

경유/1-데칸올 혼합유의 디젤엔진 연소 특성 연구

박철오* · 양정현* · 김범수* · 권재성*†

*경상국립대학교 기계시스템공학과

Experimental Study of Combustion Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Diesel/1-Decanol Blends

Cheol-oh Park*, Jeonghyeon Yang*, Beomsoo Kim* and Jaesung Kwon*†

*Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University

(Received 18 August 2022, Received in revised form 1 September 2022, Accepted 15 September 2022)

ABSTRACT

There have been many studies on the combustion characteristics of lower alcohols in diesel engines, but information on higher alcohols is relatively scarce. In this study, diesel/1-decanol blends were prepared to investigate the combustion and emission characteristics of a single-cylinder 4-stroke diesel engine. The concentration of 1-decanol in the fuel blends was 10%, 15%, and 20% by volume. Experiments were conducted by varying the engine torque from 4 Nm to 12 Nm at the same engine speed of 2000 rpm. Results show that the thermal efficiency and smoke opacity decreased while the brake specific fuel consumption increased with blended fuels. The concentration of NO_x in the exhaust gas generally reduced, while it increased for some conditions with 20% 1-decanol as the load increased. CO emissions increased for relatively high loads when the 1-decanol ratio is 15% and 20% due to the reduction in the air-fuel ratio.

Key Words : 1-Decanol, Diesel engine, NO_x , Smoke

기 호 설 명

A/F : Air/fuel ratio

BMEP : Brake mean effective pressure

BSFC : Brake specific fuel consumption

CN : Cetane number

CO : Carbon monoxide

CO₂ : Carbon dioxide

De : 1-decanol

LHV : Lower heating value

HC : Hydrocarbon

NO_x : Nitrogen oxides

rpm : revolution per minute

1. 서 론

차량 및 선박에서 배출되는 유해 물질을 감소시키고, 수송용 연료의 대부분이라 할 수 있는 화석 연료에 대한 의존도를 낮추기 위해 다양한 분야에서 연구 활동이 이어지고

있다. 일부 국가에서는 수송용 연료로써 바이오 연료를 화석 연료에 일정 비율 혼합하는 것을 의무화하고 있으며, 국내에서도 디젤 연료에 대한 바이오디젤 혼합비율을 단계적으로 높여가고 있다. 바이오 연료에는 대표적으로 바이오에탄올과 바이오디젤이 있으며, 최근에는 바이오부탄올을 포함한 다탄소 알코올의 연소 및 배기가스 특성에 대한 연구도 진행되고 있다[1-6].

알코올 연료는 분자 내에 포함된 탄소수 및 분자의 결합 구조에 따라 물리화학적 특성에 큰 차이가 있으며, 가솔린 또는 디젤 연료와 혼합 연소 시 혼화성 및 점화시기, 유해

†Corresponding Author, jkwon@gnu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

물질 배출 특성에 이르기까지 다양한 차이를 나타낸다 [7-10]. 에탄올과 메탄올은 상 분리 문제로 인해 디젤 연료와 혼합 시 별도의 연료혼합장치나 연료분사장치의 구조 변경 또는 계면활성제의 첨가가 요구되며, 낮은 저위발열량(LHV)과 낮은 세탄가(CN)로 인해 착화성이 나빠지는 문제가 있어 높은 비율로 혼합하여 압축착화방식의 디젤 엔진에 사용하기에는 불리한 점이 있다[11-14]. 알코올 연료와 석유계 연료와의 혼화성 문제를 해결하기 위해 부탄올, 펜탄올, 데칸올 등의 다탄소알코올을 첨가하는 방법이 있으며, 이는 기존 내연기관의 구조 변경을 요구하지 않는다[15-17]. 연료의 특성을 고려한 방법 외에도 흡기계에 알코올 연료를 보조 분사하고 경유 또는 바이오디젤을 연소실 내부에 직접 분사하는 이중 분사방식을 채택할 수도 있는데, 연료 내 탄소수가 증가함에 따라 디젤 엔진의 성능은 최대한 유지하면서 질소산화물과 입자상 물질의 배출 저감이 가능하다는 연구 결과가 보고되었다[18].

본 연구에서는 다탄소알코올의 디젤엔진 연소 특성을 이해하기 위해 자연흡기 방식의 4행정 단기통 디젤엔진을 대상으로 경유/1-데칸을 혼합유를 사용한 연소실험을 수행하였으며, 증발열, 자연발화온도를 포함한 연료의 점화 특성이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 1-데칸을 혼합비율에 따른 측정 결과를 다양한 부하 조건에 대해 비교하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

경유/1-데칸을 혼합유가 디젤엔진 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 1에 나타난 바와 같이 실험 장치를 구성하였다. 실험에 사용된 엔진의 제원은 Table 1에 나타내었으며, 엔진에 흡입되는 공기량 및 부하 변동은 PC를 이용하여 제어한다. 배기가스 온도와 유량을 포함한 다양한 실험데이터 수집을 위해 각종 센서류는

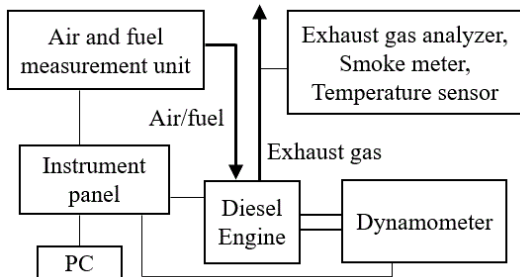


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

instrument panel에 연결되며, 제동마력 및 엔진의 열효율 등 엔진의 연소 특성과 관련된 물리량은 수집된 데이터를 기반으로 PC에 설치된 소프트웨어를 사용하여 계산한다.

배기가스의 성분 및 농도 분석을 위해 큐로테크(주)의 QRO-402 가스 분석기와 OPA-102 스모크 측정기를 배기관에 연결하였으며, Table 2는 배기가스의 성분별 농도 측정범위, 정확도 및 분해능을 나타낸다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 경유에 데칸올을 첨가하여 디젤엔진의 연소 및 배기특성 변화를 관찰하였으며, Table 3에 나타난 부피 비율로 경유와 데칸올을 혼합하여 총 4종류의 연료를 실험에 사용하였다. Table 4는 경유와 데칸올의 특성을 나타내며, 증발열과 동점도 및 분자 내 산소함량에서 명확한 차이가 나타난다.

Table 1. Test engine specifications

Model	MIT-178F
Max. power/Speed	7.0 HP/3000 rpm
Engine type	Single-cylinder, 4-stroke
Displacement volume	305 cm ³
Cooling	Air cooled
Injection	Direct
Engine start system	Recoil

Table 2. Specifications of the exhaust gas analyzer and smoke meter

Parameters	Range	Accuracy	Resolution
NO _x	0-5,000 ppm	±15 ppm	1 ppm
CO	0-10%	±0.02%	0.01%
CO ₂	0-20%	±0.06%	0.1%
HC	0-9,999 ppm	±20 ppm	1 ppm
O ₂	0-25%	±0.025%	0.01%
Smoke	0-100%	±1%	0.1%

Table 3. Composition of the fuel blends

Fuel blends	Diesel vol%	1-decanol vol%
D100	100	0
D90De10	90	10
D85De15	85	15
D80De20	80	20

Table 4. Properties of diesel and 1-decanol

Properties	Diesel	1-decanol
LHV (MJ/kg)	42.9	41.9
Latent heat of vaporization (MJ/kg)	0.27	0.51
CN	>52	52
Density (m ³ /kg)	840	826
Kinematic viscosity @ 40°C (mm ² /s)	3.75	15.8
Oxygen (wt%)	0	10.1
Stoichiometric A/F	14.9	13.07

Table 5. Fuel consumption rate(kg/h)

BMEP (MPa) \ Fuel blends	BMEP (MPa)				
	0.17	0.25	0.33	0.41	0.49
D100	16.94	15.78	15.66	15.36	15.94
D90De10	16.92	16.03	16.02	15.78	16.68
D85De15	16.82	16.68	16.37	16.35	16.22
D80De20	16.25	16.09	15.72	15.89	15.47

4종류의 연료유에 대해 공기흡입량을 조절하여 엔진의 속도를 2000 rpm으로 유지한 상태에서 엔진에 가해지는 부하를 변화시켜 엔진 토크가 4, 6, 8, 10, 12 Nm인 지점에서 성능 변수 및 배기가스 농도를 측정하였다. 실내온도는 평균 14°C로 측정되었으며, 모든 실험 조건에 대한 연료소모율은 Table 5에 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 열효율 및 BSFC

열효율(η_f)과 BSFC는 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\eta_f = \frac{P}{m_f Q_{LHV}} \quad (1)$$

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (2)$$

여기서 P 는 제동출력, \dot{m}_f 은 연료소비율을 나타낸다. Fig. 2는 실험에 사용된 4종의 연료유에 대한 평균 열효율을 BMEP에 대해 나타낸 것으로 모든 연료유에 대해 부하

가 증가할수록 열효율이 유사한 경향으로 증가함을 알 수 있으며, 측정데이터의 표준편차는 최대 2% 이내였다. 모든 실험조건에 대해 D100의 열효율이 제일 높고, 경유-데칸올 혼합유 사용 시 D100 대비 열효율이 낮아진다. 열효율은 연소 속도와 연료의 특성 등 다양한 요인에 의해 결정되는데, 데칸올의 경우 점도가 경유보다 높고 증발열이 경유보다 크기 때문에 연료 분사 후 분무의 미립화 과정에서 부정적인 영향이 있고, 연료의 증발이 지연되면서 점화 지연 및 연소 반응의 역제가 일어난 것으로 이해할 수 있다. 경유/1-데칸올 혼합유를 비교해보면 혼합유 중에서는 D80De20의 열효율이 모든 실험조건에 대해 제일 높게 나타나는데, 이것은 데칸올 혼합비율이 높아질수록 연료 내에 함유된 산소량이 증가하고, 이는 연소 활성화로 이어져 궁극적으로 열효율을 증가시키는 것으로 판단된다.

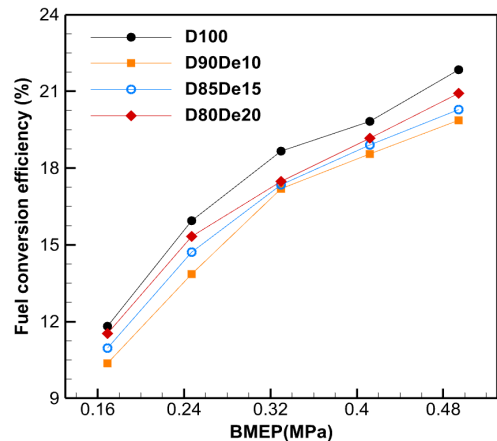


Fig. 2. Variation of fuel conversion efficiency with BMEP.

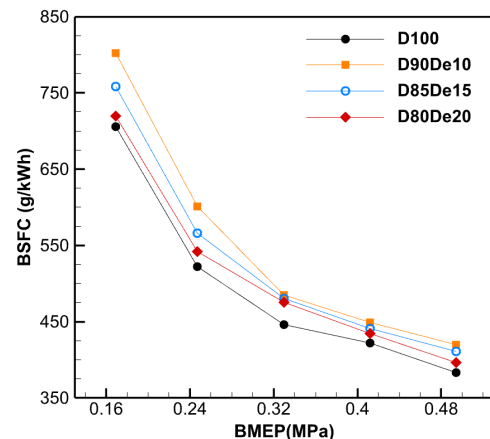


Fig. 3. Variation in BSFC with BMEP.

BSFC는 단위 출력당 소비되는 연료량을 의미하는데, 연료의 경제성을 판단하는 지표로 활용된다. Fig. 3은 모든 연료유에 대해 BMEP가 증가할수록 BSFC는 감소하는 경향을 보여주며, 경유/1-데칸을 혼합유 3종은 모든 조건에서 D100 대비 높은 BSFC를 나타낸다. 1-데칸올의 저위발열량이 경유의 저위발열량보다 적기 때문에 열효율에서 우위를 확보할 수 있는 다른 요인이 없다면 연료의 특성으로부터 BSFC는 증가할 것으로 기대할 수 있고 측정 결과는 이러한 기대에 잘 부합된다.

BMEP가 낮은 영역(0.17/0.25 MPa)은 저부하 영역을 의미하고, 이 영역에서 혼합유 3종 간 BSFC의 차이가 명확하게 나타나는데, D90De10의 BSFC가 가장 크다. 이러한 이유는 위에서 언급한 것처럼 경유/1-데칸을 혼합유는 경유보다 상대적으로 높은 증발열과 높은 점도를 가지게 되어 연소 반응이 경유보다 억제되는 경향이 있으나 연료 내 산소 성분은 연소 반응을 촉진하는 요인이기도 하다. 이렇게 상반된 두 요인이 저부하 영역에서는 경유와 1-데칸을 혼합비에 따라 다른 결과를 가져오는데, 1-데칸올의 혼합비가 증가할수록 연료 내 산소에 의한 연소 반응 촉진 효과가 상대적으로 더 강해져 혼합유 중에서는 D80De20의 BSFC가 가장 낮게 측정된 것으로 판단된다.

3.2 배기가스 특성

Fig. 4는 배기가스 중 NO_x의 농도를 나타낸다. 모든 연료유에 대해 BMEP 증가에 따라 NO_x의 배출 농도가 높아지는 경향이 확인된다. NO_x생성에 영향을 주는 요인으로 연소실 내부 온도, 산소 농도 및 체류시간이 있다. 1-데칸올은 증발열이 경유보다 크기 때문에 연료의 증발 과정에서 연소실 내부 기체를 냉각시키는 효과가 있고, 이것은 저온 연소로 이어져 NO_x 생성을 억제하게 된다. 그러나, 연료에 포함된 산소는 연소 반응을 활성화시켜 연소실 내부 온도를 상승시키고 NO_x 생성을 촉진하므로, 1-데칸올의 첨가가 단순히 NO_x 배출을 증가 또는 감소시킨다는 결론을 내리기는 어렵다. 측정 결과 1-데칸올의 혼합비율이 15%이하인 경우는 모든 조건에 대해 D100 대비 NO_x 배출 농도가 낮으나, D80De20의 경우에는 일부 영역에서 D100 대비 NO_x 농도가 높게 측정되었다. BMEP가 가장 낮은 조건에서는 1-데칸올 혼합비율이 높을수록 NO_x 농도가 감소하는 것으로 보아 저부하 영역에서는 냉각 효과가 지배적인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 배기가스 온도를 나타내는데, 전반적으로 경유/1-데칸올 혼합유를 사용했을 때 배기가스 온도가 D100보다 높게 측정되었으며, 부하가 높아질수록 혼합유 사용 조건에서 배기가스 온도가 높아지는 경향이 나타난다.

Fig. 6은 배기가스 중 일산화탄소(CO) 농도를 나타낸다. BMEP 증가에 따라 CO 농도가 증가하는 경향을 보여주는데, BMEP가 0.33 MPa 이상일 때 뚜렷한 증가 경향을 보이며, 경유/1-데칸올 혼합유 3종의 경향이 D100의 경향과 유사하다.

CO는 공기가 부족한 상태에서 불완전 연소에 의해 발생하는데, D80De20을 제외한 나머지 연료유의 경우 저부하 영역에서는 부하의 증가에 따른 CO 농도의 증가 경향이 나타나지 않는다. 이것은 실제공연비가 이론공연비보다 약 50-90% 정도 더 높기 때문에 연료에 관계없이 희박 영역에서 대부분의 연소가 발생하여 CO 농도가 낮게 측정되는 것으로 판단되며, D80De20의 경우 D100보다 공연비는 감소하지만 연료에 포함된 산소 성분이 감소된 공

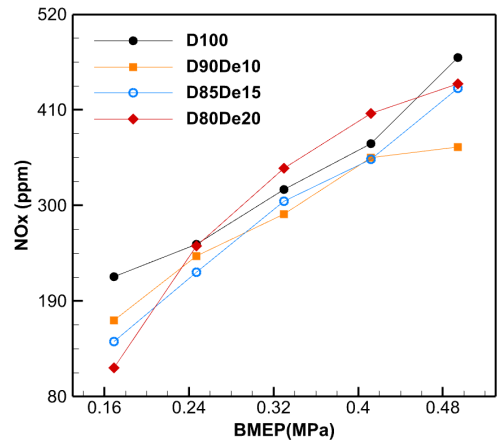


Fig. 4. Variation of NO_x emissions with BMEP.

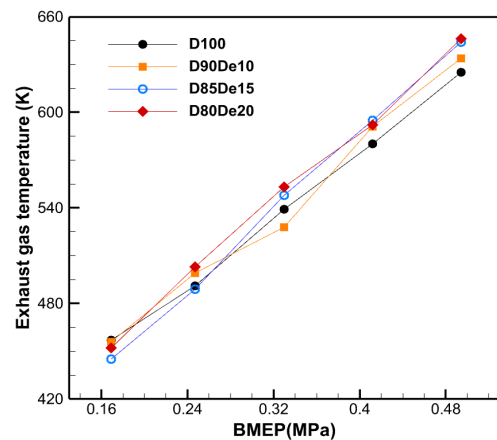


Fig. 5. Variation of exhaust gas temperatures with BMEP.

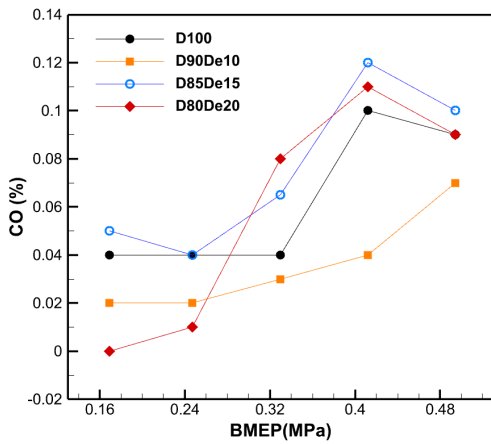


Fig. 6. Variation of CO emissions with BMEP.

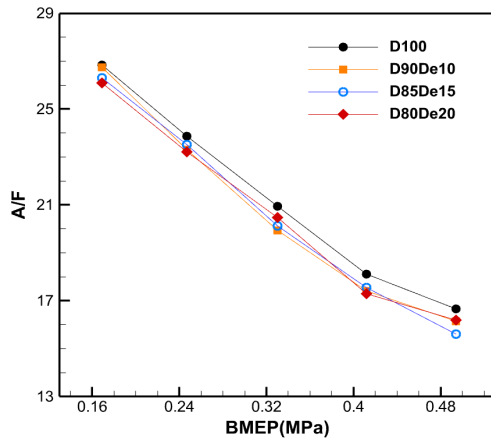


Fig. 7. Variation of A/F with BMEP.

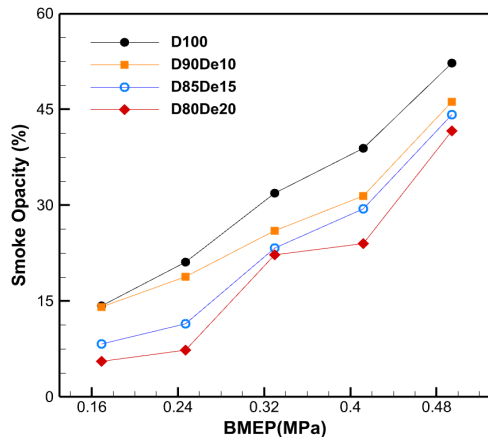


Fig. 8. Variation of smoke opacity with BMEP.

연비의 영향을 상쇄시켜 D100보다 CO의 배출농도가 낮아진 것으로 판단된다. Fig. 7에 나타난 것처럼 공연비는 BMEP 증가에 따라 감소하는 경향을 보여주며, 경유/1-데칸을 혼합유의 경우 D100 대비 더 낮은 공연비를 보여주기 때문에, 실제공연비가 이론공연비에 가까워질수록 불완전 연소의 가능성이 D100보다 높아지는 것으로 판단되며, 이로 인해 1-데칸을 혼합비율이 15% 이상인 조건에서는 BMEP값이 0.33 MPa 이상에서 D100보다 CO 농도가 높아진 것으로 이해할 수 있다. 그러나 측정 장비의 오차 범위가 $\pm 0.02\%$ 라는 점을 고려하였을 때, 다양한 BMEP 조건에 대해 데칸을 함량에 따른 CO 농도의 변화 경향에 대한 정량적 분석에는 일정 부분 한계가 있다.

Fig. 8은 스모크 불투명도를 나타낸다. 연료의 미립화 과정, 산소 농도, 분사기술 등의 차이로 인해 농후한 혼합기 영역에서 불완전 연소가 진행되면 스모크 생성이 증가하는 것으로 알려져 있다. 실험 결과 모든 연료유에 대해 BMEP 증가에 따른 스모크 불투명도 증가가 관찰된다. BMEP가 증가함에 따라 연료의 분사량이 증가하고 A/F가 감소하여 국부적으로 농후한 혼합기가 형성되고, 그로 인해 불완전 연소가 일어난 것으로 판단된다.

경유/1-데칸을 혼합유의 경우 D100 대비 스모크 불투명도가 감소하는 경향이 명확하게 나타나며, 1-데칸을 혼합비율이 증가할수록 스모크 불투명도 감소율이 증가한다. 1-데칸은 경유에 비해 상대적으로 높은 점도를 가지기 때문에 미립화 및 연료의 증발 과정에 부정적 영향을 끼칠 것으로 기대했으나, 혼합유 내 1-데칸의 비율이 높아짐에 따라 연료 내 산소 함량이 증가하고, 이것은 농후한 혼합기가 이론공연비 또는 희박한 영역으로 전환하는 데 기여하여 결과적으로 스모크 생성을 감소시킨 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 공랭식 자연흡기 디젤엔진의 연료로 경유/1-데칸을 혼합유를 사용하여 연소 및 배기 특성에 대한 실험을 수행하였으며, 아래의 결론을 도출하였다.

- 1) 경유/1-데칸을 혼합유 사용 시 모든 실험 조건에 대해 경유 대비 열효율이 감소하고, BSFC가 증가하였다. 혼합유 내에서는 1-데칸의 혼합비율이 증가할수록 열효율이 증가하고 BSFC가 감소하였다.
- 2) 1-데칸을 혼합비율이 15% 이하일 때에는 경유 대비 NO_x 배출농도가 감소하였으나, 1-데칸의 혼합비율이 20%일 때는 일부 조건에서 경유보다 NO_x 배출

농도가 높게 측정되었다.

- 3) BMEP가 0.33 MPa 이상의 조건에서는 공연비 감소로 인해 D90De10을 제외한 나머지 혼합유에 대해서 경유보다 일산화탄소의 배출농도가 높게 측정되었으며, 저부하 영역에서는 희박 연소로 인해 일산화탄소 배출농도에 명확한 경향이 나타나지 않는다.
- 4) 스모크 불투명도는 모든 조건에서 혼합유 사용 시 경유보다 낮게 측정되었으며, 1-데칸을 혼합비율이 증가함에 따라 스모크 불투명도 감소율이 증가하였다.

References

- [1] A. Imran, M. Varman, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, Review on alcohol fumigation on diesel engine: a viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission, *Renew. Sustain. Energy. Rev.*, 26 (2013) 739-751.
- [2] B. Gainey, B. Lawler, The role of alcohol biofuels in advanced combustion: An analysis, *Fuel*, 283 (2021) 118915.
- [3] J. Campos-Fernández, J.M. Arnal, J. Gómez, M.P. Dorado, A comparison of performance of higher alcohols/diesel fuel blends in a diesel engine, *Appl. Energy*, 95 (2012) 267-275.
- [4] M. Lapuerta, O. Armas, J. Rodriguez-Fernandez, Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 34(2) (2008) 198-223.
- [5] E. Koivisto, N. Ladommatos, M. Gold, Systematic study of the effect of the hydroxyl functional group in alcohol molecules on compression ignition and exhaust gas emissions, *Fuel*, 153 (2015) 650-663.
- [6] Y.S. Song, Y.C. Lim, H.K. Suh, A Study on the Combustion Characteristics of Biodiesel Emulsion Fuel Droplet Containing Water, *J. Korean Soc. Combust.*, 27(2), (2022), 39-45.
- [7] P. Kwanchareon, A. Luengnaruemitchai, S. Jai-In, Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine, *Fuel*, 86(7-8), (2007) 1053-1061.
- [8] T. Murayama, N. Miyamoto, T. Yamada, J.I. Kawashima, K. Itow, A Method to Improve the Solubility and Combustion Characteristics of Alcohol-Diesel Fuel Blends, *SAE Trans.*, (1982) 3485-3494.
- [9] H. Liu, B. Hu, J. Chao, Effects of different alcohols additives on solubility of hydrous ethanol/diesel fuel blends, *Fuel*, 184, (2016) 440-448.
- [10] S. Kim, J.K. Kim, C.K. Park, J.H. Ha, Study on fuel characteristics depending on mixing ratio of bio-butanol and bio-ethanol, *Trans. Korean Hydro. New Energy Soc.*, 28(6), (2017) 704-711.
- [11] J. Huang, Y. Wang, S. Li, A.P. Roskilly, H. Yu, H. Li, Experimental investigation on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with ethanol-diesel blends, *Appl. Therm. Eng.*, 29(11-12), (2009) 2484-2490.
- [12] J. Lei, L. Shen, Y. Bi, H. Chen, A novel emulsifier for ethanol-diesel blends and its effect on performance and emissions of diesel engine. *Fuel*, 93, (2012) 305-311.
- [13] B. Kang, H. An, T. Lee, S. Chung, J. Ha, A Study on the Reduction of Harmful Exhaust Gas with Diesel-Methanol Stratified Injection System in a Diesel Engine, *Trans. Korean Soc. Auto. Eng.*, 10(4), (2002), 43-50.
- [14] S.A. Kim, W.G. Wang, A Study on the Combustion Stability and Characteristics for D.O-Methanol Blending Oil in Diesel Engine, *J. Korean Soc. Power Sys. Eng.*, 22(1), (2018) 48-55.
- [15] K. Nanthagopal, B. Ashok, B. Saravanan, M.R. Pathy, G. Sahil, A. Ramesh, M.N. Nabi, M.G. Rasul, Study on decanol and Calophyllum Inophyllum biodiesel as ternary blends in CI engine. *Fuel*, 239, (2019) 862-873.
- [16] Y. Devarajan, D. Munuswamy, B. Nagappan, G. Choubey,. Study on the effect on combining long-chain additive with neat bio-diesel fueled engine to examine its ignition characteristics. *Fuel*, 279, (2020) 118400.
- [17] H. Chen, X. Su, J. He, B. Xie, Investigation on combustion and emission characteristics of a common rail diesel engine fueled with diesel/n-pentanol/methanol blends, *Energy*, 167, (2019) 297-311.
- [18] V. Vinodkumar, A. Karthikeyan, Effect of manifold injection of n-decanol on neem biodiesel fuelled CI engine, *Energy*, 241, (2022) 122856.

저자정보



박철오

박철오는 경상국립대학교 석사 과정이며, 관심 분야는 내연기관 유해물질 저감을 위한 대체 연료 연구이다.



양정현

양정현은 경상국립대학교 기계 시스템공학과 부교수이며, 관심 분야는 내연기관, 딥러닝 응용 연구이다.



김범수

김범수는 경상국립대학교 기계 시스템공학과 교수이며, 관심 분야는 수치기법응용 및 wavelet 해석이다.



권재성

권재성은 경상국립대학교 기계 시스템공학과 부교수이며, 관심 분야는 난류연소 수치해석, 연소모델 개발, 열유체 응용 연구이다.