

□ 論 文 □

都市高速道路 交通流 制御戰略이 交通安全에 미치는 影響에 관한 研究

A Study on the Effect of Urban Freeway Traffic Control Strategies on Safety

姜 貞 奎

(도로교통안전협회 교통과학연구원 수석연구원)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경
 - 2. 연구의 목적 및 방법
- II. 관련 문헌 연구
 - 1. 도시고속도로 교통사고 예측모형
 - 2. 도시고속도로 교통류제어와 안전도
- III. 사고자료 분석 및 설명변수의 선정
 - 1. 사고자료 분석
- 2. 도시고속도로 안전도에 영향을 미치는 변수의 선정
- IV. 교통사고 예측 회귀모형의 정립
- V. 도시고속도로 교통류 제어전략이 안전에 미치는 영향의 평가
 - 1. 안전도 평가 방법론
 - 2. 사례 연구
- VI. 결론 및 제언

ABSTRACT

Based on the traffic and accident data collected on a 4.2 km (2.6 mile) section of Interstate highway 35W in Minneapolis the relationship between traffic operation variables and safety measures is investigated. An aggregate specification that could be integrated into an urban freeway safety prediction methodology is proposed as a multiple regression model. The specification includes lane occupancy and volume data, which are the control parameters commonly used because they can be measured in real time. The primary variables that appear to affect the safety of urban freeway are: vehicle-miles of travel, entrance ramp volumes and the dynamic effect of queue building. The potential benefits of freeway traffic control strategies on freeway safety are also investigated via a simulation study. It was concluded that improvement of urban freeway safety is achievable by traffic control strategies which homogenize traffic conditions around critical occupancy values.

1. 서론

1. 연구의 배경

도시고속도로는 대도시 도로망체계의 핵심적인 요소로서 우리 나라에서도 적극적인 건설계획으로 인해 수송분담률이 크게 증가할 전망이다. 특히 서울시는 1기 도시고속도로 건설사업이 완료되는 1997년까지 321km의 도시고속도로망이 확충될 예정이어서 광역교통량 처리 측면에서 장차 중추적인 역할을 담당할 것이다. 도시고속도로는 자동차 통행기능을 특화시켜 진출입이 제한되는 연속교통류를 담당한다는 점에서 신호등의 통제를 받는 간선도로와 구분되며, 교통류해석의 기본이 되는 교통량, 밀도, 속도와의 관계로부터 정체와 비정체의 구분이 명확히 나타난다. 그러나 도시고속도로는 그 기능상 도시지역에 위치하므로 높은 통행수요, 빈번한 진·출입램프, 잦은 구간용량변화, 그리고 제약된 기하구조로 인하여 반복적 혼잡발생 비율이 높다는 점에서 지역간 고속도로와 구분된다. 동태적(dynamic) 혼잡은 운전자의 운행을 어렵게 하여 유고나 교통사고로 연결될 소지가 높으며 이는 또 다른 혼잡을 발생시킨다. 이러한 운행상의 문제는 대규모의 건설로 완화될 수 있지만 현실적으로 많은 제약이 따른다. 가능한 대안으로서 고속도로의 교통류를 제어, 관리함으로써 혼잡을 완화시키며 동시에 도로용량을 증진시킬 수 있다. 또한 고속도로의 흐름이 정상류를 유지함으로써 주행안전도가 증진하는 효과가 있는 것으로 보고되고 있다.

따라서 외국의 대도시에서는 도시고속도로 교통관리시스템(FTMS)을 구축하여 보다 효율적인 도로이용을 꾀하고 있으며, FTMS의 첨단 기술들은 기본적으로 대규모시설 건설없이 교통류관리, 제어 등을 통하여 교통혼잡을 완화하

고자 하는 미래교통의 해결대안이다. 이들 요소 기술들은 장차 첨단교통체계(ITS)구축에 중추적인 역할을 담당할 전망이다. 그 중 진입램프 미터링(entrance ramp metering)은 진입램프에서 차량을 통제하여 본선의 수송능력을 높이려는 기법으로서 유고관리와 함께 도시고속도로 교통관리체계의 핵심을 이루며 지속적인 연구가 이루어지고 있다.

그러나 도시고속도로에 대한 연구는 교통혼잡을 완화시키는 교통류관리 차원에서 주로 행해져 왔으며, 이들 교통류 제어전략이 안전에 미치는 영향에 관한 체계적인 연구는 진행되지 못하였다. 비교적 통행량이 낮은 지역간 고속도로의 경우 도로의 기하구조나 교통량이 사고발생에 미치는 영향에 관한 연구가 다각적으로 연구되어 왔다. 그러나 도시고속도로의 교통사고에 관한 연구는 아직 국내에는 전무한 실정이고, 특히 교통류 제어전략이 안전에 미치는 영향에 관한 연구는 외국에서도 극히 제한된 시도가 이루어지고 있을 뿐이다. 기존의 자료에 의하면 우수한 교통류 제어전략을 시행후 현저한 사고감소 효과가 있는 것으로 보고하고 있으나, 이들 제어전략이 교통안전에 미치는 영향을 계량화시키는 방법론은 아직 제시되지 않고 있다. 그 이유는 첫째, 도시고속도로에서의 교통사고는 밀도나 속도 등의 혼잡도와 관련된 동태적 운영변수(dynamic operation variables)와 관련이 있어서 이들 운영변수가 고려된 사고예측모형이 아직 정립되어 있지 못하고 있고, 둘째, 제안된 교통제어전략이 이들 운영변수에 미치는 영향을 계량화시키는 방법이 아직 제시되지 못한다는데 있다.

2. 연구의 목적 및 방법

본 연구의 목적은 도시고속도로 교통류 제어

전략이 교통안전에 미치는 영향을 계량화하는 방법론을 제안하는 것이다. 따라서 '기존의 도시고속도로 사고예측모형을 검토하고 혼잡이 사고에 미치는 영향에 관한 문헌도 조사한다. 그리고 미국내 대표적인 도시고속도로 구간에서 수집된 사고자료와 교통량자료를 바탕으로 도시고속도로의 동태적 교통운영변수가 교통사고에 미치는 영향을 기술할 수 있는 회귀모형을 정립하고자 한다. 마지막으로 교통류 제어전략을 도입했을 경우에 교통류 운영상태에 미치는 변화를 시뮬레이션에 의해 예측한 후 사고에 미치는 영향을 계량화시키는 방법을 제시하며, 사례연구를 통하여 제안된 방법론의 유효성을 평가한다

II. 관련 문헌 연구

1. 도시고속도로 교통사고 예측모형

1950년대 이후로 교통사고와 도로의 기하구조 및 통행변수간의 관계를 찾아내기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 통행안전도는 도로의 기하구조 및 운영변수에 의해 영향을 받는다는 가정하에 사고율과 이들 변수들간의 관계를 기술할 수 있는 거시적 모형이 주로 회귀모형의 형태로 개발되어 왔다. 본 연구의 목적이 도시고속도로의 안전도에 미치는 영향을 계량화시킬 수 있는 기법을 제안하는데 있으므로 기존 도시고속도로 사고예측모형을 회귀모형을 중심으로 검토한다. 교통사고 예측 회귀모형은 종속변수와 설명변수들과의 조합에 따라 다음과 같이 세가지 유형으로 구분할 수 있다.

- (1) 사고율과 도로의 기하구조
- (2) 사고빈도와 교통량 (주로 연평균 일 교통량)

(3) 사고빈도와 교통량 및 기하구조

첫 번째 유형은 도로의 기하구조 가운데 특정한 항목이 교통사고에 영향을 미친다는 가정하에 교통사고율과 기하구조간의 관계를 정립하려는 것이다 (Agent and Deen, 1975; Gupta, 1975; Polus, 1980). Gupta(1975)는 사고와 시거 및 평면곡선간에 주목할만한 상관관계가 있는 것으로 보고하였으나 유의한 다중선형회귀모형을 도출하는데는 실패하였다. Polus(1980)는 이스라엘에 소재한 2차선 고속도로에서 발생한 사고를 중심으로 교통사고 예측모형 정립을 시도하였다. 평균주행속도, 곡선반경, 구배, 최대와 최소 곡선반경 비율 등의 기하구조 관련변수를 설명변수로 하여 모형정립을 시도한 결과 평균주행속도(평균 곡선반경과 높은 상관관계를 보임)가 사고에 영향을 미치는 변수로 파악되었으며 구배의 영향은 미미한 것으로 분석되었다. 이상과 같은 시도는 교통사고를 야기하는 기하구조를 개선하기 위한 도로공학 중심적인 시도이며 낮은 설명력을 나타내는데 (낮은 R^2) 그 특징이 있다. 도로를 포함한 환경적 요인의 교통사고 관련비율은 35% 정도라고 보고하고 있어(Shinar, 1980) 기하구조만으로 설명력이 높은 사고예측모형 정립에 한계가 있으며 교통류 제어전략에 의해 통제 가능한 운영변수가 고려되지 않기 때문에 교통류 제어전략 대안들이 안전도에 미치는 영향을 계량화하는데는 부적합하다.

두번째 범주는 교통량과 사고율간의 관계를 밝히려는 시도이다(Oppe, 1989; Pfunt, 1969; Cedar and Livneh, 1982; Cedar, 1982). 日平均 교통량(ADT)이 가장 빈번히 사용되는 설명변수로서 비선형 회귀모형의 정립이 시도되었으며 대표적으로 Turner 와 Thomas(1986)의 연구를 들 수 있다. 이들 ADT를 이용한 회귀모형은 주로 거시적인 구간을 대상으로 시도되었기 때

문에 높은 설명력 (높은 R^2)을 갖는 것이 특징이다. 이러한 모형은 특정지역에서 교통사고율의 추이를 분석하는데 적용되어 왔으나 사고를 설명하는 구체적인 인자가 고려되지 않고 있어서 특정 도로구간과 같은 미시적인 사고분석에는 부적합하다. 이에 주목하여 Cedar와 Livneh(1982)는 1시간 교통량을 유일한 설명변수로 하여 사고율과 교통량간의 비선형 관계식을 제안하였다. 그러나 교통량과 교통밀도간에는 비선형관계가 존재하기 때문에 교통량만을 가지고는 혼잡에 의한 영향을 명확히 반영하지 못하며, 특히 1시간 교통량으로도 도시고속도로 운영변수들의 동태적인 변화를 기술하는데는 한계가 있다.

세번째 유형은 교통사고 빈도를 교통량 및 도로기하구조의 함수로 보고 사고예측 모형을 개발하는 것이다 (Jara-Diaz and Gonzalez, 1986; Thomas and Gallon, 1988; Sullivan, 1990; Benekohal and Hashimi, 1992). Thomas와 Gallon(1988)은 Turner와 Thomas(1986)가 제시한 모형에 구배와 곡선반경에 관련된 변수를 추가하여 모형의 설명력을 개선하였으며, 도로의 기하구조 자체는 사고발생에 미치는 직접적인 영향력이 매우 낮다고 분석하였다. Jara-Diaz와 Gonzalez(1986)는 도로의 기하구조가 교통사고에 미치는 영향은 다변량 테일러전개에서 유도된 비선형 관계식에 의해서 보다 뚜렷이 나타나므로 ADT, 구배, 곡선반경 같은 설명변수의 자승이나 설명변수들간의 곱에 의해 보다 유의한 회귀모형 정립이 가능하다고 주장하였다. Sullivan (1990)은 미국 캘리포니아 고속도로에서 수집된 자료를 바탕으로 고속도로 혼잡도를 고려한 교통 사고빈도 예측 회귀모형을 개발하였는데, Sullivan의 모형은 다음과 같은 가설에 근거를 두고 있다. 즉, 고속도로에서의 교통사고는 혼잡구간의 상류경계에서 주로 발생

하는데 여기에서는 운전자가 정체구간의 초입에서 적절한 감속이나 차선변경에 실패하기 때문이다. 이 자료의 분석에 의하면 혼잡구간의 사고율은 비정체구간의 사고율보다 2-3배나 높다는 것이다. 장명순(1982)은 사고율과 선형노출함수의 자승에 의해 설명되는 회귀모형을 제안하였다. 장명순의 모형에 의하면 교통사고빈도는 시간당 교통량, 단위거리(mile)당 진·출입 램프수가 증가함에 따라 증가하며, 여유차선 및 구간혼잡도(queue가 없는 피크기간의 비율)가 낮아질수록 사고빈도가 낮아진다는 것이다. Benekohal과 Hashimi(1992)는 ADT와 차선폭 및 길어깨폭을 설명변수로 하여 2차선 고속도로의 교통사고빈도 예측모형을 정립하였는데, ADT 500-5,000 대의 범위에서는 선형모형이 비선형모형보다 설명력이 높은 것으로 보고하고 있다.

2. 도시고속도로 교통류제어와 안전도

일반적으로 교통류제어는 도시고속도로의 흐름을 비정체류로 유지하여 운영효율을 높여 주며 안전하고 예측 가능한 서비스수준을 제공한다. 또한 안전도 개선에도 탁월한 효과를 있어서 미국의 대표적인 7개 지역에서 교통류 관리 사업을 실시한 결과 평균 31%의 사고감소가 있는 것으로 보고되고 있다(US DOT, 1985). 특히 진입램프미터링은 본선 뿐만아니라 램프진입부에서의 교통사고를 감소시키는 효과가 있다. 차량이 진입램프를 통하여 본선에 주행할 경우 빈번히 일어나는 사고는 램프에 있는 차량군(platoon)이 본선상의 흐름에 끼어들기 위하여 서로 경쟁하는 과정에서 발생하는 후미충돌과 차선변경시 충돌이다. 이러한 사고는 진입램프미터링으로 차량群을 통제하여 동일한 차두간격을 갖도록 조절함으로써 개선이 가능하다. 미네아

폴리스의 경우 진입램프미터링을 시행한 이후 도시부 고속도로 I-35W의 통행속도가 시간당 10 mile 이상 증가하고 사고율이 현저히 낮아진다고 보고되고 있다. 이와 같이 부가적인 안전 개선계획의 시행없이 교통류 제어전략만으로도 도시고속도로의 안전도를 증진시킨다는 사전/사후 분석이 보고되고 있으나 이를 계량화시키기 위한 체계적인 연구는 아직 수행되지 못하고 있다.

이상의 연구를 종합할 때 교통류 제어방식이 도시고속도로의 안전도에 미치는 영향을 기하구조나 ADT로 계량화하는데는 한계가 있어서 새로운 시도가 필요하다. 즉, 기하구조 자체는 사고발생에 미치는 직접적인 영향력이 낮지만, 이는 도시고속도로의 운영상태에 영향을 미쳐 사고발생에 간접적으로 기여하며 이러한 운영상태는 ADT나 1시간당 교통량보다는 교통류 제어전략에 의해 통제 가능한 단기간교통량이나 혼잡도를 나타내는 밀도 등의 동태적인 운영변수들로 보다 잘 설명될 수 있다는 해석이 가능하다.

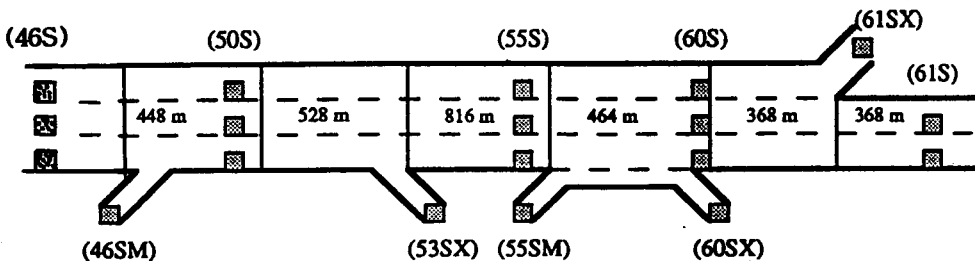
III. 사고자료 분석 및 설명변수의 선정

1. 사고자료 분석

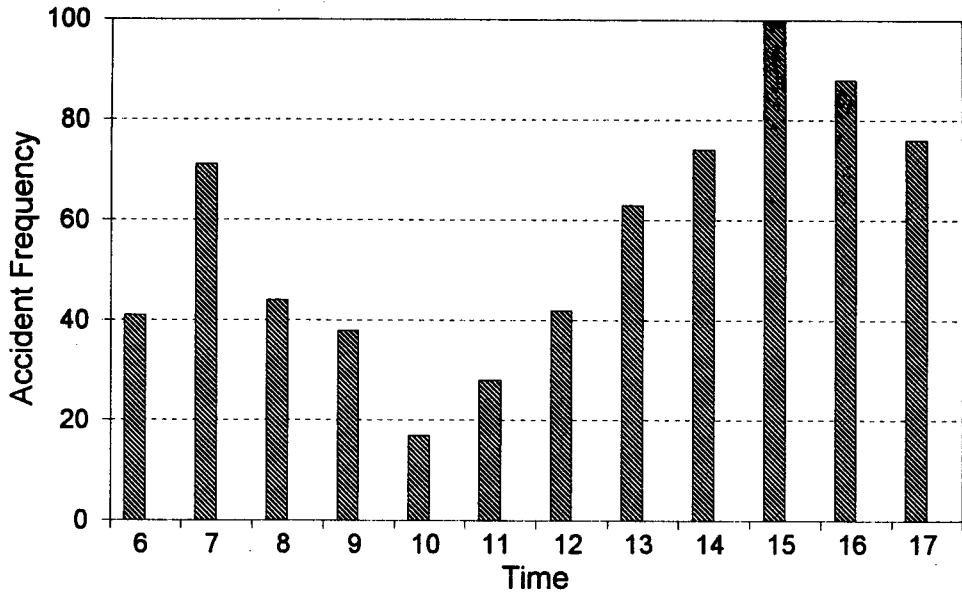
이 연구에 필요한 자료를 수집하기 위해 미

국 미네소타주 미네아폴리스시 도심을 통과하는 州間 고속도로(Interstate highway) I-35W의 46번 街에서 61번 街까지 4.2km(2.6mile)를 대상 구간으로 선정하였다 (<그림 1> 참조). 이 구간은 5개의 진·출입로가 조밀하게 배치되어 있고, 하류부에서 노선을 공유하는 州 고속도로(state highway) 62번이 (검지기번호 61S) 分枝하고 있다. 이 구간은 첨두시 차선당 교통량이 2,400대를 육박하는 높은 통행수요, 조밀한 진·출입램프로 인한 잦은 차선변경, 짧은 회전반경 등 전형적인 도시고속도로의 통행특성 및 기하구조를 보여주고 있다. 따라서 이 구간은 미네아폴리스시 주변 도시고속도로 중 가장 높은 교통사고율을 보이고 있다. 미네소타주 교통관제센터(Traffic Management Center: TMC)에서 1990년부터 1992년까지의 2년 동안 사고자료와, 5분 단위의 교통량과 점유율자료를 수집하였다. 동 기간동안 대상구간 4.2km에서 발생한 총 사고건수는 258건이며, 447건의 유고가 기록되었다. 여기에서 유고는 교통사고를 포함하여, 노건정지 차량, 경찰차량, 작업인력 등 통행에 장애를 주는 제반 사건을 지칭한다. <그림 2>는 사고의 시간대별 분포를 나타내는데 오전 첨두시 1시간(7-8시)을 제외하고는 오후시간대에 사고가 집중적으로 발생하고 있다.

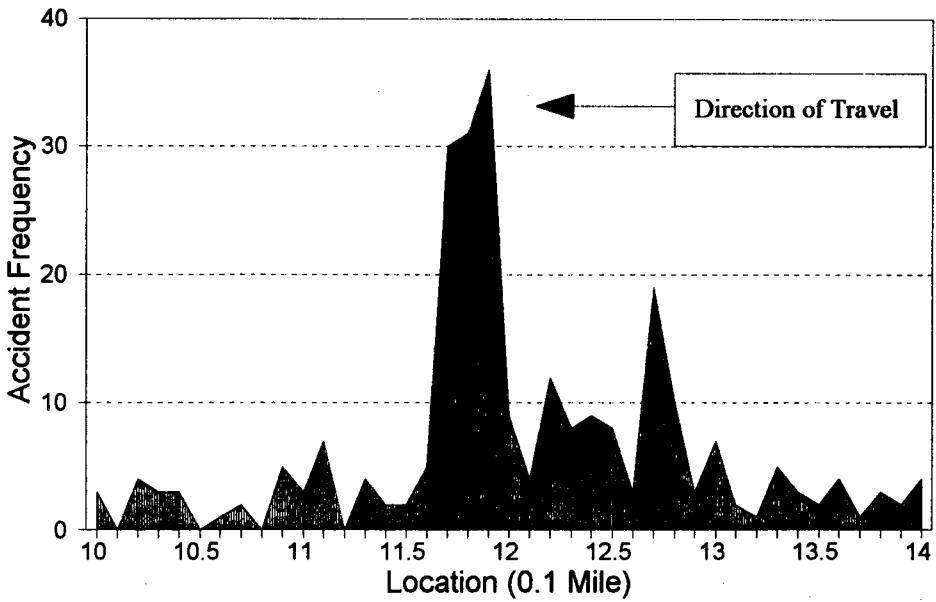
<그림 3>은 대상 고속도로 구간에서 발생한 교통사고빈도를 0.1 mile 간격으로 나타낸 것으로서 마일지점 14.0이 최상류부이며 마일지점 10.0



<그림 1> 분석대상 구간의 기하구조



〈그림 2〉 교통사고빈도의 시간대별 분포(1991-1992)



〈그림 3〉 교통사고빈도의 고속도로 지점별 분포

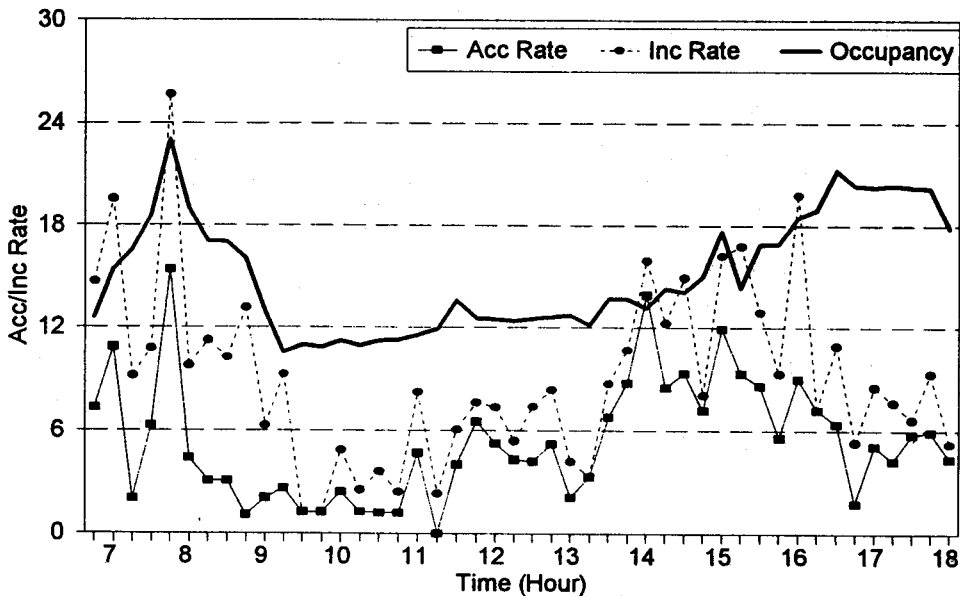
이 최하류부이다. 가장 사고가 빈발한 구간은 마 일구간 12.0-11.7로서 마일지점 11.5에서 분지하는 62번 州고속도로로 진출하려는 높은 교통수요 (첨두시 2,000대/시)로 인한 잦은 차선변경과 그 하류부의 차선수가 2개로 줄어드는 이유로 피크 시 상승적인 정체가 발생하는 구간이다.

운영변수와 안전도 (사고/유고빈도, 사고/유 고율을 지칭함)간의 동태적인 관계를 파악하기 위하여 사고자료를 15분 단위로 구분하였으며, 대상시간은 오전 6시 30분부터 오후 6시까지로 제한하였으므로 총 46개의 관측시간 간격을 갖는다. <그림 4>는 대상구간의 백만 주행-mile당 사고율 및 유고율, 혼잡도를 나타내는 5개 검지 기의 평균점유율간의 시간대별 관계를 나타낸 것이다. 전반적으로 유고율과 사고율은 점유율이 증가할수록 높아지고 있는데, 점유율이 높아 진다는 것은 혼잡도가 높아져 차두간격이 짧아 지므로 그만큼 사고위험이 높아진다는 점에서 예견된 결과이다. 이는 정체 형성시의 사고율이

비정체시보다 2배 이상 높다는 기존의 연구 (Sullivan, 1992)와 일치한다. 그러나 <그림 4>를 주의깊게 관찰하면 흥미로운 현상이 발견된다. 정체가 가장 심한 16-18시의 사고/유고율이 14-16시의 사고/유고율보다 낮다는 점이다. 그 이유는 14-16시는 정체가 형성되어 가는 시간대로서 일단 정체가 형성된 후인 16-18시보다 주행 상황의 변동이 심한 시간대이기 때문으로 추정 된다. 기간은 짧지만 오전 첨두시간대의 급격한 사고/유고율의 변화도 같은 이유로 설명이 가능할 것이다. 이상의 관측은 도시고속도로 사고 예측 회귀모형을 개발할 경우에 혼잡도와 관련된 설명변수가 도입되어야 함을 시사한다.

2. 도시고속도로 안전에 영향을 미치는 운영변수의 선정

이 절의 주요목표는 도시고속도로의 안전도에 영향을 미치는 운영변수를 선정하는 것이다. 먼



<그림 4> 시간대별 점유율과 사고 및 유고율간의 관계

저 대상고속도로의 기하구조, 운영변수, 사고자료에 대한 분석을 통하여 사고와 상관관계를 갖는 변수의 규명을 시도하였다. 1차적으로 선정된 변수의 정의가 <표 1>에 요약되어 있다. 변수 MNVODIF/ONVODIF는 각자 본선교통량/진입램프교통량에 점유율의 변화를 가중한 것으로서 동적인 운영변수를 도입하려는 시도이다

이들 계변수들이 서로 어느 정도의 상관관계를 갖고 있는지를 알아보는 상관행렬은 <표 2>와 같으며 선정된 사고/유고 건수와 변수들은 모두 정(+)의 상관관계를 보이고 있다.

IV. 교통사고 예측 회귀모형 정립

교통사고에 어떠한 요인들이 영향을 미치고

있는지를 계량화하기 위하여 수리적 모형이 주로 사용된다. 이들 모형의 주요 장점은 모형을 이용하여 대상시설의 개선대안을 평가하는데 이용할 수 있다는 것이나 모형에 포함되지 않은 변인들의 영향이 고려되지 못한다는 단점이 있다. 이의 대표적인 것으로 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)을 들 수 있는데 분석시 다중공선성(multiple collinearity)의 문제, 離分散의 문제 등에 유의하여야 한다

본 연구에서 사고예측 회귀모형을 정립하기 위하여 자료를 수집하고 분석하는데 있어서 기본 가정은 첫째, 사고/유고빈도는 총 차량주행거리(MNVM)와 진·출입 교통량 등에 의해 영향을 받으며, 둘째, 사고율/유고율은 차선변경이나 급제동을 야기할 수 있는 진·출입 교통량과 본선의 혼잡도에 의해 영향을 받는다는

<표 1> 사고/유고 예측모형에 도입될 변수의 정의

| 변수명 | 정의 |
|-------------|--|
| MNV_{it} | 단위시간간격 $t(=15\text{분})$ 동안 검지기 i 를 통과한 차량수 |
| OCC_{it} | 단위시간간격 $t(=15\text{분})$ 동안 검지기 i 의 평균점유율 |
| ACF_t | 대상구간에서 단위시간간격 t 에 2년동안 발생한 사고빈도 |
| INF_t | 대상구간에서 단위시간간격 t 에 2년동안 발생한 유고빈도 |
| $MNVM_t$ | 본선의 총 차량주행거리(veh-mile) |
| ONV_t | 대상구간에 진입한 총진입램프 교통량 |
| OFV_t | 대상구간에서 진출한 총진출램프 교통량 |
| $MNVODIF_t$ | 본선교통량에 점유율의 변화를 가중, $\sum_{i=1}^N [MNV_i \cdot (OCC_{it} - OCC_{it-1})]$ |
| $ONVODIF_t$ | 진입램프교통량에 점유율의 변화를 가중, $\sum_{i=1}^N [ONV_i \cdot (OCC_{it} - OCC_{it-1})]$ |

주: (1) N = 검지기 개수(여기서는 46S, 50S, 55S, 60S, 61S 의 5개)

(2) t = 관측시간 간격(=15분)

<표 2> 도입변수의 상관분석 결과

| | ACF | INF | MNVM | ONV | OFV | MNVODIF | ONVODIF |
|---------|-----|-----|------|-----|-------|---------|---------|
| ACF | - | .87 | .64 | .19 | .53 | .41 | .40 |
| INF | - | - | .57 | .42 | .42 | .45 | .45 |
| MNVM | - | - | - | .02 | .92 | .41 | .40 |
| ONV | - | - | - | - | -0.16 | .23 | .37 |
| OFV | - | - | - | - | - | .26 | .19 |
| MNVODIF | - | - | - | - | - | - | .37 |
| ONVODIF | - | - | - | - | - | - | - |

〈표 3〉 회귀분석 결과

| 종속변수 | 상 수 | 설 명 변 수 | | | | R ² |
|------|-------------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| | | MNVM | MNVODIF | ONV | OFV | |
| ACR | -10.35 (-2.64) | | .00026 (1.74) | .035 (1.79) | .037 (4.07) | .42 |
| ACF | -14.99 (-3.44) | .0054 (4.68) | .00015 (1.5) | .023 (1.26) | | .46 |
| INR | -17.73 (-3.24) | | .0004 (1.89) | .013 (3.75) | .047 (3.73) | .48 |
| INF | -23.83 (-3.91) | .007 (4.3) | .0002 (1.42) | .087 (3.4) | | .51 |

註: () 안의 숫자는 t-value 이며 자유도 45에 대한 5%의 유의수준에서 임계값은 ≈ 2.0

것이다. 따라서 제안된 변수들간의 상호관련성을 찾아 함수관계를 규명해 보기 위해 본 연구에서는 총주행거리(MNVM), 진출입교통량(ONV,OFV), 혼잡도를 나타내는 점유율(OCC), 기타 조합변수들(MNVODIF, ONVODIF)을 설명변수로 하고, 도시고속도로의 안전도를 나타낼 수 있는 교통사고빈도(ACF), 교통사고율(ACR), 유고빈도(INF), 유고율(INR)을 종속변수로 하여 다음과 같은 일반적인 형태를 갖는 모형정립을 시도하였다.

$$\text{안전도} = \text{function} [\text{MNVM}, \text{ONV}, \text{OFV}, \text{OCC}, \text{MNVODIF}, \text{ONVODIF}]$$

이상과 같은 함수관계를 바탕으로 종속변수가 몇개의 설명변수로 어떻게 설명 또는 예측되는지를 규명하기 위하여 SPSS Package의 Stepwise Procedure를 이용하여 모형정산을 시도하였으며 〈표 3〉은 최종 선정된 사고빈도, 사고율, 유고빈도, 유고율을 대표하는 최적회귀모형 결과를 요약한 것이다.

먼저 사고빈도(ACF)와 유고빈도(INF)에 영향을 미치는 변수로는 총 주행거리(MNVM), 진입교통량(ONV), 그리고 본선상의 동적인 정체현상을 나타내는 MNVODIF가 선정되었다.

특기할 사항은 ACF나 INF에 영향을 미칠 것으로 사료되던 변수 OFV(진출교통량)가 변수 MNVM(총 주행거리)와의 높은 상관관계($\rho = 0.92$) 때문에 모델구성에서 누락되었다는 점이다. 한편 사고율(ACR)과 유고율(INR)에 영향을 미치는 변수로는 진입교통량(ONV)과 동적혼잡가중변수 MNVODIF가 선정되었다. 전반적으로 유고빈도(INF)나 유고율(INR)의 경우 회귀식의 설명력이 사고빈도(ACF)나 사고율(ACR)보다 높게 나타나고 있는데 이는 관측표본수(총관측 유고수=447건, 총관측 사고건수=258건)의 차이에서 오는 한계로 보여진다. 〈표 3〉에서 () 안의 숫자는 t-value 이며 자유도 45에 대한 5%의 유의수준에서 임계값은 약 2.0이다. 일부 안전도에 필연적으로 영향을 미친다고 판단되는 변수의 유의도가 떨어지기는 하지만 ($t\text{-value} < 2.0$) 이는 자료수집의 한계로 보여진다.

이 모형은 도시고속도로 교통제어전략에 의해 영향을 미칠 수 있는 동적운영변수(15분 단위 교통량 및 점유율)의 조합만으로 도시고속도로의 안전도를 계량화 하였다는데 그 특징이 있다. 도시고속도로 교통류의 동적인 특성을 보다 잘 반영하기 위해 5분 단위의 분석을 시도하였으나 관측구간당 낮은 표본수로 인한 離分散

의 문제로 인해 유의한 통계모형구성에 성공적이지 못하였다.

V. 도시고속도로 교통류 제어전략이 안전에 미치는 영향의 평가

1. 안전도 평가방법론

도시고속도로 교통류 제어전략 대안이 안전에 미치는 영향을 평가하기 위하여 다음과 같은 방법을 제안한다

- 1단계 : 대상구간의 사고자료 및 운영변수의 수집
- 2단계 : 운영변수를 설명변수로 하는 안전도 예측 회귀모형 정립
- 3단계 : 교통류제어전략 대안을 실행시 대상구간의 설명변수를 simulation 에 의해 예측
- 4단계 : 3단계에서 예측된 설명변수를 회귀모형에 대입하여 각 대안별 (미시행 포함) 안전도 예측

2. 사례연구

현재 미네소타주 교통관제센터(Traffic Management Center: TMC)에서는 도시고속도로 구간에 FTMS(Freeway Traffic Management System)를 시행하고 있는데 이 시스템을 근간으로 Minneapolis市와 Saint Paul市를 포함하는 Twin Cities의 도시고속도로망을 종합적으로 관리, 제어할 수 있는 Guidestar 프로젝트를 수행 중에 있다. Guidestar 프로젝트는 미국내에서 대표적인 첨단교통운영체계(ATMS)의 사례로서 주목받고 있으며 그중 진입램프 미터링은 본선의 교통상황에 따라 가변적으로 램프 유입량을

조절하는 방식으로서 유고관리체계(Incident Management System)와 함께 대표적인 도시고속도로 교통류 관리전략이다.

현재 TMC에서 시행하는 도시고속도로 교통류 제어방식은 실시간으로 검지한 교통량과 점유율을 바탕으로 최적 유입량을 가변적으로 결정하는 교통류감응식(Traffic Responsive) 진입램프 제어방식이다. 대상 고속도로의 모든 진입램프와, 본선 0.8 km(0.5 mile) 간격으로 설치된 루프검지기에서 교통량과 점유율 정보를 제공하며, 일부 구간에는 영상검지기가 시험가동 중에 있다. 대상 진입램프 상류부의 본선 검지기와 진입램프 검지기에서 측정된 교통량을 바탕으로 통행수요를 산정하며, 하류부 검지기들의 교통량과 점유율자료를 바탕으로 여유용량이 산정 된다. 이를 바탕으로 본선의 점유율을 임계치(16-20%)이하로 유지되도록 최적 진입교통량을 결정하는 방식이다.

본 연구에서는 TMC 교통류 제어방식을 사례로 하여 교통류제어가 도시고속도로의 안전도에 미치는 영향을 모의실험을 통하여 평가하였다. 먼저 제어방식을 도입시 다양한 상황에서 도시고속도로상의 교통운영변수(traffic operation variables)에 미치는 동적인 영향을 계량화할 수 있는 도구가 필요하다. 이를 위해서 University of Minnesota에서 개발한 TMC Control Emulation Program(TMC-CEP)을 이용하였다 (Chang, 1994). TMC-CEP는 다양한 TMC 교통류제어방식 대안을 시뮬레이션하는 기능을 갖고 있는데, macroscopic simple continuum 교통류 모형을 바탕으로 특정대안하에 본선상의 교통운영변수들(교통량, 밀도)을 동태적으로 예측할 수 있다. 또한 진입·출입램프, 엇갈림, 차선감소 등의 기하구조하에서의 상황을 다양한 시간간격(30초, 5분, 15분 등)으로 요약해내는 기능을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서

는 TMC-CEP를 이용하여 다음과 같은 제약조건하에 모의실험을 수행하였다.

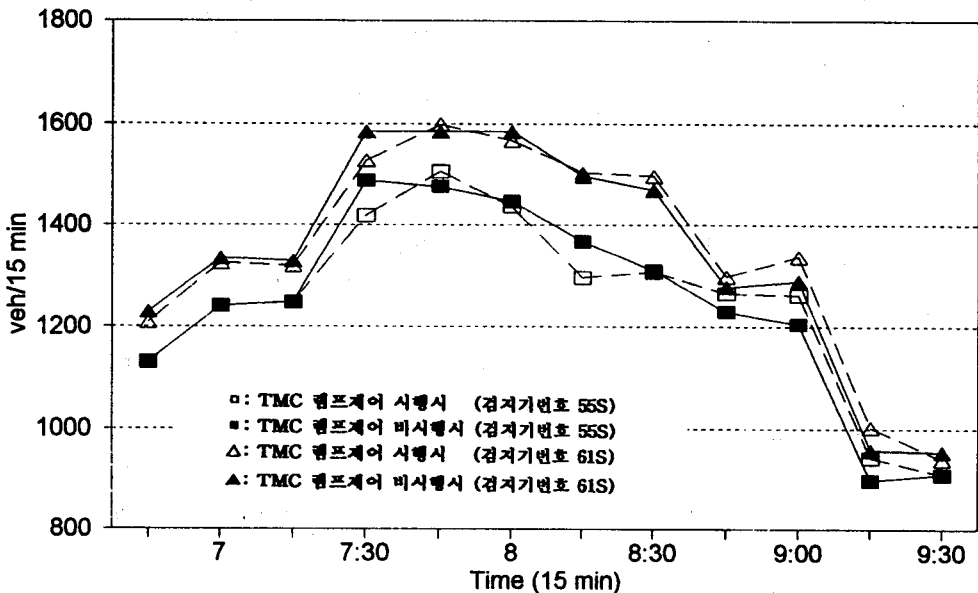
(1) <그림 1>에 제시된 4.2 km의 구간을 대상으로 하며, 이 구간은 2개의 진입램프와 3개의 진출램프로 구성되어 있다.

(2) 이상적인 진입부에서의 도착수요 변동을 현실적으로 반영하기 위하여 1992년 3월 2일의 오전 첨두시간대(6:30-9:30 a.m.)에 관측된 교통량을 도착교통량으로 활용하였다. 본선 상류부의 도착교통량은 실제관측치로 하되 진입램프의 수요는 실제관측치보다 70% 높게 하였다. 그 이유는 관측당시 TMC 교통류 제어방식이 실시되고 있어서 실제관측치를 수요로 이용할 경우 본선에서 혼잡이 발생하지 않기 때문이다.

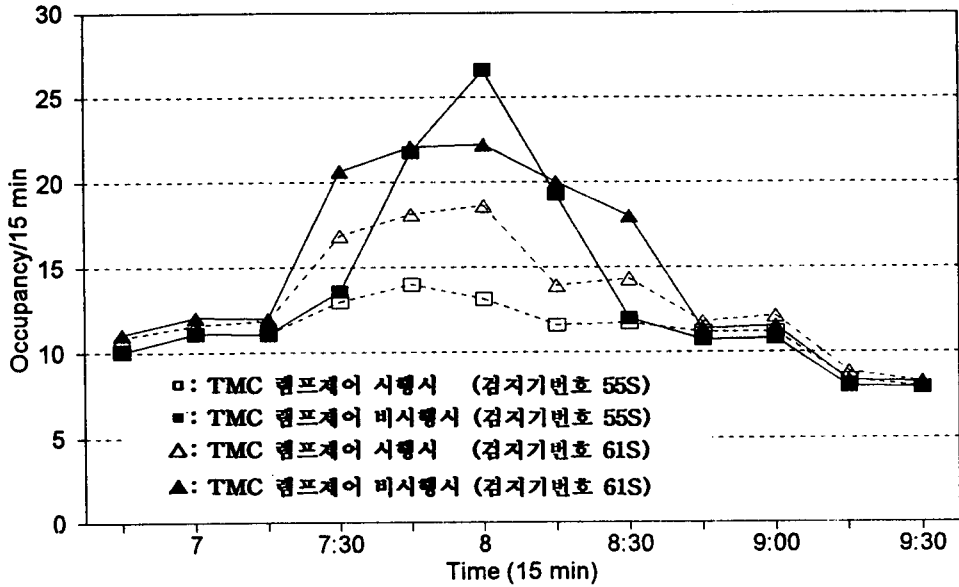
(3) 진입램프부에 차량이 대기할 수 있는 충분한 여유공간이 있다고 가정한다.

이상과 같은 상황하에 진입램프 제어를 시행하지 않을 경우와 TMC 제어방식을 시행하였을 경우 2가지 대안을 TMC-CEP를 이용하여 모의

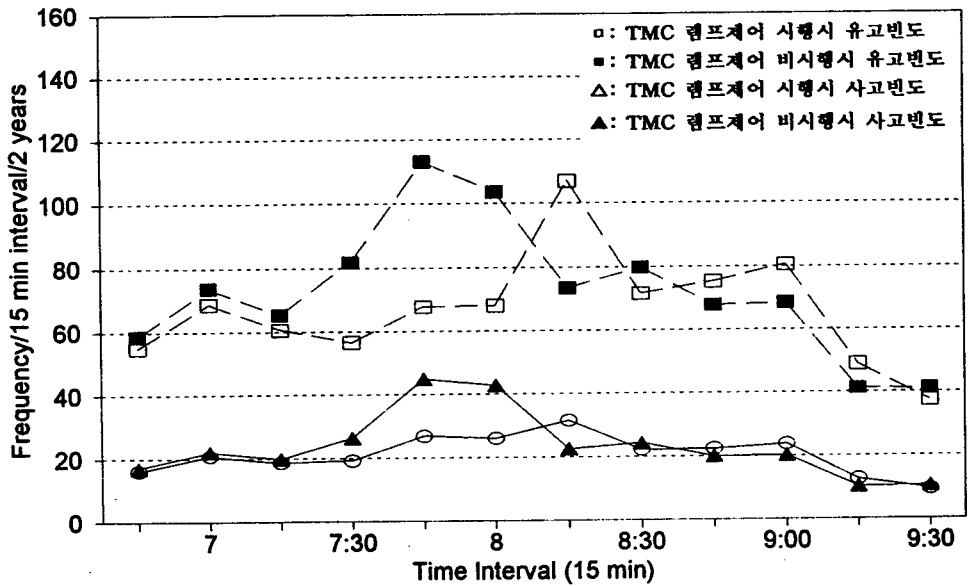
실험 하였다. <그림 5>와 <그림 6>은 각 대안을 시행할 경우 검지기 번호 55S와 61S에서 예측되는 15분 단위의 차선당 교통량과 점유율을 시계열로 나타낸 것이다. 각 대안간에 통과교통량의 변동은 눈에 띄지 않는 반면(<그림 5>), 차선 평균점유율은 TMC 교통류제어방식 시행시 현저히 낮아짐을 알 수 있다 (<그림 6>). 즉, TMC 교통류 제어방식은 본선의 교통류를 임계 점유율(18%) 이하로 유지하여 혼잡을 방지하는 동시에 용량에 근접한 차량을 처리하는 것으로 평가된다. 다음 단계로 각 대안을 시행시 예측된 15분 단위의 교통운영변수들(본선/램프교통량, 점유율)을 바탕으로 설명변수 MNVM(총 차량주행거리), ONV(총 진입차량), MNVODIF(점유율 변화 가중치)를 산정한 후 사고빈도와 유고빈도 회귀모형에 대입하여 시간대별 사고 및 유고빈도를 추정하였다. <그림 7>은 2년동안 각 15분단위로 발생할 것으로 예측된 사고 및 유고빈도 분포이다. 오전 첨두 3



<그림 5> TMC 램프제어 시행시와 비시행시 교통량 분포



〈그림 6〉 TMC 램프제어 시행시와 비시행시 점유율 분포



〈그림 7〉 TMC 램프제어 시행시와 비시행시 시간대별 예측 사고/유고빈도

시간(6:30 - 9:30 a.m.)동안 발생할 것으로 예측된 사고건수는 진입램프제어 미시행시 281건, 시행시 227건으로 약 18%의 사고감소효과가 있을 것으로 추정된다. 또한 예측된 유고건수는 진입램프제어 미시행시 867건, 시행시 757건으로 약 13%의 유고건수 감소효과를 보일 것으로 추정된다. 이상의 사례 모의실험을 통하여 도시고속도로 교통류 제어방식이 안전도 증진에 미치는 영향을 계량화시키기 위해 제안된 방법론을 평가하였다.

VI. 결론 및 제언

이 연구의 목적은 그 비중이 제고되고 있는 도시고속도로에 교통류관리방안을 도입할 경우에 부차적으로 기대되는 도시고속도로의 안전도 증진을 계량화 할 수 있는 방법을 제안하는데 있다. 본 연구는 혼잡이 발생하는 도시고속도로의 경우 기하구조나 운행행태 등의 사고유발인자는 동적교통상황에 반영된다고 전제하여 교통류 제어전략에 의해 영향을 받는 동적 운영변수를 이용하여 안전도를 계량화하며 나아가 교통류제어전략이 사고감소에 미치는 영향을 추정하자는 것이다. 미국 미네아폴리스에 소개한 전형적인 도시고속도로를 대상으로 통계적 분석기법을 통하여 통행안전도 (사고/유고빈도수, 사고/유고 밀도)에 영향을 미치는 운영변수의 규명을 시도하였으며 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 도시고속도로의 특성상 첨두시간대에 사고율이 높게 나타나며 특히 정체가 형성되어 가는 과정에서 안전도가 저해되고 있다. 이는 차선 변경을 야기하는 진·출입 교통량과 복합적으로 안전도를 저해하는 것으로 분석되었다.

둘째, 도시고속도로 교통류 제어전략에 의해

영향을 받는 동적 운영변수(주행거리, 진·출입 교통량, 점유율의 변화에 따른 동적 혼잡도)를 설명변수로 하여 도시고속도로의 안전도에 미치는 영향을 계량화할 수 있는 다중회귀모형 정립을 시도하였다. 이 모형은 교통사고에의 영향 요인으로서 고속도로 교통류 제어전략으로 직접 조절, 통제할 수 있는 운영변수(주행거리, 진·출입 교통량, 동적인 혼잡도)를 설명변수로 도입하였는데 그 특징이 있다. 도시고속도로의 교통사고는 운영변수만으로 42-51% ($R^2=.42-51$)까지 설명할 수 있었다.

셋째, 고속도로의 교통류 제어전략 대안별로 동적 운영변수의 변화를 예측할 수 있는 방법으로 동적 시뮬레이션 모형의 활용방안을 제시하였다. 미국 미네아폴리스에 소개한 도시고속도로를 사례로 TMC Control-Emulation 프로그램을 이용하여 진입램프미터링 방식이 안전도에 미치는 영향을 평가한 결과, 진입램프미터링을 실행시 첨두시간대의 안전도가 증진할 것으로 결론 지어졌다. 이는 교통소통 증진을 위한 교통류 관리방식이 교통안전 증진이란 추가적인 효과가 있다는 점에서 시설투자대안 분석시 중요한 고려요인이 될 것이다.

그러나 본 연구에서 제안된 방법을 적용하는 데는 현실적으로 다음과 같은 제약이 따른다.

첫째, 교통운영변수를 이용한 회귀모형의 이진성 여부이다. 물론 국내의 도시고속도로는 상대적으로 열악한 환경아래서 높은 정체가 예견되므로 본 연구와는 다른 제반환경 요인들이 운영변수에 보다 민감한 영향을 미칠 수 있을 것이다. 예를 들면 본 연구에서는 누락된 진출램프 교통량의 영향이 큰 사고유형이 있을 수 있으므로 도시고속도로의 운영변수를 이용한 회귀모형은 지역의 특수성에 제약을 받는다고 하겠으나, 각 지역의 특성에 적합한 운영변수를 보완하여 설명력이 높은 회귀모형을 정립할 수

있다는 점에서 추후 연구 과제로 삼는다. 따라서 앞으로 도시고속도로 사고자료와 운영변수의 효율적인 수집관리와 국내실정에 적합한 모형정립에 관한 연구가 지속되어야 할 것이다.

둘째, TMC Control-Emulation 프로그램 같은 시뮬레이션모형의 부재이다. 현실적으로 시뮬레이션은 대안의 시행시 변화를 가장 정확히 저렴하게 추정할 수 있는 방법이므로 앞으로 국내에도 이에 관한 적극적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- Agent, K.R. and Deen, R.C. (1975), "Relationships Between Roadway Geometrics and Accidents.", Transp. Res. Rec. 541, pp. 1-11.
- Benekohal, R. F. and Hashimi, A. M. (1992), "Procedures for Estimating Accident Reductions on Two-Lane Highways", Journal of Transportation Engineering Vol. 118, No. 1, pp.111-129.
- Cedar, A. (1982), "Relationship between road accidents and Hourly traffic flow-II, Probabilistic approach", Accid. Anal. Prev. 14(1), 35-44.
- Cedar, A. and Livneh, M. (1982), "Relationships between road accidents and hourly traffic flow-II, probabilistic approach", Accid. Anal. Prev. 14(1), 19-34.
- Chang, K. K. (1994), "Development of control emulation program for Advanced Traffic Management Systems", Project Report Submitted to Center for Transportation Studies, University of Minnesota.
- Chang, M. S. (1982), "Conceptual development of exposure measures for evaluating highway safety", Transp. Res. Rec. 847, 37-42.
- Cremer M. and Fleischmann S. (1987), Traffic responsive control of freeway networks by state feedback approach", In N. H. Garner, N. H. Wilson (Eds.), Proceedings of the 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Elsevier, New York.
- Ferrari P. (1988), "The reliability of the motorway transport system", Transp. Res. 22B, 291-310.
- Gupta J, (1975). "Effect of certain roadway characteristics on accident rates for two lane two way roads in Connecticut", Transp. Res. Rec. 541, 50-54
- Jara-Diaz, S. R. and Gonzalez, S. M.(1986), "Flexible models for accidents on Chilean roads" Accid. Anal. Prev. Vol. 18, No. 2, 103-108.
- Kuhne R. D. (1987), " Freeway speed distribution and acceleration noise" In N. H. Garner, N. H. Wilson (Eds.), Proceedings of the 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Elsevier, New York.
- Oppe, S. (1989), "Macroscopic models for traffic and traffic safety", Accident Analysis & Prevention Vol. 21, No. 3, 225-232.

Pfundt K. (1969), "Three difficulties in the comparison of accident rates", Accid. Anal. & Prev. 1, 253-259.

Polus, A. (1980), "The relationship of overall geometric characteristics to the safety level of rural highways", Traffic Quarterly, Vol. 34, No. 4, 575-585.

Shinar, D. (1980), Psychology on the Road, The Human Factor in Traffic Safety, John Wiley & Sons.

Smulders S. (1990), "Control of freeway traffic flow by variable speed signs" Transp. Res. 24B, 111-132.

Sullivan, E. C. (1990), "Estimating accident

benefits of reduced freeway congestion", Journal of Transp. Eng. 116(2), 167-180.

Thomas, R. and Gallon, C. A. (1988), "Motorway accidents: associations between characteristics-related variables." Traffic Eng. & Control V, 55-61.

Turner, D. J. and Thomas, R. (1986), "Motorway accidents: an examination of accident totals, rates and severity and their relationship with traffic flow." Traffic Engineering and Control 27(7/8), 377-383.

FHWA (1985), Traffic Control Systems Handbook, U. S. Department of Transportation.