

도심부 교차로의 기하 데이터를 고려한 자율주행차 사고 분석 : 미국 자율주행차 사고를 중심으로

Investigating Autonomous Vehicle Accidents at Urban Intersections based on Road Geometry Data

김 창 훈 Kim, Changhun | 정회원 · 경기대학교 일반대학원 도시·교통공학과 석사과정 (E-mail : rkditks1@kyonggi.ac.kr)
김 정 화 Kim, Junghwa | 정회원 · 경기대학교 스마트시티공학부 도시·교통공학전공 조교수 · 교신저자 (E-mail : junghwa.kim@kyonggi.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study aims to understand the characteristics of accidents involving autonomous vehicles and derive the causes of accidents from road spatial information through autonomous vehicle accident reports.

METHODS : For this study, autonomous vehicle accident reports collected and managed by the CA DMV were used as data sources. In addition, spatial characteristics and geometric data for accident locations were extracted by Google maps. Based on the collected data, the study conducted general statistics, text embedding, and cross-analysis to understand the overall characteristics of autonomous vehicle accidents and their relationship with road spatial features.

RESULTS : The analysis results for characteristics of autonomous vehicle accidents, applying statistical analysis and text embedding techniques, reveal that the damages caused by autonomous vehicle accidents are often minor, and approximately half of the accidents are triggered by other vehicles. It is noteworthy that accidents where autonomous vehicles are at fault are not uncommon, and when the cause of the accident is within the autonomous vehicle, the accident risk can increase. The accident analysis results using spatial data showed that the severity of accidents increases when on-street parking is present, when dedicated lanes for bicycles and buses exist, and when bus stops are present.

CONCLUSIONS : Through this study, geometric and spatial elements that appear to have an impact on autonomous driving systems have been identified. The findings of this study are expected to serve as foundational data for improving the safety of autonomous vehicle operations in the future.

Keywords

Autonomous Vehicle, Collision Report, Text Embedding, Geospatial Data

Corresponding Author : Kim, Junghwa, Assistant Professor
College of Creative Engineering Urban & Transportation Engineering,
Kyonggi University 154-42, Suwon 16227, Korea
Tel : +82.31.249.9772 H.P : +82.10.7731.5510
E-mail : junghwa.kim@kyonggi.ac.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Oct. 11. 2023 Revised Oct. 31. 2023 Accepted Nov. 07. 2023

1. 서론

우리나라의 『자율주행 자동차 상용화 촉진 및 지원에 관

한 법률』에서는 자율주행차를 “운전자 또는 승객의 조작 없이 자동차 스스로 운행이 가능한 자동차”로 정의하고 있

다. 해당 법령 이외에도, 자율주행차의 안정적인 정착과 상용화를 위한 제도적·정책적 기반 마련이 활발하게 진행되었다. 대표적으로, 21년 국토교통부에서 발표한 「자율주행차 규제혁신 로드맵 2.0」을 중심으로 레벨 3 이상의 자율주행 서비스를 실현하기 위한 체계를 마련하고 있다. 국가 차원의 정책 기조와 맞물려 자동차·빅테크 기업 또한 자율주행 기술의 연구·개발을 지속해서 수행하고 있다.

자율주행 기술에 대한 국제 동향도 마찬가지이다. 국가 차원에서 법·규제 및 정책적 기반을 마련하고, 우수한 기업에서 로보택시, 자율 배송, 자율트럭 등 자율주행 서비스에 대한 실증 사업을 진행하고 있다. 시장조사업체인 프레던스 리서치(Precedence Research)의 조사에 따르면, 글로벌 자율주행차 시장 규모는 22년 1,261억 9천만 달러(약 168조)로 추산하였으며, 2030년에는 연평균 성장률 38.8%로 증가하여 1조 8,084억 달러(약 2,400조)로 전망하고 있다. 다국적 로펌 기업인 DENTONS 에서 발행한 보고서¹⁾에 따르면, 자율주행 기술은 향후 차량용 엔터테인먼트(인포테인먼트), 농업, 물류 등으로 전환되어 이동성 이외에 여러 분야에서 부가가치를 제공해 줄 것으로 예상된다.

새로운 기술은 필연적으로 안전성에 대한 우려와 결부된다. 이를 잘 반영하듯, Smart Cities Dive 저널에서 실시한 설문조사²⁾에 따르면, 5명 중 4명 이상이 자율주행차가 혼입된 도로를 주행하는 것에 대해 우려를 표명하였으며, 다수의 응답자가 자율주행차의 안전성에 대한 정부 차원의 표준, 규제, 시험이 필수적으로 마련되어야 한다고 응답하였다. NHTSA³⁾는 21년 7월부터 22년 5월까지 392건의 자율주행차 사고가 집계되었다고 발표하였다. 일련의 사례들은 자율주행기술의 안전성에 대한 해결 과제가 잔존하고 있음을 대변해준다.

이러한 점에서 자율주행 기술의 안전성을 향상하기 위한 연구는 필수적이다. 본 연구에서는 CA DMV에서 수집·배포하고 있는 사고 보고서를 기반으로, 교차로 공간 내에서 발생하는 자율주행차 사고를 분석하고, 자율주행차에 취약한 기하 요소와 공간 패턴을 도출하고자 한다.

2. 선행 연구

교통사고는 인적·물적 피해와 함께 막대한 사회적 비용을 발생시키는 중대한 사회 문제 중 하나이다. 교통사고

를 예방하고 피해를 최소화하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 일반 차량 사고의 경우 교통사고 데이터를 활용하여 사고의 원인과 사고 요인을 규명하는 예방적 연구가 다수 수행되었다.

Kim & Jin(1996)은 고속도로와 국도를 포함한 지역 간 도로를 중심으로 교통사고와 밀접한 관계를 갖는 도로 기하구조 요소들을 분석하였다. 이후, 기하구조 요소 간의 상관관계를 분석하고, 교통사고 저감을 위한 도로 기하구조 개선 모형을 제시하였다. 분석 결과 차로 폭, 곡선반경, 도로선형, 도로 연속성, 종단경사, 시거, 길어깨 폭, 중앙분리대 유무 등이 교통사고의 주요 영향 요인임을 밝혔다.

Kim et al.(2011)은 단속류 시설에서 발생하는 사고를 대상으로 교통사고 영향 인자를 분석하였다. 해당 연구에서는 2005년부터 2007년까지 서대문구에서 발생한 교통사고 자료를 활용하였으며, 횡단선형, 종단구배, 신호기 운영, 기상 상태 등의 정보를 활용하였다. 분석 결과, 차대차 사고는 도로 요인에 가장 큰 영향을 받으며, 곡선반경이 500m 미만인 도로, 경사도가 $\pm 3\%$ 을 초과하는 도로, 신호기가 운영되지 않는 도로에서 사고 발생 가능성이 높은 것으로 도출되었다.

Park et al.(2016)은 무신호 교차로에서 발생한 교통사고의 영향 요인을 분석하였다. 해당 연구에서는 도로교통공단의 교통사고 분석시스템(TAAS)에서 수집한 3년간의 사고자료를 활용하여 연구를 수행하였다. 분석 결과, 주간 교통사고 건수가 야간 교통사고의 3배 정도 많이 발생하였으나, 사고 심각도의 경우 야간 교통사고가 더 높았으며, 차로 수가 많을수록 이동류가 증가하여 교통사고 발생 가능성이 높아짐을 밝혔다.

Apostolos & George(2020)은 공간적 관점에서 교통사고를 분석한 현재까지의 연구 내용을 검토하였다. 해당 연구는 교통사고가 공간적 특성에 어떠한 영향을 받는지, 사고의 영향을 끼치는 공간적 요소가 어떻게 구분되는지를 검토함으로써 교통사고와 공간적 특성의 관계를 규명하였다.

최근에는 자율주행 서비스의 부분 상용화가 이루어짐에 따라, 관련 실증데이터가 수집·배포되고 있으며, 이를 활용한 연구도 진행되고 있다.

Chen et al.(2020)은 CA DMV의 사고 보고서와 Google Map 데이터를 사용하여 자율주행차 사고의 심각성을 예측하고 사고 심각성에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하였다. 충돌유형, 사고 심각성, 주행 행동 및 차량 손상 정도를 고려하여 사고의 특성을 도출하였다. 분석 결과 날씨, 차량 손상도, 사고 위치 및 충돌유형이 사고 심각성을 결정하는

1) DENTONS, Global Guide to Autonomous Vehicles 2023

2) Smart Cities Dive, Self-driving cars have people worried: survey, 2023.03.08

3) NHTSA(미국 도로교통국) : National Highway Traffic Safety Administration

주요 요인으로 확인되었으며, 부상을 유발하는 사고는 다양한 토지 이용 패턴이 있는 지역에서 발생 빈도가 높은 것으로 관찰되었다.

Park et al.(2021)은 자율주행차 사고에 대한 특성 파악 및 분석 방법론 개발을 위한 연구를 진행하였다. 연구 데이터로는 CA DMV에서 제공하는 교통사고 보고서를 사용하였으며, 텍스트 임베딩 기법을 이용하여 주요 키워드 및 주요 토픽을 도출하였다. 해당 연구로 교통사고 주요 객체, 주요 충돌 위치 및 주요 발생 장소 등을 파악하였다.

Lee et al.(2023) 또한 CA DMV⁴⁾에서 제공하는 자율주행차 사고 보고서를 활용하여 차량 충돌 형태와 연관성이 높은 사고 요인 조합을 도출하였으며, 분석 결과를 기반으로 6개의 자율주행차 도심부 사고 시나리오를 제시하였다.

선행연구 고찰 결과, 교통사고의 원인과 영향 요인을 규명하고자 하는 연구는 기존에 다수 진행되었음을 알 수 있었다. 많은 표본 수와 오랜 기간 다양한 방법으로 수집된 데이터를 기반으로 통계적 모형을 생성하는 것이 주된 연구방법론이었다. 최근에는 자율주행 차량의 사고데이터를 활용한 연구도 진행되고 있음을 확인했다. 관련 연구에서는 데이터 수급의 한계로 대부분 CA DMV의 자율주행차 사고 보고서를 활용하고 있었고, 해당 보고서에서 제공하고 있는 내용이 제한적이기 때문에 사고와 관련된 공간 특성에 대한 분석은 거의 이루어지지 않았다(CA DMV의 사고 보고서에 관한 내용은 3장에서 자세하게 다루고자 한다). 따라서, 본 연구에서는 자율주행 사고데이터를 활용하여 자율주행차 사고에 영향을 미치는 도로의 공간적 특성 및 요인에 대한 분석을 진행함으로써 연구의 차별성을 확보하고자 한다.

3. 연구 데이터

3.1. 자율주행차 사고 보고서

선행연구 고찰로 알 수 있듯이 자율주행차 사고 분석과 관련된 대부분의 연구에서는 기초 데이터로 CA DMV의 사고 보고서(Report of Traffic Collision Involving an Autonomous Vehicle)를 활용하고 있다. 데이터 사용이 한정적인 이유로 추정되는 바는 자율주행 서비스 실증 지역이 많지 않아, 충분한 표본이 수집될 수 없다는 점과 개인정보 및 법적 문제로 인한 데이터 공유의 어려움 때문일 것이다. 그럼에도 거의 유일하게, 미국 캘리포니아 차량관리국은 모든 자율주행차 사고에 대한 수집·보고를 의

무화하도록 법적 규제를 제정하고 있으며, 해당 자료를 개인이 열람할 수 있도록 배포하고 있다. 이러한 이유로, 본 연구에서도 선행연구와 마찬가지로 CA DMV에서 배포하고 있는 자율주행차 사고 보고서를 연구 데이터로 활용하였다.

CA DMV 데이터베이스 상에는 2014년부터 최근까지의 자율주행차 사고 레포트가 등록되어 있다. 보고서의 구성은 유형에 따라 SECTION으로 구분되고 있다. 보고서 내 주요 항목으로는 제조사의 정보, 자율주행차와 상대 차량의 사고정보, 인적 및 물적 피해 정도, 사고 상세 설명 등이 포함되어 있다. 이 중 SECTION 2(Accident Information)와 SECTION 5(Accident Details)에 사고 상황을 분석할 수 있는 주요한 데이터가 포함되어 있다(Fig. 1).

SECTION 2 - ACCIDENT INFORMATION/VEHICLE 1				
DATE OF ACCIDENT 12/28/2022	TIME OF ACCIDENT 11:59 ☐ AM ☒ PM	VEHICLE YEAR 2022	MAKE Cruise	MODEL AV
LICENSE PLATE NUMBER	VEHICLE IDENTIFICATION NUMBER	STATE VEHICLE IS REGISTERED IN CA		
ADDRESS/LOCATION OF ACCIDENT 1398 Folsom St	CITY San Francisco	COUNTY San Francisco	STATE CA	ZIP CODE 94103
Vehicle was: ☒ Moving ☐ Stopped in Traffic	Involved in the Accident: ☐ Pedestrian ☐ Bicyclist ☐ Other	NUMBER OF VEHICLES INVOLVED 2		
DRIVER'S FULL NAME (FIRST, MIDDLE, LAST)	DRIVER LICENSE NUMBER	STATE	DATE OF BIRTH	
INSURANCE COMPANY NAME OR SURETY COMPANY AT TIME OF ACCIDENT	POLICY NUMBER			
COMPANY NAIC NUMBER	POLICY PERIOD FROM TO			
Describe Vehicle Damage ☐ UNK ☐ NONE ☒ MINOR ☐ MOD ☐ MAJOR		Shade in Damaged Area 		

Fig. 1 Example of CA DMV Collision report

본 연구에서는 CA DMV 데이터베이스 상에 등록되어 있는 사고 보고서 중 2019년 1월 1일부터 2023년 6월 30일 까지 총 489건의 사고 보고서를 수집하였다. 이후에 이루어질 분석 결과를 고려할 때, 시·공간적 범위를 최대한 일치시키기 위하여 San Francisco County에서 발생한 사고만을 분석 대상으로 하여 초기 분석 데이터를 구성하였다.

3.2. 공간정보 데이터

CA DMV에서 제공되는 사고데이터의 정보만으로는 주행환경 및 도로 공간의 기하 정보에 대해 알 수 없었다. 더불어, 자율주행차 사고 발생 지역이 미국 캘리포니아임을 고려하였을 때 시·공간적 제약으로 실측을 통해 사고지역의 기하 정보를 추출하는 것은 사실상 불가능하다. 이에, 본 연구에서는 Google 지도의 API를 활용하여, 사고 지점의 기하 정보를 수집하였다. 공간정보를 확인할 수 있게 위성 사진을 제공하고 있는 플랫폼은 Earth Explorer, NOAA, EOSDIS Woldview 등이 있으나, 식별 가능한 최소 길이, 길이·넓이 등을 측정할 수 있는 API 성능, 시스템 쾌적성 등을 고려하였을 때, Google Earth의 성능이 가장

4) CA DMV(캘리포니아 차량관리국): California Department of Motor Vehicles

우수하여 해당 플랫폼을 채택하였다. 해당 플랫폼을 활용하였을 때의 가장 큰 이점은 사고 지점의 공간적 범위뿐 아니라, 시간적 범위까지 최대한 일치시켜 사고 지점의 정보를 구득할 수 있다는 점이다. Google Earth는 짧게는 1달에서 길게는 3달 정도의 간격을 두고 지속해서 해당 지점의 이미지 데이터를 수집·제공하기 때문에 사고 발생에 가장 근접한 시점의 공간정보를 확인할 수 있다. 데이터 수집 간격으로 인해 사고 시점과 완벽히 일치하는 기하 정보를 획득할 수는 없으나, 기하 정보는 시간에 따른 변동성이 상대적으로 적기 때문에 사고 시점의 정보를 일정 수준에서 보존하고 있다는 가정하에 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터의 종류와 데이터 수집 방법은 각각 Fig. 2와 Table 1을 통해 나타냈다.



Fig. 2 Identification of spatial information

Table 1. Identification of Spatial information variables

Variables	Measurement method and Contents
Area of Intersection	Setting the end of crosswalk as the boundary of the intersection to calculate the area(square meter)
Distance between Intersections	Distance between the stop line of the current intersection and the stop line of the next intersection(meter)
Number of Lanes	The value obtained by dividing the sum of lanes in each direction of an intersection by 2(unit of number)
Road Width	From the center line of a lane to the center line of an adjacent lane(meter)
Left and Right Turn Lanes	The number of lanes exclusively designated for left or right turns(unit of number)
Exclusive Lanes	The number of lanes exclusively designated for bicycles, buses, and trams (unit of number)
Number of Crosswalks	The number of crosswalks within the intersection (unit of number)
Number of Bus stops	The number of public transportation stops within a radius of 30m from the intersection(unit of number)

4. 연구 방법론

수집된 데이터를 기반으로 자율주행차의 사고 특성 및 유형, 도로 기하·공간 구조와의 관련성을 살펴보고자 한다. 이 과정에서, 통계 분석과 함께 추가적인 결과를 도출하고자 하며, 사고 보고서 항목인 ‘사고 내용 설명(Description)’에 대해 텍스트 임베딩 기법을 적용하였다.

텍스트 임베딩은 텍스트 데이터를 수치 혹은 행렬 형태로 변환하는 과정이다(Kim et al., 2022). 텍스트 임베딩을 진행하기 위해 토큰화 및 불용어 제거 등 전처리 과정을 거쳤으며, 단어들의 빈도수와 단어가 전체문장에서 발휘하고 있는 영향력을 살펴보았다. 해당 과정 이후 NetworkX 라이브러리를 통해 단어 간 의미연결망을 생성하였다. NetworkX는 네트워크 알고리즘 탐구와 분석을 위한 파이썬 언어 패키지이다. 해당 라이브러리를 통해 최단 경로, 매개변수 중심성, 클러스터링 등 그래프 알고리즘의 구조 측정을 실현할 수 있다(A. Hagberg et al., 2008).

의미연결망은 문장 내에서 단어들의 구조적 관계를 통해 의미를 분석한다(Wang & Rada, 1998). 의미연결망은 기본적으로 노드(Node)와 7링크(Link)로 구성되며, 밀도(Density)와 중심성(Centrality)를 측정 도구로 한다. 중심성이란 개별 노드가 네트워크 내에서 어떠한 역할을 하는지를 분석하며, 밀도는 네트워크 내에서 구성 요소 간 연결 정도를 의미한다(G. Hwang & S. Moon, 2017). 네트워크 중심성은 연결중심성, 근접중심성, 매개중심성 등으로 구분된다(D. R. Hwang et al., 2014). 연결 중심성은 한 노드에 직접 연결된 Edge의 개수를 의미하며, 이를 통해 중심이 되는 노드를 파악할 수 있다. 매개 중심성은 다른 노드들과의 연결망을 구축하는데 얼마나 기여하는가를 의미한다. 근접 중심성은 특정 노드가 다른 노드까지 도달하는 경로가 얼마나 짧은지를 나타낸다(Zafarani R et al., 2014). 연결중심성, 근접중심성, 매개중심성 각각에 대한 산술식은 Eq. (1), Eq. (2), Eq. (3)과 같으며, 의미연결망을 도식화한 자료는 Fig. 3과 같다(Krippendorff, 2004).

$$\text{Degree Centrality} = \frac{\text{Centrality of Node}(x)}{\sum_{k=1}^n \text{Centrality of Node}(k)} \quad (1)$$

$$\text{Betweeness Centrality} = \frac{(N-1)(N-2)}{2} \quad (\because N = \text{노드수}) \quad (2)$$

$$\text{Closeness Centrality} = \frac{1}{\frac{1}{N-1} \times \sum_{X \neq 1} L_{X,1}} \quad (\because L = \text{노드 사이 최소경로}) \quad (3)$$

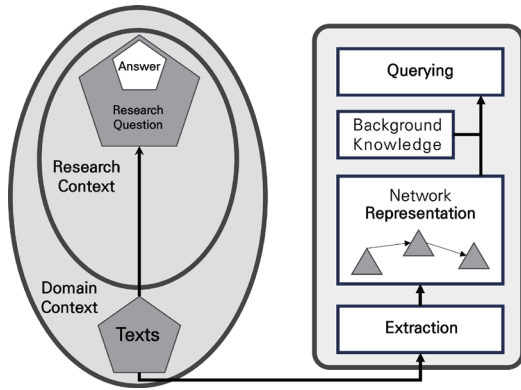


Fig. 3 Semantic Network Analysis - Krippendorff's framework

5. 분석 결과

5.1. 통계 분석

수집된 CA DMV 사고 보고서를 대상으로 기초 통계 분석을 시행하였다. 현재까지는 자율주행차가 상용화되기 이전이라는 점과 제조사가 특정 시간대에 자율주행차량을 운행할 가능성이 있다고 판단되어 사고 발생 건수에 내용 보단 사고의 유형과 특성에 주안을 두어 분석하였다. 먼저, 사고 시 충돌로 인한 피해 면적을 살펴보았다(피해 면적이란 차량을 30개의 단위 면적으로 구분하여 충돌 크기만큼 사고 조사관이 표시한 정보를 의미한다). 단위 피해 면적의 개수가 1개일 때가 가장 많았으며(46.5%), 이는 자율주행차 사고는 경미한 충돌이 많음을 시사한다(Fig. 4).

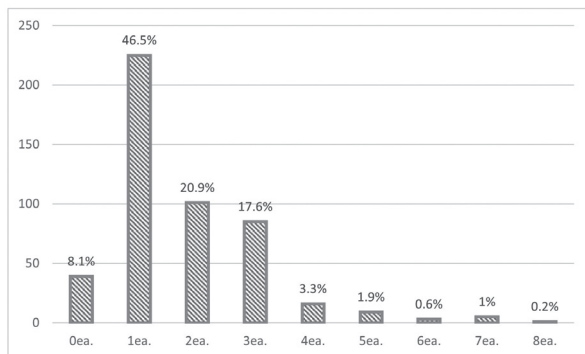


Fig. 4 Statistics for Impact Area

다음으로는 충돌유형에 대한 정보를 살펴보았다(Fig. 5). 후방 추돌이 35%로 가장 많았으며, 측면 충돌은 23.6%, 전방 충돌은 13.4%로 도출되었다. 사고 상세 설명(Description)과 연계하여 살펴보았을 때 후방 추돌과 측면 충돌 사고는 대부분 주변 차량이 사고의 원인이었다. 다시 말해 전체 사고의 절반 정도는 주변 차량이 사고 원인으로 작용하였으며, 사고 건수로 자율주행차의 위험성을 평가하게 되면 위험성이 과대 추정될 수 있음을 시사한다.

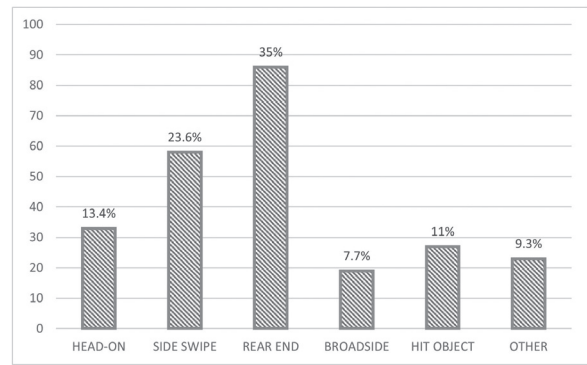


Fig. 5 Statistics for Impact Sites

마지막으로는 사고 직전 자율주행차의 거동에 대해 살펴보았다(Fig. 6). 사고 직전 정지 상태일 때가 38.5%, 전방으로 진행하고 있을 때가 27.2%, 회전하고 있을 때가 11.6% 정도로 도출되었다. 정지 상태일 때 사고 비율이 높은 것은, Fig. 4에서 분석되었던, “전체 사고의 절반 정도는 주변 차량이 사고 원인으로 작용하였다”라는 결과를 간접적으로 설명할 수 있게 된다. 분석 결과는 사고의 절반 정도는 주변 차량에 의해 발생하지만, 나머지 절반에 해당하는 사고는 자율주행차가 사고 원인으로 작용할 수 있음을 시사하므로, 추가적인 분석을 진행하였다.

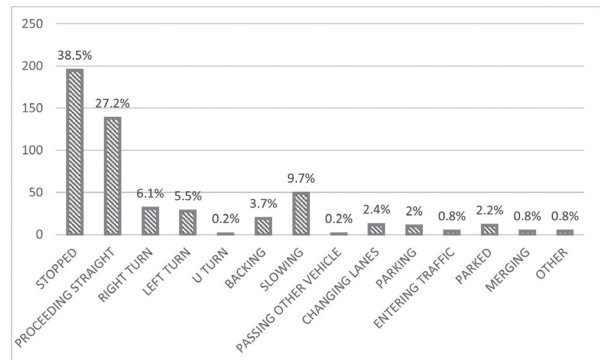


Fig. 6 Autonomous Vehicles Movement Before the Impact

5.2. 텍스트 임베딩

통계 분석에 이어, 자율주행차 사고의 개괄적인 내용을 파악하고 사고상황을 대표하는 핵심 키워드가 무엇인지 알아보고자 텍스트 임베딩 기법을 적용하여 사고 보고서를 분석하였다. 분석에 사용한 데이터는 SECTION 5에 기술된 사고상황에 대한 설명(Description)으로부터 추출하였다. 추출된 Description 집합에서 등장 빈도수가 높은 상위 20개의 키워드를 살펴보았다. 주요 키워드로는 후방(Rear), Stop(정지), Intersection(교차로), Yield(양보) 등이 있다. 후방 충돌에 대한 정보를 가진 키워드(후방, 정지)가 다수 도출되었다. 키워드 분석 결과에 대해, 자율주행차 보고서 내에 포함된 사고 상세 설명(Description)과 연

계하여 해당 키워드에 내포된 의미를 추정해 보았다. 교차로라는 키워드가 다수 등장하였으며, 이는 사고 발생 빈도가 높은 도로 유형을 나타낸다. 마지막으로 양보라는 키워드가 자주 등장하는 것으로 보아, 자율주행차는 복잡한 도로 환경에서 주행 성능이 감소하거나, 다량의 연산이 요구되는 복잡한 운전 행동을 수행하지 못한다고 추정할 수 있다. Description을 대상으로 진행한 상위 20개 키워드 분석 결과는 Fig. 7을 통해 나타냈다.

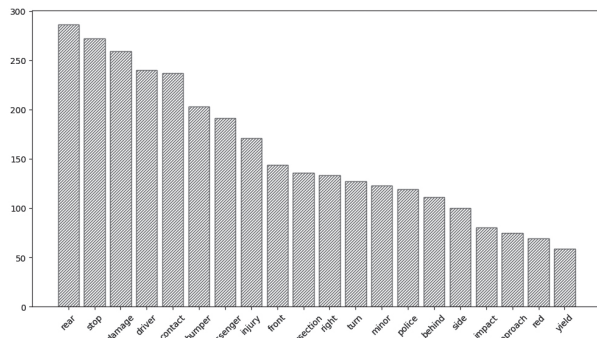


Fig. 7 Keyword Analysis Results for Description

키워드 분석 결과를 기반으로, 키워드 간 중요도 및 연결 정도를 알아보기 위해 위세 중심성(Eigenvector centrality)을 활용한 연결 중심성 분석을 진행하였다(Fig. 8). 분석 결과 위세 중심성 지수가 높은 단어 상위 7개는 Contact(0.15984), Behind(0.15968), Damage(0.15966), Driver(0.15920), Rear(0.15857), Bumper(0.15848), Stop(0.15774)으로 나타났다. 통계 분석 결과를 반영하듯 후방 추돌과 관련된 키워드가 중점적으로 도출된 것을 알 수 있다.

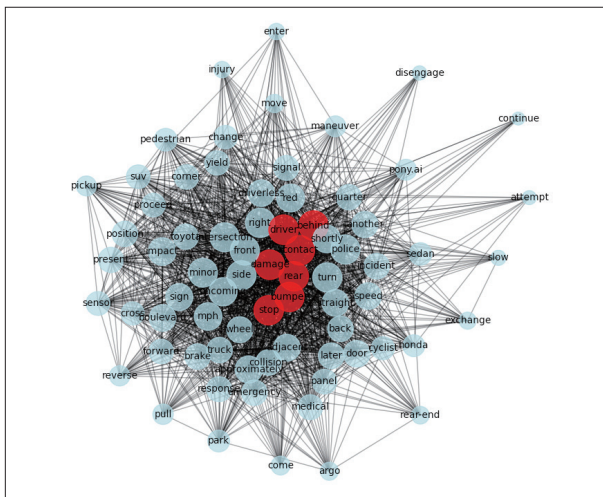


Fig. 8 Visualization of Connection Centrality Analysis Results

통계 분석과 텍스트 임베딩 기법을 적용하여 자율주행차 사고 특성에 대한 개괄적인 분석을 진행하였다. 이전의 분석 결과를 종합하면, 자율주행차 사고로 인한 피해는 경

미한 경우가 많으며, 절반 정도의 사고는 다른 차량이 원인이 되어 발생한다는 것이다. 여기서 주목해야 할 점은 자율주행차가 가해 차량이 되어 발생한 사고가 적지 않다는 점과 사고의 원인이 자율주행차에 있는 경우, 사고 위험도가 증가할 수 있다는 점이다. 이에 따라, 가해 차량 자율주행차인 사고를 중심으로 해당 사고의 원인이 무엇인지에 대해 기하 데이터를 통해 살펴보고자 한다.

5.3. 기하 데이터 분석

선행연구 검토를 통해 도로의 기하적 특성은 교통사고에 영향을 끼칠 수 있는 것을 파악하였으며, 교통사고 발생 원인의 약 34%가 도로 환경 요인임을 밝힌 연구도 존재한다(Park et al., 2019). 자율주행차 또한 도로의 기하적 특성이 센서 및 알고리즘 성능에 영향을 주고 교통사고의 원인으로 작용할 수 있다고 판단된다. 이에 따라, 도로의 기하 특성과 자율주행차 사고의 관계를 살펴보고자 한다.

본 연구의 데이터는 사고가 발생했을 때만 작성되는 사고 보고서로 자율주행차를 대상으로 한 특수한 자료이다. 자료의 특수성에 따라, 해당 자료 이외에 데이터를 수집하는 데 어려움이 있었다. 이러한 제약조건으로 인해 대조군(사고 발생 이외의 정상적인 주행 상황)의 정의 및 각종 통계 분석을 진행하기엔 한계가 있었다. 이에 따라 본 연구진에서는 수집한 사고 보고서 데이터와 기하 데이터 간 교차 분석을 통해 상호 연관성을 살펴보았다.

앞서, Google 지도의 API를 활용하여 8개 종류의 기하 데이터를 수집하였으나 유의미한 통계적 결과를 제공하는 일부 항목의 분석 결과를 기술하였다. 각각의 기하 데이터는 5가지 범주(식별 불가, 피해 없음, 경미, 중간, 심각)로 구분된 사고심각도(Vehicle Damage)를 기준으로 분석하였으며, 식별 불가에 해당하는 사고 내용은 제외하였다.

먼저 노상주차장의 존재 여부와 사고심각도를 비교하였다(Fig. 9). 분석 결과 노상 주차된 차량이 존재할 때 사고의 심각도가 증가했음을 알 수 있었다.

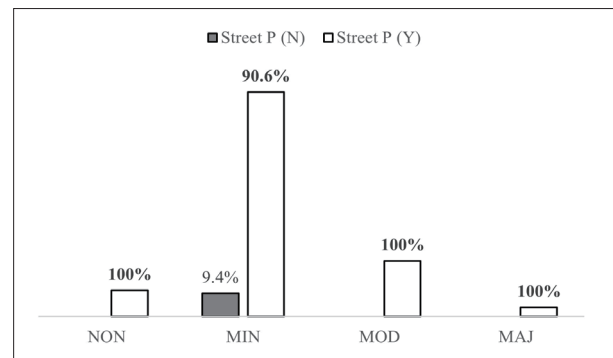


Fig. 9 Comparison of Accident Severity and Street Parking

다음으로는, 전용차로의 존재 여부와 사고심각도를 비교하였다(Fig. 10 & Fig. 11). 사고 지점 내에 버스전용차로와 자전거전용차로가 존재 여부를 확인하였으며, 사고 지점에 전용차로가 존재할 때 사고심각도가 높았다. 버스전용차로가 존재할 때는 사고심각도가 중상 이상의 사고가, 자전거전용차로가 존재할 때는 중경상 사고가 발생할 확률이 높았다.

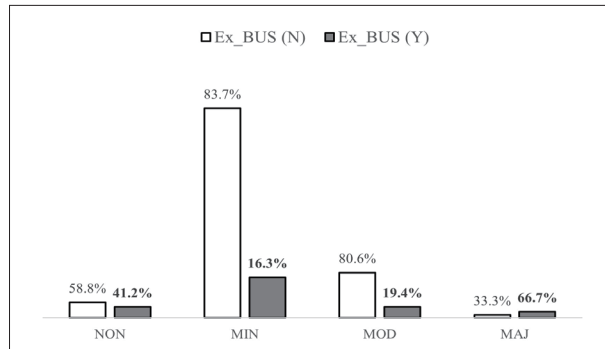


Fig. 10 Comparison of Accident Severity and Exclusive Bus Lane

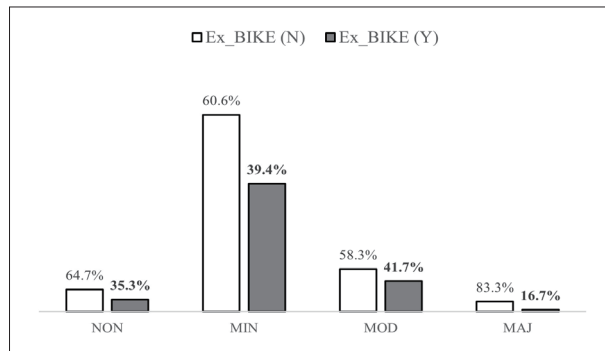


Fig. 11 Comparison of Accident Severity and Exclusive Bike Lane

이러한 결과는 버스전용차로가 존재할 때 차 대 차(버스) 사고가 발생할 가능성이 크고, 자전거전용차로가 존재할 때 차 대 자전거 사고가 발생할 가능성이 크기 때문으로 추정된다.

차로 수와 사고심각도 간의 비교도 진행하였다. 분석 결과는 Fig. 12에 나타났다. 해당 자료의 범례에 제시된 차로 수는 왕복 차로 수이며, 분석의 용이성을 위해 2개 차로 수 별로 그룹을 구성하였다. 분석 결과, 차로 수가 많은 복잡한 도로 환경일수록 사고심각도가 증가하는 것으로 도출되었다. 경미한 피해의 경우 4차로 이하의 도로에서 발생률이 29%였으나, 중간 정도 피해의 경우 4차로 이하의 도로에서 발생률이 19%로 확연하게 감소한다. 또한 심각한 사고의 경우 4차로 이하 도로에서는 발생하지 않았다. 이러한 결과는 차로 수가 증가하면서, 주변 교통 객체와 요구되는 상호작용의 횟수와 간섭이 증가하고 이에 따른 자율주행 시스템의 오작동이 혹은 센서의 인식 오류가 발생했을 것으로 추정된다.

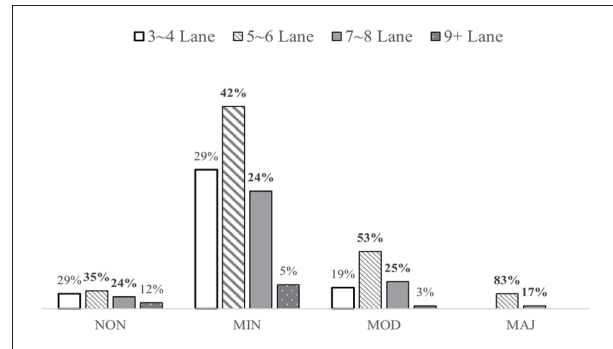


Fig. 12 Comparison of Accident Severity and Number of Lane

마지막으로 인접한 버스 정류장의 개수와 사고심각도 간의 비교를 진행하였다. 버스 정류장이 존재하게 되면, 버스의 정차 및 승객의 승하차로 인해 교통류에 영향을 줄 수 있다. 이러한 특성이 자율주행차의 사고에 영향을 끼칠 수 있다고 판단되어 사고 지점 반경 30m 이내의 버스 정류장 개수를 기준으로 분석하였다(Fig. 13).

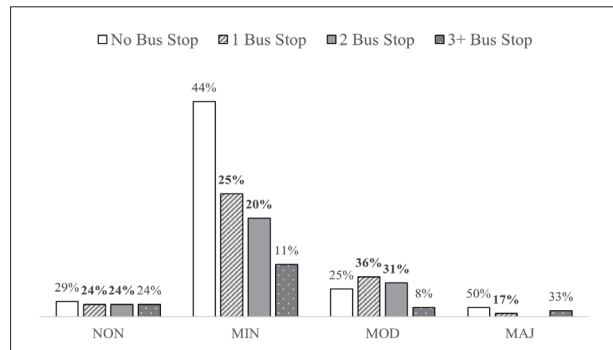


Fig. 13 Comparison of Accident Severity and Bus Stop

분석 결과, 사고 지점 주변에 버스 정류장이 존재할 때, 사고심각도가 높게 나타나는 것으로 확인되었고, 버스 정류장의 개수가 증가할수록 사고심각도가 높게 나타나지는 않았다. 앞서 언급하였듯, 버스 정류장의 존재가 교통류에 변화를 발생시켰고, 이로 인해 예측하지 못한 주변 객체의 움직임 변화가 자율주행차의 시스템에 영향을 끼친 것으로 추정된다.

6. 결론

본 연구는 지속해서 이슈화되고 있는 자율주행차의 안전성 문제에 대해 살펴보고, 사고의 원인을 기계 또는 시스템으로부터가 아닌 도로의 공간적 정보로부터 접근하여 살펴보았다. 지금까지, 일반 차량 사고의 원인을 규명하고자 하는 연구는 다수 수행되었고 도로의 공간적 특성이 사고의 원인으로 작용한다는 연구들이 존재한다. 최근 들어서 자율주행차의 사고 원인을 규명하고자 하는 연구는 일

부 진행되었으나 대부분의 연구가 기계장치 및 시스템의 오류를 규명하는 연구였다. 따라서, 자율주행차의 안전성 문제가 대두되는 현재, 사고의 원인을 기계 혹은 시스템 결합으로만 설명하기보단 다각화된 관점에서의 분석이 필요한 시점이다. 이에 따라, 도로의 공간적 특성이 일반 차량 사고에 영향을 줄 수 있다는 선행연구의 관점에서, 자율주행차의 사고 또한 도로의 공간적 특성에 영향을 받을 수 있다고 판단하여 본 연구를 진행하였다.

본 연구의 데이터로는 캘리포니아 차량 관리국(CA DMV)에서 수집 및 관리하는 자율주행차 사고 보고서를 사용하였다. 캘리포니아주의 자율주행차 관련 법·규제에 의해, 사고의 심각도와 관계없이 제조사는 모든 종류의 사고를 보고서 형식으로 보고해야 한다. 수집·관리된 보고서 중 2019년 1월 1일부터 2023년 6월 30일까지 총 489건의 보고서를 추출하여 연구를 진행하였다. 또한, 사고 지점에 대한 공간적 특성 및 기하 데이터를 추출하고자 Google Earth 시스템의 API 기능을 활용하여 8종류의 기하·공간 데이터를 추가로 수집하였다.

수집된 데이터를 기반으로, 일반 통계와 텍스트 임베딩, 교차분석을 진행함으로써 자율주행차 사고의 전반적인 특성과 도로 공간의 특성과의 관계를 알아볼 수 있었다. 일반 통계 분석의 결과로 다음과 같은 자율주행차 사고 특성을 도출할 수 있었다. 자율주행차 사고는 피해 심각도가 낮은 경미한 사고의 발생비율이 높다. 이러한 결과는 사고 유형 분석 및 충돌 직전 자율주행차 움직임 상태를 분석한 결과와 연계된다. 사고 유형을 보았을 때 35% 정도의 사고가 후방 추돌로 인해 발생하였고, 사고 직전 자율주행차가 정지한 상태일 때가 38.5%로 도출되었다. 이러한 결과는 절반 정도의 자율주행차 사고는 타 차량이 사고의 원인이 되어 발생함을 알 수 있다.

해당 부분에 대한 상세한 내용을 파악하기 위해 사고 설명 자료(Description)를 취합하여 텍스트 임베딩 기법을 적용해 보았다. 위세 중심성(Eigenvector centrality)을 활용한 연결 중심성 분석을 진행하였으며, 분석 결과 위세 중심성 지수가 높은 단어 상위 7개는 Contact(0.15984), Behind(0.15968), Damage(0.15966), Driver(0.15920), Rear(0.15857), Bumper(0.15848), Stop(0.15774)으로 나타났다. 통계 분석 결과를 반영하듯 후방 추돌과 관련된 키워드가 중점적으로 도출된 것을 알 수 있다. 통계 분석과 텍스트 임베딩 기법을 적용해 봄으로써, 자율주행차 사고의 특성을 파악할 수 있었다. 자율주행차 사고로 인한 피해는 경미한 경우가 많으며, 절반 정도의 사고는 다른 차량이 원인이 되어 발생한다는 점이다. 여기서 고려해 봐야 할 점은 자율주행차가 가해 차량이 되어 발생한

사고가 적지 않다는 점이며, 피해 수준이 타 사고보다 심각하게 나타난다는 점이다. 이에 따라, 자율주행차 사고를 예방하고 사고심각도를 감소시키기 위한 선행연구의 일환으로 공간·기하 데이터를 중심으로 자율주행차 교통사고를 분석하였다.

사고 지점 주변의 노상주차 존재 여부와 사고심각도를 비교한 결과, 노상 주차된 차량이 존재할 때 사고의 심각도가 증가했음을 알 수 있다. 다음으로 자전거 및 버스전용차로의 존재 여부와 사고심각도를 비교한 결과, 버스전용차로의 경우 중상 이상, 자전거전용차로의 경우 중경상 사고의 등장 비율이 높았다. 이러한 결과는 버스전용차로가 존재할 때 차 대 차(버스) 사고가 발생할 가능성이 크고, 자전거전용차로가 존재할 때 차 대 자전거 사고가 발생할 가능성이 크기 때문으로 추정되며, 자율주행차가 전용차선에 대한 개념이 없거나 인식이 어려움이 있을 것으로 판단된다. 다음으로, 차로 수와 사고심각도를 비교한 결과, 차로 수가 많은 복잡한 도로 환경일수록 사고심각도가 증가하는 것으로 도출되었다. 이러한 결과는 차로 수가 증가하면서, 주변 교통 객체와 요구되는 상호작용의 횟수와 간섭이 증가하고 이에 따른 자율주행 시스템의 오작동이 원인으로 판단된다. 마지막으로, 사고 지점 반경 30m 이내 버스 정류장 존재 여부와 사고심각도를 비교한 결과, 사고 지점 주변에 버스 정류장이 존재할 때, 사고심각도가 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 이는, 버스 정류장의 존재가 교통류에 영향을 끼침으로써 예측하지 못한 주변 객체의 움직임 변화가 발생하여 자율주행 시스템에 영향을 끼친 것으로 판단된다. 정리하자면, 노상주차 존재할 때, 자전거 또는 버스전용차로가 존재할 때, 버스 정류장이 존재할 때 사고심각도가 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구는 자율주행차 사고 보고서를 통해 자율주행차의 사고 특성을 이해하고, 사고의 원인을 도로 공간정보로부터 도출하고자 하였다. 연구를 통해, 자율주행 시스템 안전성에 영향을 끼치는 것으로 보이는 기하·공간 요소를 도출하였으며, 본 연구진이 연구의 한계점으로 제시한 내용은 다음과 같다. 본 연구의 주요한 제약 사항은 데이터 수급의 어려움이다. 자율주행 시대를 대비하기 위한 사전적 연구임에 따라, 자율주행차 상용화 이전인 현재 시점에서, 수급 가능한 데이터는 제한적이다. 분석에 사용된 데이터 역시, 사고상황 자체에 대한 정보만 갖고 있어, 추가적인 통계 분석 및 모델링을 진행하는 데 어려움이 있다. 그럼에도, 자율주행차의 실도로 주행 상황에서 발생한 사고를 학술적으로 분석해 보려는 시도는 도전적 가치가 있다고 판단된다. 향후 자율주행차가 상용화되고, 충분한 데이터가 확보된다면, 보다 다양한 통계적 방법론을 적용하여 후속

연구를 진행하고자 한다. 본 연구에서는 미국 캘리포니아 주의 데이터를 사용하였으나, 향후 국내 사례를 적용한 분석도 진행하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 자율주행차의 주행 안전성을 향상하고, 사고심각도를 감소시키기 위한 도로의 기하·공간적 구성과 자율주행차 알고리즘 학습의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2023년 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음

이 논문은 2023년도 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)의 지원을 받아 수행된 연구임 (23AMDP-C160881-03, 자율협력주행을 위한 미래도로 설계 및 실증 기술 개발)

REFERENCES

- A., Hagberg, D., Schult, P., Swart (2008). "Exploring Network Structure, Dynamics, and Function using NetworkX", *Proceedings of the 7th Python in Science conference*, pp.11-15.
- Apostolos, Ziakopoulos., George, Yannis. (2020). "A review of spatial approaches in road safety." *Accident Analysis & Prevention*, Vol.135, 105323, pp.1-30.
- Autonomous Vehicle Market (By Application: Defense, Transportation; By Level of Automation: Level 1, Level 2, Level 3, Level 4, Level 5; By Propulsion: Semi-autonomous, Fully Autonomous; By Vehicle: Passenger Car, Commercial Vehicle) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023-2032*, PRECEDENCE RESEARCH, Ottawa, Ontario, Canada, Available at: <https://www.precedenceresearch.com/autonomous-vehicle-market> (Accessed: July 25, 2023).
- CA DMV. (2023). AUTONOMOUS VEHICLE COLLISION REPORTS, CA DMV, Sacramento, CA 95818, United States, Available at: <https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/autonomous-vehicle-collision-reports/> (Accessed: October 1, 2023).
- Chen, H., Chen, H., Liu, Z., Sun, X., Zhou, R. (2020). "Analysis of Factors Affecting the Severity of Automated Vehicle Crashes Using XGBoost Model Combining POI Data.", *Journal of Advanced Transportation*, pp.1-12.
- Dan Zukowski. (2023). *Self-driving cars have people worried: survey*, SMART CITIES DIVE, 1255 23rd Street, NW Suite 550. Washington, Available at: <https://www.smartcitiesdive.com/news/most-adults-not-comfortable-sharing-road-with-self-driving-cars-av-autonomous-vehicles/644395/> (Accessed: August 11, 2023).
- D., R., Hwang., S., J., Moon., G., E., Hwang. (2016). "Social Network Analysis of Dance Studies utilizing Big Data". *Korean journal of physical education*, Vol.55, No.1, pp.611-621
- Go-Eun, Hwang., Shin-Jung, Moon. (2017), "Analysis of Big Data by Regimes of Image Contents Field.", *Journal of Digital Contents Society*, Vol.18, No.5, pp.911-921.
- JengSoon, Park., Oh, Ju-taek., Oh, Sangjin., Kim, Youngjun. (2016). "Analysis of Contributory Factors in Causing Crashes at Rural Unsignalized intersections Based on Statistical Modeling". *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol.34, No.2, pp. 123-134.
- Kim, Dong, Jin., Lee, Ha, Rim., Lee, Gil, Jae. (2022). "A Study on the Research Trends in Domestic Economic Education Using BERT-based Text Embedding and Clustering.", *Journal of Learner-Centered Curriculum and Instruction*, Vol.22, No.18, pp.931-947.
- Kim, Kyungseok., Kim, Hongsam. (1997). *A Study on the Analysis of Relationships between Roadway Geometries and Safety*, Guk Toyeon 96-35(국토연 96-35)
- Kim, Sang-Rok., Bae, Yun-Gyeong., Jung, Jinhyuk., Kim, Hyungjin. (2011). "Factor Analysis of Accident Types on Urban Street using Structural Equation Modeling(SEM)." *Journal of Korean Society of Transportation*, vol.29, No.3, pp.93-101.
- Krippendorff, K. (2004). *Content Analysis: An Introduction to Its Methodology (second edition)*. Sage Publications, Thousand Oaks, CA.
- Kurt, B. Gerstner., Eric, J. Tanenblatt., Michael, Malterer., Peter Stockburger., Michael, F. Ledgett. (2023). Global Guide to Autonomous Vehicles 2023, CSBrand-111184-Global AV Repor, Dentons Lee, 23 Chungjeong-ro, Seodaemun-gu, Seoul.
- LEE, Hojun., KANG, Minhee., SONG, Jaemin., HWANG, Keeyeon. (2023). "Development of Autonomous Vehicle Traffic Accident Scenarios in Urban Areas Based on Real-World Accident Data Using Association Rule Mining.", *Journal of Korean Society of Transportation*, 41(3), pp. 375-393.
- Sangmin, Park., Hwanpil, Lee., Jaehyun, So., Yun, Ilsoo. (2021). "Study of Analysis for Autonomous Vehicle Collision Using Text Embedding.", *The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol.20, No.1, pp.160-173.
- Su, Jin, Park., Seung-Yong, Kho., Ho-Chul, Park. (2019). "The Effects of Road Geometry on the Injury Severity of Expressway Traffic Accident Depending on Weather Conditions.", *The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol.18, No.2, pp.12-28.
- Wang, W., Rada, R. (1998). "Structured hypertext with domain semantics." *ACM Trans. Inform. Syst.*, Vol.16, pp.372-412.
- Zafarani, R., Abbasi, M. A., & Liu, H. (2014). "Social media mining: an introduction". Cambridge University Press.

