

설계속도 상향에 따른 인간공학적 특성을 반영한 편경사와 횡방향마찰계수 분배방법에 관한 연구

A Study for Distribution Methods Between Superelevation and Side Friction Factor Reflecting Ergonomic Characteristics by Increasing Design Speed

정승원 Jeong, Seungwon
김상엽 Kim, Sangyoun
최재성 Choi, Jaisung
김홍진 Kim, Hongjin
장태연 Jang, Taeyoun

서울시립대학교 교통공학과 석사과정 (E-mail: mydream-jsw@hanmail.net)
정회원 · 전북발전연구원 새만금지역개발연구부 부연구위원 · 교신저자 (E-mail: road@jthink.kr)
정회원 · 서울시립대학교 교통공학과 교수 (E-mail: traffic@uos.ac.kr)
정회원 · 한국도로공사 스마트하이웨이사업단 과장 (E-mail: vivid93@ex.co.kr)
전북대학교 도시공학과 교수 (E-mail: jangty@jbnu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to develop a method for distribution between superelevation and side friction factor by increasing design speed.

METHODS : First of all, a method for distribution between superelevation and side friction factor and a theory for the functional formula of side friction factor in compliance with horizontal radius applied in South Korea and the United States are considered. Especially, design speed of 140km/h and numerical value of design elements are applied to the theory for the functional formula of side friction factor in AASHTO's methods. Also, the anxiety EEG upon running speed is measured to reflect ergonomic characteristics through field experiments at seven curve sections of the West Coast Freeway, and this data is applied to graph for the functional formula of side friction factor.

RESULTS : Matching side friction factor against the anxiety EEG, the results that a critical points of driver's anxiety EEG sharply increase locate under existing parabola are figured out.

CONCLUSIONS : Therefore, we could get a new type of the functional formula that driver's driving comfortability is guaranteed if the existing the functional formula of side friction factor goes down under boundary of the critical points of the anxiety EEG.

Keywords

horizontal radius, superelevation, side friction factor, anxiety EEG(electroencephalography), increasing design speed, distribution method

Corresponding Author : Kim, Sangyoun, Associate Research Fellow
Jeonbuk Development Institute, 1696, Kongjiwi-patjwi-ro, Wansan-gu,
Jeonju-si, Jeollabuk-do, 560-860, Korea
Tel : +82.63.280.7154 Fax : +82.63.286.9206
E-mail : road@jthink.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ijhe.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

최근 하이브리드 자동차와 같은 고성능 차세대 차량의 등장 및 정보통신기술의 혁신적인 발달은 더 빠르고,

더 안전하고, 더 편안하게 주행하고자 하는 사람들의 요구를 가능하게 만들고 있다. 이에 따라 「저탄소녹색성장」이라는 국제적 동향 아래 교통분야에서는 초고속도로 건설·운영에 관심이 집중되고 있다. 현재 국내에서

적용되고 있는 고속도로의 최대 설계속도는 120km/h 인데 반해 미국, 독일, 일본과 같은 교통선진국에서 이미 운영 중인 초고속도로의 설계속도는 140~160km/h 로 더 높은 수준이다.

이에 발맞추어 국토해양부는 국내 지역간 거리의 한계를 극복하고 도로분야의 세계 일류 기술개발을 통한 국가경쟁력을 강화하기 위해 “SMART Highway 사업”을 추진 중에 있다. “SMART Highway”란 ‘세계 최고수준의 빠르고 편안한 지능형 녹색도로 실현’이라는 슬로건 아래 국내에서 연구·개발 중인 설계속도 140km/h의 초고속도로를 의미한다. 국내 지형에 적합한 초고속도로를 건설하기 위해 각 설계요소마다 고속에서의 설계기준이 필요하지만, 현재 「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침, 2009」에서는 최대 설계속도 120km/h의 설계기준까지만 제시하고 있는 실정이다. 이에 “SMART Highway 사업”의 세세부과제로 설계속도 140km/h에서의 설계요소 기준을 정립하는 ‘기하구조 기본연구’가 진행 중이다. 본 연구에서는 “SMART Highway 기하구조 기본연구” 과업의 일환으로 설계속도 140km/h에서의 초고속도로 곡선부에서 반드시 고려해야 할 설계요소인 평면곡선반지름, 편경사, 횡방향마찰계수에 관하여 이론적으로 검토하며 고속에서의 적용을 고찰하고자 한다.

고속도로 곡선부 설계 시 그 도로의 설계속도와 평면곡선 반지름이 결정되면 이에 따라 편경사와 횡방향마찰계수 값이 결정되어야 한다. 차량은 곡선부를 주행할 때 바깥쪽으로 멀어지려는 원심력을 받게 되는데 이를 편경사와 횡방향마찰계수가 분담한다. 이 때 편경사의 비율이 너무 커지게 되면 부자연스러운 핸들조작 및 노면 결빙 시 차량이 곡선부 안쪽으로 미끄러지는 위험이 발생할 수 있기 때문에 국내의 경우 최대편경사를 8%까지 적용하고 있다. 반면 횡방향마찰계수의 비율이 너무 커지면 운전자는 주행 시 불쾌감을 받게 된다. 따라서 도로 설계자는 편경사와 횡방향마찰계수가 설계속도와 평면곡선반지름에 따라 균형있게 분배되도록 판단하여야 한다. 하지만 평면곡선반지름이 달라질 때 달라진 평면곡선반지름에 적합한 e 값을 어떻게 결정할 것인가에 대해 설계속도 140km/h의 경우 명확한 결정방법이 없다는 것이다. 즉 기존 방법처럼 e 값을 결정할 것인지, 아니면 설계속도가 140km/h로 상향 조정되어 기존의 방법 대신 다른 방법을 고안해서 적용할 것인지 아직 결정된 바가 없다. 또한 설계속도 140km/h인 초고속도로 곡선부에 적용하고자 하는 평면곡선반지름이 최소평면곡선반지름과 같으면 최대편경사와 최대횡방향마찰계

수를 사용하면 되나, 최소평면곡선반지름보다 크다면 편경사와 횡방향마찰계수를 배분해야 하는 과제가 발생한다. 이 때 도로 설계자는 편경사와 횡방향마찰계수가 설계속도와 평면곡선반지름에 따라 균형있게 분배해야 하는데 어떤 방식이 좋은 것인지 분명하게 결정되어 있지 않은 실정이다.

또한 최근 사람 중심의 설계가 세계적 트렌드로 떠오르는 가운데 도로설계분야에서도 운전자 특성을 반영하려는 노력이 많이 일어나고 있다. 설계속도가 상향되면 고속의 주행환경에 적합한 기하구조 뿐만 아니라 운전자 주행행태, 심리상태와 같은 요인들도 안전한 설계를 위해 반영되어야 한다. 일반적으로 고속 주행상태에 이르게 되면 운전자는 시야가 좁아지고 긴장하게 되며 동시에 속력에 대한 불안함을 느끼게 된다(Herrstedt, 2005). 이와 관련하여 인간공학적 측면에서 차량의 주행속도가 140km/h에서 150km/h로 상향될 때 운전자 불안회파가 급증한다는 연구결과가 있다(최재성, 2012). 이는 고속주행 시 운전자의 안전성과 주행쾌적성에 직결되는 사항이며, 초고속도로 설계속도 결정 단계 시 이러한 운전자 특성이 반영되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 고속 주행환경에서 평면곡선반지름에 따른 편경사와 횡방향마찰계수 분배에 관하여 인간공학적 방법론을 적용한 연구를 수행하였다.

1.2. 연구의 내용 및 범위

본 연구의 내용적 범위는 기본적으로 고속도로 곡선부에 설계속도 140km/h를 적용하였다. 그리고 차량이 곡선부에서 고속으로 미끄러짐 없이 안전하고 쾌적하게 주행하는데 가장 직접적인 영향을 주는 평면곡선반지름, 편경사, 횡방향마찰계수를 대상으로 하여 고속에서의 평면곡선반지름에 따른 편경사와 횡방향마찰계수 분배에 관한 연구를 수행하였다. 더불어 본 연구에서는 인간공학적 특성을 반영하여 운전자 주행쾌적성 및 안전성 향상을 기대할 수 있는 연구결과를 제시하였으며, 연구의 체계적인 수행을 위해 다음과 같은 사항들을 연구의 주요내용으로 선정하였다.

첫째, 미국과 국내에서 적용되고 있는 편경사와 횡방향마찰계수 분배방법의 기존이론 및 곡선부 이론 관련 문헌들을 고찰한다.

둘째, 기존 AASHTO 설계이론에 설계속도 140km/h를 적용하여 평면곡선반지름에 따른 편경사 및 횡방향마찰계수 분배 그래프를 도출한다.

셋째, 현장실험을 수행하여 평면곡선반지름별 운전자

불안되파 데이터를 수집하고 횡방향마찰계수와 의 상관 관계 분석 후, 편경사와 횡방향마찰계수의 분배결과 및 이를 활용한 설계지침을 제시한다.

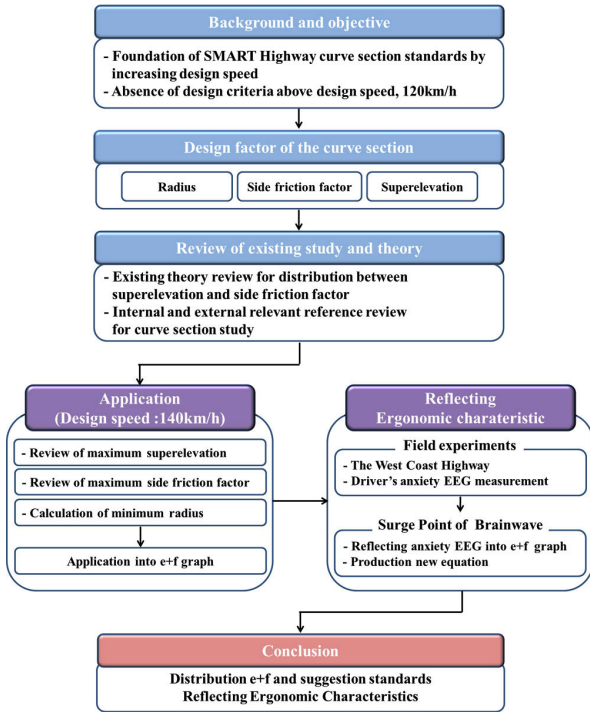


Fig. 1 The Flow of This Study

2. 선행 연구 고찰

2.1. 편경사와 횡방향마찰계수 분배에 관한 기존 이론고찰

'Craus(1978), Superelevation and Curvature of Horizontal Curves'에서는 곡선부의 편경사와 횡방향 마찰계수 분배방향에 관해 안전도(Degree of safety) 개념을 정의하여 수식적으로 설명하고 있다. 평면곡선 부를 주행하는 차량은 Fig. 2와 같이 가속도 측면에서 균형을 이루게 되는데, Eq. (1)에 의해 운전자는 곡선부에서 일정한 주행속도로 핸들 조작에 큰 어려움을 받지 않으며 쾌적한 주행을 할 수 있게 된다.

Eq. (2)는 편경사가속도와 원심가속도의 비(ratio)로 표현되며, 파라미터 β^2 은 설계속도와 다른 속도로 주행하는 차량의 안전도(Degree of safety)를 말한다. 예컨대 설계속도 140km/h의 도로에서 차량이 140km/h가 아닌 속도로 주행하면 안전도가 감소한다는 의미이다.

$$a_r = a_c - a_e \quad (1)$$

$$\beta^2 = a_e / a_c \quad (2)$$

여기서, a_r : 운전자에게 인지되는 횡방향가속도

$$a_c : V^2 / R \text{ (원심가속도)}$$

$$a_e : g \times e \text{ (편경사가속도)}$$

Eq. (2)에 따르면 도로의 일정한 편경사에 대하여 β^2 의 증가는 분모인 원심력가속도의 감소를 뜻하고, 이는 차량이 바깥쪽으로 나가려고 하는 힘이 작아지기 때문에 운전자가 곡선부를 쾌적하게 주행할 수 있다는 것을 의미한다. 한편 Eq. (1)을 Eq. (2)에 대입하면 다음 Eq. (3)과 같이 나타난다.

$$\beta^2 = \frac{1}{\left(\frac{a_r}{a_c}\right) + 1} \quad (3)$$

Eq. (3)에서 β^2 이 상향하려면 a_r/a_c 의 값이 감소해야 하며, 이는 곡선부에 설치된 편경사에 의해 발생하는 고정된 편경사가속도 값에 대하여 횡방향가속도 값이 감소해야 한다는 것을 의미한다. 따라서 곡선부에서 차량의 주행안전성 향상 측면에서 횡방향마찰계수를 편경사보다 상대적으로 적은 방향으로 분배해야 하는 것이 좋은 설계 방향이다.

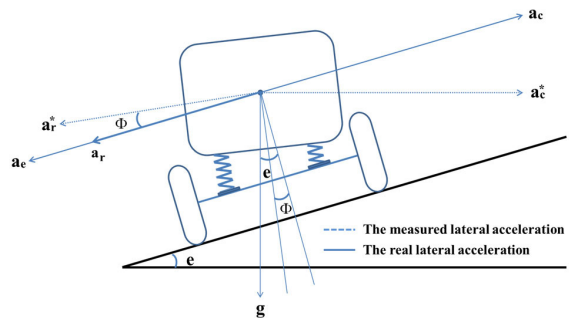


Fig. 2 Scheme of Accelerations During Travel in a Horizontal Curve

국내 「도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침, 2009」과 미국의 AASHTO Green book(2011)에서는 $e+f$ 분배 방법을 다섯 가지로 제시하며, 현재 실무에서 Table 1의 다섯 번째 방법이 일반적으로 적용되고 있다.

Method 5는 설계속도에 대응하는 횡방향력을 최대 편경사를 넘지 않는 범위 내에서 우선적으로 편경사가 받도록 한다는 원칙에서 출발한다. 그리고 나서 평면곡

Table 1. Distribution of e and f over a Range of Curves

Section	Contents
Method 1	Superelevation and side friction factor are directly proportional to the inverse of the radius (i.e., a straight-line relation exists between $1/R=0$ and $1/R=1/R_{min}$).
Method 2	Side friction is such that a vehicle traveling at design speed has all lateral acceleration sustained by side friction on curves up to those requiring f_{max} . For sharper curves, f remains equal to f_{max} and superelevation is then used to sustain lateral acceleration until e reaches e_{max} . In this method, first f and then e are increased in inverse proportion to this radius of curvature.
Method 3	Superelevation is such that a vehicle traveling at the design speed has all lateral acceleration sustained by superelevation on curves up to that requiring e_{max} . For sharper curves, e remains at e_{max} and side friction is then used to sustain lateral acceleration until f reaches f_{max} . In this method, first e and then f are increased in inverse proportion to this radius of curvature.
Method 4	This method is the same as Method 3, except that it is based on average running speed instead of design speed.
Method 5	Superelevation and side friction are in a curvilinear relation with the inverse of the radius of the curve, with values between those of Methods 1 and 3.

선반지름이 작아짐에 따라 편경사와 횡방향마찰계수를 포물선으로 변화시키는 방법이다.

Fig. 3과 Fig. 4의 Method 5에 해당하는 포물선을 보면 편경사와 횡방향마찰계수가 각각 평면곡선반지름에 따라 동시에 변화하고 있지만, 평면곡선반지름이 큰 ㉠ 경우에는 편경사가 상대적으로 크고 평면곡선반지름이 작은 ㉡ 경우 횡방향마찰계수가 상대적으로 커지고 있음을 알 수 있다.

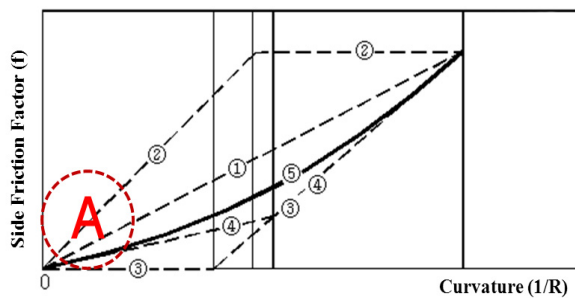


Fig. 3 Relation between f and R by Design Speed

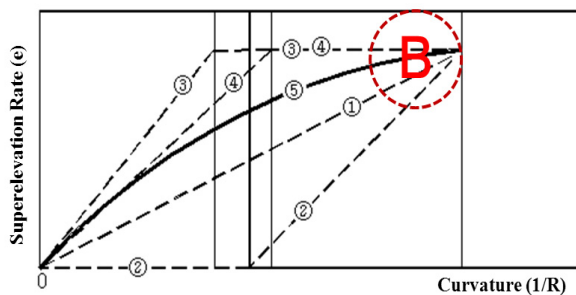


Fig. 4 Relation between e and R by Design Speed

본 연구에서는 고속의 상태에서 운전자 주행쾌적성을 확보하는 것이 중요한 과제이기 때문에 횡방향마찰계수가 높아질수록 운전자가 느끼는 주행쾌적성이 저해되는 측면에서, 편경사에 상대적으로 많은 양을 배분하는 것이 좋다. 따라서 Method 5는 초고속도로 $e+f$ 분배의 기본방향으로 적합하다고 판단한다.

한국과 미국의 현행 설계기법에서는 설계속도와 평면곡선반지름에 따른 적절한 편경사를 산정하기 위해 먼저 Fig. 3의 횡방향마찰계수 포물선 식에서 횡방향마찰계수를 산정하고, $e+f$ 값에서 횡방향마찰계수 값을 차감하여 편경사를 결정하는 방식을 사용하고 있다.

한편, 횡방향마찰계수 포물선식 산정 시 미국 AASHTO의 경우 기본적으로 설계속도 방식을 채택하고 있지만 횡방향마찰계수 포물선식 도출과정에서 Fig. 5의 R_{pl} 에 주행속도를 적용한다. R_{pl} 는 차량이 평면곡선부를 설계속도로 주행할 때 운전자에게 작용하는 원심력을 최대편경사만으로 대응할 수 있는 평면곡선반지름을 의미한다.

독일의 경우 기본적으로 최대편경사 설계기준을 주행속도를 기반으로 적용하고 있는데, 운전자가 곡선부에 진입할 때만 느낄 수 있는 최대편경사의 영향은 실제 주행속도에 의존하기 때문이다. 이러한 이유로 AASHTO 방식의 포물선식이 국내의 이론식보다 더욱 현실적인 값을 산출하는 것으로 판단된다. 설계속도와 주행속도 적용의 차이와 이에 수반하는 분배효과가 미묘한 수준으로 나타날 수 있지만, 그 이점은 실제로 존재한다.

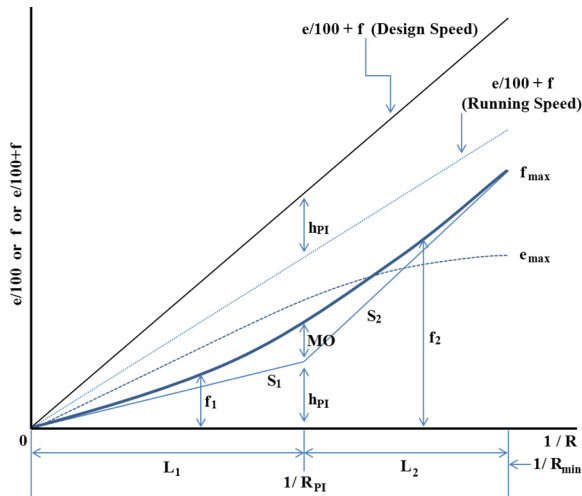


Fig. 5 The Parabolic Curve of The AASHTO

주행속도를 반영하는 R_{PI} 에 의해 Eq. (4), Eq. (5)와 같이 두 부분의 비대칭 포물선으로 표현되는 AASHTO의 횡방향마찰계수 포물선식을 본 연구에 적용하고자 한다.

$$f_1 = MO \left(\frac{R_{PI}}{R} \right)^2 + \frac{S_1}{R} \quad R > R_{PI} \quad (4)$$

$$f_2 = MO \left(\left(\frac{1}{R_{min}} - \frac{1}{R} \right) + \left(\frac{1}{R_{min}} - \frac{1}{R_{PI}} \right) \right)^2 + h_{PI} + S_2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_{PI}} \right) \quad R \leq R_{PI} \quad (5)$$

2.2. 국내·외 곡선부 연구 관련 문헌고찰

국내·외 편경사, 횡방향마찰계수 그리고 평면곡선반지름에 관한 관련 연구에 대한 문헌을 검토하였다.

정준화(1998) 등은 도로곡선부의 평면선형 설계기준과 차량 주행행태에 대해 살펴보고, 곡선부에서 안전하고 쾌적한 구조를 이루도록 도로환경 측면과 그에 따른 운전자 행태 및 차량 운동학 측면을 고려한 최소평면곡선반지름이나 최대편경사, 적정 마찰계수 등을 규정할 필요가 있음을 밝혔다.

이종달(2001) 등은 차량의 무게중심에 대한 편경사 공식을 산정하였고, 자동차 사고 재현 프로그램을 이용하여 곡선부 편경사의 결정에 있어서 차량의 무게중심을 고려해 대형차를 기준으로 한 편경사 설치에 중점을 두어 실제에 적합한 구조로 개선하고자 하였다.

김용석(2006) 등은 주행속도별 차량의 거동을 살펴보

기 위해 국내에서 생산된 차량을 대상으로 차량 동역학 해석용 차량 모델을 MSC/ADAMS 프로그램을 이용하여 모델링을 하였다. 차량은 $R=200m$ 인 직선, 완화곡선, 원곡선으로 구성된 도로를 편경사 0, 4, 6% 일 때 각각에 대하여 주행속도를 증가하면서 시뮬레이션을 수행함. 그리고 타이어와 노면 편경사의 영향을 고려하여 건조한 노면, 젖은 노면, 결빙 노면에 대해 해석을 수행하였다.

박제진(2008) 등은 곡선부 도로 변이구간에서의 주행속도와 주행반경을 고려한 지점별 횡방향 가속도와 횡방향 가속도 변화율을 산정하고, 이를 고려한 곡선부 도로 변이구간의 설계안전성을 평가하여 편경사, 평면곡선반지름 등의 선형 설계요소를 검토하였다.

G. Kanellaidis(1989)은 곡선부에서 최대편경사를 산정하는 방법에 관해 미국과 독일의 관련 지침을 제시하고 비교하였다. 미국의 지침에서 최대편경사 e 의 분배는 다양한 설계속도에서 계산된 $e+f$ 값에서 횡방향 마찰계수를 차감하면서 얻어지는 것에 비하여 독일의 지침에서는 최대편경사를 계산하는데 주행속도(V_{85})가 사용되었다.

이와 같이 관련 연구를 검토한 결과, $e+f$ 분배에 관한 연구보다는 개별요소에 대한 결과도출 연구와 대체로 기하구조 및 도로환경 측면, 차량동역학적 관점을 기반으로 연구된 사례가 주를 이루고 있다. 하지만 인적요인을 반영한 Human factor를 나타내는 운전자 특성에 의한 요인은 차량, 도로·기하구조에 못지않은 도로 설계 시 고려해야 할 중요한 항목이며, 특히 고속주행을 위한 설계에 반영해야 할 필수 설계요소가 된다. 따라서 본 연구는 설계속도 상향에 따른 곡선부 설계 연구를 운전자 특성을 반영하기 위해 인간공학적 방법론을 적용한다는 점에서 타 연구와 차별성을 갖는데 그 의의가 있다.

3. 설계속도 140km/h에 대한 기존이론 적용

현재 국내의 평면곡선부에 적용할 수 있는 최대편경사는 8%로 설계속도 120km/h일 때 최소평면곡선반지름은 630m로 규정되어 있다. 하지만 설계속도가 140km/h로 상향될 경우 이에 따라 최대횡방향마찰계수, 최대편경사, 최소평면곡선반지름 값 역시 조정되어야 한다.

3.1. 최대편경사

최대편경사는 도로의 평면곡선부에는 도로가 위치하

는 지역, 적설정도, 설계속도, 평면곡선반지름 및 지형 상황 등에 따라 구분된다. 국내 「도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침, 2009」에는 Table 2와 같은 최대편경사 기준이 제시되어 있다.

Table 2. Maximum Superelevation Criteria in Korea

Classification		Maximum superelevation(%)
Rural area	Snow area	6
	Other area	8
Urban area		6
Connection road		8

호주의 지방부 도로 설계 가이드라인에서는 구릉지, 산지지역을 제외한 지역에서는 주행속도 130km/h까지 최대편경사 6%를 적용하고 있다. 저속으로 주행이 가능한 구릉지, 산지에 대해서는 주행속도 90km/h 내에 최대 10%까지 편경사를 적용하고 있다.

본 연구에서는 향후 SMART Highway가 평면곡선 반지름이 큰 고구격의 선형으로 설계되며, 설계속도 140km/h의 고속 주행환경 유지를 위한 차원에서 하나의 최대편경사인 6%로 적용하는 것이 합리적이라고 판단하였다.

3.2. 횡방향마찰계수

미국 텍사스 주에서 발간한 “Criteria For High Design Speed Facilities(2007)” 또한 국외문헌인 Craus(1978)에서는 설계속도 140km/h의 최대횡방향 마찰계수(f_{max}) 기준을 제시하고 있다. Table 3의 값은 고속의 범위 내에서 설계속도가 증가함에 따라 일정한 선형으로 감소한다는 가정에 근거한 보외법(extrapolation)으로 산출되었다. 본 연구에서는 설계속도 140km/h의 f_{max} 에 0.07을 적용하였다.

Table 3. Maximum Side Friction Factor under the Higher Speed

Design speed (km/h)	TTI, 2007	Craus(1978)
130	0.08	0.067
140	0.07	0.063
150	0.05	-
160	0.04	-

3.3. 최소평면곡선반지름

설계속도 140km/h에서의 최대편경사, 최대횡방향마찰계수를 Eq. (6)에 대입하여 최소평면곡선반지름을 산

출하였다. 본 연구에서 적용하고자 하는 설계속도 140km/h의 최소평면곡선반지름은 최대편경사 6%, 최대횡방향마찰계수 0.07일 때 1,187m로 산출되었다.

$$R_{min} = \frac{V_D^2}{127(e_{max} + f_{max})} \quad (6)$$

여기서, R_{min} : 최소평면곡선반지름(m)

V_D : 설계속도(km/h)

e_{max} : 최대편경사

f_{max} : 최대횡방향마찰계수

3.4. AASHTO의 $e+f$ 분배 Graph

AASHTO의 횡방향마찰계수 포물선식에 설계속도 140km/h에서의 최대횡방향마찰계수, 최대편경사 그리고 최소평면곡선반지름을 적용하였고 주행속도는 135km/h로 가정하였다. 이에 따라 AASHTO의 횡방향마찰계수 포물선식 산출과정에 거쳐 Table 4와 같이 평면곡선반지름별 편경사와 횡방향마찰계수 값을 산출하였다.

Table 4. Distribution of $(e+f)$ for the SMART Highway

R (m)	V_D	140km/h	V_R	135km/h
	e_{max}	0.06	f_{max}	0.07
		f	e	
1,500	0.0453		0.0574	
1,600	0.0404		0.0560	
1,800	0.0326		0.0531	
2,000	0.0270		0.0502	
2,500	0.0182		0.0436	
4,000	0.0081		0.0305	
5,000	0.0056		0.0252	
8,000	0.0027		0.0166	
10,000	0.0019		0.0135	

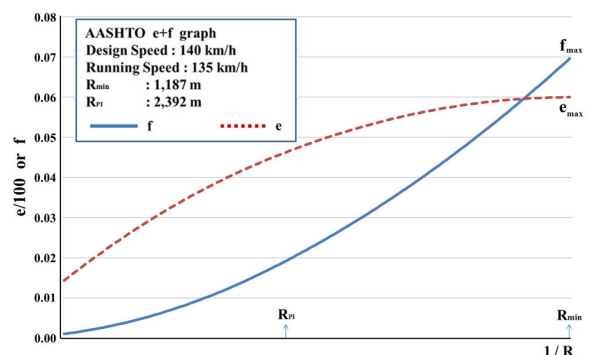


Fig. 6 Distribution of $(e+f)$ for the SMART Highway

4. 불안뇌파 데이터를 적용한 $e+f$ 의 새로운 분배

설계속도 140km/h에 대한 최대편경사, 최대횡방향 마찰계수, 최소평면곡선반지름, 주행속도를 AASHTO의 $e+f$ 분배 그래프에 적용하였더니 앞의 Fig. 6과 같은 그래프의 개형이 표현되었다. 더불어 기존의 AASHTO $e+f$ 분배방법을 바탕으로 본 연구에서는 곡선부에서 차량 주행속도의 상향과 평면곡선반지름에 따른 인간이 느끼는 불안감의 변화를 알아보고, 이에 따라 편경사와 횡방향마찰계수의 새로운 분배방법을 살펴보고자 한다. 이를 위해 본 연구진은 먼저 운전자의 불안뇌파 데이터를 얻기 위해 현장실험을 실시하였고, 산출된 데이터를 이용하여 주행속도와 횡방향마찰계수에 따른 불안뇌파의 변화를 AASHTO의 설계속도 140km/h $e+f$ 분배 그래프에 적용하였다.

4.1. 뇌파적용

뇌파(Brainwave)는 신경계에서 뇌신경 사이에 신호가 전달될 때 생기는 전기의 흐름을 말한다. 심신의 상태에 따라 각각 다르게 나타나며 뇌의 활동상황을 측정하는 가장 중요한 지표이다. 이러한 뇌의 전기적 활동은 두피에 부착한 전극을 통해서 기록되며, 그 결과 뇌전도(EEG: electroencephalogram) 또는 뇌파(brainwave)라고 한다. 뇌파는 δ 파(delta wave), θ 파(theta wave), α 파(alpha wave), β 파(beta wave), γ 파(gamma wave) 등으로 구분되며 각 뇌파의 주파수 및 뇌파에 따른 의식 상태, 주요 생성부분은 Table 5와 같다.

뇌파분석은 수시로 변화하는 뇌의 기능 상태를 잘 나타내며, 동시기록방법(polygraphy)이 가능하여 가상실험 또는 인간공학 등의 분야에 널리 쓰이고 있다. 뇌파분석의 종류로는 상대파워분석(Band to Band Power Spectrum)과 절대파워분석(Absolute Power Spectrum)으로 나눌 수 있다. 상대파워분석은 분석대상 파형과 다른 파형과의 비율을 보는 것이며, 절대파워분석은 분석대상 파형의 절대적 수치를 보는 것이다. Coope(1980)는 뇌파 데이터 처리를 위해 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통해 각 뇌파의 상대 파워 스펙트럼을 산출하였다. 또한 Kim(1999)은 고속도로 주행 시 나타나는 운전자의 뇌파신호를 추출하여 뇌파의 특성이 운전작업 부하에 얼마나 민감하게 나타나는지 조사하였다. 그 결과 Relative Energy Parameter가 비운전상황과 운전상황의 차이를 확연히 구분할 수 있었으며, Alpha파와 Beta파의 비는 운전상

황별 부하를 부분적으로 구분해 주는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서도 뇌파분석에 있어서 절대파워분석이 아닌 상대파워분석 방법으로 평상시 발생하는 Alpha파와 고속의 도로주행 시 나타나는 Beta파의 비를 계산하여 불안뇌파의 크기를 산출하였다.

Table 5. Frequency Band and Characteristics of Each Brainwave

Brainwave	Frequency band (Hz)	Consciousness	Major Production Section
δ (Delta wave)	0.2-3.99	Deep Sleeping	-
θ (Theta wave)	4-7.99	Drowsiness, Inner Side Sense	Frontal Lobe, Temporal Lobe
α (Alpha wave)	8-12.99	Relaxation, Meditation	Occipital Lobe, Parietal Lobe
β (Beta wave)	13-29.99	Active state, Anxiety/Tension	Frontal Lobe, Temporal Lobe
γ (Gamma wave)	30-50	Sympathy Sense, Stress, Excitement	-

4.2. 현장실험 개요

본 연구진은 운전자 불안뇌파 데이터를 수집하기 위해 피실험자 60명을 대상으로 서해안고속도로에서 현장실험을 수행하였다. 현장실험에 대한 세부사항은 Table 6과 같다. 실험구간은 서해안고속도로 대천IC~무창포IC 구간을 포함한 7개의 곡선부를 선정하였다.

Table 6. Field Experiment Details

Details	Contents
Date	• 2011.09.16~2011.10.15 • 14:00~16:00, 23:00~02:00
Distance	• The West Coast Highway Daecheon IC ~Muchangpo IC (11km)
Weather	• Sunny
Subject	• Sixty people

Table 7. Location of Curve Section (Horizontal Radius)

Horizontal radius (m)	Station
1,200	152+120 ~ 153+240
1,500	266+080 ~ 266+760
1,800	186+720 ~ 188+680
1,845	182+600 ~ 184+520
1,900	190+520 ~ 192+820
3,500	189+080 ~ 190+120
7,700	185+760 ~ 186+140

4.3. 실험과정

본 연구의 실험은 피실험자가 자유롭게 낼 수 있는 속도만큼 주행하라고 했을 때 수집되는 속도, 불안뇌파 데이터를 분석하여 보는 시나리오로 진행되었다. 이 때 피실험자가 자신의 속도를 확인하면 주행속도에 영향을 미칠 수 있으므로 계기판을 가리고 단속카메라 및 타 차량의 영향을 최소화시켜 주행하도록 하였다. 주행속도와 GPS좌표를 기록할 수 있는 지능형 주행기록계를 실험차량에 부착하였으며, 피실험자에게는 뇌파분석장비를 머리에 부착하여 실험을 수행하였다.

4.4. 평면곡선반지름별 주행속도 및 횡방향마찰계수에 따른 불안뇌파 값의 변화와 적용

본 연구에서는 7개의 평면곡선반지름에 대한 현장실험을 수행한 후 피실험자들의 곡선부 주행속도에 따른 불안뇌파 데이터를 얻을 수 있었다. 이 때 서해안고속도로 카드도면에 제시되어 있는 실험구간에 설치된 편경사 값을 이용하면, Eq. (7)에 의해 주행속도 상향에 따라 차량 및 운전자에게 전달되는 횡방향마찰계수를 산출하였다. 실제로 운전자가 받는 f_a 의 느낌은 미묘하지만, 고정된 평면곡선반지름, 편경사, 주행속도에 따라 요구되는 값이다.

$$f_a = \frac{V_R^2}{127R} - e \quad (7)$$

여기서, R : 평면곡선반지름(m),

V_R : 주행속도(km/h)

e : 편경사

f_a : 운전자 체감 횡방향마찰계수

Table 8은 일정한 평면곡선반지름에서 주행속도 상향에 따른 불안뇌파 데이터와 운전자가 주행 시 느끼는 횡방향마찰계수 산출값을 정리한 것이다.

그 후 횡방향마찰계수와 주행속도에 따라 나타나는 불안뇌파 데이터를 매칭시켜 그 관계를 분석하였다. 두 항목에 대하여 Pearson 상관관계분석을 수행한 결과, Table 9와 같이 7개의 평면곡선반지름에서 두 변수의 상관관계수(r)가 0.551~0.945로 상관성이 높은 것으로 나타났다.

또한 Table 8의 평면곡선반지름(R: 1,200m)에 따른 주행속도(또는 횡방향마찰계수)와 불안뇌파 데이터에서

기울기($\Delta EEG/\Delta f_a$)를 산출하여 전체적인 패턴을 살펴 보면 어느 수준의 주행속도에서 피실험자들의 불안뇌파 값이 크게 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 경향은 다른 곡선부에서도 Table 10과 같이 기울기 1,000 이상의 지점에서 유사하게 나타났다.

이에 따라 본 연구진은 실험구간의 평면곡선반지름별로 피실험자의 불안뇌파 값이 크게 증가하는 변곡점을 편경사와 횡방향마찰계수의 새로운 분배방법을 위한 중요 포인트로 두고 연구를 진행하였다.

Table 8. Part of the Summary of the Brainwave Test (R : 1,200m)

R(m)	e	V_R (km/h)	Anxiety EEG	f_a	$\Delta EEG/\Delta f_a$
1,200	0.04	105	1.711	0.0323	-604.8
1,200	0.04	106	2.362	0.0337	470.2
1,200	0.04	107	2.208	0.0351	-110.2
1,200	0.04	108	2.556	0.0365	246.8
1,200	0.04	109	1.688	0.0380	-609.3
1,200	0.04	110	2.150	0.0394	321.5
1,200	0.04	111	2.733	0.0408	401.6
1,200	0.04	112	1.891	0.0423	-575.0
1,200	0.04	113	2.078	0.0438	126.1
1,200	0.04	114	3.067	0.0453	664.2
1,200	0.04	115	2.612	0.0468	-302.5
1,200	0.04	116	1.340	0.0483	-839.6
1,200	0.04	117	3.290	0.0498	1275.6
1,200	0.04	118	4.462	0.0514	759.9
1,200	0.04	119	4.871	0.0529	262.9
1,200	0.04	120	3.282	0.0545	-1013.3
1,200	0.04	120	4.838	0.0561	965.9
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

위의 Table 8을 보면 주행속도는 고속으로 증가함에 따라 횡방향마찰계수가 증가하고 있는데, 일반적으로 한 지점의 곡선부에 설치되어 있는 평면곡선반지름과 편경사는 일정하기 때문에 주행속도가 올라가게 되면 운전자가 체감하는 횡방향마찰계수 역시 상향하게 된다. 그리고 불안뇌파는 운전자마다 불안을 느끼기 시작하는 기준과 그 변화폭이 제각기 다르기 때문에 피실험자마다 동일한 주행속도에서 측정되는 불안뇌파 값은 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서 앞의 Fig. 6과 같은 설계속도 140km/h의 AASHTO $e+f$ 분배 그래프에 불안뇌파 데이터를 적용하여, 실험구간 내 평면곡선반지름에 따른 불안뇌파

Table 9. Pearson Correlation Analysis between Anxiety EEG and Side Friction Factor

Horizontal radius			1,200m		1,500m		1,800m		1,845m		1,900m		3,500m		7,700m	
			EEG	f	EEG	f	EEG	f	EEG	f	EEG	f	EEG	f	EEG	f
1,200m	EEG	Pearson r	1	0.652	0.977	0.653	0.439	0.225	0.150	-0.008	-0.008	-0.015	-0.006	0.006	0.373	0.588
		P-value		0.000	0.000	0.000	0.060	0.355	0.553	0.974	0.976	0.951	0.981	0.984	0.046	0.001
		N	29	29	29	29	19	19	18	18	18	18	16	16	29	29
	f	Pearson r	0.652	1	0.698	1.000	0.783	1.000	0.685	1.000	0.815	0.971	0.945	1.000	0.392	0.969
		P-value	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035	0.000
		N	29	29	29	29	19	19	18	18	18	18	16	16	29	29
1,500m	EEG	Pearson r	0.977	0.698	1	0.698	0.513	0.375	0.339	0.163	0.229	0.065	-0.039	-0.033	0.388	0.622
		P-value	0.000	0.000		0.000	0.025	0.113	0.168	0.517	0.360	0.797	0.886	0.902	0.038	0.000
		N	29	29	29	29	19	19	18	18	18	18	16	16	29	29
	f	Pearson r	0.653	1.000	0.698	1	0.783	1.000	0.687	1.000	0.814	0.972	0.945	1.000	0.394	0.969
		P-value	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034	0.000
		N	29	29	29	29	19	19	18	18	18	18	16	16	29	29
1,800m	EEG	Pearson r	0.439	0.783	0.513	0.783	1	0.781	0.533	0.748	0.659	0.763	0.656	0.664	0.199	0.735
		P-value	0.060	0.000	0.025	0.000		0.000	0.023	0.000	0.003	0.000	0.006	0.005	0.414	0.000
		N	19	19	19	19	19	19	18	18	18	18	16	16	19	19
	f	Pearson r	0.225	1.000	0.375	1.000	0.781	1	0.685	1.000	0.815	0.971	0.945	1.000	0.129	0.970
		P-value	0.355	0.000	0.113	0.000	0.000		0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.598	0.000
		N	19	19	19	19	19	19	18	18	18	18	16	16	19	19
1,845m	EEG	Pearson r	0.150	0.685	0.339	0.687	0.533	0.685	1	0.686	0.674	0.632	0.514	0.517	0.124	0.654
		P-value	0.553	0.002	0.168	0.002	0.023	0.002		0.002	0.002	0.005	0.042	0.040	0.625	0.003
		N	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	16	16	18	18
	f	Pearson r	-0.008	1.000	0.163	1.000	0.748	1.000	0.686	1	0.815	0.972	0.945	1.000	0.035	0.974
		P-value	0.974	0.000	0.517	0.000	0.000	0.000	0.002		0.000	0.000	0.000	0.000	0.890	0.000
		N	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	16	16	18	18
1,900m	EEG	Pearson r	-0.008	0.815	0.229	0.814	0.659	0.815	0.674	0.815	1	0.706	0.532	0.713	-0.002	0.722
		P-value	0.976	0.000	0.360	0.000	0.003	0.000	0.002	0.000		0.001	0.034	0.002	0.995	0.001
		N	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	16	16	18	18
	f	Pearson r	-0.015	0.971	0.065	0.972	0.763	0.971	0.632	0.972	0.706	1	0.942	0.978	0.036	0.995
		P-value	0.951	0.000	0.797	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.001		0.000	0.000	0.887	0.000
		N	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	16	16	18	18
3,500m	EEG	Pearson r	-0.006	0.945	-0.039	0.945	0.656	0.945	0.514	0.945	0.532	0.942	1	0.945	-0.047	0.935
		P-value	0.981	0.000	0.886	0.000	0.006	0.000	0.042	0.000	0.034	0.000		0.000	0.864	0.000
		N	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	f	Pearson r	0.006	1.000	-0.033	1.000	0.664	1.000	0.517	1.000	0.713	0.978	0.945	1	-0.015	0.984
		P-value	0.984	0.000	0.902	0.000	0.005	0.000	0.040	0.000	0.002	0.000	0.000		0.956	0.000
		N	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
7,700m	EEG	Pearson r	0.373	0.392	0.388	0.394	0.199	0.129	0.124	0.035	-0.002	0.036	-0.047	-0.015	1	0.551
		P-value	0.046	0.035	0.038	0.034	0.414	0.598	0.625	0.890	0.995	0.887	0.864	0.956		0.001
		N	29	29	29	29	19	19	18	18	18	18	16	16	35	35
	f	r	0.588	0.969	0.622	0.969	0.735	0.970	0.654	0.974	0.722	0.995	0.935	0.984	0.551	1
		P-value	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	
		N	29	29	29	29	19	19	18	18	18	18	16	16	35	35

Table 10. Finalized Maxium Side Friction Factors and Radius of Horizontal Curve by the Brainwave Test

R(m)	Surge Points of Brainwaves	f_a	$\Delta EEG/\Delta f_a$	Design Speed : 140km/h		
				f_D	e_D	Running Speed on the Surge Points of Brainwaves
1,200	3.290	0.0498	1275.6	0.07	0.060	129
1,500	2.820	0.0319	1085.7	0.05	0.058	131
1,800	2.350	0.0201	1495.0	0.03	0.054	130
1,845	2.616	0.0189	1410.3	0.03	0.053	129
1,900	1.607	0.0174	1239.4	0.03	0.052	130
3,500	1.472	0.0048	1082.8	0.01	0.035	134
7,700	1.023	0.0009	2219.5	0.00	0.018	137

변곡점의 분포양상을 살펴보았다.

그 결과, 불안뇌파 변곡점은 Fig. 7과 같이 7개의 평면곡선반지름에 대해서 기존의 횡방향마찰계수 포물선보다 낮은 범위에 분포하는 것으로 나타났고 각각을 연결해보면 포물선 형태로 나타낼 수 있었다. 이 때 기존의 f 포물선식을 불안뇌파 변곡점 위치로 하향 이동하게 되면 이는 운전자의 불안뇌파 값을 반영한 새로운 횡방향마찰계수 분배 그래프를 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

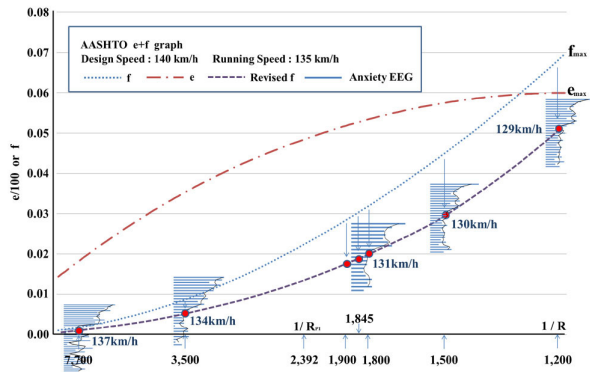


Fig. 7 Surge Points of Brainwaves for Each Radius of Curves and Revised Side Friction Factors

이것을 수식화하기 위해 기존 f 와 New f 값과의 차이, 즉 Δf 의 선형회귀모형을 구축하였다. 그리고 나서 기존 f 포물선식에서 Δf 의 모형식을 차감하여 New f 에 대한 수식을 도출하였다. 먼저, Δf 의 선형회귀모형을 구축하기 위해 SPSS 통계 분석 프로그램을 이용하였고 종속변수는 Δf , 독립변수는 곡률($1/R$)로 선정하여 $y = ax + b$ 의 형태, 대수변환을 위한 $\ln x$ 와 e^x 의 형태로 선형회귀모형을 구축하였다. SPSS 결과 세 가지 형태의 선형회귀모형 중 Eq. (8)의 형태가 R^2 값이

가장 높게 산출되었다. 본 연구에서는 Eq. (8)을 Δf 의 선형회귀식으로 채택하였다.

Table 11. SPSS Input Data

R(m)	1/R	ln(1/R)	exp(1/R)	Existing f	New f	Δf
7,700	0.000130	-8.9490	1.000130	0.0029	0.0010	0.0019
3,500	0.000286	-8.1605	1.000286	0.0101	0.0050	0.0051
1,900	0.000526	-7.5496	1.000526	0.0296	0.0175	0.0121
1,845	0.000542	-7.5202	1.000542	0.0312	0.0185	0.0127
1,800	0.000556	-7.4955	1.000556	0.0326	0.0200	0.0126
1,500	0.000667	-7.3132	1.000667	0.0455	0.0320	0.0135
1,200	0.000833	-7.0901	1.000834	0.0686	0.0500	0.0186

$$\Delta f = 23.776 \times \left(\frac{1}{R}\right) - 0.001 \quad R^2 = 0.978 \quad (8)$$

따라서, 운전자의 불안뇌파를 반영한 New f 포물선식은 (기존 $f - \Delta f$)에 의해 Eq. (9), Eq. (10)과 같이 산출할 수 있다.

$$f_1 = MO \left(\frac{R_{PI}}{R} \right)^2 + \frac{S_1}{R} - 23.776 \times \left(\frac{1}{R} \right) + 0.001 \quad R > R_{PI} \quad (9)$$

$$f_2 = MO \left(\left(\frac{1}{R_{min}} - \frac{1}{R} \right) \div \left(\frac{1}{R_{min}} - \frac{1}{R_{PI}} \right) \right)^2 + h_{PI} + S_2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_{PI}} \right) - 23.776 \times \left(\frac{1}{R} \right) + 0.001 \quad R \leq R_{PI} \quad (10)$$

Eq. (9), Eq. (10)을 이용하여 $e+f$ 기존의 그래프를 다시 Plotting하면 Fig. 8과 같이 표현된다. Fig. 8을 살펴보면 기존의 횡방향마찰계수 포물선이 아래쪽으로 내려가는 반면 편경사 포물선은 위로 상향했음을 알 수

있다. 이는 차량이 곡선부를 140km/h로 주행할 때 가해지는 원심력은 일정하기 때문에 횡방향마찰계수 포물선이 내려가면 편경사 포물선이 올라오는 것은 당연한 이치이다.

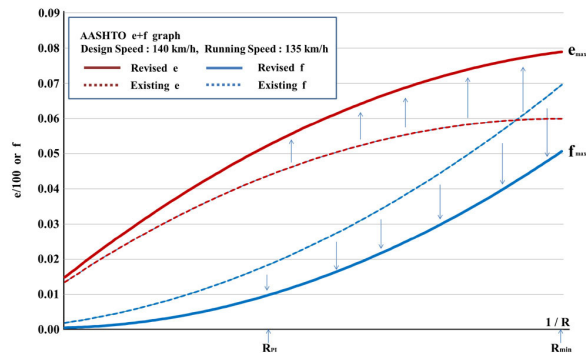


Fig. 8 Revised Distribution of $e+f$ Based on the Brainwave Test

Fig. 8에서 주의 깊게 살펴볼 것은 e_{max} 와 f_{max} 이다. 기존 AASHTO $e+f$ 그래프에서 설계속도 140km/h일 때의 e_{max} 와 f_{max} 는 각각 0.06과 0.07이었다. 하지만 운전자의 불안뇌파 데이터를 반영하면 최대편경사는 약 2% 증가하게 됨을 알 수 있다. 설계속도 140km/h의 초고속도로에서 최소평면곡선반지름에 근접한 곡선부를 설치할 경우 편경사를 기존보다 최대 2%까지 증가시키면 상대적으로 횡방향마찰계수는 2% 만큼 낮춰줌으로서, 고속으로 주행하는 운전자에게 횡방향마찰계수에 의한 불쾌감을 완화시켜 주행쾌적성을 보장해 줄 수 있다는 의미로 설명할 수 있다.

4.5. 연구결과의 적용 및 지침 제시

Table 12는 본 연구의 방법론 및 결과를 적용하여 설계속도 상향에 따른 설계기준을 지침화하여 나타내었다.

Table 12. Superelevation by Horizontal Radius (Maximum Superelevation : 6%)

Design speed (km/h)	Superelevation by horizontal radius (m)							
	NC	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
140	11,110 +	11,110~ 6,450	6,450~ 4,350	4,350~ 3,230	3,230~ 2,380	2,330~ 1,850	1,850~ 1,460	1,460~ 1,190
130	8,700 +	8,700~ 5,000	5,000~ 3,280	3,280~ 2,330	2,330~ 1,630	1,630~ 1,140	1,140~ 1,030	-
120	7,200 +	7,200~ 4,110	4,110~ 2,790	2,790~ 2,040	2,040~ 1,540	1,540~ 1,160		
110	6,000 +	6,000~ 3,450	3,450~ 2,340	2,340~ 1,710	1,710~ 1,290	1,290~ 980		
100	5,000 +	5,000~ 2,840	2,840~ 1,920	1,920~ 1,400	1,400~ 1,040	1,040~ 780		
90	4,000 +	4,000~ 2,300	2,300~ 1,560	1,560~ 1,130	1,130~ 850	850~ 630		
80	3,200 +	3,200~ 1,810	1,810~ 1,220	1,220~ 880	880~ 650	650~ 480		
70	2,400 +	2,400~ 1,380	1,380~ 930	930~ 670	670~ 490	490~ 360		
60	1,800 +	1,800~ 1,010	1,010~ 680	680~ 490	490~ 350	350~ 260		
50	1,200 +	1,200~ 700	700~ 470	470~ 330	330~ 240	240~ 170		
40	800 +	800~ 450	450~ 300	300~ 210	210~ 150	150~ 110		
30	500 +	500~ 250	250~ 170	170~ 120	120~ 85	85~ 60		
20	200 +	200~ 120	120~ 75	75~ 55	55~ 40	40~ 25		

국내 「도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침, 2009」에 제시되어 있는 평면곡선반지름에 따른 편경사 설계기준에 본 연구에서 제시한 초고속도로 최대편경사 6%를 적용하여 설계속도 130~140km/h의 평면곡선반지름 범위에 따른 편경사 설계기준을 추가 제시하였다. Table 12에서 보듯이, 기본 6%의 편경사에서 곡선부가 최소평면곡선반지름에 근접할수록 편경사를 최대 2%까지 상향하여 설치할 수 있다는 것을 나타낸다.

이는 운전자 불안뇌파를 적용하여 기존 설계기준보다 운전자 주행쾌적성 및 안전성 향상을 기대할 수 있는 설계기준으로 활용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후연구과제

본 연구는 국내 설계속도 140km/h의 설계기준 부재에 따른 한계점을 극복하고자 불안뇌파 데이터를 활용하여 초고속도로 곡선부에 적용할 수 있는 평면곡선반지름에 따른 편경사와 횡방향마찰계수 분배방법에 관한 연구를 진행하였다. 이를 위해 기존의 미국과 국내에서 적용되는 편경사와 횡방향마찰계수 분배방법 및 횡방향마찰계수 포물선 식에 대해 고찰하였고, 본 연구에서는 미국의 AASHTO 방식의 이론을 채택하여 140km/h의 설계속도를 반영하였다. 특히, 그 과정에서 고속에서의 운전자 특성을 반영하고자 현장실험을 수행하였고 수집한 운전자 불안뇌파 데이터를 AASHTO 방식의 $e+f$ 분배 그래프에 적용하였다.

이러한 인간공학적 방법론을 적용한 결과, 설계속도 140km/h의 $e+f$ 분배 그래프가 편경사는 상향하고 횡방향마찰계수는 하향하는 방향으로 재분배되었고, 최대 편경사와 최대횡방향마찰계수는 약 2%정도 상·하향하였다. 이는 기존 $e+f$ 분배방법보다 운전자에게 고속에서의 주행쾌적성과 안전성을 보장해 줄 수 있다는 것을 의미한다.

하지만 본 연구에서의 한계점은 설계속도 140km/h가 적용되는 도로가 없다는 것이다. 현재 국내의 최대 설계속도가 120km/h이므로 최근에 설계되어 가장 고규격으로 평가받고 있는 서해안고속도로 역시 차로폭, 측방여유폭, 종단곡선변화비율 등 도로·기하구조 측면에서 설계속도 140km/h의 도로상황을 나타내기에 부족하다는 한계점을 가진다.

향후 연구과제로는 운전자 불안뇌파 데이터와 사고와의 직접적 관련성에 대한 충분한 연구가 필요할 것으로 보이며, 이를 통해 설계기준에 인간공학적 특성을 반영

하는 연구에 대한 실증적 근거를 확보할 수 있을 것이라 판단한다. 더불어 본 연구에서 가정한 135km/h의 주행속도와 관련하여 설계속도 140km/h의 도로에서 운전자가 실제 어느 정도의 속도로 주행할 것인지에 대한 연구가 요구된다. 초고속도로는 현 수준보다 더 높은 속도로 운영되는 고규격의 도로인데 직선부는 물론 곡선부에서도 설계속도에 근접한 고속이 확보되어야 한다. 하지만 국내 지형여건을 고려했을 때 초고속도로 모든 곡선부 구간에서 고속의 설계속도를 확보하는 것은 쉽지 않을 것으로 판단된다. 따라서 곡선부의 주행속도에 기초한 설계이론고찰 및 적용이 진행됨은 물론 그에 따른 현장 속도조사 및 관련 연구가 수반되어야 한다. 또한 설계속도 140km/h에서의 최대횡방향마찰계수도 기존의 국내·외 문헌에서 제시되는 선형회귀식에 대한 보외법(extrapolation)이 아닌 고속에서 운전자가 느끼는 주행쾌적성 및 안전성을 만족할 수 있는 합리적인 값을 산정하는 방안이 향후 연구과제로 진행되어야 하겠다.

감사의 글

본 연구는 스마트하이웨이 사업단을 통하여 지원된 SMART Highway 구조·시설기준 구축(R&D 07 기술혁신 A01)과업에 의하여 수행되었습니다.

References

- MLTMA. *Highway Geometric Design Standards and Regulation*. Ministry of Land & Transportation and Maritime Affairs, Seoul, Korea, 2009.
- AASHTO, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 2011.
- Texas Transportation Institute, *CRITERIA FOR HIGH DESIGN SPEED FACILITIES*, 2007.
- Austrroads, *Rural Road Design; A Guide to the Geometric Design of Rural Roads*, 2003.
- Park, Jejin, Kim, Y., Ko, Y., Ha, T., 2008. Evaluation of horizontal curve transition section using lateral acceleration model, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 10. No. 2. 133-141.
- Kim, Yongseok, Cho, W., 2004. An observational study on the driver behaviours at long tangent sections followed by sharp horizontal curve, *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 22. No. 7. 139-146.
- Lee, Jongdal, Lee, Y., Kwon, K., Jeong, K., 2001. A study on the improvement of highway superelevation considering gravity center of vehicles -The case of S curve in I.C.-, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 21. No. 1D. 53-59.
- Jeong, Junhwa, Yu, S., Yun, Y., 2000. Analysis of the driver's behavior at horizontal curves, *Journal of Korean Society of*

- Civil Engineers*, Vol. 20. No. 1. 67-75.
- Jeong, Junhwa, Park, Y., Park, C., 2000. A design method of horizontal curve based on speeds, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol 22. No. 5. 537-547.
- Son, Youngtae, Kang, J., Eu, Na., 2009. Studies on the change of driver brain wave according to road type, *Conference of Korean Society of Road Engineers*, 59-71.
- G. Kanellaidis, 1989. Aspect of Highway superelevation design, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 117, No. 6, pp. 624-632.
- Choi, J., Lee, S., Kim, S., Lim, J. and Kim, K., 2012. A Study of the Relationship between Driver's Anxiety EEG & Driving Speed in Motorway Sections. *The Korean Society of Safety*, Volume 27, No. 3.
- Herrstedt, L., 1995. *Development of Speed Management Methods for Use in Rural Areas*, 3rd : Conference Proceedings of the Transportation Research Board.
- (접수일 : 2012. 5. 29 / 심사일 : 2012. 5. 29 / 심사완료일 : 2013. 5. 27)