

AHP 기법을 활용한 도로 인프라 측면에서의 자율주행차량 주행 난이도 비교분석

Comparative Analysis of Driving Difficulty of Automated Vehicles in Terms of Road Infrastructure Using AHP Method

위 정 란* · 이 종 덕**

* 주저자 : 한국교통연구원 4차산업혁명교통연구본부 전문연구원

** 교신저자 : 한국교통연구원 4차산업혁명교통연구본부 책임전문원

Jeongran Wee* · Jongdeok Lee**

* Dept. of the Fourth Industrial Revolution & Transport., Korea Transport Institute

** Dept. of the Fourth Industrial Revolution & Transport., Korea Transport Institute

† Corresponding author : Jongdeok Lee, ljd19359@koti.re.kr

Vol.20 No.6(2021)

December, 2021
pp.214~227

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.6.214>

Received 27 October 2021
Revised 3 November 2021
Accepted 4 November 2021

© 2021. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

본 연구는 주행 고난이도 상황에서 인프라 정보 연계를 통해 도로 상황 인지 수준이 고도화 되면 자율주행 수준을 높일 것으로 판단하여, 자율주행차량이 주행하기 어려운 고난이도 상황을 도로 인프라 운영 측면에서 도출하고자 하였다. 난이도 평가 지표를 도로 인프라 조건 및 주행상황 등 3단계로 구분하여 전문가 대상 설문조사 후 계층화 분석을 하였다. 분석결과, 단속류 도로가 연속류 도로보다 주행 난이도가 월등히 높고, 단속류 도로 하위의 비신호 교차로와 회전교차로의 주행 난이도가 높게 평가되었다. 또한 난이도가 높은 6가지 주행 상황도 비신호 교차로 및 회전교차로에서 발생하는 상황인 것으로 평가되었다. 자율주행차량의 주행 난이도는 다른 차량과의 상충 가능성이 높고 도로에서 차량 스스로가 인지해야 할 요소들이 많으며 현재 주행하는 주행흐름에 급격한 변화를 겪게 될수록 높아지는 것으로 분석되었다.

핵심어 : 자율협력주행, 주행 고난이도 조건, 도로 인프라, 계층화 분석

ABSTRACT

The purpose of this study is to find the driving difficulty of automated vehicles in terms of road infrastructure operation. It was judged out of this study that the level of automated driving would be enhanced if the road situation recognition ability was advanced through the presentation of infrastructure information during the difficult driving situations. The difficulty evaluation index was divided into three stages, and a survey of experts and an AHP were conducted. The result of the AHP showed that the driving difficulty of the interrupted flow was much higher than that of the uninterrupted flow. The AHP results also showed that and the driving difficulty of unsignalized intersections and roundabouts under an interrupted flow was evaluated as the highest. The top six driving situations with high difficulty were also evaluated to occur under unsignalized intersections and roundabouts.

Key words : Connected Automated Driving, Driving Difficulty Condition, Road Infrastructure, Analytic Hierarchy Process(AHP)

I. 서 론

1. 개요

2020년 5월 국내에서 ‘자율주행자동차상용화 촉진 및 지원에 관한 법률(이하 자율차법)’이 시행됨에 따라 자율주행 상용화를 위한 투자를 통해 관련 연구 및 개발을 수행 중에 있다. 특히, 2019년 10월 발표한 ‘미래 자동차산업 발전 전략’을 통해 2027년까지 4단계 자율주행 상용화를 목표로 설정하였고, 2021년부터 자율주행 관계부처 합동으로 시작된 ‘자율주행 기술개발 혁신사업’에서도 역시 2027년까지 4단계 자율주행 상용화를 목표로 설정하고 있다(Kim, 2020).

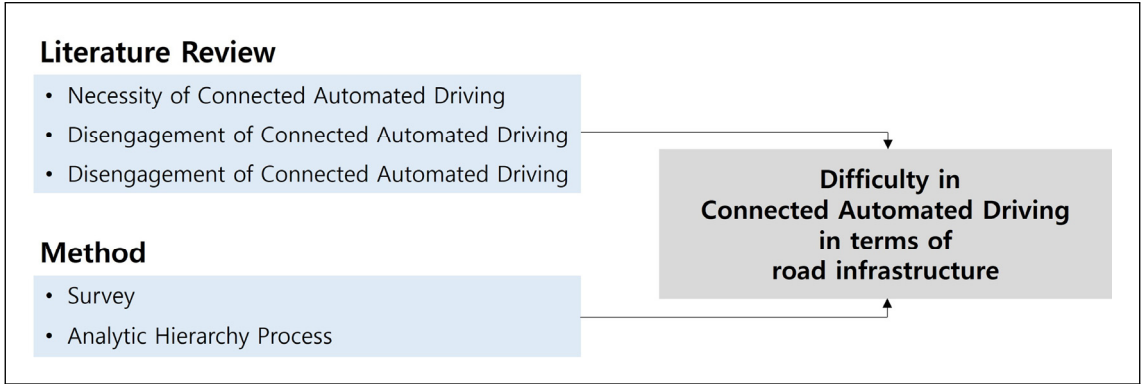
4단계 자율주행은 자율차법에서 구분하는 완전자율주행의 초기단계로 긴급상황 시에 자율주행시스템이 운전자로서의 제어권 전환 없이 스스로 긴급상황에 대처하는 단계를 의미한다. 따라서 자율주행의 4단계로의 기술적 진보를 위해서는 3단계에서 자율주행이 불가능한 상황을 해소하거나 자율주행 난이도가 높은 상황들을 난이도를 낮출 수 있도록 개선해야 할 필요가 있다. 특히 기술개발 및 실증단계에서 해당 기술이 실질적으로 도움이 될 수 있도록 자율주행이 어려운 상황(고난이도 상황)을 도출하고, 이러한 상황을 개선할 수 있도록 차량의 기술을 고도화하거나 혹은 추가적인 인프라 정보의 연계할 수 있는 시스템을 구축하는 것이 바람직하다고 판단된다.

자율주행이 도로에서 지속되기 어려운 상황은 차량 자체의 문제이거나 혹은 외부 요인 등의 원인이 존재할 수 있다. 미국 캘리포니아 자동차관리국의 경우에는 자율주행 모드 해제보고서를 제출받고 기관 홈페이지를 통해 공유함으로써 해제 원인을 분석할 수 있는 자료를 제시하고 있다. 이러한 자료를 통해 자율주행이 지속되기 어려운 상황을 도출할 수 있는데, 자율주행차량의 자율주행 모드 해제보고서 분석을 통해 자율주행 모드 해제 상황을 분석한 여러 선행연구들이 있다(Lv et al., 2018; Yun et al., 2018)

본 연구에서는 자율주행차량의 주행이 지속되기 어려운 상황을 차량 자체의 성능 요인이 아닌, 주행 환경 요인 중에 특히 도로 인프라 운영 측면에서 도출하고자 한다. 해당 도로 인프라 조건을 찾아 인프라 정보 연계 시스템 구축을 통해 도로 상황 인지 수준이 고도화된다면 자율주행차량 자체의 성능 및 기술 향상 없이도 자율주행 수준을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 자율주행차량의 단독 주행을 어려운 도로 인프라 조건 및 해당 조건에서의 상황을 도출하기 위해 도로 인프라 구분 관련 연구와 자율주행 모드 해제상황 및 사고 상황 관련 선행연구 등을 참고하고 자율주행차량이 단독으로 주행하기 어려운 도로 인프라 상황을 도출하고 설문조사 문항으로 작성하도록 하며, 국내 자율주행 운행 및 연구를 수행한 대표적인 산업계, 학계, 연구기관 소속 전문가들을 대상으로 한 AHP 설문조사 수행을 통해 도로 인프라 측면에서 자율주행차량의 주행 난이도를 비교 분석하고자 한다.

2. 연구의 흐름

본 연구의 흐름은 다음과 같다. 우선 선행연구 고찰을 통해 연구 동향을 파악하고, 본 연구의 목적을 더욱 명확히 하고자 한다. 다음으로는 본 연구의 방법론인 AHP 분석방법에 대한 고찰을 하고, 해당 방법론에 맞춰 설문 문항을 도출한다. 설문 문항은 기존 선행연구 고찰을 통해 1차 도출을 하고, 관련 전문가들의 의견 수렴을 통해 2차 보완하여 완성한다. 마지막으로 자율주행차량 단독으로 주행하기 어려운 상황의 난이도 비교를 위한 AHP 설문조사 및 분석을 통해 고난이도 상황을 도출하여 해당 분석 결과의 의미를 분석하고, 자율주행 단계를 향상시키기 위해 연구결과를 활용할 수 있는 방안을 제안하고자 한다.



<Fig. 1> Overall study process

II. 선행연구 고찰

1. 자율협력주행의 필요성

자율협력주행의 필요성에 대해서는 여러 보고서 및 연구에서 언급되어 왔으며, 현재 대부분이 이를 공감하고 관련 연구가 추진되고 있다. 자율주행차량이 단독으로 주행하는 방식은 자율주행차량 기술만을 의존할 수 밖에 없고 자율주행차량 기술 자체만으로는 주행 안전성을 온전히 확보하기가 어려우므로, 자율주행 기술의 향상을 위해서는 협력주행이 함께 이루어져야 효율성과 안전성을 향상시킬 수 있는 것이다. 우선 미국 교통국(U.S. Department of Transportation, 2018)에서는 일찍이 협력주행의 필요성을 인식하고 뉴욕, 텍사, 와이오밍 등 3개 지역에서 자동차와 인프라 간 협력주행 기술이 적용된 서비스를 제공하는 Connected Vehicle Pilot Deployment Program을 2015년부터 약 50개월간 구축 및 운영하였다. 특히 텍사에서는 도시고속도로 진출입부와 도시부도로 등에 관련 인프라를 구축하고 교차로 이동지원, 전방 충돌 경고, 대중교통 전방 우회전 차량 안내 등의 협력주행 기술이 적용된 서비스를 제공하였고, 이를 통해 사고 감소 및 이동성 개선을 이루고자 하였다. Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2017)에서는 자율주행자동차는 센서 기술만으로는 갑자기 교차로에 진입하는 차량이나 차량 전방상황 등 주변 주행상황을 인지하기 어렵고 긴급상황을 실시간으로 인지하는 것이 불가능한 한계로 인해, 이를 극복하고 도로 상황에 실시간으로 대응하기 위해서는 자동차와 도로 간의 협력 운영체계인 자율협력주행의 필요성을 강조하였다. So and Moon(2018)는 자율주행자동차의 센서는 사람의 눈과 같이 보이지 않는 것에 대해 보지 못하는데, 이는 안전과 직결되어 위험에 취약한 결과로 이어질 수 있고 자율주행차에 장착되는 레이더, 라이다 등의 센서들이 다중 구축이 이루어지는데 고가 센서로 인한 차량비용이 증가되어 보급 측면의 장애가 되며, 시시각각 변화하는 도로교통 환경에 적응하고 안전한 주행을 담보하기 위해서는 자율주행차의 센서만으로는 한계가 있다고 하였다. 이를 극복하기 위해서는 V2X 무선통신과 전자지도 등을 포함한 디지털 인프라 시스템이 필요하다는 의견을 제시하였다.

2. 자율주행 해제상황 및 사고 분석

미국 캘리포니아 자동차관리국(DMV¹⁾)에서는 Adopted Regulatory Article 3.7에 의해 매년 자율주행이 허가

된 차량의 자율주행 해제상황 보고서를 제출받고 있다(Yun et al., 2018). 해당 보고서들은 홈페이지를 통해 제공하고 있어, 이를 활용하여 자율주행 해제상황 데이터를 분석하고 해제상황을 분류한 연구들이 있었다. Lv et al.(2018)은 2016년 1월에 처음으로 제출된 6개 자율주행차량 제조사로부터의 자율주행 해제 보고서 데이터를 이용하여 자율주행 해제 원인을 분석하였다. 자율주행해제 상황을 수동해제(PDE²⁾)와 능동해제(AD E³⁾)로 구분하고 PDE와 ADE 각각의 세부원인을 하드웨어 이슈, 소프트웨어 실패/한계, 환경조건 등으로 구분하였다. 총 15개월 간의 자료를 통해 자율주행 해제횟수, 1회 해제 당 주행거리, 해제원인에 대한 통계 분석결과를 도출하였고, 자율주행차량이 Street, Interstate way, freeway/highway, rural road, parking facility를 주행한 자료를 사용하였다. 자료분석 결과, PDE와 ADE 원인으로 모두 소프트웨어 실패/한계가 가장 높은 수치를 나타냈다. Yun et al.(2018)은 DMV의 자율주행해제보고서 중 7개 업체 보고서를 활용하여 자율주행 해제 상황을 분석하였다. 운전자, 차량 환경 요인으로 대분류를 하였고 대분류에 따라 중분류 및 하위 주요 키워드를 정리하였으며, 특히 대분류 환경의 중분류는 교통이용자, 도로, 날씨, 교통량, 장애물로 분류되었다. 분류항목에 대해 자율주행 해제 횟수 및 비율을 도출하여 다양한 분석을 수행하였다. 자율주행 해제가 차량요인으로는 차량결함, 환경요인으로는 돌발상황 혹은 도로공사/사고, 운전자요인으로는 운전자 예측대로 작동하지 않는 상황이 주요 원인으로 나타났다.

또한 미국 DMV에서 자율주행자동차의 충돌 혹은 사고로 인해 재산피해, 신체상해 또는 사망이 발생하면 10일 이내에 교통사고 보고서를 의무 제출하도록 하였으며, 해당 보고서 자료를 분석한 연구들도 있었다. Park et al.(2021)은 텍스트 임베딩 기법을 이용하여 데이터를 분석하였고, 차량의 거동 관련 요소와 충돌 및 손상 관련 요소, 도로 및 환경 요소에 대해 각각 발생횟수를 도출하였다. 도로 요소 중에 도로 상태를 사고 당시 도로에서 발생되었던 도로 차단, 공사, 침수 등의 이벤트로 구분하였는데, 자율주행 모드 일 때의 교통사고 62건 중 1건은 공사구간에서 발생하였고 나머지 61건의 교통사고는 특별한 이벤트가 없는 일반적인 상황에서 발생한 것으로 나타났다. Kim and Cho(2020)는 총 120건의 사고자료를 분석하여 사고 발생의 66.4%가 자율주행 모드일 때 발생하였고 그 중 79.5%가 교차로에서 발생한 것을 밝혔다. 자율주행 모드로 운행 시 발생한 사고 88건의 유형을 교차로 우회전 시, 교차로 직진 시, 교차로 좌회전 시, 기타로 구분하여 사고원인 상황을 정리하였다.

3. 도로 인프라의 구분

도로의 운영방식에 따라 도로 인프라를 구분한 국내외 문헌을 검토하였다. Roger et al.(2011)에서는 도로의 타입을 연속류와 단속류로 구분하였다. 연속류 도로는 교통 흐름에 대해 외부의 방해가 받지 않는 도로이며 주로 교통신호, 정지표지(비신호교차로) 혹은 교통 흐름 자체에 외부의 다른 방해가 없는 고속도로에 존재한다고 하였다. 단속류 도로는 설계 및 운영에 있어 고정된 외부 간섭이 존재하는 도로라고 정의하였다. 또한 가장 빈번하고 운영측면에서 중요한 외부 간섭은 교통 신호이고 그 외에서 정지표지, 비신호교차로 등이 있으며, 사실상 도시부의 도로들은 단속류 도로라 할 수 있다고 하였다. Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013)에서는 도로시설 유형을 구분하여 용량분석 방법을 제시하였는데, 도로 구분은 연속류 도로 시설에 해당되는 고속도로 기본구간, 고속도로 엇갈림구간, 고속도로 연결로 접속부부와 단속류 도로 시설에 해당되는 신호교차로, 비신호교차로, 회전교차로로 구분하였고 그 외에 시설로 다차로도

1) DMV : State of California, Department of Motor Vehicles, 미국 캘리포니아 자동차관리국

2) PDE : Passive Disengagement, 수동해제

3) ADE : Active Disengagement, 능동해제

로, 대중교통시설, 보행자 및 자전거도로 등도 포함하고 있다.

다음으로 해당 홈페이지를 통해 국내 최대 규모의 자율주행 테스트베드인 자동차안전연구원의 자율주행 실험도시(K-City)의 도로 환경을 인프라적 관점에서 검토하였으며, 해당 내용은 홈페이지 자료를 통해 확인하였다. K-City는 크게 자동차전용도로, 도심부도로, 교외도로, 커뮤니티부로 구분되어 있다. 자동차전용도로에는 본선부, 합류부도로 및 가속차로, 톨게이트가 구축되어 있고 도심부도로에는 신호교차로, 버스전용차로 및 관련 시설 등이 설치되어 있었다. 교외도로에는 회전교차로, 공사구간 및 포트홀/맨홀, 터널, 철도건널목, 가로수길, 협로 등이 구축되어 있고 마지막으로 커뮤니티부에는 비신호교차로, 자율주차시설, 어린이보호구역, 전방향 횡단보도, 버스정류장 등이 설치되어 있는 것을 확인하였다.

4. 소결

선행연구 고찰 결과, 자율주행차량의 주행이 어려워 자율주행 모드가 해제되는 상황은 차량 기술력 자체 및 다양한 환경 요인의 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 특히 자율주행 모드 해제 원인으로는 차량 소프트웨어 실패/한계 등 차량검합의 비율이 높은 것을 확인하였다. 현재까지는 여러 센서들이 장착된 자율주행 차량 자체의 기술력으로 자율주행 실증이 이루어지고 있는 상황인데, 자율주행차량 기술력 자체만으로는 자율주행 효율성 및 안전성을 확실히 하기 어려우므로 도로 인프라와의 협력을 통해 인프라 정보를 활용해야 하고 차량과 도로 인프라 센서 정보와의 협력 상황에서의 실증 경험을 높여 자율주행 수준을 높일 수 있다고 판단하였다. 미국 캘리포니아는 자율주행차량의 주행데이터가 공개되어 있고 분석에 활용이 가능하지만, 국내에는 공개된 자료가 없어 다양한 차량의 데이터 분석에는 어려움이 있다. 또한 자율주행차량 실험이 가능한 기관/기업들은 정해진 대상지에서 집중적인 주행 실험을 하고 있으며 주행 난이도가 비교적 쉬운 구간은 현재 주행이 가능하지만, 주행 난이도가 높은 조건의 실험을 시도하기에 현실적으로 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 앞선 자율주행 모드 해제상황 연구와는 달리 도로 인프라 측면의 요인에 집중하여 분석하도록 하며, 다양한 도로 인프라 조건 중에서 자율주행차량의 주행이 어려운 조건 및 상황을 도출하여 추후 해당 조건에서 자율주행차량이 인프라와 협력하여 자율주행 수준을 높일 수 있도록 하기 위한 기초자료가 되도록 하고자 한다. 향후 도로 인프라 정보를 활용하여 자율주행이 어려운 조건을 극복하는 방안을 연구하기 위해 이에 앞서 본 연구에서 전문가들의 의견을 반영한 자율주행의 난이도가 가장 높은 상황을 도출하는 연구를 수행하였다. 전문가들의 의견을 반영하여 AHP 분석을 수행하였고, AHP 분석을 위한 자율주행차량 주행 난이도 평가 지표는 위의 선행연구를 통해 도출하였다.

Ⅲ. 연구 방법론

1. AHP 분석 설명 및 방법론 선정 이유

AHP(Analytic Hierarchy Process)는 여러 명의 의사결정자가 참여하는 ‘다기준 의사결정(multi-criteria decision making)’ 문제에서 평가 기준과 고려되는 평가항목들을 계층화한 다음, 평가항목 간 쌍대비교를 통해 상대적 중요도를 측정하여 사업 타당성의 종합적인 판단을 바탕으로 최적 대안을 선택하는 방법론이다 (KDI, 2000). 따라서 특정 문제에 대한 대안들의 중요도나 우선순위 도출이 필요한 경우, 실제 데이터를 수집하기 용이하지 않은 상황에서 전문가들의 의견을 통해 비교적 객관적인 최적 대안을 선정하기에 매우 효과

적인 분석 방법이라고 볼 수 있다. AHP 분석과정을 정리하면 다음과 같다.

1. 계층구조를 구성하고, 평가항목들 간 쌍대비교를 해당 종속 평가항목 전부에 대해 실시하여 상위 수준에 있는 평가항목에 대한 종속 평가항목들의 상대적 중요도를 비교행렬로 작성한다.
2. 비교행렬로부터 평가항목 간 상대적 추정 가중치를 구한 후 응답의 일관성을 검토하며, 척도로는 일관성 비율(C.R.: Consistency Ratio)을 사용한다.
3. 평가기준의 상대적 가중치를 하위수준에 있는 종속 평가 기준의 상대적 가중치와 곱하는 과정을 최상위 수준부터 최하위 수준까지 순차적으로 실시하여 가중치를 도출하고, 상대적 우선순위를 결정한다.

본 연구에서 검토하고자 하는 자율주행 분야는 현재 기술개발이 진행되고 있는 분야로, 개별 기관/기업의 실제 주행 데이터의 수집 및 집계가 매우 어려운 한계가 존재하는 상황이므로 비교적 객관적인 대안이며 효과적 방법론인 AHP 분석 방법론을 통해 분석을 수행하였다. 다만, AHP 분석기법을 활용할 경우에는 설문 평가 지표 설계와 함께 응답을 받고자 하는 대상 응답자를 선정하는 것이 매우 중요하기 때문에 본 연구에서는 설문조사 대상으로 자율주행 임시운행 면허를 발급받았거나, 현재 자율주행 관련 R&D를 수행하고 있는 자동차 및 교통 분야 전문가들로부터 선정하였다.

2. AHP 설문 평가 지표 설계

본 연구에서는 자율주행차량 주행 난이도를 도로 인프라 측면에서 비교하고자 하므로, 도로 인프라를 바탕으로 AHP 설문을 위한 평가 지표 설계를 하였다. 우선 국내외 문헌 및 연구에서 도로 운영측면에서의 인프라가 어떻게 구분되어 있는지 조사하고, 구분 항목별 상세내용을 검토하였다. 다음으로 자율주행차량의 자율주행 모드가 해제되거나 자율주행 모드에서 사고가 발생한다면, 해당 상황이 자율주행 시 주행 난이도가 높은 상황일 것으로 판단하였다. 이러한 판단에 따라 국내외 관련 보고서 및 논문 등 문헌을 바탕으로, 자율주행 해제상황 및 사고상황 중에서 도로 인프라 요인으로 해제나 사고가 발생한 상황을 정리하였다.

위의 과정을 거쳐 AHP 설문을 위한 평가 지표를 총 3개의 단계로 구분하여 구조화하였다. 도로 운영 측면에서 일반적으로 연속류 도로와 단속류 도로로 구분할 수 있어, 1단계는 큰 범주로서 연속류 도로(자동차 전용도로)와 단속류 도로(일반도로)로 구분하였다. 2단계는 도로 운영 방식에 따른 인프라 구분 내용을 토대로 연속류 도로와 단속류 도로에서 각각 나타날 수 있는 일반적인 도로 인프라를 도출하였다. 연속류 도로에서는 본선부, 합류부/분류부, 요금소로 구분하였고 단속류 도로에서는 신호교차로, 비신호교차로, 회전교차로, 단일도로로 구분하였다. 자율주행차량이 주행할 수 있는 일반적인 도로 인프라를 2단계의 항목으로 도출하고자 하였으며, 2단계 항목보다 더 세부적인 인프라 분류 내용은 포함되지 않도록 하였다. 3단계는 1단계와 2단계의 도로 인프라 조건에서 외부 인프라 정보의 도움 없이 자율주행차량이 단독으로 주행할 때 어려움에 직면할 수 있는 상황을 제시하였다. 해당 내용은 국내외 자율주행 해제상황 및 사고상황 분석 보고서와 자율주행 관련 연구내용 등을 바탕으로 자율주행 관련 교통 및 자동차 분야 전문가 의견수렴을 거쳐 도출하였다.

일차적으로 AHP 설문을 위한 평가 지표를 1단계, 2단계, 3단계로 구분하여 도출하였으며, 해당 평가 지표의 구조 및 내용은 교통 혹은 자동차 분야에서 자율주행 관련 연구를 수행하였거나 자율주행차량 운행 경험이 있는 다수 전문가들의 의견 수렴 과정을 거쳤다. 전문가들의 의견을 바탕으로 내용의 추가 및 보완작업을 하였고, 최종적으로 도출한 자율주행차량 단독 주행에 대한 도로 조건 난이도 평가 지표 구조 및 내용은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Road condition difficulty evaluation index for automated driving alone

Phase 1	Phase 2	Phase 3
Uninterrupted flow road	Main line	• Situation that GPS reception is not possible when driving in tunnels and high-rise building cluster, etc.
		• Situation that the communication environment is unstable due to the steel joint of the bridge
		• Situation in which radar diffuse reflection occurs when a vehicle approaches due to road signs
		• Situation in which it is difficult to recognize the surrounding environment due to a small curve radius or due to edge trees and facilities
	Merging/Diverging Area	• Situation of joining the main line from the ramp
		• Situation of entering the ramp from the main line
		• Situation of driving the ramp
	Tollgate	• Situation in which lanes increase in the tollgate entry section
		• Situation in which lanes decrease in the tollgate exit section
		• Situation that the width of the lane is narrowed due to facilities (Hi-pass lane, etc.)
• Situation that it is difficult to recognize whether the tollgate is open/closed		
Interrupted flow road	Signalized intersection	• Right turn situation that require various perceptions such as oncoming vehicles, driving directions, and pedestrians
		• Situation in which there is no guide line for lanes passing through an intersection
		• Situation in which there are two or more left-turning lanes when turning left
		• Situation that it is difficult to check the traffic light status with the vehicle sensor while driving
		• Situation in which there is a waiting in the straight lane due to the excess capacity of the left-turning lane when turning left
	Unsignalized intersection	• Situation in which a vehicle is about to enter an intersection from two or more directions
		• Situation in which the vehicle passes through an intersection where there is no guide line
		• Situation in which pedestrians are present in the pedestrian waiting area around the intersection
	Roundabout	• Situation of entering the roundabout
		• Situation of driving inside the roundabout
		• Situation of exiting the roundabout
	Single road	• Situation that driving on the right side of the road where there are bicycle lane, street parking vehicles, bus stop, illegal parking, etc.
		• Situation that it is difficult to recognize the surrounding situation in the slope section
		• Situation that GPS reception is not possible when driving in tunnels and high-rise building cluster, etc.
		• Situation that driving in a section where the number of lanes changes

3. AHP 설문조사 수행

AHP 설문의 문항은 총 35개 문항(1단계: 2개, 2단계: 7개, 3단계: 26개)이며, 5점의 등간 척도를 설정하여 응답하도록 구성하였다. 특히 AHP 설문조사는 응답자의 특성에 따라 결과에 많은 영향을 미칠 수 있는 특성을 가지므로 AHP 설문조사 응답자를 선정하는 것이 본 연구의 중요한 요인이라 판단하였으며, 이에 따라 응답 대상자 선정의 중요 기준을 크게 두 가지로 설정하였다.

첫째, 자율주행 임시운행 면허를 발급받은 기관에 소속되어 있으며 일반도로에서의 실증경험이 있는 전문가를 응답자로 선정하였다. 인프라 측면에서 자율주행차량의 주행 난이도를 분석함에 있어 실제 주행이력데이터를 분석하는 것이 좋은 방법이지만 현재로서는 각 기업별 자율주행차량 주행이력데이터 확보는 매우 어려운 상황이므로 설문조사 응답자를 실증경험이 있는 특정 전문가로 한정함으로써 실제 자율주행차량 주행 상황이 반영된 신뢰성 높은 조사 결과를 얻고자 하였다. 둘째, 자율주행과 관련된 국가연구개발사업에 참여한 경험이 있는 전문가를 응답자로 선정하였다. 자율주행 분야는 ‘자동차, 통신, 교통’ 등 여러 분야가 융복합되어 연구 및 기술 개발이 이루어지고 있다. 따라서 응답자 본인의 전문분야를 바탕으로 자율주행 연구개발을 수행하면서 타 분야와의 협업을 통해 복합적인 관점에서 판단할 수 있는 전문가의 응답이 도로 인프라 측면에서의 자율주행차량 주행 난이도에 대한 신뢰성 높은 결과를 얻기 위해 중요하다고 판단하였다.

앞서 제시한 기준에 따라 다양한 산학연 소속 총 30명의 전문가들을 대상으로 수행하였으며, 일관성 검토를 수행하여 일관성 수치가 기준($CR \leq 0.1$ 이하)에 부합하지 않는 3인의 결과를 제외한 27인의 결과를 분석에 활용하였다. 설문조사에 대한 세부 사항은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Survey summary

Classification	Description
Measure	1: Equal, 2: Little difficult, 3: difficult, 4: Very difficult, 5: Absolute
The number of Questions	35Q (Phase 1: 2Q, Phase 2: 7Q, Phase 3: 26Q)
Survey Period	Period 1 (Sample test) : 2021.08.04.~2021.08.06. Period 2 : 2021.08.25.~2021.08.27.
Sample	30 ($CR \leq 0.1$, 27)

IV. 분석 결과

도로 인프라 측면에서 자율주행차량이 단독으로 주행하기 어려운 상황을 비교하는 AHP 설문조사를 수행하고 분석하여 결과를 도출하였다. 연속류 도로와 단속류 도로로 구분된 1단계를 분석한 결과, 단속류 도로에서의 자율주행 어려움 정도가 0.788로 도출되어 연속류 도로의 자율주행 어려움 정도인 0.212과 비교하여 월등히 어려운 것으로 나타났으며 해당 결과는 <Table 3>과 같다.

1단계 지표의 비교 분석결과는 단속류 도로가 신호/비신호교차로, 회전교차로 등 다양한 도로 형태로 인해 차량 간의 상충이 많이 발생할 가능성이 높으며 보행자, 자전거 등 차량 외의 도시교통을 구성하는 요인들이 많으므로 전문가들이 연속류 도로와 비교해 자율주행차량이 인지 및 판단 해야 할 요소들이 더욱 많아 자율주행차량만으로 주행하기 어려울 것으로 판단하였음을 나타낸다.

<Table 3> Result of Phases 1

Classification	Difficulty	Rank	Consistency Ratio
Uninterrupted flow road	0.212	2	X
Interrupted flow road	0.788	1	

2단계에서는 연속류 도로와 단속류 도로의 하위 도로 요소에 해당하는 항목들로 구성되어 연속류 도로 하위에는 본선부, 합류부/분류부, 요금소로 구성되고 단속류 도로 하위에는 신호교차로, 비신호교차로, 회전교차로, 단일로로 구분된다. 우선 연속류 도로 하위의 2단계 지표와 단속류 도로 하위의 2단계 지표의 자율주행차량 주행 난이도 순위를 각각 도출하였고, 해당 결과는 <Table 4> 및 <Table 5>와 같다. 또한 2단계 지표 전체의 자율주행차량 주행 난이도 설문조사 결과를 분석하여 순위를 도출하였으며, 이는 <Table 6>에서 확인할 수 있다.

우선 연속류 도로 하위의 2단계 지표 분석 결과인 <Table 4>를 보면, 합류부/분류부가 0.451로 자율주행차량 주행 시 가장 어려운 것으로 평가되었고 다음으로 어려움 정도가 요금소가 0.399, 본선부가 0.151로 평가되었다. 합류부/분류부와 요금소에서는 도로 구조 및 형태의 변화가 발생하고 차량들의 상충이 이루어지며 많은 도로 시설물의 인식이 요구되어, 본선부에 비해 자율주행차량의 주행이 더욱 어려울 것으로 판단된다. 따라서 해당 분석결과는 설문조사에 응답한 전문가들을 통해 합리적인 판단 결과가 도출되었다고 볼 수 있다.

<Table 4> Result of Phases 2 in Uninterrupted flow

Classification	Difficulty	Rank	Consistency Ratio
Main line	0.151	3	CR = 0.042 CR ≤ .10
Merging/Diverging Area	0.451	1	
Tollgate	0.399	2	

다음으로 단속류 도로 하위의 2단계 지표 분석 결과인 <Table 5>를 보면, 자율주행차량의 주행 난이도가 비신호교차로(0.388), 회전교차로(0.360), 신호교차로(0.136), 단일로(0.116)의 순으로 평가되어 비신호교차로의 주행이 가장 어려울 것으로 분석되었다. 비신호교차로와 회전교차로의 경우에 주행 우선순위를 신호가 아닌 차량이 판단해야 하므로 주변 차량, 보행자 및 자전거 등 다른 도로교통 요소들까지 고려해야 할 것이다. 특히 비신호교차로는 상충 지점이 많아 자율주행차량의 주행 난이도가 더욱 높을 것으로 판단된다. 신호교차로의 경우에 신호에 따라 주행하므로 비신호교차로 및 회전교차로에 비해 난이도가 낮게 평가되었으나 우회전 시 대향차 혹은 우회전 직후 보행자의 인지가 필요할 것으로 보인다. 해당 분석결과 역시 설문조사에 응답한 전문가들을 통해 합리적인 판단 결과가 도출되었다고 볼 수 있다.

<Table 5> Result of Phases 2 in Interrupted flow

Classification	Difficulty	Rank	Consistency Ratio
Signalized intersection	0.136	3	CR = 0.052 CR ≤ .10
Unsignalized intersection	0.388	1	
Roundabout	0.360	2	
Single road	0.116	4	

2단계 지표 분석의 마지막으로 2단계 지표 전체의 자율주행차량 주행 난이도 설문조사 결과를 분석하여 <Table 6>과 같이 순위를 도출하였다. 자율주행차량의 주행 난이도가 1위~3위로 높은 것으로 평가된 지표는 단속류 도로 하위의 비신호교차로(0.306), 회전교차로(0.284), 신호교차로(0.107) 순으로 나타났다. 다음으로 주행 난이도 4위~7위는 합류부/분류부(0.096), 단일로(0.116), 요금소(0.084), 연속류의 분선부(0.0323) 순으로 평가되었다. 3위에서 6위까지의 지표는 난이도 수치의 큰 차이가 없는 것으로 볼 수 있으며, 해당 지표의 난이도를 평가하는 전문가들에 따라 순위가 변경될 여지가 있는 것으로 판단된다. 특히 단속류 도로 중 단일로는 1단계에서 단속류 도로의 난이도 수치가 높게 판단되어 해당 영향으로 연속류 도로 하위의 요금소에서의 자율주행차량 주행 난이도보다 높은 수치가 도출된 것으로 보인다. 해당 결과가 절대적인 정답은 아니며 평가하는 전문가들마다 의견의 차이가 존재할 수 있으므로, 결과를 참고하여 다양한 도로 인프라 조건에서 자율주행차량의 주행 및 인프라 정보 연계 전후 자율주행 성능 비교 등 다양한 시험 및 실증이 필요하다.

<Table 6> Result of Phases 2 (Uninterrupted and Interrupted flow)

Phase 1	Difficulty	Phase 2	Difficulty	Overall Difficulty	Rank
Uninterrupted flow	0.212	Main line	0.151	0.032	7
		Merging/Diverging Area	0.451	0.096	4
		Tollgate	0.398	0.084	6
Interrupted flow	0.788	Signalized intersection	0.136	0.107	3
		Unsignalized intersection	0.388	0.306	1
		Roundabout	0.360	0.284	2
		Single road	0.116	0.091	5

3단계에서는 1단계 및 2단계의 도로 인프라 조건하에서 발생할 수 있는 상황 중에서 자율주행차량 단독으로 주행할 때 주행 난이도가 높을 것으로 판단되는 세부적인 상황을 지표로 설정하였다. 해당 지표는 각 도로 인프라 조건에서 발생할 수 있는 다양한 주행 상황들을 브레인 스토밍을 통해 도출하였고, 여러 전문가들의 의견을 반영하여 자율주행차량이 도로 인프라 정보의 도움없이 단독으로 주행하기에 난이도가 높을 것으로 판단되는 상황들을 압축하여, 2단계의 도로 인프라 지표별로 3개~5개씩의 3단계 지표를 도출하였다. 여러 도로 인프라 조건에서 발생할 수 있는 자율주행차량의 주행 상황인 3단계 지표는 총 26개이고, 3단계 지표별 난이도 평가결과는 <Table 7>과 같다.

<Table 7> Result of Phases 3

Phase 1	Phase 2	Phase 3	Difficulty	Rank
Uninterrupted flow road (0.212)	Main line (0.151)	Situation that GPS reception is not possible when driving in tunnels and high-rise building cluster, etc. (0.278)	0.009	24
		Situation that the communication environment is unstable due to the steel joint of the bridge (0.130)	0.004	26
		Situation in which radar diffuse reflection occurs when a vehicle approaches due to road signs (0.212)	0.007	25
		Situation in which it is difficult to recognize the surrounding environment due to a small curve radius or due to edge trees and facilities (0.380)	0.012	22

Phase 1	Phase 2	Phase 3	Difficulty	Rank
	Merging/Diverging Area (0.451)	Situation of joining the main line from the ramp (0.520)	0.050	7
		Situation of entering the ramp from the main line (0.285)	0.027	11
		Situation of driving the ramp (0.195)	0.019	17
	Tollgate (0.398)	Situation in which lanes increase in the tollgate entry section (0.133)	0.011	23
		Situation in which lanes decrease in the tollgate exit section (0.275)	0.023	14
		Situation that the width of the lane is narrowed due to facilities (Hi-pass lane, etc.) (0.149)	0.013	21
		Situation that it is difficult to recognize whether the tollgate is open/closed (0.443)	0.037	8
Interrupted flow road (0.788)	Signalized intersection (0.136)	Right turn situation that require various perceptions such as oncoming vehicles, driving directions, and pedestrians (0.209)	0.022	15
		Situation in which there is no guide line for lanes passing through an intersection (0.130)	0.014	20
		Situation in which there are two or more left-turning lanes when turning left (0.131)	0.014	19
		Situation that it is difficult to check the traffic light status with the vehicle sensor while driving (0.306)	0.033	9
		Situation in which there is a waiting in the straight lane due to the excess capacity of the left-turning lane when turning left (0.224)	0.024	13
	Unsignalized intersection (0.388)	Situation in which a vehicle is about to enter an intersection from two or more directions (0.474)	0.145	1
		Situation in which the vehicle passes through an intersection where there is no guide line (0.255)	0.078	5
		Situation in which pedestrians are present in the pedestrian waiting area around the intersection (0.271)	0.083	4
	Roundabout (0.360)	Situation of entering the roundabout (0.322)	0.091	3
		Situation of driving inside the roundabout (0.472)	0.134	2
		Situation of exiting the roundabout (0.206)	0.058	6
	Single road (0.116)	Situation that driving on the right side of the road where there are bicycle lane, street parking vehicles, bus stop, illegal parking, etc. (0.301)	0.028	10
		Situation that it is difficult to recognize the surrounding situation in the slope section (0.265)	0.024	12
		Situation that GPS reception is not possible when driving in tunnels and high-rise building cluster, etc. (0.237)	0.022	16
		Situation that driving in a section where the number of lanes changes (0.197)	0.018	18

3단계 지표인 자율주행차량의 주행 상황에 대해 자율주행 난이도를 분석한 결과, 자율주행차량이 단독으로 주행하기 어려운 난이도가 높은 상황이 1위부터 6위까지 ‘2개 방향 이상에서 차량이 교차로로 진입하려는 상황(0.145)’, ‘회전교차로 내부 주행 시 차량의 상충 발생이 가능한 상황(0.134)’, ‘회전교차로에 진입하는 상황(0.091)’, ‘교차로 보행자 대기공간에 보행자가 존재하는 상황(0.083)’, ‘차로유도선이 없는 교차로를 통과하는 상황(0.078)’, ‘회전교차로를 진출하는 상황(0.058)’ 순으로 판단되었다. 해당 상황은 모두 단속류 도로의 비신호교차로 및 회전교차로에서 나타날 수 있는 상황들이므로 나타났다. 해당 결과는 2단계 지표에 대한 난이도 분석에서 비신호교차로와 회전교차로가 각각 1위, 2위로 자율주행차량의 주행이 어렵다고 판단된 결과와 흐름을 같이 하고 있다. 비신호교차로와 회전교차로는 차량의 주행 우선순위가 교통신호 등을 활용

하여 명확히 제시되지 않아 차량 간의 상충이 빈번하게 발생 될 수 있는 조건을 가질 것이다. 이에 따라 해당 도로 인프라 조건에서는 자율주행차량의 주행 난이도가 높은 것으로 판단되고, 해당 도로 인프라 조건하에서 발생하는 주요 상황들 또한 자율주행차량의 주행 난이도가 높게 판단된 것으로 분석할 수 있다.

3단계 지표의 난이도 하위 6개 항목은 요금소와 본선부 하에서 발생하는 상황으로, 21위부터 26위까지 ‘요금소 통과 부분의 시설물(하이패스 차로 등)로 인해 차로폭이 좁은 상황(0.013)’, ‘곡선반경이 작거나 가장자리 가로수 및 시설물 등으로 인해 주변환경 인지가 어려운 상황(0.012)’, ‘요금소 진입부에서 차로가 증가하는 상황(0.011)’, ‘터널부, 고층건물 밀집구간 등을 주행 시 GPS 수신이 불가능한 상황(0.009)’, ‘도로표지판으로 인해 차량 접근 시 레이더 난반사가 발생하는 상황(0.007)’, ‘교량부 주행 시 철재 이음부로 인해 통신환경이 불안정한 상황(0.004)’ 순으로 도출되었다. 위의 결과는 2단계 지표인 요금소와 본선부에서 자율주행차량의 주행 난이도가 낮은 것으로 나타난 결과의 영향을 받아, 3단계 지표인 2단계 도로 인프라 조건에서의 주행상황 또한 난이도가 낮게 도출된 것으로 보인다. 위의 결과를 통해 자율주행차량이 주행할 때 다른 차량과의 상충이 발생할 가능성 및 자율주행차량의 주행흐름 변화 가능성이 작고, 주변환경 및 상황 등 인지해야 할 요인들이 작을수록 자율주행차량이 추가적인 인프라 정보의 도움이 없이 주행하기에 난이도가 낮은 것으로 판단된다.

3단계 지표의 난이도 분석 결과를 정리하면 다음과 같다. 자율주행차량이 인프라 정보의 도움 없이 스스로 도로를 주행하는 상황들에 대한 어려움의 정도를 도출하였는데, 난이도 상위 6개의 상황들은 2단계 지표 중에서 1위 및 2위에 해당하는 단속류 도로의 비신호차로 혹은 회전교차로에서 발생할 수 있는 상황들이었고, 난이도 하위 6개의 상황들은 2단계 지표 중에서 6위 및 7위에 해당하는 연속류 도로의 요금소 혹은 본선부에서 발생할 수 있는 상황들이었다. 3단계 지표의 난이도 상위 6개와 하위 6개는 2단계 지표인 도로 인프라 조건의 영향을 많이 받는 것으로 보이며, 따라서 자율주행차량의 주행 난이도가 높은 상황을 도출하기 위해서는 2단계의 도로 인프라 조건 자체가 자율주행차량이 주행하기에 어려운 곳을 찾고 해당 도로 운영 조건에서 발생 가능한 다양한 상황들을 도출하는 것이 합리적일 것이라 판단된다. 난이도가 높은 도로 인프라 조건에서 도출된 상황들은 자율주행 고난이도 상황에서의 시험주행 혹은 실증 등을 기반으로 면밀히 검토 및 분석하여 객관적으로 난이도를 평가하는 과정이 필요할 것이다. 3단계 지표의 난이도 분석 결과를 전체적으로 살펴보면, 다른 차량과의 상충 가능성이 높고 도로에서 차량 스스로가 인지해야 할 요소들이 많으며 현재 주행하는 주행흐름에 급격한 변화를 겪게 될수록 자율주행차량이 단독으로 주행하기에 난이도가 높은 것으로 판단된다. 자율주행차량의 주행 난이도가 낮은 경우에는 차량 자체의 성능 및 기술력 향상, 주행경험 향상, 주행데이터 기반의 학습 등을 통해 자율주행차량의 주행 안전성을 향상시킬 수 있으나 주행 난이도가 높은 경우에는 앞선 방법으로 주행 안전성을 향상시키는데 한계가 존재하게 된다. 따라서 자율주행차량의 주행 난이도가 높은 상황에서는 인프라 센서를 통해 수집된 도로 상황 정보를 받아서 차량이 스스로 인지하기 어려운 정보들까지 인지할 수 있도록 함으로써 자율주행 해제상황 발생을 방지하여 주행 안전성을 향상시키고 자율주행 단계를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구는 자율주행차량의 주행 환경 요인 중 도로 인프라 운영 측면에서 차량 스스로가 주행하기에 어려울 것으로 판단되는 도로 인프라 조건 및 상황을 도출하고자 하였다. 자율주행차량 주행 고난이도 상황도 도출하고, 도로 인프라 정보시스템을 구축하여 차량이 스스로 인지하기 어려운 정보들을 인지할 수 있도록 한다면 차량 기술 및 성능의 향상 없이도 자율주행 안전성을 높이고 자율주행 단계를 향상시킬 수 있을 것

로 예상된다. 자율주행 고난이도 상황을 도출하기 위해 기존 국내의 선행연구 및 문헌들을 바탕으로 자율주행차량의 주행 상황을 도로 인프라 측면의 지표로 도출하였고, 이에 대해 계층화 분석(AHP)을 수행하였다. 주행 도로 인프라 조건 및 주행 상황인 1단계에서 3단계까지의 지표에 대해 국내 자율주행 차량, 통신, 교통 분야 전문가 대상 설문조사를 진행하였으며 AHP 분석 방법론에 따라 분석 수행하여 결과를 도출하였다.

가장 상위의 도로 인프라 조건(1단계)에서 단속류가 연속류에 비해 월등히 자율주행차량이 주행하기에 난이도가 높은 것으로 분석되었고, 연속류 및 단속류 하위의 도로 인프라 조건(2단계)에서는 단속류의 비신호 교차로와 회전교차로의 주행 난이도가 가장 높은 것으로 분석되었다. 도로 인프라 조건 하위의 주행 상황(3단계)에서 주행 난이도가 높은 것으로 판단된 지표 6개 또한 비신호교차로 및 회전교차로에서 발생될 수 있는 상황들이므로 나타났다. 자율주행차량의 주행 난이도는 다른 차량과의 상충 가능성이 높고 도로에서 차량 스스로가 인지해야 할 요소들이 많으며 현재 주행하는 주행흐름에 급격한 변화를 겪게 될수록 높아지는 것으로 분석되었다. 이러한 상황에서 도로 인프라 센서를 통해 수집된 정보를 자율주행차량에 전달할 수 있도록 시스템 구축을 통해 차량이 스스로 인지하기 어려운 정보들까지 인지하도록 한다면 자율주행차량 주행 난이도를 높이는 요인들의 영향을 매우 낮추거나 제거할 수 있을 것이다. 이를 통해 자율주행차량 자체의 기술 및 성능의 향상 없이 인프라 센서 기반의 인지 고도화를 통해 해제상황 발생을 방지하고 주행 안전성을 향상시켜 자율주행 단계를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

본 분석 결과는 자율주행차량의 주행 난이도라는 정성적 요인들을 전문가들의 판단을 통해 정량적 지표로 도출하고자 하는 연구의 결과로서 다양한 도로 인프라 환경에서 자율주행차량의 주행시험 및 실증을 할 때 참고할 수 있을 것이다. 자율주행차량의 기술 및 성능 향상만으로 자율주행 수준을 완벽하게 만드는 것은 기술적·시간적·경제적 한계가 존재하기 때문에 자율주행차량의 주행 난이도가 매우 높은 상황들을 인프라 센서 기반의 인지 고도화를 통해 현재 자율주행의 한계를 비교적 빠르게 극복하고, 자율주행 수준을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 다만 도로 인프라 환경에서 실제로 자율주행차량이 주행을 하면서 문헌검토나 시뮬레이션 등을 통해서만 생각하지 못했던 여러 상황들을 맞닥뜨릴 수 있으므로 본 연구를 참고하여 향후 반드시 시뮬레이션 및 실도로에서의 다양한 주행시험을 통해 주행데이터가 도출되어야 하며, 인프라 정보 연계를 통해 자율주행차량 자체의 기술적 한계를 극복하고 자율주행 단계를 향상시킬 수 있는지에 대한 실제 테스트 이루어져야 할 것이다. 또한 자율주행 고난이도 상황 극복 및 자율주행 수준 향상을 위한 인프라 정보 시스템의 구체적인 구축 방식 및 사양, 수집이 필요한 인프라 정보, 인프라에서의 가이던스 여부 및 내용 등에 대해 상세한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구를 바탕으로 차량 단독으로 주행하기 어려운 상황을 해소하는 방법을 제시한다면, 향후 자율주행의 수준을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21AMDP-C160501-01).

REFERENCES

California Legislation Information, *Division 16.6. Autonomous Vehicles*, https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/codes_displayText.xhtml?lawCode=VEH&division=16.6.&title=&part=&chapter=&artic

le=, 2021.07.07.

DataScream, <https://datascream.co.kr/136>, 2021.08.10.

Kim K. and Cho S.(2020), “Lessens Learned from Crash Types of Automated Vehicles: Based on Accident Data of Automated Vehicles in California, USA,” *Transportation Technology and Policy*, vol. 17, no. 2, pp.34-42.

Kim W.(2020), “Main contents of Korea’s autonomous driving technology development innovation project and future plans,” *Monthly KOTI Magazine on Transport*, vol. 272, pp.27-35.

Korea Automobile Testing & Research Institute, <https://www.katri.or.kr/web/contents/katri2030205.do>, 2021.08.05.

Korea Development Institute(2020), *A Study on multi-criteria analysis method for performing preliminary feasibility study*, pp.33-56.

Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), *Korea Highway Capacity Manual*, pp.1-9.

Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2017), *Development of smart connected Automated driving road system*, pp.91-97.

Lv C., Cao D., Zhao Y., Auger D. J., Dutka L. M., Sullman M., Skrypchuk L., Wang H. and Mouzakitis A.(2018), “Analysis of autopilot disengagements occurring during autonomous vehicle testing,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 5, no. 1, pp.58-68.

Park S., Lee H., So J. and Yun I.(2021), “Analysis of autopilot disengagements occurring during autonomous vehicle testing,” *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 1, pp.160-173.

Roger P. R., Elena S. P. and William R. M.(2011), *Traffic Engineering* (4th ed.), Prentice Hall, p.95.

So J. and Moon Y.(2018), “How to implement Connected Automated Driving Safety and Infrastructure,” *The Journal of the Korea Institute of Communication Sciences*, vol. 35, no. 5, pp.37-43.

State of California Department of Motor Vehicles(DMV), *Adopted Regulatory Text*, <https://www.dmv.ca.gov/portal/file/adopted-regulatory-text-pdf/>, 2021.07.07.

State of California Department of Motor Vehicles(DMV), *Order to Adopt*, <https://www.dmv.ca.gov/portal/file/order-to-adopt-pdf/>, 2021.07.07.

U.S. Department of Transportation(2018), *Connected Vehicle Pilot Deployment Program Independent Evaluation*, pp.1-23.

Yun H., Kim S., Lee J. and Yang J.(2018), “Analysis of Cause of Disengagement Based on U.S. California DMV Autonomous Driving Disengagement Report,” *Transactions of KSAE*, vol. 26, no. 4, pp.464-475.