

경유와 압축천연가스의 혼소 시스템에 대한 경제적 타당성 평가 분석

조아라, 임성린*

강원대학교 공과대학 건설토목환경공학부 환경공학전공
24341 강원도 춘천시 강원대학길 1

(2018년 5월 31일 접수; 2018년 6월 18일 수정본 접수; 2018년 6월 18일 채택)

Economic Feasibility Assessment and Analysis of Dual Fuel Systems Utilizing Diesel and Compressed Natural Gas

A-Ra Cho, and Seong-Rin Lim*

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

(Received for review May 31, 2018; Revision received June 18, 2018; Accepted June 18, 2018)

요 약

인체의 건강뿐만 아니라 일상 활동에도 막대한 악영향을 끼치고 있는 미세먼지를 저감하기 위하여 경유자동차의 엔진에 압축천연가스(CNG)와 경유를 함께 사용할 수 있도록 하는 혼소시스템이 개발되고 있다. 본 연구에서는 CNG와 경유를 함께 사용하는 혼소시스템을 경유버스에 적용하였을 때 얻을 수 있는 경제적 비용과 편익을 실제 주행결과를 바탕으로 평가 분석하여 혼소시스템의 경제적 타당성을 검토하였다. 혼소버스의 연간 주행거리가 30,000 km 이상이거나 경유와 CNG의 연료단가 차이가 408원 이상일 때 혼소시스템의 경제성이 확보되는 것으로 나타났다. 경제성 평가의 불확도평가 결과에서는 주행거리와 연료단가 등 입력 데이터의 변동성에 대해서도 경제성이 확보될 수 있는 확률이 매우 높았다. 민감도분석 결과에서는 혼소시스템의 경제적 타당성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 경유 연료단가로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 혼소시스템의 보급을 늘리기 위한 경제적 유인책이 분석되었다. 본 연구결과는 경유 버스에서 발생하는 미세먼지 문제를 저감하기 위한 혼소시스템의 보급을 확대시키기 위한 정책적 방안을 개발하는데 기여할 수 있을 것이다.

주제어 : 경유, 경제성, 미세먼지, 압축천연가스, 혼소시스템

Abstract : Since particulate matter has high impacts on human health and everyday life, the dual fuel systems utilizing diesel and compressed natural gas have been developed to improve the environmental performance of diesel vehicles. The objective of this study is to estimate the economic feasibility of the dual fuel system based on real operating data of dual fuel buses and diesel buses. The system is economically feasible if the annual mileage of the dual bus is higher than 30,000 km, or if the unit fuel price of diesel is higher than that of CNG by 408 won. The uncertainty analysis results show that the economic feasibility of the system is probabilistically high, regardless of the variability of input data such as mileage and unit prices for the fuels. The sensitivity analysis results show that diesel and CNG prices are the highest contributor to the net present value of the system. Based on these results, economic incentives are suggested to disseminate the systems. This study would provide valuable economic information for bus business industry and policy maker to help make decisions for applying and disseminating the dual fuel systems to mitigate particulate matter problems.

Keywords : Compressed natural gas, Diesel, Dual fuel system, Economic feasibility, Particulate matter

* 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.2018.24.3.166 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

미세먼지로 인한 대기오염은 인체의 건강뿐만 아니라 일상 활동에도 막대한 영향을 끼치고 있다. 인위적으로 발생하는 미세먼지는 주요 성분으로 탄소, 질산염, 황산염, 유기화합물, 중금속 등을 포함하고 있어 인체의 호흡기와 심혈관에 대하여 급성 및 만성 질환을 유발하고 있고 있다[1]. 특히, 미세먼지는 발암물질로도 분류되고 있고[2], 미세먼지로 인하여 우리 사회가 감당해야 할 사회적비용은 다른 대기오염물질인 SO₂, NO_x, 탄화수소, 일산화탄소와 비교하여 2-3배 정도 크기 때문에 미세먼지로 인한 환경오염 문제를 해결하기 위한 노력이 시급한 상황이다[3,4].

인위적인 미세먼지의 발생은 산업 및 교통 분야에서 사용되는 연료의 연소에 의해 직접 발생하거나 대기 중에서 반응에 의해 생성된다[2,4]. 점오염원으로서 화력발전소와 산업체의 에너지 사용 공정이 대부분을 차지하며[5], 비점오염원으로서 수송 수단으로 이용되고 있는 자동차, 선박, 항공기 등이 있다[6]. 점오염원은 미세먼지를 다량 배출하고 있으나 규제를 통하여 방지시설을 추가적으로 설치하거나 운영관리를 통하여 저감 조치를 집중적으로 취할 수 있으나 이동발생원이 대부분인 비점오염원은 규모가 작고 산재된 다수의 발생원을 가지고 있어 배출량을 효과적으로 저감시키기가 어려운 경우가 많다[2]. 이러한 비점오염원 중에서 경유를 사용하는 차량의 급격한 증가로 인하여 미세먼지 문제가 가중되고 있기 때문에 이를 해결할 수 있는 방안이 필요하다[6].

경유 자동차의 배출가스 중에서는 미세먼지 이외에도 다양한 유해가스가 포함되어 있어 오염물질의 저감이 요구된다. 주요 성분인 CO, 탄화수소, 미세먼지, NO_x, 매연 이외에도 CO₂, O₃, SO_x, VOC, Freon, N₂O, CH₄ 등이 포함되어 있다[7,8]. 이렇게 자동차에서 배출되는 오염물질은 지구 환경에 지구온난화, 오존층파괴, 산성비 등의 영향을 미치고, 인체에는 호흡기와 신경성 장애, 폐암을 일으킨다고 보고되고 있다[7,8].

경유를 자동차 연료로 사용했을 때 나타나는 인체 및 환경 문제를 해결하기 위하여 경유보다 황 함유량과 이산화탄소 발생량이 적은 천연가스를 이용하여 경유의 사용을 대체하고자 하는 기술에 대한 타당성 조사가 이루어져 왔다[9-12]. 경유 버스를 천연가스 버스로 전환하는 사업에서 기대되는 사회적, 사적 편익과 비용을 비교하여 순편익을 평가가 이루어졌다[10]. 또한, 액화천연가스(liquefied natural gas, LNG)와 경유를 혼소하는 시스템을 화물자동차에 적용하여 경제성을 평가하여 정부의 정책 개발을 위한 기초자료를 도출하였다[11]. 이러한 천연가스 혼소 시스템은 기존 경유 엔진에 천연가스를 공급하여 실린더 내에 분사되는 경유에 의한 화염을 이용하여 연소실 내에 유입된 천연가스와 공기를 착화시켜 엔진을 가동한다[11]. LNG와 경유의 혼소 시스템은 기존의 경유 차량을 개조하여 적용이 가능하며, 혼소 차량은 기존의 경유 차량과 유사한 운전특성을 가질 수 있다[11]. 최근에는 액화천연가스 대신에 압축천연가스(compressed natural gas, CNG)를 경유와 혼소시키는 기술의 개발되고 있다. CNG를 이용하면 LNG를

이용하기 위해 필요한 저온저장과 단열을 위한 장치가 필요 없기 때문에 새로운 혼소 기술로 고려되고 있다[12].

본 연구에서는 CNG와 경유를 함께 사용하는 혼소시스템을 경유 버스에 적용하였을 때 얻을 수 있는 경제적 비용과 편익을 평가 분석하여 혼소시스템의 경제적 타당성과 정부의 정책적 타당성을 검토하고자 한다. 이를 위해 혼소시스템을 적용하지 않은 경유버스와 적용한 혼소버스의 운행 자료를 바탕으로 초기투자비(혼소시스템 설치비), 유지관리비(연료비, 검사비, 부담금 등)와 같은 비용과 연료 절감으로 인한 편익을 조사 평가한다. 이를 바탕으로 혼소시스템의 설치비(초기 투자비) 대비 경제적 편익을 평가 분석할 수 있도록 투자수익률, 순현재가치, 비용편익비율, 내부수익률을 정량화하여 혼소시스템을 적용한 버스의 경제적 타당성을 분석하였다. 또한, 연료 사용량의 변화에 따른 편익과 비용의 평가분석과 더불어 손익분기점을 맞추기 위해 요구되는 연료 사용량과 주행거리를 도출하였다. 경제성 평가 분석에서 사용된 입력 데이터의 변동성에 따른 경제적 타당성의 변화를 분석하기 위하여 불확도평가를 실시하고, 경제적 타당성에 가장 영향을 많이 주는 인자를 규명하기 위하여 민감도분석을 실시하였다. 이러한 결과를 바탕으로 혼소시스템의 도입을 위해 고려되어야 할 정책적 인센티브를 도출하여 제시하였다.

2. 방법

2.1. 경유와 CNG 단가 조사

경유와 CNG 단가는 한국석유공사에서 운영하는 오피넷[13]과 코원에너지서비스[14]의 자료를 각각 이용하였다.

2.2. 경유버스와 혼소버스의 연간 비용 비교평가

CNG와 경유의 혼소시스템의 초기투자비와 유지관리비를 조사하기 위하여 혼소장치를 장착한 경유버스 2대의 운영자료를 이용하였다. 즉, 동일한 전세버스에 대하여 혼소장치를 가동한 경우와 가동하지 않은 경우를 구분하여 혼소버스와 경유버스의 경유 주유량, CNG 충전량, 운행거리를 조사하여 평균값을 고려하여 경제성 평가에 이용하였다. 연간 운행거리는 전국전세버스조합연합회[15]의 자료를 바탕으로 조사되었다. 이를 바탕으로 경유버스와 혼소버스의 연간 비용(연간투자비+운영비)을 비교하였다. 세부적인 비용은 초기투자비(혼소시스템 설치비)와 유지관리비(연료비, 검사비, 부담금 등)로 구성된다. 연간 비용을 비교할 때는 물가상승율과 할인율이 고려되지 않았다. 연간 비용으로 환산된 초기투자비를 구하기 위하여 다음과 같은 Equation (1)을 이용하여 연간 투자비를 산정하였다.

$$\text{연간 투자비} = \frac{\text{초기 투자비}}{\text{내용연수}} \quad (1)$$

내용연수는 혼소시스템의 내구연한을 고려하여 10년으로 가정하였다.

2.3. 혼소시스템의 경제적 타당성 평가 분석

혼소시스템의 설치로 인한 혼소버스의 경제적 타당성을 평가 분석하였다. 경유버스와 혼소버스의 연간 비용을 바탕으로 혼소버스의 비용과 편익을 평가하였다. 즉, 경유버스와 혼소버스의 비용 차이를 이용하여 혼소버스의 점증적비용과 편익(Incremental cost and benefit)을 계산하였다[16,17]. 즉, 혼소버스의 비용이 경유버스의 비용 보다 클 경우에는 혼소버스의 점증적 비용(Incremental cost)이 발생하며, 작을 경우에는 점증적 편익(Incremental benefit)이 발생한다. 여기에서 산출된 차감 비용과 차감 편익을 이용하여 혼소버스의 경제성을 평가하기 위하여 순현재가치(Net present value, NPV), 내부수익률(Internal rate of return, IRR), 비용편익비율(Cost benefit ratio), 투자회수기간(Payback period, PP)을 평가 분석하였다[18].

순현재가치법[18]은 연도별 점증적 편익과 점증적 비용을 현재가치로 환산한 후 각각 합쳐서 점증적 편익의 총현가와 점증적 비용의 총현가를 구한다. 순현재가치는 점증적 편익의 총현가와 점증적 비용의 총현가를 합하여 구한다.

$$\text{점증적 편익의 총현가} = \sum_{t=0} IB_t / (1+i)^t \quad (2)$$

$$\text{점증적 비용의 총현가} = \sum_{t=0} IC_t / (1+i)^t \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{순현재가치} &= \sum_{t=0} IB_t / (1+i)^t - \sum_{t=0} IC_t / (1+i)^t \\ &= \sum_{t=0} (IB_t - IC_t) / (1+i)^t \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 IB_t 는 t 년도의 점증적 편익, IC_t 는 t 년도의 점증적 비용, i 는 할인율이다. 순현재가치가 0보다 클 때에는 경제적으로 타당하다고 판정할 수 있다. 내부수익률[18]은 Equation (4)의 순현재가치를 0으로 만드는 할인율으로서, 점증적 편익의 총현가와 점증적 비용의 총현가를 같게 만드는 할인율이다. 예를 들면, 어떤 투자의 내부수익률은 그 투자가 얻을 수 있는 최대 이자율이라고 할 수 있다. 즉, 어떤 투자의 내부수익률이 은행금리보다 높으면 경제적 타당성이 확보된다고 할 수 있다. 비용편익비율[18]은 투자의 타당성을 검토할 때 자주 사용되는 지표로서, 사업을 운영하는 기간 동안에 사용된 비용과 편익의 비율로서 평가된다. 즉, 점증적 편익의 총현가를 점증적 비용의 총현가로 나누어 계산한다. 투자회수기간[18]은 초기투자비로부터 얻을 수 있는 이익을 이용하여 초기 투자비를 변제하는데 소요되는 기간을 평가하는 것으로서, 짧은 기간에 투자비를 회수할수록 경제적 타당성이 우수하다고 할 수 있다.

경유버스 대비 혼소버스의 경제적 타당성은 내구연한을 혼소시스템을 내구연한을 고려하여 10년으로 가정하였다. 혼소버스의 경제성 평가를 위해 필요한 물가상승률과 할인율의

결정하기 위하여 한국은행 경제통계시스템[19]의 자료를 사용하였다.

2.4. 혼소시스템의 경제적 타당성을 확보하기 위한 조건 도출

혼소버스의 연비와 운행거리의 평균값과 과거 연료단가의 평균값을 이용하여 혼소버스의 경제적 타당성을 평가한 후, 버스의 연간 주행거리와 경유 및 CNG 단가 변동에 따른 편익과 비용을 평가하여 경제적 타당성을 확보할 수 있는 조건을 도출하였다.

2.5. 불확도분석 및 민감도평가

경제성 평가에 이용한 입력 데이터의 변동성이 경제적 타당성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 입력 데이터의 확률분포를 고려할 수 있도록 확률론적 모델링 기법(stochastic modeling)인 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 수행하였다[20]. CNG와 경유의 연료단가는 유전이나 가스전이 위치한 국가의 지정학적 상황에 따라 상당한 영향을 받기 때문에 연료단가에 대한 확률분포는 과거의 연료단가 자료를 바탕으로 확률분포 함수를 결정하였다. 버스의 연간 주행거리, 물가상승률, 할인율은 국내의 전세버스연합회[15]와 한국은행[20]의 자료를 활용하여 정규분포로 가정하여 이용하였다. 주행거리에 대한 표준편차는 평균 주행거리의 10%로 가정하였고, 물가상승률과 할인율의 표준편차는 상대적으로 높은 변동성을 고려할 수 있도록 물가상승률과 할인율의 분포가 1%와 2%의 표준편차 값을 가지는 것으로 가정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 데이터의 변동성을 반영하여 100,000회 반복 실시함으로써 순현재가치의 결과값에 대한 불확도를 평가하였다. 이러한 몬테카를로 시뮬레이션을 위해 Crystall Ball 소프트웨어[21]를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 혼소버스의 경제적 타당성 평가분석

3.1.1. 연료단가와 운행거리에 대한 현황 조사 결과

2014년 5월부터 2016년 5월까지 3년간 서울 지역의 연료단가를 Figure 1에 나타내었다. 조사 기간 동안의 경유와 CNG 평균 단가는 1415원/L와 874원/Nm³이었으며, 이를 경제성 평가에 적용하였다. 전국전세버스조합연합회의 자료를 바탕으로 조사된 전세버스의 연간 주행거리의 평균은 약 40,000 km 이었다. 혼소시스템을 장착한 경유버스 2대의 운영자료를 바탕으로 혼소시스템을 가동하였을 때와 하지 않았을 때를 혼소버스와 경유버스로 각각 구분하여 경유 주유량, CNG 충전량, 운행거리를 조사하여 Table 1에 나타내었다. 물가상승률과 할인율을 결정하기 위하여 2011년부터 2015년까지의 소비자물가지수와 2010년부터 2014년까지의 금리에 대한 평균값을 고려하여 경제적 타당성 평가에 물가상승률과 할인율을 2%와 3%로 각각 적용하였다.

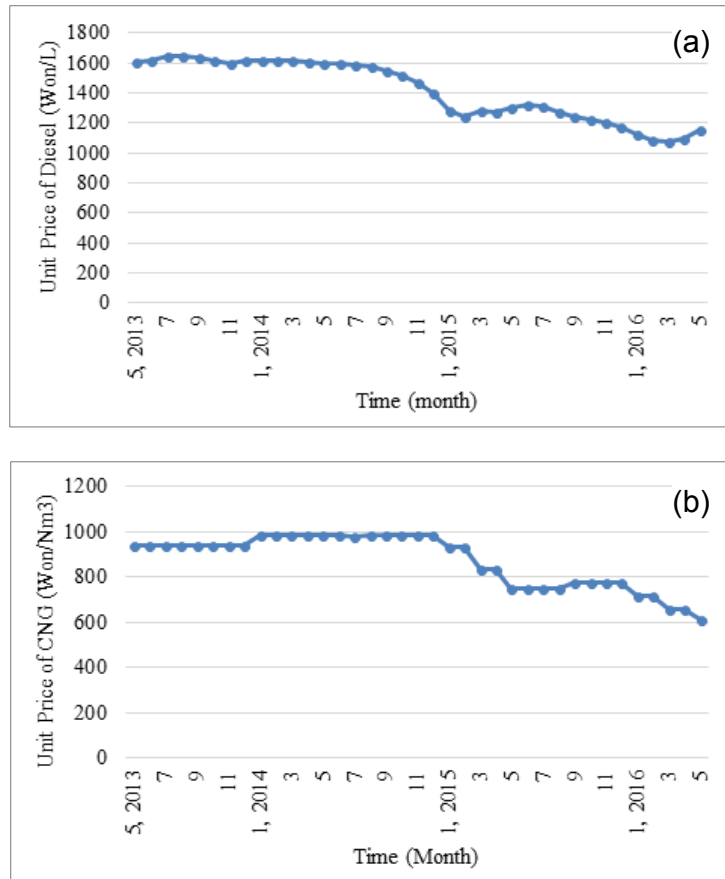


Figure 1. Unit prices of diesel and CNG fuels: (a) diesel; and (b) CNG.

Table 1. Operating data of the diesel bus and the dual fuel bus

	Diesel consumption (L)	CNG consumption (Nm ³)	Mileage (km)
Diesel bus	14,047	-	47,719
Dual fuel bus	14,255	10,639	83,754

3.1.2. 경유버스와 혼소버스의 연간 비용 비교평가 결과

혼소시스템의 연간 비용을 평가하기 위하여 혼소시스템의 설치에 따른 혼소버스의 초기투자비와 운영비를 조사하여 Table 2에 나타내었다. 혼소시스템의 설치에 따른 혼소버스의 비용에는 초기투자비와 운영에 따른 경유와 CNG의 연료비, 유지관리를 위한 천연가스필터 교체비와 내압용기 검사 수수료가 포함되었다. 연간 비용을 산정하기 위하여 혼소시스템의 초기투자비는 내용년수를 고려하여 10년으로 균일하게 분할되어 평가되었으며 내압용기 정기검사 수수료는 검사 주기를 고려하여 3년으로 균일하게 분할되어 평가되었다.

경유버스와 혼소버스의 연간 비용을 비교평가한 결과, 혼소버스는 경유 사용량의 절감을 통해 낮은 비용을 발생시키는 것으로 나타났다. Table 3에 나타난 것처럼, 경유버스의 연간 비용은 16,633,412원이고 혼소버스의 연간비용은 15,923,122원으로 평가되었다. 혼소버스의 운행비는 경유버스 대비 연

Table 2. Initial investment and operating costs for the dual fuel system

		Cost for dual fuel system (won)	Remarks
Initial investment cost		16,400,000	
Operating cost	Diesel fuel	9,634,592	Unit cost of diesel : 1415 won/L
	CNG fuel	4,440,500	Unit cost of CNG : 874 won/Nm ³
	Gas filter	125,000	Replacement time cycle : 1 year
	Gas vessel inspection	249,091	Replacement time cycle : 3 year

Table 3. Comparison of annual costs of the diesel bus and the dual fuel bus (unit : won/year)

		Diesel bus	Dual fuel bus
Annualized initial installation cost		-	1,640,000
Annual operating cost	Diesel fuel	16,633,412	9,634,592
	CNG fuel	-	4,440,500
	Gas filter	-	125,000
	Gas vessel inspection	-	83,030
Total		16,633,412	15,923,122

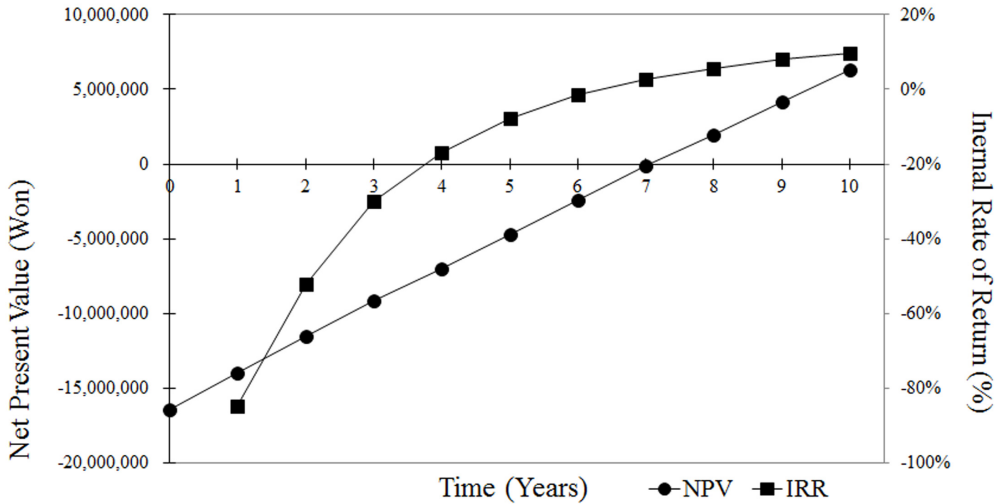


Figure 2. Net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) of the duel fuel bus in case the mileage is 40,000 km.

간 710,290원이 낮았다. 혼소시스템의 설치에 따라 초기투자비와 가스필터비, 정기검사 수수료, CNG 연료비로 인해 연간 6,288,530원의 추가 비용이 발생하였으나 경유 연료비가 연간 6,998,820원 정도 절감되어 혼소버스의 연간 비용이 낮은 것으로 나타났다.

3.1.3. 혼소시스템의 경제적 타당성 평가분석

경유와 CNG 단가를 평균값인 1415원/L, 874원/Nm³로 각각 설정하고 할인율과 물가상승률을 3과 2%로 각각 가정하여 연간 평균 주행거리인 40,000 km에 대하여 경제적 타당성을 평가한 결과, 혼소버스의 경제성은 확보되는 것으로 나타났다. Figure 2에 나타난 바와 같이, 혼소버스의 순현재가치는 6,336,950원으로 양의 값을 보였고 비용편익비율과 내부수익율은 각각 1.4와 9.8%로 나타나서 비용보다는 편익이 높고 은행금리보다는 수익률이 높아 경제성이 있는 것으로 나타났다. 또한, 투자회수기간은 7년으로 나타나서 내용년수 기간 이내에 초기투자비가 회수되는 것으로 나타났다.

3.1.4. 연간 주행거리 변화에 따른 혼소버스의 경제성 평가분석

연간 주행거리의 변화가 혼소버스의 경제성에 미치는 영향을 평가분석하였을 때, 혼소버스의 경제적 타당성은 연간 30,000 km 이상 운행할 경우에만 확보되는 것으로 나타났다. 연간 주행거리가 20,000 km일 때는 혼소버스의 순현재가치는 -5,809,499원으로 음의 값을 보여 경제성이 확보되지 않는 것으로 나타났고, 비용편익비율과 내부수익율도 0.6과 -4.6%로 각각 나타나서 편익보다는 비용이 크고 수익률이 확보되지 않아 경제성이 없는 것으로 나타났다. 투자회수기간을 살펴보면 편익보다 비용이 커서 내용년수 기간 이내에 투자비가 회수되는 것은 불가능한 것으로 나타났다. 연간 주행거리가 30,000 km일 때는 혼소버스의 순현재가치는 0원에 가깝게 나타나서 편익과 비용이 동일하여 손실이 발생하지 않도록 하기 위한 최소한

의 운행거리로 나타났다. 순현재가치의 평가결과에 나타난 바와 같이 비용편익비율도 1에 가깝게 나타났다. 내부수익율은 3.3%로 할인율인 3%보다 커서 경제성이 미미하지만 있는 것으로 나타났다. 투자회수기간에 대해 살펴보면 내용년수인 10년째에 투자비가 회수되는 것으로 나타났다. 따라서, 버스의 연간 주행거리가 크면 클수록 혼소시스템의 설치로 인하여 경유 연료비의 절감액이 커지므로 짧은 거리를 운행하는 버스보다 긴 거리를 운행하는 장거리 노선의 버스에 혼소시스템을 설치하는 것이 적합하다고 할 수 있다.

3.1.5. 연료단가 변화에 따른 혼소버스의 경제성 평가분석

연료단가 변화에 따른 CNG 혼소버스의 경제성 평가를 하였을 때, CNG 연료단가보다 경유 연료단가가 일정 수준 이상 높을 때 혼소버스의 경제적 타당성이 확보될 수 있는 것으로 나타났다. Table 4는 CNG와 경유의 연료단가가 변동할 때 혼소시스템의 경제성을 평가한 것으로서, 2013년 5월부터 2016년 5월까지의 3년간 서울지역의 경유와 CNG 단가의 최솟값, 평균, 최댓값에 따른 혼소버스의 순현재가치, 비용편익 비율, 내부수익율, 투자회수기간을 평가한 결과이다. 이 결과를 살펴보면 경유와 CNG의 연료단가 차이가 연료의 단위를 무시할 수 있다고 가정하면 408원 이상일 경우 혼소시스템의 경제적 타당성이 확보될 수 있는 것으로 나타났다. 즉, CNG의 연료단가가 최소치, 평균, 최대치인 612, 874, 988원/Nm³이었을 때에는 경유의 연료단가가 각각 1080, 1279, 1396원/L일 때부터 경제성이 확보되는 것으로 나타났다. CNG 연료단가가 최소치이면 경유 단가의 최소치가 1080원/L이었으므로 혼소버스의 경제성은 항상 확보되는 것으로 나타났다. 반면, CNG 연료단가가 평균값이나 최대치일 경우에는 경유의 연료단가가 경유 단가의 최소치에 가까울 때 순현재가치가 음의 값을 가지고 비용편익비율이 1보다 작고 비용편익비율이 음의 가지며 투자비의 회수가 불가능하여 경제성이 확보되지 않았다. 경유 연료단가의 변동측면에서 살펴보면, 경유 단가가 평

Table 4. Net present value (NPV), cost-benefit ratio (C/B), internal rate of return (IRR), payback period (PP) of the dual fuel bus depending on the variations of the unit prices of diesel and CNG. The maximum, mean, minimum unit prices were employed, and the mileage was set at 40,000 km

Unit price of CNG (won/Nm ³)	Unit price of diesel (won/L)	NPV (won)	C/B (-)	IRR (%)	PP (year)
612 (Minimum)	1012	0	1.0	3.0	10
	1080 (Minimum)	+3,161,477	1.2	6.5	8.3
	1415 (Mean)	+18,807,105	2.1	21	4.5
	1649 (Maximum)	+29,710,983	2.8	29.6	3.4
874 (Mean)	1080 (Minimum)	-9,308,677	0.4	-10.5	N.A.
	1279	0	1.0	3.0	10
	1415 (Mean)	+6,336,950	1.4	9.8	7
	1649 (Maximum)	+17,240,829	2.1	19.7	4.8
988 (Maximum)	1080 (Minimum)	-14,771,434	0.1	-26.9	N.A.
	1396	0	1.0	3.0	10
	1415 (Mean)	+874,194	1.1	4.0	9.5
	1649 (Maximum)	+11,778,072	1.7	14.9	5.8

* N.A. : Not Applicable

균치 이상이면 혼소버스의 경제성은 항상 확보되는 것으로 나타났다.

3.2. 불확도분석 및 민감도평가 분석결과

3.2.1. 투입 데이터의 확률분포 결정

경제성 평가분석에 사용한 데이터들의 불확실성을 고려하기 위하여 경유와 CNG 단가의 확률분포를 2014년 5월부터 2016년 5월까지 3년간 서울 지역의 연료단가 변화를 고려하여 결정한 결과, 경유와 CNG 연료단가는 Maximum Extreme 과 Beta 확률분포함수를 각각 따르고 있음을 알 수 있었다. 물가상승률, 할인율, 연간 주행거리는 정규분포를 따르는 것으로 가정하여, 몬테카를로 시뮬레이션에 필요한 각 투입 데이터의 확률분포를 Table 5에 나타내었다.

3.2.2. 불확도 및 민감도 분석 결과

Figure 4(a)는 혼소버스의 순현재가치에 대한 불확도평가

결과를 나타낸 것이다. 경유 단가, CNG 단가, 연간 주행거리, 물가상승률, 할인율의 변화에 따라 순현재가치는 평균값 8,455,312원과 표준편차 12,332,564원의 값을 가지는 분포를 보였다. 입력 데이터들의 변동성을 고려하여 혼소시스템의 경제적 타당성이 확보될 확률은 83%로 나타났다. 이러한 변동성을 최소화하면서 경제성을 확보하기 위해서는 연간 주행거리가 높은 버스를 대상으로 혼소시스템을 적용하는 것이 필요하다.

Figure 4(b)는 민감도분석 결과를 나타낸 것으로, 혼소버스의 순현재가치에 영향을 많이 미치는 인자는 경유 연료단가, CNG 연료단가, 연간 주행거리, 할인율, 물가상승률 순서로 나타났다. 경유 단가와 연간 주행거리가 높을수록 혼소버스의 경제적 타당성은 높아지고, CNG 연료단가와 할인율은 높을수록 경제적 타당성은 낮아진다. 그러므로, 혼소시스템의 경제성은 연료단가에 가장 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 이러한 연료단가의 변동성이 미치는 영향을 낮추기 위해서는 혼소버스의 주행거리를 높여서 CNG 사용에 따른 연료 절감액을 극대화시켜야 할 것이다.

Table 5. 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)	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

3.3. 미세먼지 저감을 위한 혼소시스템의 정책적 인센티브 평가분석

미세먼지로 인한 대기오염을 예방하기 위하여 경유 대신 CNG를 사용하도록 유도하기 위해서는 정책적 지원이 필요하다. 즉, 혼소시스템을 기존 버스에 장착시켜 혼소버스의 보급을 확산하기 위한 정책적 인센티브의 적정 수준을 평가하기 위하여 초기투자비 지원과 CNG 연료비에 대한 보조금 지급이 검토될 필요가 있다. 이러한 정책적 인센티브 평가는 혼소버스의 순현재가치가 0보다 클 경우에는 인센티브가 불필요하므로 순현재가치가 0보다 작을 경우에만 고려되어야 한다.

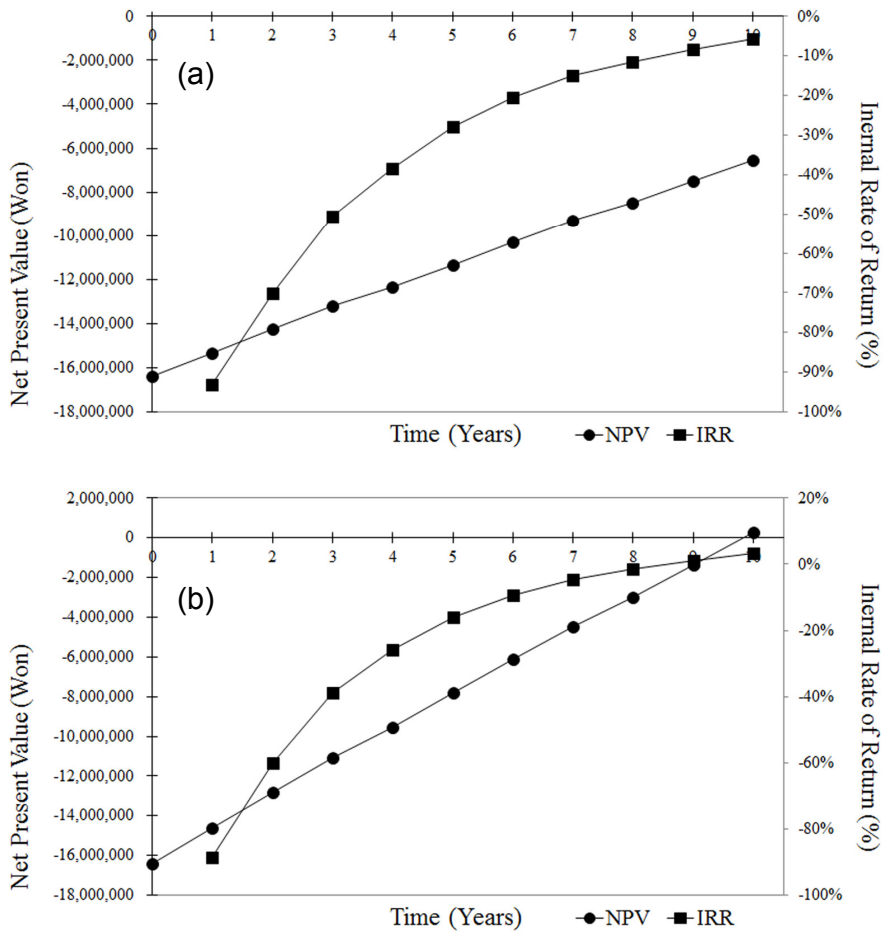


Figure 3. Net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) of the duel fuel bus in case the mileage is: (a) 20,000 km; and (b) 30,000 km.

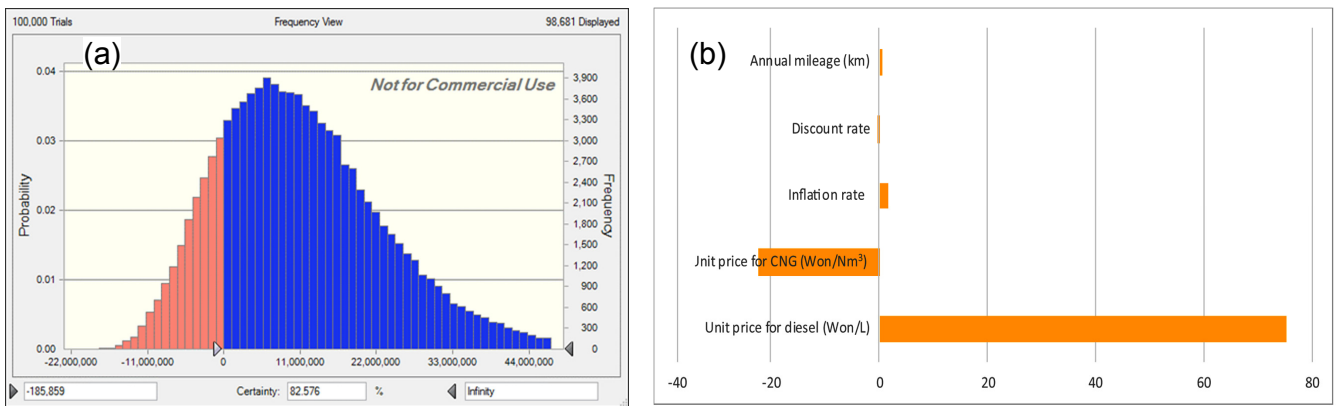


Figure 4. Uncertainty and sensitivity analysis results for the net present value (NPV) of the duel fuel bus: (a) uncertainty analysis; and (b) sensitivity analysis.

초기투자비 지원은 혼소시스템의 설치에 필요한 비용을 정부에서 지원함으로써 민간 버스 사업자의 경제적 타당성을 확보할 수 있도록 도와주는 방안이다. Figure 3(a)에서와 같이 연간 주행거리가 20,000 km일 경우에는 경제성이 확보되지 않으므로, Table 6(a)에서 보여준 바와 같이 정부에서 혼소시스템의 설치에 5,800,000원을 지원하면 순현재가치를 0으로

만들어 민간 버스 사업자의 손실을 없앨 수 있어 버스 사업자가 미세먼지 제거에 자발적으로 참여할 수 있는 경제적 유인책이 될 수 있을 것이다. 현재 정부에서 기후변화 대응을 위하여 전기자동차의 보급을 확대할 수 있도록 초기투자비를 지원하고 있는 것과 동일한 정책 방향이므로 혼소시스템의 보급을 위해 적극적으로 검토할 필요가 있을 것이다.

Table 6. Economic incentive estimation results for the dissemination of the dual fuel systems depending on the mileage and fuel unit prices: (a) partial support of the initial investment cost; and (b) partial support of the CNG fuel cost. The maximum, mean, minimum unit prices for the fuels were employed.

(a)

Annual mileage (km)	Economic support from government (won)	Bus operator's payment (won)	Net present value (won)
20,000	0	16,400,000	-5,800,000
	5,800,000	10,600,000	0
30,000	0	16,400,000	0

(b)

Annual mileage (km)	Unit price for CNG (won/Nm ³)	Unit price for diesel (won/L)	Economic incentive for CNG fuel cost (won/Nm ³)
20,000	612 (Minimum)	1080 (Minimum)	302
		1397	0
	874 (Mean)	1080 (Minimum)	572
		1415 (Mean)	244
		1649 (Maximum)	16
		1665	0
	988 (Maximum)	1080 (Minimum)	686
		1415 (Mean)	358
		1649 (Maximum)	130
		1782	0

정부의 초기투자비 지원 방안과 더불어 혼소시스템의 운영비를 낮추기 위하여 혼소버스에 대하여 CNG 연료단가를 낮출 수 있도록 보조금을 지급하는 방안도 고려될 수 있다. Table 6(b)는 혼소버스의 연간 주행거리가 20,000 km일 때 혼소시스템의 보급을 유도하기 위한 CNG 연료보조금의 산정 결과를 나타낸 것이다. 예를 들어, CNG 단가가 988원/Nm³이고 경유 단가가 1415원/L일 경우에는 CNG에 대해 정부의 연료보조금을 358원/Nm³으로 책정하여 지원함으로써 민간 버스사업자들이 자발적으로 미세먼지 저감에 참여할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 경유와 CNG를 함께 사용하는 혼소시스템을 버스에 적용하였을 때의 경제적 비용과 편익을 평가 분석함으로써 혼소시스템의 경제적 타당성과 정책적 고려사항에 대해 분석하였다. 실제 경유버스에 적용한 혼소시스템의 운영현황을 바탕으로 실시한 경유버스와 혼소버스의 경제성 평가 결과는 혼소시스템의 장점으로 인하여 경제적 비용을 낮출 수 있다는 것이 평가되었다. 연간 주행거리와 연료 단가

변화에 따른 경제성을 평가분석하였을 때는, 연간 주행거리가 버스의 평균 주행거리인 30,000 km 이상이거나 경유와 CNG의 연료단가 차이가 408원 이상일 때 혼소시스템에 대한 경제성이 확보되었고, 연간 주행거리와 연료단가 차이가 커질수록 혼소시스템의 경제성은 높아졌다. 경제성 평가의 불확도평가 결과에서는 주행거리와 연료단가와 같은 입력 데이터의 변동성에 대하여서도 경제성이 확보될 수 있는 확률은 매우 높았다. 민감도분석 결과에서는 혼소시스템의 경제적 타당성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 연료단가로 나타났다. 경제성을 고려한 평가에서는 혼소시스템의 장착 사업이 타당한 것으로 나타났으므로 향후에는 미세먼지와 온실가스 저감으로 인한 사회적 비용을 포함하여 환경경제성을 동시에 평가분석하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 실제 도로에서 주행하고 있는 버스에서의 오염물질 발생량을 온라인으로 분석할 수 있는 추가적인 연구가 수행될 필요가 있으며, 대기오염물질의 발생으로 인한 사회적비용을 한국의 상황에 맞게 평가할 수 있는 환경경제학적 연구가 동시에 진행되어야 할 것이다. 본 연구는 경유 버스에서 발생하는 미세먼지를 저감하기 위하여 혼소시스템을 경유 버스에 적용하였을 때의 경제적인 타당성을 평가하여 혼소버스의 보급을 늘리는 데 기여할 수 있을 것이다.

감사

이 논문은 2015년도 자동차부품연구원 연구용역사업, 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(520150089), 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

1. 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 (Pm2.5) on Cardiopulmonary Health," *Int. J. Environ. Res. Pub. Heal.*, **15**, 84(2018).
2. Zhang, Z. H., Khlystov, A., Norford, L. K., Tan, Z. K., and Balasubramanian, R., "Characterization of Traffic-Related Ambient Fine Particulate Matter (Pm2.5) in an Asian City: Environmental and Health Implications," *Atmos. Environ.*, **161**, 132-143 (2017).
3. Yin, H., Pizzol, M., and Xu, L. Y., "External Costs of Pm2.5 Pollution in Beijing, China: Uncertainty Analysis of Multiple Health Impacts and Costs," *Environ. Pollut.*, **226**, 356-369 (2017).
4. Jochem, P., Doll, C., and Fichtner, W., "External Costs of Electric Vehicles," *Trans. Res. Part D*, **42**, 60-76 (2016).
5. Collarile, P., Bidoli, E., Barbone, F., Zanier, L., Del Zotto,

- S., Fuser, S., Stel, F., Panato, C., Gallai, I., and Serraino, D., "Residence in Proximity of a Coal-Oil-Fired Thermal Power Plant and Risk of Lung and Bladder Cancer in North-Eastern Italy. A Population-Based Study: 1995-2009," *Int. J. Environ. Res. Pub. Heal.*, **14**, 860(2017).
6. Correa, A. X. R., Testolin, R. C., Torres, M. M., Cotelle, S., Schwartz, J. J., Millet, M., and Radetski, C. M., "Ecotoxicity Assessment of Particulate Matter Emitted from Heavy-Duty Diesel-Powered Vehicles: Influence of Leaching Conditions," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **24**, 9399-9406 (2017).
 7. Shin, G. Y., and Manuel, R. J., "London Mayor on Tackling Air Pollution London Should Ban All Diesel Vehicles," *British Med. J.*, **358**, j3288(2017).
 8. 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).
 9. Li, L., Lo, H. K., Xiao, F., and Cen, X. K., "Mixed Bus Fleet Management Strategy for Minimizing Overall and Emissions External Costs," *Trans. Res. Part D*, **60**, 104-118 (2018).
 10. Choi, B. J., "Economic Evaluation and Nationwide Dissemination Program of Natural Gas Vehicle," Master Thesis, Seoul National University (2001).
 11. Han, J. O., Chae, J. M., Lee, J. S., and Hong, S. H., "Economical Evaluation of a LNG Dual Fuel Vehicle Converted from 12 L Class Diesel Engine.
 12. Economides, M. J., Sun, K., and Subero, G., "Compressed Natural Gas (Cng): An Alternative to Liquefied Natural Gas (Lng)," *Spe. Product. & Operat.*, **21**, 318-324 (2006).
 13. Opinet (www.opinet.co.kr).
 14. SK E&S (www.skens.com).
 15. Communications with Korea Chartered Bus Association
 16. 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).
 17. 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).
 18. Lee, J. J., "Environmental Economics," Parkyoung Corporation.
 19. Bank of Korea Economic Statistics System.
 20. 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).
 21. Oracle, "Crystall Ball Software" (2015).