

고속도로 Weigh-in-Motion(WIM) 이벤트 자료를 활용한 후미추돌 위험도 분석 기법

Analysis of Rear-end Collision Risks Using Weigh-in-Motion Data

오 민 수* · 박 현 진** · 오 철*** · 권 순 민****

* 주저자 : 한양대학교 교통물류공학과 석사과정
 ** 공저자 : 한양대학교 교통물류공학과 박사과정
 *** 교신저자 : 한양대학교 교통물류공학과 교수
 **** 공저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

Min Soo Oh* · Hyeon Jin Park** · Cheol Oh*** · Soon Min Park****

* Dept. of Transportation and Logistics Eng., Hanyang University
 ** Dept. of Transportation and Logistics Eng., Hanyang University
 *** Dept. of Transportation and Logistics Eng., Hanyang University
 **** Korea Expressway Corporation Research Institute
 † Corresponding author : Cheol Oh, Cheolo@hanyang.ac.kr

Vol.17 No.2(2018)

April, 2018
pp.152~167

ISSN 1738-0774(Print)
 ISSN 2384-1729(On-line)
<https://doi.org/10.12815/kits.2018.17.2.152>

Received 17 January 2018
 Revised 19 March 2018
 Accepted 23 March 2018

© 2018. The Korea Institute of
 Intelligent Transport Systems. All
 rights reserved.

요 약

고속측중기 시스템은 개별 차량의 통행속도 및 하중 정보를 수집할 수 있어 기존의 차량 검지장비와 비교하여 다양한 활용이 가능하다. 그러나 고속측중기 원시 자료는 지점 검지 자료로 구간별 안전성 분석에 직접 적용하는 것은 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 본 연구에서는 고속측중기 자료 중 검지 시간, 검지 속도, 차량길이, 차량 종류, 차량 무게정보를 수집하여 대리안전척도로 이용한 상충률과 충격량을 산출하는 방법론을 제시하였다. 이를 통하여 고속도로 교통류 내의 추종관계 별 후미추돌 위험도를 분석하고 안전성을 평가하는 것이 가능할 것으로 판단되며 해당 구간 내 교통안전 위해차종 선별 및 계도 방안 모색에 기초 연구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 고속측중기, 후미추돌 위험도, 상충, 충격량

ABSTRACT

The high-speed weigh-in-motion system can collect the traveling speed and load information of individual vehicles, which can be used in a variety of ways for the traffic surveillance. However, it has a limit to apply the high-speed weigh-in-motion data directly to a safety analysis because high-speed weigh-in-motion's raw data are point measured data. In order to overcome this problem, this paper proposes a method to calculate the conflict rate and the Impulse severity based on surrogate safety measures derived from the detection time, detection speed, vehicle length, vehicle type, vehicle weight. It will be possible to analyze and evaluate the risk of rear-end collision on freeway traffic. In addition, this study is expected to be used as a fundamental for identifying crash risks and developing policies to enhance traffic safety on freeways.

Key words : HS-WIM, Rear-end Collision Risk, Conflict, Impulse

I. 서 론

HS-WIM이라 함은 High Speed Weigh-In-Motion의 약자로 고속으로 이동 중인 차량의 하중 정보(축하중, 총 중량)를 측정하는 장치(고속축중기)를 의미한다(Kwon et al., 2010). 고속축중기는 시스템의 특성상 중량 이외의 다양한 교통자료수집이 가능한 장치이다. 고속축중기는 기존 차량검지기(Vehicle Detection System) 혹은 자동차종분류장치(Automatic Vehicle Classification)에서는 수집 불가능한 개별 차량의 속도나 차량길이, 차량종류, 하중에 대한 자료를 수집할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히, 고속축중기의 자료를 이용하여 교통정보와 하중정보의 통합형 정보를 생성해낼 수 있으므로 목적에 따라 다양한 활용이 가능하다. 그러나 고속축중기 기능 관련 연구는 다양하게 진행되었으나 고속축중기 수집 자료를 이용한 안전성 분석 관련 연구는 미비하였다. 이에 따라 본 연구에서는 고속축중기의 중량정보 외 12종의 차종분류, 주행차로 및 속도 등의 부가정보를 활용하여 고속도로 상 안전운행 정보 수집 및 활용성을 제고하고자 하였다.

기존 문헌 고찰을 통하여 고속축중기 연구 동향을 파악하였고 교통류 안전성 관련 연구사례 분석을 통해 고속축중기의 부가정보를 활용한 교통류 안전성 분석 방안을 모색하였다. 교통류 안전성 분석을 수행하기 위하여 고속축중기에서 수집된 원시자료를 직접 사용하는 것은 원시자료가 지점 검지 자료이기 때문에 한계가 있다. 따라서 분석 목적인 교통류 안전성 분석에 적합하도록 고속축중기 원시 자료 중 필요 요소를 선별하고 대리안전척도로 이용한 상충률과 충격량을 산출하였다. 산출 결과를 기반으로 연구 대상 범위 내 교통류의 후미추돌 위험도를 분석하였다.

본 연구에서는 고속축중기 원시 자료를 선별하여 대리안전척도를 산출하고 이를 이용하여 교통류 내의 후미추돌 위험도를 평가하는 방법론을 제시하였다. 본 연구는 고속축중기 시스템의 하중정보를 이용하여 사고 심각도를 추정하였다는 점에 의미가 있다고 판단된다. 또한 연구에서 제시한 방법론을 활용하여 교통류 내 교통안전 위해차종 선별이 가능할 것으로 기대된다. 이를 통하여 교통 운영자가 교통안전 개선대책 수립 시 차량 대상 범위를 보다 구체화하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 예를 들면 특정 화물차종의 위험도가 높은 경우 대상 차종에 대한 검문을 강화하거나 차종별 주행 특성 분석을 수행하고 위험도에 영향을 주는 요인을 파악하는 것이 가능하다. 본 연구에서 제시한 방법을 적용하여 기초 자료로 활용한다면 고속도로 상의 다양한 교통안전 위해요소에 대한 대책 마련 및 적극적 계도를 실시하고 안전한 고속도로 주행 환경을 조성하는데 이바지 할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 기존 문헌 고찰

고속축중기 시스템의 기술 수준 및 연구 동향을 파악하기 위하여 고속축중기 시스템 개발 및 성능평가와 관련한 기존문헌을 고찰하였다. 또한 고속축중기 시스템 활용 방안에 관련한 연구 사례 분석을 통해 고속축중기 시스템 활용성 향상 방안을 모색하고자 하였다. 그러나 고속축중기 원시 자료를 이용하여 대상 구간의 직접적인 안전성 평가를 실시하는 것은 한계가 있다. 따라서 교통류 안전성 평가 관련 문헌을 고찰하여 고속축중기 원시 자료를 교통 안전성 평가에 활용하기 위하여 벤치마킹 요소를 도출하고자 하였다. 이를 위하여 교통안전대체지표와 상충에 관련한 기존문헌을 고찰하여 간접적인 평가에 대하여 조사하였고 상충을 활용하거나 새로운 교통안전대체지표를 제시한 연구들에 대하여 고찰하였다.

1. 고속축중기(HS-WIM) 관련 연구 사례

고속축중기 시스템 개발 및 성능평가와 관련한 연구가 수행되었다. 대표적으로 Kwon et al.(2009)는 고속축중기 시스템 개발과 과적단속 시스템 적용방안 연구에서 과적단속의 효율화를 위하여 고속축중기 시스템을 개발하고 이를 통해 국내 고속도로 과적 화물차 행태 분석을 실시하였다. 또한 고속축중기 시스템을 활용한 과적단속시스템 개발 가능성에 대하여 검토하였다. Kwon et al.(2010)는 과적단속을 위한 고속축중기 시스템의 성능향상 방안 연구에서 고속 축중기를 활용하여 무인·무정차 과적단속시스템을 개발하기 위한 고속축중기 시스템의 성능향상 방안을 제시하였다. Kwon et al.(2012)는 고속축중기를 활용한 과적 억제효과분석에서 고속 축중기는 주행 중인 차량의 축 중량을 실시간으로 계산하여 제공해야 하기 때문에 중량데이터의 정확도 및 신뢰도가 중요하다고 주장하였고, 축중기의 유럽연합 기준인 COST 323과 미국 기준인 ASTM의 등급평가 결과를 바탕으로 고속축중기의 성능을 검증하는 연구를 수행하였다. 성능 평가 결과 김천과 선산의 고속축중기는 COST 323기준 A(5) 등급의 WIM으로 판정되어 교통하중 데이터 수집 및 활용은 물론 직접적인 과적단속이 가능한 수준인 것으로 나타났다. Zhang et al.(2017)은 WIM 시스템이 실시간 교통 정보 수집에 유용한 장비이며 중차량의 과적 단속, 도로 포장 관리, 화물 물동량 관리, 교통 관리, ITS(Intelligent Transportation System) 등 다양한 목적으로 적용 가능하다고 주장하였다. 또한 WIM 시스템을 최적화 하는 방안을 제시하였고, 이를 시뮬레이션과 현장 실험을 이용하여 검증하였다.

또한 고속축중기의 활용성을 높이고자 최적 설치 위치를 선정하거나 수집 자료를 활용하여 2차 정보를 생성하는 방법에 관한 연구도 수행되었다. Wang et al.(2004)은 WIM 시스템 관련 연구들에 대하여 조사하였다. 연구 결과 과적이 도로 파손에 영향을 끼치며 교통 안전성을 감소시킨다고 주장하였다. Jacob et al.(2010)은 불법 과적 차량은 교통사고 위험도를 증가시키고 기반시설에 피해를 증가시킨다고 주장하였고 WIM 기술이 발전함에 따라 중차량의 안전성과 운영효율성이 향상될 것으로 판단하였다. Gil et al.(2013)은 WIM 데이터를 이용하여 고속도로 중차량 특성을 분석하였다. Mahmoudaba et al.(2013)은 축중기 최적 설치위치를 제시하는 것을 목적으로 연구를 수행하였다. 행동 대비 중차량의 축하중 측정 횟수를 운영효율성 지표로 설정하고 화물차량들의 최단 경로 알고리즘을 제시하였다. 이에 따라 설정된 WIM 최적 설치 위치를 선정하는 방안을 제시하였다. Yotaro et al.(2017)는 현재 일본의 고속도로가 불법 과적차량으로 인하여 고속도로 포장이 파손되고 있는데, 고속축중기 시스템을 설치한다면 화물차량들의 무게를 측정할 수 있고 데이터 분석을 통해 통행 정보도 수집 가능하다고 주장하였다. 또한 고속축중기를 활용하여 범률 위반차량을 추출하고 범률 위반 차량의 차주들에게 경고를 하거나 고소할 수 있는 방안을 제시하였다. Oh et al.(2017)은 한국도로공사에서 관리하는 스마트 제한차량 분석시스템(TCS, HS-WIM) 자료를 활용하여 고속도로에서 수송되는 화물자동차 및 화물의 규모를 추정할 수 있는 지표 산정하는 방안을 제시하였다.

2. 교통류 안전성 평가

교통안전대체지표(Surrogate Safety Measure)를 활용하여 교통 안전성을 추정하는 방법에 대한 연구들이 수행되었다. Gettman et al(2003)에 따르면 교통안전대체지표(Surrogate Safety Measure : SSM)는 직접적으로 환산하거나 수집하는 데 한계가 있는 교통 안전성을 간접적으로 추정하는 방면에 활용된다. 대표적인 교통안전대체지표로 상충이 해당되며 상충이란 둘 또는 그 이상의 도로 이용자들이 현 상황의 움직임이 변하지 않는다면 시·공간적으로 충돌할 위험이 내재되어 있는 상황을 의미한다. 교통안전대체지표는 사고 건수와 같은 직접적인 지표와 비교하여 비용이 발생하는 사고 분석이나 건설 없이도 교통 공학자들의 대책을 교안전성 측면에서 평가할 수 있는 장점이 있다. Richard et al.(1993)는 Time-to-Collision(TTC)이 교통 상충 심각도를

평가하는 데 효율적인 효과적이라고 주장하였고 TTC가 1.5s 이하인 경우가 일반적으로 심각한 상충으로 고려된다고 주장하였다. Chin et al.(1997)은 전통적으로 도로 사고 통계가 도로 안전성 및 도로 안전 프로그램을 평가하는 데 활용되었지만 교통사고의 수가 부족하거나 기록이 정확하지 않다면 부적절한 평가가 수행될 것이라고 주장하였다. 이를 보완하기 위하여 교통 상충 개념을 적용하여 도로 안전성을 분석하는 방법과 고속도로 합류부 구간에 적용하여 시범 평가한 결과를 제시하였다. Choi et al(2013)는 물리학의 운동에너지 법칙을 적용해 볼 때, 차량 충돌 시 충격량은 물체의 중량에 비례하므로 화물차 사고는 승용차 사고보다 교통사고 심각도가 높게 나타나고 화물차량은 장거리 운행으로 교통사고 발생 개연성이 높다고 주장하였다. 이러한 화물차 사고 감소 및 심각도를 감소시키기 위해서 교통류 관리전략이 필요한 것으로 판단하였고 고속도로에 설치된 루프검지기에서 수집된 속도, 교통량 자료와 기상청에서 수집된 강우·강설자료를 매칭하여 사고 발생 직전의 기상 및 교통상황을 나타내는 잠재적인 요인을 분석하고자 하였다. Vogel(2003)는 안전성 지표인 Headway와 TTC를 비교하였다. Headway는 특정 수치 이하의 경우는 잠재적으로 위험한 상황을 내포하고 있기 때문에 단순 목적으로 활용되는 것이 유용할 것으로 판단하였고 TTC는 위험 상황을 실제적으로 나타낼 수 있기 때문에 특정 교통 환경에서 안전 대책이 평가되는 경우에 사용되어야 한다고 주장하였다. Kim et al.(2016)은 실제 구간에서의 후미추돌 사고 자료와 in-vehicle sensing system(i2D)를 통해 수집된 차량의 주행 궤적 자료를 통합하여 연관성을 파악하고자 하였다. 분석 결과, 사고가 많이 발생하는 구간에서 운전자들이 급격한 감속($4m/s^2$ 이상)을 하는 경향이 있는 것을 확인하였다.

또한 상충을 활용하거나 새로운 교통안전대체지표를 제시한 연구들도 수행되었다. 대표적으로 Oh et al.(2006)는 루프검지기 자료를 이용하여 후미추돌 상충 가능성을 분석하였다. 루프에서 수집된 신호를 이용하여 고속도로 상, 개별 차량의 정보를 수집하고 추종 상황에서 안전거리를 산출하였다. 후미추돌 상충 가능성을 산출하여 후미추돌 위험 정도를 평가하였고 SDI(Stopping Distance Index)라는 새로운 위험성 지표를 제안하였다. Kim et al.(2009)는 영상검지기 기술 기반의 실시간 교통류 모니터링 환경에서 적용 가능한 교통 상충 분석 방법을 제시하였다. 교통류의 실시간 모니터링을 실시하고 안전도 분석(사고 위험도, 사고 심각도)을 실시하였다. 상충이력자료를 이용하여 경고정보를 가공하고 이를 운전자에게 제공하는 방안을 제시하여 도로 내 사고예방 대책 및 교통운영 전략 개발 방안을 도출하였다. Aliaksei et al.(2010)은 미시적 수준의 주행행태 자료를 기반으로 교통안전성을 평가하는 방안을 제시하였다. 평가 모형의 가정은 교통 안전성과 운영 효율성은 트레이드-오프 관계를 갖는 것을 기반으로 안전성 평가 방안을 수립하였다. Li et al.(2017)은 고속도로 기반설비인 교통 제어 및 안전시설이 교통 안전성에 미치는 영향을 분석하는 연구를 수행하였다. 교통 안전성은 사고 발생 확률을 기반으로 산출된 안전 지표를 이용하여 평가하였다. 안전 지표 산출을 위하여 지방부 및 도시부 고속도로 200여개의 구간의 5개년 자료를 활용하였다. Mahmud et al.(2017)은 교통안전 대체 지표에 대하여 수행된 기존연구들을 분석하였고 각 연구에서 제시된 지표들에 대한 장·단점을 정리하였다. 각 연구들의 특징을 비교한 결과로 향후 활용 가능성이 높은 연구 방안을 제시하였다. Park et al.(2018)은 주행차량이 차로변경을 수행하는 동안 안전성을 평가할 수 있는 방법론을 제시하였다. 주행차량의 SDI 프로파일을 이용하여 주변차량과의 상호작용에서 발생하는 위험도출도와 위험심각도 지표를 산출하였다. 이를 Fault Tree Analysis 이론을 적용하여 차로변경 시 주행차량의 안전성을 계량화 하였다. 위험도출도는 Risk Exposure Level을 이용하여 추정하였고 위험심각도는 Risk Severity Level을 이용하여 평가하였다.

3. 시사점

국내·외의 고속추종기 관련 기존 연구를 고찰한 결과 기술적인 부분과 정책적인 부분에 대한 연구는 활

발히 수행되고 있었다. 특히, 본 연구에서 활용하고자 하는 고속측중기는 COST 323 등급 A(5)로 연구 목적 뿐 아니라 직접적인 과적단속이 가능한 수준인 것으로 나타났다. 그러나 고속측중기를 통해 수집 가능한 부가정보들을 2차 가공하여 고속도로 내 안전성을 평가하는 방안에 관한 연구 수행은 미비한 것으로 판단된다. 따라서 고속측중기 수집 정보를 활용한 안전성 평가 방안을 제시하기 위하여 차량 검지 자료를 이용한 안전성 평가 관련 기존 연구사례를 분석하고 벤치마킹 요소를 도출하고자 하였다.

교통류 안전성 평가 관련 기존 연구 고찰 결과, 지점 검지 자료를 바탕으로 후미추돌 상충 가능성을 분석한 연구가 존재하였고 영상검지기 기술 기반의 상충 분석을 통한 안전도(사고 개연성, 사고 심각도) 분석 방법도 제시되어 있었다. 또한 화물차량 사고 심각도 요인을 분석한 연구도 수행되었다. 본 연구에서는 안전성 평가 관련 기존 연구에서의 벤치마킹 요소로 Oh et al.(2006)에서 제시한 SDI를 채택하여 해당 구간내 사고 개연성을 추정하고자 하였다. 또한 기존 연구에서 제시한 것처럼 교통사고 심각도는 차량의 중량 등과 관련이 있을 것으로 판단되나 사고 심각도 추정 시 차량의 무게를 반영한 연구는 미비하였다. 따라서 본 연구에서는 고속측중기로 수집한 차량의 중량정보를 활용하여 충격량을 계산하고 이를 사고 심각도 효과적으로 수치화하여 제시하고자 하였다. 또한 Kim et al.(2016)에서 제시한 것처럼 실제 사고 자료와 본 연구에서 제시한 효과적도 분석결과를 비교하여 상관관계를 파악하여 본 연구에서 제시한 효과적도를 객관화하고자 하였다.

Ⅲ. 자 료

고속측중기 시스템은 차량의 중량을 측정하는 축하중 측정 센서, 주행차량의 차륜위치를 판독하는 차륜위치 판독 센서, 차량의 진·출입을 판독하는 루프 센서, 축하중 보정용 온도 센서 및 WIM 제어기로 구성되며 공간적으로는 본선 상, 시간적으로는 차량이 통과할 시 모든 차량을 대상으로 개별 통과차량 단위로 자료를 수집한다. 그러나 고속측중기에서 수집되는 자료를 활용하기 위하여 원시 자료를 선별하고 대리안전척도로 산출하는 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 연구 목적에 부합하도록 원시 자료를 선별하였다. 후미추돌 위험도에 대한 분석을 수행하기 위하여 수집된 주행차로 정보를 통해 차량 간 위치를 파악하였다. 또한 선행차량과 후행차량의 시간 정보와 차중을 바탕으로 추종 관계를 파악하였고 속도 정보를 이용하여 상대속도를 산출하였다. 시간 정보와 속도 정보를 종합하여 차간거리, 무게 정보를 활용하여 무게 차를 산출하는 방식으로 자료를 가공하였다. 또한 본 연구에서 제시한 방법론을 통해 산출된 효과적도와 비교하기 위하여 사고 자료를 이용하였다.

1. 고속측중기 자료 수집 범위 및 자료 형태

본 연구에서 활용한 고속측중기의 자료 수집 시 공간적 범위는 고속측중기를 활용한 무인과적단속시스템이 시범 구축되어 있는 한국도로공사 경북본부 산하 3개 지점(김천, 왜관, 선산)으로 지정하였고 시간적 범위는 2015년 3월 수집 자료를 이용하였다. 연구에서 사용한 고속측중기는 현재 한국도로공사에서 설치 및 운영 중인 고속측중기 동일한 제어기 형식을 사용한다. 고속측중기 원시자료는 총 71개의 항목으로 구성되며 고속측중기 장비에 대한 자료, 차량 검지 시점의 포장체의 상태, 고속측중기에 의해 검지되는 차량 정보를 포함한다. 장비에 대한 정보로는 장치 상태 정보, 교정 후 경과 일자 등이 존재한다. 검지시점의 환경 정보로는 포장체의 상부온도가 포함된다. 수집되는 차량 정보에는 차량 통과 순번, 차량의 진입시간, 속도, 차중, 축중량, 총중량, 주행차로, 차량길이 등이 존재한다.

2. 고속축중기 자료 가공 절차

원시 자료를 이용하여 직접적인 안전성 평가에 적용하는 것은 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 필요한 자료를 선별하였다. 우선 차량의 추종 관계 파악을 위하여 검지된 차량의 주행 차로 정보, 차량 검지 시간, 차종을 필요 정보로 채택하였다. 또한 후미 추돌 상충 여부와 사고 심각도를 산출하기 위한 필요 정보로 속도, 차량길이, 중량정보를 수집하였다. 1차 원시 자료 선별 과정을 통해 수집된 자료를 활용하여 차량 간 추종 관계, 차두간격, 상대속도, 중량차이에 대한 정보로 가공하였다. 차량 간 추종 관계는 검지 시간과 차종 자료를 이용하였고 차두간격은 검지 시간, 차량길이, 통행속도를 활용하였다. 또한 상대속도 및 중량 차는 검지된 통행속도와 차량 중량 자료를 사용하여 가공하였다. 2015년 3월 고속축중기에서 수집된 원시 자료 선별 후 생성된 자료에 대하여 구간 별 속도 및 중량 기술통계분석을 실시하였고 분석 결과는 <Table 1>에 제시하였다. 또한 <Table 2>에서는 구간 내 차로 이용 비율을 제시하였고 <Table 3>에서는 구간 내 차종 비율을 산출하였다. 본 절에서 제시한 고속축중기 자료 가공 절차는 <Fig. 1>에 제시하였다.

<Table 1> Descriptive statistics quantity of primary processing data by sections

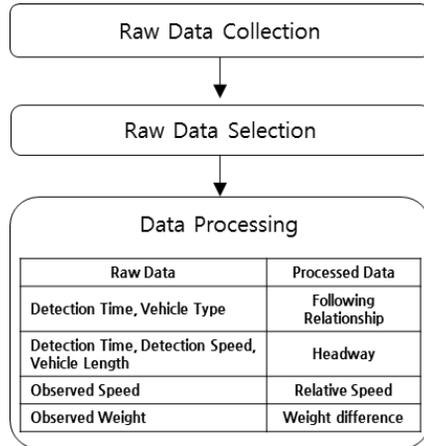
Sections	Velocity(km/h)					Weight(kg)				
	Number of samples	Average	Max.	Min.	Standard deviation	Number of samples	Average	Max.	Min.	Standard deviation
Kimcheon	427,389	94.91	246.42	6.01	15.90	427,389	7,205	75,641	922	11,062
Sunshan	778,946	93.33	219.59	3.91	13.77	778,946	6,652	58,577	889	9,659
Waegwan	822,566	90.21	219.00	4.99	11.63	822,566	5,892	56,938	960	9,182

<Table 2> Ratio of Lane Traffic by Sections

Sections	lane	Traffic	Ratio
Kimcheon	1	110,547	26%
	2	188,351	44%
	3	128,491	30%
	Sum	427,389	100%
Sunshan	1	477,066	61%
	2	301,880	39%
	Sum	778,946	100%
Waegwan	2	379,940	46%
	3	273,358	33%
	4	169,268	21%
	Sum	822,566	100%

<Table 3> Ratio of Vehicle Type by Sections

Sections	Kimcheon		Sunshan		Waegwan	
	Traffic	Ratio	Traffic	Ratio	Traffic	Ratio
1	274,404	64.2%	549,935	70.6%	578,704	70.4%
2	12,404	2.9%	28,228	3.6%	28,560	3.5%
3	28,481	6.7%	6,228	0.8%	13,417	1.6%
4	29,934	7.0%	56,467	7.2%	67,260	8.2%
5	26,865	6.3%	63,649	8.2%	53,514	6.5%
6	8,731	2.0%	13,428	1.7%	17,182	2.1%
7	20,298	4.7%	18,763	2.4%	25,352	3.1%
8	6,981	1.6%	7,479	1.0%	7,570	0.9%
9	343	0.1%	1,177	0.2%	1,540	0.2%
10	12,974	3.0%	25,258	3.2%	21,974	2.7%
11	730	0.2%	914	0.1%	995	0.1%
12	5,244	1.2%	7,420	1.0%	6,498	0.8%
Sum	427,389	100.0%	778,946	100.0%	822,566	100.0%



<Fig. 1> HS-WIM Data Processing

3. 고속도로 사고자료

한국도로공사에서 수집한 고속도로 사고자료(2016년)를 이용하여 대상 구간별 사고 건수, 차량 1만대당 사고건수, 교통사고 위험도, Equivalent Property Damage Only(EPDO)를 분석하였다. 차량 1만대당 사고건수는 식 (1)을 이용하여 산출하였다. 교통사고 위험도는 경기도교통정보센터에서 정의한 것으로 교통사고건수, 사망자수, 부상자수를 이용하여 교통사고의 심각도를 나타낸 정도이다(Gyeonggi-do Transportation Data Base Center, 2017). 교통사고 위험도 지수를 산정하는 수식은 식 (2)에 제시하였다. EPDO란 대물피해환산 기법으로 교통사고 심각도를 산출하는 방식이다. EPDO의 산출 식은 식 (3)에 제시하였다.

$$\text{차량 1만대당 사고건수} = \frac{10,000 \times \text{사고 건수}}{\text{교통량 (대)} \times \text{해당구간 길이 (km)}} \quad (1)$$

$$\text{교통사고 위험도} = \frac{\text{사망자 수} \times 12 + \text{부상자 수} \times 3}{\text{사고건수}} \quad (2)$$

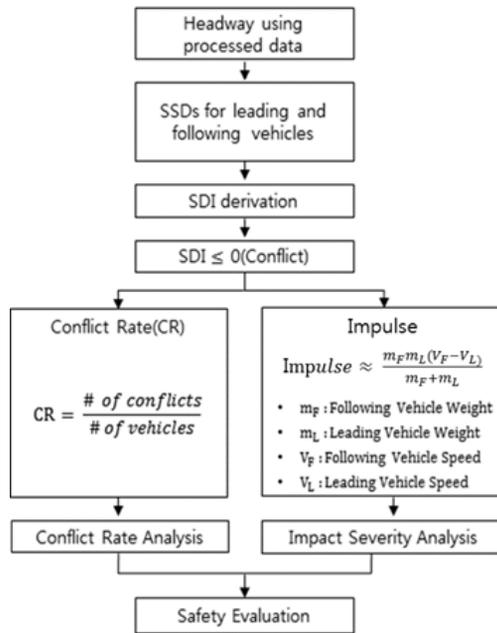
$$EPDO = (\text{사망사고 건수} \times 12) + (\text{부상사고 건수} \times 3) + (\text{물적피해 건수} \times 1) \quad (3)$$

IV. 방법론

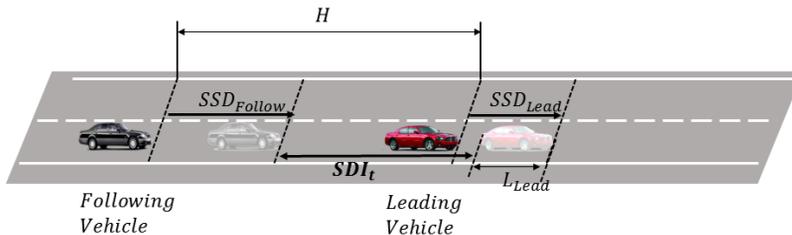
본 연구의 목적은 WIM 자료를 활용한 고속도로 안전성 평가 방안을 제시하는 것이다. WIM 자료를 가공하여 사고 개연성 측면과 사고 심각도 측면에서 분석하고자 하였고, 사고 개연성 측면에서는 차량의 지점 검지 속도와 검지 시간을 기반으로 안전정지거리 지표(Stopping Distance Index : SDI)를 산출하여 상충 유무를 판별하고 상충률을 제시하였다. 또한 사고 심각도 부분에서는 차량의 지점 검지 속도와 중량정보를 바탕으로 충격량을 산출하였다. 각 구간별로 차량의 선행차량과 후행차량의 관계인 추종 관계별 교통안전성을 분석하고 차로별 교통안전성을 평가하였다. 본 연구에서 제시한 WIM 자료를 활용한 고속도로 안전성 평가 흐름도는 <Fig. 2>에 제시하였다.

1. 사고 발생 개연성 검지

사고 개연성 측면에서는 SDI를 이용하여 상충유무를 판단하고 상충 유무를 판별하여 연구 대상 구간 및 기간의 상충률을 산출하고자 하였다. SDI는 선행차량과 후행차량의 거리(H), 후행차량의 최소정지시거(SSD_{Follow}), 선행차량의 최소정지시거(SSD_{Lead}), 선행차량의 차량길이(L_{Lead})로 계산되는 지표로 SDI가 0보다 크면 안전한 상황으로, 0보다 작다면 상충으로 판단 가능하다. SDI를 산출하기 위해서는 차량의 최소 정지 시거인 SSD(Stopping Sight Distance)를 먼저 산출하여야 한다. SSD는 차량의 속도와 인지반응시간, 마찰계수와 종단경사로 계산되며 이를 계산하는 식은 식 (4)에 제시하였다. SDI의 개념도를 <Fig. 3>에 제시하였고 산출 수식을 식 (5)에서 설명하였다. SDI 산출 결과를 바탕으로 차량추종 이벤트의 위험 유무를 판단한 이후 구간 내의 상충률을 산출하게 된다. 상충률이란 분석 대상 시간 내의 차량추종 이벤트 대비 위험한 차량추종 이벤트 수를 의미한다. 상충률은 분석 대상 시간 범위 내의 상충 분석 결과와 교통량을 이용하여 산출하였다. 상충률을 산출하는 식은 식(6)에 제시하였다.



<Fig. 2> Freeway Safety Evaluation Flowchart Using WIM data



<Fig. 3> SDI Conceptual diagram

$$SSD = \frac{V^2}{254 \times (f + s)} + t_r \times V^2 \times 0.278 \quad (4)$$

여기서, SSD : Stopping Sight Distance(m)

V : 차량의 속도(km/h)

f : 노면마찰계수

s : 종단경사

t_r : 인지반응시간

$$SDI = H + SSD_{Lead} - SSD_{Follow} - L_{Lead} \quad (5)$$

여기서, SDI : Stopping Distance Index(m)

H : 차두간격(m)

SSD_{Follow} : 후행차량의 최소정지시거(m)

SSD_{Lead} : 선행차량의 최소정지시거(m)

L_{Lead} : 선행차량 차량길이(m)

$$\text{상충률} = \frac{\text{위험한 차량추종 이벤트 수}}{\text{총 차량추종이벤트 수}} \quad (6)$$

고속추종기 자료는 지점 검지 자료이기 때문에 선행차량과 후행차량의 정보가 수집되는 시간이 상이하다. 따라서 SDI를 산출하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다. 첫째, Headway(m)는 식 (7)에 의하여 산출되며 선행차량은 검지된 시점부터 후행차량이 검지된 시점까지 측정된 속도로 주행한다. 둘째, SSD 산출에 이용되는 차량의 속도는 검측된 속도로 선행차량의 속도와 후행차량의 속도는 검지된 속도로 계속 주행한다. 셋째, 노면마찰계수는 젖은 노면을 기준으로 하고 종단경사는 평면으로 가정한다. 또한 인지반응시간은 Richard et al.(1993)이 제시한 1.5초를 기준으로 상충을 판단하였다. 마지막으로 상충은 후미추돌상충에 대하여 평가하였고 SDI는 위험한 상황인 음수 값들만 이용하여 안전성 평가에 활용하였다. SDI가 감소할수록 안전성이 감소하는 것으로 판단하였고 상충률이 높을수록 사고 개연성이 증가하는 것으로 판단하였다.

$$H = V_{Lead} \times (T^{Lead} - T^{Follow}) \times 0.278 \quad (7)$$

여기서, H : 차두간격(m)

V_{Lead} : 선행차량 속도(km/h)

T^{Lead} : 선행차량 검지 시간(s)

T^{Follow} : 후행차량 검지 시간(s)

2. 사고 심각도 추정

사고 심각도는 교통안전대체지표로 충격량을 선정하고 이를 이용하여 추정하였다. WIM 자료에서 수집된

후행차량과 선행차량의 속도와 무게자료를 활용하여 충격량을 추정하였고 사고 심각도를 예상하였다. 충격량은 후행 차량의 검지시간(t)을 기준으로 전·후 차량 정보를 수집하고 후행 차량의 속도(V_F)가 선행 차량의 속도(V_L)보다 빨라서 상충으로 판단되는 경우에 산출하였다. 충격량(I)을 산출하는 방안은 다음과 같다. 우선 운동에너지 보존법칙을 활용하여 충돌 시 공통속도(V_c)를 산출하였고 수식은 식 (8)에 제시하였다. 산출된 공통속도를 식 (9)에 대입하여 선행 차량의 유효충돌속도(δV_L)를 계산하였고 식 (10)을 활용하여 선행 차량의 충돌 전후 속도차이(ΔV_L)를 산출하였다. 최종적으로 산출된 공통속도, 선행 차량의 유효충돌속도, 선행차량의 충돌 전후 속도 차이를 식 (11)에 대입하여 선행 차량의 충격량을 추정하였다. 제시된 충돌 시 공통속도, 선행 차량의 유효충돌속도, 선행차량의 충돌 전·후 속도차이를 활용하여 충격량 산출 공식을 유도한 과정은 식 (8)에 제시하였다.

$$V_c = \frac{m_F V_F + m_L V_L}{m_F + m_L} \tag{8}$$

$$\delta V_L = V_c - V_L \tag{9}$$

$$\Delta V_L = (1+e)\delta V_L \tag{10}$$

$$I = m_L \Delta V_L \tag{11}$$

$$\begin{aligned} &= m_L(1+e)\delta V_L \\ &= m_L(1+e)(V_c - V_L) \\ &= m_L(1+e)\left(\frac{m_F V_F + m_L V_L}{m_F + m_L} - V_L\right) \\ &= \frac{m_F m_L (V_F - V_L)}{m_F + m_L} (1+e) \end{aligned}$$

- 여기서, V_c : 충돌 시 공통 속도(km/h)
- m_F : 후행 차량의 총중량(kg)
- m_L : 선행 차량의 총중량(kg)
- V_F : 후행 차량의 지점검지속도(km/h)
- V_L : 선행 차량의 지점검지속도(km/h)
- δV_L : 선행차량의 유효충돌속도(km/h)
- ΔV_L : 선행차량의 충돌 전후 속도 차(km/h)
- e : 반발계수
- I : 충격량($kg \cdot m/s^2$)

사고 개연성 효과척도 산출 과정과 동일하게 WIM 자료를 이용하였기 때문에 지점 검지 자료의 한계를 보완하기 위한 가정 사항이 필요하였다. 가정 사항은 다음과 같다. 첫째, 차량 검지시간을 기준으로 주행 차량의 선행차량 속도는 검측된 속도를 유지한다. 둘째, 후행 차량의 속도가 선행 차량의 속도보다 클 때 충돌

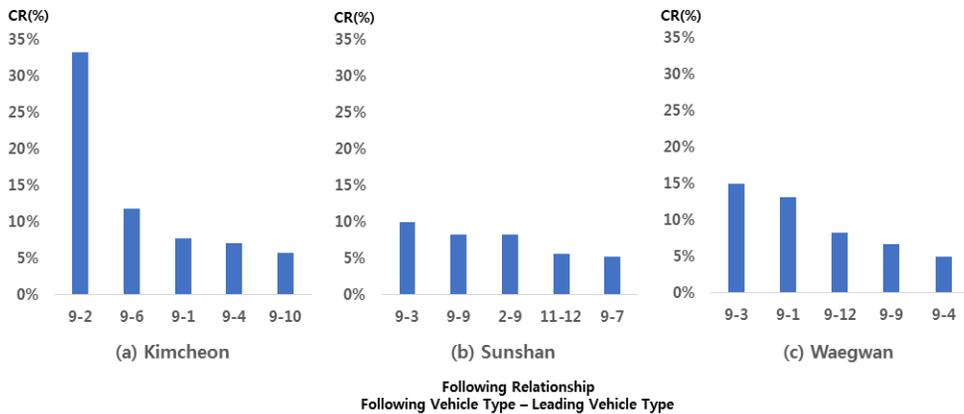
사고가 발생하며 충돌 직전 속도는 검지된 속도를 유지한다. 셋째, 충격량 산출에 이용된 질량 값은 차량의 중량 측정치를 이용한다. 마지막으로 본 연구에서는 추종관계별 충격량의 상대비교를 통하여 사고 심각도를 비교하려 하였기 때문에 공통으로 포함된 반발계수(1+e)는 모두 같은 것으로 가정하고 사고 심각도를 추정하였다.

V. 분 석

1. 추종관계 별 교통안전성 분석 결과

1) 사고 발생 개연성 분석 결과

사고 개연성 분석 시, 각 추종 관계별 상충률을 산출하여 대상 구간 별로 상충률이 높은 상위 5개 추종관계를 <Fig. 4>에 제시하였다. 김천 구간에서의 상충률 분석 결과, 상충률 상위 5개의 추종 관계 중 선행 - 후행 차량 차종에 9종 차량이 모두 포함된 것으로 나타났고 특히 후행차량이 9종 - 선행차량이 2종인 경우 상충률이 다른 추종관계와 비교했을 때 높은 것으로 분석되었다. 선산 구간에서 사고 개연성을 상충률로 추정한 결과, 상충률 상위 5개의 추종관계 중 선행 - 후행 차량의 차종에 9종이 포함된 경우가 4건(80%)으로 나타났다. 왜관 구간에서 사고 개연성을 상충률을 이용하여 판단해 본 결과 상충률 상위 5개 추종관계 중 선행 - 후행 차량 차종에 9종이 포함된 경우가 5건(100%)로 분석되었다. 연구 대상 범위인 김천, 선산, 왜관 구간에서의 분석 결과를 종합하여 볼 때, 국토해양부의 12종 차량 분류 기준에서 제시하는 9종 화물 수송용 풀 트레일러 형식의 4축 2단위 차량이 사고 개연성이 가장 높은 것으로 분석되었다.

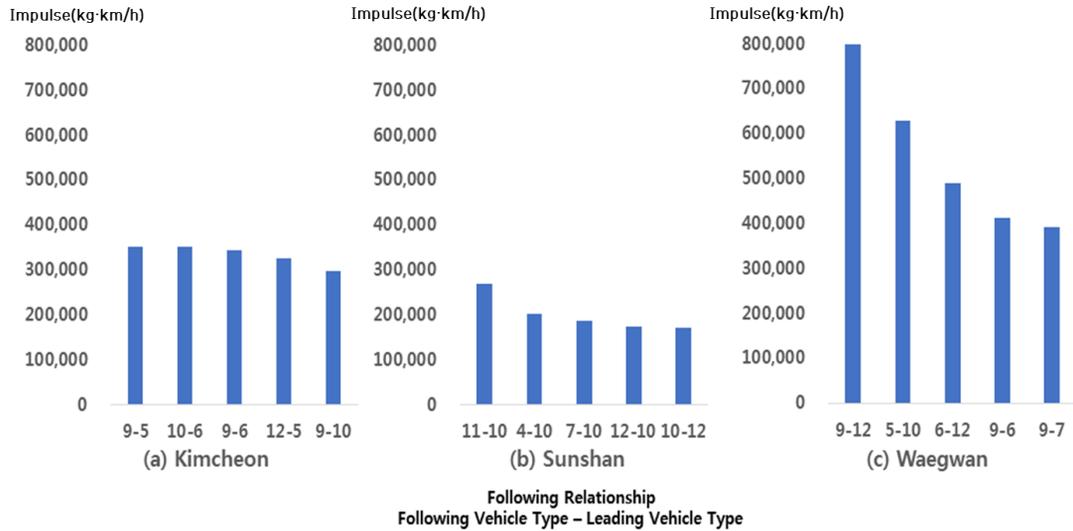


<Fig. 4> Conflict Rate(CR) Analysis Results

2) 사고 심각도 추정 결과

사고 심각도는 충격량을 이용하여 추정하였고 각 구간 별로 상위 5개의 충격량 순위를 <Fig. 5>에 제시하였다. 김천 구간에서 충격량을 이용하여 사고 심각도를 추정한 결과 후행차량의 차종이 대형화물차(9, 10, 11, 12종)이고 후행차량 차종이 중형화물차(5, 6, 7종)인 경우 충격량이 높은 것으로 나타났다. 선산 구간의 사고 심각도를 추정한 결과 사고 심각도 상위 5개의 추종관계 중 선행 - 후행 차량의 차종 중 모든 경우에 중형 혹은 대형 화물차가 포함된 것으로 분석되었다. 왜관 구간에서 충격량을 이용하여 사고 심각도를 추정

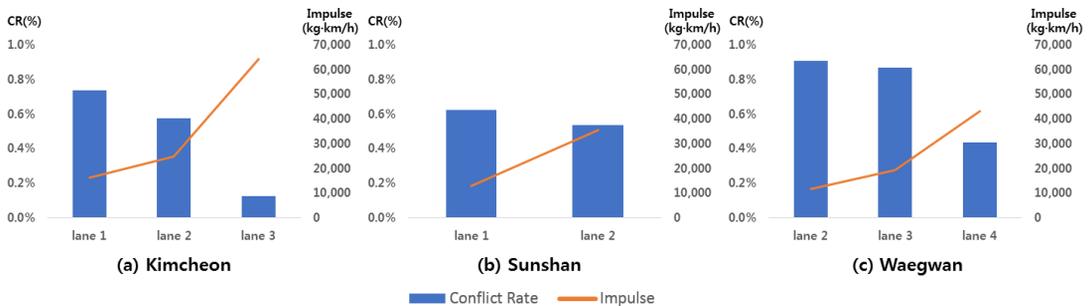
한 결과 사고심각도 상위 5개의 추종관계 모든 경우에 선행차량 혹은 후행차량의 차종이 중형, 대형화물차 인 것으로 확인되었다.



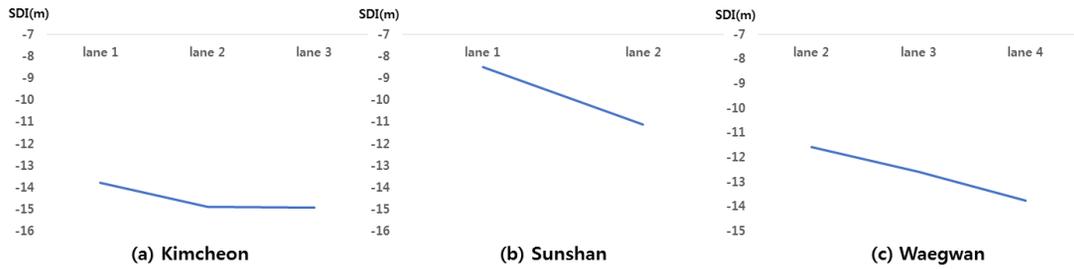
<Fig. 5> Impulse Estimation Results

2. 차로별 교통안전성 분석 결과

분석 대상 구간의 각 차로별 상충률, SDI, 충격량을 차로별로 구분하여 비교 분석하였다. 구간별 상충률과 충격량 추정 결과는 <Fig. 6>에 제시하였고 SDI 분석 결과는 <Fig. 7>에 제시하였다. 김천, 선산 구간의 차로별 교통 안전성 분석 결과 상충률, 충격량은 차로별로 차이가 있는 것으로 나타났다. 왜관 구간의 차로별 교통 안전성 분석 결과 차로별 상충률과 SDI는 상위차로보다 하위차로에서 낮은 값을 나타내는 것으로 분석되었고, 충격량은 상위차로 보다 하위차로에서 높은 추정 값을 갖는 것으로 분석되었다. 위의 결과를 종합하여 보면 전체 대상 구간에서 상위차로보다 하위차로의 상충률이 낮으나 사고로 이어질 개연성이 높은 상충이 많이 발생하고 사고 발생 시 심각도도 높을 것으로 판단된다.



<Fig. 6> Conflict Rate and Impulse Analysis Results by Lane



〈Fig. 7〉 SDI Analysis Results by Lane

3. 사고 자료와 비교 결과

본 절에서는 분석에 사용한 SSM와 실제 해당 구간의 교통사고 자료 간 상관성을 분석하고자 하였다. 2015년 김천, 선산, 왜관 구간에서의 사고 자료와 본 연구에서 제시한 효과척도를 이용하여 안전성을 분석한 결과를 비교하였고 결과를 <Table. 4>에 제시하였다. 사고 개연성 측면에서 비교한 결과, 상충률 평균과 사고 건수의 순위는 동일한 것으로 나타났으나, 차량 1만대당 사고건수를 이용한 순위와 상충률 순위는 차이가 있는 것으로 분석되었다. 또한 사고 심각도 측면에서 충격량의 평균을 이용한 지역 순위와 교통사고 위험도를 이용한 지역 순위는 같은 것으로 나타났으나, EPDO를 이용하여 지역 순위를 산출하는 경우 충격량 순위와 상이한 결과가 나타나는 것으로 분석되었다.

〈Table 4〉 Comparisons of Crash Data and SSM Data at WIM Installation Sections

Sections	Number of Crash(cases)	CTVKT ¹⁾ (cases)	EPDO	Degree of Accident Risk	Average Conflict Rate(%)	Average Impulse (kg · km/h)
Kimcheon	18	5	26	0.67	0.5	24,522
Sunshan	35	6	49	0.43	0.6	20,401
Waegwan	38	3	42	0.18	0.8	17,282

VI. 결 론

본 연구에서는 고속측중기 수집 정보를 활용하여 고속도로 구간의 안전성을 사고 개연성과 사고 심각도 측면에서 분석하였다. 또한 개별 차량의 추종 관계 별 교통안전성을 평가하는 방안을 제시하였다. 사고 개연성과 사고 심각도를 평가하기 위한 효과척도를 선정하기 위하여 교통류 안전성을 평가한 기존 문헌을 고찰하였고 사고 개연성 측면에서는 SDI와 상충률을 효과척도로 제시하였고 사고 심각도 측면에서는 충격량을 효과척도로 제시하였다.

고속측중기 시범 운영 대상 3개 구간에 대하여 본 연구에서 제시한 안전성 평가 방안을 적용하여 추종관계 별 교통 안전성 평가 결과를 제시하였다. 추종관계 별 교통 안전성 평가 결과 9종 대형 화물 차량이 교통 안전성 감소에 가장 영향을 많이 끼치는 것으로 판단되었고, 사고 심각도 분석 결과 화물 차량 간 사고가 발생하는 경우 사고 피해가 클 것으로 예상되었다. 차로별 교통 안전성 평가 결과, 모든 분석 대상 구간에서

1) CTVKT : Crashes per ten thousand vehicle-kilometer of travel

상위차로보다 하위차로의 상충률이 낮으나 사고로 이어질 개연성이 높은 상충이 발생 하고 사고 발생 시 심각도 또한 높을 것으로 판단되었다. 이는 상위차로의 교통량 보다 하위차로의 교통량이 많아 상충은 적게 발생 하지만 하위차로에서는 화물차량의 교통량이 많아 사고로 이어질 개연성이 높은 상충이 발생하고 사고 시에 사고 심각도 또한 높게 추정된 것으로 판단된다. 마지막으로 연구에서 제시한 효과적도를 사고 자료와 비교하여 일반화 하고자 하였다. 특히 실제 사고 자료에서 제시된 사고건수 순위와 상충률 순위가 동일하였고 교통사고 위험도와 충격량 순위가 동일하였다. 이는 연구에서 제시한 SSM이 일반화 · 객관화 될 가능성을 내포하고 있는 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 고속측중기의 활용성을 극대화하기 위하여 고속측중기 자료를 이용해 후미추돌 위험도를 분석하는 기법을 제시하였다는 데 의의를 둔다. 본 연구에서 제시한 방법론을 활용한다면 향후 고속측중기가 확대 운영되는 경우 도로 운영 · 관리자가 고속도로 교통류 내의 추종관계 별 후미추돌 위험도를 분석하고 안전성을 평가하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 나아가 분석 대상 구간 내의 교통안전 위해차종을 선별하고 이에 대한 계도 방안을 수립하는 데 기초자료로 활용 가능한 것으로 기대된다. 또한 도로 운영 · 관리자가 수립한 교통류 관리전략이 안전성 측면에 미치는 영향에 대하여 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 향후 연구 시에는 다음과 같은 내용을 포함하여 고속측중기 자료를 이용한 교통류 안전성 평가 방식의 다양성을 제고할 필요성이 있다. 첫째, 본 연구에서의 차량 속도는 검지된 속도를 유지하고 주행하는 것으로 가정하였다. 그러나 이는 실제 주행 특성을 모두 반영하지 못한다. 따라서 고속측중기 설치 위치 기준 상류부와 하류부의 지점검지기 자료와 연계한 분석을 수행한다면 실제 차량의 주행 특성 및 가 · 감속을 고려한 고속도로 안전성 평가가 수행 가능할 것으로 판단된다. 둘째, 본 연구에서 고속측중기 측정 자료 수집에 한계사항이 존재하여 공간적 범위는 고속측중기 시범 운영 3개 구간(김천, 선산, 왜관)으로 한정하였고 시간적 범위는 2015년 3월로 제한적으로 설정되어 본 연구에서 제시한 안전성 평가 결과 예시가 전체 구간 및 모든 시간적 범위를 대표하는 결과를 나타내지 못하는 한계점이 존재한다. 또한 실제 사고 자료와의 비교에 있어서도 따라서 향후 고속측중기 자료 수집이 용이해진다면 공간적 및 시간적 분석 대상 범위를 확대하여 보다 설명력 있는 고속도로 안전성 평가 결과를 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 셋째, 법률 위반 행위(과적, 과속, 지정차로 위반 등)와 사고 개연성, 사고 심각도 간 관계를 도출한다면 법률 위반 행위가 고속도로 안전성에 미치는 영향을 파악 할 수 있고, 교통안전 위해요소를 판별하여 고속도로 교통안전 개선대책을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 넷째, 향후 사고발생 유의 변수인 운전자 요소, 교통조건, 도로 및 환경 조건들과 교통 안전성 평가 지표와의 분석을 통해 사고발생 개연성 증가요인을 도출하고 상충분석을 기반으로 하여 교통안전 위해요소의 존재여부를 확인할 수 있는 방안을 제시한다면 도로 관리자의 교통 운영 관리 정책 설정 시, 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was also supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea government(MSIP) (NRF-2017R1A2B4005835).

REFERENCES

Cafiso S.(2010), “Development of comprehensive accident models for two-lane rural highways using exposure, geometry, consistency and context variables,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 42,

- no. 4, pp.1072-1079.
- Chin H. C.(1997), "Measurement of traffic conflicts," *Safety Science*, vol. 26, no. 3, pp.169-185.
- Choi S.(2013), "Effects of Weather and Traffic Conditions on Truck Accident Severity on Freeways," A. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, vol. 2013, no. 33.3 pp.1105-1113.
- Choi Y. H.(2012), "Overloading Control Effectiveness of Overweight Enforcement System using High-Speed Weigh-In-Motion," *The Korean Society of Road Engineers*, vol. 14, no. 5, pp.179-188.
- Choi Y. H.(2016), "An Effectiveness Analysis of Pilot Enforcement for Overweight Vehicles(Trucks) using High-Speed Weigh-In-Motion System," *J. Korea Inst. Intell. Transp. Syst.*, vol. 15, no. 2, pp.63-73.
- Gettman D.(2003), "Surrogate safety measures from traffic simulation models," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1840, pp.104-115.
- Gil H. B.(2013), "Characteristics of Heavy Vehicles Using Expressway Networks Based on Weigh-in-motion Data," *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, vol. 33, no. 5, pp.1731-1740.
- Gyeonggi-do Transportation Data Base Center(2017), *Transportation Analysis Technical Report*, p.8.
- Jacob B.(2010), "Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology," *IATSS research*, vol. 34, no. 1, pp.9-15.
- Kim J. H.(2010), "Designing a Warning Information System based on Real-time Traffic Conflict Analysis," Hanyang University.
- Kim S.(2016), "Exploring the association of rear-end crash propensity and micro-scale driver behavior," *Safety science*, vol. 89, pp.45-54.
- Korea Expressway Corporation(2015), *Highway Accident data*
- Kwon S. M.(2010), "Development and Application of the High Speed Weigh-in-Motion for Overweight Enforcement," *The Journal of Korean society of road engineers*, vol. 11, no. 4, pp.69-78.
- Kwon S. M.(2010), "Improvement of the High Speed Weigh-in-Motion for Overweight Enforcement," *Proceeding of 10th Conference of The Korea Institute of Intellignet Transport Systems*, pp.151-156.
- Kwon S. M.(2012), "Overloading Control Effectiveness of Overweight Enforcement System using High-Speed Weigh-In-Motion," *International Journal of Highway Engineering*, vol. 14, no. 5, pp.179-188.
- Laureshyn A.(2010), "Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 42, no. 6, pp.1637-1646.
- Li Z. Z.(2017), "Incorporating Traffic Control and Safety Hardware Performance Functions into Risk-based Highway Safety Analysis," *PROMET-Traffic&Transportation*, vol. 29, no. 2, pp.143-153.
- Mahmoudabadi A.(2013), "Improving the efficiency of weigh in motion systems through optimized allocating truck checking oriented procedure," *IATSS research*, vol. 36, no. 2, pp.123-128.
- Mahmud S. S.(2017), "Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review

of recent developments and research needs,” *IATSS Research*.

- Oh C.(2006), “A method for identifying rear-end collision risks using inductive loop detectors,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 38, no. 2, pp.295-301.
- Oh J. H.(2017), “A Study on Estimation for Freight Transportation Indices on Expressway Using TCS and WIM Data,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 35, no. 5, pp.458-467.
- Park H. H.(2018), “Development of a lane change risk index using vehicle trajectory data,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 110, pp.1-8.
- Van der Horst R.(1993), “Time-to-collision and collision avoidance systems,” pp.109-121.
- Vogel K.(2003), “A comparison of headway and time to collision as safety indicators,” *Accident analysis & prevention*, vol. 35, no. 3, pp.427-433.
- Wang J.(2004), “An overview of research on weigh-in-motion system,” *In Intelligent Control and Automation, 2004, WCICA 2004, Fifth World Congress on*, vol. 6, pp.5241-5244.
- Yotaro N.(2017), “A new system for vehicle weight enforcement,” *ITS World Congress 2017*.
- Zhang Z.(2017), “Optimal System Design for Weigh-In-Motion Measurements Using In-Pavement Strain Sensors,” *IEEE Sensors Journal*, 2017.