자료포락분석(DEA) 기법을 활용한 도로이동오염원 저감대책의 효율성 분석

박관휘^{1*} · 이규진² · 최기주³

¹ 한국도로공사 스마트하이웨이사업단, ² 아주대학교 TOD기반 지속가능 도시 · 교통연구센터,

³ 아주대학교 교통시스템공학과

Efficiency Evaluation of Mobile Emission Reduction Countermeasures Using Data Envelopment Analysis Approach

PARK, Kwan Hwee^{1*} · LEE, Kyu Jin² · CHOI, Keechoo³

¹ Korea SMART Highway Study & Application Center, Korea Expressway Corporation, Gyeonggi 445-812, Korea

² TOD-based Sustainable City Transportation Research Center, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

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

Abstract

This study evaluated the relative efficiency of mobile emission reduction countermeasures through a Data Envelopment Analysis (DEA) approach and determined the priority of countermeasures based on the efficiency. Ten countermeasures currently applied for reducing greenhouse gases and air pollution materials were selected to make a scenario for evaluation. The reduction volumes of four air pollution materials(CO, HC, NOX, PM) and three greenhouse gases(CO₂, CH₄, N₂O) for the year 2027, which is the last target year, were calculated by utilizing both a travel demand forecasting model and variable composite emission factors with respect to future travel patterns. To estimate the relative effectiveness of reduction countermeasures, this study performed a super-efficiency analysis among the Data Envelopment Analysis models. It was found that expanding the participation in self car-free day program was the most superior reduction measurement with 1.879 efficiency points, followed by expansion of exclusive bus lanes and promotion of CNG hybrid bus diffusion. The results of this study do not represent the absolute data for prioritizing reduction countermeasures for mobile greenhouse gases and air pollution materials. However, in terms of presenting the direction for establishing reduction countermeasures, this study may contribute to policy selection for mobile emission reduction measures and the establishment of systematic mid- and long-term reduction measures.

본 연구는 자료포락분석(Data Envelopment Analysis: DEA) 기법을 활용하여 도로이동오염원 저감대책의 상대적 효율성 평가와 그에 기반하여 우선순위를 결정하였다. 현재 시행 중이거나 장래 계획 가능한 도로이동오염원 저감 대책들을 근거로 실효성 높은 자동차 온실가스 및 대기오염물질 저감 대책 10개를 선정하여 시나리오를 구성하였으며, 대기오염물질 4개(CO, HC, NOX, PM), 온실가스 3개(CO₂, CH₄, N₂O)물질에 대해 장래 통행패턴을 고려한 교통수요예측모형과 가변적 복합배출계수를 활용하여 2027년도를 최종 목표년도로 저감량을 산정하였다. 저감 대책들 간의 상대적 효율성을 평가하기 위해 DEA모형 중 초효율성 분석을 수행한 결과, 승용차 요일제 참여 확대 대책이 효율성 점수 1.879로 가장 우선순위가 높은 저감대책으로 선정되었으며, 버스전용차로 확대, CNG버스 보급 대책의 효율성이 높은 것으로 분석되었다. 본 연구의 결과는 자동차 온실가스 및 대기오염물질 저감대책 우선순위 선정 결정 시 절대적인 자료로 활용될 수는 없지만 저감대책의 방향성을 제시하고 있으므로 향후 자동차 배출량 저감 정책방향 설정 및 체계적인 중장기 저감대책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords

benefit-cost ratio, data envelopment analysis, demand forecasting, mobile emission, super-efficiency
편익/비용 분석, 자료포락분석, 교통수요예측, 도로이동오염원, 초효율성

* : Corresponding Author

kwanhwee@ex.co.kr, Phone: +82-31-219-2541, Fax: +82-31-219-2973

Received 1 September 2013, Accepted 24 February 2014

© 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

1. 연구의 배경 및 목적

최근 대기오염과 함께 가장 중요한 환경문제 중 하나로 기후변화로 인한 지구환경문제가 국제사회의 쟁점으로 부각되면서 기후변화의 해결을 위한 국제적 협약이 이루어지고 있다. 세계 각국에서는 지구온난화 문제를 해결하기 위해 1992년 리우 UN 환경개발회의에서 “기후변화에 관한 협약(UNFCCC: United Nation Framework Convention on Climate Change)”을 체결하였으며, 우리나라는 1993년에 가입함으로써 온실가스 감축을 위한 국제적 협력에 동참하는 계기를 마련하고, 1997년 교토 의정서 채택이후 정부 부처별로 기후변화협약 대응에 노력하고 있다.

이러한 노력에도 대기오염물질과 온실가스가 주는 폐해는 점차 심각한 수준으로 발전하고 있다. 우리나라는 에너지 부문 CO₂배출량이 2009년 기준으로 세계 9위의 온실가스 다배출국이며, 국내 수송부문에서 배출된 온실가스 배출량은 약 82.6백만톤 수준으로 전체 배출량의 13.6%의 비중을 차지하고 그 중 94.4%가 도로수송부문에서 발생하고 있다. 2009년 도로수송부문의 대기오염물질 배출 비율을 대기환경정책지원시스템(CAPSS: Clean Air Policy Support System)자료를 바탕으로 살펴보면, SO_x 0.2%, NO_x 36.6%, TSP 8.7%, CO 73.1%의 비중을 차지하고 있다. 이 가운데 도로수송부문의 배출비중이 높은 오염물질은 NO_x와 CO이며, CO 배출량의 경우 거의 2/3이상 수준이 도로수송부문에 의해 기인하는 것으로 분석되고 있다.

정부는 2020년 BAU대비 30% 감축목표를 달성하기 위한 각 부문별·업종별·연도별 온실가스 감축목표 설정과 관련하여 수송부문의 감축목표를 34.3%로 설정하고, 최우선 관리대상으로 인식하고 있기 때문에 교통측면에서 이를 관리하고 억제하기 위한 계획 및 전략의 필요성이 높아지고 있는 실정이다. 자동차 등록대수의 급증과 자동차에서 배출되는 대기오염물질이 인구 밀집지역에서 집중적으로 배출되고 있는 우리나라의 특성을 고려하면, 자동차에서 배출되는 오염물질을 저감하기 위한 노력이 각별히 요구되고 있다.

수송 분야 대책으로서 비용대비 저감 효과가 큰 배출량 저감대책 수립에 관심이 집중되고 있으며, 자동차 대기오염물질 및 온실가스 저감 대책은 그동안 추진된 유

해 대기오염물질 관리뿐만 아니라, 저탄소 녹색성장의 원동력으로서 녹색교통의 중요성이 확인되고 있다.

현재 국내에서 연구된 각종 대책에 따른 자동차 온실가스와 대기오염물질 저감량 평가 방법은 저감효과에만 집중하는 경향이 있었으며, 비용·편익 중심으로 접근하여 왔다. 이러한 분석 방법은 개별 사업이나 정책이 사회적 순편익을 증대시키는지의 여부를 파악할 수 있고, 따라서 이 사업이나 정책이 시행되어야 하는 지 파악할 수 있다. 그러나 이러한 사업 효과 측정 방식은 각 사업의 후생효과와 단위(scale)가 서로 다른 측면을 고려하지 못하기 때문에 서로 다른 대안간의 우선순위를 결정하는 것에는 한계가 있다. 또한 비용·편익 분석방법은 특성상 초기에 순편익이 큰 사업이 선택되는데 순편익이 장기간에 걸쳐서 나타나는 환경정책이나 투자 사업은 정부의 예산 배정 시 우선 순위에서 밀릴 수 있으며, 또한 학자들 사이에 논란이 되고 있는 사회적 할인율의 선택 문제도 지적할 수 있다(Ministry of environment, 2003).

사업의 효과를 측정하기 위한 효율성(Efficiency)은 일상생활에서 흔히 접할 수 있는 개념으로 대체로 투입한 노력이나 자원 대비 거두어들인 성과의 비율을 의미한다. 상대적으로 효율이 높다는 것은 동일한 자원을 투입하고도 더 높은 성과를 거두었거나, 동일한 성과를 얻는데 소요된 자원이 더 적다는 것을 의미하며, 효율이 낮다는 것은 그 반대를 의미한다. 이러한 효율성을 측정하기 위하여 최근 기업이나 공공 기관 등에서 효율성 측정을 위한 방법론으로 경영학과 경제학 분야에서 많이 활용되는 자료포락분석모형(DEA : Data Envelopment Analysis)이 널리 응용되고 있다.

본 연구는 다양한 저감대책들에 대한 평가의 단위가 다른 문제를 해결할 수 있고 자동차 온실가스와 대기오염물질을 통합적으로 고려할 수 있는 DEA모형을 활용하여, 자동차 대기오염물질 및 온실가스의 저감 잠재력을 판단하고, 각종 도로이동오염원 저감대책들의 상대적 우선순위를 평가하여, 정책방향 설정 및 체계적인 중장기 자동차 배출량 저감대책 수립에 기여하고자 한다.

2. 연구의 내용 및 범위

1) 연구의 내용

본 연구는 배출량 추정기법과 배출계수 등 수송부문의 저감 잠재량 평가와 관련하여 기존에 연구되었던 내용을 검토 및 반영하여 자동차 배출량 저감 대책을 진단

하고, 실효성 있는 저감 대책 발굴 및 DEA모형을 적용한 상대적 효율성 평가를 통하여 비용 효과적인 저감대책 우선순위를 제시하였다.

각 장 별로 주요 연구내용 및 구성을 간략히 살펴보면, 제1장에서는 본 연구의 배경 및 목적과 내용 및 범위에 대하여 살펴보고, 제2장에서는 DEA모형에 대한 이론과 저감대책량 분석 연구를 검토하여 차별성을 제시하였으며, 제3장에서는 주요 10개의 저감대책에 대한 시나리오를 구성하고, 교통수요모형과 가변적 복합배출계수를 이용하여 저감대책에 따른 온실가스 및 대기오염물질 저감량을 산정하였다. 제4장에서는 저감대책별 시행 비용을 산정하여 DEA모형 중 초효율성(Super-efficiency) 분석을 통하여 저감대책별 상대적 효율성을 분석하여 우선순위를 제시하고, B/C 분석 결과와 비교하였으며, 제5장에서는 연구 결과에 대한 요약과 결론을 기술하고, 본 연구의 한계점과 향후 연구방향을 제시하였다.

2) 연구의 범위

시간적 범위는 기준년도 2010년, 중간 분석년도 2017년, 2023년, 2027년으로 설정하였다. 기준년도는 교통수요모형의 정산 기준이 되는 동시에 경제성 분석 시 현재가치화의 기준이 되기 때문에 주요 통계자료가 조사된 2010년으로 설정하였다.

공간적 범위는 전국으로 설정하였다. 본 연구에서 고려하고 있는 저감대책 중 승용차 요일제, 혼잡통행료 부과 등의 저감대책은 주로 도시부에 적용되며, 그린카 보급 대책이나 노후차량 조기폐차 등과 같은 대책은 전국권에 적용되는 등 대책별로 적용대상의 공간적 범위 차이가 발생하기 때문에 각 저감대책별로 공간적 범위의 구분이 필요할 수 있겠으나, 동일한 기준에 의한 분석결과와 상호 비교를 위해 기초 분석자료의 일치성이 필요하며, 특히 저감대책의 영향에 따른 배출량 저감 효과에는 특정 권역에 국한하지 않고 광역적으로 미치는 영향을 포함하기 위해 분석의 공간적 범위는 전국으로 일치시켰다. 다만, 분석 기초자료는 KTDB의 전국권 교통수요 분석용 네트워크 및 O/D를 활용하였으나, 도심부의 상세한 분석을 위해 전국권 KTDB에 대한 기존 250개의 존 체계를 426개의 존 체계로 상세화하였다.

저감대책 시나리오의 경우, 현재 시행 중이거나 장래 계획 가능한 저감 대책들 중 실효성 높은 현재 적용가능하리라 판단되는 억제전략(AS: Avoid Strategy) 3개, 전환전략(SS: Shift Strategy) 2개, 개선전략(IS: Improve

Strategy) 5개로 총 10개의 저감대책을 구성하였다. 여기서, 억제전략은 승용차 등의 자가용 이용을 억제함으로써 교통수요를 조절을 통해 온실가스 배출량을 감축하는 것을 의미하며, 본 연구에서는 승용차요일제 확대, 기업체교통수요관리 확대, 혼잡통행료 부과 확대 대책을 분석하였다. 전환전략의 경우 승용차 중심의 교통수단수요를 도보, 자전거, 대중교통 등의 비동력 무탄소 교통수단이나 고효율 교통수단으로의 전환을 유인하는 전략을 의미하며, 본 연구에서는 버스전용차로 확대, 경차보급 활성화 대책을 분석하였다. 마지막으로 개선전략은 친환경자동차 신규기술개발 및 에코드라이빙, 공회전 방지 등의 운행습관개선 대책 등을 의미하며, 본 연구에서는 전기차 보급, 하이브리드차 보급, 수소연료전지차 보급, 조기폐차 활성화, CNG 하이브리드 버스 활성화 대책에 대하여 분석을 수행하였다.

기존 문헌 고찰

1. DEA(Data Envelopment Analysis) 모형

교통투자 사업이나 환경저감 정책목표 달성을 위한 구체적인 사업의 경우 그 사업의 경제적 타당성을 평가하기 위하여, 주로 편익/비용 비율(Benefit Cost Ratio: B/C)을 구한다. B/C기준을 사용하여 개별 사업이나 정책이 사회적 순편익을 증대시키는지의 여부를 파악할 수 있고, 따라서 이 사업이나 정책이 시행되어야 하는 지 파악할 수 있다. 경제성 분석의 경우 개별 사업에 대한 타당성평가에 적용이 용이하다는 장점을 가지고 있으나 여러 저감대책들 간 상대적 우선순위를 산정하는 것에는 한계성이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 다수의 대안들 간의 상대적 우선순위를 평가하기에 용이한 DEA를 활용하여 저감 대책들 간의 비용효율성을 평가하였으며, 이론적 내용은 다음과 같다.

DEA는 동업종 조직들의 효율성을 선형계획모형을 이용하여 한 조직의 효율성을 다른 조직들과 비교하여 상대적으로 평가하게 해준다. 다시 말해서 선형계획법에 바탕을 둔 효율성 측정개념으로 일반적인 생산가능 집합에 적용되는 투입물과 산출물 간의 자료를 이용하여 가장 효율적인 프론티어(생산가능곡선)를 도출한 후 다른 평가대상들이 이 프론티어를 기준으로 얼마나 멀리 떨어져 있는지의 여부로 비효율성을 측정하는 것이다(Lee, 2010a). 즉, DEA는 투입과 산출의 명확한 인과 관계를 밝히기

어려운 비영리적이며 공적인 의사결정단위들의 상대적 효율성을 평가하기 위하여 개발된 기법이다. 선형계획법을 이용한 가장 효율적인 의사결정단위(DMU : Decision Making Unit)¹⁾의 프런티어를 구성하여 DMU간의 상대적 효율성을 측정하는 것으로 효율성은 총 산출(aggregated output)과 총 투입(aggregated input)의 비율로 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\text{Efficiency} = \frac{y_1 u_1 + y_2 u_2 + \dots + y_s u_s}{x_1 v_1 + x_2 v_2 + \dots + x_m v_m} = \frac{\sum_{r=1}^s y_r u_r}{\sum_{i=1}^m x_i v_i} \quad (1)$$

여기서,

u_r : r번째 산출물의 가중치, y_r : r번째 산출물의 값
 v_i : i번째 투입물의 가중치, x_i : i번째 투입물의 값
 s : 산출물의 수, m : 투입물의 수

DEA의 장점을 살펴보면 다수재 상황을 쉽게 묘사할 수 있고, 주어진 자료만으로 생산관계를 추정하여 효율성을 분석하기 때문에 잔차에 대해 통계적 분포 가정을 할 필요가 없으며, 주어진 자료만으로 투입/산출의 생산관계를 모수적(parametric) 접근법에서 요구되는 함수 형태를 가정하지 않는 비모수적(non-parametric) 접근법으로 추정하므로 함수형태에 대해서 사전적인 가정을 할 필요가 없다. 또한, 실제로 관측된 자료의 단위를 통일하거나 가공하지 않고 그대로 사용하여 분석가능하며 전통적인 방법과 달리 검증을 위한 가설이 불필요하다(Sherman and Gold, 1985; Shin, 2009).

그러나 이러한 장점에도 불구하고 다음과 같은 한계점을 갖는다. 첫째, DEA 모형이 산출해 주는 효율성은 상대적 효율성일 뿐 절대적 효율성을 나타내지 못한다(Adler et al., 2002). 둘째, DEA 모형은 비모수적인 방법에 의해 효율성을 측정하기 때문에 통계적인 가설을 검정하기는 어렵다(Min et al., 1999). 셋째, 효율성 평가 결과가 비교대상 DMU의 수와 투입 및 산출요소로 사용된 변수의 수에 의해 크게 영향을 받는다(Nunamaker, 1985).

DEA모형은 다수의 투입요소를 사용하여 다수의 산출물을 생산하는 생산조직의 효율성을 평가하기위한 모

형으로 연구목적에 따라 여러 가지 모형으로 제시할 수 있다. 효율성 모형에서 가장 널리 이용되고 있는 모형은 Charnes, Cooper and Rhodes(1978)의 CCR모형과 Banker, Charnes and Cooper(1984)의 BCC모형이다. 이 두 모형은 투입요소에 초점을 두는가, 산출물에 초점을 두는가에 따라 투입지향(Input Oriented)과 산출지향(output Oriented)으로 구별된다. 본 연구에서는 효율성 모형에서 가장 널리 이용되고 있는 CCR모형과 DEA 모형의 기본 개념을 따르고 DMU들 간의 순위를 선정할 수 있으며, 본 연구에 적용한 초효율성(Super-efficiency) 모형에 대하여 살펴보고자 한다.

CCR비율모형은 모든 DMU의 투입에 대한 산출의 비율이 1을 초과해서는 안되며 각 투입 및 산출요소의 가중치는 0보다 크다는 제약 하에 투입과 산출비율을 최대화 시킬 수 있는 가중치를 결정하는 모형으로 식(2)와 같이 표현된다.

$$E_k = \frac{\sum_{r=1}^s y_{kr} u_{kr}}{\sum_{i=1}^m x_{ji} v_{ki}} \quad (2)$$

$$E_k = \frac{\sum_{r=1}^s y_{kr} u_{kr}}{\sum_{i=1}^m x_{ji} v_{ki}} \leq 1, \quad j=1, 2, \dots, n$$

$$v_{ki} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$u_{kr} \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s$$

여기서,

E_k : k번째 DMU의 효율성

y_{kr} : k번째 DMU의 r번째 산출물의 양

x_{ki} : k번째 DMU의 i번째 투입요소 사용량

u_{kr} : k번째 DMU의 r번째 산출물 가중치

v_{ki} : k번째 DMU의 i번째 투입요소 가중치

s : 산출물의 수, m : 투입물의 수

DEA를 이용하여 효율성 분석을 실시할 경우 효율적 집단, 비효율적 집단으로 구분되고, 비효율적 기업에 대해서만 효율성 순위를 부여할 수 있지만 효율적 기업에 대해 순위정보를 제공할 수 없기 때문에 효율적 그룹의

1) 여기서 평가대상이 되는 단위를 의사결정단위(DMU)라고 하는데 각 DMU는 여러 가지 투입요소를 이용하여 다양한 산출물을 생산하는 단위를 말한다.

Figure 1. Concept graph of super-efficiency

DMU도 순위 정보를 제공할 경우 의미 있는 분석이 될 수 있다(Woo, 2010). 즉, DEA분석 결과 효율적 DMU집단 내에서의 순위정보가 중요한데 일반적인 DEA분석으로는 이를 찾아낼 수 없다는 한계가 있다.

Anderson and Peterson(1993)은 효율성이 1인 DMU를 대상으로 효율성 1을 유지하면서 투입요소를 최대한로 변화시킬 수 있는 초효율성(Super-efficiency) 기법을 제시하였다. 1의 효율성 값을 갖는 DMU들이 너무 많은 경우에는 가장 효율성이 높은 DMU를 선택하거나 각 DMU간의 우선순위를 선정할 수 없는 문제점을 해결하기 위해서 흔히 사용되는 방법론이 초효율성 모형이다. 즉, 초효율성기법이란 효율적인 프런티어선상에 있는 DMU간의 상대적 우위를 비교하기 위하여 제한한 모형이다. DMU의 효율성 값은 1보다 커질 수 있으며 측정대상 DMU와 초효율성 프런티어 사이의 거리를 측정하여 DEA 기본 모형의 효율성 분석과 같은 방법으로 효율적 DMU의 초효율성을 측정한다.

Figure 1에서 통상의 CCR모형은 A-B-K-C-D로 이어지는 생산변경을 이용하여 효율성을 측정하게 되고, A, B, K, C, D 5개의 DMU는 모두 효율적인 프린터 선상에 있으므로 효율성은 모두 100%이다. 초효율성기법은 상대적 우위를 비교하기 위하여 DMU의 효율성 계산 시 해당 DMU를 집합에서 제외시켜서 측정하도록 고안된 모형이다. 예를 들어, Figure 1에서 의사결정 단위인 K의 효율성을 측정하기 위해 K점을 배제하여 분석하면 프린터선이 A-B-C-D와 같이 주어지고 K점은 K_1 점으로 투영되면서, 그 결과 K점의 초효율성은 OK_1/OK 이 되므로 그 값은 1보다 큰 효율성 값이 나타난다. 또한 프린터선 내부에 분석대상 관측점이 존재하는 경우에는 초효율성 값이 1보다 작다. Figure 1에서 E점의 경우, E점을 배제하여 분석하여도 프린터선의 모양이

변화하지 않기 때문에 $OE_L/OE < 1$ 의 값을 나타낸다. 초효율성 값이 클수록 생산변경을 확장하는데 더 큰 공헌을 한다고 볼 수 있다. 가령 Figure 1에 나타난 것과 같이, B점은 그 점을 제거하고 나서 형성되는 프런티어(A-K-C-D)로부터 가깝게 놓여있기 때문에 K점보다 초효율성이 낮게 도출될 것이다. 달리 말하면 초효율성 값이 클수록 생산변경을 결정짓는 영향력이 더 크다. 그렇기 때문에 초효율성이 더 큰 점이 더 효율적인 점이라 할 수 있다.

초효율성분석의 특징은 효율적인 DMU들의 효율성 값은 1보다 커질 수 있지만 비효율적인 DMU들의 효율성 값은 변하지 않는다는 것이다. 따라서 효율적인 DMU들은 초효율성 값이 커질수록 효율적인 DMU들 사이에서 순위가 높아지게 되고, 그 반면 비효율적인 DMU들은 효율성 값의 변화가 없이 일정하게 유지된다. DEA 모형의 가정과 마찬가지로 준거집단을 기준으로 하여 상대적으로 도출된 값이기 때문에 절대적인 순위를 비교하는 것은 아니지만 DEA모형을 기본으로 하여 부가적인 설명력을 갖기에 효율성 연구에서 의미 있는 정보를 제공한다(Jung, 2011). 따라서 본 연구에서는 자동차 온실가스과 대기오염물질 저감대책의 우선순위를 선정하기 위하여 초효율성기법을 활용하여, 저감대책간 상대적 비용효율성을 평가하였다.

DEA 모형은 여러 제약식과 최적화 문제의 구조가 복잡하기 때문에 주어진 자료를 바탕으로 DEA를 직접 선형계획 문제로 형성하다 보면 오류가 발생할 가능성이 커진다. 이러한 오류를 해결하기 위해 DEA 분야가 확대되면서 DEA 프로그램 역시 활발하게 개발되어 왔으며, 이러한 프로그램들은 사용자에 의해 최적화 문제가 직접 작성되지 않고, 특정한 모형의 이름으로 자동생성 하도록 한다. 이에 따라 본 연구에서는 저감대책간의 상대적 효율성 및 순위를 평가하기 위해 DEA-Solver 프로그램을 활용하였으며, 입력지향 초효율성 CCR모형을 적용하였다. 이는 식(3)으로 표현된다.

$$Min \quad \theta - \epsilon (\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^n s_r^+) \quad (3)$$

$$s.t. \quad \theta x_{ip} - \sum_{j=1, j \neq p}^J x_{ij} \lambda_j - s_i^- = 0 \quad i=1,2,...,m$$

$$\sum_{j=1, \neq p}^J y_{rj} \lambda_j - y_{rp} - s_i^+ = 0 \quad r=1,2,\dots,n$$

$$\lambda_i, s_i^-, s_r^+ \geq 0$$

여기서,

y_{rj} : DMU j 의 r 번째 산출물의 양

x_{ij} : DMU j 의 i 번째 투입물의 양

j : DMU를 나타내는 지수

r : 산출물을 나타내는 지수

i : 투입물을 나타내는 지수

ϵ : non-archimedean 상수로 0에 가까운 매우 작은 수

θ : DMU p 의 효율성 측정치

λ_j : 참조대상들의 선형조합 비율을 나타내는 밀도변수

s_i^- : 투입물과 관련된 제약조건의 여유변수

s_i^+ : 산출물과 관련된 제약조건의 여유변수

2. 기존 연구 고찰

Rakha et al.(2001)은 교통신호시스템이 에너지 소비와 차량 배출량에 미치는 영향을 분석하였다. 미시적 교통류 모형과 미시적 배출량 모형을 결합하는 방법론을 제시하여 ITS 등의 신호시스템의 영향을 평가할 수 있는 방안을 제시하였다. Metha et al.(2001)은 다양한 ITS운영전략의 대기오염 영향을 평가하였으며, 교통계획 시 교통과 환경분야가 유기적인 체계를 유지하고 대기질을 평가할 수 있는 방법론 개발이 필요함을 제시하였다. Zietsman et al.(2004)은 대중교통에 의한 자동차 배출 저감량과, 저감으로 인한 경제적 효과를 분석하였다.

Gyeonggi Research Institute(2002)에서는 거시적 교통시뮬레이션 모형인 사통팔달을 이용하여 수도권 지역의 행정구역별, Grid별 배출량을 산출하였다. 이 연구에서 추정된 배출량은 환경부가 발표한 배출량과의 차이가 65%의 수준으로 낮게 추정되었으며, 이것은 산출방법의 차이와 차량주행거리(VKT)의 차이라고 제시하였다. 또한 총 5개의 저감대책 시나리오에 대하여 분석하였으며 출퇴근 시차제는 총량의 1%, 차량 10부제 운행은 7.6%, 서울-경기간 통행분포의 변화는 3.8%, 주요간선도로의 용량증대는 8.0%, 광역철도 건설에 의한 대중교통정책분석은 16.7%가 저감되는 것으로 분석되었다.

Korea Environment Institute(2010)은 대기오염물질 및 온실가스 등 대기관리 부문의 통합환경관리 전략 분석이 가능한 최적화 모델을 개발하여 2006년 GHG-CAPSS 배출량 자료를 이용한 비용 효율적인 대기질 개선 및 온실가스 저감대책을 분석하였다. 온실가스 감축 시나리오의 경우 효율적 대책으로 대중교통 이

용확대, 경차보급 등이 포함되었으며, 이에 따른 부수적 효과로 NOX는 16톤으로 1%, PM10은 9톤으로 14%의 저감이 가능한 것으로 분석하였다. 한편으로는 효율적 대기오염물질 저감 대책으로는 대중교통 이용 확대의 대기환경 개선 대책에 따라 약 7,501톤으로 2%의 CO₂ 배출량을 저감할 수 있는 것으로 분석되었다.

Lee(2010b)은 교통부문의 대기오염물질 배출특성과 교통계획 시 요구되는 수준의 정보를 제시할 만한 대기질 평가 프레임워크를 정립하고, 다음과 같은 5개의 세부모형을 구축하였다. 첫째, 목표 연도를 고려하는 배출계수 예측모형을 구축하였고, 둘째, PAMS(Portable Activity Monitoring System)를 이용해 수집된 수도권 실제 주행 자료를 바탕으로 차량비출력(VSP)함수식과 PEMS(Portable Emission Measurement System)로부터 추정된 Emission Map을 응용하여, 도로유형별 배출계수 추정모형을 구축하였다. 셋째, 준기반의 냉간 시동 배출량 추정모형을 구축하고, 넷째, 가구통행실태조사 자료, Space Syntax와 압축도시지표를 활용한 내부준 배출량 추정모형을 구축하였다. 마지막으로 가치이전기법을 활용하여 각 지역에 적합한 대기오염물질의 사회적 비용 원단위 추정모형을 구축하였다.

Hwang(2010)은 LEAP모형을 이용하여 3개의 시나리오 구성을 통하여 온실가스 배출 저감량을 전망하였는데 시나리오 I은 2030년까지 하이브리드차량이 45%를 차지하는 경우, 시나리오 II는 소형차 보급율을 2030년까지 선진국 수준인 60%로 끌어올리는 경우, 시나리오 III은 경유승용차의 보급률이 증가하였을 때 예상되는 배출 저감량을 전망하였다. 시나리오 I은 기준안에 비하여 2030년에 약 5.57% 감축효과가 있는 것으로 분석되었고, 시나리오 II와 III은 각각 8.86%, 1.02% 감축효과가 있는 것으로 나타났다.

Ku(2011)는 2016-2026년 부산광역시를 중심으로 교통수요모형을 통해 정책 시행 후 장래 차종별 통행량과 통행속도를 추정하여 지속가능 교통물류발전기본계획 상의 7개의 교통수요관리 정책에 대해서 온실가스 감축잠재량을 산정하고 감축에 따른 발생 편익을 추정하여 정책들을 비교하였다.

Jang(2012)은 향후 부산시의 통합환경관리 전략 수립을 위한 기초연구로서 부산광역시 도로수송부문을 대상으로 온실가스와 대기오염물질을 동시에 저감할 수 있는 대책을 도출하여 각 대책시행에 따른 동시저감효과를

LEAP모형을 활용하여 분석하였으며, 결과를 토대로 온실가스와 대기오염물질의 연계관리효과가 큰 대책을 도출하여 향후 부산시의 통합 환경관리정책 전략 수립을 위한 기초자료 및 시사점을 제시하였다.

Lee et al.(2012a)은 고속도로 상에 배출되고 있는 CO₂에 대하여 국립환경과학원의 배출계수와 Emme 3 모형을 활용하여 분석하였다. 현재 2010년 기준으로 약 17.3백만 톤의 CO₂배출량이 고속도로에서 발생하는 것으로 나타났으며, 전기차 보급전망에 따라 배출된 온실가스의 경우 2015년 약 2.0%의 저감효과가 발생하는 것으로 분석되었으며, 2020년에는 약 12.8% 저감 효과를 나타내었다.

3. 본 연구의 차별성

기존 연구들은 저감효과에만 집중하는 경향이 있었으며, 타당성을 평가하기 위하여 비용·편익 분석을 통하여 경제성 분석을 수행하였으나, 본 연구에서는 비용·편익 분석이 단위(scale)가 다른 여러 저감대책들에 대한 우선순위 선정 시의 한계성을 진단하고, 자동차 온실가스와 대기오염물질을 통합관리하기 위한 체계적인 국가 정책 수립에 기여하기 위한 장래 다양한 저감대책들에 대하여 저감량 산정과 더불어 경영학 및 경제학 분야에서 주로 활용되어지는 DEA모형을 통한 비용효율적인 면에서 상대적 우선순위를 평가한다는 점에서 기존 연구와 차별된다.

아울러 본 연구에서는 Choi et al.(2009)의 연구에서 제한한 교통·토지이용 측면의 변화를 반영하여 실질적인 자동차 운행현황을 교통수요예측 시뮬레이션으로 모델링하여 장래의 배출량을 추정하는 BUA기법에 의해 저감잠재량을 평가하되, 기존 자동차 오염물질과 온실가스의 배출량 및 저감량 산정 연구들의 경우 국립환경과학원에서 제시하고 있는 차종별·속도별·오염물질별 배출계수를 활용하여, 저감대책에 따른 저감잠재량을 평가하여 왔으나, 본 연구에서는 자동차의 경우 연식 또는 운행시간과 주행거리가 증가함에 따라서 촉매 및 엔진의 노후화로 인하여 생산초기보다 추가적인 배출이 이루어지며, 차종별·연료별 자동차 배출허용기준의 변화에 따른 배출계수의 시간적 가변적인 특성을 반영하였다. 여기서, Lee et al.(2012b)의 결과인 차종별·연식별 자동차 등록대수 추이, 차령별·연료별 열화계수 등을 입력하여 목표연도에 적합한 차종별·속도별 배출계수를

산정하는 가변적 복합배출계수 모형식을 활용하여 장래의 저감량을 산정하였다.

장래 자동차 배출 저감량 분석

1. 저감량 산정 방법

본 연구에서는 美 Caliper사의 TransCAD 5.0 교통계획 S/W를 이용한 링크별 교통수요 추정을 통한 저감대책별 저감량 분석을 수행하였으며, 교통수요예측 모형의 구현을 위해, 승용차, 버스, 화물차로 구분하여 TransCAD의 Multi-modal Assignment기법을 적용하여 각각의 도로이용자의 통행시간을 최소로 하는 이용자 평형배정으로 통행배정을 수행하였으며, 배출 저감량 산정 과정은 Figure 2와 같다.

저감대책별 분석과정의 전제조건은 Table 1과 같다.

승용차 요일제(AS-1)의 경우 각 대도시권(서울, 경기, 6대 광역시)에서 시행중에 있으며, 참여 현황을 살펴보면 2003년부터 시행된 서울의 경우 42.9%로 가장 높게 나타났으나, 다른 광역시도의 경우 2010년 이후부터 본격 시행되어 1.7-16.8%의 참여율로 저조한 현황이다. 이에 본 연구에서는 서울, 경기, 6대 광역시 승용차 요일제 참여율을 2017년 50%, 2023년 60%, 2027년 70%로 단계적으로 확대 시행한다는 가정을 하였으며, 미시행시는 현재 기준의 참여율과 동일하다는 가정 하에 분석을 시행하였다. 기업체 교통수요관리(AS-2)의 경우 총 19개 프로그램 중에서 가장 교통유발 부담금 최대 경감비율이 높은 주차장 축소, 대중교통이용자 보조금 지급, 업무 택

Figure 2. Calculation process of emission reduction

Table 1. Scenario consists of reduction measures

Reduction Measures	Prerequisites and Scenarios
AS-1 The Weekly No Driving Day Program	- The number of cars registered in Seoul, Gyeonggi, Incheon, Daejeon, Daegu, Ulsan, Busan, 2017 50% 2023 60% 2027 70% participation rate
AS-2 Employer-based Transportation Demand Management	- Applied to the metropolitan area businesses with more than 100 workers - Estimate number of companies with 100 or more workers(2017 : 12,121, 2023 : 18,309, 2027 : 24,104) - Facility Vehicle-induced basic unit applies(60.95 veh/1,000m ²),
AS-3 Congestion charges	- System to receive a toll when the private car has entered the special area - Free traffic section of the seoul metropolitan area highway
SS-1 Expansion of Exclusive Bus Lanes	- Seoul Outer Circular Highway, - West Coast Highway(Maesong IC-Dangjin JC),
SS-2 Compact Car Diffusion Activation	- Compact Car registration rate in 2017:15%, 2023:20%, 2027:25%(not performed during the participation rate 8.7%) - Traffic patterns the same assumptions
IS-1 Electric Car Diffusion Activation	- EV Cumulative distribution targets(2017: 469,900veh, 2023: 1,622,500veh, 2027: 2,390,900veh) - Traffic patterns the same assumptions
IS-2 Hybrid-Car Diffusion Activation	- PHEV, HEV Cumulative distribution targets(2017: 378,700veh, 2023: 928,300veh, 2027: 1,294,700veh) - Traffic patterns the same assumptions
IS-3 Hydrogen fuel cell vehicles Diffusion Activation	- FCEV Cumulative distribution targets(2017: 45,580veh, 2023: 152,020veh, 2027: 222,980veh) - Traffic patterns the same assumptions
IS-4 Early retirement vehicle scrapping	- Automobile(2017: 125,000veh, 2023: 225,000veh, 2027: 375,000veh) - Truck(2017 100,000veh, 2023: 200,000veh, 2027: 300,000veh) - Traffic patterns the same assumptions
IS-5 CNG Hybrid Bus Diffusion	- 600 years supply - Traffic patterns the same assumptions

시제 3개의 프로그램을 선정(각 30% 경감비율)하여 분석을 시행하였다. 또한, 연면적 1,000m² 기업체에 대한 자발적 참여로 시행하고 있으나 각 기업체 연면적 자료의 취득 어려움으로 인하여 100명 이상 종사자의 기업체로 전제하여 분석하였다. 혼잡통행료 부과(AS-3)의 경우 Korea Transport Institute(2010) 연구결과를 인용하여 수도권 내 개방식 고속도로인 경인선, 제2경인선, 서울외곽순환선의 무료구간 IC별로 혼잡통행료를 부과하여 분석을 수행하였다.

버스전용차로 확대(SS-1)의 경우 서해안 고속도로와 서울외곽고속도로에 반복적인 지·정체가 발생하고 있어, 버스전용차로제 실시 필요성이 있는 것으로 나타났으며, 이에 네트워크에 버스전용차로제를 반영하여 분석을 수행하였다. 경차 보급 활성화 대책(SS-2)의 경우 2011년 기준 전국 승용차 등록대수 대비 경차 등록은 8.7%로 나타났으며, 2010년 기준 일본의 경우 약 30.7%로 나타났으며, 현재 국내 경차의 비율은 다른 선진국 수준보다 낮은 상태이다. 이에 본 연구에서는 전국 경차 보급 활성화 대책에 따라 경차 등록률을 선진국 수준으로 높이고자 2017년 15%, 2023년 20%, 2027년 25% 단계적 확대 시행 가정 하에 분석을 수행하였다.

2010년 정부에서는 그린카 산업 발전전략 및 과제로

저감해 자동차 로드맵을 계획하여, 단계별로 개발 및 양산 목표를 수립하였으며, 본 연구에서는 전기자동차(IS-1), 하이브리드차(IS-2), 수소연료전지차(IS-3) 보급 대책에 반영하여 분석을 수행하였다. 또한, 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획(2010)에 노후경유차 조기폐차 추진 계획에 연간 25,000대에 대한 조기폐차를 계획함에 따라, 본 연구에서는 수도권 자료를 기반으로 전국권 노후차량(승용, 화물차) 조기폐차(IS-4)를 계획하고 분석하였다.

전국 시내버스 29,184대(2010년 기준) 중 천연가스 버스는 17,189대이며, 현재 환경부는 단계적으로 전국의 모든 시내버스를 CNG하이브리드버스로 교체하고, 장기적으로는 HCNG(수소-천연가스) 하이브리드버스 기술개발 및 보급을 유도하여 환경개선 편익을 제고해 나갈 계획 중이다. 이에 본 연구에서는 경유버스를 20년 동안 12천대 보급한다고 가정하여, 매년 600대를 도입하는 CNG하이브리드버스 확대(IS-5)의 시나리오를 구성하였다.

2. 저감량 산정 결과

각 저감 대책별로 2017-2027년의 자동차 배출물질과

Table 2. Cumulative reductions of air pollutants (Unit : Ton)

Category	CO	HC	NOX	PM
AS-1	9,836	312	4,574	161
AS-2	6,382	467	4,465	124
AS-3	1,127	64	786	25
SS-1	7,370	744	4,699	127
SS-2	11,351	270	9,110	319
IS-1	9,696	360	4,747	123
IS-2	4,588	185	2,351	64
IS-3	921	33	451	11
IS-4	7,358	930	12,829	402
IS-5	8,175	-3,483	2,558	239

Table 3. Cumulative reductions of greenhouse gas (Unit : Ton)

Category	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
AS-1	4,921,507	426	1,007
AS-2	1,985,628	164	370
AS-3	436,261	33	73
SS-1	1,024,353	110	262
SS-2	3,376,062	314	752
IS-1	3,739,972	303	718
IS-2	1,687,006	136	309
IS-3	354,139	30	70
IS-4	3,409,580	151	213
IS-5	138,051	-109	-292

온실가스별 누적 저감량을 분석한 결과는 Table 2와 Table 3과 같다.

대기오염물질 중 CO의 가장 많은 누적 저감 효과를 나타난 저감대책은 경차보급 활성화(11,351톤)로 나타났으며, HC, NO_x, PM에서는 노후차량 조기폐차 저감대책이 각각 930톤, 12,829톤, 402톤으로 다른 저감대책들에 비하여 많은 누적 저감 효과가 분석되었다. 대표적인 온실가스인 CO₂에서는 승용차요일제 참여 확대 저감대책이 4,921,507톤으로 다른 저감대책들에 비하여 많은 누적 저감효과가 분석되었다. CNG버스 보급 대책의 경우, 연료인 압축천연가스의 주성분은 CH₄로 구성되어 있기 때문에 HC, CH₄, N₂O배출량은 일반 디젤버스보다 높아 오히려 배출이 가중(음의 효과)되는 현상이 분석되었다.

이와 같이 각 전략에 대한 저감배출량은 각 배출물질별로 큰 차이를 나타내기 때문에 각 배출물질들의 저감효과를 종합적으로 고려하는 것이 요구된다. 단, 본 연구에서 분석된 각 전략별 배출 저감량은 각 전략들의 시행 시나리오에 따라 상이하게 도출될 수 있음을 참고하여야 한다. 즉, 각 저감대책별 시나리오의 가정과 범위에 의해 산정한 국한된 저감량이다.

비용효율성 분석

1. 비용 산정 결과

본 연구에서는 온실가스 및 대기오염물질 저감에 따른 편익의 경우 사회적인 편익이기 때문에 실제적으로 저감 편익이 발생하는 정책시행자(정부)의 기준으로 산정하였다. 정책시행자가 발생하는 비용은 신규설비도입, 보조금 지원금 등이 있으며, 본 연구에서는 해당 비용을 Korea Development Institute(2008)의 “예비타당성 조사지침(제5판)”에 제시된 할인율 5.5%를 사용하여 각 시나리오별 누적비용을 분석결과를 Table 4와 같이 추정하였다.

Table 4. Cumulative cost (Unit : Million won)

Category	Cumulative Cost
AS-1	414,584
AS-2	1,602,692
AS-3	56,092
SS-1	239,860
SS-2	7,454,290
IS-1	9,341,729
IS-2	4,103,142
IS-3	2,768,483
IS-4	996,794
IS-5	160,857

전체 저감대책 중 전기자동차 보급 비용이 93,417 억원으로 가장 높으며, 혼잡통행료의 경우 560억 원으로 가장 저비용으로 분석되었다. 기업체 교통수요관리는 별도의 모니터링 비용은 필요하지 않으나 교통유발부담금의 수입량이 현저히 감소되어 비용이 비교적 크게 나타났다. 경차보급 활성화의 경우 기타 저공해차 보급 대책 시나리오보다 단위비용은 적으나 보급대수가 하이브리드차 보급에 비해 5배정도 많으므로 비용이 높게 산정되었다.

2. 효율성 분석 결과

본 연구에서는 대기오염물질 및 온실가스 저감잠재량을 함께 고려하는 경우에 대한 초효율성 분석을 수행하여 이를 B/C 결과와 비교하였다. 분석 결과는 Table 5와 같으며, 효율성 점수가 1이하인 대책들은 상대적으로 낮은 비용 대비 높은 저감 잠재량을 나타내는 것으로 해석되며, 효율성 점수가 1이하인 기타 저감대책들은 상대적

효율성이 부족한 것으로 해석된다. 즉, 10개의 저감대책들에 대하여 선형계획법을 이용하여 투입요소인 비용과 산출요소인 저감량에 대한 효율적인 프론티어를 구성하여 저감대책들 간의 상대적 효율성을 측정하는 것으로 저감대책 중 1이하는 비효율적, 1이상은 효율적인 저감대책이라고 결과를 해석할 수 있다. 또한 효율성 점수간의 차이는 구성된 효율적인 프론티어로 부터 떨어진 거리를 나타내며, 이를 통하여 저감대책들 간 우선순위를 선정할 수 있다.

저감대책별 B/C와 효율성 점수를 비교한 결과, 승용차 요일제 참여 확대 대책(AS-1)이 효율성점수 1.879로 비용효율성이 가장 높게 나타났으며, 버스전용차로 확대(SS-1), CNG하이브리드버스 확대(IS-5) 등의 순으로 이들의 효율성점수는 1이상인 것으로 나타났다. 또한, 해당 대책들은 초효율성 분석과 마찬가지로 B/C가 1이상으로 경제성 있는 저감대책으로 분석되었다.

노후차 조기폐차(IS-4)의 효율성은 1 이상을 확보하지 않은 것으로 분석되었으나, 이는 해당 사업이 비효율적으로 해석되기 보다는 2006년부터 시행된 해당 대책이 성숙기에 도달하여 기 발생된 효율이 본 분석에서는 제외되었기 때문으로 사료된다.

기업체 교통수요관리(AS-2)대책의 경우 본 연구에서의 효율성점수와 B/C는 상대적으로 낮은 것으로 분석되었으나, 추가적인 비용절감 방안과 참여율 증대 방안이 함께 고려된다면 해당 대책의 효율성은 증가될 여지가 있을 것으로 판단된다.

경차 보급 활성화 대책(SS-2), 전기자동차(IS-1), 하이브리드차(IS-2), 수소연료전지차(IS-3)의 효율성 점수가 상대적으로 낮으며, B/C또한 낮은 것으로 도출되었다. 해당 대책들은 신규 기술의 적용으로써 초기 투자비용이 대책들 중 높은 수준에 포함되는 반면, 효율은 대책이 적용되는 개별 차량들에서만 국한하여 발생하기 때문에 분석 대책들의 효율성이 낮게 도출된 것으로 이해된다. 그러나 해당 대책들도 장래 기술이 성숙되어 비용의 절감이 가능하거나 본 연구에서 설정한 편익발생 기간 이상에서 배출 저감효과가 발생한다면 현재 분석된 결과보다는 효율성점수가 높게 도출될 여지는 존재할 것으로 사료된다.

즉, 본 연구에서 효율적으로 평가된 저감대책이라고 해도 그것은 저감대책들 상호간 비교시 상대적으로 효율적이라는 것이지 절대적으로 효율적이라는 의미는 아니므로 개선할 부분이 여전히 남아있 수 있다는 차원에서

분석결과를 이해해야 한다고 판단된다.

한편, 혼잡통행료 부과 확대(AS-3), 버스전용차로의 확대(SS-1), CNG하이브리드버스 확대(IS-5) 저감대책에서 B/C와 DEA의 결과에 대한 우선순위가 다르게 분석되었다. 이는 DEA모형의 경우 각 개별사업 별로 분석 하는 것이 아니라, 10개의 저감대책의 투입요소와 산출요소에 대한 가상의 효율적인 프론티어를 구성 후, 각 저감대책별 투입된 비용 대비 산출된 저감량에 대한 상대적인 효율성 점수를 산정 하여 우선순위를 분석하게 되며, B/C기준의 경우 각 개별 사업에서 발생하는 편익과 비용의 비율을 비교 하여 우선순위를 분석하기 때문에 발생하는 차이라고 볼 수 있다.

즉, B/C 기준은 개별 사업이나 정책이 사회적 순편익을 증대시키는지의 여부를 파악하는데 용이 할 수 있으나, 범위가 다른 여러 대안들 간의 편익과 비용의 비율만을 비교하기 때문에 여러 대책들 간 우선순위 선정 시 한계성이 존재 할 수 있다. 또한 B/C 기준의 경우 특성상 초기에 순편익이 큰 사업이 선택되는데, 순편익이 장기간에 걸쳐서 나타나는 환경정책의 경우 우선순위 분석시 DEA를 통한 여러 저감 대책들 간의 상대적인 비용 효과적 효율성 측정방법으로 이를 보완할 수 있을 것이라 판단된다.

Table 5. Compares of B/C and the efficiency scores

Category	Result of analysis		Priorities	
	Efficiency	B/C	Efficiency	B/C
AS-1	1.879	1.541	1	1
AS-2	0.171	0.204	6	6
AS-3	0.939	1.192	4	2
SS-1	1.493	1.058	2	3
SS-2	0.073	0.082	7	7
IS-1	0.040	0.053	9	9
IS-2	0.043	0.056	8	8
IS-3	0.013	0.012	10	10
IS-4	0.700	0.623	5	5
IS-5	1.393	1.025	3	4

Figure 3. Compares of B/C and the efficiency scores

결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 자동차 대기오염물질 및 온실가스의 저감 잠재력을 분석하고, 비용과 저감잠재량 측면에서의 저감대책 효율성 분석을 통하여 대책방향 설정 및 체계적인 중장기 자동차 배출량 저감대책 수립에 기여하고자 연구를 수행하였다.

현행 시행 중이거나 장래 계획 가능한 저감 대책들을 근거로 실효성 높은 현재 적용가능하리라 판단되는 자동차 배출가스 오염물질 저감 대책 10개를 선정하여 시나리오를 구성하였으며, 장래 자동차의 차령별·수단별·연도별 제작차 배출허용기준, 열화계수 등을 고려한 장래 가변적 복합배출계수를 추정하여 활용하였다. 또한, 저감잠재량 산정 시 TDA기법의 한계점을 보완할 수 있는 장래 통행패턴을 고려한 교통수요예측모형을 활용한 BUA기법을 이용하여 2017년, 2021년, 2027년의 저감대책 시나리오별 대기오염물질 4개(CO, HC, NO_x, PM), 온실가스 3개(CO₂, CH₄, N₂O)의 장래 저감량을 산정하였다. 그리고 저감대책들 간의 시나리오상의 보급대수, 참여·감소율 등이 모두 서로 상이하기 때문에 저감대책 시행에 따른 비용 산정과 더불어 DEA모형을 통하여 저감 대책들 간의 상대적 효율성을 평가하기 위해 초효율성 분석을 수행하였다.

저감대책을 DMU로 하고, 저감 대책 시행 시 발생하는 비용을 투입물로 온실가스 및 대기오염물질 저감량을 산출물로 하여 저감대책간의 상대적 효율성을 평가하기 위해 초효율성 분석을 수행한 결과, 승용차 요일제 참여 확대 대책이 효율성 점수 1.879로 가장 우선순위가 높은 저감대책으로 선정되었으며, 승용차 요일제 참여 확대를 포함한 버스전용차로 확대, CNG하이브리드버스 확대 대책이 효율성이 있는 것으로 분석되었다.

본 연구 결과와 같이 DEA모형을 이용하면 다수의 투입물과 산출물을 복합적으로 고려하여 대책들 사이의 상대적 효율성을 단일지표로 변환할 수 있다. 그러나 DEA를 통한 효율성 분석은 상대적인 효율성 평가이므로 다른 성과 측정기법의 대체 방법론이라기보다는 보완적으로 이용되어야 한다고 판단된다.

DEA 모형에서 분석에 필요한 적정 DMU, 투입산출물 개수를 산정할 수 없으나 본 연구 결과는 시나리오의 가정과 범위에 의한 국한된 결과물과 함께 변수의 수가 적어 효율성의 편차가 크게 나타났다. 향후 저감대책의 상대적 효율성 평가 분석에 있어서 좀 더 다양한 DMU

와 다수의 투입 및 산출물의 변수를 적용하여 분석할 경우 더욱더 객관성 있는 결과를 도출할 수 있을 것이라 판단된다. 또한, 투입물의 변수를 비용으로만 한정시켜 분석을 수행하였는데, 저감대책 시행 비용에 대한 변동가능성으로 인해 효율성 결과에 절대적인 영향을 미칠 수 있으므로 향후 보다 많은 변수들의 적용이 가능할 경우 정확한 상대적 평가가 이루어 질 것이라고 판단된다.

그리고 본 연구에서의 저감 대책들간 배출 저감량 분석결과에는 세부 시나리오 구성 및 분석 기초자료의 차이에 따라 다르게 도출될 수 있는 부분이므로 각 대책들의 절대적인 평가결과로 해석되지 못하는 한계성이 존재한다. 따라서 본 연구결과가 각 저감대책들의 정책 추진 근거자료로 직접 활용되는 것은 한계가 있기 때문에, 향후 객관적인 정책 평가를 위한 보다 구체적이고 과학적인 결과도출이 요구된다. 또한 DEA모형 제약조건 중 투입·산출요소의 값이 모두 양수 값이어야 하나 저감량 중 오히려 음(-)의 값으로 산정되는 오염물질이 존재하는데, 이에 대한 문제를 개선하기 위한 방법도 요구된다. 마지막으로, 온실가스와 대기오염물질간의 근원적 차이점을 이해하고 이에 대한 절충점 및 완화점을 모색하여, 비용 효과적인 연계감축대책을 수립하는 실질적인 도로 이동오염원 저감대책 통합 관리 방안에 대한 연구가 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea government(MEST)(NRF-2010-0029446).

REFERENCES

- Adler N., Friedman L., Sinuany-stern Z. (2002), Review of ranking methods in the data envelopment analysis context, *European Journal of Operational Research*, 140, 249-265.
- Andersen P., Petersen N. C. (1993), A procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis, *Management Science*, 39, 1265-1273.
- Caliper (2007), *Travel Demand Modeling With TransCAD 5.0*, Caliper.
- Charnes A., Cooper W. W., Rhodes E. (1978), *Measuring*

- the Efficiency of Decision Making Units, *European Journal of Operational research*, 2, 429-444.
- 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.
- Cooper W. W., Seiford L. M., Tone K. (2007), *Data Envelopment Analysis*(second Edition), Springer.
- 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*, Keimyung University, Master's Thesis.
- 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*, Kyungsoo University, Master's Thesis.
- Jung D. B. (2011), *A Study on the Efficiency of Junior Colleges in Korea : the Relative Efficiency Using Delphi/AHP/DEA Hybrid Model*, Yonsei University, Doctor's Thesis.
- Kim C. H. (2011), *(A) Study on Evaluating Greenhouse Gases Mitigation Policy Considering Cost Efficiency*, Kyungsoo University, Doctor's Thesis.
- Korea Development Institute (2008), *Korean Preliminary feasibility study guidebook* (5th).
- Korea Environment Institute (2009), *Research on the Mitigation Potentials and Mitigation Policies of the Transport and Buildings in Korea*.
- Korea Environment Institute (2010), *Integrated Environmental Strategies* (6th).
- Korea Transport Institute (2010), *A Study on Expressway Congestion Charge*.
- Ku Y. H. (2011), *Assessing the Potential Greenhouse Gas Emission Reductions of Transportation Demand Management Policies Using Travel Demand Model*, Kyungsoo University, Master's Thesis.
- Lee J. K., Han D. H., Oh C. K., Oh K. K. (2012a), *Expressway Greenhouse Gas Reduction Effect Analysis According to the Electric Vehicle Supply*, The 67th Conference of Korean Society of Transportation, Korean Society of Transportation, 651-656.
- Lee K. J. (2010b), *An Air Quality Assessment Framework for Supporting the Decision Making of Transportation Projects and Policies*, Ajou University, Doctor's Thesis.
- Lee K. J., Choi K. J., Ryu S. K., Baek S. K. (2012b), *Development of O/D Based Mobile Emission Estimation Model*, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 32(2), Korean Society of Civil Engineers, 103-110.
- Lee K. J., Choi K. J., Yu J. H., 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.
- Lee M. H. (2010a), *A Panel Analysis on Banking Efficiency in Korea : Using the DEA, Tobit, Malmquist Index*, Chosun University, Doctor's Thesis.
- Metha T., Mahmassani H. S., Bhat C. R. (2001), *Methodologies for Evaluating Environment Benefits of Intelligent Transportation Systems*, Center for transportation Research The University of Texas at Austin, Report No.FHWA/TX-04197-1.
- Min J. H., Kim J. H. (1999), *A Nonparametric Test on Mean Difference of DEA Efficiency Estimates - Bootstrapping Approach-*, *J. Korean Operations Research and Management Science Society*, 24(2), 53-68.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), *Transportation facility investment evaluation guidelines* (4th)
- Nunamaker T. R. (1985), *Using data envelopment analysis to measure the efficiency of nonprofit organizations ; A critical evaluation*, *Managerial and Decision Economics*, 6(1), 50-58.
- Rakha H., Van Aerde M., Ahn K., Trani A. A. (2001), *Requirements for Evaluating Traffic Signal Control Impacts on Energy and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Measurements*, TRR

1738, Paper No.00-1133.

Sherman H. D., Gold F. (1985), Bank branch operating Efficiency-Evaluation With Data Envelopment Analysis, Journal of Banking and Finance, 9, 297-315.

Shin S. K. (2009), The Efficiency of The University Hospitals - DEA Model Approach-, Inha University, Doctor's Thesis.

Woo N. S. (2010), A Study on the Management Performance Analysis of Automobile Parts Manufactures, Yeungnam University, Doctor's Thesis.

Zietsman J., Perkinson D. G., Bochner B. S., Bynum J. (2004), Transit as a Potential Emissions Reduction Strategy, TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM.

✎ 주 작 성 자 : 박관휘

✎ 교 신 저 자 : 박관휘

✎ 논문투고일 : 2013. 9. 1

✎ 논문심사일 : 2013. 11. 21 (1차)

2014. 1. 22 (2차)

2014. 2. 24 (3차)

✎ 심사판정일 : 2014. 2. 24

✎ 반론접수기한 : 2014. 8. 31

✎ 3인 익명 심사필

✎ 1인 abstract 교정필