

논문

실도로 운행데이터 기반 경제운전의 기후환경 편익 정량 평가

Quantitative Evaluation of the Climate and Air Quality Benefits of Eco-Driving Using Real-World Driving Data

이규진*

아주대학교 TOD기반 지속가능도시교통연구센터

Kyu-Jin Lee*

TOD-based Sustainable Urban/Transportation Research Center, Ajou University,
Suwon, Republic of Korea

접수일 2025년 8월 27일
수정일 2025년 9월 25일
채택일 2025년 9월 26일

Received 27 August 2025
Revised 25 September 2025
Accepted 26 September 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-219-2541
E-mail : transjin2970@gmail.com

Abstract This study empirically evaluates the environmental benefits of eco-driving using high-resolution real-world driving data from passenger cars, buses, and light-duty trucks. One-second trajectory data (GPS and DTG: Digital TachoGraph) were analyzed with the Vehicle Specific Power (VSP)-based MOVES emission model, coupled with standardized social cost unit values. A government-certified eco-driving index was applied to quantify the link between driving behavior and reductions in climate and air-quality-related costs. The analysis shows that eco-driving reduces combined climate and air pollution costs by approximately 11~14%, with particularly large benefits observed for commercial vehicles such as buses and freight trucks. Moreover, the private benefit of fuel savings was found to exceed the social and environmental benefit by up to 4.7 times, indicating that policies emphasizing personal economic incentives may be more effective than relying solely on environmental appeals. By integrating high-resolution empirical data with internationally validated emission models, this study provides robust scientific evidence of the environmental effectiveness of eco-driving. The findings offer a practical basis for designing data-driven and targeted transportation-environment policies.

Key words: Eco-driving, Vehicle Specific Power (VSP), MOVES emission model, Air environmental cost, Transportation behavior policy

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

수송 부문은 온실가스(Greenhouse Gas, GHG)와 미세먼지(PM_{2.5}), 질소산화물(NO_x) 등 인체 유해 대기오염물질의 주요 배출원으로 알려져 있다. 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)에 따르면, 수송 부문은 전 세계 이산화탄소(CO₂) 배출의 약 25%를 차지하며 이 중 도로교통의 비중이 가장 크다. 우리나라 또한 도로교통 배출이 대기질 악화와 국민 건강 저해에 큰 영향을 미치며, 이로 인한 사회·경제

적 비용이 막대하다. 정부는 무공해차 보급 확대와 같은 저감 정책을 추진하고 있으나, 단기간 내 내연기관 차량을 전면적으로 대체하는 데에는 뚜렷한 한계가 존재한다. 따라서 운행 중 발생하는 배출을 억제할 수 있는 보완적·즉효성 대책이 필요하다. 이 가운데 경제운전(Eco-driving)은 급가속·급감속 억제를 통해 연료 효율성을 높이고, 온실가스와 대기오염물질을 동시에 저감하는 공편익(Co-benefit)을 제공하는 비용 효율적 수단으로 주목받고 있다. Lee *et al.* (2014) 등 선행 연구에서는 경제운전의 연비 개선 효과를 다수 제시하였으나, 실제 도로 주행데이터를 활용하여 대기

오염물질과 온실가스 배출을 동시 정량 평가하고, 이를 비용 지표로 통합한 분석은 상대적으로 부족하다. 그러나, 최근 정보통신기술 발달로 초 단위 차량 운행 데이터 축적이 가능해지면서, 운전 특성과 배출량 간 관계를 정밀하게 규명할 수 있는 기반이 마련되었다.

이에 본 연구는 실제 주행 궤적 데이터를 활용하여 운전 특성과 배출량 간 관계를 분석하고, 경제운전이 기여하는 기후환경 편익을 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 한다. 대상 오염물질은 NO_x , $\text{PM}_{2.5}$, CO_2 로 한정하며, 이들의 환경적·사회적 비용을 종합한 ‘기후환경비용’을 분석하였다. 구체적으로, 1) 운전행태 지표(경제운전지수(Eco-driving Index, EDI)를 구성하고, 2) 차량비출력(Vehicle Specific Power, VSP) 및 운행모드(Operating Mode, OpMode) 체계를 적용해 오염물질별 배출량을 산정하며, 3) 연료비 절감 효과(사적 편익)와 기후환경비용 절감 효과(사회적 편익)를 결합한 통합 평가를 수행한다. 본 연구는 경제운전 활성화의 과학적 근거를 제공함으로써 교통·환경정책 수립과 실행 가능성 제고에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 이론적 고찰 및 선행 연구 검토

1.2.1 경제운전(Eco-driving)의 개념 및 효과

경제운전은 급가속·급감속 억제와 정속 주행 유지 등을 통해 차량의 연료 효율을 높이는 운전 방식이다. 초기에는 연료비 절감의 경제적 효과에 초점이 맞춰졌으나, 최근에는 기후변화 대응과 대기질 개선 측면의 기후환경 편익이 강조되고 있다. 선행 연구에 따르면 경제운전은 연료소비 절감뿐 아니라 온실가스 및 대기오염물질 배출 저감에도 유의미한 효과를 보인다. Barth and Boriboonsomsin (2009)은 실제 도로 데이터를 기반으로 경제운전을 통해 CO_2 배출량을 약 5~10% 저감할 수 있음을 제시하였다. Huertas *et al.* (2022)은 멕시코 물류 회랑의 실차 데이터를 분석해 경제운전 교육을 받은 운전자 집단에서 평균 6.8%의 연료소비 저감을 확인하였다. Díaz-Ramírez *et al.* (2017) 역시 콜롬비아 화물 운송 데이터를 통해 주행 특성 변화가

연비 개선과 배출 저감으로 연결됨을 실증하였다. 국내에서는 Hong and Oh (2016)가 정속 주행 유지가 GHG 배출의 약 9% 저감에 기여함을 제시했으며, Lee *et al.* (2014)은 수도권을 중심으로 승용차 공회전 제한장치의 경제적 효과를 분석하였고, Lee *et al.* (2018)은 경제운전 정책이 온실가스 저감에 효과적인 교통정책인 것을 정량적으로 확인하였다. 또한 Huang *et al.* (2018)은 경제운전이 연비 향상뿐 아니라 NO_x , PM 등 주요 대기오염물질 감축에도 실질적 효과가 있으며, 특히 대형 차량에서 효과가 두드러진다고 지적하였다. 대기오염물질 감축에 주목한 국내 연구인 Kim *et al.* (2018)은 실도로 주행 데이터를 활용해 급가속 구간에서 NO_x 배출이 급증함을 보여주었다. 이와 함께 Gilman *et al.* (2020)은 경로 선택과 운전자 스타일이 연비에 미치는 영향을 비교·분석하여 운전행태의 미세한 차이가 에너지 소비의 유의미한 차이로 이어질 수 있음을 정량적으로 제시하였다. 도로 유형과 시간대에 따른 연료 소모 차이를 실증한 연구에서는 동일한 속도 조건에서도 국도에서의 연료 소모가 전용도로보다 17% 이상 높게 나타났으며, Lee and Choi (2015)는 이를 반영한 배출계수 보정 지표를 제안하였다. 또한 Lee *et al.* (2024)은 수도권 버스의 주행패턴을 분석한 결과, 주말 대비 평일(경기도) 운행 버스의 단위 배출이 약 16% 높음을 분석하여, 운행 조건에 따른 배출 특성 차이를 시사하였다.

1.2.2 운행데이터 기반 배출량 산정 방법론

실도로 주행 조건에서의 배출량을 정밀 추정하려면 평균속도 중심의 거시적(macroscopic) 접근 한계를 보완할 필요가 있다. 이에 따라 1초 단위 고해상도 운행데이터를 활용하는 미시적(microscopic) 방법론이 확산되고 있으며, 이는 실제 주행 상황을 반영한 배출 평가의 정확도를 높인다.

미시적 접근의 핵심은 차량의 순간 속도, 가속도, 도로 경사 등을 통합 반영하는 VSP이다. VSP는 엔진 부하(Engine Load)의 동적 변화를 물리적으로 표현하여 배출 산정의 신뢰도를 제고한다(Jiménez-Palacios, 1999). 미국 EPA의 MOVES (Motor Vehicle Emission

Simulator) 모델은 VSP 값을 기준으로 운행상태를 Op Mode로 세분화하고, 모드별 실험 기반 배출계수를 적용해 1초 단위 배출량을 추정한다(US EPA, 2020). 이 체계는 다양한 차종·운전 조건에서 검증된 데이터와 표준화된 절차를 제공한다.

한편 기계학습·시계열 모델을 이용한 추정 연구도 증가하고 있으나, 정책 평가와 정량 비교의 재현성 측면에서 VSP-MOVES 기반 접근은 유용성이 높은 것으로 판단된다. 본 연구는 분석의 신뢰성과 정책 적용 가능성을 높이기 위해 이 방법론을 채택하였다.

1.2.3 선행 연구와의 차별성 및 본 연구의 의의

선행 연구를 종합한 결과, 경제운전의 환경적 편익을 다룬 실증 분석은 다수 축적되어 있으나, 다음과 같은 공통적 한계가 확인된다. 첫째, 기존 연구는 연비 또는 CO₂ 중심의 분석에 집중되어 NO_x, PM_{2.5} 등 인체 위해성이 높은 대기오염물질을 포함한 통합적 기후환경 영향 평가가 상대적으로 부족하였다. 둘째, 분석 지표와 평가 기준의 비표준성이 존재하여 연구 간 비교 가능성과 정책 활용성이 제한되었다. 셋째, 승용차 중심의 연구가 주류를 이루어, 배출 비중이 크고 정책적으로 중요한 버스·화물차 등 사업용 차량에 대한 체계적 검토가 미흡했다.

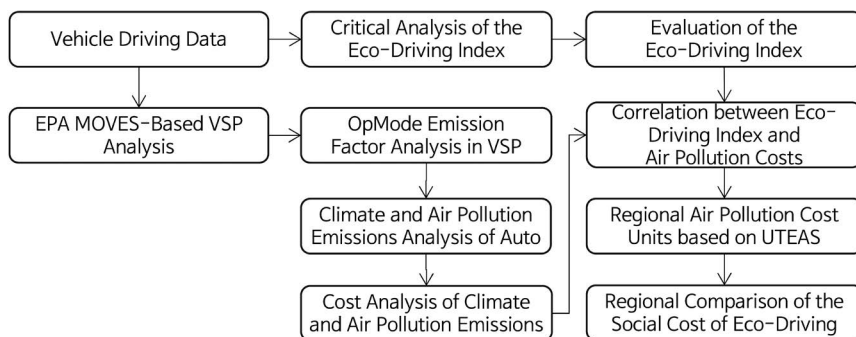
이러한 한계점을 극복하기 위해, 본 연구는 다음과 같은 차별성을 가진다. 1) 미국 EPA-MOVES 표준 체계를 적용하여 CO₂와 NO_x, PM_{2.5}를 동시에 평가하고,

이를 기후환경 편익으로 통합 정량화하였다. 2) 운행 행태를 반영한 EDI와 연계하여, 분석 결과의 객관성 및 정책 연계성을 강화하였다. 3) 승용차뿐 아니라 버스·화물차를 포함한 차종별 세분화 분석을 수행하여, 맞춤형 정책 설계에 필요한 실증적 근거를 제공하였다.

결국 본 연구는 고해상도 운행데이터와 미국 EPA의 배출모형인 MOVES를 결합함으로써, 경제운전의 환경 효과를 다각적으로 규명하고, 운전자 행태 변화와 정책 수단을 연결하는 정량적 평가 체계를 제시하였다. 이를 통해 교통·환경정책의 설계·평가 고도화와 함께, 기후환경비용 절감 유인 마련에 기여할 수 있다는 학문적·정책적 의의를 가진다.

2. 연구 내용 및 방법

본 연구는 실도로 주행 궤적 데이터를 기반으로 경제운전이 대기오염물질·온실가스 배출 및 비용 지표에 미치는 영향을 통합적으로 평가하였다. 연구대상은 승용차, 버스, 소형 화물차이며, 이들 차량으로부터 1초 단위 운행데이터를 수집·가공하였다. 배출량 산정은 미국 환경보호청(U.S. EPA)이 제시한 MOVES 방법론과 VSP 개념을 적용하여, 궤적 데이터를 OpMode로 변환한 뒤 NO_x·PM_{2.5}·CO₂ 배출량을 추정하는 방식으로 수행하였다.



*UTEAS: Urban Transportation Emission Assessment Systems

Fig. 1. Analysis procedure of this study.

운전 습관은 EDI를 통해 정량화하였으며, 이를 바탕으로 배출 변화와 연료소비 변화가 각각 사적 편익과 사회적 편익으로 연결되도록 분석 체계를 설계하였다. 분석은 차종별·지역별 단위로 수행하였으며, 기준 시나리오(베이스라인)와 경제운전 시나리오를 비교하여 배출 감축량과 비용 편익을 도출하였다. 본 연구의 전체 분석 절차는 그림 1에 도식적으로 제시하였다.

3. 기초자료 분석

3.1 자료 수집 및 운행데이터 특성

본 연구는 차종별 특성을 고려하여 승용차, 버스, 화물차를 대상으로 2022년 기준의 운행 데이터를 수집·구성하였다. 승용차(203대, 17,001 km)와 화물차(200대, 22,739 km)의 경우, GPS 기반 초 단위 로그데이터 약 293만 건을 확보하였다. 각 로그에는 위치 좌표, 순간 속도, 가속도 등 원시 주행 정보가 포함되며, GIS 기

반 맵 매칭을 통해 행정구역 및 도로망 정보와 연계하였다. 한편 버스(3,908대, 68.36억 km)는 운수회사의 디지털 운행기록계(Digital TachoGraph, DTG)로 도출된 급가속 빈도, EDI, 연비 등 집계형 지표로 구성하였다. 즉, 승용차와 화물차는 초당 데이터를 활용하여 직접 EDI 등을 분석하였고, 버스는 운수사 전산시스템으로 분석되어 저장된 EDI 지수를 활용하였다. 이러한 데이터는 다양한 차종과 주행 조건을 반영함으로써 분석의 대표성과 신뢰성을 확보하였다(표 1, 2).

초 단위 데이터가 확보된 승용차·화물차의 운행 특성을 살펴보면, 전체 표본은 폭넓은 속도 구간을 포괄하고 있으며, 차량 유형별 주행 연속성과 가속 행태에서 차이가 나타났다(그림 2, 3). 가속도 분포(그림 3)에 따르면, 1.0 m/s^2 이하의 안정적 주행 비율은 승용차 92.2%, 화물차 94.2%로, 화물차가 상대적으로 완만하고 일관된 주행 특성을 보임을 시사한다. 이러한 경향은 특히 저속 구간에서 두드러졌다. 예컨대 20 km/h 이하 구간(혼잡·신호 대기 구간)에서 1.0 m/s^2 초과 가속 비율은 승용차 16.4%, 화물차 13.1%로 나타났다.

Table 1. Definition of driving data for passenger cars and trucks.

Car ID	Time	Coordinates	Speed	Acceleration	Road type	Region
ID	Date, Time	Lat. Log.	m/s	Processing at speed	Processing at coordinates	

Table 2. Data size used in this study.

Category	Number of vehicles	Total operating hours	Total driving distance
Passenger cars	203	337 h	17,001 km
Bus	3,908	39,099 h	6,836 million km
Trucks	200	482 h	22,739 km

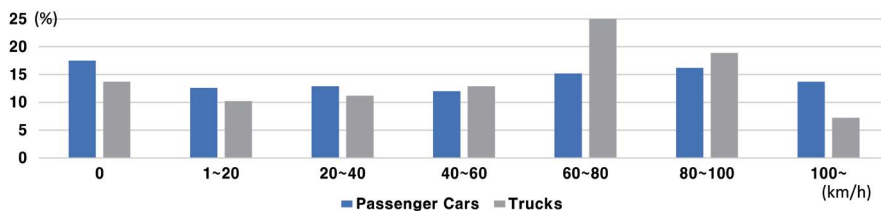


Fig. 2. Distribution of driving speed of passenger cars and trucks.

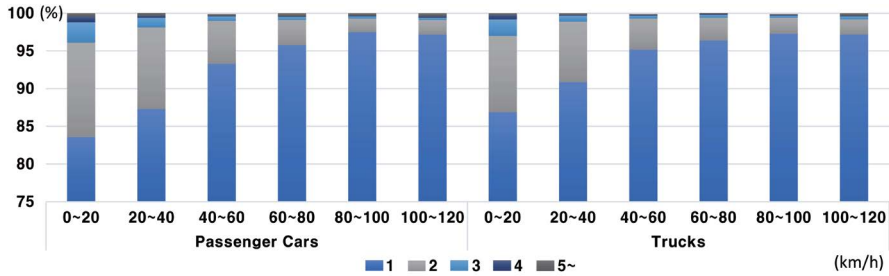


Fig. 3. Distribution of acceleration of passenger cars and trucks.

이는 저속 주행이 곧바로 경제운전을 의미하지 않으며, 저속 구간에서도 가속속 변동이 크면 엔진 부하가 증가해 연료 소모 및 배출이 확대될 가능성이 있음을 보여준다.

3.2 경제운전지수(EDI) 및 차량비출력(VSP) 분석

운전자 행태는 EDI와 VSP 기반 배출량 추정 방법을 연계하여 평가하였다. EDI는 KAEA (2019)의 함수식을 적용하며, 가속·급가속·급감속·급회전 네 요소를 기준으로 초 단위 운행데이터에서 속도별 5차 다항 임계치를 초과할 경우 감점되는 방식으로 산정된다.

VSP는 MOVES에 적용되는 일반화 식을 국내 여건에 맞게 보정하여 사용하였다. 이때, 초 단위 속도·가속도 및 경사 정보를 통해 시점별 엔진 부하 상태를 추정된 뒤, 이를 기반으로 OpMode를 결정하고, 오염물질별 배출계수(NO_x, PM_{2.5}, CO₂)를 적용해 배출량을 산정하였다. 분석 대상은 승용차, 화물차이며, MOVES의 유사 차종에 국내 자동차등록통계에 따른 차종별 연식 구성비를 반영하여 배출 특성을 분석하였다. 버스의 경우, DTG를 통한 초당 운행 정보와 연비가 수집되기 때문에 VSP 기반의 배출량 추정 방법을 적용하지 않았다.

속도-가속도 관계(그림 4)를 보면, 속도가 증가할수록 가속도 분포 폭이 확대되며 이에 따라 VSP 분포(그림 5) 역시 넓은 범위를 보였다. 차속별 VSP에 따른 OpMode 분포(표 3)를 보면, 전체 주행의 약 12.3%는 저속(11.2~22.4 km/h) 구간의 VSP 3~6 kW 범위에 집중되었고, 약 14.9%는 중·고속(22.4 km/h 이상) 구

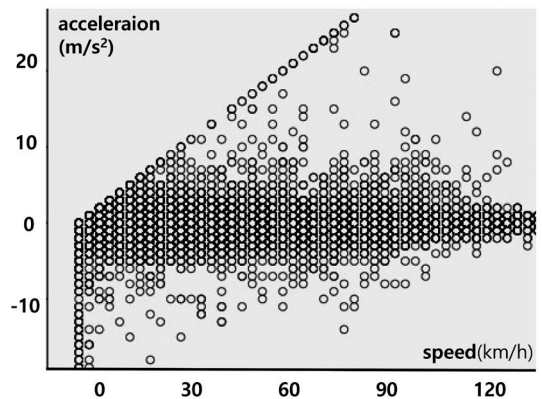


Fig. 4. Relationship between speed and acceleration for passenger cars.

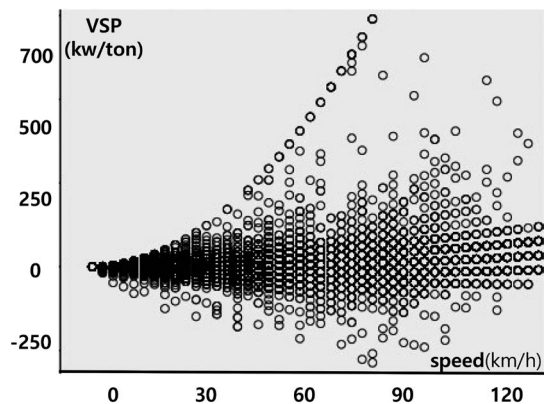
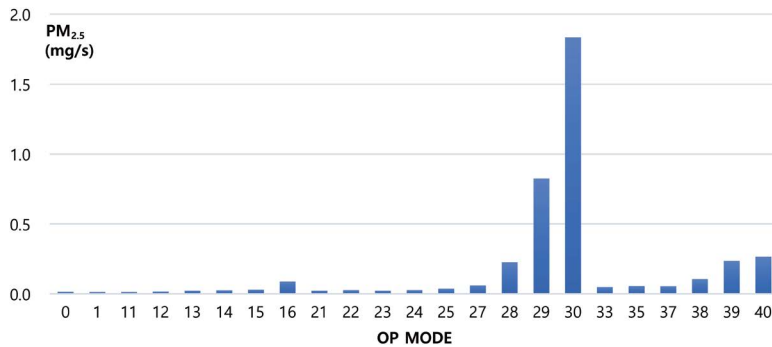
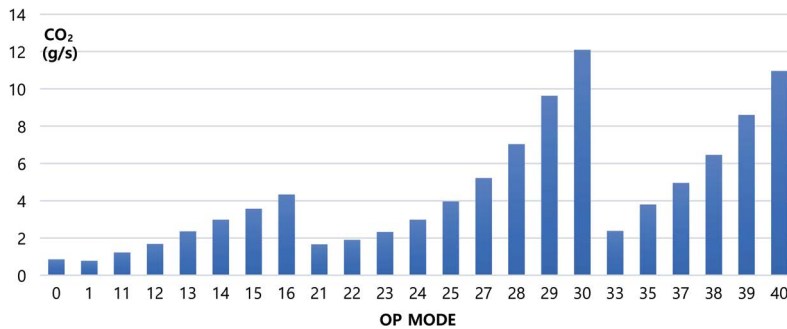


Fig. 5. Relationship between speed and VSP for passenger cars.

간의 VSP 9~12 kW 범위에 집중되었다. 이는 차량 유형과 주행 조건에 따른 엔진 부하 변동 양상을 반영

Table 3. Distribution rate of speed and VSP for passenger cars driving data.

SPD(km/h)	VSP(KW)								
	~0	0~3	3~6	6~9	9~12	12~18	18~24	24~30	30~
-0.5~0.5					17.5%				
0~11.2	4.1%	17.6%	1.0%	0.8%	1.2%	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%
11.2~22.4	3.7%	4.8%	12.3%	2.3%	0.0%	1.1%	1.7%	1.0%	0.2%
22.4~156.5	3.1%	3.1%	3.1%	14.9%	14.9%	6.4%	1.3%	0.4%	3.6%

**Fig. 6.** PM_{2.5} emissions by OpMode for passenger cars.**Fig. 7.** CO₂ emissions by OpMode for passenger cars.

한다.

승용차 기준의 운행모드별 배출 특성(그림 6, 7)을 보면, 가장 높은 엔진 부하 조건에 해당하는 OpMode 30(고속·급가속)에서 PM_{2.5} 배출계수는 1.83 mg/s, CO₂ 배출계수는 12.1 g/s에 달하였다. 동일한 차속이라도 가속도(운행패턴)에 따라 배출계수가 크게 달라졌으며, 이는 급가속 등 비경제적 운전 행태가 배출량 증가에 미치는 영향이 크음을 시사한다.

4. 분석 결과

4.1 차종별 경제운전의 기후환경 편익 분석

본 연구는 앞서 구축한 운행데이터에 기초하여 EDI와 VSP를 활용하여 NO_x, PM_{2.5}, CO₂ 배출량을 산정하였다. 산정된 배출량은 Lee and Choi (2012)가 제시한 사회적 비용 원 단위를 적용하여 차종별 기후환경비용으로 환산하였다.

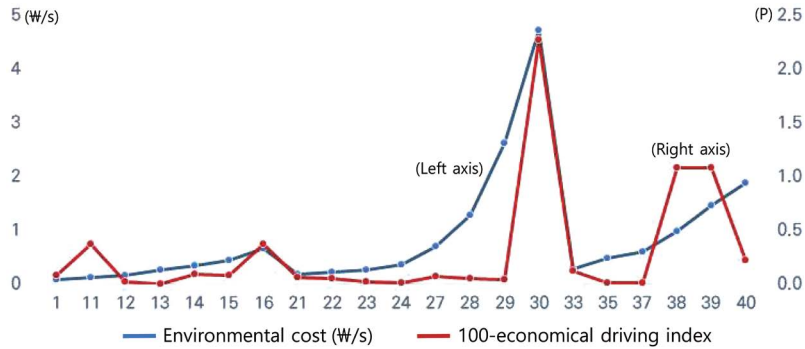


Fig. 8. Eco-driving index and environmental costs by OpMode.

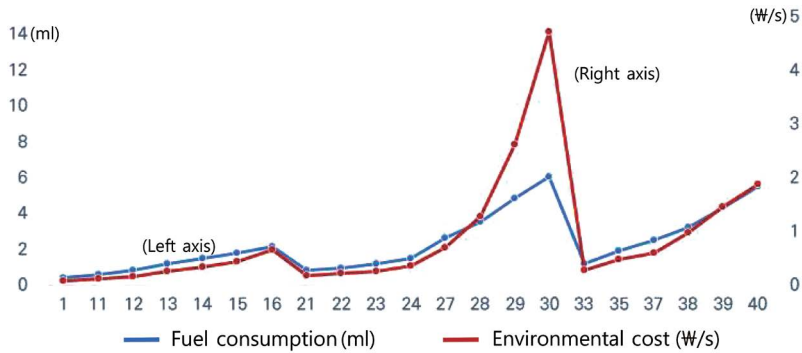


Fig. 9. Fuel consumption and environmental costs by OpMode.

우선 차속 구간과 OpMode에 따른 EDI와 기후환경 비용을 분석하고, 두 변수 간의 함수 관계를 추정하였다(식 1, 그림 8). 분석 결과, 동일한 속도 구간에서도 가속도 분산이 큰 OpMode에서는 EDI가 높을수록 기후환경비용이 증가하는 양(+)의 상관관계가 확인되었다. 이는 급가속·급감속 억제를 통해 VSP가 하향되고, 고부하 모드 체류 시간이 단축되면 모드별 배출계수가 감소하는 메커니즘으로 설명할 수 있다. 또한 OpMode별 연료소모량과 기후환경비용의 함수 관계(식 2, 그림 9)를 도출한 결과, 두 지표가 정량적으로 밀접하게 연계됨을 확인하였다.

$$\begin{aligned}
 &\text{기후환경비용(원/초)} \\
 &= 0.647 + (-0.488) \times (100 - \text{EDI}) \\
 &+ (0.999) \times (100 - \text{EDI})^2 \quad [R^2: 0.678] \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{기후환경비용(원/초)} \\
 &= 0.205 \times \text{연료소모량(mL/초)}^{1.441} \quad [R^2: 0.966] \quad (2)
 \end{aligned}$$

차종별 분석에서는 식 2의 관계식을 바탕으로 승용차(10 km/L), 버스(2.86 km/L), 화물차(6.8 km/L)의 평균 연비를 기준으로 기후환경비용을 산출하고, 이를 통해 평균적인 운전자의 기준 EDI를 도출하였다. 이후 식 1을 적용하여 EDI에 따른 기후환경비용 환산 구조를 설정하였다. 또한 경제운전이 사회적 외부비용 절감에 미치는 효과를 비용 함수(식 3~5)로 재구조화하였으며, 이때 EDI (0~100)와 주행거리를 독립 변수로 설정하였다.

$$\begin{aligned}
 &\text{승용차 기후환경 편익(원)} = \text{VKT(대km)} \times 37 \\
 &\times (1 - 10 / (5.8972 + 0.057 \times \text{EDI})) \quad (3)
 \end{aligned}$$

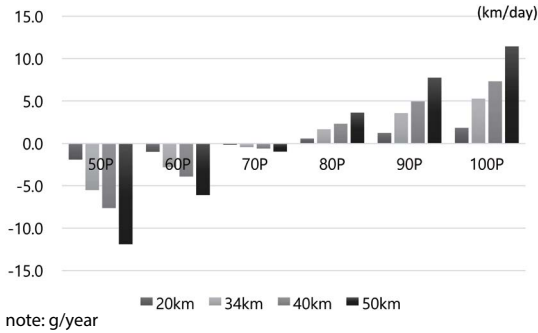


Fig. 10. PM_{2.5} reduction by eco-driving index (passenger cars).

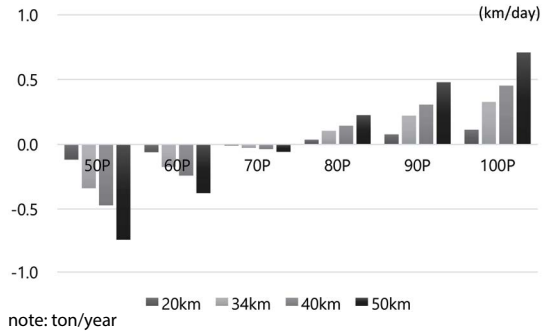


Fig. 12. CO₂ reduction by eco-driving index (passenger cars).

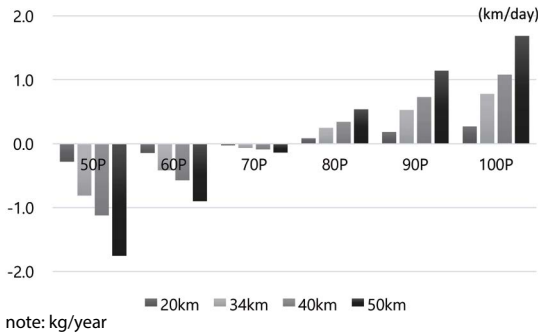


Fig. 11. NO_x reduction by eco-driving index (passenger cars).

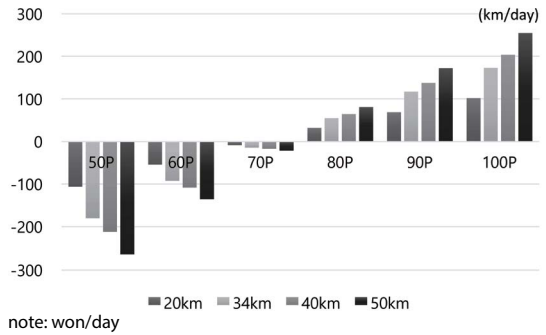


Fig. 13. Climate and environmental cost savings by eco-driving index (passenger cars).

$$\text{버스 기후환경 편익(원)} = \text{VKT(대km)} \times 240 \times (1 - 2.86 / (1.179 + 0.021 \times \text{EDI})) \quad (4)$$

$$\text{화물차 기후환경 편익(원)} = \text{VKT(대km)} \times 100 \times (1 - 6.8 / (4.798 + 0.028 \times \text{EDI})) \quad (5)$$

이 관계식에 따르면, 평균 연비에 해당하는 EDI는 승용차 72P, 버스 80P, 화물차 71P로 산출되었다. 이후 완전한 경제운전(EDI=100P) 시나리오를 적용하여 각 차종별 절감 효과를 추정하였다(그림 10~15).

분석 결과, 경제운전은 모든 차종에서 유의한 배출 감축 효과를 보였다. 승용차의 경우(일 평균 주행거리 34 km/일 기준), 단일 차량당 PM_{2.5} 5.29 g/년, NO_x 0.78 kg/년, CO₂ 0.33 ton/년이 감축되었다. 버스의 경우(200 km/일 기준), PM_{2.5} 199.20 g/년, NO_x 33.04 kg/년, CO₂ 10.83 ton/년 감축 효과가 나타났다. 이는 버스가 다중 승객을 수송하며 장거리 반복 운행을 수행하는

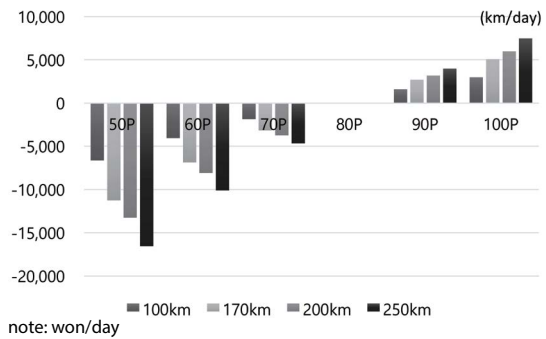


Fig. 14. Climate and environmental cost savings by eco-driving index (bus).

특성상, 단일 차량당 절감량이 크게 산출된 것으로 해석된다. 소형 화물차의 경우(50 km/일 기준), PM_{2.5} 88 g/년, NO_x 4.08 kg/년, CO₂ 1.97 ton/년이 감축되어, 단위 거리당 감축 효과가 승용차보다 높게 나타났다.

기후환경비용 절감 효과 역시 명확하게 확인되었다. 승용차는 평균 운전(EDI: 72P) 대비 경제운전 실천 시 일 평균 약 173원/일 절감이 가능하며, 주행거리가 10 km/일 감소할 경우 추가로 약 49원/일 절감되는 것으로 분석되었(그림 13). 버스는 약 5,980원/일, 화물차는 약 524원/일 절감 효과가 확인되었다(그림 14, 15), 일 평균 주행거리를 기준으로 한 분석에서는 경제운전(EDI: 100P) 시 기후환경비용 절감 비율이 승용차 14%, 버스 11%, 화물차 13%로 나타났다. 이는 경제운전이 연료비와 기후환경비용을 약 11~14% 절감할 수 있음을 실증적으로 보여준다.

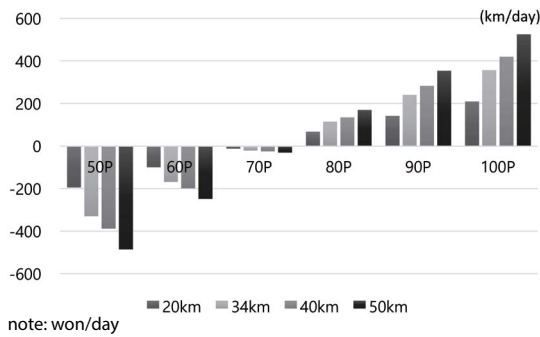


Fig. 15. Climate and environmental cost savings by eco-driving index (trucks).

마지막으로, 주행거리와 EDI 조합에 따른 차종별 기후환경비용 절감 효과를 분석한 결과는 그림 16과 같다. 승용차의 경우, 일 평균 주행거리 50 km/일 기준에서 EDI가 100P일 때 약 255원의 절감 효과가 나타났으며, 소형 화물차는 동일 조건에서 525원으로 승용차 대비 두 배 이상 높은 절감 효과를 보였다. 버스의 경우, 일 평균 주행거리 100 km/일에서 EDI가 90P일 때 1,594원, 100P일 때 2,990원으로 나타나, 경제운전 실천 수준이 향상될수록 효과가 뚜렷하게 증가함을 확인하였다.

4.2 지역별 경제운전 실천에 따른 온실가스 감축 효과 분석

경제운전의 기후환경 편익은 운전자 개인의 행태뿐 아니라, 지역별 교통 인프라, 도로 기하 및 경사, 교통 혼잡도, 차량 구성 등 외생 요인에 따라 상이하게 나타난다. 이에 본 연구는 지자체별 온실가스 배출 통계를 기초로, 앞의 분석 체계를 활용하여, 지역 단위에서의 경제운전 실천에 따른 차량 1대당 연간 CO₂ 감축량을 추정하였다. 다만, 본 추정은 연중 100% 경제운전 실천이라는 상한 시나리오를 전제로 하므로, 실제 정책 설계 시에는 실행률 및 지속률(예: 30%, 50% 등)

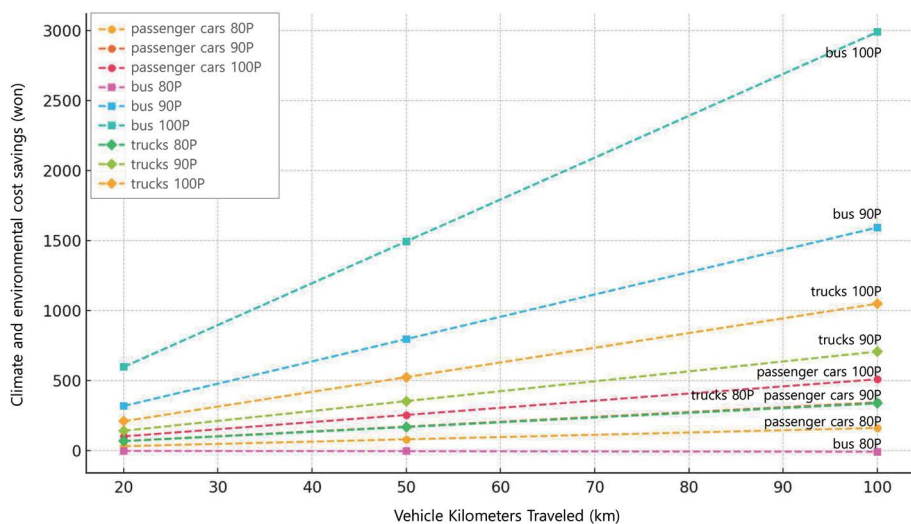


Fig. 16. Climate and environmental benefits by economic driving index.

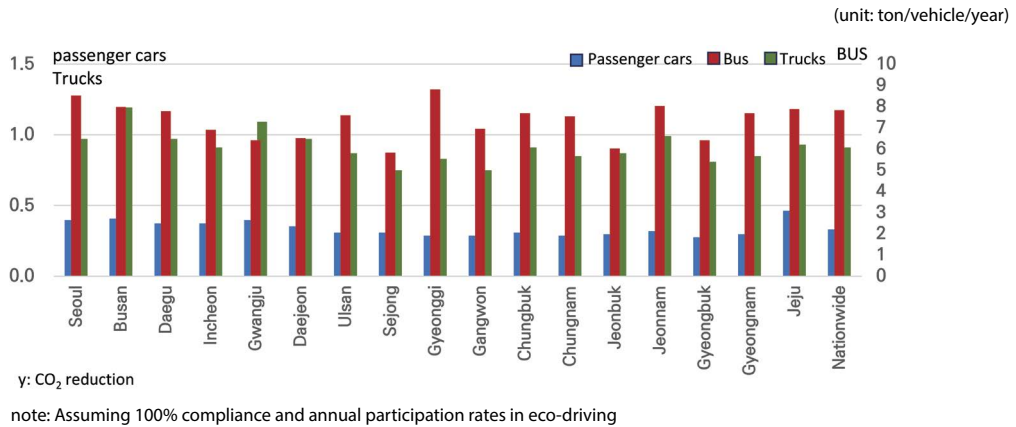


Fig. 17. Greenhouse gas reduction effects of eco-driving by local government.

을 반영한 현실적 시나리오 분석이 병행될 필요가 있다.

분석 결과(그림 17), 승용차의 경우 세종시는 대당 연간 약 0.31톤 CO₂의 감축 효과가 추정된 반면, 부산시(0.41톤 CO₂)와 제주시(0.46톤 CO₂)는 상대적으로 높은 감축 잠재력을 보였다. 이는 부산시와 제주시의 도로 특성상 경사·곡선부가 많고, 혼잡 및 렌터카 수요 등으로 인해 가감속 변동이 빈번하다는 점에서 기인하는 것으로 해석된다. 이러한 조건에서는 경제운전 실천 시 VSP 하향과 고부하 운행모드 비중 감소에 따라 CO₂ 저감 효과가 더욱 크게 나타날 수 있다. 사업용 차량에서는 지역 간 차이가 더욱 뚜렷하였다. 예컨대, 버스의 경우 경기도에서 대당 연간 8.81톤 CO₂, 소형 화물차는 부산시에서 7.98톤 CO₂의 감축 잠재력이 추정되었다. 이는 지역별 교통수단 구조(대중교통 분담률), 노선 길이·정차 패턴, 차종·배기량 분포가 경제운전 효과의 감소량을 좌우한다는 점을 보여준다. 이는 지역 맞춤형 교육·인센티브·피드백 설계가 필요함을 시사한다.

4.3 경제운전의 사적·사회적 편익 구조와 전국 확산 효과

경제운전의 정책적 확산을 위해서는 사회적 편익뿐 아니라 개별 운전자에게 귀속되는 경제적 유인, 즉 사

적 편익의 구조를 함께 파악할 필요가 있다. 본 연구는 ① 경제운전에 따른 기후환경비용 절감분을 사회적 편익으로, ② 연료비 절감액을 사적 편익으로 정의하였으며, 이를 차종별로 비교하여 경제운전 실천의 내재적 유인 구조를 평가하였다.

분석 결과, 모든 차종에서 사적 편익이 사회적 편익보다 크게 나타났다. 특히 승용차의 경우, 사적 편익은 사회적 편익의 약 4.7배로 추정되었다(표 4). 이는 경제운전 정책이 ‘환경보호’ 중심의 공익 메시지보다, 운전자가 즉시 체감할 수 있는 ‘가계 절약’ 중심의 메시지를 전면에 제시할 때 행동 전환 효과가 높을 수 있음을 시사한다. 다시 말해, 환경적 가치 제고와 더불어 개인 경제적 이익을 강조하는 이중 프레임 전략이 정책 설계에 바람직하다. 개별 운전자의 실천이 전국적으로 확산될 경우의 거시적 효과 역시 상당한 것으로 나타났다. 표 4에 제시된 바와 같이, 승용차 운전자가 경제운전을 실천(EDI: 72 → 100P)할 경우 차량 1대당 연간 약 6.3만 원의 사회적 편익이 발생한다. 이를 전국 운전자의 10%가 실천하는 시나리오로 확장하면, 연간 약 1,159억 원의 사회적 비용 절감과 약 3조 8천억 원의 연료비 절감 효과가 추정된다. 이는 경제운전이 단순한 개별 습관 개선을 넘어, 국가 차원의 저탄소 교통전환 전략으로 기능할 수 있음을 보여준다.

정책적으로는 이러한 편익 구조를 활용하여 탄소

Table 4. Comparison of private and social benefits from eco-driving (per vehicle and nationwide, 10% adoption scenario)

Category	Private benefits		Social benefits	
	Per-vehicle benefit (₩/vehicle/year)	Nationwide benefit (₩100 million won/year, 10% adoption)	Per-vehicle benefit (₩/vehicle/year)	Nationwide benefit (₩100 million won/year, 10% adoption)
Passenger cars	295,358	38,713	63,145	1,159
Bus	4,562,500	2,074	2,728,375	136
Trucks	308,425	8,541	130,305	469

note: Nationwide values represent estimated total benefits assuming 10% adoption of eco-driving across the national vehicle fleet (Passenger cars: 72 → 100P, bus: 80 → 100P, trucks: 71 → 100P).

세·교통환경세·지역 맞춤형 인센티브 등과의 연계를 통해 정책-행동-효과의 선순환 체계를 구축할 수 있다. 특히 사업용 및 고배출 차종의 경우, 점수 기반 인센티브와 실시간 피드백, 교육·컨설팅을 결합하면 높은 비용-효과성을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론 및 향후 과제

본 연구는 수송 부문의 온실가스 및 대기오염 저감을 위한 경제운전의 실효성을 고해상도 실도로 운행데이터(1초 단위)를 바탕으로 실증적으로 분석하였다. 구체적으로, 선행 연구에서 현장 실증을 통해 정립된 EDI와 국제적으로 검증된 VSP-OpMode 기반 MOVES 체계를 결합하여 NO_x, PM_{2.5}, CO₂ 배출을 산정하고, 이를 기후환경비용으로 화폐화하여 차종별 편익을 정량적으로 도출하였다. 분석 결과, 승용차·버스·소형 화물차 모두에서 경제운전 실천 시 배출 저감 효과가 확인되었으며, 특히 버스·화물차와 같은 사업용 차량에서 감축량이 크게 나타났다.

핵심 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 경제운전 실천 수준 향상은 자동차 고부하 운행모드 체류 시간 감소와 배출계수 감소로 연결되어, 기후환경비용이 평균 11~14% 절감되는 경향을 보였다. 둘째, 지역별 교통환경에 따라 감축 잠재력이 상이하게 나타났으며, 이는 지자체별 특성을 반영한 맞춤형 정책 설계의 필요성을 시사한다. 셋째, 편익 구조 측면에서 모든 차종에서 사적 편익(연료비 절감)이 사회적 편익(기후환

경비용 절감)을 상회하였으며, 승용차의 경우 사적 편익이 사회적 편익의 약 4.7배로 추정되었다. 이는 경제운전 확산을 위해 ‘환경보호’ 중심 메시지에 더해 ‘가계 절약’ 중심의 인센티브와 커뮤니케이션 전략을 결합하는 것이 행동 전환에 효과적임을 보여준다.

본 연구는 표본이 특정 운수회사 및 내비게이션 플랫폼에 부분적으로 의존하였으며, 배출모형(MOVES) 등이 미국 기준에 기반해 국내 여건 반영에 한계가 있다. 또한 분석 초점이 운전자 행태에 국한되어 교통 혼잡, 신호체계, ITS (Intelligent Transport Systems) 적용 등 외생 요인과의 상호작용은 충분히 고려하지 못하였다. 향후에는 1) C-ITS (Cooperative-Intelligent Transport Systems)·차량 센서·고정밀 지도 등 다양한 데이터와 표본 대표성 확대, 2) 국내 실험실·실도로 측정치를 활용한 배출계수·사회비용 보정, 3) 교통 시뮬레이션과의 연계를 통한 정책-행태-배출 통합 평가가 필요하다. 더 나아가 자율주행 및 운전자 지원(ADAS) 시스템에 경제운전 원리를 내재화함으로써, 정책·기술·운전행태가 선순환하는 저탄소 교통체계 설계를 앞당길 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 RS-2023-00245 871).

References

- Barth, M., Boriboonsomsin, K. (2009) Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), 400-410. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.004>
- Díaz-Ramirez, J., Giraldo-Peralta, N., Vásquez, J.A. (2017) Eco-driving key factors that influence fuel consumption in heavy-truck fleets: A Colombian case, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 56, 258-270. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.012>
- Gilman, D.A., Wolfe, M., Work, D.B. (2020) Fuel consumption analysis of driven trips with respect to route choice, *Proceedings of the 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICDEW49219.2020.000-9>
- Hong, S.J., Oh, H.U. (2016) Effect of Traffic Calming Using Speed-Maintained Standardization on Environment-Friendliness of Downward Slope Location based on GHG Emission Indicators, *International Journal of Highway Engineering*, 18(2), 103-110. <https://doi.org/10.7855/IJHE.2016.18.2.103>
- Huang, Y., Ng, E.C.Y., Zhou, J.L., Surawski, N.C. (2018) Eco-driving technology for sustainable road transport: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 596-609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.030>
- Huertas, J.I., Serrano-Guevara, O.S., Díaz-Ramirez, J. (2022) Real vehicle fuel consumption in logistic corridors, *Applied Energy*, 325, 119872. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118921>
- Jiménez-Palacios, J.L. (1999) Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing, Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Korea Automobile Environmental Association (KAEA) (2019) Smart Driving Evaluation System: Development and Application for Environment, Economy, and Safety.
- Kim, S.Y., Choi, D.H., Kim, B.Y., Kim, J.W. Lee, J.W. (2018) Correlation Analysis of NO_x Emission and Driving Parameters - Case Study: In-used Car Inspection Mode and Real Road Driving, *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, 26(4), 521-532. <https://doi.org/10.7467/KSAE.2018.26.4.521>
- Lee, K.J., Choi, K.C. (2012) A Model for Estimating Social Cost of Mobile Emission Considering Geographical and Social Characteristics, *Journal of Korean Society of Transportation*, 30(5), 33-42. <https://doi.org/10.7470/jkst.2012.30.5.033>
- Lee, K.J., Choi, K.C. (2015) Analysis on the Correction Factor of Emission Factors and Verification for Fuel Consumption Differences by Road Types and Time Using Real Driving Data, *Journal of Korean Society of Transportation*, 33(5), 449-460. <https://doi.org/10.7470/jkst.2015.33.5.449>
- Lee, K.J., Jang, J.A., Choi, K.C., Sim, S.U. (2014) Economic Effects Analysis for Passenger Car's Idle Stop and Go Strategy: Focusing on Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society of Transportation*, 32(5), 421-430. <https://doi.org/10.7470/jkst.2014.32.5.421>
- Lee, K.J., Jeon, G.S., Shim, S.W. (2024) A Study for Bus Driving Patterns Using Digital Tachograph Data, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, 23(5), 222-233. <https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.5.222>
- Lee, K.J., Yi, Y.J., Choi, K.C. (2018) A Methodology for Evaluating the Effects of Transportation Policies Related to Greenhouse Gas Reduction, *Journal of Korean Society of Transportation*, 36(1), 1-12. <https://doi.org/10.7470/jkst.2018.36.1.001>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2020) Population and Activity of Onroad Vehicles in MOVES3, EPA-420-R-20-023.

Author Information

이규진 (아주대학교 TOD기반 지속가능도시교통연구센터 연구교수) (transjin2970@gmail.com)