

주행시뮬레이션을 이용한 고속도로 공사장 주의구간 교통안전표지 설치 방안 연구

윤석민¹ · 박현진¹ · 오철^{1*} · 정봉조²

¹한양대학교 교통·물류공학과, ²한국도로공사 도로교통연구원

A Study on the Safety Countermeasures in Advanced Warning Area by Analyzing Driving Simulation in Work Zone

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

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

²Transportation Research Division, Korea Expressway Corporation, Gyeonggi 18489, Korea

*Corresponding author: cheolo@hanyang.ac.kr

Abstract

Effective installation and operations of traffic safety signs in the advance warning area is of considerable interest for safer traffic management at freeway work zones. This study evaluated the feasibility of traffic safety sign installation based on a driving simulation experiment to take drivers' responsive characteristics into consideration. Both the compliance rate for speed limit and a lane-changing safety index were used for evaluating a set of driving simulation scenarios. It was identified that providing speed limit signs to reduce speed in advance and afterward guiding lane-changing could lead to safer maneuvering of vehicles entering work zones. The outcomes of this study are expected to be useful for revising freeway work zone management policies toward crash prevention.

Keywords: advance warning area, driving simulation, traffic management of work zones, traffic sign, work zone

초록

고속도로 공사장 교통관리구간 중 주의구간은 공사구간으로 진입하는 차량이 차로 변경을 수행해야 하는 구간으로 감속과 함께 안전한 차로변경이 가능하도록 교통안전표지가 설치되어야 한다. 본 연구에서는 주행시뮬레이션 분석을 통해 주의구간 내 운전자의 반응특성으로 고려한 교통안전표지 설치의 적정성을 평가하였다. 교통안전표지 위치 변경 및 제거를 통해 시나리오를 구성하고, 시나리오 별 교통안전표지의 설치 위치 적정성을 제한속도 순응률과 차로변경 안전도를 통해 비교·평가하였다. 분석 결과 제한속도 규제표지를 주의구간 상류부에 설치하여 공사구간 진입차량의 속도를 미리 감소시키고, 차로변경 주의표지를 주의구간 하류부에 설치하여 차로 변경을 최종적으로 유도하는 것이 운전자의 인지도 및 순응도 향상에 있어서 가장 효과적인 대안인 것으로 확인되었다. 본 연구의 결과는 향후 고속도로 공사장에서 발생하는 교통사고 예방을 위해 교통관리기준의 개정 시 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

J. Korean Soc. Transp.
Vol.35, No.4, pp.278-291, August 2017
<https://doi.org/10.7470/jkst.2017.35.4.278>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 6 December 2016

Revised: 20 February 2017

Accepted: 1 August 2017

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.

주요어: 주의구간, 주행 시뮬레이션, 공사장 교통관리구간, 교통안전표지, 공사구간

서론

고속도로에서 차로를 차단하여 공사를 진행할 경우 공사구간을 진입하는 차량은 차로변경을 해야 한다. 이 때 공사구간에서 교통 혼잡 및 사고 발생 가능성이 높아진다. 이를 해결하기 위하여 공사장 교통관리 구간 중 주의구간에 교통안전표지를 설치하여 진입하는 운전자에게 공사구간에 대한 사전인지 및 차로 변경을 위한 충분한 시간을 제공해야 한다. 현재 국내에서는 완화구간 시점으로부터 전방 1.5km에 교통안전표지를 설치하여 운영하고 있다(Korea Expressway Corporation, 2015).

그러나 지난 2010년부터 2015년까지 고속도로 공사구간 사고 특성을 살펴보면, 전체 300건의 사고 중 177건의 사고가 주의구간에서 발생하였다. 특히 주의구간과 작업구간의 사고 건수를 비교해보면 주의구간에서는 177건, 작업구간은 123건으로 주의구간에서 사고가 더 많이 발생한 것으로 나타났다. 주의구간에서 발생한 사고의 주요사고 요인으로는 주시태만으로 인한 사고가 45%(80건), 졸음으로 인한 사고가 28%(51건)으로 전체 사고의 절반 이상을 차지하였다. 이는 주의구간에서는 차로변경이라는 추가적인 작업부하가 운전자에게 요구되기 때문에 주시태만 및 졸음과 같은 부주의로 인한 충돌사고 개연성이 일반구간보다 높기 때문이다. 따라서 주의구간에서 운전자의 안전한 차로변경을 유도할 수 있는 교통안전표지의 운용은 사고예방을 위한 효과적인 개선방안이라고 말할 수 있다.

이에 본 연구에서는 고속도로 공사장 교통관리구간 중 주의구간에 설치되어 있는 교통안전표지의 설치 위치를 주행 시뮬레이션 분석을 통하여 적정성을 평가하고 효과적인 교통안전표지 설치 위치를 제시하고자 한다.

우선 주행 시뮬레이션 분석을 위한 주의구간 시나리오를 설정하였다. 주의구간 내 설치되어 있는 교통안전표지의 설치 위치를 조합하여 총 4개의 시나리오를 구성하였다. 시나리오상에서 구현된 가상의 주의구간 환경에서 개별 운전자 주행행태관련 자료를 수집하여 분석하였다. 수집된 개별 운전자 주행행태관련 자료는 속도프로파일, 가감속 패턴, 차로변경 시종점 자료로 구성하였다. 수집된 개별 운전자 주행행태관련 자료를 통해 주행속도 순응률과 차로변경 안전도를 효과적으로 설정하고, 운전자 주행행태를 반영한 최적의 주의구간 교통안전표지 설치 위치를 도출하였다. 또한 작업구간 전방에 설치되는 교통안전표지를 통해 운전자에게 주의 및 안내정보를 제공하여 적절한 속도

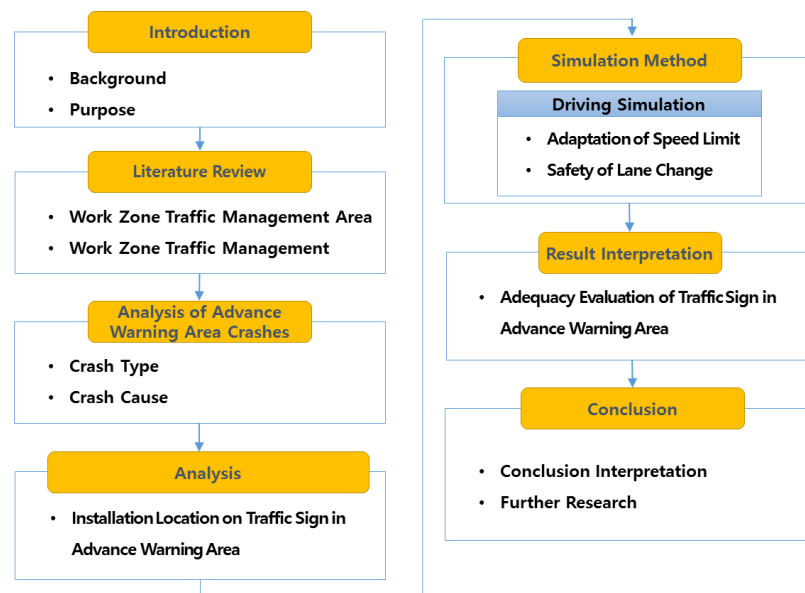


Figure 1. Study process

선택과 안전한 차로변경을 위한 의사결정을 지원하는 의미에서 ‘공사장’의 용어를 ‘공사장 교통관리구간’으로 설정하였다.

본 연구의 구성은 Figure 1과 같이 2장에서 국내 공사장 교통관리구간 및 시뮬레이션을 활용한 공사구간 관련 연구를 고찰하였다. 3장에서는 주행 시뮬레이션을 활용한 분석 방법론을 제시하였고, 4장에서는 주행 시뮬레이션 분석 결과를 통한 최적의 주의구간 교통안전표지 조합 및 설치 위치 대안을 선정하였다. 마지막으로 결론 및 향후 연구과제를 정리하였다.

기존 문헌 고찰

본 장에서는 국내 공사장 교통관리구간 및 공사장 교통관리구간 교통사고 특성, 시뮬레이션을 활용한 공사구간 관련 연구를 고찰하였다. 또한 본 연구와 기존 연구와의 차별성을 제시하였다.

1. 국내 공사장 교통관리구간

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

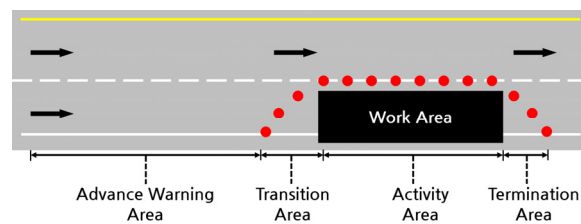


Figure 2. Work zone traffic management area

우선 주의구간은 운전자들이 전방의 교통상황 변화를 사전에 인지할 수 있도록 확보하는 구간이다. 완화구간은 테이퍼가 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.

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

주의구간에 설치하는 교통안전표지에는 공사 안내표지, 주의표지, 도로 공사구간 전용 주의표지, 규제표지가 포함된다. 또한 2013년을 기준으로 도로 공사구간 전용 주의표지의 바탕색상이 기존 황색표지판에서 형광오렌지 표지판을 사용하도록 변경되었다(Korea Expressway Corporation 2013). 본 연구에서는 교통안전표지 위치와 간격을 설치 기준으로 Figure 3과 같이 총 5개의 세부 구간으로 구분할 수 있다(Korea Expressway Corporation 2013).

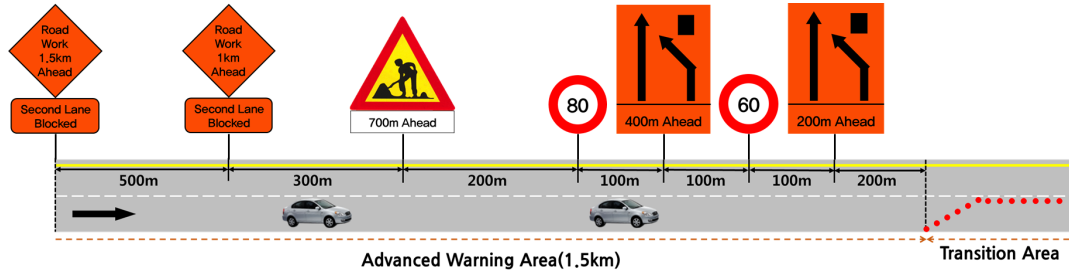


Figure 3. Traffic sign installation in advance warning area

2. 공사장 교통관리구간 교통사고 특성 관련 연구

고속도로 공사장 교통관리구간 별 교통사고 특성에 관련된 연구에서는 1989년부터 2001년까지 뉴욕에서 발생한 고속도로 공사장 교통사고를 사고 심각도 별로 사망, 중상, 경상으로 분류하고, 공사장 교통관리구간 별 교통사고 특성을 분석하였다. 분석 결과 주의구간에서 후미추돌 사고, 주시태만, 과속으로 인한 사고의 비율이 가장 높은 것으로 나타났다(Mohan et al.). 이와 유사한 연구로는 Hargroves B.T.(1981)는 버지니아 주 고속도로 공사구간에서 발생한 교통사고와 일반구간에서 발생한 사고를 분석하였다. 분석 결과, 공사장 교통관리구간 중 완충구간(완화구간 종점부터 작업구간 시점)에서 후미추돌로 인한 교통사고가 가장 많이 발생하였다. 또한 Nemeth et al.(1978)는 오하이오 주 고속도로에서 1년 동안 발생한 사고에서 km당 사고율이 높은 구간에서 발생한 사고 중 공사구간에서 발생한 151건의 사고를 분석하였다. 분석 결과, 151건의 사고 중 완충구간에서 39.1%, 작업구간에서 16.6%의 사고가 발생하였다. Zhao M. et al.(1999)는 버지니아 주 고속도로 공사구간에서 발생한 교통사고를 공사장 구간 별로 분석하였다. 분석 결과, 공사 유형에 관계없이 작업구간에서 후미추돌사고가 가장 많이 발생하였고, 완화구간보다 주의구간에서 측면 충돌사고의 비율이 높은 것으로 나타났다.

3. 공사구간 교통관리 관련 연구

시뮬레이션을 활용한 공사구간 관련 연구는 주로 주의구간 내 PVMS(Potable Variable Message Sign) 설치에 대한 연구와 차로 차단 공사 시 공사구간 교통류 분석 연구가 대부분이었다.

1) 주의구간 내 PVMS 설치 관련 연구

Park et al.(2013)은 PVMS를 주의구간 내 일정 간격으로 설치하여 VSL(Variable Speed Limit)를 구현하는 교통류 제어전략을 구성하여 공사구간에 미치는 영향을 파악하였다. VISSIM과 VT-MICRO model을 활용하여 시나리오를 분석한 결과, 주의구간에서의 VSL전략 적용을 위한 적정 PVMS 설치간격은 200m, 400m, 800m로 도출되었다. 이를 통하여 주의구간 내 VSL전략을 도입하여 단계적인 속도감속이 교통소통 및 교통안전 측면에서 효과적임을 입증하였다. 이와 유사한 연구로는 Lin P. et al.(2004)은 공사구간에 VSL 적용 시 CORSIM를 이용하여 효과를 분석하였다. 공사구간 통과율, 지체도, 평균통행속도 등을 효과적으로 이용하여 VSL 적용 효과를 분석한 결과, VSL 적용 시 통과교통량이 증가하고 전체 차량 지체가 감소하는 결과를 도출하였다. 또한 교통운영효율성 측면에서는 Li Y. et al.(2012)가 공사구간 주의구간에 PVMS 설치 위치를 산정하는 연구를 진행하였다. 공사구간 상류부로 진입하는 차량의 속도를 효과적으로 활용하여 분석한 결과, 공사구간 테이퍼 시작지점부터 228m 이전에 PVMS를 설치한 경우 진입차량의 평균속도가 가장 낮게 도출되었다.

2) 공사구간 교통류 분석 연구

차로 차단 공사 시 공사구간 용량 분석 연구에서는 CORSIM을 이용하여 1차로 차단, 2차로 차단, 1,2차로 차단

시 용량의 변화를 분석하였다. 분석 결과 차로 차단수가 증가할 때 마다 차로당 1%의 용량 감소를 보이는 것으로 도출되었다(Heaslip K. et al.). 또한 Zhu J. et al.(2004)는 INTEGRATION을 이용하여 차단 공사 중 1차로 차단 공사와 2차로 차단공사의 안전성을 평가하였다. 불안정한 감속 횟수와 속도 변화를 효과적으로 분석한 결과 2차로 차단 공사에서 불안정한 감속횟수가 감소하고 속도 변화 역시 낮은 것으로 분석되었다.

4. 기존 연구와의 차별성

국내 고속도로 주의구간에 설치하는 교통안전표지에는 공사 안내표지, 주의표지, 도로 공사구간 전용 주의표지, 규제표지가 존재하고, 공사구간 상류부로부터 설치 간격을 총 5개의 구간으로 구분하여 설치되어 있다.

공사장 교통사고 특성관련 연구에서는 완화구간과 작업구간에서 발생한 사고보다 주의구간에서 발생한 사고에서 후미추돌사고의 비율이 높은 것으로 나타났다.

한편 국내·외 공사구간 시뮬레이션 관련 연구는 주로 주의구간 내 PVMS 설치 및 효과평가 관련 연구와 차로 차단 공사 시 공사구간 용량 변화 및 안전성 평가에 대한 연구가 대부분이었다. 그러나 주의구간에 설치되어 있는 교통안전표지에 관한 연구는 부재한 상황이며, 주의구간 내 운전자 주행특성을 비교·분석하여 안전성을 평가한 연구는 찾아볼 수 없었다. 따라서 완화구간 진입 전 속도 관리 및 기존 주의구간 내 설치된 안전시설물에 대한 안전성 증진 방안 연구가 수행하였다.

이에 본 연구에서는 주행 시뮬레이션을 활용하여 주의구간 내 설치된 교통안전표지의 설치 위치의 적정성을 분석하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 새로운 주의구간 통합 교통안전표지 설치 위치를 제안하였고, 이에 본 연구의 차별성을 가진다.

공사장 교통관리구간 특성분석

1. 교통사고 특성분석

2010년부터 2015년까지 발생한 고속도로 교통사고 자료, 교통 자료, 공사장 이력자료를 매칭하여 총 300건의 공사장 사고 자료를 도출하였다.

Table 1에 제시한 분석 결과를 살펴보면, 300m~공사구간 테이퍼 시작지점 구간의 사고는 56건으로 가장 많은 사고가 발생하였다. 사고 유형은 차-차 사고가 모든 구간에서 가장 많이 발생하였고, 사고 원인은 테이퍼 시작지점 전방 500-300m 구간에서 주시태만으로 인한 사고가 28건으로 가장 비율을 차지하였다. 또한 300m~공사구간 테이퍼 시작지점 구간에서도 마찬가지로 주시태만으로 인한 사고가 27건으로 가장 많은 빈도를 나타냈다.

주의구간 시작지점의 평균속도는 84.18km/h, 작업구간의 평균속도는 82.3km/h로 평균속도가 약 2.2% 감소하는 것으로 나타났다.

Table 1. Crash characteristics by advanced warning area

	Advance Warning Area 1.5km (177 Crashes)					Work Area (123 Crashes)
Traffic Sign Installation in 1.5-1km Caution Section (Crashes) (17)	1-700m (27)	700-500m (34)	500-300m (46)	300m~Start Taper (56)	-	-
Crash Type (Crashes)	Car-Car (11)	Car-Car (12)	Car-Car (29)	Car-Car (32)	Car-Car (46)	Car-Car (94)
Crash Cause (Crashes)	Drowsiness (8)	Speeding (7)	Incautiousness (15)	Incautiousness (28)	Incautiousness (27)	Incautiousness (74)
Average Speed (km/h) (5 minute before Crash)	84.18	80.33	80.7	81.64	80.49	82.3

분석 결과를 종합해 보면, 공사장 교통관리구간 중 주의구간 시작지점에서 작업구간으로 갈수록 평균 속도는 감소하는 경향이 나타났다. 또한 주시태만으로 인한 사고가 높은 비율을 차지하므로, 이를 예방하기 위한 주의구간 내 교통안전표지의 개선이 필요하다.

2. 주행속도 특성분석

실제 공사구간 현장을 방문하여 고속도로 공사장의 운전자 주행특성 및 교통류 특성 자료를 수집하고 조사를 수행하였다. 2014년 4월 22일에 고창담양 고속도로 장성 2터널 입구에서 진행한 주간공사현장을 대상을 분석 범위로 설정하였다. 공사작업은 터널 내 보수작업이고, 편도 2차로 도로에서 2차로를 차단한 공사 유형이었다.

Figure 4와 같이 공사구간 이전(주의구간-완화구간), 공사구간(완화구간-작업구간), 공사구간 이후로 구분하고, 각 지점에 설치되어있는 VDS 검지기를 이용하여 속도자료를 수집하였다. 공사구간 이전, 공사구간 이후에 설치된 VDS 검지기의 평균속도 비교결과, Figure 5와 같이 공사구간에서 평균속도가 84.18kph로 가장 낮고, 공사구간 이후에는 평균속도가 91kph로 회복하며 공사구간보다 높게 나타난다. 이는 주의구간에서 진입하는 운전자들이 강제적인 차로변경으로 인하여 감속을 하기 때문으로 판단된다. 또한 주의구간에서는 차로변경이라는 추가적인 작업부하가 완화구간 및 작업구간보다 충돌사고 개연성이 높아지는 원인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

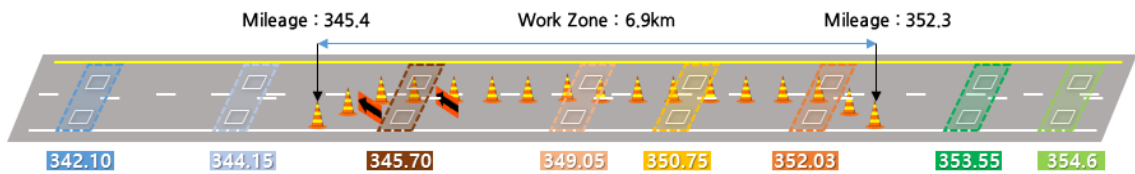


Figure 4. VDS detector installation position in work zone

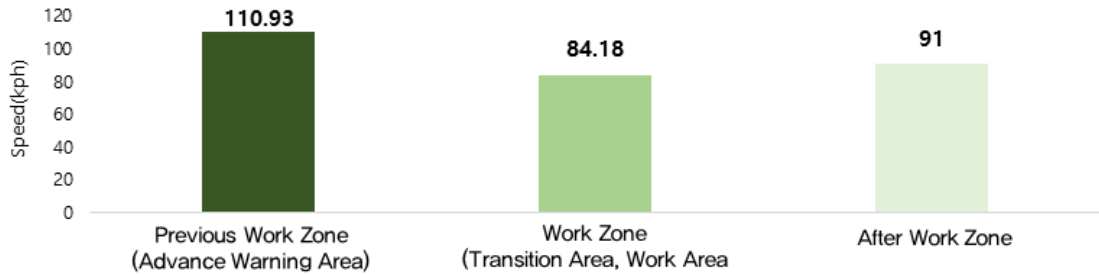


Figure 5. Speed characteristics by work zone traffic management area

분석 방법론

1. 분석 구간 및 시나리오 구성

주의구간 안전성 향상을 위한 운전자 주행특성 분석을 위한 분석 구간은 다음과 같이 설정하였다. Figure 6과 같이 주의구간 교통안전표지의 위치 및 제거를 통해 총 4개의 시나리오를 설정하였고, 각각 시나리오 별 총 1.5km의 주의구간을 분석 구간 길이로 구성하였다. 제한속도는 110kph인 고속도로 편도 2차로 중 우측 1개 차로를 차단하여 공사를 진행하는 상황을 설정하였다. 또한 차로 폭은 고속도로 차로의 최소 폭인 3.5m를 기준으로 하였다.

고속도로 공사장 교통관리지침 기준에 제시되어 있는 주의구간 교통안전표지의 위치를 기본 시나리오로 구성하였다. 주의구간에 설치하는 교통안전표지는 공사구간 상류부로부터 하류부로 진행될수록 구체적인 행동 변화를 요

구하는 표지가 설치된다. 구체적으로는 테이퍼 시작 지점으로부터 전방 1.5km와 1km, 700m 지점에 공사장 전방 안내표지와 주의표지를 설치하고, 그 이후로 공사구간 전용 주의표지를 설치한다. 두 번째 시나리오에서는 제한속도 차로변경 안전표지판을 모두 미설치한 시나리오를 구성하였고, 세 번째 시나리오에서는 제한속도 규제표지만을 설치한 시나리오를 설정하였다. 마지막 네 번째 시나리오에서는 차로변경 주의표지만을 설치한 시나리오를 구성하였다.

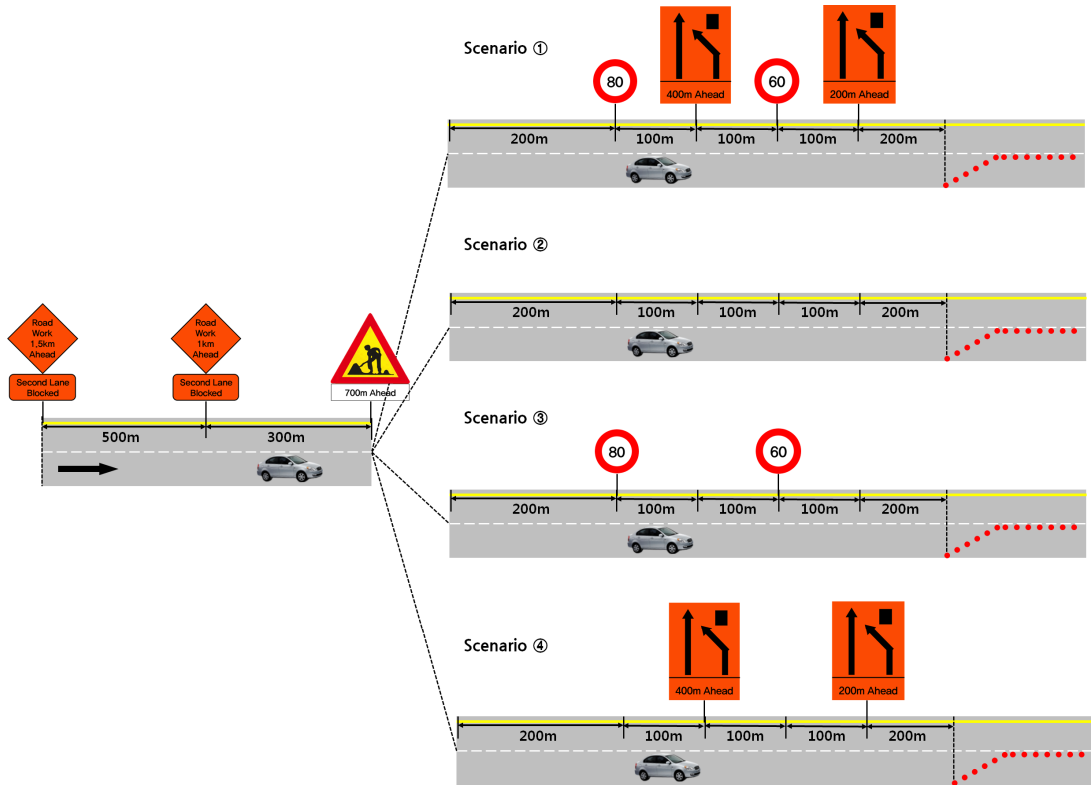


Figure 6. Analysis scenario for traffic sign in advance warning area

주행 시뮬레이션 분석에 앞서 본 연구에서 활용한 차로변경의 시·종점은 Figure 7과 같이 정의하였다. 분석에 사용된 차량은 고속도로 통행차량의 대부분을 차지하는 소형차종을 대상으로 하였으며, 제원은 폭 1.83m, 길이 4.80m인 차량으로 설정하였다. 차로변경 시·종점은 차량의 앞 범퍼의 좌측과 차로변경 전 좌측 차선이 만나는 경우로 가정하였으며, 차로변경 종점은 차로 변경 후, 차량 뒤 범퍼와 합류 차로의 우측 차선이 만나는 경우로 정의하였다.

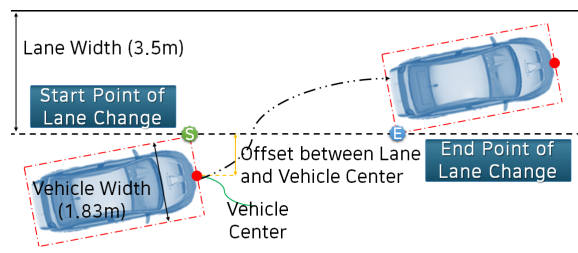


Figure 7. Definition of lane change

2. 주행 시뮬레이션

본 연구에서는 주의구간에 설치되어 있는 교통안전표지 설치위치의 적정성을 평가하기 위하여 주행 시뮬레이터를 활용한 연구를 진행하였다. 이를 위해서는 주의구간 교통안전표지의 추가 및 제거, 위치의 이동 작업이 필요하다. 다양한 교통안전표지의 적정성을 분석하기 위한 가장 좋은 방법은 현장 실험을 진행하는 것이다. 그러나 현장 실험의 경우 실험에 소요되는 시간 및 비용이 크고, 실험 중 발생할 수 있는 사고 위험성이 높다. 따라서 본 연구에서는 가상 주행 시뮬레이션 프로그램인 UC-winroad를 활용하여 주의구간 교통안전표지 시나리오를 구현하고, 가상 주행 실험을 통하여 최적의 주의구간 교통안전표지 설치 위치를 도출하였다.

본 연구에서 주행 시뮬레이터를 활용하여 실험을 진행하였다. 주행 시뮬레이션을 활용하여 주의구간을 통과하는 운전자의 반응행태를 분석하였다. 주행 시뮬레이션을 이용하여 수집한 자료로는 속도프로파일, 가감속 패턴, 차로 변경 시종점 등 다양한 자료를 수집하여 분석에 활용하였다.

주행 시뮬레이션 실험은 피실험자 40명을 대상으로 진행하였으며, 피실험자의 연령대는 Table 2과 같이 20-60대로 다양한 연령대로 구성하였다. 이 중 50대 여성 2명이 주행 시뮬레이션 실험 미적응으로 인하여 제외하였고 총 38명의 피실험자로 구성하였다. 시나리오 당 2-3분이 소요되었으며 총 4개의 주의구간 시나리오를 주행하였다. 실험구간은 공사구간 내 주의구간 1.5km부터 공사구간 종점까지 총 3km를 주행하였고, 실제 실험에 사용된 자료는 주의구간 1.5km 구간의 자료를 활용하였다. 다른 주변 차량의 영향이 없는 주의구간 교통안전표지에 의한 운전자 반응행태 분석을 위하여 시나리오 상 주변 차량은 존재하지 않는 환경에서 실험을 진행하였다. 실험은 시나리오별 각 1회씩 주행하도록 하였고, 실험 진행 전 주의구간 교통안전표지와 2차로 차단 공사 정보만을 제공하였다. 또한 피실험자들에게 교통안전표지 인지 후 차로 변경을 진행해야 한다고 판단하는 시점에서 자유롭게 차로 변경을 진행하도록 숙지시킨 후 실험을 진행하였다.

Table 2. Classification of subjects

Age	Gender		Total
	male	female	
20s	9	2	11
30s	6	4	10
40s	3	4	7
50s	4	4	8
60s	1	1	2
Total	23	15	38

주의구간 교통안전표지 적정성 분석을 위한 효과평가 지표로는 제한속도 순응률과 차로변경 안전도로 설정하였다.

제한속도 순응률은 Figure 8와 같이 60kph 제한속도 규제표지 시점(테이퍼 시작 전방 300m)부터 주의구간이 끝나는 테이퍼 시작지점까지를 기준으로 구간평균속도¹⁾를 산출하였다. 또한 공사구간 과속 기준인 80kph²⁾와 비교하여 운전자가 제한속도를 순응하는지를 판단하였다. 만약 구간평균속도가 80kph보다 낮을 경우 안전한 상황, 구간평균속도가 80kph보다 높을 경우 위험한 상황으로 정의하였다.

차로변경 안전도는 차로변경시점을 기준으로 주의구간이 끝나는 테이퍼 시작지점까지 최소정지거리와 차로변경 시점과 테이퍼 시점과의 거리를 비교하여 차로변경 안전성을 분석하였다. 최소정지거리는 Figure 9과 같이 산출할 수 있고, 최소정지거리가 차로변경시점과 테이퍼 사이의 거리보다 작은 경우 안전한 상황, 그렇지 않을 경우 위험한 상황으로 판단하였다.

1) 구간을 통과하는 차량들의 총 주행거리를 총 주행시간으로 나눈 값

2) 공사장 제한속도인 60kph를 20kph 초과한 값(도로교통공단 11대 위험운전행동 기준 중 과속 기준)

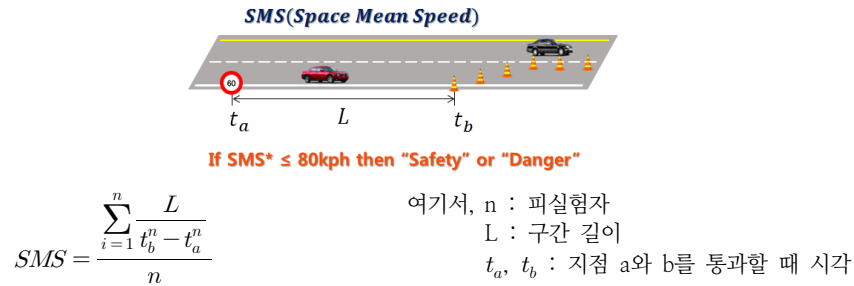


Figure 8. Definition of SMS(Space Mean Speed)

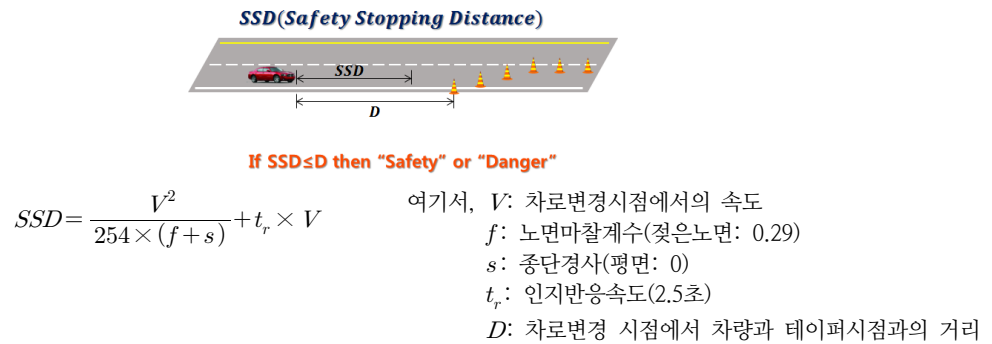


Figure 9. Definition of SSD(Safety Stopping Distance)

분석결과

1. 제한속도 순응률 및 속도감소량

제한속도 순응률 분석 결과, 구간평균 주행속도는 시나리오 ③(제한속도 규제표지만 설치)에서 90.17kph로 가장 낮게 분석되었고, 안전한 상황으로 판단되는 비율이 37%로 가장 높게 도출되었다.

속도감소량 분석 결과, 시나리오 ③(제한속도 규제표지만 설치)에서 속도 감소량은 10.77kph로 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 차로변경 주의표지 설치와 상관없이 제한속도 규제표지만 설치된 경우 주의구간에서 운전자들이 제한속도를 지키기 위해 감속하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 제한속도 순응률 및 속도감소량 분석결과는 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Result of SMS & speed reduction in advance warning area

Scenario	SMS (kph)				Safe Situation (%)	Dangerous Situation (%)	Speed Reduction (kph)
	Max	Min	Mean	Standard Deviation			
①	110.07	55.39	92.58	15.89	9(24)	29(76)	5.74
②	110.09	61.31	98.64	13.13	5(13)	33(87)	5.71
③	110.07	57.07	90.17	17.15	14(37)	24(63)	10.77
④	110.04	56.95	95.78	17.16	8(21)	30(79)	5.26

분석 결과를 종합해 보면 시나리오 ①(모든 교통안전표지 설치) 경우나 시나리오 ④(차로변경 주의표지만 설치) 경우보다 시나리오 ③(제한속도 규제표지만 설치)에서 주의구간 진입 차량의 속도 감소에 가장 큰 영향을 주는 것으

로 판단된다. 이는 주의구간에서 교통안전표지가 혼재되어 설치된 경우보다 단독으로 제한속도 규제표지가 설치되어있는 경우에 공사구간 진입 운전자들의 속도 감소 효과가 가장 큰 것으로 판단된다.

2. 차로변경 안전도 및 차로변경행태

차로변경 안전도 분석 결과, 모든 시나리오에서 평균 최소정지거리가 차로변경시점과 테이퍼 시작점과의 평균 거리보다 모두 큰 것으로 분석되었다. 시나리오 ④(차로변경 주의표지만 설치)에서 안전한 상황으로 판단되는 비율이 74%로 높게 분석되었다. 또한 시나리오 ④(차로변경 주의표지만 설치)에서 D-SSD의 값이 381.41m로 가장 크게 나타났다.

차로변경행태 분석 결과, 완화구간 시점으로부터의 거리를 살펴보면, 시나리오 ④(차로변경 주의표지만 설치)에서 586.97m로 다른 시나리오보다 표지판 인지 후 차로 변경을 미리 수행하는 것으로 나타났다. 마찬가지로 시나리오 ④(차로변경 주의표지만 설치)에서 차로변경거리가 107.47m로 가장 짧은 것으로 분석되었다. 차로변경 안전도 및 차로변경행태 분석결과는 Table 4에 제시하였다.

Table 4. Result of lane change safety in advance warning area

Scenario	Mean D (m)	Mean SSD (m)	Mean D - Mean SSD	Safe Situation (%)	Distance from Transition Area (m)	Lane Change Moving Distance (m)
①	560.11	186.83	373.28	32(84)	560.11	118.29
②	446.53	200.60	245.93	21(55)	446.53	107.5
③	514.87	187.66	327.21	27(71)	514.87	112.87
④	586.97	205.56	381.41	28(74)	586.97	107.47

분석 결과를 종합해 보면, 시나리오 ④(차로변경 주의표지만 설치)에서 차로변경 시 다른 시나리오보다 더 안전한 것으로 분석되었다. 또한 시나리오 ④(차로변경 주의표지만 설치)에서 공사구간 진입 전 차로변경을 미리 시작하고, 차로변경거리 역시 가장 짧은 것으로 분석되었다. 이는 차로변경 주의표지만 설치된 방안이 공사구간으로 진입하는 운전자들의 차로변경 시 교통 안전성 측면에서 가장 효율적인 것으로 분석되었다.

3. 주의구간 교통안전표지 개선안 도출 및 평가

제한속도 순응률과 차로변경 안전도를 종합하여 주의구간 교통안전표지 설치 적정성을 통합 평가한 결과, 시나리오 ③(제한속도 규제표지만 설치)에서 안전한 상황이 54%로 가장 높은 비율을 차지하였다. 또한 시나리오 ④(차로변경 주의표지만 설치)에서도 안전한 상황이 47%로 높은 비율을 나타냈다. 이는 단독으로 제한속도 및 차로변경 표지판이 설치되어 있는 경우에 속도 감소 및 차로 변경 유도 효과가 가장 큰 것을 의미한다. 반면 속도감소와 차로변경표지가 번갈아 설치되어 있는 경우, 공사구간 정보를 인지하는데 보다 시간이 소요되는 것으로 판단된다.

분석 결과를 종합해보면 주의구간에 교통안전표지를 다양하게 혼재하여 설치하는 것은 운전자가 정보처리 및 의사결정 시 부정적인 영향을 초래할 수 있다. 따라서 Figure 10-(b)와 같이 제한속도 규제표지를 주의구간 상류부에 설치하여 속도 감속을 유도하고, 차로변경 주의표지를 주의구간 하류부에 설치하여 차로 변경을 유도하는 것이 운전자의 인지도 및 순응도를 향상시킬 수 있는 개선방안을 제시하였다.

고속도로 주의구간 교통안전표지 설치 개선안에 대하여 20대 운전자 6명, 30대 운전자 3명을 대상으로 주행 시뮬레이션 실험을 추가적으로 수행하였다.

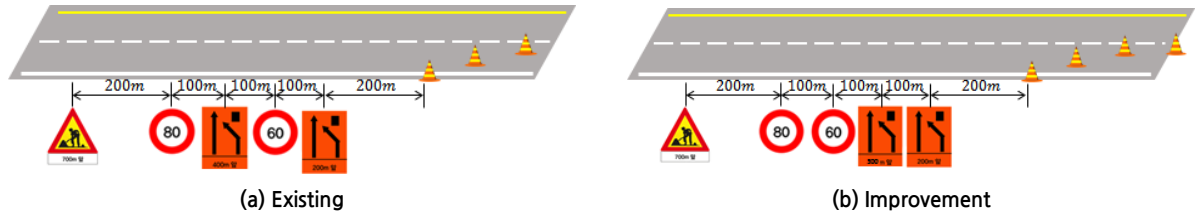


Figure 10. Improvement of traffic sign in advance warning area

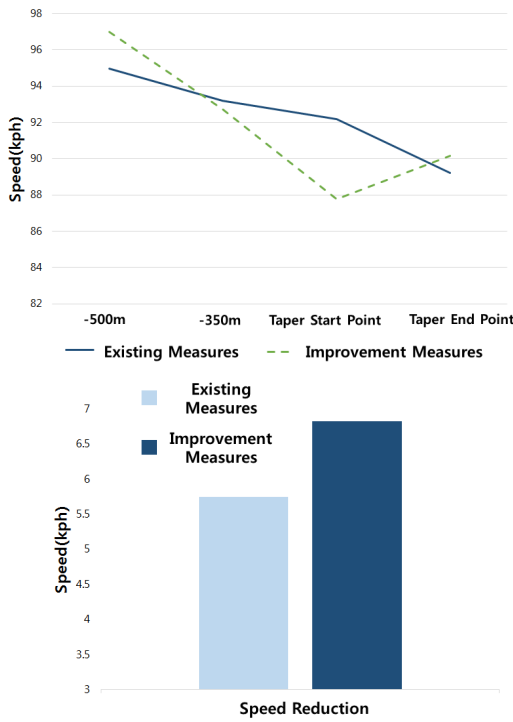


Figure 11. Result of speed of point & speed reduction



Figure 12. Result of lane change location & distance

Figure 11는 주의구간 교통안전표지 설치 지점 별로 주의구간 교통안전표지 설치 개선안(Figure 10-(b))과 기존 주의구간 교통안전표지 설치 안(Figure 10-(a))의 속도 감소량을 비교 분석한 결과이다. 지점 별 속도 및 속도감소 폭 분석결과, 기존 주의구간 교통안전표지 설치 안(Figure 10-(a))보다 주의구간 교통안전표지 설치 개선안(Figure 10-(b))에서 공사구간으로 진입할수록 속도가 감소하는 경향이 나타났다. 또한 속도 감소폭 분석 결과, 기존 설치 안보다 개선안에서 속도 감소폭이 1.1kph 더 큰 것으로 분석되었다.

Figure 12은 주의구간 교통안전표지 설치 개선안(Figure 10-(b))과 기존 주의구간 교통안전표지 설치 안(Figure 10-(a))의 차로변경시점과 차로변경거리를 비교 분석한 결과이다. 차로변경위치 및 거리 분석결과, 기존 주의구간 교통안전표지 설치 안(Figure 10-(a))보다 주의구간 교통안전표지 개선안(Figure 10-(b))에서 차로변경시점이 빠른 것으로 나타났다. 이는 주의구간 교통안전표지 기존 설치 안보다 개선안에서 공사구간 진입운전자들이 미리 차로변경을 시작하는 것을 의미한다. 또한 차로변경거리 역시 기존 설치 안보다 개선안에서 50m 짧은 것으로 분석되었다.

주의구간 교통안전표지 설치 개선안에 대한 추가 실험 분석결과, 기존 설치안보다 개선안에서 공사구간 진입 시 차로변경 행태 및 주행 속도의 안전성이 더 높은 것으로 분석되었다.

Table 5와 같이 속도 감소량에 대한 사후분석 결과 시나리오 ④(차로변경 주의표지만 설치)와 시나리오 ③(제한속도 규제표지만 설치)에서 서로 다른 집단으로 분류되었다. 이는 시나리오 ③, ④에서 속도감소효과가 있는 것을 의미한다. 또한 제한속도 순응률, 차로변경 안전도 대한 ANOVA-Test 결과, 제한속도 순응률, 차로변경 안전도는 모두 집단 간 통계적인 차이가 없는 것으로 나타났다(유의수준 $\alpha=0.05$).

Table 5. Speed reduction result of post analysis test

Scenario	N	Group of P-value=0.05	
		1	2
④	32.00	-1.18	-
②	38.00	4.04	4.04
①	37.00	4.84	4.84
③	37.00	-	10.62
P-value	-	0.43	0.35

결론 및 향후 연구과제

고속도로 공사장 교통관리구간 중 주의구간은 공사구간으로 진입하는 운전자들이 안전하게 차로 변경을 할 수 있도록 교통안전표지를 통해 정보 제공을 하는 구간이다. 그러나 주의구간 내 교통안전표지의 적정성을 분석한 연구는 부재한 상황이며, 주행 시뮬레이션을 활용하여 주의구간을 분석한 연구 역시 아직까지 찾아볼 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 주의구간 교통안전표지의 적정성을 주행 시뮬레이션을 활용하여 분석하였다. 주행 시뮬레이션을 활용하여 가상의 주의구간 내 교통안전표지 시나리오를 구현해 운전자 주행 행태를 도출하고, 최적의 교통안전표지 조합 및 설치 위치를 제시하였다.

분석 결과, 기존 주의구간 교통안전표지 조합 및 설치 위치보다 상류부에는 제한속도 규제표지를 설치하여 속도 감소 및 교통 안전성 증진을 도모하였다. 또한 하류부에는 차로변경 주의표지를 설치하는 방안이 속도 감소 및 운전자의 인지도와 순응도 향상에 효과적인 설치 기준으로 판단된다.

본 연구를 발전시키기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다.

첫째, 본 연구에서는 주의구간 내 설치된 교통안전표지판을 대상으로만 분석을 수행하였다. 그러나 공사장 교통관리구간 중 완화구간과 작업구간에도 교통콘, 로봡 신호수, 노면표시등과 같은 교통안전시설물들이 설치되어 있다. 주의구간 내 교통안전표지판 뿐만 아니라 이러한 교통안전시설물도 공사장 교통관리구간으로 진입하는 운전자들의 인지도 및 순응도에 영향을 줄 수 있다. 따라서 향후에는 완화구간과 작업구간에 설치되어 있는 교통안전시설물로 분석 대상을 확장시켜 추가적인 분석이 필요하다고 판단된다.

둘째, 주의구간 내 교통안전표지를 추가하여 분석하는 방안이 필요하다. 본 연구에서는 기존에 설치되어 있는 교통안전표지를 제거 및 위치를 이동시켜 최적의 교통안전표지의 위치 적정성을 판단하였다. 그러나 시나리오 구성 시 주의구간 상류부 700m~완화구간 시작지점 사이에 위치한 교통안전표지만을 활용하여 분석하였다. 주의구간 상류부 1.5km~주의구간 상류부 700m에도 공사장 전방안내표지와 주의표지가 설치되어 있다. 향후에는 분석 범위를 확장하여 주의구간 상류부에 설치되어 있는 공사장 전방안내표지 및 주의표지와 기존 분석에 활용한 교통안전표지들을 조합하여 추가적인 분석이 필요하다. 또한 기존 교통안전표지 조합에 제한속도 규제표지나 차로변경 주의표지, 도로 공사 중 주의표지를 추가적으로 배치하여 교통안전표지의 설치 위치 및 조합의 적정성을 평가하는 방안이 필요할 것이다.

셋째, 주의구간 교통안전표지 개선안에 대한 추가적인 주행 시뮬레이션 실험이 필요하다. 앞서 수행한 주행 시뮬레이션 실험은 피실험자 40명을 대상으로 진행하였으며, 피실험자의 연령대는 20-60대로 다양한 연령대로 구성하

였다. 그러나 주의구간 교통안전표지 개선안에 대한 추가적인 실험은 피실험자의 추가 모집 및 예산 문제 등의 현실적인 제약조건으로 인하여 실험 참가자를 20-30대 9명으로 구성하였다. 향후 다양한 연령대의 피실험자를 모집하여 주의구간 교통안전표지 개선안에 대한 시뮬레이션 분석이 필요할 것으로 판단된다.

마지막으로, 본 연구는 주행 시뮬레이션 분석을 통해 도출된 주의구간 교통안전표지를 실제 공사구간에 도입하지 못하였다. 이는 실제 주의구간에서 교통안전표지의 조합 및 설치 위치의 적정성을 평가하는 것에 한계가 있기 때문에 주행 시뮬레이션을 통해 교통안전표지의 설치 방안을 연구하였다. 본 연구에서는 이상적인 상황을 고려하여 시나리오를 설정하고 시뮬레이션 실험을 진행하여 현장적용 여부에 대한 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 주변 차량이 존재하는 시나리오를 설정하여 추가적인 분석이 필요하고, 주의구간 뿐만 아니라 완화구간 및 작업구간에 대한 연속적인 분석을 수행할 필요가 있다고 판단된다. 또한 분석 구간의 차로를 편도 4차로, 편도 6차로로 확장하여 다양한 고속도로 공사장 교통관리구간 현장에 적용할 수 있는 분석이 필요할 것이다. 향후에는 본 연구에서 제시한 공사장 교통안전표지의 설치 방안을 실제 공사구간에 적용 및 운영하여 운전자의 반응행태 및 안전성을 평가하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was carried out with the support of the Ministry of land, Infrastructure and Transport of Transportation Logistics Research Project(16TLRP-C096228-02).

알림: 본 논문은 대한교통학회 제76회 학술발표회(2017.02.16)에서 발표된 내용을 수정, 보완하여 작성된 것입니다.

REFERENCES

- Garber, N., Zhao, M. (2002). Distribution and Characteristics of Crashes at Different Work Zone Locations in Virginia, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1794), 19-25.
- Gettman, D., Head, L. (2003). Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1840), 104-115.
- Hargroves, B. T. (1981). Vehicle Accidents in Highway Work Zones, *Transportation engineering journal of the American Society of Civil Engineers*, 107(5), 525-539.
- Heaslip, K., Kondyli, A., Arguea, D., Elefteriadou, L., Sullivan, F. (2009). Estimation of Freeway Work Zone Capacity through Simulation and Field Data, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2130), 16-24.
- Korea Expressway Corporation (2015), Korea Expressway Work Zone Traffic Accident Condition.
- Korea National Police Agency (2013), Installation and Manual for Traffic Sign.
- Lee M. R., Lee, C., Kim D. G. (2013), The Proper Length of Transition Area for Work Zones on Urban Freeways, *J. Korean Soc. Transp.*, 31(4), Korean Society of Transportation, 58-66.
- Lin, P. W., Kang, K. P., Chang, G. L. (2004). Exploring the Effectiveness of Variable Speed Limit Controls on Highway Work-Zone Operations. In *Intelligent Transportation Systems*, 8(3), 155-168.
- Li, Y., Bai, Y. (2012). Determining Optimal Deployment Location of Portable Changeable Message Sign Upstream of Work Zones, In *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*, 12-0814.

- Mohan, S., Zech, W. C. (2005). Characteristics of Worker Accidents on NYSDOT Construction Projects, *Journal of Safety Research*, 36(4), 353-360.
- Nemeth, Z. A., Migletz, D. J. (1978). Accident Characteristics before, during, and after Safety Upgrading Projects on Ohio's Rural Interstate System, *Transportation Research Record*, 672, 19-23.
- Park, B., Qi, H. (2006). Microscopic Simulation Model Calibration and Validation for Freeway Work Zone Network a Case Study of VISSIM, In 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 1471-1476.
- Park, J., Oh, C., Chang, M. (2013). A Study on Variable Speed Limit Strategies in Freeway Work Zone Using Multi-Criteria Decision Making Process, *Journal of Korean Society of Transportation*, 31(5), 3-15.
- Zhu, J., Saccomanno, F. (2004). Safety Implications of Freeway Work Zone Lane Closures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1877), 53-61.