

메타분석을 이용한 자율주행자동차 혼재교통류 영향 분석에 관한 연구: 연속류 도로를 중심으로

Analysis of Impact on Mixed Traffic Flow with Automated Vehicle Using Meta-analysis: Focusing on Uninterrupted Road

정 하 립* · 조 민 경** · 윤 일 수*** · 박 상 민****

* 주저자 : 한국교통연구원 모빌리티전환연구본부 부연구위원
** 공저자 : 한국교통연구원 도로교통연구본부 연구원
*** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수
**** 교신저자 : 한국교통연구원 도로교통연구본부 부연구위원

Harim Jeong* · Minkyong Cho** · Ilsoo Yun*** · Sangmin Park**

* Dept. of Mobility Transformation, Korea Transport Institute
** Dept. of Road Transport Research, Korea Transport Institute
*** Dept. of Road Transportation System Eng., Ajou University

† Corresponding author : Sangmin Park, psm@koti.re.kr

Vol. 22 No.6(2023)
December, 2023
pp.77~91

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.6.77>

Received 10 October 2023
Revised 24 October 2023
Accepted 29 October 2023

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

요 약

최근 국내외에서 자율주행자동차의 상용화를 위한 연구개발이 활발히 진행중이며, 연속류 도로에서 레벨3 수준의 자율주행자동차들의 주행이 도입 및 증가될 것으로 예상된다. 이에 다양한 국내외 연구들에서 자율주행자동차의 시장점유율(MPR)에 따른 혼재 교통류 연구들이 진행되었으나, 각 연구들은 독립적으로 시행되어, 연구 결과에 따라 서로 다른 경향을 보인다. 이에 본 연구에서는 다수의 연구 결과들을 계량적으로 취합하여 통합된 결론을 내리는 메타분석 기법을 이용하여 연속류 도로에서 자율주행자동차의 혼재교통류의 영향을 분석하고자 하였다. 분석결과, 혼재율 75% 이상부터 추정된 효과크기가 통계적으로 유의미한 것으로 나타났으며, 자율주행자동차 혼재기에 연속류 도로 운영 및 관리를 위해서는 자율차 혼재기별 맞춤형 정책이 필요할 것으로 판단된다.

핵심어 : 자율주행자동차, 교통류, 메타분석, 혼재교통상황, 이동성

ABSTRACT

Recently, there has been a worldwide increase in research and development on automated vehicles for commercialization. It is expected that the use of level 3 autonomous vehicles on continuous-flow roads will be introduced and will increase. Consequently, various studies have been conducted to investigate the impact of mixed traffic flow with automated vehicles based on the market penetration rate (MPR). However, these studies have been conducted independently, and the results have shown different trends. Therefore, this study attempted a quantitative analysis of the impact of automated vehicles on mixed traffic flow on uninterrupted roads through a meta-analysis. The results showed that the effect size estimated from an MPR of 75% or higher was statistically significant.

Key words : Automated vehicle, Traffic flow, Meta-analysis, Mixed Traffic Flow, Mobility

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

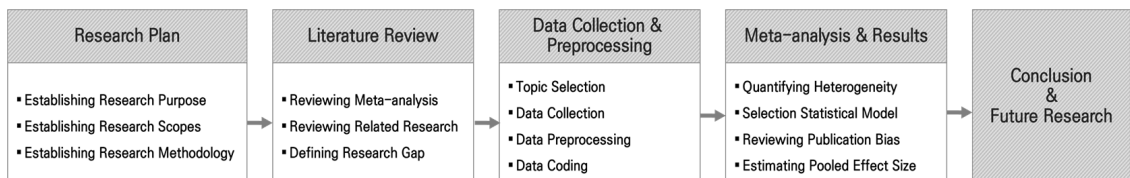
자율주행자동차의 글로벌 시장은 2040년까지 모든 차량이 미국 자동차공학회(SAE) 레벨2 이상의 자율주행 기능을 포함할 것으로 예측하고 있다(Lux Research, 2021). 또한, 2040년까지 레벨3 자율주행 시스템이 자동차 시장의 큰 부분을 차지할 것으로 예측하고 있다(Lux Research, 2021). 국내에서도 이에 대응하기 위해 자율주행과 관련이 있는 정부 부처들이 자율주행 SAE 레벨 4 기술 개발을 목적으로 자율주행기술개발혁신사업이 시행되는 등 국가 R&D도 꾸준히 진행하고 있는 추세이며, 공공과 민간이 지속적으로 자율주행 기술을 개발하고 있다. 게다가 국내에서는 레벨3에 해당하는 부분 자율주행자동차의 고속도로와 같은 연속류 도로에서의 차로유지와 관련된 안전기준이 세계 최초로 제정되어 연속류 도로에서의 자율주행자동차 도입 및 주행이 증가될 것으로 예상된다(Ko et al., 2021).

자율주행자동차의 시장점유율(market penetration rate, MPR)이 점점 증가하는 동안 자율주행자동차와 일반차가 혼재하여 주행하는 혼합교통상황(mixed traffic situation)이 발생하며, 혼합교통상황에서의 교통운영 기법 및 전략 도입을 위해 자율주행자동차의 MPR에 따른 교통류의 영향을 분석하는 것이 필요하다.

이에 국내외에서는 미시교통시물레이션을 이용하여 자율주행자동차의 MPR에 따른 교통류의 영향을 분석하는 다양한 연구들이 수행되었다. 하지만, 각각의 연구는 독립적으로 시행되었으며, 연구 결과에 따라 서로 다른 경향을 보이고 있어 다수의 연구 결과들을 계량적으로 취합하여, 통합된 결론을 내릴 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 국내외 자율주행자동차 혼재기인 혼합교통상황들의 교통류 영향 분석 연구들을 기반으로 계량적인 분석이 가능한 메타분석(meta-analysis)을 이용하여 자율주행자동차의 MPR이 교통류에 미치는 영향을 통계적으로 도출하고자 하였다. 또한, 자율주행자동차의 MPR이 교통류에 미치는 영향을 기반으로 자율주행자동차 혼재기에 연속류 도로에서의 교통운영 방안을 제시하기 위한 시사점을 제시하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 절차

자율주행자동차 혼재기의 혼합교통상황을 분석하기 위해 연구 범위를 설정하였다. 우선 시간적 범위는 2015년 ~ 2022년까지로 설정하여, 자율주행 기술의 본격적인 개발 전 연구들은 제외하였다. 또한, 공간적 범위로는 고속도로와 같은 연속류 도로의 본선 구간을 선정하여 연구를 수행하였다. 이를 위해 자율주행자동차 혼재교통류(mixed traffic flow)에 관한 국내외 연구를 수집하고, 이를 데이터화하여 자료의 특성을 파악하였다. 또한, 메타분석에 사용 가능한 데이터 도출 및 분석 가능한 지표를 선정하였다. 또한 모형 선정 및 출판 편의 검토, 효과크기 추정 등을 기반으로 메타분석을 수행하였다. 마지막으로 결론 및 향후 연구과제를 도출하였다. 전체적인 연구과정은 <Fig. 1>과 같다.



<Fig. 1> Procedure of the research

II. 관련 문헌 고찰

1. 메타분석

1) 개요

메타분석(Meta-analysis)이란 둘 이상의 개별 연구들이 제시한 결과들을 종합하여 요약 추정치로 통합하는 통계적인 분석 방법으로 의학, 교통 분야 등 다양한 분야에서 활용되고 있다(Kang, 2015). 메타분석은 특정 주제에 대한 모든 연구들을 체계적으로 검토하고 수집하여 일정한 방식으로 통합하여 결론을 얻는 통계적 방법으로 개별 연구에서 기대할 수 없는 높은 정밀도의 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다(Cho, 2020). 다양한 환경, 조건에서 실험한 결과들을 통해 일반화된 결론을 도출할 수 있으며, 개별 연구들이 제시한 결과를 반영하기 때문에 일부 또는 특정 조건에서 제시된 결과로 인한 편향된 해석이 아닌 보편적이며 종합적인 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 개별 연구에서 제시한 표본에 비해 표본의 수가 증가하여 개별 연구들이 제시한 결과보다 신뢰할 수 있는 효과 추정치를 도출할 수 있는 장점을 가지고 있다(Wolf, 1986; Pillemar and Light, 1980; Kang, 2015). 게다가 수행된 기존 연구간에 실험 환경이 동일하지 않다고 해도, 동일한 주제로 수행된 연구에서 얻어진 결과라면 통합하여 하나의 요약 추정치를 도출할 수 있다는 장점이 있다(Jin, 2015).

2) 관련 연구 사례

메타분석은 다양한 분야에서 동일한 연구 주제로 수행된 개별 연구들을 체계적으로 분석하여 통합된 효과를 추정하기 위해 사용되고 있으며, 교통 분야에서도 화물차 군집주행 운영효과 파악, 제어권 전환 소요시간 영향 요인 도출 등 활발히 사용되고 있다.

Lee et al.(2022)는 부분 자율주행시스템의 안전성을 결정하는 중요한 요소인 제어권 전환(take-over) 소요시간의 영향 요인을 도출하기 위해 메타분석을 수행하였다. 이를 위해 SAE 기준 자율주행 레벨 2 이상의 제어권 전환 연구 34건을 수집하여 검토 후 총 12개의 영향 요인을 선별하였다. 분석결과, 출판 편의가 의심되는 2개의 요인을 제외한 총 10개의 요인에 대해 통합 효과 추정치를 선정하였으며, 이중 5개 요인이 통계적으로 유의미한 것으로 분석되었다.

Kim et al.(2022)는 화물차 군집주행 운영 효과를 파악하기 위해 메타분석을 이용하여 화물차 군집주행의 효과를 분석하였다. 메타분석을 위해 국내외 군집주행의 효과와 관련된 연구를 총 75개 수집하였으며, 이 중 총 17개의 연구를 메타분석에 활용하였다. 수집된 연구를 바탕으로 용량, 상충, 연료 소비량을 군집주행의 효과 분석 요인으로 선정하였으며, 화물차 군집주행 효과크기 추정을 위해 승산비를 표준화된 상관계수의 형태로 적용하여 분석하였다. 분석결과 화물차 군집주행 도입시 13.93%의 용량 증가, 38.76%의 상충 감소, 8.13%의 연료 소비량 감소 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

Yun et al.(2016)은 차량의 첨단화 및 인프라 지능화를 통한 자율주행 교통시스템 도입의 효과를 메타분석을 통해 살펴보고자 하였다. 해당 연구의 경우 선행 연구 고찰의 과정에서 차량협력기반 순항제어장치(cooperative adaptive cruise control, CACC)에 관한 연구들이 주로 수집됨에 따라 CACC 시스템과 군집주행 기술의 효과를 분석의 목적으로 한정하였다. 교통운영 효율을 평가할 수 있는 용량과 환경 관련 연료 절감률의 효과에 대하여 승산비 효과크기를 통해 분석하고자 하였고 이 두 지표를 종속변수로 가지는 학술논문, 보고서 등의 연구결과 91건을 분석 대상으로 하였다. 분석 결과 CACC 및 군집주행 기술을 적용할 경우 용량과 연료 절감률이 각각 24%, 23% 증가하는 것으로 나타났다.

2. 자율주행자동차 혼재기 분석 관련

기존 자율주행자동차 혼합교통상황(mixed traffic flow)에서 교통류에 미치는 영향에 대한 연구들을 고찰하였다. Ko et al.(2021)은 연속류 도로인 영동고속도로 용인IC ~ 양지IC 구간을 대상으로 자율주행자동차의 MPR 변화가 교통류에 미치는 영향을 추정하였다. 분석을 위해 미시교통시물레이션 모형인 VISSIM과 차량 추종모형인 intelligent driver model(IDM)을 이용하여 자율주행자동차의 MPR에 따른 이동성 및 안전성을 분석하였다. 이동성의 경우 자율주행자동차 시장점유율이 높아질수록 향상되었지만, 안전성의 경우 자율주행자동차 혼재상황에서는 교통류가 불안정해지는 것을 확인하였다.

Mesionis et al.(2020)은 미시적 모델링을 이용하여 자율주행자동차의 혼재상황시 교통류에 미치는 효과를 분석하였다. 분석 지표로는 이동성에 관한 지표인 총통행시간, 지체시간, 평균대기시간, 속도와 환경성에 관한 지표인 CO₂, NO_x, PM, VOC 배출량을 자율주행자동차의 MPR에 따라 분석하였다. 분석결과, 자율주행자동차의 MPR이 높아 질수록 이동성에 긍정적인 효과를 갖는 것으로 나타났으며, 환경성을 나타내는 지표인 CO₂는 최대 13% 감소하고, NO_x는 최대 3% 감소하는 것으로 분석되었다.

Stogios et al.(2019)는 자율주행자동차의 주행행태와 교통상황이 배기가스에 미치는 영향을 분석하였다. 분석을 위해 미시교통시물레이션 모형인 VISSIM과 Wiedemann model의 매개변수(parameter)를 변경하여 사용하였으며, 자율주행자동차의 증가에 따라, 이동성 및 배기가스 배출에 긍정적인 효과를 나타내는 것으로 분석하였다. 또한 자율주행자동차의 주행행태와 관련하여 자율주행자동차가 좀 더 공격적인(aggressive) 주행행태를 가질 경우 배기가스 배출량이 최대 26%까지 감소할 수 있는 것으로 분석되었다. 신중한(cautious) 주행행태를 가진 자율주행자동차는 교통류에 악영향을 끼칠 수 있으며, 배출량이 35%나 증가하는 것으로 분석되었다.

Park et al.(2015)는 자율주행차량 도입에 따른 교통류 변화를 분석하였다. 분석 지표로는 서비스 수준(level of service, LOS)의 MPR 변화에 따른 시간평균속도, 공간평균속도, 밀도를 사용하여 분석하였다. 분석 결과, LOS B를 기준으로 자율주행자동차의 MPR이 높아질수록 시간평균속도 및 공간평균속도가 증가하는 것으로 분석되었고 밀도는 감소하는 것으로 분석되었다.

Van der Werf et al.(2002)는 고속도로에서 Adaptive Cruise Control(ACC) 시스템의 MPR에 따른 교통용량에 미치는 영향을 몬테카를로 기반 시물레이션을 이용하여 분석하였다. 분석 결과, ACC 시스템의 MPR이 40%까지 도달하기 전에는 교통류에 미치는 영향이 미미하거나, 네트워크에 악영향을 끼칠 수 있는 것으로 분석되었다.

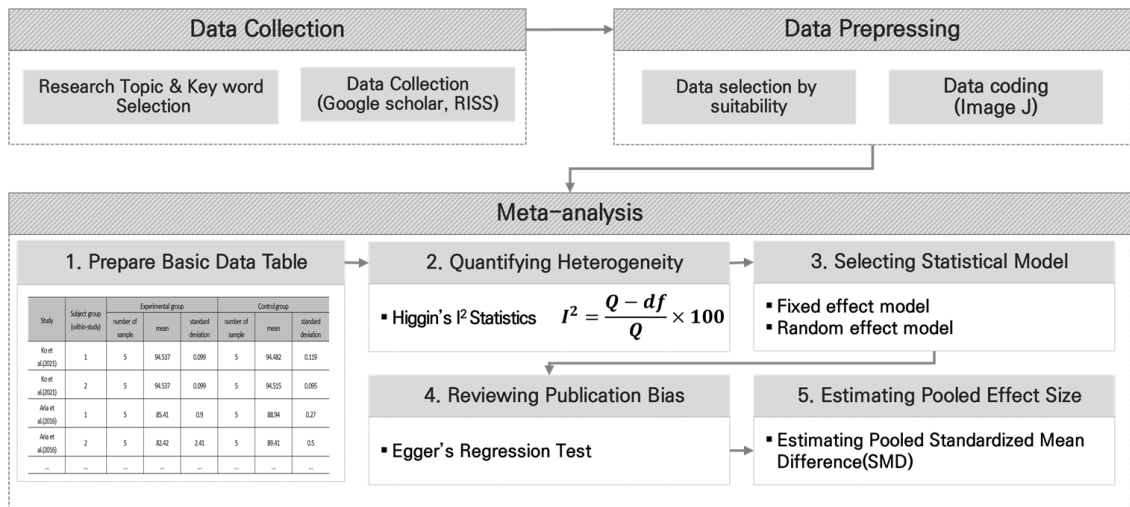
3. 연구의 시사점

앞서 자율주행자동차 혼재기 분석 연구고찰과 같이 자율주행자동차의 MPR에 따른 연속류 교통류에 미치는 영향은 대체적으로는 긍정적으로 분석이 되고 있으나, 개별 연구들에서 사용하는 방법론과 결과에 차이가 있어 통합된 결론을 도출하는 것이 필요하다. 또한, 대부분의 연구들은 미시교통시물레이션(microscopic traffic simulation)과 자율주행자동차의 주행행태 모형을 가정하여 분석하는 것으로 나타났으며, 사용하는 시물레이션의 종류 및 자율주행자동차의 주행행태 모형을 다르게 사용하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 독립적인 개별 연구들의 결과를 하나의 결과로 통합하는 체계적인 분석 방법론을 이용하여 분석하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 둘 이상의 개별 연구들이 제시한 결과들을 종합하여 요약 추정치로 통합하는 통계적인 분석 방법인 메타분석을 이용하여 자율주행자동차의 MPR이 미치는 영향을 통합적으로 분석하고 제시하고자 한다.

III. 분석 방법론

1. 개요

본 연구에서는 자율주행자동차의 MPR에 따른 메타분석을 수행하기 위해 <Fig. 2>와 같은 방법론에 따라 연구를 수행하였다. 분석 방법론은 크게 데이터 수집, 데이터 전처리, 메타분석으로 이어지는 총 3단계로 구성된 방법론을 따르며, 실질적인 메타분석은 기초 데이터 생성, 이질성 검정, 통계모형 선정, 출판 편의 진단, 통합 효과크기 추정의 5가지 세부 단계로 구성된다.



<Fig. 2> The Methodology for meta-analysis

2. 통계 모형 선정

메타분석은 앞서 고찰한 바와 같이 여러 개별 연구가 제시한 결과 즉 효과크기를 종합하는 통계적인 분석 방법이다. 따라서 종합된 효과를 추정하기 위한 통계적 모형이 사용되고 이 모형은 고정효과모형(fixed effect model)과 랜덤효과모형(random effect model)으로 구분된다.

고정효과모형의 경우 개별 연구들의 효과크기가 같은 모집단을 통해 얻어졌다는 가정을 기반으로 하는 모형이다(Jin, 2015). 따라서 개별 연구들이 제시한 효과크기의 차이는 표본추출의 오차로 인하여 발생하는 것으로 본다(Lee, 2008). 랜덤효과모형은 동일한 조건에서 실험을 통해 얻을 수 있는 효과크기가 하나씩 존재한다는 가정을 기반으로 하는 모형이다. 각 연구들은 어떤 평균적인 효과크기를 중심으로 펼쳐진 모집단 내 연구들로부터 무작위로 추출된 것으로 볼 수 있다. 따라서 각 연구의 효과크기에서 관찰되는 차이는 개별 연구 내의 변동(within-study variation)과 연구 간 변동(between-study variation)이 함께 포함된 것으로 가정한다(Lee, 2008; Yun et al., 2016). 만약 고정효과모형과 랜덤효과모형의 결과가 동일하다면 통계적으로 유의한 이질성이 존재하지 않는 것으로 볼 수 있다(Lee, 2008). 따라서 본 연구에서는 이질성 검정을 통해 적절한 통계 모형을 선정하였다.

여기서 이질성(heterogeneity)이란 개별 연구들의 다양성으로 인해 생기는 차이를 말한다. 이질성 검정을 위

한 방법에는 Q 통계량(Q statistic)을 이용한 카이제곱 검정법과 Higgins's I² 통계량 등이 있다. 이 중 본 연구에서는 이질성 정도를 정량화한 Higgins's I² 통계량을 이용하여 이질성을 검정하였다. Higgins's I² 통계량은 연구의 수, 변수의 형태 등에 영향을 받지 않는 특징이 있어 연구의 수에 의해 발생할 수 있는 영향을 배제하고자 하였다(Lee, 2008). 또한 <Equation 1>을 통해 산출할 수 있으며, 산출된 값이 75% 이상일 경우 이질성이 높은 것으로 해석할 수 있다(Higgins and Thompson, 2002; Shin, 2015).

$$I^2 = \frac{Q - df}{Q} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

where, $Q = \chi^2$ statistics
 $df =$ the degree of freedom of χ^2 statistics

3. 효과크기

효과크기(Effect size)는 메타분석에서 동일한 주제를 가지고 수행된 여러 연구들의 결과를 하나의 표준화된 값으로 종합하기 위해 사용하는 지표이며, 효과크기를 통해 비교하려는 집단 사이의 차이나 연관성을 확인할 수 있다(McGraw and Wong, 1992; Yun et al., 2016; Jin, 2015; Oh et al., 2017).

효과크기를 나타내는 방식에는 여러 가지가 있다. 대표적으로 두 집단의 평균 간의 차이를 계산하는 평균차(mean difference, MD)와 표준화된 평균차(standardized mean difference, SMD)와 집단 간 상관성을 나타낸 Pearson 상관계수, 두 집단 간 관계를 사건 발생 확률로 표현한 승산비(odd ratio OR), 상대위험비(risk ratio) 등이 있다(Kang, 2015; Yun et al., 2016).

본 연구에서는 자율주행자동차 혼재 수준에 따라 교통류의 변화를 살펴보고자 하였다. 따라서 인간 운전자만이 존재하는 조건과 자율주행자동차가 혼재된 조건에 대하여 교통량, 속도 등의 변화를 확인할 수 있는 표준화된 평균차를 사용하였으며, <Equation 2> 및 <Equation 3>을 통해 산출할 수 있다(Kang, 2015).

$$S = \sqrt{\frac{(n^E - 1)S_E^2 + (n^C - 1)S_C^2}{n^E + n^C - 2}} \dots\dots\dots (2)$$

where, $n^E =$ number of experimental group samples
 $n^C =$ number of control group samples
 $S^E =$ standard deviation of experimental group
 $S^C =$ standard deviation of control group

$$d = \frac{\overline{X^E} - \overline{X^C}}{S} \dots\dots\dots (3)$$

where, $d =$ standardized mean difference
 $X^E =$ sample mean of experimental group
 $X^C =$ sample mean of control group
 $S =$ pooled sample standard deviation

4. 표준화된 평균차의 통합 효과크기 산출

통합 효과크기는 개별 연구의 효과크기 즉 표준화된 평균차를 선정한 통계모형을 이용하여 하나의 요약

추정치를 산출한 것이다. 개별 연구를 통합하는 과정에서 시뮬레이션 멀티런 횟수, 피실험자 수와 같은 표본 크기가 작은 경우 표본의 수가 큰 대규모 연구에 비해 결과가 왜곡되어 나타날 가능성이 크다(Lee, 2008). 따라서 본 연구에서는 개별 연구 내의 변동(within-study variation)과 연구 간 변동(between-study variation)을 고려하기 위해 <Equation 4> 및 <Equation 5>와 같은 방법을 통해 통합 효과크기를 산출하였다.

$$w_k^* = \frac{1}{s_k^2 + \tau^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{k=1}^K \hat{\theta}_k w_k^*}{\sum_{k=1}^K w_k^*} \dots\dots\dots (5)$$

where, $\hat{\theta}$ = pooled effect size
 θ_k = effect size of study k
 w_k^* = random effects weight
 s_k^2 = variance of each effect size
 τ^2 = variance of distribution of true effect sizes

5. 출판 편의 검정

출판 편의(Publication bias)는 메타분석 시에 수집하는 출판된 자료(논문, 보고서 등)의 경우 통계적으로 유의미한 결과를 보인 것들이 그렇지 않은 경우에 비해 출판이 쉬운 경향을 뜻한다. 이러한 연구만을 활용하여 메타분석을 수행할 경우 그 결과가 과대 추정 혹은 과소 추정되는 왜곡된 결과가 도출될 수 있다(Kang, 2015). 본 연구에서는 이러한 현상을 예방하기 위하여 출판 편의를 검정하기 위한 통계적 방법인 Egger’s test를 사용하였다.

Egger’s test는 출판 편의의 검정을 위해 일반적으로 많이 사용되고 있는 방법이다(Kang, 2015; Kim et al., 2020, Lee et al., 2022; Kim et al., 2022). 이 방법은 기본적으로 효과크기와 표준오차 간에 상관관계가 없다는 기본 가정을 전제로 독립변수로 효과크기, 종속변수로 표준오차를 가지는 회귀모형을 이용한다. 만약 출판 편의가 없다면 회귀모형은 원점을 지나는 직선의 형태를 취하게 될 것으로 이 모형의 절편은 0이 될 것이다. 따라서 Egger’s test는 y절편이 0과 유의하게 다른지를 통계적으로 검정하는 것으로 볼 수 있고 이때 절편의 유의확률이 0.05 이하인 경우 출판 편의를 의심할 수 있다(Kang, 2015).

IV. 자료 수집 및 기초데이터 구축 결과

1. 자율주행자동차 혼재 수준 관련 연구 수집 및 선별

자율주행자동차 혼재 수준에 따른 영향에 대하여 메타분석을 수행하기 위해 혼재 수준별로 분석된 기존에 수행된 연구 문헌 자료를 수집하였다. 문헌 자료를 수집하기 위해 시간적 범위를 2015년 이후로 설정하여 다소 과거에 진행된 연구의 결과는 활용하지 않았다. 본 연구는 연속류 도로를 공간적 범위로 설정하였다. 이러한 범위에 해당하는 관련 연구를 수집하기 위해 ‘구글 학술검색(google scholar)’과 ‘학술연구정보서비스

(research information sharing service, RISS)’를 사용하였다. 검색 키워드는 ‘자율주행(autonomous driving)’, ‘자율주행자동차(autonomous vehicle, self-driving vehicle, automated vehicle)’, ‘시뮬레이션(simulation)’, ‘혼재교통류(mixed traffic flow)’ 등을 사용하였다.

앞서 말한 방법을 통해 92개의 문헌을 수집하였다. 수집된 문헌은 다음과 같은 세부적인 기준에 따라 연구에 직접적으로 활용할 수 있는 문헌 자료를 선별하였다. 첫 번째는 수집한 연구들의 공간적 범위가 연속류 도로인 것들을 선별하였다. 연구 제목만으로 수집단계에서 분류하는 것은 한계가 존재하였기 때문에 먼저 연구 문헌을 수집한 후 해당 연구들의 내용을 토대로 판단하는 과정이 필요하였다. 두 번째는 자율주행자동차 혼재 수준에 따라 효과가 제시된 연구를 대상으로 하였다. 혼재 수준의 경우 자율주행자동차가 도입되지 않은 0% 수준과 0% 이상의 자율주행차량이 도입된 수준의 최소 두 가지 조건에서 비교된 연구를 대상으로 하였다. 세 번째는 자율주행자동차 혼재 수준에 따라 분석된 지표들의 평균, 표본의 수를 확인할 수 있는 연구를 대상으로 하였다. 본 연구의 메타분석의 과정에서 효과크기를 산출하기 위해서는 평균, 표준편차, 표본의 수에 대한 값이 필요하다. 표준편차가 제시되지 않은 연구의 경우 Furukawa et al.(2006)가 제시한 방법에 따라 유사한 연구들의 표준편차를 활용하여 결측값을 대체하는 방법을 사용하였다. 또한 수집한 연구들에 제시된 결과가 그래프의 형태로 되어있어 구체적인 값을 직접적으로 알 수 없는 경우 그래프의 축과 색 등으로 값을 추출하기 위해 자바기반의 그래프 및 이미지 처리도구인 ‘Image J’를 사용하였다. 마지막으로 수집한 문헌이 한국어 혹은 영어로 작성된 연구를 대상으로 하였다.

이러한 세부 기준에 해당되지 않는 경우 분석 대상에서 제외하여 총 14개의 문헌을 선별하였으며, 수집한 문헌에 대한 개요는 <Table 1>과 같다. 선별된 문헌들은 대부분 미시교통시뮬레이션을 활용하여 수행되었으며, 이동성을 나타내기 위한 효과척도(measure of effectiveness, MOE)로 평균통행속도(average speed)를 사용하고 있는 것으로 나타났다. 반면 안전성 효과의 경우 분석된 급정거율(hard braking rate), 차로변경률(lane change rate), crash potential 등 연구들이 사용하는 지표가 공통되지 않는 것으로 나타났다.

<Table 1> Overview of related studies

No	Author(Year)	Tools	MPR range	MOEs	
				Mobility	Safety
1	Ko et al.(2021)	Vissim	0~100, 10 step	average speed, average travel time	hard braking rate, lane change rate
2	Aria et al.(2016)	Vissim	0, 100	average speed, average density, average travel time	-
3	Postigo et al.(2021)	Vissim	0~100, 20 step	throughput, average delay	-
4	Stogios et al.(2019)	Vissim	0, 10, 30, 50, 70, 90, 100	average speed	-
5	Jo et al.(2022)	Vissim	0, 50, 100	average speed, throughput	crash potential
6	Kang et al.(2019)	Vissim	0~100, 25 step	average speed, density, throughput, queue length,	
7	Park et al.(2015)	NetLogo	0~100, 25 step	average speed, density, flow rate	-
8	Mesionis et al.(2020)	Aimsun	0, 20, 50, 100	average speed, total travel time, delay, average queue, throughput	-
9	Perraki et al.(2018)	Aimsun	0, 20, 50, 100	total time spent(TTS), TTS Improvement	
10	Sukennik et al.(2018)	Vissim	0~100, 10 step	capacity	

<Table Continue> Overview of related studies

No	Author(Year)	Tools	MPR range	MOEs	
				Mobility	Safety
11	Shladover et al.(2012)	Aimsun	0~100, 20 step	lane capacity	-
12	Papadoulis et al.(2019)	Vissim	0, 25, 50, 75, 100	average travel time	-
13	Zhong et al.(2020)	Vissim	0, 10, 20, 30, 40	throughput, VMT/VHT	lane change frequency
14	Calvert et al.(2017)	JAVA	2, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	travel time, capacity	-

다음으로 앞서 선별된 연구들이 다루는 지표들과 혼재 수준 범위를 고려하여 분석 조건을 구분하여 <Table 2>와 같이 제시하였다. 효과 크기를 산출하기 위한 지표의 경우 대부분의 연구들이 사용한 평균통행속도(average speed)를 선정하였으며, 평균밀도(average density), 평균통행시간(average travel time), 총통행시간(total travel time) 등의 기타 지표들은 개별 연구들이 사용한 지표의 종류와 단위가 통일되지 않으며, 환산에 필요한 정보들이 충분하지 않아 분석이 어려울 것으로 판단하였다. 혼재 수준의 경우 25%미만, 25%이상 50%미만, 50%이상 75%미만, 75%이상 100%미만, 100%의 5개 그룹으로 구분하여 각각 0% 조건과 비교하였다.

<Table 2> Conditions of experiment

No	Selected MOE	control condition	experimental condition
1	average speed	0%(Human Driving Vehicle only)	less than 25%
2			more than 25% less than 50%
3			more than 50% less than 75%
4			more than 75% less than 100%
5			100%

2. 기초 데이터 구축

본 연구의 경우 앞서 말한 바와 같이 평균통행속도(average speed)에 대하여 효과크기를 선정하고자 하며, 여러 효과크기 산출 방법 중 표준화된 평균 차를 선정하였다. 따라서 수집한 문헌의 연구들에 제시된 결과를 활용하여 메타분석을 수행하기에 적합한 형태로 기초 데이터를 구축하였다. 기초 데이터는 실험군과 대조군에 대한 평균통행속도, 표본의 수, 표준편차를 연구 결과별로 <Table 3>의 예시와 같이 정리하였다.

<Table 3> Example of basic data table

Study	Subject group (within-study)	Experimental group			Control group		
		number of sample	mean	standard deviation	number of sample	mean	standard deviation
Ko et al.(2021)	1	5	94.537	0.099	5	94.482	0.119
Ko et al.(2021)	2	5	94.537	0.099	5	94.515	0.095
Aria et al.(2016)	1	5	85.41	0.9	5	88.94	0.27
Aria et al.(2016)	2	5	82.42	2.41	5	89.41	0.5
...

V. 분석 결과

1. 이질성 검정 및 통계모형 선정 결과

앞서 고찰한 바와 같이 개별 연구들의 효과크기를 하나의 통합 효과크기로 요약하기 위해서는 개별 연구들의 다양성으로 인해 생기는 차이인 이질성에 대한 검정이 필요하며, 이 결과에 따라 적절한 통계모형을 선택하였다. 이를 위해 본 연구에서는 앞서 고찰한 이질성 검정 방법 중 Q 통계량과 Higgins's I^2 통계량을 활용하였다. 5개의 그룹별로 Higgins's I^2 통계량을 산출한 결과는 <Table 4>와 같다. 이질성 검정 결과 모든 혼재 수준 그룹에 대해서 Q 통계량의 유의하고 Higgins's I^2 통계량이 75% 이상으로 이질성이 매우 큰 것으로 나타났다. 이질성 검정 결과에 따라 본 연구의 메타분석에 적절한 통계모형으로 변량효과모형(random effect model)을 선정하였다.

<Table 4> Result of heterogeneity test

No	classification	Heterogeneity		
		Higgins' I^2	d.f.	p-value of Q statistics
1	0% vs less than 25%	95.1%	3	<0.0001
2	0% vs more than 25% less than 50%	99.8%	22	<0.0001
3	0% vs more than 50% less than 75%	99.9%	26	<0.0001
4	0% vs more than 75% less than 100%	99.9%	22	<0.0001
5	0% vs 100%	99.9%	24	<0.0001

2. 출판 편의 진단 결과

변량효과모형을 이용하여 분석을 수행하기에 앞서 출판 편의를 진단하였다. 앞서 고찰한 바에 의하면 출판 편의를 진단할 수 있는 대표적인 방법에는 시각적 검토와 통계적 검토 방법이 있다. 본 연구에서는 이 두 가지 방법 중 정량적인 판단이 가능한 통계적 방법 중 하나인 Egger's test를 통해 출판 편의를 진단하였으며, 그 결과는 <Table 5>과 같다. 출판 편의 진단 결과 자율주행자동차 혼재 수준 50%이상 75%미만의 경우 Egger's test의 유의확률이 0.05미만으로 나타나 출판 편의가 의심되는 것으로 나타났다. 이러한 결과에 따라 출판 편의가 의심되는 자율주행자동차 혼재 수준 50% 이상 75% 미만의 조건을 제외한 4개 조건에 대하여 혼재 수준별 통합 효과크기를 산출하였다. 출판 편의가 의심되는 50% 이상 75% 미만의 조건의 경우 자율주행자동차와 일반차량이 비슷한 비율로 혼재되어 효과를 판단하기 위해 다른 조건에 비해 보다 많은 분석과

<Table 5> Result of Egger's test

No	classification	Egger's test		
		t	d.f.	p-value
1	0% vs less than 25%	1.81	2	0.2113
2	0% vs more than 25% less than 50%	0.80	21	0.4308
3	0% vs more than 50% less than 75%	2.66	25	0.0136*
4	0% vs more than 75% less than 100%	1.30	21	0.2088
5	0% vs 100%	1.73	23	0.0965

Note: '*' mark means the p-value of factor is less than 0.05

검증이 필요한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구를 통해 충분히 검토되지 못한 학술대회 초록, 포스터 등의 회색문헌에 대한 조사와 검토가 추가적으로 수행될 필요가 있다.

3. 통합 효과크기 추정 결과

출판 편의 진단 결과에 따라 출판 편의가 의심되는 1개 조건을 제외한 4개 조건에 대하여 각각 통합 효과 크기를 추정하였으며, <Table 6>과 같다. 본 연구의 경우 평균통행속도에 대한 효과크기로 표준화된 평균 차를 사용하였다. 효과크기에 대한 해석에 앞서 우선 효과크기에 대한 유의확률을 통해 산출된 효과크기가 통계적으로 유의한 값인지를 확인해야 한다. 만약 이 값이 유의할 경우 산출된 효과크기는 0을 기준으로 효과를 해석할 수 있다. 양수인 효과크기가 산출될 경우 자율주행차의 도입에 따라 평균통행속도가 높아지는 것으로 볼 수 있다. 반대로 음수인 효과크기가 산출될 경우 자율주행차의 도입으로 오히려 평균통행속도가 감소하고 교통류에 악영향을 끼친 것으로 해석하였다.

통합 효과크기 추정 결과, 자율주행자동차 혼재율 25% 미만인 조건과 25% 이상 50% 미만인 조건에서는 효과크기가 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 해당 조건의 경우 자율주행차의 존재가 교통소통 측면에서 긍정적인 영향을 보이는 결과와 부정적인 영향을 끼친 결과가 함께 존재하여 효과의 경향성이 뚜렷하지 않은 것이 원인으로 판단된다. 다만 혼재율 25% 미만의 조건의 경우 해당 조건을 다른 연구의 수가 4건으로 다른 조건에 비해 작고 이러한 작은 샘플의 수가 통계적 유의성에 영향을 끼쳤을 가능성이 있다.

이와 달리 혼재율 75% 이상 100% 미만인 조건과 자율주행자동차만 존재하는 100%의 조건의 경우 효과크기의 값이 각각 4.1174와 6.7712로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 고속도로와 같은 연속류 도로에서 자율주행차가 차지하는 비율이 75% 이상인 교통 환경에 도달하면 평균통행속도의 증가와 같은 소통개선 유의미한 효과가 존재한다는 것으로 해석할 수 있다. 또한 일반적으로 알 수 있는 것과 같이 일반차량과 자율주행자동차가 혼재된 상황보다 자율주행차만이 존재하는 상황에서 그 효과가 큰 것으로 나타났다.

해당 조건의 경우 자율주행자동차와 일반차량이 비슷한 비율로 혼재되어 다른 조건에 비해 보다 많은 분석과 검증이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 여러 후속연구를 통해 이 조건에 대한 추가적인 분석이 필요한 것으로 판단된다.

<Table 6> Result of deriving the pooled effect size

No.	classification	N		Integrated effect size		
		number of studies combined	number of observations	SMD	95%-CI	p-value
1	0% vs less than 25%	4	40	0.7981	[-0.6072; 2.2034]	0.2656
2	0% vs more than 25% less than 50%	23	480	1.3463	[-1.3120; 4.0045]	0.3209
3	0% vs more than 75% less than 100%	23	480	4.1174	[0.5132; 7.7215]	0.0252*
4	0% vs 100%	25	510	6.7712	[3.2921; 10.2503]	0.0001*

Note: ‘*’ mark means the p-value of factor is less than 0.05

VI. 결론 및 향후 연구과제

1. 결론

최근 국내외에서 자율주행자동차의 상용화를 위한 연구개발이 활발히 진행 중에 있으며, 레벨 3수준의 자율주행자동차들의 연속류 도로에서 주행이 증가할 것으로 예상된다. 특히 국내에서는 레벨 3에 해당하는 부분자율주행자동차의 안전기준이 제정되어 있어, 자율주행자동차의 연속류 도로 도입 및 주행이 가속화 될 것으로 예상된다. 하지만, 고속도로와 같은 연속류 도로에서 자율주행자동차의 시장점유율(market penetration rate, MPR)이 높아지기까지는 시간이 필요하며, 자율주행자동차와 일반차가 혼재하여 주행하는 자율주행자동차 혼재기인 혼합교통상황이 발생 될 것으로 예상된다. 그리고, 혼합교통류에서는 이전과는 다른 양상을 보일 것으로 판단되며, 기존 국내외 연구들은 혼합교통류의 교통류 변화를 파악하기 위해 미시교통시물레이션 기법을 이용하여 다양하게 분석을 수행하였다. 하지만, 기존의 개별 연구들은 독립적으로 시행되었으며, 연구 결과에 따라 서로 다른 경향을 보이고 있어 다수의 연구 결과들을 계량적으로 취합하여, 통합된 결론을 내리는 것이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 메타분석을 이용하여 자율주행자동차 혼재교통류의 영향을 분석하였다. 메타분석 수행을 위해 연속류 자율주행자동차 혼재기 영향 분석을 수행한 관련 연구들을 수집하고, 메타분석을 위한 기초 데이터를 생성하였다. 수집된 연구들이 다른 혼재기, 지표 등의 검토를 통해 본 연구에서는 평균통행속도를 분석 대상 지표로 선정하였으며, 혼재기를 25% 단위로 구분하여 혼재되지 않은 조건과의 차이를 비교하였다. 분석 결과, 수집된 연구들에 이질성이 의심되는 것에 따라 랜덤효과모형을 사용하였으며, 혼재율 50% 이상 75% 미만의 조건의 경우 출판 편의가 나타나 분석대상에서 제외하였다.

이를 제외한 나머지 4개 조건에 대하여 통합 효과크기를 산출하였으며, 혼재율 75% 이상부터 추정된 효과크기가 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다. 이는 연속류 도로에서 자율주행자동차의 유의미한 효과가 발생하는 혼재 수준으로 볼 수 있으며, 이러한 기준을 바탕으로 별개의 운영 전략이 필요할 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 본 연구의 결과는 향후 자율주행자동차 운영 및 관리를 위한 혼재수준별 맞춤형 정책의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 향후 연구과제

본 연구는 자율주행자동차의 MPR이 교통류에 미치는 영향을 분석하기 위해 메타분석을 수행하여 다양한 관련 연구들의 결과를 종합하였으나 몇 가지 연구의 한계가 존재한다.

첫 번째로 향후 추가적인 연구 자료의 수집을 통한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 자율주행, 시물레이션 등을 키워드로 92건의 선행 연구 자료를 수집하였지만 자율주행자동차의 MPR, 결과 제시 방법 등을 고려할 때 실질적으로 활용 가능한 14건의 연구만을 포함하여 분석하였다. 향후 추가적으로 연구 자료들을 확보하여 도출되는 결과의 일관성과 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 보인다.

두 번째로 자율주행자동차 MPR에 따른 안전성을 분석하지 못한 점이다. 본 연구의 경우 수집한 연구들의 대부분이 공통적으로 제시한 이동성 지표인 평균통행속도에 대하여 분석하였다. 하지만 안전성 관련 지표의 경우 대부분 대리안전척도가 사용되고 있으며, 개별 연구들이 사용한 지표의 종류가 달라 분석이 어려운 한계가 존재하였다. 따라서 향후 자율주행자동차의 MPR에 따른 안전성 분석을 위한 대표적인 지표가 개발되어 사용된다면 유의미한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구는 메타분석에 활용한 연구들이 시뮬레이션을 통해 실험한 것이라는 부분에서 한계를 갖는다. 시뮬레이션의 경우 대부분 차량추종모형, 차로변경모형 등과 같이 모형을 바탕으로 실제 차량의 움직임을 모사하는 방법을 사용한다. 하지만 이러한 조건에서 실험된 결과는 실제 현장에서 실험된 결과와 차이가 존재할 가능성이 높다. 따라서 향후 자율주행자동차의 MPR에 따른 교통운영 및 관리 정책을 수립하기 위해서는 시뮬레이션뿐만 아니라 실도로에서 수집된 자료를 함께 반영할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2022-00141102).

REFERENCES

- Aria, E., Olstam, J. and Schwietering, C.(2016), “Investigation of Automated Vehicle Effects on Driver’s Behavior and Traffic Performance”, *Transport Research Procedia*, vol. 15, pp.761-770.
- Calvert, S. C., Schakel, W. J. and Van Lint, J. W. C.(2017), “Will Automated Vehicles Negatively Impact Traffic Flow?”, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, 3082781.
- Cho, J.(2020), “Theory and Practice of Meta-Analysis”, *Journal of Rhinology*, vol. 27, no. 2, pp.83-89.
- Egger, M., Davey Smith, G., Schneider, M. and Minder, C.(1997), “Bias in Meta-analysis Detected by a Simple, Graphical Test”, *British Medical Journal*, vol. 315, pp.629-634.
- Furukawa, T. A., Barbui, C., Cipriani, A., Brambilla, P. and Watanabe, N.(2006), “Imputing missing standard deviations in meta-analysis can provide accurate results”, *Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 59, no. 1, pp.7-10.
- Higgins, J. P. and Thompson, S. G.(2002), “Quantifying heterogeneity in a meta-analysis”, *Statistics in Medicine*, vol. 21, no. 11, pp.1539-1558.
- Jin, Y.(2015), *Meta-analysis using Stata*, Korea University Press, p.13.
- Jo, Y., Jung, A., Oh, C., Park, J. and Yun, D.(2022), “Suitability Evaluation for Simulated Maneuvering of Autonomous Vehicles”, *The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no. 2, pp.183-200.
- Kang, H.(2015), “Statistical Considerations in Meta-Analysis”, *Hanyang Medical Reviews*, vol. 35, no. 1, pp.23-32.
- Kang, M., Im, I., Song, J. and Hwang, K.(2019), “Analyzing Traffic Impacts of Automated Vehicles on Expressway Weaving Sections-A Case Study using Seoul-Singal Ramp Area”, *Journal of Transport Research*, vol. 26, no. 4, pp.33-47.
- Kim, H., Jeon, G., Jang, J. and Yoon, I.(2020), “Analysis of Factors Affecting Buses and Trucks Crash Severity Using meta-analysis”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 38, no. 6, pp.520-535.
- Kim, Y., Jeong, H., Ko, W., Park, J. and Yun, I.(2022), “Analysis of the Effect of the Truck

- Platooning using a Meta-analysis”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no. 1, pp.76-90.
- Ko, W., Park, S., So, J. and Yun, I.(2021), “Analysis of Effects of Autonomous Vehicle Market Share Changes on Expressway Traffic Flow using IDM”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 4, pp.13-27.
- Lee, J.(2008), “Meta-analysis”, *Endocrinology and Metabolism*, vol. 23, no. 6, pp.361-378.
- Lee, K., Park, S., Park, G., Park, J. and Yun, I.(2022), “Analysis of Factors Affecting the Take-over Time of Automated Vehicles Using a Meta-analysis”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no. 4, pp.167-189.
- Lux Research(2021), *Autonomous Vehicle Market Forecast: Demystifying the \$50 Billion Opportunity*, p.6.
- McGraw, K. O. and Wong, S. P.(1992), “A common language effect size statistic”, *Psychological Bulletin*, vol. 111, no. 2, pp.361-365.
- Mesionis, G., Brackstone, M. and Gravett, N.(2020), “Microscopic Modeling of the Effects of Autonomous Vehicles on Motorway Performance”, *Transport Research Report*, vol. 2674, no. 11, pp.697-707.
- Oh, M., Youn, S., Jeong, E. and Oh, C.(2017), “Evaluating Traffic Safety Benefits of Electronic Stability Control System Using a meta-analysis: Focused on Accident Rates”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 35, no. 4, pp.307-320.
- Papadoulis, A., Quddus, M. and Imprialou, M.(2019), “Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 124, pp.12-22.
- Park, I., Lee, J., Lee, J. and Hwang, K.(2015), “Impacts of Automated Vehicles on Freeway Traffic-flow - Focused on Seoul-Singal Basic Sections of GyeongBu Freeway”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 6, pp.21-36.
- Perraki, G., Roncoli, C., Papamichail, I. and Papageorgiou, M.(2018), “Evaluation of a model predictive control framework for motorway traffic involving conventional and automated vehicles”, *Transport Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 92, pp.456-471.
- Pillemer, D. and Light, R.(1980), “Synthesizing outcomes: How to use research evidence from many studies”, *Harvard Educational Review*, vol. 50, no. 2, pp.176-195.
- Postigo, I., Olstam, J. and Rydegren, C.(2021), “Effects on Traffic Performance Due to Heterogeneity of Automated Vehicles on Motorways: A Microscopic Simulation Study”, *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems(VEHITS 2021)*, pp.142-151.
- Shin, W. J.(2015), “An Introduction of the Systematic Review and Meta-Analysis”, *Hanyang Medical Reviews*, vol. 35, no. 1, pp.9-17.
- Shladover, S. E., Su, D. and Lu, X.(2012), “Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow”, *Transport Research Record: Journal of Transport Research Board*, vol. 2324, pp.63-70.
- Stogios, C., Kasraian, D., Roorda, M. J. and Hatzopoulou, M.(2019), “Simulating impacts of automated driving behavior and traffic conditions on vehicle emissions”, *Transport Research Part D*, vol. 76, pp.176-192.

- Sukennik, P., Lohmiller, J. and Schlaich, J.(2018), “Simulation-Based Forecasting the Impacts of Autonomous Driving”, *Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation (ISTS'18) and the International Workshop on Traffic Data Collection and its Standardization (IWTDCS'18)*, Matsuyama, Japan.
- Vander Werf, J., Shladover, S. E., Miller, M. A. and Kourjanskala, N.(2002), “Effects of Adaptive Cruise Control Systems on Highway Traffic Flow Capacity”, *Transportation Research Record: Journal of Transport Research Board*, vol. 1800, issue 1, pp.78-84.
- Wolf, F. M.(1986), *Meta-Analysis: Quantitative Methods for Research Synthesis*, Sage Publication, Thousand Oaks.
- Yun, S., Ju, S. and Jeong, E.(2016), “Effectiveness Evaluation of Core Technologies for Automated Vehicle-highway Systems Based on a Meta-analysis”, *Transportation Technology and Policy*, vol. 13, no. 4, pp.30-41.
- Zhong, Z., Lee, E. E., Nejad, M. and Lee, J.(2020), “Influence of CAV Clustering Strategies on Mixed Traffic Flow Characteristics: An Analysis of Vehicle Trajectory Data”, *Transport Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 115, 102611.