

교통온실가스 감축정책의 효과분석 방법론 연구

이규진^{1*} · 이용주² · 최기주³

¹한국지능형교통체계협회 기술표준센터, ²아주대학교 TOD기반 지속가능 도시교통연구센터,

³아주대학교 교통시스템공학과

A Methodology for Evaluating the Effects of Transportation Policies Related to Greenhouse Gas Reduction

LEE, Kyu Jin^{1*} · YI, Yongju² · CHOI, Keechoo³

¹Center for Technology & Standardization, ITS Korea, Ansan 15327, Korea

²TOD-based Sustainable City Transportation Research Center, Ajou University, Suwon 16499, Korea

³Department of Transportation Systems Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Korea

*Corresponding author: transjin2970@gmail.com

Abstract

The purpose of this study is to establish a methodology for evaluating quantitative effects of transportation GHG (greenhouse gas) reduction-related policies that were implemented based on the reduction goals of transportation GHG and effective implementation plans. This study uses a modal utility function and demand estimation models as well as a GHG emission basic unit estimation model by each transportation mode based on actual traffic and emission data. The results showed that the effects of GHG reduction policies such as electric vary from region to region, and from vehicle to vehicle. It is also confirmed that an eco-drive promotion policy, one of the lowest budget policies, is expected to contribute to high reduction in GHG. In addition, not only automobile emission improvement policies but also the promotion policies of public transportation are expected to highly reduce GHG as confirmed quantitatively in this study. The results of this study are expected to be useful for national and local governments' evaluation of GHG reduction policies to cope with the post 2020.

Keywords: GHG emission, green transportation mode, low emission vehicle, mode choice model, post 2020

초록

본 연구는 교통온실가스 감축목표 설정 및 효과적 이행계획 수립에 기여하기 위한 교통온실가스 감축정책의 정량적 효과분석 방법론 정립을 목적으로 한다. 본 연구는 실제 교통·배출 자료에 근거한 교통수단별 온실가스 배출 원단위 추정모형을 포함하여, 수단효용함수와 수요추정모형 등을 활용하고 있다. 연구결과, 전기차 등 온실가스 감축정책 효과는 지역과 대상차종 등에 따라 다양하게 도출될 수 있으며, 저예산 정책인 에코드라이브 활성화 정책은 높은 온실가스 감축효과를 기대할 수 있는 것으로 확인되었다. 또한 자동차 배출개선 정책 뿐 아니라 대중교통 이용활성화 정책도 높은 온실가스 감축효과를 기대할 수 있으며, 본 연구는 이러한 사실을 정량적으로 확인하고 있다. 본 연구결과는 신기후체제 대응을 위한 국가 및 지자체의 온실가스 감축정책 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 온실가스 배출량, 녹색교통수단, 저탄소차, 수단분담모형, 신기후체제

J. Korean Soc. Transp.
Vol.36, No.1, pp.1-12, February 2018
<https://doi.org/10.7470/jkst.2018.36.1.001>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 17 April 2017

Revised: 2 June 2017

Accepted: 20 December 2017

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

저탄소 녹색성장은 기존의 단순한 경제성장 논리에서 벗어나, 에너지를 효율적으로 사용하여 기후변화에 대응하고 녹색기술 연구개발을 통한 경제와 환경이 조화를 이루는 지속가능한 성장을 의미한다. 이는 경제성장과 CO₂ 배출의 비동조화(Decoupling) 추구를 통해 달성가능하며, 스웨덴과 프랑스가 대표적인 비동조화 국가로 분류되고 있다(IEA, 2013). 반면 우리나라는 2009년 저탄소 녹색성장기본법 제정 등을 통해 녹색성장 가치를 추구하고 있으나, 여전히 체코, 터키 등과 함께 동조화(Coupling) 국가로 분류되고 있으며, CO₂ 배출량과 증가속도는 파리협정 195개국 중 각 7위, 3위에 머물고 있다.

저탄소 녹색성장의 가치추구를 위한 정책적 노력이 실효성을 얻기 위해서는 효율적 계획수립과 점검은 필수적이다. 아울러 2016년 발효된 신기후체제(Post 2020)에 따라 감축목표 설정 및 이행계획 점검이 의무화됨에 따라, 우리나라가 설정한 37%의 국가자발적감축목표(INDC), 특히 전 부문 중 감축목표가 가장 높은 교통부문 온실가스 감축목표(24.6%)를 달성하기 위한 구체적인 정책수립은 지속적으로 요구될 것으로 예상된다. 이를 위해서는 무엇보다도 교통부문 온실가스 배출현상과 감축정책의 효과를 객관적으로 평가하기 위한 방법론 정립이 선행되어야 한다. 관련연구의 경우, 교통부문 온실가스 배출현상을 파악하기 위한 방법론은 마련되어 있으나, 감축정책의 평가연구는 부분적으로 접근되는 등 아직까지 초기단계이며 사례연구에 국한되었기 때문에, 교통온실가스 감축정책에 따른 이행과 배출변화 등을 논리적으로 고려하지 못하는 한계가 있다.

또한 경제와 CO₂ 배출의 비동조화 국가들은 공통적으로 배출개선 기술개발을 선도하고 있으며 비동력 교통수단이 활성화되어 있다는 점을 고려할 때, 다양한 정책들이 조화롭게 계획되어야 한다. 그러나 우리나라는 2030년 수송부문 감축목표 25.9백만 톤 중 85%를 기술적 수단으로 감축하겠다는 계획을 수립하는 등 다양한 정책을 고려하지 못하는 한계가 있다. 그 원인 중 승용차 공동이용제 및 대중교통 이용 활성화 정책과 같은 정책적 감축수단의 정량적 평가 방법론 개발 부재도 지목되고 있다.

이에 본 연구는 교통부문 온실가스 감축목표 설정의 정량적 논거 및 효과적인 이행계획 수립에 기여하기 위한 목적으로, 주요 교통온실가스 감축정책의 저감 효과분석 방법론을 제시하고자 한다. 특히 연구결과의 실효성을 제고하기 위해, 본 연구범위는 제1차 기후변화대응 기본계획 등 국가온실가스 감축계획을 포함한다. 이를 위해 본 연구에서는 국가 감축방안에 주요하게 포함되거나 전문가 설문 조사로 선정된 전기차 보급 정책, 카풀, 자전거 정책 등 교통온실가스 감축의 주요 8개 정책 대상으로 정책과 온실가스 감축과의 인과관계를 검토하였고, 실제 교통수단별 통행 및 배출자료를 활용한 교통수단별 온실가스 배출량 원단위 분석을 포함하여, 수단효용함수 및 수요추정모형 등을 활용한 정책별 온실가스 감축잠재량 추정식을 정립하였다.

선행연구

교통온실가스 문제가 국제적 이슈로 부각되면서, 교통온실가스 배출량 산정연구 및 온실가스 감축을 위한 전략 연구는 2010년 이후 활발히 수행되고 있다. 전반적으로 2010년 초반에는 교통온실가스 배출량 산정을 위한 분석자료 연계 및 개별정책의 온실가스 감축량 산정방법 중심으로 연구가 진행되었다. Kim et al.(2010)는 교통온실가스 배출량 산정을 위한 국내외 방법론을 검토한 후 이동특성을 반영하기 위한 tier3 방법론 적용의 필요성을 제안하고 있으며, Lee(2010)는 자동차 주행거리 자료 기반의 상향식 접근방법을 통해 도로수송 온실가스 배출량 산정 모델을 개발하였고, Go(2012)와 Park et al.(2013)은 국가교통DB를 활용한 교통온실가스 배출 인벤토리 구축 및 배출량 산정방법을 제시하고 있다. 개별정책의 온실가스 감축량 산정연구로써 Jo(2010)은 국내외 교통온실가스 감축전략 중 우리나라에서의 실천 가능한 방안을 제시하였으며, Jung et al.(2011)은 기존 교통수요관리방안의 추상적·정성적 기대효과 제시를 극복하고자 교통수요관리 방안별로 시나리오를 설정하여 정책별 감축효과를 정량적으로 분석하였으며, Han(2013)은 국제비교를 통한 교통부문 온실가스 감축목표의 달성 가능성을 분석하고자 주요 사회경제

지표와 교통온실가스 배출량 간 관계를 활용하여 장래 감축잠재량을 살펴보았다. 이후 2010년 중반에는 기존 시나리오 및 기초자료 분석 중심의 배출량 평가연구에서 더 나아가, 교통수요모형 및 경제모형 등을 활용하거나 실증자료 분석을 통해 교통온실가스 감축정책을 평가하는 연구가 주로 수행되었다. Park(2013)는 DEA와 교통수요모형을 활용하여 온실가스와 대기오염 저감대책의 효율성을 분석하였고, Kim et al.(2016)은 LEAP 모형을 이용하여 저탄소차협력금제도의 온실가스 감축효과를 분석하였으며, Han et al.(2013)은 ASIF 모형을 이용하여 장래 신도시 교통부문 온실가스 배출량을 추정하였고, Lee et al.(2015)은 교통수요모형과 의사결정모형을 이용하여 자동차 배출저감 정책을 종합적으로 평가하였다. 그리고 Wu(2014)은 고양시와 창원시 공공자전거 이용자 자료를 활용하여 이용자 특성 및 승용차 대체에 의한 온실가스 감축효과를 분석하였으며, Lee(2015)는 국민들의 기후변화에 대한 인식이 대중교통인 지하철 이용활성화와 도로교통 부문 온실가스 감축에 미치는 영향 및 지하철 이용활성화가 도로교통 부문 온실가스 감축에 미치는 영향을 살펴보았다. 이후 최근에는 기존 도로대상에서 벗어나 대중교통 전환에 따른 온실가스 감축효과 중심으로 접근한 연구가 진행되고 있다. Wu(2013)은 기존 승용차에서 고속버스로 수단을 전환한 이용자특성을 중심으로 고속도로 휴게소 버스 환승 서비스 이용 특성을 분석하고 이러한 수단 전환에 따른 온실가스 감축효과를 분석하였으며, Kim et al.(2016)은 도로중심의 운송체계를 철도 등 친환경 교통체제로 전환함에 따른 온실가스 감축량을 배출 원단위 비교를 통해 분석하였고, Tiwari et al.(2016)은 인도 거주자를 대상으로 보행환경 및 버스인프라 개선에 의한 통행수단 분담, 연료소비, 온실가스 배출량 등을 분석하였다.

교통온실가스 배출평가와 관련된 선행연구 검토결과, 배출량 평가방법 연구는 기존 정성적 평가에서 최근 첨단 교통정보 등을 연계하여 다양화되고 있으며, 정책평가 방법론 연구는 기존 가상 시나리오 분석에서 대중교통의 전환효과 분석 등 폭넓은 연구가 수행되고 있는 것으로 나타났다. 다만, 선행연구는 대부분 개별정책 중심으로 접근하기에 다양한 정책들을 일관된 평가체제로 접근하지 못하는 한계가 있으며, 분석자료 또한 설문조사 및 특정현상 중심으로 접근하기에 일반화된 결론을 도출하기 어려운 한계점을 가지고 있다. 이러한 측면에서 본 연구는 정책과 교통온실가스 정책별 온실가스 배출량간의 연계구조 및 국가 공공DB를 활용한 분석 방법을 통해, 다양한 정책을 대상으로 일관된 평가체계에 기반 한 분석방법론을 제시한다는 점에서 선행연구와 차별된다.

교통온실가스 감축정책의 효과분석 방법론

1. 분석개요

교통부문의 온실가스 배출량은 교통활동도(Activity), 수단분담(Mode Share), 연료효율(Fuel Efficiency)로 결정되며, 현재 국가 온실가스 배출량도 수단별 교통활동도인 차종별 주행거리와 연료효율인 온실가스 배출계수를 통해 분석되고 있다. 따라서 교통온실가스 감축정책의 효과 또한 정책의 영향인자와 인자별 변화수준을 분석함으로써 도출할 수 있으며, 정책의 영향인자는 EEA (European Environment Agency) 기준으로 유형화된 개선, 억제, 전환 정책과 같은 유형별로 결정할 수 있다. 즉, 개선 정책은 배출계수 변화분, 억제 정책은 교통활동도 변화분, 전환 정책은 수단분담 변화분의 분석을 통해 온실가스 감축효과를 구조적으로 분석할 수 있는 것이다. 본 연구에서는 이러한 정책과 온실가스 감축요인의 인과관계 구조에 근거하여 교통온실가스 감축정책의 효과분석 방법론을 체계화하였으며, 이는 Figure 1과 같다.

본 연구에서 검토할 정책대상은 정책의 중요성 및 정량화 가능성 등을 고려한 전문가 델파이조사를 통해 선정하였으며, 최종적으로 개선 정책(저공해차 보급 정책, 평균 연비 및 CO₂ 배출기준 강화 정책, 에코드라이브 활성화 정책), 억제 및 전환 정책(승용차 공동이용제, 버스 교통체계개선 정책, 자전거 이용활성화 정책)의 정책을 포함하였다. 그리고 분석에 활용한 자료는 국토해양부의 자동차검사통합시스템(VIMS) 및 국가 온실가스 배출계수, 국가교통데이터베이스(KTDB)와 같은 국가 공식자료를 활용하였고, 분석에 활용한 모형은 통계분석을 통한 온실가스 발생량 및 감축량 산정모형, '도로 및 철도 부문 사업에 대한 예비타당성조사'의 교통수요모형, 선행 연구모형 등 정책의 분석구조에 적합한 모형을 활용하였다.

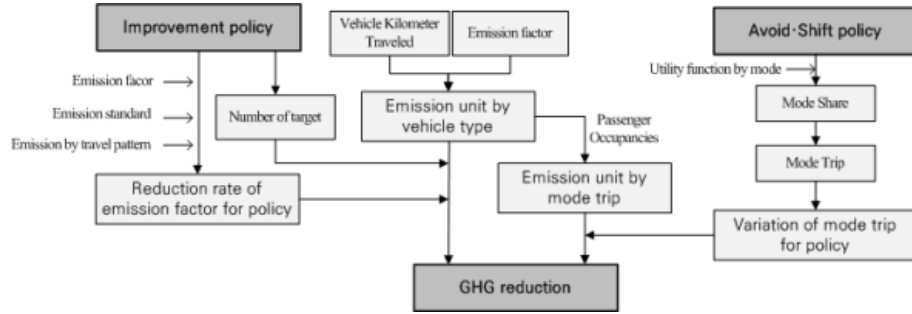


Figure 1. Proposed analysis method GHG reduction by transportation policies

2. 개선정책의 분석방법론

1) 방법론의 기본개념

개선정책은 자동차 총 주행거리 및 주행속도와 같은 교통활동도의 변화는 없으나, 기존보다 낮은 배출계수에 의해 온실가스 감축량이 발생되는 구조이다. 따라서 본 연구에서는 개선정책의 대상이 되는 자동차의 온실가스 배출량 원단위를 분석한 후, 여기에 개선정책에 따른 온실가스 배출계수 변화율을 적용하여 감축량을 산정하는 방법론을 Figure 2와 같이 제시하였다.

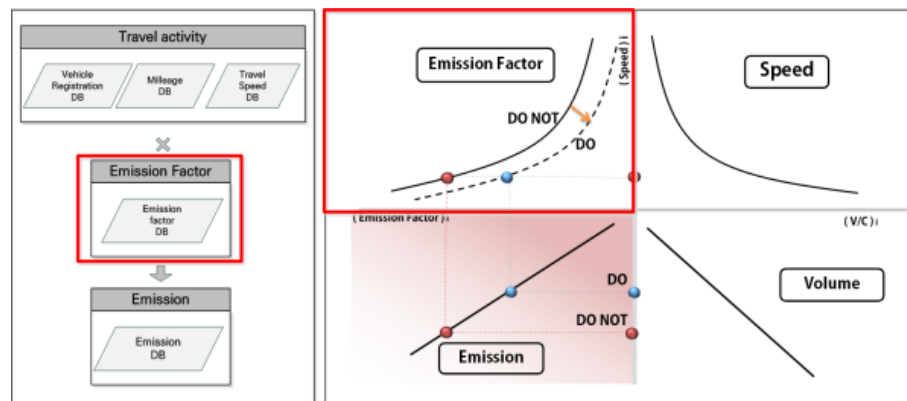


Figure 2. Proposed analysis method for greenhouse gas reduction potential of improvement policy

본 연구 방법론을 수식화하면 Equation 1과 같으며, 자동차의 온실가스 배출량 원단위와 정책별 배출계수 감축률이 분석방법론의 핵심인자로 적용되어 있다. 여기서, 자동차의 온실가스 배출량 원단위는 국토해양부 자동차검사 통합시스템(VIMS)의 자동차 유형별 총 주행거리 및 국가 대기오염물질 배출계수 등의 자료를 연계하여 구축된 아주대학교 도시교통배출평가시스템(UTEAS)으로 산정하였으며, 정책별 온실가스 감축률은 통계분석 및 선형 연구모형을 통해 도출하였다.

$$E.R. = E.U._r \times K_r \tag{1}$$

여기서, $E.R.$: 온실가스 감축량(톤/년)

$E.U._r$: 자동차 유형별(r)의 자동차 배출량 원단위(톤/대/년)

K_r : 정책(K)의 자동차 유형(r)별 온실가스 감축률(%)

본 연구를 통해 분석한 자동차의 온실가스 배출량 원단위 중 차종 및 사용용도별 원단위는 Table 1과 같다. 이는 국가 통계자료에 의한 세부 차종별 등록대수와 평균 주행거리(교통안전공단의 자동차종합관리 시스템), 차종별 온실가스 배출계수(국토교통부 고시)를 Fleets data 형태로 배열한 후, 세부 차종별 온실가스 배출량은 산정하고, 여기에 해당 차종의 등록대수로 나누어 산정된 결과이다. 2015년 기준으로 산정된 자동차 평균 온실가스 배출량은 4.16 (톤/대/년)이며, 화물차의 배출 원단위는 승용차(2.53 톤/대/년) 대비 약 3.5배 많은 8.9 (톤/대/년)으로 나타났다. 그리고 영업용 화물차의 배출 원단위(41.3 톤/대)가 가장 높으며, 자가용 승용차의 원단위(2.29 톤/대)가 가장 낮은 것으로 분석되었는데, 이는 자동차 유형별 총 주행거리 및 배출계수 차이 때문이다.

Table 1. The result of GHG emission estimates by vehicle type (E.U.)

(unit: ton/vehicle/year)

Vehicle type	Official vehicle	Business vehicle	Privately-owned vehicle	Total
Passenger car	2.45	8.15	2.29	2.53
Van	6.78	39.52	5.41	9.85
Truck	5.04	41.30	4.77	8.90
Total	4.49	24.92	2.82	4.16

2) 저공해차 보급정책

저공해차 보급정책은 전기차 및 하이브리드차 구매 보조금 지급을 통해 화석연료 차 대신 저공해차의 구매를 유도하거나, 신규 판매차의 평균 연비기준 및 CO₂ 배출기준을 강화하는 정책이다. 본 연구에서 도출한 저공해차 보급정책의 온실가스 감축량 산정식은 Equation 1이며, 관련계수(온실가스 감축률: K_r)는 Table 2와 같이 도출하였다.

저공해차 보급의 효과분석과 관련된 계수는 일반 화석연료차 대비 저공해차의 온실가스 배출수준으로 결정하였다. 가령, 전기차 보급에 따른 감축률은 화석 연료차의 평균 배출계수(휘발유: 192 g/km, 경유: 189 g/km) 대비 전기차 배출계수(94 g/km) 수준인 0.5로 산정하였다. 전기차의 경우 배기관에서 배출되는 온실가스는 없지만, 전기차의 전과정 평가(Life cycle)인 연료공급단계(원유추출, 원유수입, 석유정제, 국내분배) 및 자동차 운행단계의 에너지 사용(Well-to-Wheel)에 대한 정량화 분석을 통해 도출된 전기차 배출계수(Ministry of Environment, 2015)를 적용한 것이다. 이는 우리나라의 에너지 믹스(석탄 39%, 천연가스 23%, 원자력 29%, 기타 9%)를 고려한 것으로써, 분석시점 및 전제 등에 따라 결과의 가변성은 존재할 수 있다.

Table 2. Coefficients of GHG reduction by low emission vehicle supply policy (K_r)

	Electric vehicle supply policy	Hybrid vehicle supply policy	Fuel efficiency regulation	CO ₂ emission regulation
K_r	0.50	0.24	targeting fuel efficiency (r) / based fuel efficiency (r)	CO ₂ emission standard (r) / based CO ₂ emission (r)

note: 2014 based fuel efficiency (passenger car: 16.83, van: 13.21, truck: 12.87)

2014 based CO₂ emission (passenger car: 141.5, van: 200.4, truck: 206.0)

이와 같은 분석 전제아래, 하이브리드차 보급의 온실가스 감축률은 휘발유·경유차 대비 하이브리드차의 평균 이산화탄소 감축량인 0.24로 결정하였고, 신규 판매차의 평균 연비기준 및 CO₂ 배출기준 강화 정책의 온실가스 감축률은 현 판매차 대상의 배출기준 대비 배출목표로 설정하였다.

본 연구에서 제시한 방법론을 적용한 전기차 보급의 온실가스 감축잠재량은 Table 3과 같다. 즉, 전기차 보급의 온실가스 감축량은 연간 1.3톤/대 수준이며, 관용차·영업용차의 전기차 보급(1.38-4.17톤/대)은 자가용차(1.17톤/대)보다 더 많은 온실가스를 감축할 수 있는 것으로 분석되었다. 지역적으로는 제주도보다 서울시에서의 정책시행이 보다 효과적인 것으로 나타났으며, 이는 해당 지역의 통행속도, 차종 분포 등에 기인한 결과이다. 가령, 서울시는 제주도보다 중대형 승용차 비중 및 경유와 LPG 비중이 높고, 주행속도는 낮은 것으로 확인된다.

Table 3. Result of GHG reduction according to the electric vehicle supply (unit: ton/vehicle/year)

Region	Vehicle	Privately-owned vehicle	Official vehicle	Business vehicle
Seoul-si	1.47	1.27	1.75	5.67
Busan-si	1.42	1.26	1.36	5.75
Jeju-si	1.39	0.94	1.10	3.07
Gyeonggi-do	1.26	1.20	1.28	4.61
Sejong-si	1.14	1.11	1.08	4.49
Chungcheongbuk-do	1.03	0.96	1.25	3.78
South Korea	1.30	1.17	1.38	4.17

3) 에코드라이브 활성화 정책

에코드라이브 활성화 정책은 급가·감속, 공회전 등을 하지 않는 친환경·경제적 운전방식을 유도하는 기술 또는 정책으로써, 본 연구에서는 Equation 1과 해당 온실가스 감축률에 기반 한 효과분석 방법론을 제시하였다. 이때, 온실가스 배출량 원단위는 자동차 유형별 총 주행거리와 배출계수로 산정하였으며, 정속 주행 유도의 온실가스 감축률은 Lee and Choi(2016)의 연구결과인 급가감속 시 추가 연료소모량(0.102)을 적용하였고, 공회전시 온실가스 배출수준인 0.079-0.268 (Lee et al., 2014)을 적용하였다. 본 관련계수는 자동차운행기록계(On-Board Diagnostics, OBD)로 분석된 결과이며, 자동차의 정속주행과 공회전 방지 유도를 통해 각각 10%, 7.9-26%의 온실가스를 감축할 수 있음을 시사한다.

Table 4. Coefficients of GHG reduction by eco-drive activation policy (K_r)

Activation of cruise control	Activation of idling stop						
	Privately-owned vehicle	City bus	Large-sized bus	Small-sized truck	Middle-sized truck	Large-sized truck	
K _r	0.102	0.132	0.268	0.186	0.254	0.247	0.079

본 연구방법론을 적용한 에코드라이브 활성화 정책의 온실가스 감축효과는 Table 5와 같다. 경유 소형 화물차 대상의 정책효과(536톤/1천대)보다 LPG 중형 승용차 대상의 정책효과(655톤/1천대)가 더 큰 것으로 나타났으며, 이는 주행거리 및 온실가스 배출계수가 상대적으로 많은 택시(LPG 중형 승용차)의 경우 고비용 연료전환 정책이 아니라도 운전습관 개선 및 에코드라이브 기술과 같은 저비용 정책을 통해 상당한 온실가스 감축이 가능함을 시사한다. 또한 휘발유 및 경유차보다 LPG차의 에코드라이브 효과가 높은 것으로 나타났는데, 이는 주행거리가 긴 사업용차는 LPG를 연료로 사용함에 따른 결과로 확인된다. 본 연구결과는 에코드라이브 보조 장치의 장차보조금 지원 등을 위한 정책적 논거자료로도 활용이 가능하다.

Table 5. Result of GHG reduction by eco-drive activation policy (unit: ton/1,000 cars)

GHG reduction	Middle-sized vehicle			Small-sized van			Small-sized truck		
	Gasoline	Diesel	LPG	Gasoline	Diesel	LPG	Gasoline	Diesel	LPG
	334	385	655	41	207	499	209	536	415

3. 억제·전환정책의 분석방법론

1) 방법론의 기본개념

자동차 통행억제 및 수단전환 정책은 자동차 배출계수의 변화는 없으나, 고배출 자동차의 통행감소를 통해 온실가스 감축량이 발생하는 구조이다. 따라서 본 연구에서는 교통수단의 통행별 온실가스 배출량 원단위를 분석한 후,

여기에 교통수단별 통행량 변화율을 적용하여 온실가스 감축량을 산정하는 방법론을 Figure 3과 같이 제시하였다. 즉, 앞서 개선정책이 자동차의 온실가스 배출 원단위를 기준으로 온실가스 감축량이 결정되는 구조라면, 억제·전환 정책은 교통수단의 통행별 온실가스 배출 원단위를 기준으로 온실가스 감축량이 결정되는 차이가 있다.

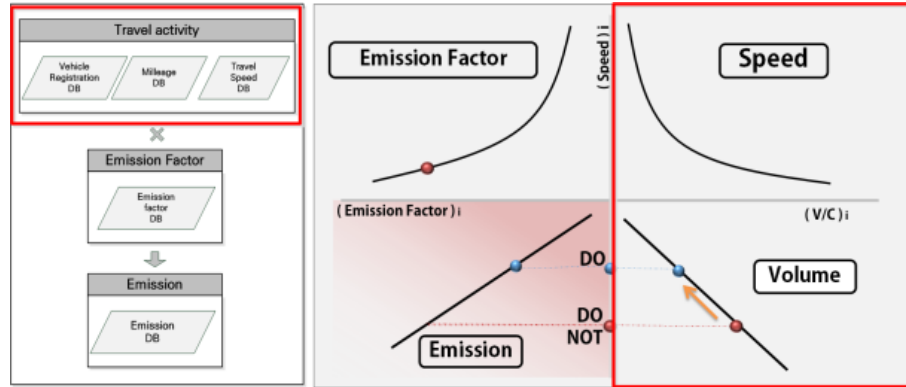


Figure 3. Proposed analysis method for greenhouse gas reduction potential of avoid·shift policy

본 연구에서는 앞서 분석한 자동차 기준의 배출량 원단위(Table 1)에 대해 차종별 재차인원(수도권 교통DB)을 적용하여 사람 기준의 배출량 원단위를 산정하였고, 여기에 차종별 통행량을 적용하여 수단별 통행 기준의 배출량 원단위를 산정하였다. 분석결과, 승용차 이용자의 평균 온실가스 배출량은 1.16 톤/통행/년이며, 버스와 지하철 이용자의 평균 온실가스 배출량은 각 0.22, 0.02 톤/통행/년인 것으로 나타났다. 이는 교통수단별 재차인원, 평균 통행 거리, 차종별 온실가스 배출계수 등이 종합적으로 반영된 결과로써, 승용차 이용자가 버스나 지하철로 통행수단 전환 시 각 0.94, 1.14 톤/통행/년의 온실가스 감축효과가 발생할 수 있음을 의미한다.

Table 6. Result of GHG emission estimates for mode trip

(unit: ton/trip/year)

Passenger car	Taxi	Bus	Subway	Bicycle · Walking
1.16	0.28	0.22	0.02	0

2) 자동차 공동이용 정책

자동차 공동이용 정책은 한대의 자동차를 여러 사람이 나누어 이용하거나 본인 소유의 자동차 대신 대중교통 이용을 유도하는 정책이다. 본 연구에서는 자동차 공동이용 정책 중 카풀 정책의 온실가스 감축 잠재량 분석방법론을 제시하였으며, 감축 잠재량은 카풀 이용에 따른 온실가스 감축 원단위에 참여인원의 곱으로 산정하는 구조이다. 카풀 이용에 따른 온실가스 감축 원단위는 기존 승용차·버스 통행자가 카풀을 이용함에 따라 기존 교통수단 이용 시 발생하였던 온실가스 배출량으로 결정하였다. 이때, 카풀은 하루 통행 중 출퇴근 통행에만 이용할 수 있는 정책이므로, 일평균 통행거리 대비 출·퇴근시 평균 통행거리에 해당하는 온실가스 배출량만을 고려하였다.

$$E.R. = E.U_{carpool} \times Q_{carpool} \tag{2}$$

$$E.U_{carpool} = E.U_p \times S_p \times TL$$

여기서, $E.R.$: 온실가스 감축량(톤/년)

$Q_{carpool}$: 카풀 참여인원

S_p : 통행수단별 수단분담률(%)

$E.U_{carpool}$: 카풀 이용에 따른 온실가스 감축 원단위(톤/인/년)

$E.U_p$: 수단 및 통행인당 온실가스 발생량(톤/인/년)

TL : 하루 평균 통행거리 대비 출퇴근 시 통행거리

카풀 참여에 따른 온실가스 감축 원단위는 Table 7과 같으며, 서울시 1.02 톤/인/년, 인천시 0.99 톤/인/년으로 분석되었다. 이는 서울시의 카풀 정책에 한명이 동참할 경우 연간 1.02톤의 온실가스를 감축할 수 있음을 의미하며, 앞서 산출된 수단별 통행 기준의 온실가스 발생량 원단위(Table 6), 수도권 교통DB를 통해 가공된 출퇴근 통행의 수단분담률 및 통행거리 등으로 분석된 결과이다. 인천시의 감축효과가 낮고 경기도가 높은 것은 지역별 통행거리 특성 차이 때문이며, 통행자가 하루 평균 배출하는 온실가스보다 소폭 낮은 것은 출퇴근 통행의 온실가스 감축량만을 고려하였기 때문이다.

Table 7. Unit load of GHG reduction by carpool (E.U._{carpool})

(unit: ton/person/year)

Seoul-si	Incheon-si	Gyeonggi-do	Seoul metropolitan area
1.02	0.99	1.11	1.02

3) 버스 교통체계개선 정책

버스 교통체계개선 정책은 버스노선 개편 및 환승체계 개선을 통해 버스이용의 경쟁력을 강화하는 정책으로써, 정책의 온실가스 감축 효과 분석 방법론은 버스 운영체계 개선에 따른 승용차의 감축 통행량과 승용차의 온실가스 배출량 원단위의 곱으로 설정하였다. 이때, 버스운영체계 개선수준에 따른 수단별 감축 통행량은 교통수요모형의 수단효용 함수식을 통해 도출하며, 본 연구에서 정립한 다음의 버스의 평균 운행시간 개선에 따른 온실가스 감축량 추정모형(수단별 통행시간 및 거리 산출 → 수도권의 수단분담모형 정립 → 수단별 효용 산정 → 통행시간 변화분 대비 수단별 통행변화량 추정 모형 정립 → 통행시간 변화분 대비 수단별 온실가스 감축량 추정)을 적용하였다.

$$ER = E_c \times K \quad (3)$$

$$K = |0.003 - 0.005 \times bt|$$

여기서, ER : 온실가스 감축량(톤/년)

E_c : 정책 시행지역(c)의 온실가스 배출량(톤/년)

K : 버스 교통체계개선에 따른 온실가스 감축률(%)

bt : 버스 평균 통행시간 감소분(분)

본 모형을 적용하게 되면, 버스 평균 통행시간(배차간격 등)이 3분 개선될 경우 승용차 온실가스 감축률은 1.21%로 나타난다. 경기도 수원시의 경우 2015년 기준 승용차 통행의 온실가스 배출량은 1,054,896 톤/년이므로, 버스 교통체계개선 정책에 따른 온실가스 감축량은 17,376톤으로 산정되며, 경기도 안산시의 경우는 이보다 적은 9,176톤의 온실가스 감축량이 발생하는 것으로 분석된다. 이는 각 지역의 평균 주행거리 및 수단분담률 차이 때문이며, 본 연구모형을 통해 지역별 교통·온실가스 배출특성을 고려한 정책효과 분석이 가능함을 시사한다.

4) 자전거 이용활성화 정책

자전거 이용활성화 정책은 자전거 도로 및 인센티브 정책 등을 자전거 수송 분담률을 제고하는 정책으로써, 자전거 통행증가량에 따른 차종별 감축 통행량과 수단별 통행 기준의 배출량 원단위의 곱으로 온실가스 감축량을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 자전거 이용활성화 정책 중 자전거 전용도로 구축에 따른 온실가스 감축량을 산정하였으며, 자전거 전용도로 구축에 따른 차종별 감축 통행량은 자전거 수요추정모형(Lee et al., 2011) 및 수도권 수단분담 특성(Metropolitan Transportation Authority, 2016)을 통해 결정하였다. 즉, 자전거 수요추정모형을 이용한 자전거 전용도로 구축에 따른 자전거 수요 분석 → 수단별 통행변화량 분석 → 수단별 온실가스 감축량 분석의 단계를 통해 최종적으로 Equation 4의 산정식을 도출하였다.

한편, 본 연구에 준용한 자전거 수요추정모형(Lee et al., 2011)의 자전거 수요증가량 산정식은 타 수단에서의 전환수요 외에 레저 자전거 이용과 같은 신규 자전거 수요도 포함된 것이므로 해석에 유의할 필요가 있다.

$$\begin{aligned} E.R. &= E.U_{bike} \times B \\ E.U_{bike} &= E.U_p \times S_p \times TB \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $E.R.$: 온실가스 감축량(톤/년)

$E.U_{bike}$: 자전거 전용도로 구축에 따른 온실가스 감축량(톤/km)

B : 자전거 전용도로 구축연장(km)

$E.U_p$: 수단 및 통행인당 온실가스 발생량(톤/인/년)

S_p : 통행수단별 수단분담률(%)

TB : 자전거 전용도로 구축에 따른 자전거 수요증가량(통행/년)(Lee et al., 2011)

또한 본 연구의 산정식은 수단별 분담률을 고려함으로써, 지자체의 수단분담률 또는 수단분담률의 변화에 따른 자전거 정책의 온실가스 감축량을 부가적으로 산정할 수 있다. 본 모형을 적용하게 되면, 수도권에 자전거 전용도로 1 km 건설 시 4.54톤/년의 온실가스가 감소하는 것으로 나타났으며, 경기도는 승용차 분담률이 상대적으로 높기 때문에 자전거 전용도로 건설의 온실가스 감축효과가 수도권 중 가장 큰 것으로 분석되었다.

Table 8. Result of GHG reduction by bicycle road project

(unit: ton/km/year)

Seoul-si	Incheon-si	Gyeonggi-do	Seoul metropolitan
3.08	5.77	6.26	4.54

연구 방법론의 적용 결과

본 연구에서 제시한 교통정책의 온실가스 감축잠재량 분석 방법론을 활용하여 주요정책을 평가한 결과는 Table 9와 같다. 자동차 구매 예정자에게 휘발유·경유차 대신 전기차를 구매하도록 유도할 경우 연간 1.17톤/대, 하이브리드차로 구매 유도할 경우 0.59톤/대의 온실가스가 감축되는 것으로 분석되었다. 승용차 평균 연비 및 CO₂ 배출기준을 약 20% 강화할 경우의 감축효과도 이와 유사한 수준인 0.51톤/대로 분석되었다. 소형 화물차의 공회전 방지 유도 정책은 0.91톤/대의 온실가스를 감축할 수 있으며, 이는 소형 화물차의 배출계수, 주행거리, 공회전 시간, 공회전 중 배출량 수준 등이 고려된 결과로써, 해당 요인들은 모두 높은 값을 나타내기 때문에 상대적으로 많은 온실가스를 감축할 수 있는 것으로 나타났다. 카풀 이용활성화 정책을 통해 이용자 1명이 자가용 대신 카풀을 이용할 경우 연간 1.02톤의 온실가스를 감축할 수 있는 것으로 분석되었으며, 이는 전기차 보급정책 효과보다는 소폭 낮은 수준인 것으로 나타났다. 이것은 카풀은 일상 교통활동 중 출퇴근 통행에만 활용되고 있기 때문으로 이해된다. 수원시의 버스통행시간(배차간격, 노선굴곡도 개선 등)이 평균 1분 개선될 경우 연간 3,105톤의 온실가스 감축잠재량이 발생하며, 이는 버스 효율의 증가에 따른 승용차 분담률 및 승용차 온실가스 배출량 감축효과로 나타난 결과이다. 또한 수원시에 1 km 규모의 자전거 전용도로를 구축할 경우 승용차 단거리 이용자들을 자전거 교통수단으로 통행전환 유도함에 따라 연간 6.26톤의 온실가스를 감축할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구결과는 자동차 온실가스의 영향인자인 총 주행거리, 배출계수, 수단분담률 등을 국가 통계자료에 기반하여 도출한 결과이므로, 국가 및 지자체 정책수립 시 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 각 정책별 예산규모 및 정책효과의 지속성 등을 종합적으로 고려하여, 교통온실가스 감축정책의 우선순위 결정에도 활용 가능할 것으로 기대된다.

Table 9. Result of potential for GHG reduction for transportation policies (unit: ton/year)

Policy	Electric vehicle supply	Hybrid vehicle supply	Fuel efficiency regulation	CO ₂ emission regulation
Contents	per electric vehicle	per hybrid vehicle	Strengthened by 20% (per vehicle)	Strengthened by 20% (per vehicle)
GHG reduction	1.17	0.59	0.51	0.51
Policy	Vitalization of idling stop	Carpool	Improving Bus Operation System	Bicycle road project
Contents	per small-sized truck	per person	per 1 minute improvement (Suwon city)	per 1 km construction (Suwon city)
GHG reduction	0.91	1.02	3,105	6.26

본 연구방법론을 활용하여, 온실가스 1만 톤을 감축하기 위한 정책별 사업규모를 분석한 결과는 Table 10과 같다. 즉, 온실가스 1만 톤은 전기차 8,547대 보급 정책을 통해 감축할 수 있으며, 하이브리드차 16,949대 보급 또는 연평균 승용차 판매대수인 137만대에 대해 16.88 km/l로 평균 연비를 강화하는 정책을 통해서도 동일한 감축효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 소형 화물차 10,989대를 대상으로 공회전 방지를 유도하는 정책은 전기차 8,547대의 보급과 동일한 수준의 온실가스 감축수준을 기대할 수 있으며, 버스 통행시간 3분 개선 또는 자전거 전용도로 1,597 km 구축도 동일한 정책효과가 발생하는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 전기차 보급 등 자동차 배출기준 강화 중심 정책과 더불어, 공회전 방지 및 버스 교통체계개선 등 저예산 및 교통편의 제고가 가능한 정책을 통해서도 동일한 수준의 온실가스 저감 효과를 기대할 수 있음을 의미한다.

Table 10. Transportation policies for GHG reduction of 1 million tons

Policy	Scale of policy
Electric vehicle supply	8,547 vehicles
Hybrid vehicle supply	16,949 vehicles
Fuel efficiency regulation	16.83 km/l → 16.88 km/l (137 million cars)
CO ₂ emission regulation	141.50 g/km → 141.05 g/km (137 million cars)
Activation of idling stop	10,989 vehicles
Carpool	9,804 persons
Improving bus operation system	3 minutes improved
Bicycle road project	1,597 km

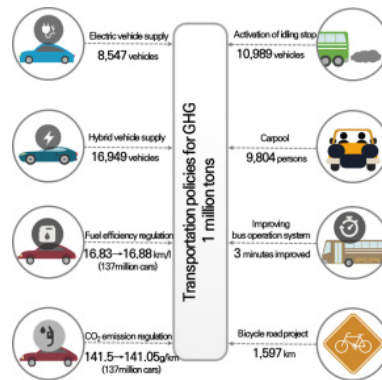


Figure 4. Transportation policies for GHG reduction of 1 million tons

한편, 본 연구결과는 각 정책들이 개별적으로 시행됨을 전제한 것으로서, 정책들이 복합적으로 실행될 경우 주행거리 및 배출계수 감축은 정책 간 중복되어 나타므로, 정책 수단간 감축배출량은 이중 계산 될 수 있다. 즉, 각 정책의 동시 실행에 따른 감축배출량은 본 연구결과보다 낮게 도출될 것이므로, 본 연구결과의 해석에 유의할 필요가 있다.

결론 및 향후 연구과제

본 연구는 교통온실가스 감축목표 설정 및 효과적 이행계획 수립에 기여하고자, 실제 교통수단별 통행 및 배출자료를 활용한 교통온실가스 감축정책 효과분석 방법론을 제시하였다. 최종적으로 개선 정책(저공해차 보급 정책, 평균 연비 및 CO₂ 배출기준 강화 정책, 에코드라이브 활성화 정책)은 자동차의 온실가스 배출량 원단위와 개선 정책에 따른 온실가스 배출계수 변화율을 적용한 감축량 산정방법을 제안하였고, 억제 및 전환 정책(승용차 공동이용제, 버스 교통체계개선 정책, 자전거 이용활성화 정책)은 교통수단의 통행별 온실가스 배출량 원단위와 교통수단별 통행량 변화율을 적용한 분석 방법론을 제시하였다. 자동차의 교통활동도 및 유형별 배출계수 자료 분석을 통해 온실가스 배출량 원단위를 분석한 결과, 승용차·승합차·화물차의 배출량은 각 2.53, 9.85, 8.9 (톤/대/년)이며, 승용차·버스·지하철 이용자의 통행 당 배출량은 각 1.16, 0.22, 0.02 (톤/통행/년)인 것으로 나타났다. 이는 교통온실가스 감축정책의 대상차종에 따라 효과가 다를 수 있으며, 승용차를 대체한 대중교통 중심도시 개발을 통해 저탄소화를 기대할 수 있으며, 본 연구는 이러한 사실을 정량적으로 확인하고 있다.

본 연구에서 제시한 교통온실가스 감축정책 효과방법론을 주요정책에 적용한 결과, 전기차 보급에 따른 온실가스 감축효과는 1.17 (톤/대/년) 수준이며, 소형 화물차의 공회전 방지 및 카풀 정책을 통해서도 각 0.91톤, 1.02톤의 온실가스 감축이 가능한 것으로 분석되었다. 그리고 그간 교통편의 증진 정책으로만 여겨졌던 버스 이용체계 개선 및 자전거 이용활성화 정책도 각 3,105톤(수원시 버스 통행시간 1분 개선 시), 6.26톤(수원시 자전거도로 1 km 구축 시)의 온실가스 감축효과가 발생하는 것으로 분석되었으며, 이는 자동차 배출개선 기술개발 외에 대중교통 이용활성화 정책도 상당한 온실가스 감축효과를 기대할 수 있음을 시사한다.

본 연구결과는 신기후체제 대응을 위한 국가 온실가스 감축계획 수립은 물론 지속가능 교통물류발전법에 근거한 지자체의 교통온실가스 감축정책의 평가체계에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 한편 본 연구는 다음과 같은 한계가 존재하며, 이는 향후 연구과제에서 해결하고자 한다. 첫째, 본 연구는 일부 연구결과 및 현재시점의 온실가스 감축 원단위를 기준으로 함에 따라, 장래 여건변화에 따른 수단별 통행특성 및 자동차 배출기술 개선에 따른 감축량을 능동적으로 산정하는 것은 한계가 있다. 가령, 본 연구에서 적용한 전기차 보급의 온실가스 감축효과는 전기 생산 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 고려한 것이기 때문에, 온실가스 감축수준은 국가 에너지믹스 정책 및 전기차 성능 향상에 따라 달리 산정될 수 있다. 따라서 보다 다양한 정책을 대상으로 하며, 장래 여건변화와 연계한 온실가스 감축정책 평가연구가 필요하다. 둘째, 에코드라이브 및 자전거 이용활성화 정책 등의 온실가스 감축효과에 적용한 방법론 및 관련계수들은 일부 선행연구결과를 준용한 것으로서 메타분석 등을 통한 연구결과의 신뢰성을 향상시킬 필요가 있으며, 특히 자전거 이용활성화 정책의 경우 공공 자전거 보급 및 인센티브 정책 등과 같은 다양한 정책수단의 효과분석 방법론 개발도 필요하다. 셋째, 온실가스 감축정책은 정량적 효과만으로 추진이 어려우므로, 각 정책 시행에 따른 사회적 불편성 및 경제적 파급효과 등을 종합적으로 분석하기 위한 방법론 개발이 필요하다. 아울러 최적의 비용편익 추구 측면에서 교통온실가스 감축정책 조합에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

REFERENCES

- Go G. H. (2012), Method of Calculation Regional Road Transport Greenhouse Gas Emissions Inventory, Using KTDB, Dongeui University, M. A.
- Han S. J. (2013), Feasibility of Greenhouse Gas Reduction Target in Transport Sector, *J. Transp. Res.*, 20(1), 67-77.
- Han S. J., Park K. Y., Park S. J. (2013), Estimation of Greenhouse Gas Emissions From Transport Sector in New Town Development, *Env. Policy Res.*, 12(4), 45-69.
- IEA (2013), IEA CO₂ Emissions From Fuel Combustion Database.

- Jo N. G. (2010), GHG Reduction Strategy for Land Transportation, *The Korea Spatial Planning Rev.*, 399, 32-43.
- Jung D. Y., Yoon J. H., Park S. W., Kim J. Y. (2011), The Strategies of Transport Demand Management to Decrease the Greenhouse Gases in Transportation Part, *J. Korean Soc. Transp.*, 29(1), 29-38.
- Kim M Y., Yoon Y J., Han J., Lee H S., Jeon U. C. (2016), Analysis of GHG Reduction Potential on Road Transportation Sector Using the LEAP Model: Low Carbon Car Collaboration Fund, Fuel Efficiency, Improving Driving Behavior, *J. Climate Change Res.*, 7(1), 85-93.
- Kim T. H., Lee S. I., Kim Y. I., Rho J. H. (2010), Improvement Study for Generated Greenhouse Gas(GHG) Amount Estimation From Transportation, *J. Korean Soc. Transp.*, 7(5), 69-79.
- Kim Y. J., Park J. H., Oh Y. H. (2016), Comparative Analysis on the Rail and Road Freight Transportation: Air Contaminant and Greenhouse Gas Emission, *J. Korea Acad.-Ind. cooperation Soc.*, 17(9), 94-101.
- Lee H. J. (2010), Basic Study on Development of Road Transport Emission Calculation System(ROTECS), *J. Korean Soc. Transp.*, 7(5), 81-89.
- Lee J. J. (2015), A Study of the Subway Utilization Awareness for Greenhouse Gas Reduction in Road Traffic Sector, Chung-Ang University, M. A.
- Lee K. J., Choi K. C. (2016), Analysis on the Correction Factor of Emission Factors and Verification for Fuel Consumption Differences by Road Types and Time Using Real Driving Data, *J. Korean Soc. Transp.*, 33(5), 449-460.
- Lee K. J., Jang J. A., Choi K. C., Shim S. W. (2014), Economic Effects Analysis for Passenger Car's Idle Stop and Go Strategy: Focusing on Seoul Metropolitan Area, *J. Korean Soc. Transp.*, 32(5), 421-430.
- Lee K. J., Kim G. W., Choi K. C. (2011), Development of Regression-based Bike Direct Demand Models, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 31(4), 489-496.
- Lee K. J., Park K. H., Shim S. W., Choi K. C. (2015), Evaluation of Mobile Emissions Reduction Strategies Using Travel Demand Model and Analytic Hierarchy Process, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 35(5), 1123-1133.
- Metropolitan Transportation Authority (2016), Passenger O/D Actualizing Project for Seoul Metropolitan Area on the Year of 2015.
- Ministry of Environment (2015), Korean Auto-oil Project (Analysis of the Life Cycle of Automobile GHG
- Park J. Y., Min Y. J., Jung T. Y. (2013), Development of KTDB Based Korean Greenhouse Gas Estimation Model in Transportation and Logistics, *J. Transp. Res.*, 20(2), 29-43.
- Park K. H. (2013), Efficiency Analysis of Greenhouse Gas and Air Pollutants Reduction Measures Using DEA and Travel Demand Models, Ajou University, M. A.
- Tiwari G., Jain D., Rao K. R. (2016), Impact of Public Transport and Non-motorized Transport Infrastructure on Travel Mode Shares, Energy, Emissions and Safety: Case of Indian Cities, *Transportation Research Part D, Transp. and Env.*, 44, 277-291.
- Wu S. K. (2013), GHG Emission Reduction Effect Analysis of Bus Transfer Service at Expressway Rest Areas Considering User Characteristics, *J. Transp. Res.*, 20(4), 41-54.
- Wu S. K. (2014), Public Bicycle User Characteristics and GHG Emission Reduction Effect, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 707-708.