

커넥티드 차량 보급률 기반 고속도로 돌발상황 검지시간 추정

Estimation of Incident Detection Time on Expressways Based on Market Penetration Rate of Connected Vehicles

남 상 기* · 정 연 식** · 김 회 경*** · 김 원 길****

* 주저자 : 영남대학교 도시공학과 박사과정

** 교신저자 : 영남대학교 도시공학과 부교수

*** 공저자 : 동아대학교 도시공학과 교수

**** 공저자 : 국토교통과학기술진흥원 모빌리티본부 PD

Sanggi Nam* · Younshik Chung* · Hoekyoung Kim** · Wonggil Kim***

* Dept. of Urban Planning and Eng., Univ. of Yeungnam

** Dept. of Urban Planning and Eng., Univ. of Dong-A

*** Dept. of Mobility, KAIA

† Corresponding author : Younshik Chung, tpgist@yu.ac.kr

Vol. 22 No.3(2023)
June, 2023
pp.38~50

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.3.38>

Received 2 May 2023
Revised 16 May 2023
Accepted 26 May 2023

© 2023. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

최근 인공지능 (Artificial Intelligence: AI) 기술 발전으로 폐쇄회로 TV(Closed-Circuit television: CCTV)와 같은 영상 센서에 AI 기술을 도입하여 특정 돌발상황을 검지하고 있으나 대부분 고정식 장비 기반으로 돌발상황 검지가 진행되어왔다. 따라서 모든 도로 공간에 대한 돌발상황 검지에는 한계가 존재해왔다. 그러나 영상 센서와 edge-computing 기술 등의 발전으로 이동식 영상정보 수집 및 분석 기술이 확산되고 있다. 본 연구는 이러한 이동식 영상 수집 및 분석 장비(커넥티드 차량)의 도입 수준에 따른 돌발상황 검지시간 감소효과를 추정하는 것이 목적이다. 이를 위해 2021년 경부고속도로 수원지사에서 수집된 돌발상황 발생 건수 자료를 활용하였다. 분석 결과 편도 2차로 고속도로는 커넥티드 차량의 보급률(Market Penetration Rate: MPR)이 4% 이상, 편도 3차로 고속도로는 3% 이상이면 돌발상황 검지 시간이 1분 이하로 나타났고, 편도 2차로와 편도 3차로 고속도로에서 MPR이 각각 0.4% 이상, 0.2% 이상이면 한국도로공사에서 발표한 평균 돌발상황 검지시간 보다 감소하는 것으로 나타났다.

핵심어 : 커넥티드 카, 이미지 검지, 돌발상황 검지시간, MPR, 미시적 교통 시뮬레이터

ABSTRACT

Recent advances in artificial intelligence (AI) technology have enabled the integration of AI technology into image sensors, such as Closed-Circuit Television (CCTV), to detect specific traffic incidents. However, most incident detection methods have been carried out using fixed equipment. Therefore, there have been limitations to incident detection for all roadways. Nevertheless, the development of mobile image collection and analysis technology, such as image sensors and edge-computing, is spreading. The purpose of this study is to estimate the reducing effect of the incident detection time according to the introduction level of mobile image collection and analysis equipment (or connected vehicles). To carry out this purpose, we utilized data on the number of

incidents collected by the Suwon branch of the Gyeongbu expressway in 2021. The analysis results showed that if the market penetration rate (MPR) of connected vehicles is 4% or higher for two-lane expressway and 3% or higher for three-lane expressways, the incident detection time was less than one minute. Furthermore, if the MPR is 0.4% or higher for two-lane expressways and 0.2% or higher for three-lane expressways, the incident detection time decreased compared to the average incident detection time announced by the Korea Expressway Corporation for both two-lane and three-lane expressways.

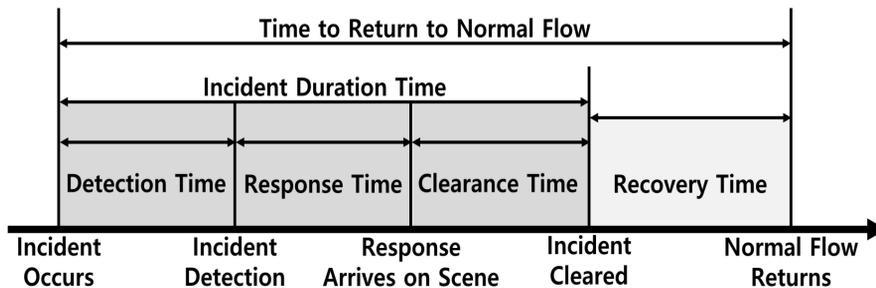
Key words : Connected Vehicle, Image Detection, Incident Detection Time, Market Penetration Rate, Microscopic Traffic Simulator

I. 서 론

1. 연구 배경 및 목적

일반적으로 도로에서 발생하는 혼잡은 반복적으로 발생하는 혼잡과 비 반복적으로 발생하는 혼잡으로 구분된다. 반복적으로 발생하는 혼잡은 교통 수요 대비 도로의 용량 부족으로 인해 발생하는 혼잡을 말하고 비 반복적으로 발생하는 혼잡은 교통사고, 차량의 고장, 도로 작업 등과 같이 도로 내 돌발상황으로 인해 발생된다(Chung et al., 2010). 2007년 OECD(Organization for Economic Cooperation and Development)에서 발표한 보고서에 의하면, 독일, 미국, 프랑스는 각각 전체 혼잡의 14%, 60%, 64%가 비 반복적 혼잡에 의한 것으로 나타났다(OECD, 2007). 이에 따라 많은 국가들은 도로에서 발생하는 돌발상황을 신속하게 검지하기 위해 다양한 방법을 시도해왔다.

이러한 돌발상황은 시간의 흐름에 따라 검지/제보시간, 대응시간, 처리시간, 회복시간까지 4요소로 구분된다(Garib et al., 1997; Nam and Mannering, 2000; Chung et al., 2007). <Fig. 1>에 제시된 바와 같이, 돌발상황의 검지/제보시간은 돌발상황 발생부터 확인까지를 의미한다. 돌발상황 검지/제보시간의 감소는 골든아워(golden hour) 확보, 교통 혼잡 및 2차 사고 발생 가능성 감소 등에 영향을 미친다. 이에 따라 신속한 돌발상황 검지를 위한 다양한 방법을 시도해왔다. 최근에는 다양한 매체(제보, 순찰차량, 센서기반 돌발상황검지 알고리즘 등)를 통해 돌발상황을 검지하고, 도로변에 설치된 CCTV를 통해 확인하는 방식으로 진화하였다. 2021년 한국도로공사에서 발표한 자료에 따르면 2018-2020년 고속도로 평균 교통사고 검지/제보시간을 12.6분으로 제시하였다(Korea Expressway Corporation, 2021). 따라서 현재 고속도로에서 활용하는 검지 방식에 비



<Fig. 1> The components of incident duration (source: Chung et al., 2007)

해 보다 신속한 검지가 요구된다.

최근 AI 기술의 발전으로 CCTV와 같은 영상 센서에 AI 기술을 도입하여 돌발상황을 실시간으로 검지하고 있다(Ren et al., 2017; Moylan et al., 2018). 이들 방식의 대부분은 CCTV와 같이 대부분 도로의 특정 지점에 설치하여 운영되기 때문에, 장비의 검지영역 내에서 발생한 돌발상황은 실시간으로 검지가 가능하지만, 영역 이외 공간에서 발생한 돌발상황은 검지가 불가능하다는 한계가 존재한다. 최근 영상분석 기술의 발전으로 이러한 영상 분석은 센터에서 뿐 아니라 차량 내(혹은 edge-computing)에서도 가능해 졌다. 즉, 현재 고정식으로 운영되는 돌발상황 검지 장비/기능을 차량에 설치하여 주행 중 돌발상황 검지가 가능하며, 결과적으로 기존 고정식 돌발상황 검지 시스템의 공간적 한계 극복이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구의 목적은 영상수집 및 분석 기술이 탑재된 차량(커넥티드 차량)의 도입 수준에 따른 돌발상황 검지시간 감소효과를 추정하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 미시적 시뮬레이션 모델인 VISSIM을 활용하였고, 2021년 한국도로공사 수원지사에서 발생된 돌발상황 자료를 입력자료로 활용하였다. 결과적으로 커넥티드 차량의 증가에 따른 돌발상황 검지시간의 단축 효과를 분석하여 시사점을 도출하고자 하였다.

2. 연구의 구성

본 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 도로에 특정 차량의 보급률(Market Penetration Rate: MPR) 증감 관련 연구를 고찰하여 시사점을 제시하였다. 3장에서는 커넥티드 차량 기반 돌발상황 검지기술에 대하여 검토하였다. 4장에서는 시뮬레이션의 환경 구축과 시뮬레이션 파라미터에 대해 정리하였다. 5장에서는 시뮬레이션 분석 결과를 제시하였고, 마지막으로 6장에서는 연구의 결과와 한계점을 제시하였다.

II. 문헌고찰

1. 특정 차량 MPR의 효과분석

Hong et al.(2008)은 신뢰성 있는 구간교통정보 생산을 위한 V2V(Vehicle to Vehicle Communication) 기반 교통정보시스템의 요구사항을 분석하였다. 이를 위해 미시적 시뮬레이션 모형인 Aimsun을 활용하였으며, 성능평가 지표로 오차의 정도를 백분율로 나타내는 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 적용하였다. 분석 결과 차량간 통신이 가능한 차량의 MPR이 5% 일 때, 통행시간 오차가 약 3.7%정도로 분석되어 낮은 MPR에도 시스템을 효과적으로 운영할 수 있을 것이라고 주장하였다.

Park et al.(2009)은 교통정보 시스템에서 산출된 구간 통행시간의 정확도를 평가하여 RSE(Road-Side Equipment)의 적정 설치 간격을 도출하고자 하였다. 연구를 위해 미시적 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 활용하였으며, 시뮬레이션 파라미터로 Time Window를 30초, 60초, 180초, 무선통신이 가능한 센서가 설치된 차량의 MPR을 5%, 10%, 20%, 30%, 50% 값을 적용하여 구간 통행시간을 산출하였다. 분석 결과 정상 교통류에 선 Time Window가 30초일 때는 RSE 설치간격이 2km, MPR이 50%일 때, Time Window가 60초, 180초 일때는 RSE 설치간격이 1.5km, MPR이 50%일 때 산출된 구간통행시간 정확도가 가장 높았고, 혼잡교통류에서는 정상 교통류 정확도보다 떨어지는 것으로 나타났다.

Li et al.(2013)은 커넥티드 차량의 MPR에 따라 대기열 길이를 추정하는 알고리즘을 개발하고자 하였다. 이들은 분석을 위해 미시적 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 활용하였으며, 성능평가 지표로 오차의 정도를 백

분율로 나타내는 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 적용하였다. 분석 결과 MPR이 10%일 때 MAPE는 60.82%, 50%일 때, 17.27%, 90%일 때 4.29%로 MPR이 높아질수록 MAPE가 낮아지는 것으로 나타났다.

Nagle and Gayah(2014)는 프로브 차량 데이터와 고정식 검지기의 결합을 통해 교통량, 밀도와 같은 교통 특성에 대해 실시간 추정하는 연구를 진행하였다. 성능 평가 지표로는 RMSE(Root Mean Square Error)를 활용하였고, 미시적 시뮬레이션 모형인 Aimsun 기반 프로브 차량 MPR을 5%에서 75%까지 증가시키면서 RMSE의 변화를 분석하였다. 분석 결과 프로브 차량의 MPR이 5%일 때, 교통량의 RMSE는 33.66대/시로 나타났고, 밀도의 RMSE는 2.02대/마일로 나타났다. 프로브차량 MPR을 40%로 증가시키면 교통량의 RMSE는 9.46대/시, 밀도의 RMSE는 0.57대/마일로 나타났고, 75%까지 증가 시 교통량의 RMSE는 4.49대/시, 밀도의 RMSE는 0.27대/마일로 분석되어 프로브차량의 MPR이 증가하면 교통량 및 밀도의 오차가 모두 감소하는 것으로 나타났다.

Seo et al.(2015)은 프로브 차량이 앞차와 간격을 측정할 수 있다고 가정하고 프로브 차량 데이터로부터 교통량·밀도·속도를 추정하는 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 차간 간격과 차량 위치를 추적할 수 있는 커넥티드 차량을 현장에 적용하여 직접 실험을 하였다. 실험 결과 최대 MPR은 3.5%이며, 이들 차량의 무작위로 선택하여 0.2%의 MPR을 각각 분석하였다. 또한, 시간(5분 or 60분) 및 거리(0.5km or 11km)에 따라 시나리오를 구분하여 RMSPE(Root Mean Square Percentage Error)를 성과지표로 활용하였다. 분석 결과 프로브 차량의 MPR이 3.5%일 때 대기행렬 정보를 정확히 추정하였으나 5분 흐름과 같은 정보에 대해서는 정확도가 떨어졌다. 반면, 프로브 차량 MPR이 0.2%일 때, 시간당 교통량 정보를 정확히 추정하는 것으로 나타났다.

Chang et al.(2018)은 교통류 측면에서 연쇄추돌 교통사고와 긴급 교통사고 정보 전파를 구현하기 위하여 미시적 시뮬레이션 모형인 Paramics와 차량간 통신(IVC: Inter-Vehicle Communication) 시뮬레이션을 병렬로 연결한 시뮬레이션 프레임워크를 개발하고, 개발된 방법론을 이용하여 차량간 긴급 교통사고 정보전파를 실험적으로 해석함으로써 연쇄추돌 교통사고 감소효과를 분석하였다. 분석 결과 IVC 기반 연쇄추돌 감소 효과는 IVC 장비의 PR(Penetration Rate)이 0.1 이상 일 때, 효과를 기대할 수 있고, 연쇄 추돌 차량대수를 50~75%까지 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Mohammad et al.(2019)은 프로브 차량 데이터만 이용하여 신호 링크 접근에 대한 총 차량 수를 추정하는 것을 목적으로 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 미시적 시뮬레이션 모형인 Integration을 적용하여, 차량 수 추정을 위한 적정 프로브 차량의 MPR을 평가하였다. 즉, MPR을 10%에서 90%까지 증가함에 따라 AKF(Adaptive Kalman Filter) 모델과 KF(Kalman Filter) 모델, AKFNN(Adaptive Kalman Filter Neural Network) 모델, Tuned AKFNN 모델 기반 차량 차량 수 추정 결과를 평가하였고, 평가지표로는 RMSE(Root Mean Square Error)를 활용하였다. 분석 결과 프로브 차량 MPR이 10% 일 때 KF, AKF, AKFNN, Tuned AKFNN 모델은 각각 6.0대, 5.3대, 3.7대, 3.3대로 나타났고, 50% 일 때, 4.1대, 3.6대, 2.7대, 2.1대, 90%일 때, 1.6대, 2.0대, 1.8대, 1.5대로 나타나 MPR이 증가할수록 예측값과 실제 값의 평균 차이가 줄어드는 것으로 분석되었다.

Kim et al.(2019)은 첨단 운전자 보조 시스템(Advanced Driver Assistance System: ADAS) 차량 점유율을 포함하여 다양한 파라미터에 따른 추정치 오차를 분석함으로써 연속류 도로의 교통류 추정을 위해 오차가 최소화되는 운영방식을 제시하는 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 미시적 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 적용하여, ADAS 장비 장착 차량의 MPR(5% ~ 50%)과 교통량에 따라 추정 결과를 분석하였으며, 교통류 추정의 평가지표로는 표준 평균 제곱근 편차(NRMSE: Normalized Root Mean Square Error)를 활용하였다. 분석 결과 서비스수준 (Level of Service: LOS) A 혹은 B와 같이 저밀도 교통류의 밀도 추정치는 신뢰할 수 없는 것으로 제시하였으며, 이외에는 MPR이 높을 때 추정치의 신뢰성이 개선되는 것으로 제시하였다.

Islam et al.(2021)은 도로에서 교통상황의 관측 수준에 따른 감응 신호제어 성능을 평가하였다. 연구를 위

해 미시적 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 활용하였으며, 도로 교통상황 관측을 위한 루프 검지기, 커넥티드 차량의 MPR에 따른 감응신호 제어의 효과를 평가하였다. 성능 평가 지표로는 통행시간의 80번째 백분위수와 50번째 백분위 수의 비율인 LOTTR(the Level Of Travel Time Reliability) 지수를 활용하였다. LOTTR 지수가 가장 높게 나타난 경우는 일반 승용차가 커넥티드 차량이고 MPR이 10% 수준일 때, 1.181로 가장 높게 나타났고, 가장 낮게 나타난 경우는 커넥티드 차량과 루프검지기를 함께 활용하고 커넥티드 차량은 대중교통 버스이며 MPR이 40% 수준일 때, 1.030으로 가장 낮게 나타났다.

Lim et al.(2022)은 ADAS 기반 차간거리 데이터 기반으로 교통 밀도 추정 방법을 제시하였다. 교통 밀도 추정을 위해 미시적 시뮬레이션인 VISSIM을 활용하였고 프로브 차량에서 수집한 차간거리 데이터와 차량 추적 데이터를 활용하여 총 이동시간을 측정하여 교통 밀도를 추정하였다. 또한 ADAS 장착 차량의 MPR을 10%부터 90%까지 10%씩 변화를 주면서 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)와 RMSE(Root Mean Squared Error) 측정을 통해 정확도를 분석하였다. 분석 결과 MPR이 50% 이상일 때, 정확도는 90% 이상으로 나타났고, 도로에서 운행되는 차량의 절반에 해당하는 프로브 차량을 활용하여 정확한 교통 밀도 추정이 가능한 것으로 나타났다.

2. 문헌고찰 요약

<Table 1>은 문헌고찰 결과를 요약한 것이다. 표에 제시된 바와 같이, Seo et al.(2015)이 수행한 연구를 제외하고 모든 연구는 미시적 시뮬레이션 모형을 활용하여 MPR 수준에 따른 교통 혹은 도로에서의 결과를 분석하였으며, 미시적 시뮬레이션은 주로 VISSIM이 활용되었다. 또한, MPR의 수준 변화 뿐 아니라, 교통 소통 수준(혹은 LOS)을 동시에 고려하여 다양한 교통환경 하에서의 해당 기술의 효과를 분석하고자 하였다.

<Table 1> Summary of Literature Review

Researchers (year)	Purpose of Study	Study Methodology	Findings
Hong et al. (2008)	Present a UBIquitous PRObe vehicle Surveillance System (UBIPROSS) using vehicle-to-vehicle (V2V) wireless communications.	Microscopic traffic simulator (Aimsun)	The system can be operated effectively at low MPR and Real-time traffic monitoring is possible than existing systems.
Park et al. (2009)	Present a novel decentralized traffic information system based on vehicle infrastructure integration (VII)	Microscopic traffic simulator (VISSIM)	It is expected that the proposed methodology will be a valuable precursor to implementing capability enhanced next generation traffic information systems under the forthcoming ubiquitous transportation environment.
Li et al. (2013)	Develop a probe trajectory data and loop detector data, and the situation in which the data fusion method is expected to work well is investigated.	Microscopic traffic simulator (VISSIM)	The data fusion method slightly improved the performance of the input - output model with ideal loop detector data and fairly improved the accuracy of the event-based method with a 70% penetration rate.
Nagle and Gayah (2014)	Estimate the relevant networkwide traffic metrics, which include the average flow, density, speed, accumulation, and exit flow of vehicles.	Microscopic traffic simulator (Aimsun)	The estimation method proposed here appears to be accurate during the entire range of traffic states, including free flow, congestion, and even unstable periods characterized by hysteresis phenomena.
Seo et al.	Estimate method for obtaining	Field	The result showed that the proposed method could

Researchers (year)	Purpose of Study	Study Methodology	Findings
(2015)	volume-related variables by assuming that a probe vehicle can measure the spacing to its leading one.	Experiment	accurately estimate the 5 min and hourly traffic volumes with probe vehicle penetration rate of 3.5% and 0.2%, respectively.
Chang et al. (2018)	Develop the parallel platform of microscopic vehicle and IVC communication simulators and then analyse the effects of IVC on the reduction of the second collision related to a series of vehicles.	Microscopic traffic simulator (Paramics)	CCA can be effectively reduced to 40~60% and 80~82% at the penetration rates of 10% and 50%, respectively.
Mohammad et al. (2019)	Present a novel model for estimating the number of vehicles along signalized approaches.	Microscopic traffic simulator (Integration)	Both models (AKF and AKFNN) produce high estimation accuracy when compared with the state-of-the-art KF model.
Kim et al. (2019)	Investigate the feasibility of the ADAS vehicle reflecting the distance error of image-based vehicle identification technology as a means to estimate the traffic flow through the normalized root mean square error (NRMSE)	Microscopic traffic simulator (VISSIM)	Although it is not possible to accurately estimate the traffic flow with the ADAS camera, its applicability will be expanded by improving its performance and functions.
Islam et al. (2021)	Quantify the effects of traffic observability on network-level performance, traffic progression, and travel time reliability, and to quantify those effects for vehicle classes and major and minor directions in an arterial corridor.	Microscopic traffic simulator (VISSIM)	Integrating 10% of CV data with loop detector data in the adaptive signal control improved traffic performance and travel time reliability.
Lim et al. (2022)	Develop a spatiotemporal traffic density estimation method based on the advanced driver assistance system (ADAS) Probe data.	Microscopic traffic simulator (VISSIM)	This practical approach is expected to mitigate the burden of density estimation, particularly in future road systems in which ADAS and autonomous vehicles are prevalent.

Ⅲ. 커넥티드 기반 돌발상황 검지 기술

본 연구에서 고려하는 돌발상황 검지 기술은 차량 내 영상검지 및 분석이 가능한 시스템이 장착되어, 운행 중 도로 주변의 상황을 실시간으로 분석하여 돌발상황을 판단하는 기술을 의미한다. 이러한 기술을 활용하여 도로의 포트홀(pothe)과 같은 특정 돌발상황 검지는 상용화되었으며, 교통사고와 같이 학습 자료가 제한적인 돌발상황 유형은 상용화에는 아직 한계가 있는 것으로 검토되고 있다(Korea Expressway Corporation, 2021). 그러나 교통사고와 같이 학습에 제한적인 돌발상황 유형의 학습자료가 충분히 확보되어 연구된다면, 기존 한계는 극복될 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에 고려된 차량 내부에 설치된 돌발상황 검지 시스템은 협각 렌즈를 장착한 2채널 영상 장비를 탑재하고 있으며, 이 장비는 차로 폭이 좁은 일반도로의 경우 최대 4개 차로까지 검지가 가능하며, 차로 폭이 넓은 고속도로의 경우 3개 차로까지는 신뢰성 있는 검지가 가능한 것으로 알려져 있다(Korea Expressway Corporation, 2021). 또한 이 장비는 AI 영상분석을 통해 돌발상황 검지 후 정보 전송이 가능하며, AI 분석 속도는 12frame/초로 시속 100km 주행 시 약 2.3m 마다 AI 분석이 가능하다. <Fig. 2>는 이러한 장비

가 탑재된 커넥티드 차량 기반 실시간 돌발상황 검지 시스템을 제시한 것이다. 본 연구는 이러한 돌발상황 검지 시스템의 검지율이 100%라는 가정하에 고속도로에 이들 차량의 MPR 증가와 도로의 교통상황을 동시에 고려하여 최적의 MPR을 판단하고자 한다.



<Fig. 2> Connected Vehicle System for Traffic Crash Detection



<Fig. 3> Example of Incident Detection Using an In-vehicle Connected System

IV. 시뮬레이션 환경 구축

1. 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 연속류 도로에서 커넥티드 차량의 MPR 증가와 교통상황에 따른 돌발상황 검지시간 단축 효과 평가를 위해 대표적인 미시적 시뮬레이션 모형인 PTV사의 VISSIM을 활용하였다. 시뮬레이션 구동을 위해 제한속도가 100km/h인 연속류 도로 4.4km를 대상 구간으로 선정하였으며, 도로의 차로 수는 편도 2차로 및 편도 3차로로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. 돌발상황은 1차로에서 발생되나, 발생 지점은 무작위로 발생시켰다. 돌발상황 구현을 위해 활용한 자료는 “2020년 한국도로공사 수원지사 IC 구간별 돌발상황 발생 건수” 자료를 활용하였으며, 돌발상황 유형으로는 한국도로공사 교통관리시스템에서 정의한 고속도로 돌발상황 중 99%를 차지하는 6가지 유형(작업, 교통사고, 정차, 낙하물, 차량증가/정체, 보행자)을 포함하였으며, 돌발상황은 포아송(Poisson) 분포를 적용하여 무작위로 발생하는 것으로 가정하였다. 교통 소통 상황은 LOS A부터 LOS F까지 구분하여 시뮬레이션에 적용하였으며, 커넥티드 차량의 점유율은 0.1%에서 5%까지 증가 (0.1% ~ 1.0%: 0.1% 증가, 1.0% ~ 5.0%: 1.0% 증가)시키면서 돌발상황 검지시간을 분석하였다. 시뮬레이션은 24시간 구동하였으며, 각 시나리오별 10회 구동하여 도출된 결과의 평균값을 최종 결과 값으로 활용하였다. <Table 2>는 시뮬레이션 파라미터를 정리한 표이다.

<Table 2> Simulation Parameters

Road Network			
	Lanes	Section Distance	Speed Limit
Content	2-lanes, 3-lanes	4.4km	100km/h
Incident			
	Incident Location	Incident-occurred Lane	Incident Distribution
Content	Every 100m Interval	First Lane	Poisson Distribution
Scenario			
	Level of Service	MPR	
Content	LOS A, B, C, D, E, F	0.1% ~ 1.0% (Increased 0.1%) 1.0% ~ 5.0% (Increased 1.0%)	

2. 돌발상황 구현

본 연구에서는 돌발상황의 무작위 구현을 위해 포아송 분포를 활용하였다. 포아송 분포는 단위 시간 내에 돌발상황과 같은 특정 사건이 몇 번 발생할 것인가를 표현하는 이산 확률 분포이다. 이 분포는 정해진 시간 내에 특정 사건(예, 돌발상황)이 발생할 횟수에 대한 기댓값(혹은 평균)이 λ 라고 했을 때, 이 사건이 k 번 발생할 확률은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P(k; \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \dots\dots\dots (1)$$

<Table 3> Probability of Daily Incident Occurrence by Section (unit: %)

	Seoul direction	Busan direction
Anseong IC - Anseong JC (4.8km)	80.64	34.90
Ansung JC - Osan IC (13.3km)	246.64	38.70
Osan IC - Dongtan JC (4km)	100.32	114.13
Dongtan JC - Giheungdongtan IC (4.3km)	93.08	70.18
Giheungdongtan IC - Giheung IC (1.5km)	33.83	24.79
Giheung IC - Suwonsingal IC (4.4km)	335.75	123.42
Suwonsingal IC - Singal JC (2.6km)	68.33	161.73
Singal JC - Seoul TG (8.3km)	249.37	122.59
Seoul TG - Pangyo IC (3.6km)	58.35	32.94
Pangyo IC - Pangyo JC (1.1km)	84.52	43.62
Pangyo JC - Geumto JC (1.3km)	106.86	25.40
Geumto JC - Yangjae IC (6.8km)	32.93	62.55

이 식을 사용하여 구간별 하루 1회 돌발상황 발생확률을 계산하였고, 이를 기반으로 시뮬레이션에서 돌발상황을 무작위 발생시켰다. <Table 3>은 각 구간별 하루 1회 돌발상황 발생 확률을 나타낸 것이다. 각 구간별 하루 1회 돌발상황 발생 확률은 기흥IC-수원신갈IC 구간(서울방향)에서 335.75%로 가장 높게 나타났고, 이 값을 시뮬레이션 네트워크에 발생하는 돌발상황 구현 값으로 적용하였다.

V. 시뮬레이션 결과

1. 편도 2차로 고속도로

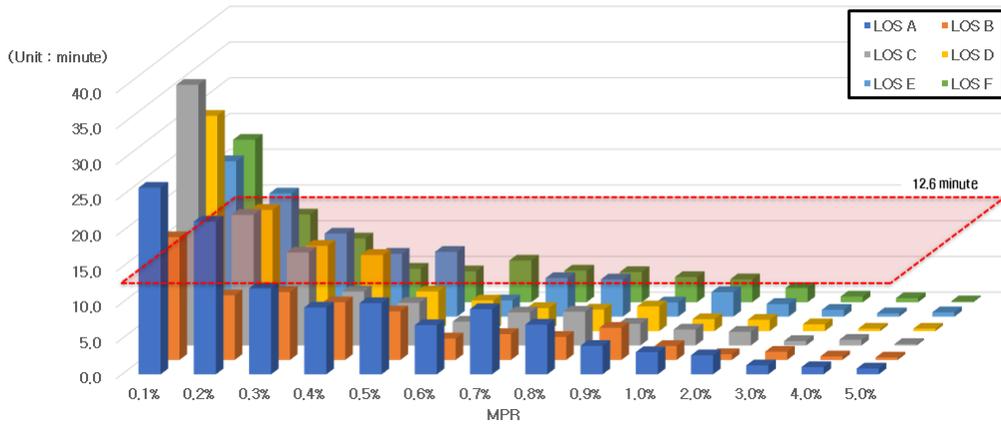
편도 2차로 고속도로 분석 결과 커넥티드 차량 MPR에 따른 돌발상황 검지시간 분석 결과 0.1분에서 36.5분 사이로 나타났으며, 커넥티드 차량 MPR이 증가할수록, 교통량이 증가할수록 더 신속한 검지가 가능한 것으로 나타났다. 특히 편도 2차로 고속도로에서는 커넥티드 차량의 MPR이 4.0% 이상으로 나타나면 교통량에 상관없이 돌발상황 검지 시간이 1분 이하로 나타나며, LOS D 이상의 교통량에서는 Probe 차량의 MPR이 3.0% 이상으로 나타나면 돌발상황 검지 시간이 1분 이하로 나타났다. 그러나 돌발상황 검지 시간이 선형적으로 감소하지는 않는데, 이는 돌발상황의 무작위 구현을 위해 적용한 포아송 분포에 의한 것으로 추정된다. 또한 국내 고속도로 하루 통행량 기준으로 몇 대의 커넥티드 차량이 필요인지 분석하였다. 2021년 기준 고속도로 일평균 교통량은 약 466만대 수준으로 나타났으며, 돌발상황 검지시간이 1분 이하로 나타나는 커넥티드 차량 MPR인 4% 이상은 약 186,400대 수준으로 나타났다. 또한 커넥티드 차량이 약 18,700대 수준이면 한국도로공사에서 발표한 교통사고 검지시간보다 더 신속한 검지가 가능한 것으로 나타났다.

또한 국내 사업용 차량의 이동식 영상 장비 설치 비율에 따른 효과에 대해 분석하였다. 결과적으로 2021년 기준 국내 사업용 차량 대수는 76만대(전체 차량의 3%)로 나타났고 고속도로를 운행하는 사업용 차량 비율 또한 전체 차량 대비 사업용 차량 비율과 같다고 가정하면, 전체 사업용 차량에 이동식 영상 장비 설치 시 검지시간은 0.6분에서 1.3분으로 분석되었다. 이는 한국도로공사에서 발표한 교통사고 검지시간인 12.6분과 비교해보면 매우 신속한 검지가 가능하다는 것을 보여준다. 또한 한국도로공사에서 발표한 교통사고 검지시간 보다 신속한 검지가 가능한 커넥티드 차량 MPR은 약 0.4% 이상(약 149,422대)으로 나타나면 교통량에 상관없이 기존에 비해 신속한 검지가 가능한 것으로 나타났다.

<Table 4> Simulation Results for Two-lane Expressway

(unit: minute)

		LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
MPR (%)	0.1	26.1	17.2	36.5	30.1	21.8	22.7
	0.2	21.4	9.0	18.3	17.0	17.2	12.3
	0.3	12.0	9.5	13.0	11.9	11.6	8.9
	0.4	9.4	8.1	7.6	10.7	8.8	4.7
	0.5	10.0	6.8	6.0	5.6	9.1	4.3
	0.6	6.9	3.0	3.3	4.3	2.3	5.8
	0.7	9.1	3.6	4.6	3.2	5.4	4.4
	0.8	7.0	3.2	4.7	3.0	5.2	4.2
	0.9	4.0	4.5	3.0	3.5	2.0	3.5
	1.0	3.1	1.9	2.0	1.7	3.4	3.2
	2.0	2.7	0.8	1.9	1.6	1.8	2.0
	3.0	1.3	1.1	0.6	1.0	1.0	0.8
	4.0	1.0	0.5	0.8	0.3	0.5	0.6
	5.0	0.8	0.3	0.2	0.3	0.6	0.1



<Fig. 4> Simulation Result for Two-lane Expressway

2. 편도 3차로 고속도로

편도 3차로 고속도로 분석 결과 커넥티드 차량 MPR에 따른 돌발상황 검지시간 분석 결과 0.2분에서 20.4 분 사이로 나타났으며, 편도 2차로 고속도로 시뮬레이션 결과와 같이 커넥티드 차량 MPR이 증가할수록, 교통량이 증가할수록 더 신속한 검지가 가능한 것으로 나타났다. 특히 편도 2차로 고속도로에 비해 돌발상황 검지시간이 더 낮게 나타났는데, 이는 편도 3차로 고속도로의 교통량이 더 많기 때문으로 추정된다. 커넥티드 차량의 MPR이 3.0% 이상으로 나타나면 교통량에 상관없이 돌발상황 검지시간이 1분 이하로 나타난다. 돌발상황 검지 시간이 선형적으로 감소하지 않는 것은 전술한 바와 같이 포아송 분포에 의한 것으로 추정된다. 또한 국내 고속도로 하루 통행량 기준으로 몇 대의 커넥티드 차량이 필요한지 분석하였다. 그 결과 1분

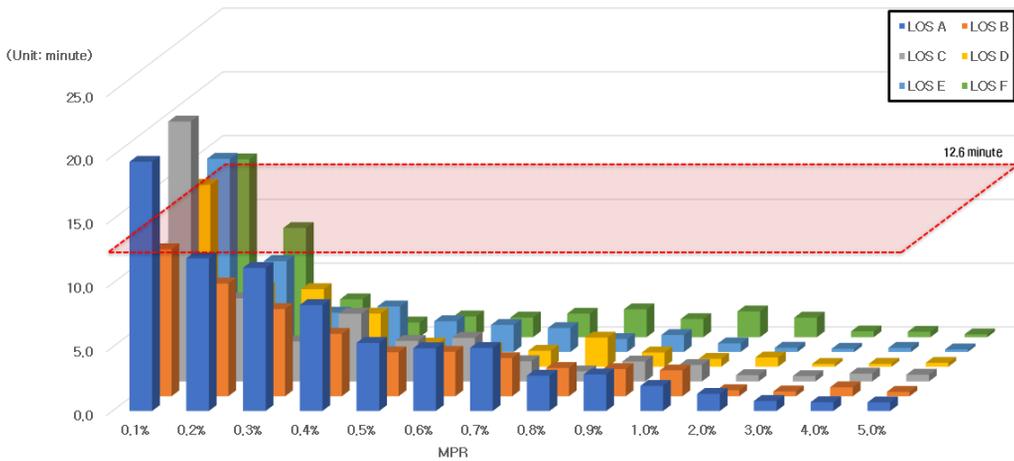
<Table 5> Simulation Results for Three-lane Expressway

(unit: minute)

		LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
MPR (%)	0.1	19.5	11.5	20.4	14.3	15.1	13.9
	0.2	12.0	8.8	6.5	6.2	7.1	8.6
	0.3	11.2	6.8	3.1	6.1	3.1	3.0
	0.4	8.3	4.9	5.3	4.2	3.6	1.2
	0.5	5.3	3.4	3.2	1.8	2.4	1.6
	0.6	4.9	3.5	3.4	1.5	2.1	1.5
	0.7	4.9	3.0	1.6	1.3	1.9	1.8
	0.8	2.8	2.2	0.8	2.3	1.0	2.2
	0.9	2.9	2.1	1.6	1.1	1.3	1.4
	1.0	2.0	2.0	1.3	0.6	0.7	2.0
	2.0	1.3	0.5	0.5	0.7	0.3	1.5
	3.0	0.8	0.4	0.4	0.2	0.3	0.5
	4.0	0.7	0.7	0.6	0.2	0.3	0.4
	5.0	0.7	0.3	0.5	0.3	0.2	0.2

이하(MPR 3% 이상)의 돌발상황 검지를 위해서는 약 139,800대/일의 커넥티드 차량이 필요한 것으로 나타났다. 아울러 커넥티드 차량이 약 9,320대/일 이상이면, 한국도로공사에서 발표한 평균 돌발상황 검지시간인 12.6분 보다 감소하는 것으로 분석되었다.

한편, 국내 사업용 차량의 이동식 영상 장비(즉, 커넥티드 차량) 설치 비율에 따른 효과에 대해 분석한 결과 사업용 차량에 이동식 영상 장비 설치 시 돌발상황 검지시간은 0.2분에서 0.8분으로 나타났다. 이러한 결과는 편도 2차로 고속도로 분석 결과와 마찬가지로, 한국도로공사에서 발표한 교통사고 검지시간인 12.6분 보다 빠른 검지가 가능하다는 것으로 보여준다. 마지막으로 커넥티드 차량 MPR이 약 0.2% 이상(약 74,711대)일 경우, 고속도로 서비스 수준과 관계없이 한국도로공사에서 제시한 평균 돌발상황 검지시간 보다 빠른 검지가 가능할 것으로 예상된다.



<Fig. 5> Simulation Result for Three-lane Expressway

VI. 결론 및 연구의 한계

본 연구는 교통상황 별 영상수집 및 분석 기술이 탑재된 커넥티드 차량의 MPR 증가에 따른 돌발상황 검지 시간 감소효과를 분석하고자 하였다. 미시적 시뮬레이션 모형을 적용한 결과 커넥티드 차량의 MPR이 높을수록, 교통량이 많아질수록, 차로 수가 늘어날수록 좀 더 신속한 돌발상황 검지가 가능하다는 것이 확인되었다. 돌발상황 검지 시간은 돌발상황 발생 후 최대 36.5분 수준에서 0.1분 수준으로 나타났다. 또한 기존 한국도로공사 교통사고 검지 시간인 12.6분보다 더 신속한 검지가 가능한 MPR의 경우 편도 2차로에서 0.4% 이상, 편도 3차로에서 0.2% 이상으로 분석되었다. 이는 편도 2차로 고속도로의 경우 전체 사업용 차량 중 약 150,000대, 편도 3차로 고속도로의 경우 전체 사업용 차량 중 약 75,000대에 이동식 돌발상황 검지 장치를 장착한다는 것을 의미하며, 그 결과 기존 검지시간 보다 빠른 검지효과로 이어진다는 것을 의미한다.

한편, 본 연구의 한계점은 한국도로공사의 평균 교통사고 검지시간인 12.6분을 비교치로 설정하여 감소효과를 제시하였으나 연구에 적용한 돌발상황 1일 발생확률은 돌발상황 발생확률이 가장 높은 값을 적용하여 검지시간을 추정하였으므로 연구에 활용된 값과 비교치 간 기준의 차이가 있다. 또한 본 연구는 현재 연속류 도로인 고속도로를 대상으로 수행되었다. 따라서 시내부 도로 등을 포함한 단속류 구간에 대한 연구가

필요하다. 또한 본 연구의 경우 이동식 영상분석 기반 돌발상황 검지가 100% 정확하게 검지된다고 가정하여 연구를 수행하였으나, 이동식 영상분석 기반 돌발상황 검지 기술의 정검지율 및 오검지율에 따른 돌발상황 검지시간을 평가하는 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the 2023 Yeungnam University research grant.

REFERENCES

- Asakura, Y., Kusakabe, T., Nguyen, L. X. and Ushiki, T.(2016), “Incident detection methods using probe vehicles with on-board GPS equipment”, *Transportation Research Part C*, vol. 81, pp.330-341.
- Chang, H. H., Yoon, B. J. and Jeong, S. Y.(2018), “Effects of Inter-Vehicle Information Propagation on Chain Collision Accidents”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 38, no. 2, pp.303-310. (in Korean)
- Chung, Y. S., Cho, H. S. and Kim, J. Y.(2010), “An Analytical Procedure to Estimate Non-recurrent Congestion caused by Freeway Accidents”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 28, no. 2, pp.45-52. (in Korean)
- Chung, Y. S., Song, S. K. and Choi, K. J.(2007), “A Prediction Model on Freeway Accident Duration using AFT Survival Analysis”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 25, no. 5, pp.135-148. (in Korean)
- ElSahly, O. and Abdelfatah, A.(2022), “A Systematic Review of Traffic Incident Detection Algorithms”, *Sustainability*, vol. 14, no. 22, p.14859.
- Evanco, W. M.(1999), “The Potential impact of Rural Mayday Systems on Vehicular Crash Fatalities”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 31, pp.455-462.
- Garib, A., Radwan, A. E. and Al-Deek, H.(1997), “Estimating Magnitude and Duration of Incident Delays”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 123, no. 6, pp.459-466.
- Han, X., Grubenmann, T., Cheng, R., Wong, S. C., Li, X. and Sun, W.(2020), “Traffic Incident Detection: A Trajectory-Based Approach”, *Proceedings of the 2020 IEEE 36th International Conference on Data Engineering(ICDE)*, pp.1866-1869.
- Hong, S. P., Oh, C., Kim, W. K., Kim, H. M. and Kim, T. H.(2008), “Designing A V2V based Traffic Surveillance System and Its Functional Requirements”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 26, no. 4, pp.251-264. (in Korean)
- Islam, B. A., Tajalli, M., Mohebfard, R. and Hajbabaie, A.(2021), “Effects of Connectivity and Traffic Observability on an Adaptive Traffic Signal Control System”, *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2675, no. 10, pp.800-814.
- Kim, M. J., Jeong, D. H. and Kim, H. K.(2019), “A study on Estimation of Traffic Flow Using

- Image-based Vehicle Identification Technology”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 18, no. 6, pp.110-123.
- Korea Expressway Corporation(2021), *A Study on the Introduction of Advanced High-Density(AHD) Traffic Control on Highways Through AI-based Image Analysis*, pp.77, 168.
- Li, J. Q., Zhou, K., Shladover, S. E. and Skabardonis, A.(2013), “Estimating Queue Length under Connected Vehicle Technology: Using Probe Vehicle, Loop Detector, and Fused Data”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2356, no. 1, pp.17-22.
- Liang, Z., Chen, H., Song, Z., Zhou, Y. and Zhang, B.(2017), “Traffic Congestion Incident Detection and Dissipation Algorithm for Urban Intersection Based on FCD”, *2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications*, pp.2578-2583.
- Lim, D. H., Seo, Y. H., Ko, E. J., So, J. H. and Kim, H. J.(2022), “Spatiotemporal Traffic Density Estimation Based on ADAS Probe Data”, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2022, p.5929725.
- Mohammad, A. A., Hossam, M. A. and Hesham, A. R.(2019), “Developing a Neural-Kalman Filtering Approach for Estimating Traffic Stream Density Using Probe Vehicle Data”, *Sensors*, vol. 19, p.4325.
- Moylan, E., Chand, S. and Waller, T.(2018), “Framework for Estimating the impact of Camera-based Intelligent Transportation Systems(ITS) Technology on Incident Duration”, *Transportation Research Record*, vol. 2672, no. 19, pp.25-33.
- Nagle, A. S. and Gayah, V. V.(2014), “Accuracy of Networkwide Traffic States Estimated from Mobile Probe Data”, *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2421, no. 1, pp.1-11.
- Nam, D. H. and Mannering, F.(2000), “An Exploratory Hazard-based Analysis of Highway Incident Duration”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 34, no. 2, pp.85-102.
- OECD(2007), *Managing Urban Traffic Congestion*, pp.62-65.
- Park, J. H., Oh, C., Lim, H. S. and Kang, K. P.(2009), “Methodology for Determining RSE Spacing for Vehicle-Infrastructure Integration (VII) Based Traffic Information System (Focused on Uninterrupted Traffic Flow)”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 27, no. 6, pp.29-44. (in Korean)
- Ren, S., He, K., Girshick, R., Zhang, X. and Sun, J.(2017), “Object Detection Networks on Convolutional Feature Maps”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 39, no. 7, pp.1476-1481.
- Seo, T., Kusakabe, T. and Asakura, Y.(2015), “Estimation of flow and density using probe vehicles with spacing measurement equipment”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 53, pp.134-150.
- Stephanedes, Y. J. and Chassiakos, A. P.(1993), “Application of Filtering Techniques for Incident Detection”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 119, no. 1.