

■ 論 文 ■

신뢰성을 고려한 도로 시거 설계의 재고

Reliability-Based Design of Sight Distance, a Revisit

이 슬 기

(동립TNS 교통계획부 연구원)

이 용 재

(중앙대학교 도시공학과 교수)

김 상 기

(중앙대학교 도시공학과 석사과정)

목 차

- I. 서론
- II. 선행 관련연구
 - 1. 기본개념
 - 2. 일계이차 모멘트법
- III. 신뢰성 이론의 적용
 - 1. 교차로 시거 산정
 - 2. 기존 교차로 시거의 안전성분석
- 3. 교차로 시거의 추정
- 4. 정지 시거 산정
- 5. 기존 정지 시거의 안전성분석
- 6. 정지 시거의 추정
- IV. 결론
- 참고문헌

Key Words : 정지시거, 교차로시거, 신뢰성이론, 신뢰도 지수, 사고감재확률

요 약

안전한 도로설계가 되기 위해서는 운전자나 자동차의 특성을 충실하게 반영한 설계기준을 사용하는 것이 필수적이다. 그러나, 기존의 설계기준들은 운전자와 차량의 체계에서 관측되는 불확실성의 특성을 감안하고 있지 못하며, 기본적으로 동질·단순 체계로 간주하여 대표적인 특성만을 반영하는 위험성이 있다.

본 연구에서는 도로선행설계의 가장 중요한 설계요소의 하나인 정지시거와 교차로시거를 중심으로 신뢰성을 기반으로 하는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 연구를 위하여 신뢰성공학에서 이미 잘 알려진 Hasofer-Lind (1974)의 일계이차 모멘트 방법을 사용한다. 연구의 결과, 만약 특정 도로구간에 대하여 적용하고자 하는 시거모형의 파라메타에 대한 평균, 분산, 그리고 분포함수를 알 수 있다면 이를 이용하여 그 구간에 대한 시거의 불확실성과 안정성을 반영할 수 있는 새로운 설계기준을 만들 수 있음을 보여주고 있다. 따라서, 본 연구에서 제안하고 있는 확률모형은 신뢰수준을 감안한 시거설계에 있어서 매우 유용할 것으로 생각된다.

Considering characteristics of drivers and vehicles with proper and reliable ways in highway design procedures can ensure high level of highway safety. However, it is almost impossible to take into account all factors of drivers and vehicles influencing on the highway safety because of their uncertain and random nature. To detour the dead-end, the nature are usually assumed as simple homogeneous and deterministic one. Although the restricted assumption makes the system simple, it can produce serious problems due to lack of considering variability in the system.

This paper develops a reliability-based method for determining stopping sight distance(SSD) and intersection sight distance(ISD), which are crucial elements in highway alignment design. In the study, Hasofer-Lind method is adopted, which is a well-known first-order second moment reliability method (AFOSM). The results in this study show that if mean, variance, and distribution of a particular driver-vehicle parameter are known, more reliable sight distances can be applied in highway design procedures because we can reflect uncertainties and randomness. Thus, the probabilistic method could be adopted in designing the sight distance(s) with the desired reliability level.

1. 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

도로설계의 기준은 사회의 발전과 걸맞게 끊임없이 변화되어야 한다. 경제적 효율성이 강조되던 시기에는 최소 설계기준에 대한 관심이 많았으나 보다 풍요로운 사회로의 발전과정에서는 경제적 효율성 못지않게 안전성, 환경성, 사회성 등의 사회적 가치가 반영되는 설계의 융통성(flexibility)이 요구되고 있다. 이러한 변화중 도로 설계 부문에 있어 나타나고 있는 최근의 경향은 안전성(safety)이 두드러지게 강조되고 있다는 특징이다. 특히 도로의 선형설계에 있어 높은 수준의 안전성이 요구되고 있다.

도로의 설계기준은 일반적으로 자동차와 도로의 역학적인 특성과 운전자의 특성(운전 습관, 반응 행태)에 좌우되므로 안전한 도로설계가 되기 위해서는 운전자나 자동차의 특성을 충실하게 반영하여야 한다.(정준화, 1999) 그러나, 운전자의 특성과 도로설계에 사용되고 있는 설계 요소의 기준들은 내재적으로 확률적인 특성을 가지고 있으나, 실제 적용에는 동질·단순 체계로 간주하여 관측된 대표적(평균적) 개념을 사용하여 결정적인 특성만을 강조하는 위험성이 노출되어 있다.

본 연구에서는 이러한 현실적인 문제에 대하여 선형설계의 가장 중요한 설계요소의 하나인 시거(視距)를 중심으로 설계의 신뢰성과 안전성을 재검토하여 보고자 한다. 이를 위하여 Ang and Tang (1984)에서와 같이 토목 구조공학 및 기계 공학 등에서 이미 활발히 사용되고 있는 신뢰성 이론을 활용한다. 도로 설계에 응용된 Navin (1990), Easa (1993, 1994, 1999), 정준화 (1999) 등의 연구결과를 면밀히 검토하고 이를 바탕으로 우리나라 실정에 맞는 새로운 시거의 설계기준을 제안하여 보고자 한다. 시거에는 정지시거와 교차로 시거 외에도 추월시거와 판단시거가 있으나 개발된 이론과 안전성의 분석에 적용할 수 있는 연구 방법은 동일하므로 논문의 목적에 적합하고 가장 기본적인 정지시거와 교차로시거를 주요 연구대상으로 연구결과를 도출한다. 따라서 다른 유형의 시거에 대해서도 유사한 연구결과를 얻을 수 있을 것으로 전망된다.

II. 선행 관련연구

연구와 관련된 신뢰성 이론의 기본개념과 Cornell

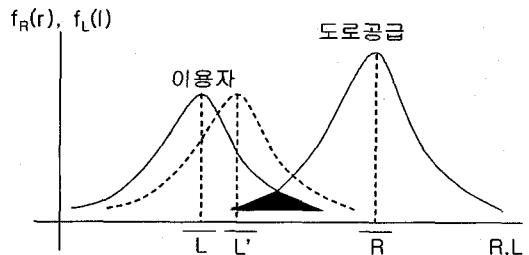
(1967)의 신뢰도지수의 개념을 기반으로 하는 특정시스템의 확률적 안전성을 평가하는 방법의 하나인 Hasofer-Lind Method(i.e., Advanced First-order Second Moment Method: AFOSM Method)를 중심으로 간단히 소개한다.

1. 기본개념

신뢰성 이론은 이용자의 안전과 사고를 판단할 수 있는 설계기준(design criterion)을 g 라 하고 이용자가 요구하는 값을 L , 도로 공급시 적용하는 값을 R 로 표시하면 상호관계는 식(1)과 같다. 식(1)은 설계기준식이 신뢰성 이론에서는 한계상태식(limit state equation), 파괴방정식(failure equation) 또는 안전여유(safety margin) 등으로 불려진다. 여기서 $R > L$ 이면 도로가 안전한 경우이고 $R < L$ 이면 사고가 발생할 경우이므로, 최소 $R = L$ 이 도로의 안전과 사고의 경계가 된다.

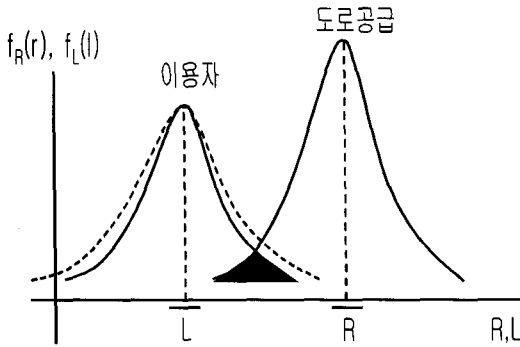
$$g = R - L \tag{1}$$

기존의 결정론적인 방법에서는 R 과 L 의 분산특성을 무시하고 대표값 \bar{R} 과 \bar{L} 만을 고려하여 \bar{R} 이 \bar{L} 보다 큰 상태가 유지되도록 하여 사고에 대한 안전여유를 두어 왔다. 이런 방법은 R 과 L 의 분산특성을 고려하는 확률론적인 입장에서도 <그림 1>에서 확인할 수 있듯이, 대표값 \bar{L} 이 증가하면 사고확률과 관계가 있는 R 과 L 의 밀도함수가 겹쳐지는 부분의 면적이 증가하게 되는 사실로도 설명할 수 있다.



<그림 1> 평균의 변화에 의한 사고잠재확률의 변화

그러나 <그림 2>에서 확인할 수 있듯이 R 과 L 의 대표값 \bar{R} 과 \bar{L} 이 일정하게 유지되어 동일한 안전계수(safety factor)를 갖는 경우라 하더라도 R 이나 L 의



〈그림 2〉 분산의 변화에 의한 사고잠재확률이 변화

분산특성이 변화함에 따라 사고 확률도 달라질 수 있다. 따라서 도로설계 기준을 적용할 때 사고의 신뢰도를 합리적으로 평가하기 위해서는 단순히 설계변수들의 대표값만을 고려한 안전계수 개념을 이용하는 것보다는 설계변수들의 통계적인 분산특성까지도 고려한 사고잠재확률의 개념을 이용하는 것이 더욱 설득력을 갖는다고 할 수 있다.

2. 일계이차 모멘트법(AFOSM Method)

평균 일계이차모멘트법은 일반적인 한계상태식을 각 확률변수의 평균점에서 Taylor 전개하고 근사한 다음, 일차항(first-order)까지만 취하여 평균에 대한 확률밀도함수의 이차(second-order) 모멘트인 분산(또는 표준편차)까지를 고려하여 신뢰도지수나 사고잠재확률을 산정하는 방법이다. 그러나, 한계상태식이 비선형일 때, 동일한 사고양식에 대한 한계상태식일지라도 어떤 형태로 표현되는가에 따라 서로 다른 사고잠재확률이 계산되는 불변성(invariant) 결함의 문제점을 안고 있다.

평균 일계이차 모멘트법의 불변성 결함문제를 해결하기 위하여 Hasofer와 Lind(1974)는 평균 일계이차 모멘트법을 개선한 새로운 일계이차 모멘트법을 제안하였다. 개선된 일계이차 모멘트법은 서로 통계적으로 독립인 정규분포 확률변수 X_i 을 식(3)의 선형변환을 이용하여 표준정규분포 확률변수 U_i 로 변환하면, 식(2)의 한계상태식은 식(4)과 같이 표현되며, 이때 신뢰도지수 β 의 정의를 잘 살펴보면 식(5)이므로 〈그림 3〉에서와 같이 표준정규분포 확률변수의 공간에서 원점으로부터 한계상태식까지의 최단거리라는 기하학적인 의미를 갖게 됨을 확인할 수 있다. 즉 사고잠재확률의 산정

을 위하여 주어진 확률변수와 한계상태식을 서로 통계적으로 독립인 표준정규분포 확률변수의 공간에서 표현되도록 변환한 다음, 원점으로부터 가장 가까운 직선 거리에 위치한 한계상태식상의 점을 추적하고 그 직선 거리를 신뢰도지수로 취하고 이를 이용하여 사고잠재확률을 계산할 수 있다.

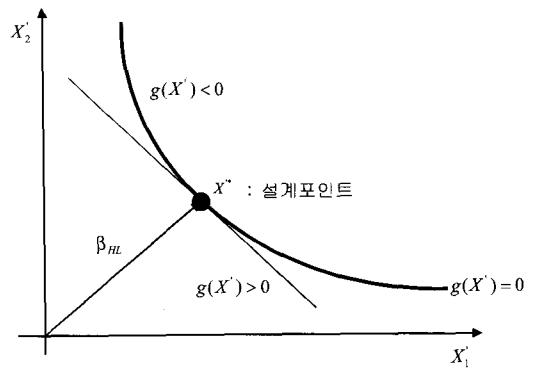
$$g = a_0 + a_1 \cdot X_1 + \dots + a_n \cdot X_n \tag{2}$$

$$= a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i$$

$$U_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \text{ 즉, } X_i = \sigma_i \cdot U_i + \mu_i \tag{3}$$

$$g = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i (\mu_i + \sigma_i U_i) \tag{4}$$

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{|g(\text{all } U_i=0)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial U_i}\right)^2}} \tag{5}$$



〈그림 3〉 Hasofer-Lind 신뢰도지수

표준정규분포 확률변수의 공간에서 구한 MPEP(Most Probable Failure Point or Design Point)의 좌표를 x^* 로 표현하면 정규분포 확률변수 공간에서의 좌표 x^* 는 식(6)과 같다.

$$u_i^* = \frac{x_i^* - \mu_i}{\sigma_i} \text{ 즉, } x_i^* = \mu_i + u_i^* \sigma_i \tag{6}$$

이 때 임의의 비선형 한계상태식을 x^* 에서 일차항까지만 Taylor 전개하여 근사하면 식(7)을 얻는다.

$$g(x) \approx \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial x_i} (x_i - x_i^*) \because g(x^*) = 0 \tag{7}$$

평균과 분산은 각각 식(8), 식(9)과 같이 표현된다.

$$\mu_G = \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial x_i} (x_i - x_i^*) \tag{8}$$

$$\sigma_G^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2 \tag{9}$$

여기서 x^* 가 식(7)과 같고 또한 한계상태식의 미분 계수에 있어서 식(10)의 관계가 있음을 고려하면, 식(8), 식(9)의 평균과 분산은 식(11), 식(12)과 같이 표현할 수 있으므로, 신뢰도 지수를 표준편차에 대한 평균의 비라는 확률론적 입장에서의 정의에 따라 유도하면 식(13)으로 다시 정리된다.

$$\frac{\partial g}{\partial x_i} = \frac{\partial g}{\partial u_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{\partial g}{\partial u_i} \tag{10}$$

$$\mu_G = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial u_i} \cdot u_i^* \tag{11}$$

$$\sigma_G^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial u_i} \right)^2 \tag{12}$$

$$\beta = - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial u_i} \cdot u_i^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial u_i} \right)^2}} \tag{13}$$

한편 식(7)의 MPEP에서 일차항까지 Taylor 전개된 근사식을 표준정규분포 확률 변수 u 을 이용하여 표현하면 식(14)와 같이 된다.

$$g(u) \approx \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial u_i} \cdot (u_i - u_i^*) \tag{14}$$

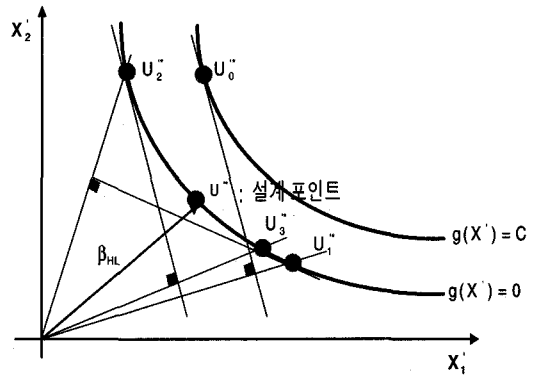
이 때 신뢰도지수의 산정을 위해 구해진 한계상태식 상의 MPEP는 한계상태식상에 존재하는 모든 점들 중 가장 발현빈도가 높은 점에 해당된다.(Freudenthal (1956), Shinozuka(1983)) 기본적으로 MPEP를 찾는 과정을 식(15)과 같은 전형적인 최적화 과정으로 보고 식(16)을 이용하여 MPEP를 적당한 수렴범위 안에서 반복하여 갱신하는 방법을 이용한다(〈그림 4〉 참조).

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \beta = \sqrt{u^T u} \\ & \text{subject to } g(u) = 0 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} u^{k+1} &= \frac{G_u^{kT} u^k - g(u^k)}{G_u^{kT} G_u^k} G_u^k \\ \text{where } G_u^k &= \left\{ \frac{\partial g}{\partial u_1}, \dots, \frac{\partial g}{\partial u_n} \right\}^T \\ & \text{at } u = u^k \end{aligned} \tag{16}$$

MPEP가 결정되면 신뢰도지수 β 는 원점에서 MPEP까지의 거리로부터 계산하거나 식(13)으로부터 식(17)을 구할 수 있다.

$$\beta_{HL} = \sqrt{u^{*T} u^*} = - \frac{G_u^{*T} u^*}{\sqrt{G_u^{*T} G_u^*}} \tag{17}$$



〈그림 4〉 β_{HL} 값을 찾는 과정

III. 신뢰성 이론의 적용

시거에 사용되는 변수들이 확률분포 특성을 가짐에도 불구하고 기존의 교차로 시거 산정 방식과 정지시거 산정 방식은 고정된 값만을 대표 값으로 사용하는 결정론적인 접근방법을 사용하고 있다. 본 장에서는 변수들의 확률분포 특성을 고려하여 비선형 교차로 시거와 정지시거를 산정하기 위해서 II장에서 살펴본 신뢰성 이론 중에 하나인 Hasofer-Lind Method (AFOSM Method)를 AASHTO(2001), 도로설계편람(2000)의 시거 모형에 적용하여 새로운 시거 기준을 산정하고자 한다.

1. 교차로 시거 산정

앞에서 언급한 바와 같이 도로 공급시 적용하는 시거를 공급시거(R)라고 하고 도로 이용자가 요구하는 시거를 수요시거(L)라고 표현하고 각각 공급시거는 도

로설계편람의 시거 기준 값을 사용하고 수요시거는 식(18)을 이용하여 각 변수들의 평균값과 변동계수 값을 고려하여 산정한다.

$$L = \frac{V}{3.6} \cdot t + \frac{1}{2a} \cdot \left(\frac{V}{3.6}\right)^2 \quad (18)$$

- L : 도로 이용자가 요구하는 시거
- V : 주도로 속도(km/h)
- a : 감가속도(m/sec²)
- t : 운전자 인지/반응시간(초)

앞에서 정의된 관계식을 이용하여 정리하면 식(19)과 같이 전개된다.

$$g = R - L = R - \frac{V}{3.6} \cdot t - \frac{1}{2a} \cdot \left(\frac{V}{3.6}\right)^2 \quad (19)$$

Hasofer-Lind Method을 적용하기 위해서는 식(19)의 각 변수들이 표준정규분포를 따른다고 가정하여 표준정규 확률변수로 변환하여 표준정규 확률식(U_g)으로 표현하면 식(20)과 같이 정리한다.

$$U_g = \frac{U_R \cdot \sigma_R + \mu_R - \frac{1}{3.6} \cdot (U_V \cdot \sigma_V + \mu_V) \cdot (U_t \cdot \sigma_t + \mu_t) - \frac{1}{2 \cdot (U_a \cdot \sigma_a + \mu_a)} \cdot \left(\frac{U_V \cdot \sigma_V + \mu_V}{3.6}\right)^2}{\sigma_g} \quad (20)$$

여기서,

- U_R : 공급시거의 표준 정규 확률 변수
- U_V : 도로 이용자의 주도로 속도 표준 정규 확률 변수
- U_t : 도로 이용자의 반응시간 표준 정규 확률 변수
- U_a : 도로 이용자의 감가속도 표준 정규 확률 변수
- μ_R : 공급시거의 평균
- μ_V : 주도로 속도의 평균
- μ_t : 반응시간의 평균
- μ_a : 감가속도의 평균
- σ_R : 공급시거의 표준편차
- σ_V : 주도로 속도의 표준편차
- σ_t : 반응시간의 표준편차

σ_a : 감가속도의 표준편차

최소 신뢰도지수(β) 값을 찾기 위해서는 식(20)을 각 변수에 대하여 편미분하여 식(15)~식(17)와 식(20)을 이용하고 시거의 설계점과 신뢰도 지수를 찾기 위해 초기점을 공급시거(R), 주도로 속도(V), 반응시간(t), 감가속도(a)을 각각 0으로 설정하여 수렴할 때까지 반복 계산한다.

2. 기존 교차로 시거의 안전성 분석

1) 도로설계편람(2000)의 시거

신뢰도 지수를 산정하기 위해 도로공급시거(R)의 값은 <표 1>의 도로설계편람의 비신호 교차로 최소 시거의 설계기준을 사용하고 도로공급시거의 변동계수는 0으로 가정하였다.

<표 1> 비신호 교차로의 최소 시거

설계속도(km/h)	계산값(m)	설계값(m)
20	21.6	25
30	38.2	40
40	58.6	60
50	82.9	85
60	111.1	115
70	143.1	145
80	179.0	180
90	218.8	220
100	262.3	265
110	309.8	310
120	361.1	365

주 : 감가속도 2.0m/sec², 인지반응시간 2.5초를 적용

도로 이용자가 요구하는 수요 시거(L)에서 주도로 속도를 정규분포라고 가정하여 식(21)을 이용하여 계산하고 주도로 평균과 표준편차를 산정하기 위해, 상한값은 설계속도로 β 값은 신뢰수준 99%인 2.32로 변동계수는 0.1로 가정하여 주도로 속도의 평균을 산정한다.

$$\text{평균} = \frac{\text{상한값}}{1 + \beta \cdot \text{변동계수}} \quad (21)$$

반응시간의 변동계수는 Wortman(1983)(<표 7>)의 연구를 이용하여 산정한다. <표 2>에서 모든 교차로의 접근로에서의 반응시간 평균인 1.3과 표준편차 0.6

을 이용하여 변동계수를 산정하면 0.46이다. 본 연구에서는 반응시간의 변동계수 0.46을 사용하고자 한다.

$$\begin{aligned} & \text{반응시간 변동계수} \\ & = \text{표준편차}/\text{평균} = 0.6/1.3 = 0.46 \end{aligned}$$

〈표 2〉 교차로의 접근로에서의 운전자의 반응시간

교차로 접근로	평균시간(초)	표준편차(초)	85% 시간(초)
모든 접근로	1.30	0.60	1.8

자료 : Wortman, R. H. and Matthias, J. S.(1983).

본 연구에서 이용할 반응시간의 평균은 도로설계편람에서 제시하고 있는 2.5초를 사용하고 표준편차는 〈표 2〉을 이용하여 산정한 변동계수 0.46을 이용하여 1.15를 사용한다.

$$\begin{aligned} & \text{반응시간의 표준편차} \\ & = \text{주어진 반응시간} \times \text{변동계수} = 2.5 \times 0.46 = 1.15 \end{aligned}$$

감가속도의 표준편차와 변동계수는 식(22)과 〈표 3〉을 이용하여 산정하였다. 〈표 3〉에서 표본이 정규분포를 따른다고 가정하고 신뢰도 95%(1.96)에서 감속도의 범위를 산정하였다고 하면, 식(22)을 이용하여 표본의 표준편차를 산정할 수 있다.

$$\frac{\text{하한값} - \text{평균}}{1.96} \leq \text{표준편차} \leq \frac{\text{상한값} - \text{평균}}{1.96} \quad (22)$$

〈표 3〉 감속도의 범위와 평균

Load	Pavement Quality	Maximum Deceleration	
		Range	Median
Unloaded	Poor, wet	0.388-0.521	0.414
Unloaded	Good, dry	0.804-0.964	0.881
Loaded	Poor, wet	0.327-0.440	0.400
Loaded	Good, dry	0.671-0.946	0.822

자료 : Shadle, S.G., L.H. Emery, and H.K. Brewer. (1983)

식(22)과 〈표 3〉을 이용하여 산정한 표준편차와 변동계수는 〈표 4〉이고, 식(22)을 이용하면 두개의 표준편차가 산정되어 두 표준편차의 평균을 이용하여 변동계수를 산정하였다.

본 연구에서는 〈표 4〉에서 산정한 변동계수 중에서 가장 큰 0.09를 사용하고 감가속도의 평균은 도로설계

〈표 4〉 감가속도의 표준편차와 변동계수

Load	Pavement Quality	표준편차			변동계수
		하한값	상한값	평균	
Unloaded	Poor, wet	0.013	0.055	0.034	8%
Unloaded	Good, dry	0.039	0.042	0.041	5%
Loaded	Poor, wet	0.037	0.020	0.029	7%
Loaded	Good, dry	0.077	0.063	0.070	9%

편람에서 제시하고 있는 $2m/s^2$ 를 사용하고 표준편차는 〈표 4〉에서 구한 변동계수를 이용하여 산정한 0.18을 이용한다.

$$\begin{aligned} & \text{감가속도의 표준편차} \\ & = \text{감가속도} \times \text{변동계수} = 2.0 \times 0.09 = 0.18 \end{aligned}$$

〈표 5〉는 신뢰성 이론을 적용하여 도로설계편람 교차로 시거 기준의 신뢰도 지수와 사고잠재확률을 산정한 것이다. 〈표 5〉를 살펴보면 도로설계편람 교차로 시거 기준의 신뢰도 지수는 약 1.41이고 설계속도가 증가할수록 신뢰도 지수가 증가함을 알 수 있고, 사고잠재확률은 약 8.0% 정도임을 알 수 있다.

〈표 5〉 도로설계편람 교차로 시거의 신뢰도 지수와 사고잠재확률

설계속도(km/h)	신뢰도 지수	사고잠재확률
30	1.23	10.9%
40	1.26	10.4%
50	1.36	8.7%
60	1.48	6.9%
70	1.43	7.6%
80	1.43	7.6%
90	1.46	7.2%
100	1.49	6.8%
110	1.46	7.2%
120	1.50	6.7%

3. 교차로 시거의 추정

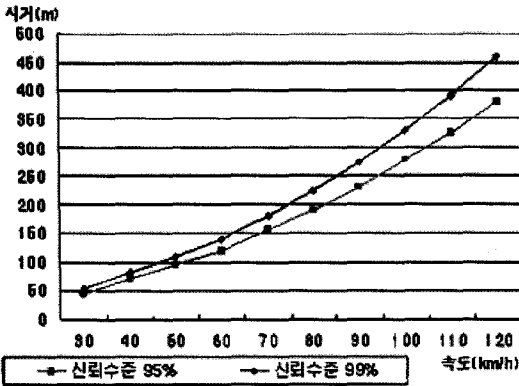
기존 시거모형의 변형과 기존 시거의 신뢰도 지수를 산정하기 위해 이용한 이용자시거(L)의 변수들의 평균과 표준편차를 이용하여 신뢰성을 고려한 각각의 새로운 교차로 시거 기준을 제시하고자 한다. 즉, 신뢰수준 95%, 99%을 만족하는 도로공급시거(R)의 값을 계산하여 교차로 시거 기준을 제시하고자 하는 것이다.

기존 도로설계편람 비신호 교차로 시거의 신뢰도 지수와 사고잠재확률은 각각 약 1.41, 8.0%로 신뢰수준

은 약 92.0%이다. 신뢰수준 95%, 99% 이상인 새로운 도로설계편람 비신호 교차로 시거 기준은 제시하기 위해서는 새로운 도로공급시거가 제시되어야 한다. 즉, 도로 이용자의 평균과 표준편차를 앞에서 살펴본 것과 동일하게 이용하여 새로운 도로공급시거가 신뢰수준 95%(신뢰도 지수 1.64), 신뢰수준 99%(신뢰도 지수 2.32) 이상이 되도록 산정하였다. <표 6>와 <그림 5>은 신뢰수준 95%, 신뢰수준 99%일 때의 새로운 도로설계 비신호 교차로 시거를 나타낸 것이다.

<표 6> 새로운 도로설계편람 교차로 시거

설계속도 (km/h)	교차로 시거	
	신뢰수준 95%	신뢰수준 99%
30	45	55
40	70	80
50	95	110
60	120	140
70	155	180
80	190	225
90	230	275
100	280	330
110	325	390
120	380	460



<그림 5> 새로운 도로설계편람 교차로 시거

4. 정지시거 산정

『도로설계기준』(개정 2003년 7월)에서 정지시거는 식(23)과 같으며 모형식은 교차로 시거와 기본적으로 같으나 적용된 가속도 대신에 종방향 마찰계수를 사용하고 있는 특징이 있다.

$$D = \frac{V}{3.6} \cdot t + \frac{1}{2gf} \cdot \left(\frac{V}{3.6}\right)^2 \tag{23}$$

- D : 도로 이용자가 요구하는 정지 시거
- V : 주행속도(km/h)
- t : 반응시간(초)
- f : 타이어와 노면의 종방향 미끄럼 마찰계수
- g : 중력 가속도상수 (9.8m/sec²)

노면이 습윤상태이고 주행속도는 설계속도가 120~80km/h 일 때 설계속도의 85%, 설계속도가 70~40km/h일 때 설계속도의 90%, 설계속도가 30km/h 이하일 때 설계속도와 같다고 보고 계산하여 평균과 표준편차 변동계수를 산정하였다.

도로 이용자에게 적용되는 안전 여유식(Z)은 다시 식(24)와 같이 정의된다.

$$Z = R - D = R - \frac{V}{3.6} \cdot t - \frac{1}{2gf} \cdot \left(\frac{V}{3.6}\right)^2 \tag{24}$$

다시 Hasofer-Lind Method을 적용하기 위해서는 식(24)의 각 변수들이 표준정규분포를 따른다고 가정하여 표준정규 확률변수의 변수로 변환하여야 한다. 각 변수들을 표준정규 확률변수로 변환하기 위해서는 식(25)~식(28)과 같다.

$$U_R = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \tag{25}$$

- U_R : 공급시거의 표준 정규 확률 변수
- R : 공급시거
- μ_R : 공급시거의 평균
- σ_R : 공급시거의 표준편차

$$U_V = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V} \tag{26}$$

- U_V : 도로 이용자의 주도로 속도 표준 정규 확률 변수
- V : 주도로 속도
- μ_V : 주도로 속도의 평균
- σ_V : 주도로 속도의 표준편차

$$U_t = \frac{t - \mu_t}{\sigma_t} \tag{27}$$

U_t : 도로 이용자의 반응시간 표준 정규 확률 변수
 t : 반응시간(초)
 μ_t : 반응시간의 평균
 σ_t : 반응시간의 표준편차

$$U_f = \frac{f - \mu_f}{\sigma_f} \tag{28}$$

U_f : 도로 이용자의 타이어와 노면의 종방향 미끄럼 마찰계수 표준 정규 확률 변수
 f : 타이어와 노면의 종방향 미끄럼 마찰계수
 μ_f : 타이어와 노면의 종방향 미끄럼 마찰계수의 평균
 σ_f : 타이어와 노면의 종방향 미끄럼 마찰계수의 표준편차

식(25)~식(28)을 식(24)에 대입하면 안전 여유식(Z)의 표준정규 확률식(U_z)을 얻는다.

$$U_z = U_R \cdot \sigma_R + \mu_R - \frac{1}{3.6} \cdot (U_V \cdot \sigma_V + \mu_V) \cdot (U_t \cdot \sigma_t + \mu_t) - \frac{1}{2 \cdot g \cdot (U_f \cdot \sigma_f + \mu_f)} \cdot \left(\frac{U_V \cdot \sigma_V + \mu_V}{3.6} \right)^2 \tag{29}$$

최소 신뢰도지수(β) 값을 찾기 위해서는 식(29)를 각 변수에 대하여 편미분하게 된다.

$$\frac{\partial U_z}{\partial U_R} = \sigma_R \tag{30}$$

$$\frac{\partial U_z}{\partial U_V} = -\frac{1}{3.6} \cdot \sigma_V \cdot (U_t \cdot \sigma_t + \mu_t) - \frac{1}{g} \cdot \frac{1}{(U_f \cdot \sigma_f + \mu_f)} \cdot \frac{\sigma_V}{3.6} \cdot \left(\frac{U_V \cdot \sigma_V + \mu_V}{3.6} \right) \tag{31}$$

$$\frac{\partial U_z}{\partial U_t} = -\frac{1}{3.6} \cdot (U_V \cdot \sigma_V + \mu_V) \cdot \sigma_t \tag{32}$$

$$\frac{\partial U_z}{\partial U_f} = \frac{1}{g} \cdot \frac{\sigma_f}{2 \cdot (U_f \cdot \sigma_f + \mu_f)^2} \cdot \left(\frac{U_V \cdot \sigma_V + \mu_V}{3.6} \right)^2 \tag{33}$$

시거의 설계 포인트와 신뢰도 지수는 앞의 경우와

같이 동일한 방법으로 식(15)~식(17)을 이용하여 산정하게 된다. 식(17)에서 식(34)를 얻을 수 있으며 식(34)는 특히 신뢰도지수에 각 확률변수가 미치는 영향에 대한 척도로 이해할 수 있으므로 이를 민감도(sensitivity)라고 한다. 위 식으로 정의된 민감도는 이후에 설계단계에서의 이용을 목적으로 요구되는 안전도를 만족시키기 위한 부분안전계수(partial safety factor)의 결정에서 사용된다.

$$\alpha = -\frac{G_u^* T}{\sqrt{G_u^* T G_u^*}} = \frac{\beta}{u^*} \tag{34}$$

5. 기존 정지 시거의 안전성 분석

위와 같은 방법을 통하여 기존 정지 시거의 신뢰도 지수와 사고 잠재확률을 산정하고 또다시 도로설계기준에서 제시된 정지시거를 찾아보면 <표 7>과 같고, 타이어의 종방향 미끄럼 마찰계수는 이슬기,이용재(2002) "종방향 마찰계수가 시거에 미치는 영향연구"에서 제시된 평균값과 표준편차를 사용하여 변동계수값을 추정하였다. 추정된 결과는 <표 8>과 같다.

정지시거의 신뢰도 지수와 사고잠재확률 산정에 사용된 운전자의 인지반응시간의 평균과 표준편차 <표 2>와 동일하며, 속도의 평균과 표준편차는 강진구, 장명순, 김진태(2002)에서 제시된 결과를 사용하였다.

제시된 속도의 평균 및 표준편차를 이용하여 각각의 변동계수를 산정한 후 변동계수들의 평균값인 0.12를 이용하여 설계 속도에 따른 속도의 평균값과 표준편차

<표 7> 2003 도로설계 기준상의 정지시거

도로설계기준개정(2003.7)				
노면습윤 상태일 때 정지시거				
설계속도 (km/h)	주행속도 (km/h)	마찰계수 (f)	주행속도에 의한 정지시거(m)	정지시거 채택(m)
20	20.0	0.44	17.4	20
30	30.0	0.44	28.7	30
40	36.0	0.37	38.4	40
50	45.0	0.34	54.0	55
60	54.0	0.32	72.3	75
70	63.0	0.31	92.6	95
80	68.0	0.30	105.9	110
90	76.5	0.30	127.4	130
100	85.0	0.29	153.8	155
110	93.5	0.28	183.6	185
120	102.0	0.28	212.0	215

〈표 8〉 설계 속도에 따른 마찰계수

설계속도 (km/h)	마찰계수 (f)(평균)	표준편차	변동계수
20	0.44	0.0968	0.22
30	0.44	0.0968	0.22
40	0.37	0.0814	0.22
50	0.34	0.0748	0.22
60	0.32	0.0704	0.22
70	0.31	0.0558	0.18
80	0.30	0.0540	0.18
90	0.30	0.0540	0.18
100	0.29	0.0522	0.18
110	0.28	0.0504	0.18
120	0.28	0.0504	0.18

〈표 9〉 고속도로 직선부의 속도의 평균 및 표준편차

조사지점	직선부		
	평균	표준편차	변동계수
1	108.50	12.10	0.11
2	110.63	15.57	0.14
3	115.38	12.17	0.11
4	110.30	12.00	0.11
5	107.46	12.34	0.11
	평균	0.12	

자료 : 고속도로 기본구간 자유속도 추정 신경망 모형개발, 대한교통학회(2002) 강진구, 장명순, 김진태

〈표 10〉 설계속도의 평균값 및 표준편차

설계속도	평균값	표준편차
20	20	2.40
30	30	3.60
40	36	4.32
50	45	5.40
60	54	6.48
70	63	7.56
80	68	8.16
90	77	9.18
100	85	10.20
110	94	11.22
120	102	12.24

를 〈표 10〉과 같이 구하여 기존의 정지시거의 신뢰도 지수와 사고 잠재 확률을 산정하였다.

〈표 11〉은 신뢰성 이론을 적용하여 도로설계기준에 제시된 시거 기준의 신뢰도 지수와 사고잠재확률을 산정한 것이다. 〈표 11〉을 살펴보면 도로설계편람 교차로 시거 기준의 신뢰도 지수는 약 0.0770이고 비신호 교차로와는 달리 설계속도와 신뢰도 지수는 선형적인 상관관계가 없음을 알 수 있고, 사고잠재확률은 약 46.96%정도로 상당히 높음을 알 수 있다.

〈표 11〉 도로설계기준의 신뢰지수 및 사고잠재확률

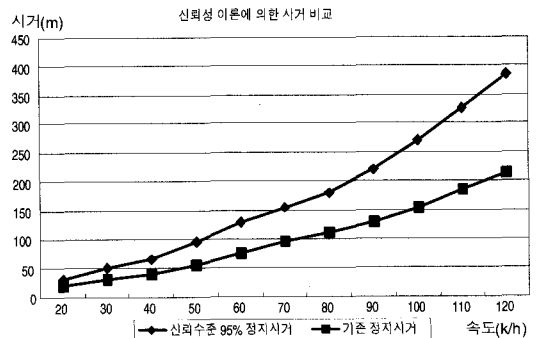
설계속도	신뢰지수	사고잠재확률
20	0.3584	36.00%
30	0.1021	45.93%
40	0.0872	46.53%
50	0.0162	49.35%
60	0.0658	47.37%
70	0.0285	48.86%
80	0.0619	47.53%
90	0.0020	49.92%
100	0.0436	48.26%
110	0.0494	48.03%
120	0.0316	48.74%

6. 정지 시거의 추정

기존 시거모형의 변형과 기존 시거의 신뢰도 지수를 산정하기 위해서는 앞에서 적용한 동일한 방법으로 이용한 이용자시거(L)의 변수들의 평균과 표준편차를 이용하여 신뢰성을 고려한 각각의 새로운 정지시거 기준을 제시한다. 즉, 신뢰수준 95%를 만족하는 도로공급 시거(R)의 값을 재산정하도록 한다.

〈표 12〉 새로운 정지시거(노면 습윤상태)

설계속도	새로운시거	신뢰지수	사고잠재확률
20	30	1.6696	4.75%
30	50	1.7682	3.85%
40	65	1.6859	4.59%
50	95	1.7859	3.71%
60	130	1.7355	4.13%
70	155	1.6895	4.56%
80	180	1.7062	4.40%
90	220	1.7125	4.34%
100	270	1.6963	4.49%
110	325	1.6561	4.88%
120	385	1.6690	4.76%



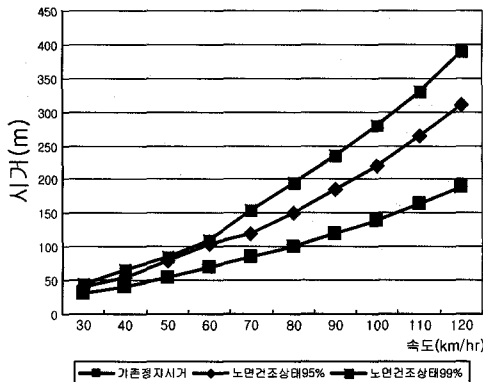
〈그림 6〉 노면 습윤상태의 정지시거 비교

기존 도로설계기준 정지시거의 신뢰도 지수와 사고잠재확률은 각각 약 0.0770, 46.96%로 신뢰수준이 매우 낮으며 이에 의해 사고잠재확률이 매우 높음을 알 수 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 새로운 도로공급 시거가 신뢰수준 95%(신뢰도 지수 1.64) 이상이 되도록 산정하였다. <표 12>와 <그림 6>은 신뢰수준 95% 때의 새로운 도로설계 정지시거를 나타낸 것이다.

<표 13>은 노면이 건조상태일때 신뢰수준 95%, 99%의 새로운 신뢰도 지수와 정지시거이고 <그림 7>은 기존의 정지시거와 신뢰수준 95%, 99%일 때의 새로운 정지시거를 그래프로 나타낸 것이다.

<표 13> 노면이 건조 상태(신뢰수준 95%,99%)

설계속도 (km/hr)	신뢰수준95%		신뢰수준99%	
	신뢰도 지수	정지시거	신뢰도 지수	정지시거
30	2.01	40	2.55	45
40	1.71	55	2.23	65
50	1.82	80	1.92	85
60	1.70	105	1.74	110
70	1.66	120	2.27	155
80	1.68	150	2.14	195
90	1.70	185	2.05	235
100	1.65	220	1.98	280
110	1.67	265	1.92	330
120	1.64	310	1.87	390



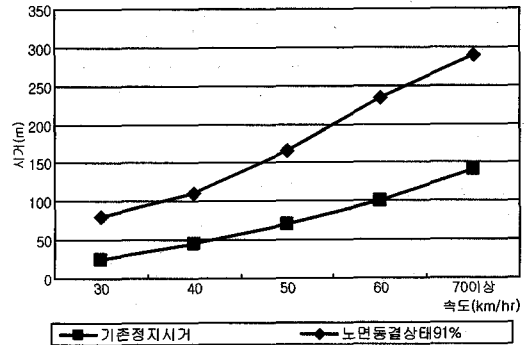
<그림 7> 노면 건조상태의 정지시거 비교

참고로 노면이 동결 상태일 때의 경우 신뢰 수준이 91.10% 이상 증가하지 않아 본 연구에서는 최대 신뢰 수준 91.10%까지만 산정하였다.

<표 14>는 91% 신뢰수준에서 노면이 동결상태 하의 새로운 정지시거와 신뢰도지수 이고 <그림 8>은 신뢰수준 91%일 때의 새로운 도로설계 정지시거와 기존의 정지시거를 그래프로 나타낸 것이다.

<표 14> 노면 동결상태(신뢰수준 91%)

설계속도 (km/hr)	신뢰수준 91%	
	신뢰도 지수	정지시거
30	1.36	80
40	1.30	110
50	1.24	165
60	1.22	235
70이상	1.64	290



<그림 8> 노면 동결상태의 정지시거 비교

IV. 결론

본 연구에서는 도로설계편람(2000)의 교차로 시거 모형과 도로설계 기준에 제시된 정지시거를 신뢰성 지수를 이용하여 새로운 설계 기준을 제시하였다. 비록 연구에 사용된 각 변수들의 평균과 표준편차의 값들은 현장에서의 면밀한 실험과 검증절차를 통하여 수집된 것이 아니고 기존 연구 문헌을 참고하여 적용하는 연구의 한계성이 있었지만, 본 연구에서는 각 변수들을 특정하게 고정된 값으로 나타낸 것이 아니고 확률적 특성을 갖는 일종의 (정규)분포 함수를 가정하고, 신뢰성에 기반을 둔 시거 설계 기준을 제시하여 보았다는 데에서 이 연구의 의의를 둘 수 있다.

본 연구를 수행하면서 얻을 수 있었던 주요한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 기존에 사용하고 있던 교차로 시거의 신뢰수준은 도로설계편람(2000)의 경우 약 92.0%에 채 미치지 못한 것으로 나타났다.

둘째, 도로설계 기준에 제시된 정지시거의 신뢰도 지수와 사고잠재확률이 각각 0.770 과 46.96%로 관측된 자료를 바탕으로 판단한 정지시거의 신뢰도는 매우 낮은 수준이며 사고잠재확률로 보아 시급히 개선할 필요가 있다.

결과적으로, 신뢰성 이론을 적용하여 산정한 교차로

시거 기준과 정지시거 기준은 시거 설계시 신뢰수준의 정도를 명시할 수 있어 기존의 대표값에 의한 설계 기준보다는 더욱 믿음을 줄 수 있으리라고 판단할 수 있다. 다시 한번 강조되어야 하는 점은 제시한 연구결과가 보편성을 가지기 위해서는 기존 연구를 통한 자료 수집 이외에 다양한 현장조사를 통해 각 변수들의 평균과 표준편차의 자료를 수집 및 정밀한 분석이 요구되며 본 연구에서는 조사에 소요되는 예산과 인력의 한계로 목적을 충분히 달성할 수 없었다는 점을 밝혀 둔다. 따라서 이러한 본 연구의 한계와 연구결과의 특이성 등을 고려하여 향후 연구방향을 제시하여보면 다음과 같다.

첫째, 각 변수들의 평균과 표준편차에 대한 높은 수준의 신뢰성과 안정성이 확보하기 위해 운전자의 일관성(Consistency)과 동질성(Homogeneity)분석에 소요되는 다양한 자료를 수집하고 분석하는 노력이 요구된다.

둘째, 본 연구에서 산정한 시거 기준은 안전 측면에서 살펴본 것 이라면, 비용(경제성) 측면에서 산정될 수 있는 시거 기준과의 적절한 조화를 통한 최적인 기준이 산정될 수 있도록 비용 함수의 설정이 필요하다.

셋째, 사고확률 분포에 대한 연구와 설계속도와 마찰계수가 가지는 상관성 및 도로설계시 사용가능한 임계마찰계수에 대한 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 건설교통부(2000), 도로설계편람, 한국건설기술연구원.
2. 건설교통부(2000), 도로의 구조 시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침, 대한토목학회.
3. 고동석·이용재·정진혁(2000), "수도권 지역 4-지 비신호 교차로에 대한 이동류별 차량의 임계간격과 추종시간 기준에 관한 연구", 대한교통학회지, 제18권 제6호, 대한교통학회, pp.19~32.
4. 김석근·이용재(2002), "비신호 교차로의 운영특성 분석과 개선에 관한 연구", 건설환경논문집, 제13권 제1호, 중앙대학교 건설환경연구소.
5. 양영순·서용석·이재욱(1999), 구조 신뢰성 공학, 서울대학교 출판부.
6. 이슬기·이용재·김석근(2003), "임계간격을 이용한 비신호 교차로의 시거 산정에 관한 연구", 대한교통학회지, 제25권 제5호, 대한교통학회, pp.97~110.
7. 이슬기(2004), 신뢰성 이론을 이용한 비신호 교차로의 시거 설계에 관한 연구, 중앙대학교, 석사학위논문.

8. 정준화(1999), 신뢰성에 기반한 도로 선형 설계 방안, 한국건설기술연구원.
9. 이슬기·이용재(2002) "중방향 마찰계수가 시거에 미치는 영향에 관한 연구" 건설환경논문집, 제13권 제2호, 중앙대학교 건설환경연구소, pp.117~125.
10. American Association of State Highway and Transportation Officials (2001), A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, Washington D.C..
11. Cornell, C. A.(1967), "Bounds on the Reliability of Structural Systems", Journal of Structural Division, ASCE, vol. 93, no. ST1, February.
12. Navin, F. P. (1990), "Safety Factors for Road Design: Can They Be Estimated?", Transportation Research Record 1280, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.181~189.
13. Easa, S. M. (1993) "Reliability-Based Design of Intergreen Interval at Traffic Signals", Journal of Transportation Engineering, Vol. 119, No. 2, pp.255~271.
14. Easa, S. M. (1994) "Reliability-Based Design of Sight Distance at Railroad Crossings:.". Transportation Research, Vol. 28A, No. 1, pp.1~15.
15. Easa, S. M. (1999), "Reliability Approach to Intersection Sight Distance Design," Transportation Research Record 1701, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.42~52.
16. Freudenthal, A. M.(1956), "Safety and the Probability of Structural Failure", Transactions of ASCE, vol. 121, pp.1337~1397.

✉ 주 작 성 자 : 이슬기
 ✉ 교 신 저 자 : 이용재
 ✉ 논문투고일 : 2005. 10. 29
 ✉ 논문심사일 : 2005. 11. 30 (1차)
 2005. 12. 15 (2차)
 2006. 1. 6 (3차)
 ✉ 심사판정일 : 2006. 1. 6
 ✉ 반론접수기한 : 2006. 6. 30