

메타분석을 이용한 화물차 군집주행의 효과 분석

Analysis of the Effects of the Truck Platooning Using a Meta-analysis

김 예 진* · 정 하 림** · 고 우 리*** · 박 중 규**** · 윤 일 수*****

* 주저자 : 아주대학교 교통공학과 석사과정
 ** 교신저자 : 아주대학교 교통공학과 박사과정
 *** 공저자 : 아주대학교 교통공학과 석·박사통합과정
 **** 공저자 : 한국도로공사 설계처 처장
 ***** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수

Yejin Kim* · Harim Jeong** · Woori Ko*** · Joong-gyu Park**** · Ilsoo Yun*****

* Dept. of Transportation Eng., Ajou University
 ** Expressway Design division, Korea Expressway Corporation

† Corresponding author : Harim Jeong, gkfla0731@ajou.ac.kr

Vol.21 No.1(2022)

February, 2022
 pp.76~90

pISSN 1738-0774
 eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.1.76>

Received 17 November 2021
 Revised 29 November 2021
 Accepted 1 December 2021

© 2022. The Korea Institute of
 Intelligent Transport Systems. All
 rights reserved.

요 약

군집주행이란, 운전자가 직접 운전하는 선두 차량과 차량 탑재 센서 및 V2V, V2I 통신을 활용하여 선두 차량의 주행 경로를 따르는 한 대 이상의 추종 차량이 하나의 군집을 이루며 주행하는 형태를 말한다. 그중 화물차 군집주행은 증가하는 화물량 및 교통물류 체계 첨단화 수요에 맞추어 등장하였으며, 도입 시 도로 용량 증대, 인건비 절감, 연료 소비량 절감 등의 효과가 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 일반 승용차에 비해 화물차의 자율주행 관련 연구 및 효과에 대한 검증은 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 화물차 군집주행의 효과를 주제로 메타분석을 수행하여, 기존의 군집주행 효과 관련 연구 결과를 하나의 신뢰도 높고 일반화·객관화된 요약 추정치로 통합하였다. 결론적으로, 군집주행 도입 시 13.93%의 용량 증가, 38.76%의 상층 감소, 8.13%의 연료 소비량 감소 효과가 나타날 것으로 분석되었다.

핵심어 : 군집주행, 메타분석, 용량, 상층, 연료 소비량

ABSTRACT

The platooning refers to a form in which one or more following vehicles along the path of the leading vehicle(directly driven by the driver) drive in one platoon using V2V, V2I communication and vehicle-mounted sensor. Platooning has emerged in line with the increasing demand for cargo volume and advanced transportation logistics systems, and is expected to have effects such as increasing capacity, reducing labor costs, and reducing fuel consumption. However, compared to general passenger cars, research on autonomous driving of trucks and verification of their effects are insufficient. Therefore, in this study, meta-analysis was conducted on the theme of the effect of truck platooning, and the results of existing studies related to platooning effects were integrated into one reliable, generalized, and objective summary estimate. In conclusion, it was analyzed that the introduction of truck platooning would have an effect of 13.93% increase in capacity, 38.76% decrease in conflict, and 8.13% decrease in fuel consumption.

Key words : Platooning, Meta-analysis, Capacity, Conflict, Fuel consumption

I. 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

대한민국 통계청(Statistics Korea)의 KOSTA 통계플러스¹⁾에 따르면 2013년부터 2018년까지 6년에 걸친 조사 결과, 국내 화물수송분담률 중 공로(public road), 즉 육상교통이 차지하는 비율은 약 91.6%로 매우 높으며, 이는 시간이 흐름에 따라 지속해서 증가하는 추세를 보이고 있다. 또한, 화물자동차 등록 대수 역시 2015년 3,432,937대에서 2018년 3,590,939대, 2020년 3,615,245대로 평균 연간 1.04%씩 5년간 약 5.31% 증가하였다. 이처럼 육로를 이용한 화물 수송의 역할이 점차 강조되는 시점에서, 4차 산업혁명 시대의 도래와 함께 뉴노멀(new normal)의 일환으로서 정보통신기술(information and communications technology, ICT)과 교통물류시스템을 결합한 형태의 첨단 및 스마트 물류 시스템이 등장하였다. 그 예시 중 하나가 기존의 화물자동차를 활용한 교통물류시스템과 자율주행을 결합한 형태의 화물차 군집주행(truck platooning)이다.

자율주행은 육상교통의 관점에서 교통사고 감소, 차량 유지비용 감소, 교통혼잡 완화, 유류비 절약, 도로 용량 증대와 같은 다양한 긍정적 효과를 불러올 것으로 기대되고 있어 관련 연구가 활발히 진행되고 있는 첨단 기술 중 하나이다(Go et al., 2016). 이러한 자율주행 기술의 상용화 시발점으로 군집주행이 꼽히고 있는데, 군집주행은 종방향 및 횡방향 차량 제어 기술(longitudinal and lateral control system) 및 V2V(vehicle to vehicle)와 V2I(vehicle to infrastructure) 통신 기술을 기반으로 이루어지기 때문에 완전자율주행(Lv.4/4+)의 도입 이전이라도 자율주행의 장점을 누리면서 빠른 기술 실현이 가능하기 때문이다.

군집주행(platooning)이란, 군집 맨 앞의 선두 차량(leading vehicle)이 주행하는 경로를 따라 한 대 이상의 차량이 일정한 차 간 간격을 유지한 채 추종함으로써 하나의 군집을 이루는 주행 형태를 말한다(Choi et al., 2020). 일반적으로 선두 차량의 운전자만 직접 운전하고, 그 외의 군집 내 차량(following vehicle)은 운전자의 운전 참여 없이 차량에 탑재된 센서 및 V2V, V2I 통신을 통해 주행 정보를 교환하면서 선두 차량을 추종한다. 군집주행 도입 시 자율주행 도입과 유사하게 도로 용량 증대, 통행시간 절감과 같은 교통류 측면의 이점, 인건비 절감과 같은 운영 측면의 이점, 연료 소비량 절감과 같은 환경적 측면의 이점, 사고율 감소와 같은 안전 측면의 이점을 얻을 수 있을 것으로 기대되고 있다.

그러나 일반 승용차의 자율주행 관련 기술 연구가 1950년대부터 이루어진 것에 비해 화물차의 자율주행 관련 연구는 비교적 최근인 1990년대 중반에야 시작되었다(Ryu et al., 2020). 그렇기에 아직 화물차를 대상으로 한 자율주행 관련 연구는 물론이고, 상용화를 통해 얻을 수 있는 다양한 측면의 영향이나 효과에 대한 검증 역시 일반 승용차에 비해 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 화물차 자율주행 기술, 그중에서도 현 시점의 높은 화물 수송 수요 분담에 기여할 수 있으면서 기술 상용화 시점이 가장 빠를 것으로 예상되는 화물차 군집주행의 도입이 가져올 효과에 대해 메타분석(meta-analysis)을 수행하고자 한다.

메타분석은 동일한 주제로 수행된 여러 기존 연구들의 결과를 통합하여 하나의 객관화·일반화된 요약 추정치(summary estimate)로 나타내는 기법을 말하며, 통합하는 과정에서 표본의 크기가 커져 연구 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 과정으로 분석을 진행하고자 한다. 먼저, 화물차 군집주행의 도입으로 얻을 수 있는 효과 요인의 유형에 대해 탐색한다. 기존 연구에서 언급된 효과 요인으로는 용량 증대, 상층 감소, 지체 감소, 통행시간 절감 등이 있다(Alzahrani, 2019; Sethuraman et al., 2019; Wang et al.,

1) http://kostat.go.kr/sri/srikor/srikor_pbl/4/index.board

2019). 그중 질적·양적으로 충분한 기존 연구 결과를 수집할 수 있는 효과 요인을 메타분석 대상 유형으로 선정한다. 그리고 선정된 요인별로 메타분석을 수행함으로써 향후 화물차 군집주행의 도입을 통해 얻을 수 있을 것으로 기대되는 효과 요인 및 요인별 효과 증감률을 분석하고 통계적 유의성을 검증한다. 본 연구를 통해 관련 기존 연구가 부족한 화물차 군집주행의 효과에 대한 객관화·일반화된 결론을 도출함으로써 관련 제도 도입의 타당성을 평가할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 관련 이론 및 연구 고찰

1) 관련 이론 고찰

메타분석(Meta-analysis)이란, 유사한 주제로 도출된 여러 개의 기존 연구 결과를 통합하여 하나의 객관화·일반화된 결론, 즉 요약 추정치(summary estimate)를 도출함으로써 효과 및 영향을 정량적으로 평가하는데 이용되는 통계 기법을 말한다(Kontopantelis and Reeves, 2009; Kang, 2015). 기존 연구간 실험 환경이 동일하지 않다고 해도, 같은 주제로 수행된 연구에서 얻어진 결과라면 통합하여 하나의 요약 추정치를 도출할 수 있다는 장점이 있다(Jin, 2015). 많은 연구 결과를 종합적으로 일반화하기 때문에 개별 연구보다 표본의 크기가 커져, 보다 신뢰도 있고 통계적 검증력이 높은 결과를 얻을 수 있다(Pillemer and Light, 1980). 일반적으로 메타분석은 수집한 개별연구의 요약 추정치 도출, 개별연구의 가중치 산정, 가중 평균(weight average)을 이용한 통합 요약 추정치 도출의 과정으로 이루어진다.

군집주행이란, 연속된 2대 이상의 차량이 하나의 군집을 이루어 차량 센서 및 V2V, V2I 통신을 활용하여 차 간 간격 및 주행 속도를 제어하며 주행하는 것을 말한다(Yun et al., 2016). 군집주행 중 추종 차량들의 거동은 종방향 및 횡방향 제어 시스템에 의해 제어되며 설정된 차 간 간격을 유지하며 선두 차량의 경로를 따라 주행하게 된다. 선두 차량을 제외하면 운전자가 직접 운전할 필요가 없으므로 인건비와 물류비를 크게 절약할 수 있어 육로를 이용한 화물 운송 분야에서 주목받고 있다. 또 도로상의 모든 차량, 인프라, 객체 그리고 교통상황을 인식하고 그에 따라 차량을 제어해야 하는 자율주행기술과 달리, 운전자가 존재하는 선두 차량과의 연동 제어를 통해 대열을 유지하는 정도의 기술 수준만이 요구되기 때문에 비교적 기술 구현의 복잡성이 낮아, 상용화 시기를 앞당길 수 있다는 장점이 있다.

2) 관련 연구 고찰

Kim et al.(2020)은 버스 및 트럭 교통사고의 심각도에 영향을 미치는 요인 및 상대적 중요도를 파악하고자 하였다. 총 42개의 버스 및 화물차 사고와 관련된 기존 연구를 수집하였으며 15개 요인에 대하여 메타분석을 실시하였다. 이질성 검정 결과, 수집한 연구 간 이질성이 있는 것으로 판단되어 랜덤효과모형을 사용하였으며, 메타분석 결과 상대적 중요도가 큰 순서부터 속도위반, 음주운전, 제한속도 100km/h 이상, 차대 차 사고, 야간시간대 발생사고, 피로(졸음) 운전, 곡선부 발생 여부, 운전자 연령까지 총 8개 요인이 유의미한 것으로 나타났다.

Oh et al.(2017)은 차체자세제어장치(electronic stability control, ESC)의 장착 여부에 따른 교통 안전성 효과를 주제로 메타분석을 수행하였다. 효과 평가 지표로는 사고율, 사망사고율, 통제 상실 사고율을 설정하였으며 이질성 검정을 통해 랜덤효과모형을 활용하여 요약 추정치를 도출하였다. 분석 결과, ESC 적용 시 사고율이 10%, 사망사고율이 36%, 통제 상실 사고율이 27% 감소하는 것으로 나타났으며 연구 결과를 ESC 장착 의무화를 위한 관련 전략 및 제도 수립에 활용할 것을 제안하였다.

Yun et al.(2016)은 차량협력기반 순항 제어장치(Cooperative adaptive cruise control, CACC) 시스템과 군집주행의 적용이 도로교통시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 메타분석의 효과 평가 지표로 운영 효율성 측면

에서 도로 용량, 환경성 측면에서 연료 절감률을 채택하였으며 Cochran's Q-test 및 Higgins' I² statistic 방법을 이용하여 이질성을 검정하였다. 랜덤효과모형을 사용하여 통합 효과크기를 도출한 결과, CACC와 군집주행 도입 시 용량이 24% 증가하고 연료 절감률이 23% 증가하는 것으로 분석되었다.

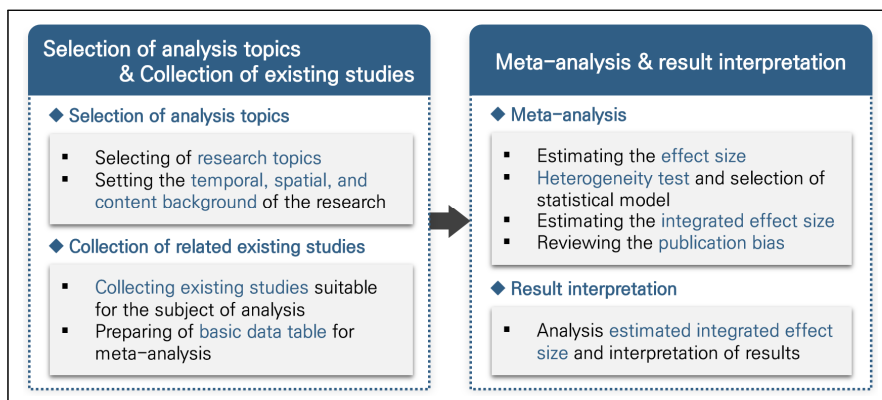
유럽의 Safe road trains for the environment(SARTRE) Project(2021)에서는 교통 혼잡을 완화하고 환경에 대한 악영향을 줄이기 위한 목적으로 군집주행을 제안하였다. 군집주행을 통해 장거리 이동의 부담을 덜 수 있고, 선두 차량과 군집 내 추종 차량 모두에게 긍정적인 효과를 가져올 것으로 예상하였다. 주행시험을 통해 군집주행의 효과를 검증하였으며, 프로젝트에서 언급된 군집주행의 효과로는 탄소 배출량 약 20% 절감, 교통류 개선, 사고 감소, (일부 차량에 대한) 공기저항 감소 등이 있다.

3. 연구의 차별성 도출

메타분석 및 군집주행과 관련된 기존 연구를 고찰한 결과, 군집주행의 효과를 분석한 연구는 찾아볼 수 있었으나 연구마다 실험 환경 및 실험조건 간의 편차가 컸다. 군집 간 간격, 군집 내 간격, 주행 속도, 군집 내 차량 수 등 다양한 군집주행의 조건에 따라 수많은 실험 시나리오가 설계되었으며 시나리오별로 결과를 추정하였기 때문에 정량적으로 군집주행의 효과를 비교하기에는 무리가 있었다. 이러한 배경하에, 본 연구는 기존에 수행된 군집주행의 효과 관련 연구의 결과를 하나의 정량화된 지표로 나타내고자 하였다. 메타분석은 실험 조건 혹은 가정과 관계없이 하나의 요약 추정치를 도출할 수 있다는 장점이 있다. 관련 연구를 고찰한 결과, 현시점에서는 군집주행의 효과에 대한 메타분석이 수행된 예를 찾아보기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 메타분석을 활용하여 군집주행의 도입 효과에 대한 정량적이고 일반화된 요약 추정치, 즉 통합 효과크기를 도출하고자 한다.

II. 분석 방법론

메타분석은 크게 ‘분석 주제 선정 및 관련 기존 연구 결과 수집’ 과정과, ‘분석 수행 및 결과 해석’ 과정으로 나눌 수 있으며, 각 과정의 세부 단계는 <Fig. 1>과 같다.



<Fig. 1> Analysis process

1. 효과크기 추정

효과크기(Effect size)란, 메타분석에서 동일한 주제에 대해 여러 분석 방법론 및 시나리오를 통해 도출된 결과를 하나의 표준화된 값으로 통합하기 위해 사용하는 지표로, 연구 집단 사이의 관계(차이 혹은 연관성)를 공통된 단위로 표현한다(McGraw and Wong, 1992; Yun et al., 2016; Jin, 2015; Oh et al., 2017). 여러 기존 연구에서는 집단 간의 관계를 나타내고 통계적 유의성을 검정하기 위한 방법으로 p-value를 활용하고 있으나, p-value를 활용한 유의성 검정에는 한계가 존재한다. 그 첫 번째 예로, p-value를 활용한 유의성 검정의 경우 표본 크기에 비례하여 연관성(relationship)이 추정되므로 이 과정에서 표본의 크기가 큰 연구는 과대추정, 표본의 크기가 작은 연구는 과소 추정될 위험이 있다. 또 p-value를 활용한 유의성 검정의 경우, ‘유의하다’ 혹은 ‘유의하지 않다’라는 이분법적인 결론만을 도출할 수 있다. 반면에, 효과크기를 활용한 검정의 경우 표본 크기에 의한 영향을 적게 받고 집단 간 관계를 연속적인 수치로 표현할 수 있다는 장점이 있다(Nahm, 2015).

효과크기를 추정하는 척도로는 odds ratio family(승산비(odds ratio, OR), 상대 위험도(relative risk, RR), 위험차(risk difference) 등), D family(평균차(mean difference, MD), 표준화된 평균차(standardized mean difference, SMD)) 등이 존재한다(Kang, 2015). 승산비는 비교하고자 하는 두 집단 간 관계를 수치화한 값으로, 사건이 발생하지 않을 확률에 대한 사건이 발생할 확률, 상대 위험도는 대조집단(control group)에서 사건이 발생할 확률에 대한 실험집단(experimental group)에서 사건이 발생할 확률, 위험차(발생 비율 차이라고도 불린다)는 실험집단에서 사건이 발생할 확률과 대조집단에서 사건이 발생할 확률에 대한 차이를 말한다. 평균차는 실험집단의 사전·사후 평균과 통제집단의 사전·사후 평균 간 차를 의미하며 표준화된 평균차는 평균차를 표준편차로 나눈 값을 의미한다.

본 연구의 목적은 군집주행을 시행함으로써 발생하는 효과를 하나의 일관된 지표로 추정하는 것이므로, 기존 연구의 결과는 군집주행 도입 전·후 효과의 증감을 형태로 수집된다. 따라서 효과크기 척도 중, 각 연구의 결과가 실험집단과 대조집단의 수치를 비교하는 자료로 제시된 경우에 사용하는 승산비를 사용한다(Yun et al., 2016). 승산비를 도출하는 식은 <Equation 1>과 같다(Oh et al., 2017).

$$odds\ ratio = \frac{p}{1-p} \dots\dots\dots (1)$$

where, p = probability of occurrence

승산비란 실험집단과 대조집단 사이의 관계를 수치화한 값으로, 1을 기준으로 하여 승산비가 1보다 클 경우 요인과 그에 따른 효과가 양의 관계에, 1보다 작을 경우 요인과 그에 따른 효과가 음의 관계에 있다고 해석하며 승산비로 나타낸 효과크기가 0일 경우, 분석에 사용한 연구 결과 간 연관성이 없음을 의미한다(Yun et al., 2016).

본 연구에서는 메타분석에 승산비를 표준화된 상관계수의 형태로 적용하였다. 승산비가 비교하고자 하는 대상 간 연관성을 수치로 표현한 값이라면, 표준화된 상관계수는 두 개의 연속변수 간 연관성을 나타내주는 지수이다(Oh et al., 2017). 표준화된 상관계수의 식은 <Equation 2>와 같다.

$$r = \frac{OR^{\frac{1}{2}} - 1}{OR^{\frac{1}{2}} + 1} \dots\dots\dots (2)$$

where, r = standardized correlation coefficient
 OR = odds ratio

2. 이질성 검정 및 통계적 모형 선택

통합 효과크기를 추정하기에 앞서, 수집한 기존 연구 결과를 가장 효과적으로 반영할 수 있는 통계적 모형을 선택해야 한다. 이때 통계 모형 선택에 활용되는 것이 ‘이질성 검정(heterogeneity test)’ 혹은 ‘동질성 검정(homogeneity test)’이다(동일한 의미이며 표현법만 다르다). 이질성이란, 메타분석을 통해 통합하고자 하는 결과를 도출한 기존 연구들 사이에 실험 환경 및 실험 조건, 실험 대상, 전제 등의 차이로 인해 발생하는 연구 간 편차를 말한다(Kim et al., 2020). 이질성 검정을 통해, 연구간 이질성 존재 여부에 따라 이질성이 존재하지 않을 경우 고정효과모형(fixed effects model), 이질성이 존재할 경우 랜덤효과모형(random effects model)을 사용한다.

고정효과모형은 수집된 기존 연구 수가 적고, 연구 간 이질성이 없다고 판단될 때 사용한다(Kang, 2015). 고정효과모형은 각 연구의 효과크기가 같은 실험 조건에서 얻어졌다고 가정하며, 표본추출에서 생기는 표준편차가 각 연구 결과에 차이를 주는 원인이라고 가정한다(Yun et al., 2016). 또한, 연구 내의 분산만을 고려하므로, 분석으로 도출한 통합 효과크기의 설명력이 분석 시 사용된 연구에 한정된다(Jin, 2015). 랜덤효과모형은 연구 간 이질성이 존재할 때, 즉 연구 별로 실험 조건이 상이할 때 사용한다. 랜덤효과모형은 고정효과모형과 달리 통합 효과크기의 신뢰구간이 확장되는 경향이 있는데, 실험 조건의 다양성에서 오는 변동이 고려되기 때문이다(Kang, 2015). 또한, 랜덤효과모형은 연구 간 분산과 연구 내 분산을 모두 고려한다는 특징이 있다(Yun et al., 2016). 연구간 이질성이 없는 경우, 두 모형은 동일한 통합 효과크기를 도출한다. 그러나 연구 간 이질성이 커질수록, 즉 실험 조건 간 다양성이 커질수록 랜덤효과모형은 변동에 대한 민감성이 고정효과모형에 비해 낮기 때문에 상대적으로 표본 크기가 작은 연구에 보다 큰 가중치를, 표본 크기가 큰 연구에 보다 작은 가중치를 부여하므로 두 모형의 추정치 간 편차가 커지게 된다(Kang, 2015).

연구 간 이질성을 통계적으로 검정하는 데 활용되는 방법론으로는 Cochran’s Q-test, Q-statistics, Higgins’ I² statistic 등이 있다. Cochran’s Q-test는 수집된 연구의 수에 비례하여 검정력이 지나치게 영향을 받는다는 기존 연구가 다수 존재하며(Kim et al., 2020; Yun et al., 2016), Q-statistics의 경우 개별 효과크기에 따른 통계값의 변화폭이 적어 이질성 검정 시 검정력이 낮을 수 있다는 문제점이 제기된 바 있다(Kang, 2015). 따라서 본 연구에서는 이질성 검정을 위해 Higgins’ I² statistic을 활용하였다. Higgins’ I² statistic은 Q-statistic을 활용하여 이질성을 정량화한 값을 말한다(Kang, 2015). 앞의 두 검정법과 비교하였을 때, 표본의 크기에 의해 통계값이 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 연구간 이질성을 추정하여 연구가 완전히 동질한 경우 0%의 통계값이 도출되며, 이질성과 비례하여 통계값이 점차 커지는 양상을 보인다. 일반적으로 통계값이 25% 이하일 경우 낮은 이질성, 75% 이상일 경우 높은 이질성, 그 사이 값일 경우 중간 이질성을 나타낸다고 해석하며(Higgins et al., 2003), 50%를 기점으로 I² 값이 이보다 작을 경우 고정효과모형, 클 경우 랜덤효과모형을 사용한다(Kang, 2015). Higgins’ I² 값을 도출하는 식은 <Equation 3>과 같다(Yun et al., 2016).

$$I^2 = \frac{Q - df}{Q} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

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

이질성의 원인을 탐색하는 방법론으로는 하위 그룹 분석(subgroup analysis), 메타-회귀분석(meta-regression), 민감도 분석(sensitivity analysis) 등이 있다(Kang, 2015). 하위 그룹 분석은 이질성을 발생시키는 원인을 파악

하기 위해, 동질할 것으로 예상되는 연구끼리 묶어 하위 그룹으로 분류하고, 각 그룹 내 비교·분석을 통해 이질성의 원인을 파악한다. 메타-회귀분석은 메타분석과 회귀분석이 결합한 형태로, 수집한 연구의 공변량(covariance)을 활용하여 통합 효과크기에 대한 회귀분석을 실시하는 것을 말한다. 마지막으로 민감도 분석은 메타분석을 진행하는 과정에서 연구자가 개입한 선택들이 결론적으로 도출된 효과크기에 미친 영향력을 분석한다. 각 선택이 결과에 큰 영향을 미칠수록 분석의 신뢰성은 낮아진다(Higgins et al., 2003).

3. 통합 효과크기 추정

검정을 통해 수집한 연구 간 이질성 여부를 확인한 후, 고정효과모형 또는 랜덤효과모형 중 메타분석에 활용할 통계적 모형을 결정하게 되면 개별연구의 결과를 정량적이고 일반화된 하나의 요약 추정치, 즉 통합 효과크기로 나타내게 된다. 이 과정에서 각 연구 별로 다른 가중치(weight)를 적용하게 되는데 연구의 규모, 즉 표본의 크기와 비례하여 가중치를 적용한다. 표본의 크기가 작은 연구의 경우 대규모 연구에 비해 우연에 의해 영향을 받을 확률이 높기 때문에 연구 결과의 신뢰성이 떨어지는 경향이 있기 때문이다. 따라서 총 100% 가중치를 연구의 규모에 따라 상대적으로 부여하게 된다(Kang, 2015).

4. 출판편의 검토

출판편의(Publication bias)란, 통계적으로 유의미한 연구일수록 쉽게 출판되고, 그렇지 않은 경우 출판되지 못하면서 발생하는 편향을 말한다(Kim et al., 2020). 메타분석을 위해 기존 연구 결과를 수집함에 있어서 상대적으로 통계적으로 의미 있는 연구가 높은 확률로 분석에 포함되어, 보고 비뚤림(reporting bias)이 발생하게 되는 것이다. 이러한 편향은 메타분석의 효과를 왜곡시켜 부정확한 요약 추정치가 도출될 위험이 있으므로 주의해야 한다.

출판편의를 검토하는 방법 중 하나로, 깔때기 그림(funnel plot)을 이용한 시각적 검정이 있다(Kang, 2015). 깔때기 그림의 x축은 효과크기, y축은 표준편차를 의미한다. 출판편의가 존재하지 않는 경우, 표본의 크기가 큰 연구일수록 y축 상위에 좁게 분포하며 표본의 크기가 작은 연구일수록 y축 하위에 넓게 분포한다. 또한, 시각적으로 그래프상 x축에 수직으로 형성되는 효과크기 요약 추정치에 대해 개별 연구의 효과크기가 대칭 형태를 띠어야 보고 비뚤림이 적다고 해석한다. 그림의 깔때기 형태의 선은 95% 신뢰구간을 의미하며, 신뢰구간 범위 밖에 위치한 연구는 비뚤림이 있다고 해석할 수 있다.

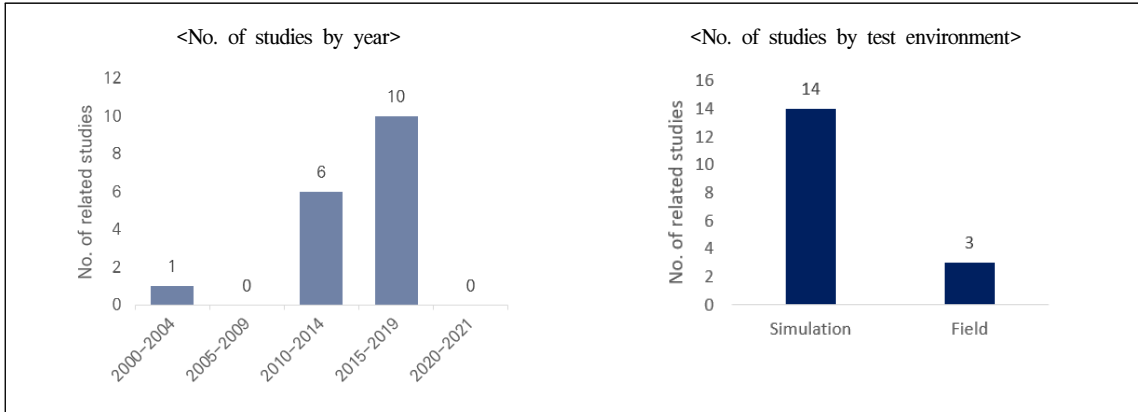
Ⅲ. 자료 수집 및 기초 데이터 구축

1. 군집주행 효과 관련 기존 연구 수집

군집주행의 효과에 대한 메타분석을 수행하기에 앞서, 분석에 활용하기 위하여 기존에 연구된 군집주행 효과 관련 연구를 수집하였다. 관련 기존 연구 수집을 위한 키워드로 ‘군집주행(platooning)’, ‘화물차 군집주행(truck platooning)’, ‘버스 군집주행(bus platooning)’, ‘효과(effects)’, ‘영향(impacts, affects, influence)’, ‘이점(benefits)’ 등을 사용하였으며 수집 자료의 내용적 범위는 화물차 및 버스 군집주행 관련 논문 및 보고서로 설정하였다. 연구의 시간적 범위는 2000년 이후로 한정하였으며(2000년~2021년, 총 22년), 공간적 범위는 육

로로 설정하였다.

결과적으로, 군집주행의 효과와 관련된 국내외 연구 총 75개를 수집하였으며 수집한 관련 기존 연구의 통계는 <Fig. 2> 그리고 개요는 <Table 1>과 같다.



<Fig. 2> Statistics of related existing studies

<Table 1> Overview of related existing studies

No.	Authors	Year	Vehicle	Sample size	Test environment	Effects
1	Alzahrani A.	2019	truck	20	simulation	capacity, conflicts
2	Jo Y., Lee S. and Oh C.	2018	truck	5	simulation	capacity
3	Harwood N. and Reed N.	2014	truck	20	simulation	capacity
4	Jo, Y., Kim, J., Oh, C., Kim, I. and Lee, G.	2019	truck	5	simulation	capacity
5	Van Maarseveen S.	2017	truck	20	simulation	capacity
6	Wang M., van Maarseveen S., Happee R., Tool O. and van Arem B.	2019	truck	20	simulation	capacity
7	Sethuraman G., Liu X., Bachmann F. R., Xie M, Ongel A. and Busch F.	2019	bus	30	simulation	conflicts, fuel consumption
8	Davila A., Aramburu E. and Freixas A.	2013	truck	5	simulation	conflicts
9	Al Alam A., Gattami A. and Johansson K. H.	2010	truck	3,313	field	fuel consumption
10	Alam A.	2017	truck	30	simulation	fuel consumption
11	Browand F., Mearthur J. and Radovich C.	2004	truck	38	simulation	fuel consumption
12	Kagenaar S. and Mingardo G.	2017	truck	760	field	fuel consumption
13	Liang K. Y., Mårtensson J. and Johansson K. H.	2014	truck	7,634	field	fuel consumption
14	McAuliffe B., Croken M., Ahmadi-Baloutaki M. and Raeesi A.	2017	truck	52	simulation	fuel consumption
15	Ramezani H., Shladover S. E., Lu X. Y. and Chou F. C.	2018	truck	5	simulation	fuel consumption
16	Tsugawa S., Kato S. and Aoki K.	2011	truck	5	simulation	fuel consumption
17	Lu X.-Y. and Shladover S. E.	2011	truck	8	simulation	fuel consumption

군집주행의 효과에 영향을 주는 요소로 MPR(market penetration rate), 군집 내 거리, 군집 간 거리, 주행 속도 등이 있으며, 이러한 요인을 어떻게 조정하느냐에 따라 무수히 많은 시나리오가 설계될 수 있다. 따라서 하나의 연구 내에서도 실험 수행 시나리오별로 실험조건 간 차이가 있을 수 있다. 이러한 시나리오를 모두 요약하여 나타내기에는 그 양이 방대하므로, 실험별 조건은 참고문헌에 제시된 각 연구를 참조하면 된다. 메타분석은 기존 연구 간 실험 환경이 동일하지 않다고 해도 하나의 요약 추정치를 도출할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 메타분석 시 활용한 기존 연구 역시 시뮬레이션 및 현장실험의 파라미터 가정이 동일하지 않지만, 이와 관계없이 연구 결과를 통합할 수 있다는 것이 메타분석의 장점이자 분석 방법론 선정의 이유이다.

수집한 기존 연구 중 메타분석이 가능한 연구를 추려내었다. 메타분석이 불가능한 연구로 분류된 원인으로는 연구에 활용된 표본의 크기(N)를 알 수 없는 경우, 효과 분석이 정성적으로 이루어져 승산비를 도출할 수 없는 경우 등이 있었다. 관련 기존 연구 고찰 결과, 총 17개의 연구를 메타분석에 활용할 것으로 결정하였다. 하나의 연구에서 여러 시나리오로 실험을 수행하여 효과를 추정한 경우, 모든 시나리오별 실험결과를 연구 결과로 포함하였다. 이러한 방법으로 17개 연구에서 도출된 연구 결과는 총 132개였다.

2. 기초 데이터 구축

기존 연구 수집 결과 표본이 충분히 확보된 용량(capacity), 상충(conflict), 연료 소비량(fuel consumption)을 군집주행의 효과 분석 요인으로 선정하였다. 선정된 효과 요인과 관련하여 기존 연구에서 도출된 연구 결과를 메타분석에 활용하기 위해 가공하는 과정이 필요하다. 메타분석에는 데이터의 유형에 따라 효과크기를 나타내는 척도로 승산비(odds ratio), 표준화된 평균차(standardized mean difference), 상대 위험도(relative risk) 등을 사용한다. 본 연구는 군집주행의 시행에 따른 효과를 주제로 메타분석을 시행하므로, 통합 효과크기 추정에 실험군과 대조군 간의 수치 비교 시 활용되는 승산비를 표준화된 상관계수의 형태로 사용하였다(Yun et al., 2016). 메타분석을 위한 기초 데이터 구축 결과의 예시는 <Table 2>와 같다.

<Table 2> The result of basic data table of the capacity factor (e.g.)

Num	N	r
Alzahrani(2019)	20	0.01924
Alzahrani(2019)	20	0.02062
Alzahrani(2019)	20	0.02382
Alzahrani(2019)	20	0.02382
Jo et al.(2018)	5	0.02200
Jo et al.(2018)	5	0.02223
...

IV. 메타분석 결과

작성한 기초자료를 바탕으로 메타분석을 수행한다. 메타분석에는 R을 활용한 프로그래밍 환경을 제공하는 R-Studio(RStudio)를 활용하였다.

1. 용량 요인

군집주행의 효과 요인 중 용량과 관련된 기존 연구 결과의 수(k)는 총 57건이었으며, 기존 연구 결과를 활용하여 통합 효과크기를 도출한 결과는 <Table 3>과 같다. Higgins' I^2 를 이용한 이질성 검정 결과, I^2 값이 0.0%로 도출되어 분석에 활용된 연구간 이질성이 없는 것으로 나타났다. 따라서 고정효과모형을 활용하여 통합 효과크기를 추정하였으며 그 결과, 표준화된 상관계수(r)의 형태로 표현된 통합 효과 크기가 0.0326으로 도출되었다. 이를 다시 승산비의 형태로 환산하면 1.1393의 값을 도출할 수 있는데, 이는 곧 군집주행 시행 전과 비교하였을 때, 시행 이후 도로 용량이 약 13.93% 증가함을 의미한다. 출판편의를 검토한 결과, p-value가 0.5895로 도출되었다. 출판편의를 검토함에 있어서, p-value가 0.05 이상일 경우, 절편이 0이라는 귀무가설을 기각하지 못해 출판편의가 존재하지 않는다고 판단한다. 따라서 용량 요인 분석에 활용된 연구 간에는 출판편의가 존재하지 않는다는 결론을 도출하였다.

<Table 3> The result of deriving the integrated effect size of the capacity factor

No. of previous studies (k)	Effect size			Integrated effect size (odds ratio)	I^2	Publication bias	p-value
	Integrated effect size (r)	95% CI					
		upper	lower				
57	0.0326	0.1193	-0.0547	1.1393	0.0%	0.5895	0.4644

그러나 분석 결과의 p-value가 0.4644로 유의수준 범위 밖에 위치하여 분석이 유의하지 않다는 결론을 얻었다. 이는 개별연구의 효과크기 및 표본 크기와 관련이 있다. 일반적으로, 표본의 크기가 작을수록 효과크기의 표준오차(standard error)는 커진다. 용량 요인의 경우 상관계수, 즉 효과크기 값이 다른 요인에 비해 비교적 작고 표본의 크기 역시 작아 이러한 결과가 도출된 것으로 보인다. 실제로 분석에 사용된 연구 결과의 통계값을 살펴보면, 필드 데이터 기반의 분석 결과가 다수 포함된 연료 소비량 요인의 경우 최대 표본 크기가 N=7,634인 것에 비해 용량 요인의 표본 크기는 N=5~N=20 수준으로 용량 요인의 표본 크기가 상대적으로 매우 작음을 알 수 있다.

2. 상충 요인

상충 요인과 관련하여 수집된 기존 연구 결과의 수(k)는 총 10건이었으며, 메타분석 수행 결과는 <Table 4>와 같다. Higgins' I^2 을 이용한 이질성 검정 결과, 용량 요인과 마찬가지로 수집한 연구 간 이질성이 없다고 판단되어($I^2=0.0%$) 고정효과모형을 사용하여 분석을 진행하였다. 표준화된 상관계수(r)의 형태로 표현된 통합 효과크기 추정치는 -0.1220이었으며, 이를 승산비의 형태로 환산하면 0.6124의 값이 도출된다. 이는 화물차 군집주행 도입 시, 도입 이전과 비교했을 때 약 38.76%의 상충 감소 효과가 있다는 의미로 해석할 수 있다. 출판편의를 검토한 결과, p-value가 0.2822로 도출되어 귀무가설을 기각하지 못해 출판편의가 존재하지 않다고 판단하였다. 마지막으로 분석 결과의 p-value가 0.0999로 도출되어 유의수준 90%에서 유의한 분석 결과라고 결론지었다.

용량 요인에서 도출된 통합 효과크기(+13.93%)와 비교하였을 때 상충 요인의 통합 효과크기(-38.76%)는 상대적으로 절댓값이 크게 도출되었는데, 이는 분석에 사용된 기존 연구의 다양성 및 연구별 승산비의 크기와 연관되어 있다. 용량 요인의 통합 효과크기 추정에 활용된 연구와 상충 요인의 통합 효과크기 추정에 활용된

연구가 다르므로 연구별 실험 수행 환경 및 조건 역시 다르다. 그렇기 때문에 상충 요인 분석 시 활용된 기존 연구의 실험 수행 환경이 상대적으로 군집주행의 효과를 극대화하는데 유리했을 가능성이 있다. 실제로 용량 요인 메타분석에 활용된 연구 결과의 승산비 평균은 0.0336 수준인 것에 비해, 상충 요인의 분석에 활용된 승산비 평균은 -0.1259 수준으로 비교적 그 절대값이 크다. 따라서 통합 효과크기도 이와 비례하여 비교적 크게 도출된 것으로 보인다.

<Table 4> The result of deriving the integrated effect size of the conflict factor

No. of previous studies (k)	Effect size			Integrated effect size (odds ratio)	I ²	Publication bias	p-value
	Integrated effect size (r)	95% CI					
		upper	lower				
10	-0.1220	-0.0234	-0.2624	0.6124	0.0%	0.2822	0.0999

3. 연료 소비량 요인

총 65건의 연료 소비량과 관련된 기존 연구 결과를 수집하였으며, 메타분석 수행 결과는 <Table 5>와 같다. 위 두 효과 요인과 동일하게 I² 값이 0.0%으로 도출되어 분석에 사용할 통계적 모형으로 고정효과모형을 채택하였으며, 분석을 통해 도출된 표준화된 상관계수 형태(r)의 통합 효과크기는 -0.0212이다. 이를 승산비 형태로 나타내면 0.9187로, 군집주행 도입 전과 후를 비교하였을 때 약 8.13%의 연료 소비량 절감 효과가 나타날 것으로 예상할 수 있다. 출판편의 검토 결과, p-value가 0.0771로 도출되어 보고 비뚤림이 없는 것으로 해석하였으며 분석의 p-value(<0.0001)도 유의수준 95% 범위에 위치하여 분석 결과가 유의미한 것으로 나타났다.

<Table 5> The result of deriving the integrated effect size of the fuel consumption factor

No. of previous studies (k)	effect size			Integrated effect size (odds ratio)	I ²	publication bias	p-value
	Integrated effect size (r)	95% CI					
		upper	lower				
65	-0.0212	-0.0114	-0.0310	0.9187	0.0%	0.0771	<0.0001

연료 소비량 요인의 경우 메타분석에 활용된 연구의 수는 65건으로 용량 요인(57건)과 큰 차이가 없다. 그러나 기존 연구 65건에 표본의 크기가 N=5, N=8인 소규모 시뮬레이션을 활용한 결과부터 N=7,634, N=3,313인 대규모 현장실험 결과까지 다양하게 수집되어, 다른 두 요인과 비교했을 때 상대적으로 높은 통계적 유의성이 도출된 것으로 보인다.

V. 결론 및 향후 연구 과제

1. 결론

지속적으로 육상교통이 해결해야 하는 물류 통행 수요가 증가하고 있는 현재의 추세에 맞추어, 화물 수송

분야에도 첨단화 및 스마트화가 요구되고 있다. 따라서 화물 수송의 뉴노멀로 화물차의 군집주행 기술이 주목받고 있다. 군집주행은 선행 차량의 주행 경로를 따라 추종 차량이 차량 탑재 센서 및 V2V 통신 기술을 활용하여 일정한 차 간 거리를 유지한 채 하나의 군집을 이루어 주행하는 형태를 말한다. 군집주행 도입 시, 도로 용량 증대, 통행시간 절감, 인건비 절감, 연료 소비량 절감, 사고율 감소와 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 화물차의 자율주행 기술 연구는 1990년대 중반에야 시작되어, 일반 승용차와 비교했을 때 양적·질적 측면에서 화물차 자율주행 도입 시 얻을 수 있는 효과와 관련된 기존 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 화물차 자율주행 기술 상용화의 시발점이 될 것으로 예상하는 군집주행의 도입 효과에 대해 일반적이고 객관화된 결과를 도출하기 위하여, 통계적 분석 방법인 메타분석을 활용하였다. 메타분석은 하나의 주제로 수행된 여러 연구 결과를 통합하여 하나의 객관적인 요약 추정치를 도출하는 정량적인 통계 기법을 말한다. 여러 연구를 하나의 추정치로 통합하는 과정에서 표본의 크기가 커져 분석 결과의 신뢰성을 높일 수 있다는 장점이 있으므로, 관련 연구가 부족한 화물차 군집주행의 효과를 주제로 분석을 수행함으로써 화물차 군집주행의 효과에 대한 일반화·객관화된 결론을 도출하고자 하였다.

메타분석을 위해 2000년 이후의 군집주행 효과 관련 기존 연구 17건에서 총 132개의 연구 결과를 수집하였으며, 분석된 효과 요인은 용량, 상충, 연료 소비량이다. 화물차 군집주행 도입의 효과크기 추정을 위해 승산비를 표준화된 상관계수의 형태로 적용하여 분석하였으며 결론적으로 군집주행 도입 시, 도로 용량은 13.93% 증가, 상충은 38.76% 감소, 연료 소비량은 8.13% 감소할 것으로 분석되었다. Higgins' I^2 값을 이용한 이질성 검정 결과, 세 효과 요인 모두 연구 간 이질성이 존재하지 않는 것으로 나타나 고정효과모형을 사용하였으며 출판편의 검토 결과 보고 비뮌림은 존재하지 않았다. 그러나 용량 요인의 p-value가 0.4644로 도출되어 통계적 유의성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 효과크기와 표본 크기의 규모에 의해 일어난 현상으로, 일반적으로 표본의 크기가 작을수록 효과 크기의 표준오차는 커지게 된다. 용량 요인 효과크기 분석에 사용된 기존 연구의 경우, 모두 시뮬레이션을 활용하여 연구 결과를 얻었기 때문에 다른 효과요인에 비해 표본의 크기가 상대적으로 작다. 또한, 효과크기 역시 다른 요인에 비해 상대적으로 작아 이러한 결과가 도출된 것으로 보인다. 상충과 연료 소비량 효과 요인의 경우 p-value가 0.0999, <0.0001로 도출되어 각각 유의수준 90%, 95%에서 유의한 분석 결과라고 해석하였다.

2. 연구의 한계 및 향후 연구과제

본 연구를 통해 도출한 향후 연구과제는 다음과 같다. 아직 메타분석에 활용 가능한 군집주행 도입 효과와 관련된 기존 연구가 양적, 질적으로 부족한 실정이기 때문에 본 연구에서는 17건의 기존 연구만을 포함하였다. 향후 화물차 군집주행 관련 연구가 활발히 이루어져 현시점보다 대규모의 연구 표본이 확보되었을 때, 이와 유사한 연구를 반복 수행할 것을 제안한다. 같은 화물차 군집주행의 효과에 관한 연구일지라도, 실험 환경(실도로, 시뮬레이션 등), 실험 대상 객체(버스, 소형화물차, 대형화물차 등), 주행 조건(통행 속도, 주행 차로 등), 군집 형성 조건(군집 내 간격, 군집 형성 차량 수 등) 등 실험 조건이 다양한 표본을 확보할 필요가 있다. 다양한 시나리오로부터 얻은 실험결과를 메타분석에 많이 활용할수록 분석으로 도출된 효과크기 값의 일관성 및 신뢰성 향상을 기대할 수 있다.

시뮬레이션을 이용한 분석의 경우, 차량의 거동이나 교통류의 흐름과 같은 실험환경을 구현함에 있어 이상적인 조건을 적용하게 되는 경우가 흔히 발생한다. 그런데 실제 도로상에는 이상적인 조건 외에도 급정거, 급출발, 지체, 돌발상황(사고, 공사 등), 악천후 등 차량 운행에 영향을 줄 수 있는 요소가 다양하게 존재한

다. 따라서 시뮬레이션을 통해 도출된 군집주행의 효과는 이상적인 교통류에서 발생할 것으로 예상되는 효과이며, 실제 도로에서 발생할 효과와 비교했을 때 과대추정 되었을 가능성이 있다는 한계가 존재한다. 이러한 경향을 적게 나타내도록 하기 위해서는 표본의 크기가 충분히 큰 현장실험(field) 결과를 다수 포함하여야 할 필요가 있다. 현장실험은 시뮬레이션 실험과 비교했을 때 비교적 실도로의 상황을 잘 묘사하기 때문이다. 그러나 아직은 군집주행의 효과를 주제로 수행된 현장실험 연구의 양이 부족한 실정이다. 따라서 첫 번째 향후 연구과제와 마찬가지로, 대규모의 연구 표본이 확보되었을 때, 이와 유사한 연구를 반복수행하면 분석의 신뢰성이 향상될 것으로 보인다.

마지막으로, 화물차 군집주행의 효과 요인으로 용량, 상층, 연료 소비량 세 개의 항목만을 분석했다는 점에서 한계를 갖는다. 본 연구에서 사용된 요인 외에도 군집주행 도입을 통해 얻을 수 있을 것으로 기대되는 통행 속도 향상, 지체 감소, 공기저항 감소, 배기가스 배출량 저하 등의 효과와 관련된 연구도 소수 존재하였으나 표본이 작아 메타분석에 활용하지 못하였다. 이 한계점도 위와 유사하게, 관련 연구가 질적·양적으로 증가하여 표본이 충분히 확보되었을 때 메타분석을 수행하면 통합 효과크기 도출이 가능할 것이다. 이러한 효과 요인이 다양해질수록 화물차 군집주행 도입의 타당성을 뒷받침하는 근거가 될 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업의 연구비지원(과제번호 21TLRP-B147674-04)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Al Alam, A., Gattami, A. and Johansson, K. H.(2010), “An experimental study on the fuel reduction potential of heavy duty vehicle platooning”, *International Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE) Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.306-311.
- Alam, A.(2017), *Fuel-efficient heavy-duty vehicle platooning*, Royal Institute of Technology, pp.61-70.
- Alzahrani, A.(2019), *The operational and safety effects of heavy duty vehicles platooning*, University of North Florida(UNF) Graduate Theses and Dissertations, University of North Florida, pp.1-82.
- Browand, F., McArthur, J. and Radovich, C.(2004), *Fuel Saving Achieved in the Field Test of Two Tandem Trucks*, University of California, pp.15-22.
- Choi, S., Park, S. and Shin, Y.(2020), “A Study on the Applicable Dynamic Platooning in Urban Road Environment”, *Korea Information Processing Society*, vol. 27, no. 1, pp.80-82.
- Davila, A., Aramburu, E. and Freixas, A.(2013), “Making the best out of aerodynamics: Platoons”, *Society of Automotive Engineers(SAE) Technical Paper Series*, pp.1-6.
- Go, Y., Yuk, D. and Noh, J.(2016), “An analysis of the expected effect of introducing an autonomous vehicle system”, *Conference of Korean Society of Transportation*, pp.317-322.
- Harwood, N. and Reed, N.(2014), “Modelling the impact of platooning on motorway capacity”, *Road Transport Information and Control Conference 2014(RTIC 2014)*, pp.1-6.

- Higgins, J., Thompson, S., Deeks, J. and Altman, D.(2003), “Measuring inconsistency in meta-analyses”, *British Medical Journal*, vol. 327, no. 7414, pp.557-560.
- Jin, Y.(2015), *Meta-analysis using Stata*, Korea University Press, p.13.
- Jo, Y., Kim, J., Oh, C., Kim, I. and Lee, G.(2019), “Benefits of travel time savings by truck platooning in Korean freeway networks”, *Transport Policy*, vol. 83, pp.37-45.
- Jo, Y., Lee, S. and Oh, C.(2018), “Impacts of truck platooning in mixed-traffic conditions on freeway capacity”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 36, no. 5, pp.331-345.
- Kagenaar, S. and Mingardo, G.(2017), *The Network Effects of Truck Platooning: A Case Study Analysis Focusing on a supermarket*, Erasmus University Rotterdam, pp.20-38.
- Kang, H.(2015), “Statistical considerations in meta-analysis”, *Hanyang Medical Reviews*, vol. 35, pp.23-32.
- 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.
- Kontopantelis, E. and Reeves, D.(2009), “MetaEasy: A MetaAnalysis Add-In for Microsoft Excel”, *Journal of Statistical Software*, vol. 30, no. 7, pp.1-25.
- Liang, K., Martensson, J. and Johansson, K.(2014), “Fuel-saving potentials of platooning evaluated through sparse heavy-duty vehicle position data”, *2014 Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE) Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, pp.1061-1068.
- Lu, X. Y. and Shladover, S. E.(2011), *Automated truck platoon control*, UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology, pp.10-59.
- McAuliffe, B., Croken, M., Ahmadi-Baloutaki, M. and Raesi, A.(2017), *Fuel-economy testing of a three-vehicle truck platooning system*, Aerodynamics Laboratory, National Research Council Canada, pp.7-34.
- McGraw, K. and Wong, S.(1992), “A common language effect size statistic”, *Psychological Bulletin*, vol. 111, no. 2, pp.361-365.
- Moon, Y., Kim, T., Leem, D., Moon, H. and Kim, M.(2014), *A Strategic Action Plan for National Transport Technology R&D*, The Korea Transport Institute, pp.1-5.
- Nahm, S.(2015), “Understanding effect sizes”, *Hanyang Medical Reviews*, vol. 35, pp.40-43.
- 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.
- 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.
- Ramezani, H., Shladover, S., Lu, X. and Chou, F.(2018), *Microsimulation framework to explore impact of truck platooning on traffic operation and energy consumption: Development and case study*, University of California, pp.22-35.
- Ryu, S., Choi, Y., Jeong, H., Kwon, B. and Yun, I.(2020), “A Study on the Determining Appropriate Truck and Commodity Types for V2X-based Truck Platooning”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 19, no. 2, pp.122-134.
- Safe Road Trains for the Environment(SARTRE) Project,

- <https://www.roadtraffic-technology.com/projects/the-sartre-project/>, 2021.10.15.
- Sethuraman, G., Liu, X., Bachmann, F., Xie, M., Ongel, A. and Busch, F.(2019), “Effects of bus platooning in an urban environment”, *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference(ITSC)*, pp.974-980.
- Statistics Korea(KOSTAT), https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1245, 2021.09.07.
- Tsugawa, S., Kato, S. and Aoki, K.(2011), “An automated truck platoon for energy saving”, *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4109-4114.
- Van Maarseveen, S.(2017). *Impacts of Truck Platooning at Motorway On-ramps: Analysis of traffic performance and safety effects of different platooning strategies and platoon configurations using microscopic simulation*, ITS Edulab, Delft, pp.2-8.
- Wang, M., Van Maarseveen, S., Happee, R., Tool, O. and Van Arem, B.(2019), “Benefits and risks of truck platooning on freeway operations near entrance ramp”, *Transportation Research Record*, vol. 2673, no. 8, pp.588-602.
- 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.