 있는 수분의 성질이 변화하여 일어나는 현상으로 비교적 입자가 작은 실트질 흙에서 일어나기 쉽다. 동결지역에서 포장을 설계할 때에는 동결작용에 의한 과도한 노면의 변위 발생을 방지하고 동결 해빙기간 중 적절한 지지력을 확보하여야 한다. 동상 방지법의 종류 및 두께 설계에 대해서 알아보자.

(1) 동방 방지법

가. 완전방지법(complete protection method)

동결작용에 의한 표면 변위량을 제거하기 위해 충분한 두께의 비동결성 층을 설치하여 포장의 융기와 지반의 약화를 감소 또는 억제하는 방법이다.

나. 노상동결 관입 허용법(limited subgrade frost penetration method)

노상상태가 수평방향으로 심하게 변하지 않거나 흙이 균질한 경우에 적용되는 설계방법이다. 동결 깊이가 노상으로 일정 깊이만큼 관입되더라도 동상으로 인한 융기량이 포장파괴를 일으킬만한 양이 아니라면 노상의 동결을 어느 정도 허용하는 것이 경제적이므로 제안된 방법으로 통상적으로 적용한다. 도로포장 구조 설계에서는 이 방법을 채택하여 설계 프로그램에 반영하였다.

다. 감소 노상 강도법(reduced subgrade strength method)

해빙 기간 중에 일어나는 노상강도 감소를 근거로 하여 동결에 대비한 포장 두께를 결정하는 것으로 동결지수가 직접함수가 아니므로 통상적으로 적용하는 방법은 아니다.

완전 방지법은 동결 작용에 의한 표면 변위량을 제거하기 위해 충분한 두께의 비동결성층을 설치하는 것으로, 노상의 동결을 일부 허용하는 노상 동결관입 허용법 및 감소 노상 강도법에 비해 비경제적이므로 특수한 경우에만 적용한다.

포장 구조 설계시 보편적으로 사용되고 있는 방법으로 노상 동결 관입 허용법과 감소 노상 강도법이 있으나, 후자는 설계 기준으로서 해빙 기간 중에 일어나는 노상 강도 감소를 근거로 하여 동결에 대비한 포장 두께를 결정하는 것으로, 동결지수와 직접적인 함수 관계가 없으므로 동결지수와 직접적인 함수 관계가 있는 노상 동결 관입 허용법을 통상적으로 적용한다.

(2) 동상 방지층 두께 설계

노상의 동결 관입허용법에 의해 동결깊이를 산정하는 방식은 아래와 같다.

가. 동결 기간의 시점에서 기층(보조기층 포함)과 노상토의 평균 함수비, 그리고 기층(보조기층 포함) 재료의 건조 단위중량(γ_d)을 결정한다. 기층과 보조기층을 모두 입상재료로 사용하는 경우, 각 층의 두께에 대한 중량비로서 평균 함수비와 단위 건조중량을 계산한다. 또한 안정처리 기층과 비처리 입상 보조기층으로 구성되는 경우에는 입상 보조기층의 함수비와 단위 건조 중량값을 적용한다.

나. <그림 5.12 도로설계편람 참조> 및 설계 동결지수 연도에 일어날 수 있는 최대 동결 관입 깊이, a 를 결정한다. 필요한 경우 직선 보간하여 결정한다.

- 다. 노상토 속에 동결 관입을 배제하는데 필요한 최대 비동결성 입상 재료 기층(보조기층 포함)두께, c를 계산한다.

$$c = a - p$$

〈식 5.23〉

여기서, c : 비동결성 재료 치환 최대 깊이

a : 설계 동결 관입 깊이 〈도로설계편람-포장부분 참조〉

p : 콘크리트 포장의 슬래브 두께 또는 아스팔트 포장의 표층두께

- 라. 노상토와 기층의 함수비의 비(r)를 계산한다.

중차량 통행이 많은 곳에서 r값은 2.0보다 큰 경우 2.0을 사용하고 이외의 모든 곳에서는 r이 3.0 이상인 경우 3.0을 사용한다.

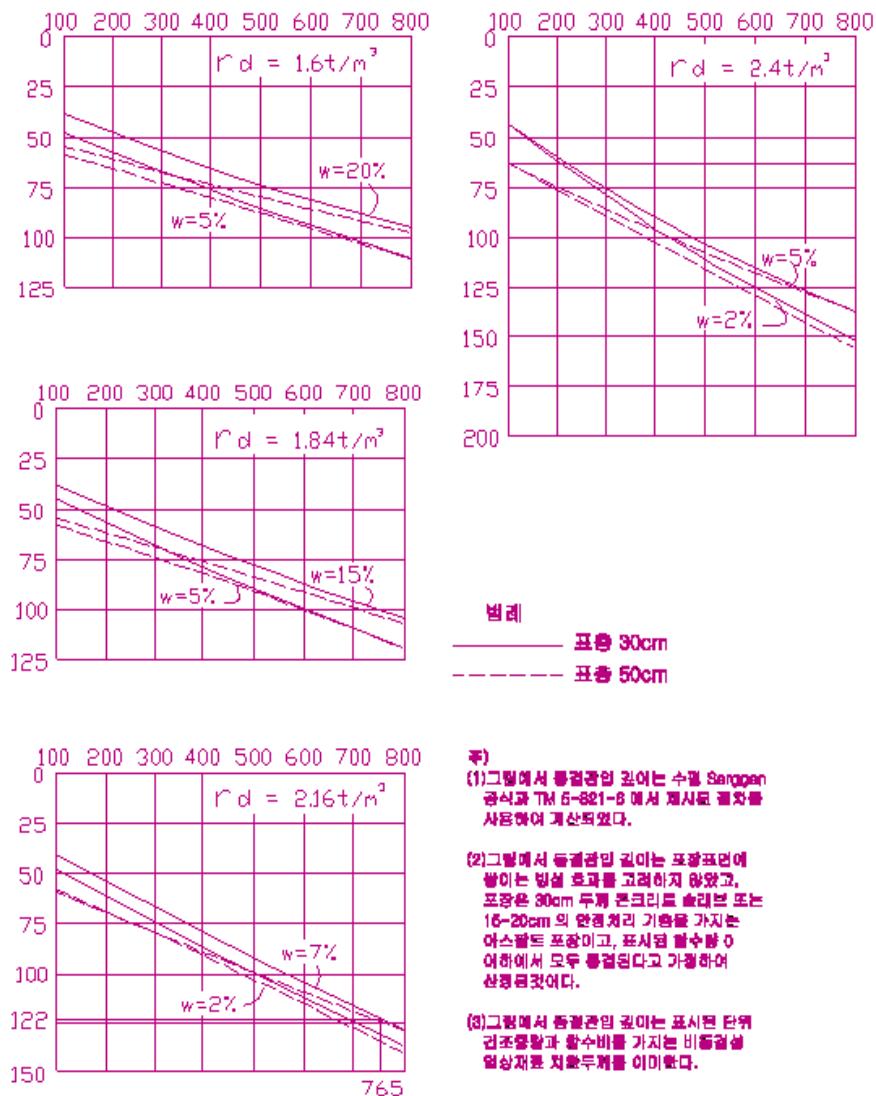
$$r = \frac{W_s}{W_b}$$

〈식 5.23〉

여기서, W_s : 노상토 함수비

W_b : 기층 함수비

설계 동결 지수(°F 일)



주)

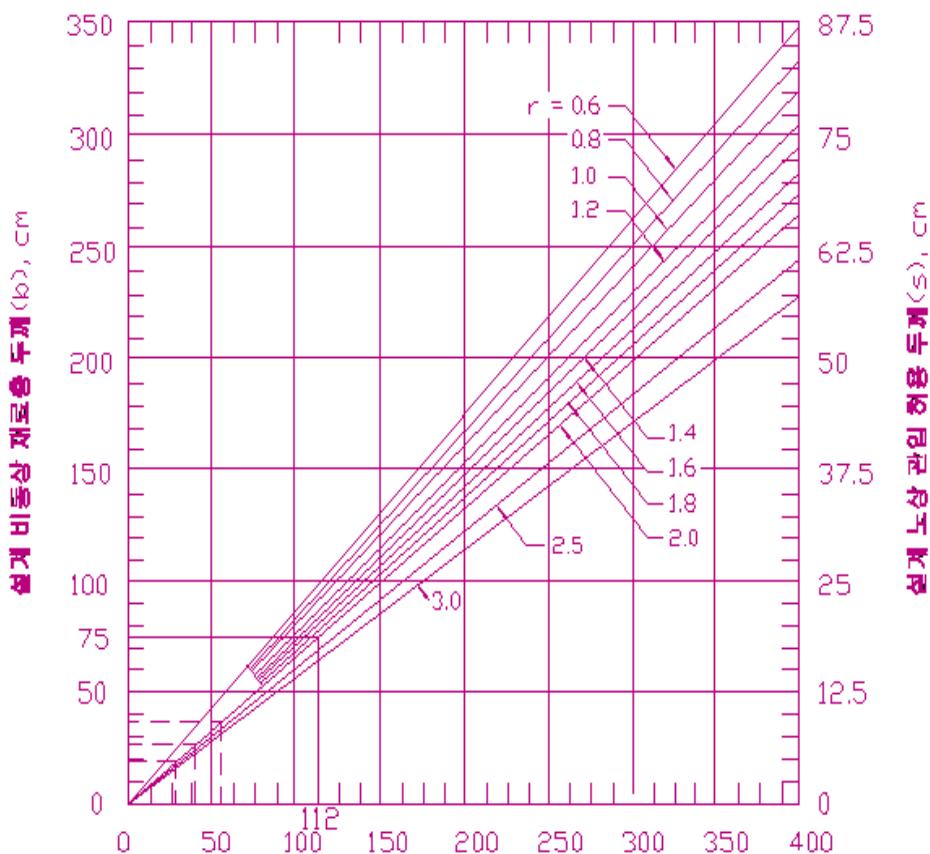
(1) 그림에서 동결관심 깊이는 수질 Sengen
증식과 TM 6-821-8에서 제시된 품종을
사용하여 계산되었다.

(2) 그림에서 동결관심 깊이는 표장표면에
쌓이는 방설 효과를 고려하지 않았고,
포장은 30cm 두께 콘크리트 슬리브 또는
15~20cm의 안경처리 기층을 가지는
아스팔트 포장이고, 표시된 험수를 0
여하에서 모두 동결된다고 가정하여
산정한 것이다.

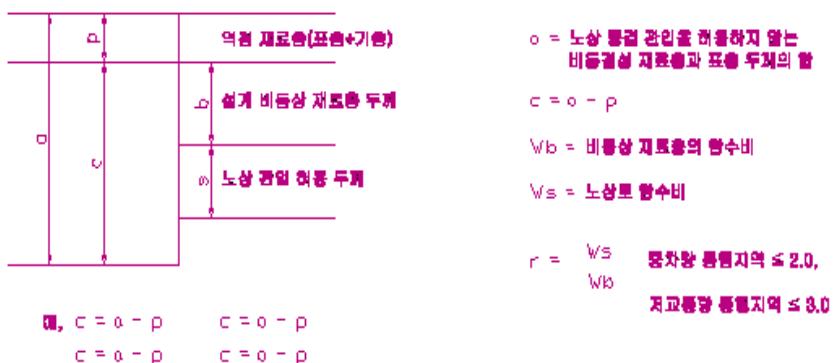
(3) 그림에서 동결관심 깊이는 표시된 단위
김조물활과 활수비를 가지는 비동결성
입상재로 치화두체를 이용한다.

설계 동결 지수 800 °F 일 이하의 경우

〈그림 5.12〉 동결 관입 깊이와 설계 동결지수 상관 도표



노상 둑걸 관입 길이가 0일 때 비둘걸성 재료층 길이(c) cm



〈그림 5.13〉 노상동결 관입허용법에 의한 설계 비동결성 재료종
두께결정 도표

- 마. <그림 5.13>에서 가로축에 c 값과 대각선의 r 값과 만나는 점을 지나는 수평선상의 좌측 세로축과 만나는 점으로 얻어지는 값이 소요의 비동결성 기층(보조기층 포함)두께, b 값이고 대응되는 우측 세로축의 값이 허용 노상 동결 관입 깊이, s 값이다.

이러한 절차로 결정되는 소요의 비동결성 기층(보조기층 포함) 두께, b 와 허용 노상 동결 관입 깊이(s)의 비는 $4 : 1$ 이고, $r = 1$ 일 때 $c = b+s$ 가 된다. 허용 노상 동결 관입 깊이(s)는 설계 노선의 평균적 현장 조건에서 설계 동결지수 연도의 1년 동안 포장 표면 사이에 과잉 동상 현상을 일으키지 않도록 허용할 수 있는 노상 관입 깊이이다.



6

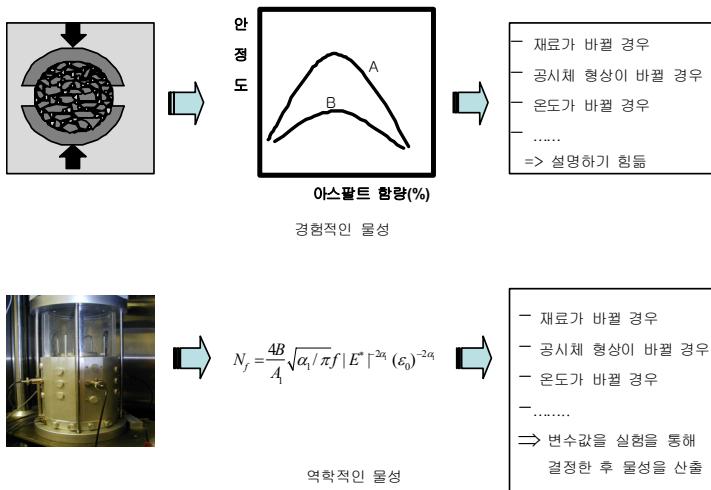
아스팔트 재료

6. 아스팔트 재료

아스팔트 재료는 온도, 하중의 크기, 하중 재하 속도 등에 따라 그 특성이 달라진다. 본 장에서는 아스팔트 재료를 정량화하기 위한 물성, 실험법에 대하여 알아보도록 하자.

6.1 아스팔트 재료 물성

아스팔트 포장 설계에 있어 재료 물성은 매우 중요한 부분이다. 기존의 경험적인 설계에서는 현장 경험을 바탕으로 아스팔트의 재료 물성을 추정하였다. 하지만 다른 입력 변수들과 같이 상이한 재료를 사용하는 경우에는 그 값이 달라져서 설계를 위한 기준이 모호했다. 역학적인 재료 물성은 크게 탄성계수와 포아송 비로 정의된다. 이 물성값을 초기에는 실험을 통해서 찾아냈지만 현재는 시간과 온도 등의 다양한 인자들을 고려한 모형을 개발하여 산정하고 있다. 흙의 정량화 부분에서 살펴보았듯이, 경험적인 재료의 물성은 구성방정식이 존재하지 않으며 재료의 형상, 시험조건 등에 따라 값이 달라지는 값이다. 이러한 것은 포장 재료에 대한 역학적인 정립이 되기 이전의 물성들로 대표적인 것이 침입도나 흐름값 등이 있다. 즉, 경험적으로 흐름값이 높은 경우 영구 변형이 많이 발생하지만 두께를 증가시켜 시공을 한다면 그 상황에 대한 물성을 설명하지 못한다. 반면, 역학적인 재료의 물성은 구성 방정식이 존재하여 그 식을 구성하는 영향 인자와 관련된 변수들을 실험을 통해 결정하고 이를 이용하여 재료의 물성을 평가한다. <그림 6.1>는 경험적 물성과 역학적 물성의 차이점을 나타낸 것이다. 아스팔트 재료의 물성값들은 구조해석을 통해 포장의 공용성을 예측하는 근간이 되고 있으며 보다 정확한 물성 추정을 위해 역학적인 이론 모형을 개발하기 위한 연구들이 수행되고 있다.



〈그림 6.1〉 경험적인 물성과 역학적인 물성의 차이점

6.1.1 사용되는 아스팔트 재료의 물성

(1) 동탄성계수

대개의 경우 아스팔트 바인더 및 아스팔트 혼합물은 온도와 하중주기 (Loading Frequency)에 크게 영향을 받는다. 따라서, 아스팔트 재료의 역학적 성질을 현장에서 경험하게 되는 모든 영역의 조건들로부터 결정된다. 동적하중시험(Dynamic Loading Test)은 아스팔트 재료특성을 시험할 수 있는 편리한 시험방법이다. 이 시험방법에 있어서 동탄성계수를 결정하는데 사용되는 시험은 주파수 F_r (Frequency) 또는 각 주파수 ω (Angular Frequency) 를 가진 Sinusoidal 비틀림과 Sinusoidal 힘, $F(t)$ 를 시편에 가하여 실시한다.

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) = 2\pi F r$$

〈식 6.16〉

이 시험으로부터 얻게 되는 결과는 힘(F), 변형(D) 및 위상각(ϕ)이다. 아스팔트 재료의 역학적 성질은 두 가지의 특정한 요소를 사용하여 〈식 6.16〉 으로부터 구한다. 동탄성계수인 $E^* = E_1 + E_2$ 는 두 요소에 의해 정의되며 E_1

및 E_2 는 〈식 6.17〉, 〈식 6.18〉과 같이 계산된다.

$$E_1 = r \left(\frac{F}{D} \cos \varphi + \mu \omega^2 \right) \quad \langle \text{식 } 6.17 \rangle$$

$$E_2 = r \left(\frac{F}{D} \sin \varphi \right) \quad \langle \text{식 } 6.18 \rangle$$

여기서, r : 형상계수(시편의 크기의 형상의 함수)

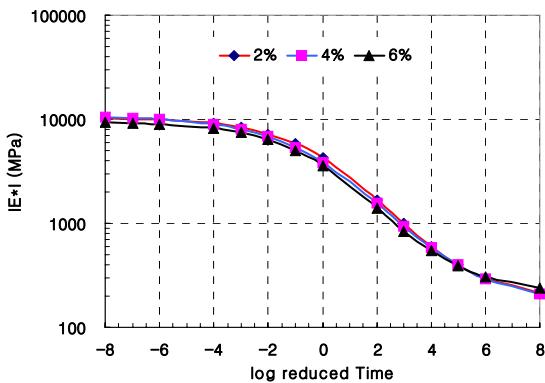
μ : 질량계수 (시편 질량 M 의 함수)

동탄성계수를 달리 표시하는 방법으로 절대치 〈식 6.19〉와 같이 $|E^*|$ 로 표현하여 많이 사용한다. 〈그림 6.2〉은 국내 화강암에 대한 동탄성계수 변화를 나타낸 그림이다.

$$|E^*| = \sqrt{(E_1^2 + E_2^2)} \quad \langle \text{식 } 6.19 \rangle$$

$$\phi = \tan \frac{E_2}{E_1} \quad \langle \text{식 } 6.20 \rangle$$

동탄성계수의 위상각(ϕ)은 힘과 변형으로부터 측정되는 위상각(ϕ)과 다르며 이 차이는 주파수에 따라 증가한다. 전단응력이 작용할 때, 동탄성전단계수 G^* 는 〈식 6.17〉 ~ 〈식 6.20〉의 E^* 계수를 구하는 방법과 동일한 방법으로 구할 수 있다. 선형 및 동일한 재료의 경우 G^* 와 E^* 의 관계는 〈식 6.21〉과 같다.



〈그림 6.2〉 마스터 곡선 (화강암 밀입도

13mm + PG 58-22)

$$E^* = 2 G^* (1+v)$$

〈식 6.21〉

일반적으로 하중 재하 시간이 길어 길수록 아스팔트 혼합물의 강성계수 값은 낮아지는 반면 하중 재하 속도가 빠르면 탄성계수가 커진다. 이는 차량의 속도에 따라 아스팔트 포장의 탄성계수가 달라져서 발생하는 포장체의 응력이 달라짐을 의미한다.

(2) 위상각

위상각은 시험 분석을 통해 아스팔트 재료의 점성 및 탄성 거동 특성을 점성거동을 측정하는 물성값이다. 위상각은 아스팔트의 점탄성적 거동을 나타내는 것으로 일반적으로 점성과 탄성의 비율 [$\tan(\gamma)$]로 나타내며 0° 에서 90° 사이에 있다. 위상각은 동적거동을 측정하여 얻을 수 있다. 원아스팔트의 위상각은 Huet 와 Sayegh(1967) 가 제안한 쌍곡선 모형을 기초로 한 절차를 사용하여 정확하게 구할 수 있다.

(3) 크리프 컴플라이언스

크리프 컴플라이언스는 일정한 응력하에서 시간에 따른 변형률의 비율을

나타낸 것으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad \langle \text{식 6.22} \rangle$$

여기서, $J(t)$: 크리프 캠플라이언스

$\varepsilon(t)$: 시간에 따른 변형률

σ : 일정 응력

앞에서 살펴본 각 점탄성 모형에서 J 값에 대한 모형은 각각 다르다.

(4) 온도의존 특성

동탄성계수는 온도와 주기의 함수이다. 이러한 관계는 계수의 등온선으로 그래프로 표현할 수 있다. 마스터 곡선은 $\log(\alpha_T)$ 계수를 두 기축을 따라 결과를 이동시킴으로써, <그림 6.2>과 같이 여러 온도와 주기에서 얻어진 계수로부터 작도 할 수 있다. 즉,

$$X = \log(\alpha_T \cdot F_r) \quad \langle \text{식 6.23} \rangle$$

여기서, α_T : 이동계수(shift factor)

F_r : 빈도

(식 6.23)은 온도와 주기의 관계이다. 이 절차의 장점은 일단 마스터곡선이 만들어지면 측정한 범위 내에서 주기 F_r 또는 온도 T 의 어떠한 조합이 되더라도 강성계수의 수치를 보간 해낼 수 있다. 이러한 보간법은 서로 다른 시험조건을 가진 서로 다른 시험실에서 얻은 실험결과를 비교할 수 있음을 물론, 시험온도와 주기를 표준화 할 필요가 없게 된다. 같은 원리를 시간의 존 특성(크리프 또는 완화곡선)에 적용할 수 있다. 이 경우 관련 변수는 $\log(t/\alpha T)$ 가 된다. 보정계수를 계산하는데 두 종류의 공식이 제안되어 있다.

다음 식은 1955년 William, Landel 및 Ferry 가 제안한 공식으로 WLF 보정계수로 불린다.

$$\log(\alpha_T) = \frac{-C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad \text{식 (6.24)}$$

여기서, C_1 과 C_2 는 매개 변수이다.

Arrhenius 가 제안한 식은 다음과 같다.

$$\log(\alpha_T) = \frac{0.4343\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_s} \right) \quad \text{식 (6.25)}$$

여기서, ΔH : 재료의 특성을 나타내는 명목활동 에너지

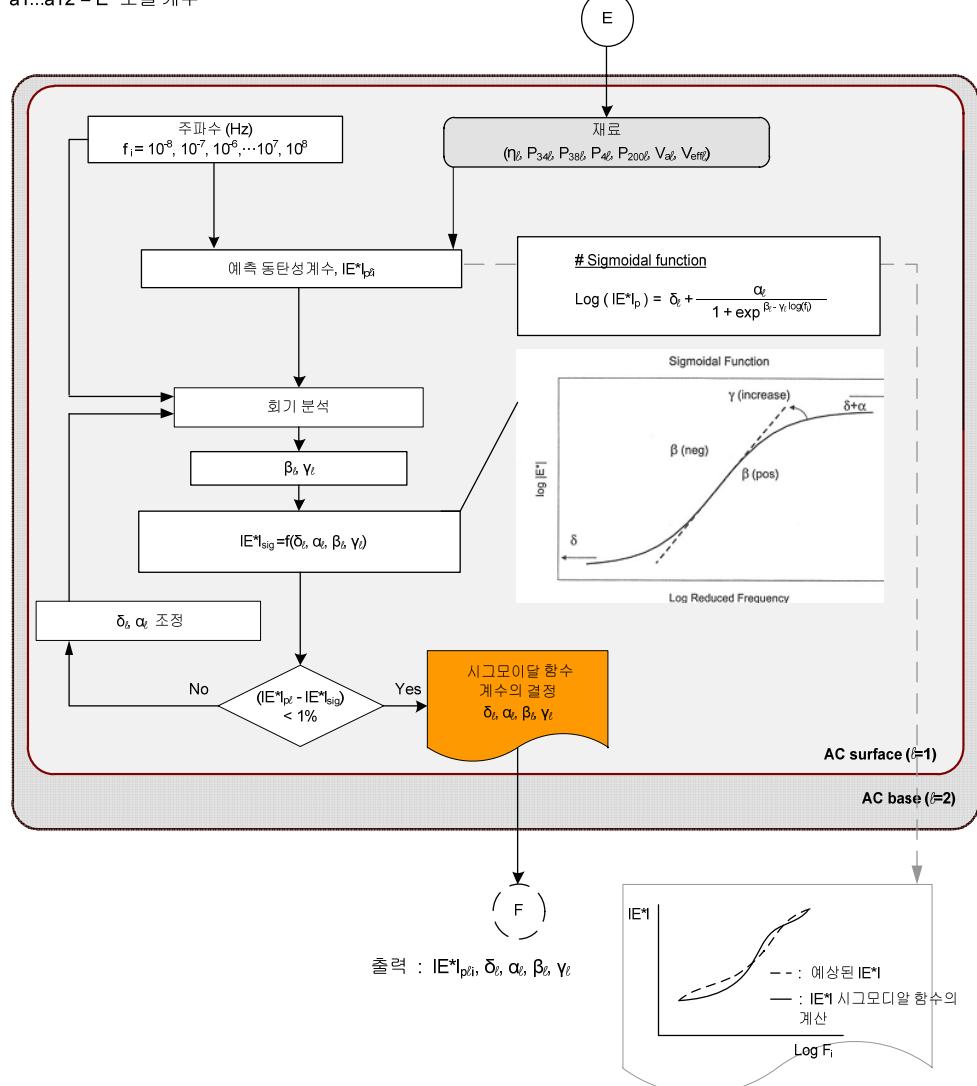
(50 Kcal/mole = 210 KJ/mole)

R: Gas Constant 상수 (8.27 J/mole/K)

T, T_s : °K 로 표시되는 온도

6.1.2 도로포장 구조 설계의 아스팔트 재료 물성

아스팔트 재료는 재료의 특성 및 하중재하 속도에 따라 달라지며, 그 결과를 동탄성계수로 나타낸다. 아스팔트 재료 물성에 대해서는 본 장에서 보다 자세히 설명될 것이며 도로포장 구조 설계의 동탄성계수를 예측하는 로직은 <그림 6.3> 및 다음 내용과 같다.

E#입력 변수 : η_{ℓ} , $P_{34\ell}$, $P_{38\ell}$, $P_{4\ell}$, $P_{200\ell}$, $V_{al\ell}$, $V_{eff\ell}$
#변수 정의 : η_{ℓ} = 아스팔트 바인더의 절대 점도 60°C (10^6 poise) $P_{34\ell}$ = 19mm 체의 골재 잔류율(%), 범위= 0% ~ 50% $P_{38\ell}$ = 9.5mm 체의 골재 잔류율(%), 범위= 0% ~ 50% $P_{4\ell}$ = 4.75mm 체의 골재 잔류율(%), 범위= 0% ~ 50% $P_{200\ell}$ = 0.075mm 체의 골재 잔류율 (%), 범위= 0% ~ 50% $V_{al\ell}$ = 아스팔트 믹스처의 공극률 (%), 범위= 2% ~ 20% $V_{eff\ell}$ = 아스팔트 혼합물의 효과적인 아스팔트 양 (%)a1...a12 = E^* 모델 계수 $|E^*|_{p\ell}$ = 예측 동탄성 계수 (MPa) δ_{ℓ} = 최소 동탄성 계수 (MPa) α_{ℓ} = 가능한 값의 범위 (0~1) β_{ℓ} & γ_{ℓ} = 형상 매개 변수 (β_{ℓ} : -2 ~ -0.5, γ_{ℓ} : 0~1)

〈그림 6.3〉 아스팔트 층의 동탄성계수 결정 로직

- ① 아스팔트 바인더 점도, 하중주파수, 공극률, 유효아스팔트바인더의 함량, 20 mm, 10 mm, 5 mm 체의 누가잔류량 및 0.08mm 체의 통과량을 실험을 통해 산정한다. 교통하중에서 설계속도에 따른 각 층의 하중 주파수를 계산한다.
- ② 각 입력 변수들을 동탄성계수 예측식에 대입하여 초기 동탄성계수를 예측한다.
- ③ 예측한 초기 동탄성계수와 시그모달 함수를 바탕으로 회귀분석을 실시하여 시그모달 함수의 계수값을 결정한다.
- ④ 초기 동탄성계수와 계수를 결정하여 시그모달 함수를 통해 계산한 동탄성계수값을 비교한다.
- ⑤ 그 차이가 1% 이내로 나면 주어진 조건의 동탄성계수로 사용한다. 하지만 1% 이상 차이가 발생하면 다시 회귀식 분석을 통해 시그모달 함수의 계수값을 조정하여 반복 계산한다.

(1) 포장설계 동탄성계수 추정식

도로포장 구조 설계에서 아스팔트 재료 물성은 동탄성계수로 정의하였고, 국내에서 사용되는 혼합물에 대한 물성실험을 진행하여 이를 정량화하였다. 현재 동탄성계수는 표층용 혼합물(밀입도 13mm와 20mm), 기층용 혼합물(25mm), 개립아스팔트혼합물(SMA 13mm), 개질아스팔트혼합물(13mm)과 아스팔트 바인더의 경우 3개의 다른 등급인 PG 58-22(AP-3), PG 64-22(AP-5), PG 76-22에 대해 데이터 베이스가 구축되었다.

각 골재와 아스팔트 바인더의 조합을 통해 도로포장 구조 설계에서는 〈식 6.26〉과 같은 예측식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} \text{Log}|E^*| = & a_1 + a_2(P_{200}) + a_3(P_4) + a_4(V_a) + \frac{a_5(V_{beff})}{V_{beff} + V_a} \\ & + \frac{a_6 + a_7(P_4) + a_8(P_{38}) + a_9(P_{34})}{1 + e^{(a_{10} + a_{11} \times \log(f) + a_{12} \times \log(\eta))}} \end{aligned} \quad \langle \text{식 } 6.26 \rangle$$

여기서, $|E^*|$: 동탄성계수 (MPa)

η : 아스팔트 바인더 점도 (106 poise)

f : 하중주파수 (Hz)

V_a : 공극률(%)

V_{bef} : 유효아스팔트바인더의 함량(%)

P_{34} : 20mm 체의 누가잔류량(%)

P_{38} : 10mm 체의 누가잔류량(%)

P_4 : 5mm 체의 누가잔류량(%)

P_{200} : 0.08mm 체의 통과량(%)

(2) 동탄성계수 추정식 입력변수로서의 아스팔트 바인더의 점도특성

〈표 6.1〉은 동탄성계수 추정식을 개발하는데 사용한 아스팔트의 입력변수로서 사용한 각 아스팔트 바인더의 온도별 점도를 보여주고 있다. 아스팔트 점도는 온도에 따라 변화함으로 5개의 온도에서 아스팔트 점도를 측정하여 아스팔트 점도와 온도와의 상관관계로부터 구한 식을 사용하였다. 〈표 6.2〉에서 VTS는 상관관계식의 기울기이며, A는 상관관계의 아스팔트 점도 축과 만나는 교차점이다.

〈표 6.1〉 아스팔트 종류별 점성특성

혼합물	아스팔트	시험온도	η	VTS	A
표층용 13mm	PG 58-22	-10	27000	-3.981	11.787
		5	921.12		
		20	5.968		
		40	0.0692		
		55	0.0048		
		-10	27000		
표층용 19mm 기층용 25mm SMA 13mm	PG 64-22	5	1276.20	-3.680	10.980
		20	10.967		
		40	0.1515		
		55	0.0111		
		-10	27000		
		5	2206.53		
개질 13mm	PG 76-22	20	30.245	-3.208	9.715
		40	0.5702		
		55	0.0473		
		-10	27000		
		5	2206.53		

(3) 동탄성계수 추정식 입력변수로서의 아스팔트 혼합물의 기본물성

아스팔트 혼합물의 기본 물성중에서는 골재입도분포, 아스팔트 혼합물 부피특성이 주요 입력변수로 사용되었다. 〈표 6.2〉에서 지금까지의 시험을 통해 수정 보완된 각 혼합물의 조합별 골재 입도분포 특성인 20mm, 10mm, 5mm 체크기의 누가잔류량과, 0.08mm체 통과량 및 아스팔트 혼합물의 공극률(V_a)과 유효아스팔트 함량(V_{beff}) 등을 볼 수 있다.

〈표 6.2〉 아스팔트 혼합별 기본 물성치

혼합물	아스팔트	P ₃₄	P ₃₈	P ₄	P ₂₀₀	V _a	V _{beff}
SMA 13mm	PG 58-22	0	38.75	72.5	10	2.783	12.3
						4.426	12.1
						6.802	11.8
	PG 64-22	0	38.75	72.5	10	1.612	12.3
						3.08	12.2
						4.909	11.9
표층용 13mm	PG 58-22	0	11	32.5	7	2.235	11.0
						4.064	10.8
						6.249	10.6
	PG 64-22	0	11	32.5	7	2.076	11.3
						4.217	11.0
						6.243	10.8
표층용 19mm	PG 58-22	2.5	24	45	6	2.457	10.4
						4.484	10.2
						6.388	10.0
	PG 64-22	2.5	24	45	6	1.927	10.7
						4.159	10.5
						5.962	10.3
기층용 25mm	PG 58-22	13	35	51	4	1.604	9.6
						3.616	9.4
						5.607	9.2
	PG 64-22	13	35	51	4	1.869	9.5
						3.777	9.3
						5.919	9.1
개질 13mm	PG 76-22	0	12.5	39	6	3.129	10.6
						4.058	10.5
						5.429	10.4

(4) 동탄성계수 시험결과 및 회귀분석에 의한 입력변수값

〈표 6.3〉에서 〈표 6.11〉은 지금까지 도로포장 구조 설계 연구를 통해 시험한 각 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 시험 결과값을 정리한 것이다.

〈표 6.3〉 표층용 화강암 13mm+AP-3(PG58-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10°C	0.05	7874.3	10.72	7367.0	10.75	6359.0	9.64
	0.1	8052.7	9.60	7547.0	10.21	6733.3	9.49
	1	9108.0	6.65	8613.5	6.31	7722.5	6.91
	10	9539.3	4.44	8959.5	4.50	8202.0	4.27
	25	9265.3	3.94	8660.0	1.79	8491.8	5.88
5°C	0.05	5209.0	15.78	4662.0	15.91	4416.7	16.68
	0.1	5566.3	12.66	4917.7	14.01	4694.3	15.21
	1	6748.3	8.62	6060.3	10.30	5729.3	8.72
	10	7735.3	6.55	6833.3	7.65	6668.3	7.16
	25	7975.3	4.15	6964.7	4.35	6632.3	5.68
20°C	0.05	2479.3	26.50	2196.3	26.44	1957.0	27.02
	0.1	2801.7	24.11	2150.7	24.96	2188.3	25.38
	1	4111.3	14.78	3672.0	16.69	3342.3	16.29
	10	5178.7	11.85	4802.7	10.37	4582.7	11.92
	25	5977.0	12.06	5411.0	10.56	5013.0	11.91
40°C	0.05	739.0	18.35	715.0	19.37	653.0	21.23
	0.1	818.0	19.32	791.3	19.79	739.7	20.55
	1	1229.0	20.81	1143.0	19.52	1023.7	18.05
	10	1948.3	21.28	1828.7	17.52	1574.3	21.15
	25	2369.3	19.80	2108.3	14.12	1874.7	16.52
55°C	0.05	326.7	12.43	302.7	14.46	274.0	12.26
	0.1	324.0	13.25	323.7	14.63	292.3	13.58
	1	426.3	15.69	433.7	16.73	368.0	16.27
	10	679.7	22.19	652.3	22.88	563.7	20.45
	25	857.0	16.06	834.3	27.23	677.7	20.13

〈표 6.4〉 표층용 화강암 13mm+AP-5(PG64-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10°C	0.05	9035.7	8.85	8092.0	7.90	7299.7	9.30
	0.1	9291.3	7.67	8352.0	7.71	7547.3	8.29
	1	10068.7	5.52	9180.0	5.81	8528.3	4.90
	10	11050.3	3.47	10440	3.82	8784.0	4.75
	25	10275.3	3.55	9812.5	5.03	8931.0	3.12
5°C	0.05	5536.7	15.01	5050.7	15.72	4485.3	15.55
	0.1	5689.7	13.63	5413.0	13.95	4650.3	14.35
	1	7028.0	9.32	6701.7	8.36	5653.7	9.02
	10	8226.7	6.04	7496.3	6.79	6751.3	7.16
	25	7683.7	5.31	7734.3	6.04	6655.3	4.88
20°C	0.05	2426.7	25.61	2293.3	25.58	1982.0	27.05
	0.1	2760.7	24.00	2545.0	24.36	2254.0	24.45
	1	4253.7	16.14	3869.7	15.24	3372.3	16.60
	10	5937.3	10.01	4923.7	11.10	4475.7	11.86
	25	5961.7	8.04	5337.7	11.74	4968.7	13.23
40°C	0.05	855.0	18.19	770.7	20.90	738.0	23.27
	0.1	956.3	19.94	870.0	21.53	825.3	22.34
	1	1401.0	18.86	1327.7	19.45	1279.0	18.25
	10	2340.0	19.83	2058.0	20.00	1967.3	16.98
	25	2807.7	17.47	2596.7	17.85	2190.7	17.57
55°C	0.05	341.0	9.91	324.7	13.05	317.7	13.78
	0.1	357.0	12.27	342.3	14.27	327.0	14.52
	1	469.0	15.94	468.3	18.35	462.7	18.15
	10	726.3	20.99	727.7	19.16	712.3	22.25
	25	891.0	21.77	933.0	22.79	908.3	23.51

〈표 6.5〉 표층용 화강암 19mm+AP-3(PG58-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10°C	0.05	7742.7	10.64	7288.7	11.17	6821.7	10.70
	0.1	8110.3	9.55	7495.7	10.33	7055.0	9.27
	1	9215.7	7.47	8700.3	7.01	7893.0	6.42
	10	9757.3	5.07	9245.7	5.46	8532.7	4.21
	25	9730.7	2.93	8619.7	3.28	8515.7	3.58
5°C	0.05	4539.0	16.10	4140.3	16.55	4525.7	17.61
	0.1	4744.3	15.22	4341.3	14.58	4778.7	14.86
	1	6038.7	9.09	5318.3	9.47	5992.7	10.69
	10	6425.3	6.06	5834.0	6.17	6850.7	7.37
	25	6601.3	5.09	5742.0	3.71	6969.3	5.08
20°C	0.05	2233.7	27.22	1926.7	26.61	1948.3	26.51
	0.1	2543.7	25.75	2171.7	25.01	2215.7	24.94
	1	3816.3	16.71	3228.7	16.45	3408.7	15.96
	10	5245.3	11.50	4303.7	11.26	4528.7	13.13
	25	5603.3	13.26	4513.0	10.55	5017.0	12.37
40°C	0.05	755.3	18.04	702.0	20.24	706.3	19.97
	0.1	825.7	17.98	757.3	19.93	776.7	18.64
	1	1183.0	17.02	1061.0	17.88	1086.0	17.79
	10	1834.3	20.33	1621.3	17.80	1702.0	16.18
	25	2165.7	15.16	1929.3	17.63	1999.0	17.98
55°C	0.05	322.3	11.19	301.7	12.82	282.7	11.70
	0.1	344.0	13.27	313.3	13.53	293.7	12.93
	1	427.3	16.41	403.7	15.71	359.7	14.97
	10	640.3	28.33	577.0	21.12	511.3	19.94
	25	796.0	23.88	733.0	21.28	616.0	20.27

〈표 6.6〉 화강암 밀입도 19mm+AP-5(PG64-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10°C	0.1	20432	15.13	24293	14.37	21008	15.49
	0.5	23909	11.88	28037	13.43	25132	14.52
	1	25576	10.08	30655	11.84	28054	10.76
	5	29363	5.15	34322	6.64	28575	7.83
	10	30794	4.69	35081	6.01	33359	6.76
	25	32388	8.60	34918	6.39	34265	4.90
5°C	0.05	10890	12.90	11705	18.75	10302	15.78
	0.1	15228	15.04	15233	13.00	14669	13.61
	1	16043	14.15	16401	10.89	15399	9.43
	5	18934	7.65	21724	8.07	18422	9.42
	10	21377	5.90	26052	6.03	19697	6.43
	25	22443	7.36	25521	7.06	24540	5.46
20°C	0.05	3632	31.63	3636	34.59	3426	30.93
	0.1	5518	24.24	8154	24.79	5829	23.67
	1	7230	22.58	9378	26.97	6304	24.75
	5	13223	14.51	13972	21.24	11885	18.54
	10	10845	16.02	15616	21.12	13068	19.64
	25	13843	11.90	17882	11.38	11268	12.93
40°C	0.05	1883	28.16	1369	42.46	1585	42.49
	0.1	2972	27.82	1873	42.29	2314	38.56
	1	3387	29.09	1895	39.41	2950	37.07
	5	6270	33.02	3210	34.39	6311	32.44
	10	8231	34.28	4177	30.53	8018	34.27
	25	7871	35.71	5126	35.30	8885	35.85
55°C	0.05	1965	39.90	1384	40.23	1221	37.54
	0.1	2397	39.93	1828	41.30	1498	37.24
	1	2115	35.53	1942	32.68	1396	36.35
	5	2593	36.35	2088	35.52	1874	45.68
	10	2726	33.08	2359	43.10	2212	41.10
	25	4449	38.17	2883	39.72	2766	41.61

〈표 6.7〉 화강암 기층용 아스팔트 25mm+AP-3(PG58-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10°C	0.1	22674	11.09	39615	10.57	26841	10.34
	0.5	27122	10.25	41292	9.92	34195	9.38
	1	30808	9.74	47065	9.56	37979	9.00
	5	37109	9.14	53588	9.44	39323	8.66
	10	38517	7.19	54162	7.37	44264	7.07
	25	42207	6.11	56504	6.25	44310	6.03
5°C	0.05	17342	17.57	23765	17.61	18434	16.45
	0.1	19492	16.15	27533	15.63	22915	14.94
	1	24779	13.99	32150	13.40	25964	13.54
	5	29945	12.36	39010	12.15	29133	11.16
	10	30612	9.45	38437	9.06	30557	8.19
	25	26939	3.53	36713	4.51	29229	5.21
20°C	0.05	4438	31.55	7630	32.04	4819	32.08
	0.1	6854	27.57	8861	26.89	6767	27.17
	1	8897	24.49	10876	24.01	7536	24.03
	5	12238	21.93	13285	20.85	12206	20.70
	10	12417	20.54	15931	19.88	12845	19.18
	25	12488	19.79	13920	19.14	13093	18.86
40°C	0.05	1614	25.74	1740	24.94	1792	26.87
	0.1	1939	26.01	2028	26.66	2117	27.62
	1	2808	28.89	3036	29.80	2283	30.34
	5	3761	29.83	3727	28.43	4111	29.71
	10	5870	30.70	4563	29.32	4831	31.35
	25	7506	26.05	4987	26.42	6754	28.28
55°C	0.05	1341	22.92	1331	23.88	1074	23.45
	0.1	1586	23.90	1499	22.38	1402	24.10
	1	1641	26.04	1640	26.58	1775	25.66
	5	2202	30.08	2407	33.67	2703	31.99
	10	3066	36.44	2322	36.10	2409	35.36
	25	2830	35.75	2467	34.96	2439	36.21

〈표 6.8〉 화강암 기층용 아스팔트 25mm+AP-5(PG64-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10°C	0.1	24356	10.76	21583	10.36	22332	10.34
	0.5	33197	9.91	27915	9.72	26176	9.38
	1	35631	10.13	30700	9.37	28677	9.00
	5	34704	9.17	33011	9.25	32478	8.66
	10	41939	7.53	33876	7.22	32226	7.07
	25	42087	6.44	37793	6.13	37044	6.03
5°C	0.05	18567	17.90	15126	17.26	15911	16.45
	0.1	22444	16.48	17892	15.32	18194	14.94
	1	24094	14.33	21575	13.14	23363	13.54
	5	30522	12.69	23755	11.90	27284	11.16
	10	32562	9.79	26921	8.88	26694	8.19
	25	30428	3.86	30490	4.42	30257	5.21
20°C	0.05	7042	31.88	4395	31.40	3100	32.08
	0.1	10378	27.90	7598	26.35	5780	27.17
	1	11842	24.82	9855	23.53	6669	24.03
	5	13727	22.26	12685	20.43	12174	20.70
	10	16461	20.75	17907	19.48	13110	19.18
	25	16877	20.13	18711	18.76	16435	18.86
40°C	0.05	1320	26.08	2715	24.44	1418	26.87
	0.1	1957	26.34	3898	26.13	2611	27.62
	1	2934	29.22	4674	29.21	3249	30.34
	5	6460	30.17	5377	27.86	6311	29.71
	10	7218	31.03	5385	28.73	5743	31.35
	25	8466	26.38	6545	25.89	7426	28.28
55°C	0.05	1177	23.29	2458	23.40	1446	23.45
	0.1	1192	24.24	2985	21.94	1371	24.10
	1	1436	26.37	2774	26.05	1368	25.66
	5	2243	30.41	3595	33.00	2149	31.99
	10	2323	36.77	5586	35.38	2534	35.36
	25	2589	36.09	6105	34.26	3712	36.21

〈표 6.9〉 화강암 SMA 13mm+AP-3(PG58-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10°C	0.1	16758	15.44	15200	14.67	11603	15.81
	0.5	18324	12.12	16897	13.70	17468	14.82
	1	21708	10.28	18996	12.09	19070	10.98
	5	23953	5.25	20820	6.77	21127	7.99
	10	25691	4.78	24781	6.13	20282	6.89
	25	26892	8.78	27092	6.52	23857	5.00
5°C	0.05	8868	13.16	9240	19.13	8810	16.10
	0.1	11753	15.35	12076	13.26	11214	13.89
	1	12995	14.44	16968	11.12	12009	9.63
	5	15016	7.81	19784	8.23	15377	9.62
	10	16988	6.02	19030	6.15	17141	6.56
	25	17229	7.51	21254	7.21	20228	5.57
20°C	0.05	4317	32.27	3454	35.29	3336	31.56
	0.1	6782	24.74	6351	25.29	5521	24.15
	1	5495	23.04	5353	27.52	6504	25.25
	5	7701	14.80	9136	21.67	9917	18.92
	10	8448	16.35	8427	21.55	7571	20.04
	25	9785	12.14	11956	11.62	8465	13.19
40°C	0.05	980	28.73	557	43.33	575	43.35
	0.1	1723	28.39	906	43.15	988	39.35
	1	1953	29.68	1135	40.22	1217	37.83
	5	3104	33.69	2037	35.10	2199	33.10
	10	4297	34.98	2685	31.16	3377	34.97
	25	5714	36.44	2433	36.02	3434	36.58
55°C	0.05	593	40.71	391	41.05	464	38.31
	0.1	852	40.75	550	42.15	524	38.00
	1	883	36.26	523	33.34	663	37.09
	5	1270	37.09	854	36.24	1382	46.61
	10	2233	33.76	1177	43.98	1289	41.94
	25	3490	38.95	1600	40.53	2076	42.46

〈표 6.10〉 화강암 SMA 13mm+AP-5(PG64-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10°C	0.1	21994	15.44	19590	14.67	18947	15.81
	0.5	25773	12.12	23725	13.70	21945	14.82
	1	27292	10.28	25680	12.09	24013	10.98
	5	28735	5.25	27508	6.77	26415	7.99
	10	32896	4.78	31618	6.13	30424	6.89
	25	35380	8.78	29585	6.52	31832	5.00
5°C	0.05	15453	13.16	12849	19.13	11783	16.10
	0.1	16748	15.35	16391	13.26	16591	13.89
	1	19319	14.44	18300	11.12	18736	9.63
	5	23220	7.81	22369	8.23	23912	9.62
	10	24385	6.02	23589	6.15	23405	6.56
	25	28604	7.51	23807	7.21	22466	5.57
20°C	0.05	5088	32.27	6185	35.29	3410	31.56
	0.1	7256	24.74	9942	25.29	5300	24.15
	1	8741	23.04	11488	27.52	6346	25.25
	5	13652	14.80	10054	21.67	9864	18.92
	10	15216	16.35	9221	21.55	11439	20.04
	25	16095	12.14	11753	11.62	14284	13.19
40°C	0.05	2005	28.73	1343	43.33	1475	43.35
	0.1	3337	28.39	2255	43.15	2416	39.35
	1	4795	29.68	2780	40.22	2973	37.83
	5	4841	33.69	5256	35.10	5072	33.10
	10	5018	34.98	5997	31.16	6267	34.97
	25	6305	36.44	5142	36.02	4758	36.58
55°C	0.05	1196	40.71	876	41.05	1159	38.31
	0.1	1625	40.75	1201	42.15	1338	38.00
	1	2118	36.26	1466	33.34	1381	37.09
	5	2715	37.09	1992	36.24	1923	46.61
	10	2938	33.76	2687	43.98	2879	41.94
	25	3913	38.95	4285	40.53	4529	42.46

〈표 6.11〉 화강암 개질아스팔트 13mm+슈퍼팔트(PG76-22)

공극율		2%		4%		6%	
시험온도	주파수	E*	δ	E*	δ	E*	δ
-10°C	0.1	17745	14.60	17034	11.64	16670	13.81
	0.5	22143	9.12	20991	11.03	19691	12.76
	1	24648	8.92	22843	10.92	19684	12.75
	5	25479	6.81	25716	8.27	23389	8.90
	10	26730	5.71	26786	6.65	21456	6.41
	25	27084	5.73	26892	5.93	25626	4.87
5°C	0.05	11364	14.50	8384	18.70	9882	18.14
	0.1	14238	12.98	12588	15.85	14938	13.18
	1	16447	11.22	13127	12.78	16868	12.05
	5	20273	10.52	18112	9.37	20995	11.26
	10	17641	7.00	20515	7.91	23674	6.99
	25	19570	7.00	21778	6.91	22969	6.19
20°C	0.05	2970	29.72	5293	32.71	5247	32.48
	0.1	4209	29.89	6854	29.00	7547	28.59
	1	4714	27.91	10090	25.12	9301	25.67
	5	7628	19.37	14158	21.52	13935	22.43
	10	7190	15.16	15822	14.68	15259	20.18
	25	9147	10.02	13774	9.91	19087	13.24
40°C	0.05	1422	29.68	1953	33.80	1262	35.06
	0.1	2123	30.14	3552	34.55	2062	33.90
	1	2487	29.03	3817	31.49	2339	35.11
	5	3613	26.97	6368	29.32	4012	33.65
	10	5053	22.10	8303	32.08	4245	29.41
	25	5983	18.88	9002	14.77	6827	27.18
55°C	0.05	1218	27.64	1266	39.12	1036	37.49
	0.1	1605	28.69	1954	41.13	1952	36.81
	1	1530	31.13	2202	32.39	1864	35.54
	5	2942	32.27	3248	34.95	3147	34.17
	10	2886	37.98	3721	34.95	3730	33.99
	25	3202	42.49	4978	39.39	5709	33.41

(식 6.26)의 동탄성계수 추정식에 각각의 혼합물별 아스팔트 바인더 점도자료와 아스팔트 혼합물 배합설계자료를 이용하여 회귀분석을 통해 Parameter a_1 부터 a_{12} 까지 결정하여 〈표 6.12〉에 나타내었다.

〈표 6.12〉 동탄성계수 추정식 파라미터

추정식 파라미터	
a_1	6.940166
a_2	-0.00176
a_3	0.003889
a_4	-0.08776
a_5	-1.33426
a_6	-3.63992
a_7	-0.03114
a_8	0.015546
a_9	0.010469
a_{10}	-0.09942
a_{11}	0.162727
a_{12}	0.180695

(5) 마스터 곡선 파라미터

일반적으로, 저온 및 상온에서의 아스팔트 혼합물의 하중응답특성은 지수함수형태를 이용하고, 고온에서의 특성 평가 시에는 다중함수(Polynomial Fitting Function)를 이용한다. Pellinen(2001)에 의해 제안된 새로운 방법은 Sigmoidal 함수를 이용하여 마스터곡선을 결정하는 것으로, 이 함수는 측정된 동탄성계수를 비선형최소자승법을 이용하여 처리한다. 기본방정식은 (식 6.27) 및 (식 6.28)과 같고, 통계프로그램을 이용하여 방정식에 사용된 파라미터를 결정하였다.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp^{-\gamma \log(t_r)}} \quad \text{식 (6.27)}$$

$$\log(t_r) = \log(t) - c \{ \log(n) - \log(n_{Tr}) \} \quad \text{식 (6.28)}$$

여기서, $\log(|E^*|)$ = 로그 함수값의 동탄성계수

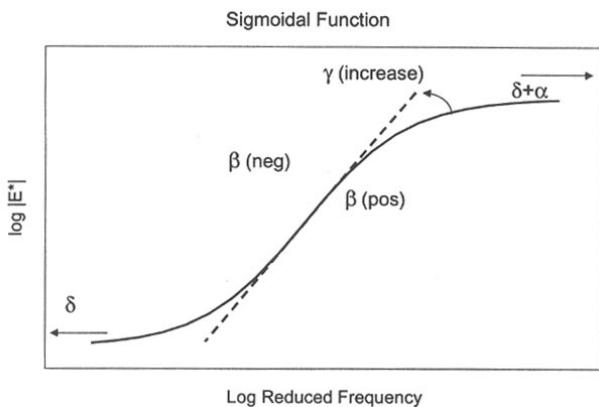
δ = 최소계수 (Minimum Modulus)

α = 가능한 값의 범위 (Range of Possible Value)

β & γ = 형상계수 (Shape Parameter)

n, n_{Tr} = 아스팔트 바인더의 점도

〈그림 6.4〉에 나타난 것과 같이, γ 는 함수 값의 기울기를 의미하고, β 는 수평방향의 분기점(Turning Point)을 의미한다.



〈그림 6.4〉 형상계수(Shape parameter)의 정의

동탄성계수 시험결과에서 결정된 동탄성계수를 실수부(탄성영역, E1)와 허수부(점성영역, E2)로 구분할 수 있고, 이를 그래프로 표시한 것을 Cole & Cole Plane 또는 복합평면 (Complex Plane)이라 한다. 로그 스케일안에 있는 동탄성계수의 절대값과 위상각(Phase Angle)의 상관관계를 나타내는

그래프를 Black Space라 정의한다. Black Space에서 하중주파수와 온도는 동탄성계수와 위상각의 상관관계에 영향을 미치지 않고, 위상각이 0인 경우는 재료의 탄성적인 특성을 보여준다. 역학적-경험적 설계인 도로포장 구조 설계에서는 다층탄성이론을 이용하여 도로포장체의 응력과 변형을 해석하고, 이런 해석을 할 때 도로 포장체의 주요한 물성치가 동탄성계수이다. 이 방법에서는 아스팔트 바인더의 점성(Viscosity)을 이용하여 변환함수(Shift Factor)를 결정하고, 이를 이용하여 아스팔트 혼합물의 동탄성계수를 결정한다(김현오, 2005).

(6) 새로운 아스팔트 재료에 대한 물성 정량화

새로운 재료에 대해 직접 재료 실험을 할 경우는 동탄성계수 마스터 곡선의 매개변수를 이용한다. 동탄성계수 마스터 곡선의 매개변수 δ , a , β , γ , c 를 구하기 위해 아스팔트 혼합물 표층 19mm와 기층 25mm의 시험 결과에 대한 회귀분석을 통해 <표 6.13>과 같이 아스팔트 혼합물에 대해 결정한 마스터곡선 입력변수를 제안하였다.

〈표 6.13〉 동탄성계수 마스터곡선 파라미터

층 종류	골재 분포	아스팔트 종류	공극률	δ	α	β	γ	c
표총	SMA 13mm	PG 58-22	2%	2.3116	2.2389	-0.4729	0.6784	1.1266
			4%	2.2657	2.3338	-0.4860	0.6237	1.2592
			6%	2.3701	2.1623	-0.3743	0.7314	1.0516
		PG 64-22	2%	0.2482	4.4556	-1.3504	0.2854	1.0735
			4%	2.2052	2.2314	-0.7859	0.5515	1.2294
			6%	2.0799	2.3362	-0.8662	0.5433	1.0612
	밀입도 13mm	PG 58-22	2%	2.2031	2.4089	-0.7713	0.5107	1.1630
			4%	2.1653	2.4625	-0.8773	0.4410	1.2603
			6%	1.5826	3.0616	-1.2297	0.3633	1.3271
		PG 64-22	2%	2.1962	2.4639	-0.8287	0.4915	1.1021
			4%	2.2990	2.2755	-1.0054	0.5677	1.1230
			6%	2.2363	2.3375	-0.9449	0.5412	1.0264
	밀입도 19mm	PG 58-22	2%	2.3443	2.3328	-0.7970	0.3751	1.0136
			4%	0.7413	3.9052	-1.4968	0.2981	1.0879
			6%	2.7086	1.8659	-0.4539	0.5948	0.7979
		PG 64-22	2%	3.1126	1.4205	-0.1498	0.7527	0.7625
			4%	3.0621	1.4655	-0.2013	0.8517	0.9328
			6%	2.7102	1.8787	-0.4579	0.5931	0.8307
	13mm	PG 76-22	2%	2.8391	1.8076	-0.0698	0.4886	1.0038
			4%	2.3319	2.2273	-0.9391	0.4976	0.7890
			6%	2.8581	1.5720	-0.7116	0.8231	0.8047
기총	25mm	PG 58-22	2%	2.8452	1.8145	-0.3575	0.5609	0.9716
			4%	2.7783	2.0697	-0.3650	0.3508	1.5613
			6%	2.7315	2.0324	-0.3364	0.4466	1.1145
		PG 64-22	2%	2.6318	1.9740	-0.9152	0.5817	1.1075
			4%	3.3064	1.3077	0.0214	0.7355	0.8334
			6%	2.9304	1.6526	-0.3496	0.7781	0.8189

6.2 아스팔트 재료 물성 시험법

앞에서 살펴본 아스팔트 물성을 정량화하기 위해 경험적인 방법에서부터 역학적인 방법에 이르기까지 다양한 실험법이 적용되었다. 다음은 이러한 실험법에 대해 알아보도록 하자.

6.2.1 간접법

(1) 만능 시험기를 통한 시험법

간접인장 시험 장비는 측정 시편과 하중 및 측정 장비를 바꿔가며 다양한 물성을 시험을 할 수 있는 장비이다. 다음은 이 장비를 이용하여 측정할 수 있는 다양한 시험을 정리하였다.

가. 간접 인장 강도 시험

간접 인장 강도 시험은 실린더형 공시체에 단일 또는 반복 압축 응력을 수직한 직경면을 따라 가하여 수행한다. 이러한 하중 형태는 직경면의 방향에 수직의 등분포 하중을 형성한다. 궁극적으로 공시체는 지금에 수직한 방향으로 균열이 발생하여 파괴된다. 101.6 mm 직경을 가진 공시체에 균일한 등분포 하중을 가하기 위해서 12.7 mm 폭의 곡률이 있는 하중 재하 막대를 사용한다. 파괴시의 인장 응력과 인장 변형율을 정의하기 위해 방정식이 개발되고 이후 간략화 되었다. 이 방정식은 HMA 를 균질하고, 등방성이며 그리고 탄성체로 가정하였다. 물론 이 가정들이 전부 옳은 것은 아니지만, 위와 같은 가정하에서 HMA 혼합물의 특성 평가하는 것이 표준화 되었으며 상대적으로 더 쉽기 때문이다. 아래의 식은 간접 인장 응력 및 변형율을 정의하기 위한 방정식을 나타낸 것이다.

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi d t} \quad \langle \text{식 6.29.a} \rangle$$

$$\sigma_y = \frac{6P}{\pi d t} \quad \langle \text{식 6.29.b} \rangle$$

$$\varepsilon_f = 0.52xt \quad \langle \text{식 6.29.c} \rangle$$

여기서, σ_x : 공시체 중앙에서의 수평 인장응력(psi)

σ_y : 공시체 중앙에서의 수직 압축응력(psi)

ε_f : 파괴시 인장 변형률

P : 작용 하중(lb)

D : 공시체 직경

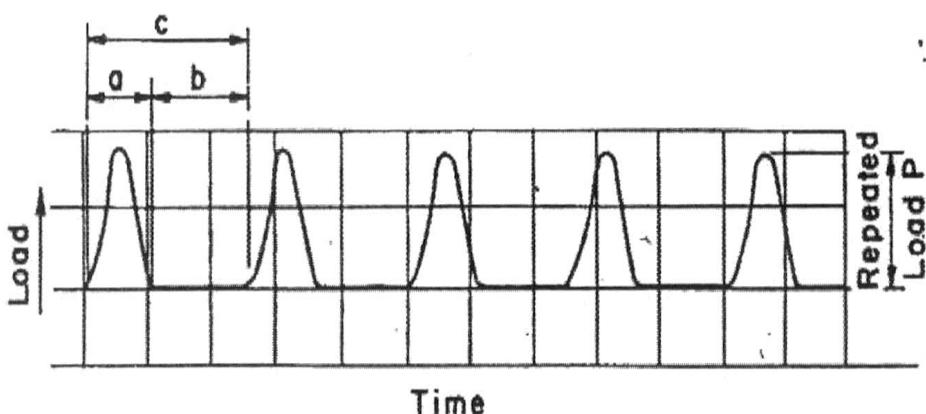
T : 공시체 두께

xt : 공시체의 수평 처짐 (in)

위의 식에서 직경 101.6 mm 직경의 공시체는 12.7 mm 폭의 하중 재하막대를, 직경 152.4 mm 폭의 공시체는 19 mm 폭의 하중 재하막대를 사용한다. 간접 인장 실험을 통해 HMA의 특성을 정의하기에 유용한 두 가지 혼합물의 특성을 알아낼 수 있다. 첫째로 인장강도이다. 이 인장강도는 종종 혼합물의 수분 민감성을 평가하는데 사용된다. 이를 위해, 노래의 인장 강도에 대한 잔류 인장강도의 백분율을 결정하기 위하여 시료의 습윤 처리 전, 후의 인장강도를 각각 측정한다. 높은 인장강도는 공용성이 좋은 것을 나타내는 것이며 낮은 값은 공용성이 나쁨을 의미하는 것이다. 또한 인장 강도는 때때로 아스팔트 혼합물의 균열 발생 가능성 평가하는데도 도움이 된다. 그러나, 파괴에 이르렀을 때의 인장 변형율을 구할 수 있는 간접 인장 시험은 균열 발생 가능성을 예방하는데 더욱 효과적이다. 균열이 일어나기 전에 높은 변형율을 감당할 수 있는 혼합물은 그렇지 못한 혼합물보다 균열에 저항할 수 있는 가능성이 더 큰 것이다. 간접 인장 강도 실험은 일반적으로 분당 50.8 mm의 변형 속도, 25 °C의 온도에서 진행된다. 만약 101.6 mm와 152.4 mm 시료에 대한 변형률과 유사한 변형률이 필요하면 분당 76.2 mm의 변형 속도로 직경 152.4 mm 공시체에 사용되어야 한다. 실제로 101.6 mm 일 때나 152.4 mm 일 때나 동일한 속도가 사용된다. 그러나 152.4 mm 일 때 측정되는 인장 강도는 변형율이 작아서 101.6 mm 보다 작게 측정된다. 또한 인장 실험은 공용 온도를 예상하기 위해서 다른 온도에서 도(특히 낮은 온도) 수행된다. 낮은 온도에서의 실험 데이터는 온도에 의한 균열 예측 모형에 사용될 수 있다.

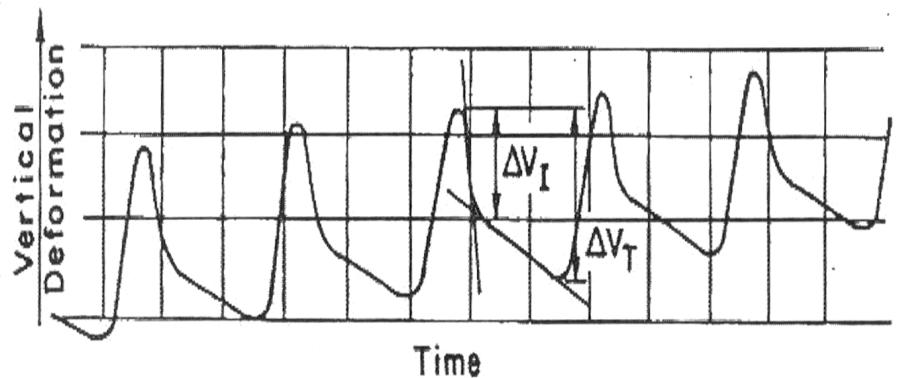
나. 회복탄성계수 시험

상온 및 저온에서의 회복탄성계수를 측정하기 위하여 AASHTO TP 31-94의 규정을 기초로 한다. 수평과 수직 변형을 측정할 수 있는 변형측정 게이지(Extensometer)의 장착을 위해 공시체의 양면을 고른 다음, 게이지 포인터를 부착한다. 시험 전 게이지 포인터가 장착된 공시체을 온도가 조절되는 챔버 안에서 3 시간 동안 시험 온도로 유지시킨다. 이 시험에서는 상온 및 저온에서의 아스팔트 혼합물의 특성을 측정할 수 있다. 시험에 사용된 하중 형태는 <그림 6.5(a)>와 같은 정현파 하중을 사용하며, <그림 6.5(b)>와 <그림 6.5(c)>는 재하 하중에 따른 일반적인 수직 및 수평에 대한 변형곡선을 보여주고 있다. 이때 하중 재하는 0.1 초의 재하 기간과 0.9 초의 휴지 기간을 1 주기(Cycle)로 하여 재하 하였으며 간접인장강도의 10 %~50 %의 범위 내에 있도록 한다.

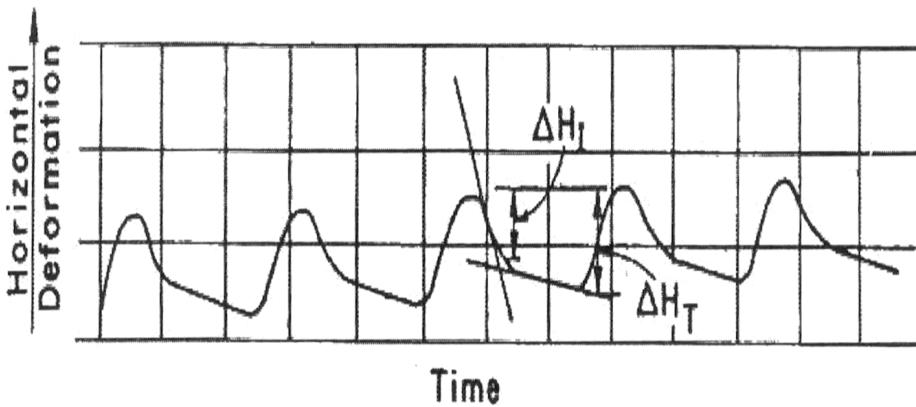


(a) 하중-시간 곡선

a = 하중 1주기당 하중지속 시간, b = 회복시간, c = 주기 전체시간



(b) 수직변형-시간 곡선



(c) 수평변형-시간 곡선

〈그림 6.5〉 회복탄성계수시험에서 하중과 변형곡선

회복탄성계수(M_R)와 포아송 비(v)는 다음 식에 따라 구한다.

$$M_{RI} = \frac{P(\nu_{RI} + 0.27)}{t\Delta H_I} \quad \text{식 (6.30)}$$

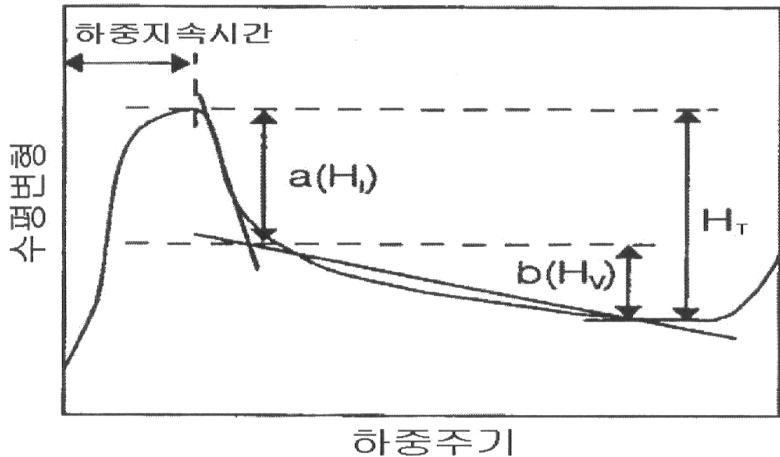
$$M_{RT} = \frac{P(\nu_{RT} + 0.27)}{t\Delta H_T} \quad \text{식 (6.31)}$$

$$\nu_{RI} = \frac{3.59\Delta H_I}{\Delta V_I} - 0.29 \quad \text{식 (6.32)}$$

$$\nu_{RT} = \frac{3.59\Delta H_T}{\Delta V_T} - 0.29 \quad \text{식 (6.33)}$$

여기서, M_{RI} : 순간회복탄성계수(kPa)	t : 공시체 두께(mm)
M_{RT} : 전회복탄성계수(kPa)	ΔH_I : 순간회복 수평변형(mm)
ν_{RI} : 순간회복 포아송비	ΔV_I : 순간회복 수직변형(mm)
ν_{RT} : 전회복 포아송비	ΔH_T : 전회복 수평변형(mm)
P : 반복하중(N)	ΔV_T : 전회복 수직변형(mm)

아스팔트 혼합물의 회복탄성계수 시험에서 하중이 순간적으로 가해졌다가 제거됨에 따라 변형이 일어났다가 곧바로 회복되는데, 이렇게 순간적으로 회복되는 변형을 순간회복변형이라 하고, 다음 하중이 재하되기 전까지의 휴지기간에 시간에 따라 서서히 변형이 회복되는 것을 점탄성 회복변형이라 하며, 이 두 가지를 합하여 전회복변형이라 한다. 순간회복탄성계수와 전회복 탄성계수와의 관계를 통해서 아스팔트 혼합물의 특성을 파악할 수 있는데 <그림 6.6>에서와 같이 하중이 재하되었다가 제거됨으로써 순간적으로 회복 되는 변형량이 a 구간이고, 다음 하중 재하 때까지 점차적으로 회복되는 구간이 b 이며 a 와 b 를 더한 것이 1주기당 전체 변형량(H_t)이다.



〈그림 6.6〉 반복재하에 의한 수평변형

a구간과 b구간의 비율로서 공시체의 점탄성 성질을 파악할 수 있는데, 위의 식에서 순간회복탄성계수와 전회복탄성계수와의 비는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\frac{M_{RI}}{M_{RT}} = \frac{\Delta H_T}{\Delta H_I} = \frac{\Delta H_I + \Delta H_V}{\Delta H_I} = 1 + \frac{\Delta H_V}{\Delta H_I}$$
식 (6.34)

여기서, ΔH_I : 순간회복 수평변형(mm)

ΔH_V : 점탄성회복 수평변형($\Delta H_T - \Delta H_I$)(mm)

위 식에서 순간회복탄성계수와 전회복탄성계수의 비는 점탄성회복변형량(ΔH_V)과 순간회복변형량(ΔH_I)과의 비로 표현되는 것을 알 수 있으며, 이 수치가 작을수록 ($\Delta H_I > \Delta H_V$) 완전 탄성체에 가깝고, 클수록 ($\Delta H_I < \Delta H_V$) 점탄성체에 가깝다. 포아송비 경우 25 °C 아스팔트 혼합물의 경우 일반적으로 적용 되는 값인 0.35 를 적용할 경우에는 수직변형의 측정은 생략해도 된다. ASTM D 4123 에서는 포아송 비의 값을 25 °C 에서의 0.35 의 값 하나만 적용하고 있으나, 1993년 한국도로공사 연구보고서 “아스팔트 혼합물 개량 연구”에서는 회복탄성계수 시험시 5 °C 에서 0.2, 25 °C 에서 0.35, 40 °C

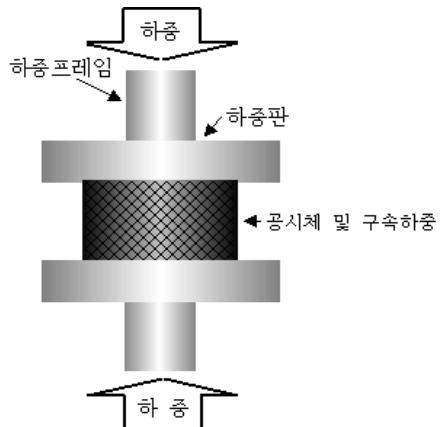
및 60 °C에서 0.5를 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

〈표 6.14〉 회복탄성계수 시험결과 (밀입도 19mm, PG 64-22)

온도	-10도		5도		20도		40도	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
2	6530	566	5706	260	4012	320	1407	112
4	6505	1213	6354	1377	4637	498	-	-
6	5520	138	5523	472	4544	347	-	-

다. 크리프 시험

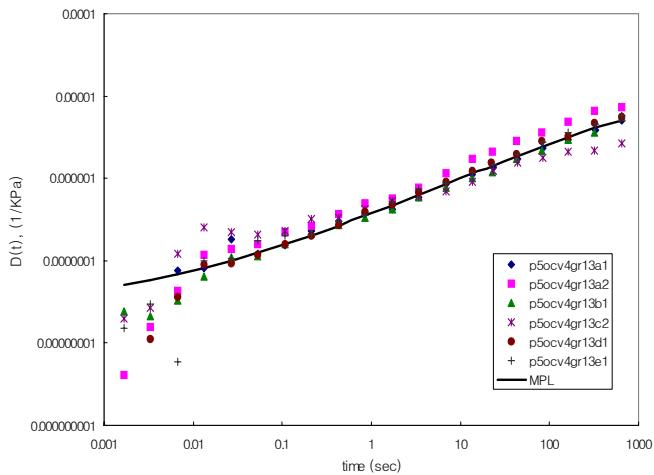
크리프 시험은 일반적으로 비구속 1축 정적압축과 구속 1축 정적압축의 방법으로 수행할 수 있으며, 이 시험들은 실제 현장 교통하중과 밀접한 관계가 있다. 가장 흔히 사용되는 크리프 시험은 비구속 1축 정적압축 크리프시험이다. 이 시험은 정해진 시간과 온도에서 시료에 일정한 하중을 가하면서 시료가 변형함에 따른 변형량을 측정하게 된다. 구속 1축 정적압축 크리프시험은 〈그림 6.7〉과 같이 비교적 기계장치가 간단하여 수행하기 쉬운 시험이며, 구속압력 약 138 kPa (20 psi)를 작용시킴으로써 시료는 828 kPa (120 psi)의 수직압력과 60 °C 까지의 온도에서 시험 할 수 있다. 이러한 시험조건은 비구속 1축 정적압축 크리프 시험조건보다도 실제 현장조건을 더 유사하게 모사할 수 있다.



〈그림 6.7〉 구속반복하중 크리프

시험

시험 방법은 원형 하중판 사이에 공시체의 중심축과 하중프레임의 중심축이 일치하도록 고정시켜 놓고 시험하기 전 공시체를 3 시간 동안 시험온도에 맞게 챔버 안에서 가열하여 공시체의 온도와 평형상태를 유지한다. 이후 구속하중을 가하고, 연직하중을 가하는 형태로 시험을 시행한다. 138 kPa 구속하중을 이용하고, 연직방향하중의 크기를 실제 대형트레일러의 하중조건을 모사한 828 kPa 까지를 고려한다. 다만, 고온에서의 실험이 수행되므로 시편의 상태에 따라 최대연직하중을 조정하여야 한다. 반복하중은 0.2 초의 재하 및 0.8 초의 비재하형태를 이용한다. 〈그림 6.8〉은 국내 13 mm 화강암에 대한 시험 결과를 도시한 것이다.



〈그림 6.8〉 최대입경 13mm 골재(화강암) + PG
64-22 바인더 혼합물의 크리프 시험결과

라. 동탄성계수 시험

동탄성계수시험은 5개의 다른 온도 및 6개의 하중주파수를 이용하여 〈표 6.15〉와 같은 구속압력, 하중조건 및 변형량을 적용한다. 시험에서 이용된 응력상태에서 선형응력상태는 시료에 하중이 재하되었을 경우 선형거동특성을 주로 평가하게 되어 높은 온도에서의 아스팔트 혼합물의 거동특성 중 골재의 맞물림 저항을 반영하는 영구변형 특성평가에 다소 취약하다. 하지만 비선형하중을 이용한 시험의 경우 골재의 맞물림 저항 특성을 충분히 평가할 수 있어, 영구변형과 관련된 아스팔트 혼합물의 특성을 잘 평가할 수 있다.

■ 동탄성계수 시험조건

동탄성계수 시험은 각각의 준비된 시험시편에 4~5 개의 온도조건, 6 개의 하중주파수를 이용하여 시험을 수행한다. 시험에 이용된 구속압력은 최고 275 kPa (40 psi)를 적용한다. 시험은 유압을 이용한 만능시험기를 이용하고, 하중은 휴지기가 없는 사인파 형태의 압축응력을 적용한다. 하중재하시 발생하는 변위는 원통형 시편의 중간에 설치한 2 개의 변위측정장치(LVDT,

Linear Variable Differential Transducers)를 이용한다. 시험에 이용된 시편의 크기는 직경 100 mm, 높이 150 mm 원통형 공시체를 이용한다. 채취된 시료 외에 실내에서 제작된 시료는 선회다짐기(Gyratory Compactor)를 이용하여 시험시편을 제작하여 이용한다. LVDT의 설치는 비구속하중 및 구속하중조건 모두 똑같이 적용한다. 모든 시험은 시험온도를 -16°C 부터 60°C 까지 정확히 조절할 수 있는 온도챔버(Environmental Chamber)를 이용한다. 비구속하중조건의 경우 2단계로 나누어 시험한다. 1단계에서는 주어진 시험온도(저온)에서 약 $150 \mu\text{e}$ 변형률을 발생시키는 하중의 크기를 변화시켜 시험을 진행한다. 1 단계 시험은 아스팔트 혼합물의 거동특성이 선형거동을 보이는 구간에서의 시험이다. 2 단계에서는 같은 시험시편을 이용하여 재료의 비선형거동과 큰 변형량, 약 $500\text{--}1000 \mu\text{e}$ 을 발생시키는 하중조건을 이용하여 고온, 37.8°C 및 54.4°C 에서 시험을 수행한다. 구속하중상태의 시험장비는 최대구속하중, 690 kPa(100psi)를 적용할 수 있는 삼축셀을 장착하고 비구속 상태와는 달리 시료에 고무멤브레인을 씌우고 시험을 수행하기 때문에 LVDT 의 설치를 위한 구멍을 고무멤브레인에 미리 뚫어 놓아야 한다. 시험방법은 비구속상태와 같은 방법으로 진행하고, 온도의 변화를 줄 경우 시험시편을 온도챔버에 넣은 상태로 온도를 변화시켜 열변화에 의한 시료의 상태를 최적의 상태로 구현한다. <표 6.15>, <표 6.16>은 시험에 이용된 하중주파수 및 시험결과측정범위를 보여주고 있다.

<표 6.15> SPT 시험항목 및 시험조건

시험 항목	Mode	시험온도($^{\circ}\text{C}$)	주파수 (Hz)	구속압력 (kPa)	응력 상태	변형량 (μe)
동탄성 계수	1	$-10, 4.4, 21.1,$ $37.8, 54.4$	25, 10, 1, 0.5, 0.3, 0.11	0	선형	< 150
	2	$4.4, 21.1, 37.8,$ 54.4		69	선형	< 150
	3	$-10, 4.4, 21.1,$ $37.8, 54.4$		138	비선 형	> 200
	4	$-10, 4.4, 21.1,$ $37.8, 54.4$		206	비선 형	> 500
	5	$4.4, 21.1, 37.8,$ 54.4		275	비선 형	> 500

〈표 6.16〉 하중주파수 및 결과측정범위

시험시료	하중조건	하중주파수	반복횟수	측정 범위
채취시료 및 실내제작시편	Sin 파 하중	25	200	95~200
		10	200	95~200
		5	100	95~100
		1	50	44~50
		0.5	20	15~20
		0.1	15	10~15

(2) 초음파시험기를 이용한 동탄성계수 시험법

초음파 시험기를 이용한 시험은 ASTM C 597, "Test Method for Pulse Velocity Through Concrete" 의 규정을 적용한다. 시험시편은 직경 150 mm, 높이 150 mm 의 시편을 이용한다. 103*200*100 mm 의 스티로폼블럭을 저판으로 이용한다. 시험시편은 시험전 온도챔버에 약 3~4시간 온도를 맞추기 위해 적치한 후, 시편을 꺼내어 약 1분 이내에 초음파시험을 한다. 시간에 따른 시편의 온도변화가 측정치에 상당한 영향을 주므로, 가능한 빠른 시간안에 시험을 마쳐야 한다. 하나의 위치에서 3개의 각기 다른 신호주기를 결정하고, 평균값을 시험값으로 적용하였다. μe 으로 표시되는 이동시간(Transit Time)이 측정된다. 시편의 밀도는 표면건조포화중량을 이용하여 결정되고, 펄스속도(Pulse Velocity)는 파형의 길이와 이동시간간의 상관관계로부터 계산된다. 시험시편의 실질적인 포아송 비의 측정이 어려우므로, 이는 적절히 가정하여 이용한다.

6.2.2 간접법

(1) 마샬 안정도

마샬 안정도 시험법(ASTM D 1559) 은 실내 실험을 통해 다진 아스팔트 혼합물의 강도를 측정하기 위해 1940 년대에 개발되었다.

이 마샬 안정도의 시험법은 실린더 형의 시편(직경:101.6 mm, 높이:63.5 mm)에 압축 하중을 가한다. 시편의 시험 온도는 60 °C이며 하중

은 분당 약 50.8 mm의 속도로 가한다. 시험 온도는 여름철에 HMA 포장이 받을 수 있는 최고 온도가 60 °C이며 이때 포장이 약화된 상태를 모사할 수 있다. 마샬 안정도는 시편이 최대로 받을 수 있는 하중크기로 정의된다. 흐름값은 그때 하중이 재하된 시편의 수직방향 처짐을 나타나며 단위 흐름값은 0.25 mm이다. 가끔 아스팔트 혼합물의 특성을 마샬 강성 지수로 나타내는데 이것은 맥락 안정도를 흐름값으로 나눈 값이다. 이 값은 유럽에서 엔지니어들이 주로 사용하고 있으며 아스팔트 혼합물의 질을 평가하는데 적용하고 있다. 마샬 강성 지수가 더 높을수록 혼합물은 더 단단해지고 영구변형에 저항 능력이 커진다.

〈표 6.17〉 마샬 시험에 대한 기준치

년 도	1973년	1991년	1999년
혼합물의 종류	밀입도 아스팔트콘크리트(20,13)*		
용 도	표층(중간층)		
다짐횟수	50	50(75)	
안정도 (kgf)	500 이상	500(750) 이상	
흐름값 (1/100 cm)	20-40		
공극률 (%)	3-6		
포화도 (%)	70-85	70-85	

(2) FWD 를 이용한 역해석

FWD 는 비파괴 실험장비의 일종으로 하중에 의하여 발생하는 포장 표면의 처짐으로 포장체의 물성을 추정하기 위해 개발되었다. 최초의 개념은 1938 년 미국 캘리포니아 도로국에서 처짐 측정장비를 설치하여 트럭하중 재하시 처짐을 측정한 것이 시초였다. 현재의 FWD 는 추를 사용하여 포장면에 충격하중을 재하하고 그에 따른 포장면의 처짐을 측정하여 도출된 처짐곡선으로부터 역해석을 통하여 포장층의 탄성계수 및 노상의 지지력을 구하는 장비이다. 이런 역산결과를 통하여 아스팔트 포장체의 탄성계수를 추정하

고 구조적 상태를 평가한다. FWD 장비의 표면처짐 개요도는 <그림 6.9>과 같다.

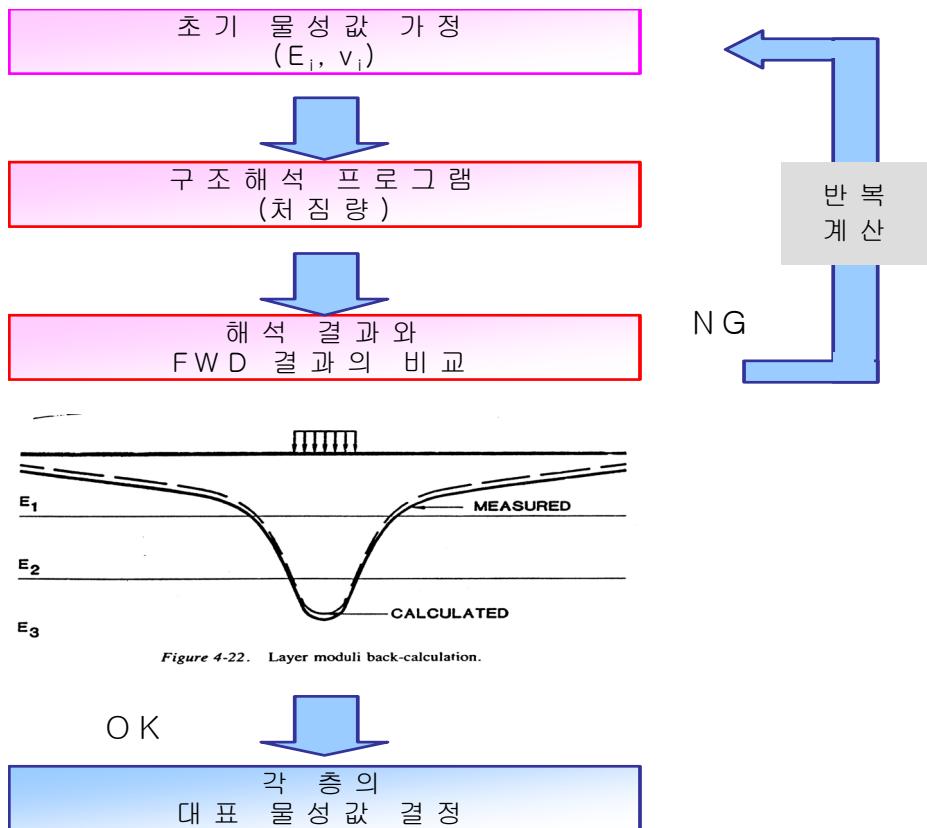
FWD 측정방법은 사전에 측정하고자 하는 위치를 도상 또는 현장에서 결정하여 아래의 순서로 측정을 실시한다.

- 1) 재하판을 측정하려는 포장면상에 위치시키고 FWD 조정원은 포장면에 페인트로 위치를 표시하며 재하판에 부착된 카메라를 이용하여 정확한 위치를 확인한다.
- 2) 정확한 위치가 확인되면 FWD 작동 프로그램을 열고 시험자의 이름, 시험장소 날짜, 포장의 종류, 시험방법 및 간단한 메모를 기록한다. 이 때 FWD 에 정착된 대기온도 및 표면온도 측정장치를 검사한다. 보다 정확한 결과 분석을 위해서 휴대용 온도측정기로 별도 측정하면 좋다.
- 3) 실제 측정 전에 예비하중을 재하판에 가하였으며, 예비하중을 가하는 목적은 버퍼(재하판에 하중을 가하는 고무)가 원활하게 작동하도록 준비운동을 시키는 과정이다.
- 4) 준비가 완료된 상태에서 시험 목적에 맞는 하중을 선택하여 하중을 가하였다.
- 5) 시험이 완료되면 파일이름을 정하여 저장하고 시험 결과가 들어 있는 디스크을 포장구조 해석자에게 전달하여 해석한다.

역해석 과정은 다음의 내용 및 <그림 6.9>과 같다.

- 1) 아스팔트 포장체를 해석할 구조해석 프로그램을 선택하다. 종류로는 Layered Elastic Theory, BISAR, ELSYM5 등이 있다.
- 2) 각 층의 초기 값(E , m)을 입력하고 각 층별 탄성계수 조건들을 설정 한다.
- 3) 반복적인 구조해석을 수행하여 센서의 위치별 처짐량이 유사한 물성 값을 찾아간다.
- 4) 허용 조건에 맞는 물성값을 선택하도록 한다.

이러한 해석 결과는 각 층의 물성 조합에 의해 처짐량을 일치시키는 것으로 유사한 해가 많이 도출되는 단점이 있다.



〈그림 6.9〉 FWD 를 이용한 아스팔트 층의 물성 역산 과정

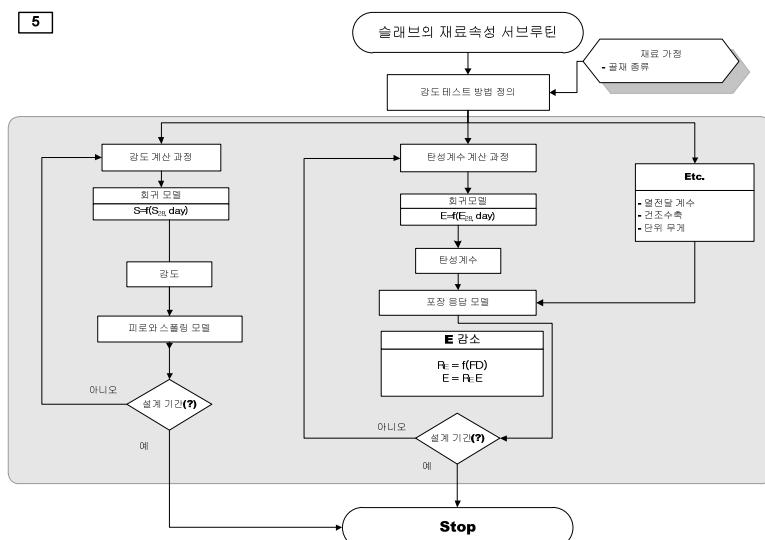


7

콘크리트 재료

7. 콘크리트 재료

콘크리트의 어원은 라틴어로 “Concretus”로써, 그 의미는 “함께 자라다 (Grow Together)”라는 의미이다. 기본적으로 콘크리트는 혼합재료로서 시멘트(Portland Cement), 굵은 골재, 잔골재, 물로 이뤄져 있다. 콘크리트 포장은 혼합재료로 구성된 표층 외에도 추가적으로 줄눈부의 하중 전달을 하는 다웰바 및 타이바 그리고 철근이 사용되고 있다. 콘크리트 재료의 가장 큰 입력 변수는 골재의 종류이다. 5가지 골재 종류에 대한 기본 물성을 정량화하여 도로포장 구조 설계에서는 이를 프로그램에 데이터 베이스화하였다. 쪼掴인장강도, 압축강도, 휨강도 및 탄성계수를 각 재령에 따라 계산할 수 있도록 하였고 쪼掴인장장도는 스팔링을 예측하는데, 휨강도는 피로균열을 예측하는데 사용한다. 압축강도를 통해 쪼掴인장강도, 휨강도 및 탄성계수를 간접적으로 추정할 수도 있으며 탄성계수, 열팽창계수, 견조수축 및 단위 중량 값은 구조해석의 입력 변수로 사용된다. 각각의 재료 물성에 대한 설명은 이후 각 장에서 자세히 설명된다. <그림 7.1>은 도로포장 구조 설계의 콘크리트 재료 물성 산정 로직이다.



<그림 7.1> 콘크리트 재료물성 산정로직

7.1 콘크리트의 재료 물성 및 시험법

도로 포장용 콘크리트 포장 재료의 물성은 탄성계수, 강도, 열팽창 계수, 건조 수축, 단위중량 및 포아송비로 크게 구분된다. 비록 비선형 거동을 하고 장기적으로 점성 거동을 하는 것으로 알려져 있으나 실용적으로는 탄성 영역의 물성이 지배적으로 사용되고 있다. 포장 구조 설계에서는 수준별로 재료 물성이 다르게 사용되는데 1등급의 경우 실험을 진행하도록 규정하고 있으며, 일반적인 2등급이하의 경우 다양한 실험을 통해 재료 물성치를 제공하고 있다.

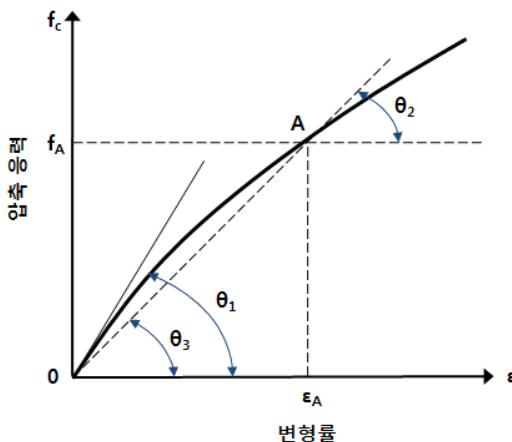
7.1.1 탄성계수

탄성계수는 탄성영역에서 응력과 변형률 사이의 기울기로서 초기접선탄성계수($E_i - \theta_1$)는 원점에서 응력과 변형률 곡선에 그은 접선의 기울기이며, 접선 탄성계수($E_t - \theta_2$)는 원점에서 응력과 변형률 곡선에의 임의의 점에서 그은 기울기로 정의한다. 할선탄성계수($E_s - \theta_3$)는 압축응력이 압축강도의 절반 정도일 때의 원점에서 응력과 변형률 곡선에 그은 직선의 기울기이다.

콘크리트 구조의 설계기준에서는 콘크리트 강도와 탄성계수와의 상관식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\textcircled{1} \quad f_{ck} \leq 30\text{MPa} \text{ 인 콘크리트 탄성계수는 } E(\text{MPa}) = 4700(f_{ck})^{0.5}$$

$$\textcircled{2} \quad f_{ck} \geq 30\text{MPa} \text{ 인 콘크리트 탄성계수는 } E(\text{MPa}) = 3300(f_{ck})^{0.5} + 7700$$



〈그림 7.2〉 응력과 변형률 곡선

여기서, f_{ck} : 콘크리트 설계 기준 강도

E : 콘크리트 탄성계수

탄성계수를 측정하는 방법은 압축강도 시편을 이용하여 탄성계수를 구하는 콤프레소미터 또는 게이지 부착 파괴방법과 비파괴 시험법이 대표적이다. 〈그림 7.3〉와 같이 콤프레소 미터를 이용한 탄성계수실험은 KS F 2438-1992 “콘크리트 원주 공시체의 정탄성 계수 및 포아송 비 시험 방법”에 준하여 콤프레소 미터 및 스트레인 게이지를 부착하는 측정하는 방법이다. 시편은 압축강도와 마찬가지로 3개의 150×300 mm (또는 100×300 mm)의 실린더 시편을 이용하여 압축강도의 40~50 %까지 재하한다. 탄성계수를 측정하기 위해 접착한 또는 접착하지 않은 측정 장치를 사용하고, 지름 반대쪽에 2개의 계측기 선을 각각 축에 평행하게 공시체 높이의 중간에 붙여서 25.4 mm에 대해 $0.127 \mu\text{m}$ 까지의 정밀도로 평균 변형을 측정한다. 각 계측기의 유효길이는 콘크리트에 사용한 굵은 골재 최대치수의 3배 이상, 공시체 높이의 $2/3$ 이하로 한다. 추천할 수 있는 길이는 공시체 높이의 $1/2$ 로 한다. 변형은 다이얼 게이지로 직접 또는 레버 확대 방식으로 와이어 변형률 게이지나 변위차 트랜스포머로 측정한다. 계측기는 수직방향으로 2개 외에 수평방향으로 2개를 추가로 부착하면 포아송 비까지 구할 수 있다.



〈그림 7.3〉 콤프레소미터를 이용한
탄성계수 측정

결과는 다음 식으로 산출한다.

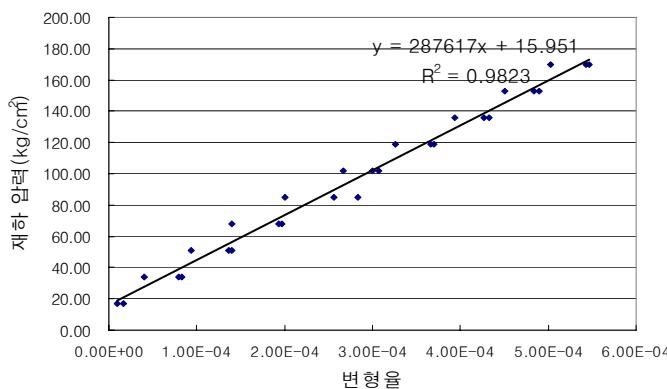
$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad \langle \text{식 7.1} \rangle$$

여기서, S_1 : 세로 변형률 50μ (0.00005)에 대한 응력 (kgf/cm^2)

S_2 : 가해진 최대 하중의 40% 에 대한 응력 (kgf/cm^2)

ε_2 : 응력 S_2 로 생긴 변형률

〈그림 7.4〉는 7일 양생된 압축 강도 시편에 대한 실험 결과를 정리한 것이다. 콘크리트 공시체에 압축응력을 가하고 그에 따른 변형율을 측정하여, ‘재하압력 – 변형율’ 그래프를 작도한다. 그림에서 기울기 값이 실제 콘크리트의 탄성계수(28.76 GPa)가 된다.



〈그림 7.4〉 콘크리트 탄성계수 산출을 위한 ‘재하 압력–변형율’ 그래프

Impact Echo 이용한 비파괴 시험방법이다. Impact Echo 시험방법은 시험체 표면에 충격을 주어 발생된 파가 시험체 매질간의 경계면에서 반사되어 오는 파형을 이용하여 탄성계수를 추정하는 방법이다. 일반적으로 사용하는 파는 비구속 압축파(Rod 파)로서 압축파의 일종으로 파의 진행방향으로 입자가 압축–수축의 과정을 반복하며 전파된다. 따라서 비구속 압축파의 속도는 비구속 탄성계수(Unconstrained Modulus) 즉, 영탄성계수(Young's Modulus)의 평가에 직접적으로 활용된다.

실험결과를 통해 고유진동수 f_c 를 구하고, 이를 이용하여 비구속 압축파의 속도(V_c)를 구한다.

$$V_c = f_c \times \lambda = f_c \times 2L \quad \langle \text{식 7.2} \rangle$$

여기서, V_c : 비구속 압축파의 속도 (m/s)

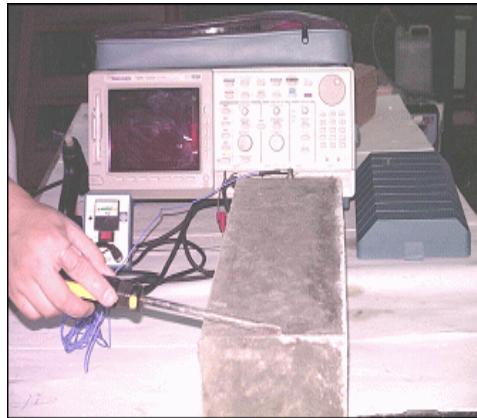
f_c : 공진 주파수 (Hz)

L : 공시체 길이 (m)

구해진 비구속 압축파의 속도를 이용해 다음 식에 의하여 공시체의 동탄성계수를 구한다.

$$V_c = \frac{\text{공시체의 동탄성계수}}{\text{공시체의 밀도}}$$

<식 7.3>



<그림 7.5> Impact Echo 시험 장면

도로포장 구조 설계에서는 28일 값을 기준으로 시간에 따른 탄성계수 변화식을 적용하였으며, 사용된 식과 상수값은 <식 7.4>와 <표 7.1>과 같다.

$$f_{ck}(t) = f_{ck,28} \times \{t / (a + b \times t)\} \quad <\text{식 } 7.4>$$

여기서, $f_{ck}(t)$ = 재령 t 에서의 재료의 물성 (GPa)

$f_{ck,28}$ = 재령 28일 재료의 물성 (GPa)

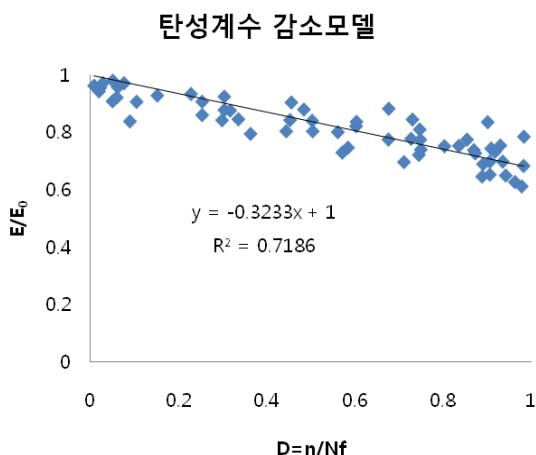
t = 재령 (일)

a, b = 상수

<표 7.1> 굵은 골재별 콘크리트 탄성계수 예측상수

굵은 골재 종류	예측상수	
	a	b
화강암	0.93	0.97
석회암	1.317	0.949
사암	0.948	0.974
편마암	0.885	1.023
안산암	0.778	0.988

콘크리트 재료의 탄성계수는 위 식과 같이 시간에 흐를수록 증가하지만, 실제 콘크리트 포장은 반복적으로 수많은 차량들이 지나가고 강우, 강설 등의 환경 영향을 받는다. 때문에 탄성계수는 증가함과 동시에 저감하기도 한다. 도로포장 구조 설계에서는 탄성계수 저감 모형은 구조해석 모형에서 고려하였다. 실제 빔공시체를 제작하여 피로실험을 실시하여 일정한 피로하중을 재하한 후 Impact Echo 와 같은 장비를 이용하여 시편의 탄성계수를 측정하였다.(한국형 포장 설계법 개발 연구 중 3단계 2차년도 보고서-I3 신설 포장 설계 프로그램의 수정 및 보완, 국토 해양부 2010) <그림 7.6>은 그 결과를 나타낸 것이며, 이 수식이 도로포장 구조 설계에 사용되었다. 여기서 x 는 재료가 견딜 수 있는 반복하중 회수에 대해 하중재하 회수의 비를 나타낸 것이며, y 는 탄성계수 저감을 나타내는 가중치를 의미한다.



<그림 7.6> 도로포장 구조 설계에 적용된
탄성계수 감소 모형

7.1.2 콘크리트 강도

콘크리트 포장 설계에 사용되는 강도는 압축강도, 할렬인장강도, 휨강도가 있다. 다음은 각 강도의 측정 방법 및 도로포장 구조 설계를 통해 산출한 강도 예측식에 대하여 알아보았다.

(1) 압축강도

압축강도는 콘크리트 포장의 가장 중요한 성질 중의 하나이다. 일반적으로 물-시멘트 비가 낮을수록 더 높은 강도가 발현된다. 이는 수화반응에 필요한 물/시멘트 비가 약 28%이며, 그 이상일 경우 잉여수가 공극을 생성하여 강도에 영향을 미치기 때문이다. 국내 압축강도 시험 기준 시험은 KS F 2405 “콘크리트의 압축강도 시험 방법”에 준하여 실시한다. 콘크리트 공시체는 KS F2403 “시험실에서 콘크리트 압축 및 휨강도 시험용 공시체 제작하고 양생하는 방법”과 KS F 2404 “현장에서 콘크리트 압축강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법”에 준하여 제작 및 양생한다. 압축강도 시험은 3개의 150×300 mm의 실린더 시편을 사용하여 수행하며, 일반적으로 크기 효과에 의해 시편의 크기가 크면 강도가 작다.(약 10 % 이내의 오차) 파괴시 압축강도는 다음 식에 의해 산정된다.

$$\text{압축강도 } (Pa) = \frac{\text{최대 재하 하중 } (N)}{\text{공시체 단면적 } (m^2)} \quad \langle \text{식 7.5} \rangle$$

〈표 7.2〉 굵은 골재별 콘크리트 압축강도 예측상수

굵은 골재 종류	예측상수	
	a	b
화강암	2.892	0.896
석회암	2.019	0.917
사암	2.610	0.902
편마암	1.913	0.921
안산암	2.307	0.896

재령에 따른 탄성계수 예측식에서와 같이 압축강도에서도 동일한 형태의 수식이 적용되었다. 〈표 7.2〉는 각 굵은 골재별 예측상수이며, 이를 통해 예측한 압축강도의 단위는 MPa이다.

(2) 휨강도

휨강도는 포장체가 실제 휨거동을 하므로 이에 대한 저항성을 알 수 있는 물성이다. $150 \times 150 \times 550$ mm (또는 600 mm)의 휨 시편을 사용한다. 시편의 지간과 단면의 크기(깊이)는 2.5~3을 사용한다. 실험규격으로는 KS F 2407-1968 "콘크리트 휨 강도 시험 방법 (단순보의 중앙점 하중법)"이나 KS F 2408-1995 "콘크리트 휨 강도 시험 방법 (단순보의 3등분점 하중법)"을 이용한다. <그림 7.7>은 휨강도 측정을 위한 시험 개념도를 나타낸 것이다.

공시체가 지간의 3등분 중앙부에서 파괴되었을 때의 휨강도는 다음 식에 따라 계산한다.

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad \langle \text{식 7.6} \rangle$$

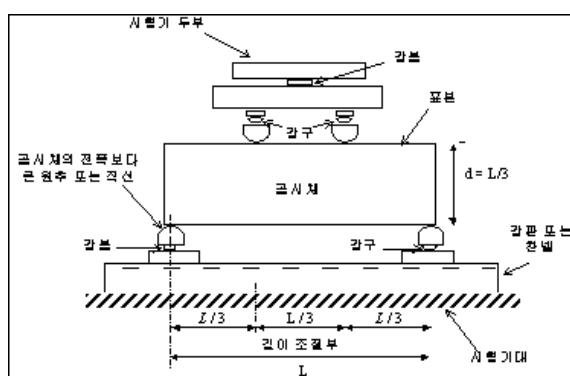
여기서, R : 휨강도(kg/cm^2)

P : 시험용 계기에 나타난 최대하중(kg) (공시체의 자중은 무시)

L : 공시체 지간의 길이(cm)

b : 공시체의 폭(cm)

d : 공시체의 두께(cm)



<그림 7.7> 휨강도 시험방법 (단순보의 3등분점 하중법)

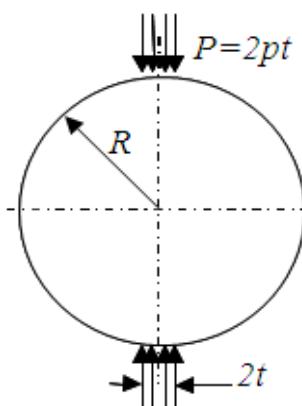
재령에 따른 탄성계수 예측식에서와 같이 휨강도에서도 동일한 형태의 수식이 적용되었다. <표 7.3>은 각 굵은 골재별 예측상수이며, 이를 통해 예측한 휨강도의 단위는 MPa이다.

<표 7.3> 굵은 골재별 콘크리트 휨강도 예측상수

굵은 골재 종류	예측상수	
	a	b
화강암	1.310	1.0120
석회암	1.226	0.944
사암	1.442	0.932
편마암	1.432	0.909
안산암	1.725	0.901

(3) 쪼캠인장강도

쪼캠인장강도 시험은 콘크리트 재료의 인장 강도를 간접적으로 구하는 시험법이다. 150×300 mm의 실린더를 이용하여 <그림 7.8>과 같이 실험을 하되 KS F 2423-2001 "콘크리트의 쪼캠인장강도(할렬 인장 강도) 시험 방법"을 사용한다. 공업규격에서는 $t/R = 1/6$ 의 패킹 스트립을 사용하여 $2t$ 폭의 등분포하중으로 재하하여 시험하도록 하고 있으나, 쪼캠인장강도 강도를 구하는 산정공식은 $2pt/\pi R$ 을 사용하여 $2t$ 폭이 고려되고 있지 않다.



<그림 7.8> 쪼캠인장강도 실험

따라서, 쪼캠인장강도는 탄성론을 바탕으로 한 다음의 식을 사용하여야 한다.

$$f_{sp} = \frac{2pt}{\pi R} \left[1 - \left(\frac{t}{R} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad \langle \text{식 7.7} \rangle$$

여기서, f_{sp} : 인장강도 (kg/cm^2)

p : 단위길이당 최대 등분포하중 (kg/cm)

t : 패킹 스트립의 폭 (cm)

R : 공시체의 반지름 (cm)

〈표 7.4〉 굵은 골재별 콘크리트 쪼캠인장강도 예측상수

굵은 골재 종류	예측상수	
	a	b
화강암	1.330	0.958
석회암	2.394	0.890
사암	1.859	0.926
편마암	2.330	0.801
안산암	2.289	0.914

〈표 7.4〉는 각 굵은 골재에 따른 장기 쪼캠인장강도 예측상수이며, 이를 통해 예측한 쪼캠인장강도의 단위는 MPa이다.

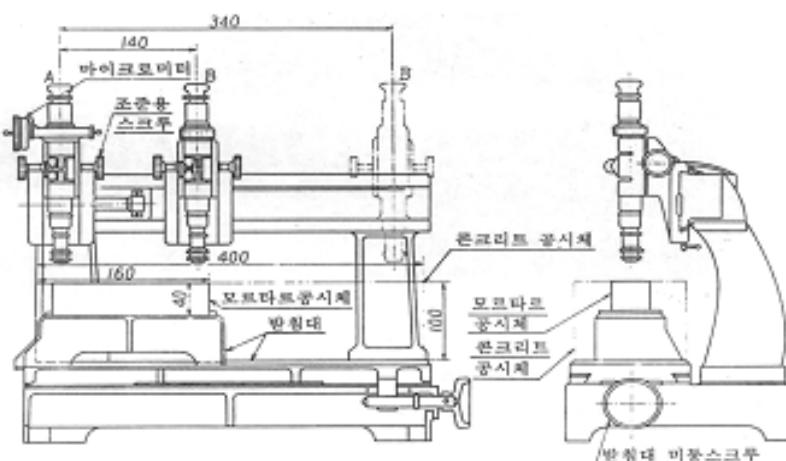
7.1.3 건조수축

건조 수축은 콘크리트 포장의 초기 및 장기 공용성에 많은 영향을 미친다. 건조 수축 계수가 큰 콘크리트 포장은 양생 과정에서 초기 균열 발생 비율이 높고 적절한 유지보수가 이뤄지지 않을 경우 교통 개방 후 이 포장의 공용성은 급격히 저하된다. 건조수축은 주로 시멘트 페이스트의 수축에 의한 것이기 때문에 시멘트 페이스트양을 가능한 한 적게 사용하며, 그 질을 개선

하는 것이 최우선이다. 건조수축은 시멘트, 골재형태, 함수비 및 배합성분 콘크리트의 수분 손실률, 부재의 크기 및 형상, 환경요인 및 건조에 노출된 시간 등에 영향을 받는다. 일반적으로 시멘트 페이스트, 모르타르, 콘크리트의 순으로 시멘트의 사용량은 감소한다. 또한, 골재에 따른 수축억제 작용은 강하기 때문에 건조수축량도 같은 순으로 감소한다. 건조 수축 실험은 한국 산업규격 KS F 2424 "모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법"에 제시되어 있으며, 모르타르 공시체 또는 콘크리트 공시체의 길이 변화 실험에 대하여 콤퍼레이터 방법, 콘택트 게이지 방법 또는 다이얼 게이지 방법 등의 세 가지 방법을 제시하고 있다. 하지만 <표 7.5>와 같이 ASTM에서 제안하는 방법과는 다소 차이가 있다.

<표 7.5> KS와 ASTM 건조 수축 시험 차이점

시험 항목	KS	ASTM
양생온도(°C)	20±1	23±1.7
초기 측정시간(일)	1, 7	4, 7
초기측정 후 측정시간	1, 4, 8주, 3, 6, 9, 12 개월	1, 3, 7 15, 31, 63 주



<그림 7.9> 콤퍼레이터 방법의 측정기



〈그림 7.10〉 다이얼 게이지를 이용한 건조수축 측정 장면

콘크리트 길이변화 측정방법은 공시체의 측면 길이 변화를 측정하는 방법과 공시체 중심축의 길이변화를 측정하는 방법으로 나눌 수 있다. 다양한 측정 방법 중 가장 정밀하게 측정이 가능하며 오차가 적은 방법이 〈그림 7.9〉과 같은 현미경 콤퍼레이터 방법이며, 〈그림 7.10〉은 비교적 실험법이 간단한 다이얼 게이지를 이용한 측정법이다. 도로포장 구조 설계에서는 콘크리트 슬래브의 건조수축을 콘텍트 게이지 및 다이얼 게이지 방법을 이용하여 형상비 및 골재 종류에 따라서 측정하였다. 〈식 7.8〉과 〈표 7.6〉은 그 결과를 정리한 것으로서, 〈식 7.8〉과 〈표 7.6〉을 통해 알고자하는 재령에서의 건조수축 변형률을 예측할 수 있다.

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{t}{a_2 + t} \times a_1 \times [1 + a_3 \times \exp(-a_4 \times (V/S))] \quad \text{〈식 7.8〉}$$

여기서, $\epsilon_{sh}(t)$: 건조수축 변형률($\mu\epsilon$)

t : 재령 (일)

a_1, a_2, a_3, a_4 : 건조수축 예측상수

V/S : 형상비 (mm)

〈표 7.6〉 굽은 골재별 콘크리트 슬래브의 건조수축 예측상수

골재	a_1	a_2	a_3	a_4
화강암	491.7	27.43	0.635	0.01956
석회암	362.9	36.71	1.613	0.0372
사암	431	33.3	2.204	0.0194
편마암	209.5	18.88	4.315	0.0110
안산암	376.7	23.50	2.537	0.0251

건조수축은 콘크리트 슬래브의 깊이에 따라 동일하게 일어나는 것이 아니라 대기중에 노출된 부분의 건조수축이 가장 크게 발생하며 깊이 방향으로 갈수록 점점 작아진다. 이러한 불균등한 건조수축은 내부의 습도 변화에 따라 달라지며, 이는 콘크리트 포장의 와핑(Warping : 콘크리트 재료가 습도 변화에 따라 변화하는 현상)을 유발시키고 수직으로 거동하는 원인이 된다. 도로포장 구조 설계에서는 이와 같은 부등건조수축(슬래브 상하부의 건조수축이 다른 경우)을 설계에 고려하기 위한 온도차 개념으로 변환하여 입력변수로 사용하였다. 〈식 7.9〉는 부등건조수축으로 인해 발생한 변형률을 슬래브 상하부의 온도차이로 변환하는 식이다. 원형 링 시험과 기존 연구결과 (Hossain 등, 2008)를 참고하여 콘크리트 응력 감소계수를 $a=-1.281$, $b=0.472$ 로 결정하였다.

$$\Delta T_{re} = \frac{-K \times \epsilon_{sh}(t)}{\alpha_c} \times [1 - \Phi(t)] \quad \text{〈식 7.9〉}$$

여기서, ΔT_{re} : 응력감소가 고려된 부등건조수축 등가온도차이

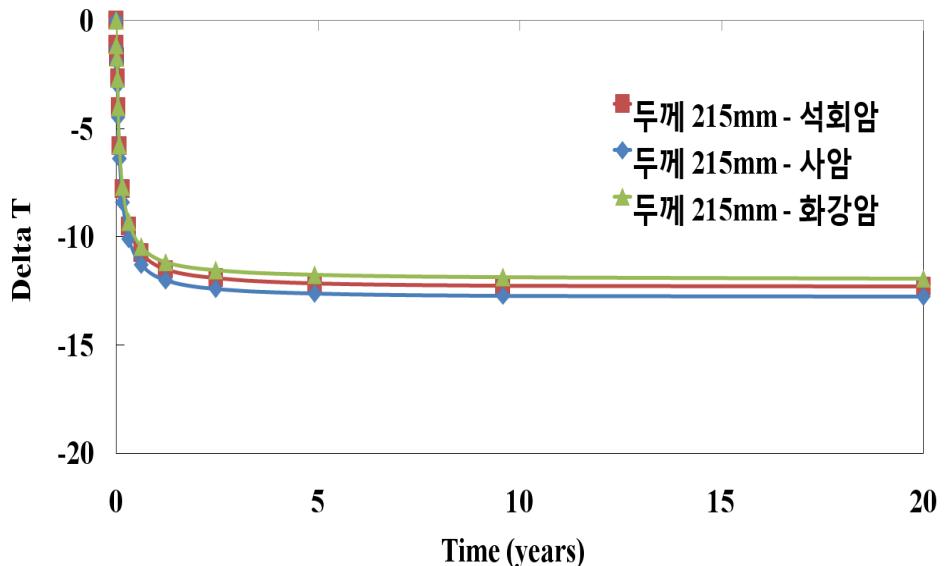
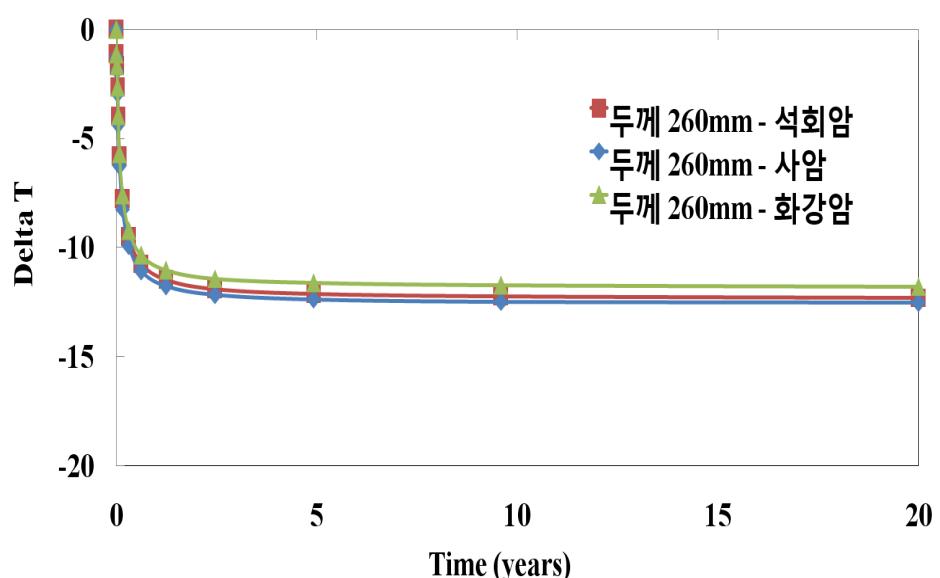
t : 재령(시공직후 부터 고려되어 함)

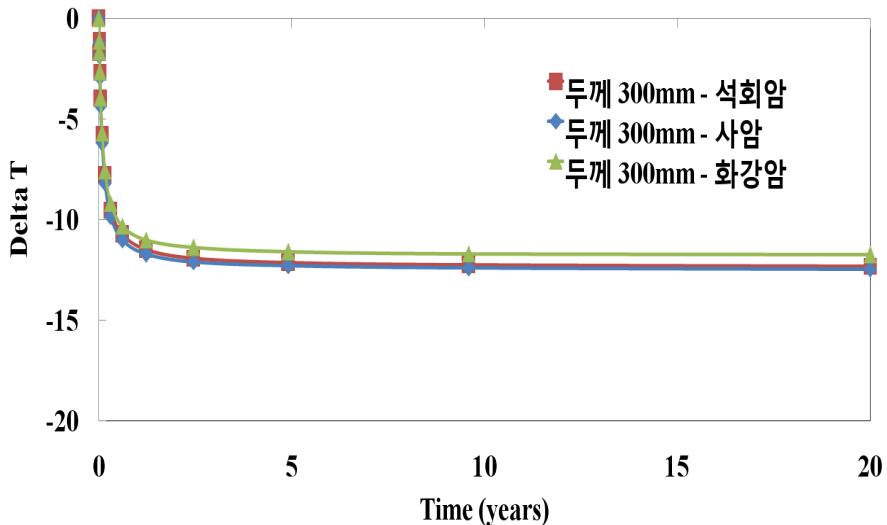
K : 부등건조수축계수($=0.6$)

α_c : 콘크리트열팽창계수(μ strains)

$\Phi(t)$: 콘크리트응력감소계수

$$\Phi(t) = a\left(\frac{1}{t}\right) + b \quad (a=-1.281, b=0.472)$$

(a) 암종별 응력감소가 고려된 부등건조수축 예측량1($V/S= 215\text{mm}$)(b) 암종별 응력감소가 고려된 부등건조수축 예측량2($V/S= 260\text{mm}$)



(c) 암종별 응력감소가 고려된 부등건조수축 예측량3(V/S= 300mm)

〈그림 7.11〉 재령에 따른 응력감소가 고려된 부등건조수축
등가온도차이 예측 결과

〈그림 7.11〉은 암종 및 형상비에 따른 부등건조수축을 등가의 온도차로 변환한 값을 나타낸 것이다. 슬래브 두께 215 mm, 260 mm, 300 mm에 각각 석회암, 사암, 화강암을 (식 7.9)에 넣어 재령에 따른 총 9가지 경우의 그래프와 재령 20년에서의 ΔT 값을 비교하였다. 〈표7.7〉와 같이 두께가 두꺼울수록, 암종별로는 화강암, 사암, 석회암 순으로 ΔT 값은 작아졌다.

〈표 7.7〉 재령 20년에서의 응력감소가 고려된 부등건조수축 등가온도차이 예측 결과

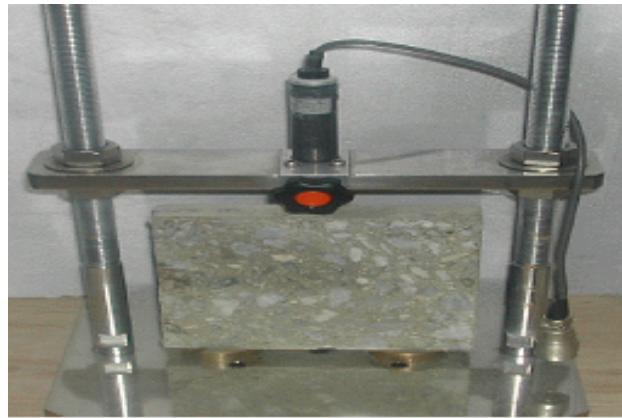
구분		두께(mm)		
		215	260	300
암종	석회암	-12.311	-12.306	-12.305
	사암	-12.781	-12.536	-12.441
	화강암	-11.919	-11.793	-11.744

7.1.4 열팽창계수

열팽창계수는 온도에 의한 슬래브의 팽창 및 수축, 상향 및 하향 커링 등의 발생 정도의 원인이 되는 요인이다. 열팽창 계수는 간접적으로 포장의 스팔링 발생, 블로업, 포장의 피로 균열 등의 발생을 설명하는 주요 인자이다.

콘크리트 열팽창계수는 시멘트 페이스트의 열팽창계수와 골재의 열팽창 계수의 복합적인 작용에 의해 결정된다. 페이스트의 열팽창계수는 함수량에 의존하며 골재의 열팽창계수는 일반적으로 페이스트의 열팽창계수보다 작기 때문에 콘크리트 내에 골재의 함유량에 따라 콘크리트 열팽창계수는 변화한다. 즉, 시멘트 페이스트와 골재로 이루어진 콘크리트에서 골재의 비율이 높을수록 열팽창 계수는 작아진다.

열팽창계수 실험은 <그림 7.12>와 같고 최근(2000)에 미국 도로연방청 산하 도로연구소(TFHRC: Turner-Fairbank Highway Research Center)에서 LVDT를 사용하여 콘크리트의 열팽창계수를 수하는 방법을 제안하였다. 또한 매립형 스트레인게이지에 의한 콘크리트의 열팽창계수 측정방법은 $150 \times 150 \times 550$ mm 콘크리트 공시체 중심부에 스트레인 게이지를 매립하여 온도에 따른 길이변화를 측정하는 방법이다. 이 시험법의 경우 온도변화가 적은 경우에는 문제가 없으나, 온도범위가 큰 경우에는 스트레인 게이지의 온도보정을 필요로 한다. 보정방법은 <식 7.10>와 같으며, 이 때 스트레인 게이지의 열팽창계수는 PML 60 및 KM 100B가 각각 11.0 및 $10.9 \mu\varepsilon/^\circ\text{C}$ 이다.



〈그림 7.12〉 열팽창계수 실험 개념도 (LVDT 실험방법)

$$\alpha_c = \frac{\varepsilon_c + \Delta T \times \alpha_{sg}}{\Delta T} \quad \langle \text{식 } 7.10 \rangle$$

여기서, α_c , α_{sg} : 콘크리트 및 스트레인 게이지의 열팽창계수 ($\mu\varepsilon/^\circ\text{C}$)

ε : 콘크리트의 변형률($\mu\varepsilon$)

ΔT : 온도변화($^\circ\text{C}$)

이상의 실험 방법을 이용하여 도로포장 구조 설계에서 콘크리트 포장용 재료의 골재 종류별 열팽창계수는 〈표 7.8〉과 같다.

〈표 7.8〉 굵은 골재별 콘크리트의 열팽창계수

굵은 골재 종류	열팽창계수 ($\mu\varepsilon/^\circ\text{C}$)	
	범위	제안값(실험값)
화강암	7.60~11.32	8.97
석회암	8.30~9.49	8.76
사암	10.80~11.51	11.00
편마암	7.60~11.64	9.56
안산암	7.22~7.95	7.69

텍사스 교통국(TxDOT : Texas Department of Transportation)에서는 앞서 살펴본 건조수축과 열팽창계수를 현장에서 측정하는 방법을 고안하였으며, 다음과 같은 방법으로 두 물성값을 측정한다. 시간에 따른 콘크리트 초기 변형률은 크게 응력하중에 의해 발생하는 변형률과 환경 하중에 의해 발생하는 변형률으로 구분된다. 만약 재하되는 하중이 환경 하중만 있다면, 응력에 의한 변형률은 “0”이 될 것이다. 또한 크리프에 의한 변형률이 매우 작아 무시할 수 있을 정도라고 하면, 전체 변형률은 <식 7.11>과 같이 간단하게 될 것이다. <식 7.11>에서 건조수축과 온도에 의한 변형률을 분리하기 위하여 텍사스 교통국에서는 원형 실린더 형태의 무응력 장치를 이용하였으며, <그림 7.13>과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_i^T &= \Delta \varepsilon_i^0 && \langle \text{식 } 7.11 \rangle \\ &= \Delta \varepsilon_i^{th} + \Delta \varepsilon_i^{sh} \\ \Delta \varepsilon_i^{sh} &= \Delta \varepsilon_i^0 - \Delta \varepsilon_i^{th} \\ &= \Delta \varepsilon_i^0 \in \text{dependent device} - (\Delta T \times COTE)\end{aligned}$$

여기서, $\Delta \varepsilon_i^T$: 전체 변형률

$\Delta \varepsilon_i^{th}$: 온도 변형률

$\Delta \varepsilon_i^{sh}$: 건조수축 변형률

ΔT : 온도 변화

$COTE$: 열팽창계수

원형 실린더는 두 종류가 있다. 하나(PNC)는 작은 구멍을 여러 개 뚫어 포장체 내의 습기가 이동할 수 있도록 하여 건조수축과 온도에 의한 거동을 측정할 수 있도록 하였다. 다른 하나(INC)는 구멍이 없어 습기가 이동할 수 없게 하여 건조수축이 발생하지 않고 온도에 의해서만 거동할 수 있도록 하였다. 두 실린더 모두 경계면은 마찰이 없도록 하였다. 전자는 콘크리트 재료의 건조수축과 온도변화에 의한 거동을 살펴보기 위한 것이고, 후자는 온도 변화 및 열팽창계수를 측정하기 위한 것이다. INC 장치를 이용하여 온도

와 변형률과의 기울기 그래프를 통해 콘크리트의 열팽창계수를 구할 수 있다. 또한 PNC의 변형률에서 INC의 변형률을 빼면 콘크리트 재료의 건조수축 변형률이 된다.



〈그림 7.13〉 PNC (Permeable Non Stress Cylinder)와 INC(Impermeable Non Stress Cylinder)

7.1.5 각 물성값 간의 상관관계

다양한 방법을 이용하여 측정한 각 물성값은 서로 독립적이기 보다는 타 물성과 상관관계를 지니고 있다. 최소의 실험으로 다양한 종류의 물성을 예측하기 위하여 〈표 7.9〉에 나타난 각 물성간의 상관관계식을 개발하여 측정된 항목의 물성을 이용하여 측정되지 않은 항목의 물성을 예측할 수 있도록 하였다. 본 도로포장 구조 설계의 콘크리트 재료 물성정량화 연구를 통해 각 물성간의 상관관계를 다음과 같이 제안하였다.

〈표 7.9〉 콘크리트 강도 및 탄성계수간의 상관관계식

항목	kgf/cm ² 단위	MPa 단위	R2
압축강도 → 휨강도	휨강도 $= 2.508 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	휨강도 $= 0.7851 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	0.867
압축강도 → 조俭인장강도	조俭인장강도 $= 1.895 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	조俭인장강도 $= 0.5932 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	0.633
휨강도 → 조俭인장강도	조俭인장강도 $= 0.757 \times (\text{휨강도})$	조俭인장강도 $= 0.757 \times (\text{휨강도})$	0.950
압축강도 → 탄성계수	탄성계수 $= 15,870 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	탄성계수 $= 4968 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	0.859
	-	탄성계수 $= 9733 \times (\text{압축강도} - 6.723)^{1/3}$	0.905

7.1.6 포아송 비와 단위중량

콘크리트 슬래브의 포아송비와 단위중량은 KS F 2438 “콘크리트의 탄성계수 시험”과 KS F 2409 “굳지 않은 콘크리트의 단위용적 질량 및 공기량 시험”에 의하여 측정된다. 본 도로포장 구조 설계에서는 실험을 통하여 사용한 굵은 골재의 종류별에 따른 포아송 비와 단위중량을 〈표 7.10〉, 〈표 7.11〉과 같이 제시하였다.

〈표 7.10〉 포아송 비 제안값

배합	세골재 종류	시멘트량	범위	측정값	제안값
석회암	자연사	330		0.176	0.176
사암	자연사	330		0.176	0.176
화강암	자연사	330	0.176	0.176	
	세척사	330	~	0.182	
	부순모래	330	0.198	0.198	0.186
	자연사	370		0.189	
	세척사	370		0.184	

〈표 7.11〉 단위중량 제안값

배합	세골재 종류	시멘트량	단위중량(t/m^3)	
			범위	제안값 (평균값)
석회암	자연사	330		2.359
사암	자연사	330		2.376
화강암	자연사	330	2.297	
	세척사	330		
	부순모래	330		2.338
	자연사	370	~ 2.414	
	세척사	370		
평균				2.358

7.2 새로운 재료에 대한 물성 정량화 방안

현재 콘크리트 포장에 사용되는 재료들이 다양하기 때문에 본 도로포장 구조 설계 개발 연구를 통해서 모든 재료에 대한 물성 자료를 확보하지 못하였다. 현재 도로포장 구조 설계에서 사용하는 재료 이외의 재료를 사용할 경우에 대한 재료 물성 정량화 방안은 다음과 같다.

7.2.1 탄성계수

(1) 신설포장

〈표 7.12〉는 입력수준에 따른 콘크리트 재료의 탄성계수 산정방법에 대해 정리한 것이다. 〈표 7.12〉의 설계 수준 1에서 직접 측정한 탄성계수나, 입력수준 2에서 압축강도로부터 산정된 탄성계수의 경우로부터 탄성계수 관계식을 도출할 때, 재령은 3일 이후부터 사용함을 알 수 있다. 실제 도로포장 구조 설계 연구에서는 재령 1일부터 측정하였다. 이에 따라 실험실에서 많은 노력이 수반되었으며, 1일~약 6개월 정도 재령의 시편을 제작하는데 여러 번의 배치가 필요하다. 따라서, 실험결과의 변동성이 크며, 초기치(1일~28일)의 S자 형태 곡선과 장기강도(7일~20년)의 성장곡선을 하나의 곡선으로 설명하기가 어려운 측면이 있다. 따라서 설계 프로그램의 탄성계수 성

장곡선을 만드는 데는 AASHTO에서 요구하는 수준이 적절하고 신뢰성이 있는 것으로 판단되어, 1일 데이터를 빼고 관계식을 만들었다.

〈표 7.12〉 설계수준에 따른 탄성계수 산정방법

설계 수준	단위 (MPa)
1	탄성계수실험: 3, 7, 14, 28, 56, 6m $E = E_{28} t / (a + bt)$
2	압축강도: 3, 7, 14, 28, 56, 6m $E = a_1 \sqrt{f'_c}$: ACI식 $a_1 = 4,968, R^2 = 0.859$

(2) 기존 콘크리트 포장의 탄성계수 측정

〈표 7.13〉 설계수준에 따른 기존 콘크리트 탄성계수 추정방법

설계수준	단위 (psi)
1	FWD시험: $E_d(\text{dynamic}) \times 0.8 = E_c(\text{static})$ $E_d = E_c \times C$ 포장상태 $C = 1.0(\text{양호}), 0.42(\text{보통}), 0.042(\text{파손 심함})$
2	코아시편의 압축강도실험: $E = 33\rho^{3/2} \sqrt{f'_c}$

〈표 7.14〉 FWD로부터 역계산된 PCCP 탄성계수 자료

재료	단위 psi (팔호 GPa)			비고
	Low	High	Mean	
PCC	3,000,000 (21)	7,500,000 (52)	4,500,000 (31)	* High값은 범위를 벗어나는 듯함
Lean Concrete	500,000 (3.4)	2,500,000 (17)	1,500,000 (10)	

7.2.2 압축강도

압축강도는 콘크리트 재료물성의 가장 기본적인 강도 데이터이다. 그러나 포장설계의 설계수준 2 및 3에서는 탄성계수, 휨강도, 쪼ヶ인장강도를 추정하기 위해서만 필요하다.

7.2.3 휨강도

〈표 7.15〉에서는 입력수준에 따른 AASHTO와 본 연구의 PCC 휨강도 산정방법을 정리하였다.

〈표 7.15〉 설계수준에 따른 휨강도 산정방법

설계 수준	단위 (MPa)
1	MR 실험: 3, 7, 14, 28, 56d, 6m ; $MR = MR_{28} t / (a + bt)$
2	압축강도: 3, 7, 14, 28, 56d, 6m ; $MR = a_1 \sqrt{f'_c}$ $a_1 = 0.7851, R^2 = 0.867$

7.2.4 쪼ヶ인장강도

쪼ヶ인장강도는 JCP의 경우 직접적인 입력 데이터가 아니지만 강도 및 탄성계수와의 상관관계식에 사용되고 있다. 그러나 CRCP의 경우에는 직접적인 입력요소가 된다.

(1) 신설포장

다음 〈표 7.16〉에는 설계수준에 따른 도로포장 구조 설계의 쪼ヶ인장강도 산정방법을 정리하였다.

〈표 7.16〉 설계수준에 따른 쪼갬인장강도 산정방법

설계 수준	본 연구 (단위 MPa)
1	f_t 실험: 3, 7, 14, 28, 56d, 6m; $f_t = f_{t28} t / (a + bt)$
2	압축강도: 3, 7, 14, 28, 56d, 6m $f_t = 0.5932 \sqrt{f'_c}$, R2=0.633 $f_t = 0.757MR$, R2=0.950

(2) 기존 포장의 쪼갬인장강도

〈표 7.17〉 설계수준에 따른 쪼갬인장강도 산정방법(기존포장)

설계 수준	단위 (MPa)
1	코어시편: f_t
2	코어시편: $f'_c \rightarrow f_t$, $f_t = 0.5932 \sqrt{f'_c}$

7.2.5 열팽창계수

〈표 7.18〉에서 알 수 있듯이 열팽창계수는 골재에 의한 영향만을 다루고 있다.

〈표 7.18〉 설계 수준에 따른 열팽창계수 산정방법

설계 수준	열팽창계수 산정방법
1	AASHTO TP 60에 의해 측정
2	골재와 폐이스트의 부피 비에 의해 'rule of mixture' 적용

7.2.6 건조수축변형률

건조수축은 가장 PCC 재료입력변수 중에서 가장 시간이 오래 걸리며 정량키 어려운 측면이 있다. AASHTO 산정방법은 포장연구자들이 연구한 데이

터가 아니라 재료연구자들이 제한적인 실험 범위 내에서 만든半 이론적-실험적인 공식을 사용하고 있기에 매우 복잡한 형태로 표현되었다.

(1) 극한 건조수축 변형률

다음 〈표 7.19〉는 입력수준에 따른 AASHTO와 KPRP의 PCC 건조수축변형률 산정방법을 정리하였다. AASHTO에서는 건조수축시험의 표준조건으로서 40% RH 조건을 제시하고 있으나 ASTM에서는 50% RH를 KS에서는 60%로 지정되어 상호보정이 필요하다. 따라서 AASHTO의 시험방법은 습도 조건만을 비교하면 ASTM조건을 기준으로 건조수축이 과대평가될 것이다. 또한 형상비(V/S)가 22.2mm인 표준시편을 사용하므로 인해 표준시편에 비해 더욱 과대평가하게 될 것이다.

〈표 7.19〉 설계수준에 따른 건조수축변형률 산정방법

설계 수준	산정 방법
1	50~60% RH에서 포장용 슬래브 크기 감안하여 측정
2	PCC mix 조건으로부터 계산 $\epsilon_{cu} = C_1 C_2 (26w^{2.1} (f'_{c'})^{-0.28} + 270)$

비고) $\epsilon_{cu} = C_1 C_2 (26w^{2.1} (f'_{c'})^{-0.28} + 270)$: NCHRP 보고서, 1980.

C1: 시멘트 타입 계수

1.0, 1종 시멘트 (level 2, 3)

0.85, 2종 시멘트 (level 2, 3)

1.1, 3종 시멘트 (level 2, 3)

C2: 양생방법 보정계수

0.75, 스팀 양생 (level 2에서만 사용)

1.0, 수중 양생 (level 2, 3)

1.2, 양생제 살포 (level 2, 3)

w: 물량, lb/ft³

(2) 50% 극한건조수축변형률에 도달한 시간

- 설계수준 1: AASHTO T160시험에서 결정
- 설계수준 2: Not applicable
- 설계수준 3: 35일 사용 (ACI 식)

(3) 회복성 건조수축변형률

특별히 실험하지 않는 경우 50%를 사용한다.

(4) 월별 평균 대기습도

EICM 프로그램을 통해 생성한다.

7.2.7 단위중량

(1) 신설포장

〈표 7.20〉 설계수준에 따른 단위중량 산정방법

입력수준	산정 방법
1	큐빅 시편으로부터 단위중량 측정
2	-

(2) 기존포장

〈표 7.21〉 설계 수준에 따른 단위중량 산정방법(기존포장)

입력수준	산정방법
1	Nuclear 방법으로부터 단위중량 측정
2	-

7.2.8 포아송 비

콘크리트 포장에서의 포아송 비의 효과는 크지 않다. 도로포장 구조 설계에서는 암종별 콘크리트의 포아송 비를 직접 측정하여, 0.176~0.186의 범위로 제시하였다.

7.3 설계관련 물성 및 시험

콘크리트 포장 중 줄눈 콘크리트 포장(JRCP), 연속 철근 콘크리트 포장(CRCP), 프리스트레스 콘크리트 포장(PCP)등에서는 철근이 사용된다. 철근은 구조적으로 하중 전달 장치 역할을 하거나 콘크리트와 함께 교통 및 환경 하중을 지지하는 구조적인 역할을 한다.

줄눈 콘크리트 포장의 줄눈은 포장의 팽창과 수축을 수용함으로써 온도 및 습도 등 환경 변화, 마찰 그리고 시공에 의하여 발생하는 응력을 가능한 완화시키기 위하여 설치하는 것이다. 형식상 가로 줄눈, 세로 줄눈, 시공 줄눈으로 나뉘며, 기능상 수축, 팽창 줄눈, 시공 줄눈으로 나뉜다. 줄눈은 가능한 적게 설치하고 또 적정구조로 설치하여 포장공용성과 주행성을 향상시킬 수 있다.

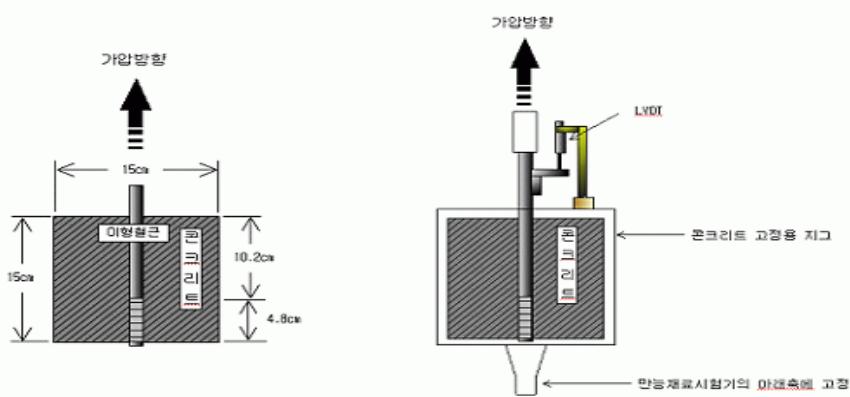
7.3.1 철근

철근은 표면의 요철의 유무에 따라 원형 철근과 이형철근으로 구분된다. 이형철근에서 공칭지름, 공칭단면적, 공칭 둘레라함은 동일한 길이, 동일한 중량의 원형 철근의 지름, 단면적, 둘레로 환산한 값을 말하며, 이를 값을 설계에 사용한다. 이때 강의 비중은 7.85로 가정한다.

철근의 성질은 항복점과 탄성계수로 대표된다. 철근의 항복점은 인장의 경우나 압축의 경우나 거의 같다. 탄성계수는 모든 철근이 거의 비슷한 값을 나타내며 2,000 ~ 2,200 GPa 의 범위에 있다.

콘크리트와 철근과의 부착은 연속 철근 콘크리트나 줄눈 콘크리트에서 중요한 설계 인자이다. 철근과 콘크리트의 부착 특성을 시험방법은 표준인발

시험법을 일반적으로 사용한다. 국내 도로설계시 제시하는 13, 16mm의 미리 준비된 $15 \times 15 \times 15\text{cm}$ 큐빅 몰드에 삽입한다. 콘크리트를 2층으로 나누어 타설하고 진동대로 각각 30초간 다짐하여 각 재령에서 미리 제작한 지그를 이용해 콘크리트를 고정한다. 철근을 공칭용량 각각 5톤과 250톤의 만능재료시험기를 이용해 각각 $0.3\text{mm}/\text{min}$ 과 $10\text{ ton}/\text{min}$ 의 하중재하속도로 인발하여 부착강도를 측정하였다.



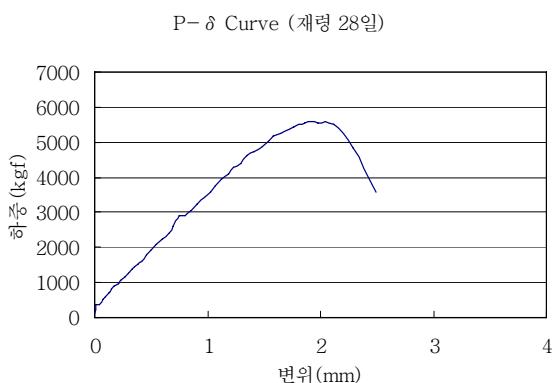
〈그림 7.14〉 Tie-Bar의 콘크리트내 매립모습과 지그 및 LVDT 설치개념도

〈표 7.22〉 부착실험 결과

구 분	시 편 1	시 편 2	시 편 3	평 균
매립 재령 1일	2970 kgf	2510 kgf	×	2740 kgf
매립 재령 7일	5151 kgf	5859 kgf	×	5505 kgf
매립 재령 28일	6201 kgf	5572 kgf	×	5887 kgf
천공 밀크그라우팅 28일	2587 kgf	2392 kgf	2105 kgf	2361 kgf

부착강도를 측정함과 동시에 〈그림 7.14〉와 같이 콘크리트의 자유단에 변형률계이지(LVDT)를 장착하여 변위를 데이터 로거(Data Logger)로 측정하는 모습이다. 철근과 콘크리트 사이의 부착강도와 함께 철근의 슬립도 중요한 인자가 되며 이는 각 재령별 P- δ Curve를 통해 부착특성을 알 수 있다.

실제 실험결과, 매립형 타이바의 경우 부착강도가 콘크리트 재령 1일 58 kgf/cm², 7일 101 kgf/cm², 28일 118 kgf/cm²로 나타났다. 그리고 밀크그라우팅한 시편의 경우는 평균 46 kgf/cm²으로 측정되었으며, 이는 매립형 타이바의 재령 28일에서의 부착강도에 40%되는 부착력이다. 그리고 확장부의 타이바 설치는 매립형 타이바와 비교하여 보았을 때 40%정도밖에 그 기능을 발휘 못 하는 것으로 나타났다. 실제 포장의 확장 공사에서 타이바의 설치는 천공한곳에 타이바를 설치한 후 밀크 그라우팅제를 주입하는 것이 아니라 타이바에 밀크 그라우팅제를 묻혀 천공구멍에 넣어 콘크리트와 밀크 그라우팅제의 조밀한 부착이 이루어지지 않았기 때문이다.



〈그림 7.15〉 재령 28일의 P-δ Curve

Harajli(2002)는 이형철근과 콘크리트간의 부착강도에 대해 다음과 같이 제시하고 있다.

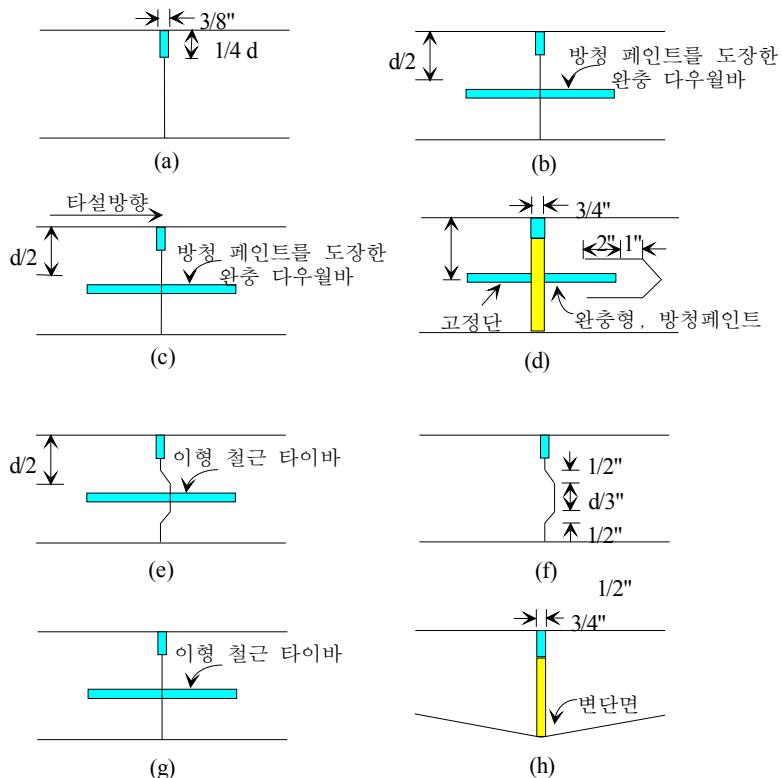
$$\sigma_{\max} = 0.75 \sqrt{f_c} \left(\frac{c}{d_b} \right)^{2/3} \quad \text{식 (7.12)}$$

여기서, σ_{\max} = 허용부착응력 (MPa),

f_c = 콘크리트강도 (MPa)

c = 피복두께 (cm)

d_b = 철근직경 (cm)



〈그림 7.16〉 다양한 불연속면 처리 형태

7.3.2 불연속면

불연속면 설계는 줄눈의 종류, 줄눈 간격, 타이바 및 다웰바, 줄눈재 선정 등을 포함한다.

(1) 줄눈의 종류

줄눈 콘크리트 포장은 초기 콘크리트를 타설한 후 양생이 되는 과정에서 수축을 하게 되고 이로 인해 콘크리트 슬래브는 초기에 균열이 발생한다. 이러한 균열 발생을 방지하기 위해서 인위적으로 줄눈을 만들어 균열을 유도한다. 〈그림 7.16〉은 다양한 줄눈 형태를 나타낸 것이다.

가. 수축 줄눈

횡방향 수축 줄눈은 수분, 온도 그리고 마찰에 의해 발생하는 인장 응력을 완화시켜 균열을 억제하기 위하여 슬래브 중앙에서 설치한다. 이러한 수축 줄눈을 설치하지 않는다면 포장의 표층에는 임의의 균열이 발생하게 된다.

나. 팽창 줄눈

팽창 줄눈의 주된 기능은 슬래브 크기 변화에 의해 발생되는 압축응력으로 인한 손상이 악화되는 것을 억제하는 것과 인접 구조물로 압력이 전달되는 것을 방지하는데 있다. 일반적으로 팽창 줄눈은 과업의 비용, 작업성, 공용성의 문제들을 고려하여 가능한 적은 수로 설치한다. 팽창 줄눈은 포장의 형식이 변하는 부분, 교차로 등에 설치한다.

다. 시공 줄눈

시공 줄눈이란 1일 포설 종료시나 강우 등에 의해서 시공을 중지할 때에 설치하는 줄눈이다. 시공 줄눈의 위치는 수축 줄눈의 예정 위치에 설치하는 것이 좋으며 이 경우는 맞댄형의 수축 줄눈이 된다. 또한 강우와 기계고장 등에 따라 수축 줄눈의 예정위치에 설치하는 것이 가능하지 않을 때는 수축 줄눈에서 3m 이상 떨어진 위치에 맞댄형의 줄눈 구조로 한다.

근래에 들어 시공 기술의 반전에 따라 수축 균열 폭 유지가 용이하여 팽창 줄눈 간격을 넓게 취하는 경향이며 미국의 경우 교량이나 공법이 다른 포장 접속부 위에는 팽창 줄눈을 시공 마무리 지점에만 설치할 수 있다.

(2) 줄눈간격

기존에는 현장 경험을 바탕으로 국내 줄눈 콘크리트포장의 줄눈간격은 획일적으로 6m로 시공되었다. 하지만 도로포장 구조 설계에서는 국내의 기후조건과 설계 및 시공 여건을 고려하여 전국 25개 권역으로 나누고 적정 줄눈간격을 <표 7.23>와 같이 6~8m로 제시하였다. 단, <표 7.23>에 제시된 줄눈간격은 포장단면과 함께 예비단면 결정시 함께 고려되어야 하는 중요

한 사항이다. 하지만, 설계가 진행됨에 따라 줄눈간격은 적절히 줄여가면서 수정될 수 있다.

〈표 7.23〉 예비단면에 사용되는 권역별 줄눈간격

권역	지역	줄눈간격(m)	권역	지역	줄눈간격(m)	
강원남부	영월	6	충남서해안	서산	7	
	원주			광주	7	
강원북부	인제	6	전남중부	순천		
	철원			목포	8	
강릉동해안	동해	7	전남서부	진도		
	강릉			완도		
	속초		전남동부	고흥	7	
	대관령	6		여수		
강원산간	태백	전북중부	전주	6		
	춘천		6		임실	
강원중부	홍천	전북서해안	군산	7		
	이천		6		안동	7
경기남부	수원	경북북부	대구			
	서울		7	영덕		
경기북부	동두천	6	경남남부	마산	7	
	문산			부산		
경기서해안	인천	7		진주		
충남남부	금산	6		통영		
	부여	경남서부	합천	7		
충남중부	대전		6		거창	
	천안	경북서부	영주			
충북중부	청주		7		상주	7
	보은				구미	
	추풍령				영천	
충북북부	제천	6	제주남부	제주	8	
	충주			제주북부		
충북서해안	보령	7				

(3) 줄눈 채움재

줄눈 채움재는 줄눈 콘크리트 포장의 줄눈부에 이물질이나 강우가 들어가는 것을 예방하여 줄눈부에서의 파손을 예방하고 하부 지지력을 증진시키

기 위함이다. 줄눈 채움재는 줄눈폭의 변동에 따라 떨어져 나가지 않고 신축 할 수 있도록 설계해야야 한다. 줄눈 채움재는 콘크리트 슬래브의 수축과 팽창에 따라 동시에 발생하는 줄눈폭의 움직임에 근거하여 결정하고, 안전측을 고려하기 위하여 평균값이 아닌 줄눈폭 움직임의 상위 95% 신뢰도 개념을 적용한 〈식 7.13〉을 사용한다.

$$\Delta L = C_k \cdot JS \cdot [(\alpha_c \cdot T) + Z] \quad \langle \text{식 7.13} \rangle$$

여기서, ΔL = 최대 줄눈폭 (mm)

C_k = 기층재료 종류별 상위 95% 신뢰개념 적용시 보정계수

(린콘크리트 기층: 1.6, 쇄석(보조)기층: 2.0, 아스팔트 기층: 2.26)

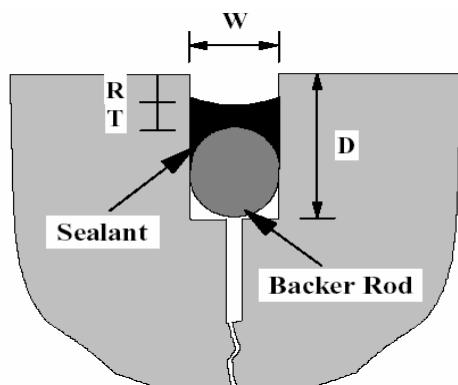
JS = 줄눈 간격 (m)

α_c = 콘크리트 열팽창계수 ($^{\circ}\text{C}/\mu\text{strains}$)

T = 슬래브의 연중 최대온도차 ($^{\circ}\text{C}$)

Z = 콘크리트의 전조수축

〈식 7.13〉에 의하여 산정된 줄눈폭 움직임을 이용하여, 〈그림 7.17〉에 보인 줄눈채움재를 설계하되 〈표 7.24〉의 실린트 종류별 형상계수를 고려한다.



〈그림 7.17〉 줄눈채움재 단면

〈표 7.24〉 줄눈채움재별 형상계수

실린트 종류	형상계수(W:T)
가열 아스팔트	1:1
실리콘	2:1
PVC 타르	1:2
폴리우레탄 및 폴리설파이드	1:1

〈표 7.25〉 타이바의 사양

구분	타이바		
	지름(mm)	길이(mm)	간격(mm)
한국	16	800	750
오스트리아	14–20	700–1000	–
벨기에	12	1000	750
덴마크	12	1000	1000
핀란드	10	800	1000
프랑스	10	600	750
독일	16–20	600–800	–
영국	12	1000	600
이태리	16	800	750
네덜란드	16	800	–
노르웨이	10	500	1000
포르투갈	12	1000	700–800
스페인	12	1000	1000
스웨덴	12	1000	1000
스위스	14	500	1000

(4) 타이바

타이바는 인접한 슬래브 간의 벌어짐을 방지하기 위해 슬래브의 중간 깊이에 매설하는 철근으로 콘크리트와 타이바 간의 부착력이 그 기능을 좌우한다. <표 7.25>는 국내외 타이바의 사양을 정리하였다. 유럽의 경우에 비해 우리나라의 사양을 비교하면 길이는 약간 짧지만 간격은 약간 조밀하다. 독일의 경우는 타이바의 중앙 3등분된 길이에 다웰바처럼 에폭시 코팅 후 사용하여 철근부식을 방지하기도 한다.

가. 타이바 철근량

국내에서는 콘크리트포장에 사용되는 타이바의 길이를 설계할 때 타이바와 콘크리트 간의 부착응력을 신설구간의 경우 약 9.8MPa이고, 확장부의 경우 신설구간의 약 50~70%을 사용한다. 철근량에 따라 다웰바와 겹쳐 시공되지 않게 간격을 설정하는 것이 일반적이다.

<식 7.14>는 슬래브의 마찰력에 저항할 수 있는 슬래브 단위길이당 요구되는 타이바의 철근량을 계산하기 위한 식으로 직경이 정해지면 설치간격을 계산할 수 있다. 철근량은 소수점 첫째자리까지 계산하여 사용한다.

$$A_s = \frac{\gamma_c h L' f_c}{f_s} \times \frac{1}{1000} \quad \langle \text{식 7.14} \rangle$$

여기서, A_s : 슬래브 단위길이(m) 당 철근의 면적 (mm^2/m)

L' : 차선 폭 (mm)

γ_c : 콘크리트 단위중량 (kN/m^3)

f_c : 슬래브와 보조기층 간의 마찰계수 (= 1.8)

h : 슬래브 두께 (mm)

f_s : 철근의 허용응력 (MPa)

나. 타이바 길이

콘크리트 슬래브에 충분히 부착되기 위하여 필요한 적정한 길이로 타이바를 시공해야한다. <식 7.15>는 이를 계산하기 위한 식으로 계산하기 위한 식이다. 타이바의 철근량과 길이도 소숫점 1자리까지 계산한다.

$$t = 2 \left(\frac{A_1 f_s}{\mu \Sigma o} \right) \quad \langle \text{식 7.15} \rangle$$

여기서, t : 타이바의 길이 (mm)

μ : 허용부착응력 (MPa)

A_1 : 타이바 단면적 ($= \frac{\pi d^2}{4}$) (mm^2)

d : 타이바 직경(mm)

Σo : 타이바 둘레 ($= \pi d$) (mm)

도로포장 구조 설계에서는 위 식을 통하여 타이바 길이가 나왔을 경우 아래의 <표 7.26>을 통하여 타이바의 길이를 변경하여 수정타이바의 길이를 사용할수 있도록 하였다. 이는 현장 조건 및 줄눈 간격 등이 달라 겹치거나 모자라는 부분을 해결하기 위해서이다.

<표 7.26> 수정 타이바의 길이

수정 타이바 길이	계산값	계산값 < 600 (mm)	600 ~ 699 (mm)	700 ~ 799 (mm)	800 ~ 899 (mm)	900 ~ 1000 (mm)	1001 $<$ 계산값 (mm)
수정 타이바 길이	600	700	800	900	1000	재설계	

※ 재설계시 : 1. 타이바의 지름 변경 (타이바의 지름을 감소시킨다.)

다. 타이바 간격(mm)

타이바의 설계에 있어 타이바의 간격도 콘크리트 포장의 공용성에 많은 영향을 미친다. 도로포장 구조 설계에서는 각 줄눈 간격별 타이바의 간격을 달리 사용하였으며, 이를 통해 시공성을 향상 시켰다. 타이바의 간격은 (식 7.16)을 통해 산정된다. 산정된 타이바의 간격 <표 7.27>에서 구해진 줄눈간격별 적정 타이바 간격을 정하여 수정 타이바의 간격으로 사용한다.

$$F(\text{마찰력}) = W \times h \times L \times f_a \quad \langle \text{식 7.16a} \rangle$$

$$F_a (\text{허용인장력}) = f_s \times A_s \quad \langle \text{식 7.16b} \rangle$$

$$\text{타이바 간격} = \frac{F_a}{F} \quad \langle \text{식 7.16c} \rangle$$

여기서, F : 마찰력(kgf/m) = 주행방향 1m당 작용하는 마찰력

W : 콘크리트 단위중량 (kgf/m^3)

h : 표층두께 (m)

L : 차로폭(m)

f_a : 마찰계수

F_a : 허용인장응력(kgf) : 타이바 1개당 받는 인장력

f_s : 철근의 허용응력(MPa)

A_s : 타이바 단면적(cm^2)

〈표 7.27〉 줄눈간격별 수정 타이바 간격 설정

줄눈간격	수정 타이바 간격(mm) 설정		
줄눈 간격 5m	경우1. 타이바 개산값 < 700 mm	:	재설계
	경우2. 700 mm ~ 1049 mm	:	700mm
	경우3. 타이바 개산값 > 1050 mm	:	1050mm
줄눈 간격 6m	경우1. 타이바 개산값 < 700 mm	:	재설계
	경우2. 700 mm ~ 1049 mm	:	700mm
	경우3. 타이바 개산값 > 950 mm	:	950mm
줄눈 간격 7m	경우1. 타이바 개산값 < 800 mm	:	재설계
	경우2. 800 mm ~ 950 mm	:	800mm
	경우3. 타이바 개산값 > 950 mm	:	950mm
줄눈 간격 8m	경우1. 타이바 개산값 < 700 mm	:	재설계
	경우2. 700 mm ~ 1049 mm	:	700mm
	경우3. 타이바 개산값 > 1050 mm	:	1050mm

※ 재설계시 : 1. 타이바의 지름 변경 (타이바의 지름을 감소시킨다.)

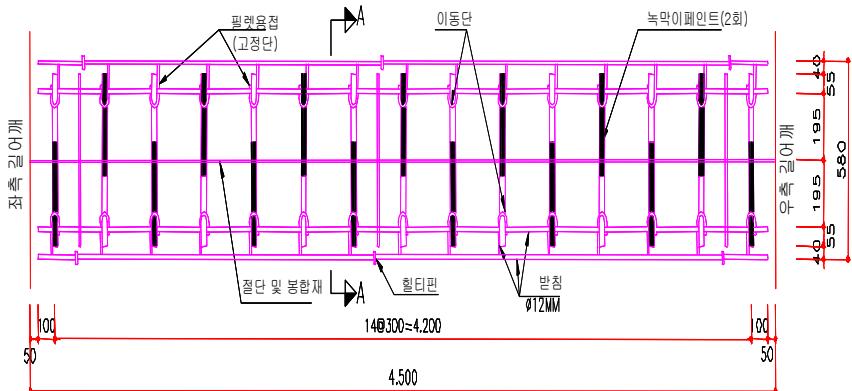
(5) 다웰바

다웰바는 콘크리트포장의 횡방향 줄눈부에 설치되어 인접한 슬래브 간에 하중을 전달하는 역할을 하며 슬립바(Slip Bar)라고도 한다. 〈그림 7.18〉은 다웰바의 설치도 및 시공 사진을 나타낸 것이다. 다웰바는 다음과 같은 특징을 가진다.

- ① 설계 구조가 간단하고, 설치가 용이하며, 콘크리트 내에 완전 삽입이 가능한 것으로 한다.
- ② 이 장치와 접촉되는 부위의 콘크리트에 과잉 응력을 발생시키지 않고 재하 하중응력을 적절히 분산시킬 수 있어야 한다.
- ③ 가로줄눈부의 가로방향 변위(longitudinal movement)를 구속하지 않아야 한다.
- ④ 실제 통과하게 될 윤하중과 그 통과 빈도에 대하여 역학적으로 안정한 구조이어야 한다.
- ⑤ 부식이 예상되는 지역에서는 부식에 저항할 수 있는 재료이어야 한다.
- ⑥ 하중 전달 장치에는 소용 인장 강도 이상의 품질을 가진 원형 봉강 철근을 사용한다.

도면

S = 1 : 15



(a) 다웰바 설치 도면



(b) 시공된 다웰바

〈그림 7.18〉 다웰바 설치도 및 시공 사진

팽창줄눈의 다웰바는 슬래브의 두께에 따라 직경 25~32mm, 길이 500mm의 것을 사용하며 끝에 철재(Cap)을 씌운다. 도로포장 구조 설계에서는 하중전달 역할을 하는 다웰바의 적정 간격을 제안하였다. 슬래브의 폭에

따라 <표 7.28>과 같은 간격으로 설치된다. 팔호 안의 숫자는 줄눈에서 가장 가까운 다웰바로부터 줄눈까지의 거리이고 나머지 숫자는 인접한 다웰바 간의 거리이다. <표 7.29>는 슬래브의 두께에 따른 일반적인 다웰바의 직경, 길이, 설치간격이다. 다웰바의 간격은 <표 7.28>에서 보듯이 동일한 슬래브 내에서도 줄눈 근처로 갈수록 좁아지나 중앙부에서는 300mm로 동일한 값을 사용한다.

<표 7.28> 슬래브 폭에 따른 다웰바 최적배치안

슬래브의 폭(m)		다웰바의 간격(mm)	비고
2.75	주행로	200@2 + 250 + 300@4 + 250@2 + 200	추월로 사용(X)
3.00	주행로	200@2 + 250@2 + 300@4+ 250@2 + 200	
3.25	주행로	200 + 250@3 + 350@4 + 250@2 + 200	
3.50	추월로	250 + 300@2 + 450@4 + 300@2	
	주행로	200 + 250@3 + 400@4 + 250@3	
3.75	추월로	250 + 300@2 + 450@4 + 300@2 + 250	
	주행로	200 + 250@3 + 400@4 + 250@3 + 200	
4.00 (측대포함)	주행로	200 + 250@4 + 400@4 + 250@4	추월로 사용(X)
4.25 (측대포함)	주행로	200 + 250@4 + 400@4 + 250@5	
4.50 (측대포함)	주행로	200 + 250@4 + 450@4 + 250@5	

<표 7.29> 슬래브 두께에 따른 일반적인 다웰바 설치 기준

슬래브 두께(cm)	다웰바 직경(mm)	다웰바 길이(mm)	다웰바 간격(mm)
15	20	460	300
18~20	25		
23~25	31		
30~36	38		

설치된 다웰바는 개별적으로 작용하는 것이 아니라 하나의 그룹으로 하

중전달을 하는 역할을 한다. 이를 다웰바 그룹 액션(Dowel Group Action)이라고 한다. 즉, 적용된 하중하에 있는 다웰바는 보다 적은 양을 받고 있는 다른 다웰바와 함께 하중의 주요부분을 감당하게 된다. 하중이 작용하고 있는 다웰바의 그룹작용은 Friberg에 의해 맨 처음 해석되었다. Westergaard에 의해 제시된 이론해석에 따라 Friberg의 최대 부모멘트(Nagative Moment)는 하중으로부터 $1.8l_r$ 의 거리에서 발생한다는 것을 알아냈다. <그림 7.19>는 다웰바 그룹 액션에 대한 범위를 나타낸다.

$$l = \left(\frac{Eh^3}{12 - (1 - \nu^2)k} \right)^{0.25} \quad \langle \text{식 7.17} \rangle$$

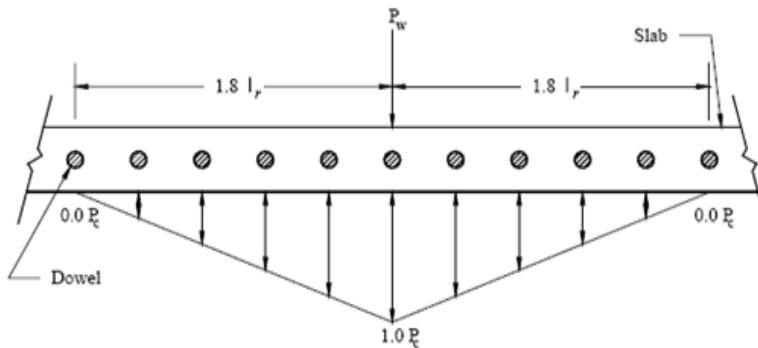
여기서, l : 상대강성계수

k : 스프링 상수

E : 콘크리트의 탄성계수

h : 콘크리트 슬래브의 두께

ν : 콘크리트의 포아송비



<그림 7.19> Friberg의 Dowel Group Action

미국의 Tabatabaie는 Friberg의 Dowel Group Action에 대한 유한요소해석 및 실제 도로포장의 처짐의 Data 분석을 통하여 $1.01l$ 같이 범위를 산정하

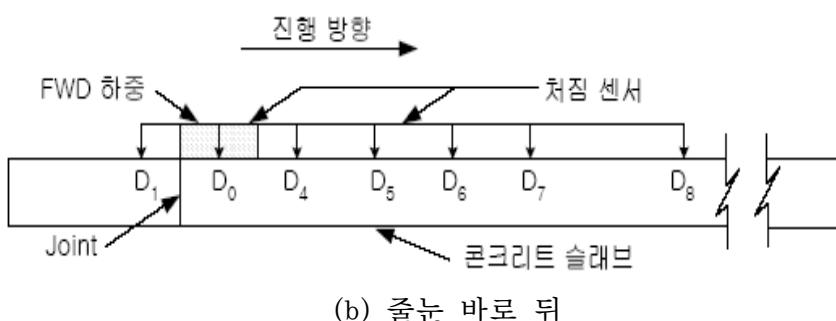
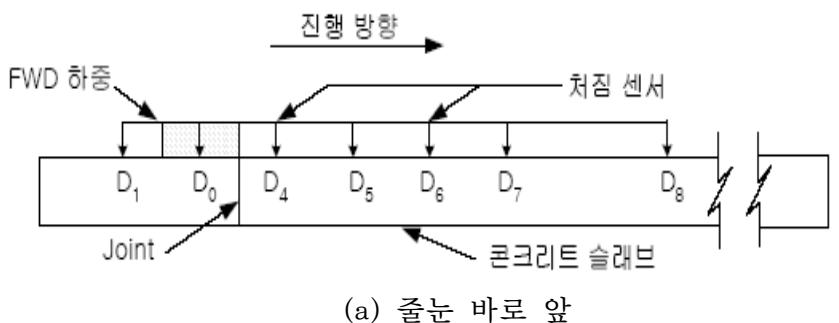
였다. 국내에서도 다웰바의 Dowel Group Action에 대한 범위 산정하여, 다웰바의 규격 및 배치에 대한 검토를 하기 위한 추가 연구를 진행 중에 있다.

(6) 출눈부의 하중 전달 효율

① 하중 전달 계수(LTE : Load Transfer Efficiency)

하중 전달 계수는 출눈 콘크리트 포장에서 출눈부의 하중 전달 능력을 측정하는 실험법이다. 방법으로는 현장에서 FWD를 이용하여 추정하는 방법과 실내에서 실험하여 산정하는 방법이 있다. 전자의 경우는 하부구조 및 환경 조건에 따른 하중 전달 효율을 알 수 있는 방법이다. 후자의 경우는 하중 전달 장치 성능을 검사하기 위한 목적의 실험이다.

〈그림 7.20〉은 FWD를 이용하여 하중 전달 계수 시험을 할 경우 각 센서의 위치를 나타내는 것이고 〈그림 7.21〉은 출눈부의 FWD 시험 장면이다.



〈그림 7.20〉 FWD 측정 시 센서의 위치



〈그림 7.21〉 줄눈부의 FWD 측정

가. AASHTO 설계 지침에서의 하중전달효율

AASHTO에서 덧씌우기 공법 적용 전에 기존 포장의 평가에 적용하였던 하중 전달효율을 산정하는 방법으로서 식 (7.18)과 같다.

$$LTE = 100 \times \frac{\Delta u_l}{\Delta l} \times B \quad \text{식 (7.18)}$$

여기서, ΔLTE : 하중전달효율 (Load Transfer Efficiency)

Δu_l : 하중이 재하되지 않은 슬래브의 처짐량

Δl : 하중이 재하된 슬래브의 처짐량

B : 측정에 따른 슬래브 기울임 보정계수

$$B = \frac{d_0}{d_{12}} \quad \text{식 (7.19)}$$

여기서, d_0 : 슬래브 중앙에서의 하중재하 지점의 처짐량

d_{12} : 슬래브 중앙에서의 하중재하 지점으로부터 30cm 떨어진
지점의 처짐량

나. Teller와 Sutherland 산정법
줄눈부 하중전달의 평가를 처짐비를 이용하여 나타내고 있다.

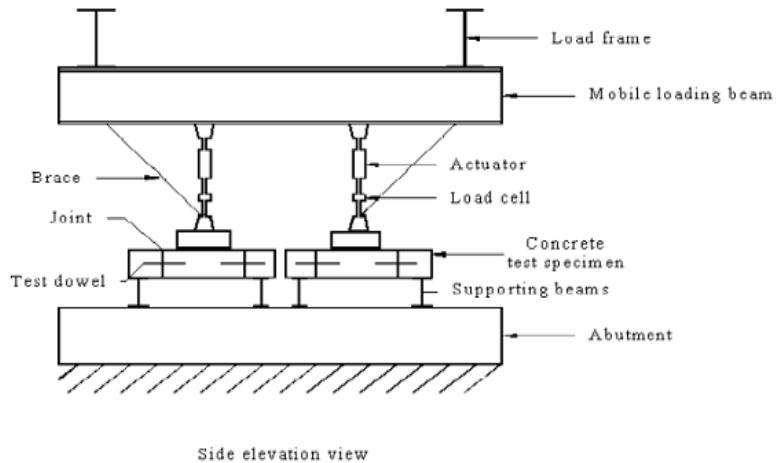
$$LTE = 100 \times \frac{2W_u}{W_u + W_l} \quad \text{식 (7.20)}$$

여기서, W_u : 하중이 재하되지 않은 슬래브에서의 처짐
 W_l : 하중이 재하된 슬래브에서의 처짐

다. 하중을 이용한 방법
하중을 이용하는 방법은 <그림 7.21>과 같이 실내에서 슬래브에 하중을
재하하고 인접 슬래브에서 하중 측정 장치를 이용하여 그 크기를 측정한다.
(식 7.21)와 같이 그 하중들의 비를 하중전달효율로 정의한다.

$$LTE = \frac{P_t}{P_w} \times 100 \quad \text{식 (7.21)}$$

여기서, P_t : 재하하중
 P_w : 전달된 하중



〈그림 7.22〉 실내의 하중전달 장치 성능평가 실험 개념도

〈표 7.30〉 88 고속도로 하중전달효율(LTE)

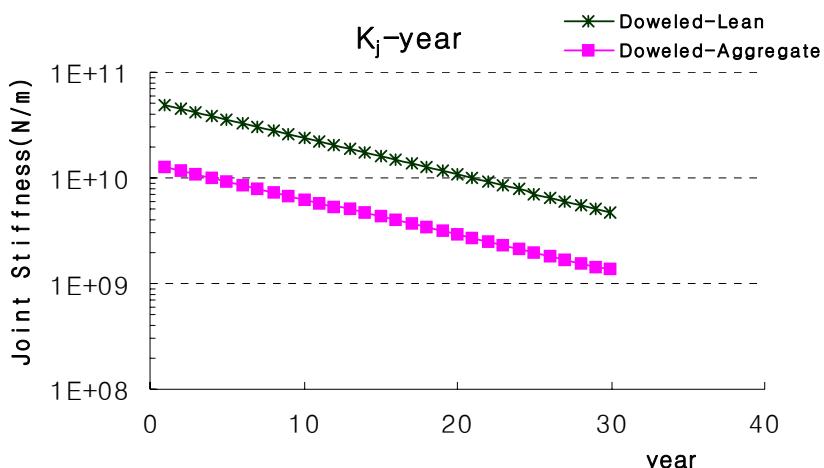
	AASHTO		Teller	
지점 1				
하중(lbs)	평균	표준 편차	평균	표준 편차
11000	81	9	89	6
9000	81	9	89	6
5500	83	9	90	6
지점 2				
11000	81	7	89	8
9000	81	8	89	8
5500	81	10	89	10
지점 3				
11000	66	19	78	22
9000	65	19	77	22
5500	66	20	77	22
지점 4				
11000	72	16	83	18
9000	72	17	82	19
5500	71	18	82	21

〈표 7.30〉은 88고속도로에서 측정한 FWD 자료를 이용하여 AASHTO 방법과 Teller 방법으로 계산한 하중전달효율을 도시한 것이다. 전체적으로

Teller 방법으로 평가한 것이 AASHTO 방법으로 계산한 결과보다 더 큰 것으로 나타났다.

② Joint Stiffness 산정식 개발

줄눈 콘크리트 포장에 있어 줄눈부의 하중전달은 다웰바, 골재맞물림, 하부지반의 강성의 영향을 받는다. 도로포장 구조 설계에서는 하중전달 부분 설계에 줄눈강성(K_j : Joint Stiffness) 및 LTE를 적용하여 그 영향을 고려하고 있다. 국내 연구진은 줄눈부의 강성 및 하중전달률이 시간에 따라 저감할 것으로 생각하였다. 이러한 가정의 검증을 위해 위해 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 이용하여 현장에서 손쉽게 구할 수 있는 하중전달율(LTE)에 대해 하부지반 및 다웰바 설치유무에 따른 국내 고속도로 및 시험도로의 데이터를 수집하였다. 또한 국내 포장조건을 고려한 구조해석자료를 통해 하부지반 조건 및 다웰바 유무에 따른 줄눈부의 줄눈강성(Joint Stiffness)(N/m)를 산정하였다. 그 결과, <그림 7.23>과 같이 공용 연수가 증가할수록 줄눈부의 강성이 감소하는 것으로 나타났다. 이에 근거하여 <표 7.31>와 같이 현장의 하중전달율 데이터 및 다웰바 유무, 하부지반 조건별 영향인자에 대해 온도 및 재령을 고려한 국내 조건에 적합한 최종 줄눈강성 및 하중전달효율을 산정하였다.



<그림 7.23> 공용 연수에 따른 줄눈부 강성 저감도 평가 결과

〈표 7.31〉 최종 Joint Stiffness 산정식

구 분		최종 Joint Stiffness 산정식
D o w	Lean 보조기층	$K_{j_{dowled-Lean}} (N/m) = 33678 \times e^{0.174 \times LTE(\%)_{dowled-Lean}}$ $LTE(\%)_{dowled-Lean} = LTE_0(\%) - 0.54 \times year(\text{재령})$ <p>단, $LTE(\%) = \text{Min}[40\%]$</p> $LTE_0(\%) = 80.8 + 0.826 \times Temp \quad Temp < 20^\circ\text{C} \text{ 일 때}$ <p>여기에서, $LTE_0(\%) = \text{초기하중전달율}$</p> $Temp = \text{슬래브온도}$
e l e d	쇄석 보조기층	$K_{j_{dowled-Agg}} (N/m) = 22820 \times e^{0.1427 \times LTE(\%)_{dowled-Agg}}$ $LTE(\%)_{dowled-Agg} = LTE_0(\%) - 0.54 \times year(\text{재령})$ <p>단, $LTE(\%) = \text{Min}[20\%]$</p> $LTE_0(\%) = 65.8 + 1.53 \times Temp \quad Temp < 20^\circ\text{C} \text{ 일 때}$ $LTE_0(\%) = 96.4(\%) \quad Temp \geq 20^\circ\text{C} \text{ 일 때}$ <p>여기에서, $LTE_0(\%) = \text{초기하중전달율}$</p> $Temp = \text{슬래브온도}$
U n d o w	Lean 보조기층	$K_{j_{Undowled-Lean}} (N/m) = 10.34 + 2.34 \times Temp(\text{슬래브온도})$ <p>단, $LTE(\%) = \text{Min}[40\%]$</p>
e l e d	쇄석 보조기층	$K_{j_{Undowled-Agg}} (N/m) = 19.54 + 1.94 \times Temp(\text{슬래브온도})$ <p>단, $LTE(\%) = \text{Min}[20\%]$</p>



8

포장체 구조해석

8. 포장체 구조해석

포장의 구조해석은 다양한 설계 인자들을 입력 변수로 하여 포장체의 역학적인 거동을 추정하는 역할을 한다. 즉, <그림 8.1>에서와 같이 구조해석 모형은 포장체에 영향을 주는 재료 물성, 환경 하중, 차량 하중, 기하구조 등과 같은 입력 변수들을 이용하여 주어진 환경 하에서 포장체가 어떻게 반응하는지를 알아볼 수 있는 도구이다. 해석 결과를 바탕으로 공용성 분석을 위한 기초 자료를 생성하여 최적 포장 단면을 설계할 수 있도록 한다. 일반적으로 구조해석을 통해 아스팔트 포장은 피로식에 사용되는 하부 인장 변형률, 수직 변형률 및 하부 인장 응력을, 콘크리트 포장은 슬래브 상하부의 인장 응력을 산출한다. 해석 방법에는 다양한 것이 있는데 이 장에서는 교통하중 해석에 사용되는 다층 탄성론, 판이론, 온도 하중 해석 및 도로포장 구조 설계에서의 연구 결과 등을 다룬다.



<그림 8.1> 구조해석을 이용한 포장체의 거동 분석의 역할

8.1 도로포장 구조 설계의 구조해석 모형

8.1.1 아스팔트 포장

도로포장 구조 설계에서는 아스팔트 포장 설계를 위해 앞서 살펴본 다층 탄성 이론에 근거한 프로그램을 자체 개발하였다. 다층탄성 프로그램을 이용 하며, 설계 프로그램내에서 교통하중에 따라 자동수행된다. 구조해석의 입력 값에는 포장을 구성하는 층의 두께와 물성치, 교통하중(차간거리와 타이어 압력), 프로그램내 자동설정 해석위치 등이 있다. 프로그램내 자동설정된 포장층내의 해석위치들에서 응력과 변형률이 산정된 후 최대응력과 최대변형율이 나타나는 한계점을 찾게 된다. 한계점에서의 응력과 변형율은 공용성 모형의 입력변수로 사용된다. 한계점에서의 포장반응의 예는 다음과 같다.

- 1) 아스팔트 혼합물층에서의 수평인장변형율 (아스팔트 혼합물의 피로균열)
- 2) 아스팔트 혼합물층에서의 수직압축변형율 (아스팔트 혼합물의 영구변형)

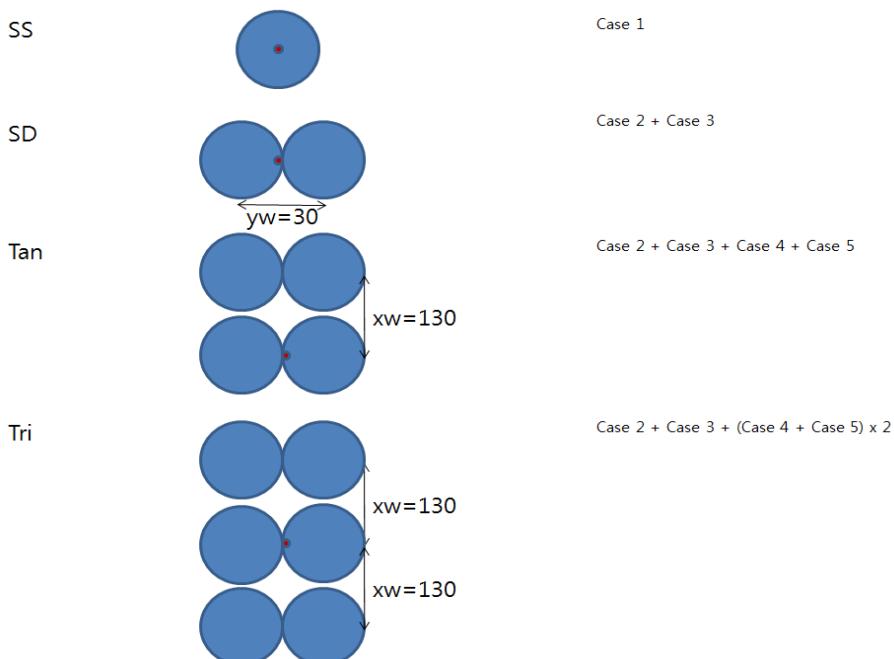
(1) 다층탄성 프로그램

아스팔트 포장에서의 탄성변형률은 균열 및 영구변형량을 결정하기 위한 입력변수로 공용성 해석에 직접적 또한 반복적으로 사용되기 때문에 매우 중요한 인자이다. 아스팔트 도로포장 구조 설계 프로그램에서는 기존의 구조해석 프로그램과 동일한 기본 이론을 사용하는 프로그램을 C#으로 개발하되, 해석조건을 설계프로그램에 맞도록 단순화하고 기존의 중첩논리(Superposition principle)를 확장하여 정밀한 결과를 얻는 동시에 해석시간을 단축할 수 있도록 하였다.

가. 축 하중 조건

다층탄성 해석 프로그램(KICTMLE)은 이전에 개발된 다층탄성 구조해석 프로그램과 유사하게 다층탄성이론(Multi-layered elasticity)을 적용하며, 단축단륜(SS), 단축복륜(SD), 복축(Tan), 삼축(Tri)의 네 가지 해석조건을 기

본적으로 고려한다. 접지면의 하중반경은 15cm로서 원형하중을 기본하중 조건으로 하였으며, 복륜조건에서 각 차륜사이의 거리는 차륜의 중심으로부터 30cm, 다축조건에서의 축간의 거리는 130cm이다. 아래 <그림 8.2>은 이상에서 설명된 축조건을 도식화한 것이며, <그림 8.2>의 오른쪽에 나타난 Case #는 중첩된 하중조건을 나타내고 있다. 이를 하중조건(Case)은 단축 단륜의 경우를 나타낸 <그림 8.3>에서 확인할 수 있다. 예를 들어 <그림 8.3>에서의 단축단륜(SS)에서 중심에서의 응력 및 변형률을 계산하는 조건은 <그림 8.3>에서의 Case 1과 같으며, <그림 8.2>에서의 단축복륜(SD) 조건은 <그림 8.3>에서의 Case 2의 결과와 Case 3의 결과를 중첩한 결과와 같다. 또한 <그림 8.2>에서의 복축(Tan) 및 삼축(Tan) 조건은 <그림 8.3>에서의 Case 2, Case 3, Case 4, Case 5를 적절히 중첩한 결과와 같다.

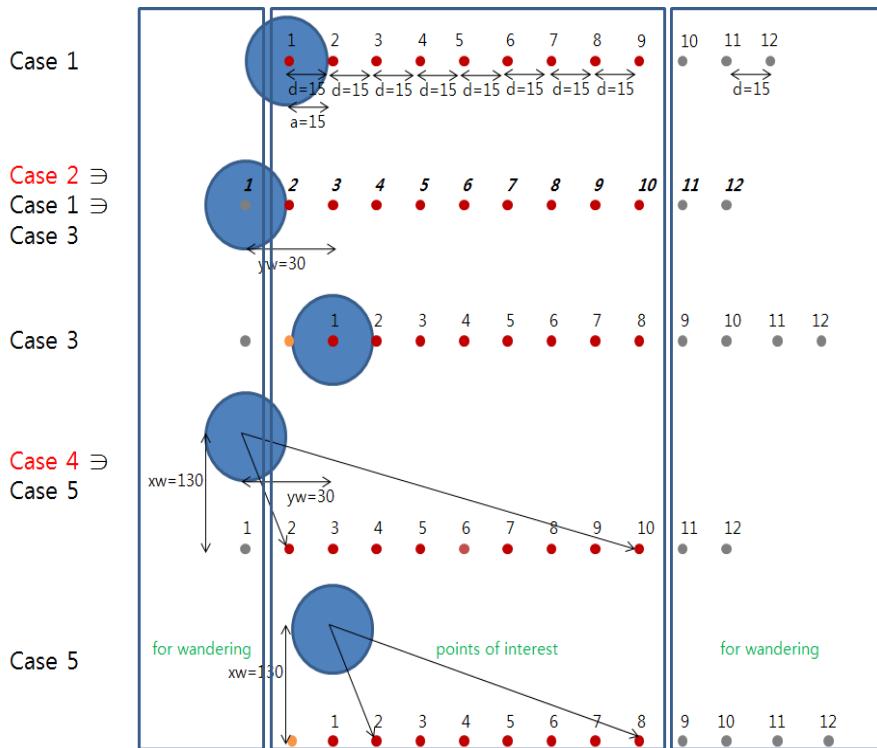


<그림 8.2> KICTMLE에서 고려하는 하중조건과 중첩방법

나. 수직방향 충분할 및 수평방향 측점

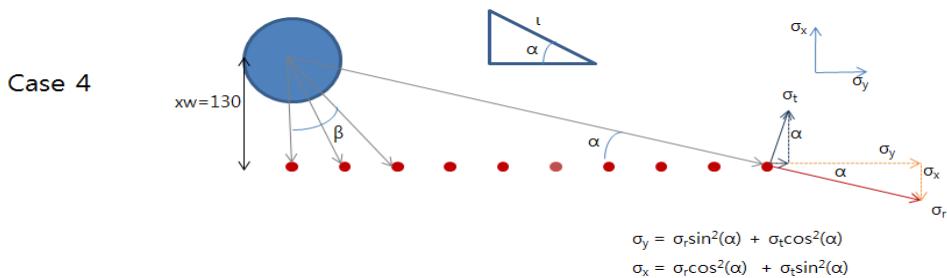
KICTMLE은 표층+중간층을 4개의 층으로 단순화하여 구분하였으며, 기

층, 보조기층을 각각 2개의 층으로 분할하여, 깊이방향으로 9개의 지점과 수평방향으로 9개 지점($15\text{cm} \times 9 = 135\text{cm}$)에 대한 수평방향 및 수직방향 변형률 및 응력을 계산할 수 있다. 다음 <그림 8.3>은 다양한 하중조건, 즉 단축단륜(SS), 단축복륜(SD), 복축(Tan), 삼축(Tri) 조건과 원더링(Wandering)을 최단시간 내에 해석하기 위하여 사용된 확장된 중첩논리를 설명하고 있다. <그림 8.3>에서 Case 2는 일반적인 단축단륜 하중에 의하여 표층 상부에서 발생되는 응력 및 변형률을 해석하는데 활용된 조건과 관심측점(points of interest)을 나타낸 것으로서, Case 2의 결과는 Case 1과 Case 3에서의 응력 및 변형률을, 또한 Case 4의 결과는 Case 5에서의 응력 및 변형률을 해석하기 위하여 활용된다. <그림 8.3>에 나타난 바와 같이, 각 측점간의 거리는 하중의 반경과 동일한 15cm이며, 총 12개의 지점에서 응력 및 변형률을 평가한다. Case 2에서의 수평방향으로 관심측점(points of interest, 135cm) 내의 총 9개의 지점외의 3개 지점에서의 응력 및 변형률은 하중의 위치가 다른 Case 1과 Case 3이나 복륜조건 및 원더링(Wandering) 조건에서의 응력 및 변형률을 계산하는데 활용된다. 예를 들어, Case 2에서 응력 및 변형률을 해석한 지점 1은 Case 1의 지점 1 및 Case 3의 지점 1과 같은 결과일 것으로 Case 2에서 사용되지 않더라도 해석되는 것이며, 이를 통하여 Case 1과 Case 3에 대한 구조해석을 하지 않을 수 있다.



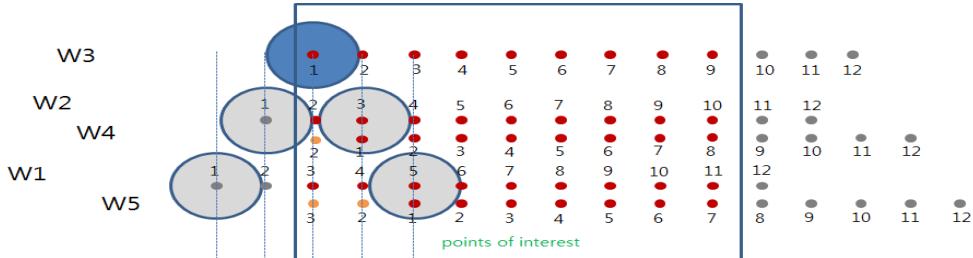
〈그림 8.3〉 단축단륜(SS) 조건에서의 하중조건과 측점의 위치

〈그림 8.3〉에서 Case 4에서의 측점 1 또한 Case 5에서의 측점에서의 응력 및 변형률을 계산하기 위하여 활용되며, 측점 11, 12 또한 복륜 및 원더링 조건을 고려하여 해석할 때 사용된다. 다음 〈그림 8.4〉은 Case 4에서 x, y 방향 응력을 결정하는 방법을 나타내는 것으로서, 하중 중심으로부터 측점 까지의 직선방향이 r 방향, 이에 수직한 방향이 t 방향이 되므로 x, y 방향 응력 및 변형률을 결정하기 위해서는 응력의 방향과 응력의 작용면을 나타내는 α 를 이용한 변환이 필요하다.



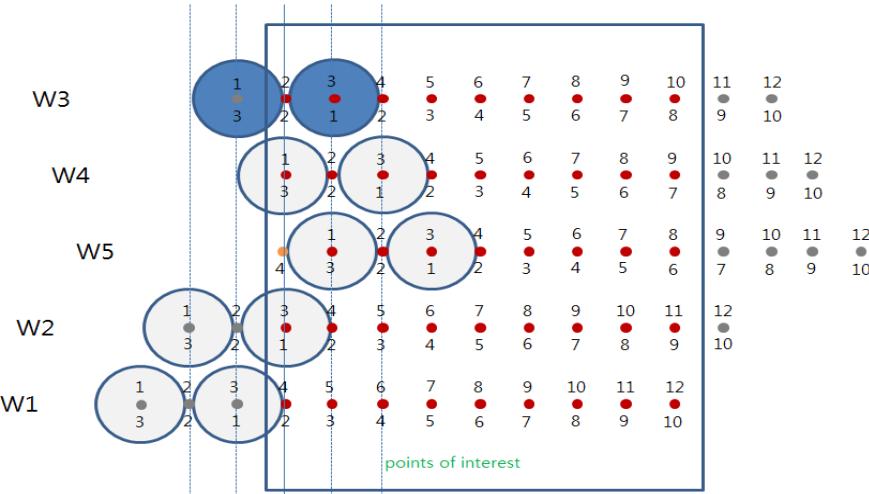
〈그림 8.4〉 Case 4에서의 x, y 방향 응력 결정방법

〈그림 8.5〉는 원더링에 따른 대상 측점의 변화를 나타낸 것으로 W3은 단축단륜 하중에서 원더링이 고려되지 않을 경우, 즉 〈그림 8.2〉에서의 Case 1을 나타내고 있다. W2, W4, W1, W5는 원더링에 따른 대상 측점의 변화를 나타내고 있는데, W2, W4, W1, W5의 모든 경우가 Case 2 조건에 포함되는 〈그림 8.5〉의 측점 번호를 통하여 알 수 있다.



〈그림 8.5〉 단축단륜 조건에서의 원더링에 따른 대상 측점의 변화

다음 〈그림 8.6〉은 단축복륜 조건에서 관심측점(points of interest)에 대한 응력 및 변형률을 결정하는 방법을 나타내고 있다. 위의 단축단륜 조건과 같이 W3은 원더링을 고려하지 않은 경우이고, 그 이외의 조건은 원더링이 발생했을 경우의 하중 및 측점의 관계를 나타낸 것이다. 예를 들어 W2의 경우, 단축복륜에 의하여 발생되는 응력 및 변형률은 측점에 따라 변화할 것이나, 고려되는 측점은 아래 사각형 내의 점들 뿐 이므로 위의 〈그림 8.3〉의 Case 2에서 계산한 응력 및 변형률을 이용하여 결정할 수 있는 것을 알 수 있다.



〈그림 8.6〉 단축복륜 조건에서의 원더링에 따른 대상 측점의 변화

〈그림 8.6〉의 단축복륜 조건과 중첩이론(Superposition principle)을 이용하면 복축 및 삼축에 의하여 발생되는 응력 및 변형률을 결정하는데 사용될 수 있다. 또한 다층탄성 구조해석 프로그램에서 접지면적이 달라지지 않는 한 단위하중이 아닌 하중에 의한 포장 구조내 응력 및 변형률을 선형적으로 증가하게 되므로 별도의 계산을 하지 않아도 된다.

한편, 조건의 단순화를 위하여 측점의 위치를 15cm, 30cm 두 개의 값으로 결정하였으므로, 신뢰성 모형의 0, 20는 이들 값을 이용하면 다소의 오차가 발생할 수 있으나, 전체적인 공용성 해석 결과에 큰 영향을 미치지는 않으므로 이들을 그대로 이용하였다.

다. 손상해석좌표

차량의 축은 단축단륜, 단축복륜, 복축 또는 삼축으로 구성되어 있으며, 복축 이상의 경우 축과 축사이의 간격이 좁기 때문에 각 축 하중간의 포장체에 미치는 응력의 중첩이 발생되어 별개의 축으로 해석할 수 없다. 또한 축 하중의 종류와 포장체의 두께 및 물성에 따라 최대 인장 변형률과 압축변형률이 발생하는 위치가 달라 최대 손상이 유발되는 지점이 일정하지 않다. 그러나 일정하지 않은 지점에 대하여 원더링을 고려한 구조해석을 진행할 경

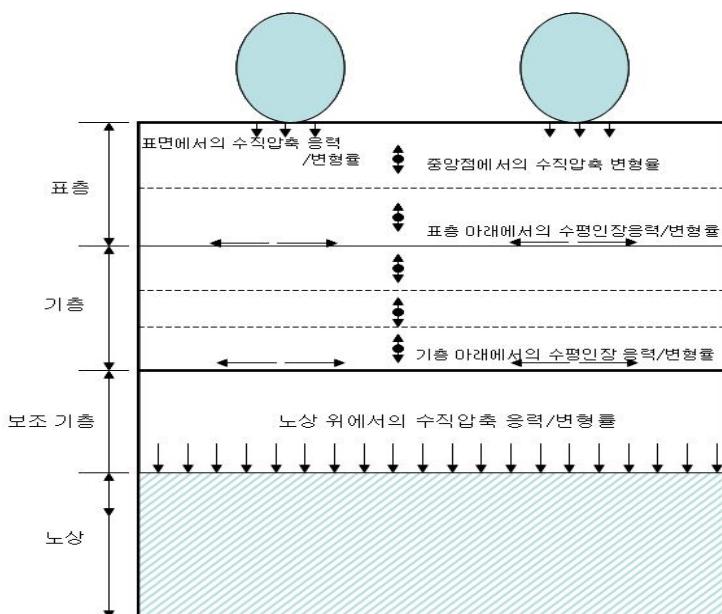
우, 해석시간이 기하급수적으로 증가하여 실용적이지 못한 문제가 있다. 따라서 위의 <그림 8.5>와 <그림 8.6>에 나타난 바와 같이, 손상해석좌표를 단순화하여 해석을 진행하였으며, 이를 통하여 해석시간을 단축시킬 수 있다.

(2) 구조해석결과

다층탄성 프로그램으로부터 구한 포장구조해석 결과는 공용성 모형의 입력자료로 사용된다. 아스팔트 포장의 구조적인 파손은 상향균열, 하향균열, 영구변형 등이 있으며, 이를 예측하기 위해 구조해석 결과값을 사용한다.

가. 상향균열 해석

다층탄성 프로그램을 통해 <그림 8.7>과 같이 아스팔트 표층 하단과 아스팔트 기층 하단의 인장변형율을 산정한다. 가장 큰 인장변형율을 보이는 한계점(critical location)에서의 결과값을 상향균열 예측모형에 사용하게 된다. 일반적으로 단륜일 경우 타이어 중앙부를 한계점으로 설정하고 반응값을 산출하며, 다축 다륜을 이용할 경우 <그림 8.7>과 같이 여러 지점의 인장변형율을 비교하여 가장 큰 값을 해석에 계산한다.



<그림 8.7> 아스팔트 포장의 구조해석결과

나. 하향균열 해석

다층탄성 프로그램을 통해 <그림 8.7>과 같이 아스팔트 표층 상단의 인장변형율을 산정한다. 가장 큰 인장변형율을 보이는 한계점(Critical Location)에서의 결과값을 하향균열에 예측모형에 사용하게 된다. 상향균열과는 반대로 타이어 중앙부에서 가장자리로 이동할수록 표층 상단에서의 인장변형율은 증가한다. 하향균열 해석에서도 <그림 8.7>와 같이 아스팔트 표층 상단부의 여러 지점의 인장변형율을 비교하여 가장 큰 값을 해석에 사용한다.

다. 영구변형 해석

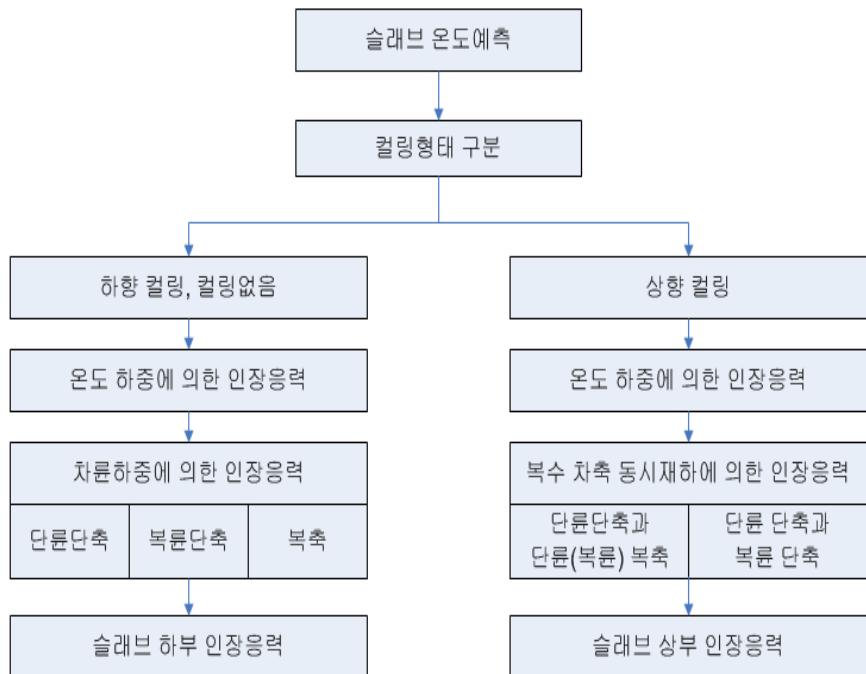
다층탄성 구조해석을 통해 <그림 8.7>과 같이 아스팔트 표층과 아스팔트 기층의 세부 분할층 중간지점에서 연직변형율을 산정한다. 아스팔트 표층과 기층의 세부 분할층은 층별로 나누어 해석을 실시한다. 일반적으로 단륜인 경우 타이어 중앙지점이 한계점(critical location)으로서 가장 큰 연직변형율을 나타내나, 다축 다륜인 경우 <그림 8.4>과 같이 여러 지점(총 30)에서의 연직변형율을 비교하여 가장 큰 변형율을 해석에 사용한다.

8.1.2 콘크리트 포장

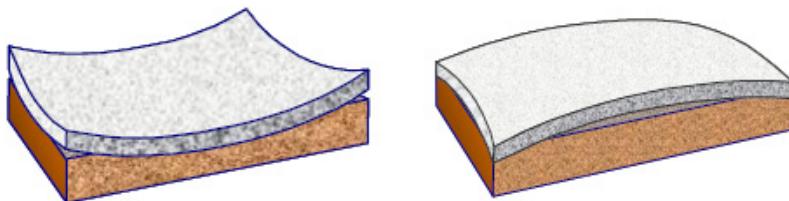
콘크리트 포장의 설계는 주어진 형상과 물성을 갖는 포장체에 교통하중과 환경하중이 작용하여 발생하는 응력을 이용하여 공용성을 예측하는 과정을 거치게 된다. 우선, 예측된 콘크리트 슬래브의 깊이별 온도를 이용하여 상부와 하부의 온도차이를 계산한 후 컬링의 형태를 판단하여 최대 인장응력이 발생하는 위치를 결정한다. 하향컬링이 발생하거나 컬링이 전혀 발생하지 않는 경우에는 종방향 줄눈부의 중앙에 작용하는 차륜하중으로 인하여 슬래브 하부에 최대 인장응력이 발생한다. 상향컬링이 발생하면 횡방향 줄눈 양 끝단에 재하된 축하중으로 인하여 슬래브 상부에 최대 인장응력이 발생한다. 이와 같이 온도하중과 차륜하중에 의하여 슬래브의 상부와 하부에 발생한 최대 인장응력을 각각 계산하여 피로균열을 예측할 수 있도록 한다. 이상에서 설명한 콘크리트포장의 구조해석 개념도는 <그림 8.8>와 같다. 아래에서는

구조해석을 통하여 슬래브의 최대 인장응력이 결정되기까지의 각 단계를 알아보기 쉽게 나열하였다.

- 단계 1. 콘크리트 포장의 형식 선택
- 단계 2. 콘크리트 포장 각 층의 두께 설정
- 단계 3. 각 층의 재료물성 입력
- 단계 4. 슬래브 온도 예측 및 커링형태 결정
- 단계 5. 온도하중에 의한 인장응력 산출
- 단계 6. 교통하중의 입력
- 단계 7. 커링형태와 교통하중에 의한 인장응력 산출
- 단계 8. 슬래브의 최대 인장응력 결정



〈그림 8.8〉 콘크리트포장 구조해석 개념도



(a) 상향컬링

(b) 하향컬링

〈그림 8.9〉 슬래브 상하부 간의 온도 차이에 의한 커링형태

(1) 유한요소해석

콘크리트포장의 유한요소해석은 포장체가 수많은 요소로 구성되었다고 가정한 후 절점을 이용하여 요소들을 상호 연결하고 이들 절점이 갖고 있는 물리량에 대한 연립방정식을 작성하여 중첩함으로써 콘크리트 포장 전체에 대한 해를 찾는 기법을 일컫는다. 환경하중이나 교통하중에 의하여 발생한 콘크리트 포장 슬래브의 응력을 계산하기 위해서, 주어진 조건 하의 포장체를 스프링 위에 얹혀 있는 3차원의 평판/쉘로 가정하여 모형을 구성하였다. 이 모형은 다웰바, 타이바 및 길어깨 등의 요소를 포함하는 3개의 슬래브로 구성되었고, 외부로부터 가해지는 환경하중, 교통하중에 대한 응답으로서 변형과 응력의 결과를 나타낸다. 이중 슬래브에 발생하는 인장응력이 콘크리트의 인장강도보다 커질 경우 균열을 발생시킨다. 인장응력의 크기에 영향을 미치는 각종 변수의 민감도분석과 회귀분석을 이용한 인장응력 예측 회귀식을 개발하여 사용하게 된다.

(2) 커링형태와 주기의 결정

앞서 설명한 바와 같이 커링이란 평면으로 건설되었던 슬래브가 대기온도 및 습도의 변화에 기인하여 깊이별로 온도와 습도가 상대적으로 높을 경우 팽창하고 낮을 경우 수축하는 콘크리트의 성질로 인하여 비틀리는 현상이다. 즉, 〈그림 8.9〉의 (a)와 같이 슬래브의 상부의 온도나 습도가 하부보다 낮아 상대적으로 상부는 수축, 하부는 팽창할 때 슬래브의 우각부가 중앙부에 비하여 상대적으로 올라가는 같은 상향커링이 발생한다. 이와 반대의 경

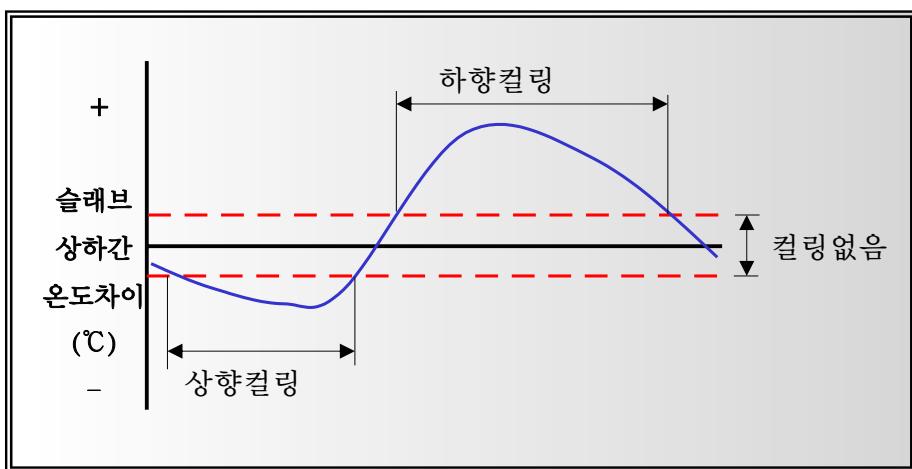
우에는 <그림 8.9>의 (b)와 같은 하향컬링이 발생하게 된다. 이 때 발생하는 응력을 커링응력이라고 부른다.

가. 슬래브 두께에 따른 커링형태

슬래브의 깊이별 온도와 상하부 간의 온도 차이를 예측하기 위한 모형이 앞장에서 설명되었으며, 이를 이용하여 슬래브 두께와 각 월별로 1시간 단위로 슬래브 상하부 간의 온도차이를 예측한 후 슬래브의 커링형태를 결정할 수 있다. 다른 유형의 커링을 유발하는 슬래브 상하부 간 온도차이의 범위를 수차례에 걸친 구조해석 결과에 근거하여 슬래브의 두께에 따라 <표 8.1>와 같이 제시하였다. 여기서, 양의 부호는 슬래브 상부의 온도가 하부보다 높다는 의미이며 음의 부호는 이와 반대이다. <그림 8.10>는 <표 8.1>를 적용하였을 때 24시간동안 임의의 슬래브에 발생한 온도 차이에 의한 커링형태이다.

<표 8.1> 슬래브 두께에 따른 커링 온도의 범위

슬래브 두께	25cm	27cm	30cm	33cm	35cm
상향컬링	$T < -3^{\circ}\text{C}$	$T < -2.5^{\circ}\text{C}$	$T < -2^{\circ}\text{C}$	$T < -1.5^{\circ}\text{C}$	$T < -1^{\circ}\text{C}$
컬링없음	$3^{\circ}\text{C} > T > -3^{\circ}\text{C}$	$2.5^{\circ}\text{C} > T > -2.5^{\circ}\text{C}$	$2^{\circ}\text{C} > T > -2^{\circ}\text{C}$	$1.5^{\circ}\text{C} > T > -1.5^{\circ}\text{C}$	$1^{\circ}\text{C} > T > -1^{\circ}\text{C}$
하향컬링	$T > 3^{\circ}\text{C}$	$T > 2.5^{\circ}\text{C}$	$T > 2^{\circ}\text{C}$	$T > 1.5^{\circ}\text{C}$	$T > 1^{\circ}\text{C}$



<그림 8.10> 24시간 동안의 커링 사이클

나. 컬링의 주기

<그림 8.11>와 같은 주기를 그리며 매일 발생하는 슬래브의 상향컬링, 하향컬링, 컬링없음의 시작시간과 종료시간은 계절 및 두께에 따라 달라지며, 다음 <표 8.2>은 프로그램 상에서 계절 및 두께의 영향으로 인하여 월별로 각각의 컬링 시작 및 종료시간이 결정된 한 예이다.

<표 8.2> 월별 컬링의 시작 및 종료시간의 예

구분	상향컬링		컬링없음		하향컬링		컬링없음	
	시작 시간	종료 시간						
1월	1	8	8	9	9	20	20	1
2월	0	0	0	10	10	22	22	0
3월	23	9	9	9	9	20	20	23
4월	23	9	9	19	19	7	7	23
5월	23	9	9	19	19	7	7	23
6월	0	0	0	10	10	21	21	0
7월	0	0	0	10	10	21	21	0
8월	0	0	0	10	10	21	21	0
9월	0	0	0	10	10	20	20	0
10월	0	0	0	10	10	20	20	0
11월	0	0	0	10	10	20	20	0
12월	0	0	0	10	10	22	22	0

(3) 구조해석 결과

온도하중이나 차륜하중에 의하여 발생한 콘크리트포장 슬래브의 응력을 계산하기 위해서는 언급한 유한요소방법을 이용하여 주어진 조건 하에 있는 포장체를 해석하여야 하나 이러한 일련의 분석에 상당히 많은 시간이 소모된다. 따라서 최적의 설계를 위하여 여러 번의 반복작업을 수행하게 될 경우 소요 시간이 오래 걸리며 많은 인력이 필요하다. 이 문제를 해결하기 위하여 도로포장 구조 설계의 콘크리트 포장 설계에서는 설계에서 고려할 수 있는 다양한 조건에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과로부터 회귀식을 제안하여 슬래브의 상부와 하부에 발생되는 최대응력을 구할 수 있도록 하였다.

비인장 스프링 기초(Tensionless Spring)를 사용한 모델에서 차륜하중과

온도하중이 슬래브에 동시에 재하된 경우 발생한 응력과 일반 스프링 기초를 사용한 모델에서 각 하중에 의하여 발생한 응력을 합한 값에 큰 차이가 없었다. 따라서 구조해석 모형에 일반 스프링 기초를 사용하고 차륜하중에 의한 응력과 슬래브 상하부 온도차이에 의하여 발생한 응력을 각각 계산한 후 <식 8.1>와 같이 합하여도 두 종류의 하중이 슬래브에 동시에 재하되어 발생한 응력으로 간주할 수 있다.

$$\sigma_{total} = \sigma_{load} + \sigma_{env}$$

$$= \sigma_{load} + \sigma_{(temp)} + \sigma_{\Delta temp_{shrinkage}} \quad <\text{식 } 8.1>$$

여기서, σ_{total} : 합성응력

σ_{load} : 차륜하중으로 인한 응력

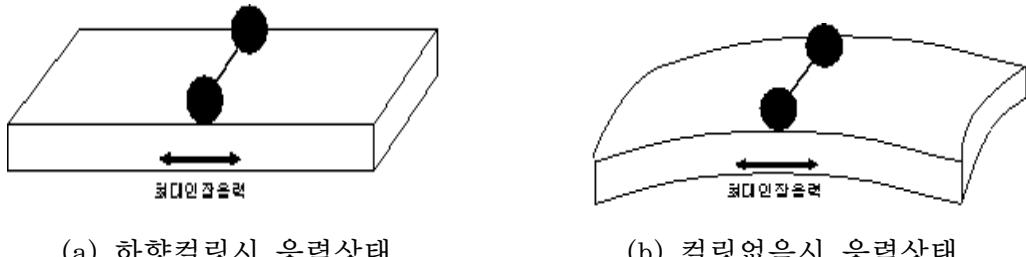
σ_{env} : 환경하중으로 인한 응력

σ_{temp} : 슬래브 상하부 간의 온도차이로 인한 응력

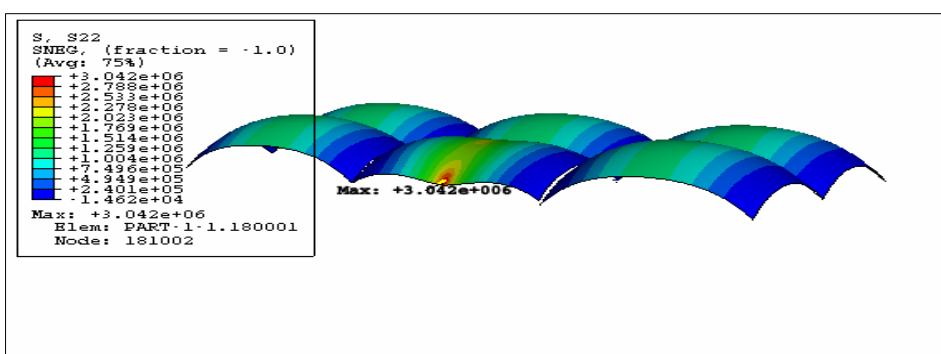
$\sigma_{\Delta temp_{shrinkage}}$: 건조수축으로 인한 응력

가. 상향균열 해석

슬래브 상부의 온도가 하부의 온도보다 높아 하향컬링이 발생하거나 상하부 간의 온도차이가 거의 없어 컬링이 발생하지 않을 때, 차륜하중이 길어깨에 접한 슬래브의 종방향 줄눈부 중앙에 재하되면 <그림 8.11>와 같이 하중이 재하된 위치의 슬래브 하부에 최대 인장응력이 유도된다. 또한 이 최대 인장응력이 콘크리트의 인장강도를 초과할 경우 슬래브의 상부로 진전하는 상향균열이 그 위치에서 발생하게 된다. 상향균열 발생응력은 <식 8.1>와 같이 차륜하중으로 인하여 발생한 인장응력과 슬래브 상하부 간의 온도차이로 인하여 발생한 인장응력을 각각 계산한 후 합하여 해석한다. 슬래브 상하부 간의 온도차이에 의하여 하향컬링이 발생한 슬래브의 세로방향 모서리에 차륜하중이 재하되었을 때 발생한 응력선도는 <그림 8.12>과 같다.



〈그림 8.11〉 상향균열을 유발하는 커링 및 차륜하중 재하상태



〈그림 8.12〉 상향균열을 유발하는 온도 및 차륜하중에 기인한 응력선도

(1) 차륜하중에 의한 슬래브 하부의 최대 인장응력

차륜하중이 슬래브 모서리의 중앙부에 재하되면 하중 재하 위치의 하부에는 최대 인장응력, 상부에는 최대 압축응력이 발생하게 된다. 이 때 슬래브 하부에 발생한 최대 인장응력의 회귀식을 〈식 8.2〉과 같이 제안하여 상향균열 해석에 사용한다. 회귀식에 사용된 변수는 차륜하중에 의하여 발생한 최대 인장응력의 변화에 민감도가 큰 기초의 지지력, 재하되는 차량의 축하중, 콘크리트의 탄성계수, 슬래브의 두께이며 재하된 축의 종류에 따라 회귀식 상수가 〈표 8.3〉와 같이 결정되었다.

$$\sigma = b_1 \cdot k^{b_2} \cdot P^{b_3} \cdot E^{b_4} \cdot T^{b_5} \quad \langle \text{식 8.2} \rangle$$

여기서, k : 기초의 복합 지지력계수(MPa/m)

P : 축하중(kN) E : 콘크리트 탄성계수(N/m²) T : 슬래브 두께 (m) $b_1 \sim b_5$: 회귀식 상수

〈표 8.3〉 축 종류별 슬래브 하부 최대 인장응력 회귀식 상수

구분	상수값		
	단륜단축	복륜단축	복축
b_1	99.236357	54.341035	10.981769
b_2	-0.158607	-0.187159	-0.247176
b_3	0.998823	0.999635	1.000059
b_4	0.159392	0.187525	0.241563
b_5	-1.603563	-1.497026	-1.308737

(2) 온도하중에 의한 슬래브의 인장응력 해석

슬래브 상부의 온도가 하부보다 높을 때, 상부가 하부보다 상대적으로 팽창하면서 하향컬링이 발생하게 된다. 슬래브의 자중 및 슬래브와 기층 사이 마찰력으로 인한 구속때문에 슬래브의 하부에는 자유수축에 반하는 방향으로 인장응력이 발생하고 상부에는 자유팽창에 반하는 방향으로 압축응력이 발생한다. 이와 같이 슬래브 내부의 온도차이로 인하여 하부에 발생한 최대 인장응력의 회귀식을 〈식 8.3〉과 같이 제안하여 상향균열 해석에 사용한다. 회귀식에 사용된 변수는 온도하중에 의하여 발생한 최대 인장응력의 변화에 민감도가 큰 콘크리트의 열팽창계수, 슬래브 내 온도구배, 기초의 복합지지력, 슬래브의 탄성계수, 두께 및 길이이며 회귀식에 사용된 상수는 〈표 8.4〉와 같이 결정되었다.

$$\sigma = tb_1 \cdot \alpha \cdot g \cdot k^{tb2} \cdot E^{tb3} \cdot T^{tb4} \cdot L^{tb5} \quad \langle \text{식 } 8.3 \rangle$$

여기서, α : 콘크리트 열팽창계수(°C) g : 슬래브 온도구배(°C/cm)

k : 기초의 복합 지지력계수(Mpa/m)

E : 콘크리트 탄성계수(N/m²)

T : 슬래브 두께(m)

L : 슬래브 길이(m)

$tb_1 \sim tb_5$: 회귀식 상수

〈표 8.4〉 온도하중에 의한 슬래브 하부 최대 인장응력 회귀식 상수

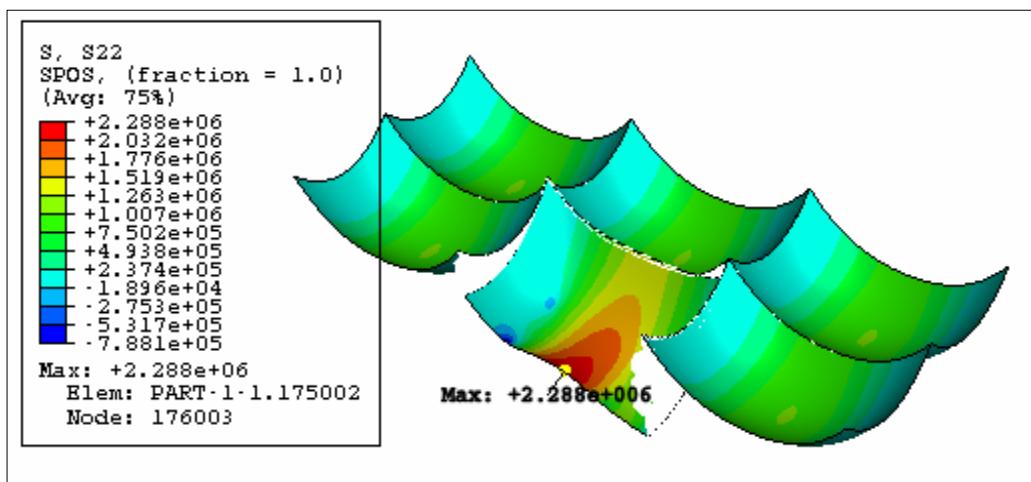
구분	상수값
tb_1	138.676
tb_2	0.171
tb_3	0.846
tb_4	0.533
tb_5	0.654

나. 하향균열 해석

슬래브의 하부의 온도가 상부의 온도보다 높을 경우 슬래브의 우각부가 중앙부에 비해 상승하는 상향컬링이 발생한다. 슬래브의 자중과 슬래브 하부에서의 마찰력으로 인해 거동이 구속되어 슬래브의 상부에는 인장응력, 하부에는 압축응력이 발생하게 된다. 이때 특정한 축간거리를 가진 차륜하중이 길어깨에 접한 슬래브의 양단 우각부 부근에 재하되면 〈그림 8.13〉과 같이 슬래브 상부의 인장응력이 더 커지게 되고 콘크리트의 인장강도를 초과하게 될 경우 슬래브의 하부로 진전하는 하향균열이 그 위치에서 발생된다. 슬래브 상하부 간의 온도차이에 의하여 하향컬링이 발생한 슬래브의 세로방향 모서리에 차륜하중이 재하되었을 때 발생한 응력선도는 〈그림 8.13〉과 같다. 하향균열 발생응력 역시 (식 8.20)와 같이 차륜하중으로 인하여 발생 응력과 온도하중으로 인하여 발생한 응력을 각각 계산하여 더하게 된다. 도로포장 구조 설계에서는 선형의 구조해석 모형을 사용하기 때문에 온도하중으로 인하여 슬래브 상부에 발생한 최대 인장응력은 앞절에서 보인 슬래브 하부의 최대 인장응력 계산에 사용된 회귀식을 그대로 사용하여 구하면 된다.



〈그림 8.13〉 하향균열을 유발하는 컬링 및 차륜하중 재하상태



〈그림 8.14〉 하향균열을 유발하는 온도 및 차륜하중에 기인한 응력선도

(1) 단륜 단축과 단륜(복륜) 복축 동시재하에 의한 슬래브 상부 최대 인장응력 길어깨에 인접하여 상향컬링이 발생한 슬래브의 양단 우각부 부근에 단륜의 단축(전축) 하중과 단륜 또는 복륜의 복축(후축) 하중이 동시에 작용하여 발생한 슬래브 상부의 최대 인장응력 회귀식은 〈식 8.4〉와 같다. 회귀식에 사용된 변수는 최대 인장응력의 변화에 민감도가 큰 각 축하중, 기초의 복합지지력, 슬래브의 두께, 콘크리트의 탄성계수, 슬래브 간의 하중전달률, 슬래브의 길이이며 회귀식에 사용된 상수는 〈표 8.5〉과 같이 결정되었다.

$$\sigma = lt_1 \cdot k^{lt_2} \cdot P_1^{lt_3} \cdot P_2^{lt_4} \cdot E^{lt_5} \cdot T^{lt_6} \cdot LTE^{lt_7} \cdot L^{lt_8} \quad \langle \text{식 } 8.4 \rangle$$

여기서, P_1 : 단륜 단축 하중(kN)

P_2 : 단륜 또는 복륜 복축 하중(kN)

k : 기초의 복합지지력계수(Mpa/m)

T : 슬래브 두께 (m)

E : 콘크리트 탄성계수(N/m²)

LTE : 하중 전달률 (%)

L : 슬래브 길이(m)

$lt_1 \sim lt_8$: 회귀식 계수

〈표 8.5〉 단륜 단축과 단륜(복륜) 복축에 의한
슬래브 하부 최대 인장응력 회귀식 상수

구분	상수값
lt_1	10.20939
lt_2	-0.217
lt_3	0.381
lt_4	0.618
lt_5	0.248
lt_6	-1.33
lt_7	-0.073
lt_8	-0.24

(2) 단륜 단축과 복륜 단축 동시재하에 의한 슬래브 상부 최대 인장응력
길어깨에 인접하여 상향컬링이 발생한 슬래브의 양단 우각부 부근에 단
륜의 단축(전축) 하중과 복륜의 단축(후축) 하중이 동시에 재하되어 슬래브
상부에 발생한 최대 인장응력에 대한 회귀식은 〈식 8.5〉과 같다. 회귀식에
사용된 변수는 앞서 보인 단륜의 단축 하중과 단륜(복륜)의 복축 하중의 동
시재하에 의한 응력계산을 위한 회귀식에 사용된 변수와 동일하나 축간거리
가 추가되며 사용된 회귀식 상수는 〈표 8.6〉과 같다.

$$\sigma = ld_1 \cdot k^{ld_2} \cdot P_1^{ld_3} \cdot P_2^{ld_4} \cdot E^{ld_5} \cdot T^{ld_6} \cdot LTE^{ld_7} \cdot L^{ld_8} \cdot AXL^{ld_9} \quad \text{〈식 8.5〉}$$

여기서, P_1 : 단륜 단축 하중(kN)

P_2 : 단륜 복축 하중(kN)

k : 기초의 복합지지력계수(Mpa/m)

T : 슬래브 두께 (m)

E : 콘크리트 탄성계수(N/m²)

LTE : 하중 전달률 (%)

L : 슬래브 길이(m)

AXL : 축간 거리(m)

$ld_1 \sim ld_9$: 회귀식 상수

〈표 8.6〉 단륜 단축과 복륜 단축에 의한
슬래브 하부 최대 인장응력 회귀식 상수

구분	상수값
ld_1	11.83042
ld_2	-0.35
ld_3	0.562
ld_4	0.435
ld_5	0.381
ld_6	-0.933
ld_7	-0.131
ld_8	-0.449
ld_9	-0.618

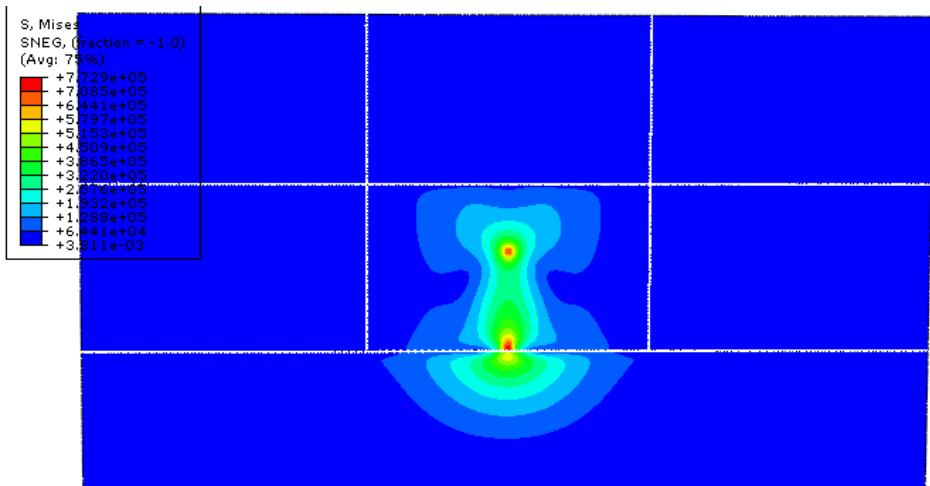
(4) 길어깨 너비 따른 응력 분포

도로포장 구조 설계에서는 길어깨 종류 및 너비에 따른 응력 전달 효과를 설계에 반영하였다. 이는 구조해석 모형을 통해 결정하였다. 일반적으로 국내 길어깨 너비는 보통 3 m 미만이 대부분이다. 그 너비에 따른 하중 전달 효과가 얼마나 되는지를 알아보기 위해 길어깨의 LTE 100 %와 50 %에 대한 구조해석을 수행하였다. 길어깨 너비 변화는 50 cm 간격으로 길어깨가 없을 때부터 300 cm 까지 해석하였으며, 〈그림 8.15〉는 그 일례를 나타낸 것이다.

길어깨가 없을 경우를 슬래브에 재하된 하중에 의해 발생한 응력이 100 %라고 할 경우, 해석 결과를 정리한 것이 〈표 8.7〉이다. 전체적으로 길어깨

가 없는 경우보다 있을 경우가 슬래브의 한계응력 지점에 발생하는 응력 수준이 더 낮았다. LTE 50 % 일 경우는 길어깨 부분으로 하중전달이 제대로 되지 않아 LTE 100 %에 비해 슬래브 내의 한계응력 지점의 응력 비율이 상대적으로 높았다. 길어깨 너비가 50 cm 정도인 경우는 LTE 50 % 일 경우, 약 88% 수준, LTE 100 % 일 경우, 약 69% 수준이었다.

길어깨 너비에 대한 응력 변화율 검토한 결과, LTE 50 % 일 경우는 50 cm 너비보다 3 % 변화, LTE 100 % 일 경우는 약 4% 변화하는 것으로 나타나 그 영향도가 미미하였다.



〈그림 8.15〉 길어깨의 하중 전달율이 50% 일 경우의 응력 분포도

〈표 8.7〉 길어깨 너비에 따른 한계 응력 지점의 응력 분포도

길어깨 너비(cm)	LTE 100%		LTE 50 %	
	응력(Pa)	비율(%)	응력(Pa)	비율(%)
0	1.29E+06	100	1.29E+06	100
50	8.99E+05	69	1.13E+06	88
100	8.51E+05	66	1.11E+06	86
150	8.41E+05	65	1.11E+06	86
200	8.38E+05	65	1.11E+06	86
250	8.37E+05	65	1.11E+06	86
300	8.36E+05	65	1.11E+06	85



9

공용성 모형

9. 공용성 모형

포장의 공용성 모형은 <그림 9.1>과 같이 포장 구조 설계의 주요 인자로 앞에서 살펴본 입력 변수를 선택하고 구조해석 모형을 통해 포장체의 거동특성을 확인하여 포장의 설계 수명을 예측하는 역할을 한다. 지금까지의 공용성 모형들은 자료 분석을 통한 회귀모형들로 경험적인 방법에 의해 만들어진 것들이 대부분이다. 그러나 최근의 추세는 포장 구조체에 대한 역학적 해석 결과와 현장의 경험적 관찰 자료 및 실험실의 자료를 이용하여 역학적-경험적 모형을 만들어 내는 것이 일반적이다. 도로포장 구조 설계에서도 이와 유사한 방법으로 공용성 모형을 개발하고 있다.

실제 포장에서 발생하는 피로균열, 영구변형, 스플링 등과 같은 파손은 시공 품질관리 미비, 재료상의 문제, 유지관리 체계의 미비 등으로 인해 일어난다. 따라서 다양한 포장 파손에 대하여 인지하고 그 원인을 규명하는 것은 포장의 설계 기준 정립 및 유지보수 차원에서도 중요한 의미를 지닌다.

본 장에서는 포장의 구조 설계 기준이 일반 설계와 어떠한 차이가 있는지에 대하여 살펴보고 포장의 기능적, 구조적 파손을 정의하여 이를 예측하는 국내 모형의 개발 방법에 대하여 살펴보자 한다.



<그림 9.1> 포장의 공용성 모형의 역할

본 도로포장 구조 설계에서는 아스팔트 콘크리트 포장의 경우 피로균열과 영구변형을 주요 공용성 인자로 고려하였으며 이를 바탕으로 평탄성지수를 계산한다. <그림 9.2>과 <그림 9.3>은 아스팔트 콘크리트 포장에서 피로균열과 영구변형을 산정하는 로직을 보여준다. 아스팔트 포장층의 피로파손 로직은 교통량, 환경, 재료의 특성을 반영하여 피로수명에 대한 반복회수의 비(손상도)를 결정하는 과정으로 표현될 수 있다. 피로파손을 결정하는 손상도의 결정은 다음과 같은 순서로 진행된다.

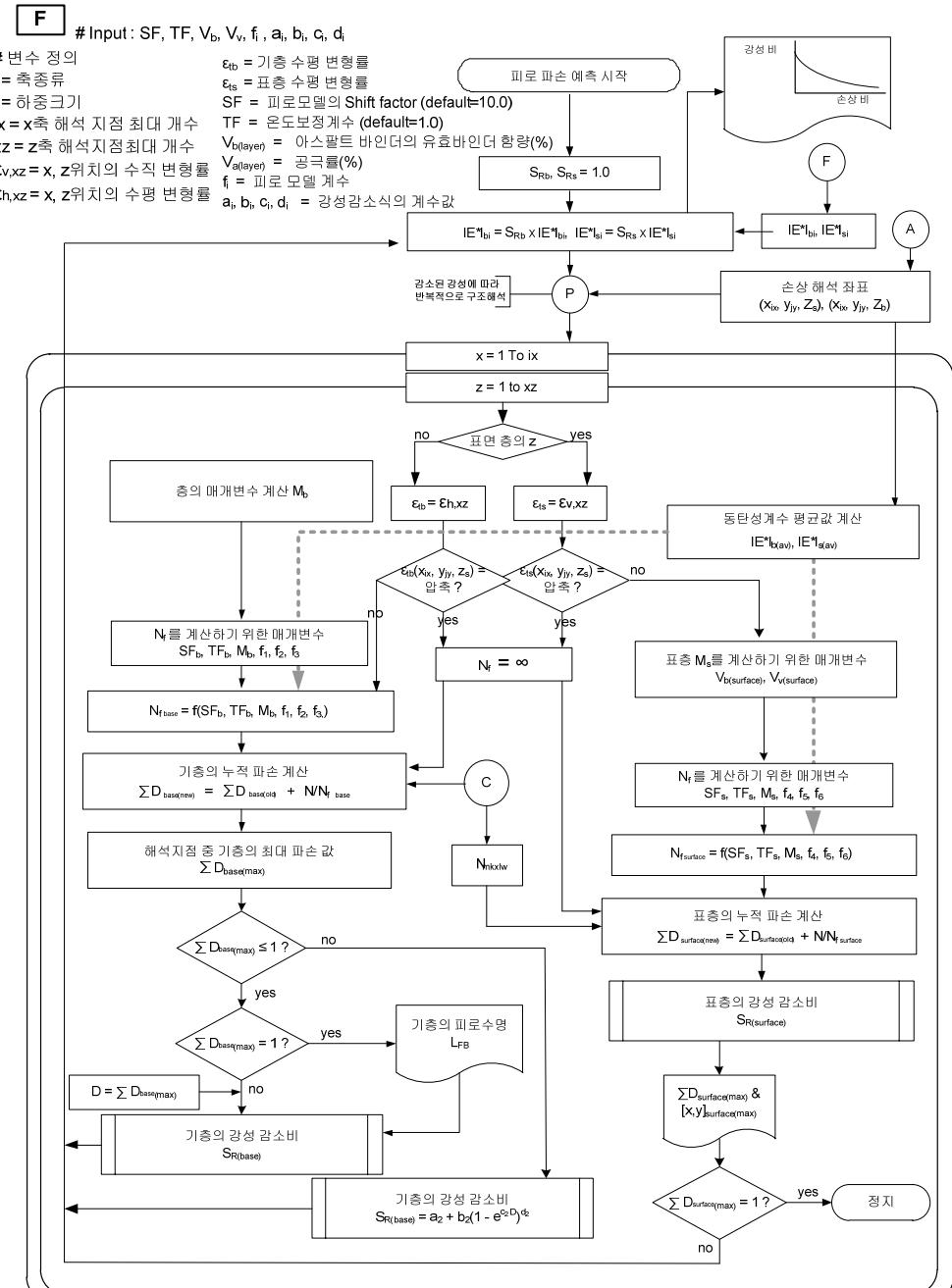
- (1) 주어진 조건에서 깊이별 온도에 따른 동탄성계수를 예측한다.
- (2) 예측된 동탄성계수를 이용하여 주어진 단면과 하중에 대하여 구조해석을 수행하여 표층상부와 중간층하부, 기층하부에서의 탄성 인장변형률을 계산한다.
- (3) 실내실험에서 피로수명식의 계수를 결정한다.
- (4) 설계 프로그램 내 주어진 조건에서의 하중의 반복회수를 결정하고 이를 피로수명으로 나누어 상향균열과 하향균열에 대한 손상도를 결정한다. 이때 결정된 손상도는 다른 하중조건에서 순차적으로 계산되는 손상도에 대하여 누적한다.
- (5) 누적된 상향 및 하향 손상도를 공용성 모형에 입력하여 상향 및 하향균열을 계산한다.
- (6) 상향 및 하향균열을 환산식에 대입하여 총균열을 계산한다.

영구변형 로직은 아스팔트층과 보조기층, 노상에 대하여 각각 결정되며, 이들을 누적하도록 적용되며, 이들을 두께에 따라 누적하여 총 영구변형량을 결정한다.

- (1) 주어진 조건에서 깊이별 온도에 따른 동탄성계수를 예측한다.
- (2) 예측된 동탄성계수를 이용하여 주어진 단면과 하중에 대하여 구조해석을 수행하여 표층, 중간층, 기층, 보조기층, 노상에서의 수직방향 압축변형률을 결정한다.

- (3) 실내실험에서 영구변형 모형의 계수를 결정한다.
- (4) 설계 프로그램 내 주어진 조건에서의 하중의 반복회수를 결정하고 이를 영구모형 식에 입력하여 영구변형률을 계산한다.
- (5) 계산된 영구변형률에 층의 두께를 곱하여 영구변형량을 결정한다.
- (6) 다른 하중조건에서 결정된 영구변형량을 계산하기 위해서는 주어진 하중조건에서의 영구변형량을 역산할 필요가 있다. 따라서 다른 하중조건에서의 영구변형률을 결정하기 전에 주어진 계수들을 이용하여 주어진 영구변형률을 발생시키는 교통량을 역산한다.
- (7) 역산된 값과 탄성변형률을 이용하여, 주어진 하중조건에서의 영구변형률을 결정한다.

위에서 산정된 공용성 모형의 결과를 바탕으로 한 평탄성지수 산정 로직은 <그림 9.4>과 같으며 입력 변수로는 초기 평탄성지수, 공용년수, 영구변형 깊이 및 균열율이 있다.



Output : L_{FB} , $D_{surface(max)}$, $[x, y]_{surface(max)}$

Output : L_{FB} , $D_{\text{surface(max)}}$,

D_{max/min} = 표층의 최대 피로파손

$D_{\text{surface(max)}}$ - 표면의 최대 피로파운
 $[x, y]_{\text{surface(max)}} \equiv$ 표면이 최대피로파온 잡포

[x,y]surface(max) = 표면의 최대피로값

National Center for Health Statistics, CDC, Atlanta, Georgia 30341-3721, USA

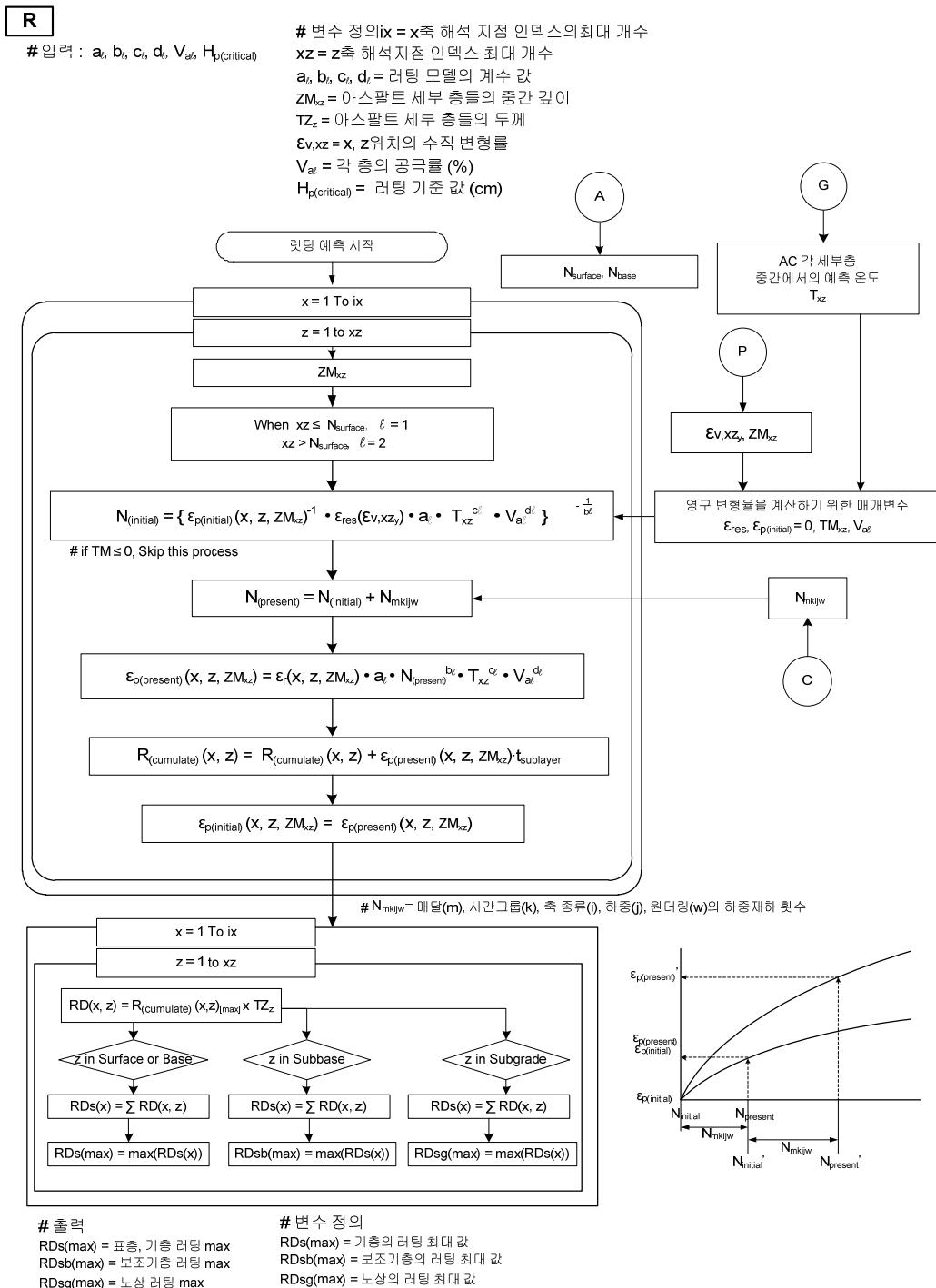
$$N_{mkxlw} = 91$$

$N_f =$ 피로수명

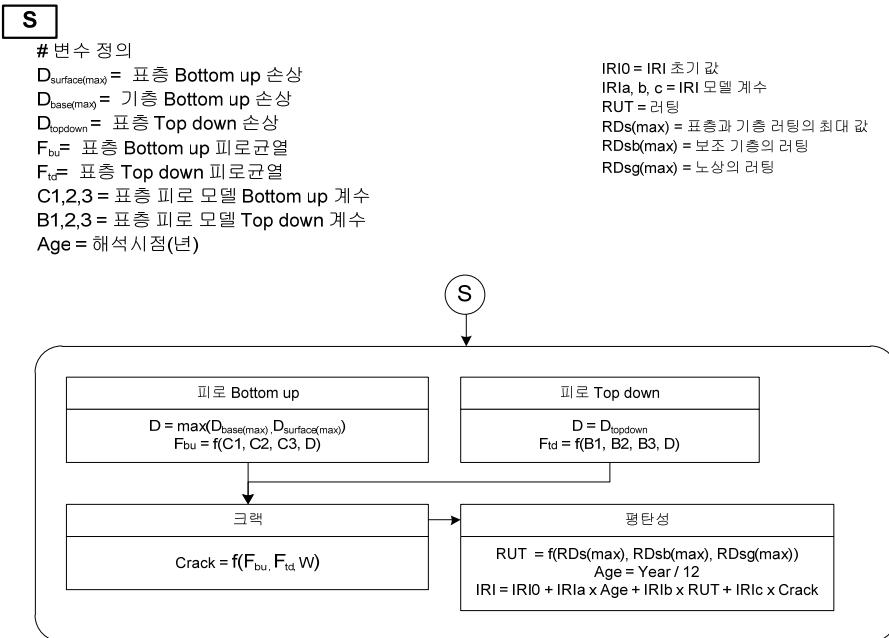
$D_t = 1$ 총의 피로 파손 정도
 $S_{pt} =$ 기초 층의 간선 간스비

S_{Rb} = 표면 층의 강성 함소비

〈그림 9-2〉 야스팔트 콘크리트 포장층의 피로균열 사정 위치



〈그림 9.3〉 아스팔트 콘크리트 포장층의 영구변형 산정 로직

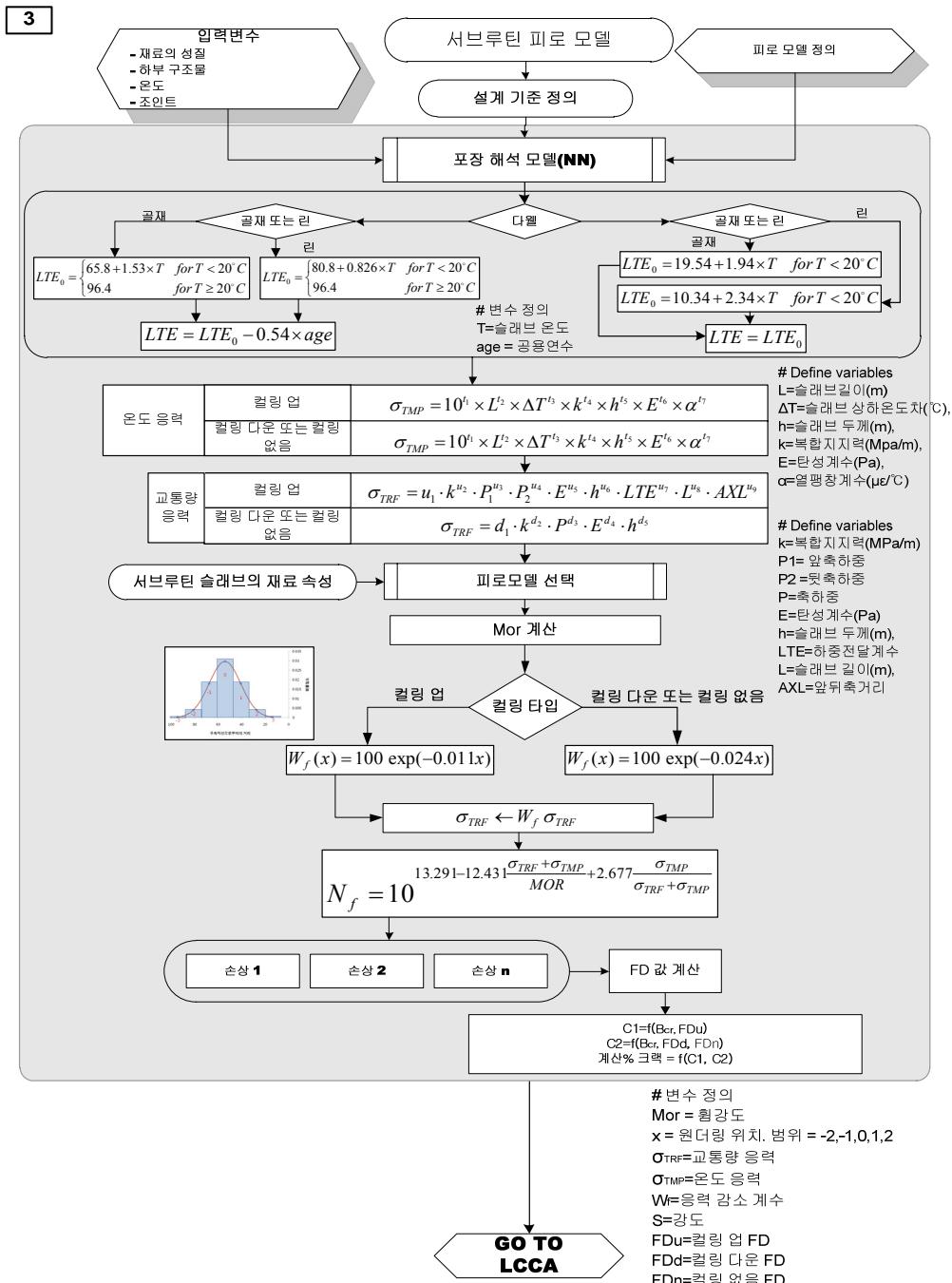


〈그림 9.4〉 아스팔트 콘크리트 포장층의 평탄성지수 산정 로직

시멘트 콘크리트 포장의 경우는 아스팔트 콘크리트 포장과 달리 영구변형 산정과정이 없으며 피로균열 모형을 바탕으로 공용성 분석이 이루어지며 이후 이를 바탕으로 평탄성지수 산정을 수행한다. 시멘트 콘크리트 포장에서 피로균열을 예측하는 로직은 기본 입력 변수들을 바탕으로 구조해석을 통해 산정한 응력과 재료의 강도비를 통해 산정한다. 〈그림 9.5〉은 피로균열을 예측하는 로직이며 이를 자세히 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 교통하중, 온도하중, 하부물성, 콘크리트 재료물성의 계산값 및 예비 설계한 단면의 형상(두께, 폭, 길이)을 불러 들인다.
- (2) 포장층의 조합에 따른 불연속면의 LTE 값을 산정한다.
- (3) 커링 조건에 따른 교통 및 환경 하중에 의한 상향 및 하향균열을 유발하는 응력을 각각 산출한다.
- (4) 원더링 효과 모듈을 통해 산출한 응력을 재계산한다.
- (5) 상향 및 하향 피로균열 모형에 계산된 응력을 대입한다.

- (6) 피로균열 모형을 통해 교통량의 최대 허용 반복회수를 구한다.
- (7) 단위 해석 기간동안에 통과할 예상 교통량을 최대 허용 반복회수로 나누워 파손율을 산정한다.
- (8) 균열율을 예측하는 전이함수에 전 단계에서 계산한 파손율을 입력하여 최종 균열율을 계산한다.
- (9) 설계 공용 년수에 해당하는 기간동안 동일 과정을 반복 계산한다.

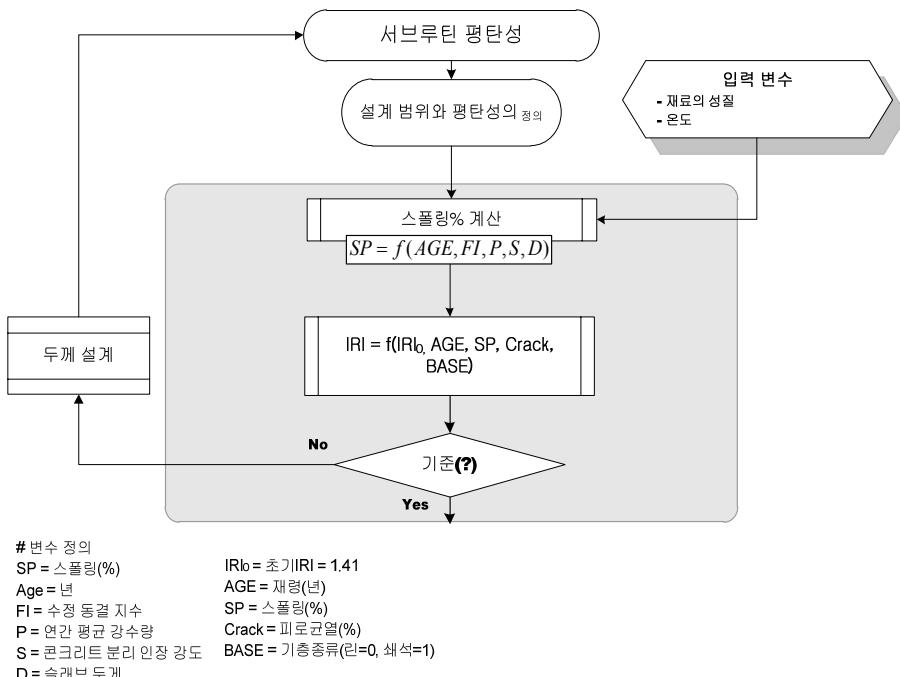


〈그림 9.5〉 시멘트 콘크리트 포장의 피로균열 산정 로직

평탄성지수는 앞서 계산한 피로균열과 포장의 공용성 기준은 아니지만 평탄성에 영향을 미치는 스팔링의 발생량을 통해 계산한다. 〈그림 9.6〉 및 다음은 평탄성지수를 계산하는 과정을 나타낸 것이다.

- (1) 공용 년수, 연평균 강수량, 수정동결지수, 쪼掴인장강도, 슬래브 두께, 중차량비율을 입력 변수로 하여 스팔링을 계산한다.
- (2) 초기 평탄성지수, 공용년수, 기층 종류, 스팔링 및 균열율을 바탕으로 평탄성 지수를 구한다.
- (3) 위 과정을 설계 공용 년수동안 반복 계산하여 평탄성지수 변화를 산정한다.

4



〈그림 9.6〉 시멘트 콘크리트 포장의 평탄성지수 산정 로직

아스팔트 콘크리트와 시멘트 콘크리트 포장의 공용성 모형에서 사용된 세부 모델에 대한 설명은 이후 각 장에서 구체적으로 설명한다.

9.1 도로포장 구조 설계

도로포장 구조 설계는 일반 토목 구조물의 설계와 그 기준이 다르다. 교량 설계는 균열이나 구조적인 파손이 발생하는 것을 혀용하지 않는다. 하지만 포장은 일정 균열이나 기타 파손이 일어나도 사용이 가능하다. 도로포장의 설계는 설계기준과 지형조건 및 교통량에 따라 구체적으로 포장의 두께와 적절한 재료를 선정하는 것이다. 즉, 재료 물성, 환경하중, 교통하중, 불연속면, 흙의 종류등과 같은 설계 입력 변수들을 포장의 해석모형에 입력하여 포장의 거동을 분석한다. 그 결과를 포장의 공용성 모형에 대입하여 설계한 포장의 설계 수명을 예측한다. 그리고 신뢰도의 개념을 도입하여 신뢰수준에 따른 설계 입력치를 결정하고 초기 건설비부터 포장의 수명이 다할 때 까지의 유지보수비용을 고려한 경제성 분석(LCCA: Life Cycle Cost Analysis)를 실시하여 최적의 설계가 이루어지도록 한다. 이러한 포장 구조 설계에서는 일반적으로 교통 및 환경에 의해 포장체 내부에 발생하는 응력이 강도에 비하여 작다. 실제로 포장 표면에 재하되는 압축 응력의 최대값은 타이어 압력 이상을 넘기가 어렵다. 이렇듯 콘크리트나 아스팔트의 압축 강도는 타이어 압력에 비해 수십배 이상이지만 포장에서는 반복하중에 의한 피로의 누적으로 파손이 발생한다. 앞서 말한 피로가 누적된다는 개념을 포장에 적용한 포장의 누적 손상이론에 대해 자세히 알아보자. 이 개념은 포장의 전체 공용수명기간동안 특정한 시점에서의 포장체 온도, 수분함량, 교통하중 및 포장의 물성이 변화되는 것을 설계자가 고려할 수 있다는 장점이 있다. 다음은 도로포장 구조 설계에서 사용되는 누적손상 이론이다. 매시간 온도가 변화하게 되면 포장 재료의 물성이 변화되며 이로 인해 포장의 거동이 달라지게 되며, 이러한 변화를 다음과 같은 개념을 적용하여 해석시 고려할 수 있다.

$$d_{ijk} = \frac{N_{ijk}}{N_{f,ijk}} \quad \langle \text{식 9.1} \rangle$$

여기서, d_{ijk} : i번째 1개월에서 k번째 축하중에 의해 j번째 한 시간 동안 발생되는 손상
 N_{ijk} : i번째 1개월에서 j번째 한 시간 동안 가해지는 k번째 축하중의 회수

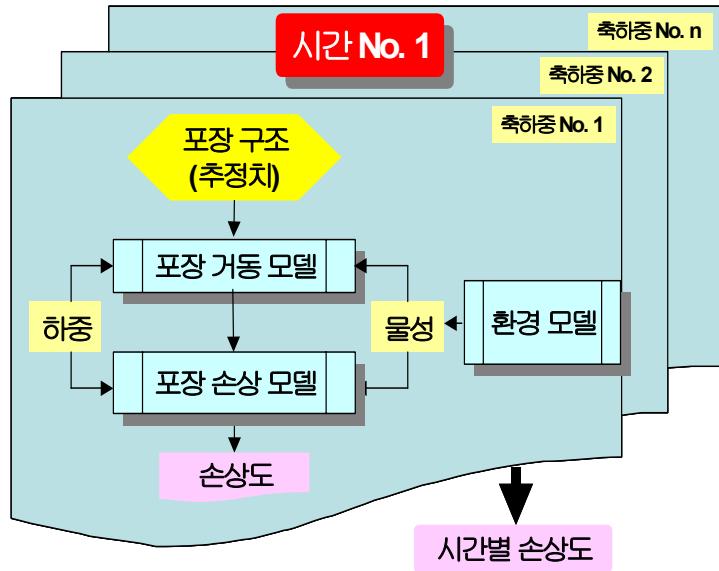
$N_{f,ijk}$: i번째 1개월에서 j번째 한 시간 동안 가해지는 k번째 축하중의 허용회수

그러면 총 M 개월 동안 발생된 전체 손상은 다음과 같다.

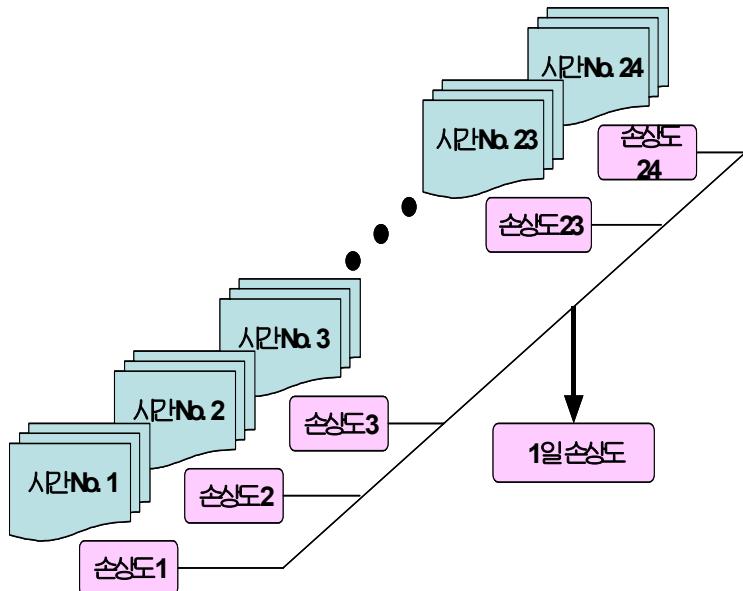
$$d = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K d_{ijk} \quad \langle \text{식 9.2} \rangle$$

여기서 K는 축하중의 종류와 크기별 그룹으로 구분되어 있는 총 개수를 말한다. 예를 들어 단축하중이 하중 크기별로 10개 그룹이 있고, 2축하중이 하중크기별로 6개 그룹, 그리고 3축 하중이 크기별로 5개 있다면 K는 21개가 된다. L은 1개월 동안의 시간으로서 $30 \times 24 = 720$ 시간이 된다. 또한 M은 전체 공용기간 동안의 개월을 나타낸다. 만약 <식 9.2>의 d 값이 1을 초과하면 포장은 파손된 것으로 간주하게 된다.

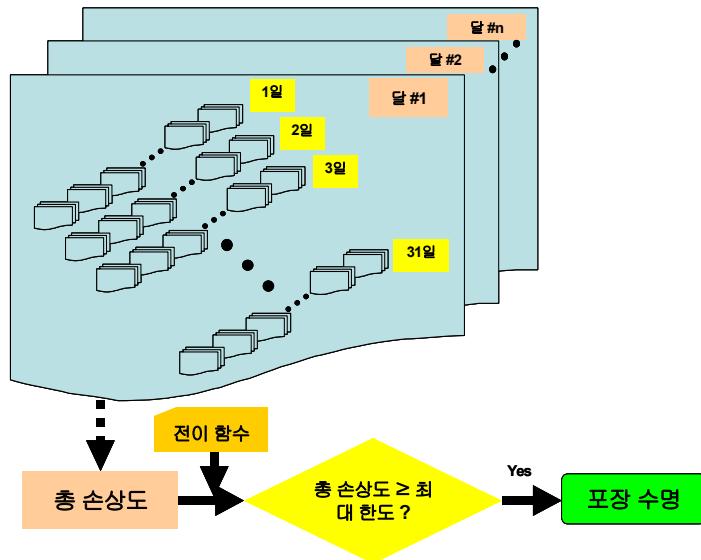
누적손상 개념을 개략적으로 도식화한 것이 <그림 9.7>~<그림 9.9>이다. 먼저 포장체의 손상을 매 시간별 혹은 몇 시간 간격으로 계산을 한다. 이렇게 계산된 시간별 손상을 누적하여 하루 동안 발생된 손상을 계산한다. 또한, 매일 발생되는 손상을 누적 계산하여 1개월 동안 발생된 손상을 계산하게 되고 전체 손상 d가 1에 도달할 때까지 매월 발생되는 손상을 누적 계산하면 d가 1에 도달할 때까지의 총 개월 수를 알 수 있으며 이것이 포장이 파손될 때까지의 공용기간이 된다.



〈그림 9.7〉 시간별 손상계산



〈그림 9.8〉 1일 손상 계산



〈그림 9.9〉 전체 누적 손상 계산

하지만 누적 손상 이론도 포장의 파손 원인이 복합적으로 작용할 경우 실체를 모사하지 못하는 이론적인 문제점이 있다. 예를 들어 교통하중에 의해 포장의 피로균열이 발생한다면, 실제 다양한 축하중을 가진 차량들이 도로의 포장위를 무작위로 순서로 주행할 것이다. 하지만 누적 손상이론에서는 해석 단위 시간 동안 한 축하중 그룹이 주행한 결과를 해석한 후 순차적으로 다음 그룹에 대한 해석을 수행한다. 이는 실제 포장에서 발생하는 것과는 차이가 있다. 따라서 설계 개발시 이러한 문제점을 이해해야 포장의 공용성 모형이 나타나는 모양이나 오차를 설명할 수 있을 것이다.

9.2 도로포장 구조 설계 기준

설계 기준이란 포장의 두께 및 형상을 설계 하는 기초 잣대이다. 이는 포장 건설 초기의 경험적인 설계에서부터 시작하여 강도 및 응력 비교를 통한 해석, AASHTO 도로 실험을 통해 정립된 PSI, IRRE(International Road Roughness Experiment)에서 개발한 IRI International Roughness

Index), 그리고 구조적 공용성 개념에까지 이르게 되었다. 여기에서는 각 공용성 개발 과정에 대하여 자세히 알아보도록 하자.

9.2.1 IRI (International Roughness Index)

(1) 정의 및 기준 연구

도로 사용자가 느끼는 포장 서비스의 질은 평탄성이 중요한 인자이다. 일반적으로 평탄성은 포장표면의 불규칙한 면의 측정으로 나타나며, 이러한 것은 도로 사용자들이 관심을 두는 포장 파손의 형태를 말한다.

1982년 이전의 평탄성은 각 나라별로 여러 가지의 장비 및 각 장비에 따른 지수로 표현되었다. 세계은행은 각 나라별 도로투자 비용을 산출하기 위해 1982년에 전 세계적으로 각 나라별 도로등급을 판단할 수 있는 통일된 평탄성 지수를 필요로 하였다. 이를 위하여 같은 년도에 브라질에서는 다양한 평탄성 측정 장비를 모아서 장비별 평가를 실시하였다. 이러한 측정 장비들은 반응형 타입의 도로 평탄성 측정 장비와 정적 및 동적 거칠기 측정방법으로 나눌 수 있다. 반응형 타입의 도로 평탄성 측정 장비는 차량의 누적 완충장치와 변환장치에 의해 구성되며, 보통 일정량만큼의 완충위치의 변화를 파악해서 측정하는 방법이다. 정적 거칠기는 노면의 프로파일을 실제 수준 측량으로 측정하는 방법이다. 동적 거칠기는 프랑스 LCPC에서 개발한 APL 장비를 말하며, 트레일러의 바퀴에 수직 진동을 가하여 지지대의 주의 각도 변화량을 측정한 후 수직 변화량으로 전환하는 방법이다. 이러한 연구 결과로, 세계은행에서는 국제적으로 사용할 수 있는 IRI를 개발하였다.

IRI란 실제 노면을 입력값으로 하여 80km/hr의 속도로 주행하는 퀼터카 (Quater-Car) 시스템을 모사한 것으로 다음과 같은 과정을 거쳐 정의된다.

- 1) IRI는 싱글 종단 프로파일에 의해서 계산된다. 샘플 간격은 최대 300mm 보다 커서는 안되고 요구되는 샘플간격은 평평한 도로의 경우에는 더 조밀해야 하는 것처럼 도로의 평탄성 수준에 의존한다. 0.5mm의 간격은 모든 조건에 적합하다.

- 2) 프로파일은 샘플 수준점 사이에 일정한 경사로 가정하며 250mm의 길이로 이동 평균에 의해서 부드럽게 된다.
- 3) 부드러운 프로파일은 80km/h 속도에서 특정 파라메터를 가진 퀼터카 시뮬레이션을 사용한다.
- 4) 시뮬레이션된 완화장치는 선형적으로 누적하고 프로파일의 길이로 나눈다.

IRI는 이러한 개발 기준의 장점 때문에 공용성을 나타내는 지수로 세계적으로 널리 쓰이고 있으며, 최근 개발된 각국의 설계에서도 공용성을 나타내는 지수로 IRI를 채택하여 관련 연구를 진행하였다.

다음은 각 연구를 통해 개발된 IRI 모형에 대하여 살펴본 것이다.

■ Simpson et al., 1994의 다월바 설치 시

$$IRI = 105.9 + 159.1 \times \left(\frac{AGE}{KSTATIC} \right) + 2.167 \times JTSPACE - 7.127 \times THICK + 13.49 \times EDGESUP \quad \text{식 (9.5)}$$

여기서, IRI : 국제 평탄성 지수 (in/mi)

AGE : 재령(년)

THICK : 콘크리트 슬래브 두께(in)

KSTATIC : 역산된 정적 K값(psi/in)

DGESUP : 길어깨 종류(콘크리트 길어깨는 1, 다른종류는 0)

JTSPACE : 횡방향 줄눈 평균 간격(ft)

■ Simpson et al., 1994의 다월바 미설치 시

$$IRI = 38.85 + 12.89 \times CESAL + 0.2217 \times FT + 1.498 \times PREIP - 10.96 \times BASE - 13.69 \times SUBGRADE \quad \text{식 (9.6)}$$

여기서, IRI : 국제 평탄성 지수 (in/mi)

CESAL : 누적 18KIPS ESALS(만)

PRECIP : 년 평균 강수량(in)

FT : 년 평균 공기 동결용해 반복횟수

BASE : 기층 종류(안정처리는 1, 비안정처리는 0)

SUBGRADE : 노상의 종류

(AASHTO 분류에서 A-1, A-2, A-3은 1, A-4 ~ A-7은 0)

■ Hoerner et al., 1999의 모형

$$IRI = INIIRI + (4.8389 \times Age) - (0.047 \times Age \times INIIRI) + (0.7165 \times \%CRACKED) + (359.956 \times FAULT) + (0.3828 \times \%SPALL) \quad \text{식 (9.7)}$$

여기서, IRI : 국제 평탄성 지수 (in/mi)

INIIRI : 초기 국제 평탄성 지수 (in/mi)

Age : 재령(년)

%CRACKED : 횡방향 피로균열의 전체 슬래브 퍼센트(%)

FAULT : 줄눈마다 평균 단차 높이(IN)

%SPALL : 심각도 중, 상의 스팔링의 전체 슬래브의 퍼센트(%)

■ Titus_Glover et al. 1999의 모형

$$IRI = 82.56 + KESAL^{0.4} \times (0.01 \times WETDAYS + 0.72 \times ZONE) + AGE^{0.4} \times (0.00506 \times FI + 1.57 \times 10^{-6} \times E_{PCC} - 3.5 \times SUBGRADE - 3.07 \times DOWELDIA) \quad \text{식 (9.8)}$$

여기서, IRI : 국제 평탄성 지수 (in/mi)

KESAL : 누적 18KIPS ESALS(천회)

WETDAYS : 강수량이 0.5in 보다 큰 강수 일수

ZONE : 미LTPP 구간의 기후 존(동결지역 : 1, 비동결지역 : 0)

AGE : 재령(년)

FI : 동결지수($^{\circ}$ F-일수)

E_{pc} : 콘크리트 포장의 탄성계수(psi)

SUBGRADE : 노상종류(1: 조립토, 0: 세립토)

DOWELDIA : 다월바 직경(in)

■ Yu et al. 1997의 모형

$$IRI = 99.59 + 2.6098 \times TFAULT + 2.2802 \times TCRACK^3 + 1.8407 \times \%SPALL \times (103) \quad (9.9)$$

여기서, IRI : 국제 평탄성 지수 (in/mi)

TFAULT : 마일당 총 누적 단차 길이(in/mi)

TCRACK : 마일당 총 균열수

%SPALL : 심각도 중, 상의 스플링의 전체 슬래브의 퍼센트(%)

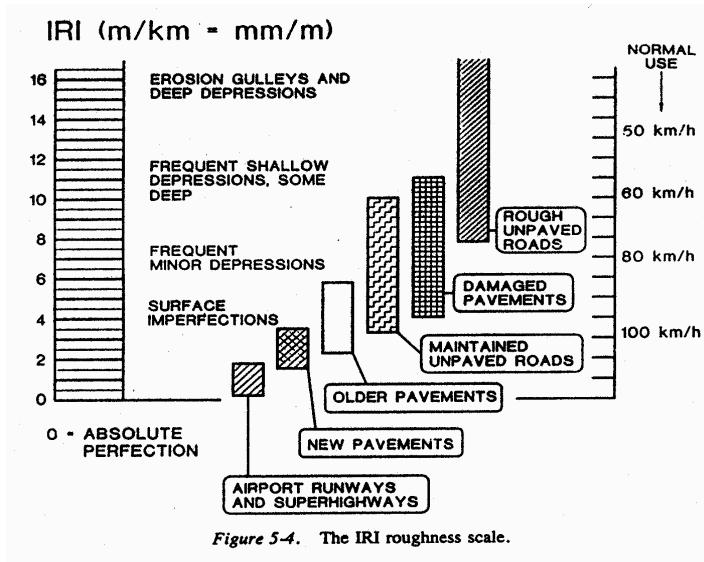


Figure 5-4. The IRI roughness scale.

〈그림 9.10〉 IRI와 포장 상태와의 관계

다양한 IRI 모형은 포장의 형식 및 조건에 따라 달라지며 도로를 관리하는 정책 및 재정에 따라서도 변화한다. IRI 모형이 포장 공용성의 기능적인 기준이 되긴 하지만 〈그림 9.10〉와 같이 상태가 좋은 노후포장과 품질관리가 나쁜 신설포장의 IRI 값을 측정한 후 동일한 결과가 나올 경우 이를 판단할 근거가 없다는 것이 단점이다.

(2) 도로포장 구조 설계

현재 IRI 모형은 아스팔트 콘크리트 포장체의 균열 및 파손 인자와의 상관 관계를 회귀 분석을 통해 개발하였고 시멘트 콘크리트 포장의 모형은 개발 중에 있다. 여기서는 아스팔트 IRI 모형의 개발 과정의 상세 내용을 설명하였다.

1) 자료 수집

국내 공용성 자료 검토 결과, 포장 평가 자료는 표면 결함 위주로 수집된 것을 확인하였으며, 모형 개발에 필요한 종단 평탄성 자료 중 국내 LTPP 구간에서 수집된 자료는 거의 없는 상태이다. 이에 따라 매년 이루어지는 국

도 PMS 및 한국도로공사의 속성조사에 의해 얻어지는 평탄성 자료를 이용하여 균열, 스팔링, 영구변형과 IRI의 상관성을 분석하였다.

아스팔트 콘크리트 포장의 경우의 PMS 자료는 자료 수집의 특성상 조사 당해 년도의 각 국도유지사무소별로 제안된 파손이 가장 심한 구간을 대상으로 선택적으로 조사하고 있으며 이에 따라 조사한 구간은 유지보수를 시행하므로 PMS 자료로는 어느 특정구간의 일관된 자료(그 구간의 시간의 변화에 따른 일관성 있는 자료)를 얻기가 불가능하다. 따라서 전반적인 각 변수들과 IRI의 관계를 알아보기 위해 PMS 자료 가운데 특정 조사대상구간을 고려하지 않고 1991년부터 1999년까지 수집된 2911개소의 자료를 분석하였다. 추가적으로 현장 실험을 수행하였으며 대상구간은 1) 시공연도가 상이할 것, 2) 포장두께가 유사하거나 동일한 구간일 것, 3) 영구변형이나 균열과 같은 파손의 대·중·소를 나타내는 구간이 인접해 있을 것과 같은 세 가지 선택조건을 만족하는 포장구간을 실험대상구간으로 선정하였다. 국도상의 여러 구간들 중 위의 조건을 만족하는 구간으로 15개소(국도1호선(2), 국도21호선(2), 국도23호선(3), 국도34호선(2), 국도36호선(1), 국도37호선(3), 국도39호선(2))이었다. 따라서 이 구간들을 현장 실험 대상구간으로 선정하였다. ARAN 장비를 사용하여 IRI를 1km 범위로 측정하고 육안조사를 통해 포장 파손을 조사하여 실제 ARAN에서 읽어들인 파손과 육안조사 결과를 비교하여 측정의 정확성을 기했다.

시멘트 콘크리트 포장의 경우 파손에 영향을 미치는 스팔링, 균열, 재령, 기층 등 상관관계 분석을 위해 사용된 자료는 고속도로 정기포장상태 조사결과이며, 교량부 및 터널부를 제외한 순수 토공부에 대해서 최소연장 300m 이상의 구간을 하나의 섹션으로 선정하였으며, 각 섹션별 슬래브수 및 출눈수 대비 손상이 발생한 개소를 손상률(%)로 나타내었다. 조사구간은 영동선, 88선, 남해선, 중부선, 중앙선, 호남선에 대하여 적용연장 280.93km에 대해서 고려하였다.

■ 도로포장 구조 설계 중 시멘트 콘크리트 포장의 모형

평탄성 지수 모형의 개발을 위해 필요한 영향인자는 스팔링, 균열, 재령, 기층으로 나타났으며, 이에 대한 회귀분석결과 신뢰성 있는 평탄성 지수 모형을 도출하였다. 또한, 초기평탄성 및 공용 개시후의 IRI 값의 증가 경향을 함께 고려하고 있다. 회귀분석 프로그램을 사용하여 도출한 평탄성 지수 모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{IRI} = & \text{IRI}_0 + 0.0235\text{AGE} + 2.17\text{Spalling(\%)} + 1.88\text{Cracking(\%)} \\ & + 0.811\text{Base} \end{aligned}$$

〈식 9.10〉

여기서, IRI : 국제 평탄성 지수 (m/km)

IRI_0 (초기 평탄성) = 1.41 (m/km)

AGE : 포장 공용 연수

Spalling(%) = 스팔링율

Cracking(%) = 균열율

Base = 기층종류 (린기층 : 0, 쇄석기층 : 1)

■ 도로포장 구조 설계 중 아스팔트 포장의 모형

평탄성 지수와 각 변수와의 영향정도를 분석한 결과 공용연수, 영구 변형량, 피로 균열률이 평탄성 지수에 영향이 있는 것으로 판단되어 3개의 변수를 이용하여 평탄성 지수와의 모형을 통계분석을 통하여 〈식 9.11〉과 같이 개발하였다.

$$\text{IRI} = \text{IRI}_0 + 0.056\text{AGE} + 0.19\text{RD} + 0.01\text{FC}$$

〈식 9.11〉

여기서, $IRI =$ 국제 평탄성 지수 (m/km)

$$IRI_0(\text{초기 평탄성}) = 1.18 \text{ (m/km)}$$

AGE : 포장 공용 연수

RD= 영구변형 깊이(mm),

FC = 피로균열률(%)

9.2.2 구조적 파손 형태 기준

포장의 구조적 공용성은 포장의 물리적 상태와 관련 있는 것으로 포장층의 균열이나 영구변형, 단차 등의 각 파손을 공용기간동안 누적하여 그 포장의 수명을 판단하는 것이다. 공용 후 구조적 파손의 발생은 포장의 교통흐름에 미치거나 유지보수작업이 필요하므로 각 공용성 모형들은 도로포장 구조 설계의 핵심이 된다. 지금부터 도로포장 구조 설계에서 고려하고 있는 아스팔트 콘크리트 및 시멘트 콘크리트 포장의 구조적 파손 모형에 대하여 살펴보도록 하자.

(1) 아스팔트 피로 파손 모형

피로수명은 보다 정확한 예측 모형을 통해 결정되어야 하지만 현재는 경험적 파손예측 모형이 주를 이루고 있다. 경험적 모형은 상이한 재료 또는 새로운 혼합물을 사용할 경우 예측식의 적용이 어렵고 혼합물의 노화가 고려되지 않았기 때문에 정확한 수명예측은 한계가 있다. 경험적 파손예측 모형의 이러한 많은 문제 때문에 포장 파손에 대한 역학적 규명이 필요하고 이를 모형화한 역학적 파손 예측모형이 필요하다. 아스팔트 콘크리트 포장의 피로파손 모형 개발 연구를 통해 반복 하중을 받는 아스팔트 혼합물의 피로수명 결정을 위한 시험법을 이용하여 피로파손 모형을 개발 하였으며 그 내용은 다음과 같다.

가. 시험 방법 및 절차

하중 장치는 Servo-Hydraulic Closed Loop 시스템의 장비로서 MTS사의 모형 810(10Ton)이다. 모든 시험은 간접인장방식에 의해 수행하였고, <그림 9.11>과 같이 시편시편을 장비에 거치한다. 그림에서 보는 바와 같이 시편의 상부 및 하부에 하중을 재하할 수 있는 재하 장치는 LTPP(2001)에서 제안한 방식으로 제작하여 사용하였다.

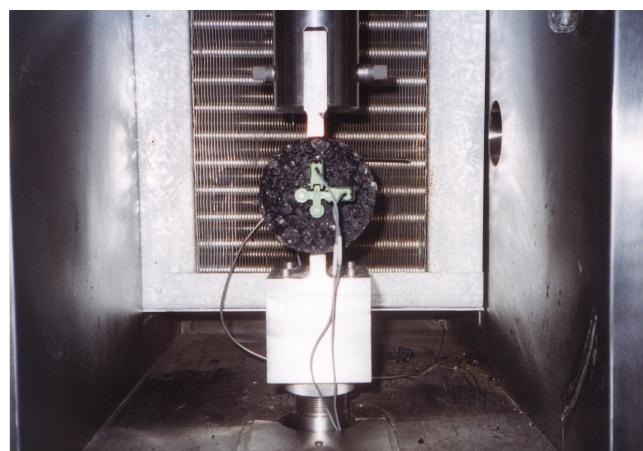
시편에 발생되는 수평 및 수직 변위를 측정하기 위하여 Strain 게이지 방식의 Extenso-Meter를 시편의 앞과 뒤에 부착하여 변위를 측정하였다. 시험에 앞서 시편의 중심을 기준으로 수평과 연직선을 따라 게이지 길이 25.4mm(1inch) 떨어진 위치에 게이지 부착을 위한 철제 포인터(Point)를 에폭시를 사용하여 부착하였다. 철제 포인터 위에 수평 및 수직 Extensometer 1개조씩을 설치하여 (포인터와 Extensometer는 자석 힘으로 고정됨) 변위를 측정하였다.

시편의 앞면과 뒷면 각각으로부터 수평 및 수직 Extensometer들로부터 읽어 들이는 4개의 Voltage 신호를 증폭하고 노이즈를 제거하는 Signal Conditioning을 위해 Data Logger를 사용하였으며, 이를 하중 및 Stroke 변위의 신호와 함께 MTS DAQ 장비에 저장하였다.

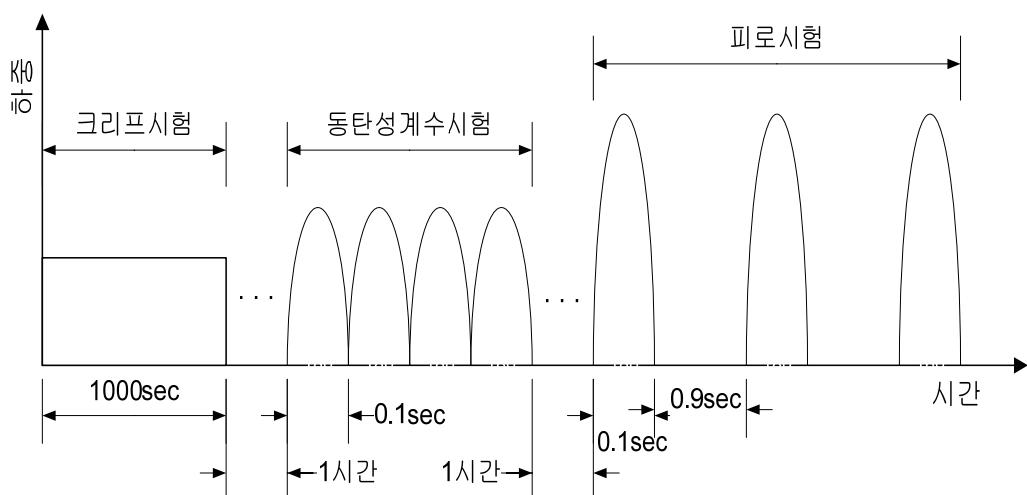
각각의 시편에 대한 피로시험을 진행하기에 앞서 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성을 측정하기 위하여 크리프시험과 동탄성계수시험을 실시하였으며, 모든 시험은 20°C의 온도에서 수행하였다. 각 시편에 대한 시험절차는 <그림 9.12>에서 보는 바와 같이 먼저 크리프시험을 1000초간 수행한 다음 1시간의 휴지기를 주어 변위가 완전히 회복되도록 기다린 다음 주기 10Hz의 Haversine 파형의 하중을 재하하여 동탄성계수측정을 실시하고 역시 1시간의 휴지기를 거친 다음 0.1초의 하중재하 및 0.9초의 휴지기를 갖는 피로시험을 순차적으로 진행하였다. 크리프 시험과 동탄성계수시험은 혼합물의 선형 점탄성 물성을 측정하는 목적으로 수행하였기 때문에 하중은 재료의 선형 점탄성범위를 벗어나지 않는 구간 내에서 결정하도록 한다.

크리프시험의 경우 동일한 시편에 대해 500N, 700N, 1000N의 하중을 재하하여 시험을 실시하고 크리프 컴플라이언스(creep compliance) D(t)를

구한 다음 $D(t)$ -시간의 관계곡선을 그린다. 그 후 곡선 간의 중첩을 확인하여 그 중복성을 판단한다. 동탄성계수시험에서는 총 수평변위가 $120 \sim 150 \mu\epsilon$ 사이, 한 Cycle당 진폭은 $40 \sim 50 \mu\epsilon$ 사이가 되도록 하중을 정하였다. 피로시험의 하중진폭은 미리 예비시험을 통하여 피로에 의한 파괴까지의 하중재하회수가 대략 $3,000 \sim 5,000$ 회, $20,000 \sim 30,000$ 회, $100,000$ 회 정도되는 3개의 하중을 결정하여 사용하였다.



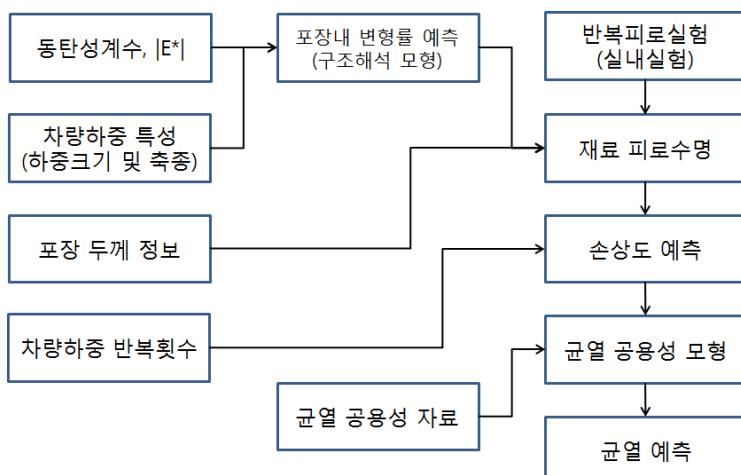
〈그림 9.11〉 시편을 시험장비에 거치한 광경



〈그림 9.12〉 간접인장 시험 순서

나. 피로시험 결과

아스팔트 콘크리트 포장의 상향균열 및 하향균열은 상부에 각각 거북등 균열 및 선상균열로 나타내는 균열로 판단되어지며, 이들 균열은 포장 전체 면적에 대한 비율로 표현되어 진다. 아래 <그림 9.13>는 상하향 균열을 예측하기 위하여 필요한 변수와 과정을 나타내고 있는데, 설계등급 1에서는 동탄성계수 마스터 곡선과 피로수명을 결정할 수 있는 실내 실험이 진행되어야 하며, 이들 외에 포장의 구조적 특성, 구조해석 모형, 교통하중의 특성 및 공용성 자료를 활용하여 최종적인 균열을 예측하게 된다. 설계등급 2에서는 동탄성계수 예측을 위한 바인더 및 골재 기초실험과 피로수명을 산정할 수 있는 실내실험이 필요하다. 설계등급 2는 과업진행 중에 특성을 확인한 아스팔트 혼합물과 유사한 재료에 대하여 제한적으로 사용할 수 있는데, 이들 혼합물에 대해서는 공용성 자료를 별로로 필요로 하지 않는다. 아스팔트 콘크리트 포장 설계에 주로 사용되는 골재와 혼합물(19mm PG64-22 등)에 대해서는 이미 설계프로그램에 적용되어 있으므로, 설계등급에 무관하게 적용할 수 있다.



<그림 9.13> 균열 예측 순서도

한편, 초기 아스팔트 콘크리트 포장의 거동은 온도 및 빈도대한 포장 재료의

강성(stiffness)에 의하여 결정되지만, 피로파손이 진행됨에 따라서 재료의 강성이 감소하는 것으로 고려하는 것이 보다 재료의 특성의 영향을 크게 반영하는 현재 포장 설계에서 보다 합리적이라고 할 수 있다. 일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장에서의 상향균열은 표층+중간층 하부에서 발생하는 인장응력에 의하여 지배되는 경향을 나타내며, 표층+중간층의 두께가 두꺼워질수록 그 현상이 저감되는 경향을 나타낸다. 아스팔트 재료의 강성감소는 간접인장 실험의 회복탄성계수의 변화로 정의되었는데, 이는 인장응력으로 발생하는 상향균열과 하향균열에 동시에 적용할 수 있는 개념이기 때문에, 상향균열이나 하향균열에 의하여 독립적으로 발생되는 포장의 강성저감에 개별적으로 또는 동시에 적용된다. 아래 <식 9.12>과 <표 9.1>은 손상도에 따른 강성의 감소를 나타내기 위하여 적용된 식과 그에 해당하는 혼합률별 계수를 나타내고 있으며, 계산된 S_R 은 위에서의 예측된 동탄성계수에 곱해져 강성의 감소를 고려하는데 사용된다.

$$S_R = aD^3 + bD^2 + cD + 1 \quad \langle \text{식 } 9.12 \rangle$$

여기에서,

a, b, c = 재료 상수

D = 손상도

〈표 9.1〉 혼합물별 동탄성계수 마스터 곡선 계수 (기준온도 21°C)

골재	바인더	a	b	c
DGA13mm	PG58-22	-0.508	0.8497	-0.8477
	PG64-22	-0.3764	0.6955	-0.7971
	PG76-22	-0.5993	1.2501	1.1567
DGA20mm	PG58-22	-0.3084	0.6405	0.8317
	PG64-22	-0.3431	0.6175	0.7734
DGA20mm	PG58-22	-0.658	1.2336	-1.0673
	PG64-22	-0.5365	0.9121	-0.8729
상기 이외의 경우	PG58-22	-0.508	0.8497	-0.8477
	PG64-22	0.3764	0.6955	0.7971
	PG76-22	-0.5993	1.2501	-1.1567

다. 아스팔트 콘크리트 포장의 상향균열 모형

〈식 9.13〉의 N_f 는 손상도 D를 결정하기 위하여 필요한 파손시까지의 하중회수를 나타내고 있으며, 상향 균열에 대한 전이함수를 나타내는 〈식 9.13〉은 전체 차로에 대한 거북등 균열의 면적 비를 나타낸다. 또한 상향 균열과 하향 균열에 사용된 누적 피로 손상을 D는 각 균열에 대하여 독립적으로 산정된 것으로 상하향 균열 사이의 상호작용을 나타내지는 않는다. 상향 균열에 영향을 미치는 손상도 D는 표층+중간층 하부와 기층 하부에서 계속적으로 평가되며, 이를 중 큰 값이 균열률을 산정하는 〈식 9.13〉에 사용된다. 〈식 9.13〉에서 함수 k는 앞서 언급한 바와 같이 포장층 단면의 구조적인 특성을 N_f 에 반영하기 위하여 추가된 변수로서 아스팔트 콘크리트 층의 두께에 영향을 고려하기 위한 것으로서, 아래 〈그림 9.14〉에 나타난 바와 같이 포장의 수명을 나타내는 N_f 값은 5cm에서 10cm에서 급격하게 변화하며, 두꺼운 포장에서 그 값이 매우 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 탄성계수와 변

형률만을 고려했을 때, 두꺼운 포장에서 과다하게 평가되는 포장의 수명을 보정하기 위한 것으로서, 재료의 특성보다는 포장층의 구조적인 특성을 공용성에 반영하기 위한 것이다.

$$Crack_{BU} (\%) = \frac{6000}{1.0 + e^{(C_1 C'_1 + C_2 C'_2 \log_{10}(D * 100))}} * \frac{1}{60} \quad \langle \text{식 9.13} \rangle$$

여기에서,

$$C_1 = -3.5$$

$$C_2 = 0.4$$

$$C'_1 = -2 * C_2$$

$$C'_2 = -2.40874 - 39.748 * 0.7 * (0.393701 + TH_{AC} / 2.54)^{-2.856}$$

$$D = \frac{n}{N_f}$$

n = number of repetition

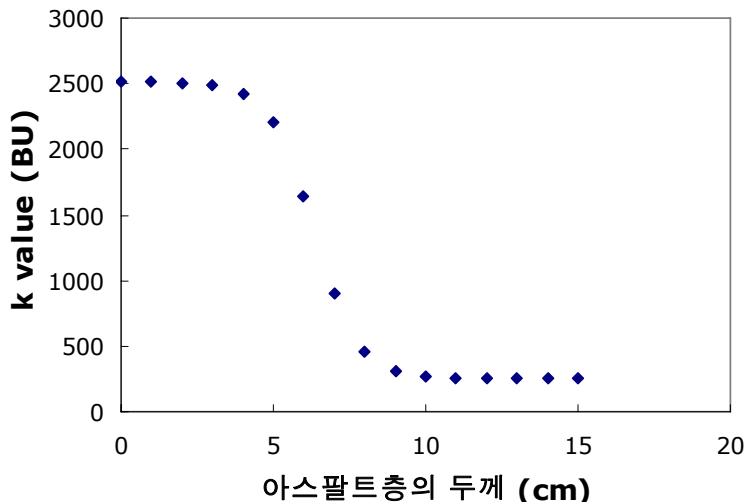
$$N_f = 10^A * \varepsilon_e^B * (|E^*|)^C * K_{BU}$$

A, B, C = Material Constants

ε_e = elastic strain $|E^*|$ = Dynamic modulus (kPa)

$$K_{BU} = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 1.374 * TH_{AC})}}}$$

$$TH_{AC} = TH_{Surface} + TH_{Intermediate} + TH_{Base} \text{ (cm)}$$



〈그림 9.14〉 상향균열의 두께 영향 변수 k 의 변화

아래 〈표 9.2〉은 피로수명 N_f 를 결정하는데 사용된 계수를 혼합물의 종류별로 나타내고 있다. 아래 표에 포함되지 않은 13F나 20Fmm 혼합물의 계수는 이와 유사한 혼합물의 계수를 적용하도록 설계 프로그램에 포함되어 있다.

〈표 9.2〉 혼합물별 피로수명 N_f 에 사용되는 변수

Aggregate	Binder	Coefficients		
		A	B	C
DGA 13mm	PG 58-22	-21.2489	-5.886	0.4212
	PG 64-22	-21.2489	-5.886	0.4212
	PG 76-22	-21.9489	-5.886	0.4212
DGA 20mm	PG 58-22	-22.8936	-5.2894	3.2373
	PG 64-22	-22.7136	-5.3394	3.2373
	PG 76-22	-31.6736	-5.8525	1.2976
SMA 13mm	PG 58-22	-22.5585	-5.9625	0.3904
	PG 64-22	-22.4485	-5.9425	0.3904
	PG 76-22	-26.2285	-5.9625	0.3904
DGA 25mm	PG 58-22	-9.9686	-3.2682	0.4961
	PG 64-22	-9.9686	-3.2682	0.4961
	PG 76-22	-9.9686	-3.2682	0.4961
DGA 40mm	PG 58-22	-9.9686	-3.2682	0.4961
	PG 64-22	-9.9686	-3.2682	0.4961
	PG 76-22	-9.9686	-3.2682	0.4961

라. 아스팔트 콘크리트 포장의 하향균열 모형

하향균열에 대한 전이함수를 나타내는 식 (9.14)는 총 균열길이(ft)를 해당 차로의 길이(mile)로 나눈 값으로서, 최대값은 누적 피로 손상률 D가 1일 때 5280ft/mile이며 1mile/mile과 동일한 결과이다. 하향균열 공용성 모형은 상향균열 모형과 유사한 형태를 나타지만 표층 상부에서의 변형률만 손상도 D를 결정하는데 사용된다. <그림 9.15>은 하향균열에 적용되는 k함수의 변화를 나타내는 것으로, 아스팔트 층의 두께가 7cm이상이되면 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 현장에서 발생되는 두꺼운 아스팔트 콘크리트 포장의 표면 노화에 의한 하향균열과는 다른 것으로서, 구조적인 영향만을 반영하도록 되어 있다. 다음 <식 9.14>은 위의 상향균열 및 손상도 관계처럼 국내 131개 고속국도 및 일반국도에서 얻어진 공용성 자료와 개발된 설계 프로그램에 의하여 결정된 하향균열에 대한 공용성 곡선 또는 전이함수를 나타내고 있다.

$$\text{Crack}_{TD} (\%) = \frac{1000}{1.0 + e^{(5.3 - 1.5 * \log_{10}(D * 100))}} * 3.52 \quad \text{식 (9.14)}$$

여기에서,

$$D = \frac{n}{N_f}$$

n = number of repetition

$$N_f = 10^A * \varepsilon_e^B * (|E^*|)^C * K_{TD}$$

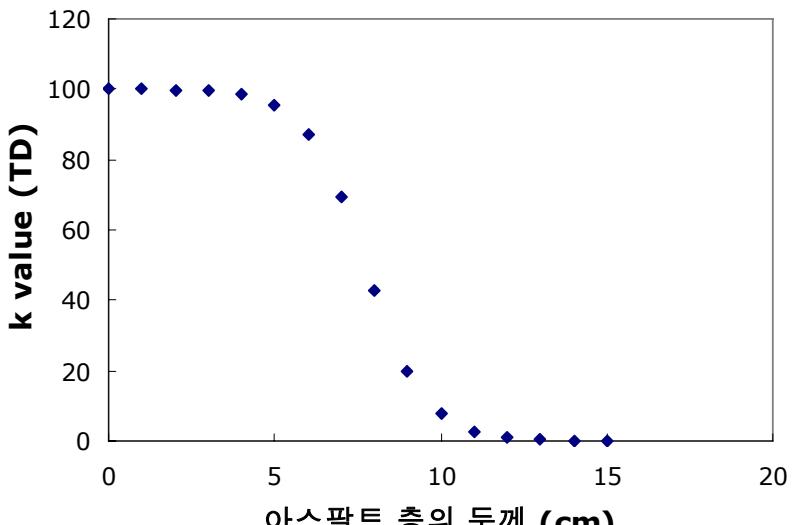
A, B, C = Material Constants

ε_e = elastic strain

$|E^*|$ = Dynamic modulus (kPa)

$$K_{TD} = \frac{1.0}{0.01 + \frac{12}{1.0 + e^{(15.676 - 1.1097 * TH_{AC})}}}$$

$$TH_{AC} = TH_{Surface} + TH_{Intermediate} + TH_{Base} \text{ (cm)}$$



〈그림 9.15〉 하향균열의 두께 영향 변수 k의 변화

마. 아스팔트 콘크리트 포장의 총균열 모형

이상에 결정된 하향균열은 폭 0.3m, 도로 폭 3.6m, 단위 구간 1,000m인 것으로 가정하여 아래 식(9.15)과 같이 상향균열과 합산되어 총균열로 환산된다. 아래 식(9.15)의 3.6은 도로폭을 나타내는 것으로서, 다른 도로폭에서는 다른 값이 사용된다.

$$Crack_{BU+TD} (\%) = BU(\%) + \frac{0.3 * TD(\%)}{3.6 * 1000} * 100 \quad \text{식 (9.15)}$$

여기에서,

BU = 상향균열

TD = 하향균열

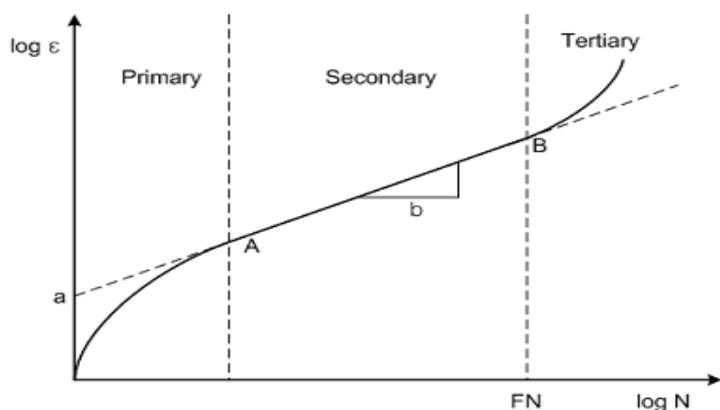
바. 영구변형 모형

도로포장 구조 설계에서 고려하고 있는 영구변형은 크게 두 가지로 구분된다. 첫째는 아스팔트 콘크리트 포장층에서 발생하는 영구 변형이고 다른

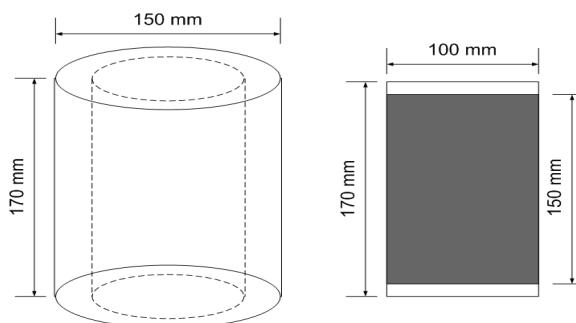
하나는 하부층에서 발생하는 영구변형이다. 각층에서 발생한 영구변형을 어떤 방법으로 실험하여 개발하였는지에 대하여 알아보도록 하자.

1) 아스팔트층의 영구변형 모형

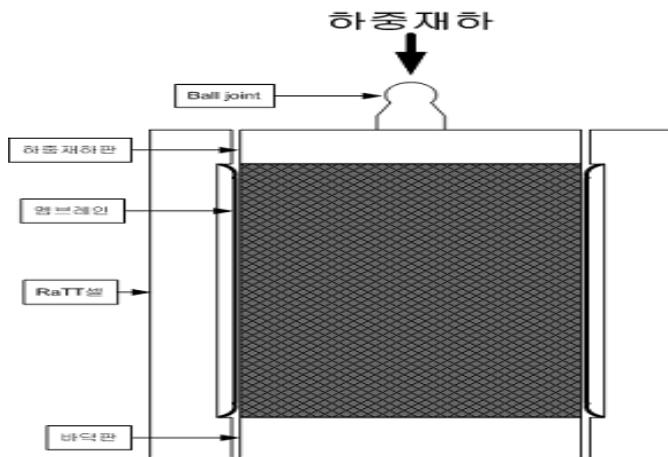
아스팔트층의 영구변형은 아스팔트 혼합물의 압밀화와 전단변형에 의해 주로 발생한다. Secondary 구간까지는 압밀화에 의한 변형이, Tertiary 구간부터는 전단에 의한 변형이 지배적으로 작용한다. 또한 Tertiary 구간이 시작되는 B점을 흐름점이라 하며, 이때의 하중재하회수를 흐름값(Flow Number : FN)이라고 한다. 영구변형은 삼축압축 반복재하시험의 전형적인 결과로서 영구변형 발생률과 하중재하 회수와의 관계는 <그림 9.16>과 같다.



<그림 9.16> 영구 변형률과 하중재하 회수의 전형적 관계



<그림 9.17> 영구변형 시험용 시편의 제작



〈그림 9.18〉 RaTT(Rapid Triaxial Testing system) 셀

2) 실험 방법 및 절차

영구변형 시험용 시편은 직경 150mm, 높이 170mm의 원통형 시편을 선회다짐기를 사용하여 제작한 다음 〈그림 9.17〉에서 보는바와 같이 직경 100mm의 시편을 코어채취기로 채취하여 시편 상부 및 하부를 10mm 씩 절단하여 높이 150mm의 시편을 제작한다. 시편을 코어 및 절단한 후 시편내부의 수분을 제거하기 위하여, 25°C의 챔버에 방습제인 실리카겔(silica gel)을 함께 넣어 3일간 건조시킨다. 이렇게 건조시킨 시편은 공기와의 접촉을 차단하기 위하여 랩으로 감싼 후 서늘한 곳에서 보관하도록 한다.

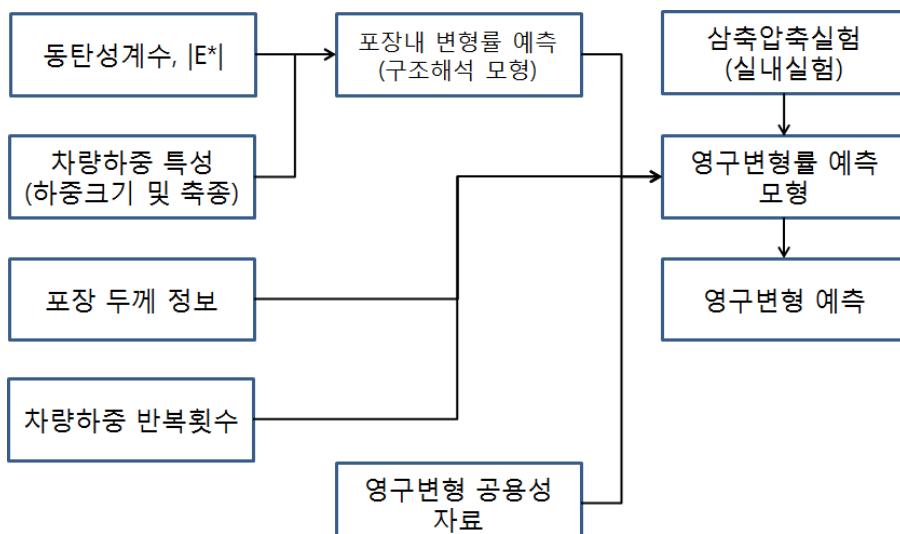
시험에 사용된 장비는 Servo-Hydraulic Closed Loop 시스템의 장비인 UTM-25(2.5ton)이며, 추가로 온도조절용 챔버와 유압장비, 그리고 데이터를 수집하기 위한 CDAS (Control and Data Acquisition System)으로 구성되어 있다. 또는 구속압을 제하하기 위하여 RaTT셀(Rapid Triaxial Testing system) 이 사용한다. RaTT셀은 시편의 주변을 멤브레인으로 감싼 후 공기 압으로 구속압을 가하는 장치로서, 간편하게 삼축응력상태를 모사할 수 있는 장점이 있다. 〈그림 9.18〉는 RaTT셀의 개략적인 모습이다.

시편의 온도를 맞추기 위하여 챔버 안에 시편의 중앙에 온도센서를 장착한 더미 시편을 두어 시험온도와 더미시편의 온도를 체크한 후 시험을 수행하였으며, 그 시간은 대략 2시간으로 한다. 재하하중은 0.1초의 재하기와

0.9초의 휴지기를 갖는 Haversine 파를 이용한다. 하중조건은 구속압을 138 kPa로 고정하며, 축하중은 827 kPa, 689 kPa, 551 kPa 의 3가지 수준으로 시험한다. Witzack and Kaloush(2002)은 "Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixtures"에서 구속압을 138 kPa(20 psi)로 고정하고, 축하중을 827 kPa, 758 kPa, 689 kPa 로 바꿔가면서 시험을 수행하는 등 이와 유사한 방법을 이용한다.

3) 아스팔트층의 영구변형 모형

아스팔트층의 영구변형을 결정하기 위해서는 아래 <그림 9.19>에 나타난 바와 같이, 위의 과정에서 예측된 동탄성계수와 교통량, 포장구조특성, 구조해석 모형 및 실내압축실험 결과가 필요하다. 이때, 하중크기 및 조합에 따른 다른 탄성변형률이 구조해석 모형에 의하여 결정되는데, 일관된 영구변형량을 결정하기 위해서는 조건이 달라질 때마다 주어지는 영구변형 모형의 계수에 대하여 교통량을 역산하여, 해석 시점에서의 영구변형량을 추산하는 방법으로 다양한 하중조건을 고려하도록 하였다.



〈그림 9.19〉 영구변형 예측 순서도

아래 <식 9.17>은 아스팔트 콘크리트 층의 영구변형을 산정하기 위하여 이용되는 영구변형 모형으로서, 혼합물별 계수는 아래 <표 9.3>에 나타난 바와 같다.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_r * K_{RUT} * 10^D * N^A * T^B * V_a^C \quad \langle \text{식 9.17} \rangle$$

여기에서,

ε_p = plastic strain

ε_r = resiliant(elastic) strain

$$K_{RUT} = 1.4 * \varepsilon^{-0.07*TH_{AC}} + 0.07$$

$$TH_{AC} = TH_{Surface} + TH_{Intermediate} + TH_{Base} \text{ (cm)}$$

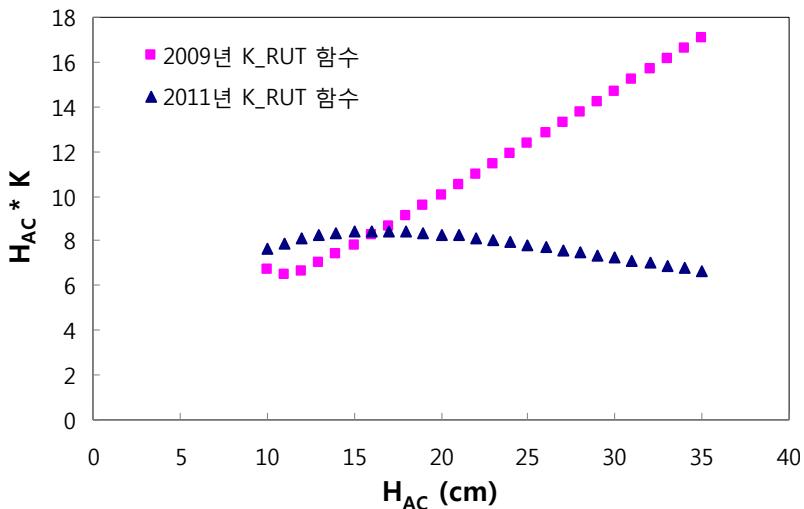
A, B, C, D = Material Constants

N = Number of repetition

T = Temperature (°C)

V_a = Air void (%)

위의 <식 9.17>에서 함수 K는 아스팔트 콘크리트 포장의 구조적 특성을 영구변형량에 반영하기 위한 것으로 2009년 최초 제시되었으나, 본 연구과정에서 131개 구간의 공용성 자료에서 나타난 영구변형량을 반영하여 수정되었다. 함수 K는 영구변형량을 산정하기 위하여 필요한 유효두께($H_{AC} * K$)를 결정하기 위하여 사용되는 것으로서, 입력된 두께와 유효두께의 관계가 다음 <그림 9.20>에 나타나 있다.



〈그림 9.20〉 아스팔트 층 두께에 따른 K값의 변화

설계등급 1에서는 실내삼축압축 실험 및 공용성 자료가 필요하며, 설계 등급 2에서 기존의 도로포장에 자주 사용되는 재료를 활용하여 설계를 진행 할 경우에는 주어진 자료를 활용할 수 있다. 다음 〈표 9.3〉는 일반적으로 사용되는 아스팔트 혼합물에 대하여 결정된 영구변형 모형계수로서 이전년도에 하모니서치 알고리듬을 이용하여 얻어진 계수에 전이계수(Transfer factor)를 고려한 것으로 설계 프로그램에 반영되어 있는 값들이다. 이들이외에 13Fmm 또는 20Fmm는 동탄성계수나 피로균열 모형에서 사용된 방법과 동 일하게 13mm 또는 20mm를 적용하도록 한다.

〈표 9.3〉 혼합물별 영구변형모형에 사용되는 변수

Aggregate	Binder	Coefficients			
		A	B	C	D
DGA 13mm	PG 58-22	0.118558826	1.045918777	0.837909281	0.091072086
	PG 64-22	0.153558826	1.035918777	0.837909281	0.091072086
	PG 76-22	0.233558826	1.085918777	0.837909281	-0.018927914
DGA 19mm	PG 58-22	0.188558826	1.035918777	0.837909281	0.091072086
	PG 64-22	0.168558826	1.035918777	0.832909281	0.071072086
	PG 76-22	0.300288723	0.132505211	0.418683015	1.534267137
SMA 13mm	PG 58-22	0.183288723	0.132505211	0.423683015	1.134267137
	PG 64-22	0.183288723	0.132505211	0.423683015	1.334267137
	PG 76-22	0.323288723	0.132505211	0.423683015	1.384267137
DGA 25mm	PG 58-22	0.203558826	1.085918777	0.781909281	-4.108927914
	PG 64-22	0.203558826	1.085918777	0.781909281	-4.108927914
	PG 76-22	0.190288723	0.182505211	0.367683015	-2.665732863
DGA 40mm	PG 58-22	0.203558826	1.085918777	0.780909281	-4.108927914
	PG 64-22	0.203558826	1.085918777	0.780909281	-4.108927914
	PG 76-22	0.190288723	0.182505211	0.366683015	-2.665732863

4) 하부층의 영구변형 모형

① 실험 방법

현재까지 노상 및 보조기층 등 포장하부구조에 적용할 수 있는 통일된 영구변형 시험법은 제시된 바 없다. 다만 국가별 또는 기관별로 각각의 연구 목적 또는 시행의도에 따라 독자적인 영구변형 시험법을 수립하여 시험을 수행하고 있다. 일반적으로 회복탄성계수(E_r) 측정을 위한 시험을 준용하거나 이를 약간 변경하여 사용하여 왔으며 이에 해당하는 것으로는 AASHTO T303-99, LTPP P46-96, NCHRP 1-28, NCHRP1-28A 및 최근 제시된 AASHTO 2002 (NCHRP 1-37) 방법 등이 있다. 〈표 9.4〉는 기존 국외 영구

변형을 시험을 위해 많이 적용하는 회복탄성계수시험법을 각 국가 및 기관별로 정리한 것이다. 대부분 하중재하기는 0.1초, 휴지기 0.9초를 두며 하중형태는 반정현파(Half sine)인 경우가 많음을 알 수 있다.

② 실험 절차

실험 절차에서는 실험에 필요한 변수 결정 및 실험 과정에 대하여 알아보았다.

a. 함수비의 결정

Uzan (1998)은 이스라엘 내의 노상재료에 대한 현장 함수비 조사결과를 바탕으로 현장함수비가 소성한계(PL)의 약 1.2~1.3배 됨을 발견하였다. 이를 근거로 노상토에 대한 영구변형 시험시 함수비를 소성한계의 1.22배로 하였다. Elliott(1998)에 의해 조사된 결과에 의하면, 현장 노상토의 함수비는 대부분 최적함수비(OMC)의 100~120% 범위였다. 다른 문헌에서 노상토에 대한 영구변형 시험의 경우, 적용된 함수비는 최적함수비(OMC)를 내외로 하여 그 이상이거나 다소 작은 경우로 구분되었다.

국내 국도에 대한 LTPP 계측자료의 분석결과, 노상의 함수비는 모든 계절에 걸쳐 최적함수비 이상으로 관찰되었다. 따라서 이를 근거로 하여 노상토를 대상으로 하는 영구변형 시험의 경우, 함수비는 Elliott(1998)이 제시한 방법인 최적함수비(OMC) 대비 105%, 110% 및 120%를 채택하였다. 보조기총 및 비처리기총과 같은 조립재료의 경우에는 함수비의 영향이 미미한 것으로 판단하여 함수비의 변화를 배제하고 최적함수비(OMC)에서 제작된 시료를 사용하기로 결정하였다.

b. 다짐도 수준의 결정

영구변형 시험을 위한 시편의 다짐도는 현장다짐도에 최대한 근접하여 확보하여야 하므로 노상토 및 입상보조기총 재료가 시방서에 요구하는 품질 기준에 적합하도록 다져야 한다. 노상토 및 보조기총모두 최대건조다짐밀도 ($\gamma_{d-\max}$) 대비 95%이상이 되도록 다진다.

〈표 9.4〉 입상보조기증 재료에 대한 시험절차(안)

구속응력 (σ_3) (kPa)	전단응력비 ($\frac{\tau_f}{\tau_{\max}}$)	축차 응력 (σ_d) (kPa)	하중 반복 재하횟수	비 고
21	0.3, 0.5, 0.7	아래 (식 9.18) 과 (식 9.19)를 이용하여 축차응력 (σ_d) 결정	각 응력 조합당 10,000 회 이상	다짐은 E 다짐에너지에 준하는 진동다짐으로 실시
35	0.3, 0.7, 0.7			
69	0.3, 0.7, 0.7			
105	0.9 (선택)			

$$\sigma_f = \frac{2\sigma_3 + 2\tan^2 \phi \sigma_3 + \sigma_d + \tan^2 \phi \sigma_d - \sqrt{\tan^2 \phi \sigma_d^2 + \tan^4 \phi \sigma_d^2}}{2(1 + \tan^2 \phi)} \quad \text{식 (9.18)}$$

$$\frac{\tau_f}{\tau_{\max}} = \frac{\sqrt{(\sigma_d/2)^2 - (\sigma_f - (\sigma_3 + \sigma_d/2))^2}}{c + \sigma_f \tan \phi} \quad \text{식 (9.19)}$$

〈표 9.5〉 노상토에 대한 응력조합단계

노상토					
구속응력	축차응력	응력비 (σ_d/σ_3)	반복재하횟수	함수비	다짐도
15kPa	15kPa	1	각응력조합당 10,000회 이상	OMC+ 5, 10, 20 %	최대건조 다짐밀도 의 95% 이상
	30kPa	2			
	45kPa	3			
30kPa	30kPa	1			
	60kPa	2			
	90kPa	3			
45kPa	45kPa	1			
	90kPa	2			
	135kPa	3			

c. 축차응력과 구속응력 및 반복재하 횟수의 결정

하부층의 영구변형 발생에 영향을 미치는 가장 큰 인자는 응력수준과 반복재하횟수이다. 결정된 구속응력과 축차응력의 수준 및 반복재하횟수는 입상보조기층의 경우 <표 9.6>와 같으며 기존 영구변형시험에서 사용된 노상토의 응력수준 및 응력조합의 경우는 <표 9.7>과 같다. 이와 같이 입상보조기층에 대해서만 전단응력비(τ_f/τ_{max} : 전단강도에 전단응력의 비)를 고려하는 이유는 보조기층까지 미치는 축차응력의 영향이 노상에 비하여 상대적으로 크고 이때 전단에 의한 영구변형이 노상토에 비하여 발생하기 쉽기 때문이다. 반면 국내의 두꺼운 표층포장이 대부분인 현실을 고려할 경우 노상토까지 미치는 전단응력과 이로 인해 발생하는 전단변형은 무시할 만큼 작다고 볼 수 있다. 따라서 전단응력비를 고려한 영구변형 시험은 보조기층재료에 국한하여 실시하였다.

③ 영구변형 시험기구의 구성

제안된 영구변형 시험절차를 이용하여 노상토와 입경이 큰 보조기층 재료에 대해 각각 다른 반복삼축시험기구를 적용하였다. 이는 입경이 작고 미세립분이 많은 노상토의 특징과 국내 입상보조기층의 특성상 입경이 최대 39mm에 이르고 입도가 고르지 못하여 큰 입경위주로 생산되는 현실을 고려한 것이다. 노상토에는 일반적인 반복삼축시험기를 이용하되 일정 구속압력을 유지한 상태에서 반복적인 축차응력을 10,000회 이상 가하면서 발생하는 변형률을 정밀하게 기록할 수 있는 기능을 갖추어야 한다. 아울러 입상보조기층의 경우, 최대 39mm에 이르는 입경을 고려하여 <그림 9.21>과 같은 대형반복삼축시험기를 사용하였으며 노상토에 적용하는 동일한 사양의 시험기능을 갖추어야 한다.

대형반복삼축시험장치에서 축압은 유압식으로 150ton을 재하시킬 수 있다. 측압은 10kg/cm^2 까지 발생시킬 수 있는 공기압 콤프레샤를 사용한다. 축하중 및 변형제어는 유압 엑추에이터에 장착되어 있는 Servo Valve에서 이루어지며, 측압제어는 정밀 레귤레이터와 E/P변환기를 사용하여 이루어지도록 설계되었다.

노상토에 대한 영구변형시험을 위하여 채택한 반복 하중재하시험 장비는 Servo Hydraulic Closed-Loop 시스템을 이용하여 작동하며, 최대 축하중은 25kN 까지 가할 수 있다. 또한 노상토 공시체의 다짐은 현장에서 로울러로 다짐한 효과를 재현할 수 있는 선회다짐기(Gyratory Compactor)를 활용하여 직경 100mm 높이 150mm인 원형 공시체를 제작하여 가능한 현장의 조건을 반영하도록 하였다.



〈그림 9.21〉 대형삼축압축 시험장치 전경

5) 영구변형 모형

대표적인 영구변형 모형에는 Power 모형과 VESYS 모형이 있다. 도로포장 구조 설계에서는 대형 반복재하시험으로부터 구한 하부재료의 영구변형 시험데이터를 이용하여 영구변형 예측 모형인 Power 모형과 VESYS 모형의 모형결정계수를 구하였다. 두 모형의 예측 결과를 비교함으로 최종 모형을 결정하였다.

각 영구변형모형의 모형결정계수는 구속응력수준, 전단응력비(입상재료 단위)의 크기에 따라 각각 회귀분석을 실시하여 구하였으며, 〈표 9.6〉은 한 예를 나타낸 것이다.

〈표 9.6〉 입상보조기총에 대한 모형별 회귀분석계수(경상도 화강암)

시험조건		power모델			VESYS 모델			
구속 응력	전단응력비 (초기 5000회)	A	b	R2	μ	ε	α	R2
35kPa	0.3/0.7	0.3	0.0228	0.1679	0.9706	0.0487	0.0785	0.8321
35kPa	0.5/0.7	0.5	0.1839	0.1095	0.9005	0.1242	0.1622	0.8905
35kPa	0.7/0.7	0.7	0.0423	0.3777	0.9335	0.0654	0.2444	0.6223
69kPa	0.3/0.7	0.3	0.0049	0.3340	0.9508	0.0158	0.1047	0.6660
69kPa	0.5/0.7	0.5	0.4214	0.0979	0.9672	0.2725	0.1515	0.9021
69kPa	0.7/0.7	0.7	0.4087	0.2132	0.9959	0.3872	0.2250	0.7868

시험조건		power모델			VESYS 모델			
구속 응력	전단응력비 (후기 5000회)	A	b	R2	μ	ε	α	R2
35kpa	0.3/0.7	0.7	0.0911	0.2611	0.8775	0.1178	0.2020	0.7389
35kpa	0.5/0.7		0.0070	0.4492	0.8771	0.0151	0.2086	0.5508
35kpa	0.7/0.7		0.0423	0.3777	0.9335	0.0654	0.2444	0.6223
69kpa	0.3/0.7		0.1647	0.3342	0.9653	0.1808	0.3045	0.6658
69kpa	0.5/0.7		0.0300	0.3855	0.9123	0.0513	0.2258	0.6145
69kpa	0.7/0.7		0.4087	0.2132	0.9959	0.3872	0.2250	0.7868

$$\epsilon_p(N) = \mu \epsilon N^{-\alpha} \quad \text{식 (9.20)}$$

여기서, $\epsilon_p(N)$: N번째 하중 재하시 발생하는 소성 변형률

μ : 소성 변형률과 회복탄성변형률 사이의 비례상수

ε : 200번째 하중 재하시 발생하는 회복탄성변형률

N : 반복재하횟수

α : 재하횟수에 따른 영구변형 증가량의 감소율

그 결과를 바탕으로 VESYS 모형이 더 높은 정확성을 나타냈기 때문에 (식 9.20)과 같이 입상재료의 영구변형 모형을 결정하였다.

〈표 9.7〉 국내 입상재료에 대한 VESYS 모델 영구변형 매개변수 수정값

층 종류	영구변형 모델결정계수	모델결정계수값
입상기층	α	0.85
	μ	0.12
노상	α	0.90
	μ	0.12

6) 콘크리트 피로 파손 모형

시멘트 콘크리트 포장의 피로강도는 적용 최대응력에 대한 최대강도에 대한 비율로 정의되며 피로강도는 응력수준, 응력비, 하중이력, 재료특성 등 의 다양한 인자에 의하여 영향을 받는다. 콘크리트의 피로거동은 반복하중을 받는 재료에 있어 진행적이고 영구적인 내부 구조의 변화를 일으키며 이러한 변화는 구조물에 손상을 입혀 균열의 진행을 초래하고 만약 응력반복이 충분히 크다면 완전파괴까지 일어난다.

국내에서는 시멘트 콘크리트 포장의 피로파손 모형 개발 연구진은 국내에서 많이 생산되는 화강암, 석회암, 사암에 대하여 1차적으로 휨인장 시험과 쪼掴인장 시험법에 의해서 피로파손 모형을 하였다. 또한 많은 협의를 통해 온도 하중이 미리 재하된 상태에서 교통하중이 재하되는 형태로 모형을 보완하였다. 아스팔트 콘크리트 포장의 피로식에서와 같이 상하향 균열을 고려하였으나, 피로식은 모두 동일하게 적용되었다. 이에 대하여 자세히 살펴보자.

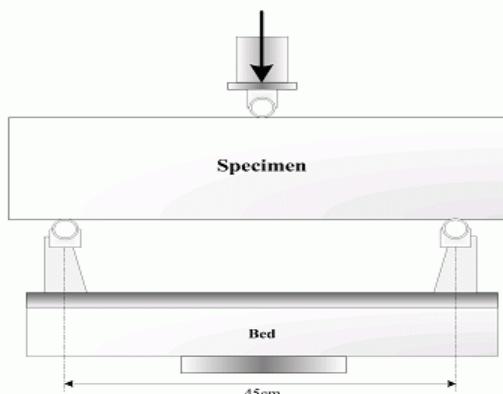
① 휨인장 피로 모형

휘인장 피로실험은 $15 \times 15 \times 55\text{cm}$ 의 각주 공시체를 제작하여 실험하며, INSTRON 8506시험기를 사용하여 정적 강도측정과 동일한 조건인 일단 헌지, 타단 롤러로 지지되고 중앙점에 하중이 재하되는 3점 재하방식으로 KS F 2408의 규정에 의해 실험한다. 실험은 200만 사이클까지 수행한 후 종료한다.

휘인장 피로실험에 사용된 공시체는 피로실험 기간 동안 강도의 증진현

상을 최소화하기 위하여 시험체를 재령 28일 수중양생 한 후 56일까지 공기 중 양생하여 정적 강도측정 결과로부터 응력수준을 계산하여 피로실험에 적용한다. 피로하중 재하시 초기 평균하중까지 도달시간은 실험적으로 결정한 20초를 가하여 시험체의 손상을 방지한다.

〈그림 9.22〉은 흡인장 피로실험 개념도를 나타낸 그림이다. 흡인장 피로 실험 방법에 의한 피로모형은 시험도로에 사용한 골재인 화강암 굽은 골재를 이용하여 KS F 2408 기준에 따라 실험하였다. 실험데이터를 분석하여 〈표 9.8〉과 같이 식을 제안하였다.



〈그림 9.22〉 흡인장 피로시험 개념도

〈표 9.8〉 시험방법 및 굽은 골재 종류별 피로 모형

구 분	피로 모형		비 고
시험 방법별	휩인장 피로시험	$L_n(N_F) = 33.312 - 29.155 \left(\frac{\sigma_{\max}}{MR_{56}} \right)$	화강암
	쪼캡인장 피로시험	$L_n(N_F) = 37.265 - 34.364 \left(\frac{\sigma_{\max}}{S_{split}} \right)$	화강암 석회암 사암
굽은 골재 종류별	화강암	$L_n(N_F) = 32.250 - 28.011 \left(\frac{\sigma_{\max}}{S_{split}} \right)$	쪼캡인장 방법
	석회암	$L_n(N_F) = 38.283 - 35.336 \left(\frac{\sigma_{\max}}{S_{split}} \right)$	"
	사암	$L_n(N_F) = 39.541 - 37.594 \left(\frac{\sigma_{\max}}{S_{split}} \right)$	"
여기서 N_F : 피로수명 σ_{\max} : 최대작용하중 MR_{56} : 재령 56일 휩인장강도 S_{split} : 재령 56일 쪼캡인장강도			

〈그림 9.23〉 쪼개인장 피로실험에
사용된 시험체 및 실험 장치

② 쪼갬인장 피로 모형

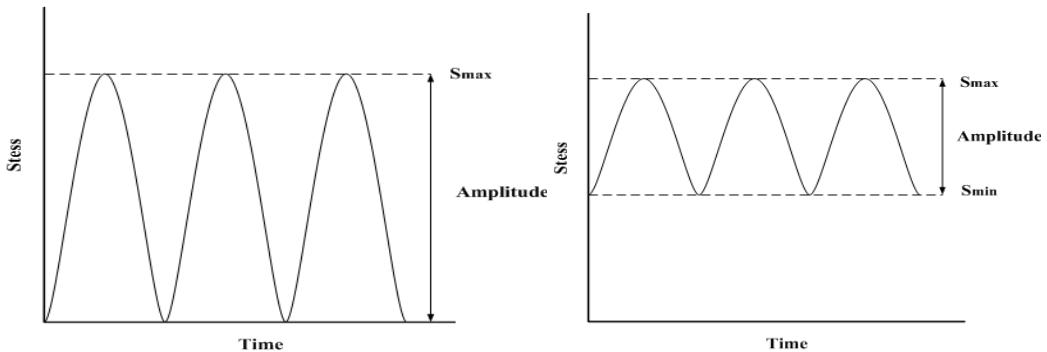
도로포장 구조 설계에서는 쪼갬인장 피로실험 방법을 포장 콘크리트의 피로실험 방법으로 정립하였다. 이 방법은 KS F 2423 규정에 따라 $15 \times 30\text{cm}$ 의 원주형 공시체를 제작하여 28일 동안 표준양생을 실시한 후 피로시험기간 동안 강도의 증진현상을 최소화하기 위하여 재령 56일까지 공기 중에 양생한 후 피로시험을 실시한다. 56일간의 양생 후 정밀시료절단기를 이용하여 $15 \times 30\text{cm}$ 원주형 공시체를 $15 \times 7.5\text{cm}$ 가 되도록 절단하고 절단된 공시체를 버어니어 캘리퍼스를 이용하여 4점을 측정하여 이에 대한 평균치가 공시체의 두께에 대한 측정오차 $7.5 \pm 0.2\text{cm}$ 이내가 되는지 측정한 후 실험에 사용한다. 실험은 INSTRON 8516시험기를 사용하고 공시체의 상·하면에 3mm 두께의 합판을 접착제로 부착하여 시험기에 정확히 수직이 되도록 장착한 후 실험한다. <그림 9.23>는 실험장치 및 전경을 나타내는 사진이다.

쪼갬인장 피로실험 방법에 의한 피로모형은 화강암, 석회암, 사암 굵은 골재로 제작한 공시체를 이용하여 실시하여 <표 9.8>에 나타난 식들을 도출하였다.

③ 응력비를 고려한 피로 모형

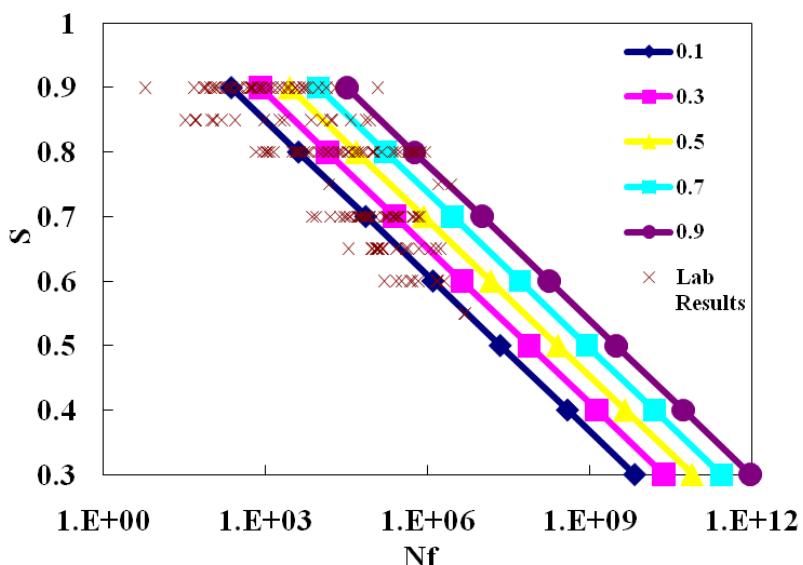
기존 대부분의 피로모형은 <그림 9.24>과 같이 최소응력을 고려하지 않고 최대응력만을 발생시키면서 개발되었기 때문에 환경하중을 고려할 수 없다. 하지만, 실제 시멘트 콘크리트 포장은 앞에서 언급한 것과 같이 환경하중에 의한 응력이 발생한 상태에서 교통하중에 의한 응력이 추가되는 것이기 때문에 피로모형을 합리적으로 개발하기 위해서는 최소응력과 최대응력 비 (R)를 고려하여야 한다. <그림 9.25>과 같이 최소응력을 도입한 후 추가의 응력을 도입하여 최대응력에 도달하게 하는 논리의 피로모형이 제시되어져야 한다.

시멘트 콘크리트 포장에 교통하중이 재하되기 전에 적용되는 환경하중의 영향을 합리적 수준으로 고려할 수 있는 피로모형을 개발하기 위하여, 기존 모형 및 국내외 타 모형에 대한 검토하여 피로 모형 보정을 위한 자료로 이용하였다.



〈그림 9.24〉 최소응력(S_{min})이 고려되지 않은 하중재하 〈그림 9.25〉 최소응력(S_{min})이 고려된 하중재하

$$\text{LogNf} = 13.291 - 12.431 * S + 2.677 * R \quad (R^2 = 0.726)$$



〈그림 9.26〉 개발 모형의 R에 대한 민감도

다중 선형 회귀분석을 통해 제안한 모형은 $R^2 = 0.723$ 을 지니며 다음 (식 9.16)과 같았다. 〈그림 9.26〉는 개발모형의 R에 관한 민감도 결과와 실

제 데이터간의 관계를 도시 것이다. 타 연구에서 $R \geq 0.5$ 이상일 경우 S-N 선도의 기울기가 급격하게 누워 피로수명이 기하급수적으로 증가 하였지만, 도로포장 구조 설계에서의 모형은 $R \geq 0.5$ 선도의 절편에 관계하고 따라서 R 이 커져도 피로수명이 급격하게 변하지 않았다.

$$\text{Log}(N_f) = 13.291 - 12.413(S) + 2.667(R) \quad (\text{식 } 9.16)$$

여기서, N_f : 피로수명,
 S : 최대응력과 강도의 비,
 R : 최소응력과 최대응력의 비

④ 스팔링 모형

스파링이란 줄눈 또는 균열의 단부에서 콘크리트의 일부가 떨어져 나가는 파손으로 정의된다. SHRP에서는 스팔링 파손의 정도에 따라, 스팔링의 폭이 75mm 이내인 경우를 하급, 75~150mm의 범위인 경우를 중급, 150mm를 초과하는 경우를 상급 스팔링으로 분류하고 있다. 스팔링은 비압축성 물질의 침투, 콘크리트 재료의 성능저하, 하중전달기구의 문제, 줄눈에서의 급작스러운 중하중에 의한 인장응력 발생 등에 의해 발생하는 것으로 알려졌다. 도로포장 구조 설계에서는 직접적으로 공용성을 판단하는 기준은 아니지만 IRI 예측 모형의 입력 변수로 사용된다.

〈표 9.9〉 스플링 모형의 개발을 위한 자료

노선	행선	시점 (km)	종점 (km)	스플링 비율 (%)	재 령 (years)	연평균 강수량 (m)	수정동결 지수 (°C·days)	쪼셉 인장강도 (MPa)	슬래브 두께 (m)	중차량 비율 (%)
남해선	순천방향	14.0	13.8	0.0	6.5	1.49	116	4.04	0.390	0.361
				0.0	11.5	1.49	116	4.04	0.390	0.394
	순천방향	46.9	46.7	0.0	6.5	1.49	128	5.55	0.230	0.399
				2.9	11.5	1.49	128	5.55	0.230	0.428
	부산방향	5.9	6.1	0.0	5.4	1.49	129	5.21	0.326	0.376
				0.0	10.4	1.49	129	5.21	0.326	0.380
	순천방향	42.4	42.2	0.0	6.5	1.49	135	4.85	0.313	0.399
				0.0	11.5	1.49	135	4.85	0.313	0.425
경부선	부산방향	66.15	65.95	2.9	8.5	1.27	133	4.84	0.288	0.551
				2.9	13.5	1.27	133	4.84	0.288	0.536
	서울방향	72.4	72.6	0.0	6.5	1.03	151	5.19	0.279	0.539
				0.0	11.5	1.03	151	5.19	0.279	0.523
	서울방향	72.9	71.1	0.0	6.5	1.03	152	5.79	0.282	0.539
				0.0	11.5	1.03	152	5.79	0.282	0.523
	부산방향	235.6	235.4	2.9	6.8	1.16	361	5.48	0.311	0.566
				2.9	11.8	1.16	361	5.48	0.311	0.541
호남선	부산방향	236.6	236.4	0.0	6.8	1.16	371	5.76	0.302	0.566
				0.0	11.8	1.16	371	5.76	0.302	0.541
	천안방향	19.05	19.25	0.0	2.5	1.49	194	5.57	0.267	0.368
				0.0	7.5	1.49	194	5.57	0.267	0.356
88선	순천방향	39.05	38.85	2.9	2.5	1.49	236	5.44	0.306	0.359
				5.9	7.5	1.49	236	5.44	0.306	0.372
	고서방향	121.5	121.3	5.9	14.9	1.27	262	5.07	0.301	0.438
				5.9	19.9	1.27	262	5.07	0.301	0.467
제2 경인선	고서방향	57.5	57.3	2.9	14.9	1.31	284	4.1	0.298	0.497
				8.8	19.9	1.31	284	4.1	0.298	0.510
	안양방향	18.35	18.55	2.9	4.8	1.34	378	6.1	0.312	0.304
				5.9	9.8	1.34	378	6.1	0.312	0.276
서해안선	목포방향	318.0	317.8	0.0	4.8	1.27	417	5.89	0.310	0.416
				0.0	9.8	1.27	417	5.89	0.310	0.386
	인천방향	312.0	312.2	0.0	4.8	1.27	421	4.51	0.299	0.388
				5.9	9.8	1.27	421	4.51	0.299	0.374
중부선	남이방향	348.7	348.5	2.9	11.4	1.3	514	6.34	0.294	0.348
				2.9	16.4	1.3	514	6.34	0.294	0.355
	남이방향	346.9	346.7	5.9	11.4	1.3	522	6.2	0.298	0.348
				5.9	16.4	1.3	522	6.2	0.298	0.355
영동선	강릉방향	127.8	128.0	0.0	4.4	1.29	598	4.81	0.329	0.366
				5.9	9.4	1.29	598	4.81	0.329	0.330
	인천방향	127.8	127.6	2.9	4.4	1.29	600	4.89	0.295	0.379
				2.9	9.4	1.29	600	4.89	0.295	0.345
	강릉방향	135.8	136.0	2.9	4.4	1.29	612	6.18	0.299	0.352
				8.8	9.4	1.29	612	6.18	0.299	0.312
	인천방향	136.0	135.8	0.0	4.4	1.29	613	5.07	0.361	0.330
				8.8	9.4	1.29	613	5.07	0.361	0.366

1) 자료 수집

스폴링 모형의 개발을 위해서 사용된 LTPP 구간은 <표 9.9>에서와 같이 중부선 2개소, 경부선 5개소, 남해선 4개소, 호남선 2개소, 제 2경인선 1개소, 서해안선 2개소, 영동선 4개소 88선 2개소로 총 22개소이다. 스팔링 모형의 개발에는 위의 구간에 대해서 1999년도와 2004년도에 조사한 자료 44개를 사용하였다. 스팔링 파손의 정량화는 위에서 언급한 SHRP의 스팔링의 구분방법을 사용하였고 이 가운데 모형의 정량화에는 중·상급 스팔링이 발생한 줄눈의 비율을 사용하였다. 재령, 수정동결지수, 콘크리트 쪼ヶ인장강도, 연평균 강수량, 연평균 습도, 연평균 풍속, 연평균 적설량 등 관련문헌의 조사를 통하여 스팔링에 영향을 미칠 것으로 판단되는 인자들에 대하여 다중 회귀분석을 실시하였으며, 그 중 스팔링 파손과 상관성이 높은 재령, 동결지수, 콘크리트의 쪼ヶ인장강도, 연평균 강수량, 슬래브 두께, 중차량 비율을 스팔링 모형의 변수로 선정하였다.

2) 모형 개발

시멘트 콘크리트 포장 22개 LTPP 구간에서 1999년과 2004년의 두차례에 걸쳐 스팔링 파손 및 관련된 인자들을 조사하였다. 폭 75mm를 초과하는 중급 이상의 스팔링 발생에 미치는 인자들을 민감도 분석에 의하여 결정한 결과, 콘크리트의 재령(years), 연평균강수량(mm), 수정동결지수(°C-days), 쪼ヶ인장강도(MPa), 슬래브 두께(m), 중차량 비율 등이 큰 영향을 미치는 것을 발견하였고 이를 변수로 사용하여 스팔링 파손을 예측하는 모형을 다음과 같이 제시하였다. 개발된 스팔링 모형의 각 변수는 조사된 22개 구간에서 <표 9.10>의 평균값을 갖는 것으로 나타났다.

$$\text{Spalling} = \frac{\text{AGE}^2}{\text{AGE} - 0.4111} \cdot \left[0.0015 \cdot \text{TRUCKRATIO} \cdot \text{AGE} + 0.0311 \sqrt{\text{FI} \cdot \text{PRECIP}} \right] \\ \left[-0.0953 \cdot \text{STRENGTH} - 1.0071 \cdot \text{THICKNESS} + 0.4462 \right]$$

식 (9.21)

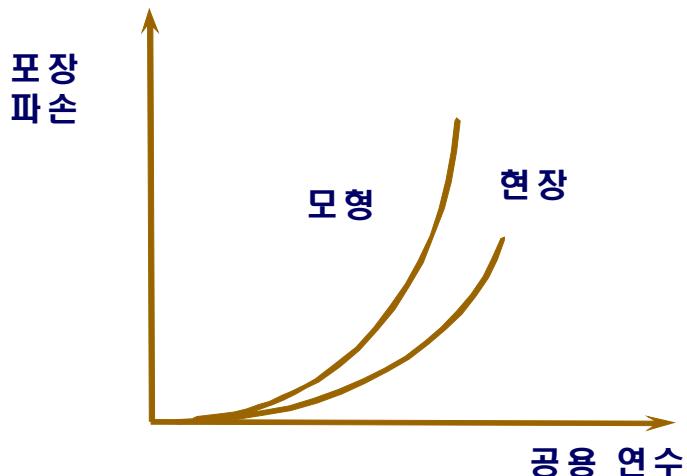
〈표 9.10〉 스팔링 모형에 사용된 변수의 평균값

변수명		평균값
spalling (%)		2.53
AGE	재령(years)	9.3
PRECIP	연평균강수량(mm)	1.31
FI	수정동결지수(°C-days)	333
STRENGTH	쪼개인장강도(MPa)	5.31
THICKNESS	슬래브두께(m)	0.304
TRUCKRATIO	중차량 비율	0.416

본 모형의 민감도 분석 결과에서는 쪼개인장강도, 슬래브 두께, 수정동결지수, 연평균 강수량, 재령, 중차량비율의 순으로 모형의 민감도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

9.3 현장 공용성 자료

실내실험을 통해 개발된 공용성 모형(피로 균열 및 영구변형)을 이용하여 공용 연수에 따른 포장체의 파손 정도를 예측하는 것은 〈그림 9.27〉와 같이 실제 현장에서의 공용성과 차이가 발생한다. 이처럼 실내 모형의 한계를 보완하기 위하여 일반적으로 현장 자료를 이용하여 검증하고 보완한다. 모형과 현장 데이터가 일치할 경우는 추가 작업이 필요 없지만, 그렇지 않을 경우(대다수의 경우)는 현장 공용성 결과에 맞게 모형들을 보완해야 한다. 전이함수(Transfer Function) 및 Shift Factor 라고 일컫는 수식이나 계수값들은 이를 위한 것이다. 여기에서는 아스팔트 콘크리트 포장의 피로모형, 영구변형 모형 및 시멘트 콘크리트 포장의 피로모형의 모형 보완을 위한 현장 자료 수집 과정을 다뤘다.



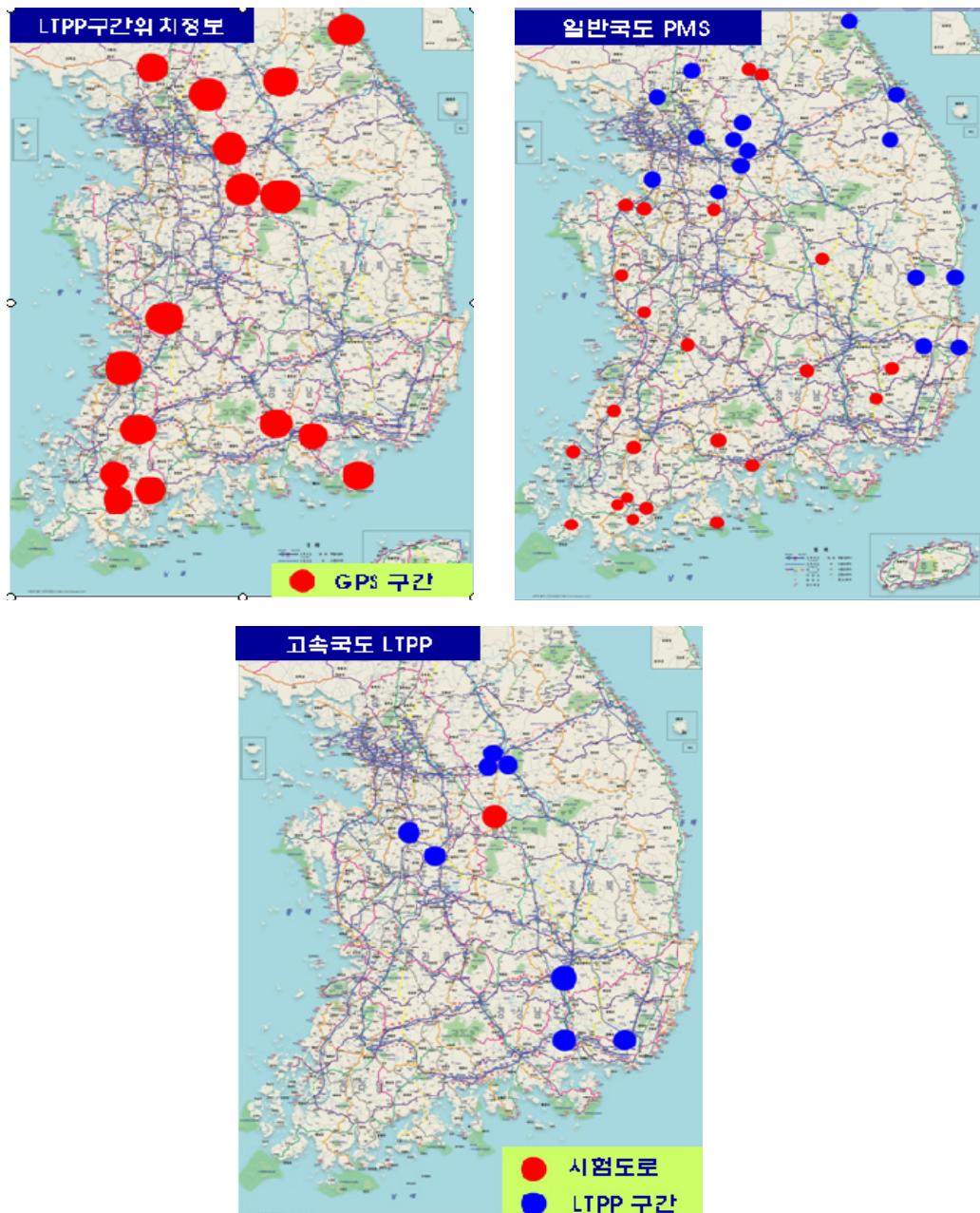
〈그림 9.27〉 현장 자료를 이용한 모형 보정의 필요성

9.3.1 아스팔트 콘크리트 포장

(1) 피로파손 모형 검증을 위한 데이터 수집

가. 조사 자료 및 구간의 선정

현재 도로포장 구조 설계의 아스팔트 포장 공용성 모형의 전이함수 개발을 위하여 일반국도 LTPP, 일반국도 포장관리시스템(PMS), 한국도로공사시험도로 및 고속국도 LTPP에 대한 분석을 통하여 단면을 선정하였으며, 〈그림 9.28〉에 각각 나타내었다.



〈그림 9.28〉 아스팔트 콘크리트 포장 설계의 현장 데이터 수집 구간

	시골년도	영구변형(mm)			피로균열(상향)(%)			피로균열(하향)(m/km)					
		2004	2005	2006	2007	2004	2005	2006	2007	2004	2005	2006	
국도 LTPP	G 1111	2004		4.9	7.82			0.288	0.84			7.40	114.95
	G 1211	1998		6.5	7.01			0.000	0.73			90.19	71.56
	G 2111	1998		8.6	9.67			0.000	1.26			78.25	299.52
	G 2211	1992		7.4	11.17			0.137	0.00			924.30	831.08
	G 1112	1999		4.5	8.12			0.000	0.00			41.67	56.67
	G 1212	1998		6.7	8.33			0.000	0.00			26.15	84.07
	G 2112	2000		9.7	10.02			0.000	0.00			163.26	175.23
	G 2212	1998		6.2	6.54			0.000	0.00			119.17	146.25
	G 1121	2000		6.2	6.84			0.000	0.00			226.86	375.97
	G 1221	1996		6.2	6.17			0.000	0.00			164.52	189.89
	G 2121	1999		8.3	9.58			0.000	0.00			73.32	226.17
	G 2221	1998		6.5	5.84			0.124	0.06			300.87	426.07
	G 1122	1999		3.5	6.44			0.000	0.00			153.68	169.63
	G 1222	1998		3.9	8.02			0.000	0.00			136.47	261.91
	G 2122	2001		7.3	7.90			0.000	0.00			187.60	250.19
	G 2222	2000		5.4	5.12			0.000	0.03			67.20	135.30
국도	A13	2003.12	0.79	7.36	15.07	0	2.65	8.85		45.40	272.40	232.31	
	A14	2003.12	0.75	1.75	4.13	0	0	0		0	0	0.000	
	A15	2003.12	0.36	2.07	3.79	0	0	3.44	2.04	0.000	53.84	50.93	
	A2	2003.12	0.64	0.93	0.79	0	0	0	1.62	0.000	0.00	64.59	
	A10	2003.12	0.25	0.75	1.38	0	0	0	0	0.000	26.29	33.55	

〈그림 9.29〉 공용성 자료

일반국도 LTPP는 16단면이며, 일반국도 포장관리시스템은 37단면, 한국도로공사 고속국도 LTPP는 8단면, 시험도로는 34단면으로 각각 이루어져 있다. 한국도로공사에서 운용중인 시험도로는 설계 전이함수 개발을 위하여 건설되었으며, 입도 및 충두께가 다르게 이루어져 있다.

나. 공용성 자료

전이함수 개발을 위해서는 조사단면에 대한 공용성 정의와 조사구간 표준화가 필요하다. 특히 한국건설기술연구원과 한국도로공사 두 기관의 영구변형량 및 면상 피로균열율에 대한 정의는 동일하였으나, 선상 피로균열에 대한 정의가 다르므로 이에 대한 정의를 통일하였다. 공용성 조사대상 구간을 1 km로 설정하였다.

포장의 공용년수는 영구변형량, 상하향 피로균열 길이를 측정한 년도에서 시공년도를 감하여 산정하였으며, 영구변형량은 mm, 하향균열길이는 조사대상 구간내에 존재하는 선 균열의 길이인 m/km, 상향 피로균열율은 조사구간 면적에 대한 균열발생 면적의 비로 각각 나타내었다. 〈그림 9.29〉에 공용성 자료 DB예를 나타내었다.

1) 아스팔트 층 재료물성

포장층의 재료는 크게 아스팔트층과 하부층으로 나뉘어지며, 아스팔트층은 표층, 중간층, 아스팔트 기층으로 이루어져 있다. 아스팔트층의 재료물성인 동탄성계수를 예측하는데 사용되며, 골재입도 분포와 아스팔트 혼합물 부피특성, 아스팔트 바인더 점성특성 등으로 이루어져 있다. 아스팔트 층의 자료로는 아스팔트 층 두께, 입도종류, 골재크기, 아스팔트 종류, 아스팔트 함량, 시공초기 공극률, 유효아스팔트 부피 함량 등으로 이루어져 있으며, 동탄성 계수 예측의 주요 입력변수이다. 유효아스팔트 부피함량은 아스팔트 혼합물 부피관계에 의하여 산정하여야 하나 일반적으로 아스팔트 함량의 두 배로 예측할 수 있다. <그림 9.30>에 아스팔트 표층의 재료물성 자료를 <그림 9.31>에 골재입도 분포자료인 19mm 누적 잔류량, 9.5mm 누적 잔류량, 4.75mm 누적 잔류량, 0.075mm 통과량을 각각 나타내었다.

국도 LTPP	섹션 ID	도로구분	도로번호	지역구분	속도	차로수	길이(미터)	시공년도	표층							Veff	
									두께	입도종류	골재크기	아스팔트 종류		아스팔트 함량	공극률		
												PG64-22	PG58-22				
	G 1111	일반국도	2	지방	진주	4	아스팔트	2004	5	밀입도	19	PG64-22	5.8	7.9	11.6		
	G 1211	일반국도	2	지방	장충	4	아스팔트	1998	4	밀입도	13	PG64-22	6.4	5.4	12.8		
	G 2111	일반국도	2	지방	장충	4	아스팔트	1998	5	밀입도	19	PG64-22	6.7	4.9	13.4		
	G 2211	일반국도	3	지방	진주	2	아스팔트	1992	4	밀입도	13	PG58-22	7.8	2.2	15.6		
	G 1112	일반국도	7	지방	속초	4	아스팔트	1999	5	밀입도	13	PG58-22	5.3	5.3	10.6		
	G 1212	일반국도	3	지방	충주	4	아스팔트	1998	6	밀입도	13	PG58-22	5.8	2.1	11.6		
	G 2112	일반국도	44	지방	홍천	4	아스팔트	2000	4	밀입도	13	PG58-22	4.9	8.1	9.8		
	G 2212	일반국도	36	지방	충주	2	아스팔트	1998	5	밀입도	13	PG64-22	5.3	1.9	10.6		
	G 1121	일반국도	13	지방	장충	4	아스팔트	2000	5	밀입도	19	PG64-22	7.1	5.6	14.2		
	G 1221	일반국도	23	지방	부안	2	아스팔트	1998	5	밀입도	19	PG64-22	5	2.9	10		
	G 2121	일반국도	24	지방	광주	4	아스팔트	1999	5	밀입도	19	PG64-22	6.9	7.3	13.8		
	G 2221	일반국도	14	지방	거제	4	아스팔트	1998	4	밀입도	13	PG58-22	6.8	5.1	13.6		
	G 1122	일반국도	42	지방	양평	4	아스팔트	1999	10	밀입도	13	PG58-22	5.9	1.7	11.8		
	G 1222	일반국도	37	지방	양평	4	아스팔트	1998	9	밀입도	13	PG58-22	6.2	1.5	12.4		
	G 2122	일반국도	1	지방	군산	4	아스팔트	2001	5	밀입도	19	PG64-22	5.3	2.7	10.6		
	G 2222	일반국도	37	지방	서울	4	아스팔트	2000	6	밀입도	19	PG64-22	5.3	4.5	10.6		

<그림 9.30> 아스팔트 콘크리트 포장 표층 입력자료

표총						
	ID	입도종류	입도크기	19mm누적잔류량	9.5mm누적잔류량	4.75mm누적잔류량
국도 LTPP	G 1111	밀입도	19	2.5	28	45
	G 1211	밀입도	13	0	17	37.5
	G 2111	밀입도	19	2.5	28	45
	G 2211	밀입도	13	0	17	37.5
	G 1112	밀입도	13	0	17	37.5
	G 1212	밀입도	13	0	17	37.5
	G 2112	밀입도	13	0	17	37.5
	G 2212	밀입도	13	0	17	37.5
	G 1121	밀입도	19	2.5	28	45
	G 1221	밀입도	19	2.5	28	45
	G 2121	밀입도	19	2.5	28	45
	G 2221	밀입도	13	0	17	37.5
	G 1122	밀입도	13	0	17	37.5
	G 1222	밀입도	19	2.5	28	45
	G 2122	밀입도	19	2.5	28	45

〈그림 9.31〉 아스팔트 콘크리트 포장 표총 골재입도 입력자료

두께	보조기총			노상총			
	최대건조단위증량	균등계수	#4체 통과량	최대건조단위증량	균등계수	최적합수비	#200체통과량
34	21.76	40	60.8	20.82	16.17	10.25	4.2
40	21.76	40	60.8	18.75	10	11.9	6
40	21.76	40	60.8	20.4	12.73	9.78	9.393
25	21.25	40	42.9	20.82	16.17	10.25	4.2
20	21.49	40	37.8	18.75	10	11.9	6
30	21.49	40	37.8	18.75	10	11.9	6
45	21.49	40	37.8	21.1	16.3	8.6	4.1
20	21.49	40	37.8	18.1	18	13.42	3.92
40	21.76	40	60.8	18.75	10	11.9	6
35	21.65	40	36.5	19.89	14.5	11.7	4.25
40	21.76	40	60.8	20.4	12.3	19	3.95
30	21.76	40	60.8	18.75	10	11.9	6
20	21.12	40	49.6	20.75	15.5	8.3	4.506
25	21.12	40	49.6	20.3	15.8	9.3	4.8
40	21.65	40	36.5	18.75	10	11.9	6
25	21.12	40	49.6	18.38	15.4	13.8	4.05

〈그림 9.32〉 하부지반 물성 입력자료

	시공연도	시공년도 ADOT	증가율	12종 분류 대수									
				1종	2종	3종	4종	5종	6종	7종	8종	9종	10종
국도 LTPP	G 1111	2004	10127	9.0	7,162	3	140	1,540	560	120	100	257	51
	G 1211	1998	11763	0.0	7,855	274	1,916	136	275	797	91	77	2
	G 2111	1998	4430	10.4	2,655	39	158	891	263	92	66	145	1
	G 2211	1992	11161	14.5	7,049	25	597	2,315	330	436	102	232	-
	G 1112	1999	25244	1.7	20,659	56	750	2,613	694	333	83	28	-
	G 1212	1998	12485	0.0	7,371	40	1,189	3,092	317	40	317	79	-
	G 2112	2000	10145	7.1	7,259	-	657	800	886	86	200	114	-
	G 2212	1998	3716	0.0	2,356	-	159	884	159	45	45	23	-
	G 1121	2000	10336	1.3	5,426	91	1,155	2,660	623	46	122	167	-
	G 1221	1996	9711	0.0	4,920	27	256	2,580	309	769	84	198	-
	G 2121	1999	1570	0.0	832	-	-	600	115	-	23	-	-
	G 2221	1998	24016	2.3	17,612	202	844	4,256	532	238	238	92	-
	G 1122	1999	12751	0.0	8,223	47	320	2,370	785	195	257	313	29
	G 1222	1998	7349	0.0	5,182	68	203	1,693	135	-	34	34	-
	G 2122	2001	9570	0.0	5,441	138	95	2,093	530	673	190	359	-
	G 2222	2000	7696	4.0	5,352	53	119	1,643	199	132	53	-	13

〈그림 9.33〉 교통하중 입력자료 예

2) 하부층 재료물성

하부지반 중 재료 물성 자료는 자료의 형태가 기존과 달라 수집에 어려움이 있다. 일반국도 LTPP구간의 노상층에 대한 재료물성 자료가 8구간 존재하며, 일반국도 SPS(Special Pavement Studies)에 7구간에 대한 보조기층, 노상층, 동방층에 대한 자료가 있다. 하부지반 자료가 존재하지 않는 단면에 대한 하부 물성은 근접한 곳의 자료를 이용하였다. <그림 9.32>에 하부지반 자료를 나타내었다.

3) 교통하중

교통하중의 입력변수는 시공년도의 AADT, 교통량 증가율, 12종 교통하중 분류로 이루어져 있다. 2008년도부터 12 차종 분류가 이루어졌으며, 그 이전에 측정한 교통하중 분류는 관계에 의해 12차종으로 분류하였다. <그림 9.33>에 교통하중 자료를 나타내었다.

(2) 아스팔트층 영구변형 모형 검증을 위한 데이터 수집

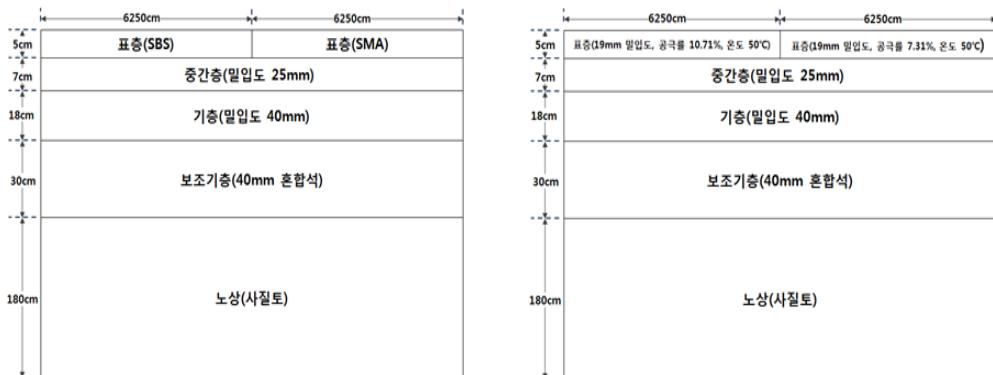
가. 실험 방법

영구변형을 현장에서 측정하거나 대규모의 현장 시험시공을 통해 이를 검토할 경우에는 많은 시간과 비용이 소요된다. 또한 이 방법들은 실험 요인 외의 요인들로 인해 자료가 상관성이 없어 활용하기 어려운 경우도 있기 때문에 포장 가속 실험장비를 이용하여 이를 평가하는 방법을 많이 사용한다. 도로포장 구조 설계에서는 포장 가속 실험장비를 이용하여 각 아스팔트 재료의 영구변형에 대한 저항성을 평가하였다.

다음 <그림 3.34>은 가속 실험장비에 사용된 포장단면의 특성과 재료 및 온도 특성을 나타내고 있는데, 밀입도 아스팔트 구간은 도로공사의 시험도로 단면과 동일하며, SMA, SBS구간은 일반적으로 국내에서 시공되고 있는 표층 5cm단면을 반영하고 있다. 또한 포장 가속실험에서는 교통하중 재하횟수, 하중재하시의 온도, 아스팔트 혼합물의 공극률, 재료가 실험변수로 결정되었으며, 하중재하에 따른 횡방향 영구변형과 단면내 온도 분포를 계측하였다.

영구변형량은 MDD 및 Laser를 이용하여 측정하였으며, 영구변형이 발생하기 전에 측정된 초기값을 기준으로 하중재하에 따라 발생하는 영구 변형량을 계산하였다.

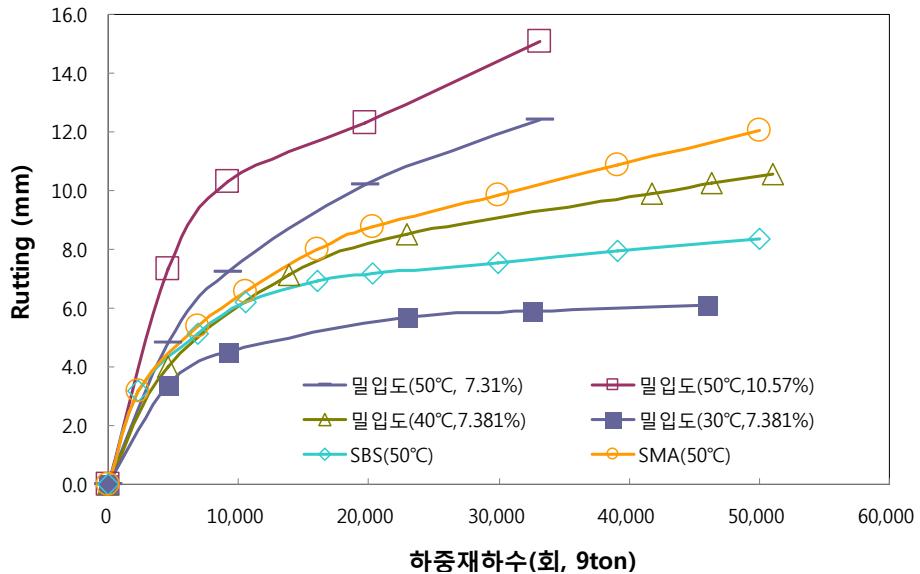
다음 <표 9.11>은 포장 가속실험에 사용된 하중 및 온도조건을 구체적으로 나타내고 있다. 또한 현실적인 변형량의 발생을 모사하기 위하여 Wandering을 고려하였는데, Wandering은 Dual Tire 중심에서 $\pm 35\text{cm}$ 이 발생하도록 하였으며, 하중재하 위치별 하중 적용수를 정규분포 형태로 적용하였다.



<그림 9.34> 가속실험에 사용된 개질(좌) 및 밀입도 혼합물의 포장 단면

<표 9.11> 가속실험에 사용된 하중 및 온도조건

구 분	포장가속시험조건
하 중	9.0ton
타이어 내부압	1.00 Mpa
타이어 접지압	0.723 Mpa
타이어 접지면적	1220.1 cm^2
축	단축 복륜
시험 온도	50°C (아스팔트 콘크리트 포장 층 깊이 5cm)



〈그림 9.35〉 하중재하 횟수에 따른 실험 조건별 영구 변형량의 변화

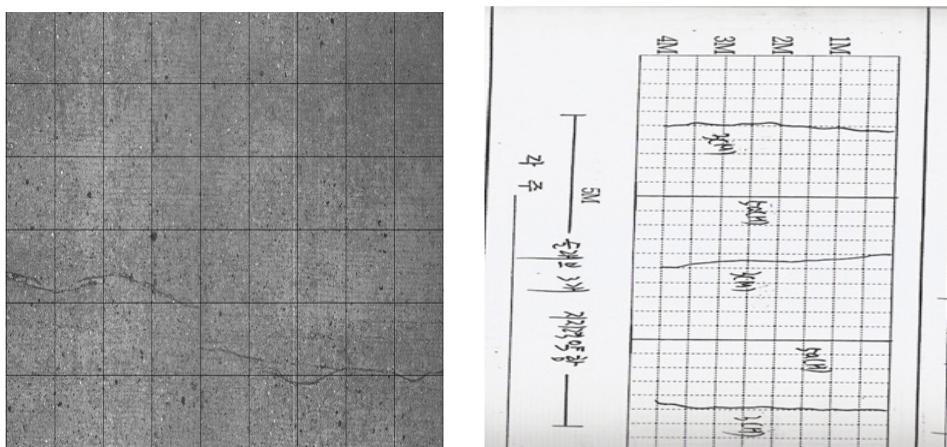
나. 포장 가속실험 장비를 이용한 영구변형 측정 결과

다음 〈그림 9.35〉은 재료별 하중재하횟수에 따른 영구변형량을 나타내고 있다. 일반적으로 알려진 바와 같이, 밀입도 혼합물에서 가장 큰 영구변형이 관찰되었으며, 공극률이 높을수록 영구변형량이 큰 것으로 나타났다. 또한 대부분의 영구변형이 하중초기 10,000이하에서 발생하여 영구변형이 포장 포설이후 초기에 발생하는 것으로 측정되었다. SBS와 SMA의 경우 초기 영구변형량은 비슷하게 발생하였으나, 하중회수가 증가함에 따라서 SBS에서 발생하는 영구변형량이 SMA보다 적은 것으로 나타나, SBS의 저온균열 저항성 뿐만 아니라 영구변형에 대한 저항성도 SMA보다 좋은 것으로 나타났다.

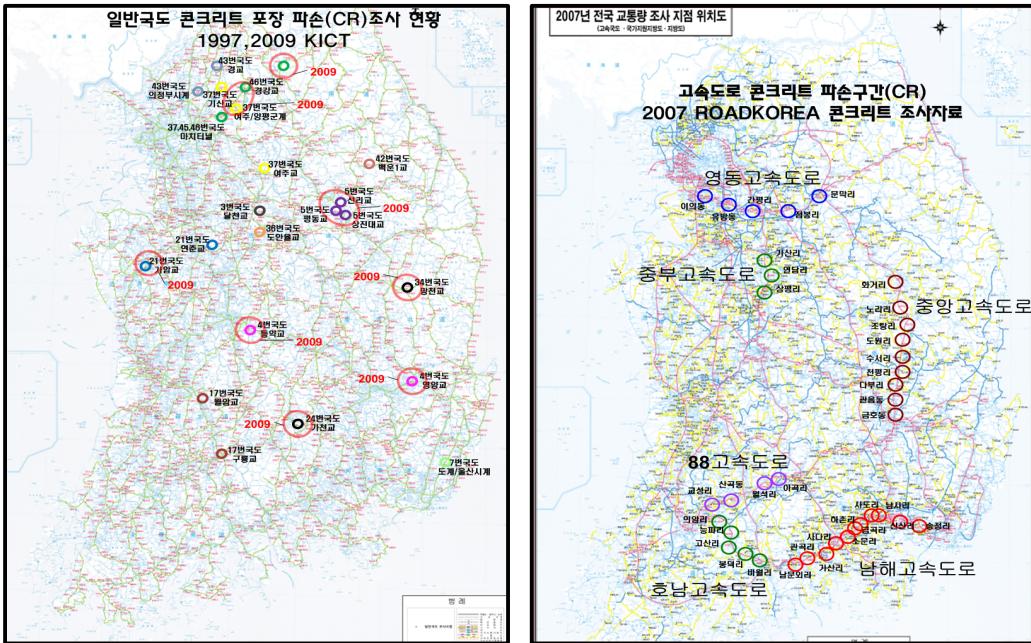
9.3.2 시멘트 콘크리트 포장

(1) 조사 자료 및 구간의 선정

현재 도로포장 구조 설계의 시멘트 콘크리트 포장 공용성 모델의 전이함 수 개발을 위하여 일반국도 PMS 보고서, 한국도로공사 고속국도 LTPP 대장 및 도로포장평가 전문회사의 파손조사 자료에 대한 분석을 실시하여 콘크리트 포장 파손이 발생한 지역을 파악하였다. 일반국도 시멘트 콘크리트 포장의 공용성 자료는 한국건설기술연구원의 PMS팀에서 1997년 조사한 보고서를 참고하여 파악하였는데, 총 10개 노선에 대하여 500m의 단위 구간 길이로 총 616개소의 자료를 얻을 수 있었지만, 균열 맵 및 사진자료는 없었고, 공용성 자료에 대해 각각 표로 정리되어 있었다. 또한 일부구간에 대해서 <그림 9.36>의 좌측 그림과 같이 2008년에 자체 개발한 자동조사장비로 조사한 사진 자료를 얻어 10년후 같은 위치의 공용성 자료의 변화를 검토할 수 있었다. 고속도로 자료는 도로공사 LTPP 조사대장 자료(1998, 2004)와 도로포장 평가 전문회사의 공용성 조사 자료를 참고하였다. LTPP 조사대장은 1998년 및 2004년에 10개 구간 150m 단위로 조사된 42개소에 대한 파손자료에 대하여 그림 9.40>의 우측 그림과 같이 균열 맵에 도시되어 있었다. 로드코리아의 자료는 자동조사장비인 ARAN을 통해 10m마다 스캔한 사진자료를 통해 분석되어진 자료로 균열 및 파손이 발생한 지역의 데이터를 얻었다. 다음 <그림 9.37>는 일반국도와 고속국도 공용성 자료가 조사된 위치를 파악하여 도시한 것이다.



<그림 9.36> 자동조사장비의 사진 자료(좌) 및 LTPP 조사대장(우)



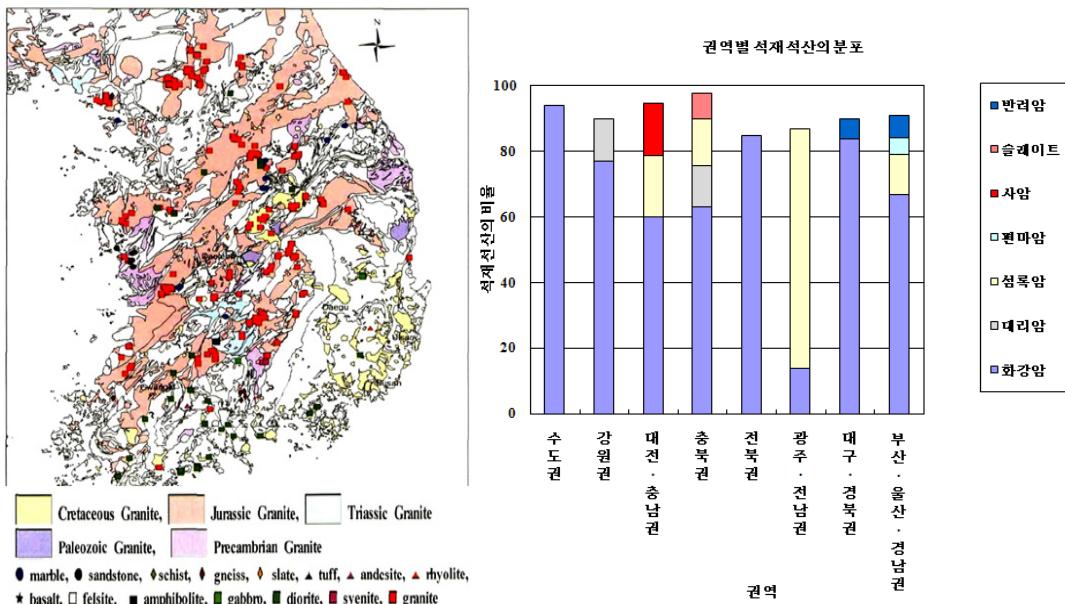
〈그림 9.37〉 일반국도(좌) 및 고속국도(우) 공용성 조사 현황

(2) 국내 공용성 자료

전이함수 개발을 위해서는 조사단면에 대한 공용성 정의와 조사구간 표준화가 필요하다. 도로공사의 경우 선상균열율의 정의가 슬래브의 길이 당 균열의 길이로 정의하였다. 하지만 본 구조 설계연구의 피로균열의 정의는 총 슬래브 당 균열 슬래브의 수로 정의하고 공용성 모델을 개발하였으므로 도로공사의 조사자료를 재검토하여 본 연구의 목적에 맞게 수정하였다. 또한 공용성 조사대상 구간을 1 km로 설정하여 500m 당 조사된 자료를 1km 기준의 자료로 재가공하였다. 그리고 스팔링도 균열과 마찬가지로 총 슬래브 당 발생 슬래브수로 정의 하였고, 평탄성은 국제평탄성지수인 IRI(m/km)로 나타내었다. <그림 9.38>에 공용성 자료의 수집 과정의 한 예를 나타내었다.

일반사항												공용성							
도로 등급	호선	이정	시점	종점	연장 km	구간	교통량 조사 위치	차로수 양방향	도심 및 지방구분	준공 년도	보수 이력	조사 년도	재령 (년)	승래 보수	균열 개수	균열률 (%)	스_polling 개수	스_polling (%)	IRI (m/km)
고속 국도	88선	고서 기점	36.5	36.8	0.23	순창IC ~ 남원 IC	전북 순창군 교성리	2	지방	1984		2007	23	38	1	2.63	2	5.26	3.02
고속 국도	88선	고서 기점	36.90	37.90	1.00	순창IC ~ 남원	전북 순창군	2	지방	1984		2007	23	167	7	4.19	9	5.39	3.76
고속 국도	88선	고서 기점	37.90	38.90	1.00	순창IC ~ 남원 IC	전북 순창군 교성리	2	지방	1984		2007	23	167	12	7.19	31	18.56	3.39
고속 국도	88선	고서 기점	38.90	39.99	1.00	순창IC ~ 남원 IC	전북 순창군 교성리	2	지방	1984		2007	23	167	13	7.78	57	34.13	2.85
고속 국도	88선	고서 기점	39.99	41.14	1.00	순창IC ~ 남원 IC	전북 순창군 교성리	2	지방	1984		2007	23	167	14	8.38	37	22.16	3.32

〈그림 9.38〉 공용성 자료 수집 예



〈그림 9.39〉 국내 지질도 및 석산의 암종 분포

가. 콘크리트 재료물성

콘크리트 층의 재료 단면 두께 및 물성에 대한 조사결과 단면 두께에 대해서는 모든 자료에서 파악이 가능했으나 휨강도와 같은 물성은 일부 자료에 서만 존재하였다. 휨강도 자료는 중부고속도로만 중앙대학교에서 작성한 중

부고속도로 PMS 보고서를 통해 확인할 수 있었으며, 그 밖에 할렐인장 강도는 2004년 고속도로 LTPP 조사대장 자료를 통해 20개 구간만 확인할 수 있었다. 그리고 콘크리트 포장에 사용한 골재는 이춘오 등(2006)이 국내 석산의 암종 분포에 대한 보고자료를 통해 지역별로 추정하였다. <그림 9.39>은 그 결과를 도시한 것이다.

나. 하부지반 및 불연속면 재료물성

국내의 콘크리트 포장은 88선의 경우 기층이 자갈층으로 시공되었다. 이후 고속도로의 경우 경부선은 기존 아스팔트 포장층에 분리막을 깔고 시공하여 마치 기층이 아스팔트와 같이 시공되었다. 일반국도도 마찬가지로 기층이 아스팔트로 4~5 cm 두께를 가지게 시공되었다. 그 이후의 모든 콘크리트 포장은 린콘크리트 기층 공법을 들여와서 15cm 두께로 설계되었다. 하부지반 층인 동상방지 층과 노상의 재료 물성 자료는 자료의 형태가 기존과 달라 수집에 어려움이 있다. 기존의 설계는 CBR을 기준으로 설계 k 치를 사용하였지만, 개발된 도로포장 구조 설계의 하부층 및 노상의 물성치는 최대건조단위 중량, 균등계수, 200번체 통과량을 요구한다. 동상방지층의 경우 현재 진행 중인 타연구단(동상방지층 연구단)의 자료를 수집하였고, 노상의 자료는 건설지 및 설계서를 찾아서 추적 하였으나, 시공 후 재령이 20년 이상 되는 국내 콘크리트 포장의 설계프로그램에 필요한 입력변수 형태의 자료는 거의 전무하였다.

불연속면 설계 및 시공에 관하여 고속도로는 건설지를 찾아서 분석하였으며, 일반국도의 경우 HMS 자료를 찾아 분석하였다. 줄눈간격이 5 m로 시공된 88선을 제외한 국내의 모든 구간은 줄눈간격이 6m로 설계되었다. 다웰바는 D32, 500mm길이의 원형 철근으로 시공되었으며, 타이바는 D16, 800~1000 mm의 이형 철근으로 시공되었다.

	구간	연장 (km)	차로수	계	승용차	버스			화물차					기타				
						소형	보통	소형	소형	보통	대형	특수 1	특수 2					
1995	176 (음성 - 진천)	12.9	4	39,852	17,738	2,338	2,148	4,486	23	12,516	4,308	546	221	17,828	14			
1996	176 (음성 - 진천)	12.9	4	41,978	17,738	3,077	2,537	5,614	20	13,156	4,948	265	221	18,610	14			
1997	176 (음성 - 진천)	12.9	4	44,774	22,781	2,338	2,307	4,645	76	12,516	3,365	1,126	230	17,313	35			
1998	176 (음성 - 진천)	12.9	4	38,711	18,418	2,577	2,148	4,725	80	10,458	4,308	546	151	15,543	25			
1999	176 (음성 - 진천)	12.7	4	44,157	21,389	2,439	2,449	4,888	93	13,605	3,201	870	100	17,869	11			
	연장 구간	차 로	계	승용차		버스			화물차									
	수					소형	소형	보통	소형	소형	보통	대형	특수 1	특수 2				
2000	176 (음성 - 진천)	12.7	4	47,069	22,432	6,853	3,768	3087	17,814	32	11,992	4726	787	277				
2001	176 (음성 - 진천)	12.7	4	47,069	22,432	6,853	3,768	3087	17,814	32	11,992	4726	787	277				
2002	05926 (진천 IC - 음성 IC)	12.7	4	52,166	29,139	4,927	2,624	2303	18,100	38	13,187	3951	820	104				
2003	05926 (진천 IC - 음성 IC)	12.7	4	45,857	24,843	4,308	2,000	2308	16,706	103	11,975	3637	928	65				
2004	05926 (진천 IC - 음성 IC)	12.7	4	46,542	24,541	5,789	3,570	2219	16,212	19	12,018	3420	680	75				
2005	(진천 IC - 음성 IC)	12.7	4	42,242	22,639	5,661	3,325	2356	13,922	79	10,750	1601	1,226	266				
	연장 구간	차 로 수	시 간	전년계	계	승용차	버스	소형	화물차	중형	화물차	대형	화물차					
						1종	2종	3종	4종	5종	6종	7종	8종	9종	10종	11종	12종	
2006	진천IC ~ 음성IC	4	4	42,242	44,611	27,910	1,404	5,431	5,770	1,887	773	563	166	14	597	33	63	-
2007	진천IC ~ 음성IC	4	4	44,611	46,093	28,852	1,445	5,609	5,980	1,950	802	579	170	14	612	34	66	-

〈그림 9.40〉 교통하중 입력자료 예

다. 교통자료

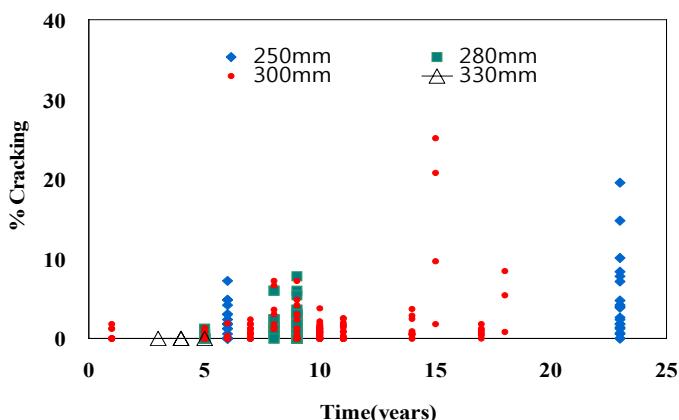
각 조사위치에 대한 교통자료를 얻기 위해 교통량 정보시스템 (<http://www.road.re.kr/>)에서 1995년부터 2007년 까지 수시 교통량자료를 얻어 자료를 분석했다. 도로포장 구조 설계에서 정의된 교통량은 12종의 차종분류를 사용하지만, 2006년 이전 자료들은 차종분류가 고속도로 8종 일반 국도 11종이었다. 현재 이를 도로포장 구조 설계 프로그램에 적용할 수 있도록 1995~2007년까지의 교통량을 정리하였으며, 〈그림 9.40〉는 그 일례를 나타낸 것이다.

라. 공용성 자료 수집결과

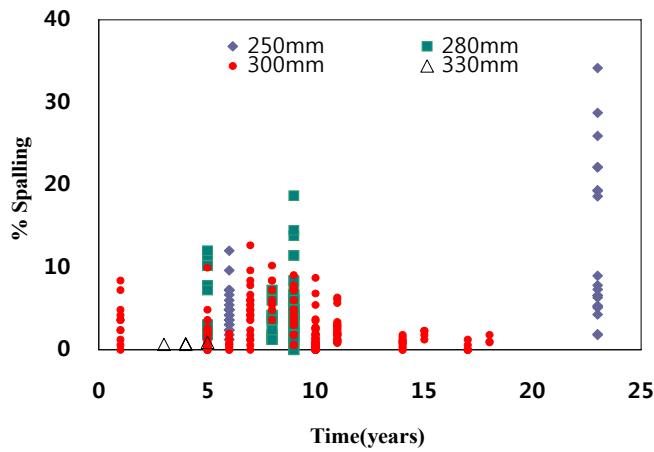
보조기층 종류에 대한 자료 수집 결과, 일반국도 줄눈 콘크리트 포장은 주로 두께 5~7cm의 아스팔트 보조기층으로, 고속도로는 88선은 쇄석보조기층으로, 그 외의 모든 구간은 두께 15cm의 린 콘크리트층으로 시공되었다. 슬래브의 두께에 대한 자료 수집 결과, 일반국도는 250mm, 280mm, 그리고 300mm의 두께를 가진 포장이 시공되었으며, 고속도로의 경우 260mm, 300mm, 그리고 330mm 두께를 가진 포장이 시공되었다. 시멘트 콘크리트 포장의 온도 및 습

도의 영향으로 인해 콘크리트 부피를 변화시키는 주요인자인 콘크리트 골재의 종류에 대해서는 국내 관련 보고서 및 논문으로 추정한 결과 국내 대부분의 암종이 화강암계열의 암석이며, 전라남도 및 경상남도 일부 지역에서 섬록암 석산이 분포하였다. 강원도 일부 지방에서 석회암 석산이 존재하며, 충청북도 지역에서 일부 사암석산이 있었다. 줄눈간격은 88고속도로의 경우 5m였고, 그 이외의 나머지 조사구간은 6m였다. 하부보조기층 및 노상의 입력변수는 기존 설계자료 및 시공건설지를 최대한 수집하려 노력하였으나 많은 자료를 확보하지 못하였다.

<그림 9.41>과 <그림 9.42>는 재령에 따른 시멘트 콘크리트 포장의 피로균열(%)과 스팔링(%)을 변화를 도시한 것으로 두께가 250~260mm인 포장의 파손 발생의 빈도가 두께 280mm이상의 포장보다 더 컸다. 두께 280mm 포장과 300mm 두께의 포장은 그 파손 발생의 빈도가 유사 하였으나 300mm 두께의 포장이 보다 낮은 수준이었다. 330mm두께의 포장은 일부 고속국도 구간에 최근 적용되었으나 재령이 5년 미만이었으며, 파손 또한 거의 발생하지 않았다.



<그림 9.41> 재령에 따른 국내 시멘트 콘크리트
포장의 슬래브 두께별 피로균열 현황



〈그림 9.42〉 재령에 따른 국내 시멘트 콘크리트
포장의 슬래브 두께별 스플링 현황

(3) 추가 공용성 자료의 수집

공용성 자료 수집결과 국내 시멘트 콘크리트 포장의 시공 현황 및 공용성 자료는 특정 보조기층 형식과 두께에 치중되어있어 다양한 보조기층 및 두께 등을 고려할 수 있는 설계 개발을 위한 기초자료로서 다소 부족함이 있어 미국의 LTPP 데이터를 추가적으로 수집하였다. 미국의 공용성 자료는 미연방도로국(FHWA)에서 운영하고 있는 웹인 www.datapave.com로부터 포장이력, 포장형식, 피로 균열율, 그리고 교통량 등의 자료를 수집하였다.

www.datapave.com로부터 미국 모든 주의 줄눈 콘크리트 포장 공용데이터를 수집한 결과, 총 620개 구간(section)의 3470개의 횡방향 균열 데이터를 확보할 수 있었다. 수집된 피로균열에 관련된 자료 중 횡방향 균열율, 재령, 교통량, 콘크리트 물성, 보조기층 물성이 모두 있는 것은 총 구간수 70개, 자료수 313개의 자료로 〈표 9.12〉와 같이 확인되었다.

다음 〈그림 9.43〉는 국내 및 미국 피로균열 자료를 정리한 것으로 미국 자료 수집을 통해 다양한 두께 및 암종에 대한 공용성 자료를 확보한 것으로 나타났다. 그리고 국내자료가 화강암 골재를 사용한 슬래브두께 280mm 및 300mm에 주로 편중되어 있는 것에 비하여 미국 LTPP자료는 이보다 더 다

양한 두께와 암종이 사용되었다.

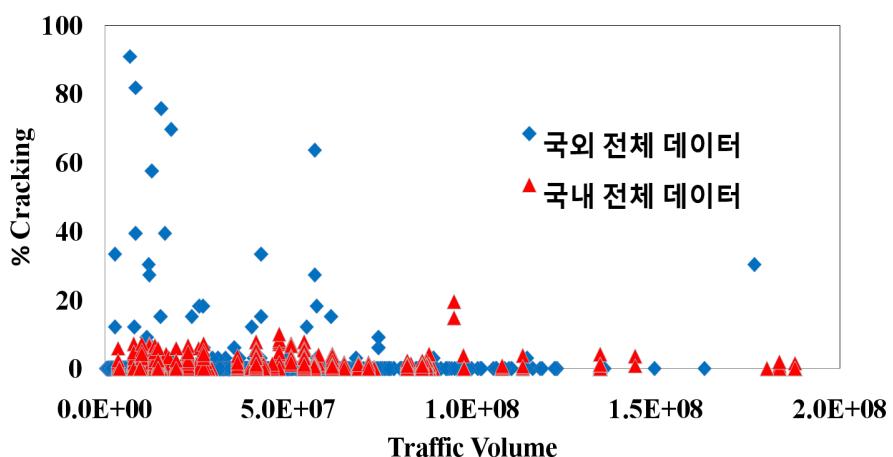
<그림 9.44>은 교통량에 따른 국내 및 미국의 시멘트 콘크리트 포장 피로 균열율을 나타낸 것으로 미국자료에 비하여 국내의 시멘트 콘크리트 포장의 균열율이 전반적으로 낮았다. 이는 다양한 조건에서 수집된 미국자료에 비하여 국내는 슬래브가 미국에 비하여 두껍고, 보조기층의 강성도 매우 큰 편인 린콘크리트층이 사용되기 때문이다.

〈표 9.12〉 미국 LTPP 시멘트 콘크리트 포장 수집자료 총 현황

수집자료	구간수	자료수
균열자료(횡방향)	620	3,470
균열자료+교통량	147	936
균열자료+교통량+재령	122	617
균열자료+교통량+재령+보조기층물성	110	530
균열자료+교통량+재령+보조기층물성+콘크리트물성	70	313

고속도로 일반국도 미국LTPP 국내자료와 중복

〈그림 9.43〉 미국 LTPP 시멘트 콘크리트 포장 자료수집 결과



〈그림 9.44〉 교통량에 따른 국내 및 미국의 시멘트 콘크리트
포장 피로균열율 분포

9.4 현장 자료를 이용한 공용성 모형의 보정

9.4.1 방법론

실내실험으로부터 개발된 포장의 공용성 모형을 현장의 다양한 조건이 반영된 모형으로 보정하기 위한 다른 방법은 누적손상 개념을 이용하는 것이다. 즉, 포장에 발생되는 파손은 반복되는 차량하중 및 환경적인 영향에 의해 발생되는 것으로 이러한 영향을 Miner의 누적 피로손상 이론과 접목하여 누적손상에 대한 포장 파손 발생률로 표현하는 방법이다. 실제 포장은 특정 인자를 조절하여 실내 실험을 통해 개발한 모형의 거동과 달리 미처 고려하지 못한 타 인자들로 인해 거동에 차이가 발생하므로 현장 데이터를 고려하여 실제 공용성을 예측할 수 있다. 이러한 방법에 의해 보정계수 및 전이함수를 산정하고 파손률과 누적손상과의 관계를 나타낸 것이다.

여기에서는 시멘트 콘크리트 포장의 피로균열에 대한 보정계수를 유도하는 과정을 살펴보았다. 콘크리트의 피로손상 개념에서 보정계수를 도입하고 도입된 보정계수를 이용하여 실내 실험을 통하여 얻은 피로모형을 현장에서의 피로모형으로 보정하게 된다. 보정과정에서 사용되는 계수는 최종 균열발생률(%)과 누적피로손상의 관계로부터 유도된다.

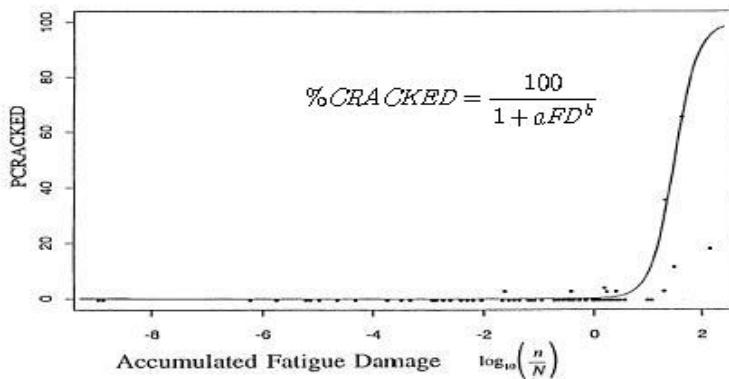
슬래브에 발생되는 균열은 차량이나 환경적인 영향에 의한 반복하중에 의하여 발생하므로 보정계수 산정을 위하여 〈식 9.22〉 ~ 〈식 9.25〉와 같이 표현할 수 있다.

$$FD' = \alpha FD \quad \langle \text{식 9.22} \rangle$$

여기서, FD = 실내실험 결과의 피로 모형

FD' = 현장 데이터를 이용하여 보정한 피로 모형

α = 보정 계수(shift factor)



〈그림 9.45〉 일반적 균열발생률과 누적 피로손상과의 관계

$$FD = \sum \frac{n}{N} \quad \langle \text{식 9.23} \rangle$$

$$\alpha FD = \sum \frac{n}{N'} = \sum \frac{n}{\frac{1}{\alpha} N} \quad \langle \text{식 9.24} \rangle$$

$$N' = \frac{1}{\alpha} N \quad \langle \text{식 9.25} \rangle$$

실내 휴인장 피로실험을 통하여 제안된 피로파손 모형 〈식 9.26〉을 보면,

$$Ln(N) = 33.312 - 29.155 \left(\frac{\sigma_{\max}}{M_{R58}} \right) \quad \langle \text{식 9.26} \rangle$$

〈식 9.27〉에 의하여 〈식 9.28〉은 〈식 9.29〉로 바꿔서 표현할 수 있다.

$$Ln(N') = Ln\left(\frac{1}{\alpha} N\right) = Ln(N) + Ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) = 33.312 - 29.155 \left(\frac{\sigma_{\max}}{M_{R58}} \right) + Ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) \quad \langle \text{식 9.27} \rangle$$

여기서, 〈식 9.29〉은 〈식 9.30〉과 같다고 가정한다.

$$\ln(N') = \ln\left(\frac{1}{\alpha} N\right) = \ln(N) + \gamma = 33.312 - 29.155 \left(\frac{\sigma_{\max}}{M_{R58}} \right) + \gamma \quad \text{〈식 9.28〉}$$

$$\gamma = \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) \quad \text{혹은} \quad \alpha = e^{-\gamma} \quad \text{〈식 9.29〉}$$

피로식은 〈식 9.30〉을 〈식 9.31〉과 같이 다시 표현하면

$$\% \text{ Cracked} = \frac{100}{1 + aFD^b} \quad \text{〈식 9.30〉}$$

$$\% \text{ Cracked} = \frac{100}{1 + aFD^b} = \frac{100}{1 + (FD')^b} \quad \text{〈식 9.31〉}$$

이 된다. 〈식 9.25〉와 〈식 9.33〉을 살펴보면

$$(\alpha FD)^b = a(FD)^b \quad \text{〈식 9.32〉}$$

$$\alpha^b FD^b = aFD^b \quad \text{〈식 9.33〉}$$

$$\alpha^b = a \quad \text{or} \quad \alpha = a^{\frac{1}{b}} \quad \text{〈식 9.34〉}$$

〈식 9.29〉와 〈식 9.34〉에 의해 보정계수는 〈식 9.35〉와 같이 표현할 수 있다.

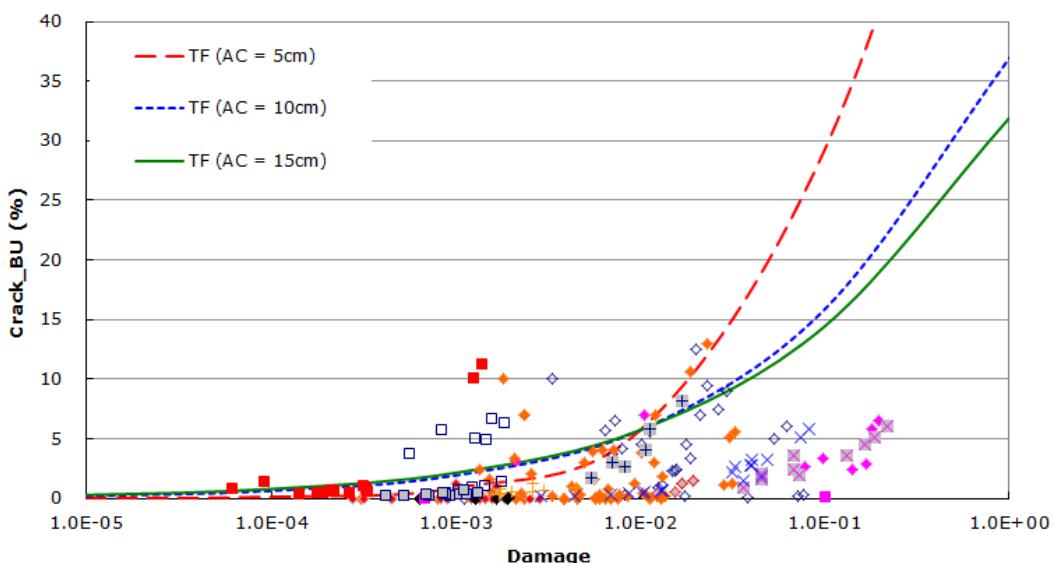
$$\gamma = -\frac{1}{b} \ln(a) \quad \text{〈식 9.35〉}$$

따라서, 쪼掴인장 피로실험과 흡인장 피로실험과 같은 실내 피로실험을 통하여 얻은 피로파손 모형은 보정계수를 산출하게 되면 현장조건을 만족하는 피로파손 모형으로 전환할 수 있다.

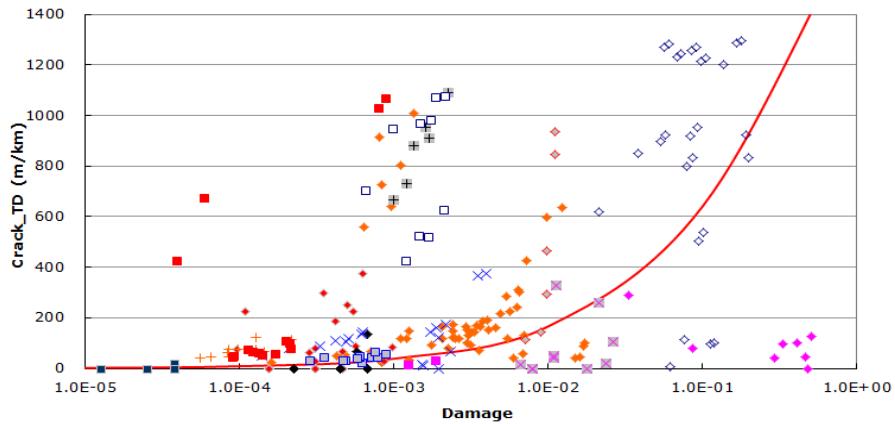
9.4.2 보정계수 및 전이함수를 이용한 모형 보정

(1) 아스팔트 콘크리트 포장의 피로균열

아래 <그림 9.46>과 <그림 9.47>는 실내실험 자료와 공용성 자료를 바탕으로 제안된 전이함수를 나타내고 있다. 상향균열에 대한 전이함수는 두께에 대한 함수로 표현되기 때문에 전이함수가 3개의 곡선을 나타내고 있는 반면, 하향균열은 두께의 함수로 정의되지 않았기 때문에 하나의 곡선을 나타내고 있다.



<그림 9.46> 상향균열에 대한 전이함수



〈그림 9.47〉 하향균열에 대한 전이함수

(2) 시멘트 콘크리트 포장의 피로균열

KPRP프로그램과 현장조사결과를 이용하여 시멘트 콘크리트 포장의 전이함수를 구하였다. 시멘트 콘크리트 포장의 전이함수를 구하기 위해 〈표 9.13〉에 보이는 국내 현장자료와 국외 LTPP자료를 이용하였다. 현장자료는 포장층의 길이 및 두께, 공용연수, AADT, 하부층 종류, 콘크리트에 사용된 골재의 종류 등으로 구분되어 있으며, 총 71가지의 경우에 대해서 현장 균열율을 확보하였다.

〈표 9.13〉 KPRP 시멘트 콘크리트 포장의 전이함수 개발에 사용된 현장포장자료

	240mm 이하(215mm)						240mm 초과 ~ 280mm 이하(260mm)						280mm 초과(300mm)															
	화강암			석회암			사암			화강암			석회암			사암			화강암			석회암			사암			
제형	자선당 AADT	린	AP	새석	린	AP	새석	린	AP	새석	린	AP	새석	린	AP	새석	린	AP	새석	린	AP	새석	린	AP	새석	린	AP	새석
5년 미만	5,000미만	#1			#5	#8					#15		#26	#24	#45	#49												
	5,000-15,000						#12				#18	#27	#35	#41							#61		#65	#68				
	15,000-30,000																				#62							
	30,000-50,000																											
	50,000이상																											
5-10년	5,000미만	#2			#6	#9					#16	#19	#28	#36	#46	#50						#63						
	5,000-15,000						#13				#20	#29	#37	#42							#51		#67	#69				
	15,000-30,000										#21										#52	#64						
	30,000-50,000							#22												#53	#65							
	50,000이상																			#54								
10-15년	5,000미만	#3			#7	#10					#17	#23	#30	#38	#47													
	5,000-15,000						#14				#24	#31	#39	#43							#55						#70	
	15,000-30,000																			#56								
	30,000-50,000																			#57								
	50,000이상																			#58								
15년 이상	5,000미만	#4				#11									#32	#40	#48											
	5,000-15,000										#25	#33	#44													#71		
	15,000-30,000																			#59								
	30,000-50,000																			#60								
	50,000이상																											

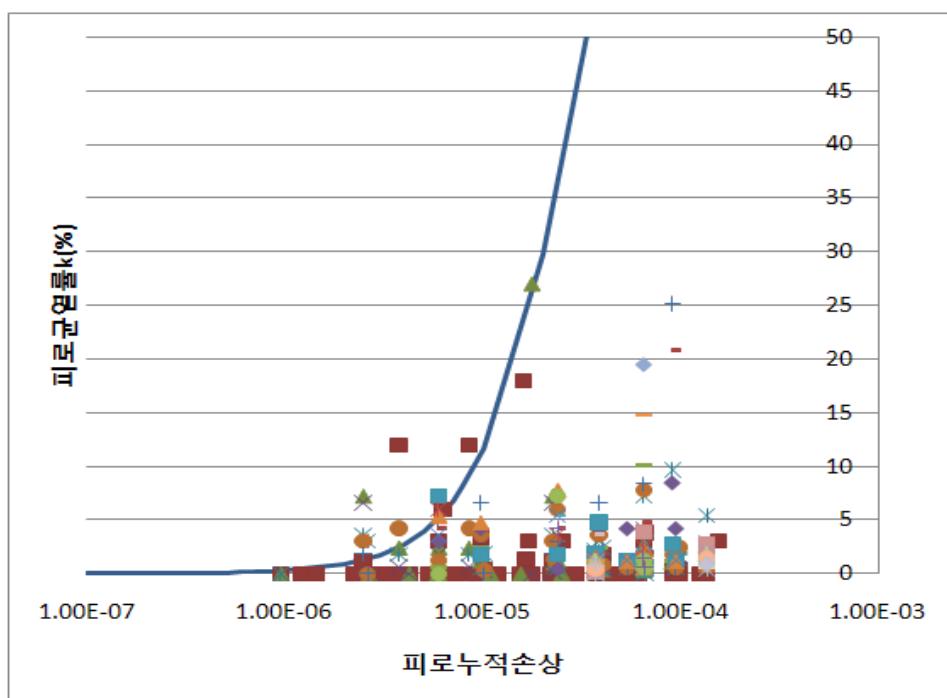
■ 국내 고속 ■ 국내 일반 ■ 국외 ■ 국내외 공통

71가지 경우 각각에 대해서 KPRP 프로그램을 이용하여 누적피로손상을 구하였으며, 이를 이용하여 피로누적손상에 따른 피로균열률을 〈그림 9.49〉에 도시하였다. 그림에 보인 데이터 포인터는 현장에서 조사 자료이며, 같은 그림에 보이는 곡선은 이들 데이터 포인터를 이용하여 보수적으로 구한 전이 함수이다. 이 전이함수는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$CRK = \frac{a_{CRK}}{1 + (b_{CRK} FD)^c_{CRK}} \quad \langle \text{식 } 9.36 \rangle$$

여기서,

$$FD = \text{피로손상}, \quad a_{CRK} = 1, \quad b_{CRK} = 30000, \quad c_{CRK} = -1.68.$$



〈그림 9.48〉 피로누적손상 vs 피로균열율



10

덧씌우기 및 유지보수

10. 덧씌우기

시간이 지남에 따라 신설포장은 반복적인 교통하중 및 환경하중에 의해 그 기능이 저하된다. 때문에 어느 시점을 지나면 포장 표면 및 내부에서 파손이 발생하여 도로 이용자들에게 불편함을 초래한다. 파손된 도로 포장을 적절하게 보수하고 관리하는 것은 새로운 포장을 건설하는 것만큼 중요하다. 적절한 유지보수 공법을 선정하기 위해서는 도로 포장체의 파손 및 결함에 대한 원인을 정확히 규명하여야 한다. 선정된 유지보수공법은 포장 파손원인을 근본적으로 해결하고 파손의 재발을 최소화해야 한다. 일반적으로 유지보수공법 중 덧씌우기 공법이 가장 효과적이고 경제적인 방법으로 알려져 있다. 본 장에서는 덧씌우기 포장 설계의 기본적 개념을 소개하고, 도로포장 구조 설계에서 고려하는 덧씌우기 포장 설계 로직을 설명하고자 한다. 기존의 아스팔트 덧씌우기 포장 설계는 주로 경험에 근거하여 수행되었다. 이는 유지보수 시행후 포장의 잔존수명을 정확히 예측할 수 없으며 파손 진전을 효과적으로 제어할 수 없다. 도로포장 구조 설계에서 개발될 덧씌우기 포장 설계는 역학적-경험적 (ME) 설계 이론을 도입하였다. 이를 통하여 과학적이고 합리적인 덧씌우기 두께 설계를 수행하고, 향후 설계 수명예측에 신뢰도 향상시킬 수 있다.

10.1 도로포장 구조 설계의 덧씌우기 설계

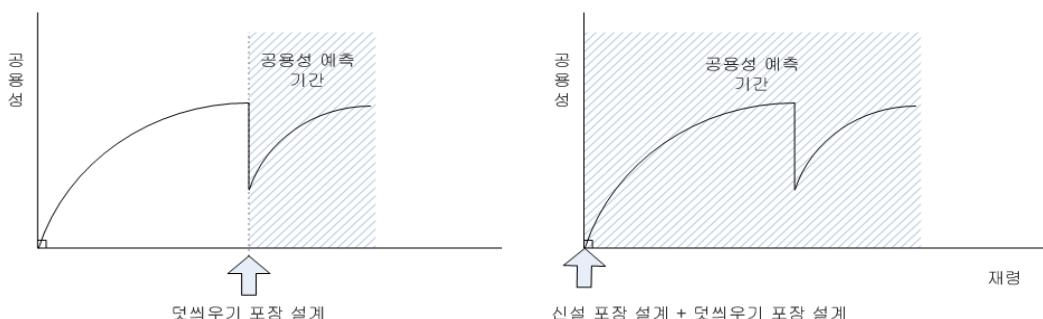
도로포장 구조 설계의 덧씌우기는 개념자체는 기존 설계와 유사한 부분이 있으나, 세부적으로 역학적인 모형들을 이용하여 공용성을 예측하고 이를 설계에 반영하도록 되어 있다. 현재 아스팔트 포장 덧씌우기는 완료가 되었으며, 시멘트 콘크리트 포장의 덧씌우기는 진행 중에 있다. 이에 대하여 알아보면 다음과 같다.

10.1.1 아스팔트 콘크리트 포장에서의 아스팔트 덧씌우기 설계

덧씌우기 포장 설계에 있어 설계 시점에 따라 두 가지로 나타낼 수 있는

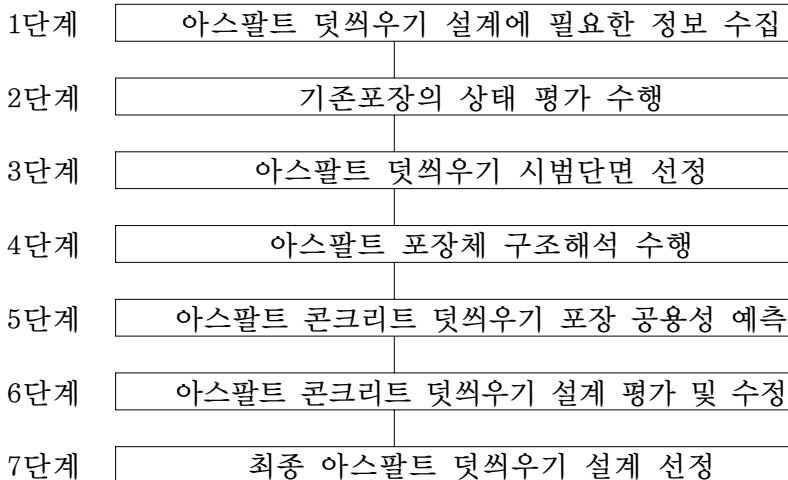
데, 첫번째로는 <그림 10.1>의 좌측 그림과 같이 공용중인 시점에서의 기존 포장의 덧씌우기 설계를 하는 경우와 두번째로 <그림 10.1>의 우측 그림과 같이 단계 건설을 위한 신설 포장 설계시 덧씌우기 설계를 하는 경우로 나타낼 수 있다. 일반적인 설계는 전자에 대한 설계 과정을 보여주었다. 단계 설계개념을 적용한 경우는 많지 않았다. 실제 신설 포장 설계시 예산제약에 따른 단계 건설을 취할 경우, 덧씌우기 포장 설계를 고려할 수 있도록 반영해야 한다.

여기서는 두 가지 아스팔트 덧씌우기 설계에 대하여 알아보았다.



<그림 10.1> 기존 포장의 덧씌우기 설계 시점(좌) 및
단계건설에 필요한 덧씌우기 설계 시점(우)

기존 아스팔트 콘크리트 포장위에 아스팔트 덧씌우기 포장을 위한 설계 절차는 총 7단계로 <그림 10.2>과 같이 구성되어 있다.



〈그림 10.2〉 아스팔트 포장 상부 아스팔트 콘크리트 덧씌우기 포장설계 절차

(1) 1 단계 : 아스팔트 덧씌우기 설계에 필요한 정보 수집

기존 공용중인 도로포장의 형식에 상관없이 아스팔트 콘크리트 덧씌우기 포장을 수행하기 위해서는 다음과 같은 기본 정보가 필요하다.

● 일반정보

- 공사이름 및 설명
- 설계 수명
- 기존 포장의 준공일
- 덧씌우기 포장 시공일
- 교통 개방 날짜
- 유지보수 이력

● 위치 및 공사구간 정보

- 공사 위치 및 구간별 정보
- 도로등급

● 분석에 필요한 정보

- 초기 평탄성
- 설계 공용성 기준 (피로균열, 소성변형, IRI)

- 교통량
 - 차종별 축별 축하중 분포 (신설 포장과 동일)
- 환경인자
 - 온도, 합수량 분포 (신설 포장과 동일)
- 배수 특성
 - 포장의 횡구배
 - 배수로의 길이
- 포장 구조 및 재료 물성
 - 포장층의 개수, 재료종류, 및 두께
 - 포장층간 상태

(2) 2 단계 : 기존포장의 상태 평가 수행

덧씌우기 포장 설계시 가장 중요한 영향을 미치는 인자는 기존 포장 구조의 상태이다. 아스팔트 덧씌우기 설계시에는 공용중인 아스팔트 포장체의 구조적/기능적 상태를 정확히 평가해야 한다. 공용중인 기존 포장의 기능적 상태는 포장층별 영구변형량과 피로균열량을 측정하여 평가한다.

구조적 상태 평가를 위해서는 공용중인 기존 포장층의 탄성계수를 예측하고 초기조건 (현재 영구변형량 등) 정량화 하여야 한다. 구조적 상태 평가를 위하여 비파괴 시험을 수행하고 포장체 표면의 처짐값을 측정한다. 기존 포장 상태 정량화를 위한 방법은 <표 10.1>에 설계수준별로 요약되어 있다.

기존 포장재료의 탄성계수 추정을 위하여 일반적으로 FWD 장비가 가장 널리 사용되고 있다<그림 10.3>. 다음과 같은 절차를 통하여 포장체의 구조적 상태 평가 척도인 포장층의 탄성계수를 계산한다.

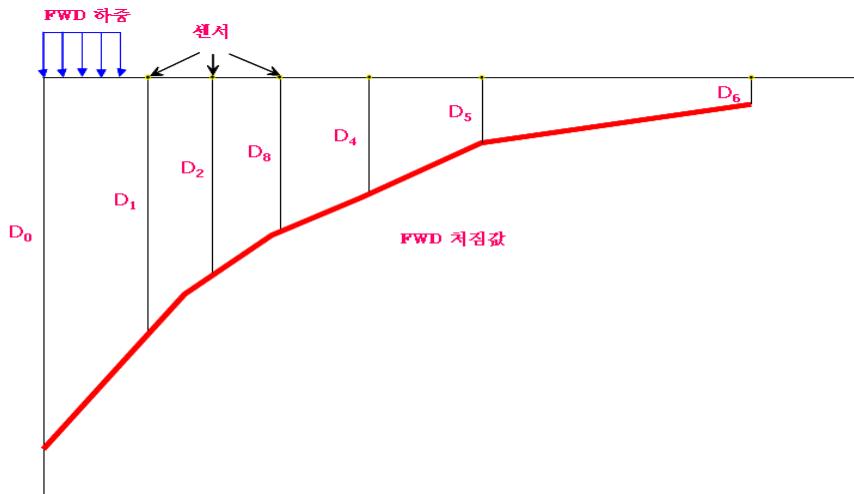
- ① 포장체 표면의 처짐값 측정 : 충격하중을 재하하여 센서위치별 처짐값 측정
- ② 포장체 각층 두께 조사: 시험구간에서 코어채취를 통한 포장층 두께 조사
- ③ 초기 탄성계수 값과 포아송(Poisson's) 비 결정: 역산 프로그램에서

최초 처짐량을 계산하기 위해 이용될 초기값 결정

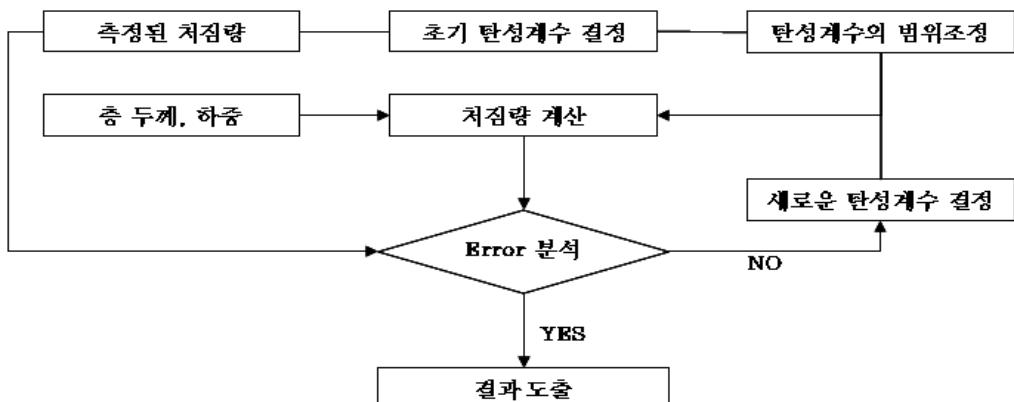
- ④ 탄성계수 범위의 조정 : 역산 프로그램에서 비합리적인 탄성계수 값이 선택되거나 계산되는 것을 방지하기 위해서 포장재료별 탄성계수의 최대/최소값의 범위 결정
- ⑤ 처짐량 계산 : 다층탄성 구조해석프로그램을 이용하여 처짐량 계산
- ⑥ 오차분석 : 측정된 처짐량과 계산된 처짐량의 비교를 통한 오차 분석
- ⑦ 새로운 탄성계수 결정 : ⑥의 과정에서 계산된 오차가 허용오차범위를 벗어날 경우 각 층의 새로운 탄성계수 결정
- ⑧ 포장층 최종 탄성계수 결정: 계산오차가 허용오차 범위안에 수렴할 경우

〈표 10.1〉 기존 포장체의 상태 평가 기법 요약

포장재료	입력변수	설계수준	
		1	2
아스팔트 재료	파손 탄성계수	비파괴시험법	비파괴시험법
	탄성계수	아스팔트 혼합물 동탄성계수값 (현장코어)	아스팔트 혼합물 동탄성계수값 (현장코어)
	피로 균열률	노면 조사통한 피로균열률	노면 조사통한 피로균열률
	초기 영구변형량	현장 실측 소성변형량	사용자 정의
보조기층	탄성계수	비파괴시험법	비파괴시험법
	초기 영구 변형량	현장 실측 영구변형량	사용자 정의
노상층	탄성계수	비파괴시험법	비파괴시험법
	초기 영구변형량	현장 실측 영구변형량	사용자 정의



〈그림 10.3〉 포장 치짐량 측정



〈그림 10.4〉 포장층 탄성계수 역산 절차

〈그림 10.4〉은 FWD 치짐값을 이용한 포장체의 탄성계수 역산절차 흐름도이다. 아스팔트, 보조기층, 노상층의 탄성계수는 다음과 같이 산정한다.

(a) 아스팔트층

신설포장 설계에서의 아스팔트 재료의 물성정량화를 위하여 동탄성계수 값이 사용된다. 아스팔트 콘크리트 덧씌우기 포장설계에서도 신설포장과 같이 기존포장의 아스팔트 동탄성계수값을 사용한다. 기존 포장의 파손 정도에

따라 동탄성계수 마스터 곡선은 다음과 같이 보정하게 된다.

$$E_{dam}^* = 10^\delta + \frac{E^* - 10^\delta}{1 + e^{-0.3 + 5 \times \log(d_{AC})}} \quad \langle \text{식 10.1} \rangle$$

여기서, E_{dam}^* = 파손 동탄성계수

δ = 회귀식 계수

E^* = 건전한 상태 아스팔트 혼합물의 동탄성계수

d_{AC} = 피로파손율

설계 수준 1은 건전한 상태 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 마스터커브 완성하기 위해서 현장에서 코어를 채취한다. 아스팔트 혼합물의 파손정도와 파손시 탄성계수 마스터커브를 완성하기 위해 비파괴 시험을 이용하여 아스팔트 혼합물의 탄성계수를 역산한다. 설계 수준 2는 비파괴 시험을 이용하여 아스팔트 혼합물의 탄성계수를 역산한다.

(b) 보조기층 및 노상층

보조기층과 노상층의 상태를 평가하기 위해서는 비파괴 시험을 수행해야 한다. 비파괴 시험 결과를 이용하여 보조기층과 노상층의 탄성계수를 역산한다. 역산된 탄성계수값은 일반적으로 실내 시험값보다 높기 때문에 보정이 필요하다. <표 10.2>는 평균 역산 탄성계수와 실내시험을 통해 얻은 탄성계수와의 비를 나타낸 표이다.

(3) 3 단계 : 아스팔트 덧씌우기 시범 단면 선정

기존 포장의 상태, 향후 예측 교통량, 덧씌우기 전 유지보수를 고려하여 설계자는 시범 덧씌우기 포장 재료 및 단면을 선정한다. 덧씌우기 포장에 사용될 아스팔트 재료의 물성 산정한다. <그림 10.5>는 아스팔트 덧씌우기 설계 시범 단면의 예를 나타내고 있다.

(4) 4 단계 : 아스팔트 포장체 구조해석 수행

기존 포장의 상태 평가를 통해 계산된 각 포장층의 탄성계수와 아스팔트 덧씌우기 두께 및 재료 물성을 이용하여 구조해석을 수행한다. 구조해석을 통하여 포장체 내부의 주요지점에서의 변형률값을 산정한다. 원칙적으로 아스팔트 덧씌우기 포장에서 사용되는 구조해석 기법은 신설포장과 동일하다. <그림 10.6>는 아스팔트 덧씌우기 포장의 일반적 단면과 구조해석을 통해 결정되어야 하는 변형률을 나타내고 있다.

<표 10.2> 평균 역산 탄성계수 (E_R)와 실내시험 탄성계수 (M_R)와의 비

포장층 종류	평균 E_R/M_R 비
보조기층	0.62
노상층	0.35~0.75

아스팔트 덧씌우기 1
기존 포장체

아스팔트 덧씌우기 1
아스팔트 덧씌우기 2
기존 포장체

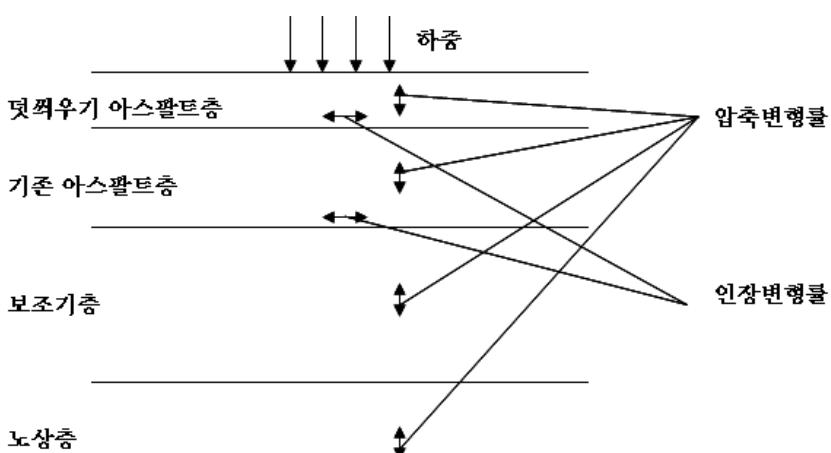
아스팔트 덧씌우기 1
아스팔트 덧씌우기 2
보조기층/CTB
기존 포장체

예시 1

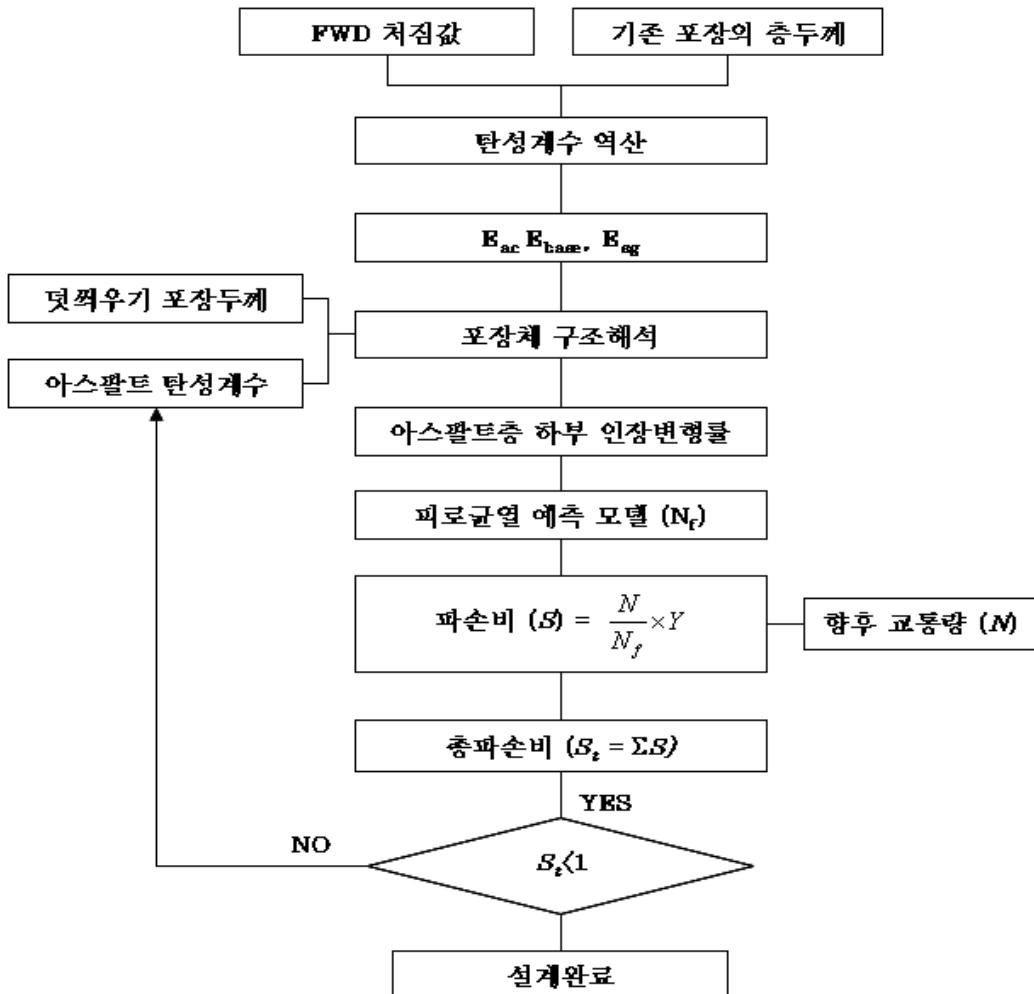
예시 2

예시 3

<그림 10.5> 아스팔트 덧씌우기 설계 단면의 예



<그림 10.6> 아스팔트 덧씌우기 포장 구조해석



〈그림 10.7〉 아스팔트 덧씌우기 포장에서 피로균열 예측 흐름도

(5) 5 단계 : 아스팔트 덧씌우기 포장의 공용성 예측

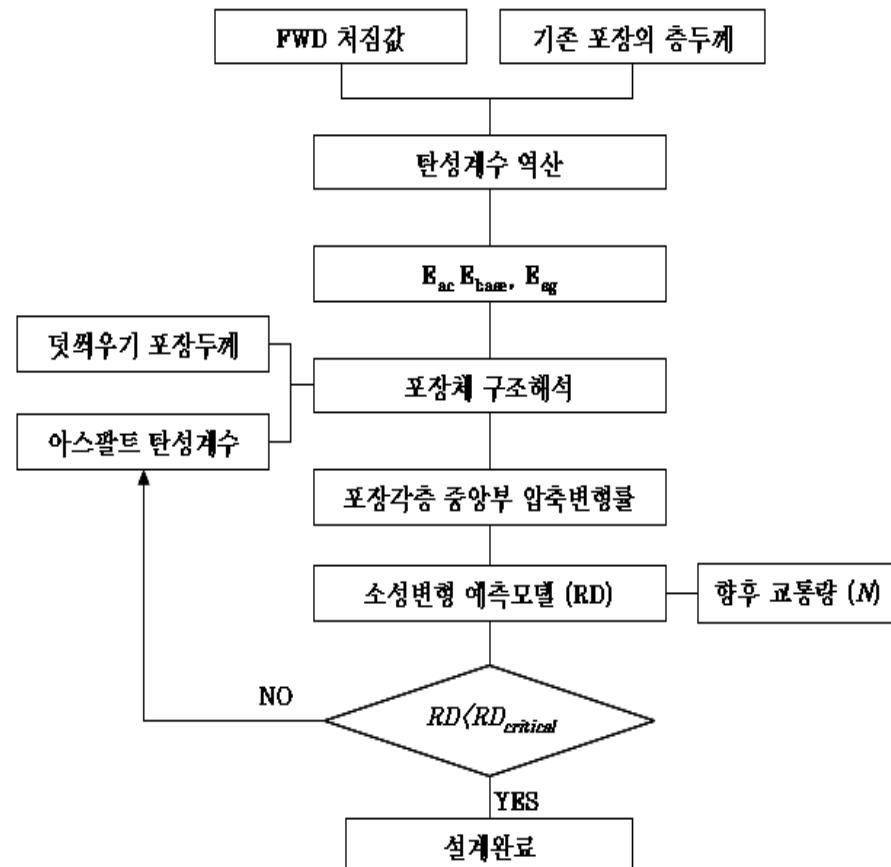
아스팔트 덧씌우기 포장 설계에서는 피로균열과 영구변형을 고려하여 포장체의 공용성을 예측한다. 4단계에서 구조해석을 통해 계산된 아스팔트 덧씌우기층 하부의 인장변형률과 포장각층 중앙부의 압축변형률은 피로수명과 영구변형량 계산에 각각 사용된다. 아스팔트 덧씌우기층 하부의 피로수명과 영구변형량 및 보조기층과 노상층의 영구변형량은 본서에서 제시한 모형을 이용하여 계산한다.

(6) 6 단계 : 아스팔트 덧씌우기 설계 평가 및 수정

아스팔트 덧씌우기 포장의 공용성 평가는 정해진 설계기간동안 예측 파손량과 사용자가 제시한 설계 공용성 기준과의 비교를 통해 이루어진다. 예를 들어, 설계기간동안 예측된 파손량이 주어진 기준을 초과할 경우, 설계자는 반드시 덧씌우기 포장층 두께 및 재료를 수정하여 정해진 기준을 만족하여야 한다.

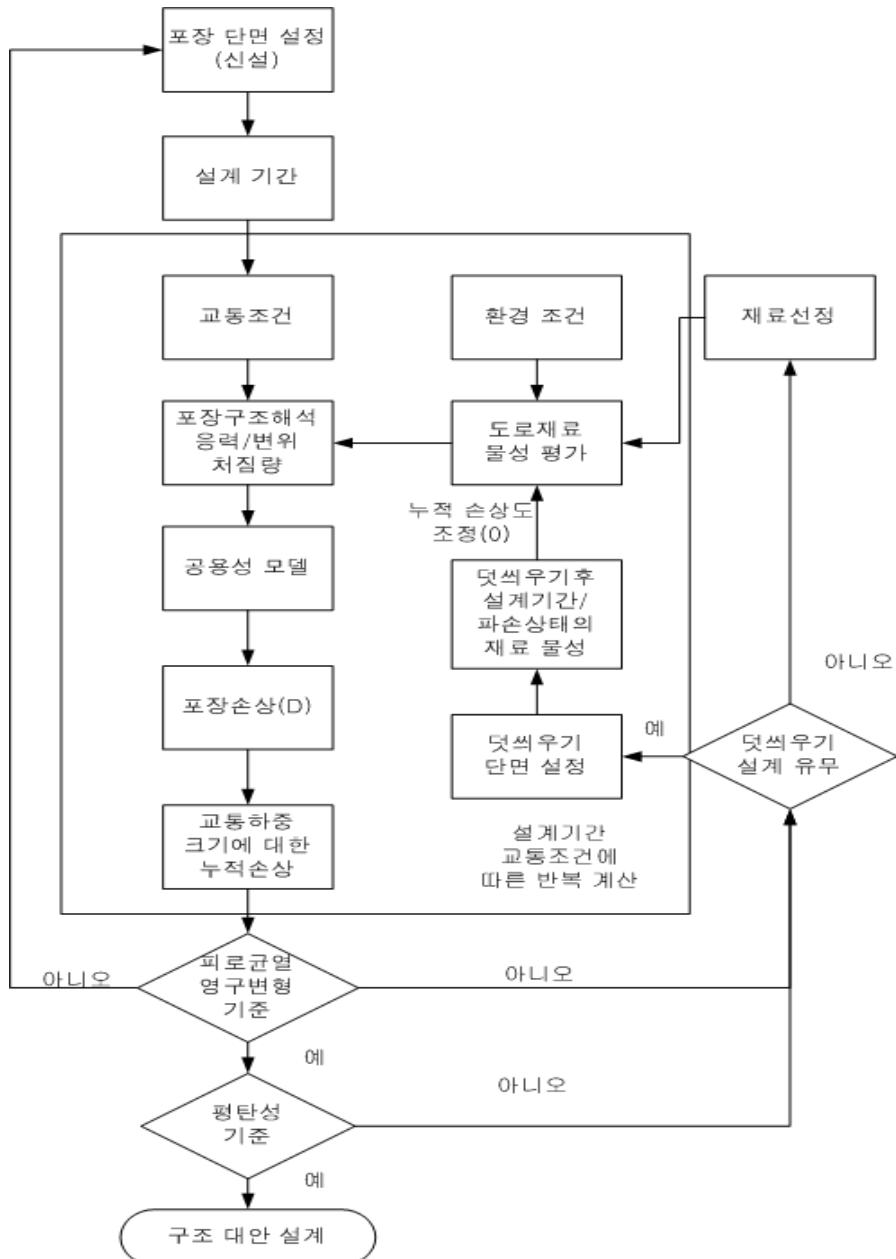
<그림 10.7>은 아스팔트 콘크리트 덧씌우기 포장의 피로균열 예측 흐름도를 나타내고 있다. 총파손비가 1보다 클 경우에는 공용기간중에 피로균열로 도로가 파괴될 확률이 높다. 따라서 덧씌우기 포장두께를 증가시키거나 또는 다른 아스팔트 재료를 이용하여 흐름도의 절차에 따라 피로수명을 계산하여 총파손비가 1보다 작게 하여야 한다. <그림 10.8>은 아스팔트 콘크리트 덧씌우기 포장의 영구변형 예측 흐름도를 나타내고 있다. 총 영구변형량이 소성변형 기준보다 클 경우에는 공용기간중에 영구변형으로 도로가 파괴될 확률이 높다. 따라서 피로균열과 동일하게 흐름도의 절차에 따라 영구변형을 계산하여 기준치보다 작게 하여야 한다. 아스팔트 콘크리트 덧씌우기 포장 설계를 완료하기 위하여는 피로균열과 영구변형에 대한 기준을 동시에 만족시켜야 한다.

본 절차를 통해 기준을 만족시킨 후보단면들은 지침서 11장에 제시한 경제성 분석을 수행하여 생애주기 비용을 산정한다.



〈그림 10.8〉 아스팔트 콘크리트 덧씌우기 포장 설계에서
영구변형 예측 흐름도

(7) 7 단계 : 최종 아스팔트 덧씌우기 설계 선정
공용성 평가 결과와 경제성 분석 결과를 근거로 하여 최종 아스팔트 덧
씌우기 설계를 선정하게 된다.



〈그림 10.9〉 덧씌우기 설계 포함된 신설 포장 설계 흐름도



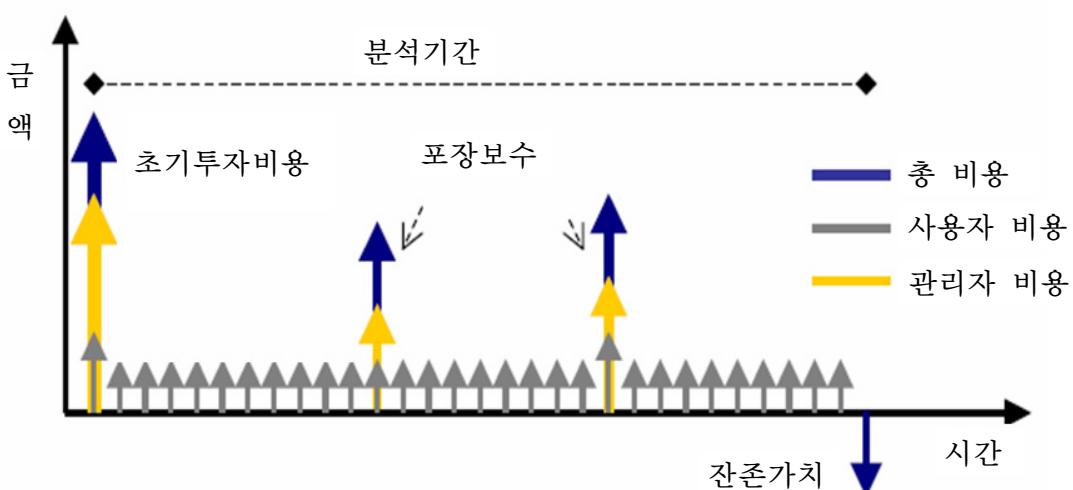
11

경제성 분석

11. 경제성 분석

다양한 포장 대안들 중에서 하나를 선정하는 의사 결정에서 경제성 분석은 중요한 자리를 차지한다. 과거 결정 방법에서는 초기투자비용만을 고려하여 시공하는 경향이 있었다. 그렇지만 포장은 초기단계의 비용보다는 주위 환경이나 교통량에 따라 유지비용이 2~5배에 이르는 경우도 있다. 선진국을 비롯한 다수의 건전한 도로 관리 기관에서는 도로의 수명을 고려하여 초기비용과 유지보수비용을 합한 금액으로 경제적 타당성을 검증하는 절차가 수립되어 있다. 비록 초기 투자비가 크더라도 적은 유지관리 비용으로 인하여 더 경제적인 공법이 있다면 이를 시행해야 한다는 뜻이다.

기본적으로 생애주기비용(LCC, Life Cycle Cost)은 제품의 생산, 사용, 폐기·처분 등의 각 단계에서 발생하는 모든 비용의 합산 금액을 말한다. 도로에서의 LCC 분석은 초기 건설비용과 유지보수, 재시공, 해체 및 폐기비용을 모두 포함한다는 것이다. <그림 11.1>에서 보듯이 생애주기비용 분석(LCCA, Life Cycle Cost Analysis)이란 생애 주기 동안 공통항목을 제외한 모든 비용을 각 대안별로 비교·분석하여 가장 경제적인 대안을 선택하게 하는 것이다.



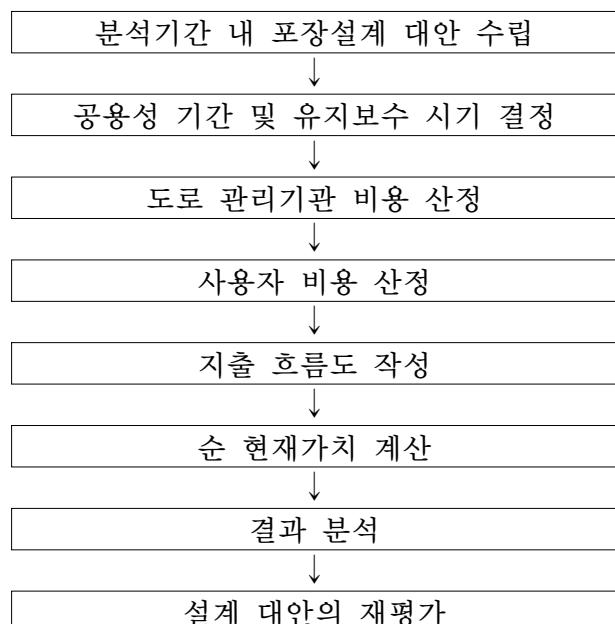
<그림 11.1> LCC(Life Cycle Cost)의 개념(Kaan Ozbay, 2003)

11.1 최적대안을 위한 논리

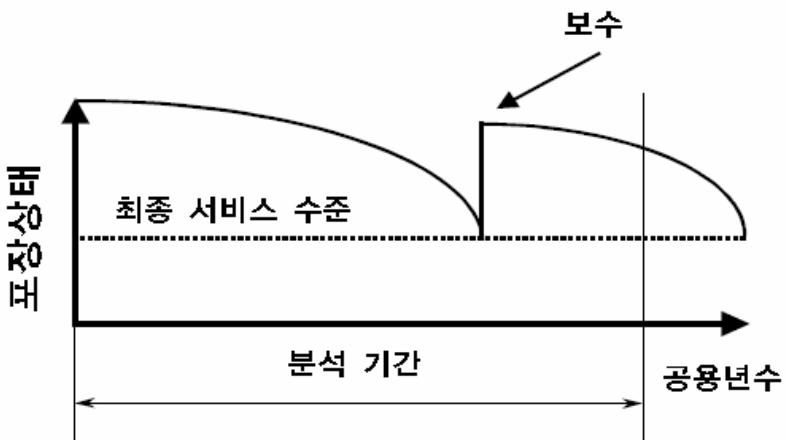
FHWA에서는 포장 수명 비용 분석에 있어 <그림 11.2>와 같이 8가지 단계로 나누어 적용할 것을 권장하고 있다.(James Walls III, 1998) 이들은 소위 시스템 접근론이라는 일반화된 접근 방법을 이용해서 단계별로 설명하였다.

11.1.1 분석기간 동안 포장 설계 대안의 수립

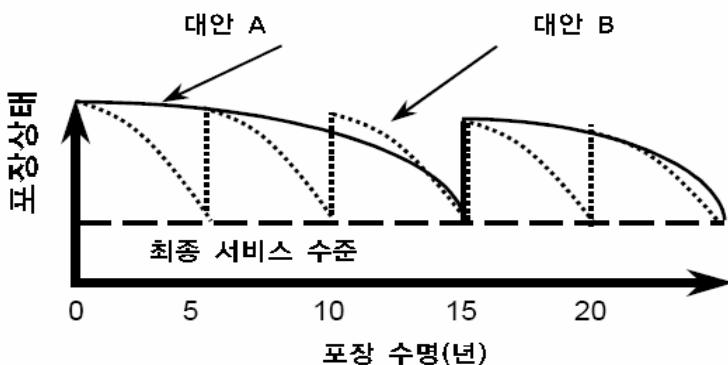
FHWA에서 권장하는 LCCA의 첫 단계는 고려하고 있는 포장 설계 대안들의 분석기간을 설정하는 것이다. LCCA 수행을 위한 분석기간은 일반적으로 설계 수명보다 길게 잡고 있는데 FHWA에서는 35년을 사용할 것을 권장하고 있다. <그림 11.3>은 분석기간 개념을 개략적으로 나타낸 것이다. 공용년수는 포장이 시공된 후에 지난 년수를 뜻한다. 공용년수가 지날수록 포장의 상태는 떨어지며 포장의 상태가 일정수준 이하가 되었을 때 보수를 한다. 분석기간은 최소 각 대안별로 보수 한 개 이상을 포함하는 년 수로 정의한다.



<그림 11.2> FHWA에서 제안하는 8단계 분석절차



〈그림 11.3〉 분석기간의 개념(James Walls III, 1998)



〈그림 11.4〉 대안별 포장상태 비교의 도식화(James Walls III, 1998)

포장 설계 전략이라는 것은 초기의 포장 설계와 그 이후 유지관리와 보수에 필요한 활동계획을 수립하는 것을 말한다. 즉 설계자가 대안을 선정하는 것이다. 포장 설계 전략에 있어서 각 설계 대안들에 대한 설계 수명, 분석기간 내에 수행할 유지 보수 방법 및 덧씌우기 활동에 대해 범위와 시기, 비용을 산정하는 것이 중요하다.

11.1.2 공용성 기간과 유지 보수 시기의 결정

초기 포장수명과 보수에 따른 공용성의 추정은 LCCA에 큰 영향을 미친다. 이는 도로 시설물에 대한 관리자의 보수 빈도에 영향을 미치고 다시 관리자 비용과 사용자 비용에 영향을 미친다. 따라서 LCCA 을 위해서는 각 설계 대안에 따른 수명을 결정하고 그에 따르는 유지보수 활동 시기를 결정해야 한다. 이러한 결정은 기존의 포장에 대한 장기 관찰 자료를 토대로 작성하는 것이 가장 바람직한데 미국의 경우는 FHWA의 주도 하에 SHRP의 LTPP자료를 분석함으로써 해답을 찾고 있다. <그림 11.4>는 공용성 기간과 유지 보수 시기의 결정방법을 대안별로 도식화 한 것이다.

11.1.3 도로기관 비용의 산정

LCCA를 위한 세 번째 단계는 각 대안에 따르는 관리자 비용을 결정하는 것이다. 관리자 비용의 평가는 시공 물량에 대한 단가를 결정하는 것으로 시작된다. 시공 물량과 비용은 초기의 설계, 보수 계획과 직접적인 관계가 있다.

관리자 비용은 프로젝트의 수명기간 동안에 소요되는 모든 관리비용을 포함한다. 여기에는 초기의 설계비용, 계약비용, 시공비용, 시공감독 비용 등이 포함되며 유지보수비용이 모두 포함된다. 또한, 도로 시설의 유지관리를 위한 정기적인 청소, 제설작업등 등과 같은 일상적인 비용들도 포함된다. 프로젝트가 분석기간 종료시점에서 잔존 수명을 갖고 있는 경우 이에 대한 잔존가치가 마이너스 비용으로 포함된다. 잔존가치는 잉여가치와 잔존수명으로 평가할 수 있다.

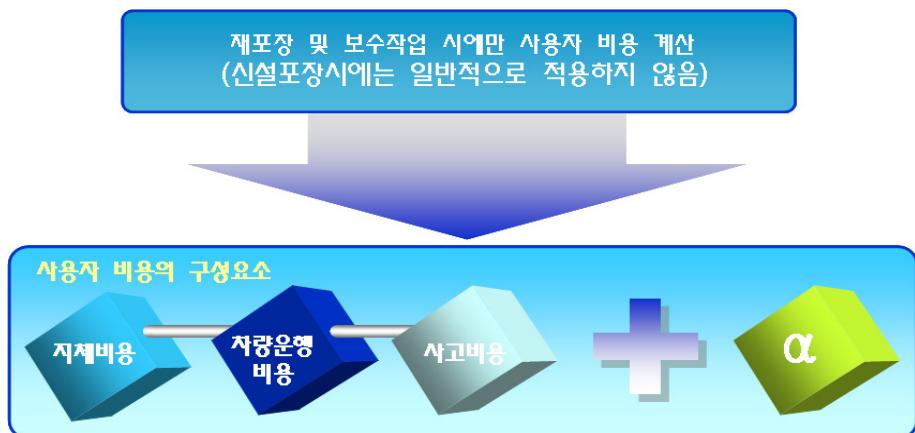
잉여가치는 포장의 재활용에 대한 가치로 생각할 수 있으며 각 대안에 따라 큰 차이가 없는 것으로 평가된다. 잔존 수명은 분석기간의 종료시점에 각 포장 설계 대안이 갖는 수명을 말하는 것으로 각 대안들은 서로 다른 잔존수명을 가질 수 있다.

11.1.4 사용자 비용의 산정

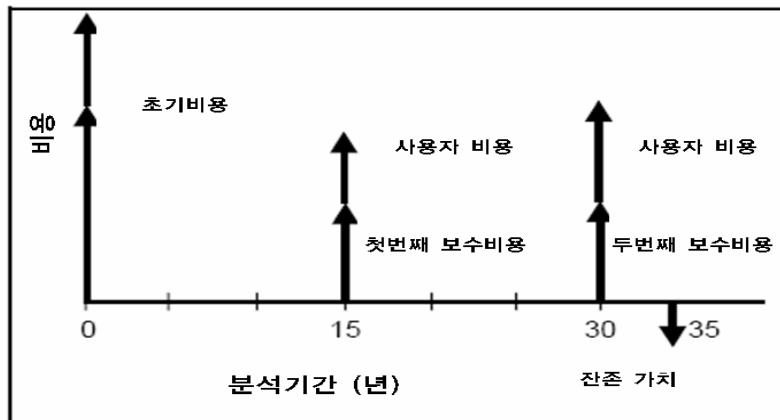
단순한 의미에서 사용자 비용은 프로젝트 수명기간 동안에 이를 사용하는 사람들에 의해 발생하게 되는 비용을 말하는 것으로 일반적으로는 차량 운행비용, 사용자 자체비용, 사고비용의 세 가지 주요항목으로 구성된다. <그림 11.5>는 사용자 비용의 구성을 나타낸 것이다.

11.1.5 지출 흐름도의 작성

LCCA 분석을 위한 지출 흐름도를 작성하는데 이는 각 포장설계 전략에 있어서 소요되는 지출 크기와 시점을 알아보기 쉽게 표현하기 위해 작성된다. <그림 11.6>은 지출흐름도의 예를 나타내고 있다.



<그림 11.5> 사용자 비용 구성요소



〈그림 11.6〉 지출흐름도의 작성 예 (James Walls III, 1998)

(1) 순현재 가치의 계산

현재가치법을 이용하여 〈식 11.1〉을 이용하여 순 현재 가치로 포장을 평가한다.

$$\text{순현재가치} = \text{초기투자비} + \sum_t (\text{유지보수비} + \text{사용자비용} \pm \text{잔존가치}) \left[\frac{1}{(1+i)^t} \right]$$

〈식 11.1〉

여기서 i : 할인율

t : 분석기간 내 년수

(2) 결과의 분석

민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 실시한다. 민감도 분석은 LCCA의 결과에 중요한 영향을 미치는 입력 변수를 결정하는 분석기법이다. 일반적으로 할인율에 대해 민감도 분석을 실시한다.

(3) 설계 대안의 재평가

각 대안별로 순 현재가치가 결정되고 민감도 분석이 수행되고 나면 LCCA의 마지막 단계는 비교 설계 대안들에 대해 재평가를 실시하는 것이다.

LCCA의 분석 결과 자체만이 중요한 대안 선정의 자료가 되는 것이 아니라 과정을 수행하면서 나오는 결과를 이용해 보다 효과적인 대안을 만들어 낼 수 있어야 한다.

11.2 포장의 경제성 분석을 위한 항목 결정 및 모형

11.2.1 생애주기 경제성 분석의 기본 구성

생애주기를 고려한 전체적인 비용구성은 <표 11.1>과 같이 구성되어 있다. 크게 초기투자비용, 유지관리비용, 해체처리비용 3가지로 나눈다.

(1) 초기 투자비용(Initial Cost)

가. 기획·설계비(Planning ·Design Cost)

도로 포장의 기획·설계에 필요한 비용이다. 포장에 대한 경제성 분석을 하는 경우, 각 포장의 단면이 다소 변경이 되더라고 기본노선이 동일하기 때문에, 기획 및 설계비는 동일하게 취급하기 때문에 제외한다.

나. 건설비(Construction Cost)

시공단계에서의 비용은 직접공사에 투입되는 순 공사비뿐만 아니라 시공업자의 선정, 입찰도서의 작성, 현장설명 등에 소요되는 비용을 포함한다. 직접공사비용과 간접공사비용과 일반관리비용 및 이윤을 합하여 산정한다.

다. 감리비(Supervision Cost)

감리비는 공사시 감리하는 업체에 제공하는 금액을 말한다. 여기에는 공사 현장관리 및 자문비용 등 여러 가지 비용이 포함되어 있다.

(2) 유지 관리비용(Operation & Maintenance Cost)

유지관리 단계에서의 비용은 LCC분석에서 가장 중요한 비용항목이며 여기에는 시설물에 대한 주기적인 점검과 보수에 소요되는 비용, 시설물 관리

에 필요한 물적·인적 비용이 포함된다. 유지관리비용은 크게 관리자 비용과 사용자 비용으로 구분된다.

〈표 11.1〉 생애주기를 고려한 비용 구성

항 목	세 부 항 목	
초기투자비용	기획설계비	
	건설비	
	감리비	
유지관리비용	관리자비용	일반관리비용 유지보수비용
	사용자비용	차량운행비용 운행지연비용 교통사고비용
해체·폐기비용 잔존가치	해체비용	
	폐기처분비용	
	재활용 비용	
	잔존가치	

가. 관리자비용

관리자비용은 유지관리비용으로 사용 중인 도로의 기능을 보전하고 도로 이용자의 편의와 안전을 높이기 위하여 도로를 일상적으로 점검·정비하는데 요구되는 일반관리비용과 손상된 부분을 원상복구 시키고 사용연수에 따라 요구되는 도로 보수작업에 대한 유지보수비용으로 구분된다. 보통 일반관리비용은 대안 선택 시 같은 노선 길이로 산정하기 때문에 동일하기 때문에 분석 시 고려하지 않고 유지보수 비용만 고려하게 된다.

나. 사용자비용

사용자비용은 도로 이용자가 도로의 보수작업으로 인하여 정상적으로 통행을 하지 못하게 되는 경우 주기적으로 지불하는 비용의 합으로, 차량운행비용, 운행지연비용, 교통사고비용 등이 포함된다.

1) 차량운행비용

차량운행비용은 크게 고정비용과 가변비용이 있는데, 고정비용은 차량의

운행여부와는 관계없이 차량을 소유하면서부터 발생하는 비용을 의미하는 것으로써 차량의 감가상각비, 보험금 등이 있다. 고정비용은 차량 운행과는 관계가 없으므로 정상적으로 통행이 어렵다 하더라도 증가하거나 감소하지 않는다. 반면에 가변비용은 차량의 운행으로 인하여 발생하는 비용으로 연료소모비, 엔진오일비 등이 있으며 이들 비용은 차량의 종류, 속도, 중량뿐만 아니라 교통량, 보수 시 공사기간에 따라 변화하는 비용이다.

2) 운행지연비용

운행지연비용이란 보수작업으로 인해 차량의 운행이 지연됨으로써 운전자의 시간에 대해 발생하는 비용으로 통행시간을 경제적 재화처럼 화폐가치로 나타낸 것이다. 즉, 시간을 비용으로 환산시키는 개념이다. 예를 들면 통행자의 임금수준, 이용경로나 교통수단의 선택 등을 기준으로 평가하는 여객시간가치, 화물의 품목에 따른 시간가치를 평가하는 화물 시간가치 등이 있다. 이 비용에 영향을 미치는 요소는 교통속도, 교통량, 보수시의 공사기간, 운전자의 시간가치 등이 있다.

3) 교통사고비용

도로의 이용 중 발생하는 사고로 인하여 발생하는 비용을 교통사고 비용이라고 한다. 교통사고 비용은 차량의 손상으로 발생하는 비용, 도로 시설물의 파손비용, 인명피해로 인한 비용등 여러 가지가 있으나 이중 통계자료가 없고 정량화하기 어려운 비용을 제외한 인명피해로 인한 비용만을 계산한다. 포장에 대한 경제성 분석에는 포장 형식의 차이나 보수기간의 차이로 인한 비용을 고려할 수 있다. 그렇지만 통계 자료의 부족으로 보통 LCC분석시 생략한다.

(3) 해체·폐기비용(Demolition & Disposal Cost) / 잔존가치

해체·폐기비용은 도로의 공용연수가 끝나는 시점에서 발생하는 비용으로 도로포장을 해체하는데 소요되는 해체비, 해체된 폐기물의 폐기 처분비, 잔존가치로 구분된다.

가. 해체비용

도로포장의 해체비용은 도로가 보수와 같은 유지관리 행위만으로는 더 이상 기능을 다하지 못하는 시점에서 도로를 해체하는데 소요되는 비용이다.

나. 폐기처분비용

폐기처분비용은 도로의 기능이 상실되어 해체한 후, 해체된 폐기물을 처분하는데 소요되는 비용을 합친 값이다.

다. 재활용가치

재활용가치는 포장재생에 관련된 순 가치이며, 도로포장 폐기물 가운데 재활용이 가능한지 여부에 따라 발생할 수 있는 부(-)비용이다.

라. 잔존가치

잔존가치는 기대수명에 비하여 아직 공용년수가 도달하지 않았을 때 가지는 가치를 말한다. 여기에서 해체 및 폐기를 할 경우 잔존가치는 0이 되며, 잔존가치로 계산할 경우에는 남은 공용년수를 고려하여 잔존가치를 추정한다.

11.2.2 현재가치 환산법

포장의 종류에 따라 시공시기, 공용연수가 다르므로 대안들을 비교하면, 우선 기준이 되는 시점을 정하고, 이것을 기준으로 각 대안에 발생하는 현재 비용과 미래 비용을 환산해야 한다. LCCA에서는 물가 상승률과 이자율을 동시에 적용하여 하나의 실질 할인율로 나타내고 이 실질 할인율을 이용하여 미래에 발생되는 비용을 현재의 가치로, 또는 현재의 금액을 미래의 가치로 등가 환산한다. 이때 물가상승률과 이자율에 의한 실질 할인율을 산출하는 방법은 <식 11.2>와 같다.

$$i \text{ (할인율)} = \frac{1 + \text{이자율}}{1 + \text{물가상승율}} - 1 \quad \langle \text{식 11.2} \rangle$$

초기 비용은 이미 현재가치로 표시되어 있으며, 매년 동일하게 반복되는

반복비용이 있을 경우 반복비용을 A, 할인율 i, 분석기간 n인 경우 반복비용의 현재가치 (P)는 <식 11.3>과 같다.

$$\begin{aligned} P &= \frac{A}{(1+i)} + \frac{A}{(1+i)^2} + \frac{A}{(1+i)^3} + \cdots + \frac{A}{(1+i)^n} \\ &= \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \times A \end{aligned} \quad \langle \text{식 } 11.3 \rangle$$

여기서, $\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n}$: 년현재가치(PWA: Present Worth of Annuity)계수

그리고 n년 후에 1회만 발생하는 비 반복 비용이 F, 할인율이 i면 비 반복 비용을 현재 가치 (P)로 환산하는 공식은 <식 11.4>와 같다.

$$P = \frac{1}{(1+i)^n} \times F \quad \langle \text{식 } 11.4 \rangle$$

여기서, $\frac{1}{(1+i)^n}$: 현재 가치 (PW: Present Worth)계수

따라서, 각 대안들에 대한 총 현재가치는 초기투자비, 현재가치 계수에 의해 환산된 유지보수비와 사용자비용들의 합으로 계산되며 기본 공식은 <식 11.5>와 같은 모형을 사용한다.

$$\text{순현재가치} = \text{초기투자비} + \sum_t (\text{유지보수비} + \text{사용자비용}) \left[\frac{1}{(1+i)^t} \right] \quad \langle \text{식 } 11.5 \rangle$$

여기서 i : 할인율

t : 분석기간내 년수

11.2.3 국내 연구의 각 항목의 변수 결정방법

국내 현실에 맞는 경제성 분석을 위하여 국내 연구자 중 이론 정립에 관련된 연구서를 제외하고 실제적인 계산과정을 담은 보고서를 중심으로 살펴보았다. 특히 각 보고서에서 제시한 분석 항목의 결정방법을 비교하였다. 이들의 연구 결과를 바탕으로 설계에 사용될 기준들의 도출 방법을 살펴보았는데, 기존 연구 대부분은 할인율 계산 시 한국은행 통계자료를 사용하였으며 교통사고비용은 포함하지 않았다. <표 11.2>는 국내 LCC분석 시 참고한 값을 나타내었다.

<표 11.2> 국내 LCC분석 시 사용 자료

연구자 (연구년도)	분석 기간	할인율 (년)	초기비용		유지관리비용				해체·폐 기비용
			건설비	기획설계비, 감리비	관리자비용	사용자비용	일반관 리비용	유지보수 비용	
권석현 (2000)	20	5년(97, 98제외)	예정가격 준칙원칙	엔지니어링 사업대가기준	생략	건설교통 통계연보, 국도유지보수 조사연구보고서	국토 개발연구원의 고속도로 사업효과조사 (1995)	생략	예정가격 준칙원칙
안장원 (2001)	20	7년	업체 견적	엔지니어링 사업대가기준	생략	98년 국도유지 보수조사 연구보고서	국토 개발연구원의 고속도로 사업효과조사 (1995)	생략	업체 견적
백석봉 (2002)	35	8년	실제 공사 비용산정	실제공사비 용산정	도로공사 자료사용	도로공사 자료사용	국토 개발연구원의 고속도로 사업효과조사 (1995) 도로교 공용수명 연장 방안연구	생략	건설폐기 물법
조윤호 (2002)	20	20년 통계를 바탕으로 판단	실제시공시 가격, 국도유지보 수조사연구 보고서	생략	생략	국도유지 보수조사연 구보고서	국토 개발연구원의 고속도로 사업효과조사 (1995)	생략	생략

11.2.4 경제성 분석 모형의 각 변수 결정 방법

(1) 분석기간

분석기간은 적어도 한 번이상의 재포장이 적용되는 시점을 포함해야 한다. <표 11.3>은 미국에서 예측하는 포장의 수명을 나타내고 있다. <표 11.3>에서 볼 수 있듯이 분석기간은 아스팔트 분석은 최소 20년, 콘크리트 분석은 최소 35년이 필요하다. 그렇기 때문에 FHWA에서는 분석기간으로 최소 35년 이상을 제안하였다. FHWA의 보고서가 반영된 AASHTO 2002설계 가이드에서는 최소 40년 이상의 분석기간으로 제안하였다. 때문에 도로포장 구조 설계에서는 최소 분석기간을 35년으로 설정한다.

(2) 할인율

할인율의 산정 중 필요한 정보 중 하나인 저축성 수신 금리의 정보 중 가장 신뢰할만한 기관인 한국은행은 1996년 이후의 자료만 축적하고 있다. 때문에 1996년 이후의 자료를 바탕으로 실질 할인율을 산정하였다. <표 11.4>는 96년부터 2005년까지 소비자 물가 상승률과 은행 시중 수신 금리와 이를 토대로 계산한 실질할인율을 나타낸다. 소비자 물가 상승률과 저축성 수신 금리의 정보는 한국은행 경제 통계 시스템(<http://ecos.bok.or.kr/>)을 이용하였다. 실질할인율 평균은 3.475%로, 표준편차는 2.700%로 계산되었다. 민감도 분석을 제외할 경우 3.5%의 값을 사용하며, 민감도 분석을 포함할 경우 신뢰도 95% 분석시 0~7%, 97%분석시 0~9%를 분석한다.

<표 11.3> 미국 각 주에서 예상하는 아스팔트와 콘크리트 수명

구분	아스팔트	콘크리트	비 고
콜로라도DOT*	20	30	아스팔트 10년 주기 덧씌우기 콘크리트 20년 주기
위스콘신주**	12~14	20~25	-
미네소타주**	20	35	아스팔트 12년 덧씌우기
켄터키주**	12	20	-
뉴욕**	10~13	20~25	-
FHWA(1985)**	6~20	13~30	-
서버지니아주***	8	20	-

* : Colorado Dot(2005)

** : America Concrete Pavement Association(2002)

*** : West Virginia Department Of Transportation Devision Of Highways Degin Directive(2003)

〈표 11.4〉 소비자 물가상승율 및 은행 시중금리(1996~2005) (한국은행 경제 통계 시스템)

년도	소비자물가상승율(%)	은행시중금리(%)	실질할인율(%)
1996	4.925	10.79	5.865
1997	4.439	11.32	6.881
1998	7.512	13.3	6.148
1999	0.813	6.9	6.087
2000	2.259	7.01	4.751
2001	4.1	5.43	1.33
2002	2.690	4.73	2.04
2003	3.555	4.15	0.595
2004	3.613	3.75	0.137
2005	2.703	3.62	0.917
평균	3.66	7.10	3.48

(3) 생애주기 비용의 산출

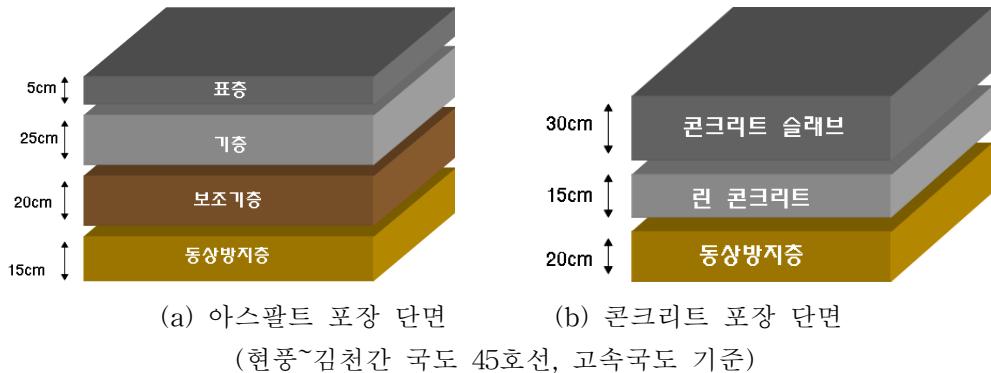
가. 초기 투자비용

1) 기획설계비 및 감리비

기획 설계비와 감리비는 일반적으로 과학기술부에서 매년 공고하는 “엔지니어링사업대가의 기준”을 참고하여 작성한다. 그렇지만 포장의 형식을 선택하는 과정에서의 기획 설계비와 감리비는 동일하다고 판단되므로 이 항목을 제외한다.

2) 건설비

건설비는 재정부에서 정한 원가계산에 의한 예정가격작성준칙에 의거하여 공사원가계산에 따라 산출되는 금액이다. 직접공사비용·간접공사비용·일반관리비용 및 이윤을 합하여 산정한다. 이 금액은 건설 표준 품셈이나 실적공사비 단가를 이용하여 산정한다. 산정한 금액은 재료비, 노무비, 경비를 산출한 결과이므로 금액에 일반관리비, 안전관리비, 이윤 등의 제잡비를 산출하여 계산한다. 제잡비는 보통 순공사비의 50%에 해당함으로 견적된 금액의 1.5배로 계산한다. 그렇지만 같은 공종이 시행된 구간이 있을 경우 실제 공사 금액을 산정한 내용을 바탕으로 산정하는 것이 더 정확한 방법이다.



〈그림 11.7〉 계산에 적용된 포장 단면

실제공사비용이 없을 경우 〈그림 11.7〉에 대한 도로 포장 비용을 산정하여 계산한다. 건설교통부에서 매년 두 번 발간하는 건설공사 실적 공사비 적용 공종 및 단가를 이용하여 가격을 책정하였다. 노상의 공정은 모든 포장에 동일하므로 제외하였고, 단순 포장형식만의 비교이므로 측구설치, 길어깨, 도로표지판등의 비용도 제외하였다. 〈표 11.5〉은 도로 폭 3.5m, 프라임코팅을 실시하였을 경우 아스팔트 포장의 비용산정 내역을 나타내고 있다. 기층의 시공비는 규격 10cm, 15cm 각 한번씩 가격을 합친 가격으로 산정하였다. 보조기층 산정 시에는 $L=1.15$, $C=0.95$ 으로 가정하였다.(L:흐트러진 상태의 토량의 변화율, C:다져진 상태의 토량의 변화율)

〈표 11.6〉은 콘크리트 가격 산정 내역을 나타내고 있다. 콘크리트 포장 계산시 레미콘은 25mm-24MPa-12cm(최대골재, 강도, 슬럼프)의 가격으로 산정하였다.(경인지역)

나. 유지관리 비용

1) 관리자 비용

a) 일반관리 비용

보통 포장에 관련된 대안을 선정할 경우는 노선길이가 같기 때문에 고려하지 않는다.

b) 유지보수 비용

유지보수 비용의 경우 건설교통부에서 발간하는 도로포장관리시스템의 부록D, 개략공사비나 실제적인 가격을 산정할 수 있을 시에는 이를 이용하여 금액을 산정하도록 한다. 여기서 운반비의 경우 현장 상황에 맞게 조정한다. <표 11.7>는 2003 도로포장관리시스템에서 제시하는 개략 공사비이다.

<표 11.5> 아스팔트 포장1km/lane 비용(폭 3.5m)

구분		가격(천원)	계산기준	계산과정	비고
표층(5cm)	시공비	2,128	m^2 당 608원	$3.5m \times 1000m \times 608원$	건설공사 실적공사비단가
	재료비	18,858	톤당 44600원	$3.5m \times 1000m \times 0.05m \times 2.4ton \times 44900원$	조달청 정부물자가격
기층 (25cm)	시공비	6,461	m^2 당 1846원	$3.5m \times 1000m \times 1,846원$	건설공사 실적공사비단가
	재료비	81,900	톤당 39000원	$3.5m \times 1000m \times 0.25m \times 2.4ton \times 39000원$	조달청 정부물자가격
보조기층 (20cm)	시공비	2,078	m^3 당 2,968	$3.5m \times 1000m \times 0.20m \times 2,968원$	건설공사 실적공사비단가
	재료비	6,356	m^3 당 7,500	$3.5m \times 1000m \times 0.20m \times 1.15 \div 0.95 \times 7,500원$	(사)한국물가정보
동상방지층 (15cm)	시공비	1,559	m^3 당 3,383	$3.5m \times 1000m \times 0.15m \times 2,968원$	건설공사 실적공사비단가
	재료비	4,767	m^3 당 7,500	$3.5m \times 1000m \times 0.15m \times 1.15 \div 0.95 \times 7,500원$	(사)한국물가정보
프라임코팅		1,526	m^2 당 436원	$3.5m \times 1000m \times 436원$	건설공사 실적공사비단가
계		119,340			

〈표 11.6〉 콘크리트 포장 1km/lane 비용(폭 3.5m)

구분		가격(천원)	계산기준	계산과정	비고
콘크리트 슬래브 (30cm)	시공비	23,223	m ² 당 6,635원	3.5m×1000m×6635원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	62,310	m ³ 당 원 54,650	3.5m×1000m×0.30m× 54,650원	조달청 정부물자가격
포장줄눈	-	141	m당 241원	167EA×3.5m×241원	건설공사 실적공사비단가
린콘크리트 (15cm)	시공비	23,223	m ² 당 6,635원	3.5m×1000m×6635원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	22,512	m ³ 당 42,880원(레미 콘)	3.5m×1000m×0.15m× 42,880원	조달청 정부물자가격
동상방지층 (20cm)	시공비	2,078	m ³ 당 2,968	3.5m×1000m×0.20m× 2,968원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	6,356	m ³ 당 7,500	3.5m×1000m×0.20m× 1.15÷0.95×7,500원	(사)한국물가정보
계		139,843			

〈표 11.7〉 단위 km당 유지보수 비용 집계표(단위 : 천원/6,700m²)

구분	재정적비용(전체공사비)			VAT 제외	비고
	유지보수 (덧씌우기)	기타 (길어깨처리)	계 (VAT 포함)		
상시유지보수 (Routine Maint)	2,415		2,415	2,174	(km/year)
소파수선 (Patching)	20,739		20,739	18,665	(원/m ²)
폴리머슬러리실 (Polymer Slurry seal)	29,846		29,846	26,861	
5AC	50,668	4,370	55,038	49,534	
5BB+5AC	96,063	5,079	101,142	91,028	
7BB+5AC	111,867	7,679	119,546	107,591	
10BB+5AC	138,575	9,527	148,102	133,292	
15BB+5AC	191,733	13,130	204,863	184,377	
CRM5AC	85,369	4,370	89,739	80,765	특수 1
SMA5AC	75,905	4,370	80,275	72,248	
PMA5AC	64,338	4,370	68,708	61,837	
PBSC5AC	75,905	4,370	80,275	72,248	특수 2
에코팔트(밀입도)5AC (다마아스팔트 5AC)	70,647	4,370	75,017	67,515	
배수성 5AC	95,897	4,370	100,267	90,240	배수성
현장재생5AC	90,386		90,386	81,347	재생공법
플랜트재생5AC	78,804		78,804	70,924	
절삭(5cm)	38,269		38,269	34,442	
절삭(5cm)+CRM5AC	123,638		123,638	111,274	특수 1
절삭(5cm)+SMA5AC	114,174		114,174	102,757	
절삭(5cm)+PMA5AC	102,607		102,607	92,346	특수 2
절삭(5cm)+PBSC5AC	114,174		114,174	102,757	
절삭(5cm)+에코팔트(밀입도)5AC (절삭 5cm+다마아스팔트 5AC)	108,916		108,916	98,024	
절삭(5cm)+CRM배수성5AC	134,165		134,165	120,749	

(한국건설기술연구원, 2004)

2) 사용자 비용

a) 차량운행비용의 산정(건설교통부, 2004)

차량운행 비용의 변수로는 연료 소모량, 엔진오일 소모량, 타이어 소모량 등이 있으며 이를 총 합계로 나타낸다.

- 유류비

유류비는 건설교통부(2004)에서 도로부분의 투자평가 지침에서 사용된 자료인 국토 연구원의 도로사업 투자기법 정립을 사용하였다. 국토연구원에 의하면 고속도로에서 실측한 연료비와 속도는 <식 11.6>과 같은 관계식을 갖는 것으로 분석한다.

$$\text{승용차} : L_c = 0.02882 + 0.910/V + 0.000003828 \times V^2$$

$$\text{소형버스} : L_{sb} = 0.03336 + 1.153/V + 0.000004312 \times V^2$$

$$\text{대형버스} : L_{lb} = 0.02476 + 3.492/V + 0.00001277 \times V^2$$

$$\text{소(중)형트럭} : L_{st} = 0.01695 + 1.292/V + 0.00001647 \times V^2$$

$$\text{대형트럭} : L_{lt} = 0.06639 + 4.158/V + 0.00002525 \times V^2 \quad \langle \text{식 } 11.6 \rangle$$

여기서, V : 차량속도(km/h)

<표 11.8>는 국도에서의 유류비 분석 시 (식 11.6)에서 식을 바탕으로 가중해야 할 차량별 유류 소모량을 차종별로 가중해야 할 값을 나타낸다.

유류비의 계산은 유류비와 국토 연구원에서 조사한 차종별 속도별로 연비측정실험에 의한 결과치(km/l)와 곱하여 산정한다. <표 11.9>는 계산시 필요한 유류비 가격이다.

<표 11.8> 일반국도 대비 고속도로의 연료소비율 향상을 비교 (국토연구원, 1999)

구 분	소형승용차	중형승용차	대형승용차	대형버스	소형트럭	대형트럭
평균 연비 향상율(%)	19.7	26.7	20.8	6.1	13.1	25.7

<표 11.9> 유류비 세전 공장도 가격(2006. 6월) (대한석유협회, 2006)

구 분	휘발유	경유	LPG
유류실질가격(원/L)	1540.41	1247.53	630.99

- 엔진오일비, 타이어비, 유지정비비, 감가상각비

<표 11.10> ~ <표 11.13>은 한국개발 연구원(2001)에서 인용한 자료를 사용하여 엔진오일비, 타이어비, 유지정비비, 감가상각비를 사용하는데 기초 자료로 쓰이는 값이다.

<표 11.10> 속도 · 차종별 엔진오일 소모량(한국개발 연구원, 2001) (단위 : L / 1,000km)

속도(km/h)	승용차	소형버스	대형버스	소형화물차	중형화물차	대형화물차
10	1.8	2.1	4.8	2.1	3.1	9.4
20	1.5	1.9	4.1	1.9	2.9	8.4
30	1.3	1.7	3.5	1.7	2.5	7.2
40	1.1	1.5	3.2	1.5	2.2	6.4
50	1.1	1.5	2.9	1.5	2.0	5.9
60	1.1	1.4	2.7	1.4	1.8	5.3
70	1.1	1.3	2.5	1.3	1.7	4.7
80	1.0	1.2	2.3	1.2	1.5	3.9
90	0.9	1.1	2.6	1.1	1.7	4.2
100	1.1	1.1	3.1	1.1	1.9	4.7
110	1.4	1.2	3.8	1.2	2.3	5.3
120	2.1	1.4	4.8	1.4	—	—

<표 11.11> 속도 · 차종별 타이어 마모율(한국개발 연구원, 2001)(단위 : % / 1,000km)

속도(km/h)	승용차	소형버스	대형버스	소형화물차	중형화물차	대형화물차
10	0.7	0.6	1.6	0.6	1.2	1.9
20	1.3	1.1	2.6	1.1	1.9	3.3
30	2.0	1.8	3.8	1.8	2.7	5.0
40	2.9	2.5	5.3	2.5	3.7	7.1
50	3.7	3.2	7.1	3.1	4.9	9.3
60	4.7	4.0	9.2	4.0	6.1	12.3
70	5.8	5.0	11.6	5.0	7.4	15.4
80	7.0	6.1	14.8	6.1	9.2	19.6
90	8.5	7.4	18.5	7.4	11.0	24.7
100	10.1	8.8	22.9	8.8	13.2	20.3
110	12.3	10.7	27.8	10.7	15.6	37.2
120	14.6	13.0	33.1	13.0	—	—

〈표 11.12〉 속도 · 차종별 차종별 유지정비비 비율(한국개발 연구원, 2001)

(단위 : % / 1,000km)

속도(km/h)	승용차	소형버스	대형버스	소형화물차	중형화물차	대형화물차
10	0.055	0.078	0.068	0.078	0.183	0.038
20	0.065	0.088	0.078	0.088	0.195	0.048
30	0.077	0.097	0.087	0.097	0.207	0.057
40	0.080	0.100	0.090	0.100	0.220	0.060
50	0.090	0.110	0.103	0.110	0.243	0.063
60	0.095	0.115	0.115	0.115	0.260	0.070
70	0.100	0.120	0.120	0.120	0.292	0.070
80	0.110	0.130	0.140	0.130	0.320	0.080
90	0.113	0.143	0.153	0.143	0.355	0.093
100	0.120	0.154	0.163	0.154	0.380	0.103
110	0.113	0.167	0.173	0.163	0.420	0.113
120	0.145	0.180	0.184	0.180	0.470	0.123

〈표 11.13〉 속도 · 차종별 감가상각비 비율 (한국개발 연구원, 2001)

(단위 : % / 1,000km)

속도(km/h)	승용차	소형버스	대형버스	소형화물차	중형화물차	대형화물차
10	0.880	1.150	0.310	1.150	0.780	0.280
20	0.750	0.950	0.270	0.950	0.660	0.230
30	0.640	0.780	0.220	0.780	0.580	0.190
40	0.540	0.650	0.180	0.650	0.490	0.160
50	0.460	0.560	0.153	0.560	0.430	0.133
60	0.415	0.495	0.135	0.495	0.385	0.115
70	0.380	0.445	0.123	0.445	0.350	0.103
80	0.340	0.400	0.110	0.400	0.320	0.090
90	0.315	0.367	0.097	0.367	0.293	0.088
100	0.293	0.340	0.087	0.340	0.273	0.079
110	0.268	0.310	0.079	0.310	0.256	0.072
120	0.237	0.285	0.071	0.285	-	-

- 총운행비용

유류비는 현재의 값으로 산정(2006. 6)하며 엔진오일비, 타이어비, 유지 관리비, 감각상각비는 건설교통부의 공공기관 투자지침에서 근거자료로 활용하는 자료가 1999년 자료이므로, 2000년부터 2005년까지의 물가 상승비율을 고려하여 20.46%만큼 더해 준다.

승용차는 휘발유 가격을 적용하고, 그 외 차량은 경유가격을 적용하여 계산한다. 계산한 결과는 다음 <표 11.14>와 같다.

<표 11.14> 승용차의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)

구분	속도	유류비		엔진오일비		타이어비		유지관리비		감각상각비		2006년 합계
		2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	
승용차	10	185.162	6.260	7.541	0.430	0.518	7.230	8.709	150.350	181.114	383.044	
	20	116.842	5.210	6.276	0.790	0.952	8.540	10.287	128.140	154.360	288.717	
	30	96.427	4.520	5.445	1.220	1.470	10.120	12.191	109.350	131.725	247.258	
	40	88.874	3.820	4.602	1.770	2.132	10.510	12.661	92.260	111.138	219.406	
	50	87.172	3.820	4.602	2.260	2.722	11.830	14.251	78.590	94.671	203.417	
	60	88.986	3.820	4.602	2.870	3.457	12.490	15.046	70.900	85.407	197.497	
	70	93.314	3.820	4.602	3.540	4.264	13.140	15.829	64.920	78.204	196.212	
	80	99.656	3.480	4.192	4.270	5.144	14.460	17.419	58.090	69.976	196.386	
	90	107.733	3.130	3.770	5.190	6.252	14.850	17.889	53.820	64.832	200.477	
	100	117.379	3.820	4.602	6.170	7.432	15.770	18.997	50.060	60.303	208.713	
	110	128.488	4.870	5.866	7.510	9.047	17.480	21.057	45.790	55.159	219.617	
	120	140.988	7.300	8.794	8.920	10.745	19.060	22.960	40.490	48.775	232.262	

<표 11.15> 소형버스의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)

구분	속도	유류비		엔진오일비		타이어비		유지관리비		감각상각비		2006년 합계
		2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	
소형버스	10	185.996	6.360	7.661	0.330	0.398	7.260	8.746	171.080	206.086	408.886	
	20	115.689	5.760	6.939	0.610	0.735	8.200	9.878	141.330	170.249	303.489	
	30	94.406	5.150	6.204	0.990	1.193	9.030	10.878	116.040	139.784	252.464	
	40	86.185	4.540	5.469	1.380	1.662	9.310	11.215	96.700	116.486	221.017	
	50	83.834	4.540	5.469	1.770	2.132	10.240	12.335	83.310	100.357	204.127	
	60	84.957	4.240	5.108	2.210	2.662	10.710	12.901	73.640	88.708	194.336	
	70	88.525	3.940	4.746	2.760	3.325	11.180	13.468	66.200	79.746	189.809	
	80	94.025	3.640	4.385	3.370	4.060	12.110	14.588	59.510	71.687	188.744	
	90	101.173	3.330	4.011	4.090	4.927	13.320	16.045	54.600	65.772	191.928	
	100	109.795	3.330	4.011	4.860	5.854	14.340	17.274	50.580	60.930	197.865	
	110	119.784	3.640	4.385	5.910	7.119	15.550	18.732	46.120	55.557	205.577	
	120	131.067	4.240	5.108	7.180	8.649	16.760	20.189	42.400	51.076	216.089	

〈표 11.16〉 대형버스의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)

구분	속도	유류비	엔진오일비		타이어비		유지관리비		감각상각비		2006년 합계
		2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	
대 형 버 스	10	468.119	12.450	14.997	0.880	1.060	11.280	13.588	521.710	628.461	1126.226
	20	255.080	10.630	12.805	1.420	1.711	12.940	15.588	454.400	547.378	832.561
	30	190.439	9.080	10.938	2.080	2.506	14.430	17.383	370.250	446.009	667.275
	40	165.288	8.300	9.998	2.900	3.493	14.930	17.985	302.930	364.915	561.679
	50	157.844	7.520	9.059	3.880	4.674	17.080	20.575	257.490	310.177	502.328
	60	160.847	7.000	8.432	5.030	6.059	19.070	22.972	227.200	273.689	471.999
	70	171.184	6.480	7.806	6.350	7.649	19.900	23.972	207.000	249.356	459.967
	80	187.302	5.960	7.180	8.100	9.757	23.220	27.971	185.120	222.999	455.208
	90	208.334	6.740	8.119	10.120	12.191	25.370	30.561	163.250	196.654	455.858
	100	233.762	8.040	9.685	12.530	15.094	27.030	32.561	146.420	176.380	467.482
	110	263.257	9.850	11.865	15.210	18.322	28.690	34.560	132.950	160.154	488.159

〈표 11.17〉 소형트럭의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)

구분	속도	유류비	엔진오일비		타이어비		유지관리비		감각상각비		2006년 합계
		2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	
소 형 트 럭	10	184.381	6.730	8.107	0.500	0.602	10.230	12.323	119.140	143.518	348.932
	20	109.955	6.090	7.336	0.920	1.108	11.540	13.901	98.420	118.558	250.859
	30	93.365	5.450	6.565	1.500	1.807	12.720	15.323	80.810	97.345	214.405
	40	94.316	4.810	5.794	2.080	2.506	13.110	15.793	67.340	81.119	199.527
	50	104.749	4.810	5.794	2.670	3.216	14.410	17.359	58.010	69.880	200.998
	60	121.978	4.490	5.409	3.340	4.023	15.080	18.166	51.280	61.773	211.348
	70	144.851	4.170	5.023	4.170	5.023	15.730	18.949	46.100	55.533	229.379
	80	172.793	3.850	4.638	5.090	6.132	17.050	20.539	41.440	49.919	254.020
	90	205.484	3.530	4.252	6.170	7.432	18.750	22.587	38.020	45.800	285.555
	100	242.732	3.530	4.252	7.340	8.842	20.190	24.321	35.220	42.427	322.574

〈표 11.18〉 중형트럭의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)

구분	속도	유류비	엔진오일비	타이어비		유지관리비		감각상각비		2006년 합계
		2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	
중형트럭	10	184.381	9.240	11.131	1.890	2.277	22.130	26.658	173.780	209.338 433.785
	20	109.955	8.350	10.059	2.990	3.602	23.580	28.405	147.040	177.127 329.147
	30	93.365	7.450	8.974	4.250	5.120	25.030	30.152	129.220	155.661 293.271
	40	94.316	6.560	7.902	5.820	7.011	26.610	32.055	109.170	131.508 272.792
	50	104.749	5.960	7.180	7.710	9.288	29.390	35.404	95.800	115.402 272.022
	60	121.978	5.370	6.469	9.590	11.552	31.440	37.873	85.770	103.320 281.192
	70	144.851	5.070	6.107	11.640	14.022	35.310	42.535	77.980	93.936 301.451
	80	172.793	4.470	5.385	14.470	17.431	38.700	46.619	71.290	85.877 328.104
	90	205.484	5.070	6.107	17.300	20.840	42.930	51.714	65.280	78.637 362.783
	100	242.732	5.670	6.830	20.760	25.008	45.960	55.364	60.820	73.265 403.199

〈표 11.19〉 대형트럭의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)

구분	속도	유류비	엔진오일비	타이어비		유지관리비		감각상각비		2006년 합계
		2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	
대형트럭	10	604.697	11.280	13.588	2.230	2.686	26.400	31.802	312.830	376.840 1029.613
	20	354.785	10.080	12.143	3.880	4.674	33.350	40.174	256.960	309.538 721.314
	30	284.081	8.640	10.408	5.870	7.071	39.600	47.703	212.270	255.704 604.967
	40	262.904	7.680	9.251	8.340	10.047	41.690	50.220	178.760	215.337 547.760
	50	265.318	7.080	8.529	10.930	13.166	43.770	52.726	148.590	178.994 518.734
	60	282.678	6.360	7.661	14.450	17.407	48.640	58.593	128.480	154.769 521.108
	70	311.277	5.640	6.794	18.090	21.792	48.640	58.593	115.080	138.627 537.083
	80	349.265	4.680	5.638	23.030	27.742	55.580	66.953	100.550	121.124 570.722
	90	395.610	5.040	6.071	29.020	34.958	64.620	77.842	98.320	118.438 632.920
	100	449.697	5.640	6.794	35.600	42.884	71.560	86.202	88.260	106.319 691.897

〈표 11.14〉~〈표 11.19〉를 이용하여 3차항을 중심으로 회귀분석을 하여 속도와 km당 차량 운행 비용에 대한 공식을 〈식 11.7〉과 같은 형태를 얻을 수 있다.

$$\text{km당 차량 운행비용} = A \times V^3 + B \times V^2 + C \times V + D \quad \langle \text{식 11.7} \rangle$$

여기서 V : 차량속도

A, B, C, D : 계수

A, B, C, D의 각 차종별 계수는 (표 11.20)과 같다. A, B, C, D에 관하여 소�数점 아래 자리수 결정을 위해 승용차의 금액에 관련된 분석을 실시한 결과 소수 넷째자리까지 구한 값에서는 R^2 값이 0.762, 소수 다섯째자리까지 구한 값에서는 0.981, 여섯째자리까지 구한 값에서는 0.983로 나타났다. 이를 토대로 소수 여섯째자리까지 구한 파라메터를 제사하였다.

〈표 11.20〉의 값은 기존의 건설교통부 투자 평가지침에서 소개된 COBA10(영국)에서 사용한 일반식을 변형하여 실제 적용속도에 따른 운행비를 산출한 결과 보다 더 높은 상관도를 보인다. 〈표 11.21〉은 계산에 이용한 3차식 회귀분석식과 〈식 11.8〉의 COBA10의 영국식 계산법을 사용했을 경우의 상관도를 비교하였다.

$$\text{영국식 차량운행비 일반식(COBA10)} : VOC = a + b_1/v + c v_2 \quad \langle \text{식 11.8} \rangle$$

여기서, v : 속도

a, b, c : 상수

〈표 11.20〉 VOC 회귀식의 차종별 계수 값

구 분	A	B	C	D	R2
승용차	-0.000433	0.120624	-10.206121	462.272736	0.982752
소형버스	-0.000501	0.136939	-11.635120	499.868129	0.985386
대형버스	-0.001798	0.456718	-37.218037	1434.256538	0.994624
소형트럭	-0.000783	0.193426	-12.843959	450.232027	0.981877
중형트럭	-0.000772	0.197375	-13.437566	540.411261	0.984280
대형트럭	-0.002223	0.535324	-37.791100	1327.667457	0.977740

〈표 11.21〉 3차식 회귀분석식과 영국식 분석식의 상관도 비교

구 분	3차식 회귀분석식 사용 R2	COBA10 영국식 사용 R2
승용차	0.982	0.954
소형버스	0.985	0.950
대형버스	0.994	0.957
소형트럭	0.981	0.923
중형트럭	0.984	0.920
대형트럭	0.978	0.940

b) 운행 지연 비용(건설교통부, 2004)

전체적인 내용은 건설교통부에서 발간한 ‘공공교통시설 개발사업에 관한 투자평가지침’의 절차를 따른다. 공사로 인한 통행시간 지연은 그만큼의 비용을 낭비하게 된다. 통행시간의 가치는 통행 목적이 업무적이나 비업무적에 따라 그 시간 가치가 변하게 된다. 업무적일 경우 지연시간으로 인한 생산 활동의 감소를 계산해야 하며, 비업무적일 경우 여가활동에 관련된 시간의 감소를 가져오게 된다.

- 시간 가치의 산정

여기에서 모든 통행량 중 1/4정도를 업무통행으로 가정하였다. 업무통행에 관한 시간가는 차량 탑승자 인건비를 기준으로 하여 임금율법으로 산정하였다. 급여 외에 복리후생비, 연금, 퇴직금충당금, 보험금 등의 오버헤드(overhead) 부분을 포함하고 월 평균 근로시간으로 나누어 산출하였다. 오버헤드 부분은 건설교통부의 “공공교통시설 개발 사업에 관한 투자평가지침”에 나온 내용을 인용하였다.

한 구간을 선정하여 설계 해당 구간의 교통량이 주어지면, 1인당 시간가치에 평균 재차인원을 곱하여 총 지연 시간 비용을 산정하게 된다. 산정 시 비업무와 업무목적 통행을 고려하여 계산한다.

임금계산은 통계청 통계정보시스템(<http://kosis.nso.go.kr/>)을 사용하여 산정하는 것이 타당하다. 승용차 탑승자의 임금은 비농 전체산업 임금을 기준으로 2005년 기준으로 산정하였으며 버스 운전자의 임금은 시내버스, 마을버스, 시외버스, 고속버스, 전세버스에 대하여 임금 급여액에 종사자수를 나눈 값을 기준으로 계산하였다. 트럭운전자의 임금은 일반화물자동차 운송업, 택배화물 운송업에 대하여 임금 급여액에 종사자수를 나눈 값으로 계산하였다. 전세버스 및 용달 화물 자동차의 경우 종일 근무가 아닌 임시 근무의 개념이 강하기 때문에 포함하지 않았다.

월 평균 근무시간은 승용차 운전자의 경우 전체산업의 평균 주간 근무시간을 이용하여 달로 환산하여 계산하였으며, 버스 및 트럭운전자의 경우 운수, 창고 및 통신업 근무시간을 적용하여 이를 환산하였다. 임금에 대한 오

버헤드 비율은 건교부 투자평가 지침에서 인용하였다. 〈표 11.22〉는 위의 절차를 따라서 산정한 승용차 운전자, 버스 운전자, 트럭운전자의 시간당 임금을 나타낸 값이다.

〈표 11.22〉 임금율법에 의한 업무통행의 시간가치 산출결과(2005년, 2004년 기준)

구 분	승용차 운전자	버스 운전자	트럭 운전자
1인당 월 평균 급여액(원/월)	2,524,917	1,956,324	1,804,688
근로시간(시간/월)	198.58	205.53	205.53
시간당 임금(원/인·시간)	12,714	9,518	8,781
임금에 대한 오버헤드 비율(%)	29.9	26.7	36.3
시간가치(원/인·시)	16,516	12,059	11,969

〈표 11.23〉 승용차와 버스의 통행 시간가치
(한국개발연구원(2001)의 자료를 이용하여 2004년 가치로 환산함)

구 分	승 용 차		버 스		
	업 무	비업무	운전자	업무	비업무
재차인원(인)	0.39	1.61	1	2.6	18.40
통행목적비율	19.5%	80.5%		16.4%	83.6%
시간가치(원/인·시)	16,516	5,505	12,059	16,516	2,424
평균시간가치(원/대·시)	6,441	8,863		99,599	
평균시간가치(원/대)	15,304		99,599		

비업무 통행의 시간가치는 획일적으로 국내에서는 승용차의 경우 업무 시간가치의 1/3을 적용하고 있다. 이에 대한 연구가 많이 진행되지 않아 도로포장 구조 설계에서도 같은 값을 적용한다. 외국의 경우도 1/3정도가 합리적이라고 판단하고 있다. 승용차의 경우 비업무통행의 시간가치는 업무통행 시간가치의 33.3%를 적용한다. 버스의 경우 20.1%를 적용하였다. 승용차의 경우 업무통행시의 재차인원은 18세 미만을 제외한 재차인원을 적용하고 버스의 경우 재차인원의 통행목적은 업무통행과 비업무통행의 비율을 16.4 : 83.6로 적용하였다. 버스 승객중 업무목적인 경우는 평균 임금에 의한 승용차 운전자의 시간가치를, 비업무 목적은 비업무 통행의 시간가치를 적용하여

산출한다. <표 11.23>은 이와 같은 방법으로 산출된 각 차량별 1대당 시간가치를 나타낸다. (한국개발연구원, 2001)

최창호(2002)년의 연구에서 인용한 De Jing, Gommer와 Klooster(1992)의 연구에서는 완성된 제품의 가격보다 1차 산업물품의 시간가치가 더 높게 나오게 되었다. 이는 이 제품이 생산과정 전반에 영향을 미치기 때문이라고 판단된다. 국내에 화물가치를 적용하기 위해서는 완제품보다는 원자재에 대한 화물가치를 산정할 필요가 있는데, 이에 대한 연구는 미비한 편이기 때문에 포함하지 않는다.

- 공사시간의 산정 및 지체비용 계산

공사로 인한 추가 시간은 <식 11.9>, 운행 지연비용은 <식 11.10>, VOC(Vehicle Operation Costs)은 <식 11.11>로 계산한다.

$$\text{공사로 인한 추가시간(h)} = \frac{\text{공사구간거리 (km)}}{\text{공사시 지정 속도 (km/h)}} - \frac{\text{공사구간거리 (km)}}{\text{평상시 속도 (km/h)}} \quad <\text{식 11.9}>$$

$$\text{공사시 지연 비용} = \text{공사추가시간} \times \text{교통량} \times \sum (\text{차량별 시간가치} \times \text{차량별 비율}) \quad <\text{식 11.10}>$$

$$\text{공사시 지연으로 인한 VOC 추가비용} = \text{차량 속도 변경으로 인한 추가 VOC} \times \text{교통량} \times \sum (\text{차량별 시간가치} \times \text{차량별 비율}) \quad <\text{식 11.11}>$$

여기서 차량 속도 변경으로 인한 추가 VOC는 <식 11.7>과 <표 11.19>를 이용하여 산정한다. 예를 들어 고속도로에서 공사를 시행하여 100km/h의 속도가 공사구간에서 최대 속도가 80km/h로 변경되었다고 가정한다면 추가되는 비용은 <표 11.24>와 같다. 대부분의 차량에서 80km/h가 더 경제적으로 나타났다. 그렇지만 최종적인 계산 시에는 시간가치가 들어가기 때문에 100km/h일 때가 더 경제적임을 추측할 수 있다.

평상시의 도로용량은 건설교통부에서 발간하는 도로용량 편람을 기본적으로 따른다. <표 11.25>는 공사시의 차선 용량을 조사한 결과이다. 대부분의 연구결과가 비슷한 결과를 도출하였으며, 2차선중 1차선을 막고 공사를 할 때 용량은 1,340정도로 나타났다. 이 값은 HCM(Highway Capacity Manual)과도 비슷한 경향을 가진다. (James Walls III, 1998)

<표 11.24> 100km/h에서 80km/h로 속도를 조정할 경우 추가금액(원/대)

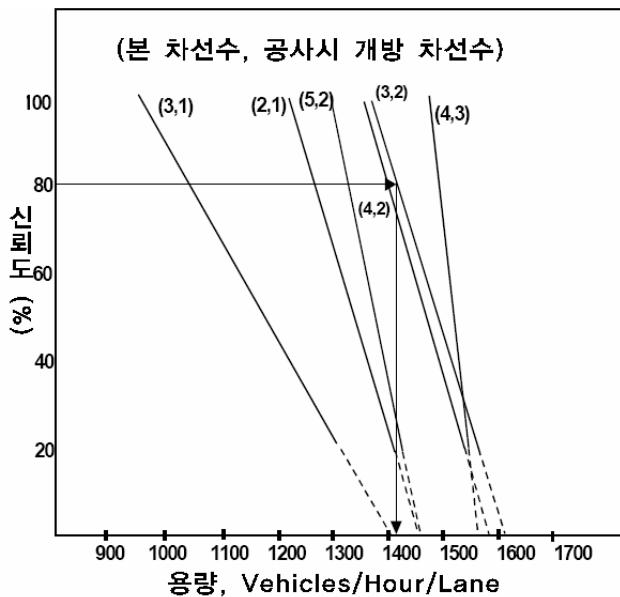
속도(km/h)	차량 종류에 따른 금액(원/km)					
	승용차	소형버스	대형버스	소형트럭	중형트럭	대형트럭
80	196.386	188.744	455.208	254.020	328.104	570.722
100	208.713	197.865	467.482	322.574	403.199	691.897
100에서 80으로 변경 시 추가금액	-12.327	-9.121	-12.274	-68.554	-75.095	-121.175

<표 11.25> 공사시 평균 차선 용량 (James Walls III, 1998)

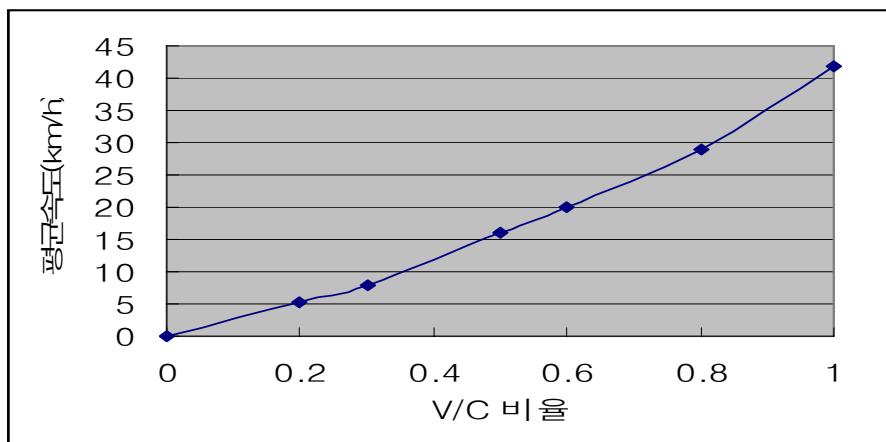
방향별 차선수	정상시 운행	공사시 운행	연구결과 건수	평균 용량	
				Vehicles/hour	Vehicles/lane/hour
3	1	1	7	1,170	1,170
2	1	1	8	1,340	1,340
5	2	2	8	2,740	1,370
4	2	2	4	2,960	1,480
3	2	2	9	2,980	1,490
4	3	3	4	4,560	1,520

<그림 11.8>는 HCM(Highway Capacity Manual) 1994에서 정의한 도로의 용량의 정의 값이다. 신뢰도(%)를 Y축으로 도로 용량을 X축을 사용하여 값을 추론할 수 있다. 예를 들면 80%의 신뢰도를 가질 때 3차선 편도시 1차선 공사, 2차선 운행시의 용량은 1,415 Vehicles Per Lane으로 읽을 수 있다.

만약 시간별 교통량이 <그림 11.8>의 용량을 넘는 경우 정체가 생기게 되는데 이에 따른 계산을 별도로 해주어야 한다.



〈그림 11.8〉 공사시 개방 차선수와 신뢰도에 따른 도로 용량(HCM, 1994)



〈그림 11.9〉 평균속도와 V/C와의 관계(LOS(Level Of Service) F일 때(HCM, 1994)

정체가 생길 때의 속도는 HCM 1994에서 제안한 값을 사용한다. HCM에서는 LOS F일 때의 속도를 〈그림 11.9〉와 같이 정의하고 있다. 현재 공사로 인하여 줄어든 시간별 교통량을 V로 두고, 공사 전 평상시의 교통 용량을 C(도로용량 편람으로 계산된 값)로 두고 그라프를 읽어 정체가 생길 경우의

평균 속도를 구한다.

공사로 인한 추가 비용과 마찬가지로 다음과 같은 과정을 거쳐서 정체가 생길시의 값을 계산한다. <식 11.12>를 사용하여 정체거리를 구한다.

$$\text{정체거리} = \frac{\text{평균정체차량교통량}(VHP)}{\frac{\text{도로용량}(VHP)}{\text{정체속도}(km/h)} - \frac{\text{교통량}(VHP)}{\text{평상시속도}(km/h)}} \quad \langle \text{식 } 11.12 \rangle$$

<식 11.13>을 이용하여 정체로 인한 추가 시간을 산정 후 <식 11.14>를 이용하여 정체로 인한 추가비용을 구한다. 또한 <식 11.15>를 이용하여 추가되는 VOC비용을 구하여 이를 산정한다.

$$\text{정체로 인한 추가시간} = \frac{\text{정체구간}}{\text{정체로 인한 지체속도}} - \frac{\text{정체구간}}{\text{평상시속도}} \quad \langle \text{식 } 11.13 \rangle$$

$$\text{정체로 인한 추가 비용} = \text{정체로 인한 추가시간} \times \text{교통량} \times \sum (\text{차량별 시간가치} \times \text{차량별 비율}) \quad \langle \text{식 } 11.14 \rangle$$

$$\text{정체로 인한 지연으로 인한 VOC 추가비용} = \text{차량 속도 변경으로 인한 추가 VOC} \times \text{교통량} \times \sum (\text{차량별 시간가치} \times \text{차량별 비율}) \quad \langle \text{식 } 11.15 \rangle$$

결론적으로, 정체가 생기지 않을 경우는 <식 11.10>, <식 11.11>을 합하여 계산하며, 정체가 생길시 <식 11.10>, <식 11.12>, <식 11.14>, <식 11.15>를 합하여 산정한다.

c) 교통사고비용·환경비용

- 교통사고비용의 정량화

교통사고 비용을 도로 포장의 경제성 분석의 결정에 적용하는 방법은 쉽지 않다. 단순한 교통 통계자료만 나열된 형태이기 때문에 공사 중 사고가

얼마나 더 크게 발생하는지, 어떤 영향에 의해 교통사고가 줄어드는지에 관련된 국내 연구는 미비한 편이다.

〈표 11.26〉 차선통제에 따른 사고수의 변화(FHWA/JHRP, 95)

차량통제방식	한방향 차선수	평균, 표준편차	1억 대·1mile당 사고수		
			평상시	차량통제시	변화량
한방향 통제	2	평균	6.0329	8.0431	2.0102
		표준편차	1.6842	3.6017	3.2005
일부 차선통제	2	평균	5.5916	7.4528	1.8612
		표준편차	1.4645	3.1398	3.3354
한방향 통제	3	평균	5.8278	9.3544	3.5266
		표준편차	1.2350	5.9645	5.6871
일부 차선통제	3	평균	7.5166	10.1006	2.5840
		표준편차	1.6422	2.6940	3.4964

〈표 11.27〉 차선통제에 따른 사상자수의 변화(FHWA/JHRP, 95)

차량통제방식	한방향 차선수	평균, 표준편차	1억 대·1mile당 사상자 발생 사고수		
			평상시	차량통제시	변화량
한방향 통제	2	평균	1.1289	2.0746	0.9457
		표준편차	0.5376	1.9380	2.1879
일부 차선통제	2	평균	1.0969	2.0311	0.9342
		표준편차	0.4252	1.3405	1.2684
한방향 통제	3	평균	1.5885	2.6367	1.0482
		표준편차	0.3961	1.5320	1.3851
일부 차선통제	3	평균	1.7641	2.1128	0.3487
		표준편차	0.2829	1.0574	1.1565

외국의 경우 일반적으로 보통상태에 비하여 3배정도 공사시 차량 사고가 증가한다고 판단하지만, 이 또한 확실한 구체적인 자료는 없다. 미국의 FHWA의 보고서에 의하면 한차선을 막고 공사를 진행하였을 때는 사고가 약간 증가하고, 두차선 모두를 막고 진행할 경우 사고가 다소 줄어들었지만, 크게 상관은 없었다.(FHWA, 1989) 또한 다른 조사에서는 〈표 11.26〉, 〈표 11.27〉과 같이 값을 제시하였다. 조사결과 사고로 인한 사상자가 2배정도 줄

어드는 것으로 조사되었다.

지속적인 연구에 의하여 기능성 포장의 사고가 구체적으로 몇 %의 저감 효과가 있음을 입증한다면 경제성 분석이 가능할 것이다. <표 11.28>은 도로 유형별 교통사고로 인한 사망자 및 부상자수를 나타낸 표이며, <표 11.29>는 사망자 및 부상자에 대한 각각의 사회비용을 나타내고 있다. <표 11.28>과 <표 11.29>를 토대로 사고의 증감에 따른 정확한 조사가 이루어질 경우 이를 이용하여 경제성 분석을 실시한다.

<표 11.28> 도로 유형별 교통사로로 인한 사망자 및 부상자수

도로 유형	km당 사고건수	1억 대·km당 사망자수	1억 대·km당 부상자수
고속도로	3.44	1.78	43.56
일반국도	5.92	6.78	196.48
지방도	1.49	4.89	126.07

(경찰청, 2001, 건설교통부, 도로교통량통계연보, 2001)

<표 11.29> 교통사고 사망자 1인당 교통사고 비용(교통개발연구원, 2002)

(단위 : 만 원)

구 분	사망자	부상자
교통사고비용	37,331.19	4,083.5

* PGS를 포함한 금액이며, 부상사고건수당 사고비용은 평균부상사고비용임.

- 환경비용의 정량화

기본적으로 환경비용과 도로 포장의 경제성에 관련된 연구는 미비한 편이다. 이는 어떤 포장 형식을 취하더라도 환경에 미치는 영향이 미비하기 때문에 이 분야에 대한 연구가 미비할 수밖에 없다. 그렇지만 최근에 기능성을 강조한 포장의 등장으로 저소음 포장이 개발되어 실용화 단계에 있다. 이 분야에 대한 연구 중 실질적으로 경제성 평가에 적용할 수 있는 분야인 소음에 대한 정량화이다.

〈표 11.30〉 교통소음에 대한 사용자 비용의 정량화 (건설교통부, 2004)

도로위치 비 용	도시지역	지방지역
	피해비용(천원/dBA/km/연)	5,611
		1,955

〈표 11.31〉 2005년 7월 29일 기준 해체비용 및 폐기 처분비용 (자료 : 폐기물처리 공제조합)

품 명	주요배출지	적 용 범 위	단위	최저가(원)
폐콘크리트	콘크리트포장 도로, 교량, 옹벽	토목 구조물 해체시 발생하는 콘크리트 등의 성상으로서 이물질이 없는 순수한 폐콘크리트를 말한다.	TON	15,896.07
폐아스팔트 콘크리트	아스팔트 포장도로	이물질이 없는 포장도로에서 발생되는 순수한 폐아스팔트콘크리트를 말한다.	TON	17,443.77

소음부분에 대한 정량화는 건설교통부의 ‘공공교통시설 개발 사업에 관한 투자평가지침’을 토대로 작성한다. 방음벽 설치비를 기준으로 소음 저감의 편익을 산출한다. 건설교통부 보고서의 결과 값을 2005년 단위로 환산한 결과는 〈표 11.30〉과 같다.

다. 해체·폐기비용

1) 해체비용 및 폐기처분비용

대한건설 폐기물처리 공제조합(<http://www.conwas.com/>)의 산정기준에 의해 산정한다. 〈표 11.31〉은 2005년 7월 29일 기준 폐기물 처리 단가를 나타낸 것이다.

2) 잔존가치

잔존가치는 포장재생에 관련된 순 가치이며, 도로포장 폐기물 가운데 재활용이 가능한지 여부에 따라 발생할 수 있는 부(-)비용이다. 보통 도로 포장의 재활용 금액은 계산에 고려하지 않으며, 기대수명이 많이 남아 있는 경우 〈식 11.16〉에 의하여 부(-)비용을 계산한다.(AASHTO, 2002)

$$\text{잔존가치} = (L_r/L_e) * C_p$$

〈식 11.16〉

여기서 : L_r =남아있는 포장의 수명(년)

L_e =기대수명(년)

C_p =초기 건설 비용

위에서 서술한 내용을 요약하면 〈표 11.32〉와 같이 나타낼 수 있다.

11.3 각 공법별 보수시점 제시 및 현 공법의 잠정 기준 제시

일반적으로 도로 포장의 공용수명 예측 모형과 연계하여 포장의 수명을 예측한 후 보수시점을 제시한다. 국내의 포장의 유형별 보수시기와 보수 방법을 제시함으로써 생애 주기비용의 계산의 표준화를 이루는데 목적이 있다.

본 장에서는 기존의 자료를 조사하여 유지보수 시기를 검토하였다.

〈표 11.32〉 비용산정방식의 요약

항 목	세 부 항 목		비 용 산 정 방 식
초기투자비용	기획설계비		엔지니어링사업대가기준 산출
	건설비		표준품셈, 실적공사비, 견적
	감리비		엔지니어링사업대가기준 산출
유지관리비용	관리자비용	일반관리비용	건교부자료조사
		유지보수비용	건교부자료조사
	사용자비용	차량운행비용	
		운행지연비용	각종 모델 및 자료조사
		교통사고비용	
해체·폐기비용	해체비용		건설 폐기물 공제조합 자료
	폐기처분비용		건설 폐기물 공제조합 자료
	잔존가치		계산 및 재사용 비용 추정

11.3.1 국내 자료

국내의 LCC는 최근에 많은 연구가 있었지만 대부분의 연구가 기존의 유지보수비 자료를 바탕으로 매년 균등한 유지보수비를 아스팔트와 콘크리트 포장에 대해 적용하였다. 대부분의 연구는 보수시점을 구체적으로 제시하지를 않았지만, 몇몇 연구는 보수시점을 구체적으로 제시하였다.

권석현(2000)은 아스팔트 포장에 대하여 5년 주기로 덧씌우기를 하고, 소파보수와 표면처리는 1년 주기로 분석하였다.

조병완(2003)은 대도시 포장의 경우 일반아스팔트 포장과 재생아스팔트 포장은 3년, 개질아스팔트 포장은 7년마다 덧씌우기를 하는 것으로 분석하였으며, 기대수명은 일반아스팔트 포장은 25년, 개질 및 재생아스팔트 포장은 10년을 주기로 분석을 하였다.

조윤호(2003)는 국도 유지보수대장을 참고하여 아스팔트 포장에 대하여 상시유지보수는 2년마다, 5cm 덧씌우기는 5년, 10cm 덧씌우기는 10년주기로 시공하는 것으로 분석하였다.

11.3.2 외국 자료

외국의 경우 각 주 및 각 연구기관에서 축적된 과거이력 자료를 통하여 LCC분석을 위한 보수시기 및 보수방법을 제시하고 있다.

James A.(1999)는 일리노이와 오하이오주, A. Bradburry는 온타리오주, Joseph N.(2003)은 미네소타주, 콜로라도의 2006년 설계가이드에서는 콜로라도주의 보수시기 및 보수 공법을 정리하였다.

〈표 11.33〉은 위에서 서술한 연구를 바탕으로 한 각각의 포장에 대한 보수시기 및 방법을 제시한 내용이다. 사용된 용어중 CPR은 Concrete Pavement Restoration의 약자로 다음 8가지 기술을 종합한 용어이다. (American Concrete Pavement Association, 2002)

1. 전체 깊이 패칭
2. 부분 깊이 패칭

3. 다이아몬드 그라인딩
4. 줄눈 및 크랙 실링
5. 슬래브 안정화
6. 다웰바 보수
7. 길어깨의 보수
8. 종방향 균열 및 줄눈의 보수

〈표 11.33〉 미국 각주의 보수 시기 및 보수 공법의 정의

지역	포장형식	보 수 내 용 (보수시점 : 년)
온타리오주	다웰 JPCP	줄눈 실링(12, 20), 부분 CPR & 다이아몬드 그라인딩(18), 전체 CPR(29) & 다이아몬드 그라인딩(29), 80mm 아스팔트 덧씌우기(38), 균열 실링보수(41, 44), 분석종료(50)
	SMA 아스팔트	균열 실링보수(3, 9, 15, 24, 31, 37, 44, 49), 패칭(15), 패칭 & 균열 실링보수(19, 28, 41), 80mm 밀링 & 아스팔트 덧씌우기(21, 34, 46), 분석종료(50)
미네소타주	아스팔트 (20년 700만 ESALs ^{0회})	균열실링보수(6, 23, 38), 표면처리(10, 27, 43), 밀링 & 덧씌우기(20, 35), 분석종료(잔존가치0)(50)
	아스팔트 (20년 700만 ESALs ^{0상})	소파보수(7, 20, 32, 45), 밀링 & 덧씌우기(15, 27, 40), 분석종료(잔존가치0)(50)
	콘크리트	줄눈 실링 & 부분 CPR(17), 부분 CPR(전 깊이 패칭)(27), 전체 CPR(40), 분석종료(잔존가치5년)(50)
콜로라도주	아스팔트 (20년 설계기준)	5cm 밀링 & 아스팔트 덧씌우기(10, 20, 30), 분석종료(40)
	콘크리트 포장 (30년 설계기준)	-다웰바와 타이바 설치시 6.35mm의 50%깊이의 다이아몬드 그라인딩 & 줄눈 채움 & 0.5% 슬래브 교체(22), 분석종료(40) -다웰바 타이바 미설치시 6.35mm의 다이아몬드 그라인딩 & 줄눈 채움 & 1% 슬래브 교체(22), 분석종료(40)
	콘크리트 포장 (20년 설계기준)	5cm 아스팔트 덧씌우기(20, 30) 도시의 중하중 교통일 경우 7.25cm 아스팔트 덧씌우기(20, 30)
일리노이	아스팔트 ESALs>3400만 (시골) ESALs>2270만 (도시)	중앙부 균열 실링(3, 6, 14, 21, 29, 37) 횡방향 균열 소파보수(15%-3, 50%-6, 100%-14, 21, 29, 37) 무작위 균열 소파보수(50%-6, 14, 21, 29, 37) 패칭(0.5%-5, 2%-13, 28, 36, 4%-20) 표면 밀링(5, 13, 20, 27, 36) 아스팔트 덧씌우기(4cm-5, 13, 28, 36, 8cm-20)
	아스팔트 ESALs>2450만 (시골) ESALs>1630만	중앙부 균열 실링(3, 8, 15, 21, 31) 횡방향 균열 소파보수(15%-3, 50%-8, 12, 15, 100%-21, 31) 무작위 균열 소파보수(50%-8, 15, 21, 31) 패칭(0.5%-5, 3%-7, 30, 4%-20), 표면 밀링(7, 20, 30)

	(도시)	아스팔트 덧씌우기(4cm-7, 30, 8cm-20)
	아스팔트 ESALs>1500만 (시골) ESALs>1000만 (도시)	중앙부 균열 실링(3, 11, 21, 33) 횡방향 균열 소파보수(15%-3, 50%-6, 100%-11, 21, 33) 무작위 균열 소파보수(50%-11, 21, 33) 패칭(0.5%-5, 3%-10, 32, 4%-20), 표면 밀링(10, 20, 32) 아스팔트 덧씌우기(4cm-10, 32, 8cm-20)
	아스팔트 ESALs<1500만 (시골) ESALs<1000만 (도시)	중앙부 균열 실링(3, 12, 21, 31) 횡방향 균열 소파보수(15%-3, 50%-6, 100%-12, 21, 31) 무작위 균열 소파보수(50%-12, 21, 31) 패칭(0.5%-5, 3%-10, 32, 4%-20), 표면 밀링(20) 아스팔트 덧씌우기(8cm-20)
	콘크리트	종방향 줄눈 실링(10, 20, 30) 길어깨 줄눈 실링(10, 20, 30) 횡방향 줄눈 실링(10, 20, 30) 전체깊이보수(0.5%-7, 1%-10, 1.5%15, 25, 4%-20, 2.5%-30, 3.5%-35) 표면 그라인딩(20), 서브실링(70%-20)
화 학 회 우 주	아스팔트	아스팔트 덧씌우기(4cm-10, 30) 8cmAC+8cmBB층(20)
	콘크리트	횡방향 줄눈 실링(20), 전체 깊이 보수(2%-20) 표면 그라인딩(20), 아스팔트 덧씌우기(30)

〈표 11.34〉 아스팔트 관련 협회에서 제시하는 보수 시기 및 보수 공법의 정의

제안협회	포장형식	보 수 내 용 (보수시점 : 년)
미네소타 아스팔트 협회*	아스팔트	덧씌우기(15년주기)
	콘크리트	전체보수(20년주기)
미국 아스팔트 협회**	아스팔트	아스팔트 덧씌우기(10, 27), 균열보수(18), 재시공(33) - 단 재시공은 온도로 인한 균열 발생시
	콘크리트	실링, 패치(9), 아스팔트 덧씌우기(18, 31), 재시공(34)

* Minnesota Asphalt Pavement Association(2003)

** Asphalt pavement alliance(2005)

〈표 11.35〉 콘크리트 협회에서 조사한 보수 시기 및 보수 공법의 정의
(American Concrete Pavement Association, 2002)

지역	포장형식	보 수 내 용 (보수시점 : 년)
북 캐 롤 라 이 나	아스팔트	6.25cm 밀링, 6.25cm 덧씌우기(10), 6.25cm 밀링, 12cm 덧씌우기(20), 분석종료(30)
	콘크리트	절삭&줄눈 재실링(10), 절삭&줄눈 재실링, 그라인딩(20), 분석종료(30)
남 캐 롤 라 이 나	아스팔트	3.2cm 덧씌우기(10), 2.5cm 밀링, 7cm 덧씌우기, 분석종료(30)
	콘크리트	청소&줄눈 재실링(10), 청소&줄눈 재실링, 2% 슬래브 교체(20), 분석종료(30)
위 싱 턴 주	아스팔트	아스팔트 덧씌우기(13, 25, 37), 분석종료(40)
	콘크리트	그라인딩&줄눈 재실링(20), 분석종료(40)
죠 지 아	아스팔트	밀링&덧씌우기(10, 20), 분석종료(30)
	콘크리트	줄눈 재실링(20), 분석종료(30)

〈표 11.34〉, 〈표 11.35〉는 아스팔트와 콘크리트 협회에서 제시하는 보수시기 및 방법이다. 각 협회에서 제시하는 내용은 한쪽으로 다소 치우친 경향이 있다.

국내의 경우 구체적으로 보수시점과 보수공법을 정의하지 않고 있다. 이는 체계적인 PMS(Pavement Management System)의 미비로 볼 수 있다. 포장의 수명을 예측하지 못함으로 인하여 보수시점과 보수공법을 예측하는 것이 실질적으로 어렵기 때문에 민원이 들어올 경우를 제외하고 일괄적인 행정적인 처리로 보수 및 재포장을 결정하고 있는 것이 국내 현실이다.

11.4 경제성 평가 비용 D/B 구축

11.4.1 아스팔트 포장

(1) 재료비

아스팔트 포장의 재료비용은 일반 아스팔트포장과 SMA 아스팔트로 구분하여 조사하였다. 재료비용은 (사)한국물가정보의 자료를 이용하였다. 편의를 위해 M/T단위당 가격을 $2.4t/m^3$ 으로 환산하여서 재료비를 산정하였다.

가. 일반 아스팔트 혼합물 비용

(사)한국물가정보의 자료를 보면 거래실례 가격과 업체에서 공시한 가격과 차이가 있어 두 값의 평균값을 사용하였으며, <표 11.36>과 같다.

<표 11.36> 일반 아스팔트 평균 가격

일반 아스팔트	규격	단위	단가(원)
아스팔트	기층용	M/T	51,585
아스팔트	중간층용	M/T	53,665
아스팔트	표층용	M/T	56,335

출처:(사)한국물가정보 2009년1월

위에서 구한 일반 아스팔트 평균가격을 $2.4t/m^3$ 로 환산하여 충별 재료비 산정시 적용하면 각층의 시공 부피(m^3)에 맞는 재료 비용을 구할 수 있다. <표 11.37>은 일반 아스팔트의 환산 가격을 나타낸 것이다.

<표 11.37> 일반아스팔트 부피 환산 가격

일반 아스팔트	규격	단위	단가(원)	$2.4t/m^3$ 환산 가격(원)
아스팔트	기층용	M/T	51,585	123,804
아스팔트	중간층용	M/T	53,665	128,796
아스팔트	표층용	M/T	56,335	135,204

나. SMA 아스팔트의 재료 비용

SMA 아스팔트의 재료 비용은 일반아스팔트 재료비용과 동일하게 (사)한국물가정보의 자료를 통하여 조사하였으며, <표 11.38>과 같다.

〈표 11.38〉 SMA아스팔트 평균 가격

SMA아스팔트	규격	단위	단가(원)
SMA 아스팔트	10,13mm	M/T	80,000
SMA 아스팔트	8mm	M/T	90,000

출처:(사)한국물가정보 2009년1월

SMA 아스팔트도 일반 아스팔트와 동일하게 $2.4t/m^3$ 로 환산 하여 층별 재료비 산정시 적용하면 시공 부피(m^3)에 맞는 재료 비용을 구할 수 있다. 〈표 11.39〉는 SMA 아스팔트의 환간 가격을 나타낸 것이다.

〈표 11.39〉 SMA 아스팔트 부피 환산 가격

SMA 아스팔트	규격	단위	단가(원)	$2.4t/m^3$ 환산 가격(원)
SMA 아스팔트	기층용	M/T	80,000	192,000
SMA 아스팔트	중간층용	M/T	90,000	216,000

(2) 시공비용

아스팔트 포장의 시공비용은 표층, 중간층, 기층, 보조기층, 동상방지층의 시공비용을 포함한다. 시공비용은 2008년 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가(국토해양부, 한국건설기술연구원)와 도로포장 및 유지보수 표준품셈 재·개정 용역[참고자료](도명 E&C, 2007.5)자료를 이용하였다. 도로포장 및 유지보수 표준품셈 재·개정 용역[참고자료](도명 E&C, 2007.5)자료는 2007년도 비용이므로 이를 한국은행에서 조사한 물가상승율을 이용하여 2008년 비용으로 환산하였다. 택코팅과 프라임 코팅 시공비용에는 재료비도 포함되어 있는 시공 비용이다. 단위는 m^2 , m^3 으로 통일 하였다.

가. 표층 포설 및 다짐

표층 포설 및 다짐 시공비용은 〈표 11.40〉과 같이 포장두께에 따라 구분하였다.

〈표 11.40〉 아스콘포장/표층/포설및다짐 시공비용

규격	단위	단가 (원)
T=5.0cm	m ²	565
T=8~10cm	m ²	1,412

출처: 2008년 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가

나. 중간층 포설 및 다짐

〈표 11.41〉 아스콘포장/중간층/포설및다짐 시공비용

규격	단위	단가 (원)
T=6cm	m ²	539

출처: 2008년 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가

다. 기층 포설 및 다짐

기층의 시공비용은 〈표 11.42〉와 같이 포장두께에 따라 구분 하였다.

〈표 11.42〉 아스콘포장/기층/포설및다짐 시공비용

규격	단위	단가 (원)
T=10cm	m ²	594
T=14~15cm	m ²	1,270

출처: 2008년 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가

라. 동상방지층 및 보조기층 포설 및 다짐

보조기층과 동상방지층은 콘크리트 포장 시에도 공통적으로 적용되는 시공이고, 규격에 따라서 시공비용을 구분하였다. 규격 이하 혹은 이상인 경우 보간법을 이용하여 원단위를 구하였으며, 〈표 11.43〉과 같다.

〈표 11.43〉 동상방지층 및 보조기층 포설 및 다짐 시공비용

규격	단위	단가 (원)
30cm	m ³	3,069
40cm	m ³	2,840

출처: 2008년 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가

(3) 시공 작업량

작업량은 작업일수를 산정하는데 아주 중요한 자료이다. 작업일수에 따라 사용자비용이 산정되며 이는 경제성 분석의 중요한 항목이다. 아스팔트 콘크리트 포장의 작업량산정은 2008 건설공사 표준품셈(한국건설기술연구원)의 자료를 참조 하였다. 2008년 건설공사 표준품셈의 작업량은 하루 8시간 기준의 작업량이다. 포장설계 D/B에는 계산의 편의를 위해서 1시간 작업량으로 환산하였다. 일반 아스팔트 포장의 작업량은 기계시공시 작업량을 나타낸다.

가. 표층 포설 및 다짐

표층 작업량은 시공구간의 폭에 따라서 〈표 11.44〉와 같이 시간당 시공량을 구분하였다.

〈표 11.44〉 표층 포설 및 다짐 시공량

8시간시공량(m ³)		1시간기준 시공량(m ³)
1.4m ≤ 시공폭 < 3m	2,000	250
3m ≤ 시공폭	5,000	625

출처: 2008 건설공사 표준품셈

나. 기층 포설 및 다짐(BB층)

기층의 시공량은 두께 10cm를 기준으로 〈표 11.45〉와 같이 시간당 작업량을 구분하였다.

〈표 11.45〉 기층 포설 및 다짐(BB층) 시공량

8시간시공량(m^3)		1시간기준 시공량(m^3)
두께 $\geq 10\text{cm}$	3,600	450
두께 $< 10\text{cm}$	4,000	500

출처: 2008 건설공사 표준품셈

다. 동상방지층 및 보조기층 포설 및 다짐

보조기층과 동상방지층의 작업량은 시공비용과 달리 규격에 따라 구분되지 않는다. 〈표 11.46〉은 시간당 m^3 의 작업량이다.

〈표 11.46〉 동상방지층 및 보조기층 포설 및 다짐 시공량

8시간시공량(m^3)		1시간기준 시공량(m^3)
550		68.75

출처: 2008 건설공사 표준품셈

(4) 유지 보수

가. 유지 보수 비용

아스팔트 포장의 유지 보수 비용은 도로포장관리시스템(부록 E_ 공사시방서, 표준도, 개략공사비, 2000)의 단위 km당 유지보수 비용 집계표를 통하여 산정하였다. 이 자료는 2002년도 자료 이므로 이를 2007년 물가상승율(2.5%)을 고려 하여 2008년기준의 값으로 환산 하였다. 또한 단위가 6700m^2 당 비용이므로 이를 1m^2 당 가격으로 환산하였다.

〈표 11.47〉 아스팔트 포장 유지보수 비용

구분	2002년도 비용 (단위: 천원/6700m ²)		2008년 환산비용 (단위: 천원/6700m ²)		2008년 환산비용 (단위: 원/1m ²)	
	계	VAT 제외	계	VAT 제외	계	VAT 제외
상시유지보수	2415	2174	2867	2581	428	385
소파수선	23920	21528	28394	25555	4,238	3,814
플리머슬러리실	24503	22053	29086	26178	4,341	3,907
5AC	56581	50923	67164	60448	10,024	9,022
7BB+5AC	125595	113036	149085	134177	22,251	20,026
10BB+5AC	153754	138379	182511	164260	27,240	24,516
15BB+5AC	210611	189550	250002	225002	37,314	33,582
CRM5AC	93060	83754	110465	99419	16,487	14,839
SMA5AC	82637	74373	98093	88283	14,641	13,177
PMA5AC	72214	64993	85720	77149	12,794	11,515
PBS5AC	72172	64055	85670	76035	12,787	11,349
에코팔트(밀입도)5AC	83281	74953	98857	88972	14,755	13,279
현장재생5AC	90386	81347	107290	96562	16,013	14,412
플랜트재생5AC	64718	58246	76823	69140	11,466	10,319
에코팔트(배수성)5AC	95144	85630	112939	101645	16,857	15,171
CRM(배수성)5AC	108295	97466	128550	115695	19,187	17,268
PMA(배수성)5AC	95788	86209	113704	102333	16,971	15,274
절삭(5cm)	38816	34934	46076	41468	6,877	6,189
절삭(5cm)+CRM5AC	127506	114755	151354	136217	22,590	20,331
절삭(5cm)+SMA5AC	117083	105375	138981	125084	20,743	18,669
절삭(5cm)+PMA5AC	106660	95994	126609	113947	18,897	17,007
절삭(5cm)+PBS5AC	105618	95056	125372	112834	18,712	16,841
절삭(5cm)+에코팔트(밀입도)5AC	112914	101623	134033	120630	20,005	18,004
절삭(5cm)+에코팔트배수성5AC	129590	116631	149079	138445	22,251	20,663
절삭(5cm)+CRM배수성5AC	137928	124135	163725	147352	24,437	21,993
절삭(5cm)+에코팔트PMA수성5AC	125421	112879	148879	13990	22,221	2,088

출처: 도로포장관리시스템(부록 E_ 공사시방서, 표준도, 개략공사비, 2000)

나. 유지보수 시공량

유지보수 시공량은 2008 건설공사 표준품셈의 자료를 인용하여 조사하였다. 유지보수 시공량 또한 기존 8시간당 시공량을 <표 11.48>과 같이 시간당 시공량으로 환산하였다.

<표 11.48> 절삭 후 아스팔트 덧씌우기 작업량

형식	시공량(m^3)	
	8시간 시공량	1시간기준 시공량(m^3)
밀링깊이 50mm	5,000	625
밀링깊이 70mm	4,400	550

출처: 2008 건설공사 표준품셈

11.4.2 콘크리트 포장

(1) 재료비

콘크리트 포장의 재료비는 실적단가를 바탕으로 산정하였다.

<표 11.49> 시멘트 콘크리트 가격 (도착가)

단위	가격
m^3	25,476원

(2) 시공비

보조기층과 동상방지층은 아스팔트 포장과 동일하므로 표층과 린콘크리트층에 대한 자료이다.

가. 포설 비용

포설 비용은 인력식과 기계식으로 구분되어지나 기계식만으로 시공한다

고 가정하였다. 기계식은 1차로 포장과 2차로 동시포설로 구분한다.

〈표 11.50〉 기계식 콘크리트 포장/포설 시공비용

공종명	규격	단위	단가(원)	2008년환산 단가(원)
기계포설/ 무근2차로동시포설	T=30cm	m^3	4,684	4,801
무근 1차로 포설	T=30cm	m^3	5,139	5,267

출처: 도로포장 및 유지보수 표준품셈 재·개정
용역[참고자료](도명E&C, 2007.5)

나. 린콘크리트 포설 및 다짐

〈표 11.51〉 린콘크리트 포설 및 다짐 시공비용

규격	단위	단가(원)	2008년환산 단가(원)
T=15cm	m^3	2,758	2,826

출처: 도로포장 및 유지보수 표준품셈 재·개정
용역[참고자료](도명E&C, 2007.5)

(3) 시공 작업량

콘크리트 포장의 작업량은 2008 건설공사 표준품셈을 통하여 기존 8시간당 작업량을 시간당 작업량으로 환산 하였다.

〈표 11.52〉 시멘트 콘크리트 포장 기계시공 작업량

시공량(m^3)		1시간기준 시공량(m^3)	
형식			
일반 구간	1차로	350	43.75
	2차로	800	100
터널 구간	1차로	300	37.5
	2차로	650	81.25

출처: 2008 건설공사 표준품셈

(4) 유지보수 비용

아스팔트 덧씌우기의 경우 앞서 제시한 비용을 사용하고 콘크리트 덧씌우기에 대한 자료는 현재 구축 중이다.



부록 1

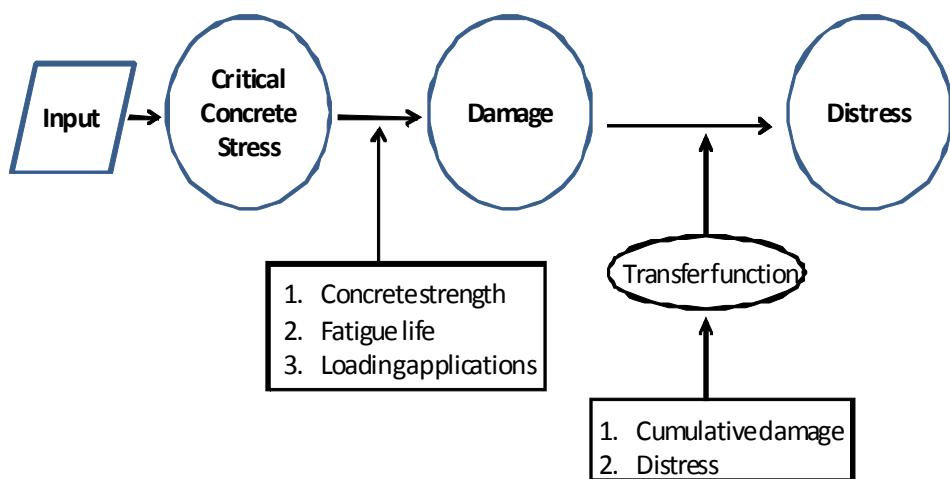
연속철근 콘크리트 포장설계 로직

1. 설계 아키텍쳐

<그림 1.1>은 개발된 연속철근 콘크리트 포장의 설계의 아키텍처를 나타낸 것이다. 전체 프로세스는 설계에서 고려하는 입력 변수들을 바탕으로 한 계응력 지침에서의 응력 상태를 평가한다. 콘크리트 강도와 하중 빈도에 따른 콘크리트의 피로파손을 산정하고, 이를 통해 파손율을 계산한다. 현장의 데이터를 바탕으로 만든 전이함수를 통해 파손율에서 편치아웃을 예측하는 것이 그 큰 그림이다.

이 설계에는 크게 다섯 개의 카타고리로 나뉜다.

- 1) 입력 변수
- 2) 응력 해석
- 3) 파손 평가
- 4) 편치아웃 예측
- 5) 결과 출력



<그림 1.1> 역학적 경험적 연속철근 콘크리트 포장 설계의 아키텍처

2. 입력 변수

연속철근 콘크리트 포장 설계의 입력 변수는 다음과 같이 크게 일곱 개의 그룹으로 대분된다.

- 1) 프로젝트 정보
- 2) 설계 파라메터 (설계 공용연수, 편치아웃 기준)
- 3) 설계 교통량 (설계 ESALs 과 교통량 연증가율)
- 4) 철근 설계 (철근의 양 및 직경)
- 5) 시공 정보(콘크리트 타설 시기)
- 6) 콘크리트 재료 물성 및 층에 대한 자료
 - a. 슬래브 두께
 - b. 굵은 골재 종류
 - c. 콘크리트 세팅 온도
 - d. 콘크리트 열팽창계수
 - e. 최종 건조수축
 - f. 28 일 압축 및 휨강도
- 7) 하부층의 정보
 - a. 보조기층의 종류
 - b. 보조기층의 두께
 - c. 보조기층의 탄성계수
 - d. 보조기층의 마찰계수
 - e. 보조기층의 층 정보(AASHTO 및 통일분류법에 의한 노상의 종류)

2.1 프로젝트 정보

설계 대상 지역, 고속도로 정보, 시공방향 및 스테이션 등과 같은 프로젝트 정보 등을 제공한다. 설계 대상 지역은 환경하중에 의한 응력을 평가하기 위해 사용하는 온도 데이터를 데이터 베이스에서 불러오기 때문에 반드시 필요한 정보이다. 다른 정보들은 옵션이며, 한번 설계가 완료될 경우, 이 화면이 프로젝트 파일로 출력이 된다.

2.2 설계 파라미터

설계 공용년수와 단위 마일(mile)당 편치아웃 개수를 입력한다. 설계자가 도로의 등급에 따라 정확한 값을 선택한다 할지라도, 일반적으로 마일당 약 10개의 편치아웃이 최종 설계의 파손 개수로 인식되고 있다. 만약 설계 공용년수동안 프로그램을 통해 예측한 편치아웃이 설계한 개수보다 더 많을 경우, 입력 변수 조정 등과 같은 재설계가 필요하다.

2.3 설계 교통량

설계 교통정보는 콘크리트층의 누적 피로파손을 평가하기 위해 사용된다. 앞서 살펴본 바와 같이 설계 기간 동안의 반복차량회수를 고려하기 위해 설계 교통량(ESALs)과 연증가율 입력한다. 여기서, 2002 MEPDG 와 같이 축하중 분포를 사용하지 않은 이유는 ESALs 을 이용하여도 축하중 분포를 이용한 설계와 예측정확도가 유사한 설계가 가능하기 때문이다.

2.4 철근 설계

종방향 철근비는 콘크리트층에서 발생하는 한계응력의 크기를 결정하는 중요한 요인 중의 하나이다. 0.5~0.7% 사이의 값이면 되지만, 실제적으로 설계자들은 0.6% 정도부터 시작하는 것이 설계 시간을 줄이는 방법이다. 설

▶ **부록 1-4 도로포장 구조 설계 해설서**

계 공용기간동안의 편치아웃 설계 기준을 만족하는 슬래브 두께 설계가 된다면, 설계 지침을 만족하는지에 대한 평가가 이뤄진다. 철근의 평균 간격 및 직경에 대한 정보도 제공되어야 한다.

철근 설계의 변수에 대한 전이함수의 개발에 사용된 철근 간격이 추정된 것이기 때문에 매우 제한적인 것을 알아야 한다. 만약 철근 설계의 변수들의 범위가 텍사스에서 사용하는 일반 범위 밖이라면, 연속철근콘크리트 포장의 정확성이 낮아진다. 철근의 소요 두께를 조정하기 위해 철근 설계와 관련된 변수들을 조율하지 않는 것이 좋다. 횡방향 철근과 타이바설계는 포함되지 않는다.

2.5 시공환경정보

콘크리트를 시공하는 달에 대한 정보가 필요하다. 이 정보는 환경하중에 의한 응력을 계산하는데 사용된다. 설계하는 동안에는 콘크리트가 언제 타설 되는지를 알기는 힘들 것이다. 심지어 하나의 공구에서도 포장의 시공 시기가 다르기 때문이다. 텍사스의 시방에서는 콘크리트의 타설 온도를 규정하고 있다. 이에 따르면 설계하는 동안 콘크리트의 시공 시기를 알지 못하면 5월이나 6월로 입력할 것을 제안하고 있다.

2.6 콘크리트 층의 정보

콘크리트 층의 정보는 <표 2.1>과 같은 항목 및 범위값으로 입력하여야 한다.

콘크리트 탄성계수는 콘크리트의 강도 및 굵은 골재 조류에 따라 다르다. 그러나 그 상관성이 정확하지 않고 변동성이 많아 이 프로그램에서는 직접 입력 변수로 사용한다. 여기서, 이 프로그램은 슬래브의 두께를 입력 변수로 사용하고 그 값이 설계자에 의해 제공되어야한다. 이러한 점에서 이 프로그램은 설계 프로그램이라기 보다는 해석 프로그램에 가깝다.

여기서, 도포장 구조 설계의 줄눈콘크리트 포장 설계와 다른 콘크리트 입력 변수는 콘크리트의 세팅 온도와 최종 건조수축 항목이다. 콘크리트의 세팅 온도란 콘크리트 타설 후 재료들의 수화반응이 일어나면서 강도가 발현되는 시점의 온도이며, 이때부터 콘크리트와 철근이 일체거동을 한다. 강도가 발현되면서부터 수화반응이 점점 둔화되고, 수일이 지나면 대기 중의 온도 변화에 따라 콘크리트의 온도는 변화한다.

연속철근콘크리트 포장에서 철근과 콘크리트에 발생하는 환경하중에 의한 응력은 콘크리트의 세팅 온도와 현재 콘크리트 슬래브의 온도 차이에 따라 변화하게 된다. 또한, 일반적으로 대기중의 온도가 높을수록 콘크리트의 세팅 온도는 높다. 줄눈콘크리트 포장에서는 부등건조수축으로 인해 발생한 응력을 시간에 따른 함수로 간주하고 이를 반영한다. 연속철근콘크리트 포장 설계에서는 동일한 개념으로 건조수축을 설계에 반영하지만, 입력된 최종 건조수축을 시간별로 환산한 후 온도차로 변환하여 응력분석에 사용한다. 최종 건조수축의 값의 범위는 약 300~700 정도이다.

부록 1-6 도로포장 구조 설계 해설서

〈표 2.1〉 콘크리트 물성 및 범위

구분	범위	단위	기록
콘크리트 두께	15~35	cm	Required
사용 골재	강자갈, 석회석, 화강암	n/a	Optional
콘크리트 세팅 온도	제안값 없음	°C	Required
열팽창계수	7.2 ~12.6	με/°C	Required
최종 건조수축	300~700	με	Required
28일 압축강도	제안값 없음	Pa	Optional
28일 휨강도	제안값 없음	Pa	Required
28일 탄성계수	제안값 없음	Pa	Required

본 설계 프로그램에 시간에 따른 강도 예측식은 다음과 같다.

$$f_{ck}(t) = f_{ck,28} \times \{t / (a + b \times t)\} \quad \langle \text{식 2.1} \rangle$$

여기서, $f_{ck}(t)$ = 재령 t 에서의 재료의 물성 (강도) (psi)

$f_{ck,28}$ = 재령 28일 재료의 물성 (psi)

t = 재령 (일)

$a=4$, $b=0.85$

콘크리트의 탄성계수를 알지 못할 경우, 다음과 같은 추정식을 통하여 그 값을 계산할 수 있다.

$$E_c = 33 \times r^{1.5} \times f'_c^{0.5} \quad \langle \text{식 2.2} \rangle$$

$$f'_c = (f_r / 7.5)^2 \quad \langle \text{식 2.3} \rangle$$

여기서, E_c = 탄성계수 (psi)

r = 콘크리트 단위중량 ($\text{lb}/\text{ft.}^3$)

f'_c = 압축강도 (psi)

f_r = 휨강도 (psi)

〈표 2.2〉 보조기층의 입력 변수

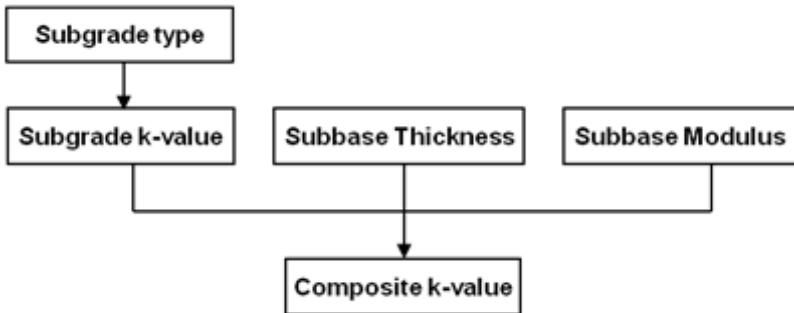
구분	범위	단위	기록
보조기층의 종류	아스팔트 안정처리기층, 콘크리트 안정처리기층 및 기타	n/a	Optional
보조기층의 두께	5 ~ 15	cm	Required
보조기층의 탄성계수	0.3 to 13.8	MPa	Required
보조기층과 슬래브와의 마찰계수	27.1 ~135.7	MPa/m	Required

〈표 2.3〉 보조기층의 구분

구분	AASHTO	통일분류법
Gravel	A-1-a	GW or GP
Coarse Sand	A-1-b	SW
Fine Sand	A-3	SP
Silty Gravel or Sand	A-2-4 or A-2-5	GM or SM
Clayey Gravel or Clayey Sand	A-2-6	GC or SC
Clayey Gravel or Clayey Gravelly Sand	A-2-7	GC or SC
Sit or Silt/sand/gravel mixture	A-4	ML or OL
Poorly Graded Silt	A-5	MH
Plastic Clay	A-6	CL
Moderately Plastic Elastic Clay	A-7-5	CL or OL
Highly Plastic Elastic Clay	A-7-6	CH or OH

2.7 하부층의 정보

보조기층 및 노상의 입력 정보는 〈표 2.2〉, 〈표 2.3〉과 같은 항목들이 있다. 노상의 흙 종류에 대한 입력 정보를 통해 해당 노상의 지지력 값을 데이터 베이스로부터 자동으로 산정한다. 산정된 노상 지지력 값과 보조기층의 두께 및 탄성계수를 이용하여 최종적으로 하부층의 복합 지지력을 구하게 된다. 이 과정과 산정식을 나타낸 것이 〈그림 2.1〉과 〈식 2.4〉이다.



〈그림 2.1〉 하부지지력 산정 로직

$$k_{\infty} = -395.7 + 92.3T_b + 0.223E_b + 1.829k_{sg}$$

〈식 2.4〉

여기서, k_{∞} : 하부층의 복합 지지력 (pci)

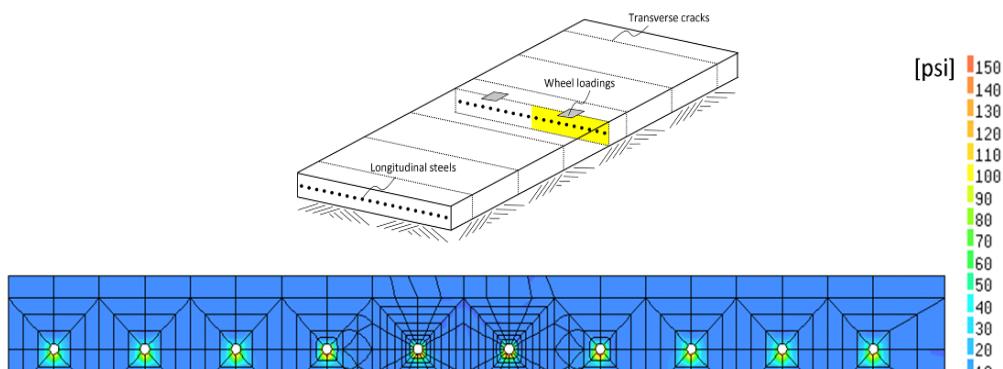
T_b : 보조기층의 두께

E_b : 보조기층의 탄성계수

k_{sg} : 노상의 지지력 (pci)

3. 구조해석

본 연구에서는 2차원 구조해석 모형은 철근 주변의 콘크리트 응력을 살펴보는데 한계가 있기 때문에 DIANA라는 해석프로그램을 이용하여 3차원 모형을 개발하였다. 이에 근거하여 철근 주변의 콘크리트에서 발생하는 주응력을 살펴보았다. 각각 온도와 교통하중이 연속철근콘크리트 포장에 재하된 경우의 해석결과를 합한 응력이 두 하중을 동시에 재하한 경우와 큰 차이가 없었다. 최종 응력 해석에는 전자 방법을 이용하였다.



〈그림 3.1〉 구조해석 모형

본 구조해석 모형을 이용하여 설계에 사용되는 입력 변수에 따른 민감도 분석을 수행하였으며, 그 결과를 살펴보면 다음과 같다.

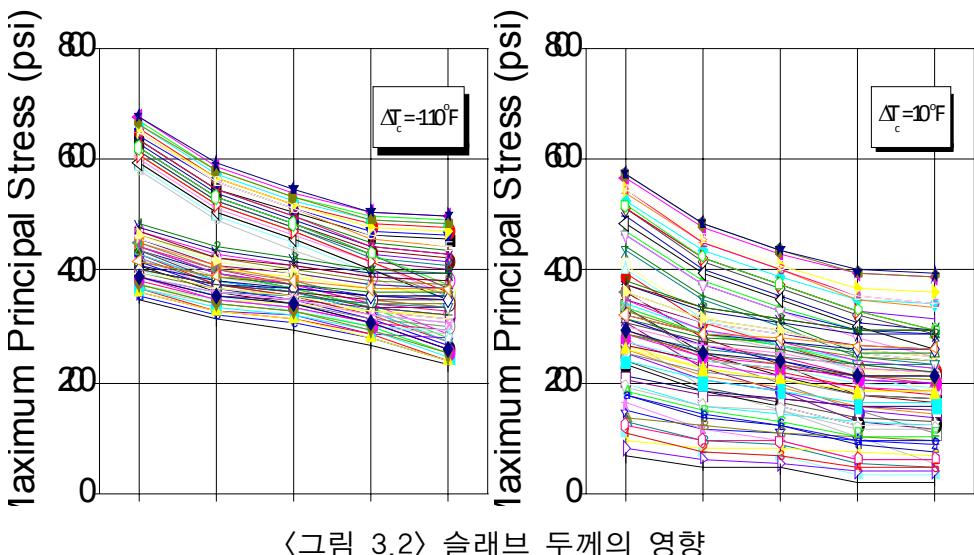
- 두께가 얇은 연속철근콘크리트 포장일수록 더 큰 응력이 발생하였다. 슬래브 두께의 영향은 얇은 슬래브 두께가 얇아질수록 더 커지는 것으로 나타났다.
- 종방향 철근비가 낮을수록 더 큰 콘크리트 응력이 발생하였으며, 콘크리트 응력은 종방향 철근비와 거의 선형에 가까운 관계가 있었다.
- 하부 복합지지력이 감소할수록 콘크리트의 응력은 증가하였다. 그 값이 작은 범위에서는 민감하게 변화하였다.
- 콘크리트 세팅온도로부터의 더 큰 온도차 조건에서 더 큰 콘크리트 응력이 발생하였다. 세팅온도와 콘크리트 응력은 거시적으로 Bilinear 관계가 있었다. 현재의 포장체 온도가 세팅 온도보다 높을 경우 그 관계는 완만한 선형관계였으나, 반대의 경우 매우 급한 선형관계가 형성되었다. 이는 환경하중이 온도하중과 건조수축에 의한 하중이 복합적으로 작용하기 때문이다. 온도하중과 건조수축에 의한 주응력은 콘크리트 온도가 세팅 온도보다 낮을 때는 같은 방향이다. 하지만 콘크리트 온도가 세팅 온도보다 높을 때는 다른 방향이 된다. 따라서, 두 환경 하중의 조합은 작은 주응력을 발생시킬 것이다.
- 콘크리트의 응력은 최종건조수축이 증가할수록 커진다. 콘크리트 응력

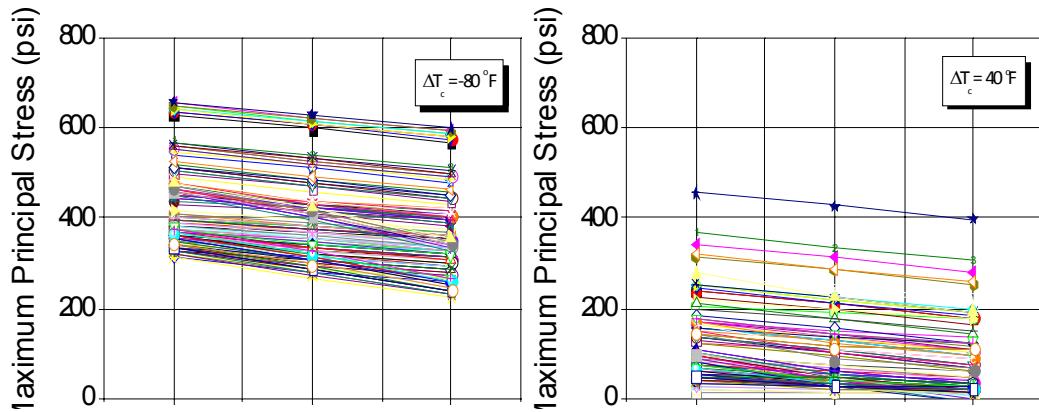
부록 1-10 도로포장 구조 설계 해설서

과 최종건조수축과의 관계는 세팅온도가 슬래브의 온도보다 낮을 경우, 완만한 선형관계가 있으나, 반대의 경우에는 앞서 말한 바와 같이 급한 선형관계가 있다.

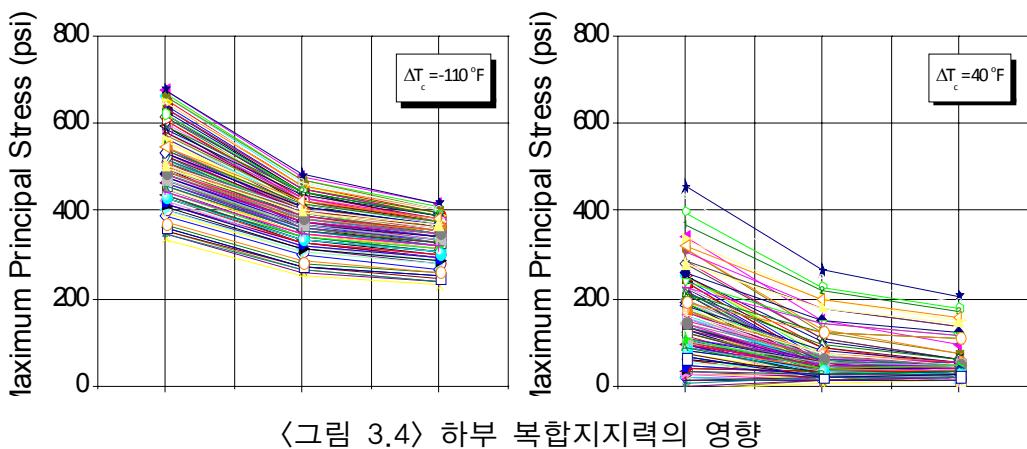
- 콘크리트 열팽창계수가 증가할수록 콘크리트의 응력도 커진다. 그 효과는 세팅온도와 현재 슬래브의 온도차가 커질수록 증가하였다.
 - 콘크리트 응력은 하부층과 슬래브 사이의 마찰력에 영향을 많이 받지 않는 것으로 나타났다.
 - 전체적으로 슬래브 두께, 하부 복합지지력, 콘크리트의 온도변화가 가장 큰 영향인자로 나타났다.

〈그림 3.2〉~〈그림 3.8〉은 각 입력 변수에 대한 민감도 분석한 예를 나타낸 것이다. 이와 같은 민감도 분석을 통해서 입력 변수와 해석 결과가 타당한 것으로 나타났다. 이 구조해석 모형으로 각 입력 변수에 대한 콘크리트에서 발생하는 응력에 대한 해석을 하였으며, 이를 데이터 베이스화하였다.

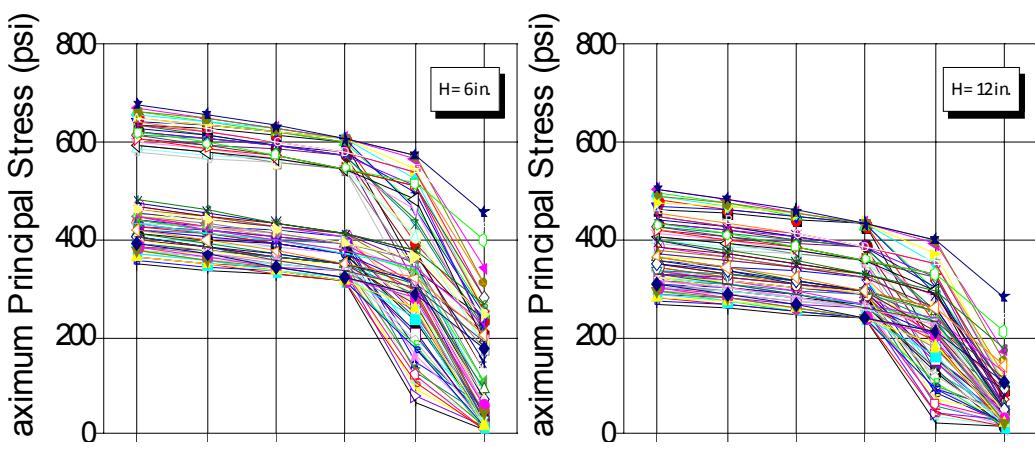




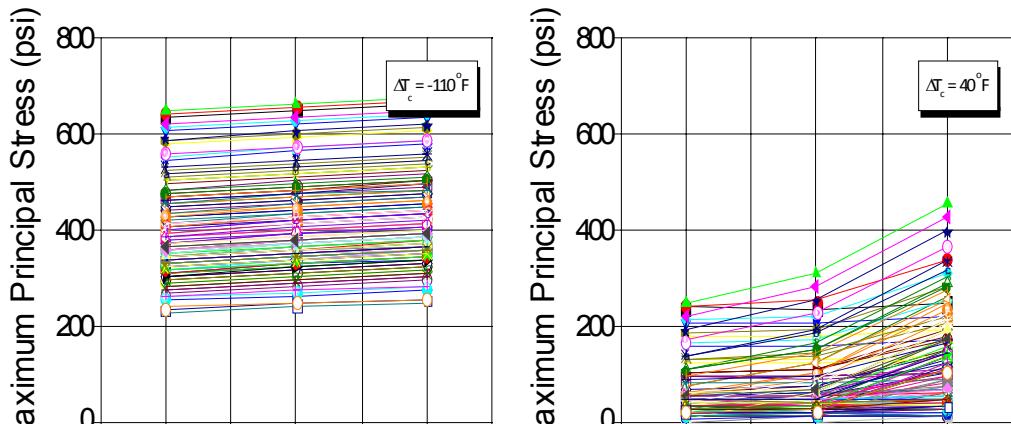
〈그림 3.3〉 종방향 철근비의 영향



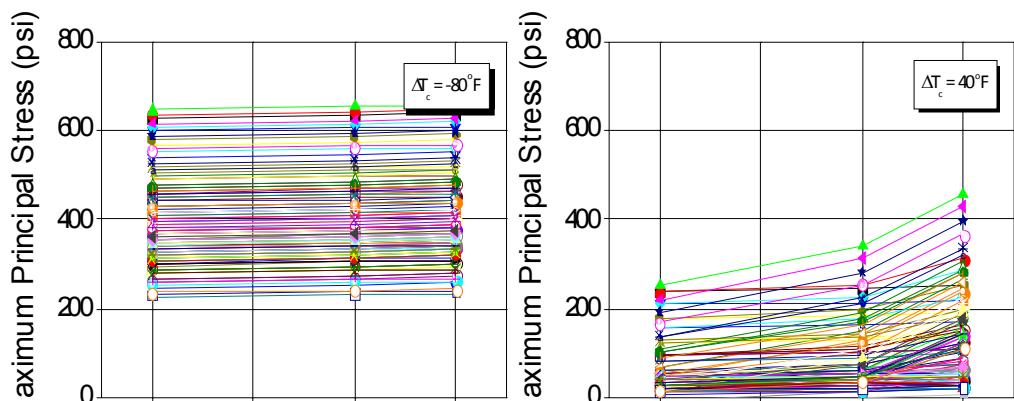
〈그림 3.4〉 하부 복합지지력의 영향



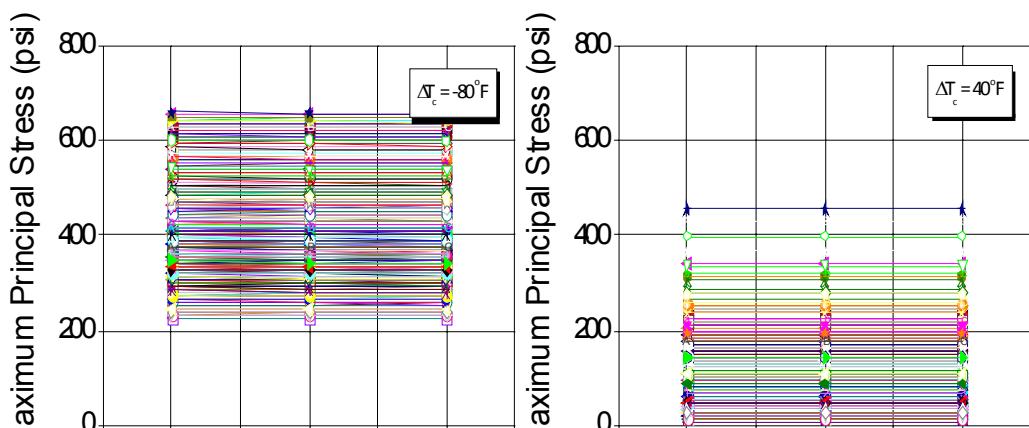
〈그림 3.5〉 콘크리트 온도 변화에 따른 영향



〈그림 3.6〉 열팽창계수의 영향



〈그림 3.7〉 최종건조수축의 영향



〈그림 3.8〉 슬래브와 하부층의 마찰력의 영향

4. 공용성 예측

연속철근 콘크리트 포장에서의 균열은 자연적으로 발생하는 것이기 때문에 공용성 기준에 포함되지 않는다. 국제 평탄성 지수(IRI)는 장기 공용에도 불구하고 양호하기 때문에 설계 기준이 되지 못한다. 따라서, 연속철근 콘크리트 포장에서는 편치아웃이 공용성 기준이 된다. 일련의 과정을 통해 역학적으로 산정한 파손은 실제 현장의 공용성과 비교할 때, 낮거나 혹은 높은 경우가 많다. 이를 현장의 공용성 데이터와 일치시켜주는 역할을 하는 것이 전이함수이다.

4.1 공용성 모형

줄눈콘크리트포장의 공용성 모형이 균열과 평탄성(IRI)인 것과 달리 연속철근콘크리트 포장은 편치아웃을 대상으로 한다. 편치아웃의 정의는 LTPP (Long-Term Pavement Performance) Distress Manual, NCHRP 1-37(A), TxDOT's PMIS Rater's Manual 에서는 각각 다음과 같이 정의하였다.

- LTPP Distress Manual ;

균열 간격이 60cm 이내인 횡방향 균열에 짧은 종방향 균열, 포장의 단부 및 종방향 줄눈부에서 발생하는 파손이며, "Y" 형 균열도 포함한다.
- NCHRP 1-37(A) ;

포장 단부를 따라 낮은 하중전달률 및 종방향 피로균열 인해 두 개의 인접한 횡방향 균열구간에 발생한 조각의 파손이다.
- TxDOT's PMIS Rater's Manual ;

표층 두께 전체로 종방향 균열 및 두 개의 종방향 균열을 관통할 경우에 생성되는 포장 블록을 말하며 일반적으로 사각형 형태이지만 다

▶부록 1-14 도로포장 구조 설계 해설서

른 형태를 하는 경우도 있다.

편치아웃을 계산하기 위해 사용한 콘크리트의 피로식은 <식 4.1>과 같다.

$$N_f = 225,000 \times \left(\frac{\sigma}{MR} \right)^4 \quad \langle \text{식 4.1} \rangle$$

여기서, N_f : 콘크리트 피로하중의 허용반복 회수

σ : 콘크리트에 발생한 인장응력 (Pa)

MR : 콘크리트 휨강도 (Pa)

피로식을 통해 산정한 허용반복 회수와 실제 차량의 공용회수인 ESALs의 비율이 파손율이 된다.

4.2 전이함수

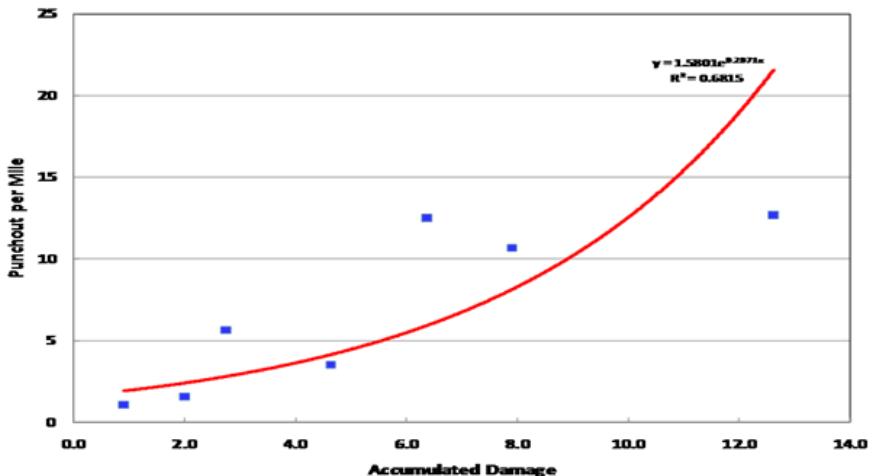
미국의 텍사스의 편치아웃 자료를 통해 개발된 전이함수는 <식 4.2>와 같다.

$$PO = 1.58 \times e^{(0.1871 \times CD)} \quad \langle \text{식 4.2} \rangle$$

여기서, PO : 마일(mile)당 편치아웃 개수

CD : 누적 파손률

<그림 4.1>은 전이함수를 통해 산정한 마일당 편치아웃개수와 실제 현장의 공용성 자료를 나타낸 것이다.



〈그림 4.1〉 전이함수를 이용한 파손율과 펀치아웃과의 상관관계