

자동차 배기가스로 인한 사회적 비용을 고려한 경제성 평가 방법론

조아라, 임성린*

강원대학교 공과대학 건설토목환경공학부 환경공학전공
24341 강원도 춘천시 강원대학길 1

(2019년 8월 8일 접수; 2019년 8월 20일 수정본 접수; 2019년 8월 23일 채택)

A Methodology to Evaluate Economic Feasibility by Taking into Account Social Costs from Automobile Exhaust Gases

A-Ra Cho, and Seong-Rin Lim*

Department of Environmental Engineering, School of Architectural, Civil, and Environmental Engineering, College of Engineering,
Kangwon National University
1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon, Kangwon, 24341, South Korea

(Received for review August 8, 2019; Revision received August 20, 2019; Accepted August 23, 2019)

요 약

자동차에서 배출되는 대기오염 물질로 인하여 인체 건강과 일상 활동이 막대한 피해를 입고 있어 대기오염 물질을 저감하기 위한 새로운 친환경 자동차나 자동차 개조 장치의 개발과 적용이 필요하다. 하지만 이러한 기술의 환경적 편익과 비용이 기존의 경제성 평가에서는 반영되지 않아 친환경기술의 보급에 장애가 되고 있다. 본 연구에서는 자동차에서 발생하는 대기오염 물질이 우리 사회에 끼치는 사회적 비용을 고려하여 친환경기술의 경제적 타당성을 평가하는 방법론을 제안하고, 이 방법론의 적용성과 타당성을 보여주기 위해 사례연구를 실시하였다. 현재 국내에서는 대기오염 물질의 사회적 비용이 평가되지 않았기 때문에 유럽에서 평가한 사회적 단위비용을 바탕으로 국내 자동차 배출가스 측정기준, 구매력 지수, 환율, 소비자 물가지수를 이용하여 국내에서 활용가능한 사회적 단위비용을 도출함으로써 경제적 타당성 평가에 활용할 수 있게 하였다. 사례연구에서는 경유버스를 개조하여 경유와 압축천연가스를 함께 사용할 수 있도록 하는 혼소시스템 기술에 대해 대기오염 물질의 사회적 비용을 포함한 경제성을 평가하였다. 본 연구에서 제안된 방법론은 자동차뿐만 아니라 다양한 친환경 기술, 사업, 정책의 타당성을 평가하는 데 활용될 수 있다.

주제어 : 경제성, 대기오염물질, 방법론, 사회적 비용, 환경성

Abstract : Air pollutants have a high impact on everyday life as well as on human health; therefore, new technologies such as low-emission vehicles and add-on systems for air pollutant reduction are needed for our society. However, the environmental benefits and costs of those technologies are not taken into account in existing economic feasibility assessments, which is a barrier that needs to be overcome for green technology to achieve wide dissemination and fast penetration in the market. Thus, this study develops a methodology to assess the economic feasibility of an air pollutant reduction technology by taking into account the social costs from air pollutants and carries out a case study to validate the methodology. Because the social unit costs for air pollutants have not been evaluated yet in South Korea, the methodology uses the social unit costs evaluated for the European Union that are then converted to those for South Korea based on the measuring criteria for vehicle emission gases, parity purchasing price, foreign currency exchange rate, and customer price index. The social unit costs for South Korea are used to assess economic feasibility. A case study was performed to assess the economic feasibility of a dual fuel system using diesel and compressed natural gas by taking into account social costs from air pollutants as well as economic costs. This study could contribute to assessing the true economic feasibility of green technology, projects, and policy related with air pollutant reduction.

Keywords : Economic feasibility, Air pollutants, Methodology, Social cost, Environmental Performance

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: srlim@kangwon.ac.kr; Tel: +82-33-250-6358; Fax: +82-33-259-5550

doi: 10.7464/ksct.2019.25.3.263 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

1. 서론

최근 미세먼지로 인한 대기오염으로 인하여 일반 대중들의 야외활동이 제한되고 호흡기 질환과 발암에 대한 우려가 가중되어 사회적 재해로 인식되고 있다. 미세먼지와 같은 대기오염 물질에는 탄소, 황산염, 질산염, 유기화합물, 중금속이 다량으로 포함되어 호흡기와 심혈관에 급성과 만성 질환을 유발할 수 있는 높은 잠재력을 가지고 있다[1]. 무엇보다도 미세먼지는 발암물질로 분류되고 있어[2], 다른 대기오염 물질보다 우리 사회에 많은 피해를 일으켜 사회적 비용이 2-3배 정도 크기 때문에 미세먼지의 발생을 사전예방하는 것이 매우 중요하다[3,4]. 점오염원은 방지시설을 설치하거나 운영관리를 통하여 저감 조치를 집중적으로 취할 수 있는 반면, 자동차와 같은 이동 발생원인 수송 수단은 다수의 규모가 작고 산재된 발생원이어서 다양한 대기오염물질의 발생을 감축시키는데 많은 어려움을 가지고 있다[2].

여러 가지 대기오염 발생원 중, 자동차로부터 발생하는 환경 문제는 다른 수송 수단보다 공간적으로 사람들과 근접해 있기 때문에 직접적으로 주변 사람에게 영향을 끼칠 수 있어 이에 대한 대책이 특별히 필요하다. 자동차의 배기가스로 인한 환경적 문제를 근원적으로 해결하기 위해서는 이로 인한 사회적 비용을 경제적 가치로 평가하여 자동차를 친환경적으로 구매하거나 개조할 때 환경적인 측면을 반영하여 의사결정을 할 수 필요가 있다. 자동차의 배출가스 중에서는 미세먼지 이외에도 다양한 유해 성분인 CO, NOx, CO₂, O₃, VOC, CH₄ 등이 포함되어 있다[5,6]. 따라서, 각 대기오염 물질에 대한 사회적 비용을 평가하여 자동차의 경제적 타당성에 포함 시킴으로써 환경성과 경제성을 동시에 고려할 필요가 있다.

대기오염 물질에 대한 사회적 비용을 추정하기 위하여 유엔과 유럽을 중심으로 많은 연구가 이루어졌다. European Commission (EC)은 수년간에 걸친 연구 프로젝트 'ExternE (Externality of Energy)'를 통해 에너지 소비에 따른 대기오염의 사회적 한계비용을 국가별, 오염물질별로 추정하였다[7]. UNEP는 대기오염의 사회적 비용에 대한 ExternE 추정치와 미국의 기존 추정치를 토대로 ExternE에 포함되지 않은 개발도상국을 대상으로 각국의 경제력 수준에 부합하는 대기오염 물질별 사회적 비용을 추정하였다[8]. Holland & Watkiss는 EU 15개 회원국에 대하여 ExternE Project의 추정방법을 적용하여 대기오염물질의 단위당 사회적 비용을 추정하였다[9]. 이들은 EU 15개국(룩셈부르크 제외)의 1998년도 오염물질 배출 시나리오를 바탕으로 SO₂, NOx, VOCs, PM에 대해 사회적 비용을 추정하였다. 국내에서는 전문가 대상의 설문조사 결과를 토대로 오염물질의 대기 위해성 지수를 이용하여 오염물질별 상대적 크기를 단순히 평가하였다[10]. 하지만 국내에서는 대기오염 물질의 사회적 단위비용이 평가되어 있지 않는 실정이므로 국내에서 대기오염 물질의 사회적 비용을 경제성 평가에 반영시킬 수 있는 방안이 필요하다.

본 연구의 목적은 자동차에서 배출되는 대기오염 물질의 사회적 단위비용을 국내 상황에 적합하게 도출함으로써 자동

차의 구입이나 개조시 요구되는 의사결정에 사회적 비용을 반영하여 경제성을 평가할 수 있도록 하는 방법론을 개발하는 것이다. 앞에서 언급한 것처럼 현재 국내에서는 대기오염 물질의 사회적 비용에 대한 평가가 이루어지지 않았기 때문에 유럽의 연구 결과를 바탕으로 국내 사정에 적합하도록 구매력지수, 환율, 물가지수를 고려하여 대기오염 물질의 환경부하를 화폐가치로 평가하여 사회적 단위비용을 도출하였고, 이를 이용하여 자동차의 구매나 개조시 환경적, 경제적으로 타당한 의사결정을 할 수 있는 방법론을 개발하였다. 또한, 본 연구에서 개발한 방법론의 적용성과 타당성을 검토하기 위하여 경유 버스를 개조하여 압축천연가스(Compressed Natural Gas: CNG)와 경유를 함께 사용할 수 있도록 하는 혼소 시스템의 환경적, 경제적 타당성을 동시에 평가하는 사례연구를 수행하였다.

2. 자동차 배출가스의 사회적 비용을 고려한 경제성 평가 방법론

2.1. 일반적인 경제성 평가의 방법론

자동차의 운행과 관련된 세부적인 비용은 투자비와 운영비로 구분된다. 즉, 초기투자비인 자동차 구입비나 친환경 자동차로의 개조를 위한 장치 설치비와 더불어 유지관리비인 연료비, 검사비, 각종 부담금 등이 있다[11]. 이러한 비용들은 수익성을 고려한 경제성 평가를 하기 위해 신규 자동차의 구입시에는 기존 자동차의 비용을 기준으로 상호 비교하여 비용이 증가하거나 감소하면 각각 점증적 비용과 편익(Incremental cost and benefit)의 발생으로 평가할 수 있다. 자동차의 개조시에는 개조를 위한 추가 시스템의 설치로 인해 발생할 수 있는 비용의 증감을 평가하여 동일한 방식으로 점증적 비용과 편익을 평가할 수 있다. 즉, 평가 기준이 되는 기존의 투자비와 운영비와 비교하여 비용 차이를 이용하여 자동차 구입이나 개조로 인한 점증적 비용과 편익을 계산하여 수익성을 고려한 경제성을 평가할 수 있다[11-13]. 구체적으로 이야기 하면, 새로운 자동차의 구입이나 개조 비용이 비교 대상인 기존 자동차의 비용보다 크면 점증적 비용(Incremental cost)이 발생하고, 작으면 점증적 편익(Incremental benefit)이 발생한다. 여기에서 산출된 점증적 비용과 편익은 순현재가치(Net present value, NPV), 내부수익률(Internal rate of return, IRR), 비용편익비율(Cost benefit ratio, C/B ratio), 투자회수기간(Payback period, PP) 등의 수익성 평가 분석방법을 통하여 경제적 타당성 평가에 이용될 수 있다[11-13].

순현재가치법[14]은 다음의 Equation (1-3)과 같이 매년 발생하는 점증적 편익과 점증적 비용을 현재가치로 환산하여 계산함으로써 점증적 편익과 비용의 총현가를 각각 구한 후 서로 합하여 순현재가치를 평가하는 경제성 평가 방법이다.

$$\text{점증적 편익의 총현재가} = \sum_{t=0} IB_t / (1+i)^t \quad (1)$$

$$\text{점증적 비용의 총현재가} = \sum_{t=0} IC_t / (1+i)^t \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{순현재가치} &= \sum_{t=0} IB_t / (1+i)^t - \sum_{t=0} IC_t / (1+i)^t \quad (3) \\ &= \sum_{t=0} (IB_t - IC_t) / (1+i)^t \end{aligned}$$

여기에서 IB_t 와 IC_t 는 t년도의 점증적 편익과 비용, i 는 할인율이다. 순현재가치가 0보다 크면 경제적으로 타당하다고 판단할 수 있다. 내부수익률[14]은 Equation (3)의 순현재가치가 0일 때의 할인율로서, 점증적 편익과 비용의 총현가를 서로 같게 만드는 할인율이다. 어떤 투자의 내부수익률은 그 투자로부터 얻을 수 있는 최대 이자율이므로 그 투자의 내부수익률이 은행금리보다 높으면 경제성이 확보된다. 비용편익비율[14]은 투자 타당성을 검토할 때 사용되는 지표이며, 사업 운영기간 동안에 발생한 비용과 편익의 비율로서 점증적 편익과 비용의 총현가를 서로 나누어 계산한다. 투자회수기간[14]은 초기투자로부터 얻을 수 있는 이익으로 초기투자비를 회수하는데 걸리는 기간을 평가하는 것으로 단기간에 회수할수록 경제성이 우수하다.

2.2. 대기오염 물질의 사회적 단위비용 평가

자동차에서 배출되는 오염물질로 인한 환경영향을 정량적으로 평가하기 위하여 배출가스에 포함된 오염물질의 종류에 따른 사회적 단위비용을 결정하여야 한다. 현재 국내에서는 이러한 사회적 단위비용에 대한 연구가 미비하여 본 연구에서는 유럽의 RICARDO-AEA에서 발표한 ‘EU의 수송에 의한 사회적 단위비용 정량화 보고서’[15]의 결과를 토대로 국내에 적용할 수 있는 배출가스별 사회적 단위비용을 다음의 Equation (4)와 같이 평가하였다.

$$\text{Social Cost for South Korea} = \frac{\text{Social Cost for EU average} \times \text{PR} \times \text{CER}}{1000} \quad (4)$$

여기서, Social Cost for South Korea는 한국에서의 배출가스별 사회적 단위비용(원 kg^{-1}), Social Cost for EU average는 EU에서의 배출가스별 사회적 단위비용(EUR tonne^{-1}), PR (PPP Ratio)은 구매력평가지수비, CER (Currency Exchange Rate)은 환율비를 각각 나타내며, 1000은 단위환산을 위해 사용되었다. 본 연구에서는 자동차로부터 배출되는 오염물질 중에서 NMVOC (Non-methane Volatile Organic Compounds), NOx, PM2.5, SO₂, CO₂, CH₄에 대해 사회적 단위비용을 결정하였다. CO에 대한 사회적 비용은 평가 대상에서 제외하였는데, 이는 자동차에서 배출되는 CO는 대기로 배출시 공기에 희석되어 농도가 짧은 시간 내에 낮아질 뿐만 아니라 공기 중의 산소에 의하여 CO₂로 산화되어 독성이 낮아지기 때문이다 [16]. CO₂에 대한 사회적 단위비용은 CO₂ 배출권의 국내 거래가격을 이용하였고, CH₄에 대한 사회적 단위비용은 지구온난화지수(GWP)를 이용하여 CO₂-eq (equivalent)로 환산하여 산정하였다.

2.3. 자동차에서 배출되는 대기오염 물질의 연간 사회적 비용 평가

자동차의 연간 사회적 비용은 대기오염 물질별 주행거리당 배출량, 사회적 단위비용, 연간 주행거리를 이용하여 다음의 Equation (5)와 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{자동차의 연간 사회적 비용(원)} &= \text{주행거리당 배출량} \left(\frac{g}{km} \right) \times \text{사회적 단위비용} \left(\frac{\text{원}}{kg} \right) \times \\ &\quad \frac{1kg}{1000g} \times \text{연간 주행거리}(km) \end{aligned} \quad (5)$$

자동차의 경제성을 평가할 때 환경성을 고려하기 위해서는 자동차의 배출가스로 인한 사회적 비용과 편익을 산정해야 한다. 이를 위해 일반적인 경제성 평가 절차와 같이 기존의 자동차나 개조 전의 자동차를 운행하였을 때 발생하는 사회적 비용을 비교 기준으로 이용하여 새로 구입한 자동차나 개조된 자동차를 운행하였을 때 발생하는 사회적 비용의 증가나 감소를 평가하여 Equation (6)과 같이 점증적 비용과 평가로 평가한다.

$$\begin{aligned} \text{점증적 사회적 비용 또는 편익} &= \text{신규 자동차나 개조 후 자동차의 사회적 비용} - \\ &\quad \text{비교 대상의 기존 자동차나 개조 전 자동차의 사회적 비용} \end{aligned} \quad (6)$$

이 식에서 신규 자동차나 개조된 자동차의 사회적 비용이 비교 대상인 기존 자동차나 개조 전의 자동차로 인한 사회적 비용보다 크다면 점증적 사회적 비용이 발생하고, 작으면 점증적 사회적 편익이 발생한다.

2.4. 사회적 비용을 고려한 경제성 평가 방법

자동차의 사회적 비용과 편익을 경제적 비용과 편익에 추가함으로써 일반적인 경제성 평가 방법을 통해 환경성과 경제성을 동시에 고려하는 통합 평가가 가능하다. 이 때 자동차의 환경성을 평가하기 위해서는 사회적 편익과 비용에 대하여 할인율을 결정할 필요가 있다. 공공의 비용과 편익에 대하여 할인율을 적용하여 미래의 편익과 비용을 합산하는 것은 미래세대에게 귀속되는 편익과 비용을 낮추는 것을 의미한다 [14]. 즉, 할인율이 높으면 먼 미래보다는 현재의 가시적 편익을 많이 창출하는 의사결정에 대한 경제적 타당성이 높아진다. 따라서, 미래세대를 고려하여 환경영향으로 인한 비용과 편익을 중요하게 반영하기 위하여 사회적 편익과 비용에 대한 할인율을 경제적 편익과 비용에 대한 할인율보다는 낮게 설정할 필요가 있다[14].

3. 사례 연구

국내에서 자동차의 배기가스 배출로 인해 발생하는 사회적 비용을 고려하여 자동차를 신규로 구입하거나 개조할 때 필요한 의사결정을 하기 위해 개발된 방법론의 타당성과 적용

Table 1. Characteristics of NIER cruise patterns

Cycle no.	Average Speed (km h ⁻¹)	Stop Factor (Number km ⁻¹)	Time Ratio -Stop (%)	Time Ratio Cruise (%)
NIER 01	4.7	17.49	52.1	30.5
NIER 02	8.0	10.26	44.6	30.7
NIER 03	10.8	6.47	38.2	32.6
NIER 04	13.4	4.20	32.9	39.3
NIER 05	17.3	2.90	29.7	40.1
NIER 06	19.4	2.20	27.4	40.3
NIER 07	24.6	1.67	22.6	42.7
NIER 08	27.3	1.44	18.1	47.4
NIER 09	34.1	0.91	12.4	56.4
NIER 10	46.4	0.34	5.5	69.1
NIER 11	53.7	0.07	0.0	82.3
NIER 12	65.4	0.00	0.0	88.7
NIER 13	79.6	0.00	0.0	95.2
NIER 14	97.3	0.00	0.0	98.4
NIER 15	114.2	0.00	0.0	94.1

성을 검토하기 위해 사례연구를 실시하였다. 이 사례연구에서는 사용 중인 경유버스(EURO 4 배출기준으로 제작)에서 배출되는 미세먼지의 발생량을 저감하기 위하여 압축천연가스를 경유와 함께 사용할 수 있도록 설치한 혼소시스템을 대상으로 하였다.

3.1. 방법

3.1.1. 버스의 운행 시나리오 설정

혼소시스템으로 개조된 경유버스의 배출오염물질을 측정하기 위해 버스의 운행 모드를 저속, 중속, 고속으로 분류하여 주행패턴을 설정하였다. 국립환경과학원의 대표적 차속별 주행패턴인 NIER (National Institute of Environmental Research) 모드[17]를 바탕으로 주행 실험이 수행되었다. NIER 모드는 Table 1과 같이 4.5 km h⁻¹ ~ 115.0 km h⁻¹ 범위에 대하여 15개의 주행패턴으로 구성된다. 본 사례연구에서는 혼소버스의 주행패턴을 대표하기 위하여 NIER 8 (도심 운행 가정), NIER 12 (근교 운행 가정), NIER 14 (고속도로 운행 가정)를 선정하여 대기오염 물질의 배출량을 측정하여 사회적 비용을 평가하였다. 혼소시스템으로 개조하기 전후의 대기오염물질 배출량과 연료 소모량을 비교하기 위하여 동일한 경유버스에 혼소시스템을 가동하지 않을 때와 가동할 때로 구분하여 실험을 수행하였다. 버스의 연간 운행 방식은 주행 장소와 속도별로 다르기 때문에 운행 방식을 도심(저속), 근교(중속), 고속도로(고속)로 구분하고 각각의 운행 방식에 따른 주행거리의 비율을 다르게 가정하여 세 가지의 시나리오로 설정하였다. Table 2는 각 시나리오별 주행 장소와 속도에 따른 주행거리의 비율을 나타내었다.

Table 2. Proportion of the bus speeds and road conditions depending on the cruise scenarios

Cruise Pattern (Area/Speed)	Urban/ Low Speed	Suburban/ Medium Speed	Intercity Highway/ High Speed
Scenario I	30%	30%	40%
Scenario II	20%	20%	60%
Scenario III	10%	10%	80%

3.1.2. 버스의 연료 단가 및 주행거리 조사

2014년 5월부터 2016년 5월까지 3년간 서울 지역의 연료단가를 조사한 결과, 경유와 압축천연가스의 평균 단가는 각각 1415원 L⁻¹와 874원 Nm⁻³이었다[18,19]. 혼소버스의 주행거리는 전국전세버스조합연합회의 자료를 바탕으로 조사되었으며 전세버스의 연간 평균 주행거리는 40,000 km이었다[20].

3.1.3. 버스의 경제적 비용 조사

혼소시스템의 설치로 인한 운행 버스의 연간 비용을 평가하기 위하여 혼소시스템의 설치에 따른 초기투자비와 운영비를 조사하였다. 운영비는 경유와 압축천연가스의 연료비, 천연가스필터 교체비, 내압용기 검사수수료가 포함되었다. 연간 비용을 산정하기 위해 혼소시스템의 초기투자비는 내용년수를 고려하여 10년으로 균일하게 분할되어 평가하였으며 내압용기의 정기검사수수료는 검사 주기를 고려하여 3년으로 균일하게 분할하여 평가하였다.

3.1.4. 물가상승율과 할인율 설정

혼소시스템의 경제성을 사회적 비용과 통합 평가하기 위해 한국은행 경제통계시스템[21]의 자료를 사용하여 물가상승율을 결정하였다. 물가상승율을 결정하기 위하여 2011년부터 2015년까지의 소비자물가지수에 대한 평균값을 고려하여 물가상승율을 2%로 적용하였다. 할인율은 경제적 비용과 사회적 비용을 구분하여 다르게 적용하였다. 경제적인 비용과 편익에 대해서는 한국은행 경제통계시스템[21]의 자료를 바탕으로 2010년부터 2014년까지의 금리에 대한 평균값을 고려하여 3%를 적용하였다. 혼소시스템의 환경성을 평가하기 위해서는 사회적 편익과 비용에 대한 할인율을 별도로 결정할 필요가 있다. 공공에 대한 비용이나 편익에 할인율을 적용하여 미래의 편익과 비용을 합산하는 것은 미래세대에게 귀속되는 편익과 비용을 낮추는 것을 의미한다. 본 연구에서는 미래세대를 위해 환경영향을 최대한 낮추는 것이 바람직하다고 판단되어 사회적 편익과 비용에 대한 할인율을 0%로 설정하였다.

3.1.5. 불확도분석 및 민감도평가

사회적 비용을 고려한 경제성 평가에서 이용한 데이터의 변동성과 불확실성이 혼소시스템의 타당성에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 평가에 사용된 데이터의 확률분포를 고려할 수 있도록 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 수행하여 확률론적 모델링 기법(stochastic modeling)을 적용하였다[22]. 압축천연가스와 경유의 단가는 연료 생산 국가의 지정

Table 3. Social unit costs of air pollutants emitted from automobile transport for European countries

Air Pollutant		Average Social Unit Cost for EU and Year 2010 (Euro ton ⁻¹)
NMVOC		1,566
NOx		10,640
PM2.5	Rural Area	28,108
	Suburban Area	70,258
	Urban Area	270,128

학적 상황에 따라 많은 영향을 받기 때문에 과거의 연료단가 자료를 바탕으로 확률분포 함수를 도출하였다. 버스의 연간 주행거리와 물가상승률, 할인율은 정규분포로 가정하였다. 주행거리의 표준편차는 평균 주행거리의 10%로 가정하였고, 물가상승률과 할인율에 대한 표준편차는 높은 변동성을 고려하기 위해 각각 1%와 2%로 가정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션에서는 데이터의 변동성을 고려하여 100,000회 반복 실시함으로써 순현재가치의 불확도를 평가하였다. 몬테카를로 시뮬레이션은 Crystal Ball 소프트웨어[23]를 이용하여 수행하였다.

3.2. 사회적 비용을 고려한 경제적 타당성 평가 결과

3.2.1. 사회적 단위비용 도출 결과

Table 3은 RICARDO-AEA[15]에서 발표한 ‘EU의 수송에 의한 사회적 비용 정량화’연구 보고서에 포함되어 있는 EU 지역의 배출가스별 사회적 단위비용을 나타낸 것이다. PM2.5의 사회적 단위비용은 인구밀도에 따라 달라지기 때문에 자동차가 운행하고 있는 주변 지역의 여건에 따라 다르다. EU의 배출가스별 사회적 단위비용을 국내에서 사용하고 있는 주행성능 평가를 위한 시험모드의 분류 방식에 맞추기 위하여 Table 4와 같이 운행 속도로 구분하여 나타내었다. 여기에서 고속 주행을 하는 고속도로의 주변 상황은 농촌 지역(Rural Area)와 유사할 것으로 가정하였다. 유럽의 사회적 단위비용을 국내에 적용하기 위해서는 Table 5의 구매력지수와 환율(KRW/EURO (2010년 평균) = 1,532.94)을 반영하였다. 이 때 유럽과 한국의 구매력지수가 직접적으로 비교된 자료가 없기 때문에 유럽 통계청[24]과 OECD 통계자료[25]를 이용하여 유럽과 미국의 구매력지수와 더불어 미국과 한국의 구매력지수를 동시에 비교하였다. 이들 지수는 2010년을 기준으로 하고 있기 때문에 Table 6의 소비자물가지수를 사용하여 2015년에 대한 한국의 배출가스별 사회적 단위비용을 Table 7에 나타내었다. 여기에서 CO₂에 대한 사회적 단위비용은 한국거래소[26]에서 제공한 CO₂ 배출권 거래가격(2016년 6월 1일 기준)으로 설정하였으며, CH₄에 대한 사회적 단위비용은 지구온난화지수(GWP)를 이용하여 CO₂ 배출량으로 환산하여 산정하였다.

3.2.2. 대기 오염물질의 배출량 모니터링 결과

대기오염 물질의 배출량을 모니터링한 결과(Table 8)를 살펴보면, 경유버스와 혼소버스가 저속으로 운행할 때 모든

Table 4. Social unit costs for PM2.5 and Europe (Year 2010) depending on automobile speed

Speed	Social Unit Cost for PM2.5 (Euro ton ⁻¹)
Low Speed for Urban Area	270,178
Medium Speed for Suburban Area	28,108
High Speed for Intercity Highway	28,108

Table 5. Purchasing power parity (PPP) for GDP per capita for year 2010

Country	EUROSTAT	OECDSTAT	Converted PPP
EU28	1	-	1
United States	1.3113	138	-
Korea	-	87	1.2096

Table 6. Customer price index for years 2010 through 2015, South Korea

Year	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Customer Price Index (2010 = 100)	100	104	106.28	107.67	109.04	109.81

Table 7. Social unit costs (Year 2015) in KRW for air pollutants in automobile exhaust gas

Air Pollutant		Social Unit Cost (KRW kg ⁻¹)
NMVOC		3,189
NOx		21,665
PM2.5	Low Speed for Urban Area	550,142
	Medium Speed for Suburban Area	57,234
	High Speed for Intercity Highway	57,234
CO ₂		12
CH ₄		360

오염물질 항목에 대해 단위 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 경유버스와 혼소장치를 장착한 버스의 운행 결과를 비교해 보면, 혼소버스는 CO₂, NOx, PM의 배출량이 감소하였지만 NMVOC, CH₄의 배출량은 증가하는 결과를 보여주었다. 특히, CH₄의 경우에는 혼소시스템을 장착하였을 때만 배출되는 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 결과만으로는 혼소시스템의 환경성에 대해서 평가하기가 어렵다. 연료 소모량의 경우에도 혼소버스는 경유버스보다 경유 사용량은 감소하였지만 압축천연가스의 사용량은 증가하여 경제적인 편익과 비용이 동시에 발생하였기 때문에 추가적인 경제성 평가가 필요함을 알 수 있다.

3.2.3. 대기오염 물질로 인한 사회적 비용의 비교평가

자동차 주행 실험의 결과와 본 연구에서 도출한 사회적 단위비용을 사용하여 버스를 1년 동안 운행하였을 때 발생하는 사회적 비용과 편익을 평가하여 Table 9에 주행 시나리오별

Table 8. Air pollutant emissions and fuel consumptions of the cruise tests for the diesel bus and the dual fuel bus

Test Mode	Average Cruise Speed (km h ⁻¹)	Cruise Distance (km)	Air Pollutant						Fuel Consumption							
			NMVOC (g km ⁻¹)		CH ₄ (g km ⁻¹)		NOx (g km ⁻¹)		CO ₂ (g km ⁻¹)		PM2.5 (g km ⁻¹)		Diesel (kg)	Compressed Natural Gas (kg)		
			Diesel Bus	Dual Fuel Bus	Diesel Bus	Dual Fuel Bus	Diesel Bus	Dual Fuel Bus	Diesel Bus	Dual Fuel Bus	Diesel Bus	Dual Fuel Bus	Diesel Bus	Dual Fuel Bus		
NIER 8	28.1	9	0.208	12.09	-	11.12	13.15	10.49	788.5	720.0	0.137	0.043	2.176	1.588	-	0.78
NIER 12	65.9	16	0.13	10.88	-	10.17	8.93	7.19	610.5	561.7	0.03	0.029	3.04	2.06	-	1.24
NIER 14	40.14	25	0.08	6.50	-	6.17	8.57	6.15	503.0	460.1	0.019	0.016	4.02	2.49	-	1.88

Table 9. Annual social costs estimated based on the cruise tests for the diesel bus and the dual fuel bus (Unit: 10³ KRW)

Scenario	NMVOC		CH ₄		NOx		CO ₂		PM		Total	
	Diesel Bus	Dual Fuel Bus	Diesel Bus	Dual Fuel Bus	Diesel Bus	Dual Fuel Bus	Diesel Bus	Dual Fuel Bus	Diesel Bus	Dual Fuel Bus	Diesel Bus	Dual Fuel Bus
Scenario I	17	1,210	-	127	8,711	6,728	298	272	942	318	9,499	8,657
Scenario II	14	1,083	-	114	8,283	6,262	279	255	642	224	9,219	7,940
Scenario III	12	956	-	86	7,854	5,795	260	238	343	130	8,470	7,207

Table 10. Comparison of annual total costs of the diesel bus and the dual fuel bus by taking into account economic and social costs: (a) Scenario I; (b) Scenario II; and (c) Scenario III. The installation cost and lifetime of the dual fuel system are KRW 16,400,000 and 10 years, respectively. Unit: 10^3 KRW yr⁻¹

			Diesel bus	Dual fuel bus
Economic Cost	Annualized initial installation cost		-	1,640
	Annual operating cost	Diesel fuel	13,211	8,961
		CNG fuel	-	3,476
		Gas filter	-	125
		Gas vessel inspection	-	83
	Sub-total		13,211	14,286
Social Cost from Air Pollutant Emissions	NMVOC		17	1,210
	CH ₄		-	127
	NOx		8,711	6,728
	CO ₂		298	272
	PM		942	318
	Sub-total		9,968	8,657
Total (Economic Cost + Social Cost)			23,179	22,944

(a)

			Diesel bus	Dual fuel bus
Economic Cost	Annualized initial installation cost		-	1,640
	Annual operating cost	Diesel fuel	12,469	8,238
		CNG fuel	-	3,416
		Gas filter	-	125
		Gas vessel inspection	-	83
	Sub-total		12,469	13,503
Social Cost from Air Pollutant Emissions	NMVOC		14	1,083
	CH ₄		-	114
	NOx		8,282	6,262
	CO ₂		279	255
	PM		642	224
	Sub-total		9,219	7,940
Total (Economic Cost + Social Cost)			21,689	21,443

(b)

			Diesel bus	Dual fuel bus
Economic Cost	Annualized initial installation cost		-	1,640
	Annual operating cost	Diesel fuel	11,718	7,515
		CNG fuel	-	3,356
		Gas filter	-	125
		Gas vessel inspection	-	83
	Sub-total		11,718	12,719
Social Cost from Air Pollutant Emissions	NMVOC		12	956
	CH ₄		-	86
	NOx		7,854	5,795
	CO ₂		260	238
	PM		343	130
	Sub-total		8,470	7,207
Total (Economic Cost + Social Cost)			20,189	19,927

(c)

로 나타내었다. 시나리오 I과 같이 저속으로 주행하는 비율이 높을수록 경유버스와 혼소버스의 사회적 비용이 모두 증가함을 알 수 있었는데, 이는 저속으로 주행할수록 배출량이 증가하기 때문이다. 경유버스와 혼소버스의 사회적 비용 차이는 저속의 비율이 높은 시나리오 I에서 가장 크게 발생하였으며 고속으로 주행하는 비율이 높은 시나리오 II에서는 비용 차이

가 가장 적게 나타났다.

3.2.4. 경유버스와 혼소버스의 경제적, 사회적 비용의 비교평가

3.2.4.1. 연간 경제적, 사회적 비용(할인율, 물가상승률 미고려시) 저속의 운행거리 비율이 높은 시나리오 I을 따르는 혼소

버스와 경유버스의 연간 경제적, 사회적 비용을 평가한 결과를 Table 10(a)에 나타내었다. 혼소버스의 경제적 비용은 혼소시스템의 초기투자비로 인하여 경유버스보다 높게 나왔으나, 사회적 비용은 낮게 발생하는 것으로 나타났다. 경제적 비용과 사회적 비용을 모두 고려한 경유버스의 연간 비용은 23,179,000원, 혼소버스의 연간 비용은 22,944,000원으로 평가되어 혼소버스의 총 비용은 경유버스보다 연간 235,000원 낮은 것으로 나타나서 경제적 측면과 환경적 측면을 모두 고려하였을 때 혼소시스템 설치하는 타당한 것으로 보인다.

Table 10(b)와 (c)에 나타난 것처럼 고속의 운행거리비율이 높은 시나리오 II와 III에서도 시나리오 I과 유사한 결과가 나타났다. 시나리오 II에서는 경유버스의 연간 비용이 21,689,000원, CNG 혼소버스의 연간 비용은 21,443,000원으로 평가되어 혼소버스의 총 비용은 경유버스 대비 연간 245,000원 낮은 것으로 분석되었다. 시나리오 III에서도 경유버스의 연간비용은 20,189,000원, 혼소버스의 연간 비용은 19,927,000원으로 평가되었으며 혼소버스의 총 비용이 경유버스 대비 연간 261,000원 낮은 것으로 나타났다. 따라서, 경제적 비용과 사회적 비용을 모두 고려하였을 때, 고속 주행의 비율이 높을수록 혼소시스템의 설치가 유리하다는 것을 보여주었다.

3.2.4.2. 사회적 비용을 고려한 경제성 평가(할인율, 물가상승률 고려시)

혼소버스의 타당성을 할인율과 물가상승률을 고려하여 평가하기 위해 도출한 NPV, C/B 비율, IRR, PP 결과를 Figure 1에 나타내었다. Figure 1은 시간에 따른 NPV 변화를 나타낸 것이다. 사회적 비용을 제외하고 경제적 비용만을 고려하였을 경우, 모든 시나리오에서 10년 후에 음의 NPV를 나타내어 경제적 타당성이 없음을 보여 주었다. 반면, 사회적 비용과 경제적 비용을 동시에 고려하였을 경우에는 10년 경과 후에 양의 NPV를 보여줌으로써 혼소시스템의 타당성이 있음을 보여주었다. 시나리오별로 NPV는 +3,745,000 ~ +3,865,000이었다. 이러한 타당성은 NPV 결과뿐만 아니라 C/B 비율, IRR, PP의 모든 평가에서 동일한 결과를 보여주었다(Table 11). C/B 비율은 1.23 ~ 1.24, IRR은 4.8 ~ 5.0%, PP는 약 8년이였다. 시나리오별로 비교해 보면 그 차이는 미미하나 혼소버스가 고속으로 주행하는 거리의 비율이 높을수록 사회적 비용을 고려한 경제적 타당성이 우수함을 알 수 있다.

3.3. 불확도분석 및 민감도평가 분석결과

3.3.1. 투입 데이터의 확률분포 결정

사회적 비용을 포함한 경제적 타당성의 평가분석 결과의 불확실성을 고려하기 위하여 2014년 5월부터 2016년 5월까지 3년간 서울 지역의 연료단가 변화를 고려하여 확률분포를 분석한 결과, 경유와 압축천연가스의 단가는 Maximum Extreme과 Beta 확률분포함수를 각각 따르고 있었다. 몬테카를로 시뮬레이션에 필요한 각 투입 데이터의 확률분포는 Table 12와 같다.

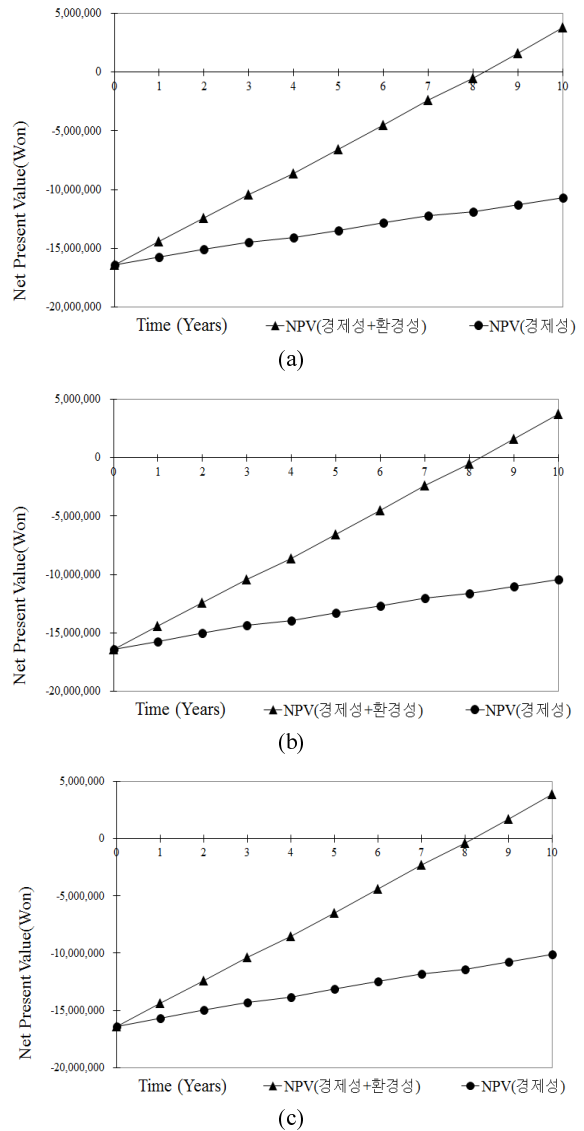


Figure 1. Net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) of the duel fuel system for the three scenarios: (a) Scenario I; (b) Scenario II; and (c) Scenario III.

3.3.2. 불확도와 민감도 분석 결과

본 사례연구의 대상인 버스는 전세버스로 고속 주행의 비율이 높기 때문에 불확실성과 민감도 분석은 실제 전세버스 주행패턴과 가장 유사한 시나리오 III을 대표적인 예로 선택하여 분석하였다.

3.3.2.1. 불확실성 평가

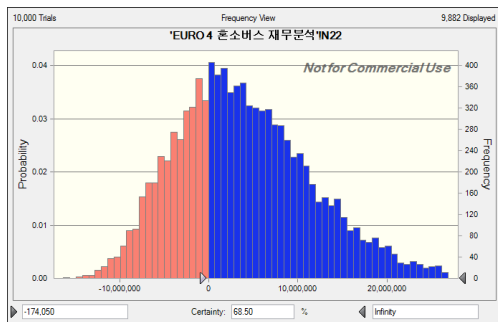
혼소시스템으로 개조된 버스에 대한 NPV의 불확도 평가 결과는 Figure 2(a)에 나타내었다. 입력 데이터의 불확실성이 고려되어 평가된 혼소시스템의 경제적, 환경적 타당성은 확률적으로 NPV가 0보다 클 가능성이 68.5%이었다. 따라서, 여러 가지 변동인자를 고려하더라도 사회적 비용을 포함하여 경제적 타당성을 가질 수 있는 확률이 비교적 높게 나타났다. 하지만, 확률이 100%이지는 않기 때문에 상황에 따라서 경제

Table 11. Net present value (NPV), cost-benefit ratio (C/B), internal rate of return (IRR), payback period (PP) of the dual fuel bus by taking into account economic and social cost at the same time, depending on the scenarios

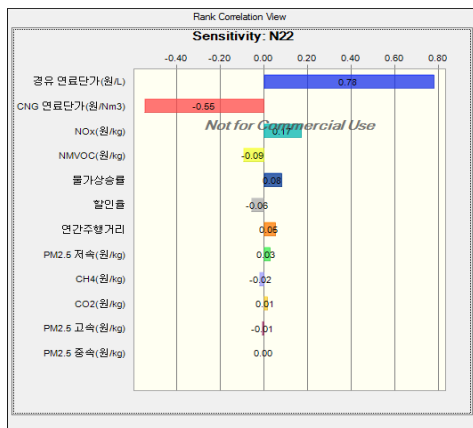
	NPV (10 ³ KRW)	C/B (-)	IRR (%)	PP (Year)
Scenario I	+3,792	1.23	4.8	8
Scenario II	+3,745	1.23	4.8	8
Scenario III	+3,865	1.24	5.0	8

Table 12. Probability distribution of the input data used for the uncertainty and sensitivity analyses

	Mean	Standard Deviation	Probability distribution function	
Unit price for diesel (Won L ⁻¹)	1415	201.01	Max Extreme	
Unit price for CNG (Won Nm ⁻³)	874	117.51	Beta	
Inflation rate	0.02	0.01	Normal	
Discount rate	0.03	0.02	Normal	
Annual mileage (km)	40,000	4,000	Normal	
Unit Social Cost for NOx (KRW kg ⁻¹)	21,665	2,167	Normal	
Unit Social Cost for CO ₂ (KRW kg ⁻¹)	12	1.2	Normal	
Unit Social Cost for CH ₄ (KRW kg ⁻¹)	360	36	Normal	
Unit Social Cost for NMVOC (KRW kg ⁻¹)	3,189	319	Normal	
Unit Social Cost PM2.5 (KRW kg ⁻¹)	Low Speed	550,142	5,501	Normal
	Medium Speed	57,234	5,723	Normal
	High Speed	57,234	5,723	Normal



(a)



(b)

Figure 2. Uncertainty and sensitivity analysis results for the net present value (NPV) of the dual fuel bus for Scenario III: (a) uncertainty analysis; and (b) sensitivity analysis.

적, 환경적 타당성을 확보하지 못할 가능성도 있다.

3.3.2.2. 민감도 분석 결과

혼소버스의 민감도 분석 결과를 Figure 2(b)에 나타내었다. 혼소버스에 대한 NPV의 민감도에 영향을 미치는 주요 인자는 영향이 큰 순서대로 보면 경유 연료단가, 압축천연가스 연료단가, NOx의 사회적 단위비용, NMVOC의 사회적 단위비용, 물가상승률이었다. 압축천연가스의 연료단가와 NMVOC의 사회적 단위비용은 음수를 띄웠는데 이는 NPV와 반비례 관계임을 의미한다. 사회적 단위비용 항목들을 비교해보면 NOx와 NMVOC외의 항목들은 NPV에 거의 영향을 미치지 않았다. 이 이유는 NOx로 인한 사회적 비용이 다른 오염물질에 비해 크고 혼소버스에 대한 NMVOC로 인한 사회적 비용이 경유버스보다 크기 때문이다. CO₂, CH₄의 경우에는 사회적 단위비용이 다른 항목들에 비해 작았기 때문에 결과에 미치는 영향이 거의 없었다. PM2.5의 경우에는 경유버스와 혼소버스의 PM2.5 배출량이 매우 적었기 때문에 민감도에 미치는 영향이 낮았다.

4. 결론

자동차에서 배출되는 대기오염물질로 인한 사회적 비용을 포함하여 경제적 타당성을 평가할 수 있는 방법론을 개발하였으며, 이 방법론의 타당성과 적용성을 검토하기 위하여 경유버스를 개조하여 압축천연가스와 경유를 함께 사용할 수

있는 혼소시스템의 타당성을 평가하였다. 현재 국내에서는 대기오염물질로 인한 사회적 단위비용에 대한 자료가 없기 때문에 유럽의 자료를 활용하였다. 향후 국내 사정을 고려하여 사회적 단위비용이 평가될 때까지 본 연구에서 제안된 방법은 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 경제적 비용만을 고려하는 평가는 인간 보건이나 생태 환경과 관련된 편익이나 비용을 반영하지 않으므로 사회적 비용을 포함하여 환경경제성을 동시에 평가 분석하는 것이 반드시 필요하다. 본 연구에서 개발된 방법론은 자동차뿐만 아니라 대기오염 물질을 배출하는 에너지 시설의 공정 개선이나 신규 건설 사업의 타당성을 평가하고 정부의 대기환경 정책을 개발하는 데도 활용될 수 있을 것이다.

감사

이 논문은 2015년도 자동차부품연구원 연구용역사업, 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(520170540), 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1D1A1A09000632)의 지원으로 이루어졌습니다. 본 연구의 수행을 위하여 기초자료를 제공해주신 김용태 박사님께 감사드립니다.

References

- Malecki, K. M. C., Schultz, A. A., and Bergmans, R. S., "Neighborhood Perceptions and Cumulative Impacts of Low Level Chronic Exposure to Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) on Cardiopulmonary Health," *Int. J. Environ. Res. Pub. Heal.*, **15**(1) 84 (2018).
- Zhang, Z. H., Khlystov, A., Norford, L. K., Tan, Z. K., and Balasubramanian, R., "Characterization of Traffic-Related Ambient Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) in an Asian City: Environmental and Health Implications," *Atmos. Environ.*, **161**, 132-143 (2017).
- Yin, H., Pizzol, M., and Xu, L. Y., "External Costs of PM_{2.5} Pollution in Beijing, China: Uncertainty Analysis of Multiple Health Impacts and Costs," *Environ. Poll.*, **226**, 356-369 (2017).
- Jochem, P., Doll, C., and Fichtner, W., "External Costs of Electric Vehicles," *Trans. Res. Part D*, **42**, 60-76 (2016).
- Shin, G. Y., and Manuel, R. J., "London mayor tackles air pollution," *British Med. J.*, **365** 11701 (2019).
- Adheesh, S. R., Vasisht, M. S., and Ramasesha, S. K., "Air-Pollution and Economics: Diesel Bus Versus Electric Bus," *Cur. Sci.*, **110**, 858-862 (2016).
- van der Kamp, J., and Bachmann, T. M., "Health-Related External Cost Assessment in Europe: Methodological Developments from Externe to the 2013 Clean Air Policy Package," *Environ. Sci. Technol.*, **49**, 2929-2938 (2015).
- Markandya, A., "The Indirect Costs and Benefits of Greenhouse Gas Limitations," UNEP Collaboration Centre on Energy and Environment (1998).
- Holland, M., and watkiss, P., "Beta Version E1.02a Benefits Table database: estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe," Created for European Commission DG Environment by Netcen. Accessed February (2002).
- KAIST, Reasonable Determination of Local Heating Fuels in Clean Energy Zones (1998).
- Cho, A. R., Lim, S. R. "Economic Feasibility Assessment and Analysis of Dual Fuel Systems Utilizing Diesel and Compressed Natural Gas," *Clean Technol.*, **24**, 166-174, (2018).
- Lim, S. R., Park, D., Lee, D. S., and Park, J. M., "Economic Evaluation of a Water Network System through the Net Present Value Method Based on Cost and Benefit Estimations," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**, 7710-7718 (2006).
- Lim, S. R., and Park, J. M., "Environmental and Economic Analysis of a Water Network System Using Lca and Lcc," *AIChE J.*, **53**, 3253-3262 (2007).
- Lee, J. J., "Understanding Environmental Economics," Pakyoungsa, (2000).
- Ricardo, A. E. A., "Update of the Handbook on External Costs of Transport," Final report, 1. (2014).
- Souidi, F., Benmalek, T., Yesaad, B., and Baik, M., "Exergy parametric study of carbon monoxide oxidation in moist air," *J. Non-Equil. Thermo.*, **40**(4), 229-245 (2015).
- Kim, H.-J., Eom, M., and Kim, J.-S., "An Investigation on the Emission Characteristics of Heavy-duty Vehicles using CNG and Diesel Fuel According to the Various Driving Cycles," *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **23**(6), 634-639 (2012).
- Opinet (www.opinet.co.kr).
- Koone Energy Service (www.skens.com).
- Korea Chartered Bus Association (Internal Report).
- Bank of Korea, Economic Statistics System (www.ecos.bok.or.kr).
- Ewertowska, A., Pozo, C., Gavalda, J., Jimenez, L., and Guillen-Gosalbez, G., "Combined Use of Life Cycle Assessment, Data Envelopment Analysis and Monte Carlo Simulation for Quantifying Environmental Efficiencies under Uncertainty," *J. Cleaner Prod.*, **166**, 771-783 (2017).
- Oracle, "Crystal Ball Software" (2015).
- Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat/home> (2016).
- OECD.Stat, <https://stats.oecd.org/> (2016).
- Korea Exchange, <http://www.krx.co.kr/main/main.jsp> (2016).