

내연기관엔진의 가스혼소발전 경제성 예측모델 개발

허광범[†] · 장혁준 · 이형원

한국전력공사 전력연구원, 에너지환경연구소 신에너지연구실

Development of Economic Prediction Model for Internal Combustion Engine by Dual Fuel Generation

KWANG-BEOM HUR[†], HYUCK-JUN JANG, HYEONG-WON LEE

Korea Electric Power Corporation (KEPCO) Research Institute, 105 Munji-ro, Yusung-gu, Daejeon 34056, Korea

[†]Corresponding author :
kbhur5798@hanmail.net

Received 19 July, 2020
Revised 19 August, 2020
Accepted 30 August, 2020

Abstract >> This paper represents an analysis of the economic impact of firing natural gas/diesel and natural gas/by-product oil mixtures in diesel engine power plants. The objects of analysis is a power plant with electricity generation capacity (300 kW). Using performance data of original diesel engines, the fuel consumption characteristics of the dual fuel engines were simulated. Then, economic assessment was carried out using the performance data and the net present value method. A special focus was given to the evaluation of fuel cost saving when firing natural gas/diesel and natural gas/by-product oil mixtures instead of the pure diesel firing case. Analyses were performed by assuming fuel price changes in the market as well as by using current prices. The analysis results showed that co-firing of natural gas/diesel and natural gas/by-product oil would provide considerable fuel cost saving, leading to meaningful economic benefits.

Key words : Internal combustion engine(내연기관), Dual fuel(혼소발전), Liquefied natural gas(천연가스), Diesel engine(디젤엔진), Economic prediction(경제성 예측)

1. 서론

혼소 디젤 발전은 기존 디젤엔진에 천연가스 연료 공급 장치를 추가하여 기존의 디젤 연료와 추가적인 연료인 천연가스를 혼합하여 연소하는 방식의 발전 시스템으로 이러한 혼소방식의 전력 생산은 연료 공급의 유연성이 있어 분산형 발전 측면에서 경쟁력을

가지고 있다. 혼소 디젤엔진은 기존의 디젤엔진과 같은 출력을 낼 수 있으며 개조가 간단하다. 또한, 경유보다 저렴하고 환경적인 천연가스를 혼소하여 사용하기 때문에 경제적 이점과 배기가스 배출량이 감소한다¹⁾. Fig. 1에 혼합 연소를 위한 연료 공급 시스템의 개략도를 제시하였다²⁾.

최근 국내 발전 분야에서는 유가 상승의 영향으로

경유의 단위 열량 당 연료 가격이 천연가스에 비해 다소 비싸졌기 때문에 연료비용의 절감 효과를 기대할 수 있는 기존 디젤엔진에서 혼소 엔진으로의 교체 및 개조에 관심을 가지고 있다. 특히 최근 전력 사용 증가에 따라서 분산형 발전의 필요성이 증가하여 최근 국내에서도 업무용 빌딩의 비상 발전기를 혼소 엔진 발전기로 개조할 때 발생하는 경제성 평가도 진행되었다³⁾. 또한 연료비용 절감 효과와 연료 공급의 유연성을 가진 혼소엔진을 이용한 도서지역 내 발전기 적용에 관한 연구도 진행되고 있다⁴⁾.

본 연구의 목적은 혼소 디젤 발전의 성능인자 분석과 다양한 연료 사용에 따른 경제성 분석이다. 혼소 엔진의 사용연료는 천연가스/경유를 사용할 경우와 천연가스/부생유를 사용할 경우로 두 가지로 나누어 분석하였다. 특히 혼소율과 평균 부하율에 따른 경제적 영향과 연료 가격 변화에 따른 경제성을 예

측하였다.

2. 혼소발전 성능 사양 및 경제성 분석 방법

2.1 300 kW 급 디젤 발전기 성능 사양 분석

분석의 대상이 되는 300 kW 급 디젤 발전기는 국내 두산인프라코어사(Incheon) 엔진이다. 이 엔진은 Fig. 2와 같으며 모델명은 P126TI-II이다. 기종은 1,800 RPM/60 Hz 타입이며 두산인프라코어의 매뉴얼⁵⁾상 나와 있는 출력은 ISO 조건에서 상용 출력 시 307 kW, 비상 출력 시 342 kW이며, 자세한 사양은 Table 1에 나타내었다.

두산인프라코어 매뉴얼⁵⁾ 상의 정격 출력은 상용 출력 시 307 kW, 비상 출력 시 342 kW이지만 실제 교류발전기를 설치하여 나오는 generator의 출력은 상용 출력 시 273 kW, 비상 출력 시 300 kW로 다소 감소하였다. 따라서 본 연구에서는 교류발전기를 포함하여 나오는 generator의 상용 출력을 기준으로 성능 및 경제성 분석을 진행하였다. 본 디젤엔진은 4행정, direct fuel injection 방식이며 bore 123 mm, stroke 155 mm이다. 또한 배기 규제는 Tier 1을 만족한다.

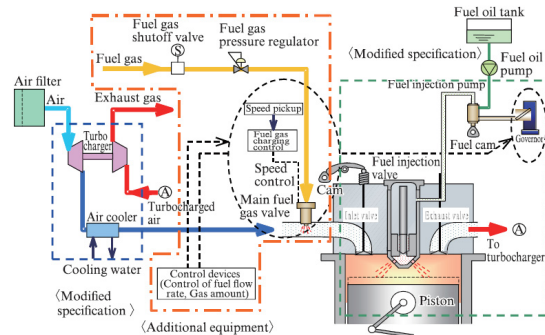


Fig. 1. Schematic of dual fuel engine system²⁾

2.2 디젤 발전기 부하별 성능

분석 대상이 되는 디젤 엔진은 교류 발전기를 설

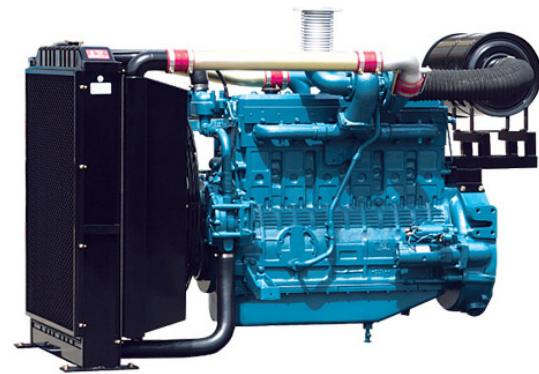


Fig. 2. P126TI-II engine (Doosan Infracore, Incheon)⁵⁾

Table 1. Main parameters of P126TI-II⁵⁾

Model	P126TI-II	
ENG power (kW)	307	342
GEN power (kW)	273	300
SFC (L/hr)	73.8	
Pressure ratio	17	
Mean effective pressure (bar)	18.6	
Speed (RPM)	1,800	
Stroke/bore ratio	1.26:1	
Displacement (L)	11.051	
Mean piston speed (m/sec)	9.3	

치하게 되면 매뉴얼 상의 출력과 달리 상용 출력이 273 kW인 발전기가 된다. 따라서 본 연구에서는 100% 부하일 경우 발전 출력을 273 kW로 하였다. 매뉴얼 상의 디자인 성능은 ISO 조건을 만족한다. Table 2는 부하 별 연료 소모량을 나타내며 1,800 RPM, 상용 출력 시의 연료 소모량을 바탕으로 부분 부하 운전 시 효율을 구하였다. Fig. 3은 부분 부하 시 디젤엔진의 열효율을 나타내며 다음의 식 (1)과 같이 정의한다. 이때 출력은 발전기의 출력을 사용하였다.

$$\eta_{th} = \frac{\text{Generator Power}}{\dot{m}_{Fuel} \times LHV_{Fuel}} \quad (1)$$

디젤엔진의 부분 부하 운전 시 출력 및 효율데이터는 Table 3에 정리되어 있으며, 혼소 디젤엔진의

Table 2. Fuel consumption ratio of P126TI-II (partial loads)

Load	Normal power fuel consumption (L/hr)		Standby power fuel consumption (L/hr)	
	1,500 RPM	1,800 RPM	1,500 RPM	1,800 RPM
100%	63.1	73.8	77.6	89.5
75%	47.0	56.0	51.6	61.5
50%	31.3	37.0	34.9	41.4
25%	16.9	20.6	18.3	22.2

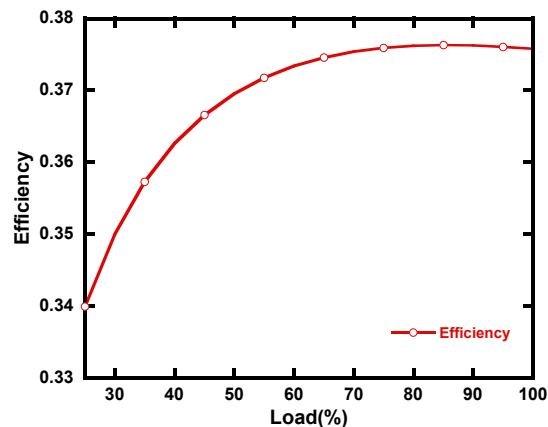


Fig. 3. Efficiency of 300 kW diesel engine depending on partial loads

경제성 분석 시에도 동일한 효율을 낸다고 가정하였다. 분석 대상이 되는 엔진은 평균 부하율이 약 70-80%로 운전된다.

2.3 발전 플랜트 경제성 분석 방법

일반적으로 발전 플랜트 경제성 평가에 많이 쓰이는 방법은 순현재가(net present value, NPV)법과 회수기간(payback period)법이다. NPV 방법은 대체안이 유효한 기간 동안 그때 안에 투입되는 각 시점의 지출액과 수입액을 적절한 할인율로 할인하여 현재가치를 구하는 것으로 NPV 값이 양수일 경우 프로젝트는 경제적 타당성이 있다고 판단할 수 있다. 회수기간법은 크게 할인율(이자율)을 고려하지 않는 회수기간법과 현금 흐름의 시간적 가치를 고려하여 할인율(이자율)이 고려된 할인 회수기간법(discounted payback period)으로 나뉜다. 본 연구에서는 이자율을 고려한 할인 회수기간법을 이용하였다. 할인 회수기간은 NPV가 0이 되는 시점을 의미하며 식 (3)에서 NPV가 0이 되는 n값이다. NPV를 구하기 위하여 발전플랜트의 연간 수익이 정의되어야 하며, 식 (2)와 같이 연간 전력 판매 수익과 연간 연료비용과 연간 유지보수 비용의 차로 표현한다. 내부수익률(internal rate of return, IRR)이란 현금유입의 현재와 현금유출의 현재를 일치시켜주는 할인율로 정의되며, 식 (4)처럼 투자안의 NPV가 0이 되도록 하는 할인율을 의미한다.

$$GM_t = R_{electricity} - (C_{Fuel} + C_{OM}) \quad (2)$$

Table 3. Performance parameters of P126TI-II (partial loads)

Load	Diesel engine power (kW)	Generator power (kW)	Efficiency (%)
100%	307.0	273.0	37.57
75%	230.3	204.8	37.59
50%	153.5	136.5	36.95
25%	76.8	68.3	33.99

$$NPV = -CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{GM_t}{(1+i)^t} \quad (3)$$

$$0 = -CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{GM_t}{(1+IRR)^t} \quad (4)$$

GM_t : t 년도 연간 수익

CF_0 : 초기 투자비용

$R_{electricity}$: 연간 전력 판매 수익

i : 할인율

C_{Fuel} : 연간 연료비용

C_{OM} : 연간 유지 보수비용

3. 결과 및 고찰

3.1 디젤엔진 각 연료별 연료소모량 분석

분석 대상이 되는 디젤엔진에 투입되는 연료가 바뀔 경우 Table 4와 같이 발열량 및 밀도가 변화한다. 즉, 엔진에 투입되는 에너지 밀도가 변하기 때문에 동일한 엔진 성능을 낼 경우 연료소모량이 변화한다. 특히 기존 경유나 부생유에 비하여 천연가스는 단위 질량 당 발열량이 약 경유 대비 16% 높고 부생유 대비 15% 높다⁶⁾. 본 연구에서는 제공된 효율 자료가 low heating value (LHV) 효율이기 때문에 HHV 대신 LHV를 기준으로 사용하였다.

Table 4. Heating values and density of fuels⁶⁾

	Heating oil (test oil)	Diesel	By-product oil	LNG
HHV	8,790 kcal/L	9,010 kcal/L	8,800 kcal/L	10,400 kcal/Nm ³
LHV	8,200 kcal/L	8,420 kcal/L	8,200 kcal/L	9,420 kcal/Nm ³
Density	0.79-0.85 kg/L	0.83 kg/L	0.8021 kg/L	0.7976 kg/Nm ³
LHV	42,384 kJ/kg	42,473 kJ/kg	42,802 kJ/kg	49,448 kJ/kg

천연가스는 기체 상태이기 때문에 발열량 단위가 kcal/Nm³이고 경유나 부생유는 액체 연료이기 때문에 kcal/L이다. 따라서 같은 단위로 비교하기 위해서는 단위부피 당 저위발열량에 밀도를 곱하여 단위질량 당 저위발열량으로 비교해야 한다. 그 결과는 Table 4와 Fig. 4에 표시하였다. 이때 액체 연료의 경우 외기온 15°C 상태의 밀도를 사용하였고 천연가스는 부피 단위인 Nm³이 0°C 기준이므로 0°C의 밀도를 사용하였다.

본 연구에서는 분석 대상이 되는 엔진인 Man 28/32 H의 보일러 등유(test oil)를 사용한 성능 자료를 기준으로 동일한 출력과 부분부하효율을 가진다고 가정하였다. 밀도와 저위발열량을 이용하여 각 연

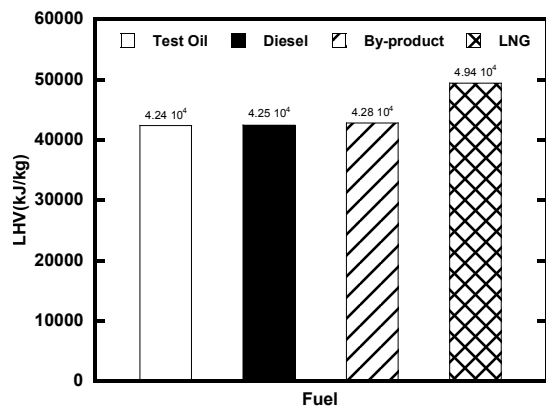


Fig. 4. Low heating value (LHV) of diesel engine fuels

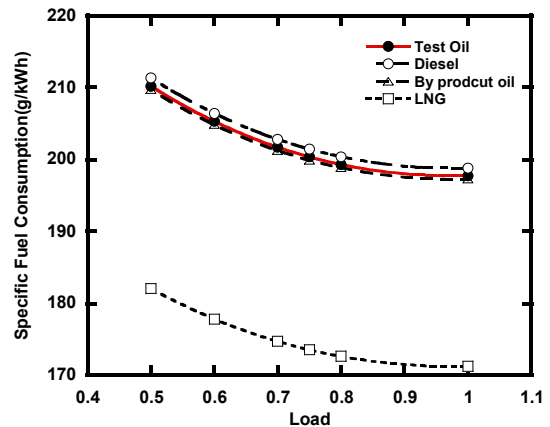


Fig. 5. Specific fuel consumption depending on diesel engine fuels

료의 부하별 비연료소비율(g/kWh)을 Fig. 5와 같이 구하였다. Fig. 4처럼 단위질량 당 발열량이 천연가스가 높기 때문에 100% 부하에서 비연료소비율은 천연가스의 경우 경유, 부생유, 보일러 등유에 비해 약 15% 낮다.

3.2 디젤/천연가스 혼소 엔진 연료소모량

혼소엔진에서 연간 소비하는 연료량은 평균 부하율과 연간 가동률에 따라 영향을 받는다^{7,8)}. 본 연구에서는 기존 플랜트가 가동률이 약 70%로 알려져 있

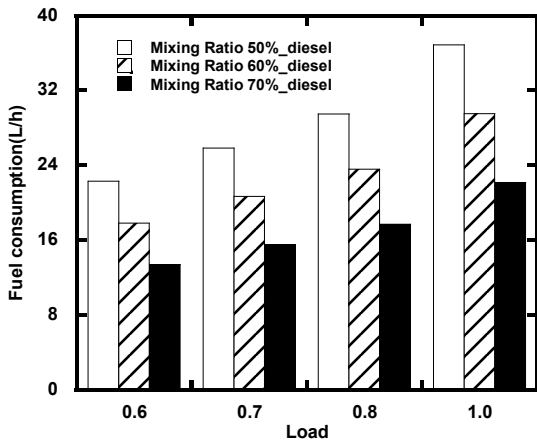


Fig. 6. Diesel consumption depending on loads for duel fuel diesel engine (300 kW), mixing ratio: % LNG

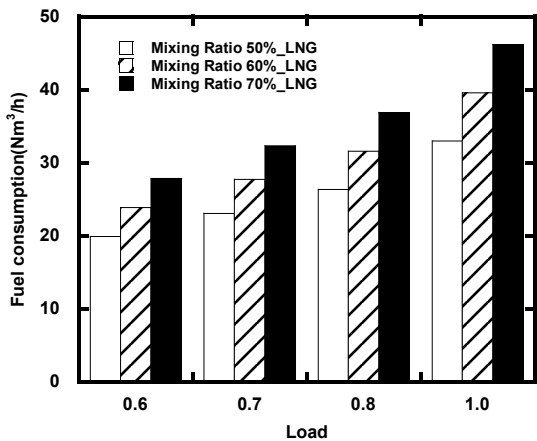


Fig. 7. LNG consumption depending on loads for duel fuel diesel engine (300 kW), mixing ratio: % LNG

기 때문에 가동률은 70%로 일정하다고 가정하였다. 혼소엔진에 투입되는 연료의 열에너지가 디젤엔진에 투입되는 연료의 열에너지(100% 경우)와 동일하다고 가정 후 부하와 혼소율을 변화시키면서 혼소엔진의 연료소모량(L/s, Nm³/s)을 도출하였다.

Fig. 6은 300 kW 급의 혼소 발전플랜트에서 디젤/천연가스를 연료로 사용 시 혼소율과 각 부하별 경우의 연료소모량을 나타낸 결과이고, Fig. 7은 300 kW 급의 혼소 발전플랜트에서 디젤/천연가스를 연료로 사용 시 혼소율과 각 부하별 천연가스의 연료소모량을 나타낸 결과이다. 두 플랜트 모두 부하가 증가하면 연료소모량이 증가하고 혼소율이 증가할수록 천연가스의 연료소모량이 증가한다.

3.3 연료가격 변동에 따른 디젤/천연가스 혼소발전 경제성 분석

연료 가격이 2017년부터 셰일가스 도입으로 천연가스 가격이 5% 감소하고 경유는 연간 5%씩 가격이 상승한다고 가정하였다. 이때의 기존 디젤 발전에서 연료를 경유 100%로 사용할 경우와 혼소할 경우에 대해서 연료비용을 계산하여 매년마다 연료 절감액을 도출하였다. 그 결과 경유 가격 상승과 천연가스 가격 하락에 의한 2중 효과로 혼소 시 연료비 절감액

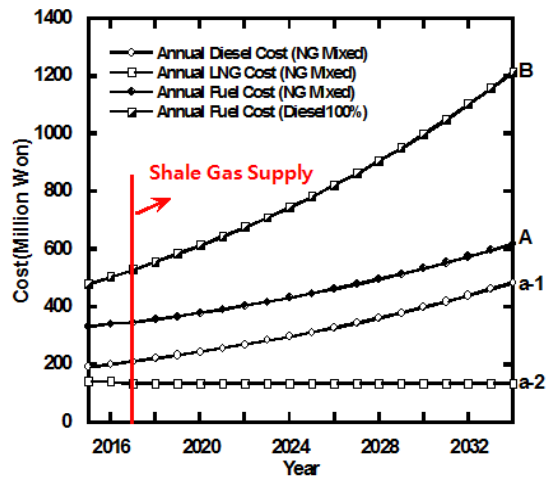


Fig. 8. Annual fuel costs considering fuel cost changes

이 상승함을 Fig. 8에서 확인할 수 있다. Table 5에서 보면 2015년도에는 혼소엔진 연료비용이 경유 100% 연료비용 대비 약 69% 정도이지만 2030년도에는 혼소엔진 연료비용이 경유 100% 연료비용 대비 약 53% 정도이다. 즉, 혼소엔진으로 교체 시 시간이 지날수록 상대적으로 연료비용 절감 효과가 예상된다.

Fig. 9에서 보듯이 혼소엔진의 연간 경유의 연료비용(a-1)은 매년 경유 가격 상승으로 인하여 2015년도에는 혼소엔진의 천연가스 연료비용(a-2) 대비 1.36배이고 2030년도에는 약 3배를 차지한다.

- A : 혼소엔진의 경유 & LNG 사용 시 연간 연료비용
- a-1 : 혼소디젤엔진의 연간 경유 연료비용
- a-2 : 혼소디젤엔진의 연간 LNG 연료비용
- B : 디젤엔진의 경유 100% 사용 시 연간 연료비용

Table 5. Fuel costs for each engine considering fuel price changes (diesel & LNG)

Year	Diesel engine fuel costs (₩ million)	Duel fuel engine fuel costs (₩ million)	Fuel cost savings (₩ million)
2015	481	334	147
2017	530	347	184
2020	614	380	234
2030	1,000	534	465

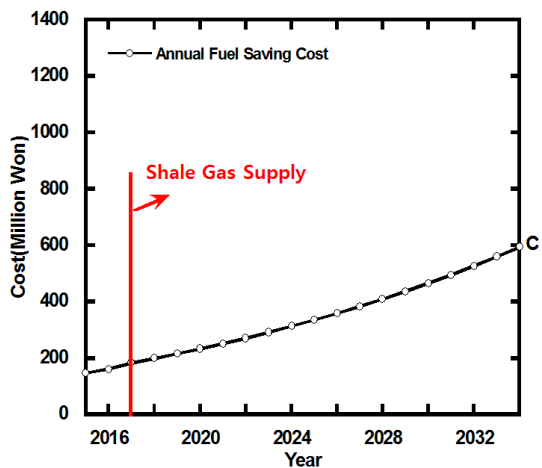


Fig. 9. Annual fuel cost savings considering fuel cost changes

Table 6. Economic analysis depending on loads and mixing ratio

		Annual fuel costs (₩ million)	Fuel cost savings (₩ million)	Payback (yearly)	IRR (%)
	Normal diesel (load 80%)	480			
Load 60%	Mixing 50%	271	93	4.36	28
	Mixing 60%	252	111	3.53	34
	Mixing 70%	234	130	2.96	39
Load 70%	Mixing 50%	314	107	3.67	32
	Mixing 60%	293	129	2.98	39
	Mixing 70%	271	150	2.51	46
Load 80%	Mixing 50%	258	122	3.15	37
	Mixing 60%	334	147	2.57	45
	Mixing 70%	309	171	2.17	52
Load 100%	Mixing 50%	449	153	2.46	46
	Mixing 60%	418	184	2.01	56
	Mixing 70%	387	215	1.71	65

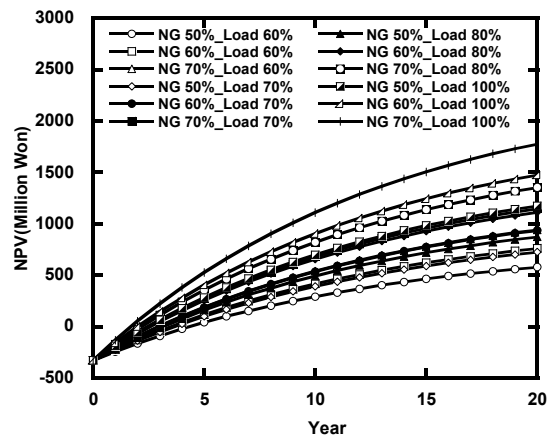


Fig. 10. NPV curve for 300 kW duel fuel engine

C : 혼소율 60% 혼소엔진 사용 시 연간 연료 절감액
(B-A=C)

추가적으로 경유 100%를 사용하는 기존 300 kW 급 디젤엔진 대비 혼소 디젤 발전의 경제성을 예측하였다. 기존 디젤엔진의 경우 부하 80%에서 연간 연료 비용은 약 4억 8천만 원이다. 그러나 혼소엔진으로 교체한다면 Table 6에 나타내었듯이 부하 60-100% 구간에서 혼소율을 50-70%로 변동할 때 연간 연료 절감액은 약 9천 만-2억 원으로 예상되며, 회수기간은 약 1.7-4.4년으로 나타났다. 연구개발비의 경우 반드시 비례해서 감소하는 것은 아니므로 연구개발비가 증가하게 되면 회수기간은 늘어날 것이다.

Fig. 10은 혼소엔진으로 기술 개발할 경우의 NPV의 곡선이다. 이때 NPV가 0이 되는 지점이 회수기간을 의미하며 혼소율이 높고 부하가 높을수록 연간 연료 절감액이 증가하여 회수기간이 짧아진다.

4. 결론

본 연구에서는 300 kW 급 디젤엔진의 성능 데이터를 이용하여 혼소엔진이 동일한 성능을 가짐을 가정하여 혼소 디젤엔진의 부하별 연료 소모량 및 효율을 도출하였다. 또한 혼소 디젤엔진의 경제성을 비교 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 혼소엔진의 부하(70%, 80%, 100%)와 혼소율(50%, 60%, 70%)을 변화시키면서 회수기간 및 IRR을 분석하였다. 이때 부하가 증가하고 혼소율이 증가할수록 회수기간이 짧아지고 IRR이 증가한다.

2) 경유/천연가스 60% 혼소할 경우 100% 경유를 사용한 디젤엔진의 연간 연료비용 대비 혼소 디젤엔진의 연간 연료비용이 약 31.7% 절감되며, 부생유/천연가스 60% 혼소할 경우에는 연간 연료비용이 약 43.2% 절감된다.

3) 향후 천연가스 혼소에 따른 대기오염물질 제거 효과에 대해서 추가적인 연구 평가가 필요하며, CO₂ 20% 및 NO_x 50% 저감 효과가 기대된다.

4) 국내외적으로 미세먼지 저감을 위하여 친환경 연료인 천연가스를 혼소함에 따라, 대기환경 규제에 적극대응하고 미래 신기술 적용이 요구된다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(천연가스 디젤 혼소 분산형 발전시스템 개발) (No. 2013101010176B).

References

1. S. Jensen, "Converting diesel engines to dual fuel the pros and cons of common gas engine types", Energy Conversion Inc., 2006. Retrieved from <https://www.energyconversions.com/whitepaperdualfuelengines.pdf>.
2. JFE Engineering, "Dual fuel engine gas fuel conversion technology", JFE Technical Report, No. 19, 2014. Retrieved from <https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/019/pdf/019-17.pdf>.
3. O. B. Lee and J. K. Ahn, "An economic analysis on dual-fuel engine generation for peak load", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 9, 2012. pp. 1260-1268, doi: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.9.1260>.
4. J. K. Lee, J. K. Park, and K. B. Hur, "Evaluation study of generator using dual fuel engine in Korean islands", KOSCO SYMPOSIUM, No. 43, 2011, pp. 253-256. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE01952103>.
5. Doosan Infracore, "P126TI-II product specification sheets". Retrieved from <http://www.doosaninfracore.com/engine/kr/product>.
6. Korea Gas Corporation, "Gas data book", Korea Gas Corporation, 2017.
7. K. Cheenkachorn, C. Poompipatpong, and C. G. Ho, "Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG (liquid natural gas)", Energy, Vol. 53, 2013, pp. 52-57, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.027>.
8. B. Pourkarimi, "Feasibility study of conversion of diesel power plant to natural gas in fort simpson", Canadian Gas Services International, 2010.