

주행 시뮬레이션을 활용한 고속도로 이동공사 안전성평가

Evaluation of Freeway Mobile Work Zone Safety using Driving Simulations

박 현 진* · 오 철** · 문 재 필***

* 주저자 : 한양대학교 교통·물류공학과 박사과정

** 교신저자 : 한양대학교 교통·물류공학과 교수

*** 공저자 : 한국건설기술연구원 수석연구원

Hyunjin Park* · Cheol Oh** · Jaepil Moon***

* Dept. of Transportation and Logistics Eng., Univ. of Hanyang

** Dept. of Transportation and Logistics Eng., Univ. of Hanyang

*** Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Corresponding author : Cheol Oh, cheolo@hanyang.ac.kr

Vol.16 No.6(2017)

December, 2017

pp.124~140

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

<https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.6.124>

2017.16.6.124

Received 30 March 2017

Revised 24 April 2017

Accepted 1 November 2017

© 2017. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

공사구간으로 진입하는 운전자에게 안전한 회피행동을 유도하는 공사장 안내 및 경고정보가 제공되고 있다. 그러나 이동공사구간의 경우 작업차량 후방에 작업보호차량을 배치하여 운영하고 있지만 안전한 회피행동을 유도하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이동공사구간에서 운전자의 주행행태분석을 통하여 안전성을 평가하고 능동적인 사고예방대책 방안을 제시하고자 하였다. 주행 시뮬레이션 실험을 통해 이동공사와 고정공사 구간에 대한 주행실험 시나리오를 제작하고 운전자의 주행궤적자료 수집하였다. 차로변경 시·종점, 차로변경 수행거리를 도출하여 주행특성분석 자료로 활용하였다. 또한 피실험자가 전방의 이동작업차량을 회피할 때의 주행궤적자료를 수집하여 주행안전성 평가지표인 Safety Distance Index를 산출하였다. 그 결과, 이동공사가 고정공사보다 위험한 주행행태를 나타냈다. 특히 주행차량은 저속으로 이동하는 작업차량을 사전에 인지하지 못하여 차로변경 시점이 늦게 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 이동공사 시 운전자가 작업보호차량을 사전에 신속히 인지하고 적절한 회피행동을 수행할 수 있도록 경고정보를 제공하는 교통안전 향상 방안의 적극적인 도입이 필요하다.

핵심어 : 고속도로 이동공사, 운전자주행행태, 주행시뮬레이션, 주행안전성

ABSTRACT

There exists a limitation to provide proper advance information for safe maneuvering through guidance and caution signs in freeway mobile work zones, unlike fixed work zones. Although a work-protection vehicle is currently deployed at the rear of the work vehicle, more active countermeasures to prevent crashes are required. The purpose of this study was to propose a method to evaluate the safety in mobile work zones and to present effective countermeasures. Driving simulation experiments were conducted to analyze characteristics of driver's behavior in mobile and fixed work zones. Safety distance index (SDI) based on the comparison of stopping distances of a work-protection vehicle and a following subject vehicle was used to evaluate traffic safety. More dangerous driving behavior was observed in the mobile work zone. Especially, it was identified that the lane-change of vehicles following the work-protection vehicle was late.

Therefore, it is necessary to actively introduce methods to provide warning information so that the driver can recognize the work-protection vehicle in advance and carry out appropriate evasive maneuvers.

Key words : Mobile work zone, Driver's behavior, Driving Simulator, Safety Index

I. 서 론

1. 연구배경 및 목적

한국도로공사는 고속도로 공사장 교통관리 기준(2013)에서 도로 공사유형을 이동공사와 고정공사로 분류하고 있다. 이동공사는 일정한 속도로 이동하면서 작업구간의 교통을 제한하는 공사이며, 그 외 장기, 중기, 단기, 단시간 공사는 고정공사로 정의하고 있다. 고정공사의 교통관리는 주의구간, 변화구간, 작업구간, 작업활동구역, 종결구간으로 구분하여 구간별로 교통안전표지 및 다양한 안전시설물들을 설치하여 운영하고 있다. 반면, 짧은 시간동안 수행되는 이동공사는 원활한 공사 진행, 교통지체 방지 및 작업자 안전을 위하여 관련 시설들이 신속하게 설치되고 회수되는 것이 중요하다. 따라서 이동공사 시 교통안전표지, 경고등, 완충시설 등을 작업보호자동차에 장착하여 이동성이 용이하도록 하고 있다.

최근 3년(2012년~2014년)동안 발생한 고속도로 공사장 교통사고 분석결과, 공사작업구간에서 발생한 총 433건의 사고 중 94건이 이동공사 작업인 갓길·중앙분리대 작업과 청소 중에 발생하였으며, 나머지 339건이 고정공사구간에서 발생한 것으로 나타났다. 이동공사 시 발생한 교통사고(94건) 중 후미추돌 사고의 비율은 약 45%(42건)로 고정공사 시 발생한 교통사고(339건)의 후미추돌 사고 비율인 약 32%(108건)보다 높게 나타났다. 또한 부상자가 발생한 사고등급 C이상인 사고가 이동공사 교통사고(94건)에서는 약 48%(45건)로 나타났으며, 고정공사 교통사고(339건)에서는 약 32%(108건)로 나타났다. 즉 이동공사가 고정공사보다 보다 심각한 교통사고가 발생할 개연성이 높은 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 이러한 문제가 발생하는 원인에 대하여 고속도로 이동공사구간에서의 운전자 주행특성분석을 통해 살펴보고, 이동공사구간의 안전성 증진을 위한 방안을 도출하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 고속도로 공사장 교통사고특성 연구, 주행 시뮬레이션 활용관련, 교통안전성평가지표 관련연구를 고찰하였다. 3장에서는 이동공사 주행안전성평가 방안을 제시하였으며, 4장에서는 분석시나리오를 설계하고 분석자료를 수집하였다. 5장에서는 주행특성 및 안전성 분석결과를 도출하였으며, 마지막 장에서는 결론 및 향후 연구과제를 정리하였다.

II. 문헌고찰 및 시사점

1. 기존문헌고찰

본 연구에서는 고속도로 공사구간 교통사고특성에 대한 연구결과와 시뮬레이션을 활용한 연구방법 그리고 교통안전 평가지표 연구에 대한 연구문헌을 고찰하였다.

Park et al.(2008)과 Jang et al.(2013)는 2003년부터 2005년까지 3년 동안 고속도로 공사구간에서 발생한 교통사고빈도분석을 수행하였다. 주요 교통사고 원인은 운전자의 주시태만으로 나타났으며, 이로 인하여 교통

사고 유형은 추돌사고가 전체사고의 32%로 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. Qi et al.(2013), Hong et al.(2010)는 고속도로 공사구간에서 교통사고 심각도에 영향을 주는 요인을 도출하기 위하여 순서형-프로빗 모형을 활용하였다. 특히 Qi et al.(2013)은 후미추돌 사고 심각도에 대한 연구를 진행하였다. 그 분석 결과 음주, 야간작업, 미끄러운 도로 상태, 트럭 변수가 사고의 심각도를 증가시키는 것으로 분석하였다. Hong et al.(2010)는 도로의 노면상태, 사고지점의 선형, 가해차량의 공사차량 여부에 따라 사고심각도가 증가하는 것으로 제시하였다.

최근 주행 시뮬레이션 기술의 발달과 더불어 이를 활용한 다양한 연구가 진행되고 있다. Shakouri et al.(2014)는 주행 시뮬레이션을 활용하여 공사구간 합류유형에 따른 이동성(주행속도, 통행시간)과 안전성(차로변경시점, 제동력)을 비교·분석하였으며, Calvi et al.(2012)는 주행 시뮬레이션을 활용하여 감속차선분류부에서 운전행태에 영향을 미치는 요인에 대한 분석을 수행하였다. 특히, Park(2013)은 일반 국도 3개 노선(각각 연장 19.4km, 14.4km, 12.8km)을 가상도로로 구현하여 기하구조에 따른 운전자의 주행행태 차이에 대한 연구를 수행하기도 하였다. 이처럼 주행 시뮬레이션은 일반적인 운전자의 주행행태에 대한 연구도 사용되었지만, 도로설계시 안전성 검토, 안전시설물 개선사업의 효과평가, 새로운 교통시설물에 대한 운전자 반응분석에도 활용되고 있다(Hong et al., 2012; Jang and Oh, 2014; Choi, 2015; Park and Park, 2016). 특히 최근에는 주행 시뮬레이션과 뇌파측정장비, 아이트래커(Eye-Tracker)를 같이 활용하여 연구에 사용되기도 하였다(Kim, 2012; Jang et al., 2012). 또한 Hwang et al.(2016)는 주행 시뮬레이션을 통해 수집된 운전자주행특성 자료를 교통시뮬레이션의 입력자료로 활용하는 연구방법론을 제시하였는데, 주행 시뮬레이션의 단점과 교통시뮬레이션의 단점을 극복할 수 있다고 주장하였다.

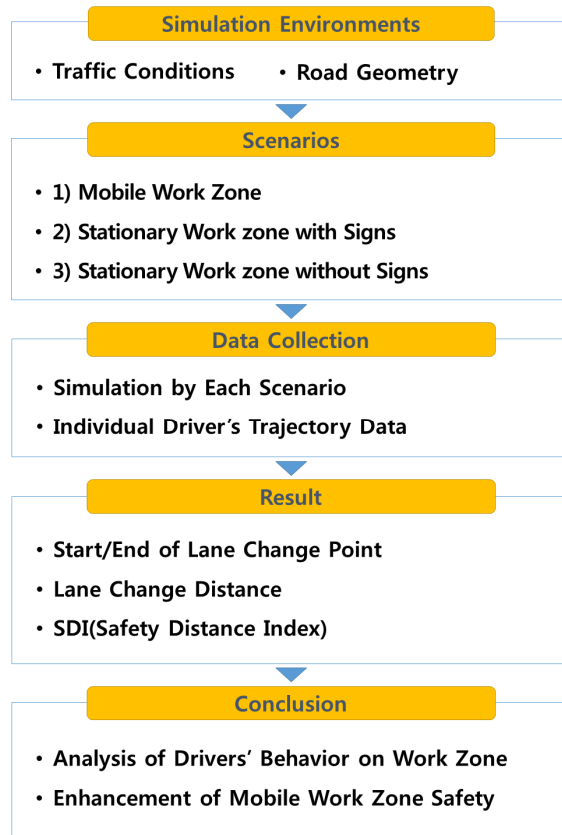
교통 안전평가 지표와 관련하여 과거에는 교통사고의 관계를 기하구조, 교통조건, 기상상태에 대한 모형을 개발함으로써 개량화하고 평가하고자 하였다(Ceder and Livneh, 1982; Kalokota and Seneviratne, 1994; Andrey and Olley, 1990). 이러한 통계적 방법을 활용한 연구 결과의 대부분은 설명력이 낮게 나타나고 개별 사고마다 복합적인 요인에 의해 발생되고 있음에도 불구하고, 몇 개의 요인으로 묶어 설명하는 한계를 내포하고 있다. 루프검지기를 이용한 교통안전평가 지표를 개발하는 연구도 진행되었다(Pande and Abdel-Aty, 2006; Oh et al., 2006). 최근에는 차량의 주행궤적자료를 수집할 수 있는 기술이 가능함에 따라 개별차량 주행궤적 기반의 교통상황에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Oh et al.(2006, 2009)은 교통상층 분석기법을 응용하여 차량추종 및 차로변경 이벤트 상황에서 불안정한 교통류 상황을 검지하는 시스템을 제안하였다. Kim(2011)과 Oh and Kim(2010)은 차량주행궤적을 이용하여 후미추돌 확률을 산출하고 안전도를 평가하는 모형을 수립하였으며, Chatterjee and Davis(2016), Przybyla et al.(2015)은 차량주행궤적자료를 교통류 이론에 적용하여 후미추돌 상황을 분석하고 주행위험도를 추정하였다.

2. 연구의 차별성

기존 고속도로 공사구간 관련 연구는 주로 교통사고 유형 및 원인과 운영효율성 측면에서 합류부 특성을 분석하는 연구로 국한되어 있었다. 또한 주행 시뮬레이션을 활용한 연구는 운전자의 주행특성을 파악하는데 많이 이용되고 있으나 이동공사구간에서의 운전자 주행특성에 관한 연구는 찾아볼 수 없었다. 본 연구에서는 고속도로 이동 공사구간에서 주행 시뮬레이션을 활용하여 개별운전자의 주행특성을 분석하였으며, 이를 활용하여 이동작업차량의 안전성향상을 위한 기반연구를 수행하였다는 점에서 기존 연구와 차별화될 수 있다.

본 연구에서는 주행 시뮬레이션을 활용하여 고속도로 주행환경을 구현하고, 고속도로 이동공사와 고정공사 시 설치되는 안전시설물을 고려하여 시나리오를 구성하였다. 이때 이동공사와 고정공사의 비교군으로 고

정공사구간에 안전시설물이 설치되어 있지 않은 시나리오를 추가하였다. 주행 시뮬레이션 실험에서 수집된 개별운전자의 속도, 가감속, 주행궤적 데이터를 활용하여 이동공사와 고정공사에서의 운전자 주행특성분석을 수행한다. 마지막으로 분석결과를 활용하여 이동공사 시 사고를 예방하고 사고심각도를 감소시킬 수 있는 방안을 검토 및 제시하였다. 본 연구의 흐름도는 <Fig. 1>에 제시하였다.



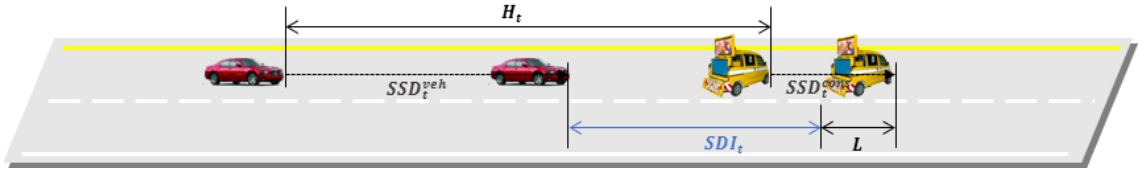
<Fig. 1> Study Process

Ⅲ. 연구방법론

본 연구에서는 운전자 주행특성 분석과 안전성평가를 위하여 ‘차로변경 시·종점’, ‘차로변경 수행거리’, ‘SDI(Safety Distance Index)’를 평가지표로 설정하였다. 첫째, ‘차로변경 시·종점’은 운전자가 전방의 공사구간을 인지하고 차로변경을 시작한 지점과 완료한 지점을 나타내는 지표이며, 공사구간의 시작지점으로부터 멀리 떨어져 있을수록 안전한 차로변경행태를 수행한 것으로 본 연구에서는 정의하였다. 둘째, ‘차로변경 수행거리’는 차로변경시점과 차로변경종점 간의 거리로 정의하였으며, 운전자가 차로변경을 수행하는 동안 위험에 노출되는 정도를 의미한다. 즉, 차로변경 수행거리가 길수록 위험에 노출된 차로변경행태를 나타낸다. 셋째, ‘SDI(Safety Distance Index)’는 주행차량과 이동작업차량의 최소정지거리를 활용한 것으로 전방차량과 후미추돌 안전성에 대하여 계량화한 지표이다. SDI가 ‘0’보다 작거나 같은 경우는 위험한 주행행태로 정의하였으며, ‘0’보다 큰 경우는 안전한 주행행태로 정의하였다.

SDI의 개념을 도식화하여 <Fig 2>에 제시하였으며 SDI 산출과정은 다음과 같다. 시간 t 에서 주행차량과 이동작업차량이 H 만큼 떨어져있는 시점에서 주행차량의 최소정지거리와 이동작업차량의 최소정지거리에서 이동작업차량 길이의 차이로 산출된다(Equation(1)). 이동작업차량의 길이는 5톤 노면청소차의 규격을 반영하여 6.6m로 가정하였다. 산출된 SDI의 값이 '0'보다 같거나 작은 경우는 후방 차량이 안전하게 정지할 수 있는 거리가 미확보된 상황으로 교통사고 발생 개연성이 높다. 즉, ' $SDI \leq 0$ '인 경우에 수행한 차로변경은 위험한 차로변경 이벤트로 정의하였다. 반면, SDI의 값이 '0'보다 큰 경우는 후방 차량이 안전하게 정지할 수 있는 거리가 확보된 상황으로 안전한 차로변경을 수행한 것으로 정의하였다(Equation(2)). 고정공사의 SDI는 고정공사 구간 테이프 시점을 기준으로 주행차량과의 SSD를 이용하여 SDI를 산출하였다.

'도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013)'에서 노면마찰계수와 인지반응시간은 충분히 안전한 값을 취하도록 제시하고 있다. 이를 반영하여 노면이 습윤한 상태의 최소정지거리를 산출(SSD, Stopping Sight Distance)하였으며, 이때 이동작업차량과 주행차량의 최소정지거리 산출식은 Equation(3)과 같다.



<Fig. 2> Conceptual illustration of safety distance index

$$SDI = H_t + SSD_t^{cons} - SSD_t^{veh} - L \quad (1)$$

$$\text{주행안전성 } (X_t) = \begin{cases} \text{Safe} & , SDI > 0 \\ \text{Unsafe} & , SDI \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

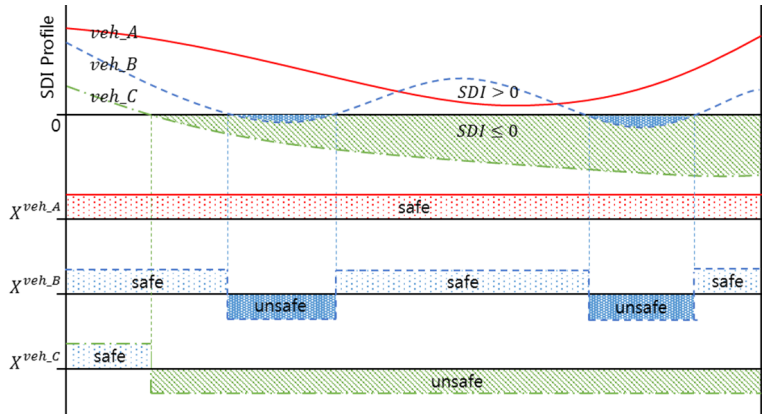
여기서, H_t : 시간 t 에서 주행차량과 이동작업차량과의 거리
 L : 이동작업차량의 길이(6.6m)
 SSD_t^{cons} : 시간 t 에서 이동작업차량의 최소정지거리
 SSD_t^{veh} : 시간 t 에서 주행차량의 최소정지거리
 X_t : 시간 t 에서 주행안전성판단

$$SSD = \frac{V^2}{254 \times (f + s)} + t_r \times V \times 0.278 \quad (3)$$

여기서, V : 차량의 속도(kph)
 f : 노면마찰계수(젖은노면 : 0.29)
 g : 중단경사(평면 : 0)
 t_r : 인지반응시간(2.5sec)

본 연구에서는 주행안전성평가 시 분석대상의 시공간적 범위를 운전자가 차로변경을 시작한 시점부터 차로변경을 완료한 종점까지로 정의하였다. 차로변경을 수행하는 동안의 SDI 프로파일을 산출하여 주행안전성을 평가하였다. 또한 차로변경을 수행하는 동안 '0'이하의 SDI 값이 관측되면 위험한 운전행태로 판단하였으며, '0'이하의 SDI 값이 관측되지 않으면 안전한 운전행태로 판단하였다.

SDI를 이용한 주행안전성평가 예시를 <Fig. 3>에 제시하였다. 상단 그래프는 개별차량의 SDI 프로파일이며, 하단 3개의 그래프는 SDI 변화에 따른 각각의 차량에 대한 주행안전성을 나타낸 것이다. 차량 A의 경우, '0'이하인 SDI 값이 관측되지 않았기 때문에 안전한 주행행태로 판단하였다. 차량 B와 C의 경우, '0'이하의 SDI 값이 관측되었기 때문에 위험한 주행행태로 판단하였다. 차량 B의 경우, 'safe'로 판단된 영역이 'unsafe'로 판단된 영역보다 상대적으로 크지만 위험한 운전행태로 판단하였다. 왜냐하면 차로변경을 수행하는 동안 'unsafe'가 관측된 것은 위험한 상황에 노출된 것으로 사고발생개연성이 존재하기 때문이다.



<Fig. 3> Example of safety distance index profile

IV. 자료수집 및 시나리오 실험설계

1. 주행 시뮬레이션

주행 시뮬레이션은 가상의 도로교통환경을 구현하여 개별 운전자의 반응행태에 따른 차량의 거동변화에 대한 실험 및 자료를 수집할 수 있는 프로그램이다. 본 연구에서는 <Fig 4>와 같은 장비를 활용하였다. 56인치 LED TV를 3채널로 구성하였으며, 운전석은 실제 차량의 부품을 사용하여 운전환경이 현실과 유사하도록 구현하였다.



(a) Driving Simulator



(b) Example of Mobile Maintenance Work Zone Scenario

<Fig. 4> Snapshot of driving simulator and scenario

주행 시뮬레이션 상의 고속도로 공사구간 네트워크는 연장길이 5km, 차로폭 3.6m인 직선구간으로 측방여유폭이 30cm인 중앙분리대와 갓길이 각각 설치되어 있다. ‘고속도로 공사장 교통관리기준(Korea Expressway Corporation, 2013)’에 의거하여 이동공사와 고정공사의 교통안전시설물을 구현하였다.

고속도로 공사구간에서 운전자의 주행행태분석을 위하여 주행 시뮬레이션을 활용하여 실험을 진행하였다. 주행 시뮬레이션을 활용하면 다양한 기하구조와 교통안전시설물 구현 및 효과평가가 가능하며, 개별 운전자의 주행속도, 가속도, 브레이크 강도, 주행거리 및 궤적 등 다양한 자료수집이 가능하다. 본 연구에서는 이를 활용하여 운전자의 개별주행특성 분석을 수행하였다. 실험은 2016년 7월 18일~22일, 5일 동안 진행하였으며 20대~60대 운전면허 소지자 40명을 대상으로 하였다. 이중 50대 여성 운전자 2명이 주행 시뮬레이션 실험 도중 어지러움을 호소하여 분석 결과에서 제외하였다. 피실험자 구성은 <Table 1>에 제시하였다.

<Table 1> Shadow and protective vehicles

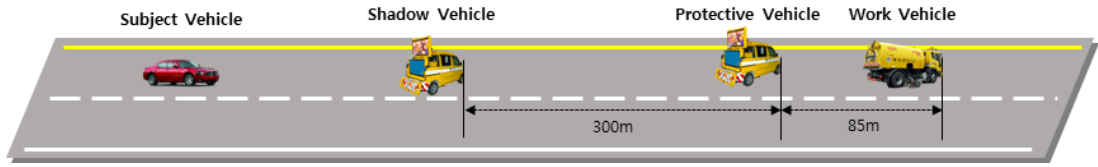
Age	sex		
	male	female	total
20's	9	2	11
30's	6	4	10
40's	3	4	7
50's	4	4	8
60's	1	1	2
total	23	15	38

2. 분석 시나리오

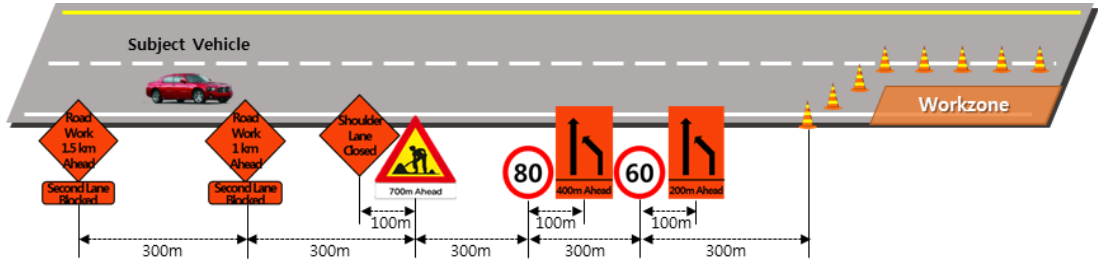
본 연구에서는 이동공사 주행특성이 기존의 고정공사구간에서 차로를 차단하는 경우와 어떻게 다른지 분석을 수행하기 위한 주행 시뮬레이션 실험 시나리오를 <Fig. 5>와 같이 총 3가지로 구성하였다. 고속도로 공사장의 모든 교통안전시설물은 ‘고속도로 공사장 교통관리기준(Korea Expressway Corporation, 2013)’에 의거하여 구현하였다.

- 시나리오 1 : 이동공사
- 시나리오 2 : 교통안전표지판 설치 고정공사
- 시나리오 3 : 교통안전표지판 미설치 고정공사

시나리오 1은 이동공사구간으로 작업보호차량은 보통 점멸 조명을 달고 있다. 본 실험에서도 <Fig 4-(b)>와 같이 점멸효과를 시뮬레이션으로 구현하여 후방에 접근하는 운전자에게 이동공사차량의 존재를 알려주었다. 2차로 이동공사 차량은 총 3대로 구성하였으며 전방 작업차량이의 후방에 작업보호 차량 2대를 300m와 85m 후방에 각각 배치하였다. 작업차량들의 이동속도는 모두 20kph로 설정하였다. 시나리오 2는 고속도로 공사장 교통관리기준(Korea Expressway Corporation, 2013)에서 제시하는 바와 같이 공사구간 안내표지, 속도제한표지, 차로변경표지를 설치하였다. 시나리오 3은 교통안전표지판을 설치하지 않았으며, 주행하는 차량은 육안으로 공사구간을 확인하도록 실험조건을 설정하였다.



(a) Scenario 1 : Shadow and protective vehicles installation in mobile work zone



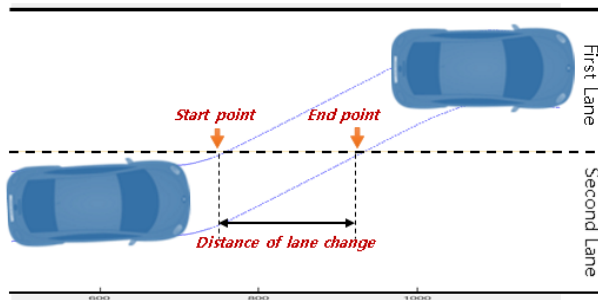
(b) Scenario 2 : Traffic sign installation in work zone



(c) Scenario 3 : No traffic sign installation in work zone

<Fig. 5> Illustration of Scenarios for driving simulation

본 연구에서는 운전자의 반응행태에 영향을 미치는 요인을 공사구간 유형으로 한정하기 위하여 Free Flow 교통류 상태에서 주행하도록 교통환경을 통제 한 후, 차로변경 시·종점 및 차로변경 수행거리에 대한 자료를 수집하였다. 실험에 사용된 주행 차량은 고속도로 통행의 대부분을 차지하는 폭 1.83m, 길이 4.80m인 소형차량의 제원을 적용하였다. 또한 주행특성의 중요한 요소인 개별차량의 차로변경 시·종점은 실제로 운전자가 차로를 변경해야한다고 판단한 시점과 차로변경을 완료했다고 판단한 시점을 차로변경 시·종점으로 정의할 수 있다. 그러나 실제로 운전자가 차로변경을 결정하는 순간을 확인하기에는 한계가 있으므로, 본 연구에서는 <Fig. 6>과 같이 차로변경 시점을 주행차량의 좌측 앞바퀴가 차로를 변경하고자 하는 방향의 차선을 통과하는 시점으로 정의하였다. 한편 차로변경 종점은 주행차량의 우측 앞바퀴가 차로를 변경하고자 하는 방향의 차선을 통과하는 시점으로 정의하였으며, 차로변경 시점과 종점의 거리를 차로변경 수행거리로 정의하였다.

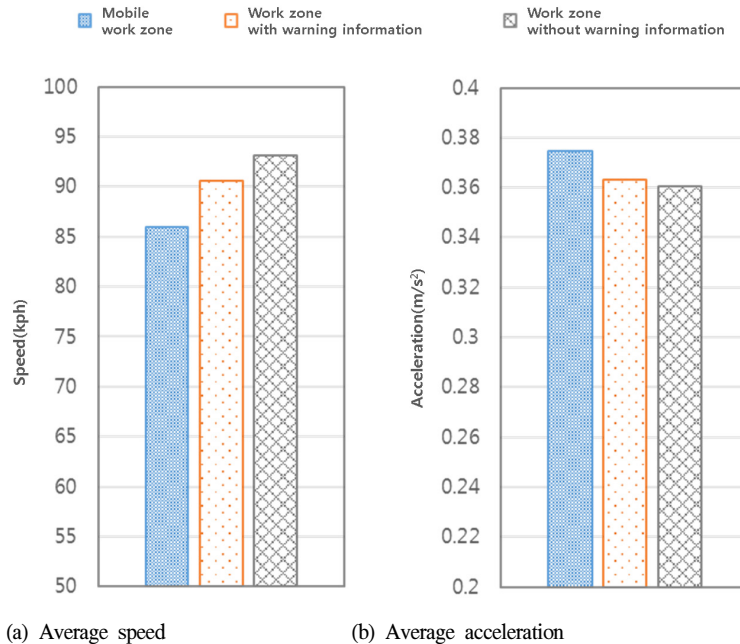


<Fig. 6> Illustration of lane changing start and end point

V. 분석결과

1. 기본주행특성

주행 시뮬레이션을 통해 수집된 38명의 운전자의 주행특성을 속도와 가감속도의 변화로 비교하였으며, 그 결과를 <Fig. 7>에 제시하였다. 평균 속도는 이동공사구간에서 가장 낮았으며 안전표지가 설치되지 않은 고정공사구간에서 가장 높게 나타났다. 평균 가감속도는 이동공사구간에서 가장 높았으며 안전표지가 설치되지 않는 고정공사구간에서 가장 낮게 나타났다. 평균 속도와 평균 가감속도 분석 결과, 이동공사의 경우, 가속 및 감속 페달을 빈번하게 또는 급격하게 조작한 것으로 판단된다. 즉, 운전자가 이동공사차량을 인지하고 급격하게 감속 페달을 조작한 것으로 해석된다. 반면 안전표지가 미설치된 고정공사의 경우, 평균 속도는 높고 평균 가감속도는 낮는데, 이는 페달의 조작이 상대적으로 적었기 때문으로 추정된다. 상대적으로 안전표지가 설치된 고정공사의 경우는 미설치된 경우보다 주행속도는 낮고 평균 가감속도는 높는데, 이는 안전시설물의 정보를 운전자가 인지하고 반응했기 때문인 것으로 추정된다.



<Fig. 7> Analysis of driver's average speed and acceleration

2. 주행 안전성평가 결과

1) 차로변경 시·종점 위치 및 차로변경 수행거리

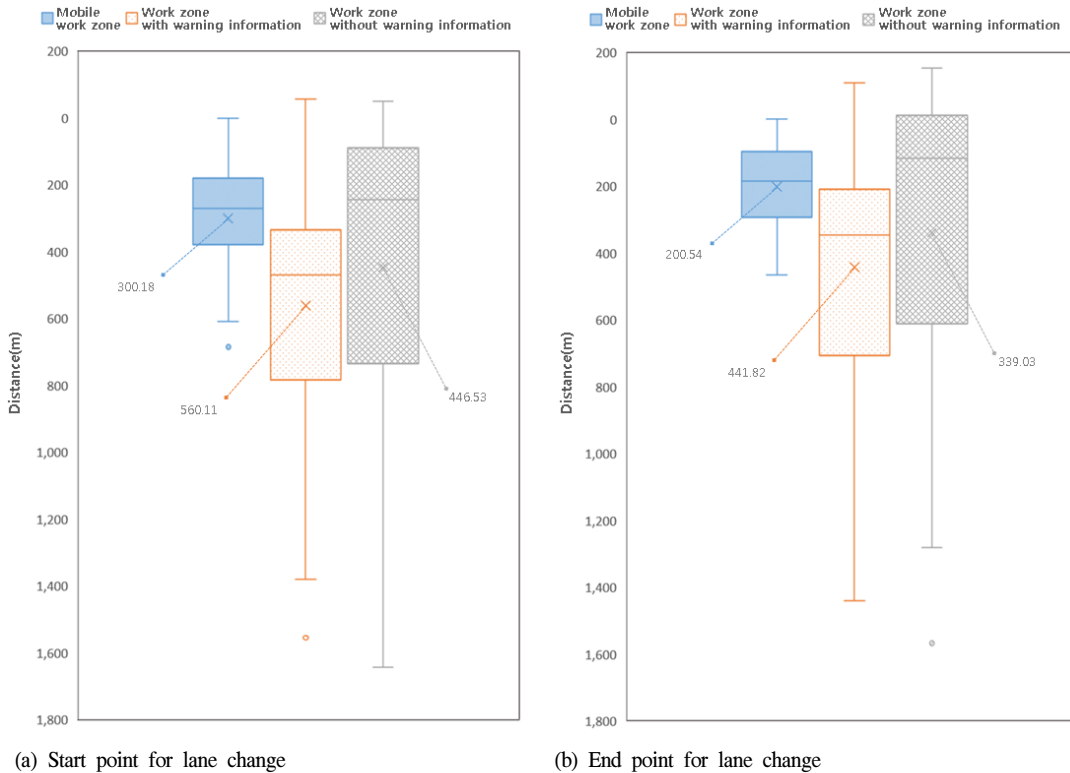
차로변경 시·종점 위치와 차로변경 시 수행거리에 대한 주행안전성 평가결과를 제시하였다.

첫째, 차로 변경 시·종점 위치에 대한 주행안전성 평가 결과이다. 개별 운전자의 차로변경 시점과 종점의 분석 결과를 <Fig. 8>에 box-plot으로 제시하였다. <Fig 8>의 Y축은 주행차량과 전방의 위험상황과의 거리가

다. 시나리오 1의 이동공사의 경우, 위험상황은 이동공사 작업차량 중 가장 후미에 주행 중인 작업보호차량이며, 시나리오 2, 3의 고정공사의 경우, 위험상황은 공사구간 테이퍼 시점이다. '0'과 가까울수록 차로변경 수행 시점과 종점이 늦은 것으로 위험상황(작업보호차량 또는 공사장테이퍼시점)과 가까운 것을 의미한다. 즉, 차로변경 시점과 종점이 위험상황과 가까울수록 위험한 차로변경을 수행한 것이다.

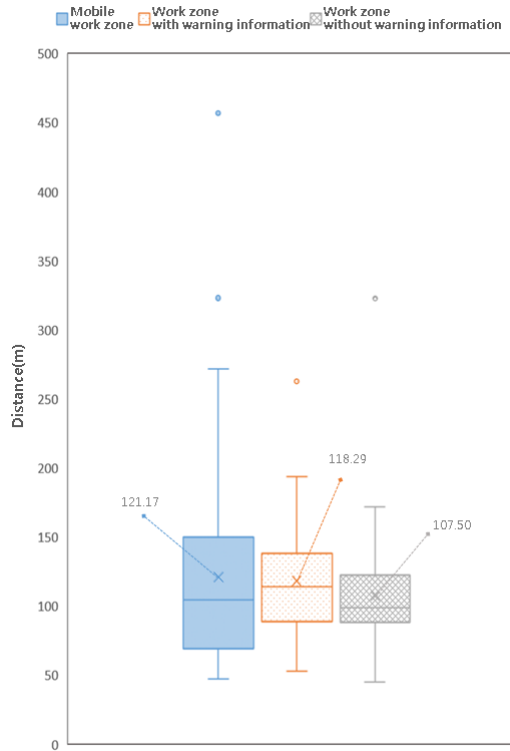
차로변경 시점 평균은 이동공사(300.18m), 안전시설물 미설치 고정공사(446.53m), 안전시설물 설치 고정공사(560.11m) 순으로 나타났으며, 차로변경 종점 평균도 이동공사(200.54m), 안전시설물 미설치 고정공사(339.03m), 안전시설물 설치 고정공사(441.82m) 순으로 나타났다. 안전시설물 설치 고정공사와 미설치 고정공사의 비교 결과, 안전시설물이 설치된 고정공사가 더 안전한 것으로 나타났다. 따라서 현 운영기준에 대한 효과가 있는 것으로 판단된다. 또한 안전시설물이 설치되어 있지 않은 고정공사의 경우, 차로변경 시·종점의 분포가 넓게 나타났는데, 운전자가 공사구간을 인지하는 시점이 피실험자의 인지능력에 따라 크게 차이가 났기 때문이다.

이동공사의 경우는 안전시설물이 미설치된 고정공사보다 더 위험한 것으로 나타났다. 이동공사의 경우, 작업보호차량이 이동공사에 대한 정보제공을 하고 있으나, 운전자는 안전시설물이 미설치된 고정공사보다 작업보호차량을 인지하는 시점이 더 늦다. 따라서 안전시설물이 미설치된 공사구간보다 이동공사가 더 위험한 것으로 해석된다. 운전자가 이동공사구간에서 안전한 차로변경을 수행하기 위해서는 고정공사와 같이 공사구간에 대한 정보를 현재 작업보호차량이 제공하는 정보보다 사전에 제공받아야 한다.



〈Fig. 8〉 Result of starting point and end point for lane change from work zone or work vehicle

둘째, 차로변경 수행거리 분석결과를 <Fig. 9>에 box-plot을 활용하여 제시하였다. <Fig 9>의 Y축은 운전자가 전방의 공사구간을 인지하고 차로변경을 수행하는 동안 이동한 거리이다. 차로변경 수행거리는 차로를 변경하는 동안 위험상황에 노출된 정도를 의미한다. 즉, 차로변경 수행거리가 길수록 안전성이 낮은 것이다. 차로변경 수행거리 분석 결과, 이동공사(121.17m), 안전시설물 설치 고정공사(118.29), 안전시설물 미설치 고정공사(107.50m) 순으로 나타났다. 차로변경 수행거리가 가장 긴 이동공사가 가장 주행 안전성이 낮았다. 특히, 고정공사의 차로변경 수행거리 분포가 조밀하게 나타났다. 고정공사의 경우, 운전자는 전방 공사장으로 인해 차로가 차단되었다는 것을 인지하고 있기 때문에 차로변경을 신속하게 수행하였다. 이동공사의 경우, 고정공사와 달리 작업보호차량이 전방에서 저속으로 이동하고 있기 때문에 운전자의 심리상태가 다양했을 것으로 판단된다. 전방의 작업보호차량을 늦게 인지한 운전자중 심리적으로 부담을 느낀 운전자는 차로변경을 수행하는데 어려움을 겪었을 것이며, 그렇지 않은 운전자는 차로변경을 수행하는데 문제가 없었을 것이다. 그 결과, 이동공사 시 차로변경 수행거리의 분포가 고정공사보다 넓게 타나난 것으로 판단된다.



<Fig. 9> Result of distance during lane change

본 연구에서 제시한 차로변경 시·종점 및 차로변경 수행거리 분석결과에 통계적 타당성을 평가하였다. 먼저 차로변경 시·종점 및 차로변경 수행거리에 대한 분산분석(ANOVA) 결과를 <Table 2>에 제시하였다. 유의수준 0.05이내에서 차로변경 시점과 차로변경 종점이 통계적으로 하나 이상 차이가 존재하는 것으로 나타났다. 반면 차로변경 수행거리의 유의확률은 0.13으로 유의수준 0.05이내에서는 통계적으로 차이가 존재하지 않은 것으로 나타났다.

〈Table 2〉 ANOVA of lane change start point, end point and distance

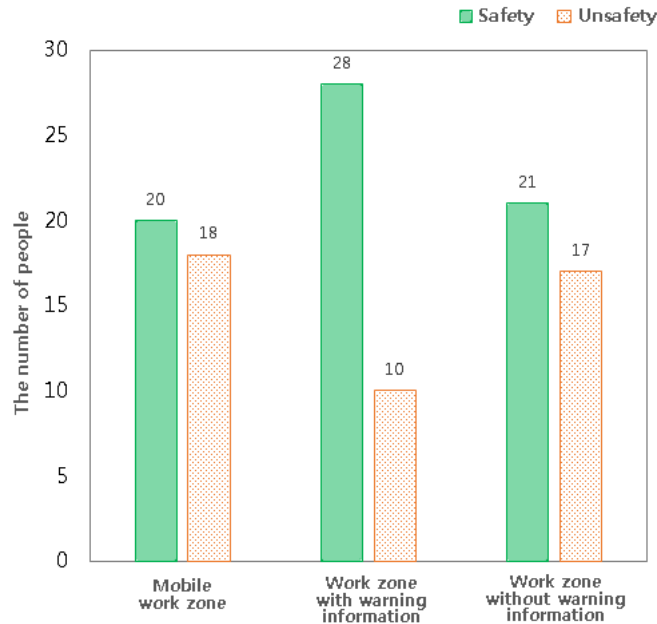
Unit : m

ANOVA		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Lane change start point	Between Groups	1127236.71	2.00	563618.36	4.52	0.01*
	Within Groups	13601901.86	109.00	124788.09	-	-
	Total	14729138.57	111.00	-	-	-
Lane change end point	Between Groups	1045322.28	2.00	522661.14	4.99	0.01*
	Within Groups	11408274.89	109.00	104663.07	-	-
	Total	12453597.16	111.00	-	-	-
Distance during lane change	Between Groups	4676.33	2.00	2338.17	2.10	0.13
	Within Groups	117076.98	105.00	1115.02	-	-
	Total	121753.32	107.00	-	-	-

* $p < 0.05$

2) SDI(Safety Distance Index)

차량의 SSD를 활용한 SDI 안전성 평가지표 분석결과는 <Fig. 10>에 제시하였다. 고정공사의 경우 총 38명의 운전자중 약 26%인 10명이 위험한 차로변경을 하는 것으로 나타났으나, 이동공사의 경우는 총 38명의 운전자중 절반 가까이 되는 18명(약 47%)이 위험한 차로변경행태를 하는 것으로 나타났다. 이와 유사하게 안전표지가 미설치된 시나리오에서도 17명(약 45%)이 위험한 차로변경을 하는 것으로 나타났다.



〈Fig. 10〉 Result of safety distance index(SDI)

본 연구에서는 이동공사와 안전표지 설치 고정공사의 안전성평가 결과가 통계적으로 차이가 있는지 판단하는 것이 중요하기 때문에 두 시나리오와 안전성평가 결과에 대하여 통계적 검정 분석을 수행하였다. 두 변수 모두 범주형 변수이기 때문에 교차분석방법을 사용하였으며, 그 결과를 <Table 3>와 <Table 4>에 제시하였다. 여기서 귀무가설(H0)은 ‘각 시나리오의 안전성 평가결과는 같다.’이며, 대립가설(H1)은 ‘각 시나리오의 안전성 평가결과는 차이가 있다.’이다. <Table 4>에 제시한 ‘Fisher의 검정’결과 정확한 유의확률(단측검정) 값이 0.48로 유의수준 0.05이내에서 귀무가설을 기각하여 대립가설을 채택하게 된다. 즉, 이동공사의 안전성평가 결과와 안전표지 설치 고정공사의 안전성평가 결과는 차이가 존재한다.

<Table 3> Cross analysis of work zone safety assessment

Unit : the number of people(%)

구분		assessment		Total
		Safety	Unsafty	
Scenario	Mobile work zone	20(26.3%)	18(23.7%)	38(50%)
	Work zone with warning information	28(36.8%)	10(13.2%)	38(50%)
Total		58(73.1%)	58(36.9%)	76(100%)

<Table 4> Chi-square tests of work zone safety assessment

division	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)	Exact Sig. (2-sided)	Exact Sig. (1-sided)
Pearson Chi-Squre	3.619a	1	.057	-	-
Continuity Correction	2.771	1	.096	-	-
Likelihood Ratio	3.657	1	.056	-	-
Fisher’s Exact Test	-	-	-	.095	.048*
Linear-by-Linear	3.571	1	.059	-	-
N of Vaild Cases	76	-	-	-	-

* p<0.05

3) 소결

이동공사와 안전시설물이 설치된 고정공사와 안전시설물이 미설치된 고정공사의 안전성 평가 결과, 안전시설물이 설치된 고정공사, 안전시설물이 미설치된 고정공사, 이동공사 순으로 나타났다. 따라서 안전시설물이 설치된 고정공사의 경우, 미설치시보다 안전하기 때문에 현재의 운영기준의 효과가 있는 것으로 판단할 수 있다. 이동공사의 경우, 안전시설물이 미설치된 고정공사보다 더 위험한 것으로 나타났다. 운전자가 고정공사에서는 공사구간 상류부에 설치되어 있는 안전시설물로부터 공사구간에 대한 정보를 인지하고 반응했기 때문이다. 반면, 이동공사의 경우는 작업구간의 상류부에서 공사구간에 대한 정보를 인지하고 적절한 반응을 유도할 수 있는 사전정보제공이 미흡했기 때문이다. 특히 안전시설물이 미설치된 공사구간보다 이동공사가 위험한 것으로 나타났다. 이는 운전자가 고정공사보다 이동공사에 대한 경각심이 적었기 때문으로 판단된다. 운전자는 주행차로 전방의 차량이 정지 또는 저속으로 주행하고 있다고 인지하지 못하는 경향이 있다는 기존 연구의 결과와 일치한다(Green, 2009; Fajen and Devaney, 2006). 실제로 이와 유사하게 정체가 발

생하는 끝단부에서 운전자는 급서행 또는 급정지하는 전방의 상황을 인지하지 못하고 후미추돌사고를 유발하기도 하며, 국외에서도 이를 중요한 교통관리대상으로 구분하고 있다(Shakouri et al., 2014). 따라서 작업구간의 상류부에서 저속으로 이동중인 작업차량을 인지하고 적절한 반응을 유도할 수 있는 사전정보제공이 필요하다.

VI. 결론 및 향후연구과제

고속도로 이동공사구간에서 작업차량과 직접 충돌하는 심각한 사고가 빈번히 발생한다. 이를 예방하기 위하여 작업보호차량을 작업차량 후방에 배치하고 있으나 보다 능동적인 교통안전시설이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 주행 시뮬레이션을 활용한 이동공사구간에서의 운전자의 주행행태 자료를 수집하여 능동적인 사고예방을 위한 안전성 증진방안을 제시하고자 하였다.

총 38명의 다양한 성별, 연령별 운전자를 대상으로 주행 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 이동공사구간에서의 주행행태분석을 위하여 비교대상으로 고정공사구간을 시나리오로 설정하였다. 운전자 주행행태특성 및 주행안전성을 평가하기 위한 지표로 주행특성지표를 ‘차로변경 시·종점’, ‘차로변경 수행거리’, ‘SDI(Safety Distance Index)’로 정의하였다.

운전자 주행특성 분석결과, 이동공사구간에서 운전자는 작업차량의 후방 약 300m 이전에서 차로변경을 시작하였다. 그러나 고정공사구간에서는 공사구간 테이퍼시점으로부터 상류부로부터 약 560m 이전에서 차로변경을 시작하였다. 즉, 이동공사의 경우 차로변경 시점이 늦은 것으로 나타났다. 이는 운전자가 전방의 이동 작업차량을 사전에 인지하지 못하거나 이동작업차량의 속도를 늦게 인지하고 반응한 것으로 판단할 수 있다. 주행안전성 평가지표 분석결과, 이동공사구간에서 38명의 운전자 중 18명의 운전자가 위험한 주행행태를 보였으며, 안전표지가 설치된 고정공사구간에서는 38명의 운전자 중 10명의 운전자가 위험한 주행을 하였다. 즉, 고정공사보다 이동공사에서 운전자는 위험한 주행행태를 나타냈다. 주행 안전성 평가에 대한 통계적 분석결과, 차로변경 시·종점이 시나리오 간 통계적으로 차이가 존재하였으며, SDI 안전성 평가지표 분석결과, 이동공사에서 운전자는 안전시설물이 설치된 고정공사보다 이동공사에서 위험하게 주행하는 것으로 나타났다. 따라서 이동공사가 가장 위험하다는 것은 통계적으로도 유의미한 결과이다.

주행특성 분석결과를 바탕으로 이동공사구간에서 운전자의 주행안전성을 제고하기 위해서는 다음과 같은 조건을 고려해야한다. 먼저, 전방의 이동공사가 진행 중인 상황을 운전자가 사전에 인지할 수 있도록 해야한다. 운전자는 전방의 작업차량의 존재를 인지한다면 차로변경 시점을 앞당겨 보다 안전하게 차로변경을 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어, 지향성 스피커는 방향성을 가지는 소리 발생 장치로 작업보호차량 후방에 설치하여 주행하고 있는 특정 대상을 향해 경고정보가 가능하다. 따라서, 이동작업보호차량에 지향성 스피커 적용 시, 위험주행행태로 판단되는 특정 차량에게 경고정보를 제공하여 운전자로 하여금 안전운전을 유도할 수 있다. 둘째, 작업보호차량에게 접근하는 차량의 주행속도를 감소시켜야한다. 본 연구에서 제시한 안전성 평가지표인 SDI는 차량의 주행속도와 차량 간 거리에 따라 변화한다. 즉, 차량의 주행속도가 낮을수록, 차량 간 이격거리가 길어질수록 안전한 주행행태로 나타난다. 속도정보 제공장비(Radar Speed Signs, RSS)는 상류부에서 고속으로 접근하는 차량에서 주행속도 정보를 제공하여 운전자로 하여금 감속을 유도하는 장비이다(Jafarnejad et al., 2017). 사고 심각도와 관련 있는 중요한 요소인 주행속도가 낮아지면 사고 심각도 감소효과를 기대할 수 있다. 따라서 RSS를 이동작업보호차량에 설치하여 작업차량 후방에 접근하는 차량의 주행속도를 감속하도록 유도한다면 안전성 평가지표 SDI 값을 증대시키므로 이동작업보호차량과 안전한 주행거리 확보하는데 기여할 것으로 기대된다.

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

첫째, 본 연구에서는 운전자 주행특성분석을 위하여 주행 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 시뮬레이션을 활용한 연구는 시나리오를 다양하게 구성할 수 있는 장점이 있다. 반면 분석결과에 대하여 상대적인 비교분석은 가능하나 절대적인 값으로 평가할 수 없다. 따라서 현장실험을 수행하거나 또는 현장에서 수집되는 자료를 활용하여 시뮬레이션 결과에 대한 검증(Validation)과정이 수행되어야 한다. 향후에는 이동공사차량에 영상자료 수집 장비를 활용하여 본 연구에서 제시한 분석결과에 대한 검증을 수행한다면 객관적인 주행특성 분석이 가능할 것이다.

둘째, 차로변경행태 분석을 위하여 주변차량을 배제하고 주행 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 그러나 실제 차로변경행태는 주변차량의 영향을 크게 받으며, 공사구간 서비스 수준에 따라라도 차로변경행태는 달라진다. 따라서 향후에는 주변차량의 위치와 속도, 교통량을 고려한 공사구간 차로변경행태 연구가 수행되어야 한다. 또한 본 연구에서는 개별주행차량에 대한 주행 안전성 평가를 수행하였으나, 주변차량을 고려한다면 이동공사구간 교통류 전체에 대한 안전성 평가도 가능할 것이다.

셋째, 주행안전성을 평가하기 위한 지표로 SDI를 제시하였으며, 주행차량이 차로를 변경하는 동안 '0이하'의 SDI 값이 관측될 경우 위험한 주행행태로 판단하였다. 이러한 주행안전성 평가방안은 이산(Discrete)적인 방법으로 차로를 변경하는 동안 어느 한 시점에서만 위험하다고 판단되는 경우도 차로변경행태 전체를 위험하다고 판단하는 한계가 있다. 그러나 차로를 변경하는 동안 주행차량의 SDI는 이동작업차량과의 시공간의 변화에 따라 연속(Continuous)적으로 변화하며, 특정 시점에서는 위험하지만 다른 시점에서는 안전할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 SDI의 연속적인 속성을 고려하여 지표를 고도화한다면, 주행하는 차량이 어떤 순간에, 언제동안, 얼마나 위험한지 또는 안전한지를 판단할 수 있는 지표로 활용 가능할 것이다.

REFERENCES

- Andrey J. and Olley R.(1990), "The relationship between weather and road safety: past and future research directions," *Climatological Bulletin*, vol. 24, no. 3, pp.123-127.
- Calvi A., Benedetto, A. and De Blasiis, M. R.(2012), "A driving simulator study of driver performance on deceleration lanes," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 45, pp.195-203.
- Ceder A. and Livneh M.(1982), "Relationships between road accidents and hourly traffic flow—I and II: analyses and interpretation," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 14, no. 1, pp.19-44.
- Chatterjee I. and Davis, G. A.(2016), "Analysis of Rear-End Events on Congested Freeways by Using Video-Recorded Shock Waves," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2583, pp.110-118.
- Choi S. R. N.(2015), *Development of active variable speed limit operations technology for adverse weather conditions on freeways*, Ph.D. Thesis, Hanyang University.
- Fajen B. R. and Devaney M. C.(2006), "Learning to control collisions: The role of perceptual attunement and action boundaries," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 32, no. 3, pp.300-313.
- Green M.(2009), "Perception-reaction time: Is Olson (and Sivak) all you need to know?," *Collision: the international compendium for crash research*, vol. 4, no. 2, pp.88-93.
- Hong J. Y., Kim K. T., and Lee S. B.(2010), "Developing the Accident Injury Severity on a Field of Construction Work Using Ordered Probit Model," *Journal of the KOSOS*, vol. 26, no. 2, pp.89-98.

- Hong S. M., Oh C., Jang J. Y., Kim G. H., Park J. Y. and Chang, M. S.(2012), “Designing pavement marking for Hi-pass lane based on Kansei engineering,” *International Journal of Highway Engineering*, vol. 14, no. 1, pp.73-83.
- Hwang D. H., Oh C., Park H. J. and Jung B. J.(2016), “Safety Evaluation of Traffic Merging Control Methods for Freeway Work Zone,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 34, no. 3, pp.263-277.
- Jafarnejad A., Gambatese J. and Hernandez, S. (2017). “Influence of Truck-Mounted Radar Speed Signs in Controlling Vehicle Speed for Mobile Maintenance Operations: Oregon Case Study,” In *Transportation Research Board 96th Annual Meeting* (No. 17-05000).
- Jang J. H.(2006), *A Study of Traffic Accident Characteristic in Freeway Work Zone in Korea*, Master’s Thesis, Chonnam National University.
- Jang J. Y. and Oh C.(2014), “Methodology for Evaluating Effectiveness of In-vehicle Pedestrian Warning Systems Using a Driving Simulator,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 32, no. 2, pp.106-118.
- Jang J. Y. Jang M. S., Kim J. Y. and Hong S. M.(2012), “Analysis of Drivers Observation Characteristics Depending on Commercial Signs on Freeway using Eye-tracker,” *Proceeding of Korean Society of Transportation*, pp.369-374
- Kalokota K. R. and Seneviratne P. N.(1994), *Accident prediction models for two-lane rural highways* (No. MPC Rept No. 94-32), Mountain-Plains Consortium.
- Kim J. Y.(2012), *Highway design driver characteristics study by driver’s psycho-physiological workload measurement*, Ph.D. Thesis, Hanyang University.
- Kim T. J.(2011), *Development and evaluation of rear-end crash potential prediction model using vehicle trajectory*, Master’s Thesis, Hanyang University.
- Korea Expressway Corporation(2013), “Highway Work Zone Traffic Control Standard.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), Rules About the Road Structure and Facilities Standards Explanation.
- Oh C. and Kim T.(2010), “Estimation of rear-end crash potential using vehicle trajectory data,” *Accident Analysis and Prevention*, vol. 42, no. 6, pp.1888-1893.
- Oh C., Oh J. and Min J.(2009), “Real-Time Detection of Hazardous Traffic Events on Freeways: Methodology and Prototypical Implementation,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2129, pp.35-44.
- Oh C., Park S. and Ritchie S. G.(2006), “A method for identifying rear-end collision risks using inductive loop detectors,” *Accident Analysis and Prevention*, vol. 38, no. 2, pp.295-301.
- Pande A. and Abdel-Aty M.(2006), “Comprehensive analysis of the relationship between real-time traffic surveillance data and rear-end crashes on freeways,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1953, pp.31-40.
- Park J. H.(2013), *A study on difference of driving behavior on geometric structure using driving simulator*, Master’s Thesis, University of Seoul.
- Park J. J. and Park J. H.(2016), “A Study on Formulation of Expressway Work Zone Guidance System Using Virtual Driving Simulator,” *Proceeding of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, pp.426-432.

- Park M. C., Lee J. H., Park T. H. and Ha T. J.(2008), “A Study of Traffic Accident Characteristics in Freeway Construction Zones,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 7, no. 1, pp.127-136.
- Przybyla J., Taylor J., Jupe J. and Zhou X.(2015), “Estimating risk effects of driving distraction: a dynamic errorable car-following model,” *Transportation research part C: emerging technologies*, vol. 50, pp.117-129, ISO 690.
- Qi Y. Srinivasan R., Teng H. and Baker R.(2013), “Analysis of the Frequency and Severity of Rear-end Crashes in Work Zones,” *Traffic injury prevention*, vol. 14, no. 1, pp.61-72.
- Shakouri M., Ikuma L. H., Aghazadeh F., Punniaraj K. and Ishak S.(2014), “Effects of Work Zone Configurations and Traffic Density on Performance Variables and Subjective Workload,” *Accident Analysis and Prevention*, vol. 71, pp.166-176.