

공사구간 교통관리특성을 고려한 고속도로 교통사고 심각도 영향요인 분석 및 안전성 증진 방안

윤석민¹ · 오철^{1*} · 박현진¹ · 정봉조²

¹한양대학교 교통·물류공학과, ²한국도로공사 도로교통연구원

Identification of Factors Affecting the Crash Severity and Safety Countermeasures Toward Safer Work Zone Traffic Management

YOON, Seok Min¹ · OH, Cheol^{1*} · PARK, Hyun Jin¹ · CHUNG, Bong Jo²

¹Transportation and Logistics Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 15588, Korea

²Transportation Research Division, Korea Expressway Corporation, Gyeonggi 445-812, Korea

*Corresponding author: cheolo@hanyang.ac.kr

Abstract

This study identified factors affecting the crash severity at freeway work zones. A nice feature of this study was to take into account the characteristics of work zone traffic management in analyzing traffic safety concerns. In addition to crash records, vehicle detection systems (VDS) data and work zone historical data were used for establishing a dataset to be used for statistical analyses based on an ordered probit model. A total of six safety improvement strategies for freeway work zones, including traffic merging method, guidance information provision, speed management, warning information systems, traffic safety facility, and monitoring of effectiveness for countermeasures, were also proposed.

Keywords: crash severity, ordered probit model, traffic data, work zone, work zone historical data

초록

공사구간에서는 교통류의 안전한 합류 및 통과를 위해 속도관리와 차로차단을 통한 체계적인 교통관리가 요구된다. 본 연구에서는 공사구간 교통관리특성을 교통안전분석에 반영하기 위해서 사고자료, 차량검지기에서 추출된 속도 및 교통자료, 공사 시·종점, 폐쇄 차로 등의 정보가 포함된 공사장 이력자료를 활용하였다. 2010년부터 2014년까지 발생한 고속도로 공사구간 사고자료 중 총 231건의 사고에 대해 교통상황자료 및 공사장 이력자료를 매칭시킨 분석 대상 자료셋을 구축하고, 순서형 프로빗 모형을 적용하여 사고 심각도 영향 요인을 도출하였다. 분석결과, 속도, 차로 폐쇄에 따른 용량 감소량, 주의구간 내 사고 위치, 공사 작업 유형의 변수들이 공사구간 사고 심각도에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 분석결과를 바탕으로 6가지 공사구간 안전성 증진 방안을 수립하였다. 안전성 증진방안으로는 차로 합류 및 차단 방안, 주의구간 내 정보 제공 방안, 공사구간 속도 관리 방안, 공사구간 경고 정보 제공 방안, 공사구간 교통안전시설 도입, 공사구간 안전성 효과분석 및 모니터링 방안을 제시하였다.

주요어: 사고 심각도, 순서형 프로빗 모형, 교통자료, 공사구간, 공사장 이력자료

J. Korean Soc. Transp.
Vol.34, No.4, pp.354-372, August 2016
<http://dx.doi.org/10.7470/jkst.2016.34.4.354>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 21 March 2016

Revised: 8 June 2016

Accepted: 11 August 2016

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

고속도로에서 차로를 통제하여 공사를 수행하는 경우 진입 운전자들은 차로를 변경해야 하기 때문에 차량 간 상호충이 증가하고 속도 감소가 발생한다. 이로 인해 교통 혼잡이 야기되고 교통 안전성이 저하될 수 있다. 지난 2012년부터 2014년까지 고속도로 공사장 평균 사망률은 37%로 전체 고속도로 교통사고의 사망률 평균인 12%보다 치사율이 약 3배정도 높은 것으로 나타났다(Korea Expressway Corporation, 2015). 이는 고속도로 일반구간보다 공사구간의 사고 발생 시 사고의 심각도가 높음을 의미한다. 따라서 고속도로 공사구간의 교통사고의 특성을 분석하고, 사고 심각도에 미치는 원인규명을 통해 교통사고를 사전에 예방할 수 있는 대응방안 제시가 필요하다.

도로확장 및 유지보수 등과 같은 도로상의 작업을 위한 차로차단은 운전자에게 강제적인 차로변경을 요구하게 되므로 교통혼잡 및 사고발생 가능성을 증대시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 공사구간 내 교통운영 및 안전시설 설치 등의 관리 전략을 공사구간 교통관리로 정의할 수 있다.

공사구간의 교통관리는 작업구간 전방에 설치되는 도로표지를 통해 운전자에게 주의 및 안내정보를 제공하여 적절한 속도선택과 안전한 차로변경을 위한 의사결정을 지원한다. 또한 공사구간 진입차량과 작업자간의 충돌사고를 예방하기 위한 차로차단 시설 및 방호벽의 설치도 공사구간 교통관리에 포함된다. 즉 공사구간 교통관리를 통하여 공사구간으로 진입하는 운전자 및 공사구간을 통과하는 운전자에게 안전하고 원활한 교통소통을 지원하고, 공사장 내 작업자의 안전을 증진시킬 수 있다.

따라서 공사구간의 교통안전성 평가를 위해서는 이러한 교통관리특성이 충분히 반영된 영향요인을 계량화된 변수로 설정하여 분석에 활용할 수 있어야 한다. 이러한 분석을 위한 첫 번째 단계는 교통사고 발생위치를 공사구간 내에서 정확히 인식하는 것인데, 개별 교통사고 자료를 공사구간의 시간적, 공간적 범위가 포함된 공사장 이력자료와의 매칭을 통해 가능하다. 또한 공사구간 내 교통사고 발생 지점과 인접한 상류부와 하류부의 차량검지기 자료에서 추출된 사고발생 당시의 속도와 교통량과 같은 교통상황 정보를 추가로 활용하면 공사구간의 교통관리특성을 반영한 교통안전분석이 가능할 것이다. 예를 들어, 교통사고 발생 시 제공된 공사장 안내정보, 공사구간 내 통행속도, 작업유형의 관계를 입체적으로 분석하는 것이다. 이러한 분석은 보다 체계적이고 과학적인 공사구간 교통관리를 위한 개선방안 도출을 위해 유용하게 활용될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 공사구간 교통관리특성을 반영한 교통안전분석을 위해 최근 5년간의 (2010년부터 2014년까지) 교통사고자료, 공사장 이력자료, 차량검지기 자료를 활용하였다. 사고 위치와 공사구간 위치를 매칭하고 교통자료(속도, 교통량)를 추가로 이용하여 공사구간 교통관리특성을 반영한 최종 분석 자료셋을 구축하였다. 이를 활용하여 순서형 프로빗 모형을 수립하고 고속도로 교통사고 심각도 영향요인을 도출하였다. 분석 결과를 통하여 공사구간 사고 심각도 감소 및 안전성 증진을 위한 대응방안을 수립하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 이론 및 공사구간 교통안전 및 사고 심각도 영향요인 관련 연구를 고찰하였다. 3장에서는 공사장 교통관리구간 및 교통사고 특성분석을 수행하였고, 4장에서는 분석자료를 제시하였다. 5장에서는 공사구간 사고 심각도 영향요인 및 공사구간 안전성 증진 방안을 제시하였고, 마지막장에서는 결론 및 향후 연구과제를 정리하였다.

관련 이론 및 문헌 고찰

본 장에서는 순서형 프로빗 모형 이론을 제시하였다. 또한 고속도로 공사구간 교통사고 특성에 관한 연구 및 공사구간 사고 심각도에 영향을 미치는 요인 관련 문헌을 고찰하고, 기존 문헌과 차별성을 제시하였다.

1. 순서형 프로빗 모형

종속변수가 순서를 지니지 않고 서열이 있는 이산형 변수일 경우 프로빗 모형 또는 로짓 모형을 사용해 분석을 할 수 있다. 그러나 종속변수가 (0,1,2...)으로 순서를 가진 경우 순서형 프로빗 모형이나 순서형 로짓 모형을 사용한다.

프로빗 모형과 로짓 모형의 차이는 모형을 결정짓는 확률효용의 ϵ_i (오차항)의 확률분포형태로 달라진다. 로짓모형은 ϵ_i (오차항)의 확률적 분포가 분산이 동일하고 독립적(IID:Identically and independently distributed)인 와이블 분포(Weibull distribution)를 따른다고 가정한다. 프로빗 모형에서는 ϵ_i (오차항)의 확률분포가 분산이 동일하고 공분산이 0인 정규분포(Normal distribution)를 따른다고 가정할 수 있다(Bonneson et al., 1993).

회귀분석의 경우 종속변수가 $y=0$ 과 $y=1$ 일 때의 차이를 $y=1$ 과 $y=2$ 일 때의 차이와 동일한 것으로 인식해 분석하여 오류를 범할 수 있다. 따라서 이러한 오류를 극복하고 ϵ_i (오차항)의 확률분포를 정규분포로 가정하여 순서형 프로빗 모형을 적용하였다.

$$y^* = \sum_{k=1}^K \beta_k x_k + \epsilon$$

위 식에서 y^* 는 관찰 불가능한(Unobservable)응답변수(Response variable)이고 응답자가 관찰가능한 응답 y 를 선택하는 기준을 제공한다. y 가 J 개 존재한다고 하면, 1부터 J 까지를 선택하기 위한 응답자에 내재한 기준, 즉 y^* 가 일정범위 내에서는 j 를 선택할 수 있도록 하는 관찰 불가능한 기준이 된다. 다음 식은 범주화된 y^* 와 관찰 가능한 응답 y 와의 관계를 나타낸 것이다(Lee et al., 2005).

$$\begin{aligned} y &= 1, \text{ if } y^* \leq \mu_1 (=0) \\ &= 2, \text{ if } \mu_1 < y^* < \mu_2 \\ &= 3, \text{ if } \mu_2 < y^* < \mu_3 \\ &\vdots \\ &= J, \text{ if } \mu_{J-1} < y^* \end{aligned}$$

위 식의 μ_1 에서 μ_{J-1} 은 y^* 은 경계값(Threshold)을 나타내는 것으로 총 J 개의 관찰 가능한 응답들에 대해 j 를 선택할 수 있는 기준이 된다. 만약 $y=2$ 로 μ_1 과 μ_2 사이의 y^* 를 가지고 있음을 나타낸다(Choi et al., 2013).

위 모형을 통해 순서형 로짓 모형에서 $y=j$ 를 선택할 확률인 $\text{Prob}(y=j)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다(Lee et al., 2005).

$$\begin{aligned} \text{Prob}(y=j) &= \text{Prob}(\mu_{j-1} < y^* = \sum_{k=1}^K \beta_k x_k + \epsilon \leq \mu_j) \\ &= \text{Prob}(\mu_{j-1} - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k < \epsilon \leq \mu_j - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k) \\ &= F(\mu_j - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k) - F(\mu_{j-1} - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k) \\ &= \Phi(\mu_j - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k) - \Phi(\mu_{j-1} - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k) \\ \text{단, } 0 &< \mu_2 < \mu_3 < \dots < \mu_{J-1} \end{aligned}$$

순서형 프로빗 모형은 오차항의 분포를 정규분포로 가정하므로, 누적확률함수를 사용하여 나타낼 수 있다. $\text{Prob}(y=2)=\text{Prob}(y \leq 2)-\text{Prob}(y \leq 1)$ 의 식을 활용하여 순서형 프로빗 모형의 확률 계산식을 유도하면 다음과 같이 일반화 할 수 있다. 또한 독립변수가 사고 심각도에 미치는 영향의 정도를 나타내는 한계효과를 구할 수 있다(Lee et al., 2005).

$$\begin{aligned}\text{Prob}(y=1) &= \Phi\left(-\sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right) \\ \text{Prob}(y=2) &= \Phi\left(\mu_2 - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right) - \Phi\left(-\sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right) \\ \text{Prob}(y=3) &= \Phi\left(\mu_3 - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right) - \Phi\left(\mu_2 - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right) \\ &\vdots \\ \text{Prob}(y=J) &= 1 - \Phi\left(\mu_{j-1} - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right)\end{aligned}$$

한계효과는 설명변수의 연속성을 기본가정으로 하기 때문에 독립변수 중 명목형 변수인 경우 Pseudo elasticity를 사용하여 독립변수가 사고 심각도에 미치는 영향 정도를 나타낼 수 있다(Washington et al., 2010).

$$E_{x_{kj}}^{Prob_j} = \frac{Prob_j[x_{kj} = 1] - Prob_j[x_{kj} = 0]}{Prob_{kj}[x_{kj} = 0]}$$

2. 공사구간 교통사고 특성 관련 연구

고속도로 공사구간의 교통 안전성 문제를 해결하고자 국내에서는 공사구간 사고 원인 및 유형 파악을 목적으로 공사구간 교통사고 특성을 분석하는 연구가 수행되었다. Park et al.(2008)은 고속도로 23개 전 노선을 대상으로 2003년부터 2005년까지 3년 동안 공사구간에서 발생한 교통사고를 사고원인별, 사고유형별로 분석하였다. 분석결과, 주시태만으로 인한 사고와 추돌사고가 각각 전체사고의 25%, 32%로 가장 많은 비율을 차지하였다. 또한 Jang et al.(2013)은 2003년부터 2005년까지의 3년 동안 공사구간에서 발생한 교통사고를 공사장 유형별, 사고유형별로 어떠한 특성이 있는지 분석하였다. 분석결과, 공사장 유형별로는 확장공사, 사고 유형별로는 추돌사고가 가장 많이 발생하였다.

국외에서도 공사구간 교통사고 특성 분석 관련 연구가 수행되었다. Bryden et al.(1999)는 1994년부터 1996년까지 3년간 발생한 공사구간 사고 중 공사구간 내 시설물과 차량과의 충돌로 발생한 496건의 교통사고를 사고유형별, 사고 심각도별로 분석하였다. 분석 결과, 전체 공사구간 사고 중 33%의 사고가 공사구간 내 시설물과 충돌하여 발생한 사고이고, 그 중 37%의 사고는 심각한 사고로 나타났다. 또한 Daniel et al.(2000)은 공사구간에서의 사고 충돌 유형, 사고 위치 별로 공사구간에서 사망사고 발생 시 비공사구간에서 발생하는 사망사고와 비교 분석하였다. 분석 결과 공사구간의 사망 사고는 공사구간의 조명 조건, 중차량 진입이 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 공사구간보다 비공사구간의 평면선형과 종단경사가 사망사고 발생에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Khattak et al.(2002)은 공사기간이 교통사고 발생에 미치는 영향에 대하여 비공사기간에서 발생한 사고와 비교·분석하였고, 분석 결과 고속도로 공사 기간 중 사고율은 비공사 기간보다 21.5% 높은 것으로 분석되었다. 또한 공사기간이 길수록 사고 발생 빈도가 증가하는 것으로 나타났다.

3. 공사구간 사고 심각도 영향요인 관련 연구

본 장에서는 공사장 교통사고 심각도에 영향을 미치는 요인 분석에 관한 연구를 고찰하였다.

Hong et al.(2010)은 수도권에서 발생한 공사구간의 교통사고를 대상으로 순서형 프로빗 모형을 활용하여 사고 심각도에 영향을 주는 요인을 도출하였다. 분석결과, 사고 심각도에 영향을 미치는 요소는 도로의 노면상태, 사고지점의 선형, 가해차량의 공사차량 여부의 변수가 채택되었다. 이에 대한 대응방안으로는 공사장 진출입 차량의 관리와 곡선도로와 접한 공사구간은 사전에 공사장의 위치를 진입 운전자에게 인지시키는 방안을 제안하였다.

Ozturk et al.(2015)은 고속도로 공사구간과 비공사구간을 구분하여 순서형 프로빗 모형을 활용한 사고 심각도 분석을 하였다. 분석결과, 비공사구간보다 공사구간에서 전복사고, 후미추돌사고, 과속, 안전거리미확보, 주시태만 변수가 교통사고 발생 시 사고심각도를 증가시키는 것으로 분석되었다. 이를 통하여 공사구간 진입운전자에게 사전에 공사구간의 정보를 제공해야 하고, 공사구간 진입 전 과속단속카메라를 설치하여 과속을 방지하는 방안을 제시하였다.

Meng et al.(2010)은 고속도로 장기 공사 시 발생한 사고자료를 바탕으로 정량적 위험평가(Quantitative Risk Assessment : QRA)방법론을 사용하여 사망사고발생 빈도를 분석하였다. 분석결과, 통행속도가 20% 감소할 경우 개별 사망 위험성은 62% 감소하였고, 개별 부상 위험성은 44% 감소하는 것으로 분석되었다. 이를 통하여 공사구간 사고 심각도를 감소시킬 수 있는 효율적인 방안으로 통행속도 감소를 제시하였다.

Wong et al.(2011)는 고속도로 공사구간 내로 침입하는 차량들로 인한 공사장 작업자들의 사고를 대상으로 로지스틱 회귀분석과 포아송 회귀분석을 활용하여 사고 심각도에 영향을 미치는 요인들을 도출하였다. 분석결과, 장기 공사보다 단기 공사에서 사고 심각도가 증가하고, 비침두시간보다 침두시간 공사에서 사고 심각도가 증가하는 것으로 나타났다.

Qi et al.(2013)은 후미 충돌 시 공사구간에서 발생한 사고에 대해 순서형 프로빗 모형을 활용하여 사고 심각도 분석을 수행하였다. 분석결과, 음주, 야간 작업, 미끄러운 도로 상태, 트럭 변수가 후미 충돌 시 사고 심각도를 증가시키는 것으로 분석되었다.

4. 기존 연구와의 차별성

기존 공사구간 교통사고 특성 관련 연구에서는 사고 유형, 사고 원인, 공사 유형, 도로 기하구조 등에 따라 교통사고의 특성을 분석하였다. 또한 공사구간 사고 심각도 영향요인을 분석한 연구에서는 도로 기하구조, 사고 유형, 사고 원인, 통행속도 등의 변수를 통하여 사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 도출하였다.

그러나 기존 공사구간 교통사고 특성 및 사고 심각도 영향요인 관련 연구에서는 고속도로 사고 원인, 유형, 기하구조의 변수만을 고려한 분석에 국한되었다. 또한 공사구간에서 발생한 사고자료만을 활용하여 공사내용, 공사 시·종점, 공사구간의 총 차로수 등 공사구간의 자세한 특징을 고려한 연구가 미비하였다.

이에 본 연구에서는 공사구간 교통관리특성을 고려한 사고 심각도 영향요인 분석을 수행하였다. 교통관리특성을 반영하기 위하여 고속도로 공사구간에서 발생한 사고 자료, 교통 자료(속도, 교통량), 공사장 이력자료를 활용하였다. 또한 공사구간을 주의구간, 작업구간으로 구분하여 사고 발생 시 각 구간에서 나타나는 교통 특성을 반영하였다.

교통 자료를 통해서는 사고발생 당시의 속도, 교통량의 평균 및 변화 패턴 등의 특징을 분석에 반영하였고, 공사장 이력자료를 통해서는 공사 시·종점, 폐쇄 차로수 등의 정보를 활용하였다.

사고 위치, 공사구간 위치를 매칭하고 교통 자료(속도, 교통량)를 추가로 활용하여 공사구간 교통관리특성을 고려한 다각적인 분석을 수행하였다. 또한 분석결과를 바탕으로 공사구간의 사고 심각도 영향요인을 도출하는데 기존 연구와의 차별성을 가진다.

분석 개요

본 연구에서는 2010년부터 2014년까지 고속도로에서 발생한 공사구간을 공간적 범위로 설정하였다. 또한 2010년부터 2014년까지 발생한 고속도로 교통사고 자료의 사고 위치와 공사장 이력자료의 공사구간 위치를 매칭하여 공사구간 사고 자료를 도출하였다. 또한 도출된 공사구간 사고 자료와 매칭되는 속도 및 교통량 자료를 추가적으로 분석에 활용하였다. 사고 심각도 분석에 앞서 공사구간 교통사고 기본특성을 전체 공사구간, 주의구간, 작업구간으로 구분하여 비교분석하였다. 또한 순서형 프로빗 모형을 사용하여 공사구간 사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 도출하고, Pseudo Elasticity와 한계효과(Marginal effect)를 통하여 설명변수들이 사고 심각도에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구의 흐름도는 Figure 1에 제시하였다.

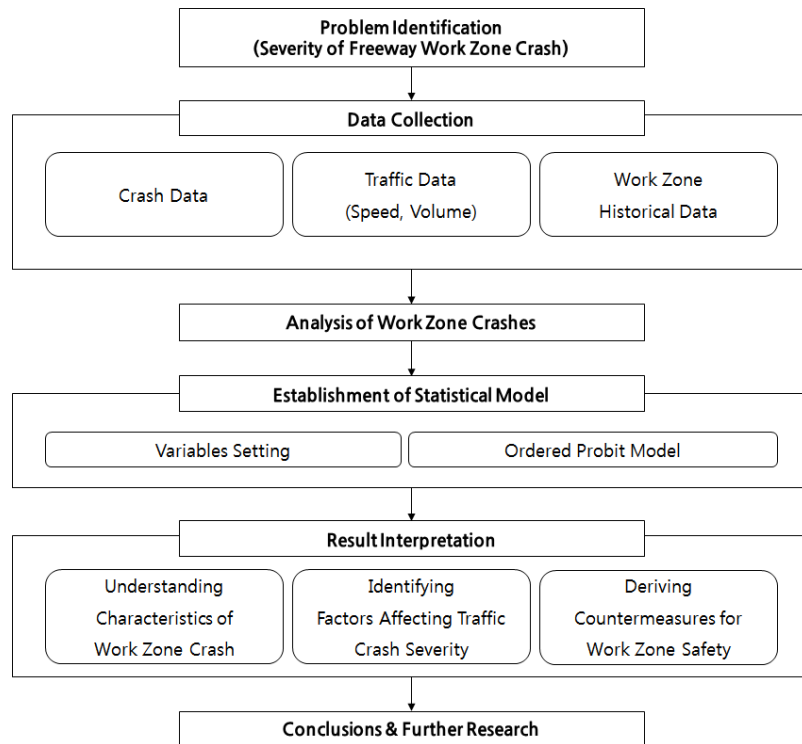


Figure 1. Research process

1. 공사장 교통관리구간 구분

고속도로 공사구간은 Figure 2 와 같이 공사장의 시점과 종점을 기준으로 공사장 상류부와 하류부의 교통류 특성이 다르기 때문에 주의구간, 완화구간, 작업구간, 종결구간으로 구분하여 관리한다(Korea Expressway Corporation 2013).

우선 주의구간은 운전자들이 전방의 교통상황 변화를 사전에 인지할 수 있도록 확보하는 구간이다. 완화구간은 테이퍼¹⁾가 시작되는 구간으로 공사 중인 해당 차로 전방에 일정 공간을 확보하여 주행차로를 차단하고 주행차량의 차로변경을 유도하는 구간이다. 작업구간은 실제 공사를 수행하는 작업 활동구역이고, 종결구간은 작업구간을 통과하여 공사 이전의 정상적인 교통흐름으로 복귀하는 구간이다(Korea Expressway Corporation 2013).

주의구간은 변화구간 시점으로부터 전방 1.5km 지점으로 설정하고, 전방의 공사구간에 대한 정보를 제공하기 위해 교통안전표지를 설치한다.

1) 자동차 진행 경로가 변경된 도로선형에 설치된 일련의 노면표시와 도류화시설을 의미함

현재 교통안전표지 설치·관리 매뉴얼에 의하면 교통안전표지는 노면표시 및 신호기와 유기적 또는 보완적으로 결합하여 설치되는 교통안전시설물로 정의하고 있다. 또한 교통안전표지는 주의표지, 규제표지, 안내표지로 구분된다(Korean National Police Agency 2013).

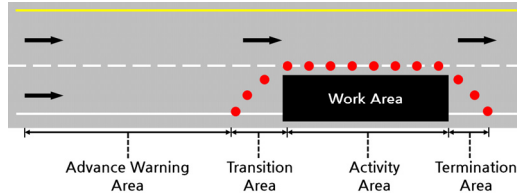


Figure 2. Work zone traffic management area

주의구간에 설치하는 교통안전표지에는 공사 안내표지, 주의표지, 도로 공사구간 전용 주의표지, 규제표지가 포함된다. 또한 교통안전표지의 종류에 따라 Figure 3과 같이 설치 간격을 총 5개의 구간으로 구분할 수 있다(Korea Expressway Corporation 2013).

한국도로공사는 공사구간 급감속으로 인한 사고를 예방하기 위하여 2016년 3월 1일부터 고속도로 공사구간 제한속도를 80km/h에서 60km/h로 하향 조정하였다. 그러나 본 연구에서는 제한속도가 80km/h 일 때의 분석 자료를 활용하였다.

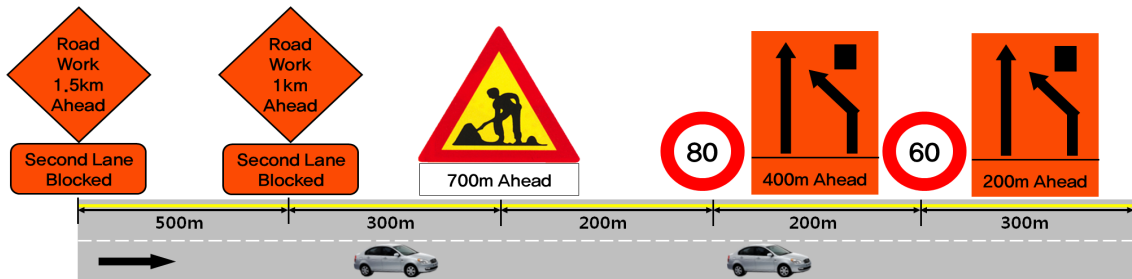


Figure 3. Traffic sign installation in advance warning area

2. 공사구간 교통사고 특성분석

1) 전체 공사구간 교통사고 특성분석

2010년 1월부터 2014년 12월까지 발생한 고속도로 교통사고 자료, 교통 자료, 공사장 이력자료를 매칭하여 총 5,180건의 사고 자료를 도출하였다. 이 중 공사구간에서 발생한 231건의 사고 자료를 전체 공사구간 사고 자료로 활용하였다. 전체 공사구간은 주의구간, 완화구간, 작업구간, 종결구간을 모두 포함한 구간으로 정의하였다.

총 231건의 사고 중 사고 유형은 차-차 사고가 168건으로 가장 많이 발생하였고, 사고 원인은 주시태만으로 인한 사고가 109건으로 가장 많은 사고가 발생하였다. 공사 유형별로 살펴보면, 확장공사에서 89건으로 가장 많은 사고 빈도를 보였고, 중분대작업에서 0.03(사망자수/건/km)와 0.11(부상자수/건/km)로 사고 심각도가 가장 높게 분석되었다. 분석 결과는 Table 1에 제시하였다.

2) 주의구간 교통사고 특성분석

총 231건의 전체 공사구간 교통사고 중 136건의 사고가 주의구간에서 발생하였다. 교통안전표지 설치위치에 따라 총 5개 구간으로 주의구간을 구분하였다. Table 2에 제시한 분석 결과를 살펴보면, 300m~공사구간 테이퍼 시작

지점 구간의 사고는 38건으로 가장 많은 사고가 발생하였다. 사고 유형은 차-차 사고가 모든 구간에서 가장 많이 발생하였고, 사고 원인은 테이퍼 시작지점 전방 500-300m 구간에서 졸음운전으로 인한 사고가 19건으로 가장 비율을 차지하였다. 또한 300m~공사구간 테이퍼 시작지점 구간에서는 주시태만으로 인한 사고가 19건으로 가장 많은 빈도를 나타냈다.

주의구간 시작지점의 평균속도는 87km/h, 작업구간의 평균속도는 79.9km/h로 평균속도가 약 8% 감소하는 것으로 나타났다.

분석 결과를 종합해 보면, 공사장 교통관리구간 중 주의구간은 교통안전표지 설치위치에 따라 5개의 구간으로 구분할 수 있다. 또한 작업구간과 가까워질수록 평균속도는 감소하는 경향이 나타났다. 이는 공사구간으로 접근하는 차량들이 테이퍼 시작지점에 접근하면서 차선 변경을 시도함에 따라 속도가 감소하는 것으로 판단된다.

Table 1. Crash characteristics by work type

work type	No. Crash	No. Fatalities	No. Injuries	Average length	Fatalities/Crash/Average Length	Injuries/Crash/Average Length
Road Widening Work	89	15	42	26.52	0.01	0.02
Shoulder Work	26	5	9	28.86	0.01	0.01
Median Barrier Work	21	16	58	26.01	0.03	0.11
Resurfacing Road Work	11	7	7	31.07	0.02	0.02
Others	84	13	49	28.15	0.01	0.02

Table 2. Crash characteristics by advanced warning area

	Advance Warning Area 1.5km (136 Crashes)					Work Area (95 Crashes)
	1.5-1km (14)	1km-700m (21)	700-500m (30)	500-300m (33)	300m-Start Taper (38)	-
Traffic Sign Installation in Caution Section (Crashes)						
Crash Type (Crashes)	Car-Car (9)	Car-Car (14)	Car-Car (21)	Car-Car (31)	Car-Car (26)	Car-Car (70)
Crash Cause (Crashes)	Drowsiness (6)	Drowsiness (6)	Incautiousness (19)	Drowsiness (19)	Incautiousness (19)	Incautiousness (54)
Average Speed (km/h) (5 minute before Crash)	87.0	77.0	79.7	78.5	76.7	79.9
Average Volume (Veh/5min/ Lane) (5 minute before Crash)	55.6	53.0	73.3	52.4	67.3	62.9

분석자료

1. 변수설정(사고 자료, 교통 자료, 이력자료)

순서형 프로빗 모형수립을 위한 변수 도출은 고속도로 교통사고 자료와 교통 자료(속도, 교통량), 공사장 이력자료를 매칭한 총 231건의 자료를 활용하였다. 종속변수는 사망사고, 부상사고, 물적피해사고로 구분하여 사고 심각도 정도를 적용하였다.

고속도로 공사구간 사고 심각도에 영향을 줄 것으로 예상되는 요인을 교통사고 자료, 교통 자료, 공사장 이력자료로 구분하여 총 19개의 독립변수로 설정하였다. 종속변수와 독립변수는 Table 3에 제시하였다.

교통사고 자료에서는 도로 기하구조, 사고 유형, 사고 원인, 운전자 요인, 환경요인 등을 독립변수로 활용하였다. 그러나 전체 231건의 자료 중 운전자 연령 정보 110건, 성별 정보 185건, 차량 종류 정보 220건의 정보가 누락되어

있었다. 따라서 본 연구에서는 운전자 요인이 교통사고 발생의 중요한 요인 중 하나이지만 운전자 요인 정보를 분석에서 제외하였다.

교통 자료에서는 VDS(Vehicle detection system : VDS) 차량검기지를 통하여 속도 및 교통량 변수를 연속형 변수로 선정하였고 각 변수들의 평균 및 분산은 Table 4, Table 5에 제시하였다. 속도 및 교통량 변수는 사고 발생 지점의 상류부, 하류부로부터 가장 인접한 4개의 VDS 차량검기지에서 도출된 속도와 교통량을 의미한다. 즉 상류부 VDS 차량검기지 2개에서 수집된 속도 및 교통량과 하류부 VDS 차량검기지 2개에서 수집된 속도 및 교통량으로 구

Table 3. Description of variables

Variable		Contents
Crash Severity		Fatalities (3), Injuries (2), Property Damages (1)
Crash Records	Occurrence Spot	Continuous
	Work Type	Road Widening Work, Shoulder Work, Median Barrier Work, Resurfacing Road Work, Others
	Crash Type	Car-Car, Car-Facility, Car-Person
	Crash Cause	Speeding, Unobtained Safe Distance, Incautiousness, Drowsiness, Vehicle Defects, Driver Factors, Others
	Day and Night	Day(1)/Night(0)
	Weather	Sunny, Rain/Snow, Cloudy
	Grade	Flat, Downhill(<3%), Downhill(≥3%), Uphill(<3%), Uphill(≥3%)
	Horizontal Alignment	Straight, Left Curve(≥1000m), Left Curve(≥500m), Left Curve(<500m), Right Curve(≥1000m), Right Curve(≥500m), Right Curve(<500m)
	Road Surface Condition	Dry, Wet, Others
	Historical Work Zone Information	Work Content
Capacity decrease		100%, 67%, 50%, 33%, 25%, 0%
Work Zone Traffic Management Area		Advance Warning Area, Transition Area, Work Area
Location of Signs		
Total Number of Lane	Continuous	
Total Lane Type	2 Lane, 3 Lane, 4 Lane, 6 Lane	
Crash Handling Time	Continuous	
Traffic Conditions	Speed	
	Volume	
VDS Difference in Speed	DS(Speed ①-Speed ②), DS(Speed ①-Speed ③), DS(Speed ①-Speed ④)	
VDS Difference in Volume	DV(Volume ①-Volume ②), DV(Volume ①-Volume ③), DV(Volume ①-Volume ④)	

Table 4. Description statistics quantity of speed & volume variables

	Speed ①	Speed ②	Speed ③	Speed ④	Volume ①	Volume ②	Volume ③	Volume ④
Average	89.90	73.30	76.96	79.45	60.71	62.12	69.30	71.06
Variance	84.05	71.20	41.09	39.26	29.88	30.45	50.11	51.25
Standard Deviation	9.17	8.44	6.41	6.27	5.58	5.84	5.11	7.12

Table 5. Description statistics quantity of difference in speed & volume variables

	Speed ① - Speed ②	Speed ① - Speed ③	Speed ① - Speed ④	Volume ① - Volume ②	Volume ① - Volume ③	Volume ① - Volume ④
Average	10.60	2.34	-2.49	-1.42	-7.18	-1.77
Variance	44.46	37.21	25.09	1.33	17.24	4.48
Standard Deviation	6.67	6.10	5.01	1.15	4.15	2.12

분하였다. 예를 들어 ‘상류부 속도 ①’의 변수는 사고 지점 상류부로부터 가장 멀리 위치한 검지기에서 측정된 사고 5분전 속도이다. 속도 및 교통량 차이 변수는 사고 기점을 기준으로 상류부에서 가장 먼 VDS 차량검지기의 속도 및 교통량을 기준으로 다른 3개의 속도 및 교통량의 차이로 설정하였다. 즉 속도 차이 ①의 변수는 상류부 속도 ①에서 상류부 속도 ②의 속도의 차이 값을 의미한다.

VDS 차량검지기를 통하여 수집된 속도 및 교통량 자료의 이상치는 발견되지 않아 별도의 보정 작업은 수행하지 않았다. 또한 결측자료의 경우 교통량 자료에서는 발견되지 않았고, 속도 자료의 경우 이동평균법²⁾을 활용하여 자료를 보정하였다.

공사장 이력자료는 공사구간 이점 및 길이, 공사 기간 및 시간, 공사 유형, 차단 차로수의 정보들이 포함되어 있다. 이 중 공사장 이력자료에서 채택한 독립변수로는 공사 유형 및 공사 구간, 총 차로수, 차로 차단에 따른 용량감소량 등으로 도출하였다. 그 중 공사 구간 변수는 앞서 제시한 교통안전표지 설치 간격을 5개의 구간으로 구분하여 주의 구간에서 발생한 사고와 작업 구간에서 발생한 사고를 분류하였다. 즉 ‘주의구간 a’의 변수는 주의구간이 시작되는 지점으로부터 공사구간 방향으로 1.5-1km 사이에서 발생한 사고를 의미한다. 용량감소는 공사구간에서 차로를 차단함에 따라 용량이 감소된 구간에서 발생한 사고를 의미하고 차로 차단에 의해서만 용량 감소에 영향을 주는 것을 가정하여 분석하였다. 예를 들어 ‘용량 100% 감소’의 변수는 공사구간 내 총 차로수에서 모든 차로를 차단 후 공사를 진행하여 100% 용량이 감소가 된 구간에서 발생한 사고를 의미한다. 또한 ‘용량 50% 감소’의 변수는 총 2차로, 4차로, 6차로 구간에서 각각 한개차로, 두개차로, 세개차로를 차단 후 공사를 진행하여 50%의 용량이 감소가 된 구간에서 발생한 사고를 나타낸다.

독립변수 중 세부내용이 2가지인 변수들은 1(해당)과 0(해당없음)으로 구분하였고, 세부내용이 3가지 이상인 변수들은 각각의 내용을 1(해당)과 0(해당없음)으로 설정하였다. 예를 들어 사고 발생 지점이 주의구간 인 경우 1로, 완화구간 및 작업구간인 경우 0으로 설정하였다. 또한 사고 발생 지점이 완화구간 인 경우 1로, 주의구간 및 작업구간인 경우 0으로 설정하였다.

분석결과

1. 사고 심각도 영향요인 분석

분석결과, 사고 심각도 모형의 전체 적합도(Overall goodness)를 검증하는 χ^2 (Chi-square)는 29.30으로 자유도

2) 결측된 자료의 시점에서 이전 시점으로 5분 자료를 평균하여 결측된 시점의 자료를 추정하는 방법

가 8이고 유의수준이 0.05일 때 χ^2 의 값 2.73보다 크기 때문에 귀무가설인 독립변수가 종속변수에 영향을 미치지 않는다는 사실을 기각한다. 따라서 독립변수가 종속변수에 영향을 주는 것으로 해석된다. 또한 모형의 설명력을 검증하는 ρ^2 (Likelihood ratio)의 값은 0.23으로 공사구간 사고 심각도 분석 시 적용한 순서형 프로빗 모형이 충분한 설명력을 갖는 것으로 판단된다.

종속변수인 공사구간 사고 심각도에 영향을 주는 독립변수의 유의성 검증 시 신뢰수준은 α 가 0.05이하인 값을 유의하다고 판단하여 변수를 도출하였다.

순서형 프로빗 모형을 이용하여 도출된 변수의 계수값은 변수들이 사고 심각도에 미치는 상대적인 영향 정도 및 유의성을 의미한다. 또한 한계효과와 Pseudo elasticity를 통하여 채택된 독립변수들이 사고 심각도에 미치는 절대적인 영향 정도를 알 수 있다(Lee et al., 2005). Pseudo elasticity는 독립변수가 명목형 변수 일 경우 사용하고, 한계효과는 독립변수가 연속형 변수 일 경우 사용한다(Maddala et al., 1983).

공사구간 사고 심각도에 영향을 미치는 변수를 순서형 프로빗 모형을 적용하여 분석한 결과와 채택된 변수들의 통계적 결과 및 Pseudo elasticity와 한계효과의 분석결과는 Table 6에 제시하였다.

공사구간 사고 심각도에 영향을 미치는 변수는 중분대작업, 도로재포장, 주의구간 ①(주의구간이 시작되는 지점부터 공사구간 방향으로 1.5-1km 구간), 차-사람, 용량 67%감소(6차로 도로에서 4차로를 차단), 용량 33%감소(3차로 도로에서 1차로 차단), 상류부 속도 ②(사고 지점 상류부로부터 가장 인접한 검지기에서 측정된 사고 5분전 속도), 하류부 속도 ③(사고 지점 하류부로부터 가장 인접한 검지기에서 측정된 사고 5분전 속도)로 도출되었다.

중분대작업 변수의 경우 순서형 프로빗 모형 분석결과, 사고 심각도와 양의 상관관계를 가지므로 중분대작업을 할 경우 사고 심각도가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 Pseudo elasticity 분석결과, 중분대작업일 경우 중분대작업이 아닌 경우 보다 사망사고가 일어날 확률이 126%만큼 증가하고, 부상사고 및 물적피해사고가 발생할 확률은 상대적으로 1%, 28%만큼 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서 공사 유형 중 중분대작업의 경우에 사망 사고가 발생할 확률이 증가한다.

도로재포장 변수의 경우 순서형 프로빗 모형 분석결과, 사고 심각도와 양의 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다. 또한 Pseudo elasticity 분석결과, 도로재포장일 경우 도로재포장 작업이 아닌 경우 보다 사망사고 및 부상사고가 발생할 확률은 각각 123%, 4%만큼 증가하고, 물적피해사고가 일어날 확률은 상대적으로 76%만큼 감소하는 것으로 도출되었다. 따라서 공사 유형 중 도로재포장의 경우에 심각한 사고가 발생할 확률이 증가한다.

주의구간 ① 변수의 경우 순서형 프로빗 모형 분석결과, 사고 심각도와 양의 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다. 또한 Pseudo elasticity 분석결과, 다른 주의구간 보다 사망사고 및 부상사고가 발생할 확률은 각각 105%, 10%만큼 증가하고, 물적피해사고가 일어날 확률은 상대적으로 71%만큼 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서 주의구

Table 6. Ordered probit model result

	Coef.	Std. Err.	z	P> z	Pseudo Elasticity/Marginal Effect		
					Fatal	Severer	Minor
Median Barrier Work	1.26	0.27	4.65	0.00	1.26	-0.01	-0.28
Resurfacing Road Work	1.23	0.37	3.35	0.00	1.23	0.04	-0.76
Caution Section ①	1.05	0.34	3.05	0.00	1.05	0.10	-0.71
Car-Person	0.63	0.24	2.66	0.01	0.63	0.18	-0.52
Reducing 63% Capacity	1.03	0.59	1.75	0.04	1.03	-0.03	-0.36
Reducing 33% Capacity	0.60	0.26	2.33	0.02	0.60	-0.18	-0.65
Upstream Speed ②	0.04	0.01	2.50	0.01	0.008	0.005	-0.013
Downstream Speed ③	0.05	0.02	2.80	0.01	0.013	0.008	-0.021
Log Likelihood					-163.98		
Number of Observation					231		
LR $\chi^2(8)$					29.30		
Pseudo R^2					0.23		

간 중 1.5-1km에서 사고가 발생할 경우 다른 주의구간에서 발생한 사고 보다 심각한 사고가 발생할 확률이 증가한다고 볼 수 있다.

차-사람 변수의 경우 순서형 프로빗 모형 분석결과, 사고 심각도와 양의 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다. 또한 Pseudo elasticity 분석결과, 다른 사고 유형 보다 사망사고 및 부상사고가 발생할 확률은 63%, 18%만큼 증가하고, 물적피해사고의 경우 상대적으로 52%만큼 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서 사고 원인 중 차-사람 사고에서 심각한 사고가 발생할 확률이 증가한다.

용량 감소량 변수의 경우 순서형 프로빗 모형 분석결과, 용량 66% 감소 변수와 용량 33% 감소 변수 모두 사고 심각도와 양의 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다. 또한 Pseudo elasticity 분석결과, 용량 66% 감소의 경우 다른 용량 감소 경우 보다 사망사고가 일어날 확률은 103%만큼 증가하는 것으로 나타났다. 또한 용량 33% 감소의 경우 다른 용량 감소 경우 보다 사망사고가 일어날 확률이 60%만큼 증가하는 것으로 분석되었다. 부상사고 및 물적피해사고의 경우 부상사고 및 물적피해사고가 일어날 확률은 용량 66% 감소 변수는 3%, 36%만큼 감소하고, 용량 33% 감소 변수는 18%, 65%만큼 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서 고속도로 공사 시 차로 차단으로 인한 용량이 66%, 33% 감소되는 경우 사망 사고가 발생할 확률이 증가하는 것으로 볼 수 있다.

상류부 속도 ②, 하류부 속도 ③ 변수의 경우 순서형 프로빗 모형 분석 결과, 두 변수 모두 사고 심각도와 양의 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다. 또한 한계효과 분석결과, 속도 ② 변수의 경우 속도 1km/h 증가할수록 물적피해사고가 일어날 확률은 1.3% 감소하지만, 사망사고와 물적피해가 일어날 확률은 0.8%, 0.5% 증가하는 것으로 분석되었다. 속도 ③ 변수의 경우 역시 속도가 1km/h 증가할수록 물적피해사고가 일어날 확률은 2.1% 감소하지만, 사망사고와 물적피해가 일어날 확률은 1.3%, 0.8% 증가하는 것으로 도출되었다. 따라서 공사구간에서 과속으로 인한 사고 발생 시 심각한 사고가 일어날 확률이 증가하는 것으로 나타났다.

분석 결과를 종합해 보면 교통사고 자료에서 도출한 변수인 중분대작업 및 도로재포장 작업 시, 차-사람의 사고 시 사고 심각도가 증가하는 것으로 나타났다. 중분대작업과 도로재포장 공사는 사고분석에서도 사고 심각도가 높은 공사 유형으로 분석되어 교통안전성 측면에서 취약한 공사 유형으로 판단된다.

또한 공사장 이력자료 변수 중에서는 주의구간 중 주의구간 시작지점부터 공사구간 상류부 1km 지점까지의 구간에서 사고발생 시, 차로 차단으로 인한 용량 감소 시 사고 심각도가 증가하는 것으로 도출되었다. 공사구간의 차로 차단으로 인하여 공사구간으로 접근하는 차량들은 주의구간의 교통안전표지를 통하여 차로 변경을 시작한다. 따라서 공사구간의 차로 차단으로 인한 강제적인 차로 변경은 주의구간에서 사고 심각도를 높이는 원인이 될 수 있다.

마지막으로 교통 자료에서 도출한 속도 변수의 경우 속도가 증가할수록 사고 심각도가 증가하는 결과가 나타났다. 이는 공사구간으로 진입하는 차량들의 속도가 높을수록 차로 변경 시 사고 발생 개연성과 사고 심각도 증가에 영향을 줄 수 있는 것으로 판단된다.

2. 공사구간 안전성 증진 방안

우선 공사구간 교통사고자료와 공사장 이력자료의 매칭을 통해 도출된 공사구간 사고 특성분석 결과는 다음과 같다. 사고 유형으로는 차-차, 사고 원인으로는 주시태만으로 인한 사고가 가장 많이 발생하였다. 공사 유형 중 확장공사에서 가장 높은 사고 빈도를 보였다. 또한 전체 공사구간 사고 중 절반 이상의 사고가 주의구간에서 발생하였고, 주의구간 중 작업구간과 가까울수록 사고 빈도가 증가하는 것으로 나타났다.

공사구간 사고 심각도 영향 요인 분석 결과, 고속도로 공사구간 사고 심각도에 영향을 주는 변수는 중분대작업, 도로재포장, 주의구간 ③, 차-사람, 용량 67%감소, 용량 33%감소, 속도 ②, 속도 ③로 도출되었고, 모든 변수가 사고 심각도와 양의 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다. 분석 결과를 바탕으로 공사구간 안전성 증진 전략을 다음과 같이 도출하였다.

1) 차로 합류 및 차단 방안

중분대작업과 도로재포장 유형은 차로를 차단하여 공사를 시행하므로 운전자들이 사전에 차로변경을 할 수 있도록 유도하는 방안을 적용할 수 있다. 기존 공사구간에서는 테이퍼를 사용하여 전면 도로 차단, 일시적 도로 차단 방안을 적용하고 있다.

본 연구에서는 다양한 공사구간 형태 별 상황에 적용할 수 있는 해외 사례로 사전 유도 방안(Chicane)과 Joint Merge 방안을 제시하였다.

사전 유도 방안은 도로 공사구간에 진입하기 전에 강제적으로 차로 변경을 유도하여 속도를 감소시키는 방안으로 Figure 4에 개념도를 제시하였다. 아직 우리나라는 일반 도로 공사구간에만 적용하고 있고 고속도로 공사구간에 적용한 사례는 찾아볼 수 없었다.

Joint Merge 방안은 공사구간 진입 전 차로의 가장자리 폭을 줄여 두 차로를 하나의 차로로 합류시키는 방안으로 Figure 5에 개념도를 제시하였다. Joint Merge 방안 적용 시 차단차로와 합류차로 간 통행 우선권의 불균형을 해소할 수 있고 완화구간 진입 전 감속을 유도하여 공사구간 내 안전성을 확보 할 수 있다. 또한 확장공사의 경우 작업량이 많아 장기 공사가 대부분이므로 공사구간 진입 운전자들에게 공사구간의 위치 및 공사 여부를 사전에 홍보하는 방안을 적용할 수 있다.

차로 합류 및 차단 방안 중 사전 유도구간의 기존 연구에 의하면, Brewer(1972)는 현장실험을 통하여 사전 유도 구간 적용의 효과를 분석하였다. 분석 결과, 기존 차로 차단 기법보다 사전 유도구간을 적용할 경우 공사구간 내 제한속도인 48km/h의 준수율이 약 20%정도 더 높은 것으로 분석되었다. 또한 Joint Merge 방안의 기존 연구를 살펴보면 Idewu et al.(2010)는 기존 차로 차단 기법과 Joint Merge 방안의 속도를 현장 실험을 통하여 비교 평가하였다. 그 결과, 교통량이 1,200vphpl 미만일 경우에는 기존 차로 차단 기법의 속도가 좀 더 낮게 분석되었다. 그러나 교통량이 1,200vphpl 이상일 경우에는 기존 차로 차단 기법보다 Joint Merge 방안이 속도 회복 정도가 높은 것으로 제시하고 있다.

기존 연구 결과를 바탕으로 국내 공사구간에 사전 유도 방안 및 Joint Merge 방안의 적용을 위해서는 다음과 같은 연구가 필요할 것으로 판단된다. 우선 사전 유도 방안 및 Joint Merge 방안은 아직 국내 운전자들에게 익숙하지 않은 방안으로 시뮬레이션 분석을 통한 운전자의 반응 및 주행특성에 관한 연구가 선행되어야 한다. 또한 기존 차로 차단 방안과의 비교 연구가 필요하다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 실제 공사구간 현장 적용 시 사전 유도 구간 및 Joint Merge 구간을 인식 할 수 있는 교통안전표지의 위치, 크기에 대한 연구 및 정책적인 홍보 방안이 필요하다고 판단된다.

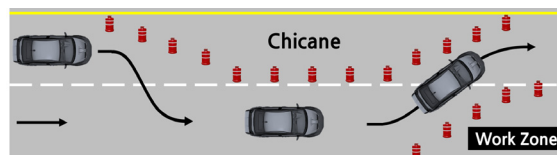


Figure 4. Conceptual diagram of chicane

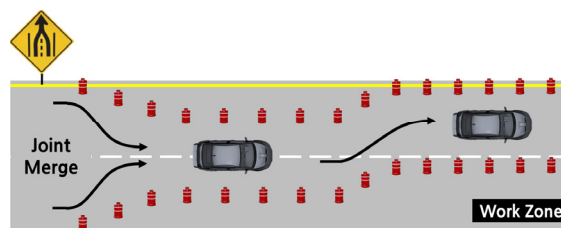


Figure 5. Conceptual diagram of joint merge

2) 주의구간 내 정보 제공 방안

공사장 교통관리구간 중 주의구간은 공사구간으로 진입하는 운전자들이 차로 합류 및 공사구간의 유무를 공사 안내표지, 주의표지, 도로 공사구간 전용 주의표지 등을 통하여 확인하는 구간이다.

공사구간 진입 전 차량 정체가 발생하게 되면 정체가 생성되는 지점을 정체 끝단부로 정의한다. 이러한 경우 Figure 6과 같이 PVMS(Portable Variable Message Sign) 메시지 정보를 이용하여 운전자에게 정체 끝단부 위치 정보를 제공할 수 있다(Gerald et al., 2016). 운전자들은 PVMS 메시지 정보를 통하여 미리 정체의 정보를 인지하고 감속 및 차로 변경을 할 수 있다. 또한 PVMS를 이용한 공사구간 정체 끝단부 정보를 운전자에게 제공하여 공사구간 정체 끝단부 관리가 가능하다.

기존 연구에 의하면 Gerald et al.(2016)는 정체 끝단부 경고 시스템 적용에 따른 사고 발생 비율을 분석하였다. 그 결과, 정체 끝단부 경고 시스템 적용 시 심각한 사고는 17%, 후미추돌 사고는 22% 감소하는 것으로 도출되었다.

현재 도로 공사장 교통관리 지침에 의하면 국내 PVMS의 공사구간 설치는 운전자에게 차로 변경, 속도 변경 등 필요한 행위를 하기 위한 시간을 제공하기 위해 공사장으로부터 충분히 먼 거리에 설치해야 한다고 명시되어있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012). 그러나 공사구간처럼 특정 지점에 이동하여 운영하는 PVMS는 지점 선정에 대한 규정 및 지침 내용이 부족하여 운영주체의 임의적 판단에 따라 설치 및 운영되고 있다. 이를 개선하기 위해서는 다양한 공사구간 교통상황에 대처할 수 있는 PVMS의 설치 및 운영에 대한 지침 수립이 필요하다. 이를 위하여 현장 실험 및 시뮬레이션 실험을 통한 PVMS 설치 위치, PVMS 표출 메시지의 경우 공사장 시점까지의 거리, 정체 끝단부까지의 거리, 표출시간 등 공사구간 상황 별 최적의 PVMS 가이드라인 개발이 요구된다.

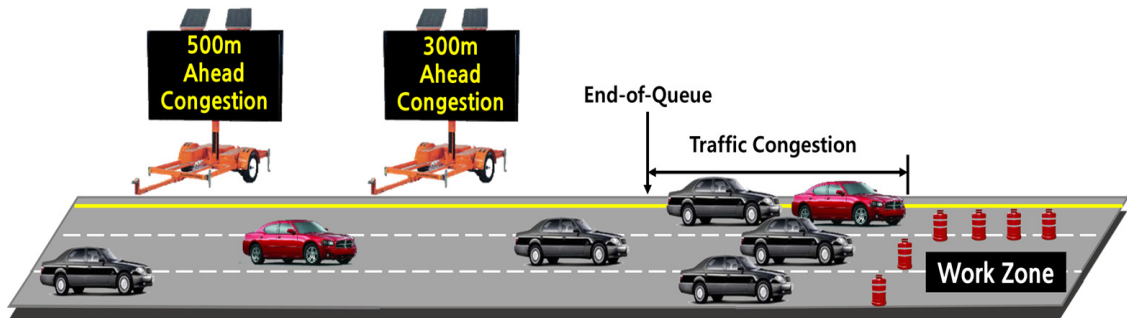


Figure 6. Example of potable end-of-queue warning system at work zone

3) 공사구간 속도 관리 방안

주의구간 및 작업구간에서의 과속은 심각한 사고를 유발할 수 있는 주요 사고 원인이다. 차로 차단공사 시 도로 용량 또한 감소하여 공사구간 진입 전 정체가 발생할 수 있다.

한국도로공사는 2016년 3월부터 고속도로 공사구간 교통사고로 인한 치사율 감소를 위해 고속도로 공사구간 제한속도를 80km/h에서 60km/h로 하향 조정하였다. 이를 통하여 발생할 수 있는 속도의 급감속으로 인한 사고를 방지하기 위하여 작업구간 전방 1.4km 지점에는 최고속도제한(80km/h) 규제표지와 전방 800m 지점에는 최고속도제한(60km/h) 규제표지를 설치하여 단계적으로 속도 감소 방안을 적용하고 있다.

공사구간 속도 관리 방안으로는 테이퍼 전방 500m부터 설치하고 있는 최고속도제한 규제표지를 주의구간 시작 지점에 추가로 배치하거나 단속을 병행하는 방안을 검토해 볼 필요가 있다. 또한 공사구간 진입 운전자들이 단계적으로 속도를 줄일 수 있도록 Figure 7과 같이 PVMS를 설치하여 VSL(Variable Speed Limit)를 도입하는 방안이 필요하다.

이를 실제 공사구간에서 적용하기 위해서는 PVMS를 활용한 VSL의 설치 위치, VSL 적용 후 운전자의 속도 감소량을 통한 교통 안전성 평가 등의 연구가 추가적으로 수행되어야 한다. 또한 나아가 공사구간에 능동적이고 현장 상황을 반영한 적응형 VSL로의 발전이 필요하다.



Figure 7. Example of PVMS+VSL in work zone

Source: Guidance for the use of portable changable message signs in work zone, FHWA (2013)

4) 공사구간 경고 정보 제공 방안

사고 유형 중 차-사람 사고의 경우 공사장 작업자와 공사차량 및 공사장 침입차량과의 사고가 대부분이고 사고 심각도 역시 높은 것으로 나타났다. 따라서 공사구간으로 진입하는 운전자들에게 공사구간의 정보를 미리 제공해야 한다. 또한 공사구간 내 작업자들에게 작업구간 내 위험 상황 발생 시 경고 정보를 제공하는 방안도 필요하다. 공사구간 경고 정보 제공 방안으로는 DSRC(Dedicated Short Range Communication)을 활용한 경고 정보 제공 장비를 공사장 작업자 및 공사 차량에 부착하는 방안을 적용할 수 있다. 이 장비를 통하여 공사차량 운전자는 작업자의 위치를 실시간으로 인지하고, 작업자 역시 공사차량이 접근하면 안전 장비나 PVMS를 통하여 경고 정보를 제공받을 수 있다(Banaeiyan et al., 2016). DSRC 장비를 활용한 경고 정보 제공 시스템 예시는 Figure 8에 제시하였다.

이러한 시스템의 실효성 있는 현장적용을 위해서는 표출메세지, 글자체, 메시지 표출순서, 표출 정보량, 공사구간 상황별 메시지 정보 내용 등과 같은 기술적 이슈에 대한 충분한 검토가 필요할 것이다. 또한 V2I(Vehicle to Infrastructure)통신이 가능한 RSE(Roadside Equipment) 설치 위치 선정도 필요하다. 마지막으로 공사구간 진입 운전자들의 차량에 경고 정보를 제공 받을 수 있는 장비의 유무 및 DSRC 장비의 장착 여부도 고려되어야 할 사항이다.

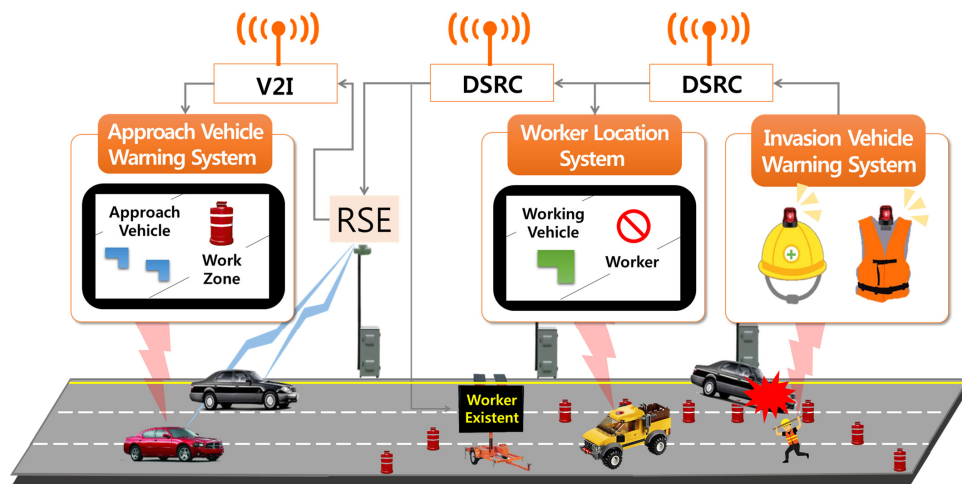


Figure 8. Conceptual illustration of warning system using DSRC for workers and drivers safety in work zone

5) 공사구간 교통안전시설 도입 방안

주의구간 및 작업구간에서 발생하는 사고의 주요 원인은 운전자들의 졸음 및 주시태만의 원인으로 나타났다. 이를 예방하기 위해서는 공사구간 진입 전·후에 교통안전시설을 도입하는 방안이 필요하다. 운전자의 주의를 환기시키는 교통안전시설로 이동형 림블스트립과 DAS(Directional Audio System)를 제시하였다.

이동형 림블스트립(Pappe, 2014)은 Figure 9과 같이 도로의 포장부에 설치하는 기존 림블스트립과 달리 운전자의 졸음, 주시태만의 예방이 필요한 특정 구간에 임시로 설치할 수 있는 시설이다.

DAS는 Figure 10과 같이 방향성을 갖는 경고음 발생 장치로 도로에서 발생하는 소음에 영향을 받지 않는 경고음을 발생시킨다. 공사구간에 DAS 적용 시 위험운전이나 공사장으로 침범하는 특정 차량에게 경고음을 발생 시켜 공사구간의 안전성을 증진시킬 수 있다.

이동형 림블스트립의 기존 연구에 의하면 Savolainen et al.(2009)는 공사구간에서 이동형 림블스트립의 적용에 따른 속도 감소를 분석하였다. 분석 결과, 공사구간에서 이동형 림블 스트립을 적용하지 않은 경우 보다 이동형 림블스트립을 적용하였을 때 속도가 12.9km/h 감소하는 것으로 나타났다. 또한 DAS의 기존 연구 결과를 살펴보면, Brown et al.(2015)는 DAS를 실제 공사구간에 적용 시 운전자의 합류 거리 및 속도에 관하여 분석하였다. 분석 결과, DAS 적용 전보다 DAS 적용 후 평균 속도를 약 4.8km/h 감소시키고 평균 합류 거리를 약 37m 증가시키는 것으로 나타났다.



Figure 9. Example of potable rumble strips

Source: Pappe R.(2014), speed reduction measures/TCD, traffic-roadway section



Figure 10. Example of DAS

Source: Savolainen, P. T, et al.(2009), evaluation of temporary removable rumble strips for speed reduction

이를 통하여 국내 공사구간에 이동형 럼블스트립을 적용하기 위해서는 우선 이동형 럼블스트립이 기존의 럼블스트립과 같은 효과를 나타내는지에 대한 고찰이 필요하다. 이를 위하여 속도, 교통량에 따라 회전각도, 종·횡방향 움직임, 진동 및 소리의 세기가 기존 럼블스트립의 요건에 부합하는지에 대한 연구가 우선적으로 필요하다. 또한 DAS의 경우 실제 공사구간 적용 시 진입 운전자들의 경고음의 인식 여부와 속도 감소 효과에 대한 분석도 수행되어야 한다. 나아가 공사구간 정보를 받은 운전자 및 작업자들은 인지 능력이나 선호도가 각각 다르기 때문에 시각적인 교통안전시설 이외의 다양한 방식의 정보제공이 가능한 교통안전시설의 개발이 필요하다.

6) 공사구간 안전성 효과분석 및 모니터링

공사구간의 안전성을 증진시키고 공사구간의 교통혼잡을 완화시키기 위하여 지능형 교통시스템을 활용한 공사구간 교통관리 방안을 적용할 수 있다. 해외 사례를 살펴보면, 미국 일리노이 교통부는 실제 공사구간에 실시간 교통관리 시스템을 도입하여 공사구간 중 안전성을 증진시킨 연구를 수행하였다.

실시간 교통 관리 시스템은 PVMS, 실시간 속도 및 교통량 수집이 가능한 이동형 교통 센서, 사고 유무를 판단할 수 있는 CCTV로 구분하였다. 각각의 구성요소는 무선통신으로 정보 전달이 가능하고, 공사구간 내 정체 및 사고 발생 시 PVMS로 공사구간의 정보를 운전자 및 작업자에게 제공하는 방식으로 운영하였다. 실시간 교통 관리 시스템 적용 결과, 시스템 적용 전과 비교하여 평균속도가 약 18% 감소하는 것으로 나타났다.

또한 앞서 제시한 공사구간 안전성 증진방안의 도입 후 효과를 분석한 연구들을 살펴보면, Schrock et al.(2008)은 공사구간에 사전 유도구간 적용 시 사고 발생률에 대하여 분석하였다. 그 결과 사전 유도구간 적용 시 약 30%의 사고 감소율을 보이는 것으로 나타났다. DSRC를 적용한 Sun et al.(2011)는 이동형 럼블스트립의 공사구간 적용 전보다 적용 후 브레이크를 밟은 차량이 10% 더 증가하였고, 차량들의 평균속도는 5.9km/h 감소하는 것으로 도출되었다.

지능형 교통시스템 및 공사구간 안전성 증진 방안의 도입은 공사구간 내 공사구간의 안전성 증진시키기 위하여 필요하다. 또한 국내 공사구간에 적용하기 위해서는 PVMS 및 이동형 교통 센서의 설치 위치, CCTV의 검지 영역 설정 등의 추가적인 연구가 수행되어야 한다. 나아가 효율적인 예산 투자를 위하여 안전성 증진 방안의 효과 크기별 현장 적용 우선순위를 세워 실제 공사구간에 적용하는 노력이 필요하다. 분석 결과로 제시된 공사구간 사고 심각도 영향 요인과 공사구간 안전성 증진 방안을 종합하여 Table 7에 제시하였다.

Table 7. Total result & countermeasure

Factors Affecting Crash Severity at Freeway Work Zones	Improvement of a Freeway Work Zones Safety
Median Barrier Work, Resurfacing Road Work	Traffic calming measure (Chicane, Joint Merge)
Caution Section ①	PVMS, TPRS(Temporary Portable Rumble Strip)
Upstream Speed ②, Downstream Speed ③, Reducing 63% Capacity, Reducing 33% Capacity	Speed-Limit Sign, Introduction of VSL through PVMS
Car-Person	Warning Information Providing Devices through DSRC
Integration Factors	Real Time Traffic Management System (PVMS, TPRS, CCTV)

결론 및 향후 연구과제

고속도로 공사구간은 차로 차단으로 인한 교통 혼잡 및 차로 변경으로 인한 교통 안전성이 저하되는 문제점이 발생하고 있다. 기존 문헌 고찰 결과, 공사구간 사고 유형, 사고 원인에 따른 단순 비교 분석과 공사구간 사고 자료만을 이용하여 공사구간의 교통 특성을 충분히 반영하지 못한 연구가 대부분이었다.

따라서 본 연구에서는 공사구간 교통관리특성을 반영한 교통안전분석을 위해 고속도로 공사구간 교통사고 자료, 교통 자료(속도, 교통량), 공사장 이력자료를 이용하였다. 최종 분석 자료셋은 교통사고 자료와 이력자료를 매칭하고 교통 자료를 추가로 반영한 자료로 구축하였다. 분석에 앞서 총 231건의 최종 분석 자료셋을 활용하여 전체 공사

구간 및 주의구간의 교통사고 특성분석을 수행하였다. 사고 심각도 영향요인 분석에서는 종속변수로 사망사고, 부상사고, 물적피해사고로 구분하였고, 독립변수는 교통사고 자료, 교통 자료(속도, 교통량), 이력자료로 구분하여 사고 심각도에 영향을 줄 것으로 예상되는 요인을 변수로 설정하였다. 분석 결과, 고속도로 공사구간 사고 심각도에 영향을 주는 변수는 중분대작업, 도로재포장, 주의구간 @, 차-사람, 용량 67%감소, 용량 33%감소, 상류부 속도 ②, 하류부 속도 ③ 도출되었다. 모든 변수는 사고 심각도와 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

분석 결과를 바탕으로 공사구간 안전성 증진을 위한 6가지 대응방안을 수립하였다. 안전성 증진방안으로는 차로 합류 및 차단 방안, 주의구간 내 정보 제공 방안, 공사구간 속도 관리 방안, 공사구간 경고 정보 제공 방안, 공사구간 교통안전시설 도입, 공사구간 안전성 효과분석 및 모니터링 방안을 제시하였다. 또한 각각의 관련 연구 사례 및 현장 적용을 위한 향후 연구 과제를 제시하였다.

본 연구를 발전시키기 위해서는 다음과 같은 사항에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

첫째, 본 연구에서는 종속변수를 사망사고, 부상사고, 물적피해사고로 구분하여 분석을 수행하였다. 그러나 종속 변수 중 부상사고를 세분화하여 중상사고, 경상사고로 구분할 수 있고, 사망자 관점에서 사망사고, 물적피해사고의 관점으로 분석할 수 있다. 각각의 관점에서 사고 심각도 분석 시 사고 심각도에 영향을 주는 요인과 이에 따른 교통 안전성 증진방안 역시 다각적인 관점에서 도출 할 수 있다. 향후에는 다각적으로 종속변수를 구분하여 보다 체계적인 교통사고 심각도 분석이 가능할 것이다.

둘째, 고속도로 교통사고 자료 중 운전자 요인 정보로 구분되어 있는 운전자 연령, 성별, 차량 종류 정보들의 자료 누락으로 분석에서 제외하였다. 이를 문제를 개선하기 위해서는 고속도로 교통사고 자료의 정확한 자료 수집과 자료 관리체계를 시스템화 하여 체계적인 자료의 관리가 필요하다. 또한 향후 이러한 교통사고 자료 관리를 통하여 자료의 누락으로 제외한 운전자 요인 정보 변수들을 분석에 포함시켜 교통안전 증진방안의 도출이 필요하다.

셋째, 본 연구에서 사고 유형으로 구분한 변수 중 차-사람 사고만이 사고 심각도에 영향을 미치는 것으로 도출되었다. 공사구간의 제한속도는 60km/h로 고속도로 일반 구간의 제한속도보다 40-50km/h 낮고 이로 인한 통행속도 및 사고 시 충돌속도도 낮게 나타날 가능성이 높다. 이러한 교통운영의 특성으로 인해 차-차, 차-시설 유형의 사고가 공사구간의 사고 심각도에 미치는 영향이 통계적으로 유의하지 않게 분석된 것으로 판단된다. 한편 차-사람 유형의 사고는 차-차, 차-시설 유형의 사고와 비교하였을 때, 충돌속도가 상대적으로 저속이라 할지라도 사람에게 가해지는 충격량은 심각도에 유의한 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 보다 객관적이고 일반적인 결과 도출을 위해서는 충분한 사고자료와 다양한 분석기법을 적용한 추가 연구가 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea government (MSIP) (NRF-2010-0028693).

This work was also supported by a research project of the Korea Expressway Corporation.

REFERENCES

- Banaeiyan N. A., Zaman A. U., Hayee M. I. (2016), Visual Warning System for Workers' Safety on Roadside Work Zones, In Transportation Research Board 95th Annual Meeting, 16-1227.
- Bonneson J. A., McCoy P. T. (1993), Estimation of Safety at Two-Way Stop-Controlled Intersections On Rural Highways, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 1401, 83-89.
- Brewer K. A. (1972), Safety Evaluation of Forced Weaving as a Traffic Control Measure in Freeway Maintenance Operations, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 390, 84-93.

- Brown H., Sun C., Cope T. (2015), Evaluation of Mobile Work Zone Alarm Systems, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 2485, 42-50.
- Bryden J., Andrew L. (1999), Serious and Fatal Injuries to Workers on Highway Construction Projects, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 1657, 42-47.
- Choi S. (2013), Effects of Weather and Traffic Conditions on Accident Severity on Freeway, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 33(3), 1105-1113.
- Daniel J., Dixon K., Jared D. (2000), Analysis of Fatal Crashes in Georgia Work Zones, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 1715, 18-23.
- FHWA (2004), Intelligent Transportation System in Work Zones: A Case Study.
- FHWA (2013), Guidance for the Use of Portable Changeable Message Signs in Work Zones.
- Gerald U., Vichika I., Robert B. (2016), Safety Effects of Portable End-of-Queue Warning System Deployments at Texas Work Zones, In Transportation Research Board 95th Annual Meeting, 16-3587.
- Hong J. Y., Kim K. T., Lee S. B. (2010), Developing the Accident Injury Severity on a Field of Construction Work Using Ordered Probit Model, Journal of the KOSOS, 26(2), 89-98.
- Idewu W., Wolshon B. (2010), Joint Merge and its Impact on Merging Speeds in Lane Reduction Areas of Construction Zone, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 2169, 31-39.
- Jang J. H. (2013), A Study of Traffic Accident Characteristic in Freeway Work Zone in Korea, Chonnam National University.
- Khattak A. J., Khattak A. J., Council F. M. (2002), Effects of Work Zone Presence on Injury and Non-injury Crashes, Accident Analysis & Prevention, 34(1), 19-29.
- Korea Expressway Corporation (2015), Korea Expressway Work Zone Traffic Accident Condition.
- Korea National Police Agency (2013), Installation and Manual for Traffic Sign
- Lee S. Y., Min S. H., Park J. Y., Yoon S. D. (2005), An application of Logit & Probit model, PARKYOUNGSA, 177-203.
- Maddala G. S. (1983), Limited-Dependent and Qualitative Variables In Economics, New York: Cambridge University Press, 257-91.
- Meng Q., Weng J., Qu X. (2010), A Probabilistic Quantitative Risk Assessment Model for the Long-term Work Zone Crashes, Accident Analysis & Prevention, 42(6), 1866-1877.
- Analysis, Transportation Research Board 94th Annual Meeting, 15-4130.
- Pappe R. (2014), Speed Reduction Measures/TCD, Traffic-Roadway Section, Oregon Department of Transportation, Salem.
- Park M. C., Lee J. H., Park T. H., Ha T. J. (2008), A Study of Traffic Accident Characteristics in Freeway Construction Zones, The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems, 7(1), 127-136.
- Qi Y., Srinivasan R., Teng H., Baker R. (2013), Analysis of the Frequency and Severity of Rear-end Crashes in Work Zones, Traffic injury prevention, 14(1), 61-72.
- Savolainen P. T., Reddy V., Santos P. E., Joseph B., Datta T. K. (2009), Evaluation of Temporary Removable Rumble Strips for Speed Reduction, In Transportation Research Board 88th Annual Meeting, 09-1970.
- Schrock S. D., See C. F., Becke M. T., Mulinazzi T. E., Initiative S. W. Z. D. (2008), Evaluation of Early Merge Static Work Zone Signing in Oklahoma.
- Sun C., Edaram P., Ervin K. (2011), Elevated-risk Work Zone Evaluation of Temporary Rumble Strips, Journal of Transportation Safety & Security, 3(3), 157-173.
- Washington S. P., Karlaftis M. G., Mannering F. (2010), Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis, Chapman and Hall/CRC.
- Wong J. M., Arico M. C., Ravani B. (2011), Factors Influencing Injury Severity to Highway Workers in Work Zone Intrusion Accidents, Traffic Injury Prevention, 12(1), 31-38.