

데이터베이스 기반의 보행자 사고 시나리오 개발 및 V2X 적용에 따른 사고예방 효과 분석

Development of Database-Based Pedestrian Accident Scenarios and Analysis of Accident Prevention Effects from V2X Application

백 세 룡* · 김 유 원** · 유 태 현*** · 김 천 호****

* 주저자 : (유)삼송 SPS팀 책임연구원
** 공저자 : 부천대학교 컴퓨터소프트웨어과 겸임교수
*** 공저자 : 지태그 개발팀 팀장
**** 교신저자 : (유)삼송 SPS팀 팀장

Seryong Baek* · Yoowon Kim** · Taehyun Yoo*** · Cheonho Kim*

* Dept. of Samsung Post Safety, Samsung Industries.
** Dept. of Computer Software, Univ. of Bucheon
*** Dept. of Software development, Gtag

† Corresponding author : Cheonho Kim, kim-chonho@samsung.co.kr

Vol. 23 No.5(2024)
October, 2024
pp.274~292

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.5.274>

Received 27 March 2024
Revised 23 April 2024
Accepted 16 October 2024

© 2024. The Korean Society of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

본 연구는 보행자 사고 예방을 목표로 V2X(Vehicle-to-Everything) 통신 기술을 활용한 테스트 시나리오를 개발하고 이를 시뮬레이션을 통해 검증하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 기존 교통사고 데이터베이스를 활용하여 차 대 보행자 사고 데이터를 분류하고, 사고 유형, 보행자와 차량의 속도 분석을 통해 주요 사고 패턴을 도출하였다. 분석된 데이터를 기반으로 다양한 보행자와 차량의 조건에서 V2X 기술이 적용 가능한 시나리오를 설정하고, 물리적으로 회피가 불가능한 조건과 V2X 기술을 통해 사고 회피가 가능한 조건을 구체적으로 분류하였다. 개발된 테스트 매트릭스를 바탕으로 다양한 시나리오에서의 시뮬레이션을 수행하여 V2X 기반 사고 예방 시스템의 성능을 평가하였다. 연구 결과, V2X 기술의 적용이 보행자 사고 예방에 효과적임을 확인하였으며, 본 시나리오는 향후 교통 안전 향상을 위한 표준화된 지침으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이 연구는 교통 안전 정책 입안자, 차량 제조업체, 기술 개발자에게 유용한 데이터를 제공하며, 보행자 안전을 강화하기 위한 새로운 접근 방안을 제시한다.

핵심어 : 교통사고, 차량사물통신, 교통사고재현, 기본안전메시지, 차세대지능형교통체계

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop test scenarios utilizing V2X (Vehicle-to-Everything) communication technology for the prevention of pedestrian accidents and to validate these scenarios through simulation. To this end, this researcher used existing traffic accident databases to categorize vehicle-to-pedestrian accident data, and drew key accident patterns through the analysis of accident types and the speeds of pedestrians and vehicles. Based on the analyzed data, scenarios were established where V2X technology can be applied under various conditions of pedestrians and vehicles. These scenarios were specifically classified into conditions where physical avoidance of an

accident is impossible and conditions where accident avoidance is possible through V2X technology. In the developed test matrix, simulations were conducted in diverse scenarios to evaluate the performance of the V2X-based accident prevention system. The research results confirmed that the application of V2X technology is effective for preventing pedestrian accidents. It is expected that these scenarios can serve as standardized guidelines for future traffic safety improvements. This study provides useful data for policymakers for traffic safety, vehicle manufacturers, and technology developers, and proposes a new approach to enhance pedestrian safety.

Key words : Traffic accident, Vehicle-to-Everything, Traffic accident reconstruction, Basic Safety Message, Cooperative-Intelligent Transport Systems

I. 서 론

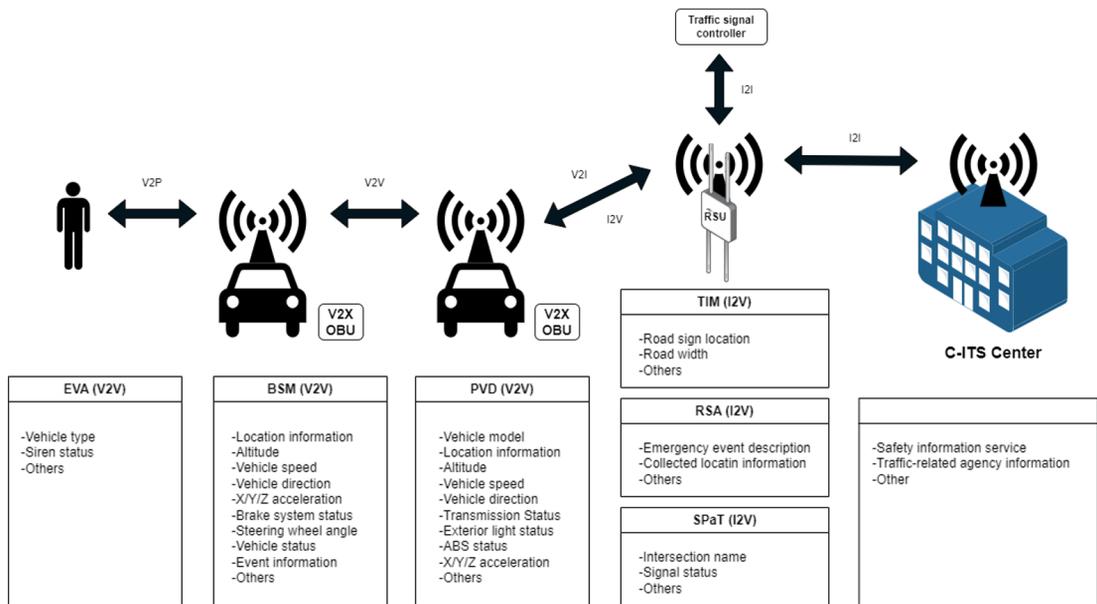
기존의 교통사고 분석은 차대차, 차대보행자, 차대자전거 등 동적 객체에 대한 움직임 표현하고 충돌 후 거동을 분석하는 방식으로 수행되고 있다. 따라서 교통사고 분석을 위한 프로그램은 동적 객체의 가속과 감속, 조향 또는 경로를 입력하는 기능으로 구성되며, 차량의 충돌 속도와 자세에 따른 속도 및 각도의 변화를 얼마나 정확히 계산하는가에 따라 성능이 결정되었다. 기존의 교통사고 분석 프로그램은 차량 충돌이 발생해야 사고로 간주하는 관점에서 개발되었다. 이러한 접근 방식은 자율주행차량 사고 분석에 필요한 기능을 제대로 제공하지 못하는 것으로 판단된다. 자율주행차량의 상용화를 앞둔 시점이다. 따라서 자율주행차량에서 발생 가능한 사고를 미리 예측하고, 이에 대한 분석을 위해 필요한 요소들을 정의하기 위한 사전 연구가 필수적이다. 자율주행차량 사고 발생 시 신속한 원인 분석과 적절한 조치는 재발 방지와 혼란 감소에 기여하며, 이는 사회적 및 경제적 손실을 최소화하는 데 중요하다. 최근 자율주행자동차 또는 주행보조 기술을 적용한 차량들에서 사고가 발생함에 따라, 영상 및 센서 기반의 자율주행만으로는 한계가 있다는 인식이 커지고 있으며, 이를 극복하기 위해 V2X(Vehicle-to-Everything) 기술을 통합한 융합형 자율주행 개념이 등장했다. 우리나라는 2027년까지 융합형 자율주행 Lv. 4+를 상용화하기 위한 기반을 구축하는 것을 목표로, 2021년부터 범부처 주도로 자율주행기술 개발 혁신 사업을 진행하고 있다. 또한 2024년부터 Euro-NCAP 및 K-NCAP 평가항목에 V2X 단말기를 적용하는 로드맵을 계획하였고, 우리나라를 포함하여 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 이미 융합형 C-ITS(Cooperative-Intelligent Transport Systems) 실증 및 시범사업을 진행하면서 V2X 기술의 도입 효과를 긍정적으로 분석하고 있다(Kim et al., 2023). 단순한 안전 운행을 넘어 완전 자율주행 기능을 위해서는 V2X는 반드시 필요한 기술이므로 V2X 기능이 포함된 교통사고가 발생했을 때 조사 및 분석할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 따라서 자율주행 자동차 교통사고 분석을 위한 소프트웨어에는 V2V, V2I 통신에 대한 기능이 필요하며, 수집 정보에 따른 차량제어 기능이 포함되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 미래에 발생할 수 있는 자율주행 교통사고를 예측하기 위해 일반 자동차의 실제 교통사고 데이터를 이용하였다. 자율주행자동차의 사고 분석 연구에서 일반 자동차의 교통사고 데이터는 간과할 수 없는 중요한 요소이다. 자율주행 기술이 급속히 발전함에 따라 운영 환경과 동적 상호작용은 기존의 운전 방식과는 많은 차이를 보이게 되었음에도 불구하고, 일반 교통사고 데이터는 여전히 자율주행차량의 사고 예방 및 안전성 향상 전략 개발에 필수적인 자원으로 활용할 수 있다. 일반 자동차의 교통사고 데이터는 교통사고의 원인, 유형, 발생 패턴 등에 대한 포괄적인 정보를 제공하며, 이 데이터는 자율주행 차량이 직면할 수 있는 잠재적 위험 요소를 식별하는 데 이용할 수 있다. 또한 일반 교통사고 데이터는 자율주행차량의 기술 개발 과정에서 안전성을 강화하고, 실제 도로 환경에서 발생할 수 있는 다양한 상황에 효과적으로 대응할 수 있도록

하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 본 연구는 자율주행 기술의 발전에 따라 발생 가능한 다양한 사고 시나리오를 분석하여, V2X 자율주행 자동차의 사고 조사 및 분석 체계를 정립함으로써 효과적이고 체계적인 사고 조사 방법을 개발하는 것을 목표로 한다. 본 연구를 통해 자율주행 차량의 안전성을 더욱 강화하고 미래 교통 시스템의 신뢰성을 높이는 데 기여할 것으로 기대하며 자율주행 기술의 사회적 수용성을 제고하고 궁극적으로는 교통사고 감소에 기여할 것으로 기대한다.

II. 이론적 배경

1. Vehicle-to-Everything

V2X는 차량과 차량(V2V, Vehicle-to-Vehicle), 인프라(V2I, Vehicle-to-Infrastructure), 보행자(V2P, Vehicle-to-Pedestrian) 간의 통신을 포함하는 기술로, 교통 안전 및 효율성을 높이는 데 목적이 있다. V2X는 WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments)와 셀룰러 기반 C-V2X로 나뉘며, WAVE는 IEEE 802.11p를 기반으로 차량 간 빠른 통신을 지원하고, C-V2X는 LTE 기반으로 더 넓은 범위와 높은 신뢰성을 제공한다. 한국은 2023년 C-V2X를 표준으로 채택해 자율주행과 C-ITS 구축을 지원하고 있다. V2X 메시지는 SAE J2735에서 BSM(Basic Safety Message), RSA(Road Side Alert), SPaT(Signal Phase and Timing Message) 등을 정의하고 있으며(SAE J2735, 2020), ITSK-00100-2:2021v4는 국내 C-ITS 규격으로 V2X 정보 구조를 설정하고 있다(ITSK-00100-2:2021v4, 2021). V2X 메시지는 차량간 직접통신 V2V 또는 C-ITS 체계하에서 V2I 통신으로 <Fig. 1>에서 보는 바와 같이 교통안전에 필요한 데이터가 전파 및 C-ITS 안전 메시지로 활용되고 있다(Kim and Jung, 2021). 만일 BSM 등과 같이 V2X 메시지가 이벤트 상황에서 저장될 수 있다면, 저장된 V2X 메시지에 포함되는 데이터 항목을 이용해 교통사고 조사 및 분석에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.



<Fig. 1> V2X Messages flow in C-ITS

2. 교통사고 데이터베이스

1) TAAS (Traffic accident analysis system)

TAAS는 대한민국 경찰청과 한국도로교통공단에서 운영하는 교통사고 분석 시스템이다. 이 시스템은 국내에서 발생한 교통사고 데이터를 체계적으로 수집하고 분석하여, 교통 안전 정책 수립과 사고 예방 전략 개발에 활용한다. TAAS에서는 교통사고가 발생한 위치와 시간, 사고의 유형과 원인을 포함하여, 사고의 심각도와 피해 규모에 대한 정보를 제공한다. 또한, 사고에 관련된 운전자와 보행자의 나이, 성별, 운전 경력과 같은 인물 정보, 사고에 연루된 차량의 종류, 도로 상태 및 기상 조건과 같은 환경적 요인 등을 포함하고 있어 교통사고를 종합적으로 분석할 수 있도록 한다(TAAS, 2024).

2) TMACS (Traffic safety information management complex system)

TMACS(교통안전정보관리시스템)는 한국 교통안전공단에서 운영하는 시스템으로 교통안전법령에 따라 구축·운영되며, 교통시설, 교통수단, 교통체계의 안전과 관련된 다양한 정보와 교통사고 자료를 통합적으로 관리한다. 또한, 교통사고 원인을 분석하고, 맞춤형 교통안전 콘텐츠를 개발·공유하여 교통안전 역량을 강화하고 교통사고 없는 미래 사회를 구현하는 것을 목적으로 한다(Traffic safety information management complex system, 2024).

3) iGLAD (Initiative for the Global Harmonization of in-depth Accident Data)

iGLAD는 2011년 말 시작된 이후, 전 세계적으로 심층 사고 데이터를 국제적으로 통합하기 위한 노력을 지속해오고 있다. 이 프로젝트는 기존 데이터베이스를 기반으로 통일된 데이터 형식을 제공하여, 각국의 개별 사고 데이터가 비교 가능하도록 하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 단일 사고, 그 환경, 참여자, 충돌 및 안전 시스템 등에 대한 세부 정보를 통합적으로 제공할 수 있다(Initiative for the global harmonisation of accident data, 2023). 특히 2023년부터는 우리나라도 IGLAD 프로젝트에 참여하여 국제적인 데이터 통합에 기

<Table 1> iGLAD data provider

Country	Organisation	Original Database
Austria	TU Graz	CEDATU (Central Database for In-Depth Accident Study)
Australia	CASR	-
Brazil	SAE Brasil	IAAT
China	CNIS/DPAC	NAIS (National Automobile Accident Investigation System)
	CATARC	CIDAS (China In-Depth Accident Study)
Czech Republic	CDV	CzIDAS (Czech In-Depth Accident Study)
France	PSA-RENAULT	-
Germany	BASt	GIDAS (German In-Depth Accident Study)
Germany	VUFO	GIDAS (German In-Depth Accident Study)
India	JP Research	RASSI (Road Accident Sampling System India)
Italy	UNIFI	-
Korea	Samsung Industries	ACCC (Automotive Collision Case Catalog)
Spain	IDIADA SP	-
USA	NHTSA	NASS CDS (National Automotive Sampling System Crashworthiness Data System) CISS (Crash Investigation Sampling System)

여하고 있다.

<Table 1>은 iGLAD에 데이터를 공급하는 단체와 각 기관의 원천 데이터베이스를 나타낸 것으로 13개 국가, 14개 기관이 데이터베이스 구축에 참여하고 있다. iGLAD의 데이터 구축을 위한 표본 추출 절차는 Case selection, Case count, Weighting variables, Stratification, Random sample의 다섯 단계로 이루어지며, 세부 사항은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> iGLAD sampling procedure

Step	Description
Case selection	The accidents selected for IGLAD shall apply to the definition of a road accident by the police in the same country as the Data Provider. Single pedestrian and suicide cases shall be excluded. For 2019 data from the two previous years, 2017 - 2018, can be included. Only accidents with at least one person coded as injured by the police shall be considered. Cases with an unknown rate of less than 20 % of the CDS variables shall be considered. 100 % sketches have to be provided and 80% have to be optimal which means: - CAD-files - Final position (if unknown, make a circle around possible area) - Collision position - Trajectories, if possible (made by the reconstructor, move of CoG) - Scaled
Case count	If number of available cases is not significantly greater than target sample size, no sampling is applied (finish here).
Weighting variables	Choose three variables that are also present with a complete crosstab in the national statistics. If variables are not available in national data, use 'location of accident', 'accident severity', and 'participant type'. If available in national statistics, these variables are also the preferred ones to choose.
Stratification	Sort the data set according to accident year and the weighting variables chosen in step 3. Each combination of values from these variables defines one stratum.
Random sample	Take an appropriate number of random cases from each stratum to generate the correct total sample size. For example, by selecting every n-th case where n is the original sample size divided by the target sample size.

iGLAD는 사고 데이터를 체계적으로 관리하기 위해 Accident, Participant, Occupant, Safety System의 네 가지 주요 카테고리로 구분되어 있으며, 각 카테고리는 <Table 3>와 같이 총 125개의 매개변수로 구성되어 데이터베이스로 구축된다. 이러한 매개변수들은 사고의 세부 사항을 정밀하게 기록하고 분석할 수 있도록 설계되었으며, 데이터의 일관성과 비교 가능성을 높이는 데 중요한 역할을 한다. 또한, 사고 현황을 나타내는 도면은 별도의 파일로 저장되어, 각 사고의 구체적인 상황을 시각적으로 확인할 수 있도록 한다.

iGLAD의 초기 구축 단계에서는 주로 충돌 관점에 초점을 맞춰 차량의 파손 정도와 탑승자의 상해에 대한 데이터를 중심으로 구축되었다. 그러나 최근 액티브 세이프티(Active Safety) 및 자율주행자동차 기술 개발을 위한 연구가 활발히 이루어지면서, 사고 예방과 관련된 데이터를 포함하는 파라미터가 새롭게 추가되었다. 이를 통해 자율주행차 및 첨단 운전자 보조 시스템(ADAS)의 개발과 평가에 iGLAD 데이터가 보다 폭넓게 활용될 수 있게 되었다. 특히, iGLAD 구축을 주도하고 있는 독일의 VUFO는 사고 발생 전 차량의 움직임을 분석할 수 있는 소프트웨어인 PCM(Pre-Crash Matrix)을 개발하였다. PCM은 iGLAD 데이터를 기반으로 차량이 충돌하기 전 5초 동안의 차량 동역학을 시뮬레이션할 수 있는 도구로, 이를 통해 ADAS(Advanced Driver Assistance Systems)의 성능을 평가하고, 다양한 교통사고 시나리오에서 사고 회피 가능성을 분석하는 데 큰 기여를 하고 있다.

<Table 3> Configuration parameters of the traffic accident database

Category	Parameters	Number of items
Accident	Accident number, Member year, Year of accident, Month of accident, Weekday, Time, GPS latitude, GPS longitude, Country, Accident description, Collision type, Accident type, Participant A referring accident type, Participant B referring accident type, Main contributing factor, Road type, Road surface, Road condition, Lane separation, Light condition, Weather 1, Weather 2, Location, Emergency arrival, Accident Severity, PCM data available, Case status.	27
Participant	Participant number, Participant type, Vehicle make (brand), Vehicle model, Registration year, Vehicle mass, Gross vehicle weight, Vehicle engine type, Vehicle engine power, Number of seats, Existence and damage of trailer, Speed limit, Primary collision - opponent, Primary collision - opponent collision, Primary collision - CDC/TDC Force Direction, Primary collision - CDC/TDC Area of Deformation, Primary collision - CDC/TDC Specific longitudinal or lateral area, Primary collision - CDC/TDC Specific vertical area, Primary collision - CDC/TDC Type of damage distribution, Primary collision - CDC/TDC Maximum extent of penetration, Primary collision - CDC/TDC Maximum extent of penetration (%), Primary collision - driving speed, Primary collision - mean deceleration, Primary collision - deceleration distance, Primary collision - delta angle, Primary collision - collision speed, Primary collision - delta-v, Primary collision - EES, Secondary collision - opponent, Secondary collision - opponent collision, Secondary collision - CDC/TDC Force Direction, Secondary collision - CDC/TDC Area of Deformation, Secondary collision - CDC/TDC Specific longitudinal or lateral area, Secondary collision - CDC/TDC Specific vertical area, Secondary collision - CDC/TDC Type of damage distribution, Secondary collision - CDC/TDC Maximum extent of penetration, Secondary collision - CDC/TDC Maximum extent of penetration (%), Secondary collision - driving speed, Secondary collision - mean deceleration, Secondary collision - deceleration distance, Secondary collision - delta angle, Secondary collision - collision speed, Secondary collision - delta-v, Secondary collision - EES, Contributing factor 1 - without ranking, Contributing factor 2 - without ranking, Contributing factor 3 - without ranking, Pre-Crash Scenario, Check of reconstruction data 1, Check of reconstruction data 2, Check of reconstruction data 3	52
Occupant	Occupant number, Occupant type, Age, Gender, Weight, Height, Police injury severity, MAIS, AIS region 1 head w/o face, AIS region 2 face, AIS region 3 neck w/o spine, AIS region 4 thorax w/o shoulder, AIS region 5 abdomen, AIS region 6 spine, AIS region 7 upper extremities, AIS region 8 lower extremities, AIS region 9 not specified injuries, Seat belt, Seat belt use, Airbag front, Airbag front deployment, Airbag tubular/curtain, Airbag tubular/curtain deployment, Sidebag, Sidebag deployment, Kneebag, Kneebag deployment, Seat ramp airbag, Seat ramp airbag deployment, Rear airbag, Rear airbag deployment, Front center airbag, Front center airbag deployment, Headrest protection system, Headrest protection system deployment, Child seat, Bolster table for children, Helmet	40
Safety system	Accident number, Participant number, System number, Type of safety system, Status of the system, System activation by the vehicle	6

3. 시뮬레이션

본 연구에서는 적절한 V2X 적용 보행자 사고 시나리오를 개발하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 교통사고 재현 및 분석에 최적화된 소프트웨어인 PC-Crash를 사용했다. PC-Crash는 원래 충돌사고 분석을 목적으로 개발된 프로그램이지만, 최근에는 교통사고에 미치는 Active safety 시스템의 영향을 분석하는 것이 중요해지면서 해당 기능이 추가되었다. 이 시스템은 변화하는 자동차 기술에 맞춰 Visual basic 언어를 활용하여 인지, 판단, 제어를 세부적으로 조정할 수 있는 Safety System 구현 기능을 제공한다. PC-Crash는 V2X 기능을 포함하지 않으므로 Safety system 기능을 응용해 V2X를 완벽하지는 않지만 모사하는 방식으로 사고 회피 가능성을 확인하였다.

4. 선행연구 고찰

<Table 4>는 관련 선행 연구의 결과를 요약한 것이다. 기존 연구들은 주로 시뮬레이션이나 이론적 모델을 통해 차량-보행자 충돌을 회피하는 V2P 통신 시스템의 기술적 구조와 설계를 다루고 있다. 하지만 이러한 연구들은 대부분 실제 교통 사고 데이터가 아닌, 가정된 시나리오에 기반하고 있으며, 실제 교통 상황의 복잡성과 예측 불가능성을 반영하지 못한다는 한계가 있다. 본 연구에서는 실제 교통사고 데이터베이스를 분석하여 기존 테스트 조건에서 다루지 않은 상황에 대한 차대 보행자 충돌 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

<Table 4> Summary of prior studies

Researchers (year)	Purpose of Study	Study Methodology	Findings
Gelbal et al. (2017)	Investigate a pedestrian collision avoidance system using V2X communication.	Elastic Band theory was applied to real-time vehicle path deformation to avoid collisions. Tested using HiL simulator with DSRC modems.	V2X communication demonstrated effectiveness in collision avoidance under poor visibility and non-line-of-sight conditions.
Kokuti et al. (2017)	To propose a V2X communication architecture for off-road autonomous vehicles.	Experiments on V2V, V2P, and V2I communication schemes using VPN and 4G networks in off-road environments.	4G-based V2X communication provides better stability and efficiency than WiFi, especially in unstructured off-road conditions.
Jung et al. (2020)	To design and validate a V2X-aided autonomous driving system for enhanced road safety and efficiency.	Developed a system with three subsystems: BLOS perception, extended planning, and control. Conducted real-world experiments, including missions like emergency braking and traffic compliance.	V2X communication significantly improved vehicle safety and performance in autonomous driving, particularly in occluded or challenging environments.
Zeng et al. (2023)	To develop pedestrian-vehicle scenarios for C-V2X digital twin testing and enhance safety applications.	Used a genetic algorithm and CNN-GRU model to generate and recognize critical pedestrian-vehicle scenarios. Lidar data and spatiotemporal analysis were used to create the testing library.	The CNN-GRU model achieved 90.2% accuracy in identifying critical pedestrian-vehicle test scenarios, improving the evaluation of C-V2X applications.
Sewalkar and Seitz(2019)	To survey Vehicle-to-Pedestrian (V2P) communication systems, design considerations, and challenges for vulnerable road users (VRUs).	Reviewed V2P communication mechanisms and evaluated them through a case study of active and passive safety systems for various VRU types.	Active V2P systems provide faster response times compared to passive systems but can cause network congestion. Precise localization and system standardization remain challenges.

III. 데이터베이스 분석

1. iGALD 데이터베이스 구축 현황

본 연구에서는 교통사고 데이터베이스 분석을 통해 보행자 사고 시나리오를 도출하였다. 분석에는 iGLAD가 2013년부터 2022년까지 13개 국가에서 공동으로 구축한 8,250건의 실제 사고 데이터 중 보행자 사고 데이

터를 분류하여 활용하였다. <Table 5>는 국가별 iGLAD 데이터 구축 현황을 나타낸 것이다.

<Table 5> Status of real accident database construction

Rank	Country	Quantity	Rank	Country	Quantity
1	Germany	1600	8	France	550
2	United states	1200	9	Australia	400
3	China	1100	10	Sweden	150
4	Italy	850	11	Spain	150
5	India	800	12	Brazil	50
6	Czech republic	750	13	Korea	50
7	Austria	600	Total		8250

2. 보행자 사고 데이터 분석

본 연구의 목적은 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 V2X 기술이 없는 상태에서 차량의 AEBS(Autonomous Emergency Braking System) 성능을 확인하고, V2X 기술이 적용되었을 때의 사고 회피 또는 경감 성능을 비교하는 것이다. 이를 위해 실제 교통사고 데이터베이스에서 차량과 보행자의 속도 범위, 노면 상태 등 보행자 사고 특성을 분석하였으며, 이러한 통계 데이터를 바탕으로 V2X 기술의 효과를 분석하기 위한 가상 사고 시나리오를 구축하였다.

1) 보행자 사고 분류

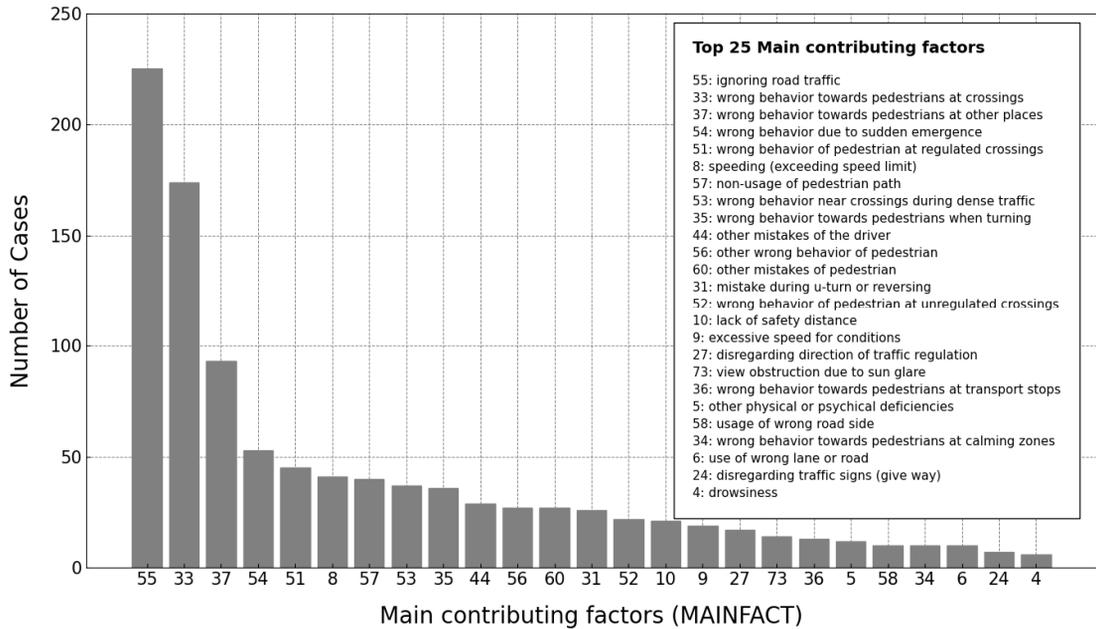
실사고 iGLAD 데이터베이스에서 시나리오를 도출하기 위해 다양한 변수를 선정하고, 각 항목별로 필터링 조건을 설정하였다. <Table 6>는 각 항목별로 적용된 필터링 조건을 보여준다.

<Table 6> Status of real accident database construction

Item	Classification Criteria
Pedestrian accident	Filtering Criteria: Participant type = 1 (Pedestrian) Merging: Combine identical Accident numbers
Accident type	Merging: Similar accident types Exclusion: All except the top 25
Vehicle speed	Merging: Combine in 10 km/h intervals Exclusion: Speeds exceeding 101 km/h
Pedestrian speed	Exclusion: Speeds of 0 km/h and exceeding 40 km/h
Light condition	Exclusion: 99999(unknown)
Main factor	Exclusion: All except the top 25
Road surface	Exclusion: 66666(not collected), 88888(other), 99999(unknown)
Road condition	Exclusion: 88888(other), 99999(unknown)
Weather	Exclusion: 88888(other), 99999(unknown)

2) 데이터베이스 분석 결과

데이터 분석에서는 사고 유형, 충돌 형태, 차량 속도, 보행자 속도, 조명 조건, 사고의 주요 원인, 도로 상태, 날씨와 같은 다양한 요소를 고려하여 사고 시나리오를 도출하였다. 각 항목은 사고 발생 조건과 원인에 대한 이해를 돕기 위해 선택되었다. 그 분석 결과를 바탕으로 각 항목별 데이터를 그래프로 시각화하고, 주요 특징을 도출하였다. <Fig. 2>는 사고의 주요원인 상위 25개 유형을 나타낸 것이다.



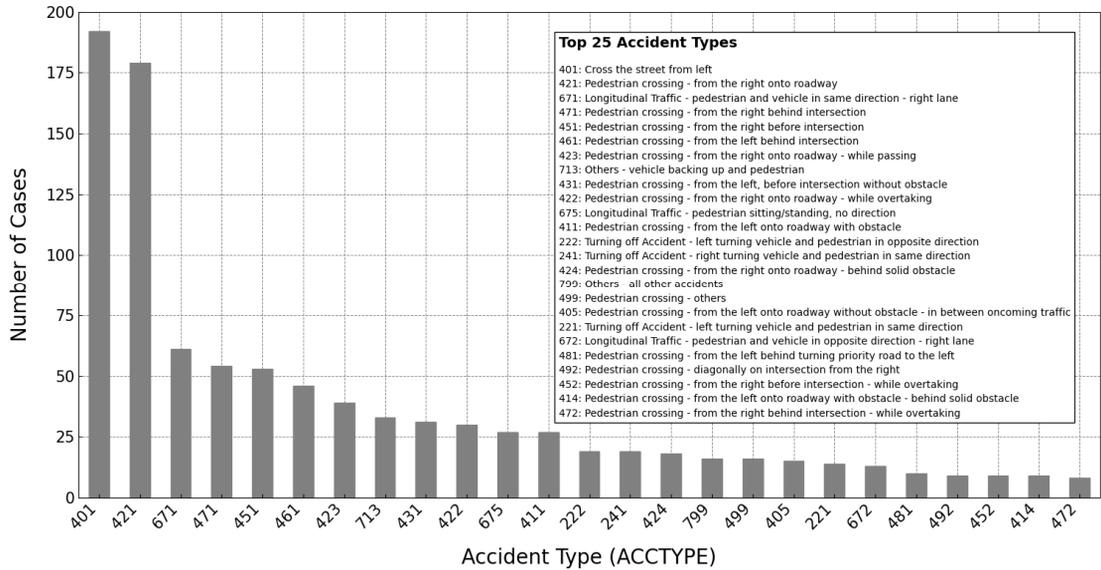
<Fig. 2> Main contributing factors

<Table 7>과 같이 보행자 사고의 주요 원인은 네 가지 그룹으로 분류할 수 있다. 첫 번째 그룹은 보행자의 부주의로, 잘못된 횡단 행동과 도로의 잘못된 사용으로, 이는 보행자가 신호를 무시하거나, 규정되지 않은 곳에서 도로를 횡단하거나, 보도를 이용하지 않는 경우를 포함한다. 두 번째 그룹은 운전자의 부주의로, 과속과 안전거리 미확보 및 회전, 차선 변경 시 실수 등이 원인이다. 세 번째 그룹은 기상 및 도로 상태로, 시

<Table 7> Main contributing factor for pedestrian accidents

Main Cause Group	Detailed Factors (Code number)
Pedestrian Inattention and Misbehavior	Incorrect crossing behavior (51, 52, 54)
	Improper use of the road (57, 58, 53)
Driver Inattention and Misconduct	Speeding and inadequate safety distance (8, 9, 10)
	Driving mistakes (30, 27, 32, 16)
Weather and Road Conditions	Visual obstruction and weather conditions (72, 73)
	Poor road conditions and maintenance (69, 76)
Other Technical Defects and External Factors	Vehicle defects (46, 47, 48)
	Other external factors (77, 78)

야 방해와 도로 유지보수 부족이 포함된다. 마지막으로, 차량 결함 및 외부 요인으로, 차량의 타이어, 브레이크, 조향 장치 결함과 도로 위의 장애물이 사고의 원인이 될 수 있다.



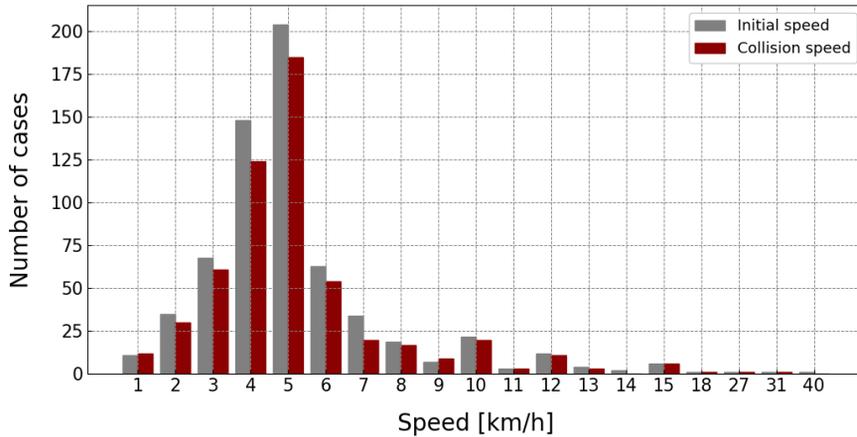
<Fig. 3> Top 25 accident types for pedestrian accidents

사고유형은 총 96개 유형으로 분류되며, 8건 이상으로 확인되는 상위 25개 유형을 <Fig. 3>과 같이 그래프로 나타내었다. 상위 25개의 사고 유형을 분석한 결과, 대부분의 사고는 보행자가 도로를 횡단하거나 교차로

<Table 8> Pedestrian accident types grouped by similar categories

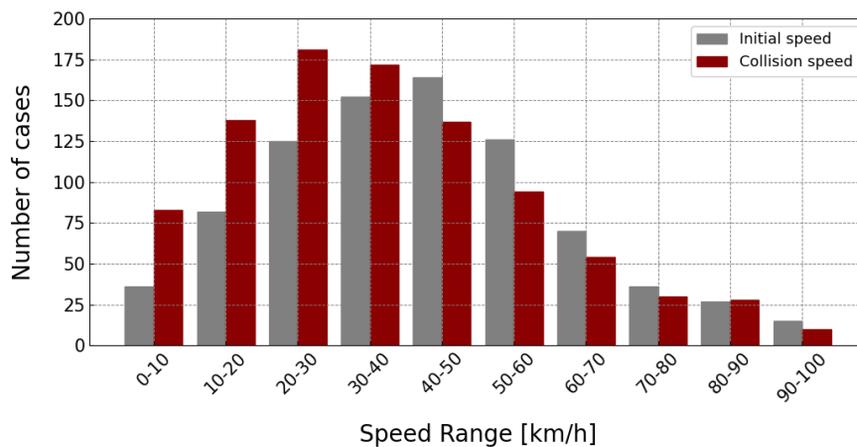
Categories	Diagrams	Frequency
Lateral + obstacle		707
Logitudinal		101
Turning		62
Other		713: 33, 492: 9, 499: 16, 799: 16

에서 발생한 사고가 주를 이룬다. 특히, 보행자가 좌우에서 도로로 진입하는 상황과 차량이 교차로에서 회전하거나 주행 중일 때 발생하는 사고가 높은 빈도를 보였다. 이러한 사고 유형들은 몇 가지 주요 패턴으로 통합할 수 있다. <Table 8>은 단순 대칭 조건, 장애물, 보행자의 이동 방향 등을 종합적으로 고려하여 유사한 사고 유형들을 통합한 결과를 나타낸다.



<Fig. 4> Comparison of initial and collision speeds of pedestrians

<Fig. 4>는 보행자 사고에서 보행자의 초기 속도와 충돌 속도를 나타낸다. 대부분의 사고는 8 km/h 이하의 속도에서 발생하며, 초기 속도의 약 90.7%, 충돌 속도의 약 90.1%가 이에 해당한다. 이는 보행자가 느린 속도로 걷거나 멈출 때 차량과 충돌할 가능성이 높다는 것을 보여준다. 이러한 결과는 K-NCAP의 보행자 보호 시험 기준과 일치하며, 성인 보행자는 8 km/h, 어린이는 5 km/h로 설정하여 상해 가능성을 평가한다. 그러나 자율주행차의 사고 예방을 위해서는 8 km/h 이상의 다양한 보행자 속도 시나리오를 고려한 전략이 필요하다.



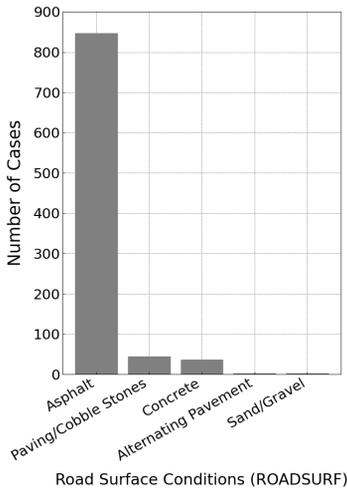
<Fig. 5> Comparison of initial and collision speeds of vehicles

<Fig. 5>는 보행자 사고에서 차량의 초기 속도와 충돌 속도를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 대부분의 사

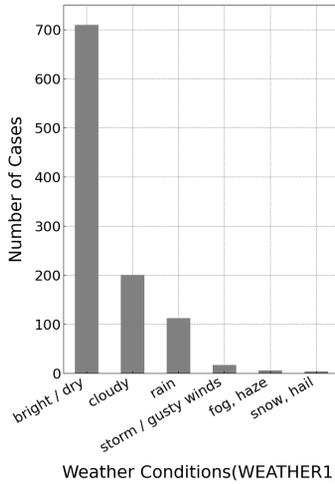
고는 100 km/h 이하에서 발생하며, 특히 초기 속도는 30-50 km/h 구간에서 가장 빈번하게 나타나 총 316건의 사고가 발생했다. 충돌 속도도 유사한 패턴을 보이며, 20-50 km/h 구간에서 490건의 사고가 집중되었다. 이는 차량이 보행자와의 충돌을 인지한 후 속도를 줄이는 경향이 있음을 시사하며, 실제 충돌 속도가 초기 속도보다 낮아진다는 것을 의미한다.

K-NCAP에서는 차량의 최대 시험 속도를 60 km/h로 설정하고 있으며, 이번 분석에서도 전체 사고의 약 70%가 50 km/h 이하에서 발생해 이 기준이 적절함을 보여준다. 특히, 시내 도로와 같은 환경에서 이 속도 구간이 사고 빈도가 높다는 점을 고려할 때, 현재의 시험 속도 설정은 현실적인 교통 상황을 반영한다고 볼 수 있다. 그러나 자율주행차의 안전성을 높이기 위해서는 60-100 km/h의 속도에서 발생하는 사고도 고려할 필요가 있다.

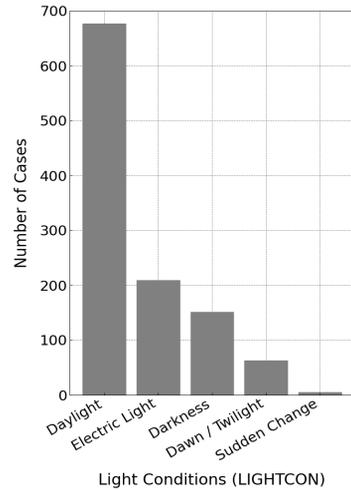
분석 결과, 초기 속도 기준으로 이 범위에서 약 32.9%의 사고가 발생했으며, 충돌 속도 기준으로는 약 23.3%가 발생했다. 이는 자율주행차가 예상치 못한 높은 속도에서도 보행자와의 충돌을 효과적으로 방지할 수 있어야 함을 의미한다. 따라서 자율주행차의 사고 예방 능력을 평가하기 위해서는 더 높은 속도 구간을 포함한 다양한 시나리오를 설정하고, 이를 통해 실제 도로 상황에서의 안전성을 검증할 필요가 있다.



<Fig. 6> Road surface conditions



<Fig. 7> Weather conditions



<Fig. 8> Light conditions

<Fig. 6>는 노면 포장의 재질, <Fig. 7>은 노면의 상태를 나타낸 것이다. 사고의 대부분은 아스팔트(847건)에서 발생하였으며, 조약돌 포장 노면에서도 44건의 사고가 발생하였다. 날씨 조건을 보면, 맑음/건조(709건)와 비 오는 날(112건)에 사고가 많이 발생하였다. 일반적으로 건조한 아스팔트 노면의 마찰계수는 약 0.7에서 0.8 사이로 나타나며, 젖은 아스팔트 노면의 마찰계수는 약 0.5에서 0.6으로 나타난다. 조약돌 포장 노면 노면의 마찰계수는 약 0.5에서 0.6으로 확인된다(MEA forensic, 2024). 따라서, 본 연구에서는 노면 마찰계수 0.8과 0.5를 적용하여 V2X 기술의 적용에 따른 보행자 사고 회피 성능의 효과를 분석하고자 한다. <Fig. 8>은 사고 당시의 조명 상태를 나타낸다. 보행자 사고는 주간에 가장 많이 발생하여 677건을 기록하였으며, 다음으로 인공 조명 하에서 209건, 어두운 상태에서 151건, 새벽/황혼에는 63건, 갑작스러운 조명 변화에서는 5건의 사고가 발생하였다. 그러나 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 프로그램인 PC-Crash는 조명 조건에 따른 영향을 분석할 수 없는 한계가 있으므로, 시뮬레이션에 반영하지 않았다.

IV. 시뮬레이션을 이용한 시나리오 도출

V2X는 차량이 주변 환경과 실시간으로 정보를 교환할 수 있게 하는 첨단 기술로, 차량뿐만 아니라 교통 인프라, 그리고 보행자와도 통신할 수 있다. 이를 통해 차량은 주변 상황에 대한 더 넓은 인식을 가지고, 더 효과적으로 대응할 수 있다. 따라서 본 연구에서 선정된 보행자가 갑자기 뛰어나오는 상황에 V2X 기술의 적용은 AEBS와 같은 독립적인 시스템의 한계를 극복하고 차량의 안전성을 보다 강화하는 데 도움이 될 수 있다. V2X는 차량에게 폭넓은 상황 인식을 제공하고 사고의 위험을 더 빨리 인지할 수 있게 함으로써 효과적인 예방 조치를 취하고 사고의 가능성을 줄이는 데 기여할 수 있다.

<Table 9> Simulation variable condition

Parameters	Range	Notes
Vehicle speed (km/h)	60-100, step 5	
Pedestrian speed (km/h)	9-20, step 1	
Pedestrian direction (deg.)	Transverse(90), Diagonal(±45)	Excluded as longitudinal direction is focused on object detection issues
Road friction (mu)	0.5, 0.8	

실제 사고 데이터베이스 분석 결과를 바탕으로, NCAP 시험에서 이미 대응 가능한 조건을 제외하고 <Table 9>과 같이 시뮬레이션 변수를 설정하였다. 차량 속도는 60km/h에서 100km/h까지 5km/h 간격, 보행자 속도는 9km/h에서 20km/h까지 1km/h 간격으로 설정하였다. 보행자 이동 방향은 횡단 방향(90도)과 대각선 방향(±45도)을 고려하였으며, 종방향 보행은 센서의 객체 감지 문제로 판단하여 제외하였다. 노면 마찰 계수는 건조한 아스팔트 노면을 나타내는 0.8과 젖은 아스팔트 또는 조약돌 포장 노면을 반영하는 0.5를 적용하였다. 이러한 변수 설정을 통해 다양한 조건에서 V2X 기술의 적용에 따른 사고 예방 효과를 종합적으로 분석하고자 하였다.

1. 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서는 PC-Crash의 Safety system 기능을 사용하였다. 이 기능은 Visual Basic 코드를 활용해 차량의 인지, 판단, 제어 모듈을 설계하여 ADAS 기능을 모사할 수 있게 해준다. 또한 엑셀 개발도구를 통해 시뮬레이션을 자동화하고, 계산된 결과를 엑셀에 기록하여 데이터를 체계적으로 관리할 수 있다. 본 연구에서는 변수 범위에 따라 시뮬레이션을 자동으로 실행하고, 그 결과 충돌 여부를 판단할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

PC-Crash는 Ego-vehicle의 알고리즘만 적용할 수 있다. 다른 차량과의 통신은 지원하지 않으며, 따라서 V2X 기능을 직접 구현할 수 없다. V2X는 차량과 차량, 인프라 간 통신을 통해 실시간 정보를 공유하는 기능이지만, 본 연구에서는 Ego-vehicle의 감지 영역을 옆 차로까지 확장하는 방법으로 이를 모사하였다. 이를 통해 보행자를 더 빠르게 인지하고 긴급 제동 시스템이 더 신속하게 작동하도록 설계된 시뮬레이션을 수행하였다. <Table 10>은 AEBS만 적용된 시뮬레이션과 감지 영역을 확장하여 V2X 기능을 모사한 시뮬레이션 모델의 특성을 보여준다. 이를 통해 V2X를 모사한 모델이 더 빠르게 위험을 감지하고 사고를 예방할 수 있음을 확인하였다.

<Table 10> Specifications of AEBS

Model	Images	Specification
Only AEBS		<ul style="list-style-type: none"> - Distance range: 80m - Angle range: 30deg. - Cycle time: 100ms - Detection Width: ±0.6m (based on vehicle width)
AEBS with V2X		<ul style="list-style-type: none"> - Distance range: 80m - Angle range: 30deg. - Cycle time: 100ms - Detection Width: ±3.9m (based on vehicle width)

<Table 11>은 648회의 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타낸 것으로 보행자를 감지하고 충돌예상지점 전에 정지한 경우 [A], 보행자를 감지하고 감속하여 충돌을 회피하였으나 충돌 예상지점을 넘어서 최종 정차한 경우 [A'], 보행자를 감지하고 제동을 시작하였으나 충돌한 경우 충돌 시점의 속도를 기입하여 나타낸 것이다. 보행자를 감지하지 못하고 충돌한 경우 [C]로 설정 하였으나 모든 조건에서 보행자를 감지하지 못한 경우는 없었다.

<Table 11> Simulation results for coefficient of friction 0.8

Direction	Vehicle speed	Only-AEBS										AEBS with V2X															
		Pedestrian										Pedestrian															
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
90deg	60	39	41	43	45	46	47	48	49	50	50	51	51	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		
	65	44	47	49	50	51	52	53	54	55	55	56	57	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		
	70	50	52	54	55	57	58	59	59	60	61	61	62	A'													
	75	55	57	59	60	62	63	64	64	65	66	66	67	A'													
	80	60	62	64	66	67	68	69	70	70	71	71	72	A'													
	85	65	68	69	71	72	73	74	75	75	76	76	77	A'													
	90	70	73	74	76	77	78	79	79	80	81	81	82	43	A'	60											
	95	76	78	80	81	82	83	84	85	85	86	86	87	50	50	A'	64	66									
	100	80	83	84	86	87	88	89	90	90	91	91	92	56	56	56	A'	66	69	71							
-45deg ↙	60	20	28	33	36	38	40	42	43	45	46	46	47	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		
	65	30	35	39	42	44	46	47	49	50	51	52	52	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		
	70	36	41	44	47	49	51	52	54	55	56	56	57	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		
	75	42	47	50	52	54	56	58	59	60	61	61	62	A'													
	80	48	52	55	58	60	61	63	64	65	66	67	67	A'													
	85	54	58	61	63	65	67	68	69	70	71	72	73	33	A'												
	90	60	64	66	69	71	72	74	75	76	77	77	78	42	41	A'											
	95	65	69	71	74	75	77	78	79	80	81	82	83	49	48	48	47	A'									
	100	71	74	77	79	81	83	84	85	86	87	87	88	55	55	54	A'										
+45deg ↘	60	27	32	35	38	40	42	43	45	45	46	47	48	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		
	65	33	38	41	43	45	47	48	50	51	51	52	53	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		
	70	39	43	46	48	50	52	53	54	55	56	57	58	17	A'												
	75	44	48	51	53	55	57	58	60	60	61	62	63	26	26	26	A'										
	80	50	54	56	59	61	62	63	65	66	66	67	68	33	33	33	33	33	33	A'	A'	A'	A'	A'	A'		
	85	55	59	62	64	66	67	69	70	71	71	72	73	40	40	40	40	40	40	40	A'	A'	A'	A'	A'		
	90	61	64	67	69	71	73	74	75	76	77	77	78	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	A'	A'		
	95	66	69	72	74	76	78	79	80	81	82	82	83	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	A'	
	100	72	75	77	80	81	83	84	85	86	87	88	88	57	57	57	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	

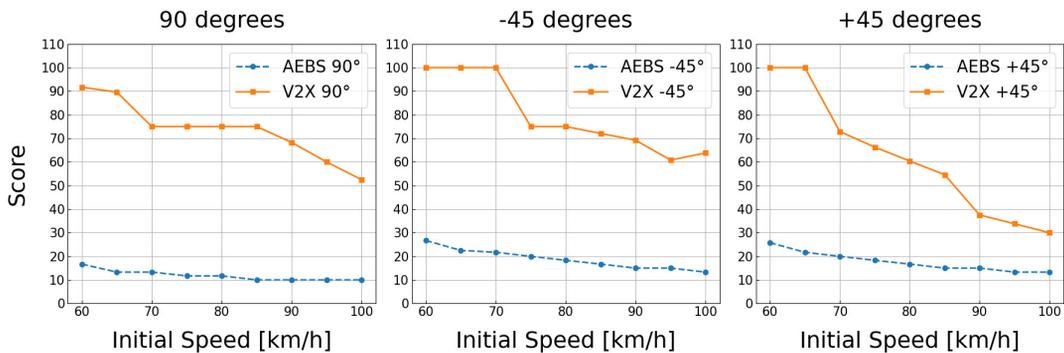
■ Avoid ■ Avoid-time ■ Mitigation ■ Collision

시뮬레이션 결과의 종합적인 평가를 위해 <Table 12>와 같은 기준을 마련하여 각 조건별 사고회피 성능에 대한 점수를 산정하였다.

<Table 12> Scoring criteria for simulation results

Condition	Score	Note
Avoidance	100	
Temporal Avoidance	75	
Mitigation	Deceleration of 75% or more - 50 Deceleration of 50% or more - 40 Deceleration of 25% or more - 30 Deceleration of less than 25% - 10	Collision avoided; accident risk remains due to timing differences.
Collision	0	

<Fig. 9>는 보행자 이동방향에 따른 시뮬레이션 결과를 그래프로 나타낸 것으로 모든 조건에서 V2X 적용에 의해 충돌로 인한 피해가 경감되는 것을 확인할 수 있다. 보행자의 이동방향 -45도(↙) 조건에서는 차량 속도 70km/h까지 사고를 회피할 수 있는 것으로 확인되었으며, +45도(↘) 조건에서는 차량 속도 65km/h까지 사고를 피할 수 있는 것으로 확인된다. 이후 속도가 증가할수록 급격하게 점수가 낮아지는 것으로 확인된다. 차량 속도 85km/h 이상 조건에서 보행자의 방향에 따라 다른 특성을 보이는 것으로 확인된다. 이는 +45도는 점수가 급격하게 하락하고, 90도와 -45도 조건에서는 비교적 완만하게 하락하는 추세를 보인다. 이는 +45도 조건에서 보행자의 방향이 차량의 주행과 반대 방향으로 이동하며 발생한 현상으로 확인된다. 따라서 보행자의 이동 방향에 따른 특성도 AEBS 및 V2X 설계에 고려되어야 할 사항으로 판단된다.



<Fig. 9> Scoring results based on simulation conditions for a coefficient of friction of 0.8

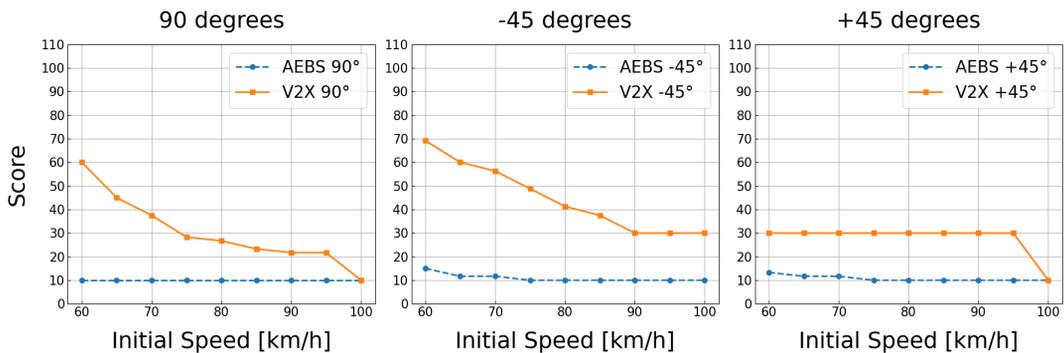
<Table 13>은 마찰계수 0.5 조건에서 수행된 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이 조건에서 AEBS만 적용한 경우 모든 시나리오에서 충돌이 발생하였다. AEBS에 V2X를 추가 적용한 경우 일부 비충돌 상황이 발생하였으나, 이는 모두 시간적 차이에 의한 것으로 잠재적 위험성이 여전히 존재함을 시사한다. <Fig. 10>은 마찰계수 0.5 조건에서의 시뮬레이션 종합 결과를 나타내며, V2X 기술을 적용했을 때 충돌 회피와 차량 속도 감소 효과가 있었으나, 마찰계수 0.8 조건과 비교하여 낮은 성능을 나타냈다. 이 결과는 자율주행 자동차가 장애물이 있는 도로에서 보행자가 갑자기 나타나는 예기치 못한 상황에 대비하여 사전에 충분히 감속하여 운행

하는 것이 필수적임을 시사한다.

<Table 13> Simulation results for coefficient of friction 0.5

Direction	Vehicle speed	Only-AEBS																				AEBS with V2X																			
		Pedestrian																				Pedestrian																			
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20																
90deg	60	48	49	50	51	52	53	53	54	54	54	55	55	32	32	A'	A'	40	42																						
	65	53	54	55	56	57	58	58	59	59	59	60	60	38	38	38	38	A'	A'	A'	A'	A'	43	44	46	47															
	70	58	59	60	61	62	62	63	63	64	64	64	65	44	44	43	43	A'	A'	A'	A'	A'	46	48	50	51	52														
	75	63	64	65	66	67	67	68	68	69	69	69	70	49	49	49	49	49	49	50	52	54	55	56	57																
	80	68	69	70	71	72	73	73	74	74	74	75	75	55	55	55	55	55	54	55	57	59	60	62	63																
	85	73	74	75	76	77	78	78	79	79	79	80	80	60	60	60	60	60	60	61	63	64	65	67	68																
	90	78	80	81	81	82	83	83	84	84	84	85	85	65	65	65	65	65	65	66	68	70	71	72	73																
	95	83	84	85	86	87	88	88	89	89	89	90	90	71	71	71	71	71	70	71	73	75	76	77	78																
100	88	90	91	91	92	93	93	94	94	94	95	95	76	76	76	76	76	76	77	78	80	81	82	83																	
-45deg	60	41	44	45	47	48	49	50	50	51	52	52	53	30	30	A'	A'	A'	A'	A'																					
	65	47	49	51	52	53	54	55	56	56	57	57	58	37	37	36	36	A'	A'	A'	A'	A'	A'	A'	A'	A'															
	70	52	54	56	57	58	59	60	60	61	61	62	62	43	43	42	42	42	A'	A'	A'	A'	A'	A'	A'	A'															
	75	57	59	61	62	63	64	65	65	66	67	67	67	49	48	48	48	48	48	47	A'	A'	A'	A'	A'	A'															
	80	62	64	66	67	68	69	70	71	71	72	72	73	54	54	54	54	54	53	53	53	53	A'	A'	A'	A'															
	85	67	69	71	72	73	74	75	76	76	77	77	78	60	59	59	59	59	59	59	59	59	58	A'	A'																
	90	73	75	76	78	79	79	80	81	81	82	82	83	65	65	65	65	65	65	65	64	64	64	64	64																
	95	78	80	81	82	83	84	85	86	86	87	87	88	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	69															
100	83	85	86	88	89	90	90	91	91	92	92	93	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75																
+45deg	60	42	44	46	47	48	49	50	51	51	52	52	53	33	33	33	33	34	34	34	34	34	34	34	34	34															
	65	47	50	51	52	53	54	55	56	56	57	57	58	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39															
	70	52	54	56	57	58	59	60	61	61	62	62	63	44	44	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45															
	75	58	60	61	62	63	64	65	66	66	67	67	68	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50															
	80	63	65	66	67	68	69	70	71	71	72	72	73	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55															
	85	68	70	71	72	73	74	75	76	76	77	77	78	60	60	60	60	61	61	61	61	61	61	61	61	61															
	90	73	75	76	78	79	80	80	81	82	82	82	83	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66															
	95	78	80	81	83	84	84	85	86	86	87	87	88	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71															
100	83	85	87	88	89	90	90	91	92	92	92	93	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76																

■ Avoid ■ Avoid-time ■ Mitigation ■ Collision



<Fig. 10> Scoring results based on simulation conditions for a coefficient of friction of 0.5

보행자 감지 영역을 확대하면 사고 회피율과 경감률을 높일 수 있으나, 보행자가 경로를 변경하거나 속도를 조절하는 등의 불확실성이 존재한다는 문제가 있다. 이러한 상황에서 긴급 제동을 실시하면 급제동으로 인한 추돌이나 탑승자의 부상 등 추가적인 사고 위험이 발생할 수 있다. 따라서 위험이 예상될 때 사전에 속

도를 감속하고, 위험이 현실화되면 긴급 제동을 통해 사고를 회피하는 단계별 전략을 마련해야 한다고 판단된다.

2. V2X를 적용한 시뮬레이션 분석의 한계점

본 연구에서는 V2X 기능이 없는 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 V2X를 모사하기 위해 자율주행차의 감지 영역을 확장하는 방식을 채택하였으며, 그 한계점은 다음과 같다.

첫째, 자율주행 자동차의 교통사고 분석을 위한 소프트웨어에는 V2X 통신 기능이 필수적이다. 본 연구에서는 주변 차량이나 인프라로부터의 위험 신호를 수신하여 감속하거나 긴급 제동을 수행하는 기능을 구현하지 못했다. 또한, 곡선 도로에서의 주행을 정확히 시뮬레이션하기 위해 Yaw rate에 따른 Ego-vehicle의 감지영역 변화를 반영한 모델 개발도 필요할 것으로 판단된다.

둘째, 연구에서는 속도 감소 비율을 기반으로 점수를 적용하였으나, 충돌 속도가 보행자의 부상 정도와 선형적으로 정비례하지 않기 때문에 부상 기반의 가중치를 적용할 필요가 있다. 시뮬레이션 결과 분석에서 시간적 차이에 의한 회피는 보행자가 차량을 보고 놀라 정지하거나 속도를 변경할 때, 차량이 보행자가 이동하는 방향으로 회피하려다 충돌이 발생하는 상황을 의미한다. 따라서 시간적 차이에 의한 회피에 대한 점수 산정 기준이 필요하다.

셋째, 본 연구는 통신 속도, 센서 인지 및 판단에 소요되는 시간을 고려하지 않고 이상적인 상황을 가정하였다. 실제 환경에서는 지연과 노이즈가 존재하므로 이를 반영해야 하며, 이에 따른 오차 범위에 대한 추가 연구가 필요하다. 종합적으로, 본 연구는 V2X 기술의 부재로 인한 시뮬레이션의 한계를 인지하였으며, 향후 연구에서는 V2X 기능의 통합과 현실적인 환경 변수를 고려한 보다 정교한 모델링이 필요함을 시사한다.

넷째, 보행자 감지의 한계로 인해 실제 도로 환경에서 보행자를 정확히 인식하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 신체의 일부만 카메라에 촬영되거나, 주변 차량이나 구조물로 인한 사각지대, 역광이나 안개와 같은 기상 조건으로 인해 보행자 식별이 어려운 상황이 존재한다. 이러한 한계를 극복하고 자율주행 차량의 안전성을 강화하기 위해서는 사고 당시의 주변 차량, 교통 시설, 조명, 날씨 등을 포괄적으로 고려하여 한계 상황을 예측하고 대응하는 전략이 필요하다. 또한, 이러한 한계 상황을 반영할 수 있는 사고 재현 프로그램의 개발이 요구된다.

다섯째, 본 연구에서는 보행자가 정자세로 뛰어오는 상황만을 모사하였으나, 실제 사고에서는 보행자가 넘어지거나 구부정한 자세로 나타날 수 있다. 이러한 다양한 보행자 자세는 이미지에서 보행자로 인식하기 어렵게 만들어, 추가적인 식별 및 예측 알고리즘의 개발이 필요하다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 보행자 자세를 포함한 시나리오를 고려하여 보다 현실적인 사고 예방 방안을 마련해야 할 것이다.

V. 결론 및 향후 과제

본 연구는 실사고 데이터베이스 분석을 통해 보행자 사고의 특성을 분류하고, 기존 평가 시나리오를 벗어난 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 V2X 기술이 보행자 충돌 및 피해를 경감하는 효과를 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) iGLAD의 실제 교통사고 데이터를 분석하여 보행자 사고의 특성을 확인하고, 기존 평가 시나리오를 벗어난 보행자 사고 시뮬레이션 변수를 도출하였다.

2) 일반 AEBS와 V2X 기능이 통합된 AEBS의 시뮬레이션을 통해, V2X 통합 AEBS가 충돌 회피 및 충돌 속도 경감 효과에서 더 우수함을 확인하였다.

3) V2X 기능이 통합된 AEBS에서도 사고를 회피할 수 없는 조건이 확인되었으며, 장애물 사이에서 보행자가 출현할 것으로 예상되는 구간에서는 사전에 감속하는 전략의 필요성이 확인되었다.

4) 기존 교통사고 분석 프로그램의 자율주행자동차 사고 분석에 대한 한계를 확인하고, V2X 구현을 위한 기능을 제안하였다.

향후 연구에서는 V2X 기능을 통합한 시뮬레이션 도구를 사용하고, 곡선 도로 주행 시 Yaw rate에 따른 감지 영역 변화를 반영한 정교한 모델을 개발해야 한다. 또한, 충돌 속도와 보행자 부상 정도 간의 비례 관계를 고려한 부상 기반 가중치 적용과 시간적 차이에 의한 회피 상황을 평가할 수 있는 점수 산정 기준을 마련할 필요가 있다. 실제 환경의 통신 지연과 센서 노이즈를 반영하고, 다양한 보행자 자세를 포함한 시나리오를 고려하여 보행자 식별 및 예측 알고리즘을 개선함으로써 자율주행 차량의 안전성을 더욱 강화하고 사고 예방 능력을 향상시킬 전략이 요구된다. 이러한 개선을 바탕으로 한 후속 연구는 자율주행차의 안전성을 강화하고 미래 교통 시스템의 신뢰성을 높이는 데 기여할 것으로 기대되며, 이를 통해 자율주행 기술의 사회적 수용성을 제고하고 궁극적으로 교통사고 감소에 기여할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2024년도 정부(경찰청)의 재원으로 과학치안진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00260576, 자율주행자동차 교통사고 조사·분석 기술 개발을 위한 교통사고 재현S/W 개발)

REFERENCES

- Gelbal, S., Arslan, S., Wang, H., Aksun-Guvenc, B. and Guvenc, L.(2017), “Elastic band based pedestrian collision avoidance using V2X communication”, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp.270-276.
- Initiative for the Global Harmonisation of Accident Data(2023), “iGLAD Codebook”, pp. 2-6.
- ITSK-00100-2:2021v4(2021), *C-ITS Specification Part 2: V2X Information Linking*.
- Jung, C., Lee, D., Lee, S. and Shim, H.(2020), “V2X-communication-aided autonomous driving: System design and experimental validation”, *Sensors*, vol. 20, no. 10, 2903.
- Kim, H., You, Y., Han, H., Cho, M. and Song, T.(2023), “Traffic accidents scenarios based on autonomous vehicle functional safety systems”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 22, no. 6, pp.264-283.
- Kim, Y. and Jung, H.(2021), “A proposal of V2X on-board unit control board design for vehicle event detection and raw data generation”, *The Korean Society of Automotive Engineers*, pp.404-409.
- Kokuti, A., Hussein, A., Marin-Plaza, P., Escalera, A. and Garcia, F.(2017), “V2X communications architecture for off-road autonomous vehicles”, *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, pp.69-74.
- MEA forensic(2024), “PC-crash operating and technical manual”, Dr. Steffan Datentechnik, p.275.

SAE J2735(2020), *V2X communications message set dictionary*.

Sewalkar, P. and Seitz, J.(2019), “Vehicle-to-pedestrian communication for vulnerable road users: Survey, design considerations, and challenges”, *Sensors*, vol. 19, no. 2, 358.

Traffic accident analysis system, <https://taas.koroad.or.kr/>, 2024.10.06.

Traffic safety information management complex system, <https://tmacs.kotsa.or.kr/>, 2024.10.06.

Zeng, L., Jin, J., Han, Q., Long, Y. and Ye, L.(2023), “Generation and recognition of pedestrian-vehicle scenarios for C-V2X digital twin tTesting”, *IEEE 3rd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence*, doi: 10.1109/DTPI.2023.1234567.