

스마트도로 안전성 향상 효과의 정량화 연구

Quantitative Analysis of Safety Improvement on Smart Roads

장 현 호*
(Hyun-Ho Chang)

백 승 곁**
(Seung-Kirl Baek)

오 성 호***
(Sung-Ho Oh)

김 호 정****
(Ho-Jeung Kim)

요 약

첨단도로 안전시설물, 첨단교통관리기법 등을 기반으로 하는 다양한 첨단 교통서비스는 교통사고 등의 돌발상황을 감소시킬 것으로 예상되며, 이에 따라 도로의 지·정체 역시 감소될 것이다. 따라서 안전성 향상에 따른 지·정체 감소효과를 편익항목에 포함시킬 수 있다. 그러나 현재 우리나라의 투자평가지침에서는 이를 편익으로 계상하지 않고 있다. 스마트도로에서 제공하는 첨단 교통서비스는 인프라의 초기 투자비용을 상승시키지만 새로운 서비스로 인한 편익이 계상되지 않아 비용/편익 분석 시에 경제성을 확보하지 못하는 문제점을 가지게 된다. 따라서 본 연구는 과거 3년간의 고속도로 사고 자료를 이용하여 평균 차로차단시간을 추정하고, 미시적 시뮬레이션을 이용하여 구축된 자료와 회귀분석기법을 통해 지체시간 추정모형을 개발하였다. 또한 개발된 모형이 투자평가기법에 적용될 수 있도록 계량화에 필요한 원단위(평균용량감소비율 등)를 제시하였다. 개발된 방법론을 스마트하이웨이사업 사례에 적용 결과, 스마트 안전시설로 인한 사고감소율을 10%로 가정하였을 경우, 30년 동안 총 안전성 향상 편익은 1,392억 원에 이르는 것으로 분석되었다.

Abstract

Intelligent transport services on smart roads tend to have a problem at the stage of benefit-cost analysis that can not secure economic feasibility of the new services which increase early investment cost on building its infrastructure. It is expected that the number of road accidents, 'Incident/Accident', will decline through various safety services using intelligent safety facilities, intelligent transport management and so on, and that traffic congestion will also decrease. The effect of traffic congestion reduction could be the benefit by safety improvement, however current investment-analysis process in Korea does not appropriate it as a benefit. This study estimated road blocking time with 'Incident/Accident' classification and highway accident data of past three years. It also developed a generalized model by a regression analysis with a microscopical simulation. Furthermore, it suggested necessary units on quantitative analysis in order to make the developed model applicable to investment evaluation. As a result of applying the developed model to Smart-Highway Project, it showed that total safety improvement benefit is about 139 billion dollars over 30 years when it is supposed that accident decreasing rate by smart safety facilities is 10%.

Key words : Incident, delay, smart roads, safety, feasibility study

* 주저자 : 서울대학교 환경대학원 박사수료

** 공저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 교통연구실 수석연구원

*** 공저자 및 교신저자 : 국토연구원 국토인프라GIS연구본부 연구위원

**** 공저자 : 국토연구원 연구위원

† 논문접수일 : 2011년 1월 21일

† 논문심사일 : 2011년 8월 3일

† 게재확정일 : 2011년 8월 4일

I. 서 론

국토의 동맥인 도로와 철도 등의 교통인프라 건설은 대규모 재원이 필요하기 때문에 사전에 타당성을 면밀히 평가하여 경제성 있는 노선을 건설하고 있다. 정부는 이러한 사전 타당성 평가의 중요성을 인지하고 ‘교통시설투자평가지침’에 사전 평가에 필요한 다양한 편익 및 비용 지표와 해당 원단위를 제시하고 있다. 해당 지침에서는 통행시간, 차량운행비, 교통사고비용, 대기오염발생량, 온실가스 발생량 및 차량소음발생량 감소와 통행시간 신뢰성 향상 등을 편익으로 구분하고 있으며, 이러한 지표와 원단위를 기반으로 신규 교통인프라에 대한 사전 경제성 평가를 수행한다.

최근 통신기술 및 IT(Information Technology)분야의 급속한 성장으로 이를 활용한 다양한 서비스가 교통 분야에도 파생되고 있다. ITS(Intelligent Transportation Systems)가 가장 대표적인 서비스로서 교통정보 수집/제공 시설물을 교통인프라에 설치하여 실시간 교통정보서비스 등을 제공하고 있다. ITS와 같이 기존 교통인프라에 추가적으로 설치되는 사업의 경우, 현재의 교통인프라 투자평가와는 다른 형태의 투자평가가 수행되어 왔다. ITS는 교통인프라의 부속물이기 때문에 2000년대 중반까지 기존의 교통시설투자평가지침에서 제시한 편익항목을 기반으로 사전평가가 아닌 사후평가를 통해서 경제성을 제시해 왔다. 2000년대 후반에 ITS사업도 사전 투자평가가 요구되어 기존 편익지표 외에 서비스 목적에 맞는 편익지표가 제시되었으나, 그 적용은 현재까지 미미한 상태이다. 또한 최근 신설되는 교통인프라에는 교통정보 수집/제공시설, 자동염수분사시설 등의 부가 서비스를 위한 시설물이 설치되고 있지만, 이에 대한 뚜렷한 사전 경제성 평가기법은 부재한 상황이다.

이러한 스마트 인프라는 ‘기존 교통인프라가 제공하는 이동성과 접근성, 쾌적성, 친환경성 외에 ① 안전성과 ②정보성 및 ③관리성 등의 향상을 위해 부가적인 첨단 지능형 시설물이 설치된 도로, 철도, 결절점 등’으로 정의할 수 있다(국토연, 2010). 여기

서 ① 안전성 향상이란 첨단의 안전시설물을 설치함으로써 얻을 수 있는 교통사고 감소효과이며, ② 정보성 향상이란 알 수 없는 하류부 교통류 상태를 이용자에게 인지시켜줌으로써 얻어지는 효과이다. 그리고 ③ 관리성 향상이란 교통시설 관리자가 첨단 시설을 통해 관리상에 얻을 수 있는 효과를 가리킨다. 따라서 기존 투자평가지침을 기반으로 현재의 교통시설이 제공하는 이동성 및 접근성은 물론이며 안전성과 정보성 등의 향상을 위해 다양한 부가서비스를 겸비한 스마트 교통인프라를 위한 합리적인 투자평가방법 개발의 필요성이 대두되고 있다. 미국, 영국, 독일 등의 선진국의 경우, 스마트도로에 설치되는 시스템의 경제성 평가항목으로 본 연구에서 제안한 안전성 효과 측정을 통한 편익의 계상을 유도하고 있다. 그러나 실제 연구가 진행되지 않고 있으며, 지침상의 선언으로 그치고 있는 실정이다[1].

첨단도로 안전시설물, 첨단교통관리기법 등을 이용하여 돌발상황(특히 교통사고)에 의한 도로의 지·정체를 감소시킬 수 있다. 이러한 교통시스템의 돌발상황 지·정체 감소효과는 비 반복적 행태로서 편익항목에 해당된다. 그러나 현행의 투자평가지침에서는 편익으로 계상하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 추가 편익항목으로 계량화하고자 한다. 이를 위해 우선 돌발상황을 유형별로 구분하고, 이에 대한 지체시간을 일반적인 모형으로 제시하였다. 본 연구에서 제시된 투자평가방법(안)을 현재 연구개발이 진행되고 있는 스마트 하이웨이에 적용하여 편익을 산출하고, 그 결과를 현행 투자평가방법론의 편익 규모와 비교/분석하였다. 스마트하이웨이사업의 후보 중 하나인 세종~용인구간에 적용한 결과, 안전성 향상으로 인한 편익은 30년 동안 1,392억 원에 이르는 것으로 분석되었다.

II. 스마트 도로의 안전성 향상 개념

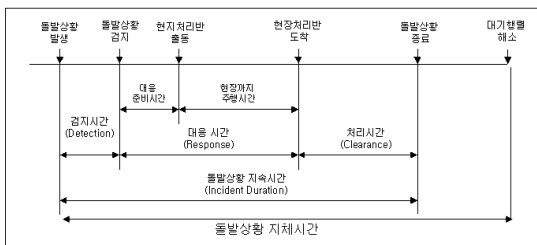
스마트도로 건설로 인한 통행시간 감소, 차량운행비 감소, 교통사고비용 감소 등과 같은 기존 교통 편익 외에 양방향 교통정보로 인한 지·정체 및 돌

발상황 감소 등의 추가적인 교통편익이 발생할 것으로 판단된다. 교통사고의 감소는 직접적으로 두 가지 효과가 예상되며, 이는 ① 사고 감소에 따른 인적/물적 피해 감소측면과 ② 지·정체 시간의 감소로 구분할 수 있을 것이다. 이 중 인적/물적 피해의 감소는 현행의 교통시설투자평가지침을 이용하여 계량화가 가능하다. 즉, 사고율(사고건수/차량-거리)과 인적/물적 피해의 사회적 비용을 적용하여 산정할 수 있으며, 또한 차량의 운행거리가 짧아지면 사고가 감소한다는 원리가 적용된다.

지·정체 감소 효과는 부가서비스를 통해 안전성이 향상되면 교통사고 감소가 예상되고, 이 감소된 사고로 인해 지·정체시간이 감소하는 효과이다. 사고가 발생하면 일부 혹은 전체 차로의 차단이 불가피하며, 이로 인한 지·정체의 발생 또한 불가피하다. 사고의 빈도가 감소한다면 차로 차단 등에 의한 지·정체는 상당수가 감소할 것이며, 이로 인한 편익은 운전자에게 돌아갈 것으로 예상할 수 있다. 그러나 이러한 안전성 향상에 따른 효과, 즉 사회적 편익은 현재의 투자평가지침에 평가항목으로 반영되고 있지 않으며, 현재로서는 계상이 어렵다.

사고 감소로 인한 지·정체시간 감소 효과를 측정하기 위해서는 교통사고로 대표되는 ‘돌발상황 지체시간’의 개념에 대한 이해가 필요하다. 돌발상황 지체시간은 돌발상황 발생 시점부터 대기행렬이 해소되는 시점까지로 정의되며, 주로 돌발상황 지속시간에 영향을 주는 요인과 상류부 교통수요에 의해 결정된다. <그림 1>은 돌발상황 지속시간을 돌발상황 처리과정으로 보여주고 있다[2,3].

돌발상황 지속시간과 관련 있는 요인은 크게 ①



<그림 1> 돌발 지속시간의 구성[2,3]

<Fig. 1> Composition of incident duration[4]

<표 1> 돌발상황 지속시간 관련 요인(3,4)
<Table 1> Factors related to incident duration(3,4,)

운영적 요인	돌발 유형별 요인	환경적 요인
-감지, 확인 및 대응시간 -견인차 지원 여부 -비상차량 대기 여부 -노면 관리상태	-대형차량 포함여부 -적재물의 유형 -인명피해 정도 -차로차단 여부 -화재발생 여부	-강우, 강설 등 기후여건 -노면상태

운영적 요인, ② 돌발상황의 유형, ③ 환경적 요인으로 <표 1>과 같이 분류할 수 있으며, 돌발상황 지속시간 동안 돌발지점의 가용용량과 깊은 관련이 있다. 따라서 돌발상황으로 인한 지체시간은 돌발상황 지속시간, 돌발지점의 가용용량, 그리고 상류부의 교통수요에 의해 결정된다.

Ⅲ. 기존 연구

돌발상황 감소로 인한 지·정체 감소 효과를 추정하기 위해서는 (평균) 돌발상황 지속시간 추정이 필요하다. 이는 돌발상황으로 인해 차량 영향을 받는 차량의 대수를 추정해야 하기 때문이다. 따라서 다양한 돌발상황 지속시간 예측모형이 보고되었으며, 개발모형은 주로 ① 확률분포모형, ② 선형회귀모형, ③ 조건부 확률모형, ④ 시계열모형, 그리고 ⑤ 의사결정 구조모형으로 구분할 수 있다.

1. 확률분포 모형

확률분포(Probabilistic distribution)모형은 확률밀도함수를 이용하여 돌발 지속시간을 예측하며, 주로 Lognormal, Log-logistic, 그리고 와이블(Weibull) 분포를 이용하여 개발되었다. Golob 등(1987)은 332개의 고속도로 본선 사고자료와 193개의 연결부 사고자료를 이용하여 Lognormal 확률분포모형을 제시하였다[5]. 또한 Giuliano (1989), Garib 등(1997), Sullivan (1997)등은 Lognormal 확률분포를 이용하여 돌발상황 지속시간을 예측하였다[6,7,8]. Jones 등(1991)은 Log-logistic 분포를 이용한 확률분포모형을 제시하였다[9]. 특히, Nam과 Mannering (2000)은 위험물관련 돌발 지속시간의 예측에 있어 와이블 분

포를 적용할 수 있음을 보였다[10]. 그러나 이러한 확률분포모형은 단시간 돌발상황에 대한 많은 부분이 포함되며, 이는 분포가 좌측으로 편향되는 경향이 있기 때문이다.

2. 선형회귀 모형

선형회귀모형은 실제 교통사고 자료와 모의시험 자료를 이용한 모형으로 구분하여 고찰하였다. Ozbay & Kachroo(1999)는 미국의 I-880 고속도로 교통사고 자료를 이용하여 교통사고로 인한 지체를 추정하기 위하여 실측 자료를 기반으로 두 개의 다중선형 회귀모형을 개발하였으며, 모형의 구조는 차단 차로수, 관련 차량대수, 지속시간, 교통수요가 증가할수록 지체가 증가하도록 설계되었다[11].

모형1은 돌발상황 지속시간, 상류유입 교통량, 차단 차로수(Closed lanes)로 인한 용량감소, 돌발상황에 연루된 차량수를 통해 총 지체를 산정하기 위한 모형으로서, 누적도착곡선(Cumulative arrival curve)과 누적출발곡선(Cumulative departure curve)사이의 영역을 수학적으로 표현한 모형이다. 모형2는 돌발상황 지속시간, 차단 차로수, 돌발상황에 관련된 차량 대수에 대한 함수로 누적돌발상황지체를 예측하며, 상류부 수요와 같은 반영하기 어려운 변수를 사용하지 않는다.

Cambridge Systematics(1998)는 일 및 침두시에 대해 고속도로 및 간선도로에서 발생한 돌발상황(Incident)과 사고(Accident)에 의한 지체를 자유교통류 속도, 용량대비 연평균일교통량 비 등을 이용하여 방향별로 예측하는 회귀모형을 차로별(편도 2, 3, 4차로)로 제시하였다[12]. Northwestern 모형(Ozbay and Kachroo, 1999)은 Illinois 도로국에서 제공된 121건의 돌발상황 자료를 이용하여 소거시간(Clearance time)을 평가하기 위하여 제안되었다[11]. 모형의 독립변수는 견인차 사용 여부, 관련된 대형 차량의 대수, 과적여부, 액체, 벌크형 화물의 여부, 심각한 상해건수, 노면 시설 훼손, 기상조건이다. Garib 등(1997)은 2개월 동안 205 건의 교통사고 자료를 이용하여 유고지속시간을 예측하기 위한 log

기반(Log-based) 모형을 개발하였다. 모형의 개발에 이용된 6개 주요 독립변수는 영향 차로수, 관련 차량 대수, 트럭관련 여부, 일중 시간대, 경찰 대응 시간, 기상 상태였으며, 모형의 결정계수(R^2)는 0.81로 높았다[7].

모의실험 자료를 이용한 회귀식 기반 예측방법은 가능한 시나리오를 구축하고, 이에 따라 모의실험을 통해 지체를 분석한 후, 이를 회귀식으로 설명하는 방법이다. Cohen과 Southworth(1999)는 미시교통류 모형인 FRESIM을 이용하여 고속도로 돌발상황으로 인한 지체의 평균과 분산을 교통량 대 용량의 함수로 추정하여 차로수별로 제시하였다. 또한 돌발상황에 의한 지체의 정도에 영향을 미치는 주요 변수는 돌발지속시간, 교통수요 대 돌발지점의 가용용량이라 지적하였다[13]. 시뮬레이션을 이용한 지체시간 예측은 돌발상황 발생지점 및 상류부 교통류의 흐름을 보다 상세하게 모사할 수 있기 때문에 돌발상황 발생시 교통와해 등 복잡한 교통류의 해석에 적합하지만, 기본적으로 실제자료를 이용한 회귀모형과 동일한 단점을 갖는다.

3. 조건부 확률 모형

실제로 운영자는 일정시간(예 15분) 동안 지속된 돌발상황이 언제 종료될(예 앞으로 30분 후) 것인가에 대한 의사결정지원이 필요하다. 조건부 확률(Conditional probabilities)모형은 이러한 조건부 확률에 대한 돌발 지속시간을 예측하기 위한 접근법이다. 조건부 확률 모형은 Golob 등(1987)가 지적한 “각각의 돌발상황 단계(Phase)는 이 단계의 돌발상황의 길이에 의해 영향을 받는다”는 돌발상황의 연속성에 기초한다. Jones 등(1991)은 이러한 조건부 확률모형을 보고하였다. Nam과 Mannering (2000)은 조건부 확률을 이용한 위험물 기반(Hazard-based) 모형을 제시한 바 있다[9,10].

4. 시계열 모형

Khattak 등(1995)은 대부분의 돌발 지속시간 예

측모형은 모든 돌발상황 변수에 대한 정보를 요구하기 때문에 운영적 값(Operational value)을 가지지 않는다고 지적하고 유고지속시간을 10단계로 구분하여 해당 단계에서 가용한 정보를 이용하여 시계열(Time sequential) 모형을 제시하였다[14]. 그러나 시계열 모형은 단계별 가용정보의 수집과 모형의 정산 측면에서 현실적인 적용의 문제점을 안고 있다.

5. 의사결정구조 모형

의사결정구조(Decision tree) 모형은 특정 형태의 분류 구조(Classification tree)를 기반으로 하는 패턴인식 모형이라고 할 수 있다. Ozbay와 Kachroo (1999)는 Northern Virginia 지역에서 발생한 다량의 교통사고 자료를 수집/분석하여 교통사고의 특성별로 의사결정모형을 제시하였다. Northwestern 대학은 ADVANCE 프로젝트의 일환으로 801건의 교통사고자료를 이용하여 돌발상황 처리시간 모형을 개발하였으며, 독립변수로는 대응차량의 대수와 역할을 이용하였다[11]. 신치현 등(2001, 2002)은 21개월 동안의 교통사고자료를 이용하여 돌발상황 지속시간 의사결정구조를 개발하였다[15,16]. 특히 이중 추돌사고와 다중 추돌사고에 대한 의사결정구조를 제시함으로써 보다 정교하고 다양한 의사결정을 지원할 수 있는 모형을 제시하였다[17].

이상의 기존연구 고찰 결과, 일부 모형은 차량의 지·정체를 예측하지만 대부분의 모형은 돌발상황 지속시간을 예측하여 현장의 운영수준에서 활용하도록 개발되었다. 또한 예측된 돌발상황 지속시간은 전통적으로 적용되는 결정론적 대기행렬법 또는 시뮬레이션의 입력값으로 이용되어 돌발상황으로 인한 차량의 지·정체 정도를 예측하고 있다. 그러나 현실적으로 계획단계에서 다양한 교통정보를 수집하는 것은 불가능한 현실이다. 따라서 독립변수를 최소화하고 본 연구의 목적에 적합한 모형의 개발이 필요하다. 본 연구는 스마트 도로의 안전성 향상으로 인한 효과를 사전 평가단계에서 직접적으로

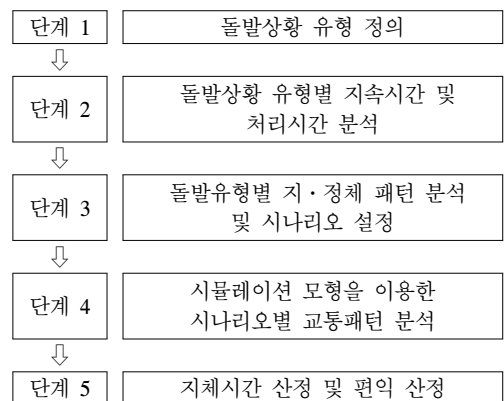
고려가 가능한 방법론을 제시하고자 한다. 따라서 돌발상황으로 인한 지·정체를 명료한 변수를 이용하여 직접 추정할 수 있는 모형의 개발이 필요하다.

IV. 개발지표 적용 및 결과분석

1. 안전성 향상 효과 추정기법 개발

본 연구는 가장 먼저 스마트화가 진행될 것으로 예상되는 고속국도를 중심으로 원단위 회귀모형을 제시하고자 한다. 돌발상황 지체시간은 운영적 요인, 돌발상황 자체 특성, 기타 환경적 요인에 의해 달라질 뿐만 아니라 상류부 교통수요에 의해서도 다양하게 달라지므로, 이러한 다양한 요인에 대한 실제 자료를 확보하기가 어렵다. 특히, 지체시간을 산정하기 위해서는 돌발상황 특성자료 외에 돌발상황 발생구간의 검지기자료들에 대한 상세한 분석이 필요하나, 돌발상황 유형별로 검지기 자료를 확보하기가 어렵고 지체시간 산정에 비효율적으로 많은 시간이 소요될 것으로 판단된다.

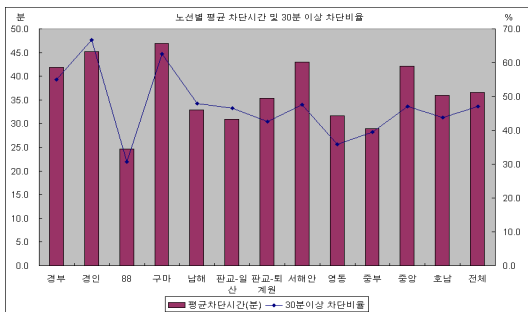
따라서 본 연구에서는 다양한 시나리오를 합리적으로 설정하고, 모의실험을 통해 지체를 분석한 후, 이를 회귀식으로 모형화하는 방법을 분석기법으로 설정하였다. 안전성 향상 효과 추정을 위한 분석 과정은 <그림 2>와 같이 5 단계로 구성된다[18].



<그림 2> 지·정체시간 감소편익 산정 과정 (18)
<Fig. 2> Est. pro. of delay-reduction benefits (18)

2. 고속도로 돌발상황 특성 분석

고속도로 돌발상황의 대부분은 교통사고이므로, 한국도로공사에서 구축한 2006~2008년의 3년간 교통사고 DB를 기반으로 각 사고 형태 및 항목별로 도로차단 (해당방향 모든 차로 차단) 시간을 분석하였다. 3년간 고속도로 본선에서 발생한 총 5,913건의 교통사고 자료를 이용하여 도로차단시간을 분석하였으며, 공사 등 그 발생 및 작업시간이 예측 가능한 돌발상황은 제외하였다. 분석결과, 돌발상황으로 인한 평균차단시간은 약 38분으로 나타났으며, 전체 사고의 29.9%인 1,767건이 정상통행이 가능한 것으로 분석되었다. 30분 이내 차단은 2,106건으로 전체의 35.6%를 차지하였으며, 30분 이상 차단 비율은 고속도로 전체의 34.5%를 차지하였다. 그리고 고속도로 노선별 평균 차단시간과 30분 이상 차단비율은 <그림 3>과 같다[19].



<그림 3> 고속도로 노선별 차로 차단시간 분석 결과
(Fig. 3) Analysis results of lane-closure time according to freeway lines

3. 분석 시나리오 설정

본 연구는 차량 모의실험 자료를 이용하여 돌발상황 발생시 차량의 지·정체 자료를 구축하고, 이를 이용하여 교통사고 유형별 지·정체를 예측하는 모형을 개발하였다. 따라서 모의실험의 정산에 적용된 미시적 교통 파라미터를 설명한 후, 설정된 분석 시나리오에 대해 설명하도록 한다. 차량 시뮬레이터는 VISSIM를 이용하였으며, 차로별 용량은 2,000(대/시)으로 설정하였다. KHCM은 설계속도

120 kph일 때 용량 ≤ 2,300(승용차/차로/시), 100 kph의 경우 2,200으로 제시하고 있으나, 실제 용량은 약 2,200 수준이다. 그리고 용량감소 약 5%를 고려하면 실제 용량은 2,090 (≈ 2,200 × 0.95)으로 설정할 수 있다. 그리고 ‘2008년 고속도로 교통량 통계’에 제시된 고속도로의 평균 중차량 구성비는 7.8%, 대형은 1% 미만이다. 따라서 평지를 기준으로 소형, 중형, 대형의 중차량 보정계수는 각각 1.0, 1.5, 2.0 임으로 중차량 보정계수(E_t)는 약 0.954 (≈ 1/[1 + 0.078(1.5 - 1) + 0.01(2.0 - 1)])이다. 이를 용량(대/차로/시)로 환산하면 2,000 (≈ 2,090 × 0.954)이다. 따라서 차량추종모형에 요구되는 파라미터는 최대통과교통량이 2,000(대/차로/시)이 되도록 정산하였으며, 설정된 파라미터는 다음과 같다.

- 안전거리(m): 2.3
- 반응시간(초): 1.5
- 가감속도(%) : 가속도 3.0 , 감속도 -4.3
- 희망속도(kph): 승용차(평균 110, 표준편차 5), 중차량(평균 90, 표준편차 5)

관련 연구결과 및 최근 년도 고속도로 돌발상황 관련 자료를 이용하여 돌발상황 특성에 대한 범위 및 계급값을 설정하였으며, 돌발상황 시나리오는 도로차로수, 교통수요, 차단시간, 차단 차로수, 용량 감소율로 구분하여 다음과 같이 설정하였다.

- 도로 차로수: 2개 차로, 3개 차로, 4개 차로
- 용량 대비 교통량 비율(V/C): 0.37, 0.56, 0.74¹⁾
- 차단시간(분): 15, 30, 60
- 차단 차로수: 1, 2, 3개 차로 (2, 3, 4차로에 대해 차단 차로수를 1, 2, 3개 차로로 각각 설정)
- 용량 감소율: 0.0~1.0

일반적으로 고속도로의 종단선형은 매우 우수하므로 모의실험의 도로조건은 평지로 하였다. 차량 구성비는 일반차량 91.2%와 중차량 8.8%로 구성하

1) LOS A-B, B-C, C-D의 경계인 교통량(대/차로/시)은 각각 700, 1,150, 1,500이며, 용량 2,000인 경우 V/C는 0.35, 0.58, 0.75이다. 그러나 미시적 시뮬레이션이므로 정확히는 설명하지 못하고 0.37, 0.56, 0.74로 정산되었다.

였다[20]. 또한 증차량 구성비를 고려하면 차로당 평균 용량은 약 2,000(대/시/차로)이다. 분석구간은 대기차량을 모두 포함할 수 있는 연장인 200km로 설정하였으며, 설정된 돌발상황 시나리오 값을 입력자료로, 각 시나리오별로 돌발상황으로 인한 혼잡이 완전히 해소될 때까지 모의실험을 수행하였다. 또한 시나리오별로 10회 반복 수행한 결과를 이용하여 돌발상황 시나리오별 지·정체 패턴을 분석하였다.

용량 감소율은 식(1)과 같이 산정하였으며, 평상시 최대통과교통량은 단위시간당 네트워크를 빠져나가는 차량대수로 정의하였고 차로당 2,000대/시로 설정하였다. 돌발상황시 통과교통량은 위와 같은 조건에서 돌발상황 발생지점 통과 직후의 시간당 통과교통량으로 산출하였다.

$$\text{용량감소율} = \left(1 - \frac{\text{돌발상황시 통과교통량}}{\text{평상시 최대통과교통량}}\right) \quad \text{식(1)}$$

사전 평가단계의 거시적 평가수준에서 상세한 돌발상황 정보를 수집하기는 불가능하다. 따라서 시나리오 설정이 가능한 차로수, 차단 차로수, 그리고 사고 발생 차로를 이용하여 <표 2>와 같이 돌발상황 발생 시나리오를 16개로 설정하였다. 차단시간, V/C를 고려한 총 시나리오의 개수는 총 96개이며, 돌발상황 시나리오별 용량 감소율 분석결과를 <표 3>과 같다.

<표 2> 돌발상황 시나리오
(Table 2) Scenario of incidents

차단 차로수	발생차로	차로수		
		2	3	4
1	1	S2_1	S3_1	S4_1
	2	S2_2	S3_2	S4_2
	3	-	S3_3	S4_3
	4	-	-	S4_4
2	1, 2	-	S3_5	S4_5
	2, 3	-	S3_6	S4_6
	3, 4	-	-	S4_7
3	1, 2, 3	-	-	S4_8
	2, 3, 4	-	-	S4_9

<표 3> 분석결과: 돌발 시나리오별 용량 감소율
(Table 3) Analysis results: capacity-drop rates according to incident scenario

차단 차로수	발생차로	차로수		
		2	3	4
1	1	0.74	0.61	0.58
	2	0.74	0.65	0.59
	3	-	0.61	0.59
	4	-	-	0.58
2	1, 2	-	0.80	0.69
	2, 3	-	0.81	0.74
	3, 4	-	-	0.71
3	1, 2, 3	-	-	0.86
	2, 3, 4	-	-	0.85

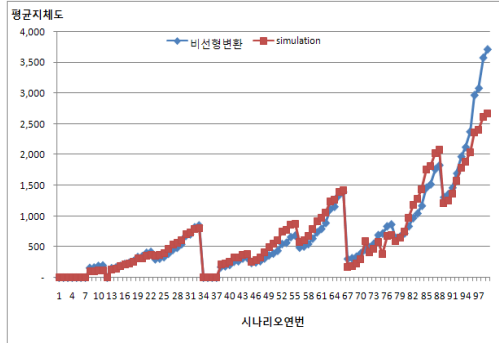
4. 지체시간 추정모형 개발

앞에서 설명한 바와 같이 사전 평가단계에서 교통사고로 인한 지·정체를 추정하기 위한 모형을 개발해야 하기 때문에 실제 적용할 수 있는 변수는 한정된다. 따라서 본 연구에서는 돌발상황으로 인한 차량의 지체(초/대)를 예측하기 위한 독립변수로서 돌발상황의 주요변수인 V/C, 돌발지속시간, 그리고 용량감소비율을 이용하였다. 돌발상황으로 인한 평균지체시간을 다중선형 회귀모형으로 1차 평가한 결과, 1,000초 이하의 평균지체에서는 지체를 과다추정하고, 1,500초 이상에서는 지체를 과소 추정하는 문제가 발생하였다. 또한 모형의 구조상 이론적으로 음의 값이 도출될 수 있다. 따라서 설명변수가 지체에 미치는 비선형적인 영향을 나타내기 위해 1차로 구축된 다중선형모형을 음지수모형의 종속변수로 다시 적용한 모형을 개발하였으며, 개발된 비선형 회귀모형은 식 (2)와 같다. 개발된 모형은 지체시간의 비선형적 특성을 반영하므로 다중선형회귀모형에서 나타나는 지체시간 과다추정 및 과소추정 문제를 해결하였다. 개발모형은 <그림 4>, <그림 5>와 같이 구축자료의 추세를 설명하였으며, 산포도의 결정계수(R^2)는 0.899로 높게 나타났다.

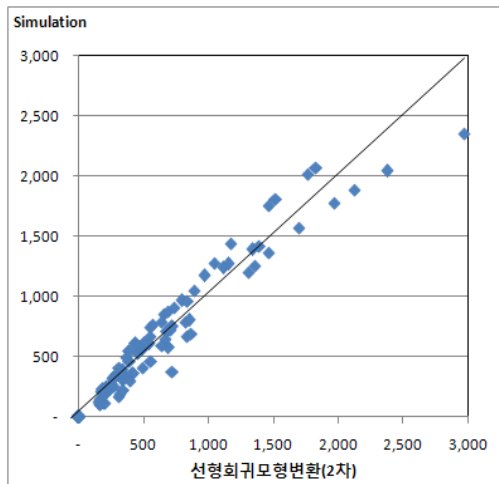
$$Y = 152.6 e^{0.00159x} \quad \text{식(2)}$$

$$x = -3,077 + 2,346x_1 + 2,474x_2 + 22.1x_3$$

여기서, Y : 지체를 경험한 차량의 평균지체(초/대),
 x_1 : 용량감소 비율(0.0~1.0), x_2 : V/C (0.0~1.0),
 x_3 : 돌발 지속시간(분)



〈그림 4〉 돌발 시나리오에 대한 시계열 비교
 (Fig. 4) Comparison on incident-scenario series



〈그림 5〉 산포도: 모의실험 vs 추정
 (Fig. 5) Scattergram: simulation vs estimation

개발모형의 적합도 검증결과는 <표 4>와 같으며, 회귀계수 및 회귀식 검증의 유의수준(%)은 모두 0.0001이하로 나타나 5% 수준에서 매우 양호한 것으로 분석되었으며, 회귀식의 결정계수(R^2)는 0.846으로 우수하게 나타났다. 이는 본 연구가 모의실험 자료를 이용하고 돌발상황으로 인해 발생하는 지·정체에 영향을 미치는 주요한 변수를 간략하게나마 고려하였기 때문이다. 따라서 거시적 수준에서의 사전 평가단계에는 적합하다고 판단된다.

〈표 4〉 (개발모형의) 적합도 검증 결과(df=95)
 (Table 4) Results of goodness of fit test

구 분	통계값		
	유의수준	F값	R^2
회귀계수 검증	용량감소율	0.0001	9.001
	V/C	0.0001	14.622
	돌발지속시간	0.0001	15.074
회귀식 검증	유의수준	F값	R^2
	0.0001	174.019	0.846

모의실험에 의해 분석된 V/C (교통량 대비 용량 비율)에 따른 지·정체 시간 및 영향을 받는 차량 대수는 <표 5>와 같으며, 사고 1건당 평균 지체시간은 704(초/대), 영향을 받는 차량대수는 1,680(대/차로)로 분석되었다.

〈표 5〉 원단위 산정 결과
 (Table 5) Estimated results of basic units

V/C	평균지체시간 (초/대)	영향을 받는 차량대수 (대/차로)
0.35	246	1,050
0.58	704	1,740
0.75	1,162	2,250
평균	704	1,680

모의실험을 통해 분석된 평균 용량 감소율 0.72와 한국도로공사의 2006~2008년의 평균 돌발상황 지속시간 38분을 원단위 값으로 적용하면, 식 (3)과 같이 돌발상황에 따른 (최소) 지체 비용(원/대)의 산정이 가능하다.

$$CC = AD * VOT / 3,600 \quad \text{식(3)}$$

여기서, CC: 돌발상황에 의한 지체시간 비용(원/대), AD: 개발된 비선형 회귀모형에 의해 추정된 평균 지체(초/대), VOT: 시간가치(14,587원/시간/대), 교통시설 투자평가지침(국토해양부, 2009)

연간 안전성 향상 편익은 식(4)에 추정결과를 적용하여 산정하며, 구축된 도로망의 링크 통행배정 결과를 이용하여 고속도로 링크의 역대-킬로미터

(10^8 대·km)를 산출하여 안전성 향상 편익을 추정할 수 있다.

$$VOS = \sum_l [Q_l \times D_l \times A_l \times S \times C \times V \times VOT \times \frac{365}{10^8 \times 3,600}] \quad \text{식(4)}$$

여기서, VOS: 안전가치 (Value of Safety, 원/년), Q_l : 링크 l 의 교통량 (대/일), D_l : 링크 l 의 길이 (km), A_l : 고속도로의 사고건수 (건/연대·km), S : 스마트 인프라로 인한 사고 감소율 (0~1), C : 사고로 인한 평균지체시간 (초/대), V : 사고로 영향 받는 차량대수 (대/건), VOT : 시간가치 (원/시/대)

5. 사례 분석

연구의 활용도 제고를 위해 기존 투자평가지침과 본 연구에서 제시하는 스마트 교통인프라 평가 방법을 고려할 경우 편익의 변화를 비교/분석하였으며, <표 6>과 같다. 적용대상은 스마트하이웨이사업의 후보노선 중 세종~용인구간으로 선정하였다. 교통시설투자평가지침의 편익항목은 총 4개로 통행시간감소, 차량운행비용 감소, 교통사고비용 감소, 환경비용 감소(대기오염, 소음감소) 항목으로 구성하였으며, 스마트 교통편익은 4개 항목에 안전성 향상 편익을 포함하여 총 5개의 항목으로 구성하였다.

분석결과, 현재 교통시설 투자평가지침에 의한 세종~용인 구간의 30년간 총 편익은 할인율을 적용하여 약 4조 2,140억 원으로 산정되었다. 스마트 교통편익중 안전성 향상 편익은 스마트 인프라 시설로 인한 사고 감소율을 10%로 가정하였을 경우, 30년 동안 총 1,392억 원에 이르는 것으로 분석되었

다. 따라서 총 편익은 약 4조 3,532억 원으로 현행의 산정방식에 비해 3.3% 증가하였다.

V. 결 론

교통시설물은 지속적으로 첨단화되고 있으며, 이에 따라 다양한 가시적 혹은 비가시적 서비스들이 제공될 것으로 예상된다. 첨단 고속도로 교통서비스는 인프라의 초기 투자비용을 상승시키지만 새로운 서비스로 인한 편익을 발생시킨다. 그러나 이러한 신규 편익은 경제성 분석과정에서 계상되지 않아 사업의 타당성을 낮게 평가하는 문제점을 가지고 있다. 첨단교통관리기법 및 교통정보제공시스템 등의 도입으로 인하여 교통사고가 감소되면, 교통사고로 대표되는 돌발상황에 의해 유발되는 도로의 지·정체는 감소될 것이다. 이러한 돌발상황 지·정체 감소효과는 편익항목에 포함되어야 하지만, 현재의 투자평가지침에서는 편익으로 계상하지 않고 있는 실정이며, 이를 반영하고자 하는 분석가의 입장에서 또한 간략하면서 적절한 방법론이 제시되어 있지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 첨단 교통서비스 중 안전성 편익에 대한 산정방법을 제시하였다. 이를 위해 돌발상황을 유형구분하고, 이에 대한 지체시간을 일반적인 모형으로 제시하여 스마트도로로 인한 추가적인 안전성을 추가편익항목으로 계량화하였다. 분석결과, 안전성은 기존 편익(통행시간절감편익)에 대비하여 많은 부분을 차지하지는 않지만, 투자비용 대비 우수한 편익을 도출하는 것으로 나타났다.

이동성 및 접근성 중심의 교통인프라 건설에서 탈피하여 지능화된 스마트 교통인프라 건설로 교통인프라의 패러다임이 변화하고 있는 시점에서, 본 연구의 결과는 관련 법·제도의 수정에 적절한 근거 자료로 활용될 수 있을 것이다. 특히, 본 연구에서 제시한 스마트 교통인프라의 투자평가방법을 활용하여 “투자평가지침(국토해양부)”, “예비타당성조사 지침(기획재정부)” 등의 관련내용을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 스마트 교통인프라로

<표 6> 편익 분석결과 비교(억원)

<Table. 6> Comparison on the results of benefit analysis.

절감 편익	통행 시간	운행 비용	사고 비용	환경 비용	안전 성	계
기존	30,310	8,840	1,537	1,451	-	42,140
제안	30,310	8,840	1,537	1,451	1,392	43,532

인한 쾌적성 및 관리성 향상 등 정성적 평가지표들에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 강연수 외, “ITS 투자평가편람 작성을 위한 연구,” 한국교통연구원, 2007.
- [2] 건설교통부, “고속도로 돌발상황관리시스템,” 2003년도 ITS 연구개발사업 최종보고서, 2004. 7.
- [3] 백승걸, 박재범, 장현호, “돌발상황으로 인한 고속도로 교통영향 예측 시스템 개발,” 제2회 ITS학회 학술발표, 2003. 11.
- [4] FHWA, “Traffic Incident Management Handbook,” FHWA, 2000.
- [5] T. F. Golob, W. R. Wilfred and D. L. John, “An analysis of the severity and incident duration of truck-involved freeway accidents,” Accident Analysis and Prevention, vol. 19(4), pp.375-395, 1987.
- [6] G. Giuliano, “Incident characteristics, frequency, and distribution on a high volume urban freeway,” Transportation Research Part A, vol. 23(5), pp.387-396, 1989.
- [7] A. Garib, A. E. Radwan and H. Al-Deek, “Estimating Magnitude and Duration of Incident Delays,” Journal of Transportation Engineering, vol. 123(6), pp.459-446, 1997.
- [8] E. C. Sullivan, “New model for predicting incidents and incident delay,” ASCE Journal of Transportation Engineering, vol. 123, pp.267-275, 1997.
- [9] B. Jones, J. Lester and M. Fred, “Analysis of the frequency and duration of freeway accidents in Seattle,” Accident Analysis and Prevention, vol. 23(4), pp.239-255, 1991.
- [10] Nam Doohee and F. Mannering, “An Exploratory hazard-based analysis of highway incident duration,” Transportation Research Part A, vol. 34(2), pp.85-102, 2000. 2.
- [11] Kaan Ozbay and Pushkin Kachroo, “Incident Management in Intelligent Transportation Systems,” Boston, MA: Artech House, 1999.
- [12] Cambridge Systematics Inc., “Sketch methods for estimating incident-related impacts,” Federal Highway Administration, 1998.
- [13] H. Cohen and F. Southworth, “On the measurement and valuation of travel time variability due to incidents on freeways,” Journal of Transportation and Statistics, vol. 2 (2), pp.123-132, 1999.
- [14] A. J. Khattak, J. L. Schofer and M. H. Wang, “A simple time sequential procedure for predicting freeway incident duration,” IVHS Journal, vol. 2(2), pp.113-138, 1995.
- [15] 신치현, “돌발상황 지속시간 예측알고리즘 개발,” 2000년도 ITS 연구개발사업 최종보고서, 2001. 11.
- [16] 신치현, 김정훈, “고속도로 돌발상황 지속시간 예측모형 개발,” 대한교통학회, 제20권 제3호, pp.17-30, 2002. 6.
- [17] 신치현, “고속도로 돌발상황 지속시간 예측을 위한 Decision-Tree 개발,” 대한토목학회지 제24권 제5호, pp.681-689, 2004. 9.
- [18] 국토연구원, “스마트 인프라 투자 평가 방법론 스마트 교통인프라를 중심으로,” 국토연구원, 2010.
- [19] 한국도로공사, “고속도로 업무통계,” 한국도로공사, 2009.
- [20] 한국도로공사, “2008년 고속도로 교통량 통계,” 한국도로공사, 2009.

저자소개



장 현 호 (Chang, Hyun-Ho)

2008년 ~ 현 재 : 서울대학교 환경대학원 박사수료 (교통관리전공)
2005년 3월 ~ 2008년 2월 : 서울시청 교통전문직
2002년 3월 ~ 2005년 2월 : 한국도로공사 도로교통기술원 연구원
2002년 2월 : 서울시립대학교 공학석사 (교통계획전공)



백 승 결 (Baek, Seung-Kirl)

2002년 ~ 현 재 : 한국도로공사 도로교통연구원 교통연구실 수석연구원
2001년 2월 : 서울대학교 대학원 (공학박사)
1995년 2월 : 서울대학교 환경대학원 (도시및지역계획학석사)
1992년 2월 : 한양대학교 도시공학과 (공학사)



오 성 호 (Oh, Sung-Ho)

2003년 ~ 현 재 : 국토연구원 국토인프라GIS연구본부 연구위원
2003년 : University of Wisconsin - Madison (공학박사)
1996년 2월 : 서울대학교 환경대학원 (도시및지역계획학석사)
1993년 2월 : 원광대학교 수학과 (이학사)



김 호 정 (Kim, Ho-Jung)

1992년 ~ 현 재 : 국토연구원 연구위원
2007년 2월 : 홍익대학교 도시계획학 (공학박사)
1993년 2월 : 홍익대학교 도시계획학 (공학석사)
1991년 2월 : 홍익대학교 도시계획학 (공학사)