

총 편익과 공 편익에 기반한 자동차 배출저감 정책의 통합관리 전략

이규진^{1*} · 박관휘² · 심상우¹ · 최기주³

¹아주대학교 TOD기반 지속가능 도시·교통연구센터, ²동부엔지니어링(주) 교통연구실, ³아주대학교
교통시스템공학과

Integrated Management Strategy of Vehicle Emission Reduction Policies Based on Total Benefits and Co-benefits

LEE, Kyu Jin^{1*} · PARK, Kwan Hwee² · SHIM, Sang Woo¹, CHOI, Keechoo³

¹TOD-based Sustainable City Transportation Research Center, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

²Department of Transportation Researcher, Dongbu Engineering Co., Ltd. Seoul 140-821, Korea

³Department of Transportation System Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

Abstract

This study aims to propose integrated management strategies based on the relationship between co-benefits and total benefits of greenhouse gases and air pollutant emissions for establishing a transport and environmental policy. The results show that the integrated management of the following policies: 'Car Free Day' and 'Early Scrapping of Decrepit Diesel Vehicle', which are used for reducing reduce gasoline and diesel, can together reduce both PM and CO₂ emissions and increase total benefits. In addition, the integrated management of 'Car Free Day' with environment policies and 'Congestion Charge' with environment policies simultaneously controls the three factors which influence emissions, including travel volume, travel speed and emissions factor, and was found to be effective in terms of co-benefits. This study reduces both air pollutants, which are harmful to health, and greenhouse gas emissions, which influence climate change, and improves the efficiency of policy through the integrated management of policies.

현재의 자동차 배출관리 전략은 단일 배출물질 중심의 정책 접근법으로 인해 정책 효과의 상호 중복이 발생하므로 이를 방지하고 효율적 예산 활용을 위해 통합적 시각에서의 교통-환경 정책을 수립할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 정책들의 개별 또는 통합 추진에 따른 총 편익과 공 편익의 비교를 통해 교통-환경 통합관리 전략의 시사점 도출을 목적으로 한다. 연구 결과, 휘발유와 경유를 함께 절감할 수 있는 '승용차 요일제 & 노후 화물차 조기폐차' 정책(MIX-4)의 통합관리가 PM과 CO₂를 함께 저감하여 총 편익이 높은 것으로 나타났으며, 배출량 영향인자인 통행량, 통행속도, 배출계수의 3요소를 동시에 제어할 수 있는 '승용차 요일제 & 환경 정책'(MIX-1~4), '혼잡 통행료 부과제 & 환경 정책'(MIX-5~8)의 통합관리가 공 편익 측면에서 더 효과적인 것으로 나타났다. 이러한 결과로 볼 때, 교통-환경 정책의 통합관리는 건강에 유해한 대기오염물질과 기후 변화에 영향을 미치는 온실가스를 동시에 저감시킬 수 있으며, 정책 추진의 효율성을 제고하는데 기여할 것으로 기대된다.

Keywords

air pollutants emission, co-benefits, greenhouse gases emission, integrated management, transport and environment policy
대기오염물질 배출량, 공 편익, 온실가스 배출량, 통합관리, 교통-환경 정책

* : Corresponding Author
transjin@ajou.ac.kr, Phone: +82-31-219-3252, Fax: +82-31-219-3253

Received 9 March 2015, Accepted 18 August 2015

서론

최근 에너지 부족 및 기후 변화는 국가 경제와 국민 건강에 직결되는 문제로 인식됨에 따라, 정부는 대기오염과 온실가스 감축을 위한 적극적인 정책을 시행하여 이러한 문제에 대응하고 있다. 그러나 대기오염물질과 온실가스물질은 모두 화석연료 사용이라는 동일 요인에서 발생하기 때문에, 대기오염 개선 정책은 대기오염물질 뿐만 아니라 온실가스 감축에도 기여하며, 반대로 온실가스 감축 정책 역시 온실가스와 더불어 대기오염물질 감축에도 영향을 미치고 있는 반면 관련 정책들은 특정 배출물질 관리에만 초점을 맞춰 수립되고 있는 실정이다. 또한 각 부처에서 추진되는 정책들도 상호 중복되는 효과가 발생할 수 있음에도 불구하고, 각 부처별로 단편적인 정책을 추진하고 있는 실정이다.

2014년 한국의 재정적자는 최근 10년간 2배 가까이 급증한 494조원에 달하여 국가의 재정 건전성이 강조되는 현 시점을 고려할 때 예산의 중복투자 문제는 정책 실행을 제한하기도 하며, 국가 경제에 부담이 되기도 한다.

따라서 통합적 시각에서 정책을 수립하고, 비용 효과적으로 접근할 수 있는 정책 관리 체계 구축은 중요한 사안이며, 이러한 관점에서 대기오염물질과 온실가스물질 저감 정책의 통합관리는 비용 효과적인 정책 수립에서 중요한 의미를 지닌다.

이에 본 연구에서는 대기오염물질과 온실가스물질의 통합관리에 따른 총 편익, 정책의 통합시행에 따른 공 편익의 발생 효과를 살펴보고, 교통-환경 통합관리 전략의 시사점을 도출하고자 한다. 이를 통해 구축되는 통합관리 전략은 정책 추진에 필요한 자원을 보다 효율적으로 배분하여 총 비용 절감에 기여할 것으로 기대된다.

관련 문헌 고찰

1. 기존 연구 고찰

통합관리 전략에 대한 주요 연구를 살펴보면, Cheong et al.(2011)은 통합적 환경관리 제도의 개념과 주요 국가의 통합 환경관리 모형을 검토하였으며, 통합 환경관리 제도를 추진하고 있는 국가가 그렇지 않은 국가에 비해 비용절감 및 환경개선 성과를 달성할 수 있는 가능성이 높다는 것을 'OECD 제2차 국가별 환경성과보고

서'에 근거하여 제시하고 있다. Korea Environment Institute(1996)은 배출업소 통합관리 체계의 도입 가능성을 검토하였으며, 중앙정부는 대형 및 유독물질 배출업소, 광역상수원 보호구역에 위치한 배출업소의 지도단속을 담당하고, 자치단체는 그 이외 업소를 담당하는 방안을 제안하였고, 환경오염시설의 통합관리에 관한 법률안을 제정하여 통합인허가 업무를 중심으로 한 통합오염관리체계의 도입을 제안하고 있다. Incheon Development Institute(2010)은 환경오염을 비용 효율적으로 줄이기 위한 목적으로 여러 대기 및 기후변화 정책의 통합관리를 진행 중인 미국과 유럽 등 선진국의 연구 사례를 조사하였으며, 기후변화 대책별 대기오염물질과 온실가스 저감량에 대한 비교 분석을 통해 통합 환경관리 인벤토리를 구축하는 것이 중요하다고 제안하고 있다. Jang (2012)은 LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning) 모형을 기반으로 부산광역시 도로수송부문을 대상으로 온실가스와 대기오염물질을 동시에 저감할 수 있는 대책 시행에 따른 동시 저감 효과를 추정하였고, 이를 통해 온실가스와 대기오염물질의 연계관리에 가장 효과적인 대책 및 부산시의 향후 통합 환경관리정책 전략 수립을 위한 시사점을 제시하였다. Korea Environment Institute(2010)은 대기관리 부문의 통합 환경관리 전략 분석이 가능한 최적화 모델을 개발하였고, 2006년 GHG-CAPSS (Greenhouse Gas and Clean Air Policy Support System) 데이터를 활용하여 온실가스 저감 대책, 대기환경 개선 대책, 대기오염물질과 온실가스 동시 저감이 가능한 통합 환경관리 전략의 3가지 시나리오에 관한 최적화를 실행하였으며, 대기오염물질 배출량의 10% 저감이 가능한 최소 비용의 정책을 도출하였다.

자동차의 배출저감 효과에 관한 선행 연구를 살펴보면, Rakha et al.(2000)은 에너지 소비와 자동차 배출량에 대한 교통신호시스템의 영향을 분석하기 위해 미시적 교통류 및 배출량 모형을 결합하였으며, 이를 기반으로 ITS (Intelligent Transport Systems) 등 교통신호시스템의 영향을 평가할 수 있는 방안을 제시하였다. Metha et al.(2001)은 다양한 ITS 운영전략에 대한 대기오염 영향을 평가하였으며, 교통계획 시 교통 및 환경 분야가 유기적인 체계를 유지하고 대기질을 평가할 수 있는 방법론 개발의 필요성을 제시하였다. Zietsman et al.(2004)은 대중교통에 의한 자동차 배출 저감량 및 이에 따른 경제적 효과를 분석하였다.

Hwang(2010)은 LEAP 모형을 이용하여 3개의 시나리오 구성을 통하여 온실가스 배출 저감량을 전망하였는데 시나리오 I은 2030년까지 하이브리드 차량이 45%를 차지하는 경우, 시나리오 II는 소형차 보급률을 2030년까지 선진국 수준인 60%로 끌어올리는 경우, 시나리오 III은 경유 승용차의 보급률이 증가하였을 때 예상되는 배출 저감량을 전망하였다. 시나리오 I은 기준안에 비하여 2030년에 약 5.57%, 시나리오II와 III은 각각 8.86%, 1.02% 감축효과가 있는 것으로 분석되었다. Ku(2011)는 2016-2026년의 부산광역시를 중심으로 교통수요모형을 통해 정책 시행 후 장래 차종별 통행량과 통행속도를 추정하여 지속가능 교통물류발전기본계획의 7개 교통수요관리 정책에 대한 온실가스 감축 잠재량을 산정하고, 이에 따른 발생 편익을 추정하여 정책들을 비교하였다. Gyeonggi Research Institute (2002)에서는 거시적 교통시물레이션 모형인 사통팔달을 이용하여 수도권별, 행정구역별, Grid별 배출량을 추정하였으며 환경부가 발표한 배출량에 비해 65%의 수준으로 낮게 추정되었으나, 그 원인은 산출 방법과 차량 총 주행거리의 차이라고 제시하고 있다. 또한 총 5개의 배출저감 대책 시나리오에 대하여 분석한 결과, 총 배출량과 비교해 출퇴근 시차제는 1%, 차량 10부제 운행은 7.6%, 광역철도 건설은 16.7%가 저감되는 것으로 나타났다. Lee et al.(2013)은 국립환경과학원의 배출계수와 EMMME/3모형을 활용하여 고속도로 상에 배출되고 있는 CO₂를 분석하였으며, 그 결과 2010년 기준으로 약 17.3백만 톤의 CO₂ 배출량이 고속도로에서 발생하는 것으로 나타났고, 전기차 보급 전망에 따라 2020년에는 약 12.8%의 온실가스 저감 효과가 발생하는 것으로 나타났다.

2. 통합 환경 전략¹⁾

통합 환경 전략(IES, Integrated Environment Strategy)은 단일매체별, 부분별 혹은 단편적 시각의 접근 방식을 지양하고 통합적인 관점에서 문제를 조명하고 해결해 나가는 방식으로써 환경시스템의 다매체적 특성과 오염물질의 매체 간 이동 등을 고려하여 각 매체별·오염물질별로 분화된 오염원의 규제를 하나의 전체 입장에서 체계적으로 파악하는 통합적 접근방법이다.

이는 개별 배출원별로 행해지는 오염물질의 매체별 배출관리를 통합시킴으로써 처리 비용 절감이 가능할 뿐만 아니라 해당 지역의 총량 관리를 통해 보다 목표지향적인 환경질(Environmental Quality)을 유지·달성할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 통합 환경 전략은 통합의 대상과 범위에 따라 다양한 유형으로 분류되는데 크게는 배출원의 통합, 오염물질의 통합, 지역의 통합 등으로 분류할 수 있다.

규범적으로는 대기환경보전법 제11조 6항 “대기오염 물질과 온실가스를 연계한 통합대기환경 관리체계의 구축”이 법규로 제시되어 있으며, 비용 효율적인 측면과 투자 제한성의 완화, 목표달성 효과 등을 고려할 때 통합관리가 매우 바람직한 것으로 알려져 있다.

한편 대기오염과 온실가스 감축 정책은 상호 보완적 효과를 가지는 경우도 있지만, 바이오 디젤과 같이 온실가스 배출 감소에는 효과적이거나 NOx의 과다 배출을 야기하는 등 한쪽의 배출 감소 정책이 다른 한편으로 배출 증가를 야기하는 경우도 있다. 따라서 온실가스와 대기오염물질간의 근원적 차이점을 이해하고 이에 대한 절충점 및 완화점을 모색하여 목적에 부합하고 비용 효과적인 연계 감축 정책을 수립할 필요가 있다.

3. 본 연구의 차별성

기존 문헌 검토결과, 최근 환경 분야 대상의 통합 환경 관리 전략에 대한 연구는 진행되고 있으나, 교통 분야에 초점을 맞추어 교통-환경 정책의 통합 환경 관리 전략에 대한 연구는 시도되지 않고 있다. 특히 통합 환경 관리 전략도 그 대상에 따라 다양하게 분류할 수 있으나, 현재까지는 대부분 오염물질의 통합적 측면에서 연구가 진행되었으며, 정책 통합에 대한 연구는 전무한 것으로 나타났다.

이러한 측면에서 단일 정책 중심으로 접근하고 있는 기존 연구들과 달리, 본 연구는 교통-환경 정책들의 통합 시행에 따른 효과와 오염물질들의 사회적 가치 등을 고려하여 나타나는 총 편익 및 공 편익을 분석하고, 정책 간 통합 추진에 따른 시사성을 도출한다는 점에서 선행 연구와 차별된다. 특히, 본 연구는 교통-환경 정책의 시행 부서 간 정책 연계의 중요성에 대한 논리적 근거를 제

1) Cheong et al.(2011)

시한다는 점에서 중요한 의미를 가진다.

또한 기존 연구에서는 정적인 관점에서 분석 시점의 교통 활동도와 배출계수 자료를 적용하고 있으나, 본 연구는 배출 영향요소들의 장래 가변성을 고려하여 장래 분석연도의 경과에 따른 배출계수를 적용할 수 있는 Lee et al.(2011)의 가변적 복합 배출계수를 활용하여 현실적인 장래 배출량 추정이 가능하도록 접근하였다. 그리고 교통수요예측모형을 이용하여 교통·토지 이용 측면의 변화를 고려한 배출량을 추정하고 있으며, 이에 따라 중장기적인 배출 저감 효과를 판단할 수 있는 평가체계를 제시한 점에서 기존 연구와 차별성이 있다.

분석범위 및 분석방법 설정

1. 분석범위

1) 단일 정책의 설정

자동차 배출 저감을 위한 단일 정책은 크게 교통수요 관리 등에 의한 통행량 감축, 자동차의 기술적 개선 또는 차종 변환에 의한 배출계수 개선으로 접근할 수 있다.

본 연구에서는 현재 시행 중이거나 장래 계획 중인 단일 정책들을 검토하여 실효성 높은 24개 정책을 선별하였고, 교통, 대기·환경, 자동차 부문 전문가 14인을 대상으로 AHP (Analytic Hierachy Process) 분석을

수행하여 해당 정책들의 중요도를 평가하였다. 이를 통해 승용차 요일제 정책, 혼잡 통행료 부과 정책, 버스전용차로 운영 정책을 포함한 3개의 교통수요관리정책 (Traffic Demand Management, 이하 TDM), 경차 보급 활성화 정책, 전기차 및 하이브리드 보급 정책, 노후 경유차 조기폐차 정책을 포함한 4개의 배출계수 개선 정책(Improve Strategy, 이하 IS)을 선정하였으며, 그 내용은 Table 1과 같다.

이때, 각 단일 정책의 시행 강도는 다음과 같이 설정하였다. 승용차 요일제 정책 (TDM-1)은 현재 각 대도시권(서울, 경기, 6대 광역시)에서 시행중에 있으며, 참여 현황을 살펴보면 2003년부터 시행된 서울의 경우 42.9%, 다른 광역시도의 경우 1.7-16.8%의 참여율을 나타내고 있다. 이에 본 연구에서는 서울시, 경기도, 6대 광역시의 승용차 요일제 참여율을 2017년 50%, 2023년 60%, 2027년 70%로 단계적으로 확대 시행하는 것으로 설정하였다. 혼잡통행료 부과 정책 (TDM-2)은 Korea Transport Institute(2010) 연구 결과를 인용하여 수도권 내 개방식 고속도로인 경인선, 제2경인선, 서울외곽순환선의 무료 구간 IC를 적용 구간으로 설정하였다. 버스전용차로 정책 (TDM-3)의 경우, Korea Transport Institute(2012)의 연구에서 제시하고 있는 서해안 고속도로와 서울외곽고속도로를 적용 구간으로 설정하였다. 경차 보급 활성화 정책(IS-1)은 선진국 수준의 경차 등록률을 목표로 2017년 15%, 2023년

Table 1. Design of single policy selected by AHP

	Policy	Contents and Assumption
TDM-1	Car-Free Day	- Car-Free day has been operated in Seoul, Gyeonggi, Incheon, Daejeon, Daegu, Ulsan, and Busan - Participation rate of Car-Free day a week will be 50% in 2017, 60% in 2023, and 70% in 2027.
TDM-2	Congestion Charge	- Build a system to receive a congestion charge on free section of the seoul metropolitan area expressway
TDM-3	Exclusive Bus Lane	- Operate a exclusive bus lane on Seoul Ring Road and Seohaean Expressway Maesong IC-Dangjin JC
IS-1	Small Vehicle Supply	- Registration rate of small vehicle will be 15% in 2017, 20% in 2023, and 25% in 2027 and traffic patterns will be same. - Registration rate of small vehicle is 8.7% when small vehicle supply is not performed
IS-2	Electric Vehicle (EV) Supply	- The number of EV will be 469,900 vehicles in 2017, 1,622,500 vehicles in 2023, and 2,390,900 vehicles in 2027 and traffic patterns will be same.
IS-3	Hybrid Electric Vehicle (HEV) Supply	- The number of HEV will be 378,700 vehicles in 2017, 928,300 vehicles in 2023, and 1,294,700 vehicles in 2027 and traffic patterns will be same.
IS-4	Early Scrapping of Decrepit Diesel Vehicle	- The number of early scrapping of decrepit diesel car will be 125,000 vehicles in 2017, 225,000 vehicles in 2023, and 375,000 vehicles in 2027. - The number of early scrapping of decrepit diesel truck will be 100,000 vehicles in 2017, 200,000 vehicles in 2023, and 300,000 vehicles in 2027. - Traffic patterns will be same

20%, 2027년 25%의 경차 등록을 가정하였으며, 전기 자동차 및 하이브리드 보급 정책 (IS-2, 3)은 정부의 그린카 산업 발전전략 및 과제로 계획한 저공해 자동차 로드맵 기준의 확대 보급 목표를 적용하였다. 노후 경유차 조기폐차 정책 (IS-4)은 수도권 대기환경관리 기본계획의 조기폐차 계획 규모인 연간 25,000대의 시행을 정책 범위로 설정하였다.

2) 통합 정책의 설정

배출량은 교통 활동도인 총 주행거리와 통행속도, 배출계수로 결정되나, 이러한 인자들은 서로 영향을 주고 있다. 이러한 관계는 Figure 1로 설명할 수 있으며, 교통량이 감소하게 되면(3사분면), 속도는 증가하게 되고(2사분면), 배출계수는 감소되는(1사분면) 인과관계가 형성되기 때문에, 단순히 교통량 감소분에 해당하는 배출량 절감효과 외에 추가적인 배출량 절감효과가 발생하게 된다. 이에 따라 본 연구에서 접근하고 있는 정책 중 TDM의 직접적인 효과는 통행량 감축에 따른 배출 저감 효과이지만, 추가적으로 교통류의 통행속도 개선에 따른 배출 저감 효과를 기대할 수 있다.

또한 배출계수를 개선하기 위한 정책과 교통 활동도를 개선하기 위한 정책들이 결합될 경우, 각 정책에 따른 배출량 영향인자들은 상호 영향을 주기 때문에 정책 조합에 따른 배출량은 일차원적으로 접근할 수 없는 부분이다.

이에 본 연구에서는 TDM과 IS 정책 조합에 의한 상호 작용 효과를 살펴보고 시사점을 도출하기 위해, Table 2와 같이 두 정책 그룹을 조합한 총 12개의 통합 관리 정책을 구성하였다.

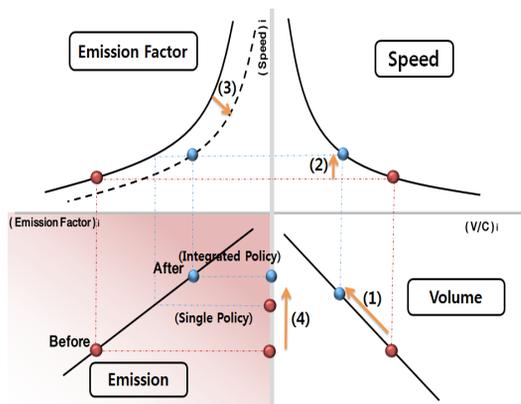


Figure 1. Relationship between emission and influence factors

Table 2. Design of integrated policy

Policy		
MIX-1	Car-Free Day	Small Vehicle Supply
MIX-2	Car-Free Day	EV Supply
MIX-3	Car-Free Day	HEV Supply
MIX-4	Car-Free Day	Early Scrapping of Deceprit Diesel Vehicle
MIX-5	Congestion charge	Small Vehicle Supply
MIX-6	Congestion charge	EV Supply
MIX-7	Congestion charge	HEV Supply
MIX-8	Congestion charge	Early Scrapping of Deceprit Diesel Vehicle
MIX-9	Exclusive Bus Lane	Small Vehicle Supply
MIX-10	Exclusive Bus Lane	EV Supply
MIX-11	Exclusive Bus Lane	HEV Supply
MIX-12	Exclusive Bus Lane	Early Scrapping of Deceprit Diesel Vehicle

3) 시간 및 공간적 범위 설정

기준년도의 경우 장래 수요를 예측하기 위한 통행배정 모형 정산의 기준이 되는 동시에 경제성 분석 시 현재 가치화의 기준 시점이 된다. 이에 본 연구에서는 분석 대상의 정책에 대한 주요 통계자료가 구축되어 있는 2012년을 기준년도로 설정하였으며, 순편익이 장기간에 걸쳐서 나타나는 정책의 저감 효과를 분석하기 위한 시간적 범위는 15년으로 설정하였고, 그에 따른 중간 목표연도는 2017년, 2022년, 2027년으로 설정하였다.

승용차 요일제 정책, 혼잡통행료 정책들은 주로 도시에 부어 해당되는 정책이나 친환경차 보급 대책, 노후차량 조기폐차 등과 같은 정책은 전국 단위로 효과가 기대되기 때문에 분석 자료의 공간적 범위가 상이한 문제가 있으며, 이로 인해 비 일관적인 결과를 초래할 수 있으므로, 본 연구의 공간적 범위는 전국권으로 설정하였다. 이에 따라 분석 자료는 전국권의 교통수요분석용 네트워크 및 O/D를 활용하였으며, 전국권 자료가 갖고 있는 낮은 상세 정도를 극복하고자, 기존 250개의 존 체계를 426개의 존 체계로 상세화하였다.

2. 분석방법

현재 국가 배출량은 TDA (Travel Demand Assignment) 방식의 대기정책지원시스템 (CAPSS, Clean Air Policy

Support System)으로 추정되고 있으며, 교통투자사업과 같은 정책 평가는 교통수요예측모형을 이용한 BUA (Bottom-up Approach) 방식으로 추정되고 있다 (Choi et al., 2009). 본 연구의 경우 향후 저감 대책에 대한 자동차의 공간적 통행 특성을 충분히 반영할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 장래 링크별 통행량 및 속도 자료가 필요하므로 교통수요예측 모형을 이용한 BUA 기법이 본 연구에 적절하다고 판단하여, TransCAD를 이용한 링크별 교통수요추정을 통해 배출량을 분석하였다. 즉, 배출량 산정식은 식(1)과 같이 총 주행거리와 속도에 대응하는 배출계수의 곱으로 각 링크별 배출량을 산출하고, 각 링크의 배출량을 집계하여 총 배출량을 산출하였다.

$$\text{배출량} = \sum_l \sum_{k=1}^3 (VKT_{lk} \times EF_v^{k,r}) \quad (1)$$

VKT_{lk} : 링크별(l), 차종별(k) 총 주행거리 (대-km)

EF_k : 차종별(k) 배출계수 (g/km)

k : 차종 (1:승용차, 2:버스, 3:화물차)

r : 배출물질 (CO, HC, NO_x, PM, CO₂, CH₄, N₂O)

v : 주행속도 (km/h)

분석 차종은 승용차, 버스, 화물차로 구분하였으며, 다수단 통행배정(Multi-modal Assignment) 기법을 적용하여 각 도로 이용자의 통행시간을 최소로 하는 사용자 균형 통행배정(User Equilibrium)을 통해 각 도로구간의 교통량을 추정하였다. 이때, 민자 고속도로를 포함하여 465개 구간을 대상으로, Table 3과 같이 오차를 30% 이내로 통행배정모형을 정산하여 현실을 모사하였다.

각 정책의 효과분석 방법은 Figure 2와 같으며, 분석 대상 배출물질은 대기환경보전법에서 규정하고 있는 대기오염물질 중 수송부문에서 배출되는 것으로 알려진 CO, NO_x, HC, PM과 자동차에서 배출되는 온실가스

Table 3. Calibration of traffic assignment model

	Summary
Observed Volume	26,173,242veh/day
Estimated Volume	26,214,660veh/day
Correlation	0.983
Mean Percentage Error	0.79%
Mean Absolute Percentage Error	9.55%

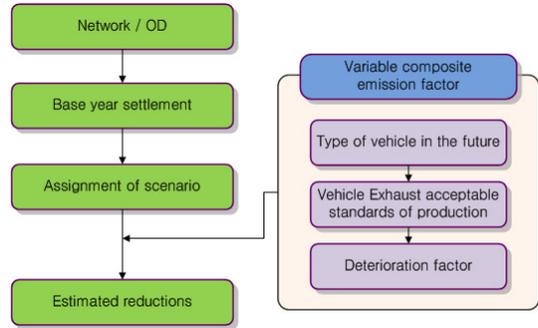


Figure 2. Flowchart of vehicle emission reduction analysis

중 CO₂, CH₄, N₂O로 설정하였다.

통합 관리 정책에 대한 효과분석 시 분석의 일관성을 유지하기 위해, 각 단일정책의 분석에 적용하였던 전제 조건들은 동일하게 적용하였다. 즉, '승용차 요일제 정책'과 '환경 정책'의 경우 승용차 요일제 정책의 효과분석을 위해 각 대도시권 내부 통행 O/D를 구축하여 통행 배정을 수행하되, 환경 정책에 따른 개선된 배출계수를 함께 적용하여 정책 시행에 따른 배출 저감량을 분석하였다.

'혼잡 통행료 정책'과 '환경 정책'의 경우도 혼잡 통행료가 포함된 도로망 네트워크와 통행 O/D를 기반으로 통행배정을 수행하되, 해당 환경 정책에 따라 개선된 배출계수를 함께 적용하였다. '버스전용차로 운영 정책'과 '환경 정책'도 네트워크에 버스전용차로를 구축 후 통행 배정을 수행하며, 개선된 배출계수를 함께 적용하여 정책 시행에 따른 배출 저감량을 산정하였다.

분석결과 및 통합관리 전략 제시

1. 분석결과

1) 배출 저감량 분석 결과

본 연구에서 적용한 링크 기반의 별도 배출량 산출 모형을 TransCAD을 이용하여 통합정책의 배출 저감량을 분석하였으며, 각 정책에 대한 2017-2027년간의 자동차 배출물질별 누적 배출 저감량은 Table 4와 같다.

온실가스 배출 감축 효과가 높은 승용차 요일제, 경차 보급 활성화, 하이브리드 보급 활성화 정책들에 대한 통합 정책은 온실가스 감축 뿐 아니라, 상당한 대기오염 물질도 감축시키는 것으로 분석되었다. 반대로 PM과

Table 4. Vehicle emission reductions by integrated policy

(unit: ton/10years)

	CO	HC	NO _x	PM	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
MIX-1	33,324	1,731	22,183	704	9,040,284	200	1,726
MIX-2	28,389	1,819	18,572	551	9,435,710	755	1,671
MIX-3	23,734	1,667	16,370	498	7,546,621	601	1,304
MIX-4	18,509	1,003	20,612	690	9,386,924	626	1,294
MIX-5	16,014	363	9,687	318	3,804,870	350	868
MIX-6	10,939	433	5,547	152	4,213,769	340	803
MIX-7	5,928	246	2,888	83	2,173,661	176	410
MIX-8	8,673	835	12,176	384	4,141,864	205	361
MIX-9	22,047	1,006	13,434	413	4,326,619	270	1,032
MIX-10	16,905	1,091	9,362	246	4,711,567	407	965
MIX-11	11,791	922	6,884	184	2,666,143	240	569
MIX-12	14,856	1,533	16,082	482	4,664,675	277	548

Table 5. Social value of vehicle emission (2010)

	Basic Unit (won/kg)
CO	10,739
HC	12,481
NO _x	12,922
PM	80,123
CO ₂	166
CH ₄	3,486
N ₂ O	51,460

NO_x과 같은 대기오염물질을 감축시키는데 효과적으로 알려진 노후 경유차 조기폐차 정책, 버스 전용차로제 정책은 대기오염물질과 더불어 온실가스도 함께 저감시키는 것으로 분석되었다. 이는 자동차에서 발생하는 대기오염물질과 온실가스는 화석에너지의 연소 과정에서 동시에 발생되기 때문으로 이해할 수 있다.

물론, 통합 관리 정책들 간에도 특정 배출물질을 저감하는 효과는 차이가 있는 것으로 나타났다. 대기오염물질 중 CO(33,324톤)와 NO_x(22,183톤) 저감 측면에서는 '승용차 요일제 정책'과 '경차 보급 활성화 정책' 조합(MIX-1)이 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 이는 승용차의 활동도 감축과 더불어 기존 중대형 승용차의 배출계수가 경차의 배출계수 수준으로 낮아짐에 기인한 결과로 사료된다. HC(1,819톤)와 CO₂(9,435,710톤) 저감 측면에서는 '승용차 요일제 정책'과 '전기차 보급 정책' 조합(MIX-2)이 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 이는 휘발유를 주 연료로 사용하는 승용차의 배출을 원천적으로 감축시키는 정책 조합이기 때문으로 판단된다.

즉, 교통 활동도 억제를 유도할 수 있는 정책과 배출계수 저감을 유도할 수 있는 정책의 통합은 다양한 배출물질에 대한 유효한 배출저감 효과를 발생하는 것으로 나타났다.

2) 총 편익과 공 편익의 분석 결과

Table 4의 분석 결과와 같이 통합 정책은 다양한 배출물질의 발생량을 저감시키나, 배출물질별로 저감 정도는 차이가 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 배출물질의 통합 관리에 의한 정책 효율성을 평가하고자 하며, 이를 위해 각 배출물질의 가치를 비용화한 편익 지표를 활용하였다. 이는 단일 정책과 통합 정책 간의 효과 비교에도 유용하기 때문이다.

각 배출물질의 가치를 비용화하기 위한 사회적 비용 원단위는 Table 5와 같이 Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2011)의 배출물질별 사회적 비용 원단위에 대해 2010년 기준으로 환산하여 활용하였다. 다만, 해당 자료에서는 온실가스 중 CO₂의 가치만 제시되고 있기 때문에 CH₄와 N₂O의 사회적 비용 원단위는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)(2006)에 근거한 온실가스별 지구온난화지수를 적용하여 추정된 값을 활용하였다.

이때 분석년도(15년간)의 누적 편익을 산정하여 비교하였으며, Korea Development Institute(2008)에서 제시된 할인율 5.5%를 적용하여, 동일한 시점을 기준으로 할인 편익을 산정하였다.

Table 6. Benefits by integrated policy

(unit: one million won)

Integrated Policy			Benefits				
	Transport Policy (A)	Environment Policy (B)	Total benefits		Co-benefits		Difference (2-1)
			A	B	A+B (1)	A&B (2)	
MIX-1	Car-Free Day	Small Vehicle Supply	638,744	613,350	1,252,094	1,562,709	+310,615
MIX-2	Car-Free Day	EV Supply	638,744	494,230	1,132,974	1,463,279	+330,305
MIX-3	Car-Free Day	HEV Supply	638,744	231,665	870,409	1,221,703	+351,294
MIX-4	Car-Free Day	Early Scrapping of Deceprit Diesel Vehicle	638,744	620,825	1,259,569	1,443,009	+183,440
MIX-5	Congestion charge	Small Vehicle Supply	66,867	613,350	680,217	683,127	+2,910
MIX-6	Congestion charge	EV Supply	66,867	494,230	561,097	569,170	+8,073
MIX-7	Congestion charge	HEV Supply	66,867	231,665	298,532	303,148	+4,616
MIX-8	Congestion charge	Early Scrapping of Deceprit Diesel Vehicle	66,867	620,825	687,692	687,844	+152
MIX-9	Exclusive Bus Lane	Small Vehicle Supply	253,692	613,350	867,042	854,764	-12,278
MIX-10	Exclusive Bus Lane	EV Supply	253,692	494,230	747,922	740,620	-7,302
MIX-11	Exclusive Bus Lane	HEV Supply	253,692	231,665	485,357	477,278	-8,079
MIX-12	Exclusive Bus Lane	Early Scrapping of Deceprit Diesel Vehicle	253,692	620,825	874,517	865,777	-8,740

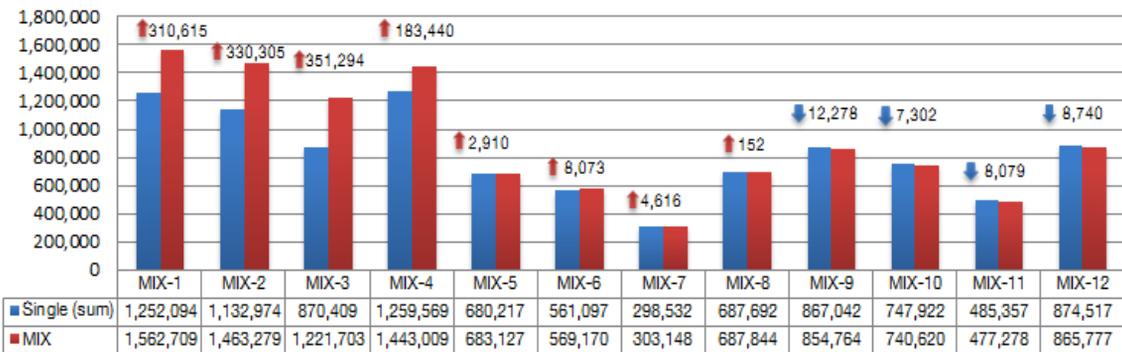


Figure 3. Benefits by integrated policy

통합 관리 정책들의 배출 저감 효과를 총 편익과 공 편익으로 구분하여 산정한 결과는 Table 6과 같다. 여기서 총 편익은 단일 정책의 시행에 따른 각 편익의 합을 의미하며, 총 편익에는 대기오염물질과 온실가스 저감 편익의 동시 저감 효과를 포함한다. 공 편익은 두 정책이 동시에 시행되어 발생하는 편익으로써 두 정책이 각각 시행되는 경우와 비교하여 중복 편익 또는 증분 편익이 포함되는 차이가 있다. 또한 공 편익에도 두 정책의 동시 시행에 따른 대기오염물질과 온실가스 저감 편익이 포함된다. 즉, 본 연구에서 다루고 있는 총 7개의 단일 정책들에 대한 대기환경 편익은 별도의 모델을 통해 TransCad를 이용하여 분석하였고, 그 결과는 Table 6에서 A와 B의 값이 이에 해당된다. 12개 통합정책들에 대한

편익도 별도의 모델로 구축되어 A&B의 결과에 기재되어 있다. 그리고 Table 6에서 'Difference'는 통합 정책이 시행됨에 따라 추가적으로 발생된 효과를 나타내고 있다.

통합 관리 정책에 대한 효과를 분석한 결과, '승용차 요일제 정책'과 환경 정책 조합(MIX-1~4)의 효과가 대체로 높은 것으로 나타났으며, 배출계수 변화를 가져오는 환경 정책 중 '경차 보급 정책'과의 조합(MIX-1)이 효과가 높은 것으로 도출되었다. 이는 승용차 요일제가 적용되는 통행 일에는 중대형 승용차의 통행거리 절감이 발생하며, 승용차 요일제가 적용되지 않는 요일에도 보다 낮은 승용차의 배출계수가 적용되는 효과가 동시에 발생하기 때문으로 사료된다. 즉, 교통-환경 통합 관리

정책을 통해 정책 실효성을 높일 수 있으므로, 정책 부처들의 상호 연계를 통한 통합 관리 정책의 필요성을 확인할 수 있다.

사용연료를 기준으로 통합 관리하는 정책들도 건강에 직결되는 대기오염물질(PM, NO_x 등)과 지구 온난화에 영향을 미치는 온실가스물질(CO₂ 등)을 동시에 저감하여 총 편익이 높은 것으로 확인되었다. 예를 들어 휘발유 사용 억제에 따른 CO₂와 경유 사용 절감에 따른 PM의 동시 저감 효과가 기대되는 '승용차 요일제' 정책과 '노후 경유차 조기 폐차' 정책(MIX-4)의 통합 관리가 총 편익 측면에서 가장 우수한 것으로 도출되었다.

단일 정책들의 개별 효과에 대한 총 편익과 통합 정책의 공 편익을 비교하여 살펴보면, '승용차 요일제 정책'과 환경 정책(MIX-1~4), '혼합 통행료 정책'과 환경 정책(MIX-5~8)의 경유 통행량 감소, 속도 증가, 배출계수 감소를 유발하여 각 정책의 단순 편익의 합계보다 두 정책을 동시에 시행함으로써 얻을 수 있는 공 편익이 높은 것으로 나타났다.

즉, 배출량 영향인자인 통행량, 통행속도, 배출계수의 3요소를 동시에 억제할 수 있는 통합 관리 정책이 높은 공 편익을 나타내는 것으로 확인되었다. 이러한 통합관리 정책에 대한 배출량 영향인자들의 인과관계를 Figure 1을 통해 살펴보면, 승용차 요일제 정책에 따른 통행량 감소(1), 통행량 감소에 따른 통행속도 증가(2)와 환경정책에 따른 배출계수 감소(3)가 동시에 이루어짐에 따라 공 편익(4)은 단일 정책의 편익보다 높아질 수 있는 것으로 이해된다.

그러나 '버스전용차로제 확대' 정책과 환경 정책의 통합 시행의 경우 버스의 통행속도는 증가시키는 긍정적 요소가 있으나, 반대로 승용차와 화물차가 주행하는 일반차로의 통행속도를 감소시키는 부정적 요소로 인해 두 정책의 공 편익은 단일 정책들의 총 편익보다 낮은 것으로 나타났다.

이러한 결과를 통해, 배출량은 자동차 통행량, 통행속도, 배출계수에 의해 종합적으로 결정되므로 이러한 영향요소를 동시에 강화시킬 수 있는 통합 관리 정책이 공 편익과 총 편익을 모두 증대시킬 수 있다는 사실을 확인하였으며, 자동차 총 주행거리와 통행속도, 배출계수 역시 인제관계에 따라 상호간에 영향을 주기 때문에, 그 인자 간의 연계성에 대한 이해를 바탕으로 교통-환경 통합 관리 정책의 평가가 이루어질 필요가 있다고 사료된다.

2. 통합관리 전략의 시사점 도출

대기오염물질 및 온실가스 배출 감축 목표를 정하는 것은 특정 연도에 특정 기준의 발생량을 유지하기 위한 것이며, 이를 위해 다양한 분야에서 배출 감축량을 설정하고 정책을 수립하게 된다. 배출 감축량을 산정하는 것은 명확한 수리적 과정이기 때문에 논리적인 순서에 따라 계량적인 체계로 계산할 수 있다. 다만 단일 정책의 경우는 영향 요소들 사이의 연결고리가 비교적 간단하나, 통합 관리 정책의 경우는 영향 요소들 간의 연계가 복잡하고 순환적 관계가 있으므로 복잡한 인과관계에 대한 충분한 이해를 기반으로 접근되어야 한다.

공간적 측면에서 자동차 배출량은 다른 고정 배출원과 달리 이동 배출원의 형태이기 때문에 고정 배출원에 비해 배출원의 추적이 어려우며 특정 지역에서 시행하는 저감 정책은 다른 지역의 발생량을 증가시키거나 감소시키게 된다. 즉, 통행 경로를 변경하거나 교통 인프라를 축소하는 정책의 경우는 정책이 적용되지 않은 권역의 통행을 증가시키거나, 교통 인프라 축소로 인한 정체 현상으로 인해, 거시적 관점에서는 정책의 배출 효과를 경감시키거나 오히려 악화시킬 가능성도 충분히 존재하므로 공간적 관점에서도 정책 통합은 중요한 의미를 지닌다. 따라서 버스전용차로제, 혼합통행료 정책과 같이 일부 권역의 통행을 증가시킬 수 있는 정책들은 광역적인 연계 관리 시스템을 구축하여 지속적인 모니터링 및 관리가 필요하며, 비 대상권역에 대한 부정적 영향을 최소화할 수 있는 환경 정책과의 통합 관리 방안을 마련해야 한다.

대부분의 TDM 정책은 통행발생을 억제하여 에너지 사용을 절감시키므로 대기오염물질 및 온실가스 배출량을 동시에 저감시킨다. 이에 따라, TDM 정책은 다수 배출물질의 동시 저감 효과가 높으며, 배출물질의 통합 관리 측면에서도 유용한 정책인 것으로 판단된다. 반면, 경유 유류세 및 자동차 탄소세 조정 등과 같이 특정 배출물질 저감에 초점을 둔 정책들은 휘발유 사용 증가 또는 주행거리 증가를 야기하여 추가 배출물질들을 유발시킬 수 있다. 따라서 추가 배출물질들을 동시에 제어하기 위한 보완적 정책들의 통합 시행을 통해 다수 배출물질의 저감 효과를 극대화할 필요가 있다.

또한 본 연구결과와 같이 정책들 간 통합 관리 측면에서 교통 활동도를 감소시키는 정책과 배출계수를 강화시키는 정책의 통합 관리는 공 편익을 증대시키는 것으로

확인되었으므로 배출량의 영향요소 및 배출특성의 이해를 토대로 최적의 연계 관리전략 및 감축 시나리오를 개발해 나가는 과정을 통해 통합 관리 정책의 효율성을 확보할 필요가 있을 것이다.

결론 및 향후 연구 과제

본 연구는 자동차 배출물질 저감을 위한 기존 단일 정책별 접근 방식과 차별되는 대기 통합 관리 정책의 효과를 분석하고 그 시사점을 도출하였다. 이를 위해 온실가스와 자동차 배출물질의 통합 관리에 따른 총 편익과 다수 정책 시행에 따른 공 편익을 분석하였으며, 주요연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 교통-환경의 통합 관리 정책은 건강에 직결되는 대기오염물질(PM, NOx 등)과 지구 온난화에 영향을 미치는 온실가스물질(CO₂ 등)을 동시에 저감하여 총 편익이 높은 것으로 확인되었다. 특히, 휘발유 사용 억제에 따른 CO₂와 경유 사용 절감에 따른 PM의 동시 저감 효과가 기대되는 '승용차 요일제' 정책과 '노후 경유차 조기 폐차' 정책의 통합 관리가 총 편익 측면에서 가장 우수한 것으로 도출되었다.

둘째, 배출량 영향인자인 통행량, 통행속도, 배출계수의 3요소를 동시에 억제할 수 있는 정책들이 통합 관리 시 공 편익이 대체로 높은 것으로 확인되었다. 특히, 자동차 통행량을 억제할 수 있는 '승용차 요일제' 정책과 이들 배출원의 배출계수를 저감할 수 있는 '경차 보급 활성화' 정책의 통합관리가 공 편익 측면에서 효과적인 것으로 도출되었다.

셋째, 배출량 영향인자 사이의 부정적 영향을 최소화하고 정책 효과의 효율성을 증대시키기 위해서는 통합 관리 정책 간 영향요소들의 전후 관계에 대한 명확한 이해를 바탕으로 한 정책 발굴이 필요함을 확인하였다. 즉, '버스전용차로제 확대' 정책과 환경 정책의 통합 시행의 경우 버스의 통행속도는 증가시키는 긍정적 요소가 있으나, 반대로 승용차와 화물차가 주행하는 일반차로의 통행속도를 감소시키는 부정적 요소로 인해, 두 정책의 공 편익은 단일 정책들의 시행에 의한 총 편익보다 낮은 것으로 분석되었다.

본 연구는 통합 관리 전략의 배출저감 특성에 대한 이해를 증진시키고, 향후 교통-환경 통합 관리 전략의 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대하나, 한계점 또한 분명하다. 먼저 본 연구에서는 각 저감 정책별 상위계획에 근

거하여 분석 범위를 설정하였으나, 각 정책들은 기본적으로 분석 가정과 범위에 의한 국한된 결과라는 한계점이 있다. 또한 교통수요모형을 이용한 활동도 자료를 통한 장래 저감 잠재량을 평가하였으나, 교통수요 예측단계에서 반영되었던 토지이용계획이나 대규모 교통유발시설계획 등의 변경, 계획 시행의 지연 및 취소 등이 장래 교통수요의 과대 및 과소예측의 원인으로 작용할 수 있으며, 장래 통행패턴의 불확실성이 내재되어 있을 가능성이 있으므로, 배출량의 인과관계에도 영향을 미쳐 배출량 산정 결과의 불확실성을 초래할 여지가 있다. 즉, 본 연구에서 적용한 정책 대안과 정책 조합에 따른 정량적 기대효과는 분석전제에 따라 충분히 가변적인 것으로써 본 연구의 결과를 정책 우선순위의 판단 자료로 직접 활용하기에는 무리가 따른다. 마지막으로 정책들의 비용도 함께 고려할 수 있는 통합 관리 체계 마련이 필요하므로 온실가스와 대기오염물질간의 근원적 차이점을 이해하고 이에 대한 절충점 및 완화점을 모색하여 합목적적이고 비용 효과적인 정책 관리 체계를 마련하는 연구 및 대기오염물질들의 광화학적 작용에 따른 2차 오염물질까지 관리할 수 있는 통합적 접근에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea Government(MSIP) (NRF-2010-0028693).

REFERENCES

- Cheong J. P., Shin Y. S., Im S. B., Shin K. W., Kim C. H. (2011), Case Study Analysis and Evaluation for Integrated Environmental Management System, Rainbow Books.
- Choi K. J., Lee K. J., Ahn S. C. (2009), An Improvement of Bottom Up Approach for Estimating the Mobile Emission Level, J. Korean Soc. Transp., 27(4), Korean Society of Transportation, 183-193.
- Gyeonggi Research Institute (2002), Estimating Automotive Emission Levels in SMA and Evaluating Transport-related Environment Policies.
- Hwang B. K. (2010), Analysis and Prospection Green

- House Gas Emissions in Korea by Using Bottom-Up Model, Master's Thesis, Keimyung University.
- Incheon Development Institute (2010), Integrated Environmental Strategy for Air Pollutants and Greenhouse Gases in Incheon.
- IPCC (2006), IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Institute for Global Environmental Strategies and IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme Technical Support Unit.
- Jang J. H. (2012), Evaluation of Co-reduction Effect of GHGs and Air Pollutants by Road Transport Sector Policies in Busan Metropolitan City, Master's Thesis, Kyungsoong University.
- Korea Development Institute (2008), Korean Preliminary Feasibility Study Guidebook (5th).
- Korea Environment Institute (1996), Management of Integrated Pollution for Discharging Store (배출업소에 대한 통합오염관리방안).
- Korea Environment Institute (2010), Integrated Environmental Strategies (6th).
- Korea Transport Institute (2010), A Study on Expressway Congestion Charge.
- Korea Transport Institute (2012), A Review of the Effectiveness and Feasibility of HOV Lane on Highway.
- Ku Y. H. (2011), Assessing the Potential Greenhouse Gas Emission Reductions of Transportation Demand Management Policies Using Travel Demand Model, Master's Thesis, Kyungsoong University.
- Lee J. K., Han D. H., Oh C. K., Oh K. K. (2013), Expressway Greenhouse Gas Reduction Effect Analysis According to the Electric Vehicle Supply, J. Korean Soc. Transp., 31(5), Korean Society of Transportation, 37-47.
- Lee K. J., Choi K. J., Yu J. W., Oh S. C. (2011), Variable Emission Factor Prediction Model for An Air Quality Assessment of Transportation Projects, J. Korean Soc. Transp., 29(6), Korean Society of Transportation, 117-128.
- Metha T., Mahmassani H. S., Bhat C. R. (2001), Methodologies for Evaluating Environment Benefits of Intelligent Transportation Systems, Report No. FHWA/TX-04197-1, Center for Transportation Research (The University of Texas at Austin), Austin, Texas.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), Transportation Facility Investment Evaluation Guidelines (4th).
- Rakha H., Van Aerde M., Ahn K., Trani A. A. (2000), Requirements for Evaluating Traffic Signal Control Impacts on Energy and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Measurements, Transp. Res. Record 1738, Transportation Research Board, 57-67.
- Zietsman J., Perkinson D. G., Bochner B. S., Bynum J. (2004), Transit as a Potential Emissions Reduction Strategy, Proc. of 84th TRB Annual Meeting, Washington D.C.
- 알림 : 본 논문은 대한교통학회 제70회 학술발표회 (2014.2.22)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

✉ 주 작성자 : 이규진

✉ 교신저자 : 이규진

✉ 논문투고일 : 2015. 3. 9

✉ 논문심사일 : 2015. 5. 7 (1차)

2015. 7. 21 (2차)

2015. 8. 18 (3차)

✉ 심사판정일 : 2015. 8. 18

✉ 반론접수기한 : 2015. 12. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필