

■ 論 文 ■

미시적 주행행태를 반영한 후미추돌위험 평가모형개발

Development of the Risk Evaluation Model for Rear End Collision on the Basis of Microscopic Driving Behaviors

정성봉

(서울대학교 지구환경시스템공학부
박사)

송기한

(서울대학교 지구환경시스템공학부
박사과정)

박창호

(서울대학교 지구환경시스템공학부
교수)

전경수

(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

고승영

(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

목 차

- I. 서론
 - II. 문헌고찰
 - 1. 도로 위험도 평가기법
 - 2. 후미추돌의 이론적 분석(안정성이론)
 - III. 모형개발
 - 1. 안전정지거리
 - 2. 사고발생과 위험
 - 3. 후미추돌위험 평가모형(개념적 접근)
 - 4. 후미추돌 평가모형개발(수학적 접근)
 - 5. 위험도 지수
 - IV. 자료수집
 - 1. 사고자료
 - 2. 거시적 교통류 자료
 - 3. 미시적 교통류 자료
 - 4. 자료보정
 - V. 결과분석 및 검증
 - 1. 구간별, 차로별 위험도 분석결과
 - 2. 교통류 상황별 위험도 분석결과
 - VI. 결론 및 향후연구과제
 - 1. 결론
 - 2. 향후연구과제
- 참고문헌

Key Words : 후미추돌위험, 사고발생 가능성, 미시적 차량 및 운전행태, 위험도지수, 등가위험도

요 약

안전측면에서 교통류를 효율적으로 운영·관리하기 위해서는 교통류의 위험정도를 명확하게 판단할 수 있는 기준 및 모형개발이 필요하다. 이를 위해, 본 연구에서는 불완전한 추종으로 인해 발생할 수 있는 교통류 위험을 후미추돌위험의 관점에서 파악하였다.

과거 사고예측 및 도로위험도 평가모형의 경우 운전자 반응을 고려하지 않았기 때문에, 모형의 신뢰성에 다소 문제가 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 한계 및 문제점을 극복하기 위해 사고발생 가능성이라는 개념을 도입함으로써 위험과 사고 사이에 존재하는 운전자 반응을 모형에 반영하였다. 즉, 추종이론 및 안정성 이론을 바탕으로 후미추돌과 관련된 미시적 변수 즉, 운전자의 반응시간과 감속도를 반영하여 운전자를 고려한 모형을 개발하였다.

위험도를 대표할 수 있는 지표 개발을 위해 소음영향평가에서 사용되는 척도를 활용하였으며, 상대적인 위험도 우위를 평가하기 위해 위험강도 및 지속시간을 고려한 '등가위험도'를 개발하였다. 서울시 도시고속도로를 대상으로 직접 실험·조사를 수행하였으며, 미시적 교통류 자료수집을 위해 직접 실험차량을 제작하였다. 수집된 자료를 바탕으로 구간별, 차로별, 교통상황별 위험도를 도출하였다. 모형에 의해 도출된 위험도를 해당구간에서 수집된 차로별 사고자료와 비교하여 본 결과, 교통상황 및 사고자료 패턴과 일치하는 결과를 보여주었다.

본 연구에서 개발된 모형은 안전진단 및 도로설계에서부터 첨단안전차량 제어알고리즘의 안전성평가에 이르기까지 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것이다.

I. 서론

교통사고는 인적요인, 차량요인, 도로환경요인이 단독 또는 복합적으로 작용하여 발생하기 때문에 이들 요인들이 함께 고려되어야 설명력 높은 모형개발이 가능하다.

도로에서 발생하는 위험한 상황 또는 사고는 다양한 자극에 대해 부적절한 반응의 결과임에도 불구하고 기존 연구는 이러한 자극만을 분석하여 위험정도를 판단하였다. 하지만, Wang 등(2000)은 현실적으로 위험한 상황은 많이 발생하지만 운전자들이 이러한 자극에 대해 적절하게 반응함으로써 위험한 상황이 항상 사고와 연결되지 않는다는 것을 보여주었다.

도시고속도로와 같은 연속류 도로에서 발생하는 교통사고는 대부분 차로변경과 추종의 실패로 인해 발생하는데, 운전자의 반응 또는 의사결정은 이러한 사고에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 특히, 불완전한 추종으로 인해 발생하는 후미추돌 사고위험을 평가하기 위한 많은 연구가 진행되어왔으나, 단순히 선·후행차량의 최대감속도를 적용하여 두 차량의 추돌위험을 설명한 것이 대부분이었는데, 여기에는 많은 가정과 전제가 포함되어 있어 다양하고 복잡한 주행상황에 따른 위험을 설명하기에는 많은 한계가 존재한다.

이에 따라, 본 연구에서는 복잡하고 다양하게 발생하는 후미추돌위험을 설명할 수 있는 모형개발을 위해 운전자의 주행특성 및 후미추돌과 관련된 미시적인 요소들을 구조적으로 해석하였다. 이를 위해 추종이론 및 안정성 이론을 바탕으로 후미추돌과 관련된 미시적 변수 즉, 운전자의 반응시간과 감속도를 고려하였으며, 개발된 모형의 현장 적용을 위해 후미추돌위험을 객관적으로 비교할 수 있는 지표를 제시하였다. 또한, 개발된 모형의 신뢰성을 사고자료 및 비 사고자료를 이용하여 검증함으로써 기존 도로위험도 평가모형이 가지는 내재적인 한계를 극복하고자 하였다.

II. 문헌고찰

본 장에서는 지금까지 개발된 사고예측 또는 위험도 평가모형에 대해 개략적인 검토를 한 후, 후미추돌위험을 이론적으로 설명하는 안정성이론에 대한 기존 연구

결과를 살펴보았다.

1. 도로위험도 평가기법

도로위험을 평가하는 방법은 크게 사고자료 기반모형과 비사고자료 기반모형으로 나눌 수 있다.

사고예측모형으로 대표되는 사고자료 기반모형의 경우 사고와 관련이 있다고 판단되는 변수들을 상관분석을 통해 회귀모형식을 도출한 후, 장래 사고건수를 예측함으로써 위험도를 평가하는 기법으로 다년간 축적된 사고자료를 이용해야 한다는 어려움과 사고발생의 우연성, 그리고 사고요인의 복합성을 제대로 설명하지 못한다는 한계를 가지고 있다. 또한, 다양한 사고형태를 단순하게 비교하는 과정에서 발생하는 비교 방법상의 문제점 등이 존재하기 때문에 최근 도로위험도를 객관적으로 비교·평가하는데 다소 부적절한 방법으로 인식되고 있다.

이에 반해, 비사고자료 기반 위험도 평가모형의 경우 사고 및 도로위험에 영향을 주는 요소(1)를 직접 도출한 후 이를 이용하여 적절한 지표로 반영하는 기법으로 사고요인에 대한 정확한 원인규명과 이를 통한 객관적인 모형화의 어려움이 존재하지만, 위험정도를 정량화하여 표현할 수 있을 뿐만 아니라, 상대적인 위험도에 대해 객관적인 비교·평가가 가능하며, 사고위험에 대한 명확한 요인분석으로 체계적인 대처방안 마련에 효과적으로 이용될 수 있는 기법이다.

특히, 후미추돌위험에 대한 기존 연구의 경우 엄광태와 이영인(2002, 대한교통학회 추계학술대회)의 연구에서와 같이 선행차량이 급정지할 경우 선행차량과 추돌하지 않기 위한 최소안전정지시거와 두 차량의 차간거리를 비교하여 추돌위험을 계산한 것이 대부분으로, 이러한 모형으로는 다양하고 복잡하게 발생하는 후미추돌위험을 제대로 설명할 수 없을 것이다.

최근, 도로안전측면에서의 서비스수준에 대한 연구가 많은 학자들에 의해 진행되고 있는데 Kononov(2003)

(표 1) 도로위험도 평가기법

구분	대표적 평가기법
사고자료 기반모형	- 사고건수, 사고율법, 사고예측모형, EB기법 등
비사고자료 기반모형	- 속도차·기하구조의 연속성, 운전자 부담 및 복합적인 요인을 고려한 모형, 상충기법 및 노출계수 등

1) 도로기하구조의 연속성, 상충횟수, 운전자 부담감, 속도 및 가속도 분산 등이 있음.

은 Safety Performance Function을 이용하여 안전에 대한 서비스수준(LOSS)의 개념과 안전문제를 해결할 수 있는 방안에 대한 연구를 수행하였다. 이 논문에서 그는 LOSS는 예상되는 사고빈도와 특정 AADT수준에서의 심각도를 제공할 수는 있으나, 안전문제의 본질과 관련된 정보는 제공하지 못한다는 한계를 가지고 있음을 밝혔다.

2. 후미추돌의 이론적 분석(안정성이론)

추종이론을 바탕으로 교통류의 상태를 파악하기 위해, 추종이론의 모수를 이용하여 교통류 상태를 분석하고자 하는 노력이 진행되어 왔는데, 이러한 모수들을 이용하여 교통류의 미시적 상태를 설명한 이론이 안정성 이론이다.

충격과 이론과 함께 발전한 안정성 이론은 추종모형에 있어 민감도와 반응시간의 관계를 수학적으로 전개하여 추종상태를 분석한 이론으로 이를 통해 후미추돌의 발생상황을 이론적으로 설명할 수 있다. 즉, 차량군이 불안정한 상태²⁾로 움직인다면, 개별 차량사이의 거리 및 속도변화 진폭은 선행 차량의 움직임의 변화에 따라 증가할 것이며 이러한 영향이 차량렬을 따라 상류로 전파되면서 추돌로 이어지게 되는 것이다.

안정성 이론에 대한 초기연구는 Herman, Montroll, Potts, Rothery(1959)에 의해 이루어졌는데, 그들은 추종상황에서 발생하는 안정성을 국지적 안정성(Local Stability)³⁾과 점근적 안정성(Asymptotic Stability)⁴⁾으로 구분함으로써 안정성 분석에 대한 기본틀을 제공하였다. 이 연구에서 그들은 단순한 선형 미분 방정식을 기반으로 하는 추종이론으로는 복잡한 교통현상을 설명하는데 한계가 있다고 밝혔다. 즉, 이러한 모형으로는 가장 단순한 교통상황(추월과 차량간섭이 발생하지 않으며, 모든 운전자의 반응시간과 민감도가 동일한 경우)만을 설명할 수 있다고 밝혔다.

Chandler(1958)는 반응시간이 교통류 불안정의 원인이라는 것을 제시하였으며, 또한 교통류의 안정성 문제를 선행차량 속도함수의 Fourier 전개를 통해 해석하였다. 그는 이 연구를 통해 '민감도×반응시간'의 값이 안정성을 판단하는데 있어 가장 중요한 요소임을 밝

혔다.

Köhler(1974)는 후미추돌사고의 중요한 원인 중 하나로 차량군의 불안정성을 제시하였다. 즉, 만일 차량군이 불안정한 상태로 움직인다면, 개별 차량사이의 거리변화의 진폭은 선행 차량의 움직임의 변화에 따라 증가할 것이며 이는 불안정성의 정도에 따라 추돌로 이어진다고 하였다. 그는 기존의 안정성 이론과 Hoefs, D. H(1972)에 의해 정산된 모수를 이용하여 세 가지 상황에 대한 반응시간과 민감도를 계산하여 운전자의 주행행태와 거리-속도 한계곡선식을 파악할 수 있다고 하였다. 또한, 그는 교통류의 안전을 증대할 수 있는 방안을 마련하기 위해, 이러한 개념을 시뮬레이션을 통해 적용시켜 본 결과, Distance Warning Indicator에 의한 위험지시정보는 운전자의 주의도를 증가시켜 교통류의 안정성에 기여할 수 있음을 밝혔다.

Ferrari(1994)는 교통류가 불안정하게 되는 확정적인 모수(민감도, 반응시간)값은 존재하지 않고, 모수들에 따라 특정 시간 동안 교통류가 불안정하게 될 확률을 이르는 것만이 가능하다고 하였다. 그는 교통류의 불안정에 대한 확률성을 민감도의 경우 밀도에 따라 증가하는 함수 주변에 분포하는 확률변수이며, 반응시간의 경우 평균이 환경적인 특징에 의존하는 확률변수로 볼 수 있기 때문에 설명하였다. 또한, 그는 고전적인 추종이론에서 정의된 교통류가 불안정해지는 밀도값 즉, 임계밀도는 반응시간, 민감도 그리고 차두간격의 관계에 영향을 받는다고 하였는데, 임계밀도의 경우 불안정성이 의존하는 교통류 모수의 확률적인 특성으로 인해 확정적인 값은 존재하지 않는다는 점을 강조하였다. 그는 이 연구를 통해 추종이론에 포함된 모수를 이용하여 도로에서 발생하는 불안정 현상의 원인을 확인하고, 이를 결정하는 모수들을 지적하였으며, 불안정성의 경계 지점을 제시하는 임계밀도에 대해서도 이론적으로 검증하였다.

Zhang 등(1997)은 고전적인 추종모형에서 다루었던 안정성이론을 수학적으로 분석하였다. 특히 그들은 비선형 모형을 선형모형으로 근사시킴으로써 선형모형에만 머물던 기존의 이론을 비선형 모형으로 확장시켰다. 이 연구에서는 차량의 감·가속과 같은 변동(disturbance)이 시간에 따라 어떻게 변하는가와 이러한 요소들이 차량

2) 반응시간이 크고, 민감도가 클 경우인데 이는 결국 파격한 가·감속으로 연결되어 교통류를 불안정하게 만들.

3) 두 차량간의 안정성.

4) 세대 이상의 차량으로 구성된 교통류에서의 안정성.

렬을 따라 진행됨에 따라 어떻게 변하는 지를 분석하였으며, 비선형 모형의 안정성을 다루기 위해 선형화 과정 및 대수적 분석을 적용하여 안정성 분석에 대한 새로운 분석틀을 정립하였다.

안정성 이론에 대한 이러한 연구결과를 통해, 교통류의 안정성에 영향을 미치는 모수는 운전자의 민감도와 반응시간이며, 이러한 모수의 경우 확정적으로 존재하는 값이 아니라, 운전자에 따라서 또는 동일한 운전자에 대해서도 주변 환경에 따라 달라질 수 있는 확률적인 값을 알 수 있었다. 또한, Ferrari(1994)의 연구결과에서 알 수 있듯이 교통류의 불안정 범위 즉 후미추돌의 발생위험은 반응시간, 민감도, 그리고 차두간격에 의해 결정되기 때문에 후미추돌위험을 평가하기 위해서는 이러한 요소들을 고려해야 할 것이며, 본 연구에서는 이러한 요소를 운전자의 행태로서 고려하여 모형개발에 임하였다.

III. 모형개발

후미추돌은 교통류의 불안정성으로 인해 발생하는 현상으로, 이러한 불안정성은 추종이론의 두 모수인 반응시간과 민감도 즉, 감·가속의 정도에 의해 결정된다.

본 장에서는 안전정지거리와 사고발생가능성에 대한 개념을 도입하고 위험도 지수를 개발하여 모형검증에 활용하여 이러한 운전자 요소가 고려된 모형을 개발하였다.

1. 안전정지거리

어떤 상황에 대한 위험을 평가하기 위해서는, 위험이 발생하는 상황에 대한 명확한 정의가 필요하다. 후미추돌위험의 경우 후행차량이 선행차량의 주행행태 즉, 선행차량의 가·감속에 영향을 받는 순간부터 위험이 발생한다고 볼 수 있다. 하지만, 이러한 시점을 파악하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 선행차량의 주행행태와 상관없이 안전한 반응을 수행할 수 있는 시점을 정의하여, 이를 넘어서는 순간부터 후미추돌 위험이 발생한다고 전제하였다. 여기서 안전하게 반응하는 것이란 후행차량의 운전자가 충분한 반응시간과 정상감속률로 감속하여도 후미추돌이 발생하지 않는 경

〈표 2〉 최대감속도와 정상감속도

범위	최대감속도(m/s^2)	정상감속도(m/s^2)
0~30 <i>kph</i>	6.468	2.08
30~40 <i>kph</i>	6.272	1.86
40~50 <i>kph</i>	6.076	1.39
50~60 <i>kph</i>	5.978	1.39
60~70 <i>kph</i>	5.782	1.39
70~80 <i>kph</i>	5.684	1.39

자료 : 교통공학원론(2001), 도철웅

우를 의미한다.

충분한 반응시간은 과거 연구⁵⁾를 바탕으로 2.3초로, 적정 감속률은 〈표 2〉와 같이 설정하였다.

2. 사고발생과 위험

도로에 존재하는 위험과 이러한 위험이 운전자에 의해 경험되어 실제 주행행태에 반영되어 나타난 위험, 그리고 이러한 위험으로 인해 발생한 사고와의 관계를 설명하기 위해 지금까지 많은 연구들이 진행되고 있다. 하지만, 사고를 직접적으로 설명할 수 있는 변수를 모형화하는 것은 매우 어렵기 때문에, 지금까지 대부분의 연구에서는 이들이 교통현상으로 나타나는 간접적인 요인을 반영하여 모형을 개발하였을 뿐만 아니라, 사고와 이러한 요인을 직접 연관시키려고 했기 때문에 모형의 유의성은 다소 낮게 나타났다.

본 절에서는 이러한 문제를 해결하고자 위험과 사고 사이에 존재하는 운전자 요인을 고려하여 다음과 같이 위험과 사고의 관계를 정립하였다.

- 잠재적 위험 : 도로-차량 시스템이 본질적으로 가지는 위험을 의미한다. 따라서 여기에는 운전자요인에 의한 영향이 반영되지 않는다.
- 무시된 위험 : 잠재적 위험에 대해 운전자에 의해 무시(감수) 또는 파악되지 못한 위험으로, 후자의 경우 현실적으로 분석이 불가능하므로 본 연구에서는 무시(감수)된 위험만을 고려하였다.
- 사고 : 잠재적 또는 운전자에 의해 무시된 위험이 어떤 요인에 의해 급격하게 증가하여 돌이킬 수 없는 상황에서 발생하는 비정상적인 사건.

이와 같이 도로에 존재하는 위험과 사고 사이에 운전자의 반응을 고려한다면, 어떤 상황으로 인해 위험이

5) 교통류 평가기술개발 최종보고서(2000, 과학기술부)

증가하더라도 직접 사고로 연결되지 않는다는 것을 알 수 있으며, 이는 운전자가 이러한 위험에 적절한 대응을 하기 때문으로 볼 수 있다. 즉, 동일한 위험에 대해 운전자가 어떻게 반응하느냐에 따라 사고발생가능성이 달라지며 이에 따라 실제 발생하는 사고 또한 달라질 수 있다.

이러한 개념을 바탕으로 본 연구에서는 사고발생가능성을 도로-차량 시스템에 내재된 위험(R_{sys})에 대해 운전자에 의해 무시된 위험(R_d)의 비로 정의하였다.

$$R_{\text{사고발생가능성}} = \frac{R_d}{R_{\text{sys}}} \quad (1)$$

3. 후미추돌위험 평가모형(개념적 접근)

후미추돌의 경우 일반적으로 선행차량의 감속에 대해 후행차량의 부적절한 반응으로 발생한다. 따라서 본 연구에서는 선행차량의 잠재적인 감속상황⁶⁾에 대한 후행차량의 반응을 사고발생가능성이라는 관점에서 파악하여 모형개발에 임하였다.

앞 절에서 설명된 R_{sys} 와 R_d 를 후미추돌관점에서 살펴보면, R_{sys} 의 경우 후미추돌이 발생할 수 있는 모든 위험상황을 나타내며, 이러한 위험상황은 후행차량이 안전정지거리 보다 선행차량에 더 가깝게 추종하는 경우 발생한다. 또한, R_d 는 후미추돌 위험상황에서 운전자에 의해 무시 또는 감수되는 위험정도를 의미하는데, 이는 추종상황에서 운전자의 반응시간과 감속정도에 의해 결정된다.

결국, 후미추돌 사고발생가능성을 적절히 모형화하기 위해서는 이러한 R_{sys} 와 R_d 를 설명할 수 있는 변수들 즉, 선·후행 차량의 속도 및 감·가속상태, 차간거리⁷⁾, 그리고 반응시간을 고려해야 할 것이며, 이러한 변수들을 이용하여 R_{sys} 와 R_d 를 개발하였다.

1) 후미추돌위험의 개념적 이해

본 연구에서 정의하는 후미추돌위험은 추종상태로

주행하고 있는 두 차량에 대해 선행차량이 임의의 감속률로 감속할 경우 후행차량의 운전자가 수행하는 감속시점과 감속정도(이는 후행차량의 운전자가 감수하려는 위험정도에 따라 결정될 것임.)에 따라 결정되는 잠재적인 추돌위험으로 볼 수 있다. 따라서 이는 한 시점에서 결정되는 두 차량의 주행상태에 대해 선행차량의 감속정도에 따른 후행차량의 반응시간과 감속률로 결정될 수 있다.

즉, 두 차량의 차간거리를 h , 선행차량의 이동거리를 d_a , 그리고 후행차량의 이동거리를 d_b 라 하면, 후미추돌 없이 후행차량이 정지하기 위한 조건은 식(2)와 같다.

$$d_a + h > d_b \quad (2)$$

여기서, $d_a : v_a t_a + \frac{1}{2} a_a t_a^2$

$$d_b : v_b t_r + v_b t_b + \frac{1}{2} a_b t_b^2$$

인데, v_i 는 i 차량의 현재 주행속도이며, a_i 는 i 차량의 감·가속도⁸⁾, 그리고 t_i 는 i 차량이 감·가속한 시간⁹⁾, 그리고 t_r 는 후행차량이 반응을 하는데 소요된 시간이다.

식(2)를 후미추돌이 발생하는 경우에 대해 다시 정리하면 식(3)과 같이 된다.

$$0 \leq \frac{h}{d_b - d_a} \leq 1 \quad (3)$$

이 때, $f(v_i, a_i, h, t_i, t_r) = \frac{h}{d_b - d_a}$ 이라 두면, 식(4)에서 $d_b - d_a \rightarrow h$ 에서 $f \rightarrow 1$ 이 되어 두 차량은 추돌하게 된다. 또한, $d_b - d_a$ 가 음수일 경우에는 후미추돌에 대해 안전한 상태가 되며, h 를 초과하여 증가함에 따라 추돌가능성이 감소 즉, $f \rightarrow 0$ 이 된다.

따라서, 두 차량 사이에 존재하는 후미추돌위험은

6) 후행차량의 운전자는 선행차량의 감속률을 미리 예측하지 못하기 때문에, 선행차량이 선택할 수 있는 가능한 모든 감속률을 고려하여 경험적으로 운전함.

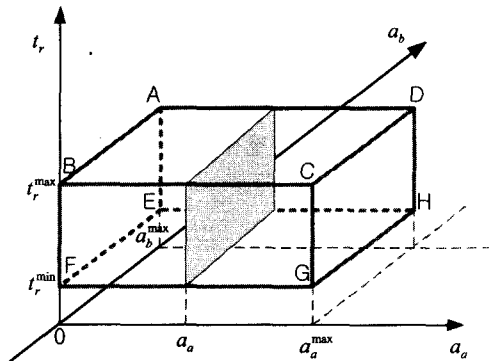
7) 후행차량의 운전자가 후미추돌의 위험을 피하기 위해 직접 관찰하는 것은 두 차량의 차간거리이므로, 모형개발시 차간거리를 이용하였음.

8) 두 차량은 일정한 감속률로 정지시까지 감속한다고 봄.

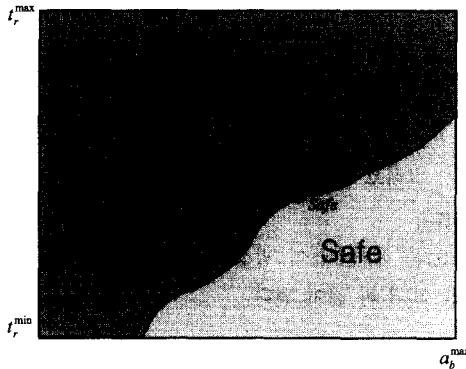
9) 매 초당계산되며, 감속시점에서 두 차량의 정지시까지 소요되는 시간

$v_a, v_b, a_a, a_b, h, t_r$ 에 의해 결정된다. 이 때, 두 차량의 주행상태는 각 차량의 속도와 두 차량간의 차간거리로 나타낼 수 있다.

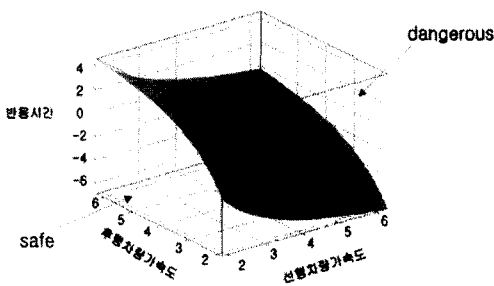
두 차량의 주행상태가 결정된 상황에서 후미추돌위험을 변화시킬 수 있는 변수는 선행차량의 감속에 대한 후행차량의 반응 즉, 감속과 반응시간으로 볼 수 있다.



〈그림 1〉 a_a 에 대한 후행차량의 상태변수 평면



〈그림 2〉 감속도 v.s 반응시작시간 평면



〈그림 3〉 최종 분석된 위험/안전 영역

이 때, 선행차량의 운전자가 선택할 수 있는 감속률은 〈그림 1〉¹⁰⁾에서 a_a 축의 한 점으로 결정될 수 있으며, 이러한 상황에서 후미추돌위험은 후행차량의 감속도와 반응시간에 대한 2차원 평면에서 결정된다. 즉, 식(2)를 만족하는 (a_b, t_r) 의 조합을 이 평면에 나타내면 잠재적인 후미추돌위험에 대해 위험영역과 안전영역으로 구분되며, 이 순간 두 차량 사이의 후미추돌위험은 〈그림 2〉와 같이 전체 면적에 대한 위험한 영역의 면적비로 결정된다.

일반적으로 한 운전자가 동일한 자극에 대해 보일 수 있는 반응 즉, 후행차량 운전자에 의해 선택되는 감속률 및 반응시간은 어떤 분포를 가질 수 있을 것이다. 하지만, 각 운전자에 대한 이러한 분포를 파악한다는 것은 거의 불가능하기 때문에, 본 연구에서는 후행차량 운전자에 선택될 수 있는 감속률과 반응시간은 동일한 선택확률을 가지는 것으로 전제하였다.

전술한 바와 같이 후행차량의 운전자는 선행차량의 감속정도를 미리 예측할 수 없기 때문에 두 차량사이에 경험될 수 있는 위험도를 평가하기 위해서는 선행차량의 운전자가 선택할 수 있는 모든 감속률이 고려되어야 한다.

따라서 어느 한 순간 두 차량사이의 후미추돌위험은 가능한 a_a 에 대해 어떤 (a_b, t_r) 의 조합을 선택하느냐에 따라 결정되므로, 〈그림 3〉과 같이 3차원 공간에서 결정된다.¹¹⁾

4. 후미추돌 평가모형개발(수학적 접근)

본 절에서는 위험도를 직접 계산하기 위한 수학적 모형식을 제시하였다.

선·후행 차량이 일정한 감속률로 감속하는 동안 이동한 거리를 각각 d_a, d_b 라고 하면,

$$d_a = v_a t_a + \frac{1}{2} a_a t_a^2 = -\frac{v_a^2}{2a_a} \tag{4}$$

$$d_b = v_b t_r + v_b t_b + \frac{1}{2} a_b t_b^2 = v_b t_r - \frac{v_b^2}{2a_b}$$

(단, $a_i = f_i \cdot g$) (5)

10) 〈그림 1, 2〉의 경우 변수간의 이론적인 관계도가 아닌 어떤 주행상황에서 운전자에 의해 선택될 수 있는 요소를 도식화한 것이며, 〈그림 3〉은 Matlab을 이용하여 최종적인 위험도 분석례를 보여주고 있음.

11) MatLab으로 분석한 결과를 정리하였으며, 프로그래밍상에서 좌표스케일을 맞추기 위해 z축상에 (-)부분이 포함됨.

여기서, g 는 중력가속도이며, f_i 는 i 차량의 타이어와 노면의 마찰계수이다.

후미추돌위험 곡선식은 $h + d_a = d_b$ 로 결정되며, 이를 반응시간, t_r 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$t_r = \frac{h}{v_b} + \frac{v_b}{2a_b} - \frac{v_a^2}{2a_a v_b} \quad (6)$$

(단, $a_{mod}^b \leq a_b \leq a_{max}^b$, $t_{min}^r \leq t_r \leq t_{max}^r$)

식(6)에서 기본변수(h, v_a, v_b)는 어느 한 시점에서 결정되며, 후미추돌위험은 선행차량이 선택할 수 있는 가능한 a_a 의 경우에 대해 계산된다.

결국, 식(6)은 a_b 에 따라 결정되며, 식(7)과 같이 정리된다.

$$t_r = k_1 + \frac{k_2}{a_b} \quad (7)$$

(단, $k_1 = \frac{h}{v_b} - \frac{v_a^2}{2a_a v_b}$, $k_2 = \frac{v_b}{2}$)

어느 한 a_a 에 대한 각 영역의 면적 S_D, S_{sys} 는 식(8), (9)와 같은 적분식에 의해 계산된다.

$$S_D = \int_{a_a^b}^{a_a^{max}} \{t_{max}^r - t_r(a_b)\} da_b \quad (8)$$

$$S_{sys} = \int_{a_a^{mod}}^{a_a^{max}} (t_{max}^r - t_{min}^r) da_b \quad (9)$$

따라서 모든 a_a 에 대한 위험도는 식(8)과 식(9)를 a_a 에 대한 적분함으로써 계산될 수 있다.

$$R_D = \int_{a_a^{mod}}^{a_a^{max}} \int_{a_b^b}^{a_b^{max}} \{t_{max}^r - t_r(a_b)\} da_b da_a \quad (10)$$

$$R_{sys} = \int_{a_a^{mod}}^{a_a^{max}} \int_{a_b^b}^{a_b^{max}} (t_{max}^r - t_{min}^r) da_b da_a \quad (11)$$

결국, 최종적으로 계산되는 후미추돌위험도는 식(12)와 같이 계산된다.

$$R = \frac{\int_{a_a^{mod}}^{a_a^{max}} \int_{a_b^b}^{a_b^{max}} \{t_{max}^r - t_r(a_b)\} da_b da_a}{\int_{a_a^{mod}}^{a_a^{max}} \int_{a_b^b}^{a_b^{max}} (t_{max}^r - t_{min}^r) da_b da_a} \quad (12)$$

5. 위험도 지수

본 절에서는 후미추돌위험을 객관적으로 비교할 수 있는 지표를 도출하기 위해 소음평가시 적용되는 두 가지 방법¹²⁾을 바탕으로 위험도 지수를 개발하였다.

소음과 위험은 발생원의 다양성, 주관적·심리적, 비축적성¹³⁾, 국소적 발생 등의 측면에서 서로 비슷한 속성을 가지기 때문에, 실제 위험에 대한 대푯값 선정문제는 소음의 그것과 유사하다고 볼 수 있다. 예를 들어, 소음과 위험의 변화는 복잡하고 불규칙할 뿐만 아니라, 강도와 빈도에 따라 사람마다 느끼는 정도가 다르다. 또한 피크가 생긴 순간에 측정된 값은 위험(소음)을 지나치게 과대평가할 것이며, 반면에 낮은 순간에 측정된 값은 위험(소음)을 과소평가하게 될 것이다.

소음충격과 같이 위험충격 또한 일정수준 이상이 되어야만 실제 위험한 상황이라고 인식되기 때문에 제 75백분위수 개념을 활용하여 일정 시점 또는 구간에서 조사된 위험도를 대표하는 값으로 정하였다. 이러한 값을 바탕으로, 각 구간의 위험도를 비교하기 위해 각 구간의 위험발생회수를 고려한 식(13)과 같은 '등가위험도'를 개발하였다.

$$R_{eq}^i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \times R_{75\%}^i \quad (13)$$

여기서, R_{eq}^i : i 번째 상황의 등가위험도

N_i : i 번째 상황에서의 위험발생횟수

n : 비교집단의 수

$R_{75\%}^i$: i 비교집단의 75분위 위험도

이와 같은 방법으로 m 초동안 관측된 n 대로 구성된 차량군 g 와 l 초동안 관측된 p 대로 구성된 두 차량군에 대한 등가위험도는 식(14), 식(15)와 같이 나타난다.

12) 등가소음도(L_{eq} : Equivalent Sound Level)와 L_n (누적백분률 소음도)

13) 소음과 위험은 일정 상황이 경과한 후 사라지게 되며 오염물질도 발생하지 않는다는 속성임. 하지만, 위험의 경우 임계수준을 넘어서는 순간 사고라는 결과가 나올 수 있기 때문에 두 현상사이에 약간의 차이는 존재함.

$$R_{eq}^g = \frac{m \times (n-1)^{75\%}}{N_t} \times R_{75\%}^g \quad (14)$$

$$R_{eq}^{g'} = \frac{p \times (l-1)^{75\%}}{N_t} \times R_{75\%}^{g'} \quad (15)$$

여기서,

$$N_t : m \times (n-1)^{75\%} + p \times (l-1)^{75\%}$$

$$(n-1)^{75\%}, (l-1)^{75\%}$$

: 각 차량그룹의 위험도 상위 25%에 해당하는 차량대수

R_{eq}^i : i 그룹의 등가위험도

$R_{75\%}^i$: i 그룹의 제 75분위 위험도

IV. 자료수집

모형검증을 위해 수집되어야 하는 자료는 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫째, 개발된 모형과 실제 발생한 사고와의 연관성 파악을 위한 차로별, 시간대별 사고건수, 둘째, 교통류 상황에 따른 후미추돌위험도를 평가하기 위한 거시적 교통류 자료, 마지막으로 도로구간의 위험도를 계산하기 위한 미시적 교통류 자료이다.

1. 사고자료

개발된 모형의 유의성 검증을 위해 서울시 교통관리센터와 교통방송, 그리고 외부기관 등의 협조를 받아 동절기를 제외한 2002년 3월~2002년 11월까지, 9개월 동안의 사고자료를 바탕으로 조사구간 1, 3차로에서 발생한 후미추돌사고에 대해 구간별, 차로별, 시간대별 자료를 정리하였다.

2. 거시적 교통류 자료

속도, 교통량, 점유율과 같은 거시적 교통류 자료는 각 도로구간에 설치된 영상검지기로부터 수집된 자료를 활용하였다.

수집된 검지기¹⁴⁾자료의 시간적 범위는 검지차량에

〈표 3〉 조사구간별 사고건수

시간	구간 1			구간 2		
	1차로	3차로	소 계	1차로	3차로	소 계
07:00-08:00	1	1	2	1	0	1
08:00-09:00	1	0	1	0	0	0
09:00-10:00	0	0	0	0	0	0
10:00-11:00	4	0	4	0	0	0
11:00-12:00	0	1	1	0	0	0
12:00-13:00	0	0	0	0	0	0
13:00-14:00	0	0	0	0	1	1
14:00-15:00	3	0	3	0	1	1
15:00-16:00	0	0	0	1	0	1
16:00-17:00	1	0	1	0	0	0
17:00-18:00	1	0	1	0	1	1
18:00-19:00	0	1	1	0	0	0
합계	11	3	14	2	3	5

의해 조사가 수행된 것과 같은 시간대(요일 및 시간)로 하였으며, 속도-교통량 그래프를 이용하여 분석을 위한 교통류 상황을 〈그림 4〉와 같이 4개 영역으로 구분하였다.

3. 미시적 교통류 자료

서울시 도시고속도로 1, 3차로를 대상으로 이틀간의 예비조사를 포함하여 총 8일간 현장조사를 수행하였다. 이 때, 구간별 차로별 특성을 반영하기 위해 동일 도로를 두 구간으로 구분하여 오전 7시~오후 7시까지 하루 총 12시간 조사를 수행하였다.¹⁵⁾

객관적인 자료수집을 위해 피 실험자의 선정은 매우 중요하다. 본 연구에서는 위험노출과 관련된 운전자분류기준¹⁶⁾과 서울시 운전자의 운전경력(면허소지기간) 및 성별을 바탕으로 피 실험자의 비율을 〈표 4〉와 같이 분류하여 조사를 수행하였다.

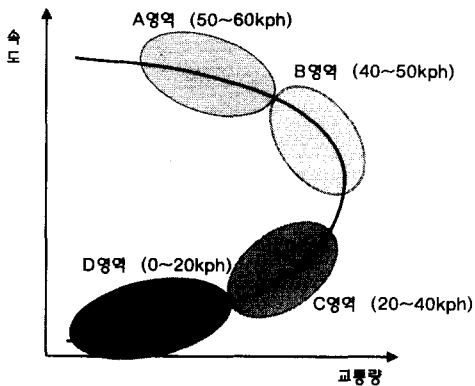
각 차량의 미시적 교통류자료를 수집하기 위해, (주)로티스에서 제작한 타코미터 분석기와 이 장비를 통해 올라오는 자료를 직접 log-in할 수 있는 컴퓨터 시스템을 설계, 구축하였다. 수집된 자료는 laptop 컴퓨터에서 코드변환 프로그램¹⁷⁾을 통해 가공되며, 엑셀 프로그램과 Matlab S/W를 통해 계산 및 분석되었다.

14) 구간 1의 대표검지기 : VK5090, 구간 2의 대표검지기 : VK5130

15) 서강대교~마포대교 구간을 구간 1로, 마포대교~원효대교 구간을 구간 2로 나타냄

16) Cohen(1989)

17) Visual Basic으로 코딩



(그림 4) 교통류상황 구분도

〈표 4〉 운전자그룹 분류

구분	운전자수	구분기준(운전경력)
Group 1	4	Novice drivers(1년 미만의 운전경력)
Group 2	2	Practiced drivers(1년~2년)
Group 3	7	Experienced drivers(3년~5년)
Group 4	7	Routine drivers(6년~10년)

4. 자료보정

타코미터에서 자료전송시 발생하는 노이즈와 노면의 비평탄성 및 주행궤적의 차이로 인한 노이즈를 제거하기 위해 2단계의 보정을 수행하였다.

조사구간의 거리와 실제 차량주행 거리의 차이는 평균분할법을 이용하여 보정하였다. 또한, 자료전송시 신호의 불규칙성으로 인해 발생하는 노이즈는 주행속도 및 초당 평균이동거리를 분석하여 이상점이 발생할 경우 이를 제거하였으며, 이러한 이상점이 제거된 자료는 Matlab에서 wavelet tool을 이용하여 노이즈를 제거하였다.

V. 결과분석 및 검증

위험도 계산을 위해서는 후행차량의 운전자가 선택할 수 있는 가능한 감속률과 반응시간이 결정되어야 한다. 이 때, 감속능력의 경우 차량의 성능 및 주행상태를 고려하여, 속도별 최대감속도 및 정상감속도로 구분하였으며, 반응시간은 기 연구된 결과를 바탕으로 0.5초~2.3초를 적용하였다.

1. 구간별, 차로별 위험도 분석결과

두 구간의 1차로에 대한 위험도 분석결과를 살펴보

면, 구간 1, 2의 1차로 위험도는 각각 0.882, 0.795로 나타나 구간 1의 위험도가 약간 더 높은 것으로 분석되었다. 하지만 등가위험도를 이용하여 두 구간의 위험도를 비교해 보면 구간 1의 1차로 등가위험도는 0.638, 구간 2의 1차로 등가위험도는 0.362로 구간 1의 등가위험도가 2배정도 높게 나타났다.

이를 각 구간의 1차로에서 발생한 사고건수와 비교하면, 구간 1의 경우 11건, 구간 2의 경우 2건으로 서강~마포구간의 사고건수가 훨씬 많은 것으로 나타나 위험도 분석결과와 일치하는 결과를 보여주고 있다.

각 구간의 3차로의 경우, 구간 1, 2의 등가위험도는 각각 0.612, 0.388로 나타나 구간 1의 등가위험도가 구간 2의 위험도에 비해 2배정도 높게 분석되었다. 하지만, 실제 사고건수는 각각 3건으로 위험도 분석결과와는 다소 차이가 있는 것으로 나타났는데, 이러한 차이는 비사고자료 기반모형에 의해 도출된 결과와 사고자료를 직접 비교하는데서 기인한다고 볼 수 있다.

구간 1의 위험도가 구간 2에 비해 높게 나타난 것은 두 구간의 기하구조와 각 구간에서 유입·유출되는 교통량에 의한 교통상황의 차이에 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 구간 1의 경우 2개의 진입로와 1개의 진출로가 존재하며, 구간 2의 경우 1개의 진입로와 2개의 진출로가 존재한다. 그리고 이러한 진·출입로에서 유출 또는 유입되는 교통량이 1차로의 위험수준에 많은 영향을 미치는데, 조사시점에서 구간 1의 경우 구간 2에 비해 진입, 진출하는 차량이 더 많은 것으로 분석되어, 이로 인해 구간 1의 위험도가 더 높게 나타난 것으로 볼 수 있다. 이 외에도 구간 1의 경우 각 진입·진출로 사이의 거리가 구간 2에 비해 가깝기 때문에 진입, 진출로 인한 혼잡효과는 더 심한 것으로 사료된다.

동일구간의 차로별 등가위험도를 살펴보면, 구간 1의 경우 1차로 등가위험도는 0.574로 3차로의 0.426에 비해 더 위험한 것으로 분석되었으며, 사고건수 또한 각각 11건, 3건으로 나타나 1차로가 3차로에 비해 위험하다는 것을 보여주고 있다. 구간 2의 경우 1차로 등가위험도는 0.547이며, 3차로는 0.453으로 이 구간 역시 1차로가 3차로에 비해 더 위험한 것으로 분석되었으나, 사고발생건수는 각각 2건, 3건으로 위험도 분석결과와는 다소 차이가 나는 것으로 나타났다.

1차로의 후미추돌위험이 상대적으로 더 높은 것은 1차로가 진·출입로와 연결되기 때문에 같은 구간일지라도 더 많은 차량의 간섭이 발생하며 이로 인해 더 큰

위험도가 나타나게 되는 것이다.

2. 교통류 상황별 위험도 분석결과

속도-교통량 곡선에서의 4가지 교통상황하에서 후미추돌위험을 살펴보면, 구간 2의 3차로를 제외하면 후미추돌에 대한 위험도는 D영역에서 가장 높게 나타났다. 이는 D영역에서의 교통상황은 거의 정체류로서 가다서다 현상이 반복되기 때문에, 정지시와 이동시 감·가속이 빈번하게 발생하여 후미추돌에 대한 위험도가 높게 나타난 것으로 분석된다.

구간 2의 3차로의 경우 C영역의 위험도가 D영역에 비해 높게 나타났으나 그 차이는 그렇게 크지 않은 것으로 모든 구간에서 C, D영역의 위험도가 A, B영역에 비해 높게 나타나 혼잡류상에서 후미추돌에 대한 위험이 더 크게 발생하는 것으로 분석되었다.

특히, 마포~원효 구간의 1차로를 제외하고는 B영역의 위험도가 A영역의 위험도 보다 낮은 것으로 나타났다. 이는 혼잡을 고려한 서비스 수준의 경우 소통이 자유로운 A영역이 더 높을 수 있으나, 후미추돌위험의 경우 차량이 어느 정도 있어 상대적으로 안정한 흐름을 보이는 B영역이 더 낮게 나타난 것이다. 이는 혼잡측면과 안전측면을 동시에 고려하여 도로의 서비스 수준을 산정한다면 기존의 체계와는 다른 결과를 보일 수 있음을 보여준다.

〈표 5〉 구간별 차로별 위험도

구분	표본개수		위험도	
	1차로	3차로	1차로	3차로
구간 1	1,579	1,299	0.882	0.795
구간 2	885	808	0.891	0.811

〈표 6〉 구간별 차로별 등가위험도

구분	구간별비교		차로별비교	
	1차로	3차로	1차로	3차로
구간 1	0.638	0.612	0.574	0.426
구간 2	0.362	0.388	0.547	0.453

〈표 7〉 영역별 등가위험도 분석결과

구분	서강~마포		마포~원효	
	1차로	3차로	1차로	3차로
A 영역	0.027	0.117	0.043	0.181
B 영역	0.019	0.023	0.128	0.052
C 영역	0.161	0.177	0.288	0.309
D 영역	0.671	0.385	0.427	0.268

VI. 결론 및 향후연구과제

1. 결론

본 연구에서는 기존 사고분석 및 위험도 평가모형의 한계를 극복하고, 도로-차량 시스템에 내재하는 위험도와 차량의 주행특성이 함께 반영된 위험도를 정의하기 위해 사고발생 가능성이라는 개념을 도입하여, 후미추돌위험을 평가할 수 있는 모형을 개발하였다.

모형에 의해 계산된 위험도를 대표할 수 있는 위험도 지수를 소음영향평가에서 사용하는 '등가소음도' 및 'L₁₀값'과 '백분위수의 평균'개념을 활용하여 개발하였으며, 상대적인 위험도 우위를 평가하기 위해 위험강도 및 지속시간을 고려한 '등가위험도'를 가중평균개념을 이용하여 개발하였다.

개발된 모형의 유의성 검증을 위해 서울시 내부순환도로 외선 구간에서 수집된 자료를 바탕으로 구간별, 차로별, 교통상황별 위험도를 도출하였으며, 이를 해당구간에서 수집된 구간별, 차로별 사고건수와 비교하였다. 분석결과 혼잡류 상황으로 갈수록 후미추돌 위험은 증가하였으며, 진입·진출의 영향이 많은 1차로에서의 위험도가 다른 차로에 비해 높게 나타났는데, 이는 해당구간의 사고자료와도 일치하는 결과를 보여주었다.

분석대상구간에 대해 후미추돌 발생가능성은 '서강대교~마포대교' 즉, 구간1의 1차로에서 가장 높게 나타났으며, 4가지 교통상황 중 D영역의 위험도 값이 가장 큰 것으로 분석되어 이러한 구간과 영역에 대한 적절한 운영 및 관리전략이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 도출된 결과는 향후 위험도의 객관적 비교·평가를 위한 방법론을 제시해 줄 수 있을 것이며, 이를 통해 안전을 고려한 도로설계지침 개발과 안전을 고려한 LOS 산정, 추돌회피모형 개발을 통한 시뮬레이션 적용, 시뮬레이션에 있어서의 새로운 효과적 도로서의 활용, 다양한 도로 시설물 건설시 위험도 평가를 제공, 도로 안전대책 수립시 위험도로 판단지표 등 그 활용분야는 무한할 것으로 판단된다. 이 외에도 최근 연구개발 중인 첨단안전차량(Advanced Safety Vehicle : ASV)에 사용되는 ACC(Adaptive Cruise Control) 시스템의 안전성을 평가할 수 있는 알고리즘으로 활용될 수 있을 것이다.

2. 향후연구과제

교통류의 불안정성은 추종과 차로변경에 의해 야기될 수 있는데, 본 연구에서는 조사 및 분석의 어려움으로 인해 차로변경에 의한 영향을 고려하지 않고 추종에 의한 후미추돌위험만을 고려하였으나, 향후 추종과 차로변경에 의한 복합적인 영향을 반영하여 좀 더 일반적인 모형개발이 이루어져야 할 것이다.

반응시간 및 자극에 대한 운전자의 반응의 경우 동일한 운전자라 할지라도 항상 같은 반응을 보이는 것은 아니기 때문에, 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 즉, 동일한 자극에 대해 운전자간의 반응이 어떤 분포를 보이듯이, 운전자내에서의 반응 또한 어떤 분포를 가질 것인데, 이는 본 연구에서 뿐만 아니라, 기하구조 및 다양한 도로설계시에도 반드시 필요한 내용으로 앞으로 연구가 필요한 분야라 판단된다.

등가위험도 계산에 앞서, 사고위험에 영향을 주는 위험도 기준을 설정할 때, 사고건수 또는 사고율과 위험도의 관계를 파악하여 좀 더 유의성있는 기준을 설정할 필요가 있다. 하지만, 조사구간에서 수집가능한 사고자료가 다소 부족하였기 때문에 이러한 관계를 파악할 수 없었다. 향후 민감도 분석기법 등을 이용하여 사고위험에 영향을 미칠 수 있는 객관적인 위험수준을 결정할 수 있는 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 모형개발 및 이의 검증에만 초점을 맞추었으나, 이러한 평가모형을 실제 설계시에 적용할 수 있도록 하기위한 연구가 수행되어야 할 것이다.

본 연구에서 제시한 방법론을 바탕으로 다양한 요인과 발생형태에 대한 사고위험을 설명할 수 있는 모형개발과 적용성에 대한 연구가 이루어진다면, 사고에 대한 안전대책수준은 한층 진일보할 것이며 이에 따라 교통선진국으로 발돋움할 수 있는 기틀이 마련될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 도철웅(1996), "교통공학원론", 청문각.
2. 엄광태·이영인(2002), "미시적 시뮬레이터를 이용한 도로 안전성 평가", 대한교통학회 추계학술대회.
3. 정성봉(2003), "미시적 주행특성을 반영한 교통류 위험도 평가기법개발", 서울대학교 박사학위논문.
4. 정준화(2001), "주행속도를 이용한 도로의 평면선형

안전성 평가모형개발", 서울대학교 박사학위논문.

5. Ali Touran, Mark A. Brackstone and Mike McDonald(1999), "A collision model for safety evaluation of autonomous intelligent cruise control", Accident Analysis and Prevention, 31, Pergamon, pp.567~78.
6. Drew, D. R.(1968), "Traffic Flow Theory and Control", McGraw-Hill Inc., pp.330~387.
7. Ferrari, P.(1989), "The Effect Of Driver Behavior On Motorway Reliability", Transportation Res.-B, Vol.23B, No.2, pp. 139~150.
8. Ferrari, P.(1994), "The Instability Of Motorway Traffic", Transprtation Research Board, Vol.28B, pp.175~186.
9. Gazis, D. C., R. Herman and Weiss, G. H.(1962), "Density Oscillations Between Lanes of a Multilane Highway," Operations Research, Vol.10, pp.658~667.
10. Herman, R., Elliott W. Montroll, Renfrey B. Potts, and Richard W. Rothery(1959), "Traffic Dynamics : Analysis of Stability In Car Following", Operations Research, Vol.7, pp.86~106.
11. Herman, R. and Richard W. Rothery(1967), "Propagation of Disturbances in Vehicular Platoons", Proceedings of the 3th international symposium on the theory of traffic flow, New York, pp.14~25.
12. Herman, R. and Tenny-Lam(1974), "Stability of Vehicle Platoons.", Proceedings of the 6th international symposium on the theory of traffic flow, pp.39~56.
13. Kononov J., Allery B.(2003), "Level of Service of Safety : A Conceptual Blueprint and the Analytical Framework", Transportation Research Board Annual Meeting, Jan 2003.
14. Stollnitz, E. J., T. D. DeRose and D. H. Salesin(1995a), "Wavelets for Computer Graphics: A Primer, Part 1.", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.15, No.3,

- pp.75~85.
15. Stollnitz, E. J., T. D. DeRose and D. H. Salesin(1995b), "Wavelets for Computer Graphics: A Primer, Part 2.", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.15, No.4, pp.75~85.
16. Triggs, T. J. and W. G. Harris(1982), "Reaction Time Of Drivers To Road Stimuli", Human Factors Report, No.HFR-12, Australia.
17. Xiaoyan Zhang and David f. Jarrett(1997), "Stability Analysis Of the classical car-following model", Transportation Research-B, Vol.31, No.6, pp.441~462.

✉ 주 작 성 자 : 정성봉

✉ 논문투고일 : 2004. 8. 27

논문심사일 : 2004. 10. 1 (1차)

2004. 11. 23 (2차)

심사판정일 : 2004. 11. 23

✉ 반론접수기한 : 2005. 4. 30