



# 설계일관성을 고려한 도로 곡선반경 산정에 관한 연구

## Development of Estimation of Curve Radii of Road Considering Design Consistency

박 제 진\*  
Park, Je Jin

이 상 하\*\*  
Lee, Sang Ha

박 광 원\*\*\*  
Park, Kwang Won

하 태 준\*\*\*\*  
Ha, Tae Jun

### Abstract

Achieving consistent geometric design is an important goal in highway design to ensure obtaining safe, economical and smooth traffic operation. Most evaluation of consistency is based on 'speed change' in speed profile. According to literature, the speed depends on geometric elements, speed on tangent section prior to a curve, and background around roads. Especially, the radius is the most main element mentioned in various literature. Therefore, this paper shows two ways of calculating horizontal radius on real road, that is, three-dimensional road. First of all, the radius of horizontal curve is calculated based on physical method. The calculated radius contains not only superelevation but also longitudinal grade while the current minimum radius is calculated by considering superelevation and side friction according to the point-mass equation. Secondly, the problem of composed curves with distorted appearance by overlaying sag or crest vertical alignment has been known. To quantify the extent of distortion effects, the method of calculation of real seen so called 'Perspective Radius' is developed. The paper presents the perspective radius and recommended perspective radius.

**Keywords :** *design consistency, curve radius, perspective radius, friction*

### 요 지

차량의 주행속도는 설계일관성을 평가하는 주요한 척도로 활용되며 그 중 곡선반경은 여러 연구에서 공통적으로 제시한 주된 요인으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 복합선형에서 설계속도별 적정 평면곡선반경 범위기준을 정립하고 운전자의 인지 행태를 나타낼 수 있는 인지반경을 정립하여 입체선형에서 적합한 평면곡선반경을 제시하고자 한다. 첫째, 본 연구에서는 저속차량의 방해요소를 최소화하기 위하여 입체선형을 고려한 도로의 임의지점에서 횡방향 미끄럼 마찰계수와 주행방향 미끄럼 마찰계수를 동시에 고려하여 설계속도와 종단경사별 평면곡선반경을 제시하였다. 둘째, 본 연구에서는 곡선부 인지반경을 통하여 평면 곡선부와 편평한 종단경사가 조합된 경우, 평면 곡선부와 종단곡선부가 조합된 경우를 비교한 후, 곡선부 인지반경을 산정하여 설계속도별 적정 평면곡선반경과 인지반경 비율을 제시하였다.

**핵심용어 :** *설계일관성, 곡선반경, 인지반경, 마찰계수*

\* 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원  
 \*\* 비회원 · 도로교통안전관리공단 전남지부 안전조사팀원  
 \*\*\* 정회원 · 광주광역시 종합건설본부 토목지원과장  
 \*\*\*\* 정회원 · 전남대학교 토목공학과 부교수



# 1. 서론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

현행 도로 일관성평가에서 가장 중요한 척도로 속도가 주를 이루고 있다. 기존 연구문헌을 살펴보면, 속도는 기하구조요소, 곡선부 전 선행속도, 도로주변환경 등에 영향을 받는 것으로 나타났고, 그중 곡선반경은 기존의 연구문헌에서 공통적으로 제시한 주요인으로 나타났다. 그러나 실제 도로설계시, 곡선반경은 설계속도와 편경사에 의하여 결정되어진다. 이에, 본 연구에서는 바람직한 도로선형설계를 위해 복합선형에서의 설계속도별 적정 평면곡선반경 범위의 기준을 정립하고, 운전자의 인지행태를 나타낼 수 있는 인지반경을 정립하여 바람직한 도로설계기준을 제시하고자 한다. 여기에서 곡선부 인지반경은 평면 곡선부와 종단 곡선부의 조화가 만들어낸 입체선형 도로에서 운전자가 주행중 느끼는 시각적 평면곡선반경을 말한다.

## 1.2 연구의 내용 및 방법

기존 연구문헌에서 제시하는 곡선반경 및 인지반경에 관하여 살펴보고, 실제 도로 형상에서 고려되어질 수 있는 도로요소를 사용하여 곡선반경을 산정하며, 추가적으로 종단곡선에 의하여 나타나는 평면곡선의 왜곡변형을 제시하였다.

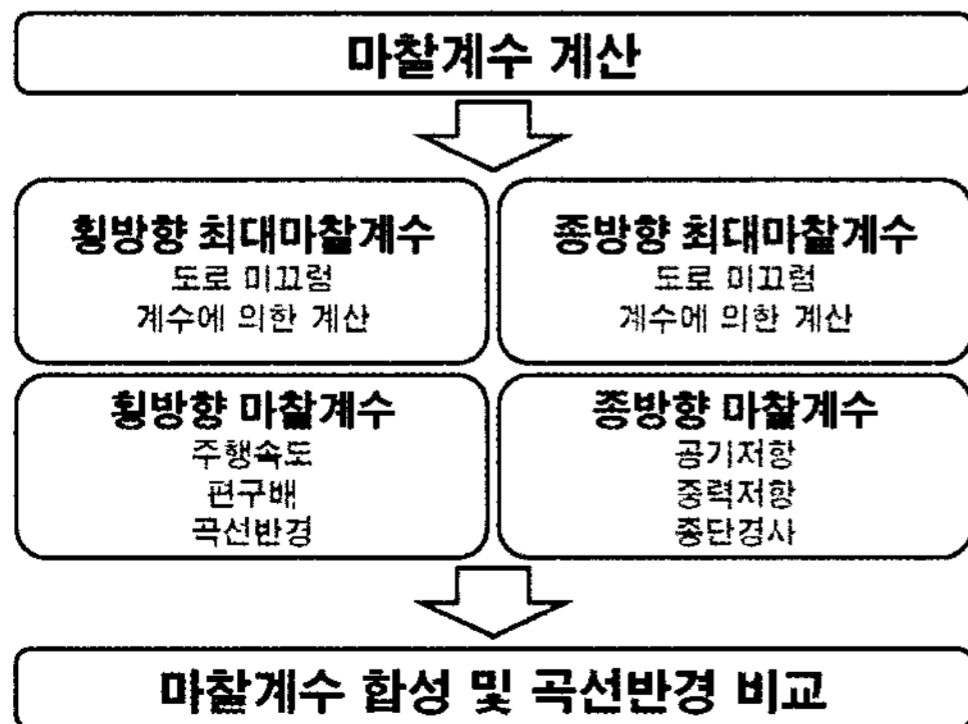


그림 1. 연구수행 흐름도

# 2. 기존 연구문헌 고찰

## 2.1 물리학적 접근에 따른 곡선반경

노관섭(2000)은 도로의 선형 설계에서 각 선형 요소는 차량 주행의 안전성을 우선으로 고려해야 한다고 제시하고 있다. 이를 위해 곡선부에서도 안전하고 쾌적한 구조를 이루도록 도로 환경 측면과 그에 따른 운전자 행태 및 차량동력학적 측면을 고려한 곡선부의 최소곡선반경이나 최대 편경사, 여건별 적정 마찰계수 등을 규정할 필요가 있다고 하였다. 특히, 차량동력학과 마찰저항에 관련하여 차량적 측면에서 살펴본 마찰저항은 주로 곡선부 주행에서 문제가 되는데, 이는 차량이 곡선부·편경사·횡단경사가 있는 도로를 주행할 때 원심력이나 횡방향력을 받기 때문이다. 잘못 설계되거나 잘못 시공된 도로에서는 필요한 마찰력이나 편경사가 충분히 확보되지 못하거나 곡선반경이 너무 작은 경우가 대부분인데 이로 인해 주행하는 차량이 곡선 주행시 밖으로 튀어나가거나 승차자가 바깥으로 쏠리는 등의 불안감을 느끼게 된다.

건교부(2000)에 따르면, 평면곡선반경은 차량이 평면곡선부를 주행할 때 발생하는 원심력으로 인하여 곡선부의 바깥쪽으로 미끄러지거나 전도할 위험을 방지할 수 있도록 점질량 방정식을 사용하여 최소평면곡선반경으로 기준을 정하였다.

## 2.2 인지반경

Veit Appelt(2000)는 평면곡선과 종단곡선이 동시에 존재할 경우, 인간의 시각적 정보 수집능력에 따라 시각적 왜곡(image distortion)이 나타난다고 제시하고 이 시각적 왜곡도를 정량화 하기 위하여 인지반경(apparent radii)을 개발하였다. 또한, 적정 시각적 왜곡도  $Q$  범위로 운전자에게 불쾌하지 않은 도로선형을 제시하였다.



$$R_{apparent} = Q \times R \quad (1)$$

$$Q = f$$

$R_{apparent}$  : 인지반경 ( $m$ )

$Q$  : 왜곡도

$f$  : 평면곡선반경( $m$ ), 종단곡선반경( $m$ ),  
편경사(%), 곡선 시작전 직선길이( $m$ ),  
차로폭( $m$ )

$R$  : 곡선반경( $m$ )

Y. Hassan(2002)은 실제 도로와 유사하게 제작한 애니메이션을 이용하여 도로 선형변화에 따른 운전자의 인지반응에 대한 연구를 진행하였다.

$$R_p = -51.28 + 0.953R_a + 132.11V + 0.125R_a \cdot V \quad (2)$$

$R_p$  : 인지 곡선반경 ( $m$ )

$R_a$  : 실제 곡선반경 ( $m$ )

$V$  : 종단곡선에 따른 상수

### 3. 물리학적 접근에 따른 곡선반경 개발

도로의 평지부에서는 차종간의 속도차가 크지 않아 차종에 관계없이 비슷한 속도를 유지할 수 있어 운전자의 안전한 주행을 쉽게 도모할 수 있다. 그러나 오르막 경사 구간에서는 단위마력당 중량이 높아 등반능력이 떨어지는 대형차량이 저속으로 주행하게 되어 전체 교통류에 영향을 미치게 된다. 특히, 우리나라의 지형조건은 산악부가 많아 교통류에 중차량의 혼재비율이 높아지면 오르막 경사에서 저속차량에 의한 영향이 더욱 심각해질 수 있다. 이러한 저속차량은 다른 차량의 고속주행을 방해하여 교통의 혼란을 야기시키고 교통지체 등으로 도로의 교통용량을 저하시키는 요인으로 작용하게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 저속차량의 방해요소를 최소화하기 위한 도로의 최소설계기준을 재정립하고자 한다.

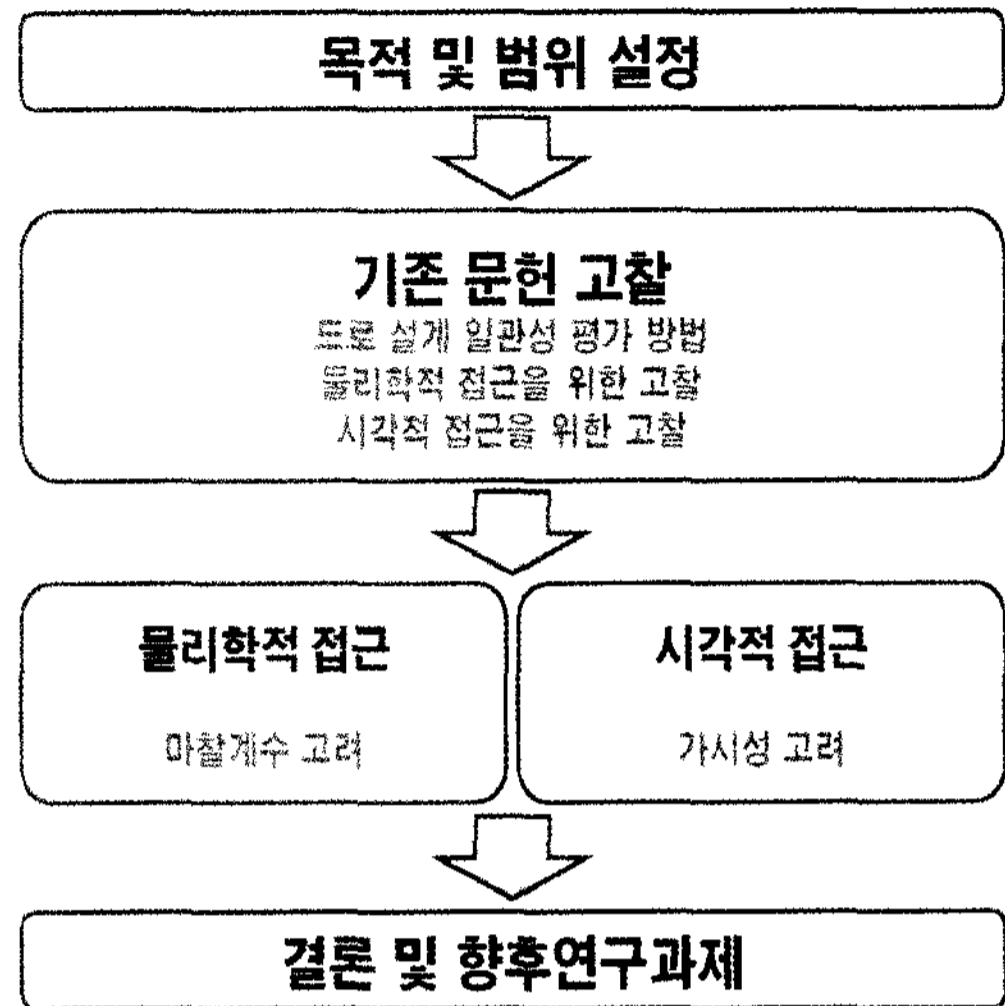


그림 2. 물리학적 접근에 의한 곡선반경 계산 흐름도

#### 3.1. 주행 방향에 미치는 마찰계수

##### 3.1.1 횡방향 마찰계수 (Side Friction Factor)

횡방향 미끄럼 마찰계수( $f_R$ )란 횡방향 미끄럼 마찰 저항력( $F_R$ )과 차량하중( $W$ )에 대한 비를 뜻한다. 즉, 타이어가 진행방향과 같은 방향으로 자유롭게 회전하고 있을 때, 타이어 접지면에 직각 방향의 외력이 작용하며 타이어를 횡방향으로 이동시키려고 하면 타이어의 접지면에서 이것에 저항하는 힘의 작용을 말한다. 여기서, 외력이란 곡선반경과 편경사와 같은 기하구조의 변화에 따른 힘을 포함한다. 차량의 횡방향력은 그림 3에 나타난 요소의 합력에 의하여 이루어진다.

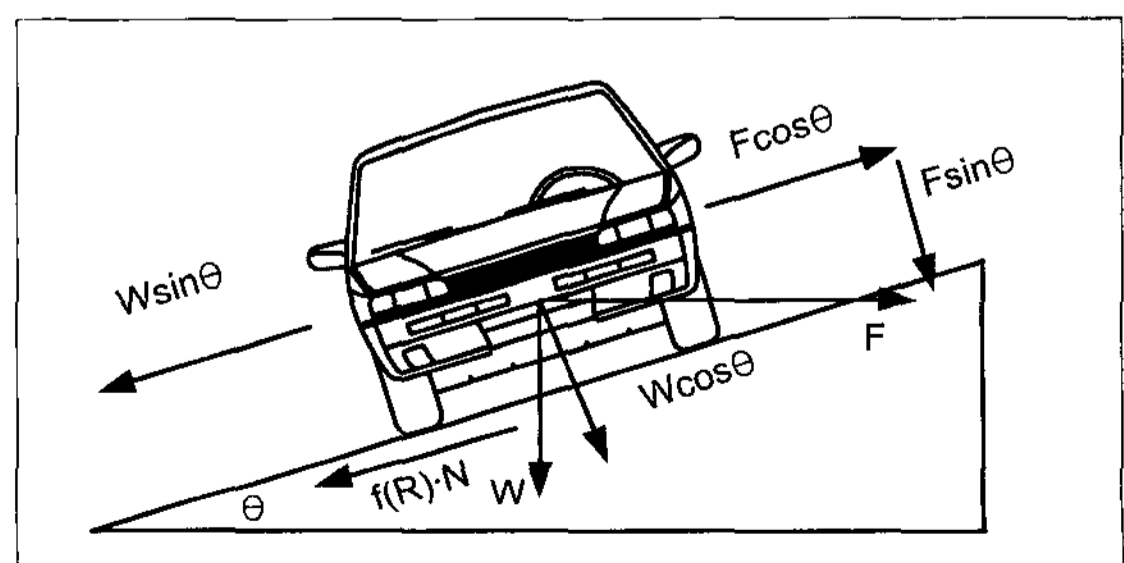


그림 3. 차량의 횡방향력



차량의 안전한 주행이 이루어지기 위해서는 식(3)을 충족시켜 주어야 한다. 식(3)을 횡방향 마찰계수 값에 대하여 정리하면 식(4)와 같이 정리할 수 있다.

$$W \sin\theta + f_r (W \cos\theta + F \sin\theta) \geq F \cos\theta \quad (3)$$

$$F = \frac{m \times v^2}{R}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{e}{100}$$

$$f_r \geq \frac{v^2}{g \times R} - e \quad (4)$$

- $W$  : 자동차의 총중량 (kg)
- $f_r$  : 횡방향미끄럼마찰계수
- $F$  : 원심력 (kg)
- $m$  : 차량질량(kg)
- $g$  : 중력가속도(≒ 9.8m/sec<sup>2</sup>)
- $v$  : 자동차의 속도(m/sec)
- $\theta$  : 경사각(°)
- $e$  : 편경사(%)

### 3.1.2 주행방향 마찰계수 (Tangential Friction Factor)

주행방향 마찰계수( $f_T$ )란 차량의 제동력이 가장 큰 경우에 노면에 대한 타이어 표면의 미끄럼률이 100%가 될 때, 미끄럼 마찰 저항력과 타이어 하중의 비를 뜻한다. 제동력이 가장 큰 경우에는 차량의 타이어가 완전히 잠금상태(wheel lockup)인 것으로 타이어를 완전히 잠그고 주행방향 미끄럼 마찰을 측정하는 것을 의미한다. 종단경사에서 차량의 안전한 주행은 식(5)를 만족해야 한다. 식(5)를 주행방향 마찰력으로 나타내면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

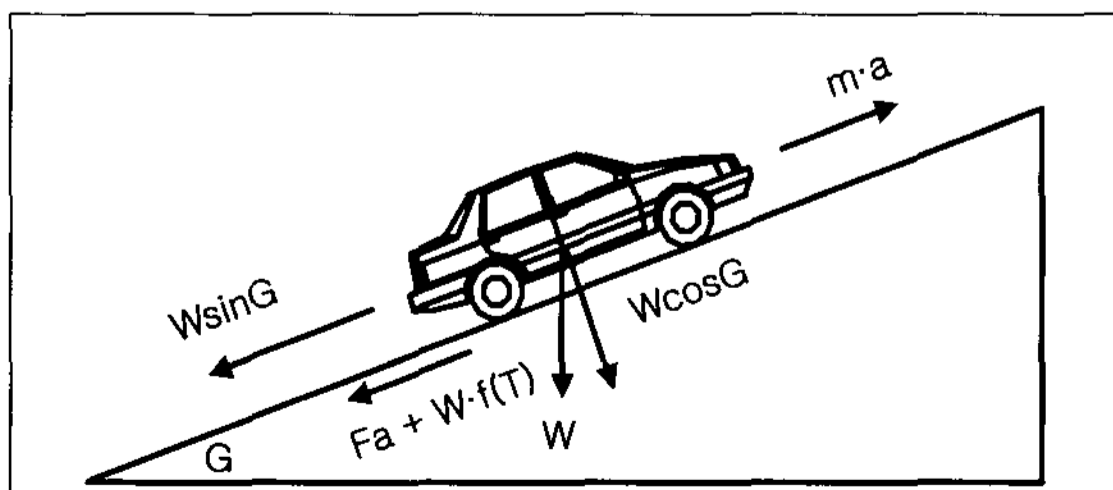


그림 4. 차량의 주행방향력

$$m \times a \geq W \sin G + F_A + W f_T \quad (5)$$

$$f_T \geq \frac{1}{W} \times (m \times a - W \sin G - F_A) \quad (6)$$

- $m$  : 차량질량(kg)
- $a$  : 차량의 가속도(m/sec<sup>2</sup>)
- $W$  : 자동차의 총중량 (kg)
- $G$  : 종단경사 (%)
- $F_a$  : 공기저항력(kg)
- $f_T$  : 주행방향마찰계수

### 3.1.3 최대마찰계수

횡방향·주행방향 최대마찰계수는 미끄럼계수( $\mu_G$ )에 의해 나타날 수 있다. 주행방향 최대마찰계수값( $f_{T_{Max}}$ )은 미끄럼계수와 같고, 횡방향 최대마찰계수값( $f_{R_{Max}}$ )은 주행방향 최대마찰계수의 92.5%와 같다(Lamm, 1999). 그리고 미끄럼계수는 차량의 타이어가 완전히 잠금상태일 때의 값으로 최대 미끄럼계수( $\mu_P$ )보다는  $\mu_G$ 값을 사용한다. 그림 5는 Lamm(1999)이 제시한 미끄럼계수이다.

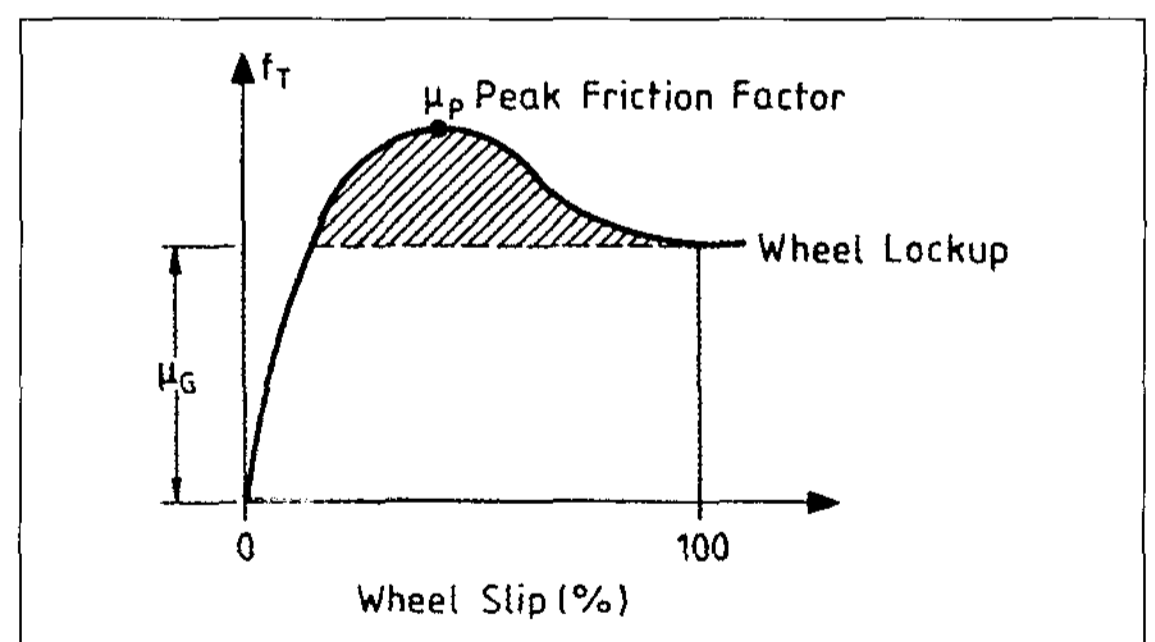


그림 5. 미끄럼 계수

본 연구에서는 Lamm(1999)이 언급한 미끄럼 저항값을 사용한다. 이 값은 1992년까지 독일에서 사용된 도로 상태별 속도와 미끄럼 값을 표시한 그래프에서 95%에 해당된 값을 도식화 한 것이다. 식(7)을 바탕으로 주행방향 및 횡방향 최대마찰계수값을 정하였다.



$$\mu = f_{Tmax} = 0.241\left(\frac{V}{100}\right)^2 - 0.721\left(\frac{V}{100}\right) + 0.708 \quad (7)$$

- $\mu$  : 최대마찰계수
- $f_{TMax}$  : 주행방향 최대마찰계수
- $V$  : 주행속도 (km/hr)

### 3.1.4 횡방향 마찰계수와 종방향 마찰계수의 합성

Krempel(1999)에 의하면 주행방향 및 횡방향의 마찰계수는 식(8)과 같은 관계를 제시하였다.

$$\left(\frac{f_R}{f_{RMax}}\right)^2 + \left(\frac{f_T}{f_{TMax}}\right)^2 \leq 1 \quad (8)$$

- $f_R$  : 횡방향 마찰계수
- $f_{RMax}$  : 횡방향 최대마찰계수
- $f_T$  : 주행방향 마찰계수
- $f_{TMax}$  : 주행방향 최대마찰계수

## 3.2 가속도

승용차의 경우 종단경사 4~5%에서도 평지와 거의 비슷한 속도로 주행이 가능하나, 트럭과 같은 대형차량의 경우 속도저하 현상이 심하다. 트럭의 경우, 평지에서는 승용차와 거의 동일한 주행행태 및 속도를 보이나, 오르막 구간에서 경사의 정도, 경사의 길이, 중량당 마력의 크기와 진입시 속도에 크게 영향을 받는다.

현재 오르막 구간의 설계에서도 트럭의 오르막 능력 및 특성을 감안하여 설계된다. 현재 설계에 기본이 되는 국내의 '도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침'은 미국 AASHTO의 종단경사 기준을 바탕으로 오르막차로의 설치를 검토한다.

그러나 이는 국내화물차의 90%가 90 kg/kw 이하 마력비를 갖지만 AASHTO에서 제시한 모든 기준값은 120 kg/kw를 바탕으로 하여 우리나라

실정과는 적합하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 이유로, 그동안 국내에서 많은 연구가 이루어져 왔다. 그 중, 유경수, 장명순(1999)은 트럭 중량/마력비가 90 kg/kw를 대표로 하여 조사하여 진입속도는 80 km/hr로, 각 종단경사 변화에 따라 표 1과 같은 결과를 도출하였다.

본 연구에서는 표 1과 가속도 식(9)을 이용하여 종단경사별 가속도를 표 2와 같이 나타내었다. 단, 차량이 감속할 수 있는 충분한 길이를 포함하는 도로라 가정하였다.

표 1. 오르막 한계속도 및 도달거리

종단경사(%)	속도(km/hr)	거리(m)
0	-	-
1	-	-
2	76	2,200
3	62	2,000
4	55	1,700
5	26	1,600
6	20	1,500
7	36	1,400
8	43	1,200

표 2. 종단경사별 가속도율

종단경사 (%)	가속도율(h <sup>-1</sup> )
0	0
1	0
2	34.55
3	31.00
4	32.35
5	16.25
6	13.33
7	25.71
8	35.83

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta s} \times v \quad (9)$$

- $a$  : 차량의 가속도(m/sec<sup>2</sup>)
- $\Delta v$  : 주행속도차(m/sec)
- $\Delta s$  : 주행시간차(sec)
- $v$  : 자동차의 속도(m/sec)



### 3.3. 곡선반경 · 종단경사 · 속도 관계

본 연구를 진행한 결과는 표 3과 같이 나타났다. 속도 60~80 km/hr에서는 종단경사 정도에 관계없이 필요한 곡선반경의 크기는 동일한 것으로 나타났다. 그리고, 현행 도로설계기준과 비교시, 본 연구에서 제시한 곡선보다 더 큰 값을 사용한 것으로 나타나, 기존 최소곡선반경은 도로 안전성에 기여하는 것으로 나타났다.

그러나, 속도 90 km/hr 이상에서는 현재 사용되는 지침서의 값보다 본 연구에서 제시한 값이 더 큰 것으로 나타나, 곡선반경 값의 수정이 필요한 것으로 나타났다. 그리고 속도가 증가할수록 종단경사간에 요구되는 곡선반경의 차는 더욱 큰 것으로 나타났다. 이는 실제 도로 설계시 일정 속도에서 곡선반경 선정시, 종단경사의 고려가 필요한 것으로 나타났다.

표 3. 기존 곡선반경과 산정된 곡선반경의 비교

설계속도 (km/hr)	곡선반경(m)		
	설계기준	종단경사	
		2%	8%
60	130	103	103
70	180	162	162
80	250	247	247
90	340	364	366
100	420	523	531
110	530	730	758
120	630	986	1067

## 4. 곡선부 인지반경 개발

### 4.1 곡선부 인지반경 정의 및 가정

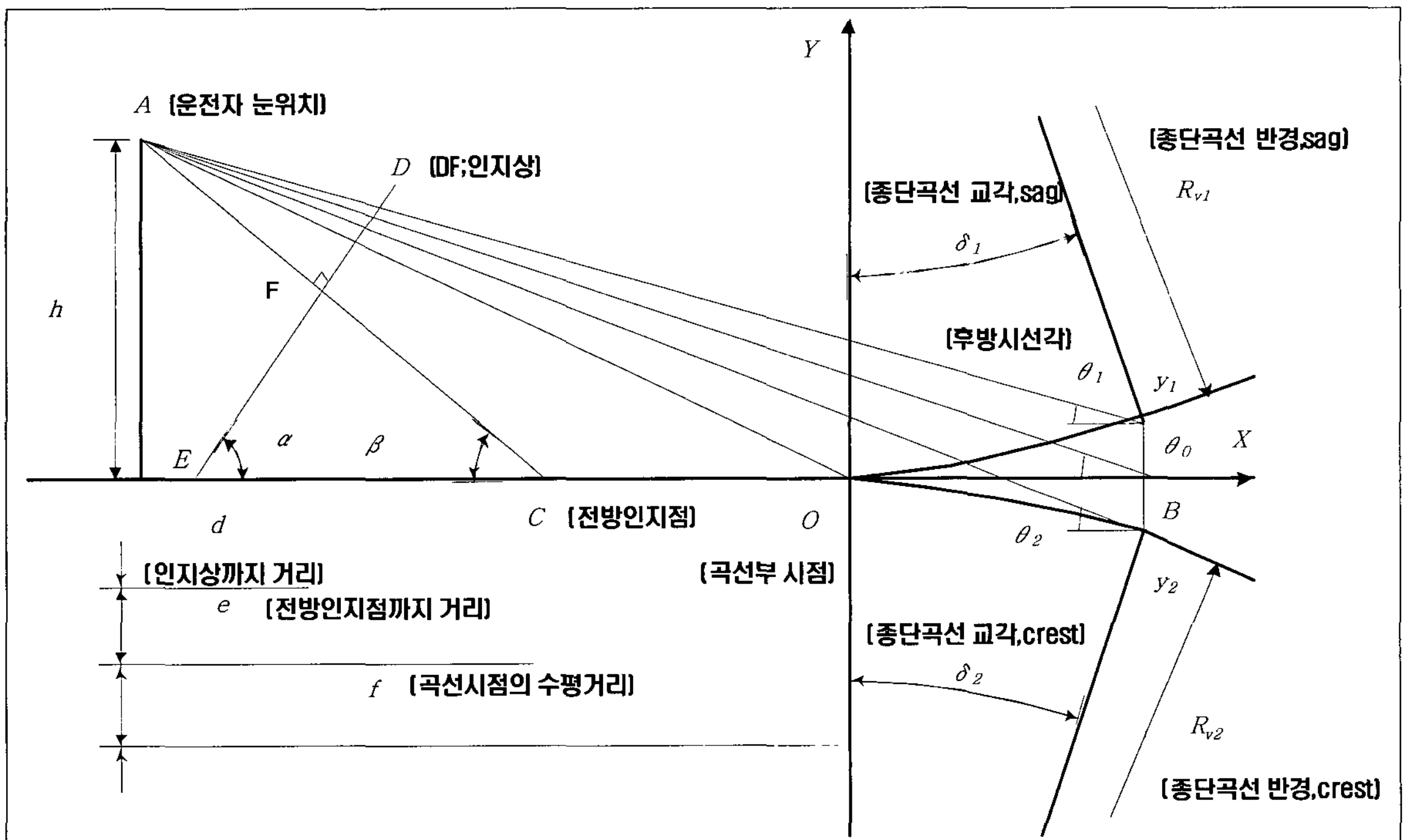


그림 6 곡선부 인지반경 모형도



$$\theta_0 = \tan^{-1} \frac{e}{f + R_v \delta} \quad \theta_1 = \tan^{-1} \frac{h - y_1}{e + R_v \sin \delta} \quad \theta_2 = \tan^{-1} \frac{h + y_2}{e + R_v \sin \delta} \quad (10)$$

$$\overline{DF}_n = \frac{d}{\cos \beta} \tan(\beta - \theta_n) \quad (11)$$

$$R_n = \frac{\overline{DF}_n}{\overline{DF}_0} \times R_o \quad (12)$$

- A : 운전자 눈 위치 (m)
- B : 후방 인지점
- C : 전방 인지점 (기준점)
- O : 평면곡선과 종단곡선의 시점
- $\overline{AC}$  : 전방시선 (기준선) (m)
- $\overline{DE}$  : Rectangle of Clear Visibility
- $\overline{AO}$  : 곡선시점 인지시선 (m)
- $\overline{AB}$  : 후방 인지시선 (m)
- $\overline{DF}$  : 인지상 (m)
- y : 후방 인지점의 높이 =  $R_v(1 - \cos \delta)$  (m)

- $R_v$  : 종단곡선반경 =  $\frac{L}{S_2 - S_1}$  (m)
- $\delta$  : 종단곡선교각 =  $S_B - S_O$  (°)
- d :  $d = 0.5 \cos \beta$  (m)
- e : 기준점의 수평거리 (m)
- h : 눈높이 (일반적으로 1m)
- f : 곡선시점의 수평거리 (m)
- a :  $a = \sin^{-1}(\frac{e}{h} \sin \beta)$  (°)
- $\beta$  : 곡선시점 인지시선각 =  $\tan^{-1} \frac{h}{f}$  (°)
- $\theta$  : 후방인지 시선각 (°)
- S : 종단경사 (%)

주) 0 : even , 1 : sag, 2 : crest

도로기하구조 설계에서 평면선형과 종단선형의 조합은 가장 중요한 부분이다. 특히, 평면곡선과 종단곡선의 조합인 경우에는 두 종류의 반지름 조합으로 인하여 왜곡이 이루어지게 된다. 이 왜곡의 정도는 운전자의 안전한 주행에 영향을 미친다 (Veit Appelt, 2000). 본 연구에서는 ‘인지반경’을 이용하여 임의의 곡선반경에 대해 운전자가 느끼는 종단곡선의 영향을 제시하고자 한다. 본 연구의 가정은 다음과 같다.

- ① 평면곡선과 종단곡선의 시점은 일치한다.
- ② 운전자의 시선은 비교적 작은 각도에 집중하여, 인지상은 일정 거리에서 갖는다.
- ③ “even종단선형(종단경사 변화율이 없는 경우)”에서 운전자는 평면곡선반경과 인지반경을 동일하게 인식한다.
- ④ 곡선부 인지반경 산정시, 종단선형의 영향만 고려한다.

이상의 가정을 바탕으로 입체선형에서 운전자의 시선 및 시점에 따라 나타날 곡선반경의 크기를 동일한 곡선반경의 값을 갖는 평지에서 반경과의 비율을 나타내어 인지반경을 구한다. 그림 6을 바탕으로 후방인지 시선각은 식(10)과 같이 제시할 수 있다. 그리고 식(10)을 통해 운전자의 인지상은 식(11)과 같고 인지반경은 식(12)와 같이 제시하였다.

#### 4.2 ‘EVEN’에 대한 인지반경 비율 설계기준

식(10)을 기준으로 다음 가정에 의하여 표 4에 ‘EVEN’에 대한 인지반경 비율 기준 즉, 적정  $R_n/R_o$  설계 기준을 제시하였다. 단, 다음 세가지를 가정하였다.

- ① 운전자는 평면곡선반경 및 종단곡선반경의 시점을 100m 전에서 발견 가능하다.
- ② 운전자는 종단곡선의 마지막 접선을 인지할 수 있다.



③ 지침서에 제시한 종단곡선 최소 변화비율( $K$ )을 적용한다.

나타났다.

표 4 'EVEN'에 대한 인지반경 비율 계산

설계속도( $km/hr$ )	오목종단곡선	볼록종단곡선
120	1.16	1.10
110	1.18	1.11
100	1.35	1.07
90	1.42	1.07
80	1.65	1.03
70	1.97	0.98
60	2.25	0.96
50	3.05	0.84
40	4.50	0.58
30	5.22	0.54

표 4의 기준값은  $R_n/R_o$  값 1을 기준으로 상한값 및 하한값이다. 예를 들어, 오목종단곡선에서 설계속도가  $80km/hr$ 인 경우,  $R_n/R_o$ 의 비 1~1.65까지 허용한다.

## 5.2 향후 연구과제

본 연구에서는 평면곡선과 종단경사로 이루어진 도로를 대상으로 물리학적 곡선반경을 도출하는 것으로 연구의 범위를 한정하였으나, 향후 종단곡선이 포함된 다양한 입체선형의 도로에서 물리학적 곡선반경을 산정하도록 연구의 확장이 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 2004년도 전남대학교 특별연구사업비 지원에 의해 수행되었음.

## 참고문헌

건설교통부 (2000), “도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침”, 대한토목학회.

노관섭 (2000), “도로의 횡방향 마찰계수와 곡선반경에 관한 연구”, 한국건설기술연구원 연구보고서.

하태준, 박제진, 김유철 (2003), “가속도를 고려한 도로의 설계일관성 평가기법에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제21권 제1호.

유경수, 장명순 (1999), “한국형 화물차 성능곡선 개발 연구”, 대한교통학회지, 제15권 제4호.

Ruediger Lamm (1999), “*Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*”, Vol. 1, Chap.10, McGRAW-Hill, New York.

Veit Appelt (2000), “*New Approaches to the Assessment of the Spatial Alignment of Rural Roads - Apparent Radii and Visual Distortion*”, Proceeding of 2nd International Symposium on Highway Geometric Design.

Y. Hassan (2002), “Influence of Vertical Alignment on Horizontal Curve Perception, Phase I : Examining the Hypothesis”, *TRR*, 1796,

## 5. 결론 및 향후 연구과제

### 5.1 결 론

본 연구에서는 도로의 설계일관성에 가장 큰 요인인 평면곡선반경에 대한 설계기준을 개선하고자 물리학적 접근에 의한 곡선반경을 산정하여 현 설계곡선반경과 비교한 결과, 상대적으로 높은 속도에서 현행 곡선반경 설계기준의 수정이 필요한 것으로 나타났다. 그리고 인지반경을 통하여 운전자가 느끼는 종단곡선의 영향을 살펴본 결과, 기준점의 수평거리, 종단곡선의 반경과 교각이 가장 큰 영향이 있는 것으로 나타났고, 본 연구에서는 'EVEN'에 대한 인지반경 비율의 비로 평면곡선 기준값을 제시하였다. 즉, 설계속도와 편경사로 최소 곡선반경을 산정하는 현행 도로설계기준은 종단선형을 고려한 새로운 기준 제시가 필요한 것으로





12-23.

Y. Hassan(2002), "Influence of Vertical Alignment on Horizontal Curve Perception, Phase II: Modeling Perceived Radius", *TRR*, 1796, 24-34.

접 수 일: 2008. 3. 6

심 사 일: 2008. 3. 24

심사완료일: 2008. 4. 14