

E-fuel 기반 OME₂ 첨가를 통한 SI 엔진의 성능 개선 및 배출물 저감 연구

이 건 우¹⁾ · 송 순 호^{*2)}

연세대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 연세대학교 기계공학과²⁾

Research on the Improvement of Performance and Emissions of the SI Engine by Adding E-fuel Based OME₂

Geonwoo Lee¹⁾ · Soonho Song^{*2)}

¹⁾The Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

(Received 24 March 2023 / Revised 15 May 2023 / Accepted 24 May 2023)

Abstract : Different solutions have been proposed to reduce air pollutants and greenhouse gases to combat the severity of environmental pollution. Research on alternative fuels in the transportation sector can utilize existing infrastructure while minimizing pollution. This study aims to assess engine performance and emission changes by varying the blend ratios of OME₂, an E-fuel-based fuel. Experiments were conducted by adding OME₂ to a spark-ignition(SI) engine, followed by a numerical analysis using GT-Suite. Results showed that increasing the OME₂ energy ratio led to a decrease in engine output (up to 9.27 % reduction in IMEP). However, it also improved thermal efficiency(up to 3.67 % increase) due to enhanced combustion. Moreover, the addition of OME₂ resulted in a maximum reduction of 35.67 % in NO_x emissions. Thus, utilizing OME₂ as an alternative fuel can be an effective and environmentally beneficial approach.

Key words : Polyoxymethylene dimethyl ethers(OMEn, 폴리옥시메틸렌디메틸에테르), Oxygenated fuels(함산소연료), Spark-ignition engine(불꽃점화엔진), Emissions(배출물), Engine efficiency(엔진 효율)

Nomenclature

SI : spark-ignition
RPM : revolutions per minute
BMEP : brake mean effective pressure, bar
IMEP : indicated mean effective pressure, bar
BSFC : brake specific fuel consumption, g/kW
NO_x : nitrogen oxides
DOE : design of experiment
CA : crank angle

1. 서론

최근 환경오염과 기후변화에 대한 심각성이 대두되면서, 산업의 모든 분야에서 NO_x, Soot 등의 대기오염물질

과, CO₂ 등의 온실가스(Green House Gas)를 줄이려는 다양한 노력이 이루어지고 있다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 환경오염은 가속화되고 있으며, 이산화탄소 배출량 역시 꾸준히 증가하고 있다. 이를 해결하기 위해서 교통 분야에서도 다양한 연구가 진행되고 있는데, 크게 3가지로 구분할 수 있다. 배터리와 전기모터를 이용한 직접적 전기화, Fuel Cell과 같이 Energy carrier로써 수소를 이용하는 간접적 전기화, 그리고 기존의 내연기관에 암모니아, E-fuel, 수소¹⁾ 등의 연료를 이용하거나, 기존의 연료에 첨가하여 이용하는 대체연료가 있다.²⁾ 특히 E-fuel은 이산화탄소 포집과 신재생 전기에너지를 활용을 통한 탄소 중립을 목적으로 하기에 최근 각광받고 있다.²⁻⁴⁾ 이렇듯 대체연료는 기존의 내연기관 및 관련 인프라를 그대로 이용하면서, 대기오염물질 및 온실가스를

*Corresponding author, E-mail: soonhosong@yonsei.ac.kr

¹⁾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.

저감할 수 있기 때문에 환경오염 해결을 위한 돌파구가 될 수 있다.

대체연료에 대한 연구 중 가장 큰 부분을 차지하며 이루어져왔던 것은 합산소연료 연구이다. 합산소연료란 분자구조에 산소를 포함하고 있는 연료로, E-fuel 및 바이오매스와 같이 신재생에너지 자원을 통해 생산이 가능하고, 기존 연료 대비 탄소 및 황 함유량이 적으며, 분자 구조 내에 산소를 포함하고 있어 완전 연소에 유리해 배출물 저감이 가능하다는 장점이 있다.⁵⁾ 합산소연료는 크게 알코올계와 에테르계로 분류할 수 있으며, 특히 지금까지는 에탄올, 부탄올과 같은 알코올계 합산소연료에 대한 연구가 주로 이루어져왔지만, 최근에는 DME, OME_n과 같은 에테르계 합산소연료에 대한 연구가 진행되고 있다. PODEs로도 알려져 있는 OME_n의 분자식은 CH₃O(CH₂O)_nCH₃(n>=1)이며,⁶⁾ 이렇듯 DME, OME_n과 같은 에테르계 합산소연료는 탄소원자 간의 직접적인 결합이 없어 기존 연료에 비해 Soot 배출 저감이 가능하고, 알코올계 합산소연료보다도 상대적으로 더 높은 산소 농도를 가지고 있어 HC, CO와 같은 배출물이 적다. 특히 Table 1에서 확인할 수 있듯이, 끓는점이 -25 °C로 상온에서 기체인 DME와는 달리, OME_n 중 OME₂는 끓는점이 105 °C로 상온에서 액체이기 때문에 추가적인 장치 없이 기존 연료에 섞어서 운용할 수 있으며, OME₂의 산소 질량백분율은 DME보다 약 30 % 정도 크기 때문에 완전연소에 유리하여 배출물 저감 효과가 더 크다. 하지만 이러한 관심에도 불구하고, SI 엔진에 OME₂를 직접 첨가한 연구는 진행되지 않았으며, 따라서 본 연구를 통해 가솔린을 연료로 하는 SI 엔진에 OME₂가 첨가되었을 때, 엔진의 성능과 배출물 개선 가능성을 확인하고자 한다. 기존의 가솔린 연료에 다양한 에너지 비율로 OME₂를 첨가하여 직접 실험을 진행하였으며, 1-D 엔진 연소 해석 프로그램을 통해 대상 엔진을 모델링 하였고, 실험 계획법(DOE)을 활용한 실제 실험 데이터와의 검증과정을 통해 구축한 모델에 대한 신뢰도를 확보하였다. 최종적으로 GT-Suite를 활용한 시뮬레이션 해석을 통해

OME₂의 첨가 비율에 따른 엔진 성능의 변화와, 배출물 변화를 확인하였다.

2. 실험방법 및 수치해석

2.1 대상 엔진 제원 및 실험 방법

실험에 사용된 엔진은 1 L 급 2기통 4행정 가솔린 터보 엔진으로, 대상 엔진의 상세 제원은 Table 2와 같다. 엔진의 회전속도와 토크를 제어하기 위해 300 W 급 교류동력계 D2T MDA 300(최대 토크: 700 Nm, 최대 속도: 10,000 rpm)를 엔진과 결합하였으며, 연료의 유량 측정을 위해 ONO SOKKI FZ-2100 유량계(정확도: ±0.1 %)를 장착하였다. 공연비를 측정하기 위해 산소 센서가 포함된 ETAS의 공연비 측정 모듈 ES630.1을 사용하였으며, 배기가스 분석기 HORIBA MEXA-1600DEGR를 통해 CO, HC, NO_x 등의 배출물을 측정하였다. CO는 적외선 비분산법(NDIR)을 통해 측정되며, HC와 NO_x 배출물은 각각 불꽃 이온화검출기(FID)와 화학 발광검지기(CLD)를 통해 측정된다.

모든 실험은 엔진을 충분히 예열한 상태에서 진행되었다. 배기량 1 L 급 엔진이 탑재된 차량의 경제운전 조건인, 회전속도 1700 rpm, BMEP 4.5 bar에서 실험을 진행하였으며, 점화시기는 27°CA BTDC이다. 실험에 사용된 연료는 가솔린과 OME₂이며, 연료의 구성은 OME₂의 에너지비율 0 %에서 최대 12 %까지로 이루어져 있다. OME₂의 에너지비율(β_O)은 다음과 같은 공식으로 정의된다.

$$\beta_O = \frac{m_O \cdot L_O}{m_O \cdot L_O + m_G \cdot L_G} \times 100\%$$

이때, m_O 와 m_G 는 각각 OME₂와 가솔린의 질량(kg)을 나타내며, L_O 와 L_G 는 각각 OME₂와 가솔린의 저위발열량(MJ/kg)을 나타낸다.

공연비는 이론공연비인 람다 1 조건이며, 람다는 다음과 같은 공식으로 정의된다.

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{air} \cdot \rho_{air}}{m_O \cdot AF_{O_{st}} + m_g \cdot AF_{g_{st}}}$$

이때, \dot{V}_{air} 는 정상상태에서의 공기의 체적유량(L/h)을, ρ_{air} 는 정상상태에서의 공기의 밀도(kg/L)를 나타내고, m_O 와 m_g 는 각각 OME₂와 가솔린의 질량 유량(kg/h)을 나타내며, $AF_{O_{st}}$ 와 $AF_{g_{st}}$ 는 각각 OME₂와 가솔린의 이론 공연비($AF_{O_{st}}=6.47$, $AF_{g_{st}}=14.7$)를 나타낸다. 위의 실험 조건들을 정리하여 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Properties of DME, OME₂⁷⁻¹⁰⁾

	DME	OME ₂
CAS NO.	115-10-6	628-90-0
Molecular formula	CH ₃ OCH ₃	CH ₃ O(CH ₂ O) ₂ CH ₃
Molecular weight (g/mol)	46.07	106
Boiling point (°C)	-25	105
Lower heating value (MJ/kg)	28.43	20.6
Oxygen content (%)	34.8	45.2
Liquid density (kg/m ³)	667	980

Table 2 Specification of engine

Item	Specification
Engine type	2-cylinder, 4-stroke gasoline turbo engine
Bore (mm)	86
Stroke (mm)	86
Displacement (cc)	999
Compression ratio	9.2
Bore/Stroke ratio	1
Max. power (kW/rpm)	30/3,000
Max. torque (Nm/rpm)	115/1,800

Table 3 Experimental conditions

Case	Speed (rpm)	BMEP (bar)	A/F ratio	OME ₂ energy ratio (%)
1	1700	4.5	14.7	0
2	1700	4.5	14.2	3
3	1700	4.5	13.7	6
4	1700	4.5	13.3	9
5	1700	4.5	12.9	12

2.2 모델링 및 신뢰도 확인

상용 엔진 연소해석 프로그램인 GT-Suite를 사용하여, Table 2의 엔진 제원과 정상 상태 실험 데이터를 바탕으로 Fig. 1과 같이 대상 엔진에 대한 1-D 모델을 구축하였다. 그리고 BMEP, 토크, NOx 배출량 등 엔진의 성능 및 배출물을 보여주는 주요 인자 6가지를 Table 4와 같이 선정하여 10% 이내 오차를 가지도록 모델의 신뢰도를 확보하였다.

구축한 1-D 모델에 대한 신뢰도를 확보하기 위하여, 시뮬레이션 상에서 연소, 마찰, NOx에 대한 3가지 변수를 실험계획법(DOE)으로 선정하였다.¹¹⁾ 먼저, 연소 모델 구현은 SI 난류화염모델(SI turbulent flame combustion model)을 사용하였는데, 이는 SI 엔진에 대한 예측적 연소 모델로, 실린더 내 연소율, 배기가스 배출 및 노킹 발생 등을 예측하는 데 사용된다. 연료 및 공기의 균질 혼합물뿐만 아니라층상 혼합물 또한 예측할 수 있으며, 연소실 형상, 점화 위치 및 시기, 실린더 내 가스의 조성 및 흐름 등의 변수를 이용하여 예측한다. 두번째로 마찰에 대한 모델은 최고 실린더 압력 및 피스톤 속도 값을 이용하여 계산하는 Chen-Flynn engine friction 모델을 통하여 엔진의 FMEP를 결정하였다. 마지막으로, 배출되는 NOx 양은 실험 데이터를 기반으로, NOx 값 자체의 멀티플라이어와 N2 산화 활성화 에너지 변수를 이용하였다. 위의

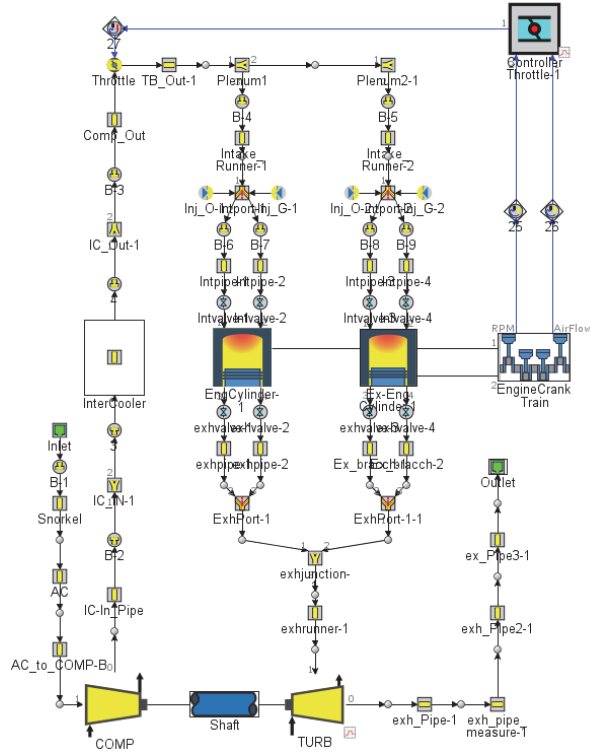


Fig. 1 GT-Suite engine model

Table 4 Model calibration for reliability

Main data for calibration	* Data reliability error
BMEP (bar)	≤ 10 %
Torque (Nm)	
Engine speed (rpm)	
BSFC (g/kW-h)	
Air flow rate (kg/h)	
NOx (ppm)	

*Data reliability error(%)=(model data - actual test data) / actual test data

3가지 영역에서의 변수들에 대하여 각각 적절한 수준 (Level)을 구성하고, 실험계획법의 완전요인배치법을 이용하여 신뢰도를 확보하였다.

2.3 수치해석

수치해석은 동일하게 엔진 회전속도 1700 rpm에서 진행하였으며, OME₂의 첨가 비율을 0%에서 12%까지 단계별로 증가시켰다. 점화시기는 기존의 가솔린 연료와 OME₂ 연료의 특성 차이를 고려하기 위해서, 1700 rpm의 엔진 회전속도에 대하여 각 첨가비율에 따라 최대 제동 토크가 발생하는 점화 시기(MBT)를 채택하였다. 또한 연료의 첨가 비율 변화에 따른 엔진 성능 및 배출가스 배

출량의 변화를 뚜렷하게 확인하기 위해, 모든 해석 조건에 대하여 연료량을 2 kg/h로 동일하게 설정하였으며, 공연비는 이론공연비 조건을 유지하였다. 상기와 같은 수치해석 조건을 통해 OME₂ 첨가 비율에 따른 열효율, IMEP 등의 엔진 성능과, 질소산화물의 배출량의 변화를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 엔진 성능

Fig. 2는 구축한 엔진 모델에 2 kg/h의 동일한 양의 연료가 주입되었을 때, 1700 rpm, MBT 조건에서 각 OME₂의 에너지비율에 따른 연료의 에너지유량을 나타낸 그래프이다. 연료 내 OME₂의 에너지비율이 커질수록 연료의 총 에너지유량은 꾸준히 감소하여, OME₂의 에너지비율이 12%일 때 기존의 가솔린 연료만 사용했을 때보다 약 10.53% 감소하였다. Table 1에서와 같이 OME₂의 상대적으로 낮은 저위발열량으로 인해 동일한 양의 연료가 주입되었을 때, 연료 내 OME₂의 에너지비율이 커질수록 연료의 에너지유량은 감소한 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 동일한 해석 조건에서 각 OME₂의 에너지비율에 따른 도시평균유효압력(IMEP)을 나타낸 그래프이다. OME₂가 첨가되지 않은 0%일 때의 IMEP는 약 6.21 bar로 가장 큰 것을 확인할 수 있고, 연료 내 OME₂의 에너지비율이 커질수록 IMEP는 꾸준히 감소하여 OME₂의 에너지비율이 12%일 때 5.63 bar로 가장 작은 값을 가지며, 0%일 때보다 약 9.27% 감소한 것을 확인할 수 있다.

다만 Fig. 4는 OME₂의 에너지비율에 따른 열효율을 나타낸 그래프로, OME₂의 첨가 비율이 커짐에 따라 열효율은 증가하는 것을 확인할 수 있다. OME₂가 첨가되

지 않고 기존의 가솔린 연료만 사용한 경우 열효율은 약 35.68%로 가장 낮았지만, OME₂를 첨가할수록 열효율은 꾸준히 증가하여, OME₂의 에너지비율이 12% 첨가된 경우 약 36.99%로 가장 높았다. 이는 0% 에너지 비율의 경우보다 약 3.67% 증가한 수치이다. 열효율이 증가한 이유는 OME₂가 첨가됨에 따라 그림 2에서와 같이 엔진으로 투입되는 연료의 전체 에너지유량은 감소하였지만, Fig. 3에서와 같이 도시평균유효압력은 더 적게 감소하였기 때문이다. 즉, OME₂의 상대적으로 낮은 발열량으로 인해 연료의 전체 에너지유량은 감소하였지만, 연소 과정에서 OME₂의 빠른 증발 속도로 인해 연료와 흡기가 더욱 균일하게 혼합할 수 있었고, OME₂의 분자 구조 내에 포함된 산소로 인해 연료의 완전 연소 비율이 높아지게 되었다.¹²⁾ 또한 OME₂의 낮은 자발화 온도로 인한

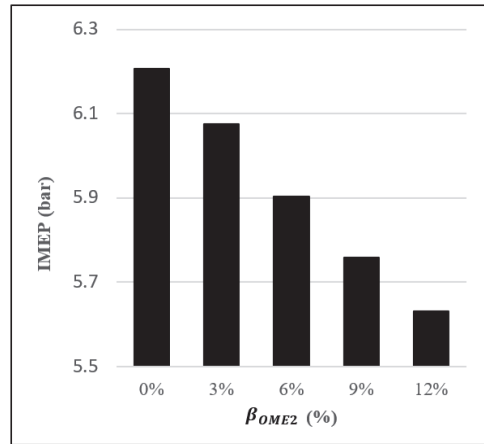


Fig. 3 Indicated mean effective pressure according to OME₂ energy ratio

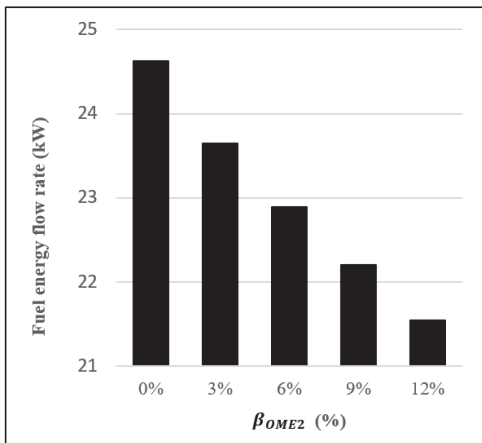


Fig. 2 Fuel energy flow rate according to OME₂ energy ratio

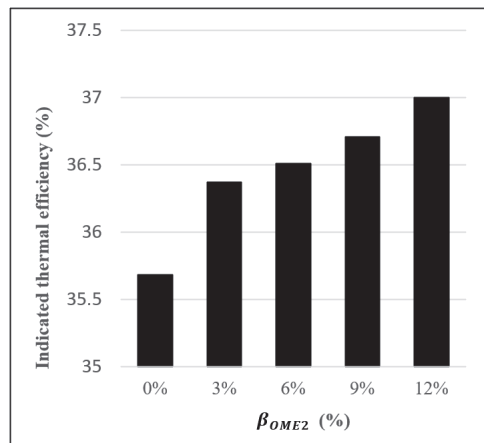


Fig. 4 Indicated thermal efficiency according to OME₂ energy ratio

빠른 화염전파속도로 인해, 가솔린 연료의 산화과정을 더욱 촉진시켜 전체적인 열효율은 증가하게 되었다.¹³⁾

Fig. 5는 각 OME₂의 에너지비율에 따른 제동연료소비율(BSFC)를 나타낸 그래프로, BSFC는 연료의 경제성을 확인하는 척도로 사용될 수 있다. OME₂의 에너지 비율이 증가함에 따라 OME₂의 상대적으로 낮은 발열량으로 인해 성능 대비 더 많은 연료가 필요하게 되었고, 그에 따라 BSFC는 증가하는 것을 확인할 수 있다. OME₂의 에너지비율이 0 %일 때 BSFC는 약 265.98 g/kWh인 반면, OME₂의 에너지비율이 12 %로 증가했을 때 BSFC는 약 294.18 g/kWh로 약 10.6 % 증가하였다.

3.2 배출물

NO_x 생성 반응에서 가장 큰 영향을 미치는 요인은 연소온도이다. 즉, 연소온도가 높아질수록 NO_x 생성이 촉

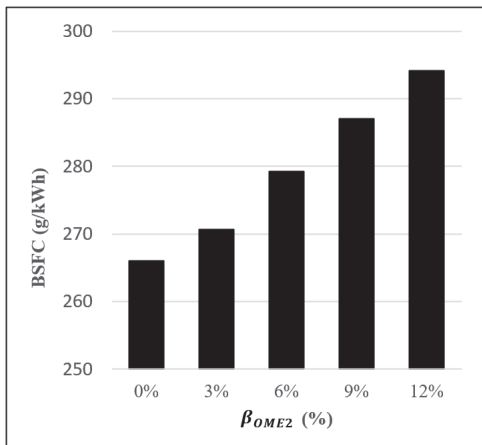


Fig. 5 Break specific fuel consumption according to OME₂ energy ratio

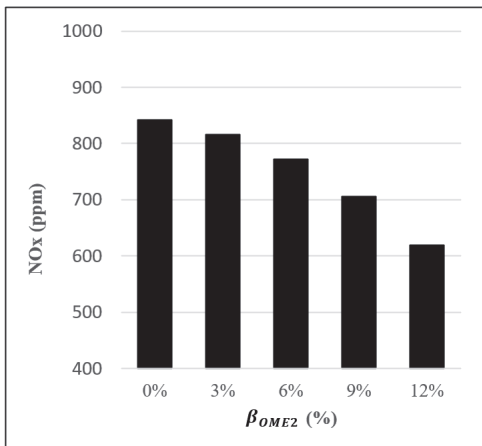


Fig. 6 NO_x emissions according to OME₂ energy ratio

진되며, 연소온도가 감소할수록 NO_x 배출량은 감소하게 된다. Fig. 6은 OME₂의 에너지비율의 변화에 따른 질소산화물의 배출량을 나타낸 그래프이다. OME₂의 에너지비율이 가장 높은 12 %에서 질소산화물 배출량이 가장 적은 것을 확인할 수 있으며, 이는 OME₂가 첨가되지 않았을 때보다 약 35.67 % 감소한 수치이다. OME₂의 에너지비율이 커짐에 따라 연료의 총 에너지유량이 감소하였고, 따라서 엔진의 실린더 내에서 연소온도가 감소하여 질소산화물 배출량이 감소하였으며, 한편으로 OME₂의 분자 구조 내 높은 산소 함량 또한 질소산화물 배출 감소에 도움이 되었다.

4. 결론

- 1) OME₂의 에너지비율이 높아질수록 연료의 총 에너지 유량 및 IMEP는 감소하였지만, OME₂의 화학적 특성에 의한 실린더 내 연소 개선으로 열효율은 최대 3.67 % 증가하였다.
- 2) 배출물의 경우 OME₂의 첨가에 따른 연소온도의 감소로 NO_x 배출량이 최대 35.67 % 감소하였다.
- 3) 결과적으로 가솔린을 연료로 사용하는 불꽃점화엔진에 OME₂를 첨가하는 것은 경제적 및 환경적인 관점에서 효과적인 방법이 될 수 있다.
- 4) OME₂는 기존 연료 대비 점화지연시간이 짧고, 공연비의 변화에 따른 층류화염속도의 변화가 작기 때문에 연료가 희박한 연소 조건에서 이점이 있을 것으로 여겨진다.^{13,14)} 따라서 희박 연소 조건에서의 OME₂ 연료의 운용가능성을 확인하는 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 대체연료는 열효율 증가 및 배출물 저감 측면에서 장점이 있지만, 기본적으로 낮은 발열량으로 인한 출력 저하 및 연료소비율 증가와 같은 한계점이 존재한다. 따라서 대체연료들의 열효율 증가 대비 출력 저하를 비교, 분석하는 성능 평가 연구와 연료소비율의 증가에 따른 경제성 평가 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 6) 추가적으로 기존의 화석연료를 기반으로 하여 E-fuel이 첨가된 혼합연료가 아닌, E-fuel만으로 이루어진 연료에 대한 연구도 중요한 의미를 지닌다. 따라서 OME₂ 에너지비율 100 % 연료를 활용한 연구 및 다른 종류의 E-fuel 연료와 OME₂를 혼합한 연료를 활용한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 환경부에서 지원하는 대기환경 관리기술 사업화 연계 기술개발사업인[Post Stage-V 대응을 위한

중대형 건설기계 LPG 엔진 개조 및 차량 적용 기술개발 연구 과제(No.2021003390011)의 일부이며, 관계기관에 감사의 뜻을 전합니다.

References

- 1) S. W. Lee, H. K. Baek, H. C. Oh, J. H. Lee, J. Y. Jung, J. S. Kim, S. H. Song and K. M. Chun, "Thermal Efficiency Improvement of SI Engine Using On-board Gasoline Fuel Reforming," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.135-142, 2018.
- 2) F. Ausfelder and K. Wagemann, "Power-to-fuels: E-fuels as an Important Option for a Climate-friendly Mobility of the Future," Chemie Ingenieur Technik, Vol.92, Nos.1-2, pp.21-30, 2020.
- 3) L. E. Hombach, L. Doré, K. Heidgen, H. Maas, T. J. Wallington and G. Walther, "Economic and Environmental Assessment of Current (2015) and Future (2030) use of E-fuels in Light-duty Vehicles in Germany," Journal of Cleaner Production, Vol.207, pp.153-162, 2019.
- 4) H. Maas, A. Schamel, C. Weber and U. Kramer, "Review of Combustion Engine Efficiency Improvements and the Role of E-fuels," Internationaler Motorenkongress 2016: Mit Konferenz Nfz-Motorentechnologie, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp.463-483, 2016.
- 5) O. I. Awad, R. Mamat, T. K. Ibrahim, A. T. Hammid, I. M. Yusri, M. A. Hamidi, A. M. Humada and A. F. Yusop, "Overview of the Oxygenated Fuels in Spark Ignition Engine: Environmental and Performance," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.91, pp.394-408, 2018.
- 6) R. Schmitz, C. Russo, F. Ferraro, B. Apicella, C. Hasse and M. Sirignano, "Effect of Oxymethylene Ether-2-3-4 (OME2-4) on Soot Particle Formation and Chemical Features," Fuel, Vol.324, Paper No. 124617, 2022.
- 7) S. H. Park and C. S. Lee, "Applicability of Dimethyl Ether (DME) in a Compression Ignition Engine as an Alternative Fuel," Energy Conversion and Management, Vol.86, pp.848-863, 2014.
- 8) C. Arcoumanis, C. Bae, R. Crookes and E. Kinoshita, "The Potential of Di-methyl Ether (DME) as an Alternative Fuel for Compression-ignition Engines: A Review," Fuel, Vol.87, No.7, pp.1014-1030, 2008.
- 9) C. J. Baranowski, A. M. Bahmanpour and O. Kröcher, "Catalytic Synthesis of Polyoxymethylene Dimethyl Ethers (OME): A Review," Applied Catalysis B: Environmental, Vol.217, pp.407-420, 2017.
- 10) O. I. Awad, X. Ma, M. Kamil, O. M. Ali, Y. Ma and S. Shuai, "Overview of Polyoxymethylene Dimethyl Ether Additive as an Eco-friendly Fuel for an Internal Combustion Engine: Current Application and Environmental Impacts," Science of the Total Environment, Vol.715, Paper No.136849, 2020.
- 11) S. Jeon and S. Song, "Numerical Analysis of Engine Efficiency by Pilot and Main Injection Timing Optimization through 1D Modeling of Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.25, No.6, pp.668-674, 2017.
- 12) C. Wang, H. Xu, R. Daniel, A. Ghafourian, J. M. Herreros, S. Shuai and X. Ma, "Combustion Characteristics and Emissions of 2-methylfuran Compared to 2,5-dimethylfuran, Gasoline and Ethanol in a DISI Engine," Fuel, Vol.103, pp.200-211, 2013.
- 13) C. Liang, C. Ji, B. Gao, X. Liu, and Y. Zhu, "Investigation on the Performance of a Spark-ignited Ethanol Engine with DME Enrichment," Energy Conversion and Management, Vol.58, pp.19-25, 2012.
- 14) S. Eckart, L. Cai, C. Fritsche, F. vom Lehn, H. Pitsch, and H. Krause, "Laminar Burning Velocities, CO, and NOx Emissions of Premixed Polyoxymethylene Dimethyl Ether Flames," Fuel, Vol.293, Paper No. 120321, 2021.