

메타분석을 통한 자율주행 도로교통시스템 기반기술 효과평가: CACC 시스템 및 군집주행을 중심으로

Effectiveness Evaluation of Core Technologies for Automated
Vehicle-Highway Systems Based on a Meta-analysis



윤석민



오철



주신혜



정은비

서론

최근 자동차 누적 등록대수가 약 1,940만대에 이르는 등 자동차 수요가 증가함에 따라 교통 혼잡 비용¹⁾이 크게 증가하고 있다(한국교통연구원, 2014). 2015년 교통 혼잡비용은 33조 4천억 원으로 GDP의 2.16%를 차지하였다. 이러한 비용 규모는 고속도로를 매년 약 887km, 인천국제공항 3.8개를 건설할 수 있는 정도이다. 또한 교통 혼잡이 많이 발생할수록 차량들 간의 급가속, 급제동이 많이 발생한다. 실제 완만 가속을 할 경우보다 급가속을 할 경우 44.3%의 연비저하를 보인다(교통안전공단, 2013). 또한 차량들의 연비저하

로 인해 오염물질의 배출 또한 증가하는 현상이 발생한다. 교통 혼잡으로 인한 문제를 해결하기 위해서는 부족한 도로시설을 공급하는 것이 가장 효과적일것으나, 현실적으로 교통량 증가에 비례해 새로운 도로를 신설하거나 확장하는 것은 어려운 일이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 자동차 첨단화 및 기존 인프라의 지능화를 통한 자율주행 교통시스템의 도입이 필요하다.

자율주행 도로교통시스템 기반기술은 자율주행 자동차와 도로간 연속적인 V2X²⁾기반 정보 교류를 통해 효율적인 자율주행이 가능하도록 하는 시스템이다. 따라서 차량에 자율주행 도로교통시스템 기반기술을 적용하여 도로용량을 증가시켜 교통 혼

윤석민 : 한양대학교 교통물류공학과, you921@hanyang.ac.kr, Phone: 031-400-4504, Fax: 031-436-8147

오 철 : 한양대학교 교통물류공학과, cheolo@hanyang.ac.kr, Phone: 031-400-5158, Fax: 031-436-8147

주신혜 : 한양대학교 교통물류공학과, noble0104@hanyang.ac.kr, Phone: 031-400-4503, Fax: 031-436-8147

정은비 : 한양대학교 공학기술연구소, jeb0120@hanyang.ac.kr, Phone: 031-400-4032, Fax: 031-436-8147

1) 자동차가 교통 혼잡으로 인해 서행하거나 서 있는 경우 추가로 발생하는 사회적 손실 비용

2) V2X = V2V(Vehicle to Vehicle) + V2I(Vehicle to Infrastructure)

잡의 문제를 해결 할 수 있고, 나아가 차량의 연비 개선을 통해 교통 환경성 측면의 개선이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 자율주행 도로교통시스템 기반기술 적용 시 교통 운영효율성과 환경성 측면에서 발생하는 효과를 메타분석(Meta-analysis)을 통하여 평가하고자 하였다.

교통 운영효율성의 평가지표로 용량, 교통 환경성의 평가지표로 연료 절감률을 설정하였으며, 메타분석을 위한 기존문헌 고찰 시 자율주행 도로교통시스템 기반기술 중 차량협력기반 순항제어장치(Cooperative adaptive cruise control: CACC) 시스템, 군집주행(Vehicle platooning: VP)에 관한 자료를 채택하였다.

채택한 연구들에서 산출된 효과는 승산비로 정리하였고, 연구들마다 서로 상이한 분석방법으로도 출된 결과 값들을 하나의 표준화된 지표로 평가하기 위하여 통합 효과크기를 산출하였다. 분석 결과를 바탕으로 기반기술 보급의 확대와 상용화를 위한 법·제도적 정비의 근거를 마련하고자 하였다.

본 연구의 구성은 그림 1과 같다. 2장에서는 자율주행 도로교통시스템 관한 정의를 제시하였다. 3장에서는 메타분석을 위한 문헌수집의 기준과 결과를 소개하였고, 4장에서는 메타분석의 방법론을 제시하였다. 5장에서는 효과적도에 따른 통합 효과크기를 도출하였다. 마지막 장에서는 결론 및 향후과제를 제시하였다.

자율주행 도로교통시스템

자율주행 도로교통시스템은 자동으로 종방향 및 횡방향의 주행이 가능한 첨단차량이 도로 인프라와 무선통신기반 연계를 통해 교통안전성 및 운영 효율성을 혁신적으로 증대시킬 수 있는 미래교통시스템이라고 정의할 수 있다. 이러한 교통시스템 중 제한된 조건에서 자율주행을 하기 위하여 필요한 기반기술인 CACC 시스템과 군집주행을 연구의 범위로 설정하였다. 또한 효과적인 교통 혼잡

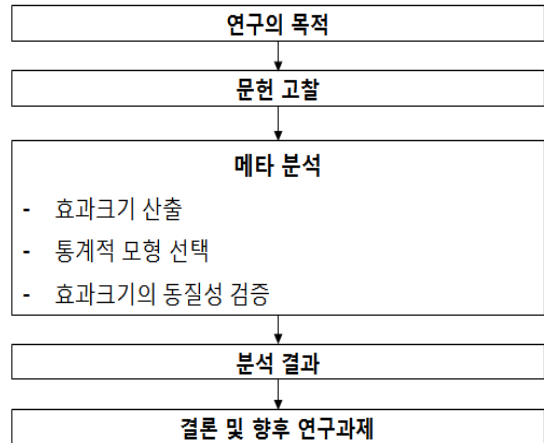


그림 1. 연구의 흐름도

감소와 교통 환경성 측면의 개선을 위해서는 자율주행 도로교통시스템을 기반으로 한 자율주행자동차의 도입이 필요하다. 따라서 본 장에서는 메타분석을 수행하기 앞서, 자율주행 자동차와 자율주행 도로교통시스템 기반기술 중 CACC 시스템, 군집주행에 대한 정의를 제시하였다.

1. 자율주행 도로교통시스템 기반기술

미국 도로교통안전청은 자율주행단계를 5단계로 구분하고 있다(NHTSA, 2013). 0단계는 운전자가 모든 제어를 하는 단계이고 1단계는 종·횡방향 중 한 방향을 제어하는 기능을 수반하는 단계이다. 관련 기술로는 차량의 움직임을 안정적으로 제어해주는 차체자세 제어장치, 선행차량과의 간격과 속도를 제어하는 적응형순항제어장치 등이 있다. 2단계는 운전자 감시상태에서 2개 이상의 제어 기능이 작동하는 단계이다. 그 예로 ACC 시스템과 차선유지 지원시스템이 결합하여 고속도로 주행 시 차량과 차선을 인식해 앞차와의 간격을 유지하고 자동으로 조향할 수 있다. 3단계는 조건부 완전 자율주행으로 특정 교통상황에서 자동차가 모든 기능을 제어하는 단계로 구글에서 개발한 자율주행자동차가 여기에 해당한다. 4단계는 완전 자율주행으로 모든 상황에서 자율주행을 하는 단

계이다.

본 연구에서는 자율주행 1단계 기술 중 하나인 ACC 시스템의 발전된 형태로 차량 센서와 V2X 통신을 이용하여 차량을 제어하는 기술인 CACC 시스템과 군집주행을 통하여 효과를 분석한 연구들을 수집하였다.

1) CACC 시스템

CACC 시스템은 적응형순항제어장치(Adaptive cruise control : ACC) 시스템에 V2V나 V2X 통신을 결합하여 앞차와의 거리와 속도를 제어하는 시스템이다. ACC 시스템은 차량 앞쪽에 레이더나 라이다(LIDAR)³⁾를 장착하여 선행차량과의 간격과 속도를 제어하는 시스템이다. 기존 ACC 시스템은 선행차량의 속도변화에 따라 차량 간격과 속도를 조절하는 방식이지만, CACC 시스템은 실시간 무선 통신을 통한 정보 교환으로 선행차량의 속도변화의 정보를 활용한 실시간 제어가 가능하다. CACC 시스템 도입 시 ACC 시스템과 더불어 동일한 도로 용량에서 교통 혼잡을 큰 폭으로 감소시킬 수 있다. 또한 전방의 위험요인에 보다 능동적인 대응이 가능하여 교통사고 예방에도 기여할 수 있다.

2) 군집주행

군집주행은 차량들을 하나의 군으로 설정하고 센서와V2V통신을 기반으로 차량 군내의 차량들의 간격과 속도를 제어하는 주행행태이다. 장거리 이동을 하려는 차량이 이미 군집주행을 하고 있는 차량 대열에 군집주행 요청을 하면, 선행 차량이 허용 여부를 결정한다. 이 후 군집 차량 대열에 합류하게 되면 운전자는 직접 운전하지 않고 군집 내에서 주행이 가능하다. 이미 유럽의 샤프트르 프로젝트에서는 50만km를 주행하여 효과를 검증하였고 5-10년 내 상용화가 가능할 것으로 전망했다. (SARTRE-Project, 2014).

문헌 수집 및 고찰

1. 문헌 수집 및 선정

메타분석은 두 개 이상의 개별적인 연구결과들을 종합하여 하나의 효과크기로 통합하는 방법이다. 메타분석을 수행하기 위해서는 통합하고자 하는 연구주제와 관련된 선행 연구들의 수가 충분하여야 한다(Kang, 2015). 자율주행 도로교통시스템 기반기술과 관련된 기존 문헌 수집 결과 CACC 시스템과 군집주행과 관련된 연구가 주로 수행되었으며 타 기술관련 연구는 미비하였다.

따라서 본 연구에서는 자율주행 도로교통시스템 구성요소 중 CACC 시스템, 군집주행을 통하여 교통 운영효율성 및 환경성 효과를 평가한 연구들을 수집하였다. 수집된 문헌들 중 CACC 시스템을 사용한 연구는 종방향만을 제어하는 연구로 한정하였다. 또한 다른 외부요인이 연구결과에 미치는 요인을 배제하기 위하여 CACC 시스템 및 군집주행 기술을 각각 적용한 실험군과 적용하지 않은 대조군을 비교·분석한 논문을 선정하였다. 이를 통하여 CACC 시스템 및 군집주행 기술만의 효과를 분석한 연구들을 분석에 활용하였다.

각 연구 별 결과 값 비교를 위한 통계량은 승산비(Odds ratio)로 정리하였다. 승산비란 비교대상간의 관계를 수량화한 값으로, 1을 기준으로 승산비의 값이 1보다 크면 자율주행 도로교통시스템 적용 유무와 그에 따른 효과와의 관계가 양의 관계로 해석할 수 있다. 또한 승산비의 값이 1보다 작으면 음의 관계로 해석한다. 예를 들어 자율주행 도로교통시스템 적용 시 용량증가에 대한 승산비 값이 1.63으로 분석되면 자율주행 도로교통시스템 적용 시 용량이 63% 증가한다고 해석할 수 있다.

국내 논문은 한국교육학술정보원 학술연구정보서비스(RISS), 한국학술정보(KISS), 누리미디어(DBPIA) 등을 검색하여 연구재단 등재 학술지

3) 레이저 펄스를 쏘아 반사되어 돌아오는 시간을 측정하여 반사체와의 거리를 측정하는 장치

에 게재된 논문을 선정하였다. 국외 논문은 SCI(E) (Science citation index (expanded) : SEC(E)) 저널의 학술지 및 기관보고서를 선정하였다. 자료 수집 결과 자율주행 도로교통시스템 구성요소 중 CACC 시스템과 군집주행과 관련된 총 17건의 논문과 11건의 보고서가 채택되었고 이에 따른 연구 결과는 총 93건으로 수집되었다.

교통 운영효율성, 환경성측면에서 자율주행 도로교통시스템 적용 시 나타나는 효과를 종속변수 별로 구분하였고, 수집된 연구들의 기준 별 수집건수와 저널 별 수집건수를 정리하였다. 교통 운영효율성측면의 종속변수로는 용량, 차두 간격으로 구분하였고 교통 환경성측면의 종속변수는 연료 절감률로 선정하였다. 한편, 교통안전성 측면의 효과를 분석한 기존 연구들은 ACC 시스템에 국한되어 있어서 본 연구의 메타분석 대상에서 제외하였다.

2. 문헌 고찰

교통 운영효율성과 환경성측면의 연구들을 본 연구의 최종 분석 자료로 활용하였다. 자율주행 도로교통시스템 적용 시 차두 간격의 단축으로 도로 용량의 증가를 통한 교통 혼잡 해소가 가능할 것으로 판단하여 교통 운영효율성측면의 효과분석 척도를 용량으로 채택하였다. 또한 차두 간격의 단축으로 주행 시 불필요한 가감속이 줄어들어 연료 소모량을 줄일 수 있고, 연료 절감을 통하여 교통 환

경성측면의 개선이 가능하여 교통 환경성측면의 효과분석 척도는 연료 절감률로 설정하였다. 종속 변수로 용량, 연료절감률을 사용한 16건의 논문과 11건의 보고서를 채택하였고, 이에 따른 연구 결과는 91건으로 선정되었다.

또한 총 91건의 연구 중 저널 별 수집건수를 살펴보면 SCI(E)저널의 논문의 연구가 37건, 보고서가 38건으로 전체 수집건수의 82%를 차지하였다. 연도 별로 살펴보면, 2000년도 이전의 연구건수는 20건, 이후의 연구건수는 71건으로 최근 15년간의 연구 건수가 더 많은 것으로 나타났다. 또한 시뮬레이션을 통하여 실험한 연구가 81건으로 대부분의 연구가 시뮬레이션을 사용하였다. 자료 수집 결과는 그림 2에 제시하였다.

분석 방법론

1. 메타분석의 정의

메타분석은 기존연구를 분석하는 방법 중 하나로 두 개 이상의 개별적인 연구들의 결과들을 통합하는 방법이다. 즉, 기존 연구들에서 제시된 결과들을 하나의 정량적인 값으로 통합하여 효과 및 효율성을 평가하기 위해 사용되는 통계적 기법이다 (Kang, 2015). 1970년대 중반 교육심리학에서 시작된 이후 다양한 학문 분야에서 널리 이용되고 있다.

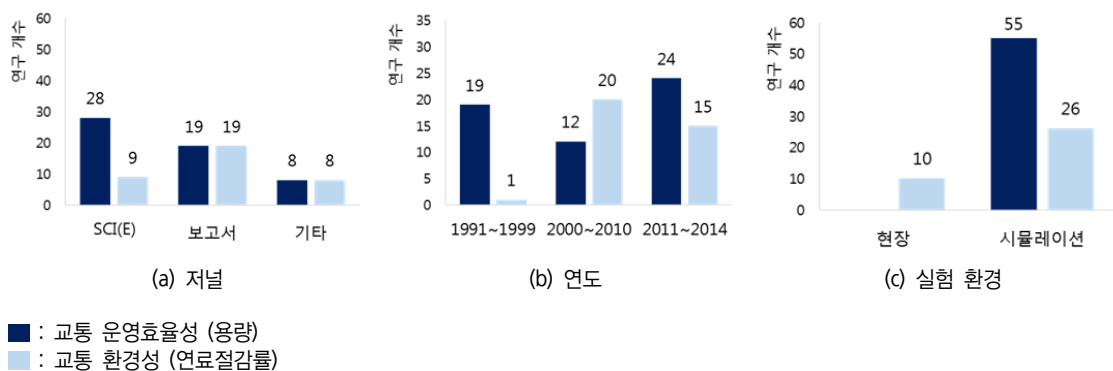


그림 2. 최종 수집 문헌 특성

메타분석의 장점은 실험환경에 차이가 있는 독립적인 연구들을 종합하여 일반화 할 수 있고, 동일 연구주제 하에서 많은 연구결과를 체계적으로 통합하여 일반화된 신뢰성 높은 효과 추정치를 얻을 수 있다(Jin, 2014).

메타분석은 연구목적에 맞는 선행연구결과를 수집하고 연구결과를 바탕으로 표준화된 하나의 효과크기를 산출하여 분석할 수 있다.

2. 메타분석의 절차

메타분석은 우선 구체적인 연구문제를 설정하여, 연구 목적에 맞는 논문, 보고서를 수집한다. 수집한 연구들의 결과를 개별 효과크기로 도출하고, 연구들 간의 이질성 여부에 따라 통계적 모형을 선택한다. 채택된 통계적 모형을 사용하여 메타분석을 실시하고 산출된 개별 효과크기를 하나의 통합 효과크기로 도출한다. 마지막으로 동질성 검증을 시행하여 효과크기가 동질성을 가지는지 판단한다.

1) 통계적 모형선택

메타분석에서 각 연구의 효과크기들을 결합하여 통합 효과크기를 추정하기 위해서는 통계적 모형이 필요하고, 통계적 모형은 고정효과모형(Fixed effect model)과 랜덤효과모형(Random effect model)으로 구분된다. 우선 고정효과모형은 각 연구들의 효과크기는 같은 모집단에서 얻어졌다는 가정으로 분석하는 통계모형이다. 또한 각 연구 결과가 서로 조금씩 다른 이유는 표본추출에서 생기는 표준편차가 원인이라고 가정한다. 따라서 고정효과모형은 연구 내 분산만을 고려하기 때문에 모형으로 도출된 통합 효과크기는 분석에 사용된 연구들의 한정하여 설명이 가능하다(Jin, 2014).

랜덤효과모형은 개별 연구마다 동일한 조건에서 가질 수 있는 효과크기가 하나씩 존재한다고 가정으로 분석하는 통계모형이다. 동일한 연구문제를 일반화하여 연구 간의 이질성을 고려하여 연구 내

분산뿐만 아니라 연구 간 분산을 추가적으로 고려한다.

본 연구에서는 수집한 연구들 간의 이질성이 존재함을 가정하여 랜덤효과모형을 사용하였다.

2) 효과크기 산출

효과크기란 동일한 주제를 대상으로 수행된 연구들의 결과를 비교, 통합할 수 있도록 하는 표준화된 지표이다. 즉, 서로 다른 분석방법으로 도출된 결과 값들을 표준화하여 공통된 단위로 만든 값이다(Jin, 2014). 효과크기가 0이라는 것은 개별 연구들 사이에 차이가 없다는 것을 뜻한다. 효과크기를 표현하는 방식은 각각의 연구들의 결과에 따라 여러 가지 방식이 존재한다. 첫째, Cohen's d와 Glass's Δ 로 계산되는 두 집단 간 평균의 차이를 표준화한 효과크기가 있다. Cohen's d는 두 집단 평균의 차이를 표준화하기 위해 두 집단의 표준 편차를 고려(Cohen, 1977)하는 반면에, Glass's Δ 는 두 집단의 차이를 대조군의 표준 편차로 나눈다는 점(Glass, 1976)이 차이가 있다.

둘째, Pearson's r로 사용되는 두 변수 간 표준화된 관련의 정도인 효과크기가 있다. Pearson's r의 효과크기는 분산의 분포의 크기에 영향을 많이 받아 Fisher's z(Z_f)으로 표준화 한 효과크기를 사용해야 한다.

마지막으로 이분형 변수를 사용한 승산비(Odds ratio)와 상대위험비(Risk ratio)가 있다. 개별 연구의 결과가 실험군과 대조군의 수치를 비교하는 자료로 제시 될 때 사용한다.

본 연구에서는 평가지표로 선정된 용량 및 연료 절감률을 효과적으로 한 연구 결과들을 승산비로 제시하였다. 또한 앞서 가정한 랜덤효과모형을 통하여 승산비로 정리된 연구 결과들을 표준화한 효과크기로 산출하였다.

3) 승산비의 통합 효과크기 산출

교통 운영효율성 평가지표인 용량과 교통 환경성 평가지표인 연료 절감률로 구분하여 승산비의

연구	승산비 (OR)	표준화된 상관계수 (r)	가중치 ($\frac{1}{SD}$)	상관계수의 통합 효과크기 (ES_r)	승산비의 통합 효과크기 (ES_{OR})
1	1.2	0.04	4.47	0.18	1.07
2	1.5	0.10	3.46	0.34	1.48
3	1.6	0.11	5.47	0.60	1.56
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

$$r^* = \frac{OR^{\frac{1}{2}} - 1}{OR^{\frac{1}{2}} + 1}$$

$$ES_{r^*} = r \times \frac{1}{SD}$$

$$ES_{OR^*} = \left(\frac{1 + ES_{r^*}}{1 - ES_{r^*}}\right)^2$$

그림 3. 승산비를 통한 통합 효과크기 산출 과정

효과크기로 산출된 개별 효과크기들을 승산비의 통합 효과크기로 변환하여 최종적인 결과를 분석하였다. 승산비의 통합 효과크기를 산출하기 위해서는 우선 승산비로 제시된 각 연구의 결과들을 표준화된 상관계수로 변환하였다. 표준화된 상관계수 변환 식은 식(1)와 같다(Bonnett, D. G, 2007).

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

여기서, r : 표준화된 상관계수
 OR (Odds ratio) : 승산비

위 식에서 도출된 표준화된 상관계수와 가중치를 적용한 통합 효과크기를 산출한다. 가중치와 상관계수 통합 효과크기 산출 식은 식(2)와 같다(Hedges, L. V et al., 1985).

$$w = \frac{1}{STD^2} \quad (2)$$

$$ES_r = \frac{1}{STD^2} \times r$$

여기서, w : 가중치
 STD : 표준편차
 ES_r : 통합 상관계수 효과크기
 r : 표준화된 상관계수

마지막으로 상관계수로 나타난 통합 효과크기를 승산비를 통한 통합 효과크기로 변환하였다. 통합 승산비 효과크기 변환 식은 식(3)과 같다(Bonnett, D. G, 2007).

$$ES_{OR} = \left(\frac{1 + ES_r}{1 - ES_r}\right)^2 \quad (3)$$

여기서, ES_{OR} : 통합 승산비 효과크기
 ES_r : 통합 상관계수 효과크기

통합 효과크기 산출 시 가중치를 적용한 이유는 각각의 연구마다 표본의 크기, 연구의 가정, 실험 환경 등이 다르기 때문에 가중치를 적용하여 연구 결과의 신뢰성을 높이기 위함이다. 가중치는 대개 표본 수의 크기에 따라 달라진다. 표본의 수가 작은 연구들은 대규모의 연구에 비해 우연에 의한 영향을 더 많이 받을 수 있기 때문에, 대규모 연구에 대하여 상대적으로 더 많은 가중치를 부여한다(Kang, 2015).

본 연구에서는 그림 3과 같이 연구들 간의 이질성을 가정한 랜덤효과모형을 이용하여 개별 연구들의 표준화된 상관계수로 계산된 효과크기를 도출하였다. 이를 가중치를 활용하여 표준화된 상관계수로 나타낸 통합 효과크기를 산출하였고, 최종적으로 승산비를 통한 통합 효과크기로 변환하여 결과를 해석하였다.

4) 효과크기의 동질성 검증

메타분석을 위해 수집된 개별 연구 별 연구의 대상, 가정, 조건 등이 다르기 때문에 개별 연구 간의 효과크기 이질성이 존재 할 수 있다. 따라서 개별 연구들로부터 도출된 효과크기의 신뢰성을 보장하기 위해 개별 효과크기들 간의 동질성 검증이 필요하다(Jang et al., 2011).

동질성 검증 결과 개별 연 별 효과크기의 이질성이 있는 경우 랜덤효과모형을 채택해서 분석하여야 하고 이질성이 없는 경우는 고정효과모형을 활용한다. 동질성 검증을 위해 주로 사용되는 방법은 Cochran's Q와 Higgin's I²가 있다. Cochran's Q는 메타분석에 사용된 연구의 수가 적을 때는 매우 낮은 검증력을 가지고 분석에 포함된 연구의 수가 많아지면 지나치게 높은 검증력을 가지므로 해석에 주의해야 한다. Cochran's Q의 식은 식(4)와 같다.

$$Q = \sum_{i=1}^n (ES_i - \overline{ES})^2 \times w_i \quad (4)$$

여기서, Q : χ^2 통계량
 ES_i : 개별 연구의 효과크기
 \overline{ES} : 통합 효과크기
 w_i : 개별 효과크기 분산의 역수

Higgin's I²는 분석에 포함된 연구들의 수에 영향을 받지 않는 통계값으로 계산된다. 해석하는 방법은 I²이 25%보다 낮으면 낮은 이질성, 50%이면 중간 정도의 이질성, 그리고 75%이상이면 높은 이질성을 가진 것으로 해석한다(Higgins et al., 2003). Higgin's I²의 식은 식(5)과 같다.

$$I^2 = \frac{Q - df}{Q} \times 100 \quad (5)$$

여기서, Q : χ^2 통계량
 df : χ^2 통계량의 자유도

앞서 승산비를 통한 통합 효과크기 산출 시 수집한 연구들 간의 이질성의 존재함을 가정한 부분은 I²값을 이용하여 연구들 간의 동질성 여부를 판단하였다.

분석 결과

교통 운영효율성 측면의 효과척도인 용량과 교통 환경성 측면의 효과척도인 연료 절감률을 종속변수로 구분하여, 각각의 통합 승산비 효과크기를 분석하였다. 통합 승산비 효과크기 산출 시 개별

연구들 간의 이질성이 존재함을 가정하였고, 랜덤효과모형을 사용하여 효과크기를 산출하였다. 앞서 가정한 수집한 연구들 간의 이질성 존재 여부는 동질성 검정을 통하여 판단하였다. 또한 메타 회귀 분석 시 랜덤효과 회귀모형을 사용하여 연구들의 특성들이 종속변수들의 효과크기에 미치는 영향을 도출하였다.

1. 통합 효과분석

1) 교통 운영효율성 통합 효과분석

교통 운영효율성 측면의 효과크기 분석 결과, 승산비의 효과크기는 1.24로 분석되어 CACC 시스템의 적용과 군집주행 시 용량이 24% 증가 하는 것으로 도출되었다. 또한 관련성 검정을 통한 유의확률은 z=1.98(p<0.04)으로 나타나 CACC 시스템과 군집주행을 적용한 실험집단과 통제집단의 관련의 정도는 유의하다고 분석되었다.

Cochran's Q 방법을 이용하여 효과크기의 동질성 검증 결과, χ^2 은 1.03이고 유의확률 p=1.00 (p>0.05)으로 연구들 간 효과크기에 서로 차이가 없는 것으로 분석되었다. 그러나 χ^2 은 분석에 포함된 연구의 수가 많을수록 지나치게 높은 값을 나타내므로 Higgin's I² 방법을 고려해야 한다. Higgin's I² 방법 역시 I²의 값이 0.00%로 나타나 연구들 간 낮은 이질성을 가진 것으로 해석되었다. 또한 앞서 수집된 연구들 간의 이질성이 존재함을 가정하였고, 랜덤효과모형을 사용하여 도출한 효과크기 값이 타당함을 입증하였다. 교통 운영효율성 측면의 효과크기 분석 결과는 표 1에 제시하였다.

2) 교통 환경성 통합 효과분석

교통 환경성 측면에서는, 승산비의 효과크기가 1.23으로 도출되어 CACC 시스템과 군집주행 적용 시 연료 절감률이 23% 증가 하는 것으로 분석되었다. 또한 CACC 시스템과 군집주행을 적용한

표 1. 교통 운영효율성 측면의 통합 효과크기

효과척도	통합 효과크기	95% 신뢰구간		χ^2	I^2 (%)	유의성 검증
		하한값	상한값			
용량	1.24	0.97	1.59	1.03 (p=1.00)	0.00	z=1.98 (p=0.04)

표 2. 교통 환경성 측면의 통합 효과크기

효과척도	통합 효과크기	95% 신뢰구간		χ^2	I^2 (%)	유의성 검증
		하한값	상한값			
연료 절감률	1.23	0.92	1.69	0.53 (p=1.00)	0.00	z=2.02 (p=0.03)

실험집단과 통제집단의 관련의 정도를 판단하기 위한 유의확률은 $z=2.02(p<0.03)$ 로 두 집단 간 관련의 정도는 유의하다고 나타났다. 효과크기의 동질성 검정 결과, χ^2 은 0.53이고 유의확률 $p=1.00(p>0.05)$ 로 연구들 사이의 효과크기가 서로 차이가 없는 것으로 도출되었다. Higgin's I^2 방법을 이용하여 동질성 검정을 한 결과 I^2 값이 12.1%로 분석되어 각 연구들은 낮은 이질성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 앞서 가정한 수집한 연구들 간의 이질성 존재함이 적절한 것으로 증명되었다. 교통 환경성 측면의 효과크기 분석 결과는 표 2에 제시하였다.

결론

자동차 수요의 증가로 교통 혼잡비용이 크게 상승하고 있고, 교통 혼잡으로 인해 차량 간의 급가속, 급제동이 많이 발생하여 연비저하, 오염물질 배출 증가의 문제점이 발생되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자동차의 첨단화 및 기존 인프라의 지능화를 통한 자율주행 교통시스템 도입이 필요하다. 따라서 본 연구는 메타분석 기법을 통해 자율주행 도로교통시스템 기반기술 적용 시 교통 운영효율성 측면의 효과척도인 용량과 환경성 측면의 효과척도인 연료 절감률의 효과를 승산비 효과크기를 통해 분석하였다. 자율주행 도로교통시스템 기반기술 중 기존 문헌 고찰 시 CACC 시스

템과 군집주행과 관련된 연구가 주로 수행되어 자율주행 도로교통시스템 기반기술은 CACC 시스템과 군집주행으로 한정하였다.

자료 수집은 자율주행 도로교통시스템 구성요소 중 CACC 시스템과 군집주행을 통하여 교통 운영 효율성의 평가지표인 용량 및 교통 환경성의 평가 지표인 연료 절감률의 효과를 평가한 연구들을 수집하였다. 즉 CACC 시스템 및 군집주행을 통하여 분석한 연구들을 용량 및 연료 절감률로 구분하여 연구의 결과들을 통합하였다.

종속변수로 용량, 연료절감률로 설정하고 실험 집단과 통제집단이 있는 논문으로 한정하였다. 또한 국내 논문은 학술지에 게재된 논문, 국외 논문은 SCI(E)급 저널의 학술지 및 기관보고서를 선정하여 총 91건의 연구결과를 수집하였다.

각 연구결과는 용량 및 연료 절감률에 따라 승산비로 나타내었고, 랜덤효과모형으로 통합 승산비 효과크기를 도출하여 비교-분석하였다. 또한 앞서 수집한 연구들 간의 이질성이 존재함을 가정하여 랜덤효과모형을 사용하였고 연구들 간의 이질성 존재 여부는 동질성 검정을 통하여 판단하였다.

교통 운영효율성 측면에서는 통합 승산비 효과크기가 1.24로 분석되어 CACC 시스템과 군집주행 적용 시 용량이 24% 증가하는 것으로 도출되었고, 환경성 측면에서는 통합 승산비 효과크기가 1.23으로 분석되어 연료 절감률이 23% 증가하는 것으로 분석되었다.

그러나 본 연구에서 선정한 연구들의 결과를 현실에 적용하기 위해서는 몇 가지 이슈들의 해결이 필요하다. 첫째, 대부분의 연구들이 시뮬레이션 실험을 통한 자율주행 도로교통시스템 기반기술의 효과 평가가 대부분이다. 아직 완전한 자율주행을 위한 도로교통시스템 기반기술이 상용화되지 않았고 자율주행자동차의 개발도 진행단계이지만, 가상 시뮬레이션 주행 실험의 효과를 현실 도로에 적용하여 판단하기는 어렵다. 따라서 앞으로의 자율주행 도로교통시스템 기반기술의 연구방향은 시뮬레이션 실험의 결과를 토대로 실제 도로에서 자율주행자동차에 적용하여 분석하는 방향으로 연구가 진행되어야 한다. 이를 위해서는 우선 자율주행차량의 도로 시범 운행이 가능한 허가 요건과 자율주행자동차의 성능 및 안전기준 연구를 위한 테스트 베드 구축이 필요하다.

둘째, 본 연구에서는 자율주행 도로교통시스템 기반기술에 대한 교통 운영효율성과 환경성측면의 효과를 평가하였다. 그러나 자율주행에서 가장 우선시 되어야 할 요소는 바로 교통 안전성 부분이다. 또한 자율주행 도로교통시스템 도입에 따른 교통 안전성측면의 연구들은 ACC 시스템 적용에 따른 효과 분석이 대부분인 것으로 확인되었다. 따라서 향후 연구에서는 CACC 시스템과 군집주행을 통한 자율주행 교통 안전성측면의 연구가 더 필요하다.

셋째, 채택된 연구들은 자율주행 도로교통시스템 중 개별 기술에 대한 효과분석이 대다수였다. 자율주행기반 교통시스템 기반기술을 장착한 자율주행자동차의 개발과 상용화를 위해서는 자동차 스스로 도로교통 상황 및 주변 정보를 수집하여 상황을 판단하고 제어하는 통합 기술에 대한 연구가 필요하다. 또한 이를 위하여 자동차가 주변 정보를 인식할 수 있는 센서 성능에 대한 연구도 진행되어야 한다.

넷째, 자율주행은 자율주행자동차만으로 이루어지지 않으므로 자율주행자동차를 지원하는 도로교

통시스템 기반기술과 도로인프라의 연계가 필요하다. 자율주행자동차에 장착된 자율주행 도로교통시스템 적용기술의 처리 범위는 한계가 있고, 자동차 기술만으로 자율주행 시 고가의 시스템 비용으로 자동차 가격이 상승되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 자율주행자동차와 도로교통시스템 기반기술 간의 실시간 정보 교류, 주변 교통상황 정보 수집이 가능한 도로인프라의 구축이 필요하다.

다섯째, 자동차에 장착되는 자율주행 도로교통시스템 기반기술의 한계를 극복해야 한다. CACC 시스템이나 군집주행의 경우 차량이 끼어들기를 할 경우 일정 차두 간격을 유지하기 위해 차량들 간의 급정거 현상이 나타나 사고의 위험성이 높아질 수 있다. 또한 자율주행 도로시스템은 사용 온도 조건, 오작동 등의 문제점이 발생할 수 있다. 가장 큰 문제는 전자기기들은 오작동 시 리셋을 시켜 다시 작동시킬 수 있으나 자동차는 시스템 오류 발생 시 사람의 생명에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 자율주행 도로교통시스템 기반기술은 충분한 실험을 통하여 시스템 결함이나 오류를 완전히 제거하여 완전한 기술로 자동차의 제어가 필요하다. 또한 이러한 기술의 개선을 통하여 사람들이 자율주행 도로교통시스템의 기반기술을 신뢰할 수 있도록 해야 한다.

마지막으로 CACC 시스템에 사용되고 있는 무선통신기술의 오류 가능성을 최소화해야 한다. 무선통신은 통신지연이나 데이터 손실등과 같은 오류의 가능성을 항상 내포하고 있기 때문에 통신 오류가 발생하게 되면 자율주행을 해제하고 운전자에게 조작을 맡기는 등의 대책이 필요하다.

본 연구의 결과는 자율주행 도로교통시스템 기반기술의 상용화와 교통사고 시 관련 법 정비 및 제도 개선을 유도하고 자율주행 시 필요한 기술개발을 지원하는 근거를 마련하는데 의의가 있다. 또한 신뢰성 있고 안전한 완전 자율주행을 위해서는 앞서 언급한 이슈들의 해결을 위한 다각적인 노력이 필요할 것이다.

참고 문헌

- Alam, A. (2014), Fuel-efficient heavy-duty vehicle platooning, KTH Electrical Engineering.
- Alam, A. A., Gattami, A., Johansson, K. H. (2010), An experimental study on the fuel reduction potential of heavy duty vehicle platooning, Intelligent Transportation System, 13th International IEEE Conference on, pp.306-311.
- Amoozadeh, M., Deng, H., Chuah, C. N., Zhang, H. M., Ghosal, D. (2015), platooning management with cooperative adaptive cruise control enabled by VANET, Vehicular Communications, Vol.2. No.2, pp.110-123.
- Barth, M., Younglove, T., Scora, G. (2005), Development of a heavy-duty diesel modal emissions and fuel consumption model, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH).
- Barth, M. (2000), An emissions and energy comparison between a simulated automated highway system and current traffic conditions, Intelligent Transportation System, IEEE, pp.358-363.
- Baoqin, H. (2009), Research on Automotive Aerodynamic Characteristics of platooning, Ph.D. Thesis of Jinlin University.
- Benmimoun, M., Pütz, A., Zlocki, A., Eckstein, L. (2012), Effects of acc and fcw on speed, fuel consumption, and driving safety, Vehicular Technology Conference, pp.1-6.
- Bonett, D. G. (2007). Transforming odds ratios into correlations for meta-analytic research, American Psychological Association, Vol.62, No.3, pp254-255.
- Bonnet, C., Fritz, H. (2000), Fuel consumption reduction experienced by two promote-CHAUFFEUR trucks in electronic towbar operation, World Congress on IST Systems, Torino, Italy.
- Broucke, M., Varaiya, P. (1997), The automated highway system: A transportation technology for the 21st century, Control engineering practice, Vol.5, No.11, pp.1583-1590.
- Browand, F., McArthur, J., Radovich, C. (2004), Fuel saving achieved in the field test of two tandem trucks, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH).
- Browand, F., Michaelian, M. (2000), platooning TRAVEL SAVES FUEL—HOW MUCH?, Intellimotion, Vol.9, No.2.
- California Department of Motor Vehicles, (2015), Autonomous Vehicles Express Trens, 3.7(1)
- Chira-Chavala, T., Yoo, S. M. (1994), Potential safety benefits of intelligent cruise control systems, Accident Analysis & Prevention, Vol.26, No.2, pp135-146.
- Fernandes, P., Nunes, U. (2010), platooning of autonomous vehicles with intervehicle communications in SUMO traffic simulator, Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference on, pp.1313-1318.
- Glass, G. V. (1976), Primary, secondary

- and meta-analysis of research, Educational researcher, pp.3-8.
- Hansson, K. (2013), Data-Driven Analysis of the Fuel Saving Potential of Road Vehicle platooning, KTH Computer Science and Communication.
- Hedges, L. V., Olkin, I. (1985), Statistical Methods for Meta-analysis, Academic press.
- Higgins, J. P., Thompson, S. G., Deeks, J. J., Altman, D. G., (2003), e, British Medical Journal, Vol.327, pp.557-560.
- Hitchcock, A. (1995), Intelligent vehicle/highway system safety: multiple collisions in automated highway systems, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH).
- National Automated Highway System Consortium. (1997), Automated Highway System(AHS), 4.1(7-9).
- Jang, D. H., Shin, I. S. (2011), A study of development process of Meta-analysis in pedagogy method of study, Journal of Curriculum and Evaluation, Vol.14, No.3, pp.309-332.
- Jin, Y. A. (2015), Meta-analysis using Stata, Korea university press, 13.
- Kanaris, A., Ioannou, P., Ho, F. S. (1997), Spacing and capacity evaluations for different AHS concepts (pp. 125-171). Springer US.
- Kang, H. (2015), Staistical Considerations in Meta-Analysis, Hanyang Med Rev, Vol.35, pp.22-32.
- Kim, J. D., Kyun, K. K., Lee, S. I. (2012), Trends and Applications on Lidar Sensor Technology, ETRI Electronics and Telecommunications Trends.
- Korea Transportation Safety Authority, <http://blog.naver.com/autolog/10165044183>, 2015.07.30.
- Lang, D., Stanger, T., Schmied, R., del Re, L. (2014), Predictive Cooperative Adaptive Cruise Control: Fuel Consumption Benefits and Implementability, Optimization and Optimal Control in Automotive Systems, Springer International Publishing, pp. 163-178.
- Liang, C. Y., Peng, H. (2000), String Stability Analysis of Adaptive Cruise Controlled Vehicles, JSME International Journal Series C, Vol.43, No.3, pp.671-677.
- Michaelian, M., Browand, F. (2001), Quantifying platooning fuel savings: 1999 field experiments, SAE Technical Paper.
- National Highway Traffic Safety Administration (2013), "Preliminary statement of policy concerning automated vehicles", Washington, DC.
- Plenum Press, New York, (1997), "Automated Highway Systems", 11-26.
- Rajamani, R., Shladover, S. E. (2001), An experimental comparative study of autonomous and cooperative vehicle-follower control systems, Transportation Research Part C: Emerging Technologies Vol.9, No.1, pp.15-31.
- Rudin-Brown, C. M., Parker, H. A. (2004), Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): implications for preventive strategies, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Vol.7, No.2, pp.59-76.
- Safe Road Trains for the Environment

- (SARTRE), <http://www.sartre-project.eu/en/Sidor/default.aspx>, 2015.08.31
- Shladover, S. E., Nowakowski, C., Lu, X. Y. (2014), Using Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) to Form High-Performance Vehicle streams, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH).
- Shladover, S., Su, D., Lu, X. Y. (2012), Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.2324, pp.63-70.
- The Korea Transport Institute (2014), "Prediction for Traffic congestion costs in 2015", 1.
- Thomopoulos, N., & Givoni, M. (2015), ICT for Transport: Opportunities and Threats, Edward Elgar Publishing, pp.161-173
- Tsugawa, S. (2014), Results and issues of an automated truck platooning within the energy ITS project, Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, IEEE pp. 642-647.
- Tsugawa, S., Kato, S., Aoki, K. (2011), An Automated Truck platooning for Energy Saving, Intelligent Robots and System(IROS), IEEE/RSJ International Conference on, pp.4109-4114.
- Zabat, M. A., Stabile, N. S., Browand, F. K. (1995), Estimates of fuel savings from platooning, Intelligent Transportation: Serving the User Through Deployment, Proceedings of the 1995 Annual Meeting of ITS America.
- Zhang, J., Ioannou, P. (2004), Control of heavy-duty trucks: environmental and fuel economy considerations, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH).
- Zhao, J., Zhao, R., Wang, G., Zhang, X. (2013), Analysis of fuel economy of autonomous vehicle platooning, ICTE 2013@ Safety, Speediness, Intelligence, Low-Carbon, Innovation, ASCE pp.980-986.
- Zhao, L., Sun, J. (2013), Simulation Framework for Vehicle platooning and Car-following Behaviors Under Connected-vehicle Environment, Procedia-Social and Behavioral Sciences, Vol.96, pp.914-924.