

제 3-1 편 본선





5. 평면선형

5.1 평면선형의 구성 요소

도로의 평면선형은 경제적 여건이 허락하는 한도 내에서 주행의 안전성, 쾌적성 및 연속성을 고려해야 하며, 그 도로의 설계속도에 따라 자동차가 주행하기에 무리가 없도록 직선, 원곡선, 완화곡선으로 구성되어야 한다.

이 세 가지 요소는 적절한 길이 및 크기로 연속적이며 일관성 있는 흐름을 갖도록 해야 하며, 특히 평면곡선부인 원곡선과 완화곡선 구간에서는 설계속도와 평면곡선반지름의 관계는 물론 횡방향미끄럼마찰계수, 편경사 및 확폭 등의 설계 요소들이 조화를 이루어야 한다.

5.2 평면곡선반지름

차도의 평면곡선반지름은 설계속도와 편경사에 따라 다음 표 5.1의 최소 평면곡선반지름 이상으로 한다.

〈표 5.1〉 최소 평면곡선반지름

설계속도 (킬로미터/시간)	최소 평면곡선반지름(미터)		
	적용 최대 편경사		
	6퍼센트	7퍼센트	8퍼센트
140	1190	1110	1030
130	960	890	840
120	710	670	630
110	600	560	530
100	460	440	420
90	380	360	340
80	280	265	250
70	200	190	180
60	140	135	130
50	90	85	80
40	60	55	50
30	30	30	30
20	15	15	15

자동차가 평면곡선부를 주행할 때에는 원심력에 의하여 자동차는 곡선 바깥쪽으로 힘을 받게 되며, 이때 원심력은 자동차의 속도 및 중량, 평면곡선반지름, 타이어와 포장면의 횡방향 마찰력 및 편경사와 관련하여 자동차에 작용하게 된다.

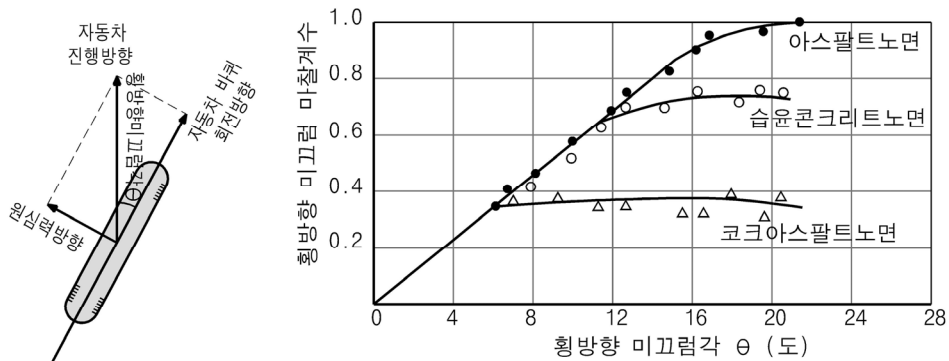
이와 같이 평면곡선부를 주행하는 자동차에 작용하는 힘의 요소들에 대하여 주행의 안전성과 쾌적성을 확보할 수 있도록 횡방향미끄럼마찰계수와 편경사의 값으로 설계속도에 따른 최소 평면곡선반지름을 산정하게 된다. 이때 직선부에서와 같이 안전하고 쾌적한 주행이 가능하도록 횡방향미끄럼마찰계수와 편경사의 값을 결정하게 되므로 두 요소는 주행의 안전과 쾌적에 가장 큰 영향을 미치는 기본적인 요소라 할 수 있다.

(1) 횡방향미끄럼마찰계수(side friction factor : f)

자동차가 평면곡선부를 주행할 때 편경사의 설치 여부와 관계없이 곡선 바깥쪽으로 원심력이 작용하게 되며, 그 힘에 반하여 노면에 수직으로 작용하는 힘이 횡방향력으로 작용하게 되어 타이어와 포장면 사이에 횡방향의 마찰력이 발생하게 된다.

이때 포장면에 작용하게 되는 수직력이 횡방향 마찰력으로 변환되는 정도를 나타내는 것이 횡방향미끄럼마찰계수로서, 그 값은 자동차의 속도, 타이어와 포장면의 형태 및 조건에 따라 달라진다. 횡방향미끄럼마찰계수의 성질을 살펴보면 다음과 같다.

(가) 실측하여 구한 값



〈그림 5.1〉 횡방향 미끄럼각과 재질에 따른 횡방향미끄럼마찰계수

횡방향미끄럼마찰계수의 실측치는 조사·연구자료에 따르면 노면의 재질 및 상태에 따라 다음과 같은 값을 나타내고 있다.

- 아스팔트콘크리트 포장 : 0.4 ~ 0.8

- 시멘트콘크리트 포장 : 0.4 ~ 0.6
- 노면이 결빙된 경우 : 0.2 ~ 0.3

위의 값에서 보듯이 실측하여 구한 값은 노면이 결빙된 경우의 값이 가장 작게 나타나고 있으며, 안전을 고려할 때 횡방향미끄럼마찰계수의 값은 노면이 결빙된 경우에도 안전할 수 있도록 결정되어야 한다.

자동차가 평면곡선부를 주행할 때 횡방향력이 작용하게 되며, 이때 바퀴의 회전방향과 자동차의 진행방향이 일치하지 않음으로써 두 방향이 각을 이루게 되는데 이 각을 횡방향 미끄럼각이라 한다.

횡방향력에 따라 횡방향 미끄럼각이 증가할 때 횡방향미끄럼마찰계수도 증가하게 되며, 어느 각에 이르면 횡방향미끄럼마찰계수의 값이 일정하게 되는데 이때 횡방향미끄럼마찰계수 값으로 정하고 있다.

(나) 쾌적성을 고려한 값

평면곡선부를 주행할 때 운전자는 원심력 때문에 불쾌감을 느끼게 되며, 주행의 방향을 바로 잡기 위하여 속도를 줄이거나 핸들 조작에 주의를 기울이게 된다.

따라서, 횡방향미끄럼마찰계수의 값은 운전자가 안전하고, 동시에 주행의 쾌적함을 만족할 수 있도록 결정되어야 한다.

운전자는 안전하고 쾌적한 주행을 위하여 노면의 요철이 심한 곳에서는 속도를 낮추고, 평면곡선반지름이 작은 구간에서는 될 수 있는 대로 크게 회전하려고 한다.

이와 같은 운전자의 조작에 따른 자동차의 적응 능력 및 기동성을 볼 때 도로에서는 철도에서 요구하고 있는 횡방향 가속도의 범위인 $0.3 \sim 0.6 \text{ m/sec}^2$ 보다 큰 값이 종래부터 허용되고 있다.

그러나 횡방향미끄럼마찰계수의 값을 너무 크게 결정하면 안전한 주행이 보장되지 않아 사고의 위험이 커지며, 이 때 운전자는 안전을 위하여 속도를 낮추게 되어 원활한 교통 흐름에 방해가 된다.

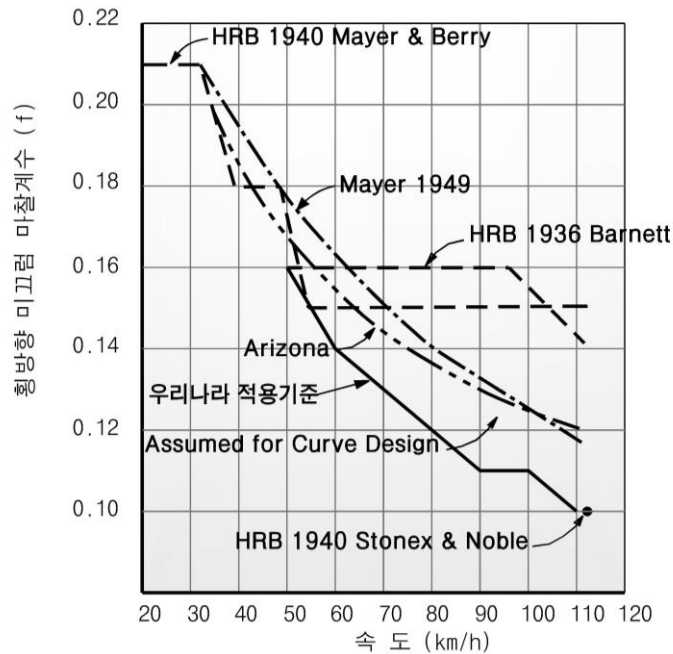
이러한 횡방향미끄럼마찰계수의 한계값을 구하기 위하여 많은 조사 연구가 있었으며, 대체적으로 쾌적성을 고려할 경우 그 값은 속도에 따라 0.10 ~ 0.16 정도가 타당한 것으로 알려져 있다.

(다) 설계에 적용되는 값

횡방향미끄럼마찰계수의 값은 주행의 안전성과 쾌적성을 동시에 만족하는 값이어야 하므로 주어진 조건의 최댓값이 아닌 허용할 수 있는 범위 내에서의 최댓값을 적용해야 한다. 이 요령에서는 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)의 연구 실적을 참고하여 그 값을 결정하였다.

〈표 5.2〉 설계속도에 따른 횡방향미끄럼마찰계수

설계속도(km/h)	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20
횡방향미끄럼마찰계수	0.07	0.08	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16



〈그림 5.2〉 속도에 따른 횡방향미끄럼마찰계수

그림 5.2에서 보듯이 횡방향미끄럼마찰계수는 속도에 따라 주행의 쾌적을 고려하여 $f = 0.1 \sim 0.16$ 을 적용하도록 하였으며, 이 값을 실측하여 구한 값과 비교하여 보면 안전의 측면에서도 충분한 값이라고 판단된다. 그러므로 횡방향미끄럼마찰계수는 설계속도별로 표 5.2의 값을 적용하도록 한다.

(2) 편경사

자동차가 평면곡선부를 주행할 때 작용하는 원심력에 저항하는 힘은 횡방향 마찰력과 설치된 편경사에 따른 포장면에 수직으로 작용하는 분력이다. 원심력 가운데 운전자에 불쾌감을 주는 횡방향력을 작게 하기 위해서는 될 수 있는 대로 편경사를 크게 해야 하지만 편경사가 너무 클 경우 저속으로 주행하는 자동차가 횡방향으로 미끄러지려 하기 때문에 운전자가 주행방향을 유지하기 위하여 부자연스러운 핸들 조작을 해야 한다. 또한 포장면이 결빙되었을 때 자동차의 정지 및 출발할 때 횡방향으로 미끄러질 우려가 있어 최대 편경사를 제한하고 있다.

최대 편경사를 결정할 때 고려해야 할 요소는 다음과 같다.

- ① 주행의 쾌적성 및 안전성
- ② 적설, 결빙 등의 기상조건
- ③ 지역 구분
- ④ 저속 주행 자동차의 빈도
- ⑤ 시공성 및 유지관리

최대 편경사는 이러한 요소들을 고려하여 그 도로가 갖는 조건들을 감안하여 6 ~ 8%로 결정하였다.

AASHTO에서는 일반적으로 최대 편경사 8%를 바람직한 값으로 정하고 있으며, 우리나라도 최대 편경사를 8%까지 규정하고 있으나 고속국도의 경우 본선은 6%, 연결로는 8%를 적용하고 있다.

(3) 평면곡선반지름

최소 평면곡선반지름은 평면곡선부를 주행할 때 발생하는 원심력으로 인하여 곡선부의 바깥쪽으로 미끄러지거나 전도할 위험을 방지할 수 있도록 타이어와 포장면 사이의 횡방향 마찰력이 원심력보다 크도록 해야 하며, 동시에 주행의 쾌적성을 확보 할 수 있도록 해야 한다.

(가) 횡방향 미끄러움을 일으키지 않기 위한 조건

평면곡선부를 주행하는 자동차는 원운동을 하기 위하여 구심력이 필요하며, 그에 반하여 평면곡선반지름과 속도에 따라 다음과 같은 크기의 원심력이 작용하게 된다.

$$F = \frac{W}{g} \times \frac{v^2}{R} \quad (5.1)$$

여기서, F : 원심력(kg)

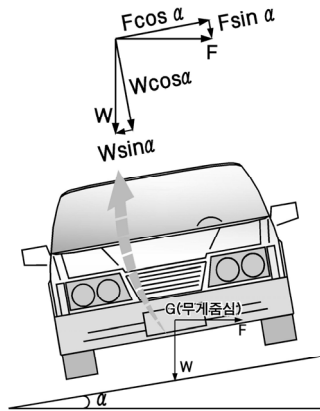
W : 자동차의 총 중량(kg)

g : 중력가속도($\approx 9.8 \text{ m/sec}^2$)

v : 자동차의 속도(m/sec)

R : 평면곡선 반지름(m)

그림 5.3에서 보듯이 평면곡선부를 주행하는 자동차는 노면에 수평방향으로 원심력(F)과 수직방향으로 자동차의 총 중량(W)이 작용하게 되며, 경사각 α (편경사)에 의하여 원심력(F)과 자동차의 총 중량(W)은 그 분력이 발생하게 된다.



〈그림 5.3〉 평면곡선부 주행 시의 자동차에 미치는 힘의 분력

이 때 자동차가 미끄러지지 않기 위하여서는 원심력 방향의 힘이 타이어와 포장면 사이의 횡방향 미끄럼 마찰력보다 작아야 한다. 횡방향 마찰력에 의한 횡방향미끄럼마찰계수를 f 라 하면 자동차의 안전을 위하여서는 다음의 식을 만족해야 한다.

$$(F \cos \alpha - W \sin \alpha) \leq f (F \sin \alpha + W \cos \alpha)$$

양변을 $\cos \alpha$ 로 나누어 정리하면,

$$(F - W \tan \alpha) \leq f (F \tan \alpha + W)$$

$$\tan \alpha = i \text{ (편경사)를 대입하면 } (F - Wi) \leq f (Fi + W)$$

위의 식에 식 5.1을 대입하면

f_i 는 매우 작으므로 생략하여 정리하면

$$R \geq \frac{v^2}{g(i + f)} \quad (5.2)$$

위의 식에서 속도(v : m/sec)를 설계속도(V : km/h)로 정리하면

$$R \geq \frac{V^2}{3.6^2 \times 9.8 \times (i + f)} \geq \frac{V^2}{127(i + f)} \quad (5.3)$$

(나) 횡방향 미끄럼을 일으키지 않기 위한 조건 식 5.3은 평면 곡선부를 주행하는 자동차가 횡방향으로 미끄러지지 않을 조건의 평면곡선반지름, 설계속도, 횡방향미끄럼마찰계수 및 편경사의 관련 식이다.

일반적으로 원심력에 의하여 자동차는 전도보다는 횡방향 미끄럼의 영향을 먼저 받게 되므로 횡방향 미끄럼에 안전할 수 있는 한계치의 평면곡선반지름을 최소 평면곡선반지름으로 결정하게 되며, 식 5.3에 따라 최소 평면곡선반지름은 다음 식으로 구한다.

$$R = \frac{V^2}{127(i + f)} \quad (5.4)$$

식 5.4와 표 5.2에 따라 설계속도와 최대 편경사별로 최소 평면곡선반지름을 구하면 표 5.3과 같다.

〈표 5.3〉 최소 평면곡선반지름의 값

설계속도 (km/h)	횡방향미끄럼 마찰계수	최소 평면곡선반지름(m)					
		최대 편경사 6%		최대 편경사 7%		최대 편경사 8%	
		계산값	규정값	계산값	규정값	계산값	규정값
140	0.07	1187	1190	1102	1110	1029	1030
130	0.08	951	960	888	890	832	840
120	0.10	709	710	667	670	630	630
110	0.10	596	600	560	560	529	530
100	0.11	463	460	437	440	414	420
90	0.11	375	380	354	360	336	340
80	0.12	280	280	265	265	252	250
70	0.13	203	200	193	190	184	180
60	0.14	142	140	135	135	129	130
50	0.16	89	90	86	85	82	80
40	0.16	57	60	55	55	52	50
30	0.16	32	30	31	30	30	30
20	0.16	14	15	14	15	13	15

(4) 평면곡선반지름의 적용

최소 평면곡선반지름의 규정값은 평면곡선부를 주행하는 운전자의 안전성과 쾌적성을 확보하기 위한 최소한의 값이며, 각 차로의 중심선에 적용되는 값이므로 설계속도 60 km/h 이상의 도로나 6차로 이상의 다차로 도로에서 평면선형을 차도 중심선을 따라 설계할 경우 최소

평면곡선반지름 적용 구간에서는 곡선의 안쪽 차로에 대한 평면곡선반지름에 세심한 주의를 기울이어야 한다.

또한, 평면선형을 설계할 때 최소 평면곡선반지름의 규정값에 얽매어 지형상 상당히 여유 있는 평면곡선반지름을 적용할 수 있음에도 불구하고 최소 평면곡선반지름에 가까운 값을 적용하는 것은 바람직하지 못하며, 그 구간 앞뒤의 조건과 균형을 고려하여 지형조건에 순응할 수 있는 평면곡선반지름을 적용해야 한다.

(가) 지방지역도로의 경우

어떠한 설계속도를 정하여 규정된 최소 평면곡선반지름을 적용하려면 토공 등 공사비의 증가로 막대한 공사비의 증액을 초래하여 사실상 공사 시행이 불가능하게 되는 경우도 있다.

이와 같은 경우에는 설계속도를 한 단계 낮추어 설계하는 것이 타당할 것이며, 설계속도를 낮추어 도로에서 얻어지는 편익에는 다소 손실이 있다 하더라도 막대한 건설비가 절약된다면, 비용-편익비(Benefit Cost Ratio)가 커지므로 경제적 측면에서 볼 때 합리적이라 할 수 있다.

그러나 이 경우, 극히 한정된 구간에 대해서만 낮은 설계속도를 적용하는 방법은 피해야 한다. 운전자가 갑자기 속도를 낮출 경우 교통사고 발생위험이 높아지므로 적당한 구간에 걸쳐서 설계속도를 낮추어 운전자가 자연스럽게 속도를 조정할 수 있도록 설계해야 한다.

또한, 선형의 계획단계에서 서서히 평면곡선반지름을 작게 설계하여 배치하거나, 평면곡선반지름이 작은 평면곡선부를 운전자가 인지할 수 있도록 평면곡선반지름을 배치하도록 하는 것이 바람직하다.

이와 같이 평면곡선반지름이 작은 곡선부의 앞뒤에는 교통안전표지를 활용하여 경고하도록 함과 아울러 방호울타리 등 안전시설을 설치해야 한다.

(나) 도시지역도로의 경우

도시지역도로에서는 주변 여건으로 인하여 편경사를 설치할 수 없는 경우가 많다. 이 경우, 평면곡선반지름의 최솟값은 직선부의 횡단경사를 편경사로 설정하고 횡방향미끄럼마찰계수의 값은 설계속도에 따라 0.14 ~ 0.15까지 적용하여 산정해야 한다.

이보다 더 작은 최소 평면곡선반지름을 쓰는 경우는 원심력의 증가분에 대하여는 약간의 편경사를 설치하여 안전성을 확보해야 한다.

(다) 터널 구간 평면곡선반지름

터널 내 평면곡선반지름별 사고 발생 현황을 분석한 결과 $R = 1,800\text{ m}$ 이상의 경우 거의 사고가 발생되지 않는 것으로 조사되었다. 따라서 터널 구간의 평면선형은 가급적 직선 또는 $R = 1,800\text{ m}$ 이상으로 설계해야 하며, 부득이한 경우라도 터널 전·후의 지형 여건, 지장물 여건 등을 고려하여 가급적 큰 곡선반지름을 적용함이 바람직하며, 터널 입·출구부는 심리적 압박감이 최소화 될 수 있도록 완화곡선 또는 직선에서 곡선으로 변화되는 선형은 자제해야 한다.

5.3 평면곡선길이

평면곡선부의 차도 중심선 길이(완화곡선이 있는 경우에는 그 길이를 포함한다)는 다음 표 5.4의 값 이상으로 한다.

〈표 5.4〉 최소 평면곡선길이

(단위 : 미터)

설계속도(킬로미터/시간)	도로 교각이 5° 미만	도로 교각이 5° 이상
140	$800/\theta$	160
130	$750/\theta$	150
120	$700/\theta$	140
110	$650/\theta$	130
100	$550/\theta$	110
90	$500/\theta$	100
80	$450/\theta$	90
70	$400/\theta$	80
60	$350/\theta$	70
50	$300/\theta$	60
40	$250/\theta$	50
30	$200/\theta$	40
20	$150/\theta$	30

주) θ 는 도로 교각(단위는 도). θ 가 2°미만일 때는 2°로 한다.

(1) 개요

자동차가 평면곡선부를 주행할 때 평면곡선의 길이가 짧으면 운전자는 평면곡선 방향으로 핸들을 조작하였다가 직선부로 진입하기 위하여 즉시 핸들을 반대 방향으로 조작해야 하기 때문에, 이로 인하여 운전자는 횡방향의 힘을 받게 되어 불쾌감을 느낄 뿐만 아니라 고속으로 주행할 때 안전에 좋지 않은 영향을 주게 된다. 그러므로 최소 평면곡선길이는 다음의 조

건을 고려하여 결정해야 한다.

- ① 운전자가 핸들 조작에 곤란을 느끼지 않을 것.
- ② 도로 교각이 작은 경우에는 평면곡선반지름이 실제의 크기보다 작게 보이는 착각을 피할 수 있도록 할 것.

(2) 최소 평면곡선길이의 계산

(가) 운전자가 핸들 조작에 곤란을 느끼지 않을 길이

평면곡선부를 주행하는 운전자가 핸들 조작에 곤란을 느끼지 않고 그 구간을 통과하기 위하여서는 경험적으로 한 방향으로 핸들조작을 할 때 2 ~ 3초가 필요한 것으로 알려져 있으나, 평면곡선길이는 보다 안전하고 쾌적한 주행을 위하여 경험적인 값의 2배인 약 4 ~ 6초 간 주행할 수 있는 길이 이상 확보하는 것이 좋은 것으로 알려져 있다.

이 요령에서는 최소 평면곡선길이는 4초 간 주행할 수 있는 길이 이상을 확보하도록 결정하였으며, 이 값은 최소 완화곡선길이의 2배의 값이다.

최소 평면곡선길이는 식 5.5에 따라 산정하며 설계속도별로 그 길이를 구하면 표 5.5와 같다.

$$L = t \cdot v = \frac{t}{3.6} V \quad (5.5)$$

여기서, L : 평면곡선길이(m)

t : 주행시간(4sec)

v, V : 자동차 속도(m/sec, km/h)

〈표 5.5〉 최소 평면곡선길이의 계산값과 규정값

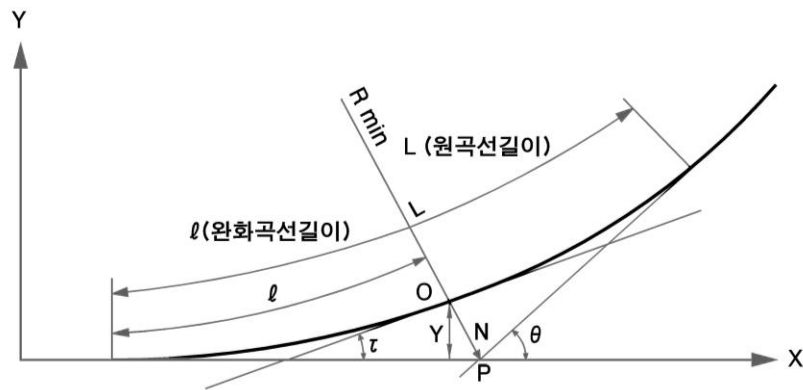
설계속도(km/h)	최소 평면곡선길이(m)	
	계산값	규정값
140	155.5	160
130	144.4	150
120	133.3	140
110	122.2	130
100	111.1	110
90	100.0	100
80	88.9	90
70	77.8	80
60	66.7	70
50	55.6	60
40	44.4	50
30	33.3	40
20	22.2	30

(나) 도로 교각이 5° 미만인 경우의 길이

도로 교각이 매우 작은 경우에는 평면곡선길이가 운전자에게 실제보다 짧게 보이므로 도로가 급하게 꺾여져 있는 것 같은 착각을 일으키며, 이 경향은 교각이 작을수록 현저히 높아진다.

따라서, 교각이 작을수록 긴 평면곡선부를 삽입하여 도로의 평면곡선부가 완만히 진행되고 있는 것이 운전자에게 느껴지도록 해야 한다.

도로 교각이 작은 구간에서 운전자가 평면곡선부를 주행해야 한다는 것을 인식하기 위해서는 그림 5.4에 나타난 외선 길이(N, Secant Length)가 어느 정도 이상이 되어야 한다. 그러므로 완화곡선을 클로소이드로 생각하고 도로 교각이 5° 미만인 경우의 외선 길이가 도로 교각이 5° 인 경우의 외선길이의 값이 같은 값이 되는 평면곡선길이를 최소 평면곡선길이라고 한다.



〈그림 5.4〉 도로 교각 5° 미만일 경우의 외선 길이

클로소이드 파라미터를 A라 할 때 클로소이드의 식에서

$$Y = \frac{A}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{3} \tau \sqrt{\tau} \left(1 - \frac{\tau^2}{14} + \frac{\tau^4}{440} \dots \right) \quad (5.6)$$

$$\ell = A \sqrt{2\tau} \quad (5.7)$$

$$N = \frac{Y}{\cos \tau} (= \overline{PO}) \quad (5.8)$$

식 5.6, 식 5.7, 식 5.8식에서

$$N = \frac{1}{\cos \tau} \cdot \frac{\tau \ell}{3} \left(1 - \frac{\tau^2}{14} + \frac{\tau^4}{440} \dots \right) \quad (5.9)$$

식 5.9에서 τ 의 값이 매우 적은 경우는 $\tau^2, \tau^4 \dots \approx 0$, $\cos \tau \approx 1$ 로 간주할 수 있으므로

$$N \approx \frac{\tau \ell}{3} \quad \therefore \ell = \frac{3N}{\tau}$$

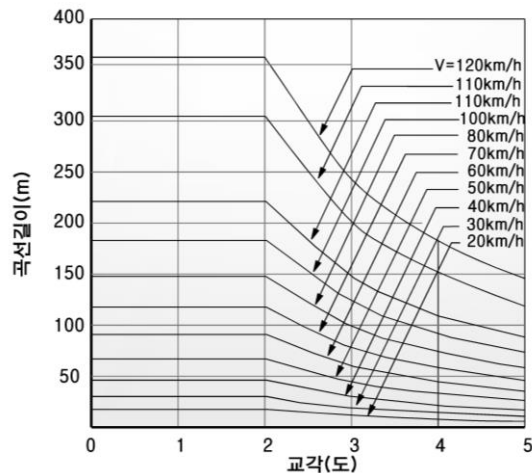
τ (radian) 대신에 도로 교각 θ (도)를 쓰면

$$\text{완화곡선 길이 } \ell = \frac{344N}{\theta}, \text{ 원곡선 길이 } L = 2\ell = \frac{688N}{\theta} \quad (5.10)$$

〈표 5.6〉 도로 교각과 최소 평면곡선길이의 관계

설계속도(km/h)	최소 완화곡선길이(m)	외선장(m)	최소 평면곡선길이(m)
140	80	1.16	$800/\theta$
130	75	1.09	$750/\theta$
120	70	1.02	$700/\theta$
110	65	0.94	$650/\theta$
100	55	0.80	$550/\theta$
90	50	0.73	$500/\theta$
80	45	0.65	$450/\theta$
70	40	0.58	$400/\theta$
60	35	0.51	$350/\theta$
50	30	0.44	$300/\theta$
40	25	0.36	$250/\theta$
30	20	0.29	$200/\theta$
20	15	0.22	$150/\theta$

완화곡선구간에서 규정하고 있는 최소 완화곡선길이를 이용하여 도로 교각 5° 일 때의 외선 길이 N 을 구하고, θ 를 함수로 한 식 5.10을 이용하여 L 을 구하면, 표 5.6과 같다. 또 그 길이를 그래프로 나타내면 그림 5.5와 같다.



〈그림 5.5〉 도로 교각과 최소 평면곡선길이의 관계

(3) 적용상의 주의

규정된 최소 평면곡선길이는 최소 완화구간 길이의 두 배로 되어 있다. 즉, 완화곡선만으로도 최소 평면곡선길이를 만족할 수 있으나, 이 경우에 핸들 조작에 곤란을 느끼지 않을 길이를 만족하고 있다 하여도 운전자가 평면곡선반지름이 가장 작은 곳에서는 급히 핸들을 돌려야 하기 때문에 원활한 핸들 조작이라고 할 수 없다. 또한, 편경사의 설치에 주의하지 않으면 꺾어져 보이는 일이 많아 운전자에게 원활한 주행감을 주지 못하는 곡선이 된다. 따라서, 이 두 완화곡선 사이에 어느 정도 길이의 원곡선을 삽입하는 것이 바람직하다.

이 원곡선의 길이는 설계속도로 약 4초 간 주행할 수 있는 길이 이상을 삽입하는 것이 바람직하다.

경험상으로는 원곡선 반지름 R 에 대해서 클로소이드의 파라미터(Clothoid Parameter, A)와 원곡선 반지름(R) 간에 $R \geq A \geq R/3$ 되는 관계에 있을 때 원활한 평면곡선의 조화가 이루어지며, 그 가운데서도 $A > R/2$ 가 바람직하다고 알려져 있으나, 도로 교각의 크기, 지형 및 지장물 등의 주변 여건에 따라 운전자의 핸들 조작 시간, 편경사 등을 고려하여 원곡선과 완화곡선의 길이를 적절히 설치해야 한다.

5.4 평면곡선부 확폭

(1) 차도 평면곡선부의 각 차로는 평면곡선반지름 및 설계기준자동차에 따라 다음 표의 폭 이상을 확보해야 한다.

세미트레일러		대형자동차		소형자동차	
평면곡선반지름 (미터)	최소 확폭량 (미터)	평면곡선반지름 (미터)	최소 확폭량 (미터)	평면곡선반지름 (미터)	최소 확폭량 (미터)
150 이상 ~ 280 미만	0.25	110 이상 ~ 200 미만	0.25	45 이상 ~ 55 미만	0.25
90 이상 ~ 150 미만	0.50	65 이상 ~ 110 미만	0.50		
65 이상 ~ 90 미만	0.75	45 이상 ~ 65 미만	0.75		
50 이상 ~ 65 미만	1.00	35 이상 ~ 45 미만	1.00	25 이상 ~ 45 미만	0.50
40 이상 ~ 50 미만	1.25	25 이상 ~ 35 미만	1.25		
35 이상 ~ 40 미만	1.50	20 이상 ~ 25 미만	1.50	15 이상 ~ 25 미만	0.75
30 이상 ~ 35 미만	1.75	18 이상 ~ 20 미만	1.75		
20 이상 ~ 30 미만	2.00	15 이상 ~ 18 미만	2.00		

(2) 제(1)항에도 불구하고 차도 평면곡선부의 각 차로가 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우에는 확폭을 하지 않을 수 있다.

- 1) 도시지역도로(고속국도는 제외한다)에서 도시·군관리계획이나 주변 지장물 등으로 인하여 부득이하다고 인정되는 경우
- 2) 설계기준자동차가 승용자동차인 경우

(1) 개요

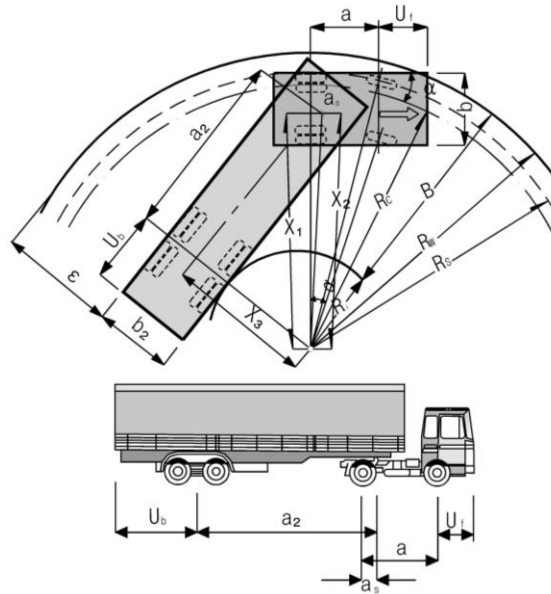
도로의 차로폭은 설계속도 및 그 도로의 설계기준자동차에 따라 결정하게 되지만, 평면곡선 반지름이 작은 곡선부에서는 설계기준자동차의 회전에 따른 궤적이 해당 차로의 차선을 넘어가는 경우가 발생하게 되어 교통안전에 악영향을 미치게 된다.

그러므로 이러한 구간에서는 설계기준자동차의 주행 궤적이 정하여진 차로로 통행할 수 있도록 차로의 폭을 넓혀야 한다.

이 요령에서는 그 도로에 적응하는 설계기준자동차에 따라 확폭량을 산정하도록 하였다. 또한 도시지역도로(고속국도는 제외)에서 도시·군관리계획, 도로 주변 상황 등으로 부득이한 경우에 확폭하지 않을 수 있다.

(2) 확폭량의 계산

고속국도의 확폭량 계산 시에는 설계기준자동차를 세미트레일러로 한다.



〈그림 5.6〉 세미트레일러의 확폭량 계산

그림 5.6에서,

a : 견인차의 축간거리

a_2 : 피견인차의 축간거리

a_s : 연결판에서 견인차의 뒤축까지의 거리

b : 견인차의 폭

b_2 : 피견인차의 폭 일 때,

$$\epsilon = B - 2.5$$

$$B = R_w + 1.25 - \sqrt{R_c^2 - 111.25}$$

$$R_w = \sqrt{(\sqrt{R_c^2 - 30.25} + 1.25)^2 + 30.25} \quad (5.11)$$

여기서, ϵ : 확폭량

R_w : 외측 평면곡선반지름

B : 자동차의 주행 폭원

R_c : 차로 중심선의 반지름

「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙」해설에서는 확폭을 필요로 하는 최소 평면곡선반지름은 계산으로 구한 확폭량이 0.20 m 이상이 되는 평면곡선반지름을 기준으로 하여 그보다 큰 평면곡선반지름의 경우에는 확폭하지 않는 것으로 하였으며, 차로당 최소 확폭량은 설계 및 시공의 편의를 고려하여 0.25 m 단위로 확폭량을 결정하였다.

〈표 5.7〉 평면곡선반지름에 따른 확폭량

(단위 : m)

설계기준자동차								
세미트레일러			대형자동차			소형자동차		
평면곡선 반지름	계산값	한 차로 당 최소 확폭량	평면곡선 반지름	계산값	한 차로 당 최소 확폭량	평면곡선 반지름	계산값	한 차로 당 최소 확폭량
150이상~280미만	0.20~0.37	0.25	110이상~200미만	0.20~0.36	0.25	450이상 ~ 55미만	0.19~0.24	0.25
90이상~150미만	0.37~0.62	0.50	65이상~110미만	0.36~0.61	0.50			
65이상~ 90미만	0.62~0.86	0.75	45이상~ 65미만	0.61~0.88	0.75			
50이상~ 65미만	0.86~1.12	1.00	35이상~ 45미만	0.88~1.14	1.00	250이상 ~ 45미만	0.24~0.41	0.50
40이상~ 50미만	1.40~1.12	1.25	250이상~ 35미만	1.14~1.60	1.25			
350이상~ 40미만	1.61~1.40	1.50	200이상~ 25미만	1.60~2.01	1.50	150이상 ~ 25미만	0.41~0.66	0.75
300이상~ 35미만	1.89~1.61	1.75	180이상~ 20미만	2.01~2.25	1.75			
200이상~ 30미만	2.96~1.89	2.00	150이상~ 18미만	2.25~2.77	2.00			

차로별 확폭량은 이론적으로는 차로의 평면곡선반지름에 따라 서로 다르지만, 차로의 반지름을 각각 구해서 확폭량을 결정하는 수고를 덜기 위하여 도로 중심선(또는 차도 중심선)의 반지름이 35 m 이상인 경우에는 원칙적으로 도로 중심선(또는 차도 중심선)에 의해서 차로의 확폭량을 구하도록 한다.

(3) 확폭할 때 주의사항

(가) 도로 중심선의 평면곡선반지름이 작은 경우의 확폭 도로 중심선의 평면곡선반지름이 35 m 미만의 경우로서, 특히 차로수가 많을 때에는 도로 중심선의 평면곡선반지름을 따라 구한 확폭량이 각각의 차로에 필요한 확폭량과 크게 다를 경우가 있으므로 차로마다 확폭량을 구하는 것으로 한다.

(나) 도시지역도로의 확폭

도시지역에 위치하는 도로에 대해서는 지형의 상황, 그 밖의 특별한 이유로 부득이한 경우에는 확폭량의 축소나 확폭을 생략할 수 있으나 이를 남용해서는 안 되며, 교통안전과 원활한 흐름을 위하여 확폭량 설치를 최대한 노력해야 한다. 부득이하게 확폭량을 축소하거나 확폭을 생략할 경우에도 대형자동차의 통행이 예상되는 도로에 대해서는 차로폭을 대형자동차의 폭($B=2.5$ m)이 적용된 확폭량을 더한 폭 이상으로 설치해야 한다.

(4) 고속국도 설계 시 적용

고속국도 본선의 경우 일반적으로 설계속도 100 km/h 이상을 적용하여 최소 평면곡선반지름을 460 m 이상 사용하므로 확폭은 고려하지 않아도 된다.

인터체인지 루프 연결로의 경우 길어깨는 본선 포장과 동일한 포장을 실시하고, 측방여유폭이 확보되어 확폭을 생략한다.

5.5 완화곡선 및 완화구간

5.5.1 완화곡선 및 완화구간의 설치와 길이

- (1) 설계속도가 시속 60킬로미터 이상인 도로의 평면곡선부에는 완화곡선을 설치해야 한다.
 (2) 완화곡선의 길이는 설계속도에 따라 다음 표 5.8의 값 이상으로 해야 한다.

〈표 5.8〉 완화곡선 최소 길이

설계속도(킬로미터/시간)	완화곡선의 최소 길이(미터)
140	80
130	75
120	70
110	65
100	60
90	55
80	50
70	40
60	35

- (3) 설계속도가 시속 60킬로미터 미만인 도로의 평면곡선부에는 다음 표의 길이 이상의 완화구간을 두고 편경사를 설치하거나 확폭을 해야 한다.

〈표 5.9〉 완화구간의 최소 길이

설계속도(킬로미터/시간)	완화구간의 최소 길이(미터)
50	30
40	25
30	20
20	15

(1) 개요

자동차의 안전한 주행을 위하여 직선부에서 곡선부, 곡선부에서 직선부 또는 곡선반지름이 다른 곡선부로 원활하게 주행할 수 있도록 그 사이에 완화구간을 설치할 필요가 있다.

여기에서, 완화구간이란 편경사의 접속설치를 위한 구간, 확폭을 위한 접속설치 구간, 직선과 원곡선 사이 또는 대원과 소원 사이의 구간을 말하며, 완화구간에는 완화곡선을 설치하는데 주로 클로소이드 곡선을 사용한다.

완화곡선의 종류에는 삼차 포물선(cubic parabola), 램니스케이트(lemniscate), 클로소이

드(clothoid)등이 있다. 그 중에서 클로소이드 곡선이 여러 가지 점에서 우수한 성질을 가지고 있어서 대표적인 완화곡선으로 사용되고 있다.

(2) 완화곡선 및 완화구간의 설치 목적

완화곡선 및 완화구간의 설치 목적은 다음과 같다.

- ① 평면곡선부를 주행하는 자동차에 대한 원심력을 점차적으로 변화시켜 일정한 주행속도 및 주행궤적을 유지시킨다.
 - ② 직선 구간의 표준횡단경사 구간에서 원곡선부에 설치되는 최대 편경사까지의 변화를 주행속도와 평면곡선반지름에 따라 적절하게 접속시킬 수 있도록 한다.
 - ③ 평면곡선부에서 확폭이 필요한 경우 평면곡선부의 확폭된 폭과 표준횡단의 폭을 자연스럽게 접속시킬 수 있도록 한다.
 - ④ 원곡선의 시작점과 끝점에서 꺾어진 형상을 시각적으로 원활하게 보이도록 한다.
- ① ~ ④에서 완화곡선길이를 결정하는 주요소는 ①과 ②이며, ③의 경우는 결정된 완화곡선길이 내에서 접속 설치하게 된다.

(3) 완화곡선의 길이 산출

(가) 자동차의 완화주행 궤적

자동차가 직선부에서 곡선부로 주행할 때 그 회전 반지름이 무한대(직선)에서 차츰 일정한 반지름이 되도록 핸들을 조작해야 하는데, 이와 같이 직선 주행에서 일정한 반지름의 곡선부 주행으로 옮기기까지 사이에 곡선 주행을 완화주행이라 하고, 이때의 자동차 궤적을 완화주행 궤적이라 한다.

완화주행 궤적의 형상은 다음과 같다.

그림 5.7에서 자동차의 회전각속도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

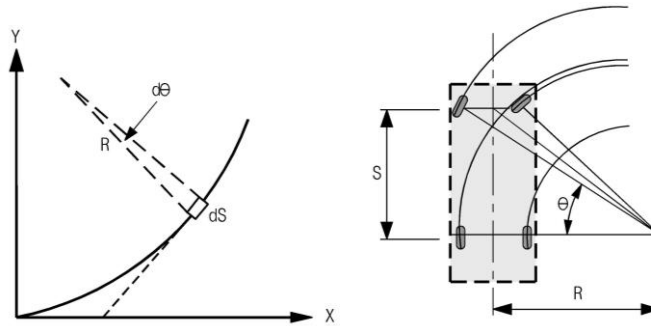
$$w = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{v}{R} \quad (5.12)$$

여기서, w : 자동차의 회전각속도

v : 자동차의 주행속도(m/sec)

R : 주행 궤적상의 임의의 점에서의 평면곡선반지름

θ : 회전각



〈그림 5.7〉 자동차의 완회주행

지금 자동차의 주행속도 v 가 일정하다고 하면, 회전각 가속도 w' 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$w' = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = \frac{v}{s} \sec^2 \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (5.13)$$

단, $R = \frac{s}{\tan \theta}$ 이다(그림 5.7 참조).

직선부에서 평면곡선부로 또는 평면곡선부에서 직선부로 주행하는 회전각 가속도 w' 가 일정하게 될 때 운전자가 안전하고 쾌적하게 주행할 수 있으며, 그 궤적을 구해 보면 다음과 같다.

식 5.13에서 회전각 가속도 w' 가 일정하다고 가정할 때

$$\frac{v}{s} \sec^2 \theta \cdot \frac{d\theta}{dt} = k \quad (5.14)$$

이를 풀면, $\tan \theta = \frac{k \cdot s}{v} \cdot t + c$

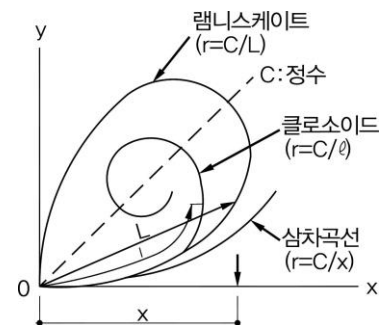
$t=0$ 일 때 $\tan \theta = 0$ 이므로, $c=0$

따라서, $R = \frac{v}{k \cdot t}$

완회곡선의 길이를 L 이라 하면,

$$t = \frac{L}{v} \text{ 이므로, } R = \frac{v^2}{k \cdot L}$$

$$\text{그러므로, } R \cdot L = \frac{v^2}{k} = A^2 \left(A^2 = \frac{v^2}{k} = \text{일정} \right) \quad (5.15)$$



〈그림 5.8〉 완회 주행궤적에 근사한 곡선

식 5.15는 클로소이드의 일반식이다.

즉, 자동차가 일정한 회전각 가속도로 주행하는 경우에는 완화주행궤적은 클로소이드를 그린다는 것을 알 수 있다.

자동차의 구조상 θ 는 $0 \sim 30^\circ$ 이므로 $\sec^2\theta$ 는 거의 일정한 값이 되며, 따라서 $\frac{d\theta}{dt}$ 도 거의 일정하며 θ 가 핸들 회전각과 비례한다고 생각하면 이 주행은 회전속도가 거의 일정한 주행이라 할 수 있다.

(나) 완화곡선 및 완화구간의 길이

설계속도 60 km/h 이상의 도로에서는 운전자가 미숙한 핸들 조작과 사소한 착오를 일으키더라도 원상 복귀가 가능한 주행시간의 길이만큼 반드시 완화곡선을 설치하여 운전자의 시선 및 주행 궤적을 자연스럽게 유도할 수 있어야 하며, 설계속도 60 km/h 미만의 도로에서 완화곡선을 설치하지 않을 경우에는 직선부와 원곡선부를 직접 연결하고, 평면 곡선부의 편경사 및 확폭을 점속 설치할 수 있도록 완화구간을 설치해야 한다.

핸들 조작에 곤란을 느끼지 않고 주행할 수 있는 곡선부의 주행 시간을 2초로 하고, 식 5.16을 이용하여 최소 완화곡선 및 완화구간 길이를 계산하면 표 5.10과 같다.

〈표 5.10〉 완화곡선 및 완화구간의 최소 길이

설계속도(km/h)	계산값(m)	규정값(m)
140	77.8	80
130	72.2	75
120	66.7	70
110	61.1	65
100	55.6	60
90	50.0	55
80	44.4	50
70	38.9	40
60	33.3	35
50	27.8	30
40	22.2	25
30	16.7	20
20	11.1	15

$$L = v \times t = \frac{V}{3.6} \times t$$

(5.16)

여기서, L : 완화곡선 및 완화구간 길이(m)

t : 주행시간(초)

v : 주행속도(m/sec)

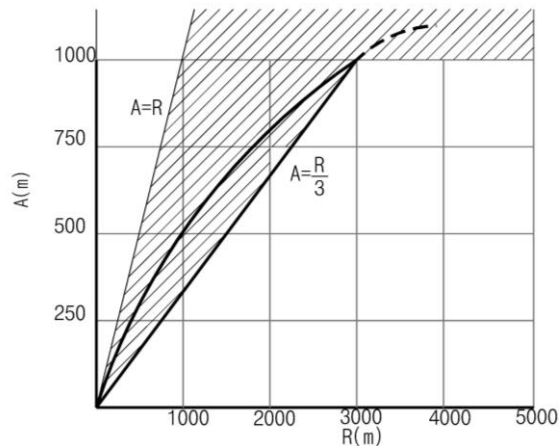
V : 주행속도(km/h)

(4) 완화곡선의 적용

완화곡선을 클로소이드로 쓰는 경우, 경험에 따른 그 크기는 접속하는 원곡선에 대하여 완화곡선 파라미터를 A 라 할 때 다음의 범위에 들어가도록 권장하고 있다.

$$\frac{R}{3} \leq A \leq R \quad (5.17)$$

이 법칙이 적용되는 원곡선의 반지름은 어느 범위에 들어가 있을 때이므로, 원곡선 반지름 R 이 작으면 파라미터 A 가 원곡선 반지름보다 커지고, 원곡선 반지름 R 이 크면 파라미터 A 가 $R/3$ 보다 작게 되어, 일반적으로 그림 5.9와 같은 곡선에 따르는 조합을 선형과 조화, 주행의 쾌적성, 경제성 등의 관점에서 권장한다.



〈그림 5.9〉 평면곡선반지름과(R)과 클로소이드의 파라미터(A)의 관계

5.5.2 완화곡선의 생략

- (1) 직선과 원곡선 사이에 완화곡선을 설치하는 경우, 원곡선 반지름이 설계속도에 따라 다음 표 5.11의 값 이상이면 완화곡선을 생략할 수 있다.

〈표 5.11〉 완화곡선을 생략할 수 있는 한계 원곡선 반지름(직선과 원곡선)

설계속도(킬로미터/시간)	140	130	120	110	100	90	80
한계 원곡선 반지름(미터)	4,000	3,500	3,000	2,500	2,000	1,600	1,300

(2) 같은 방향으로 굽어지는 소원과 대원 사이에 완화곡선을 설치하는 경우, 다음 조건들 중 어느 하나를 만족시키면 완화곡선을 설치하지 않아도 된다.

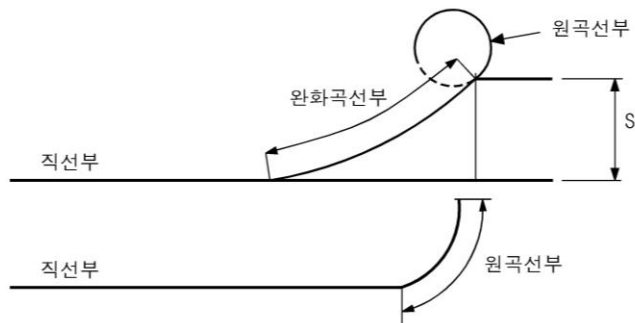
- 1) 두 원곡선의 반지름 중 작은 반지름이 표 5.11의 값 이상일 때
- 2) 두 원곡선 사이에 완화곡선을 설치했을 때 이정량이 0.2미터 미만이고, 두 원곡선 반지름의 비가 1.5 이하일 때

(1) 개요

완화곡선을 직선과 원곡선 사이에 삽입하는 경우, 그림 5.10에 나타낸 바와 같이, 직선과 원곡선을 직접 연결하는 경우에 비하여 S만큼의 이정량(shift)이 생긴다.

이 이정량이 차로폭에 포함되는 여유 폭(차로폭은 자동차의 폭에 여유 폭을 더한 값임)에 비하여 매우 작은 경우에는 직선과 원곡선을 직접 접속시키더라도 자동차가 완화 주행을 하는데 아무런 지장이 없다.

이와 같이, 완화곡선을 생략하여도 자동차의 주행에 지장을 주지 않는 이정량을 한계 이정량이라고 한다.



〈그림 5.10〉 완화곡선의 이정량

「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙」 해설에서 완화곡선의 한계 이정량을 0.20 m로 규정하고 있으며, 이정량이 0.20 m 이상일 경우에 대해서만 완화곡선을 설치하는 것으로 한다.

(2) 한계 원곡선 반지름의 계산

직선과 원곡선 사이에 설치되는 완화곡선이 클로소이드라고 가정할 때, 한계 이점량 0.20 m에 대한 한계 원곡선 반지름을 구하는 계산식과 값은 다음과 같다.

$$S = \frac{1}{24} \times \frac{L^2}{R} \quad (5.18)$$

여기서, S : 이점량(m), L : 완화구간의 길이(m), R : 곡선반지름(m)

식 5.18에 이점량 0.20 m와 완화곡선의 최소 길이를 구하는 식인 식 5.16을 대입하여 원곡선 반지름 R에 대해서 정리하면 식 5.19와 같다.

$$R = 0.064V^2 \quad (5.19)$$

식 5.19를 이용하여 설계속도에 따라 완화곡선을 설치해야 할 한계 평면곡선반지름을 구하면, 표 5.12와 같다.

주행 중 운전자의 시각적 측면과 쾌적성을 유지하기 위해서는 계산값의 3배 정도까지는 완화곡선을 생략하지 않는 편이 바람직하다.

〈표 5.12〉 완화곡선을 생략할 수 있는 곡선반지름

설계속도(km/h)	계산값(m)	적용값(m)
140	1,254.4	4,000
130	1,081.6	3,500
120	921.6	3,000
110	774.4	2,500
100	640.0	2,000
90	518.4	1,600
80	409.6	1,300
70	313.6	1,000
60	230.4	700

5.6 교통전환구간 기하구조

(1) 개요

도로의 확장공사 시 교통전환구간에 대해서는 도로 공사장 교통관리지침(국토교통부) 등 관련 기준을 참고할 수 있으며, 이 요령에서는 교통전환구간에서의 안전사고 예방을 위하여 평면곡선반지름, 횡단 폭원 등 기하구조 기준을 제시하였다.

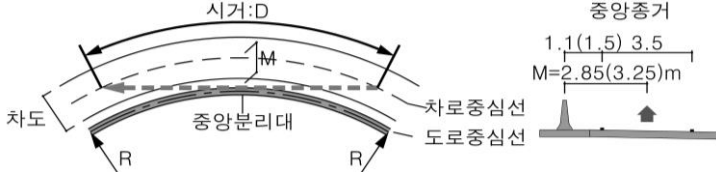
(2) 설계속도

교통전환구간에서 고속국도의 설계속도는 80 km/h 이상을 적용하는 것이 바람직하나, 현지 지형 여건 등 부득이한 경우 60 km/h로 적용할 수 있다.

(3) 정지시거 확보 가능한 최소 평면곡선반지름

확장공사 등으로 교통전환구간은 제한속도 80 km/h 적용 시, 정지시거 확보를 위해 평면곡선반지름(R)을 600 m 이상으로 한다. 하지만 교통전환구간 대부분이 주행 여건이 불리한 확장공사라는 점을 감안할 때 설계속도에 따른 최소 곡선반지름 값의 1.5배 이상 적용을 권장한다. 여건상 최소 곡선반지름 확보가 어려운 경우에는 중앙분리대 확폭 방안 등을 검토하여 정지시거를 확보한다.

〈표 5.13〉 정지시거 확보를 위한 최소 평면곡선반지름

정 지 시 거 산 정							
						$M \approx \frac{D^2}{8R}$ D : 시 거 M : 중앙 종거 R : 곡선반지름	
중앙분리대	설계속도 (km/h)	차로폭 (m)	임시 중앙분리대 폭(m)	중앙 종거 (m)	정지시거 기준(m)	최소 평면곡선반지름	
						계산값(m)	적용값(m)
미 확폭	80	3.5	2.2	2.85	110	531	600
	100				155	1,054	1,100
확폭	80	3.5	3.0	3.25	110	465	500
	100				155	924	1,000

(4) 차로폭

교통전환구간의 차로폭은 신설도로와 확장도로 여건에 따라 다르며, 차로폭은 3.5 m 이상을 원칙으로 하되 현장 여건상 3.25 m 까지 축소하여 적용할 수 있다. 다만, 단순 또는 편측 확장 구간(1단계 교통전환)에서는 3.25 m 이상을 원칙으로 한다.

(5) 우측 길어깨

- ① 교통전환구간 기존 도로 측 우측 길어깨 폭원은(편측 확장 시) PC방호벽 전면을 기준으로 2.0 m 이상 확보한다.

현 설 계	개 선

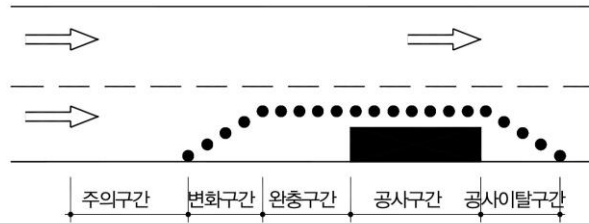
〈그림 5.11〉 교통전환구간(4→6차로 확장구간)의 우측 길어깨 폭원(예시)

- ② 단순 양측 및 편측 확장(1단계 교통전환) 시 우측 길어깨 폭원은 확장 여건 및 차로수 등을 종합적으로 검토하여 최소 1.0 m 이상 확보해야 한다.

〈표 5.14〉 단순 확장구간 횡단구성(예시)

4 → 6차로 확장	6 → 8차로 확장
기존도로(8.9m) 확장공사구간 6.1m 0.75 2@3.25=6.5 0.65 1차로 2차로 1.0 임시방호벽 길어깨 확보(1.0m)	기존도로(12.5m) 확장공사구간 6.1m 0.75 2@3.25=6.5 3.5 1.75 1차로 2차로 3차로 1.0 임시방호벽
차로폭 조정, 측대 및 방호벽 설치 : 차로 2@3.25m, 우측 길어깨 1.0m	차로폭 조정, 측대 및 방호벽 설치 : 차로 2@3.25 + 3.5m, 우측 길어깨 1.0m

(6) 교통 관리구간 설정



〈그림 5.12〉 교통 관리구간 설정 개념도

〈표 5.15〉 교통 관리구간의 목적과 설치 길이

구 분	목 적	설치 길이	비 고
주의구간	전방 교통상황 변화를 사전에 인식하도록 하는 구간	전방 1,500 m 부터	-
변화구간 (테이퍼)	운전자가 진행 중인 차로나 길어깨를 차단하는 구간	표 5.16 참조	우회도로의 경우 평면곡선 설치 구간
완충구간	차로를 변경하지 못한 차량의 공사장 충돌을 방지	50 m 이상	-
작업구간	공사가 이루어지는 해당 구간	VAR	작업구간 유형에 맞춰 안전시설물 설치
공사 이탈구간	공사 이전의 정상적인 주행차로로 복귀하는 구간	표 5.16 참조	우회도로의 경우 평면곡선 설치 구간

〈표 5.16〉 테이퍼 길이(L)

구 분		4차로(m)	2차로(m)	비 고
차로 합류 테이퍼(lane closure)		180	90	- 4차로 : $L = \frac{WS}{1.6}$ - 2차로 : $L = \frac{WS^2}{150}$
차로 변환 테이퍼(transition)		90	45	1/2 L
길어깨 차단 테이퍼(shoulder closure)		60	30	1/3 L
하류부 테이퍼 (down stream)	작업장 길이 30 m 미만	30	30	-
	작업장 길이 30 m 이상	90	45	1/2 L