

■ 論 文 ■

고속도로 교통사고 예방을 위한 가변제한속도 적용방안 연구

A Study on the Application of Variable Speed Limits(VSL) for Preventing Accidents on Freeways

박 준 형

(한양대학교 교통시스템공학과 석사과정)

황 효 원

(한양대학교 교통시스템공학과 석사과정)

오 철

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

장 명 순

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

목 차

- I. 서론
- II. 관련문헌 및 국내외 사례조사
 - 1. 주행안전성 향상에 관한 연구
 - 2. 교통운영 최적화에 관한 연구
 - 3. 국내법규 및 해외사례조사
- III. 연구방법론
 - 1. 실시간 검지기 자료를 이용한 사고위험도 예측모형
- 2. 기상 및 도로조건과 VSL
- IV. VSL적용을 위한 기술적 이슈
 - 1. 사고위험도 예측에 의한 VSL적용
 - 2. 도로환경조건에 의한 VSL적용
 - 3. 가변제한속도의 복귀와 적용시간
 - 4. 가변제한속도 시스템 알고리즘
- V. 결론
- 참고문헌

Key Words: 교통안전, 가변제한속도, 교통사고발생 개연성, 최소정지거리, 교통운영
 traffic safety, variable speed limit (VSL), accident likelihood, minimum stopping distance, traffic operations

요 약

효과적인 가변제한속도(Variable Speed Limit: VSL)는 교통사고를 예방하고 교통정체를 완화시키는데 기여하는 중요한 교통류 제어방안이다. 본 연구에서는 교통사고 예방을 목적으로 가변제한속도를 적용하는 방법론을 제시하였다. 가변제한속도를 적용하는 조건을 두 가지로 분류하였는데, 사고위험도 예측모형에 따른 제한속도 변화와 도로환경조건의 변화에 따른 제한속도 조정 방안을 제안하였다. 예측된 사고위험도에 따른 가변제한속도의 적용은 검지기에서 추출되는 교통량, 속도, 점유율자료와 교통사고자료로 이항로지스틱회귀분석 기법을 사용하여 구축된 사고위험도 예측모형을 사용하였다. 한편, 도로환경조건에 따른 가변제한속도 적용에서는 안개, 폭우, 폭설로 인한 시거제한 상황과 결빙, 비, 눈으로 인한 노면마찰력감소상황 시 최소정지거리 계산을 통해 각 상황에 적용되어야 하는 제한속도를 제시하였다. 이를 바탕으로 통합도로환경조건 모니터링 시스템 하에서 사고위험도와 도로환경조건을 관측하고 제한속도를 변화시키는 가변제한속도 시스템 알고리즘을 제시하였으며, 제안된 알고리즘의 현장 적용 시 고려되어야 할 기술적 이슈를 논의하였다.

Using variable speed limits (VSL) is a key strategy for preventing traffic accidents and alleviating traffic congestion. This study proposes an algorithm to operate VSLs on freeways for traffic safety. The proposed algorithm consists of two components based on accident likelihood estimation and analysis of safe stopping distance under various environmental conditions. A binary logistic regression technique is used for estimating accident likelihood. It is expected that the proposed algorithm would be successfully applied in practice in support of an integrated traffic and environmental condition monitoring system. Technical issues associated with the field implementation are also discussed.

I. 서론

인명피해 심각도가 높은 고속도로에서의 교통사고를 줄이기 위해 다양한 연구가 진행 중에 있으며, 가변제한속도(Variable Speed Limit, VSL) 시스템에 대한 연구도 그 중 하나이다. 가변제한속도 시스템은 교통상황과 도로상황을 실시간으로 모니터링하여 도로상황에 적절한 제한속도를 제공하는 시스템이다. 가변제한속도 시스템은 센서(검지기, 시정계, CCTV 등), 가변제한속도표지(VSLS), 가변전광표지(VMS)와 이를 통제하는 센터로 구성된다. 센서를 통해 수집된 도로상황정보는 센터로 전송되고, 센터에서는 수집된 정보를 분석한 후 적절한 제한속도를 계산하여, 산출된 제한속도를 가변제한속도표지와 가변전광표지를 통해 운전자에게 제공할 수 있다.

고속도로에서는 차량들이 고속으로 주행하므로 운전자의 시각, 청각 등의 감각이 제약되는 상황이 발생할 경우 차량의 높은 주행속도에 비해 시거가 부족하거나 운전자가 긴급상황에 대처하는 시간이 부족한 상황이 발생할 수 있다. 그리고 비, 눈, 안개 등에 의해 노면의 상태가 건조상태가 아닌 습윤 또는 결빙상태일 경우 최대정지마찰계수의 감소와 함께 최소정지거리가 증가하게 된다. 최소정지거리의 증가는 차량이 제동하는데 소요되는 거리가 길어진다는 의미이므로 운전자가 원하는 위치에 정지하지 못하는 위험한 상황이 발생할 수 있다. 또한 예상치 못한 상태에서 공사구간으로 접근하는 경우 차선변경 등의 운전자가 적절한 조치를 취해야 할 때 운전자가 반응 및 행동할 공간과 시간이 부족할 경우가 많이 발생한다. 이 때 운전자가 잘못된 판단을 하거나 조치를 취하지 못할 경우 교통사고로 이어질 수 있는 가능성은 더 커지게 된다.

본 연구의 목적은 교통상황의 변화와 도로 및 환경조건 변화의 변화를 고려하여 교통사고의 발생 가능성이 높은 조건을 검지하고, 속도제어를 통해 이를 완화시킬 수 있는 알고리즘을 제시하는 것이다. 교통사고자료와 검지기에서 수집된 교통자료를 이용하여 교통사고 발생 개연성을 추정하는 모형을 이용하여 위험한 교통상황을 제거하는 방안을 개발하였다. 한편, 도로환경조건에 따른 가변제한속도 적용에서는 안개, 폭우, 폭설로 인한 시거제한 상황과 결빙, 비, 눈으로 인한 노면마찰력감소상황 시 최소정지거리 계산을 통해 각 상황에 적용되어야 하는 제한속도를 제시하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 국내외의 관련문헌과 가변제한속도 시스템을 운영하고 있는 해외 사례 및 우리나라 도로교통법을 검토하였다. 3장에서는 사고위험도 예측모형을 구축하는 과정을 제시하고 예측된 사고위험도와 기상환경에 따른 가변제한속도의 적용 예를 제시하였다. 4장에서는 가변제한속도의 적용 시 고려되고 해결되어야 할 기술적 이슈에 대해 논의 하였다. 마지막장에서는 본 연구의 연구결과를 요약하고, 연구의 공헌과 의의 그리고 향후 연구과제에 대해 서술하였다.

II. 관련 문헌 고찰

본 연구에서는 가변제한속도 시스템에 관한 연구를 수행 안전성 향상에 관한 연구와, 통행시간을 최소화하는 교통운영 최적화에 관한 연구로 구분하여 문헌 고찰을 수행하였다.

1. 주행안전성 향상에 관한 연구

이호영(2006)은 신설되는 도로에 대해 안개에 의한 위험정도를 예측하여 위험구간을 도출하고 주행안전성을 높이는 방안에 대하여 연구하였다. 주행안전성 분석은 총 3단계로 이루어지며 1단계는 대상노선의 월별 안개 생성 패턴분석, 2단계는 안개가 발생하지 않았을 때 노선의 시거변화를 분석, 3단계는 안개발생 시 시정감소를 반영한 시거를 산출하고 설계기준치인 정지시거와 비교하여 적절한 안전대책을 수립하는 과정이다.

Peter Allaby(2007)는 도시부 고속도로를 대상으로 미시교통 시뮬레이션 프로그램인 PARAMICS를 이용하여 VSL에 대한 분석 및 효과를 평가한 결과, VSL시행 시 통행시간은 증가하고 안전성은 일반적으로 높아지는 것으로 나타났으나, 비침투시에는 안전성이 감소하는 것으로 나타났다.

Mohamed Abdel-Aty(2006)는 CORSIM을 이용하여 도로의 안전도를 향상시키기 위한 VSL의 효과를 선행연구(Abel-Aty, 2005)에서 진행된 사고잠재율 산출모형을 이용해 고속주행차량이 통과하는 비정체구간과 저속주행차량이 통과하는 정체구간에 대하여 분석을 수행하였다. 분석 결과 비정체구간에서는 VSL시행 시 뚜렷한 안전도 향상결과가 나타났으나, 정체구간에서는 명확한 향상 결과가 나타나지 않았으며, VSL 시행 시 다음과 같은 사항을 제시하였다.

- 점진적인 제한속도 변화폭(10분에 5mph)
- 제한속도의 변화는 동시에 표출한다(거리에 따라 차등표출하지 않는다)
- 상류부는 속도를 감소시키고 하류부는 속도를 증가시키는 것이 바람직하다
- 상류부와 하류부의 거리는 짧아도 충분하다 (각각 2mile)

Chris Lee(2004)는 PARAMICS를 이용하여 진입 램프를 포함한 2.5km 고속도로 구간에 대한 VSL적용 시 통행시간 및 잠재사고율을 분석한 결과, 잠재사고율은 낮은 threshold를 적용할 때 큰 폭으로 감소하고 짧은 VSL주기는 잠재사고율을 증가시키는 것으로 나타났다. 낮은 제한속도에서는 잠재사고율이 낮게 나타났으나 통행시간이 증가하며 VSL 시행 시 잠재사고율이 가장 많이 감소하는 구간은 교통혼잡이 가장 높은 램프 상류부인 것으로 나타났다.

Ali S. Al-Ghamdi(2007)는 안개발생 시 경고정보 시스템의 운영평가에 대하여 연구하였다. 연구결과 운전자의 행태에 시거의 확보가 매우 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 감속 메시지를 표출했을 때 6.5kph의 감속 효과를 보였고 감속 시 차량들 간의 분산은 커지지 않았다. 안개경고정보시스템은 높은 속도의 차량들이 속도를 줄이고 차량 간 속도의 분산을 감소시키는 정온화에 기여한다고 볼 수 있다.

2. 교통운영 최적화에 관한 연구

강경표(2004)는 WorkZone에서의 VSL Control Model 및 운영 알고리즘을 제시하였다. CORSIM 시뮬레이션 결과 정상교통상황(Normal Traffic Condition)에서 VSL 시행 시 통과교통량 증가와 평균지체 감소의 효과가 가장 높게 나타났다.

A. D. Mason(1998)은 Car-Following model을 기반으로 혼잡상태일 때 통행시간의 감소와 사고지점으로 접근하는 교통류의 안전도에 대한 속도조정의 잠재적 효과에 대하여 연구하였다.

지금까지의 VSL에 대한 연구는 도로환경요인(안개 등)에 따른 교통사고 발생가능성 감소를 위한 연구와 교통상황(Traffic Condition)에 따른 교통사고 발생가능성과 통행시간 대한 연구였다. 시뮬레이션을 이용한 VSL 시행 시 교통사고발생 가능성이 감소하는 효과가 나타났

으며, 연구대상 구간에 따라 통행시간이 증가 또는 감소하는 효과가 나타났다. 그러나 도로환경요인과 교통상황을 동시에 고려한 VSL 적용에 대한 연구는 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 고속도로의 도로환경요인과 교통상황을 반영한 VSL 시스템 운영 알고리즘 제시를 위한 연구를 수행하였다.

관련논문의 내용을 검토한 결과 VSL의 적용은 정체혼잡상황이 아닌 정상교통류(비정체상황)일 때 적용하는 것이 안전도를 높이고 통과교통량을 증가시킬 수 있다는 것이 공통된 주장이다. 그리고 교통사고와 사고시점의 교통자료에는 연관성이 존재하고 교통자료의 분석을 통해 사고와 관련된 변수를 산출가능하다는 것을 알 수 있었다.

3. 국내 법규 및 해외 사례조사

가변제한속도 시스템은 아직 국내에 적용되지 않고 있으며 다만 도로교통법시행규칙 제12조 제2항에 차량이 주행하는 도로에서 이상기후 발생 시에 감속 운행하여야 한다는 조항에 의해 <표 1>과 같이 비, 바람과 같은 도로환경이 이상기후 시에 제한속도를 20% 또는 50% 감속하는 규정을 두고 있다. 그러나 국외에서는 Speed Management라는 명칭으로 가변제한속도에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 연구결과가 실제 도로에도 적용되고 있다.

대표적으로 영국, 미국, 독일에서 가변제한속도 시스템이 실제 도로에 적용되고 있는데 영국에서는 안개구간에 진입하기 이전에 운전자에게 안개, 차선폐쇄, 차선변경 등의 교통사고 및 사고발생과 관련된 정보를 제공하는 가변제한속도 시스템을 도입하였다. 기상조건과 Incident의 여부에 따라 제한속도를 다르게 적용하여 도로를 운영한 결과, 차량들의 차두간격이 증가하고 전반적인 용량이 증대되는 것을 보였다. 또한 급작스런 차선변경이 감소하고 운전자들의 안전성이 향상되는 것으로 나타났다. 한편, 미국에서는 안개 감지 및 경고 시스템을 설치하여 운전자에게 미리 교통사고정보나 경고정보를 제공할 수 있도록 하였다. VSL시스템은 사전에 정의된 응답 시나리오로 현장

<표 1> 도로교통법시행규칙 제 12조

※ 비, 바람과 같은 이상기후 시 적용	
최고속도의 20%감속	· 우천으로 인한 습윤노면 발생 시, 20mm미만의 강설
최고속도의 50% 감속	· 폭우, 폭설, 안개로 인한 가시거리가 100m 이하, 노면결빙, 20mm이상의 강설

센서자료의 상호관계에 따라 대책을 결정하며, 점멸비콘과 VSL표지를 이용하여 위험한 상황의 운전자에게 경고 정보와 감속정보를 제공한다. 그리고 독일에서는 지방부 고속도로에서 가변제한속도시스템을 운영하고 있으며 관리구간에 1마일 간격으로 가변속도표지판이 설치되어 제한속도 범위는 130~60km/h로 설정되어 있다. 교통흐름, 속도, 도로포장면의 상태, 바람, 안개 등에 관한 사항을 점검하는 기능이 있으며 전체 사고율이 20~30%까지 감소하는 효과를 보였다. 독일의 가변제한속도 시스템은 교통량, 노면상태와 주·야간의 조건에 따라 제한속도를 달리 적용하고 있다.

국내에서 현재 안개의 발생과 관련해서 규제의 성격을 갖는 속도감속은 시정 100미터 이하일 때 50%감속으로 규정되어 있다. 그러나 시정거리, 노면상태 등의 도로상황을 관측할 수 있는 시스템이 설치되어 있지 않기 때문에 대부분 자발적인 운전자의 감속에 의지하고 있는 실정이다. 따라서 시정감소에 따른 운전자의 차량주행 패턴을 분석하고 시정에 따른 적절한 속도 감속치를 찾아내는 과정이 필요하다.

외국의 경우에는 안전성을 제고하기 위한 방편으로 가변제한속도 시스템이 적극적으로 활용되고 있으며 기상관련 변수를 속도감속을 결정짓는 중요한 변수에 포함시키고 있고 그 중 대부분이 안개로 인한 시정감소를 중요한 변수로 보고 있다. 대부분의 가변제한속도 시스템은 도로 전광표지를 통해서 속도메시지를 표출하는 방식을 사용하고 있으며 다양한 변수에 따라서 속도메시지 뿐만 아니라 위험경고 메시지 등을 표출하도록 운영되고 있다.

III. 연구방법론

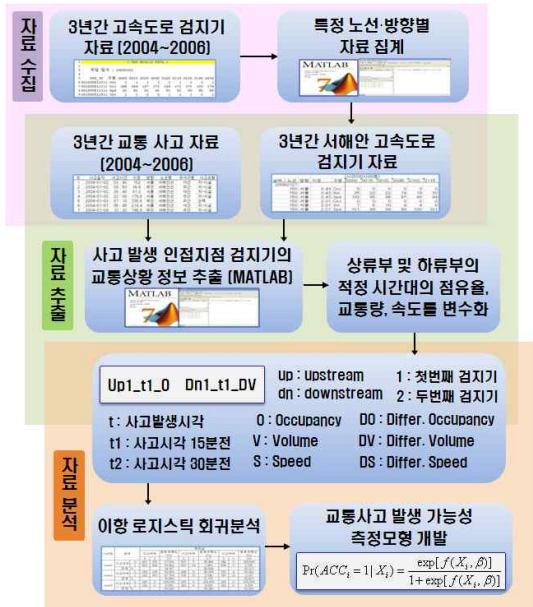
본 연구에서는 가변제한속도를 도로에 적용하는데 앞서 제한속도를 변화시켜야 하는 상황을 교통사고가 발생할 확률이 높은 상황이라 판단하고 도로의 위험도를 운전자에게 제공하는 알고리즘을 제시하였다. 그리고 가변제한속도 시스템 운영 시 도로환경에 맞는 제한속도를 적용하기 위한 환경변수에 대해 서술하였다.

1. 실시간 검지기 자료를 이용한 사고위험도 예측 모형

교통사고 발생 및 원인분석을 위한 대부분의 기존연구에서는 연평균일교통량과 같은 장기간 집계된 교통변수와 도로의 기하구조 등의 주변 환경요인과의 관계를 통계모형

으로 설명하려는 노력을 기울여 왔다. 실시간 교통자료 기반 고속도로 교통사고 발생 가능성 추정 모형개발 연구에서는 검지기자료와 교통사고자료를 이용하였으며, 검지기자료는 총 연장 339.51km에 설치된 검지기에서 생성되는 교통량, 속도, 점유율 자료로 구성되어 있고 교통사고자료는 2004~2006년 최근 3년 동안 발생한 서해안고속도로에서 발생한 교통사고자료를 이용하였다. 교통자료와 사고자료를 이용해 교통사고와 개연성이 없는 정상교통상황(normal traffic conditions)과 교통사고를 유발할 수 있는 비정상교통상황(abnormal traffic conditions)을 분류하는 분류문제(classification problem)로 설정하고 사고위험도를 계량화하는 방법으로 이항 로지스틱 회귀분석(binary logistic regression analysis) 기법을 적용하였다.

모형에 사용된 입력자료는 교통사고자료와 루프검지기에서 추출된 자료로 구성된다. 최근 3년간 교통사고자료에서 사고일자, 사고시간, 사고지점의 이점, 방향, 사고유형 등의 정보를 추출하고 검지기자료에서는 노선별 및 방향별로 교통량, 점유율, 속도자료를 수집하여 자료 내에 존재하는 결측치를 인접참조기법을 통해 보정하였다. 교통사고자료를 참고하여 발생한 교통사고에 노선, 방향, 날짜, 시간, 이점 등의 자료로 구성된 개별 ID를 부여하였다. 사고발생지점에서 가장 인접한 검지기를 기준으로 상류부(upstream)의 검지기 2개와 하류부(downstream)의 검지기 2개를 대상으로 사고발생시점(t)의 교통량(V), 점유율(O), 속도(S)자료와 사고발생시점(t)부터 15분전(t-15)까지의 교통량(V), 점유율(O), 속도(S)자료(t1), 15분전(t-15)부터 30분전(t-30)까지의 교통량(V), 점유율(O), 속도(S)자료(t2)로 구분하여 분석하였다. 그리고 하루동안 수집된 검지기 자료의 평균값과 각 시간별 이점별 검지기 자료의 차이값을 Difference값으로 정의하고 변수명 앞에 "D"를 붙여 구분하여 사용(DO, DV, DS)하였다. 변수의 공간, 시간, 종류에 따라 변수명을 <그림 1>과 같이 설정하였다. 추출된 총 교통변수는 72개로서 각각의 검지기에서 수집된 실제값과 일일 평균에 대한 각 교통변수의 difference값으로 구성되었다. 교통사고 유무를 비교하기 위해 교통사고 발생시점에서 발생시간 하루전날의 동일시간대를 대상으로 사고상황 자료의 추출과정과 동일하게 72개의 교통변수를 추출하고 이항 로지스틱 회귀분석을 통해 교통사고와 유의한 관계의 변수들을 산출하였다. 자료구축 및 처리와 관련된 보다 자세한 내용은 관련문헌3)에 서술되어 있다.



<그림 1> 검지기자료와 교통사고자료를 이용한 사고위험도 산출 과정 및 변수명 설정

회귀분석 시 주·야간, 주행방향, 사고유형 등의 교통 상황별로 어떤 교통변수들이 사고와 연관성이 있는가에 대해 분석하였다. 분석 시 교통변수들의 유의성을 판단하여 유의하지 못한 변수들을 제거하는 과정을 반복하여 사고와 연관성이 있는 변수들을 산출한 결과, 추돌 및 충돌 상황의 교통상황자료가 사고와 가장 연관성이 있는 것으로 나타났다. 검지기 자료와 교통사고자료를 이용하여 사고위험도를 산출하는 과정을 <그림 1>에 도식화 하였다.

검지기자료와 교통사고자료를 이용하여 사고위험도 예측 모형을 구축한 결과 식(1)과 같은 사고발생확률 모형식을 산출하였다. (R²=0.301) 그리고 <표 2>와 같은 변수들이 추돌 및 충돌 상황과 연관성이 있는 것으로 산

<표 2> 사고위험도 예측 모형 변수의 유의도

변수	B	유의확률
up1_t1_O	0.63607	0.03142
up1_t2_V	-0.00701	0.03692
up2_t1_O	-0.54779	0.02818
up2_t2_V	0.00671	0.01903
up1_t1_DO	-1.23492	0.01089
up1_t2_DO	1.11977	0.02173
up2_t1_DS	0.06987	0.05738
dn2_t1_DV	0.00816	0.00346
dn2_t1_DS	0.20489	0.00047
dn2_t2_DS	-0.12514	0.02855
상수	-1.13773	0.00013

출되었다. 산출된 사고위험도 예측모형과 실시간 교통자료를 이용하여 실시간 사고위험도를 예측하고 교통사고 발생개연성이 높은 상황에 경고정보제공 또는 가변제한 속도 시스템을 적용할 수 있을 것이다.

$$\Pr(ACC_i = 1 | X_i) = \frac{\exp[f(X_i, \beta)]}{1 + [f(X_i, \beta)]} \quad (1)$$

→ 추돌 및 충돌상황의 사고발생확률 모형식

$$f(X_i, \beta) = 0.636X_1 - 0.0007X_2 - 0.548X_3 + 0.006X_4 - 1.235X_5 + 1.120X_6 + 0.070X_7 + 0.008X_8 + 0.205X_9 - 0.125X_{10} - 1.138X_{11}$$

R²=0.301

2. 기상 및 도로조건과 VSL

기상조건과 도로조건이 변화되었을 때 운전자는 이를 주관적으로 판단함으로써 운전자마다의 조건변화에 대한 감속치가 다양하다. 그러므로 기상조건과 도로조건 변화에 따른 위험도를 공학적으로 판단하고 운전자에게 경고정보 및 감속정보를 제공할 필요가 있다.

연속교통류에서 속도에 따른 최소정지거리를 식(2)을 통해 산출할 수 있으며 운전자의 반응시간과 노면의 마찰계수가 동일한 상황에서 속도가 높을수록 최소정지거리도 증가한다.¹⁾ 안개, 폭설, 폭우 등이 발생하게 되면 운전자는 시거의 제약을 받게 되고 전방에 돌발상황이 발생할 경우 운전자가 대응할 수 있는 시간과 거리는 감소하게 된다. 따라서 운전자는 시거의 제한에 따라 동일한 최소정지거리를 보유했어야만 전방에 장애물이 나타났을 때 회피하거나 정지할 수 있다. 따라서 기상조건에 따라 시정거리를 관측하고 안전한 최소정지거리를 확보하는 제한속도를 운전자에게 제공할 수 있다. 또한 도로조건 변화(비, 눈, 결빙)에 의해 차량의 타이어와 노면간의 마찰력이 변화 시 안전한 최소정지거리를 확보하기 위한 제한속도를 식(2)의 계산을 통해 표출할 수 있다.

$$d = \frac{V^2}{254(f+s)} + 0.278 \times t_r \times V \quad (2)$$

d : 최소정지거리(m) s : 종단경사(%)
 V : 속력(kph) f : 마찰계수
 t_r : 인지반응시간

IV. VSL 적용을 위한 기술적 이슈

본 가변제한속도 시스템을 운영하기 위해서는 가변제한속도를 적용해야 하는 상황을 감지하는 시스템이 필요하다. 가변제한속도를 적용해야 하는 상황은 대상 도로의 사고위험도가 높게 예측되거나 기상조건이나 도로조건 변화로 도로환경이 기 설정된 제한속도로 주행할 경우 사고가 발생할 확률이 커질 경우이다.

1. 사고위험도 예측에 의한 VSL 적용

실시간으로 수집되는 교통상황자료를 지속적으로 모니터링하면서 교통사고 발생 가능성을 산출하고 threshold 값 이상의 교통사고 발생 가능성이 예측되면 기 설정된 제한속도보다 낮은 제한속도를 적용해야 할 상황이 발생한다. <그림 2>는 실시간 사고위험도 예측모형에서 추돌 및 충돌상황에서의 일일 교통사고 발생확률 그래프로써 <그림 2>의 적색선의 수위의 조정을 통해 위험하다고 판단되는 상황을 감지하는 기준을 조정할 수 있다. threshold값은 제한속도를 적용하게 되는 사고위험도의 기준으로서 threshold값이 너무 낮으면 제한속도를 변화시켜야 할 횟수가 늘어나고 너무 높으면 속도를 낮추어야 하는 위험상황임에도 가변제한속도를 적용하지 않는 상황이 발생할 수 있다. <표 3>에서와 같이 threshold(0.6, 0.7, 0.8)를 다르게 설정했을 경우 위험상황이라 판단되는 시간도 변하며 가변제한속도를 적용하는 시간도 변하는 것을 볼 수 있다. Unsafe Time은 하루 중 threshold값보다 높은 사고발생확률을 나타낸 시간의 합계이며, VSL Rate는 전체 시간에서 Unsafe Time의 비율로서 하루 중 가변제한속도를 적용하는 시간 비율과 같다. 그러므로 각 도로의 교통 환경에 맞는 적정 threshold 값을 찾는 것이 중요하다.



<그림 2> 일일 교통사고 발생확률 그래프 예

<표 3> Threshold에 따른 가변제한속도 적용시간

Threshold	Unsafe Time	VSL Rate
0.6	915분	64%
0.7	615분	43%
0.8	555분	38%

<표 4> 다양한 Threshold에 따른 제한속도 변화폭의 적용 예

Threshold	VSL Rate	감속치
0.6	64%	5 kph
0.7	43%	10 kph
0.8	38%	20 kph

* 기본 Threshold가 0.6로 설정된 경우

제한속도의 감속치도 중요한 기술적 이슈가 된다. 차량들의 소통을 원활하게 하는 동시에 교통류의 안전성을 확보할 수 있는 가변제한속도 시스템을 설계하는 것이 중요하다. threshold값에 따라 사고위험도가 다르게 예측되므로 threshold값이 사고위험도의 심각도를 구분하는 기준으로 보고 각 threshold값에 따라 속도감소폭을 설정해야 한다. <표 4>에 threshold값에 따라 가변제한속도를 적용한 예를 볼 수 있다. <표 4>에 표기된 임의로 설정한 제한속도 감속치는 향후 다양한 교통상황을 반영하는 사고위험도 예측모형을 구축하고 사고위험도 판단기준인 threshold값과 함께 교통소통과 사고위험도 감소를 만족시키는 최적값을 찾는 연구가 향후 추진되어야 할 것이다.

예측한 사고위험도와 비교하는 threshold값을 어떻게 설정하는가에 따라 사고위험도 예측모형의 분류분석도와 오보율(Wrong Information Rate)이 달라진다. 따라서 다양한 도로환경조건 하에서 여러 도로들을 대상으로 사고위험도 예측 모형을 산출하고 오보율을 최소화 하는 threshold값을 찾아내는 과정이 필요하다. 그리고 도로의 제한속도를 감소시킴에 따라 주행차량들의 통행속도가 감소되므로 도로의 소통능력에 영향을 주지 않는 적절한 감속치에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

2. 도로환경조건에 의한 VSL 적용

제한속도를 감소시켜야 할 상황으로 사고위험도가 높게 나타나는 경우 외에 도로환경조건에 의해 감속시켜야 할 상황이 존재한다. 도로 환경조건은 기상조건이나 도로의 노면상태의 변화에 의해 변할 수 있다. 본 연구에서는 기상조건 및 노면상태가 변함에 따라 속도를 줄여야 하는 상황을 크게 두 가지로 구분하여 서술하였다. 첫째

로 안개나 비, 눈으로 인하여 시거가 확보되지 않는 경우이며, 둘째로 비, 눈, 결빙현상 등으로 인해 노면의 마찰력이 감소하는 경우이다. 노면상태를 나타내는 최대마찰계수는 관련문헌^{1,8)}을 참고하였다.

첫째로 도로상에 안개가 생성된 경우 날씨가 맑을 때 보다 전방의 차량이 탁하게 보이고 차량이 보이기 시작하는 시인거리도 짧아진다. 시거가 감소되면 운전자가 전방에 나타난 장애물에 대해 반응하는데 주어진 시간이 단축되므로 차량은 기 설정된 제한속도 보다 낮은 속도로 주행해야 한다.

안개는 지표면에 다량의 수증기가 분포하고 기온이 낮을 경우 발생한다. 따라서 실시간으로 안개를 검지하는 시스템을 안개다발지역에 설치하여 안개가 발생했을 때 제한속도를 변화시키는 전략을 사용할 수 있다. 안개의 농도를 시정(視程)거리와 함수량에 따라 <표 5>와 <표 6>과 같이 구분한다.⁹⁾

국내에서는 폭우·폭설·안개로 인해 가시거리가 100m 이내일 때 최고속도의 50%를 감소한 속도를 제한속도로 규정하고 있다. 기존의 규정에 따라 안개의 발생 여부가 제한속도의 변화조건이 아닌 안개의 농도에 따라 제한속도의 감속치가 다르게 적용되어야 한다.

연속교통류조건에서 고속도로에서의 제한속도가 100kph이고 건조한 노면일 때 최대마찰계수(f=0.57)[1, 8]를 적용하여 최소정지거리를 <계산 1>과 같이 계산하였다. 100kph의 속도로 주행하는 차량은 정지하는데 최소 140m의 거리가 필요하다. 시정거리 만큼 최소정지거리가 확보되지 않으면 전방에 장애물이 발생했을 때 정지를 하지 못하고 충돌하게 된다. 따라서 안개에 의해 시정거리가 감소되면 최소정지거리도 감소되어야 하므로 최소정지거리를 감소시키기 위해 기 설정된 제한속도보다 낮은 속도를 도로에 적용시켜야 한다. <계산 2>와 같이 차량이 100kph로 주행할 때 안개로 인해 시거가 100m로 제한되면 최소정지거리도 100m로 제한

<표 5> 시정거리에 따른 안개의 농도

구분	강도 0 (약)	강도 1 (중)	강도 2 (강)
안개	1~0.5km	0.5~0.2km	0.2km 미만
박무·연무	10~4km	4~2km	2~1km

* 출처 : 기상학개론, 안개(임경택)⁹⁾

<표 6> 시정거리와 함수량에 따른 안개의 농도구분

구분	질은안개	보통안개
시정거리	50m 미만	50m~1km
함수량	약 3g/m ³ 이상	3g/m ³ ~0.02g/m ³

* 출처 : 기상학개론, 안개(임경택)⁹⁾

<계산 1> 제한속도 100kph일 때의 최소정지거리

$$d = \frac{V^2}{254(f+s)} + 0.278 \times t_r \times V$$

$$d = \frac{100^2}{254(0.57)} + 0.278 \times 2.5 \times 100 = 138m$$

d : 최소정지거리(m)

s : 종단경사(%)

V : 속도(kph)

t_r : 인지반응시간(연속교통류 : 2.5(초))

f : 최대마찰계수 (100kph 건조한 노면(평균) : 0.57)

<계산 2> 시거제약에 의한 감속

$$100 = \frac{V^2}{254 \times 0.57} + 0.278 \times 2.5 \times V \text{ (시정거리} = 100m)$$

$$V = 80kph < 100kph$$

되어야 하므로 가변제한속도를 적용하여 주행하는 차량의 속도를 80kph로 감소시킴으로서 시거제약으로 인한 최소정지거리 미확보 상황의 사고발생가능성을 낮출 수 있다. 식(2)을 통해 시거의 감소에 따른 최소정지거리감소와 정지거리를 감소시키기 위해 적용되어야 하는 제한속도를 <표 7>에 표기하였다. 시정거리가 150m일때 부터 제한속도를 적용하는 것은 시정거리가 100m일 때의 감속치가 20kph이고 점진적인 속도감속과 각기 다른 운전자의 시력을 감안하여 제한속도를 적용시키기 위함이다. 그리고 현장실험과 시뮬레이션을 통해 안개가 발생했을 때 시거의 제약에 따른 정확한 실제 최소정지거리를 산출하고 소통에 지장을 주지 않는 범위 내의 운전자 다수가 수용할 수 있는 가변제한속도를 적용해야 할 것이다.

둘째로 비, 눈, 노면결빙에 의한 주행차량과 노면 간의 마찰력 감소로 사고위험도가 커지는 경우이다. 최대마찰계수는 속도, 타이어 마모상태, 포장면의 종류, 노면상태에 따라 달라지며 고속에서의 마찰계수는 저속에서보다 작

<표 7> 안개의 강도에 따른 가변제한속도 전략 예

시정거리	제한속도	최소정지거리	적용제한속도	감속치
200m	100kph	139m	100kph	0 kph
150m	100kph	139m	100kph	10 kph
100m	100kph	100m	80kph	20 kph
80m	100kph	80m	69kph	30 kph
50m	100kph	50m	49kph	50 kph

다.¹⁾ 노면이 습윤상태일 때 최소정지거리는 마찰계수가 작아짐에 따라 건조노면일 때보다 더 길게 된다. 노면상태에 따른 최소정지거리는 <계산 3>에서와 같이 건조상태의 최소정지거리가 131m임에 비해 습윤상태의 최소정지거리는 210m로 큰 차이를 보였다. 최대마찰계수^{1.8)}는 고속도로의 노면이 콘크리트로 된 것을 감안하여 건조·습윤 시의 PC콘크리트 최대마찰계수^{1.8)}를 적용하였다. 습윤상태의 도로를 주행하는 차량이 건조상태인 도로를 주행할 때와 같은 최소정지거리를 가지려면 <계산 4>과 같이 건조노면일 때보다 낮은 속도로 주행해야 한다.

비, 눈, 결빙으로 인한 마찰력 감소로 건조노면일 때보다 최소정지거리가 충분히 확보되지 못할 때는 안전성 확

<계산 3> 노면상태에 따른 최소정지거리

○ 건조상태의 최소정지거리

$$d = \frac{100^2}{254(0.63)} + 0.278 \times 2.5 \times 100 = 131m$$

○ 습윤상태의 최소정지거리

$$d = \frac{100^2}{254(0.28)} + 0.278 \times 2.5 \times 100 = 210m$$

d : 최소정지거리(m),

V : 속력(kph), tr : 2.5(초)

f_d : PC콘크리트 건조상태 마찰계수(100kph - 0.63)

f_w : PC콘크리트 습윤상태 마찰계수(100kph - 0.28)

<계산 4> 습윤노면 상태에서 건조상태와 같은 거리로 정지하기 위한 속도

$$131 = \frac{V^2}{254(0.28)} + 0.278 \times 2.5 \times V$$

V = 74.92kph < 100kph 건조

$$254(f + s)d_{\text{desire}} = V^2 + 70.612 \times (f + s) \times t_r \times V \quad (3)$$

※ 습윤노면 시 건조노면상태와 동일한 최소정지거리를 확보하기 위한 제한속도 산출식

d_{desire} : 건조노면 최소정지거리(m) s : 종단경사(%)
 f : 습윤노면 최대마찰계수 t_r : 인지반응시간
 V : 속력(kph)

<표 8> 노면상태에 따른 제한속도의 감속치

속도 (kph)	최소정지거리(m)			제한 속도	감속 (kph)
	건조시	습윤시	차이		
100	131.9	210.1	78.1	74.92	25
90	113.9	172.5	58.5	69.55	20
80	95.6	142.4	46.8	61.88	18
70	79.0	112.9	33.9	55.50	14
60	63.8	84.6	20.8	49.69	10
50	49.8	63.7	13.8	42.23	8
40	37.3	45.3	7.9	34.50	5
30	26.2	30.6	4.4	26.42	4

보를 위해 가변제한속도를 적용해야 한다. 주행속도별로 도로조건이 습윤상태일 때 건조시의 최소정지거리로 제동하기 위한 제한속도를 식(3)을 이용하여 <표 8>에 산출하였다. 주행속도가 100kph(고속도로 제한속도)일 때 노면이 습윤상태이면 건조상태일 때 보다 25kph 낮은 속도를 표시하는 가변제한속도 시스템을 적용할 수 있다.

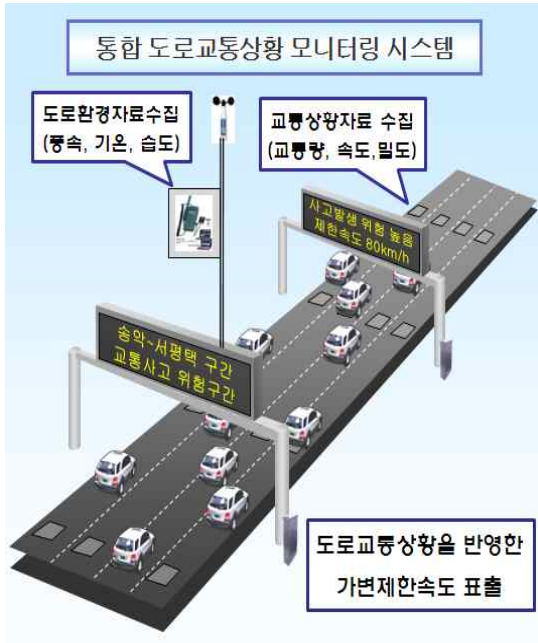
3. 가변제한속도의 복귀와 적용시간

비, 눈, 안개 등으로 인해 가변제한속도를 적용했을 경우 기상 및 도로조건이 원상태로 복귀됨에 따라 제한속도도 원상태로 복귀되어야 한다. 그리고 복귀되는 제한속도의 가속치도 점차적으로 도로환경조건이 완화되는 수준에 따라 이루어 져야 할 것이다. 비, 눈, 우박 등의 기상조건은 상황이 종료되더라도 노면의 습윤상태는 유지되기 때문에 제한속도의 복귀 시 노면상태는 항상 고려되어야 한다.

사고위험도 예측에 의한 가변제한속도 적용 시에는 실시간으로 사고위험도를 예측하면서 threshold값을 기준으로 사고위험도가 낮아짐에 따라 제한속도를 복귀시켜야 한다. 사고위험도가 높게 예측되어 제한속도를 감속시킬 때와 다시 복귀시킬 때의 교통환경조건은 다르므로 가변제한속도의 감속치와 가속치는 다르게 적용되어야 할 것이며 적절한 속도변화폭에 대한 연구가 필요하다.

4. 가변제한속도 시스템 알고리즘

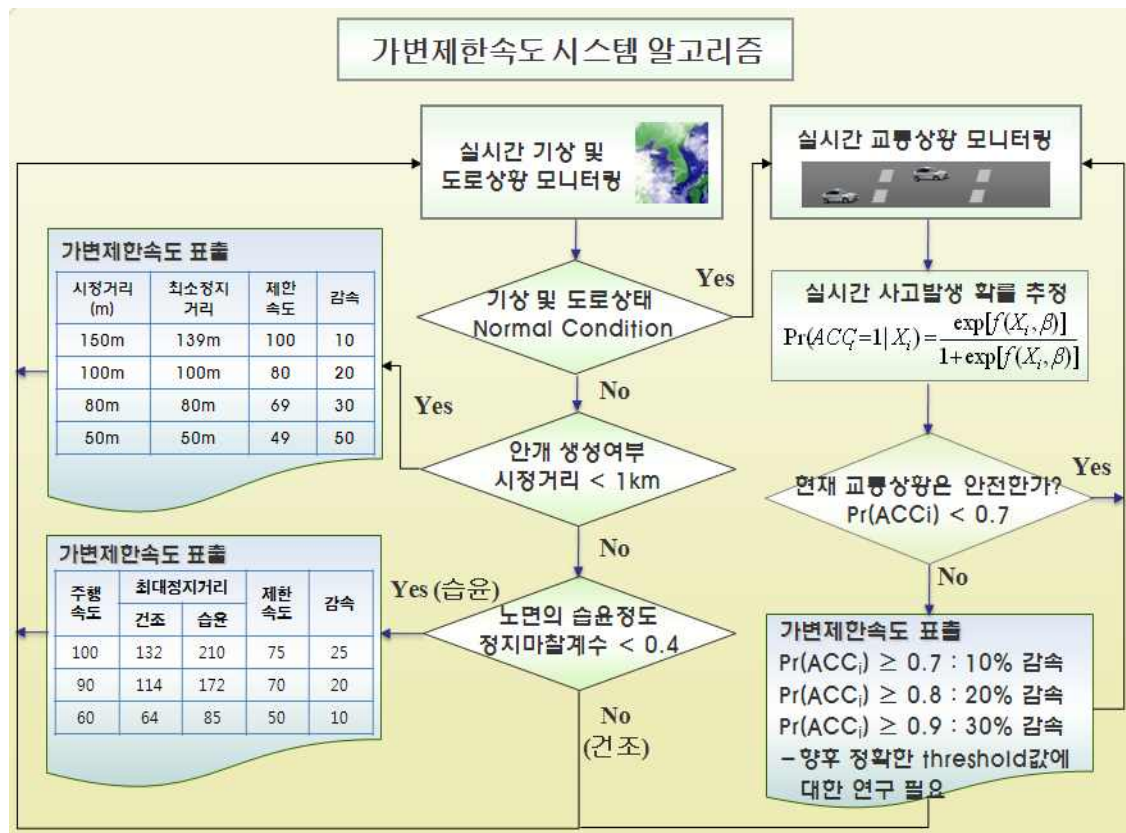
통합 도로교통상황 모니터링 시스템은 <그림 3>과 같이 실시간 기상·도로상황 모니터링 시스템과 실시간 교통상황 모니터링 시스템으로 구성되어 있다. 실시간



<그림 3> 통합 도로교통상황 모니터링 시스템 개념도

기상·도로상황 모니터링 시스템은 풍속계, 습도계, 기온계, 조도계, 시정계, CCTV 등의 기상환경변화 감지장비를 이용하여 실시간으로 도로환경의 변화를 관측한다. 교통상황 모니터링 시스템은 도로면에 설치된 검지기를 통해 교통량, 속도, 점유율 등의 교통자료를 수집하여 사고위험도를 예측한다. <그림 3>에 통합 도로교통상황 모니터링 시스템의 개념도가 도식화 되어 있다.

가변제한속도 시스템 알고리즘은 기상상태와 안개여부, 노면상태 등을 파악하고 현재의 도로상황이 기 설정된 Normal Condition과 유사할 경우 사고위험도 예측 알고리즘을 통해 사고위험도에 따른 가변제한속도를 적용한다. 그리고 비, 눈, 결빙, 안개 등으로 인한 도로상황의 변화가 감지될 경우 각 요인의 강도에 따라 제한속도의 감속치를 설정하고 도로에 설치된 VMS를 통해 운전자에게 표출한다. <그림 4>에서와 같이 제한속도를 감소시켜 주행차량들의 속도의 분산과 평균주행속도를 감소시킴으로써 사고위험도 및 사고심각도를 감소시킬 수 있다.



<그림 4> 가변제한속도 시스템 알고리즘

V. 결론

본 연구에서 제시한 알고리즘에서는 교통사고자료와 검지기자료를 이용하여 구축한 교통사고 발생가능성 예측 모형을 이용하여 사고위험도를 예측하고 이를 통해 제한속도를 변화시킨다. 그리고 도로상황관측 장비를 통해 도로상황이 비, 눈, 안개 등의 사고와 연관성이 높은 환경으로 변화할 경우 가변제한속도를 적용시킬 수 있다. 사고위험도 모형에 의한 제한속도 변화는 예측된 사고위험도의 수준에 따라 변화하며 그 예를 본문에 제시하였다. 그리고 도로환경에 따른 제한속도의 적용은 시거의 제약정도와 노면의 마찰력 감소정도에 따라 제한속도 적용기준을 산출하고 본문에 적용 예를 제시하였다.

본 연구에서 제시된 알고리즘은 현재 국내에 가장 보편적으로 설치된 루프검지기를 이용하여 비교적 간단한 자료 처리 과정을 거쳐 사고위험도를 예측할 수 있으며 이에 따라 사고예방 뿐만 아니라 교통류 정온화에도 기여할 것으로 판단된다. 그리고 도로상황관측장비를 이용하여 기상상황을 관측할 뿐만 아니라 도로의 소통상황도 관측이 가능하므로 다양한 정보수집이 가능할 것으로 판단된다.

본문의 기술적이슈 부분에서 제시된 사고위험도 예측 모형과 도로상황에 따른 가변제한속도 시스템이 실제 도로에 활용되기 위해서는 몇 가지 기술적 이슈들이 향후 연구에 반영되어 분석되고 해결되어야 할 것이다.

첫째, 사고위험도 예측모형에 의한 가변제한속도 적용시 제한속도의 변화 여부의 기준이 되는 threshold값을 어떻게 설정하는가에 따라 제한속도 감속치와 적용시간의 설정이 달라질 수 있다. 또한 가변제한속도 시스템이 적용될 때 갖은 제한속도의 변화가 교통류에 어떤 영향을 주고 이와 함께 사고위험도 예측 결과에 미치는 영향에 대한 연구가 향후 추진되어야 할 것이다. 실시간 도로·교통상황 자료를 이용하여 교통류의 소통에 지장을 주지 않으면서 제한속도를 변화시키는 시스템을 구축하기 위해 제한속도를 변화시키는 parameter들과 threshold값들의 반복적인 튜닝과정이 필요하다.

둘째, 사고위험도 모형에 사용된 검지기 자료의 집계간격이 15분 단위이므로 급변하는 교통상황에 민감하게 반응하는 사고위험도 예측모형을 구축하기 위해서는 15분보다 짧은 시간간격으로 수집된 원시자료들의 사용이 바람직하다. 검지기자료의 활용방안을 고려하여 장기적으로 저장·관리할 수 있는 체계가 구축되어야 할 것이다.

셋째, 본 연구의 가변제한속도 알고리즘에 사용된 사고위험도 예측모형은 추돌 및 충돌 case의 교통사고 모형을 적용하였다. 그러나 실제 발생하는 교통사고의 유형은 다양하고 각 도로의 지형과 교통류패턴도 다르므로 더 많은 자료의 분석을 통해 사고유형별, 도로선형별, 차종별, 차로별 등의 다른 Case에 대해서도 교통사고와 연관된 변수들을 산출하여 사고위험도 예측모형을 구축해야 할 것이다.

마지막으로, 기상환경의 변화를 변수로 사용하기 위해서는 추상적이지 않은 정량화된 기준으로 기상상황을 구분하고 기상변화가 운전자의 운전능력에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다. 그리고 비, 눈, 안개 등의 기상변화시 노면상태변화와 시정거리의 변화가 동시에 일어나므로 제한속도를 변화를 시키는 기준의 우선순위에 대한 분석 및 알고리즘 수정이 향후 추진되어야 할 것이다.

교통사고 예방과 교통사고 심각도 감소에 기여할 것으로 판단되는 가변제한속도 시스템에 운전자들이 쉽게 적용할 수 있도록 가변제한속도가 적용되는 구간에 대한 정보가 명확하게 제공되어야 하며 운전자들이 자발적으로 사고예방을 위해 제한속도를 준수하도록 홍보 및 법규와 같은 정책적 지원이 뒷받침되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 도철웅(1989), "교통공학원론", 청문각.
2. 도로교통안전관리공단(2007), "교통사고통계".
3. 박준형·오철·남궁성(2008), "실시간 교통자료 기반 고속도로 교통사고 발생 가능성 추정 모형", 대한교통학회지, 제26권 제2호, 대한교통학회, pp.157~166.
4. 이호영·최재성(2006), "지방부 간선도로에서 안개영향에 따른 도로의 안전성제고에 관한 연구", 한국도로학회 학술발표논문집, pp.301~306.
5. 임경택(1992), "기상학개론", 동화기술교역.
6. 조혜진 등(2003), "안개다발지역의 안전관리시스템 개발 연구보고서", 건설교통부.
7. A. D. Mason, and A. W. Woods(1998), "The Effects of Speed Controls on Traffic", Mathematics in Transport Planning and Control, pp.351~360.
8. AASHTO(1984), "A Policy on Geometric Design of Highway and Streets".
9. UTOT Research & University of Utah Traffic Lab(2001), "Adverse Visibility Information System Evaluation(ADVISE)", Fog & Dust Warning Systems

Workshop Phoenix Arizona.

10. Ali S. Al-Ghamdi(2007), "Experimental Evaluation of Fog Warning System", Accident Analysis and Prevention AAP-1167.
11. Chris Lee, Bruce Hellinga, and Frank Saccomanno(2004), "Assessing Safety Benefits of Variable Speed Limits", Journal of the Transportation Research Board, No. 1879, TRB, pp.183~190.
12. E & FN Spon(1991), "Highway Meteorology", London, England.
13. Kyeong-Pyo Kang, Gang-Len Chang, and Nan Zou(2004), "Optimal Dynamic Speed-Limit Control for Highway Work Zone Operations", Journal of the Transportation Research Board, No. 1877, TRB, pp77~84.
14. National Research Council National Academy Press(1998), "Managing Speed : Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits", Transportation Research Board Special Report 254, Washington, D.C.
15. Mohamed Abdel-Aty, Jeremy Dilmore, and Albinder Dhindsa(2006), "Evaluation of Variable Speed Limits for Real-time Freeway Safety Improvement", Accident Analysis and Prevention 38, pp.335~345.
16. National Transportation Safety Board Highway Accident Report(1992).
17. Peter Allaby, Bruce Hellinga, and Mara Bullock(2007), "Variable Speed Limits : Safety and operational Impacts of a Candidate Control Strategy for Freeway Applications", IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, Vol.8, No.4, pp.671~680.

✉ 주 작 성 자 : 박준형
 ✉ 교 신 저 자 : 오 철
 ✉ 논문투고일 : 2008. 2. 23
 ✉ 논문심사일 : 2008. 4. 16 (1차)
 2008. 7. 7 (2차)
 ✉ 심사판정일 : 2008. 7. 7
 ✉ 반론접수기한 : 2008. 12. 31
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필