

곡선부 시각왜곡현상을 고려한 인지곡선반경 산정에 관한 연구

Calculation of Perceived Curve Radius Considering Visual Distortion at Curve Section

신재만* · 박제진** · 하태준***

Shin, JaeMan · Park, JeJin · Ha, TaeJun

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

도로의 직선구간과 연결되는 곡선구간에서 운전자가 주행시 느끼는 곡선반경인 인지곡선반경은 곡선부의 실제곡선반경과 상이하게 나타나게 되는데, 이를 시각왜곡현상이라 한다. 시각왜곡현상은 운전자에게 시각변화를 일으켜 운행속도에 영향을 미치고, 각 운전자의 시각변화에 따른 운행속도 변화는 운전자들의 인지정도 차이에 따라 속도편차를 보이게 되며, 결국 곡선부 주행안전에 악영향을 미치게 된다.

그러나 현재까지 곡선부의 사고위험도를 증가시키는 시각왜곡현상을 정량적으로 분석하는 연구가 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 곡선부에서의 시각왜곡현상을 정량적으로 산정할 수 있도록 수학적 기법을 통한 이론적 모형식을 개발하고자 한다.

1.2 연구의 내용 및 방법

본 연구에서는 운전자가 인지하는 시각왜곡현상을 고려하여 곡선부 인지곡선반경의 이론적 모형식을 개발하였다. 또한, 이론적 모형식을 통해 곡선부 인지곡선반경과 시각왜곡도를 산정하였으며, 기존의 경험적 모형식을 토대로 곡선부 인지곡선반경과 시각왜곡도를 산정하여 본 연구의 이론적 모형식과 비교분석을 실시하였다. 본 연구의 연구수행 흐름도는 그림 1과 같다.

1.3 연구의 범위

본 연구에 앞서 도로 곡선부 운전자 행태와 곡선부 운전자 시각 특성, 곡선부 설계기준에 대한 연구문헌을 고찰하였다. 이를 토대로 지방부 2차로 도로의 곡선부 시각왜곡현상을 고려한 인지곡선반경 모형식을 기하학적 조건에 의한 계산 방법으로 산출하기 위해 가정을 세우고, 정량적으로 분석하였다.

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 연구원 · 공학석사(E-mail : m750p@hotmail.com) -발표자

** 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 · 공학박사(E-mail : jjpark@ex.co.kr)

*** 정회원 · 전남대학교 토목공학과 정교수 · 공학박사(E-mail : tjha@jnu.ac.kr)

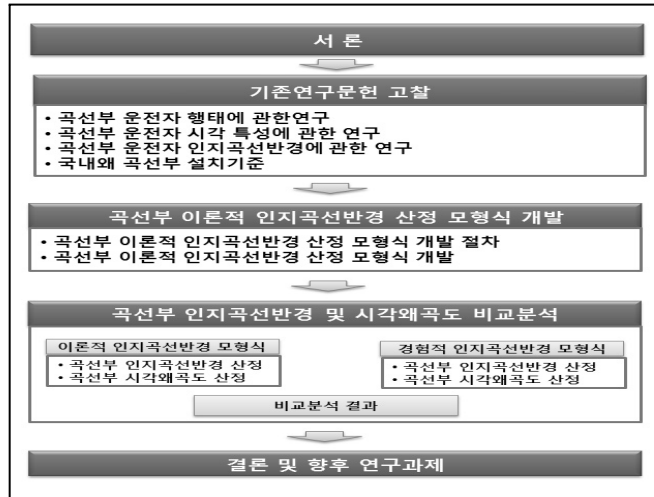


그림 1. 연구수행 흐름도

2. 곡선부 이론적 인지곡선반경 산정 모형식 개발

2.1 곡선부 이론적 인지곡선반경 산정 모형식 개발 절차

첫째, 2차함수 기본공식의 형태는 $(0, 0)$, (A_1, B_1) , (A_2, B_2) 를 지나는 그림 2(가)와 같다. 그러나 실제 운전자가 인지하는 곡선의 형상은 2차함수 그래프를 시계방향으로 90° 회전했을 시 1사분면에 나타나는 형상과 같으므로 그림 2(나)와 같이 나타낸다.

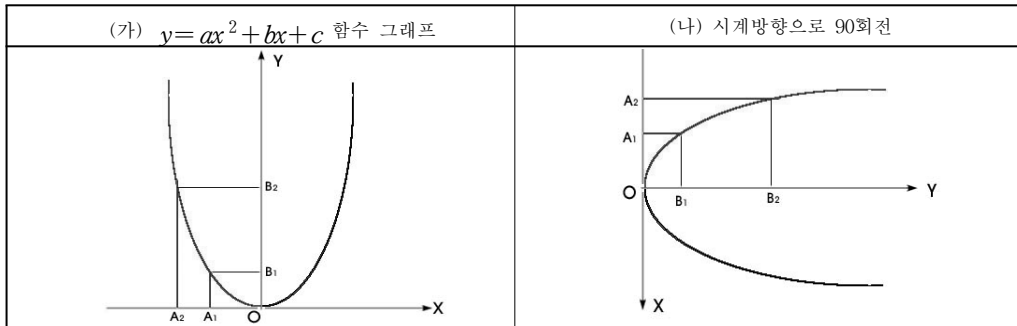


그림 2. 2차함수 그래프의 변환

지방부 2차로 도로의 곡선부 시각왜곡현상을 고려한 인지곡선반경 모형식 도출을 위한 기본가정은 다음 식 (1)과 같다.

$$y = ax^2 + bx + c \quad \text{식 (1)}$$

- y : 곡선부 깊이(m)
- x : 곡선부 폭(m)
- a : 계수 ($a = \frac{A_1 B_2 - A_2 B_1}{A_1 A_2 (A_2 - A_1)}$)
- b : 계수 ($b = \frac{B_1}{A_1} - \frac{A_1 B_2 - A_2 B_1}{A_2 (A_2 - A_1)}$)
- c : 상수 ($c = 0$)

둘째, ‘도로의 구조·시설기준에 관한 규칙’에 따라 설계속도 60km/hr에서 85m 이상의 정지시거를 확보하여야 하므로 운전자는 곡선부 시작 지점 85m에서 곡선부를 인지한다고 가정한다.

셋째, 곡선부 종료지점 후, y 축 방향으로 50m 지점까지 선형의 변화는 없다고 가정한다.

이상의 기본가정을 바탕으로 운전자가 인지하는 곡선부를 표현하면 그림 3과 같다. 곡선부 시작점으로부터 85m 떨어진 지점에 위치한 운전자는 곡선부를 인식할 때 곡선부 시작점인 O점과 곡선부 종료지점 P점 그리고 곡선부 종료지점 이후 y' 축으로 50m 진행했을 시 함수의 값에 속하는 임의의 점을 인식하게 된다. 그러나 실질적으로 운전자는 곡선 시작지점으로부터 85m 거리로 떨어져 있기 때문에 실제 인지곡선은 이를 고려하여 산정되어야 한다. 그러므로 곡선부 인지곡선반경 산정의 마지막 단계에서는 곡선 OPQ를 축소한 곡선 O'P'Q'에 대한 계산을 수행하게 된다.

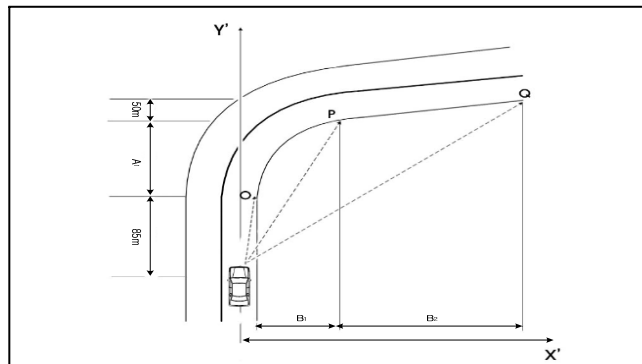


그림 3. 운전자가 인지하는 곡선부 지점

O점은 (0, 0)지점으로 곡선부 시작지점, P점은 (A_1', B_1)으로 곡선부 종료지점, Q점은 (A_2', B_2)로 곡선부 종료지점 이후 y' 축으로 50m 진행했을 시 함수의 값에 속하는 임의의 점이다.

운전자는 그림 3과 같이 곡선부 지점을 인지하고, 그림 4와 같이 곡선 OPQ를 축소한 곡선 O'P'Q' 형태로 인지한다. 그림 4는 곡선 O'P'Q'는 실제 운전자가 인지하는 곡선부 형태를 나타낸 것이다. 운전자는 도로 및 사물을 인지할 때 그 깊이는 왜곡하지 않으나 인지하려는 대상의 폭(너비)에 대해서는 왜곡하여 인지한다고 가정하였으므로, 곡선 O'P'Q'의 각 지점의 좌표는 y' 축 좌표는 일정하나 B_1, B_2 의 값은 바뀌게 된다. 즉, 곡선 O'P'Q'의 좌표는 (0, 0), (A_1, B_1'), (A_2, B_2')으로 변하게 된다.

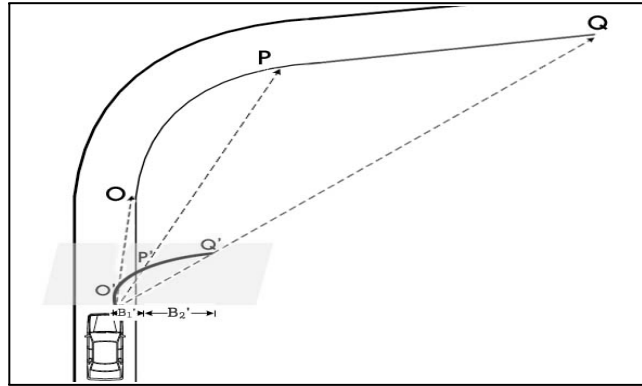


그림 4. 실제 운전자가 인지하는 곡선부 형태

2.2 곡선부 이론적 인지곡선반경 산정 모형식 개발

이를 바탕으로 이론적 곡선부 인지곡선반경을 산정하는 방법은 다음과 같다. 우선, 2차 함수식 식 (1)을 식 (2)와 같이 (t)에 관한 X의 함수로 표현한다.

$$X(t) = (t, at^2 + bt) \quad \text{식 (2)}$$

$$a : \text{계수 } \left(a = \frac{A_1 B_2' - A_2 B_1'}{A_1 A_2 (A_2 - A_1)} \right)$$

$$b : \text{계수 } \left(b = \frac{B_1'}{A_1} - \frac{A_1 B_2' - A_2 B_1'}{A_2 (A_2 - A_1)} \right)$$

$$A_1 : \text{곡선부 종료 지점}(y' \text{축})$$

$$t : 0 \leq t \leq A_1$$

이 때 운전자의 인지곡선반경은 실제 곡선구간인 곡선 O'P'구간이므로 매개변수 t의 범위는 $0 \leq t \leq A_1$ 가 된다. 곡선 X(t)의 특정 구간에 대한 곡선 길이를 구하기 위해서 X(t)를 미분한 후, 곡선부 시작지점부터 곡선부 종료지점까지 적분을 하면 식 (3)과 같이 $L_b^a(C)$ 형태로 나타나게 된다.

$$L_b^a(C) = \int_b^a |X'(t)| dt \quad \text{식 (3)}$$

$$L_b^a(C) : \text{매개변수}$$

$$a : \text{곡선부 시작지점 } (0)$$

$$b : \text{곡선부 종료지점 } (A_1)$$

이때, $|X'(t)|$ 는 좌표에 대한 거리의 값이 되어야 하므로 $|X'(t)| = \sqrt{1 + (2at + b)^2}$ 가 되고, 이를 다시 적분한 $L_b^a(C)$ 은 식 (4)와 같이 나타난다.

$$L_0^{A_1}(C) = \int_0^{A_1} \sqrt{1 + (2at + b)^2} dt \quad \text{식 (4)}$$

$$\begin{aligned}
 L_0^{A_1}(C) &: \text{인지곡선길이(m)} \\
 t &: \text{매개변수} \\
 a &: \text{계수 } \left(a = \frac{A_1 B_2' - A_2 B_1'}{A_1 A_2 (A_2 - A_1)} \right) \\
 b &: \text{계수 } \left(b = \frac{B_1'}{A_1} - \frac{A_1 B_2' - A_2 B_1'}{A_2 (A_2 - A_1)} \right)
 \end{aligned}$$

산정된 $L_0^{A_1}(C)$ 는 운전자가 인지하는 곡선부 길이이므로, $L_0^{A_1}(C)$ 를 곡선길이로 갖는 반지름 길이(R_p)를 산출하면 식 (5)와 같다.

$$R_p = \frac{360 \times L_0^{A_1}}{2\pi I} \quad \text{식 (5)}$$

$$\begin{aligned}
 R_p &: \text{인지곡선반경(m)} \\
 L_0^{A_1}(C) &: \text{인지곡선길이(m)} \\
 I &: \text{교각(°)}
 \end{aligned}$$

3. 곡선부 인지곡선반경 및 시각왜곡도 비교분석

3.1 곡선부 인지곡선반경 비교분석

표 1과 같이 [이론적 인지곡선반경], [경험적 인지곡선반경 I], [경험적 인지곡선반경 II]을 이용하여 곡선부 인지곡선반경 산정 모형을 제시하였다.

표 1. 곡선부 인지곡선반경 산정모형식

구 분	모형식	비교
[이론적 인지곡선반경]	$R_p = \frac{360 \times L_0^{A_1}}{2\pi I}$	본 연구 개발 모형식
[경험적 인지곡선반경 I]	$R_p = -51.28 + 0.953R_a + 132.11V + 0.125R_a \cdot V$	Hassan (2002)
[경험적 인지곡선반경 II]	$Y_{a1} = -4.028 + 0.999R$	전기연 (2009)

곡선부 이론적 인지곡선반경 산정을 위하여 곡선반경(R)은 100m 간격으로 1,500m까지 선정하였으며, 평면 곡선길이에 따른 영향을 분석하기 위해 설계속도 60km/hr을 고려한 최소 평면곡선길이(CL) 70m를 기준으로 ±20m를 선정하였다. 그에 따른 비교분석 결과는 표 2와 같다.

표 2. 곡선부 인지곡선반경 비교 결과

구 분	[이론적 인지곡선반경]	[경험적 인지곡선반경 I]	[경험적 인지곡선반경 II]
곡선부 인지곡선 반경	운전자는 곡선부 주행 중 실제보다 과소하게 평면곡선반경을 인지함	운전자는 곡선부 주행 중 실제보다 과대하게 평면곡선반경을 인지함	운전자는 곡선부 주행 중 실제보다 과소하게 평면곡선반경을 인지함



3.2 곡선부 시각왜곡도 비교분석

곡선부 시각왜곡도 산정을 위해 곡선부 인지곡선반경과 실제 평면곡선반경을 곡선부 시각왜곡도 산정식을 통하여 비교분석하였다. 비교분석 결과는 표 3과 같이 정리하였다.

표 3. 곡선부 시각왜곡도 비교

구 분	[이론적 인지곡선반경]	[경험적 인지곡선반경 I]	[경험적 인지곡선반경 II]
곡선부 시각왜곡도	실제곡선반경 보다 작게 인지함	실제곡선반경 보다 크게 인지함	실제곡선반경 보다 작게 인지함
	평면곡선반경이 200m 이하일 경우 시각왜곡도가 크게 나타나며, 500m 이상일 경우 시각왜곡도가 1에 가까움	평면곡선반경이 200m 이하일 경우 시각왜곡도가 크게 나타나며, 평면곡선반경이 커질수록 시각왜곡도가 작게 나타남	평면곡선반경이 200m 이하일 경우 시각왜곡도가 크게 나타나며, 평면곡선반경이 커질수록 시각왜곡도가 작게 나타남

4. 결론 및 향후 연구과제

4.1 결론

본 연구에서는 도로 곡선부의 시각왜곡현상을 고려한 인지곡선반경에 대하여 곡선부의 기하학적인 특성을 고려한 수학적 이론을 바탕으로 인지곡선반경을 산정하였다.

첫 번째, 이론적으로 인지곡선반경을 산정하기 위하여 인지곡선반경은 2차함수 형태로 $y = ax^2 + bx + c$ 나타나며, 곡선부 시작 지점 85m에서 곡선부를 인지하고, y축 방향으로 50m 지점까지 선형의 변화가 없다고 가정하였다. 또한 운전자가 인지하는 곡선부 지점과 실제 운전자가 인지하는 곡선부 형태를 고려하여 모형식을 개발하였다.

$$R_p = \frac{360 \times L_0^{A_1}}{2\pi I}$$

R_p : 인지곡선반경(m)
 $L_0^{A_1}(C)$: 인지곡선길이(m)
 I : 교각(°)

두 번째, 이론적 인지곡선반경 산정을 위하여 곡선반경(R)은 100m 간격으로 1,500m까지 선정하였으며, 평면곡선길이에 따른 영향을 분석하기 위해 설계속도 60km/hr을 고려한 최소 평면곡선길이(CL) 70m를 기준으로 이론적 인지곡선반경모형을 이용하여 곡선반경을 산정하였다. 또한 곡선부 시각왜곡도는 곡선부 인지곡선반경에 대한 실제곡선반경의 비율을 통해 곡선부 시각왜곡도를 산정하였다.

세 번째, 이론적 인지곡선반경과 경험적 인지곡선반경, 이론적 시각왜곡도와 경험적 시각왜곡도를 비교분석하였다. 곡선부의 인지곡선반경의 [이론적 인지곡선반경]과 [경험적 인지곡선반경 I]의 경우 실제곡선반경 보다 곡선반경을 작게 인지하였으며, [경험적 인지곡선반경 II]의 경우 실제곡선반경 보다 곡선반경을 크게 인지하였다. 비교결과, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

구 분	[이론적 인지곡선반경]	[경험적 인지곡선반경 I]	[경험적 인지곡선반경 II]
곡선부 인지곡선반경	운전자는 곡선부 주행 중 실제보다 과소하게 평면곡선반경을 인지함	운전자는 곡선부 주행 중 실제보다 과대하게 평면곡선반경을 인지함	운전자는 곡선부 주행 중 실제보다 과소하게 평면곡선반경을 인지함
곡선부 시각왜곡도	평면곡선반경이 200m 이하일 경우 시각왜곡도가 크게 나타나며, 500m 이상일 경우 시각왜곡도가 1에 가까움	평면곡선반경이 200m 이하일 경우 시각왜곡도가 크게 나타나며, 평면곡선반경이 커질수록 시각왜곡도가 작게 나타남	평면곡선반경이 200m 이하일 경우 시각왜곡도가 크게 나타나며, 평면곡선반경이 커질수록 시각왜곡도가 작게 나타남

마지막으로, [이론적 인지곡선반경]과 [경험적 인지곡선반경 I], [경험적 인지곡선반경 II]의 인지곡선반경 및 시각왜곡도를 비교분석한 결과를 토대로 각 모형식에 영향을 미치는 인지곡선반경 영향인자를 아래와 같이 도출하였다.

- [이론적 인지곡선반경] : 곡선반경(R), 인지곡선길이(L), 교각(I)
- [경험적 인지곡선반경 I] : 곡선반경(R), 종단선형(V)
- [경험적 인지곡선반경 II] : 곡선반경(R)

4.2 향후 연구과제

연구의 결과를 발전시키기 위한 향후 연구과제는 다음과 같다.

- 이론적 곡선부 인지곡선반경 산정을 위해 개발한 수학적 모형식이 3차원적인 블록·오목 종단곡선의 종단요소를 반영하지 못한 한계로 인해, 향후 종단요소를 반영할 수 있는 모형식이 개발되어야 할 것으로 판단된다.
- 본 연구는 시간적 한계로 인해, 곡선부 시각왜곡현상으로 고려한 이론적 인지곡선반경 모형식을 개발하는 과정에서 다양한 도로 기하요소와 환경요소를 반영하지 못 하였으므로 향후 이에 대한 검토가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 노관섭, 도로의 시선유도시설 형태에 따른 운전자의 시인성 분석 연구, 서울시립대학교, 1997.
2. 대한토목학회, 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침, 2000.
3. 건설교통부, 도로설계편람, 2000.
4. 오동성, 운전자 행태도출을 위한 신호교차로 황색신호 시 인지반응시간연구, 아주대학교, 2001.
5. 금기정, 김홍삼, 김명수, 박영진, 교통안전 증진을 위한 국도 곡선부에서의 운전자 시각 형태 분석, 대한교통학회지, 2002.
6. 이수범, 김장욱, 권혁민, 종단선형구간에서의 도로안전시설물 인지특성 모형개발, 대한교통학회지, 2002.
7. 이상하, 도로 시각왜곡현상에 관한 연구, 전남대학교, 2004.
8. 박민철, 곡선부 시각왜곡현상 분석에 관한 연구, 전남대학교, 2008.
9. 한국건설기술연구원, 곡선부 시각왜곡현상 분석 및 설계기법제시, 2008.
10. Krammes, R.A. R.Q. Brackett, M.A. Shafer, J.L. Ottesen, I.B. Anderson. K.L. Fink, K.M. Collins, O.J. Pendleton, and C.J. Messer, Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two-Lane Highway, FHWA-RD-94-034, FHWA, USDOT, 1995b.
11. AASHTO, Roadside Design Guide, American Association of State Highway and Transportation



Officials, 1996.

12. Fitzpatrick, K., R.A Krammes, and D.B Fambro, Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Relationships, Institute of Transportation Engineers Journal, ITE, Vol. 67, No 2, pp.52-59, 1997.
13. Hassan, Y., S.M. Easa, and A.O.Abd El Halim, Design Considerations for Combined Highway Alignments, Journal of Transportation Engineering, ITE, Vol. 123, No.1, 1998.
14. I. Taiganidis and G. Kanellaidis, Approximate Perspective Design of Roads, Journal of Transportation Engineering, 1999.
15. Veit Appelt, Sichtbare Radian als ein Kriterium zur Beurteilung der Räumlichen Linienführung von einbahnigen ußerortsstraßen, Head of Roads Department, Germany, 2000.
16. AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 2001.
17. Thomas Janikula and Norman W. Garrick, Three-Dimensional Visualization, 2002.
18. Yasser Hassan, Tarek Sayed, Shaun Bidulka, Influence of Vertical Approach to Illustrating Esthetic Concepts for Highway Design, TRR 1796, 2002.