

지방부 도로에서 평면선형 설계관리의 필요성

A Need of Management of Horizontal Alignment Design at Rural Roads

김 용 석 Kim, Yong Seok
조 원 범 Cho, Won Bum

정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 · 수석연구원 (E-mail : safey@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 · 전임연구원 (E-mail : worber@kict.re.kr)

ABSTRACT

Road design guideline provides the directions on how to design a road alignment based on design speed, and this guideline has a design expectation in that design speed is supposed to be equal to the operating speed of drivers. Horizontal curve design is also based on design speed, and minimum radius is derived based on the drivers comfort while negotiating the curve. However, side friction reflecting drivers comfort is lower than a physical friction measured on wet road surface, therefore, it is reasonable to regard the criterion on minimum radius has a safety margin. Futhermore, the practical preference of choosing the larger radius than minimum leads to a noticeable gap between design speed and operating speed, so links to the violation of design expectation implicated in the guideline. In order to review this assumption, friction and operating speed at rural roads was measured and observed. As the results, a safety margin brought out by the gap between comfort-based friction and measured friction is qualitatively derived. Also, the gap between design speed and operating speed presumably caused by the safety margin and practical preference is analysed. By this, it is suggested that current design guideline should provides not only the minimum radius but also the management of road alignment design to minimize the gap between the design speed and operating speed.

KEYWORDS

design speed, side friction factors, safety margin, operating speed

요지

현 도로설계기준은 설계속도에 기반하여 선형설계에 관한 지침을 제시하고 있으며, 이는 설계속도가 도로 공용 후에 운전자의 주행속도와 거의 동일할 것임을 전제하고 있다. 도로 평면 곡선부의 설계도 주어진 설계속도에 따라 운전자가 쾌적성을 유지한 채 통과할 수 있는 최소곡선반경을 기준으로 제시하고 있다. 그러나 쾌적성에 기초한 횡방향 미끄럼마찰계수는 실제 습윤노면에서 관측되는 물리적인 횡방향 미끄럼마찰계수보다 낮기 때문에 기준에 제시된 곡선반경은 최소의 의미보다는 권장 값으로 보는 것이 합리적이다. 아울러, 최소곡선반경보다 여유로운 설계 값을 선호하는 실무관행으로 도로 공용 후 운전자의 주행속도는 설계속도를 상회하여 설계속도가 주행속도를 대표하지 못하는 결과를 초래하고, 결과적으로 현 설계기준의 주요전제를 위반하게 될 것으로 본다. 이러한 연구가정을 검토하기 위해 지방부 도로에서 노면 미끄럼 마찰계수와 운전자의 주행속도를 조사하였다. 연구결과로, 쾌적성에 기반한 미끄럼 마찰계수와 물리적인 미끄럼마찰계수의 차이에 따른 안전여유를 정량적으로 제시했고, 안전여유 및 설계관행에 따른 여유로운 설계로 인해 설계속도와 주행속도 간에 괴리가 발생함을 제시했다. 이를 토대로, 현 설계속도 기반의 선형설계는 최소기준과 더불어 설계속도와 주행속도 사이의 괴리를 최소화할 수 있는 선형 설계 관리 방안이 마련될 필요가 있다.

핵심용어

설계속도, 횡방향 미끄럼마찰계수, 안전여유, 주행속도

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

도로 설계속도는 기상 조건이 양호한 상태에서 평균적 운전 기술을 가진 운전자가 쾌적성을 유지하고 주행할 수 있는 최고 속도이다. 설계속도가 도로설계요소를 정하는 기초 근거로 사용되는 이유는 도로 공용 시 운전자가 선택할 것으로 예상되는 주행속도를 대표할 수 있다고 보기 때문이다. 평면 곡선부의 설계에 있어서도, 운전자가 설계속도로 주행 시 쾌적성을 유지한 채 곡선부를 통과할 수 있는 최소곡선반경 기준을 제시하고 있다. 대개 도로설계기준에 제시되는 최소 기준들이 도로, 자동차, 운전자 간의 물리적 역학관계에 근거하여 마련된 것에 비해, 최소곡선반경 기준은 쾌적성이라는 다소 정성적 평가에 근거해 마련된 것이라는 차이점이 있다.

이러한 차이는 역학 관계 중심의 사고가 일반화되어 있는 도로설계실무에서 최소곡선반경 기준을 정량화된 개념으로 이해하는데 어려움을 주었다. 이와 더불어, 쾌적성을 반영하고 있는 횡방향 미끄럼마찰계수가 1930~1940년대에 수행된 국외실험에 근거하고 있고, 실험 당시의 자동차 성능이나 도로 노면 조건이 현재와 같다고 보기 어려운 점도 현 최소곡선반경 기준이 다소 보수적으로 설계되었다고 간주될 수 있다. 비록 쾌적성에 기반한 횡방향 미끄럼마찰계수가 실제 습윤 도로노면에서 관측되는 횡방향 미끄럼마찰계수에 비해 낮기 때문에 안전측면의 여유가 있다고 볼 수 있으나, 다른 측면에서는 이러한 안전여유가 운전자의 과속을 조장할 개연성이 있고 대다수의 통행이 발생하는 건조한 도로노면에서는 설계속도와 실제 운전자가 선택하는 주행속도와는 큰 괴리가 발생할 것이라고 볼 수 있다.

본 논문은 이상의 연구 배경을 염두에 두고 설계속도 기반의 도로 선형설계에 대한 개념적 고찰과 도로 평면선형 설계에 포함된 안전여유를 정의해 보았다. 쾌적성에 기반한 최소곡선반경기준이 이미 안전여유를 내포하고 있음에도 불구하고 설계실무에서 최소곡선반경보다 여유로운 곡선반경을 선호하는 관행이 궁극적으로는 설계속도를 크게 상회하는 주행속도로 이어질 개연성에 주목하였다. 본 논문에서는 두 가지 연구 논점을 검토했다. 첫째는 도로설계실무에서 막연히 논의만 되었던 안전여유에 대한 정량적인 값을 산출해보는 것이고 둘째는 안전여유 및 설계실무에서 최소곡선반경보다 여유로운 곡선반경의 선정으로 인한 도로 공용 후 파생되는 주행속도에 대해 검토하는 것이다.

논문에서 제기코자 하는 문제점은 도로 설계속도는 공용 후 주행속도를 대표할 수 있어야 하지만 앞서 언급한 두 가지 이유로 인해 설계속도를 크게 상회하는 주행속도가 발생할 개연성이 있으며 이러한 점이 설계속도 기반 선형설계의 한계점이라는 것이다. 따라서 이를 극복할 수 있는 방안 마련의

필요성을 제기하는 것이 논문의 목적이다.

1.2. 연구범위 및 방법

연구범위는 서론에서 제기한 두 가지 연구 논점에 대해 이론적 배경을 설명하고 현장조사 자료를 이용하여 논점에 대해 정량화된 결과를 제시하기 위해 현장조사를 통하여 도로 노면의 미끄럼 마찰계수와 운전자의 주행속도를 조사하였다. 미끄럼마찰계수를 조사한 이유는 쾌적성을 기반으로 한 최소곡선반경 설계와 실제 습윤 노면상태에서 조사되는 미끄럼마찰계수와 차이 검토해보는 것이다. 이를 토대로 쾌적성을 기반으로 한 최소곡선반경 기준은 최소한 물리적으로 안전한 곡선반경보다도 안전여유가 고려되어 있다는 것을 제시하려고 한다. 운전자의 주행속도를 조사한 이유는 안전여유 및 최소곡선반경 이상으로 설계를 시행하는 실무 관행이 궁극적으로 설계속도와 주행속도 사이에 큰 괴리를 발생시키는 측면에 대해 검토하고자 하였다.

연구방법은 현장조사방법을 채택하였고, 조사지점은 도로 선형조건이 양호한 구간으로 국도 47호선 경기도 파주 근방이다(그림 1 참조). 대상도로는 일반도로 평지부의 기준에 따라 80km/h로 설계되었으며, 도로의 전반적 기하구조 조건은 매우 양호한 상태이다. 제한속도는 설계속도와 동일하게 80km/h이다. 지점 선정은 도로 선형 이외에 주행속도에 영향을 줄 수 있는 외부 요인을 최대한 배제하는데 초점을 두었다. 선정기준은 교차로의 영향이 없는 곳, 도로 주변 영향이 최소화된 곳, 도로에 인접하여 또는 진행방향으로 운전자의 주행에 비정상적인 상황 유발을 일으킬 수 있는 교량, 학교, 공장이 없는 곳을 선정하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 설계속도 기반 도로 설계의 한계

현 도로설계기준(국토해양부령, 2009)은 설계속도를 기반으로 수행되고 있으며, 설계속도는 1936년에 Barnett에 의해 처음 제안된 것이다.(Barnett, 1936). Barnett은 "상대적으로 속도가 높은 운전자 그룹에 의해 받아들여질 수 있는 균일한 최대 속도"로 설계속도를 정의하고 있다. 현 도로설계 기준은 설계속도를 "기후가 양호하고 교통밀도가 낮으며 차량의 주행조건이 도로의 구조적인 조건만으로 지배되고 있는 경우에 평균적인 운전기술을 가진 운전자가 안전하고도 쾌적성을 잃지 않고 주행할 수 있는 최고 속도"로 정의하고 있으며, 도로 지형과 인접 토지이용에 따라 적정 값을 선정하도록 하고 있다.

설계속도는 문자 그대로 향후 건설되는 도로의 기능 및 지형에 부합되어 운전자가 선택할 것으로 예상되는 주행속도를

설계단계에서 정의한 것이다. 여기서 주목할 점은 설계속도는 정의상 양호한 기후조건에서 운전자의 주행속도를 의미하고 있음에 반해 최소곡선반경 기준은 습윤 노면조건을 가정하고 있다는 점이다. 따라서 도로설계기준 내 문맥상으로 분명하게 정의되어 있지는 않지만 양호한 기후조건에서 가정할 설계속도가 노면 습윤상태에서도 동일하게 가정되고 있다고 볼 수 있다. 노면 건조상태와 습윤상태에서 운전자의 주행속도 선택에 차이 여부를 구분할 필요가 있지만 현재까지 노면 건조상태와 습윤상태에서의 주행속도에 관련한 연구 결과는 매우 제한적이다.

설계속도 기반의 도로 설계는 설계구간이라는 개념과 반드시 연계하여 다루어져야 한다. 설계구간이란 “지역 및 지형의 상황과 계획교통량에 따라 동일 설계기준을 적용할 수 있는 구간”으로 정의된다.(건설교통부, 2000). 설계속도란 설계구간 내에서 유지되어야 하는 최저 속도로서 대개 설계구간 중에 선형 조건이 가장 열악한 지점에서 운전자가 선택하는 속도로 이해할 수 있다. 이와 같이 설계속도 기반의 도로 설계는 사실상 도로에 부여된 기능을 유지하기 위해 최소로 유지되어야 하는 설계를 규정한 것이라 할 수 있다.

설계속도 기반의 도로 설계는 최소에 관한 분명한 기준을 두고 있는 반면에 이를 초과하는 설계에 있어서는 어떠한 제약도 사실상 제시하고 있지 않다. 이는 설계의 유연성을 고려한 측면이라고 볼 수 있으나 도로 운영 관점에서는 운전자의 과속을 유발하는 등의 심각한 부작용을 초래하는 단서를 제공하는 양면성을 가지고 있다. 이러한 부분이 현 설계속도 기반 선형설계의 한계이기도 하다.

도로 평면선형 설계 중 최소곡선반경 기준도 설계속도에 근거하여 운전자가 쾌적성을 유지한 채 곡선부를 통과할 수 있는 기준으로 제시하고 있다. 다만 최소곡선반경 기준은 쾌적성을 기반으로 제시된 점에서 다른 최소기준의 설정 배경과 일관성을 갖지 못하는 측면이 있다. 일본의 도로설계기준(日本道路協會, 2004)은 도로 노면의 동결 시에 횡방향 미끄럼마찰계수가 0.1~0.3이므로 설계 횡방향 미끄럼마찰계수를 0.1~0.15로 설정하는 것이 타당하다고 언급하고 있으나, 도로설계기준내 타 기준들(예로 정지시거)이 노면 습윤조건을 기준으로 작성된 점을 감안 시 곡선부 최소곡선반경 기준만이 동결 노면조건을 고려하여 설계 미끄럼마찰계수를 선정한다는 것은 기준을 정의하는 방법 간에 일관성이 결여된 것으로 판단할 수 있다.

다만, 문제시 되는 부분은 쾌적성에 기반한 횡방향 미끄럼마찰계수가 실제 습윤 도로노면에서 관측되는 횡방향 미끄럼마찰계수에 비해 낮기 때문에 운전자가 설계속도로만 주행한다는 전제하에서는 합리적인 기준으로 받아들일 수 있지만, 빈번한 통행을 통해 해당 도로구간에 익숙해진 운전자는 최

소한 도로노면이 건조한 조건에서는 설계속도 이상으로 주행할 것이라고 보는 것이 타당할 것이다. 이와 관련한 국외 연구사례로, McLean(1981)도 호주의 120개 평면곡선에서 설계속도가 90km/h 이하인 도로에서는 주행속도가 설계속도보다 높게 나타남을 제시한 바 있다. 그는 설계속도가 90km/h 이하인 구간에서 설계속도 기반 도로설계의 기본적인 전제가 유지되기 어려움을 제시하였다.(McLean, 1981).

여기서 운전자의 주행속도를 정의할 필요성이 있다. 운전자의 주행속도의 대표 값을 정하는 데는 다소 어려움이 있으나, AASHTO(2001)는 “현장에서 관찰되는 운전자의 주행속도를 언급하는 것으로, 특히 주행속도는 도로 기하구조와 관련한 주행속도를 통계적으로 기술하는 대표적인 값으로 사용되고 있음”을 제시하고 있다. AASHTO(2001)는 “주행속도는 85%의 운전자가 이 속도 이하로 운행하는 속도를 의미하며, 지점 속도를 측정하고 이를 이용하여 85백분위수(이하 V85)를 산출함”을 제시하고 있다. 부가적으로 “일반적으로 주행속도는 자유 교통류 상태에서 주행하는 자동차(일반적으로 100대에서 125대 사이)의 속도를 조사하고 이를 토대로 산출하게 됨”을 제시하고 있으며, 자유 교통류에서 조사된 속도란 “운전자가 다른 자동차에 의해 속도를 영향 받지 않는 조건에서 관찰되는 소위 희망속도를 의미함”을 제시하고 있다.(AASHTO, 2001). 따라서 본 논문에서도 운전자의 주행속도는 V85로 정의코자 한다.

전술한 바와 같이, 설계속도는 도로가 건설되고 공용된 이후에 운전자가 선택할 것으로 예상되는 속도를 의미한다. 따라서 설계속도가 의미를 가지려면 도로 공용 후에 관측되는 속도가 사실상 설계속도와 큰 차이를 가지지 않아야 한다. 그러나 현 도로설계기준은 최소설계기준은 분명하게 제시하고 있으나 최소기준 이상으로 설계되는 조건에 대해서는 분명한 규정을 제시하지 않고 있다. 본 논문은 이러한 점이 설계속도와 공용 후 운전자의 주행속도 간에 큰 차이를 가져올 수 있는 개연성을 주고 있다고 본다.

본 논문은 설계속도에 따라 규정된 최소곡선반경 기준은 해당 도로에 부여된 기능을 충족하기 위해 설계구간 내에서 가장 열악한 설계지점의 하한치를 규정하고 있다는 의미와 함께 설계구간 내에서 운전자의 주행속도를 설계속도와 크게 다르지 않게 유지할 수 있는 소위 “제어(control)” 포인트의 역할도 동시에 하는 것으로 이해하는 것이 바람직하다고 본다. 따라서 설계속도 기반의 선형설계가 공용 후에도 개념과 구현 사이에 일관성을 유지하기 위해서는 평면선형 설계관리가 필요하다는 것이 본 논문의 제안점이다.

2.2. 평면선형 설계에 있어 안전여유

평면곡선부의 설계는 설계속도에 따른 최소 평면곡선반경

을 설계하는 것을 의미한다. 식 1은 설계속도와 평면곡선반경간의 관계를 나타내는 방정식이다. 여기에는 편경사와 횡방향 미끄럼마찰계수가 파라미터로 들어간다. 예로, 현 도로 설계기준에는 설계속도 80km/h의 조건에서 횡방향 미끄럼마찰계수를 0.12로 제시하고 있으며 다른 속도에 대해서도 각각 횡방향 미끄럼마찰계수를 제시하고 있다. 따라서 도로 설계자는 이들 설계 값을 이용하여 최소 곡선반경을 산출할 수 있다.

$$R = \frac{V^2}{127(e+f)} \quad (1)$$

여기서, V = 설계속도(km/h)
 R = 평면곡선반경(m)
 e = 편경사(m/m)
 f = 횡방향 미끄럼마찰계수

평면 곡선반경을 산정하는 식에 사용되는 횡방향 미끄럼마찰계수는 자동차가 구심력을 받는 상황에서 운전자의 쾌적성을 기준으로 작성되었다. 이 기준은 국외 실험연구를 참조하여 국내 기준에 반영한 것인데, 횡방향 미끄럼마찰계수의 범위는 0.1~0.16 사이에 있다. 여기서 횡방향 미끄럼마찰계수가 운전자의 쾌적성을 기반으로 정해진 점에 주목할 필요가 있다. 쾌적성에 기반한 이 값은 실제 도로 노면에서 측정되는 미끄럼마찰계수보다 낮은 값으로 선정되어 있으며 대개 “안전여유(safety margin)”라 하는 것이 이 두 가지 미끄럼마찰계수의 차이로부터 파생된 것이다. 본 논문에서 안전여유는 쾌적성에 기반한 횡방향 미끄럼마찰계수로부터 산출된 속도와 노면의 물리적 횡방향 미끄럼마찰계수에 근거한 속도와의 차이로 식 2와 같이 정의코자 한다.

$$SM = V_1 - V_2 \quad (2)$$

여기서, SM = 안전여유(km/hr)
 $V_1 = \sqrt{127R(e + f_{comfort})} = f_{comfort}$ 에 기반한 속도(km/h)
 $V_2 = \sqrt{127R(e + f_{measured})} = f_{measured}$ 에 기반한 속도(km/h)
 $f_{comfort}$ = 곡선주행시 쾌적성에 기반한 횡방향 미끄럼마찰계수
 $f_{measured}$ = 곡선부 습윤노면의 물리적 횡방향 미끄럼마찰계수

횡방향 미끄럼마찰계수는 실측할 수 없으므로 종방향 미끄럼마찰계수를 이용하여 추정하게 된다. Lamm 등(1999)은 횡방향 미끄럼마찰계수 추정을 위한 방법으로 식 3을 제시했다.

$$f_s = n \times 0.925 \times f_T \quad (3)$$

f_s = 횡방향 미끄럼마찰계수(maximum permissible side friction factor)
 f_T = 종방향 미끄럼마찰계수(maximum permissible tangential friction factor)
 n = 횡방향 미끄럼 마찰계수 활용비
 - 신규도로 구릉지/산지 : 0.4
 - 신규도로 평지 : 0.45
 - 기존도로 : 0.6

2.3. 연구 논점 및 현장조사 계획

도로설계기준 내 최소값에 이미 ‘안전여유’가 포함되었음에도 불구하고, 현 기준에는 “평면선형 설계 시 최소 평면곡선반경의 규정 값에 얽매어 지형 상 상당히 여유 있는 평면곡선반경을 적용할 수 있음에도 불구하고 최소 평면곡선반경에 가까운 값을 적용하는 것은 바람직하지 못하다”라고 규정하고 있어, 이미 내포된 안전여유에 추가적인 여유를 주는 것이다. 이러한 접근은 설계속도를 훨씬 상회하는 속도로 운전자의 주행이 이루어질 개연성을 높여줄 수 있다.

여기서 두 가지 연구 논점이 생기는데 첫째는 최소 곡선반경 기준에 포함된 안전여유가 어느 정도 인가와 둘째는 실제 대부분의 통행이 이루어지는 건조한 도로노면에서 운전자의 주행속도와 설계속도 간에 차이이다. 이를 토대로 그동안 쾌적성이라는 막연한 개념으로 정의된 최소곡선반경 기준에 내포된 안전여유를 도로설계 실무자가 정량적으로 이해할 수 있는 계기를 마련하고, 최소 곡선반경 기준을 초과하여 도로 선형설계를 시행 시에 운전자의 주행속도와 설계속도 간에 차이도 정량적인 수치로 이해할 수 있는 단초를 제공하는 측면에서 본 연구가 기여할 것으로 본다. 다만 현장조사 범위의 제약으로 지방부 왕복 4차로 국도 한 구간을 대상으로 연구가 수행된 점이 연구 한계로 볼 수 있다. 현장조사는 동일 도로 구간에서 미끄럼마찰계수와 운전자의 주행속도 조사를 시행하였으며, 자료 분석을 토대로 위에 제시된 두 가지 논점을 검토코자 한다.

3. 현장조사

3.1. 조사개요

현장조사의 내용은 도로 노면의 미끄럼마찰계수와 운전자의 주행속도로 이루어져 있다. 미끄럼마찰계수는 조사대상 도로의 직선부에서 종방향 미끄럼마찰계수를 산정한 이후에 국외문헌에서 제시한 방법에 따라 횡방향 미끄럼마찰계수를 추정하였다. 주행속도 조사는 이동식 검지기를 이용하여 도로 구간을 약 100m 간격으로 나누어 연속적으로 시행하였다. 횡방향 미끄럼마찰계수를 이용하여 본 논문에서 정의한 안전여유의 크기를 제시하였고 속도조사자료를 이용하여 대상도로의 설계속도와 곡선부 지점에서 조사된 주행속도를 비

교하였다.

3.2 조사지점

조사지점은 도로 선형조건이 양호한 구간으로 선정했다. 선정된 지점은 국도 47호선으로 경기도 파주에 위치하고 있다(그림 1 참조). 대상도로는 일반도로 평지부의 기준에 따라 80km/h로 설계되었으며, 도로의 전반적 기하구조 조건은 매우 양호한 상태이다. 제한속도는 설계속도와 동일하게 80km/h이다. 지점 선정은 도로 선형 이외에 주행속도에 영향을 줄 수 있는 외부 요인을 최대한 배제하는데 초점을 두고 선정하였다. 선정기준은 교차로의 영향이 없는 곳, 도로 주변 영향이 최소화된 곳, 도로에 인접하여 또는 진행방향으로 운전자의 주행에 비정상적인 상황 유발을 일으킬 수 있는 교량, 학교, 공장이 없는 곳이다.

최종 선정된 지점의 곡선부 설계제원은 표 1과 같다. 속도 조사구간의 연장은 20km이며, 이 가운데 곡선부 지점은 21개소이다. 곡선지점의 기하구조 제원은 표 1과 같다. 조사구간의 설계속도에 따른 최소곡선반경 기준은 280m인데 표 1과 같이 도로현장의 설계제원은 최소 500m에서 최대 2,000m에 분포하고 있어 최소기준에 비해 비교적 여유로운 선형설계를 시행한 것을 알 수 있다.

표 1. 조사지점 도로 평면선형 설계요소 제원

구 분	설계 범위	도로설계기준*
평면 곡선반경(m)	500~2,000m	280m(최소 값)
편경사(m/m)	0.01~0.06	0.06(평지기준 최대 값)

* 설계속도 80km/h 조건에서 도로설계기준에 명시된 최소 기준



그림 1. 현장조사 지점위치

3.3. 미끄럼마찰계수 조사

현장 조사 지점에서 종방향 미끄럼마찰계수를 조사하였다. 조사는 총 3회(2006년 6월, 2006년 11월, 2007년 5월)로 나누어 수행되었으며, 조사속도는 설계속도와 동일하게 80km/h에서 수행하였다. 미끄럼 저항은 습윤 노면과 동일한 환경을 모사하기 위해 노면에 살수하고, 조사속도에서 타이어를 제동한 다음, 필요한 견인력을 측정하는 방법을 이용하였다. 미끄럼 저항을 조사하기 위한 장비는 미국의 K. J. Law Engineers(주)에서 제작한 포장 미끄럼 측정장비(Pavement Friction Tester)를 이용하였다(그림 2 참조).

본 장비는 트레일러 형식의 차량을 이용하여 미끄럼 마찰계수를 측정하게 되며 습윤 노면을 모사하기 위한 살수 장치, 시험륵의 브레이크 장치, 시험륵의 견인력을 측정할 수 있는 계측 시스템 등으로 구성된다. 측정은 사전 계획된 속도로 장비를 주행시키면서 시험륵 앞에 살수를 하여 습윤 노면을 모사한다. 살수 시작 약 0.5초 후에 시험륵에 브레이크를 걸어 완전히 잠기도록 하고, 시험륵은 일정구간에서 잠긴 상태를 유지하도록 하였다. 살수는 브레이크를 풀고 나면 중단하며, 각 구간 시험 전후의 계측기 정산 신호를 기록한다. 시험륵이 잠기는 지점을 표시하고 이 표시 후 적어도 0.2초 후의 지점부터 1.0~3.0초 간격으로 견인력을 측정한다. 마찰계수는 견인력을 타이어에 재하된 동적 수직 하중으로 나누어 산출하며 식 4와 같다.

$$SN = \frac{F}{W} \times 100 \quad (4)$$

여기서, F : 견인력(N)

W : 시험륵에 재하된 동적 수직 하중(N)



그림 2. 노면 미끄럼 저항 측정 장비

3.4. 주행속도 조사

속도 조사는 추월차로에서 조사되었다. 속도자료 수집은 미국 nu-metrics사의 NC-97을 이용하였다. 검지기는 가로 16cm, 세로 14cm, 높이 2cm 정도로 운전자에게 쉽게 식별되지 않을 정도의 크기이다. 검지원리는 자기장(magnetic field) 위로 통과하는 차량의 영향을 검지하고, 검지기 내의 마이크로컴퓨터가 이를 토대로 지점속도(spot speed)를 예측하게 된다. 검지기로부터 수집되는 자료는 차량속도, 검지 시간, 차두시간, 차량길이이다. 이들 자료는 검지기에 저장되고 조사시간이 끝난 후에 RS232 포트를 통해 개인용 컴퓨터로 옮겨진다. 조사장비를 통해 조사된 자료 중 추종이 일어날 수 있는 차두시간이 10초 이하인 경우는 다른 차량의 영향을 받았다고 가정하고 자료에서 제외하였으며, 차종은 승용차로 국한하여 분석을 수행하였다.

3.5. 분석 결과

3.5.1. 미끄럼마찰계수 조사결과를 이용한 안전여유 도출

현장조사 구간에서 조사된 종방향 미끄럼마찰계수는 표 2와 같다. 미끄럼마찰계수는 시간이 지남에 따라 낮아지는 것을 알 수 있으며 전체 평균은 0.408로 조사되었다. 이 값에 식 3을 적용하여 횡방향 미끄럼마찰계수를 추정하면 0.226이다. 현장조사 구간은 기존도로에 해당하여 활용비를 0.6을 적용하였다.(Lamm 등, 1999). 표 3은 안전여유를 나타낸 것이다. 쾌적성에 기반하여 설계된 최소곡선반경에서 운전자의 설계속도는 80km/h(현 기준값)이며 실측 종방향 미끄럼마찰계수로 추정된 횡방향 미끄럼마찰계수를 이용한 속도는 100.8km/h로, 본 논문에서 정의한 안전여유는 20.8km/h로 나타났다. 분석 의미는 운전자가 해당 최소곡선반경으로 설계된 지점에서 100.8km/h로 주행하여도 최소한 물리적으로는 안전한 것(미끄러짐이 발생하지 않음)을 의미한다. 앞서도 언급한 바와 같이 이 값은 습윤 노면 상태를 가정하여 제시한 속도로 건조한 노면의 경우에는 안전여유가 더욱 높아진다.

표 2. 종방향 미끄럼마찰계수

조사차수	조사횟수(trial number)	평균	표준편차
1차	50	0.437	0.040
2차	46	0.410	0.045
3차	45	0.390	0.039
전체	141	0.408	0.045

표 3. 안전여유

$f_{comfort}$	$f_{measured}$	V_1	V_2	SM
0.120	0.226	80	100.8	20.8

* $e=0.06m/m$, 설계속도 80km/h에서 최소 곡선반경인 $R=280m$ 가정

3.5.2. 운전자의 주행속도 조사 분석결과

표 4는 현장조사 구간 내 곡선부 지점별로 조사된 주행속도를 나타낸 것이다. 분석결과를 보면 모든 곡선부 조사지점에서 설계속도를 크게 상회하는 주행속도가 조사되었다. 곡선부 주행속도는 106km/h에서 134km/h까지 분포되어 있다(그림 3 참조). 주행속도와 설계속도(80km/h)의 차이를 비교한 결과, 설계속도보다 20km/h 이상 차이가 나는 지점수가 1개, 30km/h 이상 차이가 나는 지점이 11지점, 40km/h 이상 차이가 나는 지점이 8지점, 50km/h 이상 차이가 나는 지점이 1개소로 나타났다.

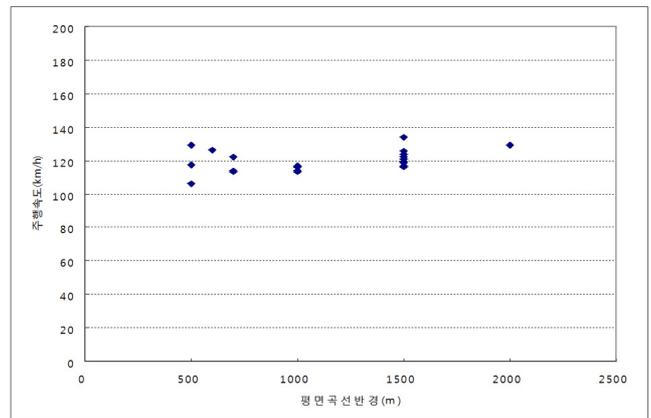


그림 3. 평면곡선반경별 주행속도

표 4. 곡선부 지점별 주행속도 조사결과

곡선 지점 번호	곡선부 기하구조 제원		속도 통계			
	곡선반경 (m)	편경사 (m/m)	분석 자료 수	V85 (km/h)	평균 (km/h)	표준편차 (km/h)
1	500	0.05	102	106.0	92.7	15.9
2	500	0.05	186	117.5	100.5	15.7
3	500	0.06	172	129.0	108.6	17.6
4	600	0.04	132	126.3	107.7	18.4
5	700	0.04	533	113.0	97.7	14.8
6	700	0.04	451	122.0	105.3	16.0
7	700	0.05	391	114.0	97.4	14.4
8	1000	0.02	414	116.0	101.6	13.0
9	1000	0.02	487	113.0	99.0	13.8
10	1000	0.02	413	114.0	96.5	17.3
11	1000	0.03	410	117.0	103.5	14.6
12	1500	0.01	468	125.9	108.9	14.7
13	1500	0.01	489	124.0	107.5	15.5
14	1500	0.02	414	122.0	101.6	13.0
15	1500	0.02	71	121.0	106.7	16.3
16	1500	0.02	442	116.0	98.5	16.3
17	1500	0.02	62	116.8	96.9	19.0
18	1500	0.02	112	119.0	100.5	18.6
19	1500	0.02	96	134.0	114.2	16.8
20	1500	0.03	90	118.3	103.6	15.7
21	2000	0.02	53	129.2	114.0	15.9

3.6. 결과 검토 및 제안

도로평면선형 설계에 있어 쾌적성에 기초한 횡방향 미끄럼 마찰계수는 실제 습윤노면에서 관측되는 물리적인 횡방향 미끄럼마찰계수보다 낮기 때문에 기준에 제시된 곡선반경은 최소의 의미보다는 권장 값으로 보는 것이 타당하다고 전제하고, 지방부 왕복 4차로 구간을 대상으로 도로 노면의 미끄럼 마찰계수와 운전자의 주행속도를 실증 조사하여 본 연구에서 제기한 두 가지 논점 중 안전여유에 대한 정량적인 값과 주행속도와 설계속도 간에 차이에 대해서도 정량적으로 제시하였다. 분석결과, 조사대상구간에서 추정된 횡방향 미끄럼마찰계수를 이용한 속도는 100.8km/h로 안전여유는 20.8km/h로 나타났다. 이 값이 습윤노면 상태에서 조사된 미끄럼마찰계수를 적용한 것임을 감안 시 건조노면에서의 안전여유는 이보다 높다.

건조노면 조건에서 운전자의 주행속도를 조사한 결과, 곡선부 전체 조사지점에서 주행속도가 설계속도를 초과하였으며 그 차이는 최소 26km/h에서 최대 54km/h까지 나타났다. 이상의 조사결과를 토대로 볼 때, 설계속도 기반의 평면선형 설계는 최소 값 규정만이 제시되고 여유로운 설계에 대한 관리규정이 없는 관계로 설계속도는 공용 후에 주행속도를 대표하지 못한 결과를 초래하였다. 이는 단순히 경제적인 관점에서만 불합리성을 주는 것이 아니라 운전자의 과속 주행을 유도하여 도로 안전 관점에서 바람직하지 못한 결과를 초래한다.

4. 결론 및 향후연구

본 논문은 설계속도 기반 선형설계의 한계점에 대해 검토하였다. 설계속도 기반 선형설계는 최소기준 중심의 설계로써 토목설계에서 언급하는 안전여유를 고려하고 있다. 평면선형 설계도 안전여유를 횡방향 미끄럼마찰계수를 토대로 제시하고 있으나 도로설계기준 내 여타의 최소기준이 도로, 자동차, 운전자 사이의 역학관계에 근거하여 마련된 것에 비해 곡선 주행시 운전자의 쾌적성에 기반하고 있다는 것이다. 따라서 도로설계기준 내 공통적으로 적용되는 도로 습윤노면조건에서 관측되는 횡방향 미끄럼마찰계수보다도 낮은 미끄럼마찰계수를 가정하고 최소곡선반경기준을 제시하고 있다. 그러나 안전여유는 문자 그대로 열악한 노면조건에서도 운전자가 설계속도를 유지하고 주행할 수 있도록 설계된 점에서는 고무적이지만 노면이 건조한 조건에서 해당 도로구간을 빈번하게 통행한 운전자에게는 과속을 조장하는 원인으로 작용할 개연성이 있다. 더욱이 현 도로설계기준에서도 언급한 바와 같이 최소곡선반경보다도 여유로운 설계 값을 선택하라는 권고는 안전여유를 더욱 높이는 결과를 초래할 수 있다. 이러한

관점에서 본 연구는 현장 조사된 미끄럼마찰계수와 주행속도 자료를 이용하여 연구배경과 논점에서 제기한 현상이 사실상 도로현장에서 발생되고 있음을 입증하였다. 연구결과를 통한 제안으로, 설계속도 기반 평면선형 설계는 최소 값 규정과 더불어 설계속도와 도로 공용 후 주행속도 간에 큰 차이가 발생하지 않도록 하는 설계관리가 필요함을 제시하였다.

향후 연구는 평면선형 설계관리에 대한 구체적인 방법론을 개발하는 것이다. 본 연구에서 추천하는 방법은 도로설계단계에서 도로 선형조건에 따른 주행속도의 프로파일을 이용하는 것이다. 이를 위해서는 도로 직선부나 곡선부 등 설계요소에 따른 주행속도를 신뢰성 있게 추정할 수 있는 모형식이 필요하다. 또한 설계속도와 주행속도 간의 차이에 대한 합리적인 기준 값을 설정할 필요가 있으며, 공용중인 도로의 주행속도를 고려한 제한속도 설정에 관한 연구도 필요하다. 도로설계실무에서는 본 연구에서 제시한 안전여유와 여유로운 평면선형 설계가 궁극적으로는 설계속도와 주행속도 간에 큰 괴리를 발생함을 고려하여 선형 설계를 시행하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 친환경·지능형 도로설계 기술개발 연구단(건설핵심 D05-01)을 통하여 지원된 건설교통부 건설기술혁신사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 건설교통부(2000), *도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침*
- 국토해양부령(2009), *도로의 구조·시설기준에 관한 규칙*
- 日本道路協會(2004), *道路構造令の解説と運用*
- American Association of State Highway and Transportation Officials(2001), *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*
- Barnett, J. (1936), "Safe Friction Factors and Superelevation Design," Proc., Sixteen Annual Meeting, Washington, D.C. Novemver 18-20, 1936. HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 69-80.
- Lamm, R., Basil Psarianos, and Theodor Mailaender (1999), *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*, McGraw-Hill, pp 10.8-10.9
- McLean, J. R. (1981), "Driver Speed Behaviour and Rural Road Alignment Design", *Traffic Engineering & Control*, Vol. 22, 1981.

접 수 일 : 2009. 11. 12
심 사 일 : 2009. 11. 12
심사완료일 : 2010. 4. 19