

퍼지 AHP를 이용한 자율주행차량의 운행 위험도 평가 모델 개발 연구

A Study on the Development of Driving Risk Assessment Model for Autonomous Vehicles Using Fuzzy-AHP

김시원* · 권재경** · 황재성*** · 이상수**** · 이철기*****

* 주저자 : 아주대학교 일반대학원 교통공학과 석사과정

** 공저자 : 아주대학교 일반대학원 교통공학과 석사과정

*** 공저자 : 아주대학교 교통연구센터 연구원

**** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수

***** 교신저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수

Siwon Kim* · Jaekyung Kwon* · Jaeseong Hwang** · Sangsoo Lee* · Choul ki Lee*

* Dept. of Transportation Eng., Ajou University

** Dept. of Transportation Research Center., Ajou University

† Corresponding author : Choul ki Lee, Cklee@ajou.ac.kr

Vol. 22 No.1(2023)
February, 2023
pp.192~207

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.1.192>

Received 1 December 2022
Revised 8 December 2022
Accepted 19 December 2022

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

요약

Lv.4 자율주행의 상용화를 위하여 안전한 도로환경과 자율주행차량이 안전하게 운행할 수 있는 구체적인 정의가 필요되고, 미래 교통안전 문제에 대비하기 위해 자율주행차량의 안전한 운행 여부를 판단할 수 있는 위험도 평가모델이 요구된다. 자율주행차량의 운행 위험요소를 선정 및 등급화를 수행하였으나, 자율주행차량의 사고 발생 원인과 운행 자료 구축에 어려움이 있어 자율주행 분야 전문가 설문조사를 활용하여 정성적 자료로 의사결정방법을 적용하였다. 의사결정자의 애매모호한 언어적 표현, 불확실함을 정량적 수치로 변환하는 퍼지-계층화 분석법을 통해 다기준 의사결정에 있어 기존의 계층화 분석법(AHP)의 단점을 보완할 수 있었다. 상위·하위속성들의 가중치 도출 과정을 거쳐, 물리적 인프라인 도로선형이 자율주행차량의 운행 위험도에 가장 중요한 위험요소로 분석되었다. 또한, 자율주행차량의 운행 위험도 범례를 통하여 평가 대상지 5곳에 대한 자율주행차량 운행 위험 여부를 도출하였다.

핵심어 : 자율주행 운행 위험도, 운행설계영역, 퍼지-계층화 분석법

ABSTRACT

Commercialization of level-4 (Lv.4) autonomous driving applications requires the definition of a safe road environment under which autonomous vehicles can operate safely. Thus, a risk assessment model is required to determine whether the operation of autonomous vehicles can provide safety to is sufficiently prepared for future real-life traffic problems. Although the risk factors of autonomous vehicles were selected and graded, the decision-making method was applied as qualitative data using a survey of experts in the field of autonomous driving due to the cause of the accident and difficulty in obtaining autonomous driving data. The fuzzy linguistic representation of decision-makers and the fuzzy analytic hierarchy process (AHP), which converts

uncertainty into quantitative figures, were implemented to compensate for the AHP shortcomings of the multi-standard decision-making technique. Through the process of deriving the weights of the upper and lower attributes, the road alignment, which is a physical infrastructure, was analyzed as the most important risk factor in the operation risk of autonomous vehicles. In addition, the operation risk of autonomous vehicles was derived through the example of the risk of operating autonomous vehicles for the 5 areas to be evaluated.

Key words : Risk of Autonomous Driving, ODD(Operation Design Domain), Fuzzy-AHP

I. 서 론

1. 배경 및 목적

범 국가적으로 자율주행차량의 기술개발과 제도개선이 활발히 이루어지고 있고, 우리나라는 2027년 Lv.4 자율주행 상용화를 목표로 다양한 노력을 기하고 있다. (Kim and Ki, 2020)은 현재 자율주행은 차량마다 기술적 수준이 상이하고, 도로별 인프라를 포함한 여러 요소들이 다르기 때문에 안전을 확보하기 위해 자율주행의 특정 작동조건을 정의하기 위한 운행설계영역(ODD, Operation Design Domain)을 설정하고 있다.

보다 안전한 자율주행을 위해서는 시스템의 작동에 필요한 상황이 상세히 정의되어야 하고, 동적·정적인 물체를 인식하고 구별할 수 있는 판단기술과 안개·강우 등의 환경, 주행경로 상 돌발상황 등 인식 및 예측하기 어려운 상황의 정보를 제공하여야 할 필요가 있다.

Kim et al.(2021)은 자율주행에 앞서 안전한 도로환경을 구축하기 위해 안전시설물의 설치 기준에 대한 도로 안전지표를 개발하여 도로 안전 및 운영관리에 긍정적인 영향을 미치고 있다. 자율주행 차량도 실시간 교통상황과 ODD의 변화를 분석하고 자율주행에 관련 정보를 제공할 수 있다면, 우회 및 안전운전 전략을 보다 수월히 수립할 수 있을 것이다.

본 연구는 도로 및 교통 관리자 측면에서 자율주행차량의 운행 위험도를 평가하고자 ODD 6가지 요소 및 자율주행차량의 사고 발생 원인 분석, 자율차량 외 일반차량으로 인한 사고 가능성을 고려하여 자율주행차량 및 일반차량을 대상으로 위험요소를 도출하였다. 또한, 도출된 위험요소를 바탕으로 자율주행차량의 운행 위험도를 평가할 수 있는 모델 개발을 목적으로 하였다.

2. 연구범위 및 절차

본 연구에서는 자율주행차량의 주행 위험도 평가 모델을 개발하기 위하여 ODD의 구성요소, 자율주행차량의 운행 위험요소를 분석하며 자율차량 이외의 일반차량으로 인한 사고 가능성을 고려함으로써 자율주행차량 및 일반차량의 위험요소를 검토 및 분류하였다. 자율주행차량의 주행 위험도 평가에 활용되는 위험요소들을 선정함에 있어, 수집 가능 여부, 계량화 여부, 자율주행차량과의 사고 연관 요인, 향후 시스템 구축 간 연계 및 통합이 가능한 요소 여부를 종합적으로 검토하여 선정하였다.

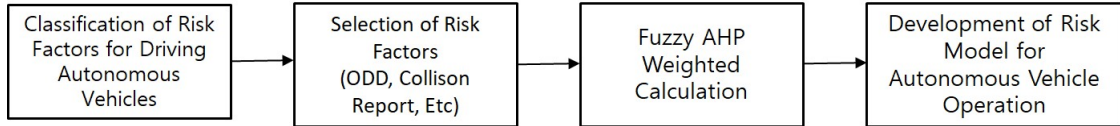
자율주행차량의 사고 연관 요인 분석에 있어, 미국 캘리포니아 차량관리국(Department of Motor Vehicles, DMV)에서 수집한 자율주행차량 충돌보고서를 토대로 사고 일자, 사고 시각, 사고 유발원인, 기상, 노면상태 등에 대한 내용을 2019년~2022년 총 4개년 자료를 바탕으로 분석하였다.

하지만, 자율주행차량 충돌보고서 상에는 ODD의 구성요소인 6개 항목이 전부 포함되어 있지 않으며 정확한 주행정보 데이터는 각 차량제조사에서 미제공하기에 구득이 어려운 상황을 감안하여 정성적인 자료를 활

용하여 의사결정 방법을 적용하였다.

자율주행차량의 운행 위험요소들이 다른 요인들과의 복합적인 영향을 미치기 때문에 의사결정의 애매모호함, 불확실성을 정량적 수치로 변환하는 퍼지-계층화법(Fuzzy-AHP)으로 각 위험요소의 가중치를 도출하였다.

본 논문에서는 퍼지-계층화법(Fuzzy-AHP)을 활용하여 보다 정확한 수치와 의사결정 과정을 체계적으로 수립함으로써, 각 요소의 애매모호한 정도를 표현하고 자율주행차량의 운행 위험도 평가에 적용하였다.



<Fig. 1> Research Process Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process

II. 관련 문헌 고찰

1. NHTSA 운행설계영역 분류

2018년 9월, 미국 도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)은 자율주행자동차의 안전한 자율주행 시스템 활성화와 기술 개발 등에 대해 자율주행시스템 보고서를 발간하였다. 운행설계영역(Operational Design Domain, ODD)의 6가지 요소에 대해 분류하였으며, 물리적 인프라 요소, 운영적 제약 요소, 객체, 환경 조건, 연결성, 구역이 포함된다.

<Table 1> Classification of ODD Elements

Classification	Elements
Physical Infrastructure	Roadway Types, Roadway Surfaces, Roadway Geometry
Operational Constraints	Speed Limit, Traffic Conditions
Objects	Signage, Roadway Users, Non-roadway User Obstacles/Objects
Environmental Conditions	Weather, Weather-induced Roadway Conditions, Particulate Matter, Illumination
Connectivity	Vehicles, Traffic Density Information, Remote Fleet Management System, Infrastructure Sensors & Communications
Zones	Geo-fencing, Traffic Management Zones, School/Construction Zones, Regions/States, Interference Zones

2. 캘리포니아 DMV 자율주행차량 충돌보고서

미국 캘리포니아주에서 Waymo, GM 등 차량 제작사에서 자율주행 시범운영 중에 있다. 각 제조사별 주행 데이터는 비공개하기에 관련 주행데이터에 관하여 구독하기에 한계가 있다. 그러나, 캘리포니아 차량관리국(Department of Motor Vehicles, DMV)에서는 자율주행차량의 사고이력자료를 공개하고 있다.

캘리포니아 차량관리국은 운전자가 탑승하지 않은 상황의 자율주행 실험을 2018년부터 허가하였으며 자율주행차량의 운행간, 사고가 발생할 경우 인적피해, 재산 피해가 발생시 사고 10일 이내에 자율주행자동차 교통사고 보고서를 의무적으로 제출하도록 규정되어있다. 위 자료는 캘리포니아 차량관리국에서 확인 가능하며 자율주행차량의 사고일자, 사고 시각, 사고 유발원인(보행자, 오토바이 등), 기상(시정악화, 주야, 맑음 흐림 등), 노면상태

(결빙, 건조, 습윤 등), 조도 등의 정보들을 포함하고 있고, 사고 발생 원인에 대해 추측이 가능하다. 자율주행차량 사고보고서는 6가지의 Section으로 구분되며 각각의 항목은 아래의 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Autonomous Vehicle Collision Report Components

Section	Components
Section - 1 Manufacturer's Information	Manufacturer's name, Business name
Section - 2 Accident Information (Vehicle 1)	Date of accident, Time of accident, Vehicle year, Make, Describe vehicle damage Model Vehicle was (Moving / Stopped in traffic), Shade in damaged area Involved in the accident (Pedestrian / Bicyclist)
Section - 3 Other Party's Information(Vehicle 2)	Vehicle year, Model Vehicle was (Moving / Stopped in traffic) Involved in the Accident (Pedestrian / Bicyclist)
Section - 4 Injury (Death, Property Damage)	Injured, Deceased, Driver, Passenger, Bicyclist, Property
Section - 5 Accident Details Description	Autonomous Mode, Conventional Mode Additional information attached : Weather, Lighting, Roadway surface, Roadway conditions, Movement preceding collision, Type of collision, Other associated factor(s)
Section - 6 Certification	Program director, Authorized representative, printed name and title, Signature, Date signed

3. 선행연구 고찰

자율주행차량 도입에 따른 사상사고 발생 등에 대하여 안전성 문제가 제기되고 있으며, 자율주행 운전 능력의 검증은 통하여 미래에 발생할 교통안전 문제에 대한 대비가 필요하다고 지적하였다. 미국 도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)에서 자율주행 시스템에 관하여 발간한 보고서의 운행설계영역(Operation Design Domain, ODD) 식별 및 분류, 자율주행 시스템의 사물 객체, 이벤트 탐지 및 반응(Object and Event Detection and Response, OEDR)의 식별, 자율주행 테스트 및 평가 방법 개발 등을 제시하였다.(KoRoad, 2020)

Lyou(2018)는 자율주행차량의 사고 영향요인으로서, 자율주행시스템 차량 장치의 기계적인 문제, 시스템상의 오류로 인한 인접 차량 또는 노변 인프라부터의 잘못된 정보 수신, 신호등 및 도로인프라의 결함, 예측하기 어려운 자연재해와 돌발 상황, 해킹 요소 등이 있으며, 다양한 요인들이 복합적으로 발생하여 자율주행차량 사고가 발생할 수 있다고 주장하였다.

Kim et al.(2022)은 운행설계영역을 초과하는 상황에 대하여 자율주행시스템의 안전도 평가가 필요함을 강조하고 있다. 자율주행시스템이 안개 속에서 속도제한 표지판 식별에 따른 감속 등 실도로와 유사한 K-City의 평가환경(자동차 전용도로, 교외도로부, 도심부 등)과 주행시험로(전과장에 시험장, 비포장로 등)를 바탕으로 운행설계영역 기반의 평가 요소를 제시하였다.

Hwang et al.(2022)은 자율주행차량이 운행하게 될 실도로 환경은 돌발상황, 도로 구조 변화 등 다양한 위험 요소들을 직면하게 되며 레이더, 카메라, 라이다 등 자율주행차량의 눈 역할을 수행하는 차량 센서에 결함이 발생할 경우, 인접 상황을 인식하지 못하거나 오인식에 따른 객체 검출 불가로 교통사고가 발생할 수 있음을 역설하였다.

Schoettle(2017)는 자율주행차량의 안전한 운행을 위하여 주변 상황의 정확한 인식과 왜곡되지 않는 정보의 송수신이 필요함을 설명하고 있다. 또한, 센서의 이물질, 저조도 또는 눈부심, 시정거리가 확보되지 않는 날씨(폭우, 강설, 안개 등)와 고층 건물 및 지형에 따른 통신간섭구역 등의 요인들로 인해 자율주행자동차의 운

행 안전성이 감소함을 시사하고 있다.

Filiz(2020)는 자율주행차량의 레이더, 라이다 등의 센서를 바탕으로 운전자의 인식 영역을 지원 및 대신하여 역할을 수행하고 있으며, 안전한 자율주행을 위해 객체로부터 검지 거리, 각도, 속도 등의 정보와 차량과 인접한 주변에 대한 공간정보 등의 수집이 필수적이거나 시정거리 미확보, 돌발상황, 센서의 성능적 결함 등이 발생하면 자율주행차량의 안전성이 낮아질 수 있음을 주장하였다.

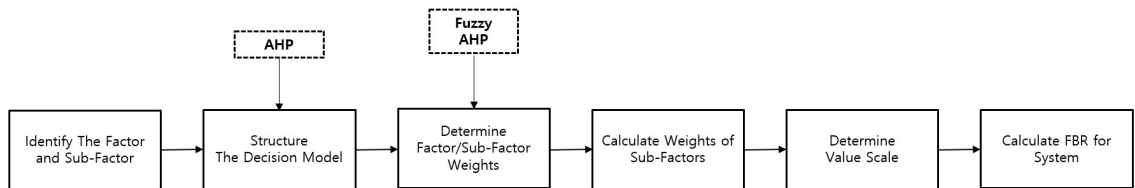
4. 퍼지-계층화 분석법(Fuzzy Analytic Hierarchy Process)

의사결정자가 결정을 내릴 때 개인적인 경험과 판단을 명확하게 반영하기 위해 계층적 의사결정 기법(AHP)를 활용하지만 의사결정자의 언어의 애매모호한 표현을 정량적으로 나타낼 수 없는 한계를 가지고 있다. 또한, 쌍대 비교를 통하여 분석되기에 의사결정자에 따라 AHP의 신뢰도에 영향이 발생하며 가중치 산정할 때에 그 적합성이 충분하지 못할 수 있다.(Lee and Kim, 2003) 따라서, 본 연구에서는 의사결정에 있어 언어적인 의사결정 정도를 퍼지이론을 적용한 퍼지-계층화 분석법으로 연구를 수행하고자 한다.

퍼지이론은 1965년 Zadeh를 통해 발전된 이론으로서, “그렇다 또는 아니다”로 명확하게 나타는 이분법적 논리가 아닌 “거의 그렇다 또는 거의 그렇지 않다” 등의 애매모호한 불확실성(Faulty Behaviors Risk, FBR)을 나타내는데 활용된다. 불확실함을 표현하는 질적인 방법이자, 정성적 자료를 수치로 변환 가능하기에 애매모호성을 담고 있는 인간의 의사결정을 명확하게 나타내는 방법론이다.

퍼지-계층화 분석법은 전문가 설문조사로부터 언어적 애매모호함을 퍼지 척도화하며 각 항목의 중요도를 산출하고 기존의 계층화 분석법인 AHP보다 주관성을 더 정량화하여 객관성을 높일 수 있다.(Lee et al., 2002)

또한, 퍼지(Fuzzy)이론을 적용하여 의사결정자가 다기준 의사결정시에 애매모호함과 현실상황의 불확실성을 해결하기 위해 수행하는 방법이며 의사결정자의 판단을 수치로 도출하는 것보다 신뢰구간 값을 바탕으로 의사결정자가 결정을 내릴 수 있다.(Son, 2008)



<Fig. 2> Fuzzy Analytic Hierarchy Process Logic

Ⅲ. 데이터 분석 및 퍼지-계층화법 가중치 산정

1. 캘리포니아 DMV 자율주행차량 충돌보고서 분석

2019년부터 2022년까지 4개년 동안 미국 캘리포니아 차량 관리국(DMV)에 신고된 자율주행차량 충돌보고서 395건을 분석하였다. 자율주행차량 충돌보고서에서 필요한 데이터를 선별하기 위해 ‘모드(Mode)’ 변수로 자율주행차량의 사고 데이터를 추출하였다.

추출 후 정제한 데이터는 257건이며 사고발생 시각, 기상, 사고 발생 시 조명, 노면 상태, 도로 상황으로 구분하였다. 사고발생 시각 항목은 주간(09:00~18:00)에 155건, 야간(18:00~09:00)에 102건 발생하였으며 주간 시간 대비하여 야간시간대에 자율주행차량 사고가 발생한 것을 알 수 있다. 기상 항목은 수집된 데이터 중에서 흐리면서 비가 내리는 복합적인 상황이 2건 있었으며 사고 발생시 조명, 노면 상태, 도로 상황 3개 항목에 대해선 일부 자료가 기재되지 않아 239건의 사고가 도출되었다.

일반적인 상황인 주간 시간 & 맑은 날씨일 때 교통량이 많기에 자율주행차량의 사고 역시 해당 조건에서 많은 사고가 발생하였다. 다만, 야간과 흐림 및 강우, 어두운 조명 상황에서 자주 발생하는 것을 알 수 있으며 센서의 인식 문제로 인한 사고가 많이 발생한 것으로 사료된다. 자율주행차량의 센서가 고도화되었다도 급작스러운 돌발상황, 시야 확보가 되지 않는 환경에서 사고를 피하기에 어려움이 있으며 도로표지판, 기하구조 등 사물 및 객체를 인식의 용이성이 중요하다.

또한, 운행설계영역의 구성요소 중에서 구역 및 통신의 연결상태 등에 대한 자료는 미 포함되었으며 각 제조사 별로 자율주행차량 운행데이터는 제공되지 않았다.

<Table 3> Autonomous Vehicle Collision Accident Factor by California DMV

Category	Factors and Data							Total
Accident Time	Daytime(09:00~18:00)				Nighttime(18:00~09:00)			257
	155				102			
Weather (Including Duplication)	Clear	Cloudy	Raining	Snowing	Visibility	Wind	Other	259
	232	19	6	0	2	0	0	
Lighting	Daylight		Dawn		Dark-Street Lights		Dark-Street Lights Not Functioning	256
	174		9		73		1	
Road Surface	Dry		Wet		Snowy-Icy		Slippery (Muddy, Oily, Etc)	244
	233		11		0		0	
Road Conditions	No Unusual Conditions	Holes	Obstruction	Construction	Reduced Roadway Width	Flooded		239
	236	0	1	1	1	0		

2. 운행설계영역 및 자율주행차량 운행 위험요소 도출

NHTSA에서 분류한 ODD 6가지 요소, 자율주행차량의 사고발생 원인 분석, 일반차량으로 인한 사고 가능성을 고려하여 자율차량 및 일반차량을 대상으로 위험요소를 검토하였으며, 기준은 6가지로 분류한 각 항목 별로 자료의 수집 가능성, 계량화 여부, 자율차량 연관성, 향후 시스템 구축 용이성(연계 및 통합)을 고려하여 분석대상의 위험요소를 선정하였다.

물리적 인프라 요소에는 「교차로 형태, 도로 선형, 교통신호기, 시설물 고장 및 훼손」, 운영조건 요소에는 「교통정보, 제한속도, 보호구역」, 통신 요소에는 「통신 간섭구역, IoT 인프라 구축, HP Map(LDM) 구축」, 환경 요소에는 「날씨, 시정거리, 노면상태, 주/야 시간, 온도」, 사고 요인에는 「사고 다발지역, 돌발상황 정보」, 객체 요소는 선정 여부가 없으며 총 17개의 운행 위험 영향요인을 도출하였다.

<Table 4> Determination of Risk Factors for Autonomous Vehicle Operation

Classification	Categorization	Attribute	Normal vehicle	Autonomous Vehicle	ODD	Collection Status	Quantification	Connected Vehicle	Connected System	Selection	
Physical Infrastructure	Roadway types	Expressway, National Highway, ETC.	O	X	O	O	O	X	O	X	
	Roadway Pavement	Gravel, Concrete, Asphalt, ETC.	O	O	O	X	O	O	X	X	
	One-way traffic	One-way Traffic Status	O	O	O	O	O	O	X	X	
	Intersection Type	Intersection, Interchange, Roundabout, ETC.	O	O	O	O	O	O	O	O	
	Geometric Design	Curved, Straight, Slope	O	O	O	O	O	O	O	O	
	Traffic Signal Controller	Defect Status	O	O	X	O	O	O	O	O	
	Median Barriers	Median Barriers Status	O	X	X	X	O	O	X	X	
	Facilities Failure	Failure, Defect Status	O	O	X	O	O	O	O	O	
Operational Constraints	Traffic Information	V/C, Free/Slow/Jammed	O	O	O	O	O	O	O	O	
	Speed Limit	Max, min speed limit	O	X	O	O	O	X	X	O	
	Protective Zone	School Zone, Silver Zone, ETC.	O	O	O	O	O	O	O	O	
Connectivity Condition	Communication Interference Zone	Underground roads, High- Building of Density Area	X	O	O	O	X	O	O	O	
	IoT Infrastructure Establishment	Internal / External environment of vehicle, Roadside Unit	X	O	O	O	O	O	O	O	
	HD Map (LDM) Establishment	LDM Status	X	O	O	O	O	O	O	O	
	Information distortion	GPS, V2V Recognition Data, ETC.	X	O	X	X	X	O	X	X	
	Equipment Malfunction	LDM Awareness Equipment		X	O	X	X	X	O	X	X
		Camera, LiDar ETC. H/W and S/W		X	O	X	X	X	O	X	X
	Control Equipment Malfunction	Steering, accelerating, brake Equipment, ETC.	X	O	X	X	X	O	X	X	

Classification	Categorization	Attribute	Normal vehicle	Autonomous Vehicle	ODD	Collection Status	Quantification	Connected Vehicle	Connected System	Selection
Weather Conditions	Weather	Clear, Cloudy, Raining, Snowing	O	O	O	O	O	O	O	O
	Date	Holiday Season, Vacation, ETC.	O	X	X	X	X	X	X	X
	Visibility Distance	Fog, Particulate Matter, Smog, ETC.	O	O	O	O	O	O	O	O
	Roadway Surface	Snowy, Icy, Flooded, ETC.	O	O	O	O	O	O	O	O
	Day and Night	Day, Night	O	O	O	O	O	O	O	O
	Temperature	Ambient Temperature	O	O	O	O	O	X	O	O
Accident	Black Spot	Black Spot Status	O	X	X	O	O	X	O	O
	Driver Inattention	Illegal Acts, Non-implementation of safe driving	O	X	X	X	X	X	X	X
	Incident Information	Road Construction, Vehicle Defect, ETC.	O	O	O	O	O	O	O	O
Objects	Road User	Pedestrian, Bicyclist, PM User, ETC.	O	O	O	X	O	O	X	X
	Non-Road User	Construction Material, Animal, ETC.	O	O	O	X	O	O	X	X

3. 자율주행차량 운행 위험요소의 등급화

물리적 인프라, 운영조건, 통신환경, 기상환경, 사고 요인으로 구분된 5가지의 항목에 대한 17개의 속성 요인들을 등급화하였으며 이는 <Table 5>와 같다. 위험요소의 등급화는 O, X를 통한 이분법을 기본으로 수행하였으며 3가지 이상 분류가 필요한 경우, 선행 연구를 통하여 선정하였으며 각 등급에 따른 점수를 차등 부여하였다.

Kim and Park(2022)은 최소시정거리 50m부터 최대시정거리 200m이하까지 4단계로 구분하여 시정거리를 실험하였으며 강우량 20mm/h, 50mm/h의 2단계의 설정을 통해 안개 및 강우상황에서의 LiDAR 인식 성능에 대하여 연구하였다. 강우의 경우, 비가 오지 않는 맑음, 20mm/h 이하의 강우, 20mm/h~50mm/h, 50mm/h 이상의 상황과 50m 이하, 50m~100m, 100m~200m, 200m 이상의 시정거리를 토대로 네 가지의 등급화를 수행하였다.

자율주행자동차의 안전주행에 필요한 요소 중 하나로서 -35도에서 45도 사이에서 자율주행이 가능하여야 한다고 제시하고 있다. 이는, 1981년 1월 5일 경기도 양평군에서 -32.6도와 2018년 8월 1일 강원도 홍천군에서 41.0도를 기록한 기상청 관측 기온 자료를 바탕으로 하였다.(LH, 2022)

5가지의 항목에 대한 17개의 속성요인 등급화를 통하여 자율주행차량의 운행 위험요소 평가 척도를 제시하고자 한다.

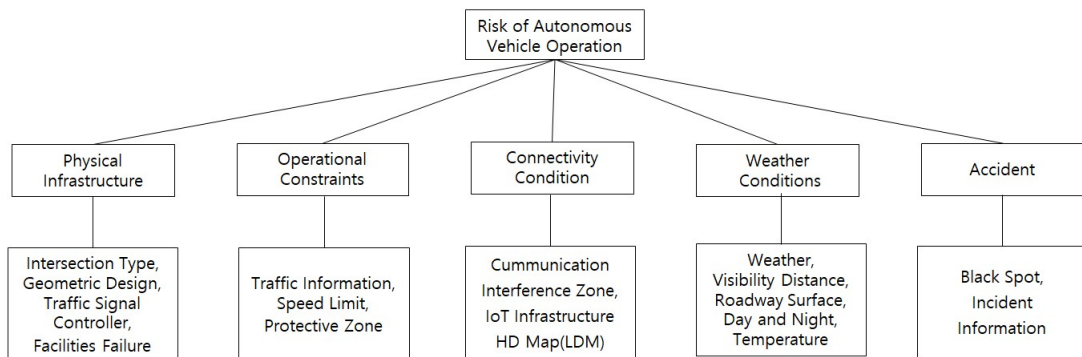
<Table 5> Rating of Risk Factors for Driving Autonomous Vehicles

Classification	Categorization	Rating
Physical Infra structure	Intersection Type	Formal Intersection : 0, Atypical Intersection : 1
	Geometric Design	Degree of Curvature $\leq 5^\circ$: 0 Degree of Curvature $>5^\circ$: 1
	Traffic Signal Controller	Normal : 0, Failure : 1
	Facilities Failure	Normal : 0, Failure : 1
Operational Constraints	Traffic Flow Staus	30Km/h $>$: 0, 15~30Km/h : 0.5, 15Km/h $<$: 1
	Speed Limit	Enforcement Camera Installation : 0, Enforcement Camera Not Installation : 1
	Protective Zone	Not Entering : 0, Entering : 1
Connectivity Condition	Cummunication Interference Zone	Not Entering : 0, Entering : 1
	IoT Infrastructure Construction	Built : 0, Non - Built : 1
	HD Map (LDM) Construction	Built : 0, Non - Built : 1
Weather Conditions	Weather	Sunny : 0, 20mm/h \leq Rain : 0.3, 20<Rain<50mm/h : 0.6, Rain \geq 50mm/h : 1
	Visibility Distance	200m \leq : 0, 100m<Visibility Distance<200m : 0.3, 50m<Visibility Distance<100m : 0.6, 50m \geq Visibility Distance : 1
	Roadway Surface	Dry : 0, Wet & Slippy : 1
	Day and Night	Day(09:00~18:00), Night(18:00~09:00)
	Temperature	-35°C \leq Degree \leq 45°C : 0, Range Other : 1
Accident	Black Spot	Not Entering : 0, Entering : 1
	Incident Information	Non - Occurrence : 0, Occurrence : 1

4. 퍼지-계층화법 가중치 산정

1) 계층적 분류체계 선정

퍼지-계층화법의 첫 번째 과정은 기존의 계층화 분석방법과 동일하게 자료 검토 및 관련 분야 전문가 설문조사를 통해 문제 해결에 앞서 계층적으로 분류하는 과정이 필요하다. 달성 목표를 위한 5개의 상위 속성(Criteria)과 17개의 하위속성(Sub-Criteria)으로 계층 구조를 설계하고, 각 수준별 요인들은 독립적인 관계를 갖되 하위 속성과는 종속적인 관계를 지니며 이는 <Fig. 3>과 같다.



<Fig. 3> Hierarchical Classification System

2) 전문가 설문조사

자율주행차량의 운행 위험도 평가를 위해 <Fig. 3>과 같이 상위속성과 하위속성으로 계층적 분류체계를 수립한 후 자율주행 전문가 20명을 대상으로 상위속성들에 대한 하위속성들의 영향과 중요도 설문조사를 수행하였다.

쌍대 비교를 통하여 각 수준별에서 요인마다 상대적 중요도(Weights) 측정이 가능하며 의사결정자의 언어적인 표현에 대해 적정 수치를 부여하는 정량적인 전환 과정이 수반된다. 또한, Satty의 9점 척도 방식을 활용하여 “동일하게 중요하다”라는 답변에 1점, “강하게 중요하다”라는 답변에 5점, “절대적으로 중요하다”라는 답변에 9점을 부과하며 해당 척도는 <Table 6>과 같다.

<Table 6> 9-Point Scale by Satty

1	3	5	7	9	2,4,6,8
Equal Importance	Moderate Importance	Strong Importance	Very Strong Importance	Extreme Strong Importance	The Intermediate Values

전문가를 대상으로 실시한 설문 답변의 일관성 여부를 확인하고자 일관성 지수(Consistency Index, CI)와 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)을 산출하였으며 일관성의 허용 한도를 뜻하는 RI(Random Index)를 활용하였다. 다만, 퍼지-계층화분석법은 일관성 지수를 계산할 수 없기에, 계층화 분석법을 통해 응답자의 일관성을 측정하였다. 일관성 지수가 0.1이하인 경우에만 설문의 일관성이 확보되며, 전문가 20명의 설문 중에서 전원이 0.1이하로 분석되어 최종적으로 전문가 20명의 가중치 값을 분석하고자 한다.

3) 삼각 퍼지수

의사결정자가 특정 대안을 평가함에 있어, 정확한 데이터를 도출하는 것은 보다 선호도에 따른 언어적 방법으로 나타내는 것을 선호한다. 반면, Fuzzy 이론은 모호한 언어적 선호도를 반영 가능하며 AHP 기법의 계층화 장점과 9점 척도의 한계를 극복하는 삼각 퍼지수(Triangular Fuzzy Number, TFN)는 척도를 제시하고 있다. 언어적 판단정도를 정량적으로 대응시키며 숫자 대신 하한값, 중앙값, 상한값의 범위를 갖으며 <Table 7>과 같다.

<Table 7> Linguistic Variables and Triangular Fuzzy Number

Linguistic Scale	Triangular Fuzzy Scale	Triangular Fuzzy Reciprocal Scale
Equal Importance	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Moderate Importance	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
Strong Importance	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
Very Strong Importance	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
Extreme Strong Importance	(9, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/9)

4) 가중치 도출

20명의 전문가가 설문조사는 자율주행차량 운행 위험요소의 중요도를 산정하는 근거자료로 활용하였다. 먼저, 설문 결과를 토대로 쌍대비교 결과를 삼각퍼지수로 환산하였으며 전문가들의 설문 답변을 단일 의견으로 변환하기 위해 기하평균 방법을 활용하였다. 이후, 상위속성들의 가중치를 <Table 8>과 같이 산정하였으며, 상위속성인 물리적 인프라(0.4), 사고 속성(0.216), 운영조건(0.176), 기상환경(0.126), 통신환경(0.082) 순으

로 가중치가 도출되었다.

<Table 8> Weights of Each Factor by Criteria

Criteria	Lower Value	Median	Upper Value	Weight
Physical Infrastructure	0.250	0.411	0.54	0.400
Operational Constraints	0.097	0.165	0.265	0.176
Connectivity Condition	0.050	0.086	0.110	0.082
Weather Conditions	0.052	0.117	0.208	0.126
Accident	0.099	0.220	0.330	0.216

하위속성 17개에 대한 가중치를 도출한 <Table 9>를 보면, 물리적 인프라-도로선형(0.406), 운영조건-교통정보(0.645), 통신환경-통신 간섭구역(0.384), 기상환경-시정거리(0.413), 사고-돌발상황 정보(0.552)가 각 상위 속성에 대한 가장 높은 하위속성 가중치로 분석되었다. 하위속성 가중치 도출 과정에서 통신환경-통신 간섭구역(0.384)과 IoT 인프라 구축(0.357) 가중치가 가장 근소한 차이(0.027)를 나타내고 있으며 “IoT 인프라 구축” 항목도 중요한 속성임을 알 수 있다.

자율주행차량의 운행 위험요소에 대한 최종 가중치는 물리적 인프라-도로선형이 0.163의 가중치로 가장 높게 분석되었으며, 사고-돌발상황 정보(0.119), 운영조건-교통정보(0.114), 물리적 인프라-안전 시설물 고장 및 훼손(0.108), 사고-사고다발지역(0.097) 등의 순으로 분석되었다.

<Table 9> Fuzzy-AHP Weight Calculate

Criteria	Criteria Weight(A)	Sub-Criteria	Lower Value (X)	Median (Y)	Upper Value (Z)	Weight(B)	Total Weight (C=A*B)
Physical Infrastructure	0.400	Intersection Type	0.118	0.247	0.353	0.240	0.096
		Geometric Design	0.198	0.429	0.594	0.406	0.163
		Traffic Signal Controller	0.042	0.082	0.125	0.083	0.033
		Facilities Failure	0.140	0.281	0.391	0.271	0.108
Operational Constraints	0.176	Traffic Flow Staus	0.386	0.683	0.865	0.645	0.114
		Speed Limit	0.134	0.234	0.300	0.222	0.039
		Protective Zone	0.077	0.133	0.189	0.133	0.023
Connectivity Condition	0.082	Communication Interference Zone	0.181	0.359	0.611	0.384	0.032
		IoT Infrastructure Construction	0.228	0.359	0.485	0.357	0.029
		HD Map (LDM) Construction	0.144	0.249	0.385	0.259	0.021
Weather Conditions	0.126	Weather	0.127	0.238	0.342	0.236	0.030
		Visibility Distance	0.192	0.416	0.631	0.413	0.052
		Roadway Surface	0.110	0.215	0.316	0.214	0.027
		Day and Night	0.041	0.082	0.127	0.083	0.010
		Temperature	0.027	0.053	0.084	0.054	0.007
Accident	0.216	Black Spot	0.202	0.431	0.711	0.448	0.097
		Incident Information	0.285	0.499	0.871	0.552	0.119
Total	1.000						1.000

IV. 자율주행차량의 운행 위험도 평가 모델의 검증

전문가 설문조사를 통하여 자율주행차량의 운행 위험요소에 대한 가중치를 <Table 8>, <Table9>과 같이 도출하였다. <Table 11>에서 상위속성 5개 항목에 대한 하위속성 17개 항목의 하위값, 중앙값, 상위값, 가중치를 토대로 자율주행차량의 운행 위험도 범례를 제시하였다.

자율주행차량의 운행 위험도 지수를 산출하기 위해 앞서, <Table 8>의 상위속성 가중치 순위를 기반으로 추가적인 위험도 가중치(W)를 적용하였으며, 해당 가중치는 <Table 10>과 같다.

계산과정으로는 식(1)과 같으며 우선, 하위속성에 대한 가중치(B)와 각각의 하한값(X), 중앙값(Y), 상한값(Z)을 곱셈하여 각 상위속성의 소계 값을 도출하였다. 이후, 해당 상위속성의 추가적인 위험도 가중치(W)를 각 상위속성의 소계 값과 곱셈한 후 이를 합산하여 최종적인 자율주행차량의 운행 위험도 지수를 도출하였다.

$$Risk\ of\ Danger = (\sum Physical\ Infrastructure\ Danger\ Risk \times Weight + \sum Operational\ Constraints\ Danger\ Risk \times Weight + \sum Connectivity\ Condition\ Danger\ Risk \times Weight + \sum Weather\ Condition\ Danger\ Risk \times Weight + \sum Accident\ Danger\ Risk \times Weight) \dots\dots\dots (1)$$

<Table 10> Result of Autonomous driving Risk

Criteria	Risk Weight(W)	Sub-Criteria	Lower Value (B*X)	Median (B*Y)	Upper Value (B*Z)
Physical Infrastructure	50	Intersection Type	0.028	0.059	0.085
		Geometric Design	0.080	0.174	0.241
		Traffic Signal Controller	0.003	0.007	0.010
		Facilities Failure	0.038	0.076	0.106
		Subtotal	0.149	0.316	0.442
Total(Subtotal*Risk Weight)			7.507	15.821	22.111
Operational Constraints	25	Traffic Flow Status	0.249	0.441	0.558
		Speed Limit	0.030	0.052	0.067
		Protective Zone	0.010	0.018	0.025
		Subtotal	0.289	0.511	0.65
Total(Subtotal*Risk Weight)			7.224	12.754	16.242
Connectivity Condition	8	Communication Interference Zone	0.070	0.138	0.235
		IoT Infrastructure Construction	0.081	0.128	0.173
		HD Map (LDM) Construction	0.037	0.064	0.100
		Subtotal	0.188	0.33	0.508
Total(Subtotal*Risk Weight)			1.506	2.644	4.060
Weather Conditions	15	Weather	0.030	0.056	0.081
		Visibility Distance	0.079	0.172	0.261
		Roadway Surface	0.024	0.046	0.068
		Day and Night	0.003	0.007	0.011
		Temperature	0.001	0.003	0.005
		Subtotal	0.137	0.284	0.426
Total(Subtotal*Risk Weight)			2.065	4.255	6.360

Criteria	Risk Weight(W)	Sub-Criteria	Lower Value (B*X)	Median (B*Y)	Upper Value (B*Z)
Accident	30	Black Spot	0.090	0.193	0.319
		Incident Information	0.157	0.275	0.481
		Subtotal	0.247	0.468	0.800
Total(Subtotal*Risk Weight)			7.434	14.056	23.980
Result of Autonomous driving Risk (Score)			25.736	49.530	72.752

식(1)에 따라 자율주행차량이 운행하기에 가장 안전하고 모든 조건을 충족하는 범위는 26점 미만이며 안전 범위는 26~50점, 50~73점은 주의 구간, 73점을 초과하는 범위는 자율주행차량의 운행에 있어 위험한 수준인 것으로 도출하였다.

<Table 11> Risk of Danger Legend

Classification	Fulfillment	Safety	Caution	Warning
Score	<26	26~50	50~73	73<

본 연구의 적용은 자율주행차량이 운행하면서 링크/구간 단위로 실시간 위험도가 산출되어야 하나 선행적인 차원에서 지역 단위의 운행 위험도를 산출하였다. 자율주행차량 운행 위험요소 가중치와 위험도 범례를 기반으로 5개 대상지의 자율주행 운행 위험도를 평가하였다. 자율주행차량의 시범운행 실증사업을 진행하고 있는 세종시와 판교제로시티, 자율주행서틀 실증을 위해 설정된 안양시 도시부도로 각 1개소, 국토지리정보원의 국토정보맵을 통하여 의왕 고천동, 화성 병점동 일대 2곳 임의로 설정하여 총 5곳을 적용하였다.

<Table 5>의 등급화 항목에 없는 요소, 국토지리정보원 국토정보맵의 정밀지도 상 포함되지 않은 요소는 <Table 9>의 중앙값을 활용하였다. 세종시, 판교제로시티, 안양시의 경우, 자율주행 실증 실험과 관련된 운행 설계영역을 토대로 자율주행 운행 위험도 산출을 수행하였으며, <Table 12>의 표에 따르면 임의 대상지와 비교하였을 때 소통상태, 보호구역, 통신간섭구역, IoT 인프라 구축, HD Map(LDM) 구축, 날씨, 시정거리, 노면상태 항목에 대해서 추가적인 분석이 이뤄졌다.

임의 대상지인 의왕 고천동과 화성 병점동 일대는 정밀도로지도의 항목을 기반으로 분석한 결과, 신호기와 안전 시설물 등 동일한 요소가 포함되었다. <Table 10>의 자율주행차량 운행 위험도 산출과정과 동일하게 5곳에 대한 분석을 수행하였고 의왕, 화성시 대상지의 운행 위험도가 다른 3곳과 비교하였을 때 20~25점 가량 높으며 이는, 자율주행 운행 시 주의 단계에 포함된다. 사고 요인의 사고다발지역 및 돌발상황 정보는 기본적으로 미 진입, 미 발생으로 인한 0점을 부과하였으나, 자율주행차량이 사고다발지역 진입과 돌발상황이 발생한 특정 순간에서는 이에 상응하는 점수가 부과됨으로써 최종적으로 자율주행차량 운행 위험도가 높아질 것으로 예측된다.

<Table 12> Autonomous Vehicle Operation Risk Result of Verification Target Area

Classification	Categorization	Verification Target Area & Characteristic Status				
		Uiwang (Gocheon)	Anyang	Sungnam (Pangyo)	Hwasung (Byeongjeom)	Sejong
Physical Infrastructure	Intersection Type	X(0.247)	X(0.247)	X(0.247)	X(0.247)	X(0.247)
	Geometric Design	X(0.174)	X(0.174)	X(0.174)	X(0.174)	X(0.174)
	Traffic Signal Controller	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)
	Facilities Failure	X(0.281)	X(0.281)	X(0.281)	X(0.281)	X(0.281)
	Subtotal	0.702	0.702	0.702	0.702	0.702
Total(Subtotal*Risk Weight)		35.100	35.100	35.100	35.100	35.100
Operational Constraints	Traffic Flow Status	X(0.441)	O(0.323)	O(0.000)	X(0.441)	O(0.000)
	Speed Limit	X(0.052)	X(0.052)	O(0.000)	X(0.052)	O(0.000)
	Protective Zone	X(0.018)	X(0.018)	O(0.133)	X(0.018)	O(0.133)
	Subtotal	0.511	0.393	0.133	0.511	0.133
Total(Subtotal*Risk Weight)		12.754	9.805	3.325	12.756	3.325
Connectivity Condition	Communication Interference Zone	X(0.138)	X(0.138)	O(0.384)	X(0.138)	O(0.384)
	IoT Infrastructure Construction	X(0.359)	O(0.000)	O(0.000)	X(0.359)	O(0.000)
	HD Map (LDM) Construction	X(0.249)	X(0.249)	O(0.000)	X(0.249)	O(0.000)
	Subtotal	0.746	0.387	0.384	0.746	0.384
Total(Subtotal*Risk Weight)		5.967	3.095	3.072	5.967	3.072
Weather Conditions	Weather	X(0.238)	O(0.000)	O(0.000)	X(0.238)	O(0.000)
	Visibility Distance	X(0.416)	O(0.000)	O(0.000)	X(0.416)	O(0.000)
	Roadway Surface	X(0.215)	O(0.000)	O(0.000)	X(0.215)	O(0.000)
	Day and Night	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)
	Temperature	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)
	Subtotal	0.869	0.000	0.000	0.869	0.000
Total(Subtotal*Risk Weight)		13.035	0.000	0.000	13.035	0.000
Accident	Black Spot	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)
	Incident Information	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)	O(0.000)
	Subtotal	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total(Subtotal*Risk Weight)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total		66.865	48.000	41.497	66.857	41.497
Risk of Autonomous Vehicle Operation		67 (Caution)	48 (Safety)	42 (Safety)	67 (Caution)	42 (Safety)

V. 연구결론 및 기대효과

본 연구는 도로 및 교통 관리자 측면에서 자율주행차량의 운행 위험도를 평가 모델의 개발을 수행하였다. 운행설계영역의 6가지 요소와 캘리포니아 차량관리국의 자율주행차량 충돌보고서 등을 기반으로 자율주행차량의 운행 위험 요소를 도출하였다.

연구의 한계점으로 자율주행자동차의 운행설계영역 세부 기준이 전 세계적으로 명확하게 제시되어 있지 않으며, 미국 캘리포니아 차량관리국의 자율주행자동차 충돌보고서에 운행설계영역의 일부 항목만 포함되어 자율주행차량의 정확한 사고 발생 분석에 어려움이 발생하였다. 또한, 자율주행차량 차량 제작사 측에서 자율주행 운행 간 사고 발생시 자료를 미제공하기에 전체 자료를 구득함에 어려움이 있어 정성적 자료를 활용한 의사결정 방법을 적용하였다.

정량적인 자료 분석을 대체하기 위해 전문가 설문조사를 통한 퍼지-계층화법으로 의사결정자의 애매모호함과 불확실성을 정량적인 수치로 변환하여 각 위험 요소마다 가중치를 분석하여 자율주행차량의 운행 위험도 평가에 활용하였다.

전문가 설문조사를 진행하기에 앞서 상위속성과 하위속성으로 계층 구조를 설계하였으며 Satty의 9점척도와 삼각퍼지수를 통해 의사결정자의 언어적 선호도를 정량적으로 전환하는 과정을 수행하였다. 상위속성에 5개, 하위속성 17개의 가중치가 분석되었으며 이에 따른 자율주행차량 운행 위험도 범례를 도출하였다.

향후, 교통정보·인프라·운영정보·기상·돌발상황 정보 등의 자료를 수집하여 퍼지-계층화법을 통해 자율주행차량의 운행 위험요소 가중치를 적용하면 범례화 된 위험도 산정 방식으로 운행가능 여부를 판단 할 수 있을 것이라 사료된다. 또한, 분석된 자율차량의 운행 위험요소를 차량에 전송하여 주행속도 제어, 위험구간 회피, 운전자 알림 서비스와 관리자 측면에서는 위험원인을 상세히 분석 가능하며 도로의 위험요인에 대한 개선 정책을 적극적으로 추진할 수 있을 것이라 기대된다.

다만, 자율주행자동차가 주어진 조건에서 안전하게 운행할 수 있는 운행설계영역에 대하여 국내의 실정에 적합한 기준과 6가지 항목에 대한 분류체계의 재정립이 요구된다. 이를 바탕으로 자율주행자동차의 운행 안전도를 검증하기 위하여 기존에 자율주행시스템에 정의되어 있지 않은 돌발상황, 센서의 오인식 및 미인식 등의 상황을 대상으로 다양한 시나리오에서의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2022년도 정부(경찰청)의 재원으로 과학치안진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No.092021C28S01000, 자율주행 혼재 시 도로교통 통합관제시스템 및 운영기술 개발)

REFERENCES

- California Department of Motor Vehicles, <https://dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/>, 2022.11.14.
- Filiz, C.(2020), *Can autonomous vehicles prevent traffic accidents?*, In Accident Analysis and Prevention, pp.19-31.
- Hwang, Y. S., Lee, M. S., Lee, Y. H., Kim, B. S. and Lim, T. H.(2022), “A Study on the Achievement of Minimal Risk Condition in Fallback Situation due to Sensor Failure of Self-driving Vehicle”, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences Conference*, pp.197-217.
- Kim, D. K., Hwang, J. S., Lee, J. H. and Lee, C. K.(2021), “Study on the Development of Road Safety

- Judgment Indicators to Establish of Installation Criteria of Safety Facility”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no, 6, pp.192-202.
- Kim, I. Y., Ko, H. G., Yun, J. W., Lee, Y. S. and Yun, I. S.(2022), “Suggestion of Evaluation Elements Based on ODD for Automated Vehicles Safety Verification: Case of K-City”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no, 5, pp.197-217.
- Kim, J. H. and Kee, S. C.(2020), “A Research on the ODD and OEDR Guidelines Based on the Demonstration Case of Autonomous Driving in Sejong City”, *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, vol. 28, no. 10, pp.659-668.
- Kim, J. Y. and Park, B. J.(2022), “A Study of LiDAR’s Detection Performance Degradation in Fog and Rain Climate”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no, 2, pp.101-115.
- Korea Land and Housing Corporation(LH)(2022), *Seongnam Geumto District Autonomous Vehicles Development Environmental Requirements and Operation Method Study*, pp.119-121.
- Korea Road Traffic Authority Traffic Science Institute(2020), *A Study on the Development of Autonomous-Driving AI Driving Capacity Evaluation Techniques and Models*, pp.33-39.
- Lee, D. U. and Kim, Y. S.(2003), “A Study on the Decision Making Model for Construction Projects using Fuzzy-AHP and Fuzzy-Delph”, *Construction Engineering and Management*, vol. 4, no. 1, pp.81-88.
- Lee, S. H., Kim, D. Y. and Kim, S. H.(2002), “A Fuzzy Evaluation Method of Traveler’s Path Choice in Transportation Network”, *Journal of Korea Society of Transportation*, vol. 20, no. 1, pp.65-76.
- Lyoo, B. W.(2018), “Legal Responsibility of Autonomous Vehicle Accident”, *The Law Research institute of Hongik Univ*, vol. 19, no. 1, pp.44-47.
- National Geographic Information Institute of Korea, <http://map.ngii.go.kr/ms/pblict/preciseRoadMap.do/>, 2022.11.28.
- National Highway Traffic Safety Administration(2018), *A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios*, pp.30-39.
- Schoettle, B.(2017), *Sensor fusion: A comparison of sensing capabilities of human drivers and highly automated vehicles*, University of Michigan, pp.1-11.
- Son, M. J.(2008), “The Development of a Practicability Evaluation Model on VE Proposals using the Scenarios Planning and the Fuzzy Analytic Hierarchy Process: Focused on BTL Educational Facilities”, *Seoul City University*, vol. 4, no. 1, pp.36-43.