

제 9-2 편 터널 환기



목 차

1. 적 용	351
1.1 목 적	351
1.2 적용 범위	351
2. 계획 · 조사	352
2.1 계 획	352
2.1.1 일반 계획	352
2.1.2 단계건설계획	352
2.1.3 계획 순서	353
2.2 조 사	355
2.2.1 교통 조사	355
2.2.2 환경 조사	355
2.2.3 지형, 지물, 지질 조사	356
3. 환기량	357
3.1 환기량 산출공식	358
3.2 기준 배출량	359
3.2.1 매연(smoke)에 대한 기준배출량(q_0^T)	359
3.2.2 일산화탄소(CO가스)에 대한 기준배출량(q_0^{CO})	361
3.2.3 질소산화물(NOx)에 대한 기준배출량(q_0^{NOx})	361
3.3 환기 설계 교통량	362
3.3.1 도로용량	362
3.3.2 주행속도별 교통밀도[pc/(km · lane)]	363
3.3.3 승용차 환산계수	365
3.4 단계건설	366
3.4.1 침투설계시간교통량	368
3.4.2 교통량 대 용량비(V/C) 및 평균주행속도의 추정	368
3.4.3 환기설계를 위한 교통밀도(D)	371
3.5 터널 내 오염물질의 허용농도	371
3.5.1 매연(smoke)에 대한 허용소광계수 [K_{lim}]	372
3.5.2 일산화탄소(CO가스)에 대한 허용농도	372
3.5.3 질소산화물(NOx)에 대한 허용농도	373

3.6 보정계수	374
3.6.1 경사속도 보정계수(f_{iv})	374
3.6.2 표고보정계수(f_h)	375
3.6.3 경사보정계수(f_i)	375
3.6.4 속도보정계수(f_v)	376
4. 터널에서 승압력과 환기저항	377
4.1 자연풍에 의한 환기저항	377
4.2 터널 입·출구 저항 및 벽면마찰저항	378
4.3 교통환기력	379
4.4 환기설비의 승압력	380
5. 환기방식	381
5.1 개 요	381
5.1.1 환기방식의 종류	381
5.1.2 환기 방식 선정	383
5.2 자연 환기방식	385
5.3 제트팬 환기방식	385
5.3.1 개 요	385
5.3.2 제트팬 승압력 및 소요대수산정	386
5.3.3 제트팬 방식의 설계	387
5.4 삭칼드 환기방식	388
5.4.1 개 요	388
5.4.2 분류장치의 승압력 : ΔP_j	388
5.4.3 송풍기의 풍량, 풍압	389
5.4.4 송기노즐의 승압계수	389
5.4.5 삭칼드방식의 설계	390
5.5 수직갱 송배기 종류환기방식	392
5.5.1 개 요	392
5.5.2 수직갱 송배기 종류환기방식의 이론	393
5.5.3 수직갱송배기 종류 환기방식의 설계 고려사항	396
5.6 집진기부착 종류환기방식	398
5.6.1 개 요	398
5.6.2 집진기부착 종류환기방식의 매연농도 개선	398
5.6.3 집진장치의 승압력	399

5.6.4	집진기 부착 종류 환기방식의 설계 고려사항	399
5.7	수직갱 배기방식 (집중배기방식)	401
5.7.1	개 요	401
5.7.2	수직갱 배기식 환기 방식에 있어서의 공기 흐름의 기초	403
5.8	반횡류식 및 횡류식 환기방식	409
5.8.1	덕트 및 차도 내 압력계산	409
5.8.2	급기 반횡류방식의 계산	410
5.8.3	배기 반횡류방식	414
5.8.4	횡류식 환기 시스템	417
6.	방재용 환기설비	419
6.1	개 요	419
6.1.1	화재 시 환기기기 용량	419
6.1.2	화재 시 환기기기 운전	424
7.	계측기	427
7.1	환기용 계측기	427
7.1.1	오염물질 농도 계측기	427
7.1.2	풍향·풍속계	430
7.1.3	기타 터널 내·외부 계측기	430
8.	설 계	432
8.1	설계일반	432
8.1.1	개 요	432
8.1.2	환기계산에 사용하는 단위	432
8.1.3	환기계산에 사용하는 기호와 단위	433
8.1.4	공기 흐름에 관한 설정 조건과 정수	435
8.2	환기량 산정 설계예	436
8.2.1	설계조건	436
8.2.2	소요환기량 산정식	437
8.2.3	소요환기량 계산	437
8.2.4	소요환기량 산출결과	438
8.3	환 기 기 기	439
8.4	환기 덕트	456
8.5	환기소	469

8.5.1	갱구 환기소	470
8.5.2	지하환기소	470
8.5.3	전기집진기실	470
8.5.4	배기탑 등의 대기 환경 문제	470
9.	운전과 제어	478
9.1	환기 제어	478
9.2	제어 방식	480
9.3	제어 장치	481
9.4	제어상의 유의 사항	490
9.5	환기 제어의 예	491
참고자료	496



1. 적 용

이 편은 고속도로 터널의 환기·제연 시설에 관한 일반적 기준으로 한다.

1.1 목 적

이 편에서는 고속도로 터널의 환기시설의 설계 및 유지관리를 위한 일반적인 고려 사항과 설계요령을 제시한다.

도로터널의 환기시설은 ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙’ (1999년 8월) 제 41조에 ‘터널에는 안전하고 원활한 교통을 확보하기 위해 필요하다고 인정하는 경우에는 도로의 계획교통량, 설계속도 및 터널길이를 참작하여 환기시설 및 조명시설을 고려하여 설치하여야 한다.’라고 규정한 제반 시설을 의미한다.

따라서, 터널환기 설비시설의 계획·조사·설계·시공 및 유지관리를 할 때에는 이 편을 이해하고, 종합적으로 검토하여 적절한 설비계획을 수립하여야 한다.

1.2 적용 범위

이 편은 1997. 10월 제정한 고속도로 터널 환기시설 설계기준을 개정된 것으로 고속도로 터널의 환기시설 계획 및 설계와 기 설치된 환기시설의 유지관리 기준으로 준용한다.

이 편에서는 가장 일반적인 2차로 산악 터널을 주요 대상으로 하고 있지만, 터널의 시공법·차로 수 등이 변해도 설계 요령은 대부분 유사하므로 이들 터널에 대해서도 적용할 수 있다. 그러나 도로의 성격, 터널의 규모, 교통조건, 입지조건 등이 보통의 경우와 현저히 다른 경우에는 이 편에서 제시한 요령을 참고하여 해당 터널의 특수성에 따른 검토가 필요하다.

아울러 최근 차량엔진의 기능향상으로 인하여 오염물질 배출량이 감소됨에 따라 터널환기시설 설계기준 변경이 검토되고 있으므로 설계 시 변경사항을 확인하여야 한다.



2. 계획 · 조사

2.1 계획

도로 터널의 환기계획은 터널건설 전체계획의 일환으로 면밀하게 검토되어야 한다.

2.1.1 일반 계획

도로 터널에서는 통행하는 자동차의 배출가스에 의한 터널 내 공기의 오염을 제어하기 위하여 환기가 필요하다. 터널연장이 짧은 터널에서는 자연환기로 충분한 경우도 있지만, 연장이 길고 교통량이 많은 터널에서는 기계 환기시설이 필수적이다.

환기계획은 터널계획의 중요한 부분을 차지하여, 터널단면형상 등의 터널본체구조를 결정하는 요소가 될 뿐 아니라, 노선선정 등의 기본계획에도 밀접하게 관련되어 있기 때문에 터널 전체 계획의 일환으로서 면밀히 계획할 필요가 있다. 즉, 환기 계획은 목적을 달성할 수 있는 가장 경제적인 방식이 되도록 기계설비 및 본체공을 검토한다는 협의의 환기계획 뿐만 아니라, 환기에 큰 영향을 주는 교통 방식, 방재계획(비상용 시설), 주변환경 등에 미치는 영향에 대한 보다 넓은 차원에서의 검토가 필요하며, 터널전체로 볼 때 합리적인 것이어야 한다.

2.1.2 단계건설계획

단계건설의 필요는 터널 내 차량의 통행방식의 변화 즉, 양방향에서 일방향 통행으로의 전환과 터널을 통과하는 차량수의 변화 및 제작차 오염물질 배출량 규제치의 변화에 따른 환기시설에 대한 검토를 목적으로 한다.

통행방식의 변동이 계획된 경우에는 초기설계단계에서부터 최종환기방식과 조화를 이룰 수 있도록 계획하는 것이 중요하며, 터널에서의 환기량은 교통량의 증가에 따른 증가요인과 점차 강화되는 오염물질 배출량 규제에 따른 감소요인이 복합적으로 작용하여 터널 내 환기시설 용량의 변동을 초래하게 되므로 일정주기로 적정 환기기기 용량에 대한 재검토가 필요하며, 환기설비의 용량에 큰 변화가 요구되는 경우에는 이에 대응하는 운영계획 또는 시설을 갖출 수 있도록 하여야 한다.

2.1.3 계획 순서

환기시설의 계획, 설계 및 시공은 다음 항목과 순서에 따라 하는 것이 보통이다. 각 항목은 서로 관련이 있기 때문에 필요에 따라 이전의 검토항목에 대한 재검토가 요구되는 경우도 있다.

(1) 터널의 노선 선정

터널의 노선은 일반적으로 노선의 편익, 지형, 지물, 지질 등을 고려하여 검토한다. 그러나 터널이 긴 경우에는 입갱, 사갱의 위치 선정, 환기규모 등의 환기계획이 노선선정 시 중요한 항목이 된다. 이 때는 각각의 대안에 대한 환기계획은 개략 검토하여 노선결정을 위한 요소로 사용한다.

(2) 환기 설계 시 필요한 자료 수집

노선이 결정되면 상세한 환기계획을 하게 되지만, 우선 환기계획에 필요한 자료를 수집한다. 필요한 자료의 주요 항목은 다음과 같다.

- (가) 교통관계 자료
- (나) 기상관계 자료
- (다) 환경관계 자료
- (라) 지형, 지물, 지질관계 자료
- (마) 관련법규

(3) 소요 환기량 산정

터널의 교통량 및 토목제원 등을 바탕으로 필요한 환기량을 산출한다.

(4) 환기의 기본계획 작성 (환기방식의 선정)

결정된 노선에 대해 소요환기량 및 기상, 환경조건 등 터널의 입지조건에 따른 환기방식 등의 기본계획을 작성한다. 기본계획 시에는 환기시설의 필요성 유무, 즉 자연 환기로 처리할 수 있는지를 우선 검토한다. 환기시설이 필요한 경우에는, 각종 환기방식의 장단점을 비교하여 검토한다. 이 때에는 경제성뿐만 아니라 안정성과 주위환경에 대한 영향을 포함한 종합적인 평가를 행한다.

(5) 단면계획 및 환기력계산

환기의 기본계획이 결정되면, 환기설비 기계실, 덕트 등의 공간계획과 소요환기력의 상세한 검토를 행한다. 공간계획 및 환기력계산은 기본계획 단계에서 개략적인 검토를 하고, 여기서는 결정된 항목에 대해 다른 항목과 관련지어 상세하게 검토한다.

(6) 설비제원의 결정

전 항목의 검토결과에 입각하여 덕트설계, 환기기기 사양, 배치계획, 환기소 건물계획 등의 설계를 한다. 설비제원은 정상 및 비상 시의 운전조건 등을 고려하며 환경감시, 계측, 운전, 제어 등의 설비설계도 행한다.

(7) 환기 기기의 제작, 시공

설계기준에 준하여 환기 기기, 덕트 등을 제작, 시공한다.

(8) 운전 조정

환기설비는 완성된 단계에서 각 설비가 설계에서 요구되는 능력을 만족하는지 여부에 대한 종합적인 검사와 조정을 수행하며, 개통 후에 재확인하여 필요할 경우에는 재조정을 한다. 특히, 터널에 설치되는 각종 계측기는 터널개통 후에 소정의 점검기간을 두어 조정을 실시하여 계측데이터의 신뢰성을 확보하여야 한다.

(9) 데이터베이스 구축

터널 내 각종 계측데이터 및 환기기기 운영상황을 판단할 수 있는 데이터 베이스를 구축하여 환기기기 운영평가 및 향후 터널 설계를 위한 기초자료로 활용할 수 있도록 한다.

2.2 조 사

환기시설을 계획할 때에는 교통, 기상, 환경 및 지형, 지물, 지질 등에 대한 조사자료를 활용해야 한다.

2.2.1 교통 조사

터널의 소요환기량에 가장 중요한 영향을 미치는 교통량, 차종 구성 및 교통 상황 등에 관한 다음과 같은 자료를 조사한다.

(1) 설계년도의 차종별 추정교통량

설계년도의 일 교통량 및 첨두시간 교통량을 적용한다.

(2) 설계년도 차종별 구성비

차종별 오염물질 배출량이 서로 상이하기 때문에 필요하며, 부득이한 경우 차종별 구성비를 조사할 수 없는 경우에는 디젤연료를 사용하는 대형차와 가솔린 사용하는 소형차로 구분하여야 한다.

(3) 연도별 교통상황

단계건설계획을 수립하기 위해서 연도별 일추정 교통량을 조사한다.

2.2.2 환경 조사

터널환기설계에 있어서 기상 및 환경에 관련된 제반자료는 자연풍 또는 양 갱구 고도차에 의한 환기력, 갱구 또는 오염공기의 확산 및 흡입공기의 질 등에 의한 영향을 조사 반영할 필요가 있다.

(1) 자연풍에 의한 환기력

자연풍 풍향풍속은 산악터널의 경우에 환기기기 용량에 중요한 영향을 미치게 되므로 이에 대한 가능한 정확한 조사 및 평가를 수행하여 적정 규모 환기기기 용량을 산정하도록 한다.

(2) 갱구 및 환기탑에서의 배기의 확산

도심이나 청정지역에서의 터널로부터 배출되는 오염공기의 확산이 환경에 미치는 악영향을 최소화하기 위해서 오염물질이 집중적으로 배출되는 지역의 기상상황 자료를 고려하여 환기탑 위치를 선정하며 갱구에서의 오염확산 방지를 위한 대책을 수립한다.

환경조사는 해당노선의 환경영향 평가서를 사전에 면밀히 검토하고 환경영향 평가가 진행중인 경우에는 평가 기관과 협의 등을 통하여 기초자료 등을 충분히 수집하여 활용한다.

(3) 갱구에서의 오염물질 재유입

터널에서는 흡입갱구 주변의 오염상태나 인접 갱구에서의 오염공기 재유입 등에 의해 터널 내 공기의 오염도가 영향을 받으므로 이에 대한 평가가 필요하다.

(4) 환기소의 소음

환기소 내에 환기 기기를 설치할 경우는 소음이 주변환경에 미치는 영향을 충분히 고려하여야 한다.

2.2.3 지형, 지물, 지질 조사

지형, 지물, 지질 조사는 모든 조사의 기초가 되며, 목적에 따른 축척 조사가 필요하다. 지형, 지질 조사는 환기용 입갱, 사갱의 배치 계획의 기초 자료로 이용되며, 갱구 부근의 환경 조사에서는 지형 외에 인근 건축물에 영향을 검토할 필요가 있는 경우도 있다.

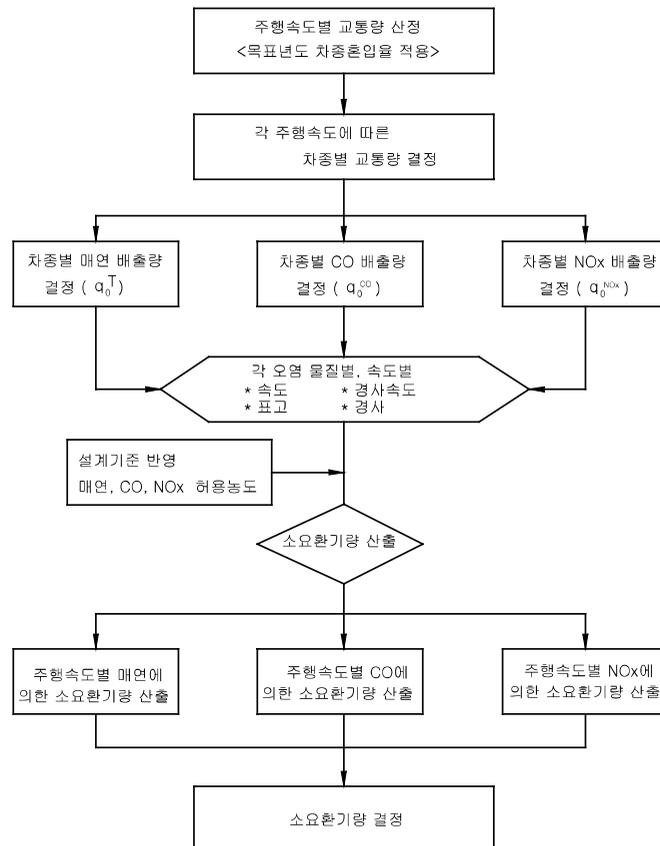


3. 환기량

이 편의 소요환기량 산출방법은 현재 유럽등 많은 국가에서 적용하고 있는 국제상설도로회의(PIARC : Permanent International Association of Road Congresses)방식을 근간으로 하였다.

오염농도 제어대상 물질은 매연(smoke), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx)로 하며, 목표년도의 차종별 구성비 및 차종별 오염물질 기준배출량 등의 데이터를 이용하여 주행속도별 소요 환기량을 산출하고 제연환기 소요량과 비교하여 설계 환기량을 결정한다.

〈그림 3.1〉은 소요환기량 산출 흐름도이다.



〈그림 3.1〉 환기량 산출 흐름도

환기기기 용량은 소요환기량의 대소뿐만 아니라 차량의 주행속도에 의한 교통환기력이 영향을 받게 되므로 주행속도별 환기기기 용량을 산정하여 최대용량을 요구하는 주행속도에서 환기용량을 결정한다. 이 편은 고속도로를 대상으로 함을 감안하여 소요환기량 및 환기기기 용량은 다음에 준하여 결정한다.

- (1) 매연에 대한 소요환기량은 60km/h 이상의 속도에서 최대 환기용량을 요구하는 주행속도의 값을 채택한다.
- (2) 단, 설계 목표년도의 추정교통량에 의한 서비스수준이 E수준이하 이거나, 지리적 여건 등으로 정체가 빈번할 것으로 판단되는 경우에는 40km/h 이상의 속도에서 최대 환기기기 용량을 산정하여 적용할 수 있다.
- (3) 그러나 저속 시에 예상되는 소광계수(매연농도)가 터널 폐쇄조건 ($K=0.012 \text{ m}^{-1}$)을 초과하고 지체빈도가 빈번할 것으로 판단되는 경우에는 이를 고려하여 환기기기 용량을 산정하는 것이 바람직하다.
- (4) NO_x 및 CO에 대해서는 전속도에서 검토하여 최대 환기기기 용량을 산정한다.

3.1 환기량 산출공식

매연, 일산화탄소, 질소산화물에 대한 소요환기량 산정식은 다음식으로 한다.

- (1) 매연 (smoke)에 대한 환기량 계산식

$$Q_T = \sum_{i=\text{차종}} (q_0^T \cdot n)_i \cdot \frac{f_{iv} \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{1}{K_{lim}} [\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{km} \cdot \text{lane})] \quad (3.1)$$

- (2) 일산화탄소 (CO)에 대한 환기량 계산식

$$Q_{CO} = \sum_{i=\text{차종}} (q_0^{CO} \cdot n)_i \cdot \frac{f_i \cdot f_v \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{10^6}{CO_{lim}} [\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{km} \cdot \text{lane})] \quad (3.2)$$

(3) 질소산화물 (NOx)에 대한 환기량 계산식

$$Q_{NOx} = \sum_{i = \text{차종}} (q_0^{NOx} \cdot n)_i \cdot \frac{f_i \cdot f_v \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{10^6}{NOx_{lim}} [m^3 / (s \cdot km \cdot lane)] \quad (3.3)$$

여기서, Q^T, Q^{CO}, Q^{NOx} : 오염물질에 대한 소요환기량 [$m^3 / (s \cdot km \cdot lane)$]

$q_0^T, q_0^{CO}, q_0^{NOx}$: 오염물질에 대한 기준배출량 [〈표 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 3.5〉참조]

[q_0^T : $m^2 / (h \cdot 대)$, q_0^{CO} : $m^3 / (h \cdot 대)$, q_0^{NOx} : $m^3 / (h \cdot 대)$]

f : 각종보정계수 [3.6절 참조]

K_{lim} : 허용소광계수 [m^{-1} , 3.5.1절 참조]

CO_{lim} : 허용CO농도 [ppm, 3.5.2절 참조]

NOx_{lim} : 허용NOx농도 [ppm, 3.5.3절 참조]

n : 차종별 교통량 [대/(h · km · lane), 3.3절 참조]

{단, 매연에 대한 환기량 산출 시는 가솔린 엔진 차량(승용차)은 제외됨.}

이다.

3.2 기준 배출량

3.2.1 매연(smoke)에 대한 기준배출량(q_0^T)

기준배출량은 표고 0m, 경사 0%인 도로를 주행속도 60km/h로 차량이 주행할 때 단위시간에 배출되는 오염물질의 양으로 이 편에서는 대기환경보전법의 제작차 오염물질 배출량 규제치를 적용하여 오염물질 및 차종별로 산출하여 제시한다.

매연은 안전운행을 위한 가시거리에 영향을 미치는 오염물질로 디젤차에서 배출되는 입상물질 및 부유분진을 총칭한다.

터널 내 매연의 농도는 소광계수(K)나 매연투과율(τ) 관점에서 허용농도를 정하고 있기 때문에 매연 농도와 가시도의 상관관계를 밝히는 것이 중요하며, 일반적으로 다음식으로 표현되는 MIRA의 관계식을 적용하고 있다.

$$K = 6.25C_s \quad (3.4)$$

여기서, C_s 는 매연의 농도(g/m^3)이다.

중량단위(g/kWh)로 규제되는 매연의 농도는 다음식으로 PIARC 방식의 기준배출량($m^2/h \cdot 대$)으로 환산할 수 있다.

$$q_0^T = 6.25 f_r \cdot C_k \cdot P \tag{3.5}$$

여기서, C_k : 신차의 배출량 규제치(g/kW · h)

P : 차량의 출력(kW/대)

f_r : 감소계수(75%)이다.

감소계수(reduction factor)는 자동차에서 배출되는 총 입자상 물질 중에서 가시도에는 탄소입자가 결정적인 영향을 미치며, 그 외의 물질은 가시도에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 이에 대한 감소효과를 고려하기 위한 계수이다.

식(3.5)로 계산한 차종별 기준배출량은 <표 3.1>과 같으며, 또 <표 3.2>는 PIARC에서 제시하는 중량별 기준배출량을 나타낸 것이며, 표에서 권장값은 <표 3.1>의 차종별 기준배출량을 보간법에 의해 보간하여 제시한 것으로서, 이 편에서는 이를 매연에 대한 기준배출량으로 제시한다.

또한 적용차량에 대한 엔진동력 및 중량은 도로용량편람에서 제시하는 <표 3.3>의 값을 사용하며, 환기기기 설계 시 공차율 즉, 적재차량에 대한 비적재차량의 비를 20%로 한다.

<표 3.1> 차종별 매연기준배출량(q_0^T)환산

구 분	승용차	버 스		트 렉			
		소 형	대 형	소 형	중 형	대 형	특 수
허용기준 (2000년1월이후)	0.05 g/km	0.06 g/km	0.25 g/(kW · h)	0.08 g/km	0.25 g/(kW · h)	0.25 g/(kW · h)	0.25 g/(kW · h)
엔진출력 [kw]	69.1	54.4	166.2	58.8	81.6	183.8	237.9
'95 PIARC기준	-	17	195	23	96	216	279

<표 3.2> 중량별 매연 기준배출량

Trucks, Bus with diesel motors (m) 3.5ton					
Emission Law	Control	$q_0^T (V = 60\text{km/h}), [m^2/(h \cdot \text{대})]$			
		truck weight (ton)			
		5	10	20	40
No Law	no	80-130	160-250	300-400	400-600
EEC R 49 + 24	no	80	160	240	280
EEC R 49 + 24	yes	65	130	200	240
EEC 88/77	yes	50	100	160	200
US Transient 88	yes	50	100	160	200
US Transient 91	yes	30	60	100	140
US Transient 94	yes	20	40	70	110
적 용 값		72	160	235	275

〈표 3.3〉 차종별 차량제원

‘2001 국토해양부 도로용량 편람

구 분	승용차	버 스		트 렉					
		소형	보통	소형	보통	대형	세미 트레일러	풀 트레일러	
단위중량당 마력(PS/톤)	68.6	33.6	18.6	33.5	17.8	13.5	7.4	8.6	
무게 [톤]	차중량	1.08	1.48	9.49	1.41	3.25	8.30	13.83	14.45
	총중량	1.37	2.20	12.16	2.39	6.22	18.55	45.02	36.45
차체 규격 [cm]	길 이	434	450	1,077	452	610	874	1831	1872
	너 비	168	165	245	168	202	248	261	260
	높 이	144	197	312	168	227	321	286	307
마 력 [PS]	94	74	226	80	111	250	332	315	

3.2.2 일산화탄소(CO가스)에 대한 기준배출량(q_0^{CO})

일산화탄소의 기준배출량은 CO의 비중량을 $1,250\text{g}/\text{m}^3$ 으로 하여 계산한 결과 〈표 3.4〉와 같다.

〈표 3.4〉 차종별 CO기준 배출량

구 분	승용차	버 스		트 렉			
		소 형	대 형	소 형	중 형	대 형	특 수
허용기준	2.11 g/km	1.27 g/km	4.9 g/(kW·h)	1.52 g/km	4.9 g/(kW·h)	4.9 g/(kW·h)	4.9 g/(kW·h)
적용값(m^3/h)	0.101	0.061	0.652	0.073	0.320	0.721	0.933

참고 • CO 배출량 허용기준 : 대기환경보전법 시행규칙 제 67 조 별표 20
1996년 9월 14일 환경부령 제 24 호

3.2.3 질소산화물(NO_x)에 대한 기준배출량($q_0^{NO_x}$)

질소산화물에 대한 기준배출량도 CO와 같은 요령으로 계산하며, NO_x 의 비중량은 $1,554\text{g}/\text{m}^3$ 로 한다.

〈표 3.5〉 차종별 NO_x기준 배출량

구 분	승용차	버 스		트 렉			
		소 형	대 형	소 형	중 형	대 형	특 수
허용기준	0.25 g/km	0.64 g/km	6.0 g/(kW·h)	0.71 g/km	6.0 g/(kW·h)	6.0 g/(kW·h)	6.0 g/(kW·h)
적용값(m ³ /h)	0.010	0.025	0.642	0.027	0.315	0.710	0.919

참고 •NO_x 배출량 허용기준 : 대기환경보전법 시행규칙 제 67 조 별표 20
1996년 9월 14일 환경부령 제 24 호

3.3 환기 설계 교통량

환기 설계에 적용하는 교통량은 해당터널의 도로용량을 기준으로 한다.

소요환기량 및 환기기기 용량 산정 시 교통량은 도로용량 편람에 제시된 설계속도별 도로용량을 기준으로 적용한다. 설계목표년도의 교통량이 도로용량 보다 현저히 적어 C수준 이상(A,B)일 경우에는 첨두설계시간교통량을 적용한다. 그러나 교통량 적용방법에 따라 환기방식이 변화하는 경우에는 개통 이후 환기방식 변경 가능성에 대하여 충분히 검토하여야 한다. 이외 지체 시의 적용여부는 그 도로의 지체 빈도나 도로 여건을 고려하여 판단한다.

환기설계에 적용하는 차종별 교통량(n_i)은 다음과 같은 순서로 구한다.

- (1) 설계대상의 도로용량[pc/(h·lane)]의 결정
- (2) 주행속도별 교통밀도의 산정
- (3) 승용차 환산계수 결정
- (4) 차종별 혼입율을 고려한 총 승용차 환산계수 산출
- (5) 터널 내 차량 수 산출

3.3.1 도로용량

도로용량은 주어진 도로조건에서 15분 동안 무리없이 최대로 통과할 수 있는 승용차 교통량을 1시간 단위로 환산한 값으로 이상적인 조건의 도로용량에 도로 및 교통조건에 따른 감소요인을 반영한 보정계수를 곱하여 구한다.

이상적인 조건에서의 도로용량은 설계속도 및 도로의 조건에 따라 다르며, 각국의 적용값은 <표 3.6>과 같다. 국내의 기준값은 도로용량편람(2001 도로용량 편람)을 근거하여 제시하였다.

<표 3.6> 이상적인 조건에서의 도로용량 <일방향 터널 기준>

국 명	도로용량 (최대교통량) pc/(h · lane)
PIARC 보고서	<ul style="list-style-type: none"> • 도시 터널 1800 ~ 2200 (평균 2000) • 안정된 상태의 터널 2200 ~ 2400
일 본 (도로 구조령)	1800
영 국 (Webster)	1900
미 국 (HCM)	1800
독 일	1800(시외 터널) 1900(시내 터널)
한 국 (고속도로 기본구간)	2300(설계속도 120 kph) 2200(설계속도 100 kph) 2000(설계속도 80 kph)

3.3.2 주행속도별 교통밀도[pc/(km · lane)]

교통밀도는 특정시간, 단위길이의 도로상을 주행하는 차량의 대수로 아래와 같이 교통밀도 산정식과 교통밀도 산정도에 의해서 구하는 방법이 있으며, 이 편에서는 교통밀도 산정식을 이용하여 구하는 것을 원칙으로 한다.

(1) 교통밀도 산정식

교통밀도는 식(3.6)와 같으며, 이 식은 도로의 성격에 따라 교통용량인 최대교통량(M_{max})을 어떻게 적용하느냐에 따라서 교통밀도를 보완할 수 있는 장점이 있다. 최대교통량은 도로용량으로 하며 도로의 설계속도에 따라 <표 3.10>에 제시된 값을 적용한다.

<표 3.7>은 산정도 및 산정식에 의한 교통밀도를 비교한 것으로 저속의 경우를 제외하고는 M_{max} 를 2200 pc/(h · lane)을 적용한 결과와 산정도에서 얻어지는 값이 매우 근사함을 알 수 있다.

$$D = \frac{(D_0 \times M_{max})}{[(D_0 \times V_t) + M_{max} \times (1 - V_t/60)^2]} \quad (3.6)$$

여기서, D : 교통밀도 [pc/(km · lane)]

D_0 : 정체 시 교통량 [속도 $V = 0$ km/h 150pc/(km · lane)]

M_{max} : 도로용량 [pc/(h · lane)]

이다.

(2) 교통밀도 산정도

〈그림 3.2〉의 그래프는 프랑스에 있는 터널연구센터(Tunnel Research Center, CETU)가 1984년에 프랑스의 ROND POINT터널, FOURVIERE 터널, AMBROISE PARE 터널 및 Cours de Verdun 지하도에서 측정한 자료를 근거로 작성된 것으로 교통량·차량밀도 및 차량 속도의 관계를 나타내고 있으며, 관계식은 식(3.7)와 같다.

$$D = -C \cdot I + A \quad (3.7)$$

$$I = V_t \cdot D$$

여기서, D : 교통밀도 [pc/(km · lane)]

I : 교통량 [pc/(h · lane)]

V_t : 차량속도 [km/h]

C, A : 산정도에 제시된 상수이다.

교통밀도 산정도로부터 교통밀도는 다음과 같은 요령으로 구한다.

$$V_t = 10\text{km/h 일 때 } D = \frac{160}{1 + 0.04 \times 10} = 114.285 \quad [\text{pc}/(\text{km} \cdot \text{Lane})]$$

$$V_t = 20\text{km/h 일 때 } D = \frac{150}{1 + 0.04 \times 20} = 83.333 \quad [\text{pc}/(\text{km} \cdot \text{Lane})]$$

$$V_t = 30\text{km/h 일 때 } D = \frac{140}{1 + 0.04 \times 30} = 63.636 \quad [\text{pc}/(\text{km} \cdot \text{Lane})]$$

$$V_t = 40\text{km/h 일 때 } D = \frac{140}{1 + 0.04 \times 40} = 53.846 \quad [\text{pc}/(\text{km} \cdot \text{Lane})]$$

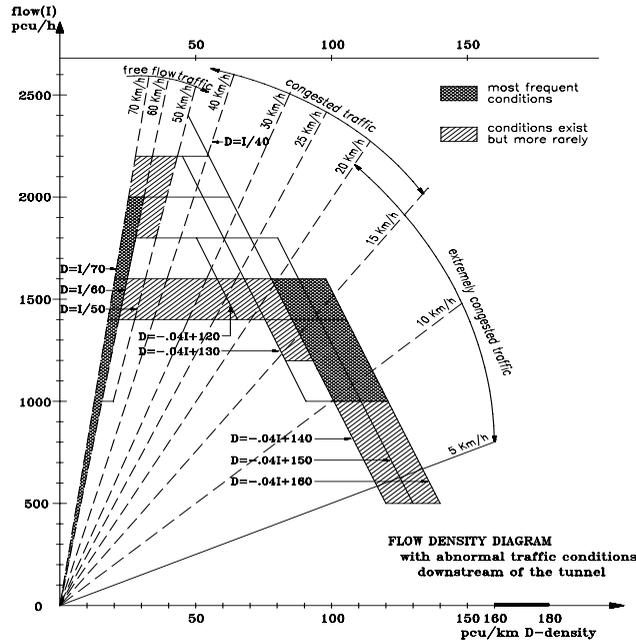
$$V_t = 50\text{km/h 일 때 } D = \frac{140}{1 + 0.04 \times 50} = 46.667 \quad [\text{pc}/(\text{km} \cdot \text{Lane})]$$

주행속도가 60km/h이상인 경우에는 $D = \frac{I}{V_t}$ 에 $I = 2200$ 을 대입하면

$$V_t = 60\text{km/h 일 때 } D = \frac{2200}{60} = 36.667 \quad [\text{pc}/(\text{km} \cdot \text{Lane})]$$

$$V_t = 70\text{km/h 일 때 } D = \frac{2200}{70} = 31.429 \quad [\text{pc}/(\text{km} \cdot \text{Lane})]$$

$$V_t = 80\text{km/h 일 때 } D = \frac{2200}{80} = 27.5 \quad [\text{pc}/(\text{km} \cdot \text{Lane})]$$



〈그림 3.2〉 교통밀도 산정도

〈표 3.7〉 속도별 교통밀도

[단위: pc/(km · lane)]

구 분		차 량 속 도 (km/h)							
		10	20	30	40	50	60	70	80
그래프 산출법		114	83	64	54	47	37	31	28
수식 산출법	$M_{max} = 1800$	99	72	55	44	36	30	26	23
	$M_{max} = 2000$	104	78	60	49	40	34	29	25
	$M_{max} = 2200$	109	83	66	53	44	37	32	27
	$M_{max} = 2300$	112	86	68	56	46	39	33	29
	$M_{max} = 2400$	114	89	71	58	48	40	35	30

3.3.3 승용차 환산계수

승용차 환산계수는 〈표 3.8〉의 값을 기준으로 한다.

대형차의 승용차 환산계수(PCE : Passenger Car Equivalents)는 환기량 계산 시 중요한 인자로 경사 및 대형차 혼입율에 따라서 다르나 현재 국내도로 터널에 대한 승용차 환산계수는 연구된 바가 없으므로 도로용량편람의 값을 준용한다.

〈표 3.8〉 승용차 환산계수

차 량 구 분	지 형		
	평 지	구 릉 지	산 지
소형 (2.5톤 미만 트럭, 12인승 미만 소형버스)	1.0 (1.0)	1.2	1.5
중형 (2.5톤 이상 트럭, 버스)	1.5 (1.5)	3.0 (2.4)	5.0
대형 (세미 트레일러 또는 풀 트레일러)	2.0 (1.9)		

I) 중차량이 승용차와 거의 동일한 속도를 유지할 수 있는 지형으로 종단경사가 2% 미만인 지형
 II) 종단경사가 2% 이상 5% 미만인 지형
 III) 종단경사가 5% 이상인 지형
 IV) 지형 구분 시 하향경사는 동등 상향경사의 1/2로 추정한다.
 V) ()은 2차로 도로(대면통행)일 경우의 환산계수

3.4 단계건설

도로터널의 환기량은 제작차 오염물질 배출량 규제치 및 터널을 통과하는 차량 수에 가장 크게 영향을 받으며, 제작차 오염물질 배출량은 점차 강화되는 규제에 의해서 감소추세를 보이고 있다. 그러나, 터널을 통과하는 차량 수는 증가할 것으로 예상되기 때문에 환기기기 용량 변화와 서로 상반되는 결과를 초래할 것으로 판단되므로 향후 환기기기 용량에 대한 정확한 예측이 곤란한 측면이 있다. 따라서 단계건설에 의한 환기기기 용량추정은 현실적으로 많은 어려움이 있으나 다음과 같은 방법으로 단계건설 방안을 고려한다.

(1) 운영 중인 터널

5년 주기로 환기기기 운영평가를 실시하여 환기기기 용량의 증대 또는 감소수준을 검토한다. 단계건설을 위한 검토 주기는 교통량 평가 및 환기기기 운영 평가에 의해서 변동될 수 있다.

(2) 터널 설계 시

(가) 검토대상년도의 계획교통량(AADT)에 의한 첨두설계시간교통량(PDDHV)을 적용하여 원할 시에 검토함을 원칙으로 한다.

- (나) 지체 시 교통량은 계획 교통량의 수준과 관계없이 결정되므로 지체 시 환기기기 용량은 도로용량에 의한 환기기기 용량으로 결정되게 된다. 따라서 지체 시 환기기기 용량이 원활 시 환기기기 용량을 상회하는 경우에는 해당터널의 저속 또는 지체 시 빈도와 오염농도 등을 고려하여 지체 시 환기기기 용량의 적용여부를 판단한다.
- (다) 도로터널은 개통이후 구조물에 대한 부분 확장이 매우 어렵다. 그러나 터널 내 환기방식은 통과교통량의 변화뿐만 아니라 터널 내 공기질 유지수준의 강화, 화재 시 환기방식의 역할 강화 추세 등으로 향후 구조물의 변경이 필요한 환기방식으로 변경될 수 있다. 따라서, 첨두설계시간교통량으로 환기방식을 결정하는 경우에는 개통이후 환기방식의 변화가능성을 충분히 검토하여야 하며, 검토결과 변화가 예상되는 도로용량을 고려한 환기방식을 적용할 수 있다. 이 경우 환기방식에 대한 경제성 및 타당성을 고려한 단계건설방안을 적용하여야 한다.

(3) 단계별 건설방안 기준

- (가) 터널의 환기설비 계획을 수립할 경우에는 교통량 분석을 통한 단계별 건설방안을 검토하여 경제성과 효율적인 유지관리 방안을 확보하도록 하여야 한다.
- (나) 단계별 건설은 통행방식의 변경 가능성(대면통행 → 일방향통행), 도로망의 정비계획 등에 따른 교통유발 가능성 등을 분석하여 적절한 방안을 수립한다.
- (다) 일시적으로 대면통행방식을 고려하는 경우 설계당시에는 연도별로 교통량 추이를 분석하여 연도별 환기기기 용량을 계산하여 적절한 단계건설방안을 확립하고, 개통후에는 실제 교통량 추이를 검토하여 적절한 단계별 건설방안을 수립한다.
- (라) 추정교통량이 도로용량 보다 현저하게 작은 경우에는 연도별 추정교통량에 의한 환기기기 용량을 검토하고 단계 건설 계획을 수립한다.
- (마) 추정교통량의 신장율이 커서 20년 후의 교통량에 의한 설비와 초기교통량에 대한 설비가 현저하게 차이가 있는 경우, 5년 주기의 교통량을 기본으로 단계건설 방안을 검토한다.
- (바) 종류식 환기방식의 대면교통인 터널의 경우 교통환기력 부재로 인한 설비규모가 증대하므로 향후 일방향으로 변경될 경우 용량이 과다하게 될 가능성이 높으므로 이를 고려하여 단계별 건설방안을 검토한다.
- (사) 수직갱 및 전기집진기 등과 같이 터널 구조물이 필요한 환기방식의 경우, 개통이후 필요한 구조물의 설치를 단계건설방안으로 검토하며, 필요 시 향후 환기방식 변경에 대비한 기반시설을 터널 개통 전에 미리 설치할 수 있도록 한다.

3.4.1 침두설계시간교통량

침두설계시간교통량(PDDHV : 대/h)은 중방향설계시간교통량(DDHV)을 침두시간계수(PHF)로 나눈 값으로 다음과 같이 구한다.

$$PDDHV = \frac{DDHV}{PHF} = \frac{AADT \times K \times D}{PHF} \quad (3.8)$$

여기서, AADT : 연평균일교통량 (대/일)

K : 설계시간계수(일반적으로 30번째 교통량에 의한다.)

D : 중방향 교통량의 비

PHF : 침두시간계수

로 일반적인 값은 도로용량편람에 제시되어 있으며, <표 3.9>에 나타냈다.

<표 3.9> 설계시간계수 및 중방향계수

구 분	도시 지역	지방 지역
설계시간계수(K)	0.09(0.07~0.11)	0.15(0.12~0.18)
중방향계수(D)	0.60(0.55~0.65)	0.65(0.60~0.70)

3.4.2 교통량 대 용량비(V/C) 및 평균주행속도의 추정

(1) 이상적인 조건에서 차로 당 최대 서비스 교통량

도로용량편람에서는 설계 속도별로 이상적인 조건에서 차로당 최대 서비스 교통량 값을 나타내었으며, 서비스 수준별 최대 서비스 교통량은 V/C 비율과 관계가 있다.

$$MSF_i = C_j \times (V/C)_i \quad (3.9)$$

여기서, MSF_i : 서비스수준 i에서 차로당 최대 서비스 교통량[pc/(h · lane)]

C_j : j 설계 속도의 용량[pc/(h · lane)]

(V/C)_i : 서비스수준 i에서 교통량 대 용량비

(2) 서비스 교통량

주어진 도로조건과 교통조건에 대한 서비스 교통량(대/시)은 이상적인 조건의 최대 서비스 교통량 {pc/(h · lane)}을 기준으로 차로폭 및 측방여유폭과 중차량을 고려하여 산출한다.

$$\begin{aligned} SF_i &= MSF_i \times N \times f_w \times f_{HV} \\ &= C_j \times (V/C)_i \times N \times f_w \times f_{HV} \end{aligned} \quad (3.10)$$

여기서, SF_i : 서비스수준 i 에서 주어진 도로 및 교통 조건에 대한 서비스 교통량(대/시)

N : 편도 차로 수

f_w : 차로폭 및 측방여유폭 보정계수

f_{HV} : 중차량 보정계수

$$f_{HV} = 1/[1 + P_{HV}(E_{HV} - 1)]$$

P_{HV} : 중차량 구성비(%/100)

E_{HV} : 승용차 환산계수

교통량 대 용량비는 도로용량에 대한 최대 예상교통량의 비를 의미하는 것으로 다음 식으로 표현된다.

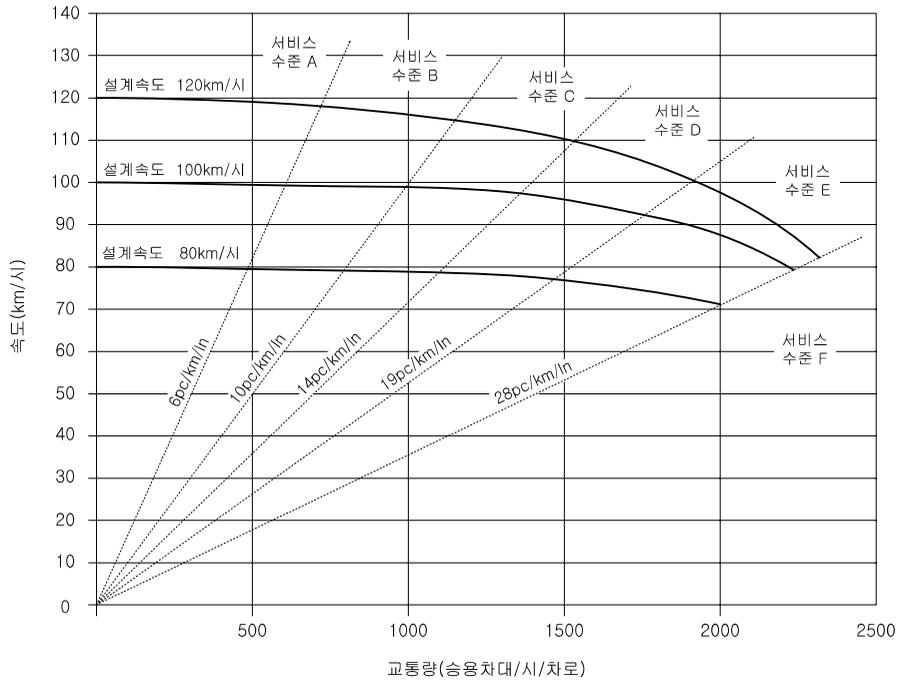
$$V/C = PDDHV/C \tag{3.11}$$

서비스수준은 위에서 구한 V/C 에 의해서 <표 3.10>에 의해서 구하고 평균주행속도에 대한 추정은 승용차 단위의 첨두시간교통량 V_p (pc/h)를 다음식으로 구하여 <그림 3.3>에 의해서 추정한다.

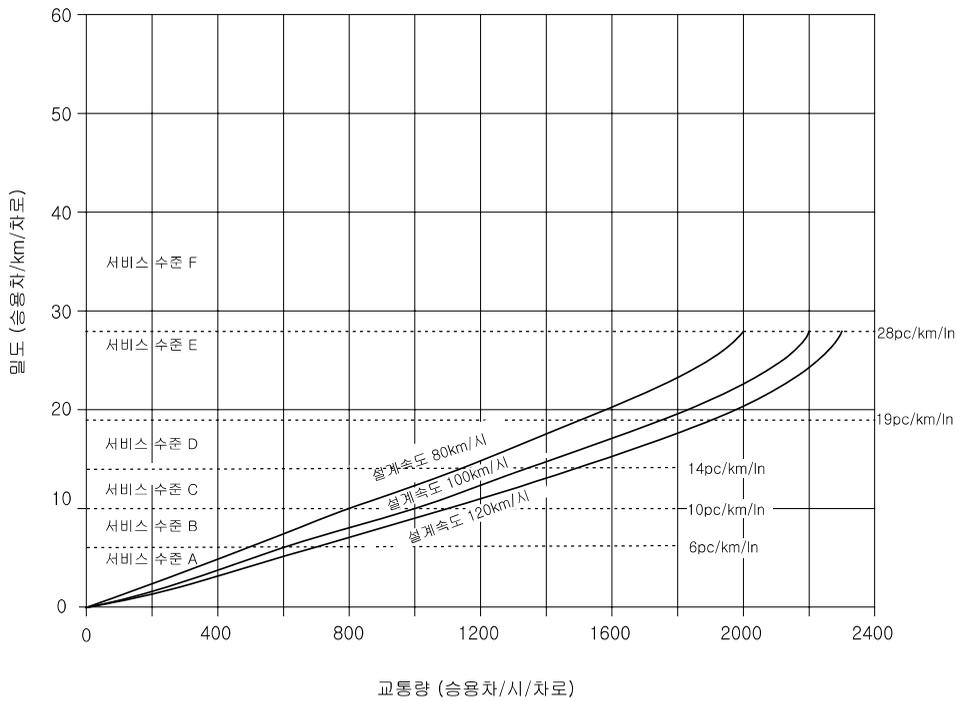
$$V_p = PDDHV/f_{HV} \tag{3.12}$$

<표 3.10> 고속도로 기본 구간의 서비스 수준

서비스 수 준	밀도 [pc/(km · lane)]	설계 속도 120 kph		설계 속도 100 kph		설계 속도 80 kph	
		교통량 [pc/(h · lane)]	V/C비	교통량 [pc/(h · lane)]	V/C비	교통량 [pc/(h · lane)]	V/C비
A	≤6	≤700	≤0.3	≤600	≤0.27	≤500	≤0.25
B	≤10	≤1,150	≤0.5	≤1,000	≤0.45	≤800	≤0.40
C	≤14	≤1,500	≤0.65	≤1,350	≤0.61	≤1,150	≤0.58
D	≤19	≤1,900	≤0.83	≤1,750	≤0.8	≤1,500	≤0.75
E	≤28	≤2,300	≤1.00	≤2,200	≤1.00	≤2,000	≤1.00
F	>28	-	-	-	-	-	-



〈그림 3.3〉 고속도로 기본 구간의 속도-교통량 곡선과 서비스수준



〈그림 3.4〉 고속도로 기본 구간의 밀도-교통량 곡선과 서비스수준

3.4.3 환기설계를 위한 교통밀도(D)

환기량 계산을 위한 교통밀도는 전술한 첨두설계시간교통량(PDDHV)을 주행속도(60~80km/h)의 관계에서 식(3.13)으로 계산하며, 차종별 차량 수는 3.3.2와 동일한 방법으로 구한다.

$$D = PDDHV / (Vt \cdot NL) \text{ [대/(km} \cdot \text{lane)]} \quad (3.13)$$

3.5 터널 내 오염물질의 허용농도

터널 내 오염물질의 허용농도는 <표 3.11>에 제시된 PIARC의 권고치를 준용하여 다음과 같이 정한다.

<표 3.11> 교통상태에 따른 CO, NOx 허용농도 및 매연 허용소광계수의 권고치

<표 3.11> • PIARC 91

교통 형태	$K_{lim}[m^{-1}]$	비 고
원활한 교통 $V_{max} = 60, 80km/h$ $V_{max} = 100km/h$	0.005 ~ 0.007 0.005	50 ~ 60% 60%
혼잡 교통	0.007 ~ 0.009	50 ~ 40%
터널 폐쇄	0.012	30%
터널 보수 작업	0.003 이하	75%

• PIARC 95

교통상태	CO		NOx	가시거리	
	연도			허용소광계수	투과율
	1995	2010			
	ppm	ppm		ppm	$10^{-3} m^{-1}$
50~100 km/h	100	70	25	5	60
매일혼잡	100	70	25	7	50
극도로 혼잡한 통행	150	100	25	9	40
터널유지보수	30	20	25	3	75
터널차단	250	200	25	12	30

3.5.1 매연(smoke)에 대한 허용소광계수 [K_{lim}]

터널의 매연의 허용농도는 소광계수나 매연투과율로 정하고 있으며, 소광계수와 매연투과율의 관계는 식(3.14)와 같다.

$$K = -\frac{1}{L} \ln \frac{E}{E_0} \quad (3.14)$$

여기서, E : 스모그가 자욱한 대기에서 거리 L을 통과한 후의 광선강도

E_0 : 초기광선의 강도

이다.

매연의 허용농도는 <표 3.12>를 적용한다.

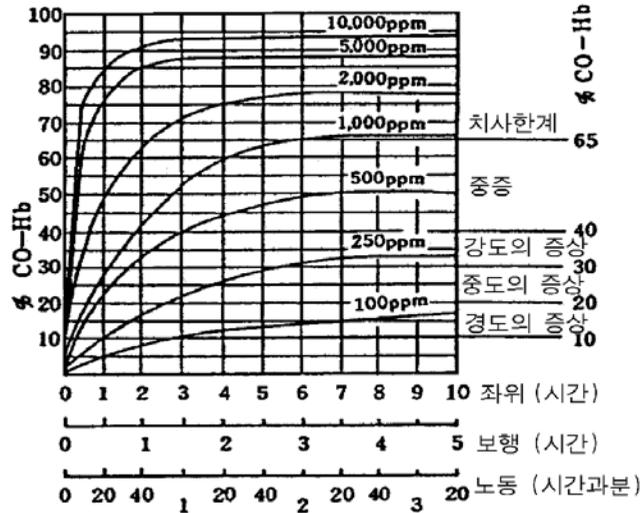
<표 3.12> 허용소광계수 기준표

주 행 속 도	허 용 소 광 계 수 (K_{lim})			비 고
	0.005	0.006	0.007	
40 km/h			●	목표년도 서비스 수준이 E 이하이거나 지체빈도가 많을 것으로 예상되는 경우
50 km/h			●	
60 km/h		●		
70 km/h		●		
80 km/h		●		

● : 설계 기준값 □ : PIARC 허용범위

3.5.2 일산화탄소(CO가스)에 대한 허용농도

CO는 승용차에서 가장 많이 배출되는 오염물질로 연료의 불완전 연소로 인하여 생성되는 것으로 무색, 무취하며 헤모글로빈과 결합력이 산소보다 200배나 높아 인체에 흡수되면 COHb를 형성하여 산소의 운반능력을 저하시켜 신경계통에 영향을 주어 반사운동신경의 둔화로 운전자의 판단능력을 저하시켜 교통상황 판단의 지연으로 인해 교통사고를 유발할 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(그림 3.5) 참조). 터널에서 일산화탄소의 허용농도는 <표 3.13>에 나타난 PIARC 보고서의 권고치를 준용한다.



〈그림 3.5〉 CO가스가 인체에 미치는 영향

〈표 3.13〉 허용 CO 농도

주행속도[km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80
CO [ppm]	100	100	100	100	100	100	100	100

3.5.3 질소산화물(NOx)에 대한 허용농도

NOx는 엔진 내에서 연료의 연소 시 고온에 의해서 공기 중의 질소와 산소가 열반응하여 생성되는 것으로 배기관을 통해 배출되는 NOx는 95%이상이 NO이나 대기 중에서 광화학 반응하여 NO₂로 변환된다. NO₂는 NO보다 5배 이상 독성을 가지고 있으며 호흡 시 인체로 흡입된 NO₂의 95%가 기관지 내에 남아 호흡기를 감염하여 천식환자의 기도저항을 증가시키고 폐의 기능을 감소시킨다. 농도가 100~150ppm에 30~60min정도의 노출은 위험한 정도인 것으로 알려져 있다.

NOx에 대한 주행속도별 허용농도기준은 전 주행속도에서 25ppm으로 한다.

〈표 3.14〉 허용 NOx 농도

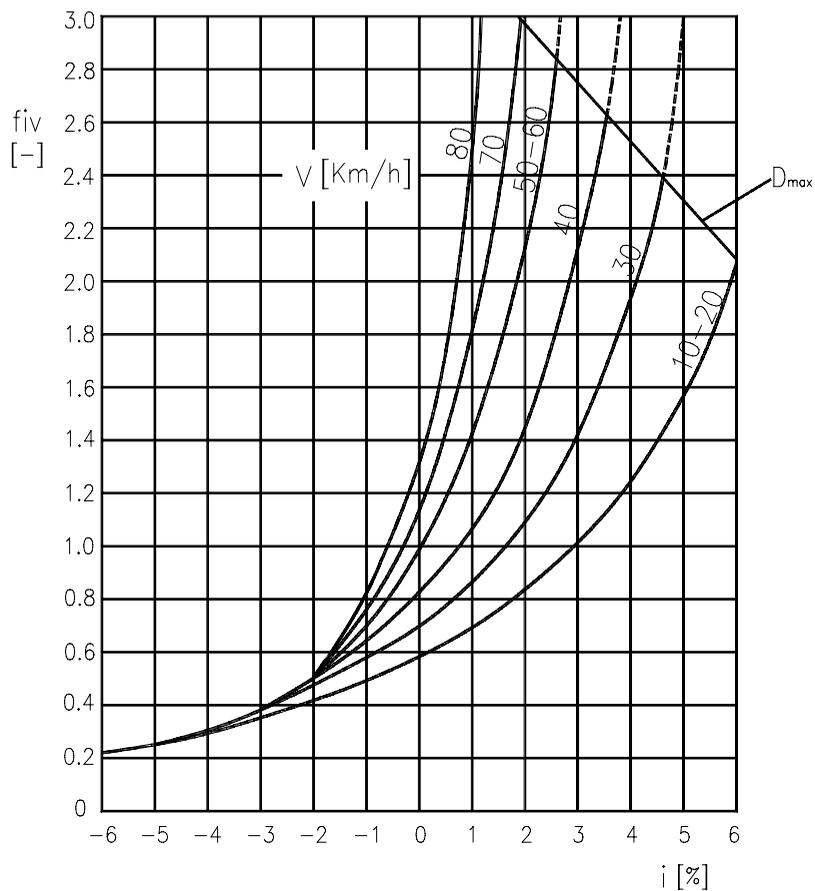
주행속도[km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80
NOx [ppm]	25	25	25	25	25	25	25	25

3.6 보정계수

환기량 계산 시 속도경사, 속도, 경사, 표고에 대한 보정계수가 사용되나 현재 국내 실정으로 이에 대해 정확하게 제시된 값이 없으므로 PIARC 보고서에서 제시하는 값을 준용한다.

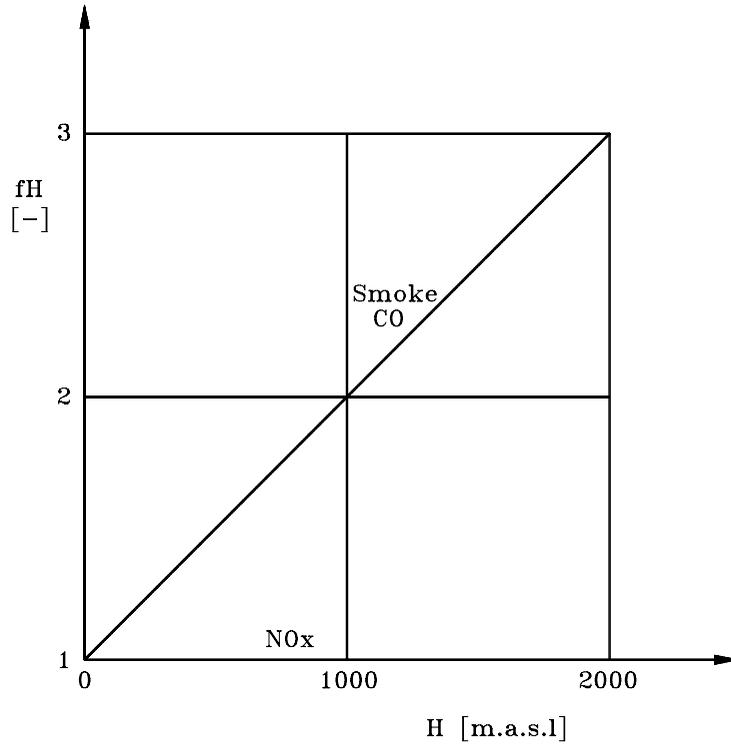
3.6.1 경사속도 보정계수(f_{iv})

경사속도 보정계수는 매연에 대한 환기량 계산 시 보정계수로 <그림 3.6>의 '91 PIARC보고서의 경사속도에 따른 보정계수를 준용한다.



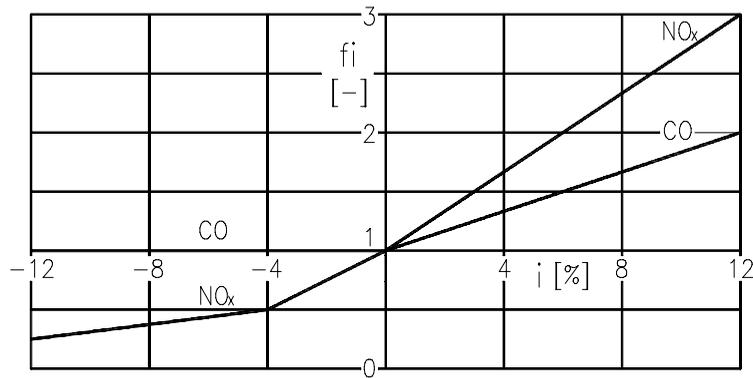
<그림 3.6> 매연에 대한 경사속도 보정계수

3.6.2 표고보정계수(f_H)



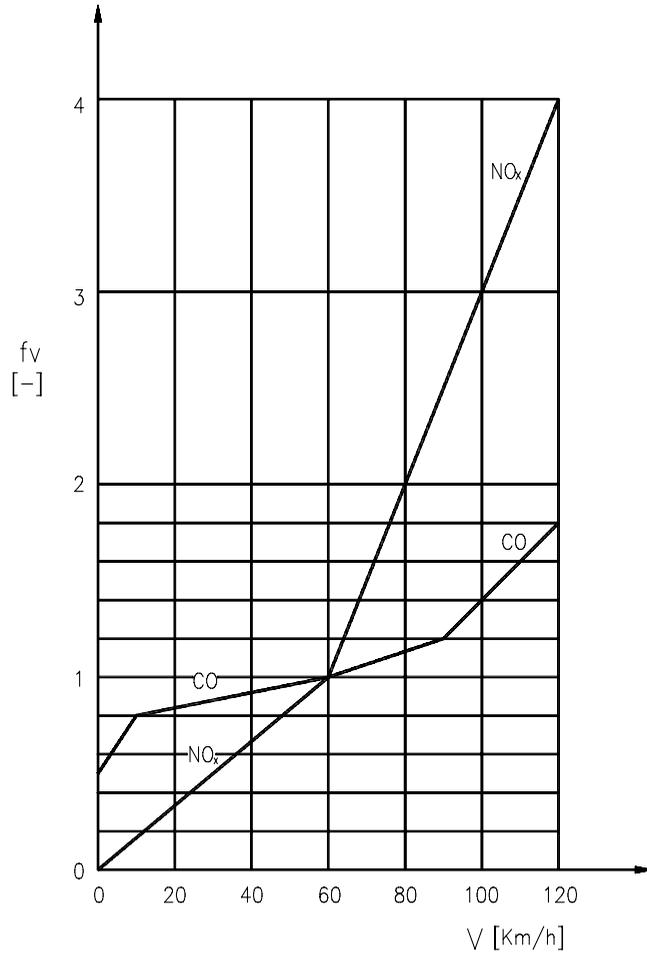
〈그림 3.7〉 표고보정계수

3.6.3 경사보정계수(f_i)



〈그림 3.8〉 경사보정계수

3.6.4 속도보정계수(f_v)



〈그림 3.9〉 속도보정계수



4. 터널에서 승압력과 환기저항

터널 내 기류는 터널에 작용하는 각종 환기력(자연풍에 의한 환기저항, 터널벽면 마찰저항, 교통환기력, 환기기기에 의한 승압력)이 평형을 이루는 상태로 결정된다.

터널에서 기류는 터널 내 공기에 작용하는 각종 힘이 평형을 이루는 상태에서 형성되며, 이 힘들은 터널 내 기류를 생성하는 힘(환기력)과 저항으로 작용하는 힘(저항력)으로 구분되며, 일반적으로 터널에서의 환기력은 차량의 피스톤효과에 의한 교통환기력 및 환기기기(제트팬 또는 송기노즐)에 의한 승압력이 있으며, 저항력으로는 터널 양갱구의 입·출구손실에 따른 환기저항, 터널벽면의 마찰손실에 의한 환기저항, 역 방향 자연풍에 의한 환기저항이 있다. 일반적으로 환기 시스템 설계 시에는 이들 환기력을 압력으로 환산하여 압력평형식에 의해서 터널 내 풍속 및 소요 환기기기의 용량을 결정하게 된다.

4.1 자연풍에 의한 환기저항

자연풍에 의한 환기저항은 자연풍의 풍속·풍향 및 온도, 대기압차 등 외부기상조건에 의해 발생하는 양갱구의 압력차에 의한 것으로 터널외부의 기상조건이 항상 변동하므로 자연풍에 의한 환기저항의 크기 및 작용방향은 수시로 변하게 되나, 일반적으로 안전측면에서 작용방향은 터널 내 주기류의 반대방향, 즉 환기에 저항으로 작용하는 것으로 하며, 자연풍에 의한 저항력의 크기는 식(4.1)의 U_n 의 값을 일반지형조건하에서 자연풍은 양방향 교통일 경우는 1.5 m/s, 일방향 교통일 경우는 2.5 m/s 적용을 표준으로 하며, 기타 특수지형조건에서는 터널별 설계조건을 고려하여 설계한다.

$$\Delta P_{MTW} = \left(1 + \xi_i + \lambda_r \frac{L_r}{D_r}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_n^2 \quad [\text{Pa}] \quad (4.1)$$

여기서, ΔP_{MTW} : 자연풍에 의한 환기저항 [Pa]

ξ_i : 터널 입구 손실계수

λ_r : 터널 벽면 마찰 손실계수

L_r : 터널 길이 [m]

- D_r : 터널 대표 길이 [m]
- U_n : 자연풍에 의한 터널 내 평균 풍속 [m/s]
- ρ : 공기 밀도 [kg/m³]

이다.

참고로 전술한 식에 의한 U_n 과 ΔP_{MTW} 관계는 <그림 4.1>에 나타낸 것과 같다.

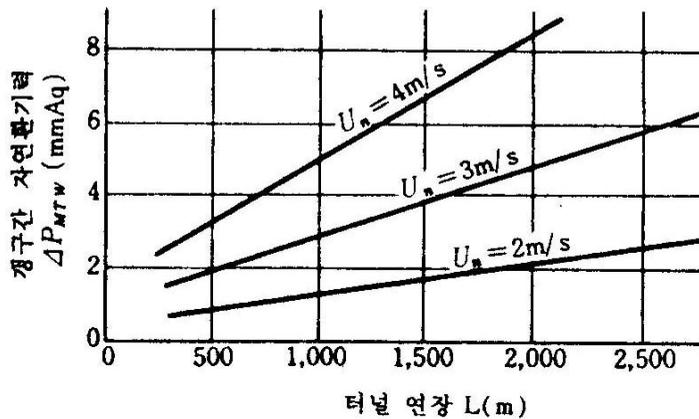
4.2 터널 입·출구 저항 및 벽면마찰저항

터널 입구 및 출구에서는 기류의 급격한 변화로 인한 압력손실과 터널 벽면마찰 및 교통 표시판 등 제 설치물에 의해서 발생하는 압력손실로 터널 내 풍속이 U_r 일 때 식(4.2)로 표시된다.

$$\Delta P_r = \left(\xi_i + \xi_e + \lambda_r \frac{L_r}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_r^2 \quad (4.2)$$

여기서, λ_r 은 도로터널의 벽면마찰계수로 Moody선도에서 구해지는 값으로 일반적으로 0.025로 하고 있으나 이 값은 터널 내 기류의 속도와 터널 내 각종 표시판의 상태 및 조명기구의 설치 조건에 의해서 변하므로 이에 대한 충분한 검토를 한 후에 적용한다.

또 식(4.2)에서 ξ_i , ξ_e 는 각각 입구 손실계수 및 출구손실계수로 일반적으로 0.6과 1을 적용하고 있으나 이 값은 갭문의 형상에 의존하는 값으로 갭문의 형상에 따른 검토를 수행한 후에 적용하는 것이 바람직하다.



<그림 4.1> 저항이 되는 자연 환기력

4.3 교통환기력

교통환기력은 터널을 주행하는 차량의 피스톤효과에 의해서 발생하는 것으로 식(4.3)으로 계산한다.

$$\Delta P_t = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n^+ \cdot (V_t^+ - U_r)^2 - \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n^- \cdot (V_t^- + U_r)^2 \quad (4.3)$$

여기서, 터널 내 풍속(U_r)의 방향을 기준으로 하여 +는 기류와 동일한 방향, -는 기류와 반대방향을 의미한다. n^+, n^- 은 각각 환기풍의 방향과 동일한 방향의 차량의 수와 반대방향의 차량수를 나타낸다. 또 V_t^+, V_t^- 는 차량의 주행속도를 의미한다. 또 A_m 은 자동차 등가저항면적으로 식(4.4)로 계산한다.

터널 내공단면에 따른 차량의 전면투영면적과 저항계수는 이 편에서는 최근 일본의 연구를 기초로 하여 <표 4.1>에 제시된 값을 사용한다.

$$A_m = A_s \cdot C_{DS} \cdot (1 - \phi) + A_L \cdot C_{DL} \phi \quad (4.4)$$

여기서, $A_{s,L}$: 자동차의 전면투영면적

$C_{DS,DL}$: 자동차의 저항계수

ϕ : 대형차 혼입율

이다.

참고로 <그림 4.2>는 대형차 혼입율에 따른 자동차의 등가저항면적을 나타낸 것으로 대형차 혼입율이 동일한 경우에도 터널의 내공단면이 적은 경우에는 등가저항면적이 증대하는 것을 알 수 있다. 또 자동차의 형상에 관련된 저항계수는 폐색율(자동차의 전면투영면적 / 터널내공단면적)이 크면 저항계수도 증가하며, 식(4.5)로 표시할 수 있다.

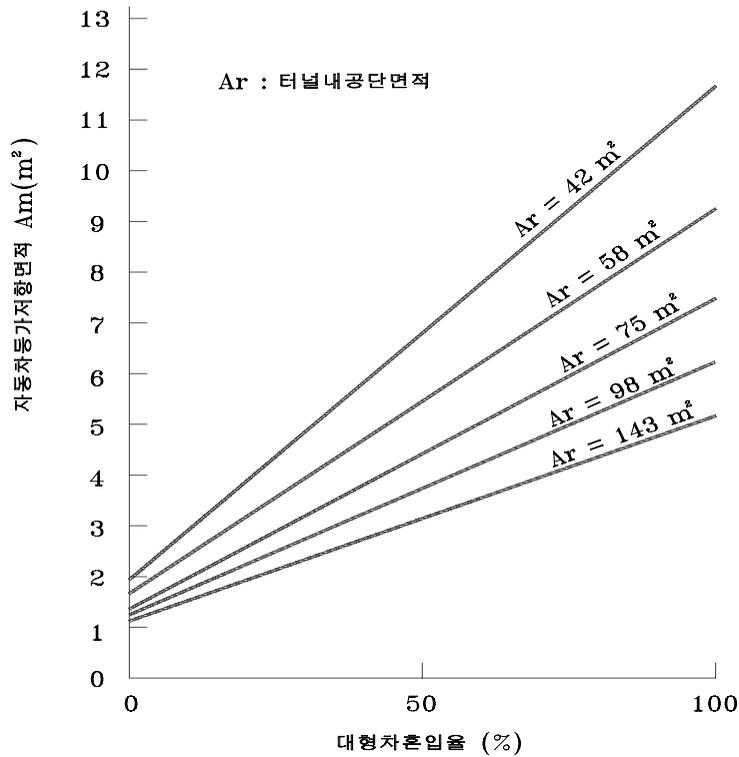
$$Y = 0.0786X + 0.35 \quad (4.5)$$

여기서, Y : 저항계수, X : 폐색율(%)

이다.

<표 4.1> 터널단면에 따른 차량의 투영면적 및 저항계수(적용 권장값)

터널 내공단면적 (m ²)	143		98		75		58		42	
	대형	소형	대형	소형	대형	소형	대형	소형	대형	소형
자동차의 전면투영면적 (m ²)	7.11	2.31	7.11	2.31	7.11	2.31	7.11	2.31	7.11	2.31
자동차의 저항계수	0.74	0.48	0.92	0.53	1.09	0.59	1.31	0.66	1.68	0.78
자동차의 등가저항면적 (m ²)	5.26	1.11	6.54	1.22	7.75	1.36	9.31	1.52	11.95	1.80



〈그림 4.2〉 자동차의 등가저항 면적과 대형차 혼입률의 관계

4.4 환기설비의 승압력

제트팬, 수직갱 또는 집진기의 송기노즐은 분류(jet)의 운동량에 의해 승압력을 발생시켜 터널 내 기류를 형성하는 설비로서, 이에 의한 승압력은 5. 환기방식에서 설명한다.



5. 환기방식

환기방식은, 그 특징을 이해하여 터널의 길이 · 지형 · 지물 · 지질 · 교통조건 · 기상조건 · 환경조건 등에 따라 효과적이고 경제적인 방식을 선정한다.

5.1 개요

5.1.1 환기방식의 종류

터널의 환기는 자연환기와 기계환기로 크게 구분되며, 자연환기는 소정의 환기량을 교통 환기력만으로 충족할 수 있는 경우이며, 그렇지 못한 경우에는 환기설비를 하여 환기기에 의한 환기를 수행하게 되며 이를 기계환기라 한다. 이를 환기에 대한 승압력 관계식은 식(5.1)과 같다.

즉, 환기저항이 교통환기력보다 작은 경우에는 자연환기가 가능하며, 그렇지 못한 경우에는 기계환기가 필요하다.

$$\Delta P_{MTW} + \Delta P_r \leq \Delta P_t \text{ ————— 자연환기 가능} \quad (5.1)$$

$$\Delta P_{MTW} + \Delta P_r > \Delta P_t \text{ ————— 자연환기 불가능}$$

기계설비에 의한 환기는 일반적으로 터널외부의 신선한 공기를 기계 환기력에 의해서 유입하여 오염된 공기를 희석 · 배기하는 것으로 환기방식은 차도 내 기류의 방향에 따라 종류식, 반횡류식, 횡류식 등으로 구분된다. 또한 이들의 방식을 조합하여 사용하는 경우도 있다.

그리고 전기집진기에 의해 오염공기를 정화하는 방식은 주로 종류 환기방식과 조합하여 이용되고 있다. 기본적인 환기 방식은 다음과 같이 분류할 수 있으며, 각 환기방식에 따른 특징은 <표 5.1>에 나타났다.



〈표 5.1〉 환기방식의 특징 (일방향 터널)

환기방식		종 류 식					반 횡 류 식		횡 류 식	
기본적 특징		터널 내 종방향의 기류가 발생하여, 교통신기력을 유효하게 이용할 수가 있다. 터널 내 덕트는 필요하지 않다.					터널에 평행하게 설치된 덕트에 의해서 송기 또는 배기되고 차도 내 종방향의 흐름이 발생한다.		터널 덕트에 의하여 송기와 배기가 동시에 이루어지기 때문에 횡방향의 흐름이 발생하고 차도를 흐르는 풍량은 비교적 작다.	
대표적 형식		제트팬식	사카르트식	집중배기방식	수직강송배기방식	전기집진기식	송기반횡류식	배기반횡류식		
개 요		제트팬 및 교통신기력	송기노즐의 분류에 의한 송입력 및 교통신기력	갱구로 부터 흡입되는 풍량이 있음, 교통신기력이 저항으로 되는 구간 존재	송기노즐의 송입력 및 교통신기력에 의한 송기	송기노즐의 송입력 및 교통신기력, 집진에 의한 오염물질 처리효과	터널 내 송기 덕트에 의해서 신선공기가 공급되고 오염물질이 희석됨	터널 내 배기 덕트에 의해 오염물질이 배기되고, 양갱구를 통해서 신선공기가 공급됨		
개 략 도	환기계동도									
	차도 내압									
	차도 내 풍속									
	농도분포									
	차도 내 풍속	역풍상대에서 한계속도는 10m/s이하					중성점이 터널의 중앙에 있는 상태에는 8m/s를 유지하고 국부적인 한계풍속은 10m/s이하로 한다.		덕트계의 분할이 가능하며, 일반적으로 차도 내 풍속은 교통신기력에 의한다.	
구 조		천장에 제트팬 설치공간 필요	제트팬을 병용하지 않는 경우에는 천장공간 불필요					덕트공간이 필요		송배기덕트공간이 동시에 있어야 하므로 내공단면적이 가장 큼
유 지 관 리	설비동력	차도공간에 있어서 환기를 위한 에너지 효율은 타방식에 비하여 불리함				겉보기 환기량이 저감되어 비교적 좋음	배기 반횡류식에 비해서 동력비가 저렴함		반횡류식에 비해서 고기압	
	제어성	풍량단계와 가동팬의 수는 비례하지 않음		풍량 단계와 가동팬은 비례하지 않고 교통량 자연풍의 적정한 운용은 비교적 곤란		풍량단계와 가동팬의 수는 비례하지 않음		교통량의 변동에 비례해서 제어됨		
	기타	정비 시 터널 내 차도 공간에서 작업 진행됨	갱구부근의 환기소에 팬을 설치하기 때문에 용이함	환기소에 팬을 설치하기 때문에 정비가 용이			환기설비 전체의 유지관리작업량이 종류식에서 보다 증가함			
오염물질의 배출		출구측 갱구로 전량 배출		일부 또는 전량이 배기탑으로 배출, 갱구로의 배출제어가 가능	배기탑 및 출구측 갱구로 배출	출구측 갱구로 배출, 집진된 오염물질의 처리	출구측 갱구로 거의 전량 배출	갱구에서 오염공기를 배출하지 않고 배기탑을 통해서 배출함	배기탑을 통해서 배출되나 일부는 터널출구로 배출됨	
화재 시 제연		출구측 갱구로의 제연		입경을 통해서 일부 또는 전량을 제연	출구측 갱구를 향한 제연으로서 운영할 수 있음	화재 시에는 기능정지	환기기의 조합에 의해서 터널구간의 배기와 송기가 자유로우므로 화재대응력이 좋다.		각종 조합운전이 가능하므로 화재 대응력이 가장 우수하다.	
자연풍의 영향		자연풍 및 피스톤작용에 의한 효과를 기대할 경우에는 이들의 영향을 정확히 평가할 필요가 있음					자연풍의 영향을 비교적 받지 않음			
설치의 곤란성		덕트를 필요로하지 않기 때문에 터널의 개통후에도 환기설비의 추가 설치 가능. 단 집진기실은 제외					차도공간과는 별도의 덕트를 필요로하기 때문에 환기설비의 증설변경은 곤란하다.			
설비비		환기덕트는 차도공간 자체가 되기 때문에 다른 방식에 비하여 경제성이 좋음					종류식 보다 고기압			
기타		환기덕트로 차도공간 자체를 사용하기 때문에 압력손실이 적다. 전기집진기와 병용하여 적용연장을 늘릴 수 있다. 차도 또는 차도근방에 제트팬이 설치되므로 소음에 대한 고려가 있어야 한다. 집진 정확률 공기를 3회 이상으로하는 경우에는 주의를 요함.					차량의 피스톤작용을 저해하기 때문에 에너지 효율 면에서 종류식 보다 떨어진다.		중성점에서 오염물질의 농도는 이론적으로 동일하나 환기가능하다.	

5.1.2 환기 방식 선정

환기방식의 선정에 영향을 가장 크게 미치는 것은 주행속도에 따른 소요환기량으로 소요환기량은 터널의 기하학적인 제원 및 터널을 통행하는 교통류에 영향을 받으므로 환기방식의 선정에도 전술한 조건이 가장 큰 영향을 미치게 되므로 이에 대한 충분한 검토가 요구되며, 또한 터널 주위의 환경조건, 화재 시 환기기관의 운용, 유지관리, 경제성, 단계건설, 기타 조건 등에 대해 유의하고 종합적으로 검토하여 가장 적절한 방식으로 결정해야 한다.

(1) 터널의 제원

터널의 길이, 터널의 경사, 터널의 단면적이 영향을 미치게 된다. 이중에 경사는 환기 방식에 아주 큰 영향을 미치는 인자로 경사가 -인 경우에는 주로 저속에서 CO나 NOx 등 가스상 물질의 처리가 환기 기기 용량을 결정하게 되며, 경사가 +인 경우에는 일반적으로 정상 주행 시 매연을 처리하기 위해서 환기기기 용량이 결정된다.

교통환기력이 커지는 장대터널의 경우에는 자연환기에 의한 터널 내 풍속이 증대하여 제트팬 방식인 경우에는 팬의 승압효율이 감소하여 소비동력이 증가하는 문제점이 있으므로 터널 내 풍속이 지나치게 커지는 것은 안전측면 뿐만 아니라 유지관리 면에서도 고려해야 한다.

(2) 터널의 통행방식

환기방식의 특징은 터널의 통행방식에 따라 크게 달라질 수 있다. 즉 일방향 교통에서는 교통환기력을 유효하게 이용할 수 있는 종류식 환기방식이 유리하며, 양방향 교통의 경우에는 교통환기력을 기대할 수 없으므로 횡류방식이나 집중배기방식을 선택하는 것이 유리하나, 초기 건설비가 증가하므로 경제성을 고려한 선택이 필요하다.

(3) 주변환경에 대한 영향

최근들어 터널주변 환경에 미치는 영향에 대한 문제가 부각되고 있으며, 제트팬 종류환기방식에서는 터널에서 발생하는 오염물질의 전량이 터널 출구를 통해서 배출되며, 수직갱방식에서는 환기탑과 출구에서 오염물질이 배출되는 특성이 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

또한 전기집진기 방식은 제트팬 방식과 조합하여 적용하고 있으며, 오염물질을 집진처리한다는 점에서 오염물질에 대해 가장 적극적으로 처리한다고 볼 수 있으나 일부 오염물질은 터널 출구를 통해서 배출된다.

따라서 오염물질에 대한 터널 출구로의 오염물질 배출을 완전히 억제하기 위해서는 집중배기 방식이나 배기 반횡류방식의 적용이 요구된다. 그러나 집중배기 방식의 경우에는 배기량이 소요환기량보다

증대하므로 이에 대한 운영측면에서의 경제성 검토가 요구되며, 배기 반횡류식의 경우에는 덕트의 설치로 인한 초기 투자비가 증대하므로 이에 대한 종합적인 고려가 필요하다.

(4) 차도 내 한계풍속

터널의 차도 내 풍속이 지나치게 크면 보행자에게 위험을 줄 염려가 있고, 차량의 고장 등으로 운전자가 터널 내에서 하차하는 경우에 위험을 야기할 수 있다는 안전측면과 풍속이 증가할수록 분류에 의한 승압력이 감소하여 환기 시스템의 효율이 감소하므로 차도 내 풍속을 일정정도 이하로 억제시켜야 한다. 따라서 일방향 통행 터널일 경우 10 m/s 이하를 적용하고 양방향 통행 터널에서는 8 m/s 이하를 적용한다.

특히 종류식 환기방식에서는 터널 연장이 증가하면 교통환기력에 의한 자연환기의 풍속이 10 m/s에 근접하게 되어 제트팬의 설치가 불가능해지는 경우가 있으며, 제트팬의 효율이 감소하여 소비동력에 대한 환기효율이 저하되므로 터널 내공 단면적의 확대나 수직갱 또는 전기 집진기 방식의 적용으로 터널환기구간을 나누는 방법이 있으나 초기투자비가 증대하므로 경제성을 고려한 선택이 필요하다. <표 5.2>는 외국 및 국내의 차도 내 한계풍속을 나타낸 것이다.

(5) 소비동력

소비동력이 동일할 때 집진기 방식이나 수직갱방식의 환기효과가 제트팬 방식보다 우수하므로 제트팬의 설치대수가 과도하게 증가되는 경우에는 운영비 측면에서 전기집진기나 수직갱 방식의 적용 필요성을 검토하여야 한다.

또한 전기집진기 및 수직갱 방식과 제트팬 방식이 조합되는 환기방식에서는 일반적으로 동일한 동력 하에서 집진기나 수직갱의 환기효과가 우수하므로 환기기기 운영 시 이에 대한 충분한 검토를 통해서 운전단계를 결정하는 것이 바람직하다.

<표 5.2> 외국 및 국내의 터널 내 한계풍속기준

국 가	일방향 교통터널	양방향 교통터널
일 본(일본도로공단)	10~12 m/s 이하(10 m/s 이하)	7~8 m/s 이하(8 m/s 이하)
PIARC 보고서('95 Report)	10~12 m/s 이하	8 m/s 이하
독 일(RABT 기준)	12 m/s 이하	8 m/s 이하
노르웨이	10 m/s 이하	7 m/s 이하
한국 (도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙)	10 m/s 이하	8 m/s 이하

5.2 자연 환기방식

교통환기력만으로 소정의 환기가 가능한 것을 자연환기라 한다. 기계설비에 의한 환기 검토에 앞서 터널 내의 환기가 자연환기로 충분한지를 검토해야 한다.

자연환기는 기상조건에 따라서 터널 내를 지나가는 자연풍과, 터널 내를 주행하는 자동차의 영향으로 발생하는 교통환기력에 의해 터널입구로부터 신선공기가 유입함으로써 가능해진다. 자연환기가 가능한 한계길이는 터널의 기하 조건, 교통 조건(교통 방향, 교통량, 차종 구성, 주행속도)과 기상 조건 등에 따라 다르다. 기상조건은 터널마다 다른 것은 물론 같은 터널이라도 시간적, 계절적으로 변화가 심하다. 특히 양방향 교통 터널에 있어서의 교통환기력은 교통량 및 상·하행별 교통량 변동에 따라 시시각각 변한다. 따라서 기대할 수 있는 자연환기효과를 정량적으로 정하는 것은 매우 어렵다.

따라서 자연환기의 한계길이를 산술적으로 정하는 것은 불가능하며, 터널환기에 영향을 미치는 각종 인자에 대해서 충분히 검토한 후에 결정하여야 한다.

5.3 제트팬 환기방식

5.3.1 개요

제트팬 방식은 터널 종방향에 작용하는 교통환기력에 의한 자연환기력이 환기저항보다 작은 경우 제트팬을 설치하여 분류에 의한 송압력에 의해서 소요환기량을 확보하게 하는 방식이다. <그림 5.1>은 제트팬 방식의 개요도이다.

종류식 제트팬 환기방식에서 압력평형식은 식(5.2)와 같다. 즉 교통환기력 보다 환기저항이 큰 경우이며 그 차에 해당하는 만큼의 제트팬 송압력이 요구된다.

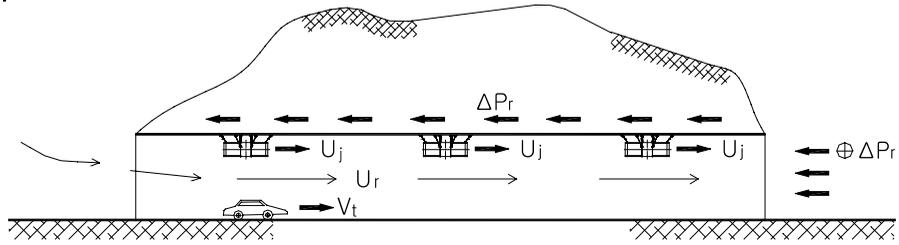
$$\Delta P_r + \Delta P_{MTW} = \Delta P_t + \Delta P_j \quad (5.2)$$

여기서, ΔP_r : 환기저항

ΔP_{MTW} : 자연풍에 의한 환기저항

ΔP_t : 교통 환기력

ΔP_j : 제트팬 송압력



〈그림 5.1〉 제트팬 환기 방식의 개요도

5.3.2 제트팬 승압력 및 소요대수산정

(1) 승압력

터널이 아닌 대기 중에 있는 제트팬에 의한 추력(thrust)은 유체역학이론에 따라 식(5.3)으로 표시된다.

$$F = \rho \cdot A_j \cdot U_j \cdot (U_j - U_r) \quad (5.3)$$

또, 제트팬에 의한 승압력을 ΔP_j 는 다음식과 같다.

$$\Delta P_j = \rho \cdot U_j^2 \cdot \left(\frac{A_j}{A_r}\right) \cdot \left(1 - \frac{U_r}{U_j}\right) \quad (5.4)$$

여기서, $A_j / A_r = \emptyset$, $U_r / U_j = \psi$ 라고 하면 제트팬 1대에 의한 승압력은 식(5.5)가 된다.

$$\Delta P_j = \rho \cdot U_j^2 \cdot \emptyset \cdot (1 - \psi) \quad (5.5)$$

여기서, U_j : 제트팬의 분류 속도 [m/s]

A_j : 제트팬의 분류 면적 [m²]

\emptyset : A_j / A_r

ψ : U_r / U_j

이다.

(2) 제트팬 소요대수 산정

제트팬을 Z대 운전할 때 한 대당 승압력을 ΔP_j 라면, 소요환기량을 만족하는 U_r 값을 기준으로 하여 식(5.6)으로 제트팬 소요대수를 구한다.

$$Z = \frac{\Delta P_r + \Delta P_{MTW} - \Delta P_t}{\Delta P_j} \quad (5.6)$$

5.3.3 제트팬 방식의 설계

(1) 일반사항

제트팬 방식은 전술한 바와 같이 일방향 터널에서는 교통환기력을 이용할 수 있다는 점에서 환기효율이 타방식보다 우수하다.

그러나 양방향터널에서는 교통환기력이 무시되므로 환기저항에 의해서 제트팬의 수가 결정되는데, 자연풍이 작용하는 방향은 단순하지 않기 때문에 제트팬을 역전 운전해야 하는 경우가 발생할 수 있으며, 역전운전은 터널 내 공기의 관성과 제트팬 전동기의 기계적 요인으로 보아 바람직하지 못하다. 이런 점을 감안하여 양방향 통행의 경우에는 자연풍의 풍속 $U_n = 1.5 \text{ m/s}$ 로 불리한 방향으로 작용하는 것으로 가정하여 소요환기량을 계산하고, 제트팬 대수를 구한다.

제트팬 방식은 소비동력이 동일한 경우에 수직갱이나 집진기 방식보다 오염물질 제거효과가 떨어지며, 특히 차도 내 풍속이 증가하면 효율저하가 크게 나타나므로 설계속도 하에서 터널 내 풍속이 과도하게 증가하는 경우에는 집진기 방식이나 수직갱방식 등 타 방식에 대한 경제성을 충분히 검토하여 적용한다.

(2) 제트팬의 설치위치 및 간격

터널에서 제트팬의 설치위치는 차도 상부의 시설한계를 벗어나는 위치에 설치하는 것을 원칙으로 하며, 설치간격은 분류에너지가 주기류의 에너지로 충분히 치환되는 믹싱거리를 확보하도록 한다. 믹싱거리를 고려한 제트팬 설치 간격에 대해서는 <표 5.3>에 제시한 거리를 참고로 한다.

또, 터널 내에 화재가 발생했을 경우를 고려하여 터널별 설계조건을 감안한 방재운영방안을 검토하여 설치위치를 결정하되 가능한 한 터널 입구 쪽에 배치하는 것이 제트팬 보호측면에서 바람직하다.

터널에서의 제트팬 설치 방법은 천정에 매다는 식이 보통이며, 제트팬 바깥지름과 천정 벽면까지의 이격거리는 제트팬 내경의 0.5배 이상으로 하는 것을 표준으로 하고 있다.

이격거리가 작으면 분류가 벽면으로부터 마찰저항을 받아 승압효과가 감소하게 되므로 팬 제작사에서 제시하는 자료에 의해서 제트팬 설치 효율을 고려하여 설계한다. 제트팬 설치효율은 모형실험 및 수치시뮬레이션 등을 통해서 적정값을 산출하여 적용한다.

또한 사각단면 터널의 모서리와 측벽 근처에 설치한 예는 우리나라에서는 경험이 없기 때문에 분류속도가 교통차량에게 주는 영향을 포함하여 충분히 확인한 후 설치할 필요가 있다.

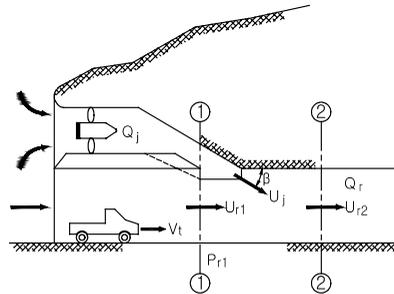
〈표 5.3〉 제트팬의 설치간격 (참고값)

형	내경 [mm]	A_j [m ²]	U_j [m/s]	갱구로부터의 거리[m]	제트팬 상호 간격[m]
600	630	0.27	30	80	80
1000	1030	0.83	30	140	140
1250	1250	1.23	30	160	160
1500	1530	1.83	30	180	180

5.4 삭칼드 환기방식

5.4.1 개 요

삭칼드 방식은 비교적 대형분류장치에 의해서 압력상승을 일으킴과 동시에 교통환기력을 효과적으로 이용하여 터널 마찰 손실에 의한 저항 및 자연풍에 의한 환기저항을 담당하도록 설계·계획하는 방식으로, 제트팬 방식과 마찬가지로 터널 내 오염물질을 터널입구에서 유입하는 신선공기에 의해서 희석 배기하는 방식이다. 이 방식은 대풍량 고속분류를 차도로 흐르게 하기 위해 일방향 교통터널에 적용하는 것이 일반적이다. 〈그림 5.2〉는 분류장치의 개요를 나타낸 것이다.



〈그림 5.2〉 삭칼드 환기방식의 개요도

5.4.2 분류장치의 승압력 : ΔP_j

〈그림 5.2〉에서 단면 ①과 단면 ②로 구분된 구간에 운동량법칙을 적용하면 식(5.7)로 표시된다.

$$\Delta P_j = \frac{\rho \cdot Q_r \cdot U_{r2} - \rho \cdot (Q_r - Q_j) \cdot U_{r1} + K_j \cdot \rho \cdot Q_j \cdot U_j \cdot \cos \beta}{A_r} \quad (5.7)$$

또한, 연속방정식은 다음과 같다.

$$U_{r1} = \frac{Q_r - Q_j}{A_r}, \quad U_{r2} = \frac{Q_r}{A_r} \quad (5.8)$$

식(5.7)에 연속방정식을 대입하여 정리하면 송압력은 식(5.9)가 된다.

$$\Delta P_j = 2 \cdot \left\{ \frac{Q_j}{Q_r} \cdot \frac{K_j \cdot U_j \cdot \cos \beta}{U_{r2}} - 2 + \frac{Q_j}{Q_r} \right\} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_{r2}^2 \quad (5.9)$$

여기서, Q_r : 소요 환기량

Q_j : 분류 장치 풍량(송풍기 풍량)

U_j : 분류 속도(20~30 m/s 정도가 바람직하다.)

β : 분류와 터널의 축방향을 이루는 각도

K_j : 송기 노즐의 송압계수

이다.

분류장치의 노즐면적 A_j (m^2)은 식(5.10)이 된다.

$$A_j = \frac{Q_j}{U_j} \quad (5.10)$$

5.4.3 송풍기의 풍량, 풍압

송기량(Q)가 정해지면 송풍기 풍량이 결정되며, 송풍기 전압 ΔP_{TOT} 은 10%의 여유를 두고 정하는 것이 일반적이다. 식(5.11)에서 ΔP_d 는 흡입 덕트 손실, 노즐손실, 유로형상에 따른 손실 등 전압손실의 총합이다.

$$\Delta P_{TOT} = \left\{ \frac{\rho}{2} \cdot U_j^2 + \Delta P_d \right\} \times 1.1 \quad (5.11)$$

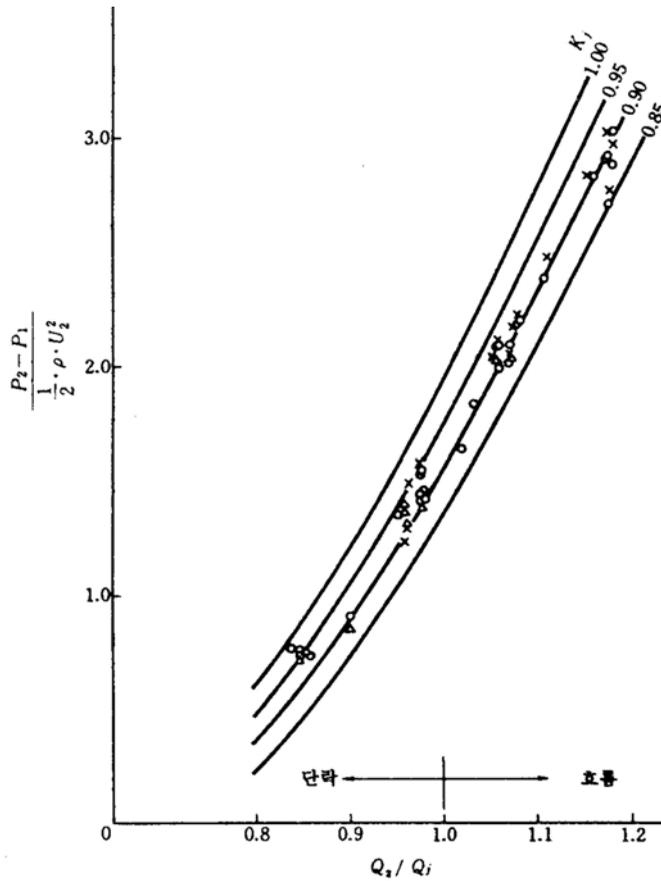
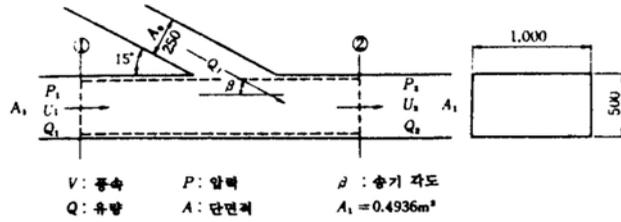
또, 이 방식의 경우 설계에 이용하는 최대 교통량에 대해 송풍기 사용이 최대로 된다고는 할 수 없으므로 대상이 되는 여러 가지 교통 상태와 기상 조건을 조합하여 검토해 둘 필요가 있다.

5.4.4 송기노즐의 송압계수

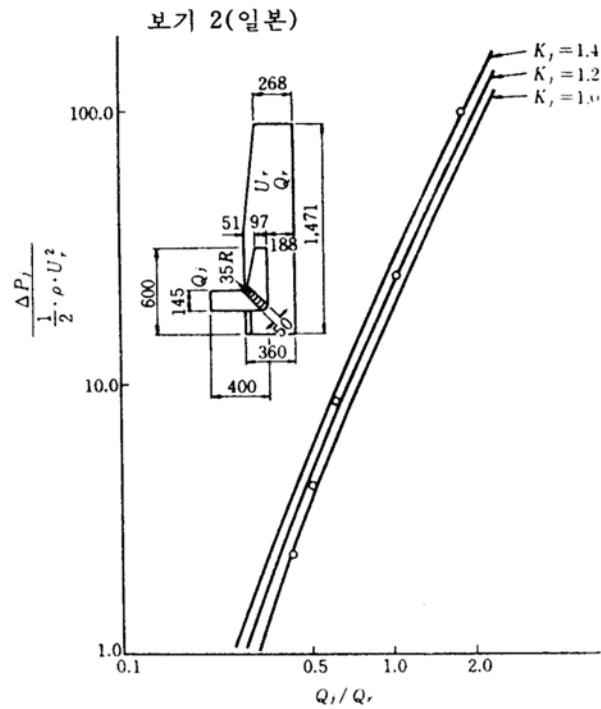
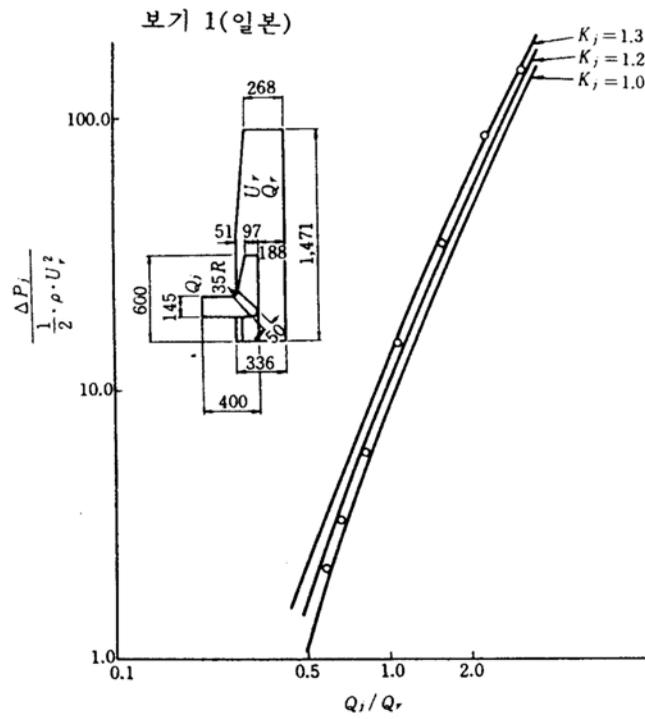
송기노즐의 송압계수는 송기노즐이 본갱과 합류할 때의 형상 및 분류와 터널 축방향이 이루는 각도(β)에 영향을 받는 인자로 실제 실험이나 모형실험 및 수치 시뮬레이션 등을 통해서 얻을 수 있다. K_j 값의 일례로서 <그림 5.3>은 일본 건설성 토목연구소의 실험결과를 나타낸 것으로 대략적으로 K_j 값은 0.95~0.90의 값을 보이고 있다. 또 일본도로공단이 행한 실험에 의하면 송기노즐의 차도측면을 차도와 평행하게 하고, 송기노즐의 천정면을 약간 경사지게 하여(<그림 5.4>참조) 분류 천정면에 의한 마찰손실을 줄이면, $K_j = 1.0$ 을 거의 확보할 수 있다고 한다. 그러나 정확한 값은 모형실험이나 수치계산을 통해서 확보할 필요가 있다.

5.4.5 삭칼드방식의 설계

이 방식에서 환기소의 형상과 덕트의 접속방법 등에 의한 연락덕트 손실, 환기량과 분류장치의 유량 및 유속관계 등을 충분히 비교 검토하여 경제적으로 운용되도록 배려해야 한다. 또 다른 환기방식과 병용할 경우는 특히, 송압력 부담에 대하여 상당수의 조합을 고려해야 하므로 충분한 경제성 비교가 필요하다.



〈그림 5.3〉 송기노즐에 의한 압력상승과 K₁



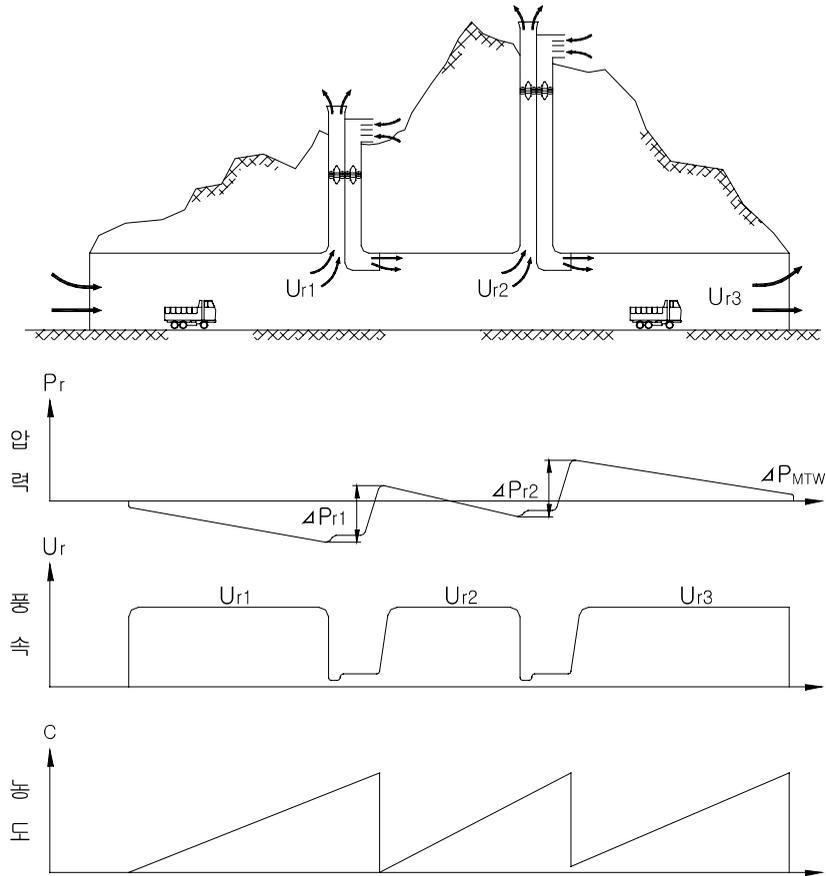
〈그림 5.4〉 송기노즐에 의한 압력상승과 K_j

5.5 수직갱 송배기 종류환기방식

5.5.1 개 요

이 환기방식은 <그림 5.5>와 같이 터널의 외부와 연결되는 수직갱 또는 사갱을 통해서 오염된 차도의 공기를 배기하고 신선공기를 송기하여 공기를 교환함으로써 환기효과를 달성할 수 있는 방식으로 주로 장대터널에서 종류환기방식의 적용 길이를 연장시키는 방식이다.

일반적으로 배기갱은 터널의 상부 또는 측면에 부착하며, 송기는 송기덕트와 터널의 상부에 설치되는 송기노즐에 의해서 고속의 분류를 송기하여 송압력을 얻는 방식으로 교통환기력을 얻을 수 있는 일방향 교통에 적합하다.



<그림 5.5> 터널 내 풍속, 압력 및 농도분포

5.5.2 수직갱 송배기 종류환기방식의 이론

〈그림 5.6〉은 수직갱방식의 송기노즐과 배기갱 부분을 나타낸 것으로 송기노즐 및 배기구에서 승압력은 다음과 같이 계산된다.

(1) 송기노즐의 승압력 (ΔP_b)

〈그림 5.6〉에서 점선으로 표시한 송기노즐을 포함하는 Control Volume에 대한 운동량 방정식 및 연속 방정식은 식(5.12), 식(5.13)과 같다.

$$(P_{se} + \rho U_s^2) \cdot A_r + K_b \cdot \rho \cdot Q_b \cdot U_b \cdot \cos \beta = (P_{s2} + \rho U_{r2}^2) \cdot A_r \quad (5.12)$$

$$A_r \cdot U_{r2} = A_b \cdot U_b + A_r \cdot U_s \quad (5.13)$$

따라서, 송기노즐의 승압력(ΔP_b)은 식(5.12)와 식(5.13)을 정리하면 $Q_b = Q_e$ 라면 $U_{r1} = U_{r2} = U_r$ 이므로 식(5.14)로 정리할 수 있다.

$$\Delta P_b = 2 \cdot \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right) \cdot \left\{ \left(\frac{U_b}{U_r} \right) \cdot K_b \cdot \cos \beta - 2 + \frac{Q_b}{Q_r} \right\} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_r^2 \quad (5.14)$$

여기서, Q_b : 수직갱 송기노즐의 풍량

Q_e : 수직갱의 배기풍량

Q_r : 터널 내 풍량($Q_b = Q_e$ 이며, $Q_r = Q_{r1} = Q_{r2}$, $U_r = U_{r1} = U_{r2}$ 이다.)

U_b : 수직갱 송기노즐의 풍속

U_r : 터널 내 풍속

이다.

(2) 배기구에 의한 승압력(ΔP_e)

〈그림 5.6〉에서 배기구를 포함하는 검사체적에 대해 운동량 방정식 및 연속방정식은 식(5.15)과 식(5.16)이 된다.

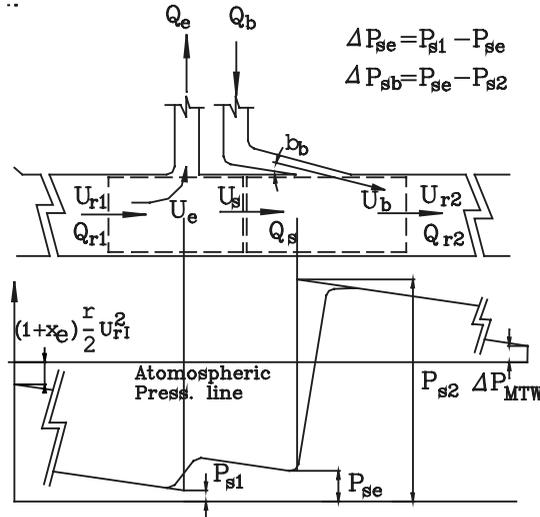
$$(P_{s1} + \rho \cdot U_{r1}^2) A_r = (P_{se} + \rho \cdot Q_s \cdot U_s^2) A_r + \rho \cdot K_e \cdot Q_e \quad (5.15)$$

$$A_r \cdot U_{r2} = A_r \cdot U_s + U_e \cdot A_e \quad (5.16)$$

따라서 배기구에 의한 승압력은 $Q_b = Q_e$ 이면, $U_{r1} = U_{r2} = U_r$ 이므로 식(5.17)로 정리된다.

$$\Delta P_e = 2 \cdot \left(\frac{Q_e}{Q_r} \right) \cdot \left\{ K_e + \frac{Q_e}{Q_r} - 2 \right\} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_r^2 \quad (5.17)$$

여기서, U_e 는 배기관의 입구풍속이다.



〈그림 5.6〉 송기노즐과 배기구의 압력관계

(3) 급·배기 노즐의 승압력계수 K_b , K_e 의 관계

K_b 및 K_e 는 송·배기노즐의 형상 및 유량에 관계되는 값으로 실험적으로 각각 0.85~1.15와 0.7~1.1의 범위로 알려져 있으며 일반적으로 터널설계에서는 1로 하여 계산하고 있다.

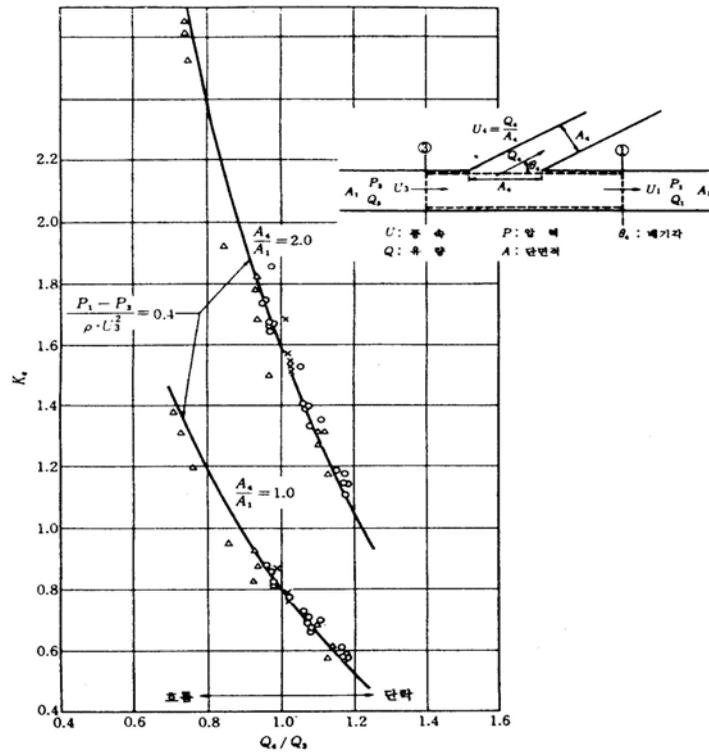
〈그림 5.7〉은 일본건설성 토목연구소의 실험결과로 K_e 는 본류의 풍량과 배출풍량의 비율 및 본류의 단면적, 배출구 면적(본류의 유선에 접하는 면적)비에 영향을 받으며, 더욱 연구해야 할 필요가 있는 부분이다.

또 〈그림 5.7〉에 나타내는 실선으로부터 실험범위 내에서는 배기구의 승압력은 다음식과 같이 계산해도 됨을 보이고 있다,

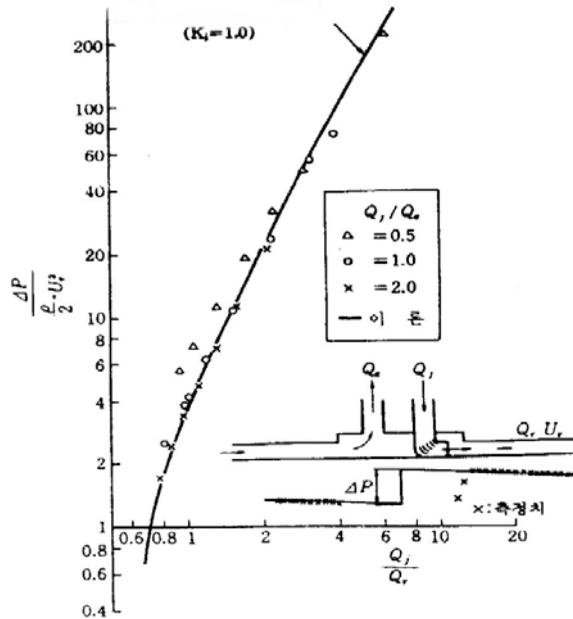
$$\frac{P_{r2} - P_{r1}}{\frac{\rho}{2} \cdot U_r^2} = 0.4 \quad (5.18)$$

따라서, 일반적으로 차도풍속 U_r 를 4~7 m/s 라고하면 배기노즐에 의한 승압력은 4~12 Pa 정도이며, 이것은 송기노즐의 승압력에 비해 극히 작기 때문에 일반적으로 무시한다.

또 〈그림 5.8〉은 터널 내 풍량과 송기량의 비에 따른 K_b 값을 나타낸 것이다.



〈그림 5.7〉 K_e 와 Q_4 / Q_3 의 관계



〈그림 5.8〉 K_b 값 Q_b / Q_t

(4) 수직갱의 배기량 및 송기량

일반적으로 터널설계에 있어서 수직갱의 배기량(Q_e) 및 송기량(Q_b)은 동일하게 설정하고 있으며, 이 경우에 송·배기량은 식(5.21)과 같다.

$$Q_b = Q_{req} - Q_n (= U_m \times A_r) \quad (5.21)$$

여기서, Q_n 은 자연 환기 시 풍량이다.

(5) 차도 내 풍속

수직갱의 급·배기량이 결정되면 차도 내 풍속(U_i)은 U_i 에 대해 2차방정식으로 표현되는 식(5.22)로 구한다. 이때 일반적으로 배기에 의한 승압력(ΔP_e)은 작기 때문에 무시한다.

$$\Delta P_r - \Delta P_t - \Delta P_b - \Delta P_e \pm P_{MTW} = 0 \quad (5.22)$$

여기서, ΔP_b 및 ΔP_e 는 송기노즐과 배기구에 의한 승압력으로 각각 식(5.14)과 식(5.17)에 의해서 구한다.

(6) 송·배풍기의 소요풍압

송·배기 풍량이 결정되면, 송·배풍기의 전압력(ΔP_{TOT})은 다음식으로 구한다.

$$(\Delta P_{TOT})_j = \left(\frac{\rho}{2} \cdot U_j^2 + \Delta P_d + P_m \right) \cdot 1.1 \quad (5.23(a))$$

$$(\Delta P_{TOT})_e = \left(\frac{\rho}{2} \cdot U_e^2 + \Delta P_d - P_m \right) \cdot 1.1 \quad (5.23(b))$$

여기서, ΔP_d : 연결덕트손실, 노즐손실 등 전압손실

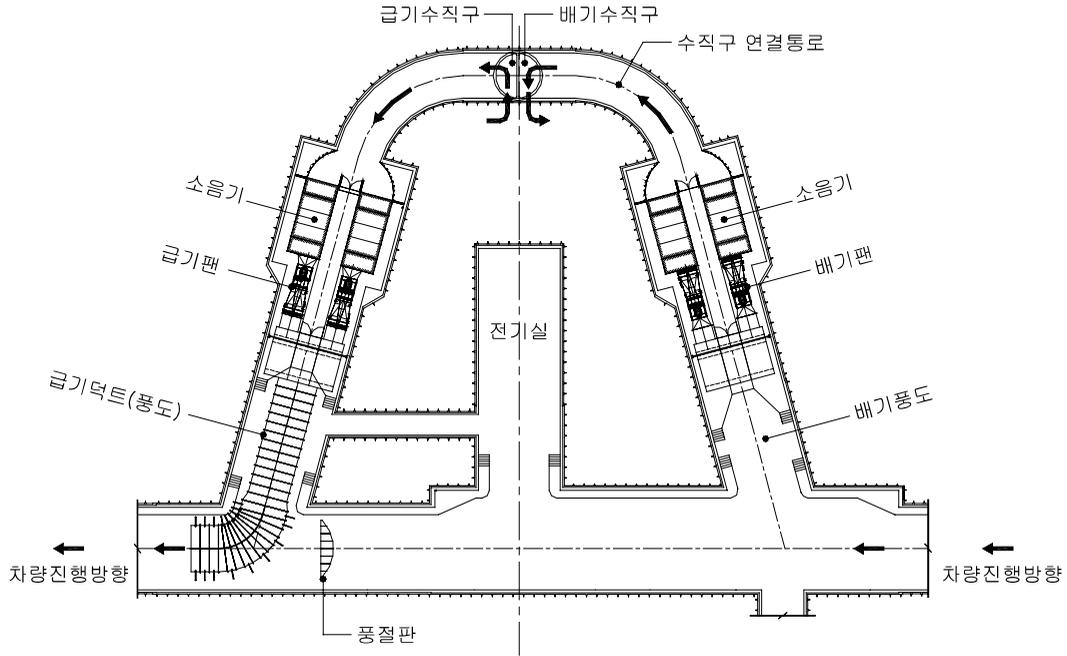
P_m : 송·배기 노즐 중간의 차도전압

이다.

5.5.3 수직갱송배기 종류 환기방식의 설계 고려사항

- (1) 교통신기력을 최대한으로 활용하는 환기방식이기 때문에 일방향 통행터널에 적용하는 것을 원칙으로 한다. 또 양방향 통행터널에 적용을 검토할 경우에는 단계시공을 전제로 하며 조기에 일방향 통행으로 함이 바람직하다.
- (2) 이 환기방식에서는 교통신기력의 면에서 차도 내 풍속 6~8m/s 정도의 범위에 적용하는 것이 경제적이다.

- (3) 수직갱 방식의 설계 시 수직갱 하부에서의 흐름은 수직갱에 의해서 분할되는 양구간의 압력상태에 따라서 급기구로부터 들어오는 신선공기가 배기구로 재순환되는 흐름이 발생할 가능성이 있으며, 재순환의 발생은 환기효율을 크게 저하하므로 재순환이 생기지 않도록 설계한다. 즉 수직갱의 배기풍량을 터널 본갱으로 유입되는 풍량보다 크게 설계하지 않도록 한다. 일반적으로 저속에서 재순환이 발생하게 된다.
- (4) 수직갱의 위치는 자연환기에 의해서 환기하는 경우에 터널입구로부터 유입되는 환기풍에 의한 오염물질의 농도가 허용농도에 달하는 부근에서 설치하는 것이 이상적이며 경제적이다. 그러나 지형적인 특성상 수직갱이 최적의 위치에 벗어나는 경우에는 동력비교를 포함한 종합적 경제성을 비교한다.
- (5) 수직갱으로 구분된 환기구간 중 수직갱 송기구가 분담하는 구간의 소요 환기량은 수직갱 바로 밑을 빠져나가는 공기의 양과 그때의 농도를 감안하여 산정하고, 이에 맞는 송기량을 송기 풍량으로 한다.
- (6) 수직갱 송기노즐에 의한 승압력을 환기력으로 이용하고자 하는 설계에서는 송기구에서의 분류풍속은 최대 30m/s로 한다.
- (7) 배기구는 일반적으로 차도공간에 대해 거의 직각위치로 설치하는 경우가 많으며, 이때 차도공간 이용자에게 주는 영향을 적게하기 위하여 배기구 평균 단면풍속을 대략 6m/s 이하로 계획한다. 또 차도에 접한 단면 부근에는 정류격자와 철망 등을 설치하여 이용자의 안전을 도모한다.
- (8) 급기 또는 송기구와 횡을 연결하는 연결덕트에서의 압력손실이 소요동력에 큰 영향을 미치게 되므로 압력손실을 최소화 할 수 있는 설계가 요구되며, 풍도 내에서의 풍속은 15~20m/s를 초과하지 않도록 하는 것이 바람직하다.



〈그림 5.9〉 수직갱 지하환기소 평면 예

5.6 집진기부착 종류환기방식

5.6.1 개 요

종류환기방식은 특히 일방향 교통 터널에 주행차량에 의한 교통환기력을 효과적으로 활용할 수 있을 경우 건설비 및 환기동력비 측면에서 효과적이다. 터널길이가 길어지면 매연에 대한 환기량이 CO에 대한 환기량보다 증대하므로 매연에 대한 처리가 문제시 되는 경우나 터널출구 또는 환기탑에서 매연의 배출이 문제되는 경우에 집진기방식의 효용성이 우수하다.

집진기 방식의 환기설계 및 환기기기 용량산정은 수직갱방식과 거의 동일하므로 이에 대한 자세한 설명은 생략한다.

5.6.2 집진기부착 종류환기방식의 매연농도 개선

〈그림 5.10〉에서 집진장치를 포함하는 검사단면 ①, ②를 대상으로 하여 매연농도 개선효과를 구해 보자.

집진기 후의 터널 내 농도 C_n 은 다음과 같이 구해진다.

$$Q_r \cdot C_n' - Q_c \cdot C_n' \cdot \eta_{VI} = Q_r \cdot C_n \quad (5.24)$$

식(5.24)를 정리하면,

$$C_n = (1 - \alpha \cdot \eta_{VI}) \cdot C_n' \quad (5.25)$$

여기서, $\alpha = Q_c/Q_r$, $Q_c < Q_r$

Q_r : 차도 내 환기풍량 [m^3/s]

Q_c : 집진기의 처리풍량 [m^3/s]

Q_s : $Q_r - Q_c$

C_n' : 집진기실 직전의 차도공간 평균 매연농도비

C_n : 집진기실 직후의 차도공간 평균 매연농도비

여기서 C_n' , C_n 은 설계농도에 대한 농도비이다.

η_{VI} : VI(매연투과율)에 대한 개선율

이때의 Q_s 의 농도는 C_n' 에 dx 구간의 배출량이 가해진 농도로 dx 구간의 소요환기량을 dQ_{req} 라고 하면 다음식으로 표현된다.

$$Q_s \text{의 } \textcircled{2} \text{의 단면농도} = C_n' + \frac{dQ_{req}}{Q_s} \quad (5.26)$$

일반적으로 집진기 배기구와 송기노즐사이의 거리 dx 는 50~100 m정도이며, Q_s 가 아주 작지 않다면 식(5.26)의 우변 2항은 무시할 수 있는 정도이다.

5.6.3 집진장치의 승압력

일반적으로 전기집진기 방식에서 집진관의 송기부에 송기노즐을 설치하여 고속의 분류에 의한 승압력을 얻고 있으며, 이 경우 집진용 송풍기의 정압이 증대하므로 이에 대한 고려가 있어야 한다. 이 경우에 $Q_c = Q_e = Q_r$ 로 하면 수직갱 송배기방식과 동일하게 압력관계식을 계산 할 수 있다.

집진기의 배치방식은 소용량의 집진기를 터널 축방향으로 여러 개를 배열하는 분산 배치방법과 터널 본관의 외측에 집진기실을 건설하는 대용량형 전기집진기방식이 있다. 신설터널의 경우, 일반적으로 대용량 집진기방식을 적용하고 있다.

5.6.4 집진기 부착 종류 환기방식의 설계 고려사항

이 환기방식은 그 특성이 수직갱송배기 환기방식과 같다고 보아도 좋으므로 5.5절에 제시한 내용이 적용되며, 이외에 다음과 같은 사항을 고려해야한다.

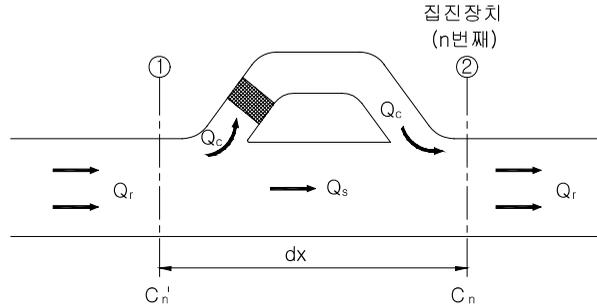
(1) 집진처리 공기이용의 한도

집진장치에 의해 집진처리된 공기를 재처리하는 한도는 없지만, 실제 환기계획에서는 CO에 대한 허용 농도 등을 고려하여 재처리 한도를 정한다. 현재 고려되고 있는 실용적인 재이용 한도로는 집진기 처리풍량의 합계가 터널 입구에서 유입하는 풍량의 두배까지로 하고, 또 처리된 공기의 재처리는 3회 이내로 하고 있으며 재처리 횟수가 3회 이상이 되면 CO를 대상으로 하는 소요환기량이 이보다 적을 경우라도 신선한 공기와 교체하도록 집진장치를 배치하거나 다른 환기방식을 조합하여 계획한다.

(2) 집진장치는 집진기에 공기를 유입하여 다시 차도로 송기하기 위한 송풍기가 필요하고 전력도 비교적 크므로 집진기실 내의 각종 압력손실과 배기동압 등을 고려하여 압력손실을 산정하여야 한다. 특히 관성필터나 에프터 필터 등이 설치되는 경우에는 제작사 양에 의해서 이에 대한 압력손실을 반드시 고려한다.**(3) 집진기에 접근하는 풍속분포**

집진기실 내에 집진기의 배치계획과 덕트형상을 계획하는 경우에 각 집진셀의 집진효율을 일정하게 하기 위해서 집진기에 접근하는 부분의 풍속 분포가 가능한 한 일정하게 하는 것이 바람직하다. 급격한 단면변화에 의한 흐름의 혼란과 소용돌이가 생기지 않도록 덕트의 형상을 설계하여야 한다.

(4) 전기집진기의 경우, 매연 이외에 CO, NOx 등의 물질을 제거하는 능력은 기대할 수 없다. 집진기는 작동원리상 오존(O₃)등을 발생시키기 쉽지만, 실제 장치는 이것을 허용값 이하로 억제하도록 배려한다.**(5) 집진기실에 의해 포집된 먼지 처리방법은 여러 가지 방법이 있으며, 주로 산업 폐기물로 처리하는 것 외에 분말을 고형화하여 저장을 하기 쉽게 하거나 다른 물질과의 혼합제로 적극적으로 활용하는 등의 방법이 있다.****(6) 풍도 내 장애물과 급격한 단면변화는 기류를 불안정하게 하므로 집진기 효율저하의 원인이 될 수 있으므로 풍도 내에는 안정된 기류가 형성 되도록 설계하여야 한다.**



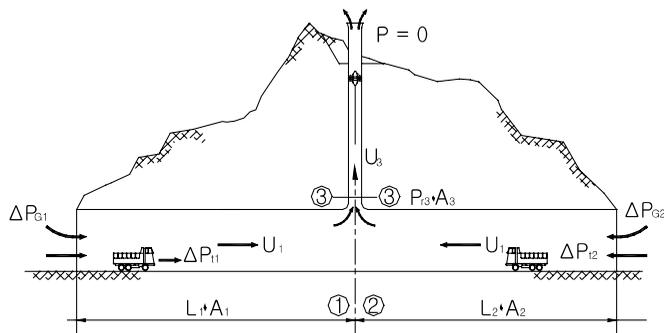
〈그림 5.10〉 집진기 종류 환기방식의 환기 계통도

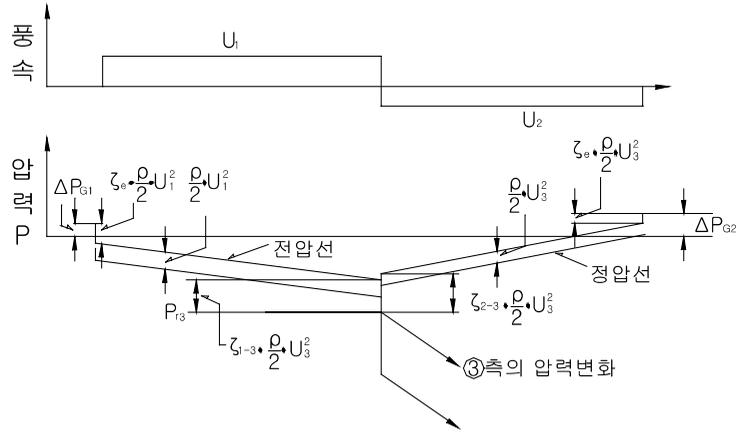
5.7 수직갱 배기방식 (집중배기방식)

5.7.1 개요

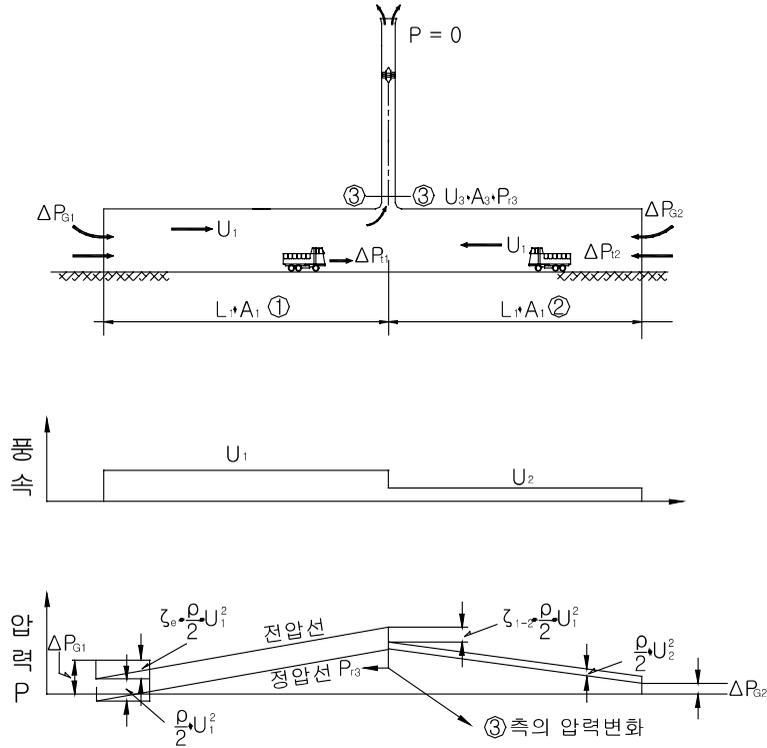
수직갱 배기식 환기방식은 차도 내에 수직갱을 두어 〈그림 5.11〉과 같이 수직갱에 의해서 양분되는 두 개의 터널의 공기를 유인하여 집중배기하는 방식이다. 수직갱 대신에 사갱과 횡갱을 설치하는 경우도 있다. 이 환기방식은 일반적으로 교통환기력을 기대할 수 없는 양방향 터널에 적용되며, 터널중 양부근에 수직갱을 설치하는 것이 보통이다. 이 때의 신선공기는 양 갱로를 통해서 유입되어 수직갱 하부에서 합류하여 배기되게 된다. (〈그림 5.11(a)〉참조)

또한 이 환기방식은 도심지 터널에서 출구측 갱구로부터의 오염물질 배출을 억제하기 위해 일방향 터널에서 사용되는 경우도 있으며, 분류 중 일부는 수직갱을 통해서 배기되고 일부는 터널의 출구측으로 배기되는 경우도 있다. (〈그림 5.11(b)〉참조)





〈그림 5.11(a)〉 수직갱 배기 환기방식의 계통도 (합류형)



〈그림 5.11(b)〉 수직갱 배기 환기방식의 계통도 (출구배출형)

집중 배기 환기방식의 일반형인 합류형의 경우, 교통 조건과 자연풍의 영향에 의해 수직갱 및 전후 터널구간에 풍량의 불균형이 생긴다. 따라서, 각 구간의 환기량이 소요환기량보다 부족하지 않도록 배기풍량에 여유를 둘 필요가 있다. 여유 배기량이 너무 커지면 건설비와 동력비측면에서 경제적이 지 못하기 때문에 터널천정부에 저항판을 설치하거나 제트팬 환기방식을 병용하는 방안을 검토해야

한다. 일반적으로 여유 배기량은 양방향 터널에서는 그다지 증가하지 않으나 일방향터널에서는 과도하게 증가하는 경향이 있다.

또, 양방향 터널에서는 상하행선의 교통량의 불균형과 자연풍의 영향으로 경우에 따라서는 출구로 터널 내 오염공기가 유출되는 되는 수가 있다. 교통량이 적을 때에 이런 흐름이 생기는 경우가 많으며, 이는 바람직한 환기상태라고는 할 수 없으므로 환기방식의 선정과 환기기기 운용상의 주의를 요한다. 한편, 갱구부근의 환경보전을 목적으로 이 환기방식을 일방향 터널의 출구부근에 적용할 경우, 예를 들어 출구의 토출량(풍량)을 0 또는 이에 가깝게 하는 것이 가능하지만, 일반적으로 대개의 경우 집중배기능력을 필요로 할 뿐만 아니라 차량자체가 차도 공기의 일부를 가지고 나가는 현상이 있어 오염물질의 갱구를 통한 배출량은 0이 되지 않는 경우가 있으므로 이 방식으로 설계를 할 때는 반드시 환기제어의 목적을 기술하고 운전시간에 따른 경제성 분석을 병행하여야 한다.

5.7.2 수직갱 배기식 환기 방식에 있어서의 공기 흐름의 기초

(1) 합류 흐름의 경우

〈그림 5.11(a)〉에 있어서 ΔP_G 는 갱구와 수직갱구 사이에 존재하는 기상적 압력차를 나타내는 것으로 배기구를 기준으로 작용하는 압력이 배기구 전·후가 서로 다르므로 ΔP_{MTW} 와 구별하여 정의한다. ΔP_G 를 가압력이라 하고 $A_1 = A_2$ 일 때 양방향의 풍속 U 는 〈그림 5.11(a)〉에 나타난 방향으로 흐르면 수직갱 밑의 합류 후 전압 P_{T3} 는 다음식으로 표현된다.

$$P_{T3} = \Delta P_{G1} + \Delta P_{t1} - \left(\zeta_e + \lambda \cdot \frac{L_1}{D}\right)_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_1^2 - \xi'_{1-3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_3^2 \quad (5.27(a))$$

$$P_{T3} = \Delta P_{G2} + \Delta P_{t2} - \left(\zeta_e + \lambda \cdot \frac{L_1}{D}\right)_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_2^2 - \xi'_{2-3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_3^2 \quad (5.27(b))$$

$$A_3 \cdot U_3 = A_1 \cdot (U_1 + U_2) \quad (5.28)$$

여기서, ΔP_{G1} : 제 ①구간의 터널과 수직갱구 사이의 기상적 압력차

ΔP_{G2} : 제 ②구간의 터널과 수직갱구 사이의 기상적 압력차

(어느 것이나 자연풍이 터널을 향하는 방향일 때 양수가 됨)

ΔP_{t1} , ΔP_{t2} : 교통 환기력이며, 다음 식으로 표현된다.

($n+$ 는 제① →제②로, $n-$ 는 제② →제① 구간으로 향하는 차량대수로 한다.)

$$\Delta P_{t1} = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \{ n_{+1} \cdot (V_t - U_1)^2 - n_{-1} \cdot (V_t + U_1)^2 \}$$

$$\Delta P_{t2} = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \{ n_{-2} \cdot (V_t - U_2)^2 - n_{+2} \cdot (V_t + U_2)^2 \}$$

위식 중의 ξ_{1-3} 및 ξ_{2-3} 은 하류(수직갱) 풍속을 기준으로 한 전압 손실계수로서 “3)합류 및 분기손실 계수”에서 설명한다.

(2) 터널출구로 일부 유출되는 경우

〈그림 5.11(b)〉에 나타낸 바와 같이 터널출구로 흐름이 있는 경우에는 수직갱 밑에서의 지류의 분기가 생기며 분기손실계수는 본류(제 ①구간)풍속을 기준으로 하여 표시하며 다음과 같이 계산된다.

지류의 분기 손실계수는 ξ_{1-3} , 본류의 분기 손실계수 ξ_{1-2} 로 각각 전압 손실계수로 표현하고, 기타는 합류흐름과 같이 취급하면 식(5.29)과 같이 각 부의 압력을 얻을 수 있다.

제 ①구간 끝의 전압력(분기 직전의 전 압력); P_{T1}

$$P_{T1} = \Delta P_{G1} + \Delta P_{t1} - (\zeta_c + \lambda \cdot \frac{L_1}{D})_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_1^2 \tag{5.29(a)}$$

제 ②구간 시점의 전압력(분기 직후의 전 압력); P_{T2}

$$P_{T2} = \Delta P_{T1} - \zeta_{1-2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_1^2 \tag{5.29(b)}$$

제 ②구간 끝(출구)의 전 압력;

$$\Delta P_{G2} + \frac{\rho}{2} \cdot U_2^2 = \Delta P_{T2} - (\lambda \cdot \frac{L_2}{D})_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_1^2 + P_{t2} \tag{5.29(c)}$$

수직갱 하부의 전 압력 : ΔP_{T3}

$$P_{T3} = \Delta P_{T1} - \zeta_{1-3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_1^2 \tag{5.29(d)}$$

(3) 합류 및 분기 손실계수

T자 합류관의 경우 〈그림 5.12(a)〉처럼, 합류부분의 흐트러짐 등의 국부적인 현상에 영향을 받지 않는 위치에 ①, ②, ③과 같이 검사 단면을 설정하면 수직갱 저부의 압력은 다음과 같이 표시된다.

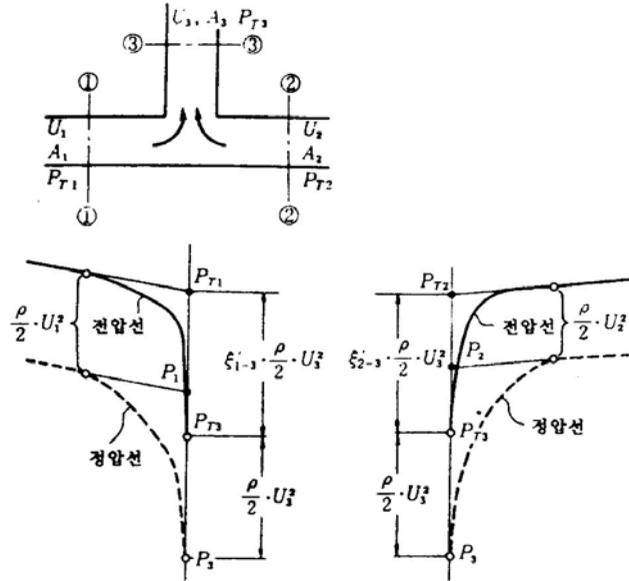
$$P_{T3} = \Delta P_{T1} - \zeta_{1-3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_3^2 \tag{5.30(a)}$$

$$P_{T3} = \Delta P_{T2} - \zeta_{2-3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_3^2 \tag{5.30(b)}$$

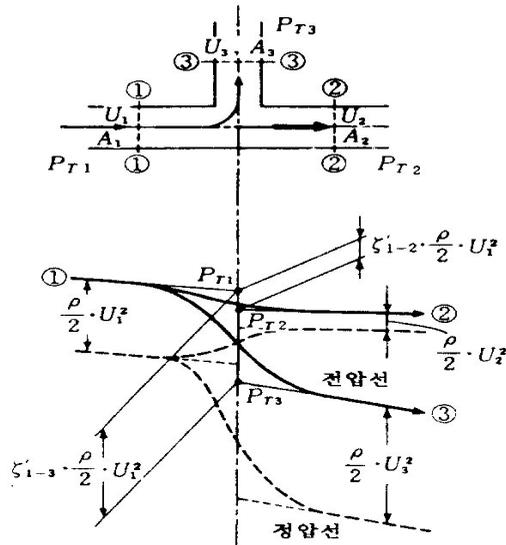
ξ_{1-3} , ξ_{2-3} 은 합류관의 단면적 비 · 유량 비 · 합류 각도 및 우각부의 형상에 의해 영향을 받는 값으로, 그 예를 〈표 5.4〉 및 〈그림 5.13〉에 나타내었다.

$U_1 = U_2$ 일 경우 〈표 5.4〉에서 $\xi_{1-3} - \xi_{2-3} = 0$ 이기 때문에, 식{5.27(a)와 (b)}는 다음식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 & \left(\zeta_e + \lambda \cdot \frac{L_1}{D} \right)_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_1^2 \\
 & = \left(\zeta_e + \lambda \cdot \frac{L_2}{D} \right)_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_2^2 - \Delta P_{G2} + \Delta P_{G1} - \Delta P_{t2} + \Delta P_{t1}
 \end{aligned} \tag{5.31}$$



<그림 5.12(a)> T자 합류관 압력선도



<그림 5.12(b)> T자 합류관 압력선도

출구로의 유출이 있는 경우 <그림 5.12(b)>에서 ①, ②, ③ 검사 단면을 설정하면 다음 식이 성립한다.

$$P_{T2} = \Delta P_{T1} - \zeta_{1-2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_1^2 \quad (5.32(a))$$

$$P_{T3} = \Delta P_{T1} - \zeta_{1-3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_1^2 \quad (5.32(b))$$

그림 <5.12(b)>은 $U_3 > U_1$ (지류의 속도가 증대), $A_1 = A_2$ 인 경우에 일반적인 압력선도를 나타낸 것이다.

ξ_{1-2} , ξ_{1-3} 은 분기관 단면적 비 · 유량 비 · 분기 각도 및 우각부의 형상에 의해 영향을 받는 값이며, <그림 5.14>과 <그림 5.15>는 그 예를 나타낸 것이다.

(4) 환기기기의 소요풍압

전술한 바와 같이 각 구간의 풍량, 풍속 및 압력이 결정되면 수직갱 밑의 전압 P_{T3} 와 수직갱 및 이후의 손실에 의해 환기기기의 소요풍압이 구해진다. 즉, 설계 상태에서 환기기기 소요풍압(ΔP_{TOT})은 수직갱(사갱 또는 횡갱) 밑의 전압 P_{T3} 에 수직갱 및 이후의 연결덕트의 압력손실(전압 기준)의 합계를 가산하여 계산 값에 여유율을 10%로 하여 구한다.

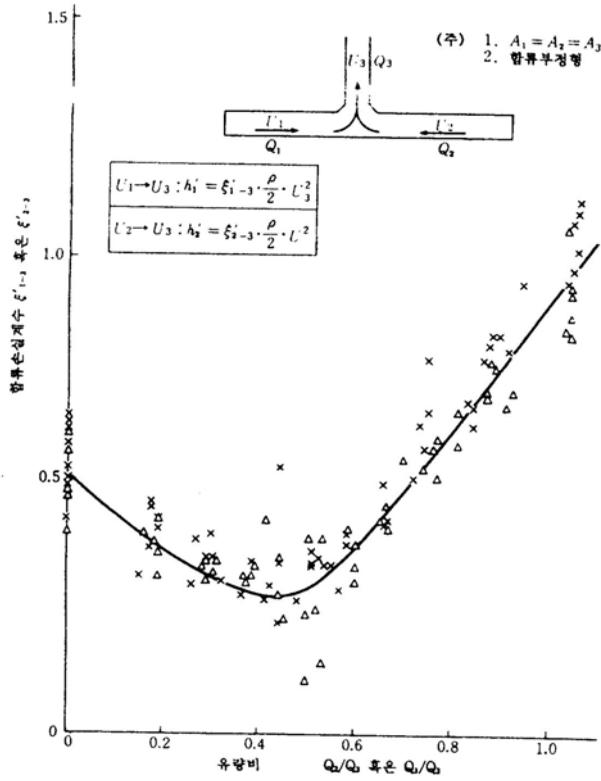
$$\Delta P_{TOT} = (P_{T3} + \Delta P_d) \times 1.1 \quad (5.33)$$

참고로 차량이 존재하지 않는 간단한 경우 합류흐름에 대한 압력선도 개념 예를 나타내면 <그림 5.16>과 같다.

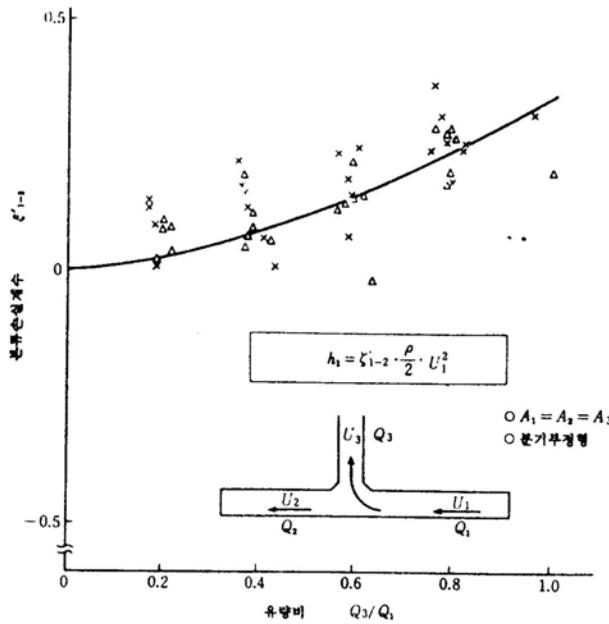
<표 5.4> T자 합류관의 손실계수

Q_1/Q_3	Q_2/Q_3	ξ'_{1-3}	ξ'_{2-3}	$\xi'_{1-3} - \xi'_{2-3}$
1.00	0	0.91	0.55	0.36
0.95	0.05	0.84	0.50	0.34
0.90	0.10	0.78	0.46	0.32
0.85	0.15	0.71	0.42	0.29
0.80	0.20	0.64	0.38	0.26
0.75	0.25	0.58	0.35	0.23
0.70	0.30	0.52	0.33	0.19
0.65	0.35	0.46	0.31	0.15
0.60	0.40	0.40	0.29	0.11
0.55	0.45	0.34	0.29	0.05
0.50	0.50	0.31	0.31	0

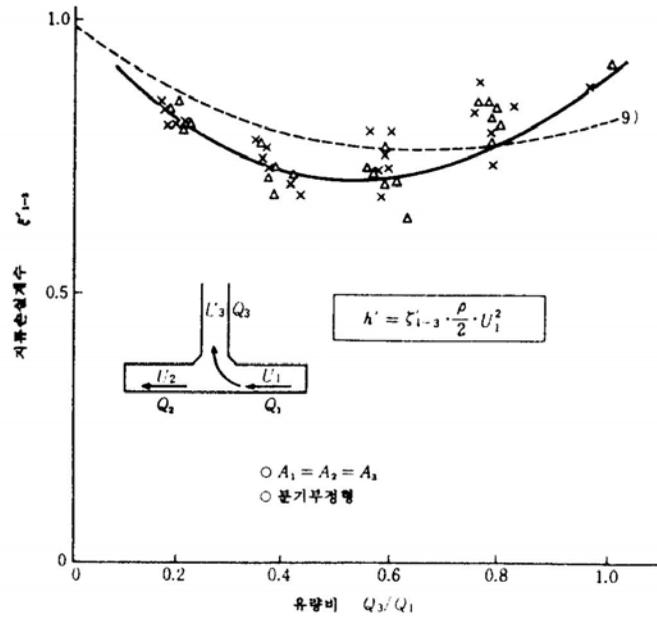
주) 모형치수 $A_1 = A_2 = A_3 = 500\text{mm} \times 500\text{mm}$, 합류부 8각형 치수 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 양측



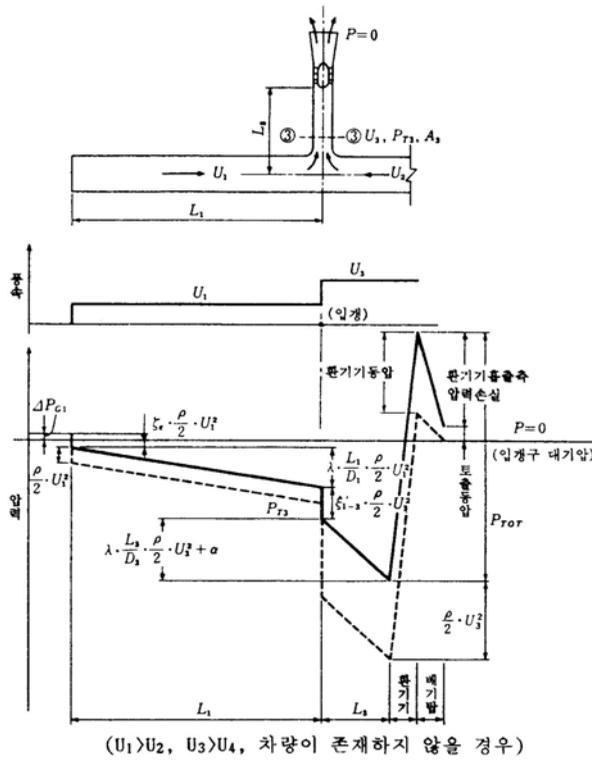
〈그림 5.13〉 합류 손실계수



〈그림 5.14〉 본류의 분기 손실계수



〈그림 5.15〉 지류의 분기 손실계수



(U₁ > U₂, U₃ > U₄, 차량이 존재하지 않을 경우)

〈그림 5.16〉 수직갱 배기 방식의 압력선도

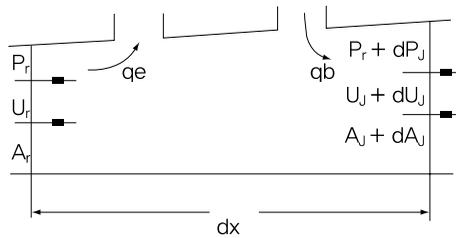
5.8 반횡류식 및 횡류식 환기방식

터널 내에 덕트를 설치하여 급기 또는 배기하는 방식으로 전자는 급기 반횡류식이라 하며 후자는 배기 반횡류식이라 한다. 이 시스템은 터널의 입구나 출구 한쪽에만 환기탑을 두는 경우와 터널의 입출구 양쪽에 환기탑을 설치하여 양방향에서 급기하는 방식이 있으며, 또 터널을 두 개의 구간으로 나누어 한쪽은 급기하고 다른 한쪽은 배기하는 시스템이 있다.

5.8.1 덕트 및 차도 내 압력계산

(1) 차도 내 압력분포

〈그림 5.17〉에서 급기덕트와 배기덕트를 포함하는 검사체적(control volume)에 대한 운동량방정식 및 연속방정식은 다음과 같다.



〈그림 5.17〉 급·배기덕트에 대한 검사체적

$$\text{운동량방정식: } \frac{dP_r}{dx} = -k \cdot \rho \cdot \frac{d(U_r^2)}{dx} - (2k-1) \cdot \rho U_r^2 \cdot \frac{dA_r}{dx} - \frac{\lambda_r}{D_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_r^2 \pm \Delta P_t \quad (5.34)$$

$$\text{연속방정식: } \frac{dU_r}{dx} = \frac{1}{A_r} \cdot (q_b - q_e) \quad (5.35)$$

여기서,

$$- k \cdot \rho \cdot \frac{d(U_r^2)}{dx} = -2 \cdot k \cdot \rho \cdot U_r \frac{dU_r}{dx} : \text{포트로 흡입되거나 송출되는 공기의 유속변화에}$$

의한 운동량 변화량이다.

$$- (2k-1) \cdot \rho \cdot U_r^2 \cdot \frac{dA_r}{dx} : \text{단면적 변화에 의한 운동량 변화량}$$

$$- \frac{\lambda_r}{d_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_r^2 : \text{벽면마찰에 의한 운동량 변화량}$$

ΔP_t : 교통환기력에 의한 운동량 변화량

또 윗 식에서 k 는 포트 운동량 계수로 Singstad가 적용한 식을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\text{급기포트(efflux or supply port)} : k_b = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{3}{2 + c_s} \right)$$

$$C_s = 0.25 \quad q_b > 0.31 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m} \text{ 일 때 } k_b = 0.667$$

$$C_s = 0.20 \quad q_b > 0.31 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m} \text{ 일 때 } k_b = 0.682$$

$$\text{배기포트(influx or exhaust port)} : k_e = \frac{3 - K_s}{4}$$

$$K_s = 0.616 \text{ 일 때 } k_e = 0.596$$

미국연방도로국에서는 k_e 와 k_b 를 각각 0.5, 0.5로 적용하고 있으며, 일본 수도공단 보고서에는 0.5, 1.0을 적용하고 있다.

차도 내 압력분포는 급기덕트로 부터 터널 전 길이에 일정량의 신선공기(q_b)가 공급되고 토출되는 공기는 터널의 종축방향에 수직인 방향으로 공급된다는 가정 하에 다음과 같이 구할 수 있다.

(2) 급 · 배기덕트의 압력분포

급 · 배기덕트의 압력분포에 대한 미분방정식은 식(5.36)과 같다.

$$\frac{dP_b}{dx} = -k \cdot \rho \cdot \frac{d(U_b^2)}{dx} - (2k - 1) \cdot \rho \cdot U_b^2 \cdot \frac{dA_b}{dx} - \frac{\lambda_b}{d_b} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_b^2 \quad (5.36)$$

5.8.2 급기 반횡류방식의 계산

급기 반횡류방식은 <그림 5.18>과 같이 터널에 설치된 급기덕트를 통해서 터널 단위길이 당 일정량의 신선공기 $q_b(\text{m}^3/\text{s})$ 를 급기하게 되며, 이때 급기되는 공기는 기상조건 및 터널 내의 압력분포에 따라서 입 · 출구 어느 한쪽 방향으로 흐르거나 그림에 나타낸 바와 같이 분기되어 터널의 입 · 출구 양 방향으로 흐르는 흐름이 형성된다. 따라서 급기 반횡류식 터널에서 속도분포는 일반적으로 <그림 5.18>과 같다. 이때 차도 내 풍속이 0이 되는 지점을 중성점이라고 한다.

급기 반횡류식에서 중성점이 차도의 중앙에 위치하는 경우에 차도의 최대풍속은 8 m/s로 권장하고 있다.

이 방식의 설계는 우선적으로 차도 내 압력 분포와 덕트에서의 압력분포를 구하는 것이 중요하므로 이에 대해서 자세히 알아보기로 하자.

(1) 차도 내 압력분포

차도 내 압력분포는 급기덕트로부터 터널 전 길이에 걸쳐 일정량의 신선공기(q_b)가 공급되고 공기는 터널의 종축방향에 대해서 수직인 방향으로 토출된다는 가정 하에 식(5.34)을 중성점을 기준으로 x_1 (상류방향) 및 x_2 (하류방향)에 대해서 적분하면 다음과 같이 구해진다.

(가) 차량의 진행방향과 기류의 방향이 반대인 경우

$$P_r^* - P_{r(x_1)} = \left(\frac{\lambda_r}{3} \cdot \frac{x_1}{D_r} + 2 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_{r(x_1)}^2 + \alpha \cdot \frac{x_1}{L_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(U_t^2 + U_t \cdot U_{r(x_1)} + \frac{1}{3} \cdot U_{r(x_1)}^2 \right) \quad (5.37)$$

(나) 차량의 진행방향과 기류의 방향이 같은 경우

$$P_r^* - P_{r(x_2)} = \left(\frac{\lambda_r}{3} \cdot \frac{x_2}{D_r} + 2 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_{r(x_2)}^2 - \alpha \cdot \frac{x_2}{L_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(U_t^2 - U_t \cdot U_{r(x_2)} + \frac{1}{3} \cdot U_{r(x_2)}^2 \right) \quad (5.38)$$

여기서, $\alpha = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{N_{veh} \cdot L_r}{U_t}$ 이며, N_{veh} 는 단위 시간 당 통과하는 차량수(대/s)이다.

(2) 급기덕트의 압력분포 및 덕트 시작점의 동압

급기덕트의 압력계산은 급기덕트의 설계 및 송풍기의 용량산정을 위해서 필수적인 사항으로 이 절에서는 급기덕트의 단면적이 일정하고 단위길이 당 차도로 급기되는 신선공기의 양이 덕트 전 길이에 걸쳐서 일정하다는 가정 하에 압력분포를 계산한다. 급기계통의 압력분포는 <그림 5.18>에 나타난 바와 같으며 각 요소는 다음과 같이 계산할 수 있다.

(가) 덕트 시작부분의 풍속 및 동압

$$\text{덕트풍속} : U_{li} = \frac{Q_b}{A_b} \quad (5.39)$$

$$\text{덕트시작부 동압} : \Delta P_{li} = \frac{\rho}{2} \cdot U_{li}^2 \quad (5.40)$$

(나) 덕트의 정압차

덕트 내 풍속, U_b 는 덕트 말단으로 갈수록 감소하며, 임의 지점 x 에서 덕트 내 풍속 $U_b(x)$ 는 다음과 같다.

$$U_{b(x)} = U_{li} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_b} \right) = \frac{Q_b}{A_b} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_b} \right) \quad (5.41)$$

단, $x = 0$ 덕트의 시작점, $x = L_b$ 덕트의 말단

따라서 덕트의 정압차는 식(5.36)을 적분하여 구하며, 미국연방도로국에 의해서 유도된 식과 Holland 터널 설계 시 사용한 식을 소개하면 다음과 같다.

1) 미국연방도로국 :

$$P_{b(x)} - P_{bi} = \rho \cdot \frac{U_{bi}^2}{2} \cdot \left\{ \left(4k_F - \frac{\lambda_b \cdot L_b}{d_b} \right) \cdot \frac{x}{L_b} + \left(2 \cdot k_B - 4 \cdot k_F + \frac{\lambda_b \cdot L_b}{d_b} \right) \cdot \left(\frac{x}{L_b} \right)^2 + \left(\frac{4}{3} \cdot (k_F - k_B) - \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda_b \cdot L_b}{d_b} \right) \cdot \left(\frac{x}{L_b} \right)^3 \right\} \quad (5.42)$$

여기서, P_{bi} 는 덕트 시작점에서의 압력이며, k_F 와 k_B 는 각각 덕트의 시작점과 말단에서 유효포트 운동량 계수(effective port momentum coefficient)로 덕트의 종횡비에 따라서 변하며 $k_F = 0.8 \sim 0.5$ 의 범위이며, $k_B = 0.1$ 로 일정하다.

여기서 평균포트운동량 계수(\bar{k})는 식(5.43)과 같이 정의되며, 식(5.42)에서 덕트의 시단과 말단의 포트 운동량 계수가 같다고 가정하여 다시 쓰면 덕트 내 정압분포는 식(5.44)와 같다.

$$\bar{k} = k_F - (k_F - k_B)/3 \quad (5.43)$$

$$P_{b(x)} - P_{bi} = \rho \cdot \frac{U_{bi}^2}{2} \cdot \left\{ \left(4\bar{k} - \frac{\lambda_b \cdot L_b}{d_b} \right) \cdot \frac{x}{L_b} + \left(-2 \cdot \bar{k} + \frac{\lambda_b \cdot L_b}{d_b} \right) \cdot \left(\frac{x}{L_b} \right)^2 + \left(-\frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda_b \cdot L_b}{d_b} \right) \cdot \left(\frac{x}{L_b} \right)^3 \right\} \quad (5.44)$$

따라서, 급기덕트에서 정압차는 뒷식에 $x = L_b$ 를 대입하면 다음식이 된다.

$$P_{bi} - P_{bo} = \rho \cdot \frac{U_{bi}^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda_b \cdot L_b}{d_b} - 2 \cdot \bar{k} \right) \quad (5.45)$$

여기서, P_{bo} 는 덕트 말단에서의 압력이다.

식(5.45)는 $\bar{k} = 0.5$ 인 경우에 일본의 수도공단에서 제시하는 식과 동일하다.

그리고 λ_b 는 급기덕트의 마찰손실계수로 일반적으로 덕트의 유속은 차도의 유속보다 변화폭이 크기 때문에 상세계산을 위해서는 속도에 대한 고려가 있어야하며, λ_b 는 풍속이 큰 덕트의 시작부분에서는 대략 0.015정도이며, 덕트의 말단에서는 0.04가 된다. 일본의 수도공단의 보고서에서는 0.015를 권장하고 있다.

2) Singstad의 식

$$P_{b(x)} - P_{bo} = 12 \cdot \frac{\rho}{d_b} \cdot \left\{ U_{bi}^2 \cdot \left(\frac{a \cdot L_b \cdot Z^3}{3 \cdot d_b} - \frac{1}{2} \cdot (1-K) \cdot Z^2 \right) + \frac{b \cdot L_b \cdot Z}{2 \cdot d_b^3} \right\} \quad (5.46)$$

여기서, P_{bo} 는 덕트 말단의 압력,

a : 콘크리트의 마찰계수에 관련한 값으로 0.0035

b : 콘크리트의 마찰계수에 관련한 값으로 0.01433

$$z = \frac{L_b - x}{L_b}$$

K : 0.615 (난류에 관계된 계수)

(다) 급기덕트의 말단압력($P_{bo}-P_{ro}$)

덕트의 말단압력은 차도 내 압력분포나 교통상황 및 기상상황에 의해서 영향을 받기 때문에 이를 고려하여 충분한 여유를 두고 설계해야 한다. 일본의 경우 동명고속도로 등의 실험결과에 의해서 147Pa 정도를 권장하고 있다.

(라) 급기포트(slot)의 개도계산

급기포트의 개구율은 설계조건에서 차도 내 압력이 일정할 때 급기풍량에 터널 전 연장에 걸쳐서 일정하게 유지되도록 설정되어야 하며, 급기량 q_b 를 얻기 위해서 급기덕트 및 차도의 정압차와 개도의 관계는 다음식과 같다.

$$\Delta P_{b-r} = (1 - \xi) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_s^2 + (\zeta_2 - 1) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_b^2 \quad (5.47)$$

여기서, 교축부의 유속은 $U_s = \frac{l_b \cdot q_b}{K \cdot a_b}$

여기서, l_b : 급기포트의 피치

a_b : 급기포트의 개구면적

K : 급기포트의 개구율

$K \cdot a_b$: 교축부의 면적

ξ : 교축손실계수 스톱트의 개도

ζ_2 : 분기손실계수, 슬롯의 개도

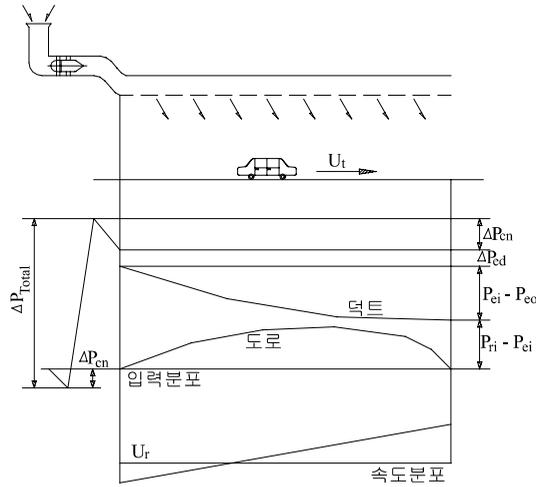
(마) 연결덕트의 압력손실 (ΔP_{cn})

급·배풍기에 외기도입을 위한 덕트 및 급·배풍기에서 발생하는 공기를 터널덕트로 연결하기 위한 덕트의 손실로 덕트의 굴곡, 변형, 직관부의 손실등이 포함되며 소음장치나 집진장치의 압력손실도 고려해야 한다.

(바) 송풍기의 소요정압

급·배풍기의 소요정압의 위에서 설명한 전체 압력손실의 합이 되며 여기에 안전율을 10% 정도 고려하면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{total1} = 1.1 \cdot \{(P_{bo}-P_{ro}) + (P_{br}-P_{bo}) + \Delta P_{ed} + \Delta P_{cn} + P_r\} \quad (5.48)$$



〈그림 5.18〉 급기 반횡류식의 개요도

5.8.3 배기 반횡류방식

배기 반횡류방식의 개요도는 〈그림 5.19〉과 같다. 이 방식은 배기덕트를 설치하여 오염된 공기를 흡입하여 배출하는 방식으로 터널의 입출구를 통해서 신선공기가 유입되기 때문에 터널의 출구를 통해서 배출되는 오염물질의 양을 줄일 수 있는 효과가 있다.

이 경우에 중성점에서는 풍량이 0 m/sec가 되므로 오염물질의 농도는 이론적으로는 무한대가 되나 일본의 실측결과에 의하면 목표농도의 수배 정도임이 밝혀지고 있다. 이 절에서 환기계산은 터널 전 길이에 걸쳐서 단위 길이 당 $q_e(m^3/s)$ 의 공기가 배기되고 터널은 일방향교통인 조건에서 수행하기로 한다.

(1) 차도 내 풍속

전술한 바와 같이 단위길이 당 배기되는 풍량이 q_e 로 일정하다면 중성점을 기준으로 하여 차도 내 풍속은 중성점에서 멀어질수록 증대하며 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$U_{r(x)} = \frac{q_e}{A_r} x \quad (5.49)$$

(2) 차도 내 압력분포

차도 내 압력분포는 급기덕트의 경우에 같이 계산할 수 있으며 식(5.34)를 적분하면 다음과 같다.

(가) 차량의 진행방향과 기류의 방향이 동일한 경우

$$P_r^* - P_{r(x_1)} = - \left(\frac{\lambda_r}{3} \cdot \frac{x_1}{D_r} - 1 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_{r(x_1)}^2 + \alpha \cdot \frac{x_1}{L_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(U_t^2 - U_t \cdot U_{r(x_1)} + \frac{1}{3} \cdot U_{r(x_1)}^2 \right) \quad (5.50)$$

(나) 차량의 흐름과 기류의 흐름이 반대인 경우

$$P_r - P_{r(x_2)} = - \left(\frac{\lambda_r}{3} \cdot \frac{x_2}{D_r} - 1 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_{r(x_2)}^2 - \alpha \cdot \frac{x_2}{L_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(U_t^2 + U_t \cdot U_{r(x_2)} + \frac{1}{3} \cdot U_{r(x_2)}^2 \right) \quad (5.51)$$

(3) 배기덕트의 압력분포

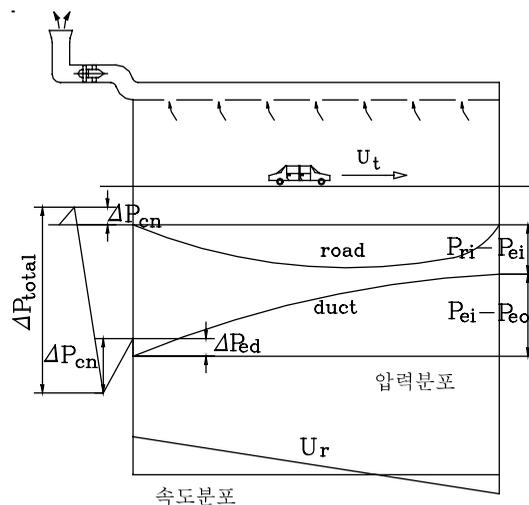
배기 반횡류식 터널에서 덕트 및 차도의 압력 분포는 <그림 5.19>와 같으며, 각 압력성분은 다음과 같이 구한다.

(가) 배기덕트 시작단의 풍속 및 동압

$$\text{풍속} : U_{eo} = \frac{Q_e}{A_e} \quad (5.52)$$

$$\text{배기덕트 시작단의 동압력} : \Delta P_{ed} = \frac{\rho}{2} U_{eo}^2 \quad (5.53)$$

(나) 배기덕트에서 압력분포 및 정압차



<그림 5.19> 배기반횡류식의 개요도

배기덕트의 압력분포는 급기덕트의 경우와 같은 방법으로 구할 수 있으며 자세한 유도과정은 생략하고 미국연방도로국과 Singstad의 식을 소개하면 다음과 같다.

1) 미연방도로국 :

$$P_{e(x)} - P_{ei} = -\rho \cdot \frac{U_{ei}^2}{2} \cdot \left[2 \cdot k_B \cdot \left(\frac{x}{L_e}\right)^2 + \left\{ \frac{4}{3} \cdot (k_F - k_B) + \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda_r \cdot L_e}{d_e} \right\} \cdot \left(\frac{x}{L_e}\right)^3 \right] \quad (5.54)$$

여기서, k_B 와 k_F 는 전 절에서 설명한 바와 같으며, 급기덕트와 마찬가지로 덕트의 정압차를 구하면 식(5.55)와 같다.

$$P_{ei} - P_{eo} = \rho \cdot \frac{U_{eo}^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \lambda_e \cdot \frac{L_e}{d_e} + 2 \cdot \bar{k} \right) \quad (5.55)$$

여기서, $\bar{k} = 0.5$ 이며 P_{eo} 는 배기덕트 말단부의 압력이다. 그러나 일본 수도공단보고서에서는 $\bar{k} = 1.0$ 으로 하고 있다.

2) Singstad의 식

이 식은 덕트의 압력분포를 구하는 식으로 가장 오랫동안 여러 개의 터널에 적용된 식으로 식(5.57)과 같다.

$$P_{e(x)} - P_{e(x=L)} = 12 \cdot v \cdot \rho \cdot \left\{ \frac{U_{eo}^2}{2} \cdot \frac{a \cdot L_e}{(3+C) \cdot d_e} \cdot Z^3 + \frac{3}{2+C} \cdot Z^2 + \frac{b \cdot L_e}{2 \cdot d_e^2 \cdot (1+C)} \cdot Z \right\} \quad (5.56)$$

여기서, $C = 0.25$ 이며, 그 외의 상수는 급기덕트의 압력분포계산에 사용한 값과 동일하다.

(다) 배기덕트 시단의 필요압력

배기덕트의 시점부 압력은 이론적으로 차도의 압력보다 낮게 설정하면 되며, 배기가 원활하게 이루어지도록 하기 위해서 차도의 압력보다 100Pa정도 낮게 설정하는 것이 바람직하다.

(라) 배기구의 개도계산

배기구의 개도는 급기덕트의 설계 시와 마찬가지로 덕트의 압력과 차도의 압력차에 의해 결정된다.

(마) 배풍기 소요풍압

$$P_{rd} = 1.1 \cdot \{ (P_{ri} - P_{ei}) + (P_{ei} - P_{eo}) - \Delta P_{ed} + \Delta P_{cn} + P_r \} \quad (5.57)$$

5.8.4 횡류식 환기 시스템

이 방식은 1924년 Holland Tunnel에 최초로 적용된 터널환기방식 중에서 가장 오래된 방식으로 시설비, 토목공사비, 유지관리비 등에 있어서 가장 고가이지만 화재발생 시 대응능력이 우수하고 터널의 길이에 제한을 받지 않는다.

〈그림 5.20〉은 터널의 차도부에 급기덕트를 설치하여 환기탑으로 부터 유입되는 신선공기를 급기하고, 터널의 천정부에 배기덕트를 시설하여 배기하도록 하는 전형적인 횡류식 환기방식을 나타낸 것이다.

횡류식 환기방식에서 일반적으로 급기구는 차량에서 발생하는 매연을 즉시로 희석할 수 있다는 관점에서 터널의 하부에 설치하며, 배기구는 급기구에서 급기되는 기류가 터널을 횡단하는 흐름을 유지할 수 있도록 급기구와 마주보는 위치의 터널천정에 설치하게 된다.

차도 내 풍속은 〈그림 5.20〉에 나타낸 바와 같이 터널 전체에 걸쳐서 일정하며 이때 풍속은 교통환기력에 의해서 야기된다.

또한 오염물질의 농도분포는 터널입구에서 터널의 출구까지 점차적으로 증가하며 터널 출구로 갈수록 증가율은 둔화되는 경향을 보인다. 또 일방향 교통인 경우에는 터널출구로 일정한 풍속으로 터널 내 공기가 유출되기 때문에 터널갱구를 통해 오염물질의 일부가 배출되게 된다.

횡류식 환기시스템에서 가장 중요한 것은 급기덕트나 배기덕트에서 공급 또는 흡입되는 공기량이 덕트계 전 연장에서 균일하게 되도록 설계하는 것과 송풍기의 풍량 및 풍압결정이다. 이에 대해서 자세히 알아보기로 하자.

(1) 차도 내 압력분포

단위길이당의 송풍량 q_b 와 배기량 q_e 가 동일한 횡류식 환기방식에 대해서는 차도 내 풍속은 일정하며 다음의 압력평형식에 의해서 구할 수 있다. 또한 이 경우에는 반횡류식 환기방식에서 나타나는 중성점은 생기지 않는다.

$$\Delta P_r + \frac{\rho \cdot Q_b \cdot U_r}{A_r} = \Delta P_{MTW} + \Delta P_t \quad (5.58)$$

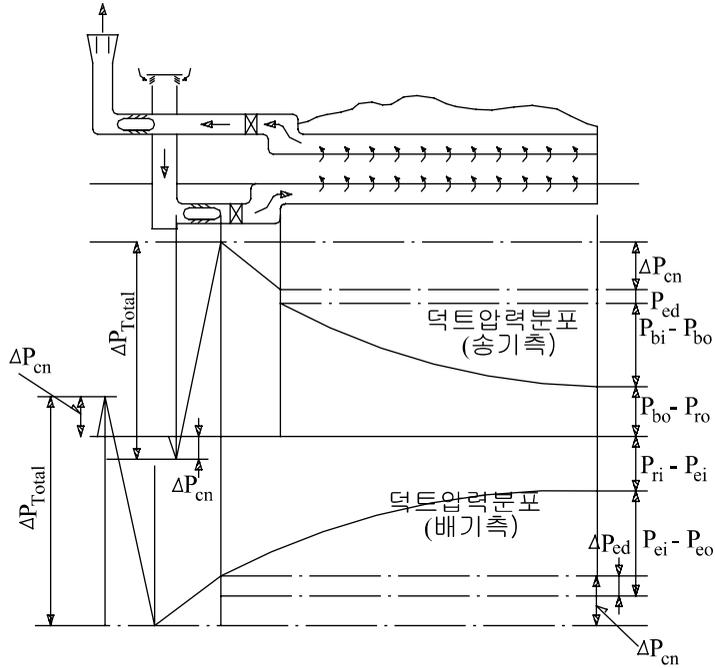
여기서, Q_b 는 급기덕트와 배기덕트를 통해 유출·입되는 공기의 정미차 $Q_b = L_r \times (q_b - q_e)$ 이다. 일반적으로 횡류식 환기방식에서 $q_e = q_b$ 이므로 차도 내 풍속은 자연환기방식에서의 풍속과 일치한다. 차도내압은 반횡류식과 동일한 이론으로 식(5.59)으로 구하며 일반적으로 횡류식 설계에서 차도내압은 0으로 하고 있다.

$$P_r - P_{r(x_1)} = -\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{x_1}{d_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_{r(x_1)}^2 + \alpha \cdot \frac{x_1}{L_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(U_t^2 - U_t \cdot U_{r(x_1)} + \frac{1}{3} \cdot U_{r(x_1)}^2 \right) \quad (5.59)$$

(2) 덕트 내 압력분포

반회류식과 동일한 방식으로 구한다.

급기 및 배기덕트의 압력분포는 전 절에서 설명한 것과 같다. 따라서 급·배풍기의 소요풍압은 반회류식의 경우와 동일하게 구해진다.



〈그림 5.20〉 회류식 배기덕트계의 압력 분포



6. 방재용 환기설비

6.1 개요

터널은 반밀폐공간으로 터널 내에서 화재와 같은 사고가 발생하면 인명과 재산 손실이 크다. 터널 이용자를 안전하게 대피시킬 수 있도록 하기 위해서 사고의 신속한 감지와 함께 화재의 확산을 방지하고, 유독한 연소가스가 피난 방향으로 향하는 것을 방지하는 한편 구조요원이 안전하게 구조활동을 할 수 있는 환경을 제공하도록 방재설비 및 화재 시 대응방안이 수립되어 있어야 한다.

유독가스를 배출하는 제연설비의 경우 설계시점에서 제연전용으로 갖추도록 하는 경우도 있으나 환기설비를 겸용으로 이용하는 것이 일반적이다(환기소요량보다 적은 경우 제외). 즉, 환기설비는 화재 등 비상 시 연기를 제어하기 위한 제연설비로서도 활용되며, 운영에 있어서는 교통상황이나 환기방식 등과 같은 터널의 상황에 유의하여 검토하는 것이 바람직하다.

비상 시의 운영은 피난을 중점적으로 고려한 초기운영과 피난후의 소화 및 복구활동을 위한 운영으로 구분한다.

터널 내 화재 시 화염이나 연기의 역류현상을 제압할 수 있도록 임계풍속을 유지하여 피난과 소화활동이 원활 할 수 있도록 하여야 한다. 비상 시에는 이러한 점을 전제로 하여 환기설비를 운영하도록 하며, 화재 시 환기설비의 운영은 환기방식 및 화재의 규모·화재의 위치 등 다양한 인자에 의해서 최적 제연조건이 달라지므로 제연설비(환기설비)의 운영에 대해서는 터널의 구조를 고려한 적절한 운전 방법을 초기운전과 피난완료 후로 구분하여 최종 결정하는 것이 바람직하다.

6.1.1 화재 시 환기기기 용량

현재 고속도로 터널이 종류식 환기방식에 의해서 건설되는 것이 대부분이므로 화재 시 환기 용량을 종류식 환기 방식에 대해서 기술한다.

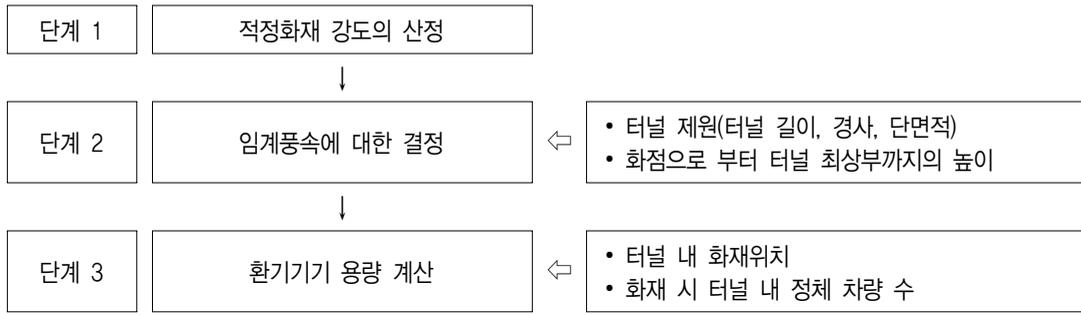
터널 내 화재 시에는 인명의 대피로 확보와 화재진압을 위해서 화염 및 연기가 역류하는 것을 억제하고 화염 하류의 연기에 대해서는 성층화를 유지하면서 기류를 유지하기 위한 최소한의 터널 내 풍속이 요구되는데 이를 임계속도(critical velocity)라 한다.

임계속도는 화재강도, 터널의 형상(단면형상 및 높이), 기울기에 영향을 받으며, 일반적으로

Kennedy식을 사용하여 계산하고 있다. 임계속도에 의해서 제연용 팬 용량이 결정되게 된다. 따라서, 환기설비 설계 시 제연을 위한 환기용량의 선정은 <표 6.1>에 나타난 바와 같이 우선적으로 적정 화재규모를 결정하여야 하며, 이것이 결정되면 Kennedy식에 의해서 터널제원 및 화재 크기에 대응하는 임계속도를 구하고 이를 만족하기 위한 환기기기 용량을 결정한다.

단, 종류식의 경우에는 화재 시 환기기기 용량은 전술한 바와 같이 임계속도를 유지하기 위한 승압력에 의해서 환기기기 용량이 결정되나, 횡류식의 경우에는 화재 규모에 따른 연기의 발생량을 산정하고, 이를 제거하기 위한 제연풍량에 의해서 환기기기 용량이 결정된다.

<표 6.1> 제연용 환기기기 용량 산정



(1) 화재강도

화재의 강도는 화재가 발생하는 차량에 따라서 달라지며, 주요국가에서 제시하고 있는 차종별 화재강도는 <표 6.2>에 나타난 바와 같다. 표에 의하면 화재강도(heat release rate)는 승용차 1대가 전소하는 경우에 대략 2~2.5 MW정도이며, 유조차의 경우에는 100~200 MW로 차종별로 다양하게 제시되고 있음을 알 수 있다. 따라서 적정 화재강도의 산정에 어려움이 있으며, 적정 화재강도가 산정이 된다고 하여도 선정된 화재강도보다 큰 강도의 화재가 발생하는 경우에는 제연에 어려움이 있으리라고 판단할 수 있다.

각국에서 터널 설계 시 적용한 화재강도를 살펴보면 <표 6.3>과 같다. 표에 나타난 바와 같이 일반적으로 화재강도를 20 MW로 하는 경우가 대부분이며, 표에는 언급하지 않았으나 프랑스의 경우에는 30 MW를 기준으로 하여 화재강도를 정하고 있다.

따라서 국내 도로터널에서도 이에 대한 기준의 정립이 필요하며, 현재까지 국내에서는 실측자료가 없으므로 20 MW를 기본으로 하고 경우에 따라 증감하여 적용한다.

(2) 임계속도의 계산

임계속도는 화재강도, 터널의 형상(단면형상 및 높이), 기울기에 영향을 받으며, 일반적으로 식(6.1)로 표현되는 Kennedy식을 사용하여 계산하고 있다.

$$U_c = K_g \cdot F^{-\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{g \cdot H \cdot Q}{\rho_\infty \cdot C_p \cdot A_r \cdot T_f} \right)^{1/3} \quad (6.1)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho_\infty \cdot C_p \cdot A_r \cdot U_c} + T_\infty \quad (6.2)$$

여기서, U_c : 임계속도 [m/s]

g : 중력가속도, 9.8 [m/s²]

H : 터널 높이 (평균직경 - 차량의 화점높이)

Q : 화재의 크기 [MW]

ρ_∞ : 주위의 공기 밀도 [kg/m³]

C_p : 정압비열 [J/kg · K]

A_r : 단면적 [m²]

T_f : 화점온도 [K]

K_g : Tunnel Grade factor

T_∞ : 공기온도 [K]

$$F_{rc} = \frac{\Delta \rho \cdot g \cdot H}{\rho \cdot V_C^2} \quad (6.3)$$

여기서, F_{rc} : 임계 Froude 수

$\Delta \rho$: 온도변화에 따른 공기밀도 변화량 [kg/m³]

이나 터널에서는 아래식으로 적용한다.

$$F_{rc} = 4.5K_g^{-3}$$

$$K_g = 1 + 0.0374g_r^{0.8}$$

※ g_r : 터널경사

Froude 수는 매연의 역류를 방지하기 위해 4.50 이하를 유지하여야 한다.

<그림 6.1>은 터널경사(slope %)별 화재강도에 따른 임계속도를 나타낸 것이다. 화재강도가 증대하면 임계풍속도 증가하며, 화재강도가 동일한 경우에도 터널경사가 커지면 임계속도가 증가한다.

(3) 방재용 환기기기 용량

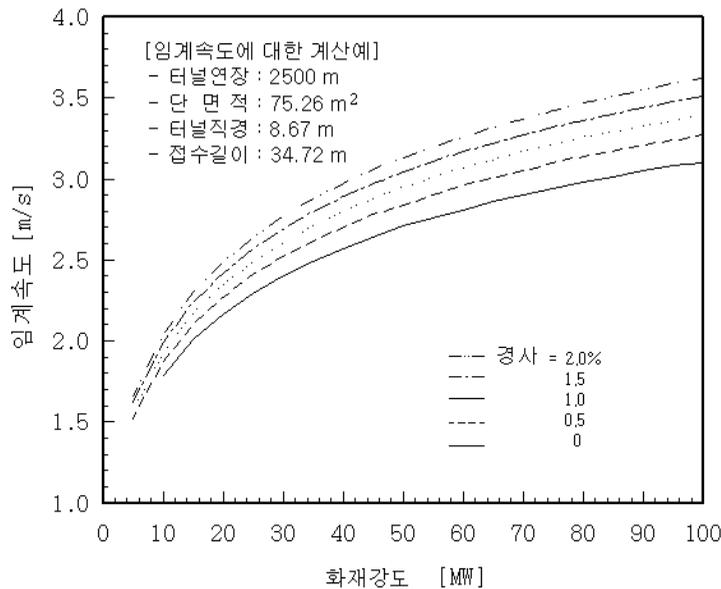
방재용 환기팬 용량은 적정 화재강도를 산정하고 이에 따른 임계풍속을 결정한 후에 임계풍속을 만족 하기 위한 제연용 환기팬 승압력을 구하여 환기기기 용량을 식(6.4)로 결정한다.

〈표 6.2〉 화재강도(측정값 및 추천값)

Fire Category	Heat Release Rate (MW)						
	Recommadations				Fire Tests		Expert report
	PIARC 1995	RABT	CETU	NFPA 502	EUREKA	Memorial adopted fire size	Oreund tunnel 1994
passenger car	5		2,5	5	1,5~2		2,5
passenger car (large)			5				
passenger van (plastic)					5~6		
1-2 passenger cars		5~10					
2-3 passenger cars	8		8				
1 van	15		15				
1 public bus					29~34		
1 bus or lorry (freight of lorry no hazadous)	20~30	20~30	20	20		20	15
heavy goods vehicle			30		100~130		
petrol/gasoline tanker with a leak	100	50~100	200	100			120 LPG 150
flammable spill of 400 liters						50	
flammable spill of 800 liters or hazadous material						100	
mixed load 2844 kg(wood, rubber tires plastic material)					15~17		

〈표 6.3〉 최근 외국의 화재강도 적용 사례

터널명	터널길이 (km)	화재강도 (MW)	도시	국가	비고
Memorial tunnel	0.85	10~100	버지니아	미국	화재실험
Euraka EU 499/1992				노르웨이	화재실험
Yodo river tunnel	3.0	20	오사카	일본	
Melbourne	1.6+3.5	25	멜버른	호주	
Comberland gab road tunnel	1.5	20	켄터키	미국	
Blackwall tunnel	1.2	20	런던	영국	
Sydney harbour tunnel	2.3	50	시드니	호주	
Gotthard road tunnel		17.6		스위스	실제 트럭 화재 시 측정
Ekeberg tunnel		35	오슬로	노르웨이	화재 시 추정결과
Pierre Petuis	2.114	20	Jura	스위스	설계조건에 대한 검토
Hanshin Expressway tunnel	-	12	-	일본	버스
Ted Williams tunnel	2.53	20	Boston	미국	
Central Artery tunnel	-	20	Boston	미국	
Limehouse tunnel	1.55	50	London	영국	



〈그림 6.1〉 터널경사 및 화재강도에 따른 임계속도 예시

식(6.4)에서 ΔP_j 는 제연풍속 하에서 제트팬 1대당 승압력, ΔP_r 는 환기저항, ΔP_m 는 자연풍에 의한 환기저항, ΔP_n 는 교통환기력이다.

$$N_z \cdot \Delta P_j = \Delta P_r + \Delta P_m + \Delta P_t \quad (6.4)$$

여기서, N_z : 요구되는 제트팬 수

$$\Delta P_r = \left(1 + \zeta_e + \lambda \cdot \frac{L_r}{D_r}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_r^2$$

$$\Delta P_m = \left(1 + \zeta_e + \lambda \cdot \frac{L_r}{D_r}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U_n^2$$

$$\Delta P_t = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n \cdot U_r^2$$

이다.

방재용 제연팬의 설치 위치는 화재 시 팬 보호측면에서 터널 입구측에 설치하는 것이 효과적이거나, 화재 시 효율적인 제연과 부대시설의 경제성을 고려하여 설치 위치를 결정하는 것이 바람직하다.

(4) 화재 시 터널 내 차량수

식(6.4)의 교통환기력 항에서 n 은 터널 내 차량수로 주어진 주행속도에서 차량수 N (대/시)으로부터 식(6.5)로 구한다. 식(6.5)에서 우변의 제 1항은 화재발생 시 터널에 존재하는 차량의 수이며, 우변의 2항은 화재감지까지 3분이 소요된다는 가정 하에 화재 발생 후 3분 동안에 터널에 진입한 차량수이다.

$$n = \frac{N \cdot L}{V_t} + N \cdot \frac{3}{60} \quad (6.5)$$

따라서, 화재 시 터널 내 차량 수는 화재의 위치와 화재직전의 터널 내 평균주행속도에 따라서 달라지게 된다. 그러나 화재직전의 터널 내 평균주행속도는 60km/h를 기준으로 한다.

6.1.2 화재 시 환기기기 운전

(1) 초기운전

제연운전에서 가장 중요한 것이 초기운전이다. 이 경우 제연설비는 피난에 가장 양호한 환경이 확보될 수 있도록 운전하는 것이 중요하다.

화재 등 유사시의 환기설비의 운전방법은 환기방식, 화재발생위치, 화재의 규모, 자연풍의 상황 및 교통형태에 따라서 다르기 때문에 일률적으로 규정하는 것은 상당한 부담이 따르게 된다. 화재 시 기본적인 운전방법은 연소가스가 대피공간으로 확산되지 않도록 하는 것으로 이를 위해 무풍 또는 일정한 풍속을 갖도록 할 필요가 있다. 화재 시 차도에 대한 기류는 화재시기와 화재규모에 의해 영향을 받을

뿐만 아니라 화재의 경과에 대응하여 운전을 변경시킬 필요가 있는 경우도 있다. 따라서, 화재 시 환기설비의 적절한 운전을 위해서는 여러 경우를 고려한 시나리오 분석과 수치 시뮬레이션, 모의 모델시험 등을 통해 운전제어, 제연능력 및 안정성 검증 등의 확인과 고도의 기술적인 판단이 필요하다.

(가) 일방통행

일방통행 터널인 경우 사고차 및 화재지점보다 진행방향의 전방에 있는 차는 그대로 주행을 계속하여 터널을 벗어날 수 있고, 후방은 사고차 등에 의해 정체되는 것이 예상되므로 제연은 설치된 설비를 이용하여 차량의 진행방향으로 실시하도록 하며 차도 내 풍속은 임계풍속을 목표로 하고 있다.

〈표 6.4〉 일방통행터널의 환기방식별 제연운전 예시

환 기 방 식	일 방 통 행	비 고
제트팬 종류방식 전기집진기+제트팬	차량 진행방향으로 제트팬 운전	정상 교통 중 화재 시
수직갱 송배기방식	① 발화점이 터널입구~수직갱 사이인 경우 : 수직갱 배기팬을 운전하여 연기를 수직갱을 통하여 배출 ② 발화점이 수직갱~터널출구 사이인 경우 : 수직갱 송·배기팬을 운전하여 연기를 터널 외부로 배출	① 배기팬을 제연목적으로 사용하는 경우에는 배기덕트는 냉각장치가 필요하며, 화재연기의 온도를 고려하여 축류팬 절연등급을 선정한다. ② 전동기 절연등급보다 설정온도가 큰 경우에는 별도의 냉각시스템을 고려한다.
수직갱 집중 배기 종류식 + 제트팬방식	① 발화점이 터널입구~수직갱 사이인 경우 : 수직갱 배기팬을 운전하여 연기를 수직갱으로 부터 배출하거나 제트팬을 차량 진행방향으로 운전 ② 발화점이 수직갱~터널출구 사이인 경우 : 차량의 진행방향으로 제트팬을 운전	

(나) 대면통행

대면통행 터널의 경우에 있어서는 화재지점을 사이에 두고 후속차량이 양측에 위치해 있기 때문에 피난방향을 어느 특정한 방향으로 정할 수 없는 경우에는 기류 성층화를 가능한 한 파괴하지 않도록 하여 노면부근에 연기가 강하하는 것을 최소화하도록 하여야 한다.

이 경우에는 즉시 환기기를 정지하여 연기의 확산을 최소화함과 동시에 피난을 용이하게 할 수 있는 환경을 확보하여야 한다. 특수한 방법이지만 터널 내에서 화재가 발생하면 많은 차량이 정지하고 있는 것을 예상할 수 있기 때문에 터널 내의 풍속을 0 m/s가 되도록 제어하기도 한다. 이러한 제어를 실시하는 데에 있어서 제약조건으로는 화재부근의 연기가 확산되지 않도록 하는 것이 필수적이다.

〈표 6.5〉 대면통행터널의 환기방식별 제연운전 예시

환 기 방 식	대 면 통 행
제트팬 종류식	제트팬 운전을 정지하고 연기의 확산을 억제한다.
수직갱송배기 종류방식	송·배풍기를 정지시켜 연기의 확산을 제어한다.
수직갱송배기 종류식 + 제트팬 방식	송·배풍기를 정지시켜 연기의 확산을 제어한다.

(2) 피난 완료 후 운영

소방대가 현장에 도착하여 소화·구급활동을 실시할 때에 터널 내에 연기가 총만해 있으면 활동에 지장을 주기 때문에 활동에 필요한 환경을 확보하기 위해서 터널내의 제연운전을 실시한다. 터널 내에 총만해 있는 연기를 터널외부로 배출할 때 통로가 되는 곳에서는 고농도대량의 연기와 가스가 통과한다는 점을 고려하지 않으면 안 된다. 특히 차도단면을 제연통로로서 사용하는 경우에는 제연통로 구간에 피난 중에 있는 사람이 있는지의 여부를 확인하여야 한다. 따라서, 제연운전을 실시하는데 있어서는 실제로 현지에서 도로관리자와 소방대원이 안전여부에 대한 확인을 마친 시점에서 실시하도록 한다. 운전방향에 대해서는 소방대와 충분히 의견을 조율한 상태에서 실시하도록 하고, 평소부터 소방기관과 운전방법에 대해서 협의를 하는 것이 긴급 시에 혼란을 최소화할 수 있는 방법이다.

(3) 제연설비를 결정하기 위한 조건설정

제트팬 종류환기방식에서 제트팬을 제연용으로 이용하는 경우 제연용 팬의 대수 산정은 다음 항목을 조건으로 한다.

- 1) 차도 내 풍속으로서 임계풍속을 확보한다.
- 2) 자연풍에 의한 환기저항은 환기설계 시 적용값을 적용하는 것을 원칙으로 하며, 실제 자연풍에 의한 환기저항을 계산할 수 있는 경우에는 해당조건을 고려하여 결정한다.
- 3) 터널 내 화재발생 시 터널 내에 정지하고 있는 차량은 기류에 대해서 저항으로 작용한다. 이 때 정지차량대수는 설계교통량이 이동하고 있는 경우 3분경과 이후에는 진입차량이 없는 것으로 하여 산정한 대수를 대표로 한다.



7. 계측기

7.1 환기용 계측기

터널의 최적 환경과 안전성을 보장하기 위해서 환기시스템이 설치되는 터널에서는 터널 내 환경을 실시간으로 모니터링하여 그에 부합되도록 환기시스템을 제어할 수 있도록 하여야한다. 이러한 측면에서 터널에 설치되는 환경 측정용 계측기는 터널 내 환경을 확보하는데 필요한 자료를 제공할 수 있도록 터널별 특성을 고려하여 적절히 설치하여야 한다.

따라서, 터널 내에는 오염물질의 농도를 측정하기 위한 오염물질별 오염농도 계측기, 터널내부의 기류 특성을 파악하기 위한 풍향·풍속계, 교통상황을 감지하기 위한 교통류 감지기 등을 교통방식이나 환기방식에 따라서 검토하여 설치한다. 또 터널의 외부에는 기상조건을 감지하기 위한 풍향·풍속계, 기압계, 안개감지센서 등을 터널상황에 적합하도록 필요 여부를 검토하여 설치한다.

7.1.1 오염물질 농도 계측기

(1) 측정대상 오염물질 및 계측범위

- (가) 계측대상 오염물질은 입자상 물질(매연) 및 가스상 물질(CO, NOx)로 하며, 터널특성에 따라서 검토 설치한다.
- (나) CO 계측기의 측정범위는 0~150ppm, NOx 계측기는 0~50ppm 이상 범위를 측정할 수 있어야 한다.
- (다) 터널상황에 따라서 NOx농도가 과도하여질 수 있는 경우에는 NOx농도계의 설치를 검토하거나 매연의 가시거리나 CO농도에 의해서 NOx농도를 유추할 수 있도록 한다.
- (라) 입자상 물질은 터널 내 운전자의 가시거리에 영향을 미치게 되므로 가시거리계를 설치하여 입자상 물질의 농도를 측정할 수 있도록 하며, 가시거리계의 측정범위는 $0\sim 15\times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 정도로 한다.

(2) 설치위치 및 설치갯수

설치갯수 및 축방향 설치위치는 다음과 같은 사항을 고려하여 결정한다.

(가) 터널의 특성

- 1) 계측기의 설치대수 및 위치는 환기방식의 특성에 적합하도록 결정되어야 한다. 환기구간을 1개로 볼 수 있는 제트팬 종류식 환기방식의 터널에서는 이론적으로 터널 출구부의 오염농도가 최대가 된다는 점을 고려하여 설치위치를 선정한다.
- 2) 계측기의 설치대수는 유지보수 작업이나 고장 등의 원인으로 일부 계측기의 작동 중지로 인해 터널 내 환경에 결정적인 영향을 미치지 않도록 설치대수를 정하며, 화재 등 터널 내 특정 상황을 감시하기 위하여 터널 중간부와 출구부 설치를 표준으로 한다.
- 3) 수직갱이나 집진기 설치 터널과 같이 환기구간이 여러 개로 분할되는 터널에서는 각 환기구간에 적어도 1개소 이상에 계측기 설치를 검토한다.
- 4) 일방향 통행터널이라도 양방향 통행을 배제할 수 없는 경우에는 터널 내 오염농도가 최대가 되는 지점이 변할 가능성이 있으므로 터널 입구부, 중간부, 출구부 등 3개소 설치를 표준으로 한다.
- 5) 집진기가 설치된 터널의 경우에는 집진기의 운전효과를 확인하고 유지관리하기 위하여 배기덕트 상류 및 급기덕트의 하류에 계측기 설치를 고려한다. 집진기는 CO농도와 관계가 없으므로 CO 계측기는 배기덕트의 상류부에만 설치한다.
- 6) 제트팬 종류환기방식이라도 터널 연장이 3,000m 이상으로 길거나, 터널 내 환기시설을 일정구간 별로 독립제어하는 환기방식 등을 설계에 반영하는 경우에는 추가적인 계측기 수량을 필요한 위치에 설치할 수 있다.

(나) 유동특성

- 1) 환기용 팬으로부터 이격거리는 계측기 설치 목적에 따라 달라질 수 있다. 완전 혼합된 균질한 샘플을 얻기 위하여서는 팬으로부터 가급적 먼 거리에 설치하여야 하며 팬 가동 후의 정상상태에 도달할 때까지의 상황감지를 위해서는 팬과 동일한 지점에 설치하여야 한다.
- 2) 터널입구로부터 유입된 공기의 난류형성 거리, 터널 출구에서의 난류확산에 의한 농도 저하 현상 등을 고려하여 터널 입출구에 설치하는 계측기는 갱구로부터 터널 대표직경의 약 7배 이상 떨어진 위치에 설치한다. 이때 가시거리 계측기의 경우에는 자연광의 영향이 미치지 않는 곳에 설치하여야 한다.
- 3) 계측기는 터널 내 환경을 대표하여야 하므로 공기유동이 정상류가 되는 지점에 설치함을 원칙으로 한다. 집진기, 수직갱의 급배기 덕트 인근에 설치하는 경우에는 이 지점으로부터 150 m 또는 최소 터널반지름의 7배 이상 되는 지점에 설치하여 오염농도의 확산에 의한 영향을 최소화하도록 설치하도록 한다.
- 4) 환기팬의 흡입구에 설치하는 것은 피하며, 환기설비 부근의 공기유동에 대한 검토 결과에 따라 결정하여야 한다.

(다) 유지보수

- 1) 보수점검을 위한 접근이 용이하여야 한다. 따라서, 안전하고 신속한 보수점검 작업이 가능한 지점을 선택하여야 한다.
- 2) 유지보수 작업 시 작동을 중지하는 계측기가 전체 환경 모니터링에 결정적인 영향을 미치는 경우가 발생하지 않도록 하여야 한다. 따라서 가급적 인접 계측기에 의한 추정이 가능하도록 계측기 간격을 결정하여야 한다.

(3) 터널단면상의 계측기 설치위치

터널단면상의 계측기 설치위는 다음과 같은 사항을 고려해서 정한다.

(가) 환기유동특성

- 1) 측정값은 터널 내 환경을 대표하여야 하므로 공기유동이 균일하지 않은 환기설비에 너무 접근한 지점이나 환기팬의 흡입구 쪽에 설치하는 것은 피하여야 한다. 설치를 피하여야 할 지역의 범위는 환기설비 부근의 공기유동에 대한 검토 결과에 따라 결정하여야 한다.
- 2) 터널 단면상의 농도 분포는 비교적 일정하나 터널계측기 설치 높이는 계측기 보호 및 유지관리를 위해서 3.5m 정도가 바람직하다. 그러나 최대농도의 형성이 다른 지점일 경우 효율적인 환기 제어를 위하여 설치 높이를 조정하여야 한다.
- 3) 환기 및 화재 시뮬레이션 분석에 의한 유해 오염물질의 농도 분포를 고려한 설치 방법을 검토하여야 한다.

(나) 터널 시설물의 영향

- 1) 비상대피소와 같이 공기가 정체될 가능성이 있어 국부적으로 높은 농도분포를 나타낼 우려가 있는 지점은 피하도록 한다.
- 2) 가시도 계측기의 경우 터널벽면으로부터 반사광에 의한 영향을 받지 않도록 충분한 거리를 유지하여야 한다.
- 3) 구조물이나 차량 통행에 의해 계측기의 투과경로(transmission path)에 장애를 받지않도록 하여야 한다.
- 4) 차량 통행에 의한 손상을 받지 않도록 안전한 지점을 선택하여야 한다.

(다) 유지보수

- 1) 보수점검을 위해 접근이 용이하여야 한다. 따라서 가능하다면 안전하고 신속한 보수점검 작업이 가능한 지점을 선택하여야 한다.
- 2) 계측기 측정부의 손상 가능성을 고려하여 가능하다면 터널 자동세척차량의 세척범위 밖에 설치한다.

7.1.2 풍향 · 풍속계

- (1) 터널에 설치되는 풍향 · 풍속계는 0~20m/s 이상 범위의 풍속을 측정할 수 있어야 하며 측정치가 터널 평균 풍향 · 풍속을 대표할 수 있어야 한다.
- (2) 제트팬 환기방식의 터널에서 풍향 · 풍속은 이론적으로 터널 전 구간에서 일정하기 때문에 풍속계의 설치위치는 문제가 되지 않으나, 오염물질 계측기와 함께 설치되어야 유지관리가 용이한 점을 감안하여 터널 중간부 설치를 표준으로 한다.
- (3) 수직갱 환기방식과 같이 구간별 풍속이 달라질 수 있는 터널에서는 환기구간별 1개소 이상에 설치한다.
- (4) 양방향 통행 터널에서는 기류방향 및 풍속이 터널환기에 미치는 영향이 크므로 터널 입출구부에 1대씩 설치하는 것이 바람직하다.
- (5) 터널 단면상 계측기 설치높이는 터널 내 차량주행이 풍향 풍속에 미치는 영향을 감안하여 가능한 평균값 측정이 가능하고, 평상 시 유지관리 용이성을 고려할 때 3.8m 정도가 바람직하다. 그러나 계측기 및 터널단면 특성으로 효율적인 환기제어 목적상 필요 시는 설치높이를 조정할 수 있다.
- (6) 제트팬 종류환기방식이라도 터널 연장이 3,000m 이상으로 길거나, 환기시설이 구간별 독립제어 방식 등을 적용하여 터널 내 풍향 풍속이 달라지는 경우에는 추가적인 계측기 수량을 필요한 위치에 설치할 수 있다.

7.1.3 기타 터널 내 · 외부 계측기

- (1) 종류식 환기방식의 양방향통행 터널의 경우에는 터널 외부 입구부 가까이에서 풍향풍속을 측정하여 팬의 가동방향과 풍량을 제어할 필요가 있다.
- (2) 자연풍에 의한 환기력이 터널 내 기류에 큰 영향을 미치는 터널에서는 외기의 풍향풍속에 의한 환기팬 연동이 필요하며, 이와 같은 경우에 터널 외부용 풍향풍속계의 설치를 고려한다.

- (3) 산악지 장대터널 등에서 환기구간 양단의 대기압차에 의한 자연환기력을 파악할 필요가 있는 경우나 양방향 통행 터널의 경우에는 터널의 양쪽 갱구에 기압계 설치를 검토한다.
- (4) 안개가 터널 내로 유입될 경우 터널 내 부유 입자상 물질에 응집되어 입도가 커지므로 가시도의 급격한 악화를 초래하며 이를 기준으로 환기설비가 작동할 경우 안개의 급속한 유입이 예상된다. 따라서 안개 발생 빈도가 높은 지역에서는 갱구로 유입되는 안개에 의한 피해를 최소화하기 위하여 안개센서의 설치를 검토하며, 설치위치는 갱구로부터 10m 이내가 바람직하다.
- (5) 터널내부에는 시설물관리 목적상 필요할 경우 온·습도계 설치를 고려할 수 있다.



8. 설 계

8.1 설계일반

환기시설은 이 편에 준해서 각 단계에 따라 충분하고 필요한 정밀도를 갖도록 설계하여야 한다.

8.1.1 개 요

환기설계는 2.1절에서 설명한 바와 같이 환기 기본계획 단계, 터널단면과 덕트단면을 결정하는 단계 및 환기시설제원의 설계 단계 등 각 검토 단계마다 다음의 항목에 대해 검토해야 한다.

- (1) 환기량의 설계
- (2) 자연환기의 계산
- (3) 기계환기의 설계
- (4) 환기방식에 의한 환기구분, 환기덕트 및 연결덕트 등의 환기계에 관한 설계
- (5) 환기기기, 관련 전기설비 및 환기소 등의 설계
- (6) 환기운용, 기타사항 검토 및 설계

그러나 각 검토 항목의 내용이나 정밀도는 각 검토 단계에 있어서 검토목적에 따라 다르기 때문에 충분히 검토하여야 한다.

8.1.2 환기계산에 사용하는 단위

힘에 관한 단위를 많이 취급하게 되는데, 국제 표준화 기구 (ISO)의 규격에 있는 SI단위에서는 힘을 N(뉴우톤)으로 표시하고, 압력을 파스칼(Pa = N/m²)로 표시하고 있다. 그러나 기존의 환기에 관한 자료들은 관용적으로 중력 단위계로 표현되어 있는 것이 대부분이지만, 이들을 조합하여 각종 계산

을 행할 때 SI 단위계 힘의 값으로 환산하는 과정은 아직 익숙하지 않으므로, 기존 단위계와 혼란을 고려하여 힘에 관한 단위는 다음과 같은 것으로 사용하기로 한다.

중력 및 힘 : N

압 력 : MPa 또는 Pa

비 중 량 : γ N/m³

밀 도 : ρ N · s²/m⁴

8.1.3 환기계산에 사용하는 기호와 단위

(1) 공간을 나타내는 기호

L [m]		길이
A [m ²]		단면적
D [m]		대표값
첨자	r	교통 공간 (예 A _r)
	b	송기 덕트 (예 L _b)
	e	배기 덕트 (예 D _e)
	d	연락 덕트 (예 L _d)

(2) 교통에 관한 기호

n [대/시]	$n = \frac{N \times L_r}{3600 \times V_t}$	터널 내 차량수
		대상 터널 길이에 있어서의 자동차 대수
V _t [m/s]		평균 주행 속도
첨자	+	교통량이 많은 방향의 교통 (예 n ₊)
	-	교통량이 적은 방향의 교통 (예 n ₋)
γ_L		대형 자동차 구성비
γ_D		디젤 자동차 구성비
A _m [m ²]		자동차 등가 저항 면적
N[대/시]		시간당 교통량
L _r [m]		터널연장

(3) 풍속을 표시하는 기호

U [m/s]		단면 평균 풍속
첨자	r	교통 공간 (예 U_r)
	b	송기 덕트 (예 U_b)
	e	배기 덕트 (예 U_e)
	d	연락 덕트 (예 U_d)
U_n [m/s]		자연 풍속 (터널 내부를 흐르는 바람의 속도)
W_n [m/s]		기상 풍속 (터널 외부에서 들어오는 바람의 속도)

(4) 압력을 표시하는 기호

P [Pa]		압력 (통상 정압을 나타냄)
P_T [Pa]		전(全)압력
ΔP [Pa]		압력차, 압력 손실
첨자	r	교통 공간 (예 ΔP_r)
	b	송기 덕트 (예 ΔP_b)
	e	배기 덕트 (예 ΔP_e)
	d	연락 덕트 (예 ΔP_d)
	t	교통에 의한 것 (예 ΔP_t)
	j	분류에 의한 것 (예 ΔP_j)
ΔP_{MTW} [Pa]		양 갱구간 압력차
ΔP_G [Pa]		터널 갱구와 입갱 등 갱구 사이의 압력차 (입갱 등 갱구 압력을기준으로 함)
P_{TOT} [Pa]		환기기기의 소요 전 압력

(5) 환기량에 관한 기호

Q_T, Q_{CO}, Q_{NOx} [m^3/s]		환기량
q [$m^3/(s \cdot m)$]		단위 길이당 환기량
첨자	b	송기 (예 Q_b)
	e	배기 (예 q_e)
Q_o [m^3/s]		기준 환기량

Q_{req} [m^3/s]	소요 환기량
q_0 [$m^3/(s \cdot km \cdot 대 \cdot h)$]	단위 기준 환기량
G	유해 성분량
g	단위 길이당 유해 성분량
k	보정계수
첨자	i 경사에 의한 것 (예 k_i)
	h 표고에 의한 것 (예 k_h)
K	유해 성분 농도
첨자	CO 일산화탄소 (단위 : ppm) (예 K_{CO})
	VI 매연 (단위 : 1/m) (예 K_{VI})
τ	(%) 매연 투과율 (보통 100m 투과율로 나타냄)

8.1.4 공기 흐름에 관한 설정 조건과 정수

환기에서 다루는 흐름은 국부적으로 보면 비교적 복잡하나, 크게 보면 정상류(定常流)라고 가정해도 실용상 지장은 없다. 또 검토 대상이 되는 유속은 일반적으로 30m/s 이하인 경우가 많아 압축성의 영향은 충분히 무시할 수 있다. 환기의 대상이 되는 터널 내 공기는 차량에서 배출되는 각종유해 가스 및 분진을 포함하여 터널 밖의 신선한 공기와는 약간 조성이 다르지만 이에 따른 공기 성질의 차이는 대부분 무시할 수 있는 범위에 있다.

따라서, 환기 계산은 공기의 흐름에 관하여 다음 조건을 전제로 하여 행한다.

(1) 비압축성 유체

터널 환기에 있어서는 공기의 압축성 영향을 무시하고 비압축성 유체로 간주한다.

(2) 정상류

덕트 및 차도 내 흐름은 시간에 따라 변화가 없는 정상류로 취급한다. 또한 자동차의 교통 환기력에 대해서도 자동차 주행은 정상 흐름이라고 가정한다.

(3) 공기의 성질

환기하는 공기는 송·배기를 불문하고 순수 공기로 간주한다.

따라서, 다음 값으로 사용한다.

비 중 량	$\gamma = 1.2$	kg/m^3
밀 도	$\rho = 0.1224$	$\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$
동점성(動粘性)계수	$\nu = 1.52 \times 10^{-5}$	m^2/s

(4) 벽면 마찰 손실계수와 터널 입구 손실계수

특별한 경우를 제외하고 일반적으로 다음 값을 사용한다.

차도 벽면 마찰 손실계수	$\lambda_r = 0.025$
터널 덕트 벽면 마찰 손실계수	$\lambda_b = \lambda_e = 0.025$
연락 덕트 벽면 마찰 손실계수	$\lambda_d = 0.015 \sim 0.020$
터널 입구 유입 손실계수	$\xi_e = 0.6$

8.2 환기량 산정 설계예

8.2.1 설계조건

- (1) 터널연장 및 경사 : 3000 m, $\oplus 1.0 \%$
- (2) 도로 지형 구분 : 평지 적용
- (3) 설 계 속 도 : $V = 100 \text{ km/h}$ (단, 환기설계상 80km/h)
- (4) 평 균 표 고 : 400 (m), Sea Level
- (5) 터널 내공 단면적 : 74.928 (m^2) ; 확폭단면
- (6) 터널 대표 직경 : 8.77 (m)
- (7) 차로수 : 2차로
- (8) 추정 교통량 [단위 : 대/일]

구 분	승용차	일 교 통 량 (대/일)						합 계 (AADT)
		버 스		트 렉				
		소 형	대 형	소 형	중 형	대 형	특 수	
2021 년	34,704	3,054	3,714	4,194	8,574	3,754	2,006	60,000

(2) 기준배출량

구 분	승용차	버 스		트 럭			
		소형	대형	소형	중형	대형	특수
매연 q_0^T [$m^2/h \cdot$ 대]	-	29,664	172,225	31,536	83,088	208,75	265,84
CO q_0^{CO} [$m^3/h \cdot$ 대]	0.101	0.061	0.652	0.073	0.32	0.721	0.933
NO _x q_0^{NOx} [$m^3/h \cdot$ 대]	0.01	0.025	0.642	0.027	0.315	0.71	0.919

(3) 각종보정계수

구 분		10	20	30	40	50	60	70	80
매연	경사속도보정계수 [f_{iv}]	0.72	0.72	0.88	1.09	1.44	1.44	1.8	2.54
	표고보정계수 [f_h]	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CO	경사보정계수 [f_i]	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
	속도보정계수 [f_v]	0.80	0.84	0.88	0.92	0.96	1.00	1.07	1.13
	표고보정계수 [f_h]	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
NO _x	경사보정계수 [f_i]	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
	속도보정계수 [f_v]	0.17	0.33	0.50	0.67	0.83	1.00	1.50	2.00
	표고보정계수 [f_h]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

8.2.4 소요환기량 산출결과

(1) 매연

주행속도[km/h]	40	50	60	70	80
$q_0^T \times n$	2022.64	1650.94	1403.39	1196.80	1031.64
f_{iv}	1.09	1.44	1.44	1.8	2.54
f_h	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
허용소광계수[m^{-1}]	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006
차로 수	2	2	2	2	2
터널 연장[km]	3	3	3	3	3
환기량[m^3/s]	734	793	787	836	1020

(2) CO

주행속도[km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80
$q_0^{CO} \times n$	20.42	15.31	11.78	9.62	7.85	6.67	5.69	4.91
f_i	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
f_v	0.80	0.84	0.88	0.92	0.96	1.00	1.07	1.13
f_h	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
허용농도[ppm]	100	100	100	100	100	100	100	100
차로수	2	2	2	2	2	2	2	2
터널연장[km]	3	3	3	3	3	3	3	3
환기량[m ³ /s]	413	325	262	224	191	169	153	141

(3) NOx

주행속도[km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80
$q_0^{NOx} \times n$	15.03	11.27	8.67	7.08	5.78	4.91	4.19	3.61
f_i	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
f_v	0.17	0.33	0.50	0.67	0.83	1.00	1.50	2.00
f_h	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
허용농도[ppm]	25	25	25	25	25	25	25	25
차로수	2	2	2	2	2	2	2	2
터널연장[km]	3	3	3	3	3	3	3	3
환기량[m ³ /s]	195	292	337	367	375	382	489	562

8.3 환 기 기 기

환기기는 사용조건에 일치하고, 경제성과 합리성이 확보되도록 계산한다.

환기기는 송풍기·배풍기 및 제트팬 등을 지칭하며, 최근 자원과 에너지 절약을 주목적으로 한 전기 집진기를 부착한 종류 환기방식이 출현하고 있다. 전기 집진기는 차도공간의 오염 공기를 신선한 공기로 교체하는(환기) 것을 목적으로 하는 것은 아니지만, 터널 내 공기 중 매연의 일부를 제거하여 터널

내 환경을 개선하려 하는 것이므로 넓은 의미에서 환기기기라고 말할 수 있어 이 절에서 이를 포함하여 다루기로 한다.

따라서, 이 절은 송·배풍기, 제트팬 및 전기 집진기와 부속장치의 세 항목으로 나누어 설명한다.

(1) 송·배풍기

(가) 송·배풍기의 형식

터널 환기용으로 사용되는 송·배풍기(이하 송풍기라고 한다)는 보통 대풍량, 저풍압이기 때문에 이에 적당한 축류 송풍기를 채용하는 것을 원칙으로 한다.

축류식은 원심식에 비해 소형이므로 관로의 일부로 쉽게 삽입할 수 있고, 효율도 다른 것에 비해 뛰어난 반면, 가격이 비싸고 소음이 크다.

원심식은 압력을 쉽게 올릴 수 있는 형식이므로 풍압이 높아질수록 소형으로 되기 때문에 필요 송풍기 전압이 500mmAq 정도에 달할 때는 축류식과 원심식을 비교 검토할 필요가 있다. 화재 시의 배연 등에 관해서는 축류식일 때 역전 운전법이 채용되어 배기가 비교적 쉽지만, 원심식에서는 덕트 전환을 행하지 않으면 배기 운용이 불가능한 결점이 있다.

〈표 8.1〉은 송풍기의 종류와 특성을 비교한 것이다.

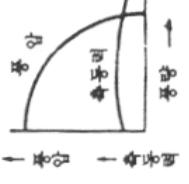
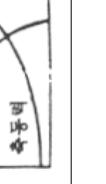
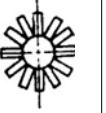
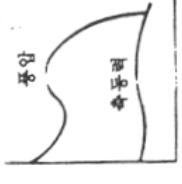
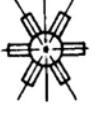
(나) 송풍기의 대수

하나의 환기계(1터널 덕트 또는 1환기 구간)에 송풍기를 1대만 설치할 경우, 그 송풍기가 고장 등으로 정지하면 그 환기계는 완전히 환기 능력을 잃는다. 반면, 하나의 환기에 두세대의 송풍기를 병렬로 설치하면 두 대 중 한 대의 운전으로 65% 정도, 세대 중 두 대의 운전으로 80% 정도의 환기량을 확보할 수 있다.

따라서, 송풍기의 설치 대수는 환기방식과 그 터널의 운용 형태에 따라 다르지만, 일반적으로는 1 환기에 대하여 두세 대의 송풍기를 병렬 설치하므로써 고장 등에 대한 위험을 분산하는 것을 원칙으로 하고 있다. 하나의 환기에 세 대 이상의 송풍기를 병렬 운전할때, 서징 상태라고 부르는 불안정한 송풍기의 운전형태가 출현하는 수가 있고, 병렬 운전대수가 증가할수록 그 경향이 강하다. 현재 공용중인 터널 예에서는 세 대 까지의 병렬 운전 실적과 경험이 있지만 그 이상의 대수에 대해서는 확실하지 않다.

송풍기의 고장 등으로 장기간 환기량이 부족한 상태가 발생할 수 있는 터널에서는 예비기를 준비하는 경우도 있다. 또한 입형 송풍기의 감속기와 날개 바퀴로 구성되는 주요 부분만을 예비기로 준비한 설계 예가 있으며, 상하선 터널처럼 환기계가 2계통일 경우 연락 덕트와 전환장치의 운용에 의해 지원 송풍이 가능하도록 배치하여 대처한 예도 있다.

〈표 8.1〉 송풍기의 종류와 특성

형식	날개배위형상과 주요특성	비속도 Ns	전풍압 mmAq	전압효율	소음	형상 치수	부착 면적	가격	특성곡선
원심식	 터보팬 (기본형)	300~ 750	150~ 1200	65~80	中	大	大	中	
	 터보팬 (날개형)	400~ 800	150~ 1200	75~85	小	大	大	中	
	 레디얼팬	200~ 500	200~ 1500	60~75	中	中	中	中	
축류식	 다익팬	500~ 700	15~ 400	45~65	조금 작음	조금	조금	小	
	 벤축류 팬	1000~ 2000	20~ 700	65~90	大	小	小	大	
	 투브 축류팬	1800~ 3000	0~40	50~65	조금 큼	小	小	大	
	 이중반전 축류팬	700~ 1200	200~ 700	85~90	매우 큼	小	小	大	

여기서, ϕ : 유량계수

ψ : 압력계수

C_m : 날개부를 통과하는 기체의 축류속도(m/s)

U_o : 날개끝 속도(m/s)

Q : 풍량 (m^3/min)

D_o : 날개의 외경 (= 송풍기 지름, m)

ν : Boss 비(Boss 경/날개 외경)

N : 회전수(rpm)

H : 압력수두(m)

P : 전풍압(mmAq)

g : 중력가속도 ($9.8m/s^2$)

γ : 공기의 비중 (kgf/m^3)

이 유량계수와 압력계수는 송풍기의 성능을 송풍기 지름 D_o 와 회전수 N 으로

$$\phi \propto \frac{1}{D_o^3 \cdot N}$$

$$\psi \propto \frac{1}{D_o^2 \cdot N^2}$$

별렬 운전의 조건으로 $\psi = 0.27$ 이하가 안전하고, $\phi = \psi + (0.05 \sim 0.10)$ 가 안정된 특성을 보인다.

보스 비는, $\nu = \sqrt{(1.25 \sim 1.35)\psi}$ 가 무난한 압력을 얻을 수 있는 값이다.

<그림 8.1>의 선도(線圖)는 $\phi = 0.35$, $\psi = 0.27$, $\nu = 0.6$, $A_{kw}/M_{kw} = 0.7$ 일 때의 값을 나타낸 것이다. 그림에서 풍량, 풍압이 주어지면 환기기기의 구성, 회전수, 개략적인 소요동력 등을 알 수 있다.

(b) 송풍기의 동력과 전동기

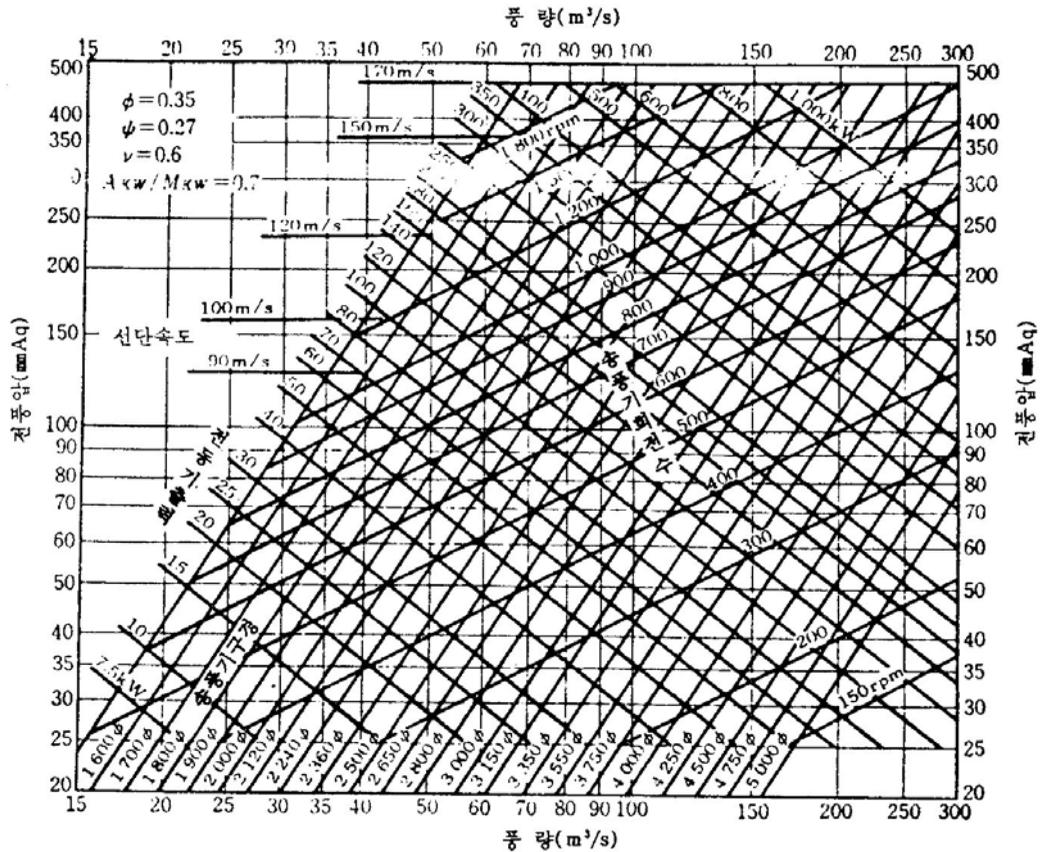
$$A_{kw} = \frac{Q \cdot P_{TOT}}{102} \quad (8.4)$$

$$S_{kw} = \frac{A_{kw}}{\eta} = \frac{Q \cdot P_{TOT}}{102\eta} \quad (8.5)$$

여기서, A_{kw} : 이론 공기 동력 (kW) η : 송풍기 효율 (일반적으로 80%)

P_{TOT} : 송풍기 전 풍압 (mmAq) S_{kw} : 송풍기 축동력 (kW)

Q : 풍량(m^3/s)



〈그림 8.1〉 축류 송풍기 제원 선도

또한 송풍기의 동력은 절대온도에 반비례하고 대기압에 비례하므로 다음 식으로 보정하여 산출한다.

$$S_{kw1} = S_{kw0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t_1} \cdot \frac{P_1}{P_0} \quad (8.6)$$

여기서, S_{kw1} : t_1, P_1 으로 변화했을 때의 축동력

S_{kw0} : $t_0 = 20^\circ \text{C}, P_0 = 760\text{mmHg}$ 일 때의 축동력

t_0, t_1 : 온도($^\circ \text{C}$)

P_0, P_1 : 대기압 (mmHg)

표고에 따른 대기압의 변화는 대류권(對流圈, 표고 11km 이하)에서는 다음식으로 주어진다.

$$P/P_0 = (1 - 0.022557H)^{5.2561}$$

여기서, P : 표고 H km의 기압

P_0 : 표준 대기압 (760mmHg)

전동기의 출력, 입력은 다음 식으로 산출한다.

$$\text{전동기 출력 } M_{kw} = S_{kw1} \cdot (1 + \alpha)$$

$$\text{전동기 입력 } M_1 = M_{kw} / \eta_m$$

여기서, α : 전동기 여유계수 (일반적으로 10%)

η_m : 전동기 효율 (일반적으로 90~95%)

(c) 배풍기의 내열성

터널 환기시설은 터널 내에 자동차 화재 등이 발생하였을 때 대응운용으로 배기운전이 요구된다. 따라서 배풍운전으로 운용되는 수가 많다.

그 때의 연기를 포함한 고온 공기의 온도가 문제가 되나, 일반적으로 100℃까지의 공기온도를 하고, 그로 인한 공기 냉각 설비를 별도로 설치하는 예가 많다.

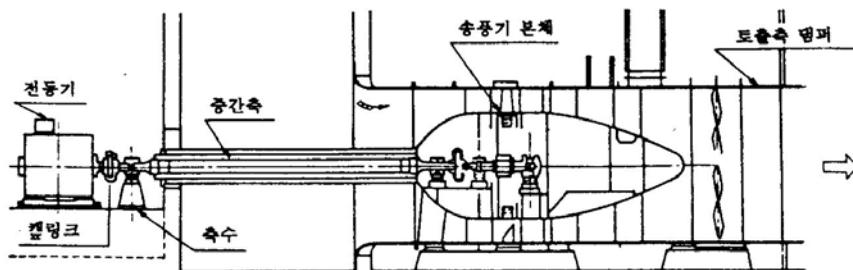
(라) 축류 송풍기 설치와 배치

구조상 가로형과 수직형이 있지만 최근에는 수직형을 채용하는 경향이 있다. 이것은 주로 설치면적을 적게 할 수 있기 때문이다. 그러나 전동기 출력이 클 때는 감속기나 전동기가 원통형에 들어가지 않으므로 가로형을 채용할 수 밖에 없다. <표 8.2>는 이 두 형식을 비교한 것이며, 대표적인 구조도를 <그림 8.2>와 <그림 8.3>에 표시하였다.

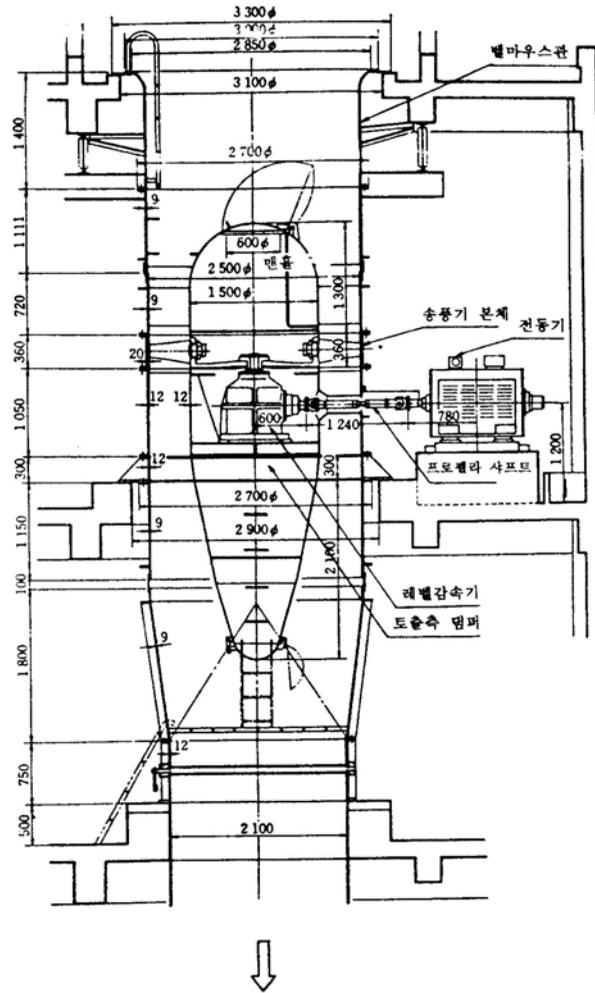
(마) 풍량 제어의 방법과 단계

풍량 제어의 방법에는 다음 종류가 있다.

- 댐퍼(damper) 제어법
- 속도 제어법
- 벤 제어법
- 가변 피치 제어법
- 대수 제어법



<그림 8.2> 가로형 축류 송풍기



〈그림 8.3〉 수직형 축류 송풍기

이것들 중 제어가 용이하여 비교적 효율성이 좋고 저렴한 가격, 또한 전동기의 극수 변경에 의한 속도 제어법과 대수 제어법과의 조합이 많이 채용된다.

터널 환기에 채용되는 각 제어법의 특성에 대하여 상술한다.

(a) 속도 제어법

송풍기의 회전수를 N_A 에서 N_B 로 변환시켰을 경우의 성능변화는 압력비가 작을 경우 다음식으로 나타낸다.

$$\frac{Q_A}{Q_B} = \left(\frac{N_A}{N_B} \right) \quad (8.8)$$

〈표 8.2〉 축류 송풍기에서의 가로형과 수직형의 비교

비교 항목	가 로 형	수 직 형
제 작	케이싱을 상하 반갈림으로 하므로 케이스를 정확하게 원형으로 유지하는데는 약간 곤란하나 중심내기 등의 조절이 쉽다는 이점이 있다.	케이싱은 겹상자식으로 축방향에만 분할하므로 피복프렌지면을 기계 가공하고 정밀도를 높여야 한다.
구 조	① 횡축이 되므로 베어링부 축봉(軸封)장치는 비교적 간단한 것으로 충분하다. ② 송풍기 지름에 대해 전동기 출력이 커도 전동기를 외장으로 하면 제작 가능 범위에 제한이 없다. ③ 전동기 외장일 때는 흡입측 또는 토출측에 곡관부를 만들어야 한다. ④ 송풍기를 옥외에 설치하기가 용이하다.	① 수직축이 되므로 축봉한 부위에서 기름이 새는 것을 방지하기 위해 오일, 시일 등이 필요하다. ② 전동기 내장일 때는 송풍기 안지름보다 전동기 바깥지름이 작지 않으면 제작하지 못한다. 또 베벨기어를 기입하여 전동기를 외장했을 때에도 베벨기어 감속기의 크기를 제한한다. ③ 전동기 내장일 때는 화재 시에 통기온도 및 설치 방법에 따라 특수형이 되고 고가가 된다.
운 반	① 분할 및 현지 조립이 쉬우므로 분할 제작이 가능하며 화재수송이 편리하다. ② 설치 장소에 천정 크레인이 필요하다.	① 전동기 내장일 때는 축방향 길이가 길어서 분해하지 않고 수송할 때 특수 트레일러나 해상 운송이 필요할 때가 있다 ② 전동기 외장형은 축방향 길이가 짧고 일반 화차로 수송될 때가 많다. ③ 설치 장소에 체인 블록에 의한 4점 매달기의 특수 크레인이 필요하다.
설 치 면 적	① 원통을 가로로 눕힌 것같은 되므로 설치면적이 커진다. ② 분해점점의 공간이 필요하다.	① 송풍기 지름보다 약간 큰 설치면적이 있으면 충분하다. ② 송풍기의 배치에 따라 반입로가 필요하다. 단, 이공간은 분해 점점 시의 공간으로 이용된다. ③ 가로형보다 설치면적이 작다
설 치 높 이	지름의 약 3배 이상의 천정 높이가 필요하다.	지름의 2.0~2.5배 정도의 천정 높이가 필요하다. 가로형보다 천정을 낮게 한다.
보 수	① 통 안에 맨홀이 있어 들어가 베어링 점검, 그리스 교환이 쉽게 된다. ② 정기 점검의 분해도, 위 케이싱을 떼어 내면 내장된 각 부분이 노출되므로 점검이 쉬우나, 중심내기 조정에 대해서는 다소 숙련이 필요하다. ③ 운전 중에 가변피치를 하는 것은 1~2년에 한번은 대부분해를 수반하는 정기점검이 필요하나 그 외의 것은 정기점검은 오우버홀을 하지 않고 그리스 교환이나 기타점검을 하면 충분하다.	① 내부점검은 분해하지 않으면 곤란하다. ② 그리스급유도 특별한 장치를 사용하며 베어링 안의 상황을 몰라 그리스를 지나치게 넣어 베어링 사고를 일으키기 쉽다. ③ 베벨기어에 의한 전동기 외장형은 축의 상부에만 관통시키면 기름이 썬 염려도 적고 기름의 감시도 밖에서 가능하다. ④ 3~4년에 한번 큰 분해를 수반하는 정기점검이 필요하다. 이 때 중심내기를 할 필요가 그다지 없으므로 분해, 조립이 비교적 간단하다. ⑤ 베어링 온도, 감소기 기름 온도, 기름면은 송풍기 밖에서 감시한다.

〈표 8.3〉 풍량 제어방식의 비교

구 분	댐퍼 제어		속도제어 (극수변경)	속도제어 (무단계)	벤 제어	가변피치 제어	대수 제어
	토출측	흡입측					
효율(전동기 효율성 포함함)				양		양	
구조의 용이성	①	①	④	⑤	③	⑤	②
조정범위의 크 기	소	중	대	대	중	대	중
가 격	저	저	고	고	저	고	

(주) 표 중의 숫자는 순위를 나타낸다.

$$\frac{P_A}{P_B} = \left(\frac{N_A}{N_B} \right)^2 \tag{8.9}$$

$$\frac{L_A}{L_B} = \left(\frac{N_A}{N_B} \right)^3 \tag{8.10}$$

여기서, Q : 풍량(m³/s)

P : 풍압 (mmAq)

L : 축동력(kw)

N : 회전수(rpm)

관로계의 저항이 풍량이 제곱으로 변화하는 계에선 <그림 8.4>처럼, 송풍기는 회전수 변화로 넓은 범위의 풍량을 조절할 수 있으며, 상당히 높은 효율로 작동할 수 있다. 단, 회전수의 변화가 커지면 레이놀즈수가 다르고, 특히 레이놀즈수 2×10⁶ 이하에서는 급격하게 효과가 떨어진다.

(b) 전동기의 속도 제어법

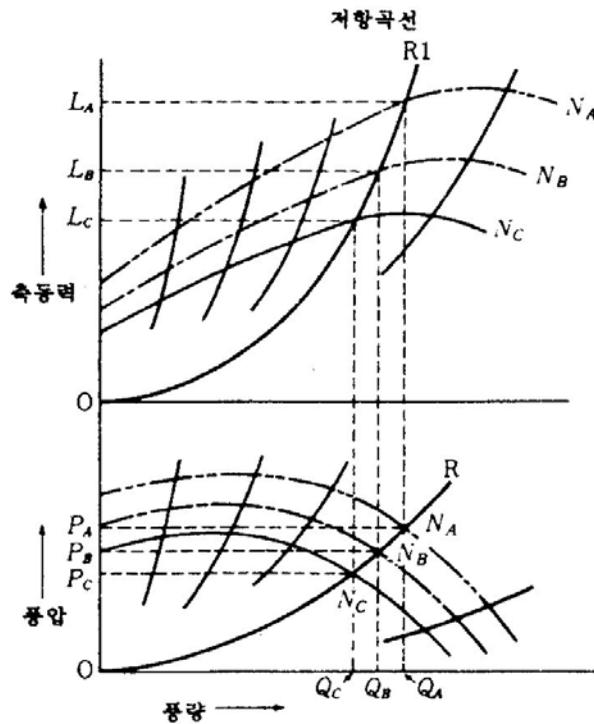
속도 제어법은 송풍기의 풍량 조절에 매우 적절하나, 실제의 경우 구동 전동기의 회전수를 바꾸는 일은 쉽지 않다. 터널 환기의 경우 회전수를 바꾸는 방법을 열거하면 다음과 같다.

① 무정류자(無整流子) 전동기 (사이리스터 모터, thyristor motor)

최근, 브러시와 정류자에 의한 기계적 정류기구를 없애고, 높은 범위의 속도제어가 가능한 사이리스터 모터가 반도체 응용기술을 토대로 개발되어 터널 환기에 채용되고 있으나, 고가인 점이 단점이다.

② 극수 변동 전동기

유도 전동기의 극수를 2단 또는 3단으로 바꾸는 방법은 가격도 비싸지 않고 비교적 간단하지만, 회전수의 변화가 극수에 의해 제약을 받기 때문에 단계적인 제어로 된다.



〈그림 8.4〉 속도 제어 작동도

이 극수의 전환 방법으로는,

- 동일 철심상에 극수를 다르게 하는 2조 이상의 독립된 코일을 설치하는 방법
- 한 조의 코일 밖에 설치하지 않으나, 도중에 사이 선을 내어 코일을 꺾이음으로써 극수를 바꾸는 것 등이 있다. 전자는 다단 속도 전환에 이용되고 후자는 속도비가 2 : 1 일경우에 이용된다.

③ 코일의 유도 전동기

전동기의 2차 회로에 저항을 삽입하여 회전수를 바꾼다. 속도제어는 60~70% 정도까지 회전수를 올릴 수 있지만, 2차 저항에 의한 열손실을 수반하므로 전동기의 효율은 떨어진다. 집전환 및 외부 저항을 필요로 하므로, 유지 관리 측면에서 난점이 있다.

④ 유체 이음매

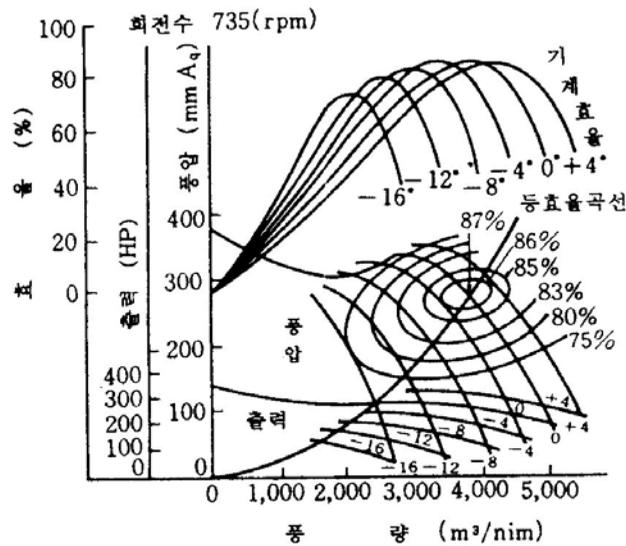
정속 전동기와 송풍기 사이에 유체이음매를 삽입하여 회전수를 바꾼다. 이 방법은 제어 범위는 조금 넓지만, 회전수가 낮아짐에 따라 효율이 나빠짐과 동시에 부하 변동에 대해 회전이 불안정하게 된다. 단, 유체 이음매를 사용하면, 기동이 원활하게 되고, 무리한 충격과 진동을 흡수할 수 있는 장점이 있다.

⑤ 유압모터

유압식의 오일모터를 사용할 경우에는 기름탱크, 펌프 구동용 진동기를 필요로 하나, 속도제어 및 역회전이 가능한 장점이 있다.

(c) 축류 송풍기의 가변 피치 제어법

날개바퀴(動翼)의 날개 설치각을 바꾸어 풍량 조절을 행하는 방법을 가변 피치 제어라 한다. 일정 회전 운동 상태로 날개 바퀴 각도를 바꾸면, 축류 속도와 영각이 변하여 다른 모든 제어보다 부분 부하에서의 효율이 좋고 동력비가 적게 든다. <그림 8.5>는 가변 피치특성의 예를 나타낸 것이다.



<그림 8.5> 가변 피치 특성

날개 바퀴의 가변 피치 방식은, 그 조작 방법에서 다음 세 종류로 나눌 수 있다.

- ① 정지 시에 한 장씩 날개 각도를 변경하는 방법
- ② 정지 시에 일제히 날개 각도를 변경하는 방법
- ③ 운전 중 가변 피치로 하는 방법

일본의 경우 개량 전에 만든 터널용 송·배풍기, 텐노우산, 타대하라 터널용 송풍기기는 개량 전의 카스께간 터널용 송풍기에서 ③ 종류가 채용되어 있지만, 180° 가변피치로 되기 위한 구조가 복잡하다는 등의 이유로 다른 곳에 설치된 예는 적다.

최근, 40° 정도의 가변 피치 범위이지만 구조가 비교적 단순한 범용타입의 가변 피치팬과 그 유사 기계의 송풍기를 사용한 예가 있다.

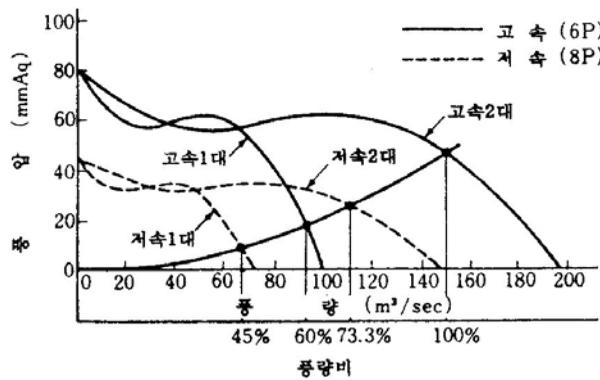
(d) 대수 제어법

환기기기 몇 대를 한 조로하여 병렬운전을 행하는 것으로, 최대 풍량 시에 전체 병렬운전으로 하여 풍량 조절을 대수로 나타내는 방법이다. 효율은 나쁘지만 간단히 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 단, 병렬운전은 일반적으로 두세 대까지가 한계이다. 네 대 이상일 경우, 소풍량 시에서 효율이 현저히 떨어지므로 피하는 것이 좋다.

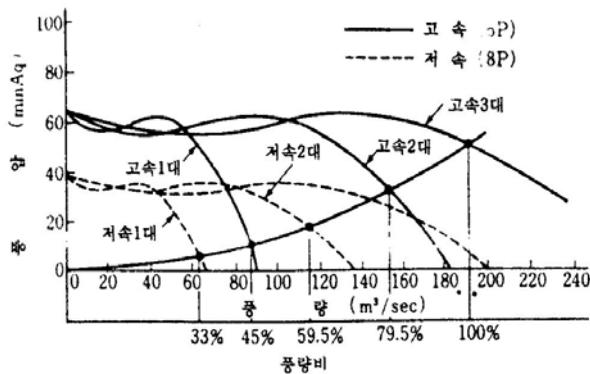
(e) 풍량 단계 결정

풍량 단계를 결정하는데 일교통량의 시간별 변화를 조사하여, 각 단계를 결정할 필요가 있다. 터널환기는 그 대상물(터널 내 유해 물질 희석)의 적응성이 완만하므로 너무 세밀한 풍량 단계는 무의미하며 제어성도 나빠진다.

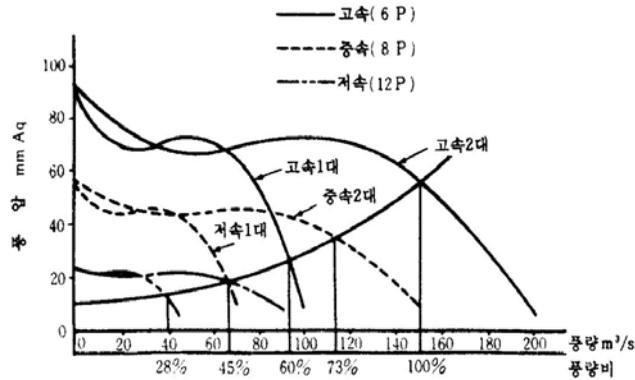
풍량 단계는 대수와 속도의 조합에 따라 몇 단계를 설치하지만, 그 대수는 보통 2~3대, 속도는 2~3 종류 정도이다. 그 조합 예를 들면, <그림 8.6>은 두 대 · 2 속도일 경우, <그림 8.7>은 세 대 · 2속도일 경우, <그림 8.8>은 두 대 · 3속도일 경우를 나타낸 것이다.



<그림 8.6> 병렬 운전 작동 선도 (2대 2속도)



<그림 8.7> 병렬 운전 작동 선도 (3대 2속도)



〈그림 8.8〉 병렬 운전 작동 선도 (2대 3속도)

이들 그림에서 제어 단계(노치, notch)를 선택할 경우는 소비동력을 충분히 고려하여야 한다. 예를 들면, 〈그림 8.6〉의 두 대 · 2 속도일 경우 송풍기와 소비 동력과의 관계를 표현한 것이 〈표 8.4〉이다. 이러한 결과로 되었을 때, 고속 1 대의 제어 단계를 선택하지 않아도 된다.

〈표 8.4〉 송풍량과 소비 동력(2대 2속도의 경우)

고 · 저속 운전대수	회전수	송 풍 량	축 동 력
고 속 2 대	100%	100%	100%
고 속 2 대	75%	73.3%	42%
고 속 1 대	100%	60%	43%
저 속 1 대	75%	45%	18%

(f) 전동기의 역전

환기기기를 평상 시 송풍기로 사용하던 것을 화재 등에 배기용으로 사용하는 경우가 있다. 이때 전동기의 역전이 이루어진다. 삼상유도 전동기는 고정자 모양을 변환시킴으로써 회전 궤도를 역전시켜 전동기를 역전시킬 수 있다. 급속하게 역전시킬 경우 브래킹 제동을 걸어 전동기를 그대로 역전시키는 경우가 있다. 이때 제동력이 크게 작용하고 절단할 때는 전류가 커지므로 주의가 필요하다.

사이리스터 모터로는 점고(点菰) 순서의 절단에 의해 용이하게 역전이 가능하고 역전할 때 전류는 억제된다.

(바) 송풍기의 소음

송풍기의 소음은 일반적으로 식(8.11)에 의해 추정할 수 있고, 이 식에 근거하여 계산값을 〈그림 8.9〉와 〈그림 8.10〉에 나타내었다.

$$L_A = L_{SA} + 10 \log_{10} Q \cdot P^2 \quad (8.11)$$

여기서, L_A : 소음 레벨 (dB(A))

L_{SA} : 비소음 레벨 (dB(A))

Q : 풍량 (m^3/min)

P : 전풍압(mmAq)

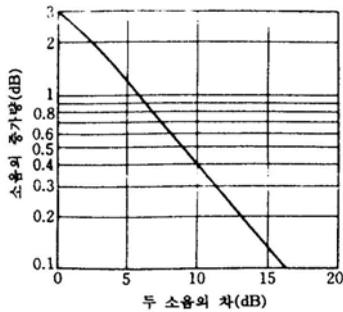
축류 송풍기에서는 $L_{SA} = 30$ dB(A) 정도로 채용하면 된다. 또, 기본 주파수는 다음 식으로 구할 수 있고, 이 기본 주파수 1, 2, 3 배의 주파수로 현저한 최대 값을 발생하는 것이 보통이다.

$$F = \frac{N}{60} \cdot Z \quad (8.12)$$

여기서, F : 기본주파수(Hz)

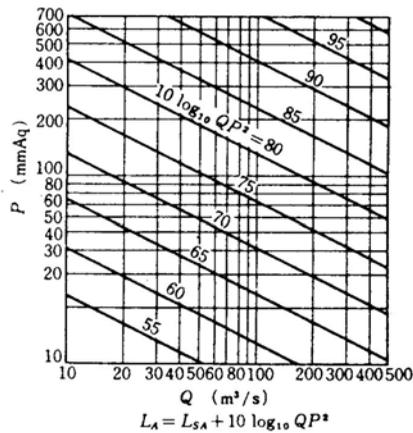
N : 송풍기의 회전수 (rpm)

Z : 날개수



기 종	비소음 레벨
	LSA + (dB(A))
터보역풍기	14~26
익형역풍기	4~19
다익역풍기	13~23
축류역풍기	21~38

〈그림 8.9〉 각종 송풍기의 소음



〈그림 8.10〉 두 소음의 합성 계산도

(2) 제트팬

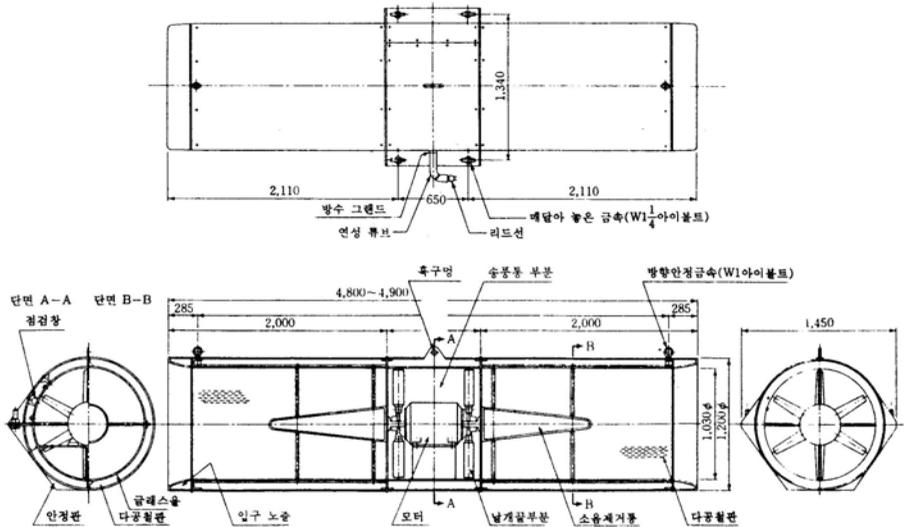
(가) 구조

제트팬의 일반적인 구조 예를 <그림 8.11>(a)와 <그림 8.11>(b)에, 현재 사용되고 있는 제트팬의 표준적인 값을 <표 8.5>에 나타내었다. 이 외에도 현재 400형이 있다. 제트팬의 성능 곡선 예는 <그림 8.12>에 나타내었다.

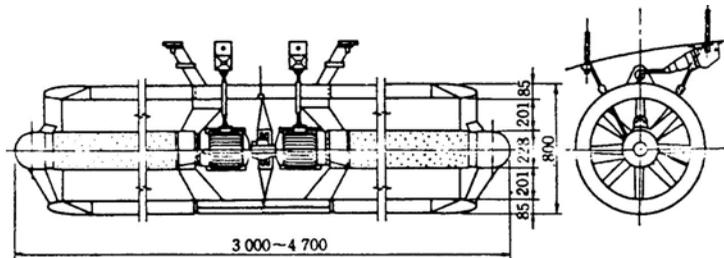
이미 설치되어 있는 터널 등에 설치할 때는 충분한 공간을 확보하지 않을 경우 400형~600형의 제트팬을 사용하든지 터널일부를 넓힐 필요가 있다.(이 때는 분류효율이 떨어지지 않도록 주의한다.)

(나) 설치방법

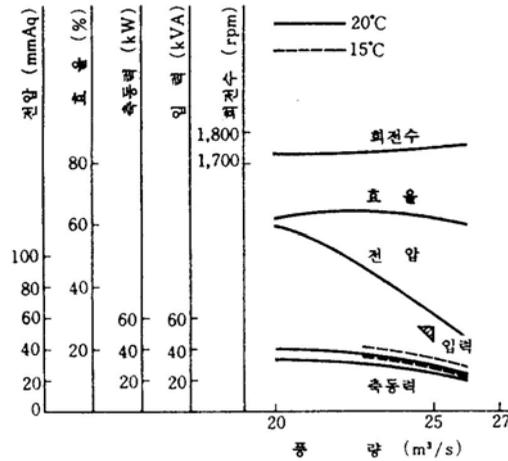
제트팬의 설치 방법에는 고정식과 자유 매달기식이 있으며, 이 두 방식 중에서 적절하게 선정하도록 한다 (<그림 8.13>). 설치 때에는 기초 볼트를 포함하여, 제트팬 본체의 유지 강도는 실제 하중의 15배 이상을 취한다. 기초 볼트는 제트팬의 설치 전에 재하 시험이나 인발시험을 할 필요가 있다.



<그림 8.11>(a) 1000형 제트팬의 구조도 예



<그림 8.11>(b) 600형 제트팬의 구조도 예



〈그림 8.12〉 1000형 제트팬의 성능 곡선(60Hz)

〈표 8.5〉 제트팬의 사양 예

형 식 구 분		JF-600	JF-1,000	JF-1,500	BF-1,500
송 풍 기	안지름 (mm)	630	1,030	1,530	1,530
	송풍기 평균 풍속(m/s 이상)	30	30	30	30
	효 율 (%) 이상	60	60	65	70
	소 음(dB(A)이하)	90	95	98	93
	전 체 길 이 (mm)	3,000	4,900	5,500	4,250
	바 깔 지 림 (mm)	800	1,200	1,750	1,750
	송풍량 (m ³ /s 이상)	8	25	55	55
	유효 토출 면적(m ²)	0.27	0.83	1.84	1.84
송 풍 방 향		양방향	양방향	양방향	한방향
전 동 기	전 압 (V)	440/440	440/440	440/440	440/440
	출 력 (kw 이하)	11	30	55	50
	정 격	연 통	연 통	연 통	연 통
	절연종별(이상)	F종	F종	F종	F종
개략중량(kg)		600	1,300	2,700	2,100

(다) 제 어

제어는 대수에 의한 단계제어를 표준으로 하고 회전수제어는 하지 않도록 한다. 자연풍압이 클 때는 역전제어도 고려할 필요가 있다. 그러나 실제로 제트팬은 단시간에 역전하여도 터널 내 공기는 관성 때문에 역전시간이(오푸다 터널의 예) 소요되기 때문에 그 동안 오염 공기가 축적되어 좋지 않은 상태가 된다. 따라서 역전은 자주 하지 않도록 한다.

8.4 환기 덕트

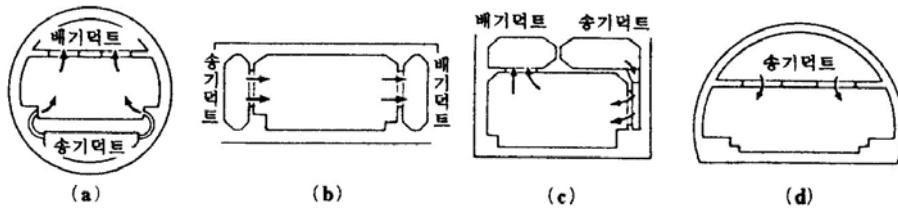
환기 덕트는 공기 역학적으로 합리적이고 건설비, 유지비 등을 고려하여 경제적인 설계가 되도록 한다.

환기 덕트는 터널 덕트와 연락 덕트로 구분된다.

(1) 터널 덕트

터널 덕트는 터널에 따라서 설치하는 덕트를 가리키며, 횡류 환기 방식과 반횡류 환기방식에 사용된다. 터널 덕트에는 급기 덕트와 배기 덕트가 있고 각각 급·배기공이 설치된다.

〈그림 8.13〉은 터널 덕트의 배치 예를 나타낸 것이다.



〈그림 8.13〉 터널 덕트 배치 예

환기 방식과 환기량이 정해지면, 터널 덕트가 부담하는 송기량이나 배기량을 계산할 수 있다. 이 때 1 환기 구간을 길게 하면 터널 덕트 단면적이 커져 건설비가 많이 드는 경향이 있으므로 터널 덕트 분할 수와 단면적의 관계를, 터널 입지 조건, 지형 조건 등의 여러 가지 요소에 대하여 충분히 검토하여 경제적으로 설계해야 한다. 따라서, 1 환기 구간 길이란 횡류와 반횡류 환기식의 경우는 1 터널 덕트 구간으로 구분되고, 다른 터널 덕트 구간과 풍량 제어를 독립적으로 실시할 수 있는 구간의 길이를 말한다. 종류 환기 방식의 경우는 차두 간격의 공기가 교체되는 구간을 1 환기 길이로 보면 된다. 경제 설계의 구체적인 순서는 다음과 같다.

(가) 환기계 비교안의 입안

덕트 구분수, 덕트 단면적 (덕트 풍속 변함) 및 관련 연락 덕트를 계획하여 입안한다.

(나) 각 비교안의 소요동력 상정 및 비교 항목에 대한 설비 계획

각 비교안에 대하여 설계조건에 맞는 개략적인 소요 풍압을 산정하고, 송풍기 등에 관한 개략적인 사양과 소요동력을 상정한다. 다음으로 환기소와 전기 설비 등에 대하여 각 비교안별 차이점을 명확히 하고, 건설비 상정의 자료가 되는 것을 계획한다.

(다) 각 연도별 유지비 상정

각 비교안별 유지비의 차이는, 대부분의 경우 전력비의 차이로 나타나는 일이 많으므로, 주로 전력비의 추이를 상정한다.

(라) 경제성 비교

각 비교안에 대하여 건설비(터널 본체공, 입갱, 천정판 등의 덕트공, 환기소, 환기기기 설비, 전기 관련 설비 등)를 상정하고, 경과 연도를 고려하여 다음 식에 따라 총 비용을 산출하여 경제성을 비교한다.

$$C = C_B(1+r)^Y + \sum_{n=1}^Y C_E(1+r)^{Y-n} \quad (8.13)$$

여기서, C : 총 비용

C_B : 건설비

r : 연이율

Y : 경과 연도

C_E : 유지비(연간 전력비)

(2) 연락 덕트

연락 덕트는, 횡류 환기 방식 및 반횡류 환기 방식에 대해서는 터널덕트와 환기소를 연락하는 덕트를, 종류 환기 방식에 있어서는 본갱과 환기소를 연락하는 덕트를 말하며, 지하 환기소 방식에서는 환기소와 대기공간을 연락하는 입갱도 연락 덕트에 포함된다.

환기기기의 소요 풍압을 산출할 때 환기소 내 각종 덕트의 압력손실을 환기소 내 압력손실이라고 칭하는 경우도 있지만 모두 연락 덕트로 취급된다. 연락 덕트의 압력손실은 덕트 길이에 비례하는 마찰 손실에 의한 것 뿐만 아니라 덕트의 변형(휨, 확대, 축소, 분기, 합류 등)에 의한 것도 고려해야 한다. 연락 덕트의 단면적, 길이, 변형 등에 대한 계획 시에도 터널 덕트와 같은 방법으로 경제성을 비교할 수 있다.

(3) 환기 덕트에 관한 일반적 유의 사항

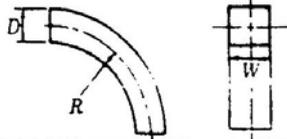
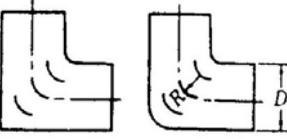
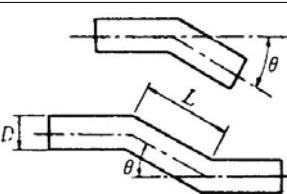
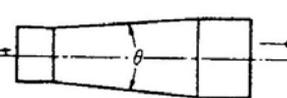
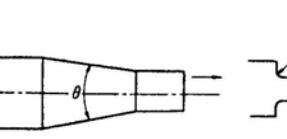
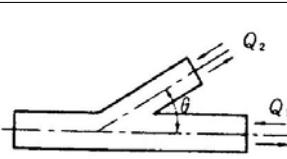
(가) 환기 덕트 설계 시에는 일반적으로 다음 사항에 유의해야 한다.

(a) 마찰 저항을 작게 하기 위해 내면을 평탄히 할 것

(b) 환기 덕트의 단면 형상, 특히 변형 부분의 형상을 결정할 때에는 <표 8.6>에 제시한 주의 사항을 충분히 감안할 것

- (c) 갱구나 배기구에서 배출된 터널 내 오염 공기와 환기기기를 손상하는 이물질이 흡기구로 흡입되지 않을 것
- (d) 콘크리트 시공에 있어서 완성 값이 설계 값보다 작게 하지 않을 것
- (e) 한랭지에서는 결빙에 의한 덕트 단면적(특히 흡·배기구 단면적)의 축소가 없을 것

〈표 8.6〉 각종 덕트의 변형부

	덕트 변형부	주의 사항	비 고
휨		<ul style="list-style-type: none"> ○ $R > 1.6D$인 경우 가이드베인을 붙이지 않아도 된다. 단, 휨 후의 흐름은 편류한다. 	
휨		<ul style="list-style-type: none"> ○ $R < 1.6D$인 경우 코너 베인을 붙이면 손실이 적어지고 편류도 적어진다. ○ 휨 내측은 반드시 환미(丸味)를 붙인다. ○ 휨 외측의 환미는 없어도 된다. 	각형 베인이 붙은 것은 〈그림 8.18〉을, 이형 베인이 없는 것은 〈그림 8.17〉를 참조
굴절		<ul style="list-style-type: none"> ○ $\theta > 30^\circ$의 굴절은 가능한 한 피한다. 연속 굴절에서는 L/D 및 θ를 적당히 선택하면 손실을 매우 적게 할 수 있다. 예를 들면 $\theta = 30^\circ$의 경우, $L = 3D$가 가장 좋다 	각형 베인이 없는 것은 〈그림 8.16〉 참조. 연속(베없음)은 〈그림 8.24(a), (b)〉를 참조
확대		<ul style="list-style-type: none"> ○ $\theta = 6 \sim 10^\circ$가 가장 좋다. $\theta = 60 \sim 70^\circ$에서 손실이 최대가 되므로, 이때는 오히려 $\theta = 180^\circ$의 급확대 쪽이 좋다. 	〈그림 8.25〉, 〈그림 8.26〉 참조
축소		<ul style="list-style-type: none"> ○ 급축소는 피한다. $\theta < 60^\circ$이면 좋다. 또 $\theta > 60^\circ$의 경우 벨마우스형으로 하면 손실이 적어진다. 벨마우스의 반지름은 0.1D 이상이 좋다. 	" 이상적으로 0.3D 정도
분기·합류		<ul style="list-style-type: none"> ○ 분기, 합류 손실은 풍량비 Q_1 / Q_2 및 면적비에 따라 다르므로 한마디로 말할 수는 없지만, θ는 가능한 한 작게 한다. 	

- (f) 송풍기의 직전 흡입측 덕트는 편류, 선회류가 일어나지 않도록 형상에 주의할 것, 예를 들면, 90° 굽음이 있을 경우, 반드시 코너 제트팬을 넣을 것

- (g) 환기소 내의 연락 덕트는 풍량 제어 방식, 비상 시 운전 방식 등을 충분히 고려하여 그 형상과 교환방식을 결정할 것
- (h) 배풍기를 터널 화재 시에 운전할 때 공기 냉각용 설비로, 일반적으로 물분무 장치를 배기 덕트 내에 설치할 것
- (나) 환기 덕트 내에는 조명 설비, 비상용 시설 등의 기기, 배관 등이 수납되는 일이 많으므로 이들 시설의 보수 점검에 필요한 맨홀, 계단, 조명 등의 설비를 설치한다. 또, 환기 덕트 내에 침입한 물의 배수에 대해서도 고려한다.
- (다) 터널덕트는 <그림 8.13>처럼 차도 위쪽이나 아래쪽 또는 옆쪽에 설치되어 있어 손상했을 경우 보수, 교체는 매우 곤란하다. 터널 덕트 설계에 있어서는 특히 내구성을 중시할 필요가 있다. 또 누풍이 있으면 계획된 환기가 불가능하므로 유해한 누풍이 없는 구조물로 해야 한다.
- 차도 위쪽에 터널 덕트를 설치할 경우 강판, 경량기포(氣泡) 콘크리트판(ALC판), PC 판 및 RC구조 등이 이용된다. 각각 장단점이 있으므로 터널 마다의 여건을 고려하여 선정할 필요가 있으며, 구체적인 지침으로 다음 항목들을 참고하면 좋다.
- (a) 구조 일반
천정판의 구조는 마찰 저항이 적고 기밀성, 내식성이 우수하고 소정의 강도를 지니며 경제적인 것
- (b) 설계 하중
사하중(死荷重) : 완성재를 포함한 재료의 자중
활하중(活荷重) : 풍하중(환기 계획에 의해 얻어지는 송·배풍 시의 최대 풍압) 및 인하중 (人荷重) (100kg/m^2)
- (c) 휨
사하중 및 풍하중, 인하중 어느 것이나 큰 하중을 재하했을 경우, 휨량은 스팬의 1/500 이하로 한다.
- (d) 구조 값
천정판의 두께는 100mm이하를 표준으로 한다.
단, 터널 조명 기구를 천정판 내에 설치할 경우에는 조명기구의 두께를 고려하여 150 mm까지 두께를 늘려도 된다. 터널 덕트 단면에 여유가 있고 비교 검토 결과 두께를 늘리는 쪽이 경제적일 수도 있다.
- (e) 차도 아래쪽이나 차도 옆쪽에 터널 덕트를 설치할 경우 상판 또는 측벽은 도로교 설계 시방서에 따라 설계해야 한다.
- (f) 터널 덕트용 재료에 금속, 특히 강재를 사용할 경우에는 녹 방지를 충분히 고려하여 적당한 녹 방지 조치를 강구한다.

(라) 터널 덕트에는 풍량조절이 가능한 송·배기공을 설치하지만, 그 면적 및 간격은 다음 값을 표준으로 한다.

(a) 송기공

송기공의 면적은 최대 환기량일 때 전개(全開) 송기공에서 뿜어내는 풍속이 6~8m/s 정도가 되게 선택하며, 송기공의 간격은 5m를 표준으로 한다.

터널 덕트에서 직접 차도로 뿜어내면 환기기기의 거리에 따라 뿜어내는 속도가 다르지만 후류를 설치하여 일단 후류로 분출하도록 하면, 차도로의 분출 풍속은 거의 일정하다.

(b) 배기공

배기공의 면적은 최대 환기량일 때 전개 배기공에서 흡입풍속이 4m/s 이하가 되게 선택하며, 배기공의 간격은 송기공 간격의 두 배를 표준으로 하고, 그 위치는 송기공 간격의 중앙에 배치한다.

(마) 환기기기를 두 대 이상 병렬운전할 경우는 환기기기 앞 또는 뒤에 개폐장치를 설치한다. 개폐 장치에는 다익(多翼)댐퍼, 호형(戶形)댐퍼, 셔터 등이 있지만 일반적으로는 다익댐퍼를 이용한다. 댐퍼는 환기기기의 운전, 정지와 연관하여 개폐하고, 공기 누출이 적은 구조로 한다.

또, 환기계가 두 계통 이상일 때 경우 비상 시 및 환기계의 수리 등으로 1환기계에서 다른 환기계로 풍량을 배분 또는 전환할 필요가 있을 경우에는 전환장치를 설치하는 것이 좋다. <그림 8.14>는 그 예를 나타낸 것이다.

(4) 각종 덕트의 손실계수

각종 덕트 형상에 따른 압력 손실은 다음에 기술한 각 손실계수를 이용하여 구할 수 있다. 덕트의 변형이 연속되어 있을 때는 이에 의한 축소 흐름과 여유를 고려하여 손실값으로 처리하는 경우 있는데, 이 때에는 실험 등으로 구체적인 손실 값을 확인해야 한다.

(가) 직관(直管) 마찰 손실

마찰에 의한 압력 손실은 ΔP , 마찰계수를 λ , 관의 길이를 L , 대표지름을 D , 공기의 밀도를 ρ , 관 내의 평균 흐름 속도를 U 라 하면,

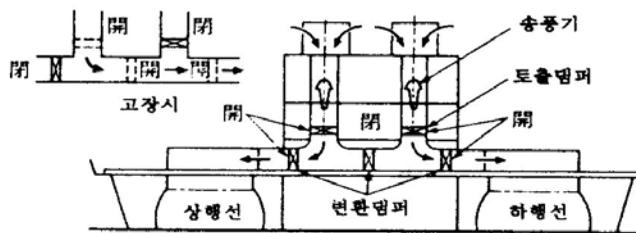
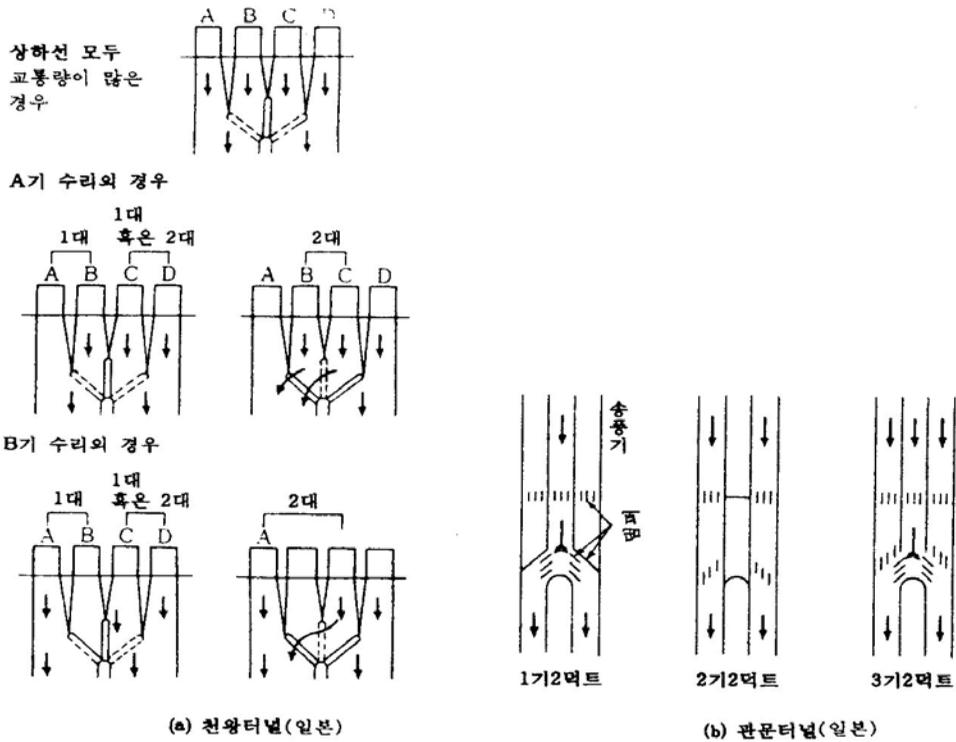
$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho}{2} U^2 \quad (8.14)$$

λ 의 값에 대하여 여러 가지 측정을 해왔으나 벽면의 상대조도 δ/D (평면벽면조도 δ 와 대표지름 D 의 비)와 레이놀즈수 $R_e = \frac{U \cdot D}{\nu}$ (ν 는 동점성(動粘性)계수)와의 관계로 정해진다.

일반적으로 환기계에서 레이놀즈수는 커서 $10^5 \sim 10^8$ 정도일 때가 많으므로 대부분 난류영역에 속

하며 λ 는 거의 δ / D 만으로 정해진다. λ 가 레이놀즈수에 관계되지 않는 영역에서 관을 마찰계수는 λ 에 대한 계산도표 <표 8.7>을 이용한다.

따라서, 대표지름 D , 평균 벽면조도 δ 와 D 의 비 δ / D 및 λ 의 관계를 표시하면 <그림 8.15>과 같다. δ 의 각종 값은 <그림 8.15>에 병기(竝記)하였다. 이것에 따르면 보통의 콘크리트 덕트에서는 $\lambda = 0.015 \sim 0.025$ 가 많이 이용된다.

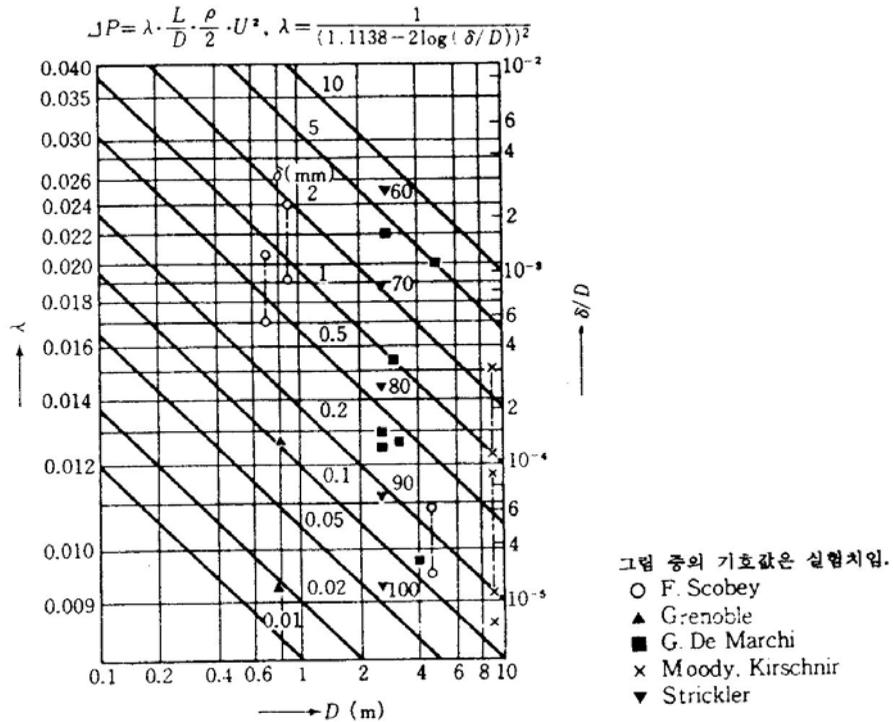


(c) 清見寺 터널

<그림 8.14> 덕트전환 장치 설치 예(일본)

<표 8.7> 벽면 조도 δ

δ (mm)	시 공 방 법
0.01~0.05	실험실 값
0.10~0.20	기름을 도포하여 금속형 틀로 시공하는 경우 (시멘트 모르타르, 숏크리트, 아스팔트 시멘트 관)
0.20~0.30	금속성 틀 (손질이 잘됨)
0.20~0.80	목재형 틀로서 중형으로 결이 있는 경우, 시멘트 모르타르
0.80~2.00	결이 거친 시멘트 벽
2.00~10.00	특히 거친 면



<그림 8.15> 관의 마찰계수 계산도

원 이외의 단면을 갖는 덕트에서는 일반적으로 대표 지름(등가의 원관 지름)을 다음 식으로 계산한다.

$$D = \frac{4 \times \text{관 단면 면적}}{\text{관 단면의 둘레 길이}} \quad (8.15)$$

또, 직사각형 단면에서는 일반적으로 다음 식을 이용한다.

$$D = \frac{2a \cdot b}{a + b} \quad (8.16)$$

여기서, a와 b는 직사각형 단면의 긴변과 짧은 변의 길이이다. 식(8.15-8.16)에서 구한 D값을 식(8.14)에 대입한다.

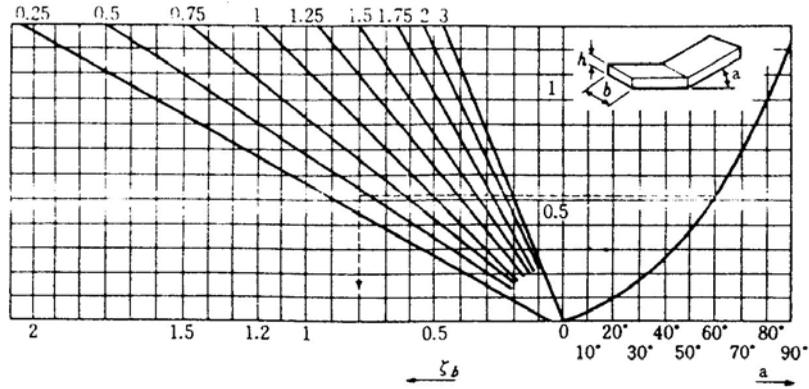
(나) 곡관과 굴절관의 손실

힘에 의한 손실을 ΔP_b , 손실계수를 ξ_b 라 하면

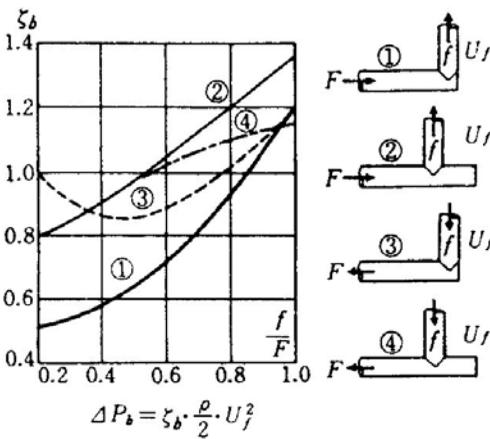
$$\Delta P_b = \xi_b \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \tag{8.17}$$

로 표시된다.

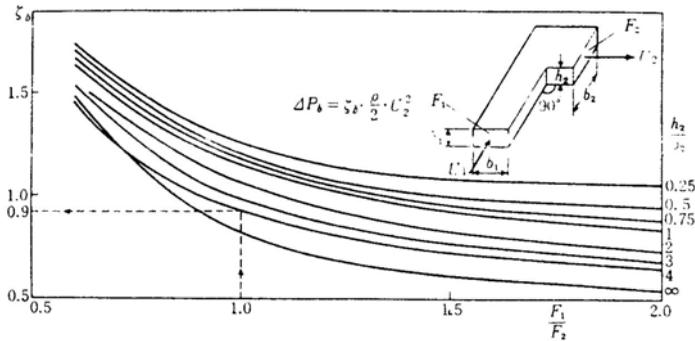
직사각형 굴절관의 힘 손실계수 ξ_b 는 <그림 8.16>에서 구한다. 또 원형 및 직사각형의 변형 단면적 굴절관의 힘 손실계수 ξ_b 는 <그림 8.17>(a), (b)에서 구한다.



<그림 8.16> 직사각형 굴절관의 힘 손실계수 ξ_b



<그림 8.17>(a) 변형 단면 굴절관의 힘 손실계수 ξ_b

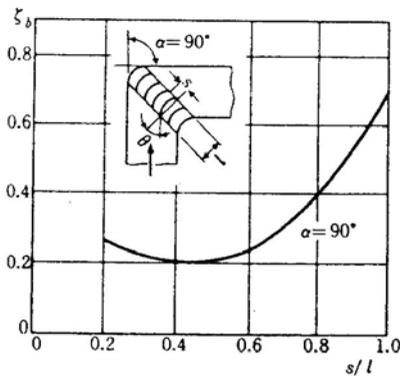


F_1, F_2 : 단면적

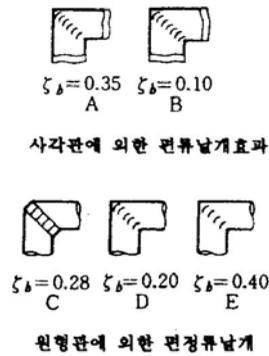
〈그림 8.17〉(b) 변형 단면 직사각형 굴절관의 힘손실계수 ξ_b

(다) 도입날개 달린 곡관 또는 굴절관

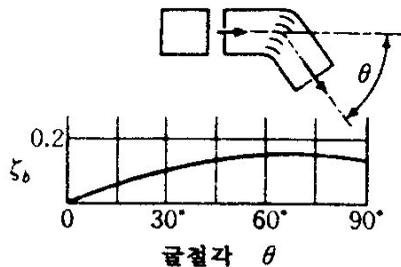
〈그림 8.18〉은 90° 로 기운 방향의 2 차원 날개별 현마디비 s/l 와 손실계수 ξ_b 의 관계를 표시한 것이며, 〈그림 8.19〉은 도입 날개 형상이 변할 때 원형과 사각형 굴절관의 ξ_b 를 나타낸 것이다. 적당한 편류날개를 사용한 정사각형 단면이 급격히 휘게 되면 휨각 θ 와 ξ_b 의 관계는, 0가 작을 때 ξ_b 는 대체로 0에 비례한다. ξ 가 $60^\circ \sim 90^\circ$ 의 범위에서 ξ_b 는 많이 변하지 않으며, 휨각의 상대 값 결정은 〈그림 8.20〉을 이용한다.



〈그림 8.18〉 가이드 벤 손실계수



〈그림 8.19〉 둥근것과 각에 대한 편류날개효과



〈그림 8.20〉 편류 날개를 이용한 급곡관의 각 θ 와 ξ_b 의 관계

〈그림 8.21〉는 특수한 모양으로 도로 터널의 천정 덕트(반원형) 도입 날개가 달렸을 때의 압력 손실을 표시한 것이며, 〈그림 8.22〉은 90° 환 편류 날개 형상이 휨 손실 계수에 미치는 영향에 대한 실험 결과를 표시한 것이다.

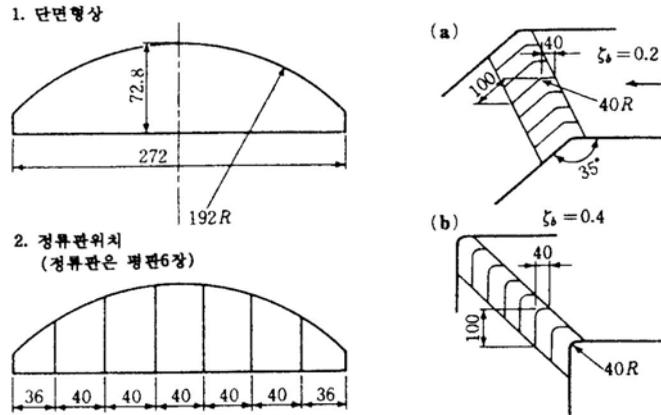
(라) 연속곡관 또는 굴절관

장방형의 연속 굴절관에 대해서는 〈그림 8.23〉 및 〈그림 8.24〉와 같은 자료가 있다.

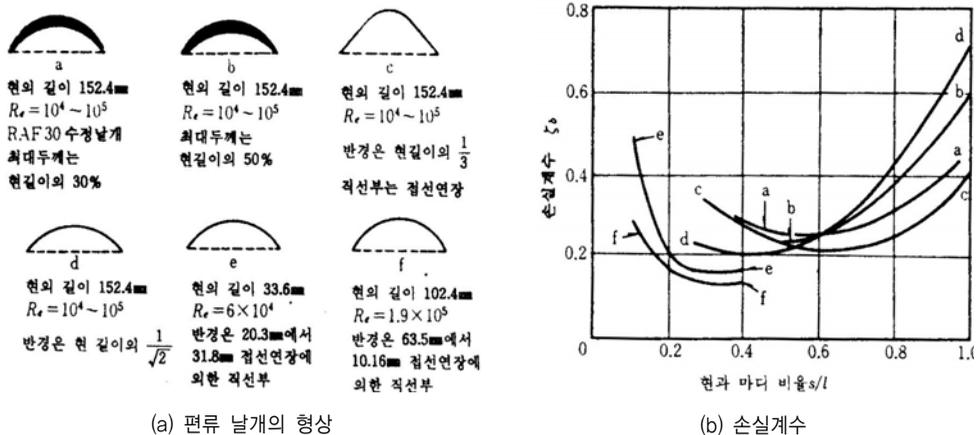
(마) 축소관과 확대관

급격한 축소와 확대에 대해서는 〈그림 8.25〉을 이용한다.

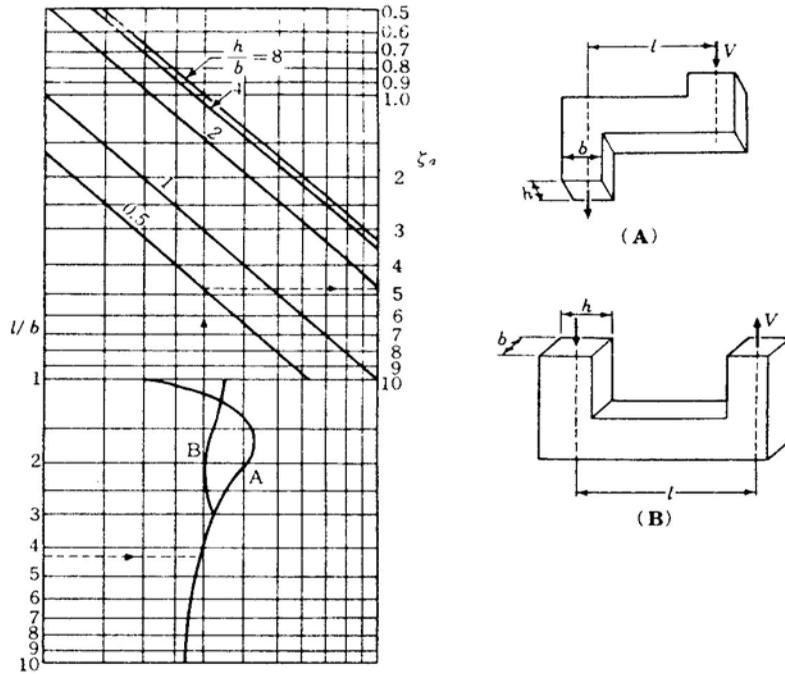
단면적이 점차 변화할 때도 급변할 때와 같이 큰 쪽의 속도 U 를 기준으로 잡고, 관로의 손실계수를 계산하면 편리하다. 〈그림 8.26〉에 원형 확대관에 대한 실험 예를 표시한다.



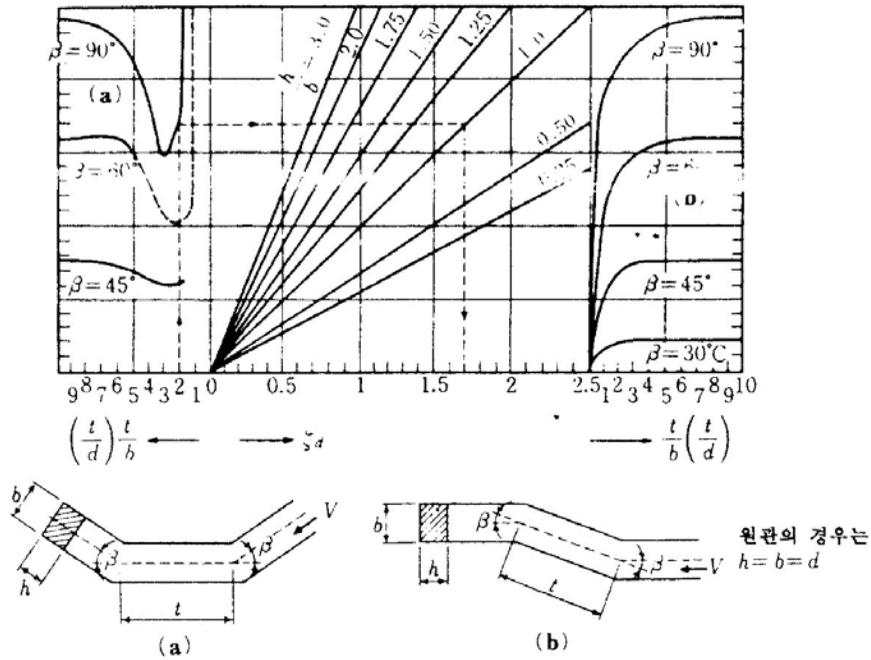
〈그림 8.21〉 천정덕트의 휨 손실계수



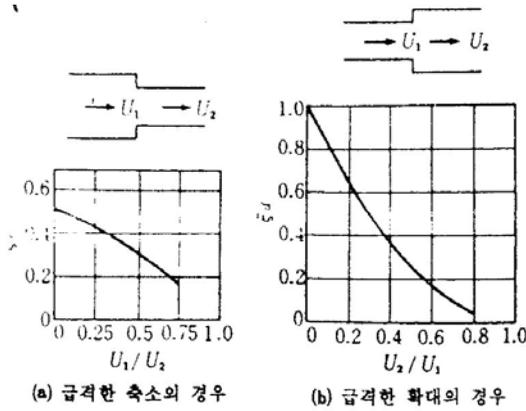
〈그림 8.22〉 편류날개의 형상과 손실계수



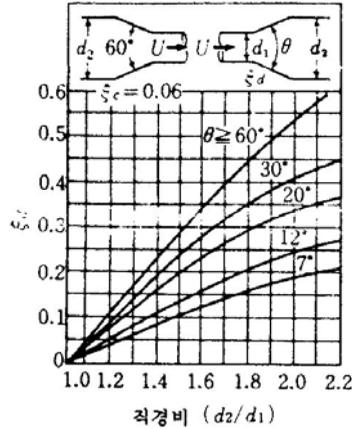
〈그림 8.23〉 여러겹 직각 힘 손실계수 ξ_d



〈그림 8.24〉 여러겹 비(非) 직각 힘 손실계수 ξ_d



〈그림 8.25〉 급격한 축소, 확대의 손실계수



〈그림 8.26〉 원형 확대관 및 좁아지는 관의 손실계수 ξ_c, ξ_d

또한 축소각 60° 에서 ξ_c 는 대체로 일정하게 0.06이다

(a) 급격한 축소일 때

$$\Delta P_c = \xi_c \frac{\rho}{2} \cdot U_2^2 \tag{8.18}$$

(b) 급격한 확대의 경우

$$\Delta P_d = \xi_d \frac{\rho}{2} \cdot U_1^2 \tag{8.19}$$

(바) 분기관 및 합류관

T자형 합류관 및 분기관의 손실에 대해서는 〈그림 8.27〉에 표시하였다. 또 지류의 분기 손실계수는 〈그림 8.28〉, 〈그림 8.29〉에 나타내었다.

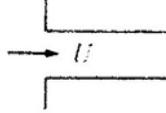
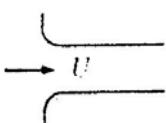
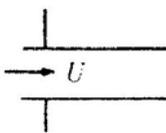
(사) 관로의 출입구, 기타

〈그림 8.27〉 및 〈그림 8.28〉에 각종 입구 및 출구의 손실계수를 종합하여 표시하며, 손실량은 다음 식에서 구한다.

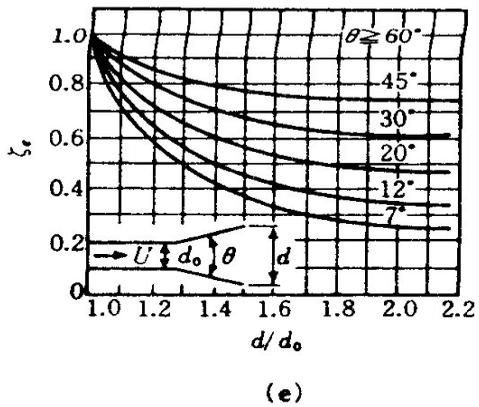
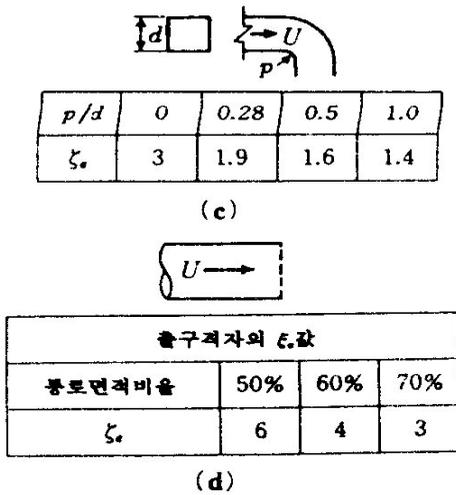
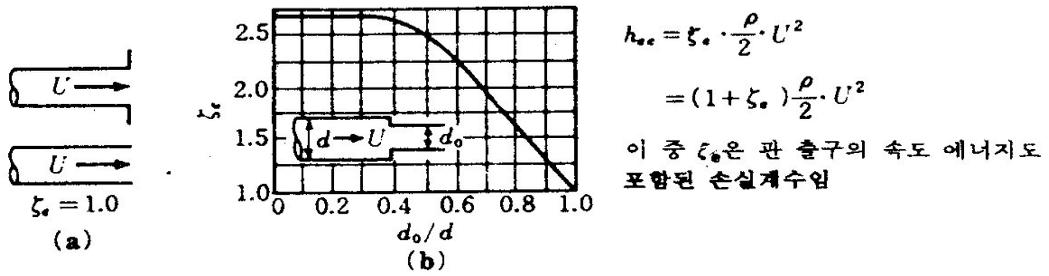
$$\Delta P_e = \xi_e \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \tag{8.20}$$

흡기탑의 입구 격자, 루버의 손실계수를 〈그림 8.29〉에, 철망에 관한 것은 〈그림 8.30〉에 표시한다. 계산은 모두 다음 식으로 한다.

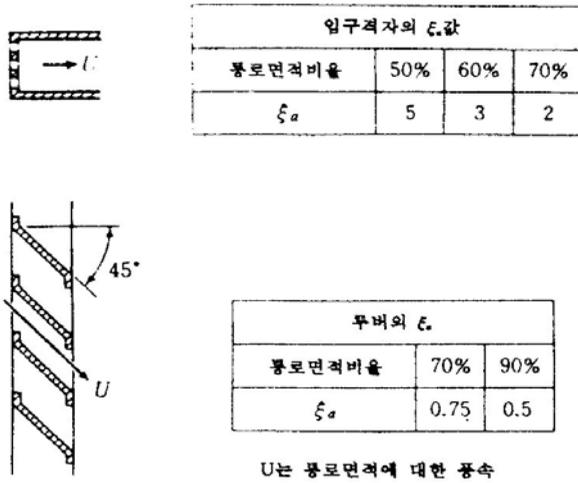
$$\Delta P_d = \xi_d \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \tag{8.21}$$

급 격 축 소 입 구		$\xi_e = 0.50$
벨마우스 달린 입 구		$\xi_e = 0.03$
흔 을 더 의 입 구		$\xi_e = 0.85$

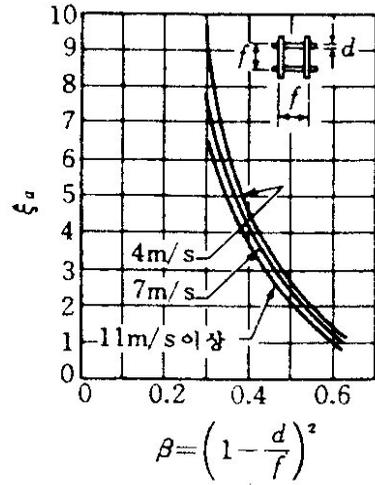
〈그림 8.27〉 입구 손실계수



〈그림 8.28〉 관로 출구의 손실계수



〈그림 8.29〉 입구격자, 루버의 손실계수



〈그림 8.30〉 철망의 손실계수

8.5 환기소

환기소는 기능적인 구조가 되도록 설치하고, 특히 위치 선정 및 외관은 유지관리와 환경 측면을 고려하여 설계하도록 한다.

환기소는 환기기기, 전기 설비, 제어 설비, 기타 보조 기기를 기능적으로 배치하고, 효율적으로 환기할 수 있는 흡·배기구 및 터널 본체와 연락 덕트를 설비한 구조로 해야 한다.

특히 흡기구의 위치와 구조를 설계할 때에는 횡류식 또는 입갱송배기의 경우 배기구에서, 반횡류식의 경우는 터널 갱구에서 배출되는 오염공기를 흡입하는 일이 없도록 주의해야 한다.

환기소의 내부는 설치된 기기의 감시·점검·수리 등을 지장 없이 행할 수 있는 넓이로 하고, 특히 환기기기 등의 대형 기계에 대해서는 반출·입을 쉽게 할 수 있는 구조로 해야 한다. 또한 관리원이 주재하는 환기소에서는 설계 시에 건축 관련 법규 등에 따라야 한다.

환기소는 가능한 한 터널 본체에 가깝고 설치된 제 설비의 보수 점검을 용이하게 할 수 있는 위치에 설치하는 것이 바람직하다. 환기소는 일반적으로 터널 또는 환기용 입갱 등의 갱구에 설치하지만 입갱 및 근처의 지하에 설치할 수도 있다.

8.5.1 갱구 환기소

갱구 환기소는 설치할 위치에 따라 터널 갱구부에 설치하는 경우와 입갱등의 갱구에 설치하는 경우로 나누어지며, 터널 갱구에 설치하는 경우 노상에 설치할 때와 노측에 설치할 때가 있다.

어느 경우에도 환기소의 외관은 주변경관과의 조화를 충분히 고려하여 설계할 필요가 있고, 터널갱구의 노상에 설치할 경우에는 터널로 진입하는 운전자에게 위압감을 주지 않는 곳이어야 한다.

갱구 환기소로서 환기기기에서 발생하는 소음이 제한 값 이상일때는 그 대책을 강구해야 한다. 노상식 환기소의 예로 <그림 8.31>(a), (b)에 일본 도우메이 고속도로의 都夫良野 터널 東口 환기소를, 노측식 환기소의 예로 <그림 8.32>에 메이신 고속도로의 天王山 터널 환기소를 나타내었다. 한편, <그림 8.33~8.38>에는 각종 터널 환기소의 예(일본 중심)를 나타내었다.

8.5.2 지하환기소

환기용 입갱이 있는 터널에서 지형과 기계구조 등의 이유로 갱구에 환기소를 설치하는 것이 곤란할 경우는 입갱 밑과 터널 사이에 지하 환기소를 설치한다.

지하환기소는 갱구 환기소에 비교하여 일반적으로 공사비가 상승하나 터널에서 직접 환기소로 진입하여 제 설비의 유지관리를 할 수 있다는 이점이 있다. 지하환기소에서는 특히 환기소 내의 온도 조절, 방진, 방습 등에 유의할 필요가 있다.

지하환기소의 예로서는 <그림 8.36>(a), (b)에 쥬오우 자동차도의 群山터널 환기소를, <그림 8.37>(a), (b)에 일본의 일반국도 31호선 魚見山터널 환기소를 표시하였다.

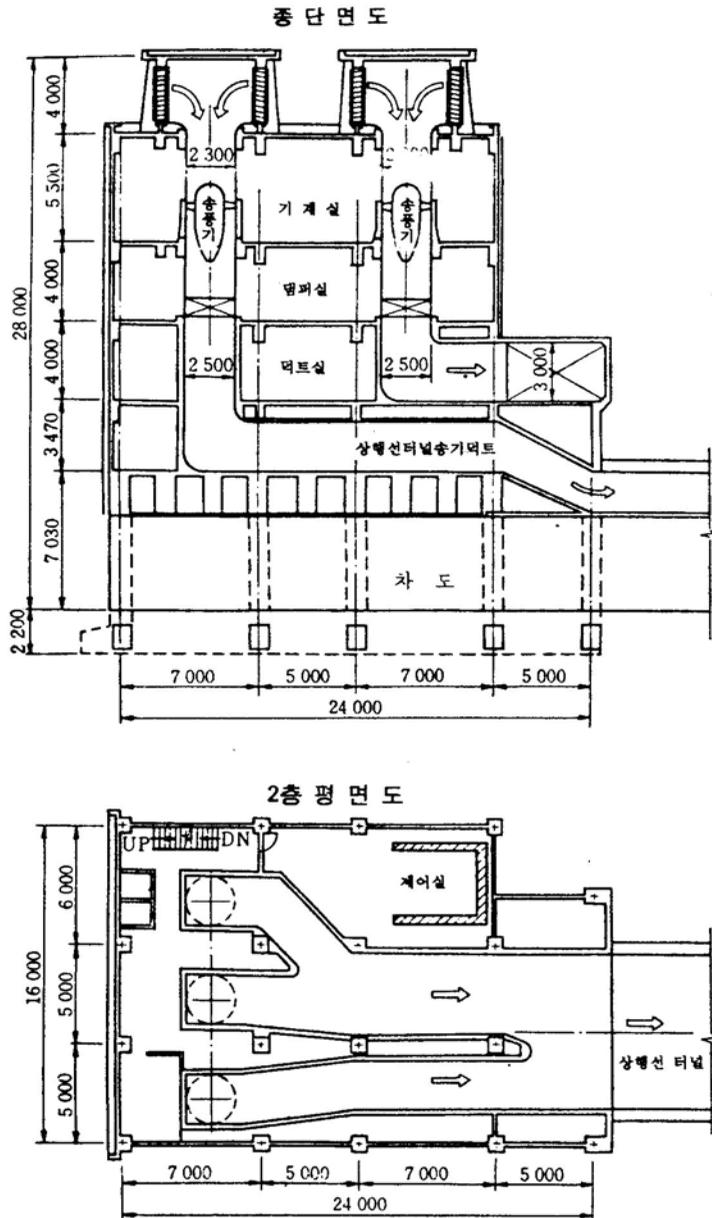
8.5.3 전기집진기실

전기집진기를 부착한 종류 환기방식의 경우로, 대용량 집진기를 설치할 때는 본 갱 단면 외에 본 갱 단면과 유사한 규모의 바이패스 형상풍로를 건설하여 그 안에 전기 집진기 및 부속 시설과 전기실을 배치하는 방법이 있다. 그 실시 예로 일본 쥬오우 자동차도 에나산 터널 2기선이 있고, 그 개요도는 <그림 8.38>(a), (b)에 나타내었다

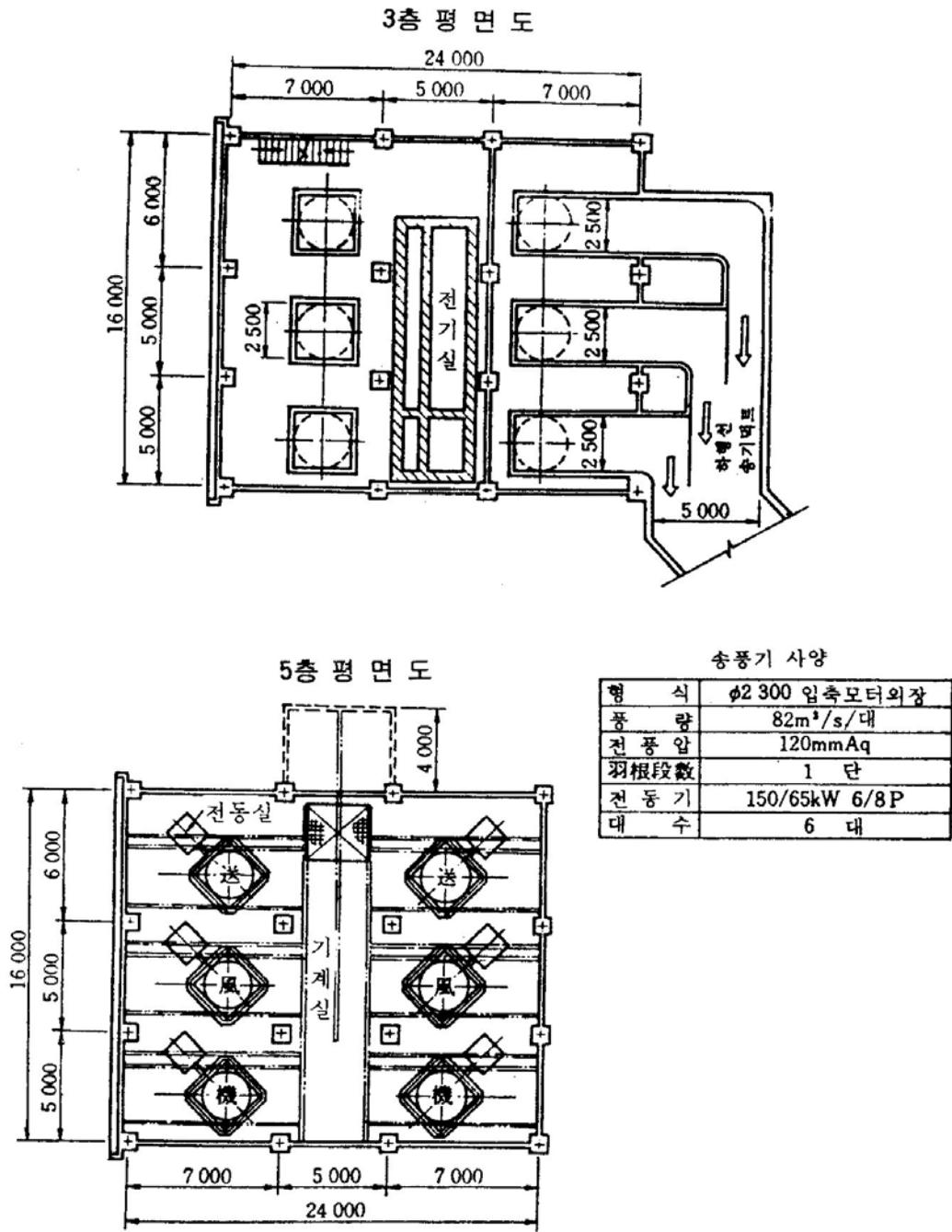
8.5.4 배기탑 등의 대기 환경 문제

배기탑은 그 경관과 사용 목적 때문에 일반적으로 환경 보전상 불안을 초래할 수가 있다. 그러나 차도 공기를 배기하는 것이기 때문에 토출 공기 중의 매연 농도와 일산화 탄소 농도가 일반적으로 매우 낮고, 위쪽을 향하고 있는 토출속도로 배출되기 때문에 대부분의 경우 환경문제는 생기지 않는다. 즉, 특별한 경우를 제외하고 매연 투과율이 40%정도로 조절된 공기 중의 매연은 거의 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 이하이고, 그 때의 일산화탄소에 대해서도 10~20 ppm 정도이거나 그 이하인 경우가 많다.

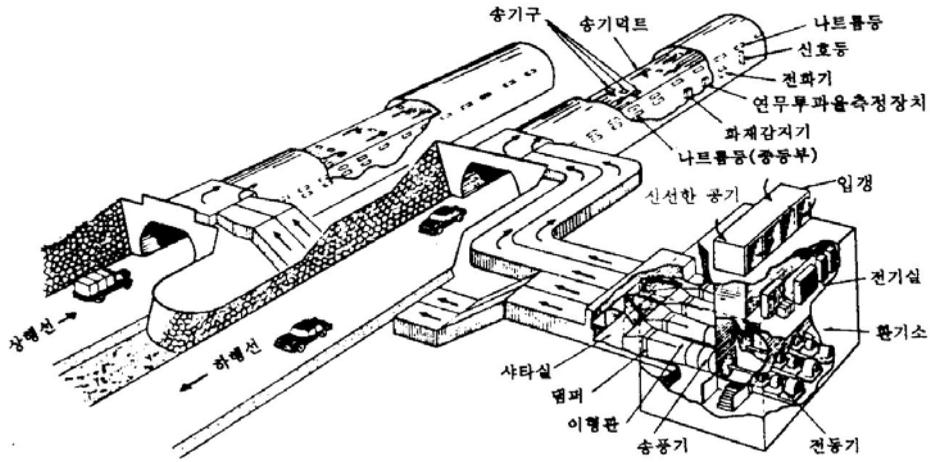
도시에 있어서 국지적인 공해의 관점과 지역특성에 따른 특별한 주민 감정에서 오는 결과 때문에 배출원의 농도에 관계없이 배기탑이 문제가 될 때는 배기탑의 위치나 부근의 기상조건 또는 역정축의 유무 등을 고려하여 배기확산의 경향을 파악해 두는 것이 바람직하다. 또, 배기탑으로부터의 토출속도는 배기제어에 따라 시간마다 변하므로 주의해야 한다.



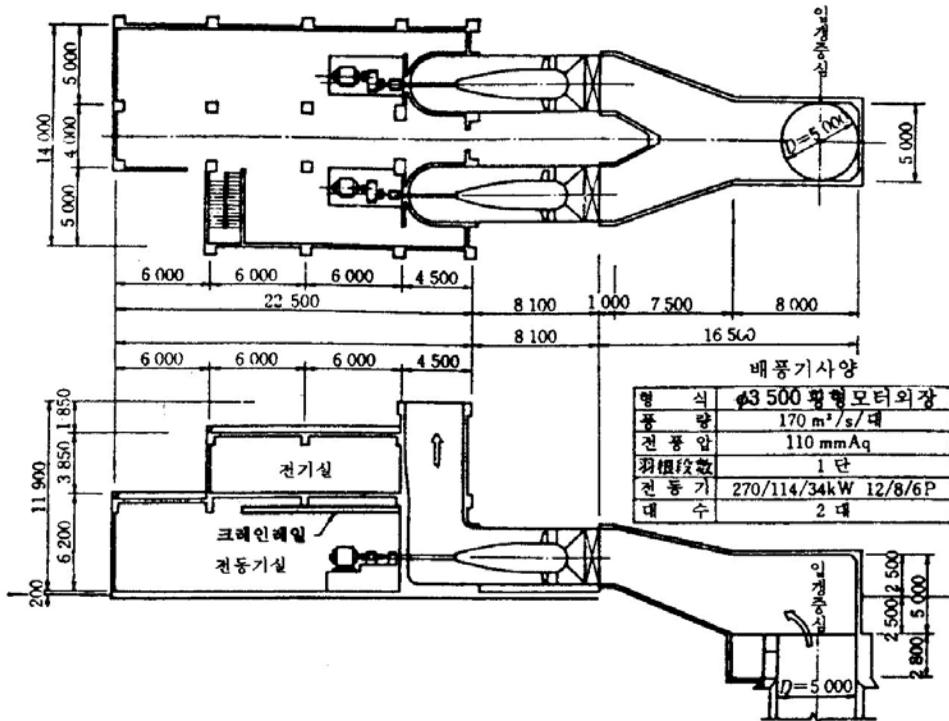
〈그림 8.31〉(a) 일본 도우메이 고속도로 都夫郎野 터널 東口 환기소(노상식)



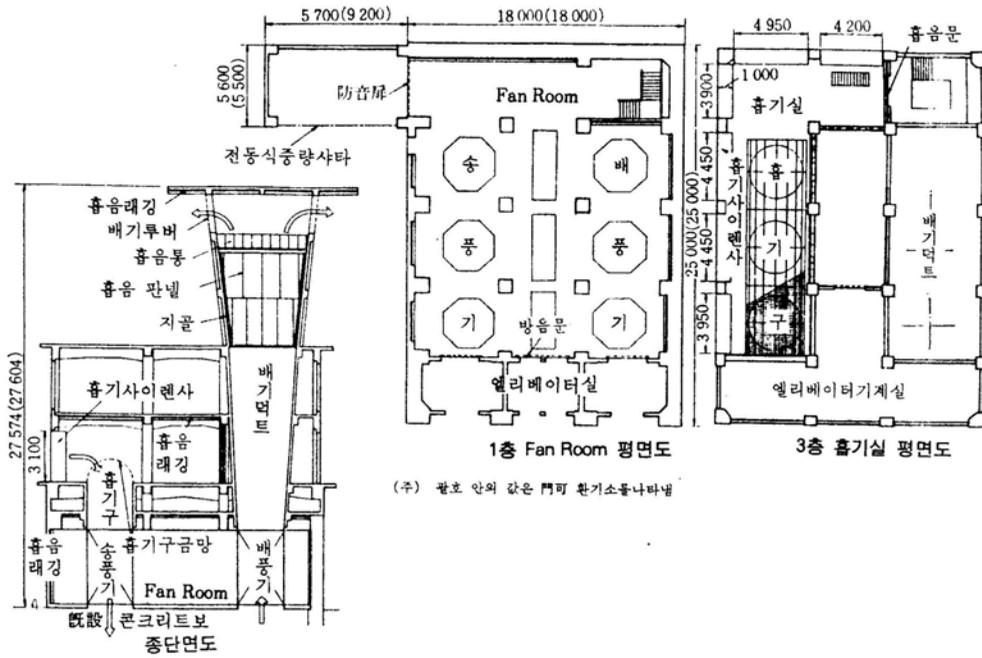
〈그림 8.31〉(b) 일본 도우메이 고속도로 都夫郎野 터널 東口 환기소(노상식)



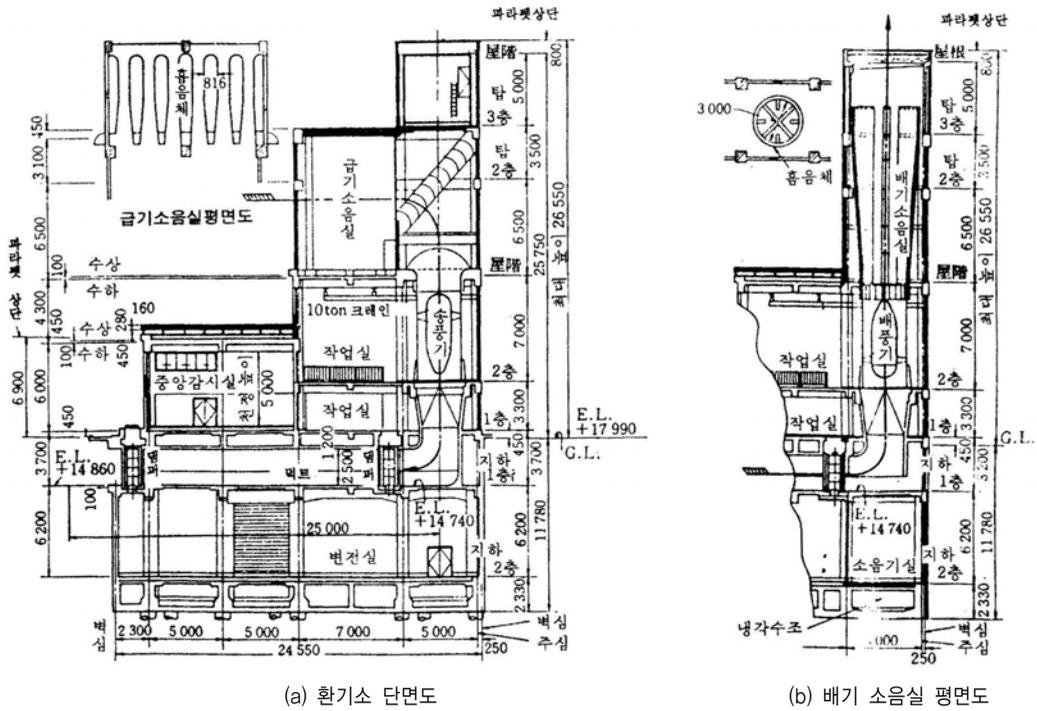
〈그림 8.32〉 일본 메이신 고속도로 天冢山 터널 환기소 (노측식)



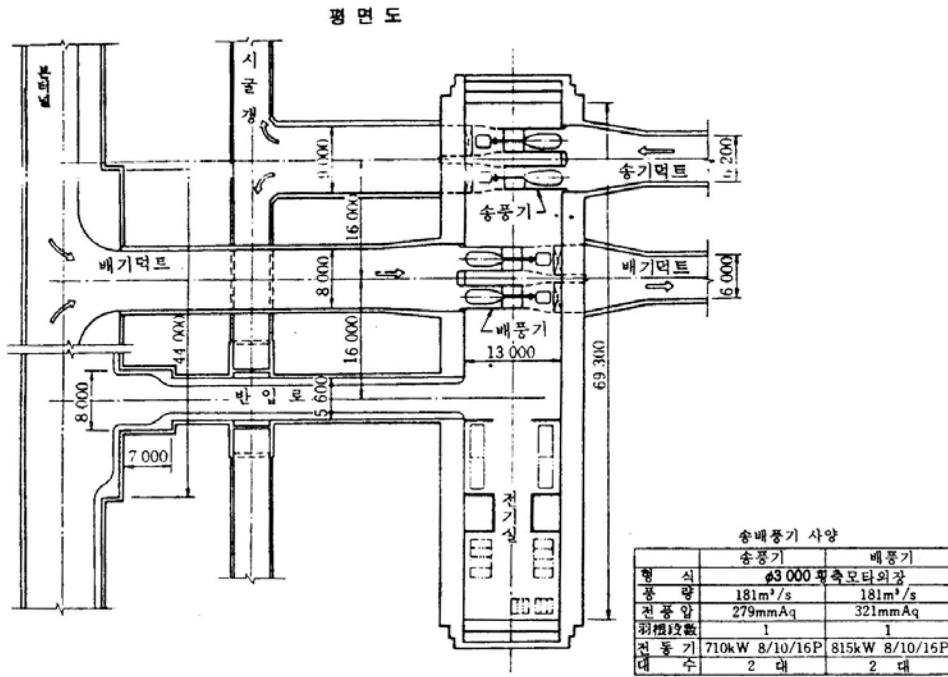
〈그림 8.33〉 터널 입갱구 환기소 설치 예 (일본)



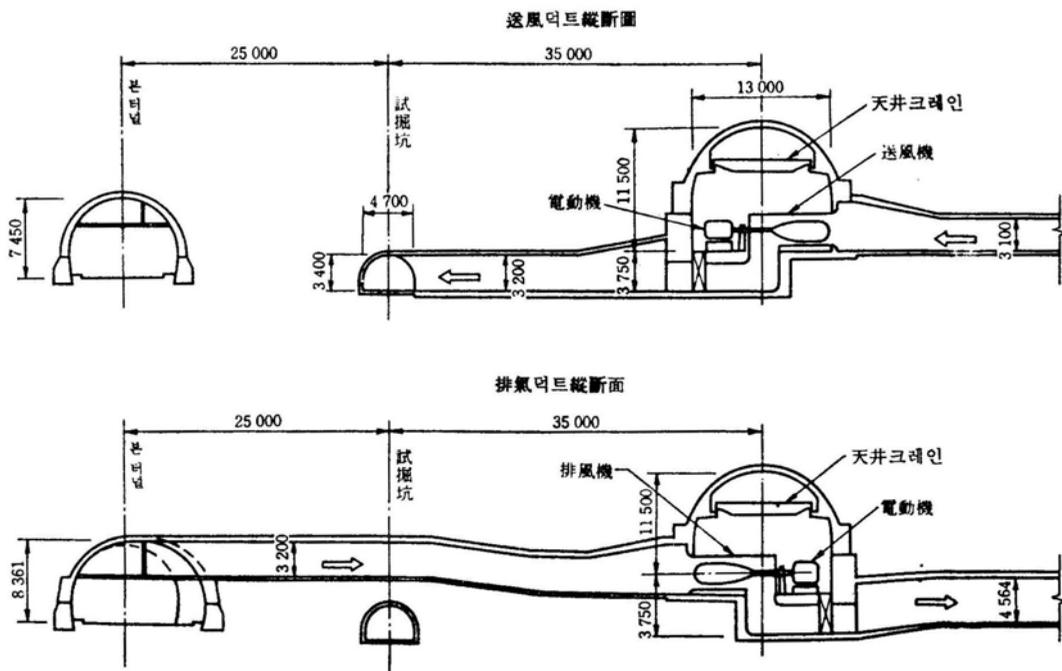
〈그림 8.34〉 일반국도 2호선 開門 터널 下開 환기소(일본)



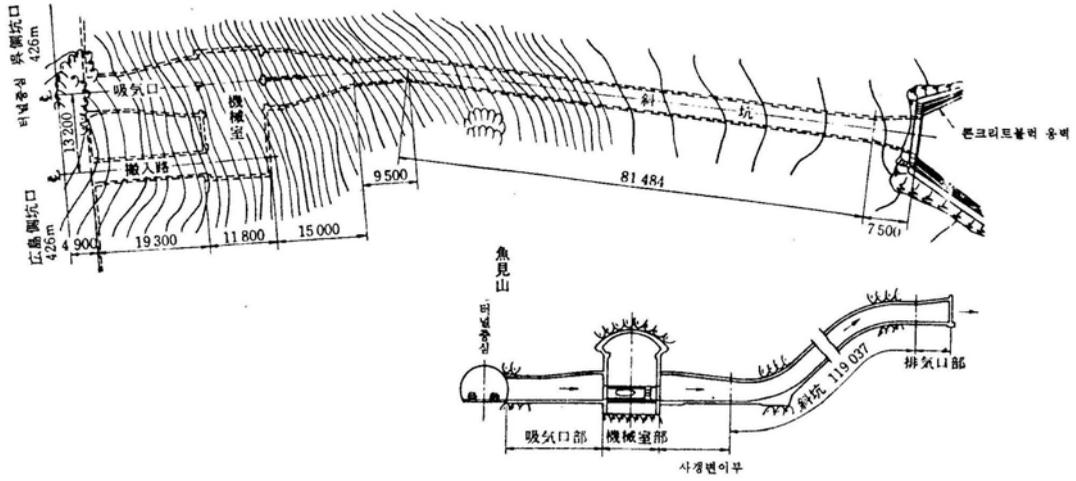
〈그림 8.35〉 도시 고속도로 千代田 터널 三宅坂 환기소(일본)



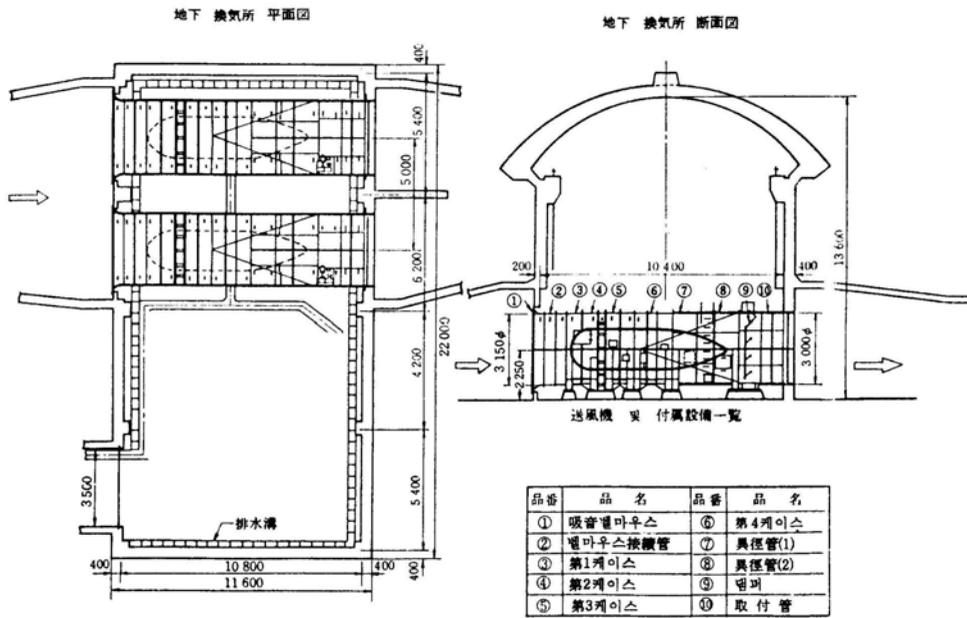
〈그림 8.36〉(a) 일본 쥬우이 자동차도 에나산 터널 지하 환기소



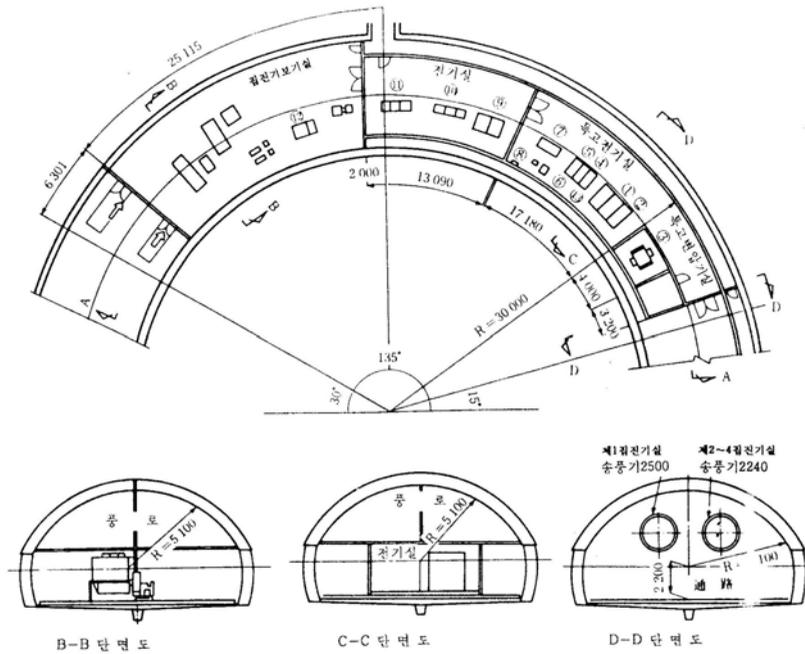
〈그림 8.36〉(b) 일본 쥬우 자동차도 에나산 터널 지하 환기소



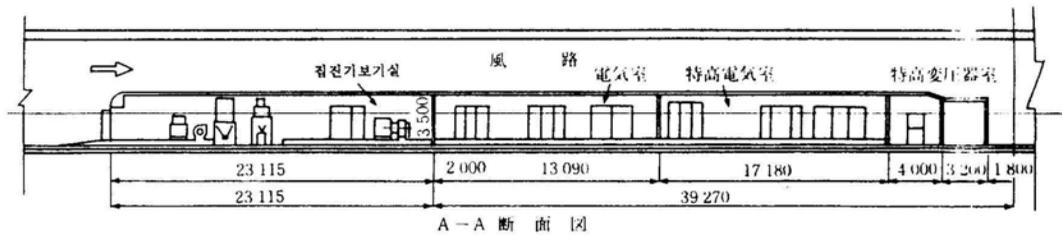
〈그림 8.37〉(a) 일본 국도 31호선 魚見山 터널 地下 환기소 (일본)



〈그림 8.37〉(b) 일본 국도 31호선 魚見山 터널 地下 환기소 (일본)



<그림 8.38>(a) 일본 쥬오우 자동차도 에나산 터널 2기선 전기실 배치도



記号	名 称
①	特高断路器
②	特高차단기
③	特高変圧器
④	低壓차단기
⑤	所内盤
⑥	直流電源盤
⑦	連絡制御盤
⑧	中継端子架台
⑨	換氣運動機盤
⑩	換氣制御盤・換氣操作室
⑪	高压発生盤
⑫	補機盤 (2面)
⑬	460V

<그림 8.38>(b) 일본 쥬오우 자동차도 에나산 터널 2기선 전기실 배치도



9. 운전과 제어

9.1 환기 제어

환기 제어의 목적은 환기계산에서 결정된 소요환기량을 바탕으로 터널 내의 교통 상태에 따라 최소 소비 동력으로, 필요하고 충분한 환기 풍량을 공급하는 것이다. 그 운용 방법은 환기 방식에 따라 다르기 때문에 각 터널 환기 방식에 대해 충분히 검토해 두어야 한다. 또, 화재 발생과 같은 이상 상태에 대비한 운전 제어 계획을 미리 세워 두어야 한다.

(1) 종류 환기 방식

이 방식은 자연풍과 교통환기력을 충분히 이용하는 것이므로, 터널 내의 풍향과 풍속을 감시하면서 운전 제어를 한다.

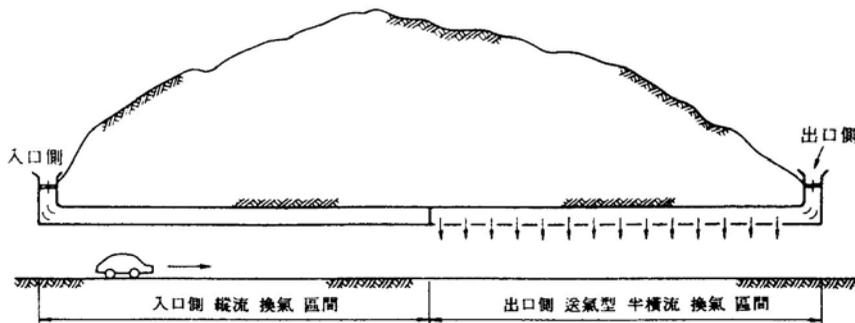
제트팬 환기방식의 왕복 교통 터널일 경우, 환기기기의 회전 방향 변경은 교통조건 (상하 행선별 교통량 등)과 자연풍에 대하여 바람직한 환기 풍향이 되도록 한다. 그러나 운전방향을 변경할 경우라도 어느 정도 일정한 간격 (충분한 환기효과가 나타나는 시간)을 두고 운전해야 한다. 운전방향의 빈번한 변경은 터널 내 공기 기동의 관성에 의해 터널 내에 오염된 공기가 남아 있게 하여 오염 농도가 높아지고, 환기기기 반복 기동의 문제 등이 있기 때문에 변경 시점의 상황에 대해 종합적으로 판단할 필요가 있다. 반면, 이러한 상태를 면밀히 감시하는 것은 이론적으로 바람직한 일이지만 각종 검출 장치, 제어 장치가 복잡하고 시설비가 증가될 경우가 있으므로 경제성도 충분히 검토해야 한다.

입갱 집중배기, 입갱 송배기 또는 전기 집진기 부착 환기 방식 등을 채용한 터널에서는 각 환기 구간에 따라 자연풍에 의한 영향 정도가 다르므로 풍향, 풍속과 그것에 지배되는 터널 내 오염 상태가 주요 감시 대상이 된다.

따라서 교통 조건, 기상 조건 등을 충분히 고려한 후, 그 터널 고유의 여러 조건을 검토하여 운전제어 방법을 결정한다.

(2) 송기 반횡류 환기 방식

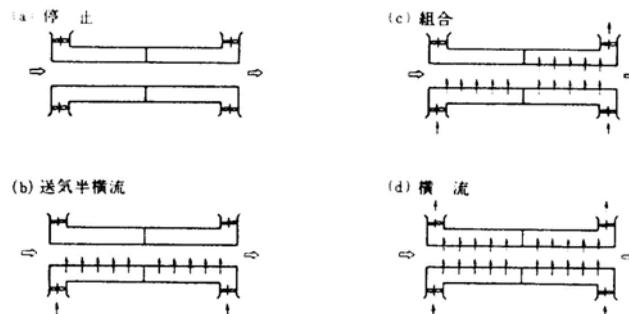
이 방식을 일방향 교통터널에 적용했을 경우 터널 종단 방향으로 복수 환기 구간이 있고, 복수 환기기가 설치될 때는 일반적으로 터널 출구측의 환기 구간 환기기기에서 운전을 개시하는 것이 바람직하다. 즉, 교통량이 적고 단순한 교통풍에 의한 종류환기가 행해지고 있는 상태에서 교통량 증가에 따라 환기량을 늘릴 경우 터널 전체 길이를 송기 반횡류 환기로 운전하는 것이 아니라, <그림 9.1>에 나타낸 바와 같이 입구측의 환기 구간을 교통 환기력에 의한 종류 환기로 한 상태로 출구측의 환기 구간을 송기 반횡류 환기로 하는 등의 방법이 있다.



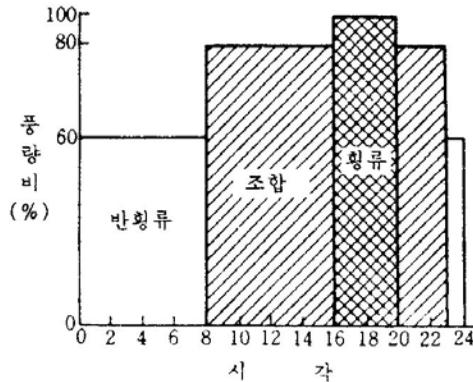
<그림 9.1> 임의 풍량 단계의 운전 예

(3) 횡류 환기 방식

이 방식은 송·배풍기를 한 쌍으로 조합하여 운전하는 경우가 일반적이며, 운용 시에는 어느 환기계통부터 운전할지 자유롭게 순서를 결정한다. 예를 들어 일방향 교통터널로 비교적 교통량이 적은 경우에 기계환기를 할 때는 일부를 반횡류 환기 구간으로 하고, 나머지는 교통 환기력에 의한 종류 환기구간으로 하는 등 각종 조합을 검토함으로써 환기 동력의 최적화를 도모하는 운전 제어 방법을 도입하는 것도 가능하다.



<그림 9.2> 지내고(笹子) 터널의 환기방식



〈그림 9.3〉 지내고(箆子) 터널의 환기제어 방식의 설정 예와 풍량비

〈그림 9.2〉는 지내고(箆子) 터널에서 채용하고 있는 각종 환기 양상이며, 〈그림 9.3〉은 이 터널의 하루 환기 양상을 설정한 예이다.

9.2 제어 방식

환기기는 각종 검출 장치에서 얻는 교통량, 일산화탄소 농도, 연무 투과율과 교통환기력, 자연 환기력에 의한 터널 내 풍속 등의 정보를 바탕으로 운전을 제어해야 한다. 제어 방식은 자동 제어를 원칙으로 하지만 기기의 고장과 시험, 조정의 경우에 대비하여 최소한의 수동 제어도 가능한 방식으로 한다.

(1) 자동제어

자동제어는 제어 장치로 환기 풍량 조절을 하기 위해 필요한 일련의 기기류를 자동적으로 제어하는 방식이다. 일반적으로 연무 투과율 측정 장치, 일산화탄소 농도 측정 장치, 차종별 교통량 측정 장치, 풍향, 풍속 측정 장치 등의 신호에 따라 자동적으로 풍량 제어를 하고 있다. 자동제어 방법의 대표적인 것으로 다음 세 종류가 있으며, 이것을 기본으로 조합하여 사용한다.

(가) 피드백 제어

피드백에 의한 제어량을 목표값과 비교하여 그것을 일치시키도록 정정(訂正) 동작을 하는 제어이다. 터널 내의 오염물질 농도를 측정하여 그 결과를 제어에 피드백하는 것으로 대부분의 터널에서 실시되고 있지만 자주 운전상태를 바꾸지 말아야 한다.

(나) 피드포워드 제어

터널에서 바로 앞 구간의 교통상황 정보 등에 의해 교통 조건 등의 영향이 제어계에 나타나기 이전에 미리 필요한 정정 동작을 하는 제어이다.

(다) 프로그램 제어

터널 내의 유해 성분농도와 교통량에 따라 풍량을 결정하는 것이 아니라, 정해진 프로그램으로 시간마다의 환기기기 운전을 하는 방식이다.

(2) 수동제어

수동제어는 사람의 손에 의해 기기류를 운전하여 풍량을 제어하는 방식이다.

(가) 단독 제어

각 기기를 개별적으로 사람의 손으로 하는 제어이다. 이 경우라도 환기기기의 운전 및 정지 시에는 댐퍼, 동익(動翼), 정익(靜翼) 등의 부속 기기가 연동하여 동작하도록 해야 한다. 이 제어는 자동 제어계 또는 연동 제어계가 고장나거나 제어가 불가능하게 되었을 때나 각 기기를 개별적으로 시험할 때 이용된다.

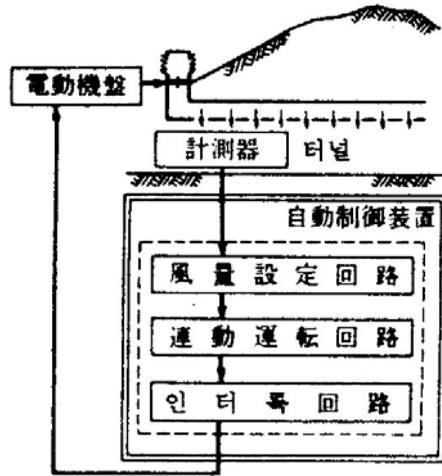
(나) 연동 제어

미리 정해진 풍량 단계버튼을 눌러 한 번에 소정의 풍량을 얻을 수 있도록 관련 기기를 연속시키는 제어이다. 연동제어는 자동 제어계가 고장났을 경우와 시험할 때 이용된다.

9.3 제어 장치

2제어 장치로 터널 내의 환기상태를 검지하는 각종 계측 장치와 풍량 단계를 결정하여 환기 기기로 운전 지령을 내리는 자동 제어 장치 및 전동기의 주 회로 개폐기를 포함한 전동기반으로 구성된다.

계측 장치, 자동제어 장치 및 전동기반의 구성은 <그림 9.4>과 같다.



〈그림 9.4〉 제어 장치의 구성 블록

(1) 터널 환기 상태 계측 장치

터널 내의 환기 상태를 감시하는 계측 장치 예는 다음과 같은 것이 있다.

(가) 연무(煙霧) 투과율 측정 장치(VI계)

터널 환기에서는 매연 농도를, 매연을 포함한 공기 중 빛의 투과율로 나타낸다.

연무 통과율 측정 장치는 투광부와 수광부를 일반적으로 떨어지게 설치한다. 이 장치를 사용할 경우 다음 사항에 유의한다.

- ① 광학적인 측정 계기이기 때문에 광학계의 오염에 의해 지시 값에 이상이 생기기 쉬우므로 적절히 교정할 필요가 있다. 이런 이유 때문에 투과율 100% 상태를 확보하는 일은 보통의 터널 내에서는 곤란하다.
- ② VI 계를 설치하는 위치 및 설치 대수는 <표 5.1>에 기술되어 있는 환기 방식과 농도 분포의 특징을 충분히 고려하여 검토한다. 또, 터널 출입구 근처에서는 자동차가 태양광, 우천에 들어오는 물방울과 안개 등의 영향을 받을 우려가 있으므로 200 m 정도 이상 안으로 들어온 곳에 설치한다.

(나) 일산화탄소 농도 측정 장치 (CO계)

공기 중의 일산화탄소 농도를 측정하는 데는 다음의 세 가지방식이 주로 이용된다.

- ① 적외선 분석 방식
- ② 수소 염이온화 검출 방식

③ 정전위 전해 방식

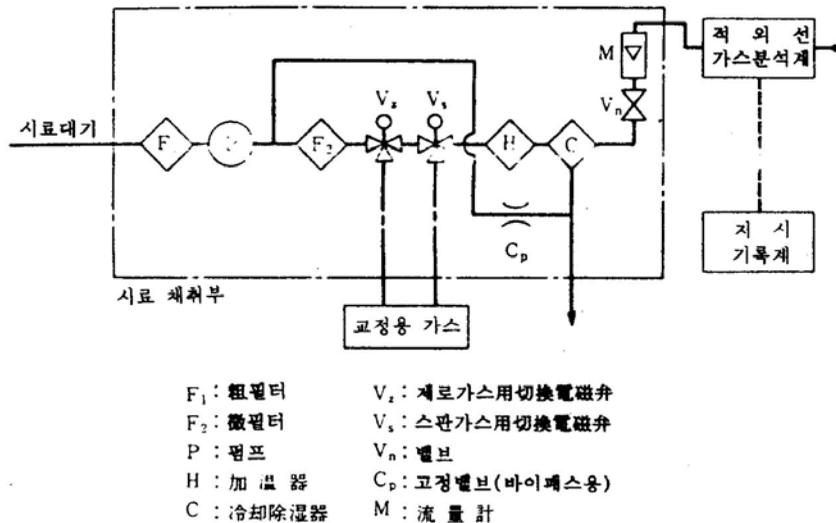
이 중 적외선 분석 방식은 다음과 같은 이점 때문에 일반적으로 사용된다.

- (a) 연속해서 안정된 분석이 가능
- (b) 측정 정밀도가 높음
- (c) 방폭 구조로 주위 조건에 영향을 받지 않음

④ 응답 속도가 빠름

⑤ 장기간 사용에 내구적임

측정 장치는 시료 채취부, 적외선 가스 분석부, 교정용 가스, 지시 기록계 및 기타 부속장치로 구성된다. 장치의 유로 계통계의 예는 <그림 9.5>와 같다.



<그림 9.5> 일산화탄소 농도 측정 장치의 유로 계통 예

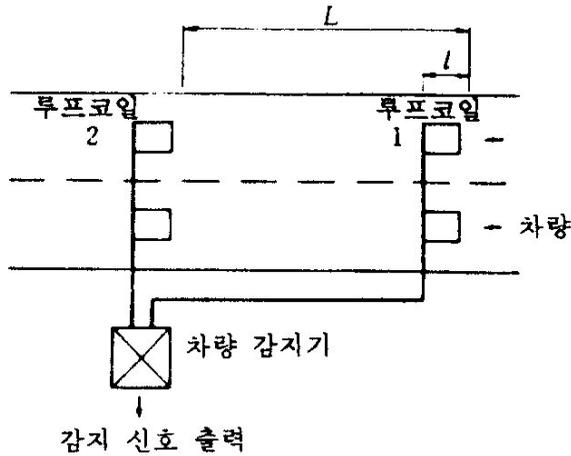
(다) 차종별 교통량 측정 장치(TC)

제어용 입력 자료로서 차량의 대수, 속도, 대형 자동차와 소형 자동차의 구별 등을 검출하는 교통량 측정 장치에는 차량 감지기가 있다. 차량 감지기는 그 검출 방식에 따라 루프 코일(loop coil)식 차량 감지기, 초음파식 차량 감지기, 광전식 차량 감지기 등이 있다.

① 루프 코일식 차량 감지기

이 방식은 노면에 매설한 루프 코일 위에 자성체인 차량이 진입했을 때 생기는 코일의 유도계수 변화량을 검지하여 차량을 감지하는 방식으로, 고 정밀도의 차량감지 능력을 지닌다.

<그림 9.6>처럼 차로마다 루프 코일 1, 2를 일정간격을 두고 설치함에 따라 위의 각 신호를 골라낼 수 있다. 단, 항상 차량이 지체하는 곳에 설치할 때는 주의를 해야 한다.



〈그림 9.6〉 루프 코일식 차량 감지기의 설치 예

② 초음파식 차량 감지기

이 방식은 초음파를 발사하여 차량에 반사된 반사파의 변화로 차량을 감지한다. 이 방식의 종류에는 초음파 송수신기(헤드)의 설치위치에 따라 사이드 화이어 방식과 오버헤드 방식이 있다. 터널 안에서는 초음파가 난반사하므로 감지기 설치를 피하고 갱구 부근의 밝은 부분에 설치한다.

(라) 풍향과 풍속 측정 장치 (WD 계)

터널용으로 가장 일반적으로 사용되고 있는 것은 프로펠러식 풍속계이다. 한 개의 발신기에서 풍향과 풍속을 동시에 감지하고, 전기적으로 지시기와 기록기에 전달하여 풍향과 풍속을 지시하고 기록한다.

(2) 계측기 설치 지침

(가) 터널 축방향 설치위치

계측기의 설치위치는 환기시스템의 특성에 부합되도록 결정하여야 하며 일반적으로 길이, 경사, 선형 등과 같은 터널의 물리적 특성과 환기방식, 환기설비의 위치 등과 같은 환기시스템의 특성에 좌우된다. 또한 외국의 관련규정 및 권장사항 등을 고려할 때 환기모니터링을 위한 계측기의 설치는 정상 환기 시에는 안전하고 인체에 유해하지 않은 환경을 확보할 수 있도록 하고, 화재와 같은 비상시에는 안전하고 신속한 대피경로의 확보 및 대처, 효율적 환기를 통한 구조물에 대한 피해의 최소화를 궁극적인 목적으로 하고 있다. 따라서, 계측기 설치 위치의 결정에는 경제성, 안전성, 효율성 등의 측면에서 최적의 환기시스템 운영이 가능하도록 터널별 특성이 고려되어야 한다.

장대터널에서는 전체구간을 다수의 환기구간(ventilation zone)으로 구분하여 환기구간별로 환경모

니터링을 수행하여 구간별로 환기시스템을 연동제어를 할 수 있도록 한다. 이와 같은 환기제어 방식은 정상 환기 시에는 경제성을 확보하고, 비상 시에는 효율성과 안전성을 극대화할 수 있는 장점이 있으므로 대부분의 터널에 적용을 검토할 필요가 있다. 환기구간의 길이는 일정하지 않지만 독일의 경우 400~500m 범위이며 수직갱과 집진기를 이용한 종류식 환기방식을 장대터널의 환기방식으로 널리 채택하고 있는 일본의 경우 각 환기구간은 집진기 및 수직갱 1개소씩을 포함하고 있다. 한편, 2002년 개통 예정인 스위스의 Aecherli 터널의 경우 환기 시뮬레이션 분석에 의한 계측기 설치 방안을 검토하고 있다. 환기분석에 CFD(수치유체역학) 분석 기법 등이 광범위하게 적용되는 추세에 비추어 향후 터널의 특성을 고려한 시뮬레이션 분석에 기초한 계측기 설치 방법이 적극 검토될 전망이다. 터널의 축방향으로 계측기를 설치하는 경우 측정위치를 결정할 경우 고려하여야 할 지침들을 정리하면 다음과 같다.

〈표 9.1〉 터널 축방향 계측기 설치위치 결정을 위한 지침(1)

고려 사항	설 치 위 치
터널 특성	<ul style="list-style-type: none"> • 터널 길이가 길어질수록 환기제어 및 비상 시 제어가 어려워지므로 환기의 효율성, 안전성, 경제성을 고려하여 계측기의 설치 지점 수도 많은 것이 바람직하다. • 일방향 교통 터널에서는 두 터널 사이의 비상 연락갱을 통한 환기량이 비교적 많을 경우 이로 인한 영향을 측정할 수 있는 계측기의 위치 결정이 필요하며, 위치는 비상연락갱으로부터 터널 대표직경의 7배 거리를 기준으로 한다. • 곡률 반지름이 비교적 작은 곡선부위에서는 계측기의 투과경로상에 구조물이나 통행차량 등이 위치하지 않도록 설치하여야 한다.
교통 방식	<ul style="list-style-type: none"> • 일방통행 터널의 경우 보수, 유지관리 등과 같이 필요에 따라 대면식 통행으로의 전환이 필요할 수 있다. 대면통행으로의 전환 시 최대 농도 발생지점은 양방향 교통량 비 및 자연환기력의 크기에 따라 큰 차이를 보이게 된다. 이와 같은 경우를 고려하여 계측기 설치 위치를 결정하여야 한다. 독일 RABT 기준에 따르면 오염물질 최대 농도의 위치를 고려하여 종류식 터널의 경우 갱구로부터 150m 지점과 터널 중간에 1개소, 총 3개소에 설치할 것을 권장하고 있다.
환기 및 제어 설비/방식	<ul style="list-style-type: none"> • 환기구간별로 독립적인 환기제어를 할 경우, 인접한 환기구간사이에 interlocking(팬의 역회전 시에도 각 인접 환기구간의 환기방향이 일치)이 반드시 필요하므로 계측기는 모든 환기구간에 설치되도록 하는 것이 원칙이다. 그러나 인접 환기구간의 계측값으로 충분한 추정이 가능한 경우는 예외로 한다. • 환기용 팬으로부터의 거리는 계측기 설치 목적에 따라 달라질 수 있다. 완전 혼합된 균질한 샘플을 얻기 위하여서는 팬으로부터 가급적 먼 거리에 설치하여야 하며 팬 가동 후의 정상상태에 도달할 때까지의 상황감지를 위해서는 팬과 동일한 지점에 설치하여야 한다. • 급배기 수직갱 부근에 설치하여 급배기 풍량 및 오염물질 농도를 모니터링하는 계측기는 급배기덕트로부터 터널 대표직경의 7배 거리에 설치하는 것이 일반적이다. • 집진기는 입자상 오염물질의 농도만을 저감시키므로 CO 계측기 설치 위치는 집진기 위치에 영향을 받지 않는다. 그러나, 가시도 계측기의 경우에는 집진기 입구 및 출구 쪽에 각각 1개소씩 설치할 필요가 있다. 설치 위치는 급배기 덕트로부터 터널 대표직경의 7배 거리에 설치하는 것이 일반적이다.

기상 특성	<ul style="list-style-type: none"> • 자연환기력이 비교적 크고 작용 방향이 교통환기력 및 기계환기력의 반대로 작용할 우려가 있는 터널의 경우, 최대농도 지점이 터널 내부에 위치하므로 계측기 설치간격은 작게 결정하여 정확한 위치확인이 가능하도록 하여야한다. • 안개가 터널 내로 유입될 경우 터널 내 부유 입자상물질에 응집되어 입도가 커지므로 가시도의 급격한 악화를 초래하며 이에 기준하여 환기설비가 작동할 경우 안개의 급속한 유입이 염려된다. 따라서 안개의 유입이 우려되는 지역에서는 최대 150m 정도까지 갱구로 유입되는 안개에 의한 피해를 최소화하기 위하여 안개센서의 설치가 필요하며 설치위치는 갱구로부터 10m이내가 바람직하다. 이와 같은 경우에 갱구 부근에 설치되는 가시도 계측기는 갱구로부터 150m정도 떨어진 위치에 설치되어야 한다.
계측자료의 신뢰도 수준	<ul style="list-style-type: none"> • 계측지점이 1개인 경우 데이터 전송경로 또는 분석상의 오차로 인한 문제 발생은 환기제어에 상당한 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 계측 지점을 1개소로 결정할 경우에는 계측 자료의 중복성(redundancy) 결여의 우려가 있으므로 신중한 판단이 요구된다.
유지보수	<ul style="list-style-type: none"> • 보수점검을 위한 접근이 용이하여야 한다. 따라서, 가능하다면 안전하고 신속한 보수점검 작업이 가능한 지점을 선택하여야 한다. • 유지보수 작업 시 작동을 중지하는 계측기가 전체 환경 모니터링에 결정적인 영향을 미치는 경우가 발생하지 않도록 하여야한다. 따라서 가급적 인접 계측기에 의한 추정이 가능하도록 계측기 간격을 결정하여야 한다.
화재감지	<ul style="list-style-type: none"> • CO 및 가시도 계측기는 화재감지 기능을 가지므로 교통사고 및 화재 발생 확률이 높은 지점 부근에 설치하도록 한다.
환기 유동 특성	<ul style="list-style-type: none"> • 측정값은 터널 내 환경을 대표하여야하므로 공기유동이 정상류 유동이 아닌 환기설비에 너무 근접한 지점이나 환기팬의 흡입구에 설치하는 것은 피하여야 한다. 설치를 피하여야 할 구간 범위는 환기설비 부근의 공기유동에 대한 검토 결과에 따라 결정하여야 한다. • 터널입구로부터 유입된 공기의 난류형성 거리, 터널 출구에서의 난류확산에 의한 농도 저하 현상 등을 고려하여 터널 입출구에 설치하는 계측기는 갱구로부터 터널 대표직경의 약 7배 정도 떨어진 위치에 설치한다. 가시도 계측기의 경우 자연광의 영향이 미치지 않는 곳에 설치하여야 한다. • 환기 및 화재예측 시뮬레이션 분석에 의한 유해 오염물질의 농도 분포를 고려한 설치 방법을 검토하여야 한다.

(나) 터널단면상의 설치위치

터널 단면에 대한 계측기의 설치 위치를 규정한 기준의 내용을 보면 다음과 같다.

독일 RABT
<ul style="list-style-type: none"> • 환기방식에 관계없이 샘플링 위치는 도로 경계로부터 약 1m 높이의 측벽에 설치한다.
독일 SICK 사
<ul style="list-style-type: none"> • 터널 바닥에 침착된 분진의 재부유로 인한 계측기의 오염 및 이로 인한 측정오차를 최소화할 수 있는 높이를 선택한다. • 차량 정체 시와 같은 발진과 정지가 반복될 경우 노면으로부터 약 3.5m 높이 지점에서의 농도가 평균 농도에 비하여 높게 나타나므로 신속한 환기설비의 작동을 위하여 운전자의 평균 높이보다 약 1.5m가 높은 3.5m를 설치높이로 함이 바람직하다. • 보수점검을 위한 접근이 용이하여야 한다. 따라서 가능하다면 안전한 보수점검 작업이 가능한 지점을 선택하여야 한다. • 가능한 한 터널 자동세척 범위 밖에 설치한다. • 측정값은 실제 터널 내 환경을 대표하여야 하므로 환기설비에 너무 접근한 지점이나 환기팬의 흡입쪽에 설치하는 것은 피하여야 한다. • 구조물이나 차량 통행에 의한 계측기의 투과경로(transmission path)상의 장애를 피하여야 한다.
영국 CODEL 사
<ul style="list-style-type: none"> • 계측기는 인명 보호가 주목적이므로 터널 이용자의 눈 높이에 설치한다.
일본 FUJI ELECTRIC 사
<ul style="list-style-type: none"> • 보수작업을 고려하여 천장 등 접근이 용이하지 않은 위치는 피하는 것이 바람직하며 투과경로 광축이 감시원 통로 위 2.2~2.5m 정도에 위치하도록 함이 바람직하다. • 발신 및 수신부는 측벽으로부터 이격거리를 충분히 확보하여 벽면의 반사에 의한 영향을 피하도록 하여야 한다. • 설치 높이는 감시원의 통행로의 노면으로부터 700mm(기기 중심) 정도로 한다.

(다) 자동 제어 장치

자동 제어 장치는 터널 환기 상태 계측 장치로부터의 신호를 바탕으로 자동적으로 환기량을 결정하여 환기기에 운전 을 지시하는 자동제어 릴레이반과 운전 상태를 감시하여 수동 운전을 지시하는 감시 제어반으로 구성되어 있다.

이들의 구성 및 기능은 터널의 규모에 따라 여러 가지가 있다. <그림 9.7>은 대표적인 제어 회로 구성 블록 예이다. 계측 장치로부터의 신호에 의한 피드백 제어, 1일 운전 양상을 설정하는 프로그램 제어를 하는 것(예 1), 피드백 제어로 환기기의 운전 효과를 올리는 것, 필요에 따라 1차 연산 처리 회로나 환기량 결정 회로를 설치하는 등 자료 처리 기능을 첨부한 장치(예 2, 3) 등이 있다. 이들 주요 장치에는 비교적 간단한 제어인 시퀀스 제어 장치(최근 마크로프로세서가 많이 이용되고 있음)와 이보다 약간 복잡한 제어인 제어용 계산기 등이 채용되고 있다.

(3) 전동기반

전동기반은 전동기의 기동, 정지 회로, 속도 변환 회로, 기기 보조 제어 회로로 구성된다.

(4) 감시장치

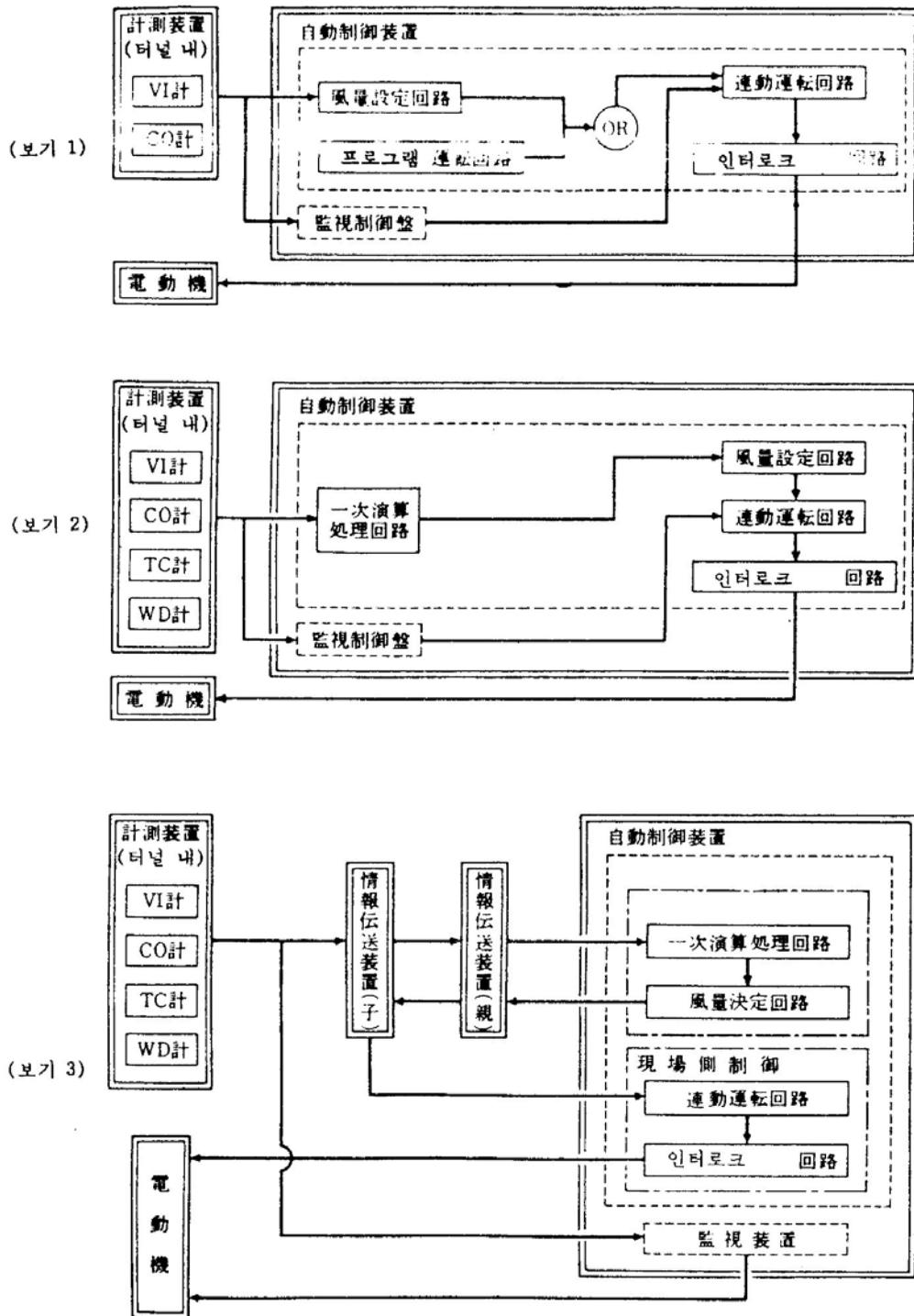
여러 곳에 설치된 각종 설비를 유기적이고 효율적으로 운영하기 위해서는 한 곳에서 집중 감시제어를 할 필요가 있다. 이 때 서로 거리가 멀리 떨어져 있고 전송하는 정보량도 많기 때문에 정보 전송 장치를 통하여 전송하고 있다.

(가) 감시 제어 장치

감시 제어 장치는 계통 감시판과 제어 데스크로 구성된다. 계통 감시판은 상태 감시를 쉽게 할 수 있도록 기기를 그래픽 형상으로 알기 쉽게 배치하고, 제어 데스크는 콤팩트로 정리하여 소수 운전자가 조작을 쉽게 하도록 한다. 긴 터널에서는 모니터를 설치하여 많은 정보를 정리, 표시할 수 있도록 하여 운전수에 대한 부담을 경감시킬 수 있다.

(나) 정보 전송 장치

각종 기기의 상태와 계측장치의 측정치를 중앙에서 감시하기 위하여, 각 기기로 운전 지시를 전달하기 위해 사용된다. 전송 항목, 횟수, 전송 거리 등에 따라 각종 방식이 있지만 일반적으로 디지털 사이클릭 방식이 사용되고 있다.



<그림 9.7> 제어 회로 구성 블록 예

9.4 제어상의 유의 사항

제어 시 유의해야 할 사항은 화재 시의 운전, 제어계의 변경, 환기기기의 최저 운전 시간, 제어 방식의 선정, 운전 기록의 자동화로 나누어 설명할 수 있다.

(1) 화재 시의 운전

배연에 사용되는 환기기기는 화재발생 때에 다음에 기술되어 있는 목적을 만족할 수 있도록 해야 하며, 최대한 활용을 도모하는 일이 요구되기 때문에 통상의 운전 업무중에서 배연 기능의 유지에는 충분한 고려가 필요하다.

일반적으로 화재 시의 환기운전 상태로서, 화재 발생 직후의 화점 부근의 이용자가 피난할 수 있는 시간을 확보하기 위해 연기 확산 방지를 목적으로 한 환기 운전상태와, 피난후의 본격적인 소화 활동을 하는데 편리한 필요 지점의 작업 환경을 확보하는 것을 목적으로 한 운전상태, 즉 배연 운전 상태 두 가지로 크게 나눌 수 있다.

이들 각 운전 상태의 선정에 있어서 그 터널의 고유 조건에 입각하여 조작성 확실한 방법을 충분히 검토함과 동시에 관계 기관과 협의할 필요가 있다.

(2) 제어계의 변경

개통 후의 교통 상황을 파악한 후에 제어 방법을 확립하는 것이 적당할 때가 많다. 이러한 경우에 대처할 수 있도록 제어계의 제어 폭이 넓고 설정 값의 변경이 용이한 방식을 채용한다.

(3) 환기기기의 최저 운전 시간

터널의 환기는 제어를 하고 나서, 그 효과를 검출할 수 있는 환기기기 운전시간까지는 비교적 길다. 응답속도를 빠르게 하려고 하면, 환기기기의 용량을 매우 크게 해야 하므로 비현실적인 설비가 된다. 한편, 어떤 운전 상태를 계속할 최소 시간 간격이 너무 길어도 에너지 절약 측면에서 문제가 있기 때문에 전동기의 기동 빈도, 횡수, 상태 등에 대한 충분한 고려가 필요하다.

또, 터널 내의 교통량은 시시각각으로 변하기 때문에 일시의 계측 장치 출력 신호로 환기기기의 기동과 정지를 직접 하는 일은 헌팅현상이 일어나서 불편하다. 이러한 현상이 생기지 않도록 최저 운전 시간을 확보하기 위해 충분한 고려가 필요하다.

(4) 제어 방식의 선정

터널의 입지조건에 따라 교통량의 양상과 디젤 자동차 구성비의 변화가 커서 환기 풍량의 현저한 변동이 예측될 때는 제어계 내에 적분 동작과 미분 동작 기능을 지닌 제어방식을 채용한다.

한편, 매일의 교통량 양상이 거의 고정되어 디젤 자동차 구성비 등이 비교적 작게 변동한다고 예상될 경우는 프로그램 제어로 충분한 경우도 있다.

(5) 운전 기록의 자동화

운전기록의 자동화는 비교적 저렴한 비용으로 가능하므로, 보통 제어 장치를 고려할 때에도 장래 유지 관리의 자료로 이용할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

터널 환기 상태 계측 장치에서의 아날로그 자료는 디지털 변환으로 시간마다의 평균 값으로 대응하는 교통량과 환기기기의 운전 상태를 종합하여 운전 기록 용지로 작성하는 일도 고려할 수 있다. 또, V 계, CO 계 등의 아날로그식 기록지는 디지털값을 확인하거나 변화 상태를 눈으로 확인하는 경우, 장치 시험 조사를 하는 경우 등 필요에 따라 사용되고 있다.

9.5 환기 제어의 예

터널의 환기 제어의 예로 일본의 예를 소개한다.

(1) 지네고(笹子) 터널

이 터널의 환기 시스템은 평상 시에는 교통량, 일산화탄소 농도, 연무 투과율 자료를 바탕으로 컴퓨터가 필요한 환기량에 적당한 운전대수와 회전수를 결정하여 환기기기를 제어하고 있다. 에너지 절약 관점에서, 교통량에 따라 환기 방식으로 횡류 방식으로 운전할 뿐만 아니라 조합 환기, 반횡류 환기의 운전을 자동적으로 하고 있다 (〈그림 9.2〉 참조)

또, 비상 시 제어로는 화재 발생 지구별 환기 운전, 일산화탄소 농도, 연무 투과율, 비상 시의 환기 운전, 정전 시의 부하 제한 운전 등의 처리를 자동적으로 하고 있다.

환기 제어는 자동 제어 외에 감시 제어 데스크에서 수동 연동 제어와 수동 단독 제어를 이용하고 있다. 수동 연동 제어에서는 조작자가 풍량을 설정하고 그 풍량에 적당한 운전 대수와 회전수를 컴퓨터로 결정하여 환기기기를 제어한다. 수동 단독 제어에서는 컴퓨터에 의하지 않고, 조작자가 운전 대수와 회전수를 결정하여 환기기기를 제어한다. 지네고 터널의 환기 제어 흐름도는 〈그림 9.8〉과 같다.

(2) 동경항(東京港)터널

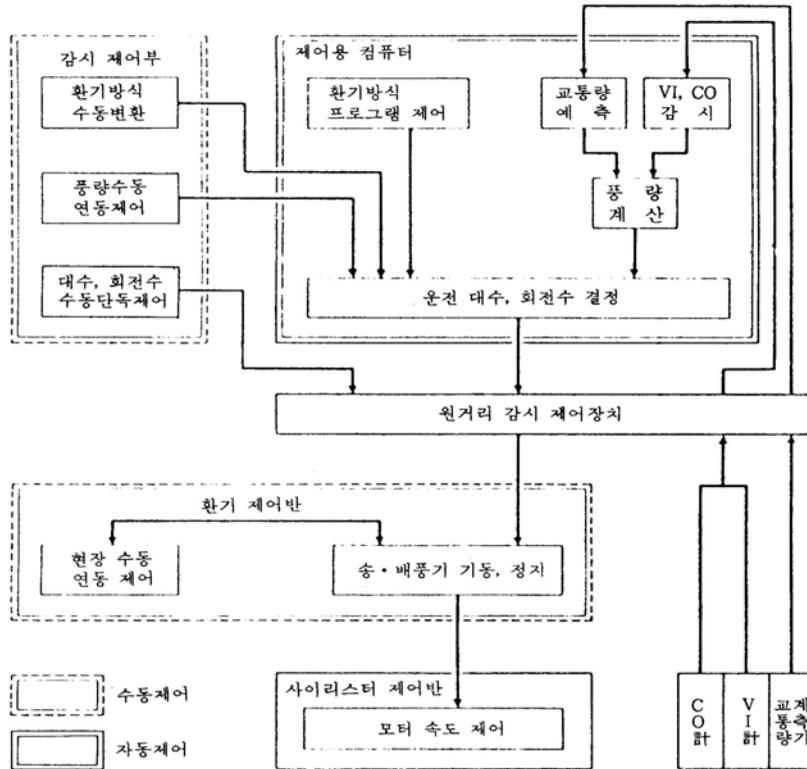
이 환기 제어는 교통 조건, 일산화탄소 농도, 연무 투과율 자료를 바탕으로 피드백과 프로그램 제어 방식의 두 방식을 채용하고 있다.

피드백 제어용의 각 자료는 제어량으로 취사 선택이 가능하며, 설정값이 있는 경우에는 제어 데스크에서 자유로이 설정 값을 변경할 수 있도록 한다.

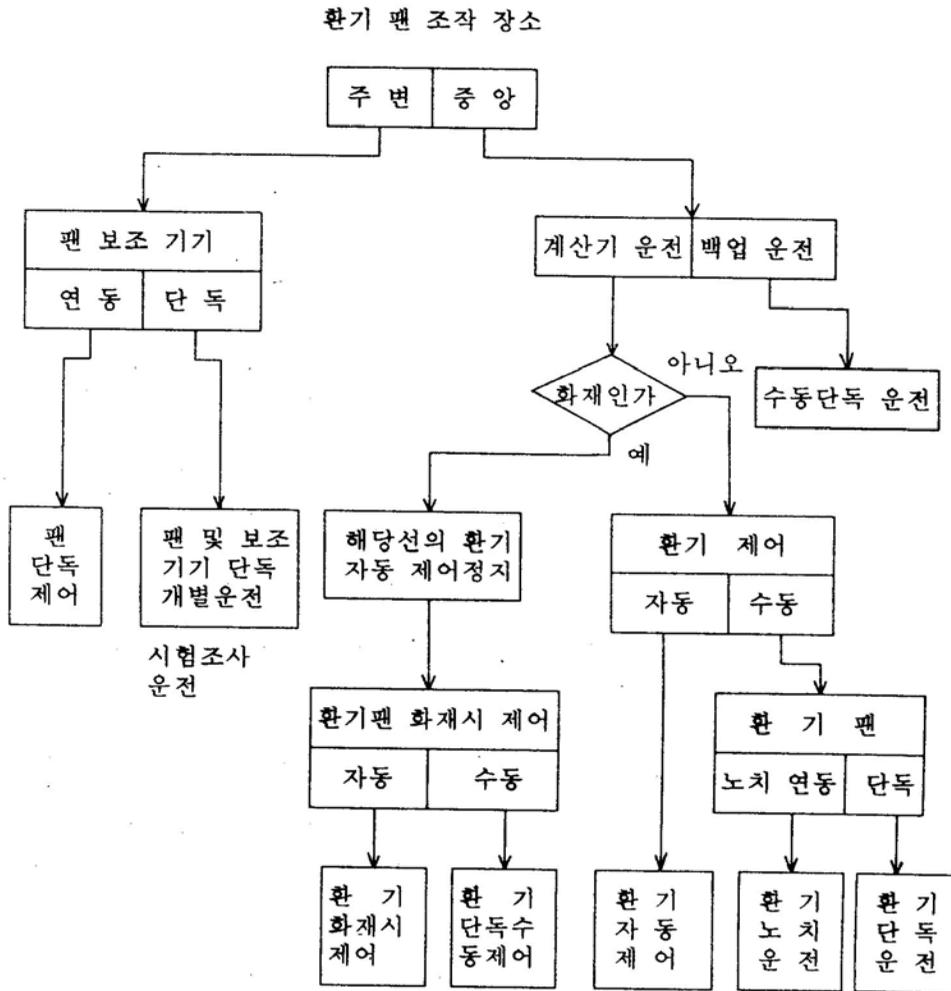
프로그램 제어는 장래 주변장치의 충실 및 교통량의 안정화등을 조건으로 소프트웨어를 변경함에 따라 실시할 수 있는 제어 장치로 하고 있다. 이들 환기의 기본 제어방식은 <그림 9.9>와 같다.

터널 환기 상태를 계측하는 장치에서 나오는 각 자료는 처리 장치에 의해 분석 및 해석되어 <표 9.2>에 나타낸 노치 지령을 낼 수 있을 때까지 자료를 정리한다.

환기장치의 운전 방법이 기억되어 있는 기억장치는, 자료처리 장치에서 지시가 나왔을 경우 각 환기기의 기동순서에 따라 하나의 프로그램을 완성하는 기능을 가지고 있다. 이 흐름도는 <그림 9.10>과 같다. 또한, 비상 시 제어로서는 화재정보가 들어왔을 경우, 배풍기를 모두 기동시킴과 동시에 송풍기를 차례로 모두 역전 운전하도록 하고 있다. 그 외에 수동 연동, 수동 제어는 앞의 내용과 거의 같다.



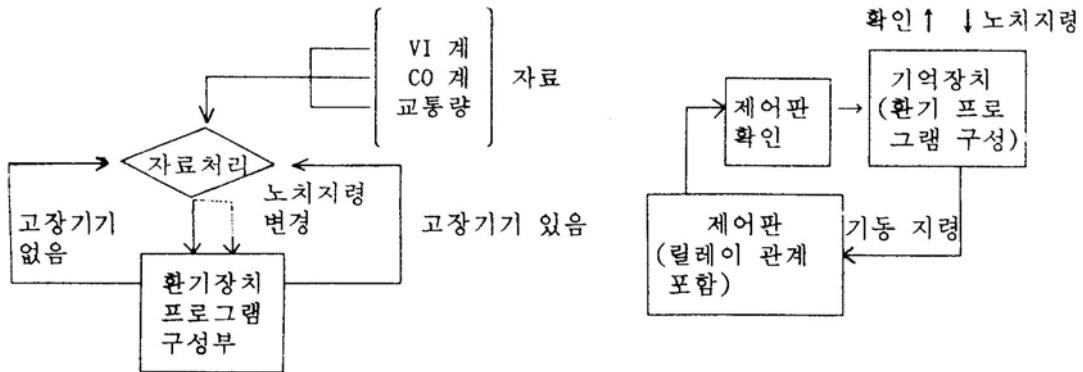
<그림 9.8> 지네고(笹子) 터널의 환기 제어의 흐름



〈그림 9.9〉 동경항(東京港) 터널의 환기 기본 제어 방식

〈표 9.2〉 환기기기의 조합 운전 단계(노치)

운전단계	송 풍 기		배 풍 기	강제 환기량 (m ³ /s)
	터널 입구측	터널 출구측	터널 출구측	
0	0	0	0	0
1	0	1 대 운전	0	150
2	1 대 운전	1 대 운전	1 대 운전	320
3	1 대 운전	2 대 운전	2 대 운전	450
4	2 대 운전	2 대 운전	3 대 운전	570
5	2 대 운전	3 대 운전	3 대 운전	650
6	3 대 운전	3 대 운전	3 대 운전	720



〈그림 9.10〉 환기장치 자료 처리 및 프로그램 구성 흐름도

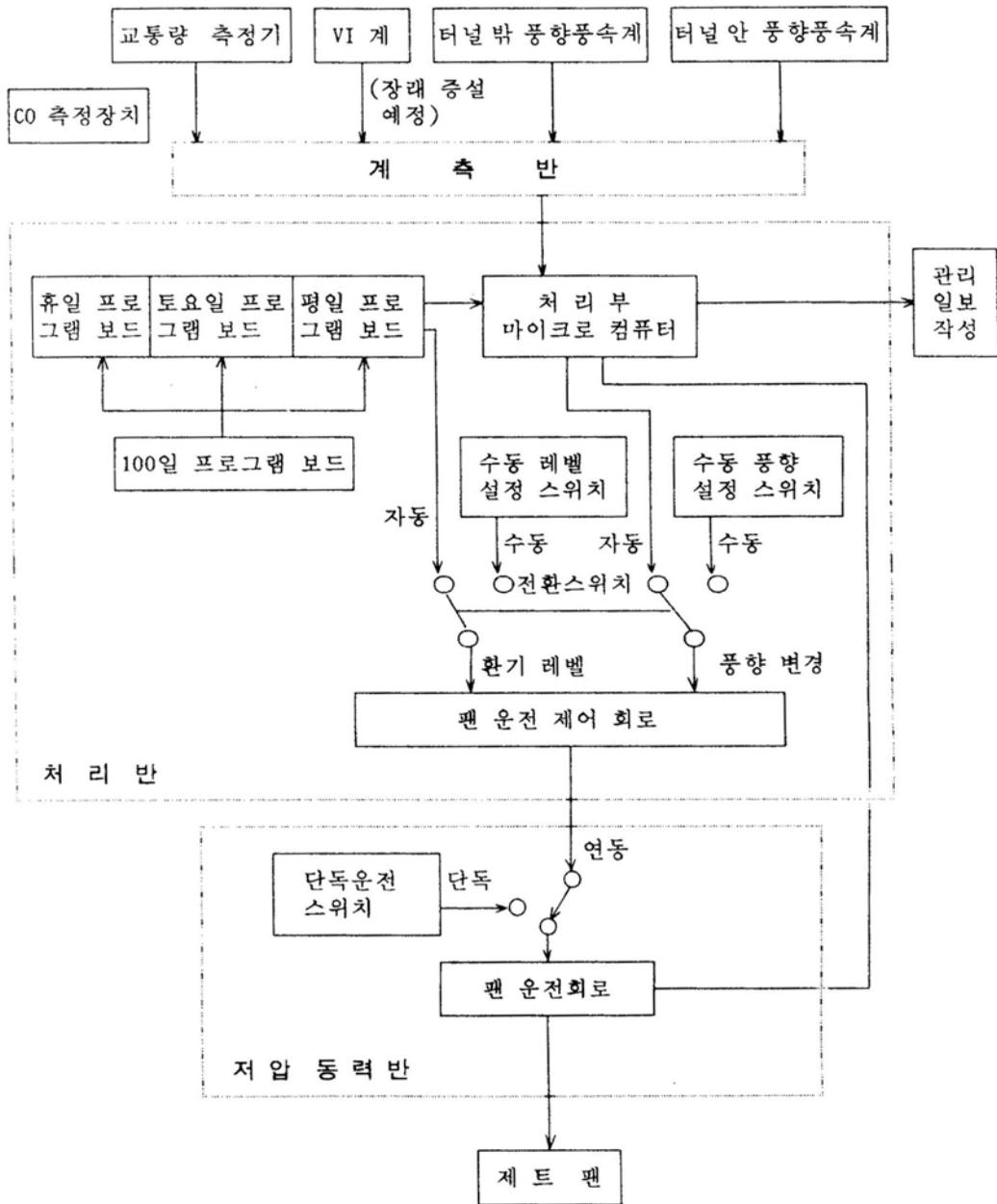
(3) 텐노우산(天王山) 터널

텐노우산 터널의 환기장치 운전은, 두 대가 한 조로 이루어져 풍량 조절은 회전수의 교체, 동익(動翼) 각도의 조절, 운전 대수의 조합 등에 의하지만, 이 설정은 전동 컨트롤러의 노치위치에 따라 일원적으로 행해지고 있다. 이 노치 위치는 평상 시에는 연무 투과율을 40~60% 사이로 유지하도록 피드백 방식으로 자동 제어되고 있다. 연무 투과율의 출력이 40%보다 낮아지면 풍량을 늘리도록 노치를 올리는 제어를 하고, 출력이 60%를 넘으면 풍량을 줄이도록 노치를 내리는 제어를 하고 있다. 연무 투과율의 시간변화에 따라 제어 단수를 바꾸는 미분 제어를 하여 매년 투과율을 가능한 한 빨리 규정치 내로 되돌리는 기능을 가지고 있다.

(4) 성산(城山) 터널 (왕복 교통)

이 터널의 환기제어는 처리 장치의 프로그램 보드에 의해 행해지고 있다. 프로그램 보드에는 평일, 휴일, 토요일 세 종류의 환기 양상(제트팬 운전 대수와 운전 방향)을 설정하고, 100일 프로그램으로 어느 프로그램 보드 운전을 선택할지를 결정하고 있다.

제트팬의 운전방향은 원칙적으로 프로그램에 따라 행하지만, 에너지를 더 절약할 수 있도록 운전하기 위하여 각 계측자료를 처리 장치 내의 마이크로 컴퓨터로 연산처리하여 그 결과에 따라 역전하는 쪽이 좋은 결과를 얻을 수 있다고 판단될 경우, 프로그램 제어에 풍향 제어를 삽입할 수 있도록 되어 있다. 동시에 이 마이크로 컴퓨터와 출력기를 접속하여 교통량, 기타 계측자료와 설비의 운전 현황을 출력하여 관리 일보를 작성할 수 있게 되어 있다. 이 시스템의 계통도는 〈그림 9.11〉와 같다.



<그림 9.11> 환기 제어 시스템 계동도



참 고 자 료

1. 터널표준시방서, 국토해양부, 2009
2. 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙, 해설, 지침, 2009
3. 고속도로 건설공사 설계기준, 한국도로공사, 2000
4. 고속도로 건설공사 표준도, 한국도로공사, 2001
5. 호남고속도로 고서-순천간 4차선 확장 실시설계 터널공 설계기준 비교검토(안), 한국도로공사 설계사업소 설계기준부, 1992
6. 고속도로 공사 시공 및 품질관리 지침서(Ⅰ), 한국도로공사(수도권 고속도로 건설사업소), 1991
7. 영동고속도로 신갈-원주간 4차선 확장 실시설계 특별시방서, 한국도로공사, 1991
8. 중부고속도로 건설지, 한국도로공사, 1988
9. 남산 제1호 터널 쌍굴 건설공사 종합보고서, 서울특별시, 1988
10. 고속철도 터널 표준시방서(안), 고속전철기획단, 1991
11. 토목 구조물의 현장계측에 관한 연구, 한국전력공사 기술연구원, 1989
12. 토목공사 감리 실무 요령(도로, 지하철), 한국종합기술개발공사, 1989
13. 최신 도로설계요령 제3권 12편 터널공, 건설이공학사, 1980
14. 설계요령 제3집 제9편 터널, 일본도로공단, 1985
15. 도로 터널 기술기준(환기편)·동해설, 일본도로협회, 1985
16. 고속도로 터널 환기시설 설계기준, 한국도로공사, 2002