Check for updates

Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 34, No. 1, 2023, pp. 69~76
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2023.34.1.69

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

직분사 디젤 엔진에서 1-옥탄올/경유 혼합 연료의 연소 및 배기 특성 연구

박철오 · 양정현 · 김범수 · 권재성†

경상국립대학교 기계시스템공학과

Investigation of the Combustion and Emission Characteristics of 1-Octanol/Diesel Fuel Blends in a Direct Injection Diesel Engine

CHEOL-OH PARK, JEONGHYEON YANG, BEOMSOO KIM, JAESUNG KWON †

Department of Mechanical and System Engineering, Gyeongsang National University, 2 Tongyeonghaean-ro, Tongyeong 53064, Korea

†Corresponding author : jkwon@gnu.ac.kr

Received 27 January, 2023
Revised 16 February, 2023
Accepted 17 February, 2023

Abstract >> An experimental study was conducted on a 4-stroke direct injection diesel engine to examine the combustion and emission characteristics of 1-octanol/diesel fuel blends. The concentration of 1-octanol in the fuel blends was 10%, 30%, and 50% by volume. Experiments were conducted by varying the engine torque from 6 Nm to 12 Nm at the same engine speed of 2,700 rpm. Results showed that the fuel conversion efficiency increased as the 1-octanol proportion increased under most experimental conditions. However, the brake specific fuel consumption increased due to the relatively low lower heating value of 1-octanol. The smoke opacity and the concentrations of NO_x and CO emissions generally decreased with brake mean effective pressure as the 1-octanol proportion increased. On the other hand, the unburned hydrocarbon concentration increased with an ascending ratio of 1-octanol.

Key words : 1-octanol(1-옥탄올), NO_x(질소산화물), Smoke opacity(스모크 불투명도), Diesel engine(디젤 엔진), Brake specific fuel consumption(제동 연료 소비율)

1. 서 론

화석연료는 고효율 자원으로 산업 발전과 경제 성장에 있어 중요한 에너지원이다. 최근 개발도상국의 급속한 산업화와 인구 증가로 인해 전 세계적으로 에너지 소비량이 증가하였으며 대부분의 에너지는 화석연료를 활용하여 생산되었다. 하지만 화석연료의 사용으로 발생하는 배기 물질은 인체에 부정적인 영향을 미치며 환경오염 문제를 초래하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 바이오연료를 포함한 대체연료 연구가 이어지고 있다[1-3].

바이오 알코올은 화석연료 의존도를 줄이고 차량과 선박 등 운송 수단의 연료로 활용할 수 있어 세계적으로 많은 관심을 받고 있다. 일부 국가에서는 바

2023 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

이오연료를 화석연료와 혼합하여 수송용 연료로 사용하는 것을 의무화하고 있으며, 유가 급등의 대응 정책으로 휘발유와 바이오 에탄올을 혼합하여 판매하고 있다. 바이오연료에는 바이오 에탄올과 바이오 디젤이 있으며, 최근에는 바이오 부탄올을 포함한 다탄소 알코올의 연소 및 배기가스 특성에 관한 연구가 진행되고 있다[4-6].

알코올은 분자 내 탄소수와 결합 구조에 따라 물리화학적 특성에 큰 차이가 나타난다. 그중 저탄소 알코올인 에탄올은 디젤 엔진의 배기 물질을 저감시킬 수 있어 에탄올을 디젤 엔진에 적용하기 위해 많은 연구가 수행되었다[7-9]. 에탄올은 경유보다 증발잠열과 산소 함량이 높아 저온 연소를 통해 질소산화물(nitrogen oxides, NO_x)과 스모크 저감에 효과적이지만, 에탄올 분자 내 결합되어 있는 하이드록시기는 극성을 강화하기 때문에 비극성인 경유와 혼합하게 되면 상 분리 문제가 발생하여 계면활성제를 첨가하거나 엔진 분사 장치의 구조를 변경해야 하는 어려움이 있다. 또한 에탄올의 낮은 세탄가(cetane number, CN)와 저위 발열량(lower heating value, LHV)은 압축 착화 방식의 내연 기관에는 부정적인 영향을 주므로 연료 분사 및 연소 기술의 개선이 필요하다[10-12].

디젤 엔진의 구조 변경 없이 알코올을 연료로 사용하기 위해 다탄소 알코올과 경유의 혼합 방식을 이용한 다양한 연구가 수행되었다. 다탄소 알코올은 분자 내 탄소수가 증가할수록 CN, LHV, 증발 잠열 등 연료 특성이 경유와 유사해지며, 이에 따라 경유와 혼합 시 상 분리 문제가 발생하지 않는다. 또한 바이오 디젤의 높은 점도를 개선하고 NO_x 배출량을 줄이기 위해 연료첨가제로 사용되기도 한다[13-17].

본 연구에서는 경유와 1-옥탄올을 혼합하여 직분사 방식의 4행정 디젤 엔진을 대상으로 연소 실험을 수행하였다. 증발 잠열과 산소 농도를 포함한 연료의 점화 특성이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 1-옥탄올 혼합 비율에 따른 측정 결과를 다양한 부하 조건에 대해 비교하였다.

2. 실 험

2.1 실험 장치

본 연구에서는 1-옥탄올/경유 혼합연료를 디젤 엔진에 적용하여 연소 및 배기 특성 변화를 파악하였다. 실험에 사용된 엔진 시스템을 Fig. 1에 나타내었으며 주요 엔진 제원을 Table 1에 나타내었다. 디젤 엔진은 흡입 공기량과 부하를 조절하여 엔진 속도와 출력을 실험 조건에 맞게 제어하였다. 그리고 배기가스 온도 및 연료 유량은 배기관과 제어 패널에 부착된 센서를 통해 측정하였으며, 엔진 성능 및 연소 특성에 관련된 물리량은 수집된 데이터를 기반으로 PC 소프트웨어(MT-502, ESSOM, Bangkok, Thailand)를 사용하여 계산하였다.

디젤 엔진에서 발생하는 주요 배기가스 측정을 위해 비분산 적외선 방식의 QRO-402 가스 분석기(QroTech, Bucheon, Korea)와 광투과식 OPA-102 스모크 측정기(QroTech, Bucheon, Korea)를 사용하였다. Table 2는 배기 물질의 성분별 농도 측정범위, 정확도 및 분해능을 나타낸다.

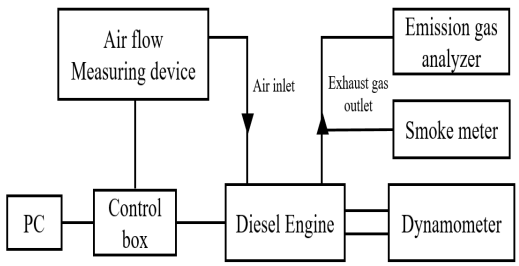

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1. Test engine specifications

Model	MIT-178F
Max. power/speed	7.0 HP/3,000 rpm
Engine type	Single-cylinder, 4-stroke
Displacement volume	305 cm^3
Cooling	Air cooled
Injection	Direct
Engine start system	Recoil

2.2 실험 방법

Table 3은 실험에 사용된 경유와 1-옥탄올의 연료 특성을 나타내며 LHV, 산소 농도, 증발 잠열 등 연료의 특성에 큰 차이를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 1-옥탄올의 혼합 비율에 따른 디젤 엔진의 연소 및 배기 물질의 특성 변화를 관찰하기 위해 Table 4에 나타낸 4종류의 연료를 사용하였다. 운전 조건은 엔진 속도 2,700 rpm에 대하여 부하에 따른 변화를 파악하기 위해 엔진 토크를 6, 8, 10, 12 Nm로 부여하였다. 데이터는 디젤 엔진의 정상상태 구간에서 1초 간격으로 30회 수집하였으며, 평균값을 계산하여 엔진 성능과 연소 특성을 분석하였다.

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%
HC	0–9,999 ppm	±20 ppm	1 ppm
Smoke	0–100%	±1%	0.1%

Table 3. Properties of diesel and octanol

Properties	Diesel	1-octanol
Lower heating value (MJ/kg)	42.9	37.6
Latent heat of vaporization (MJ/kg)	0.27	0.55
Cetane number	>52	37
Density (m^3/kg)	840	820
Kinematic viscocity at 40°C (mm^2/s)	3.75	10.24
Oxygen (wt%)	0	12.29
Stoichiometric A/F	14.9	12.71

Table 4. Composition of the fuel blends

Fuel blends	Diesel vol%	1-Octanol vol%
D100	100	0
D90Oc10	90	10
D70Oc30	70	30
D50Oc50	50	50

3. 결과 및 고찰

3.1 연료 변환 효율(fuel conversion efficiency) 및 제동 에너지 소비율(brake specific energy consumption, BSEC)

Fig. 2는 실험에 사용된 4종의 혼합연료에 대한 연료 변환 효율을 평균 유효 압력(brake mean effective pessure, BMEP)에 대해 나타낸 것으로, 1-옥탄올 혼합 연료는 D100 대비 연료 변환 효율이 향상되었으

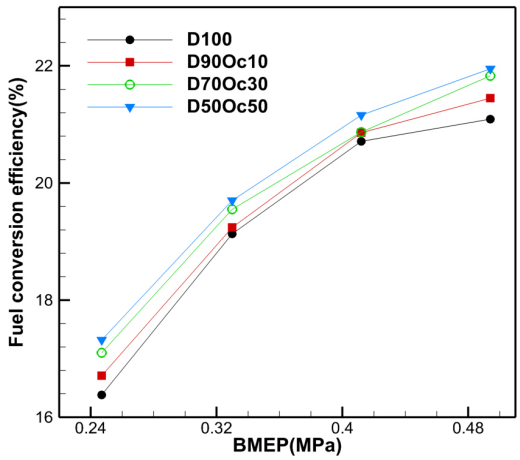

Fig. 2. Variation in fuel conversion efficiency with BMEP

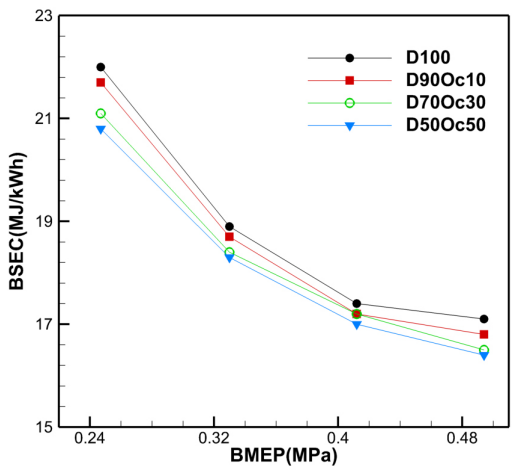

Fig. 3. Variation in BSEC with BMEP

며 1-옥탄올 혼합 비율이 증가할수록 연료 변환 효율이 상승하였다. 혼합연료의 연료 변환 효율 상승은 연료 특성에 의한 것으로 보이며, 1-옥탄올에 함유된 산소는 디젤 엔진의 연소과정 중 확산화염 단계에서 연소반응을 촉진한다. 그리고 1-옥탄올 연료 특성 중 낮은 CN으로 점화 지연이 발생하였으며, 이로 인해 실린더 내부에서 균일한 혼합기가 형성되어 점화 초기 연소 효율을 높여준 것으로 판단된다. Fig. 3은 실험 연료에 대한 BSEC를 BMEP에 대해 나타내었으며, BMEP가 증가할수록 BSEC는 감소하였다. BSEC는 단위 출력 생산에 소비되는 에너지로, LHV와 실린더에 분사되는 연료량에 정비례한다. 실험에 사용된 1-옥탄올의 LHV는 경유 대비 약 10% 낮고 1-옥탄올의 증발 잠열이 높아서 BSEC가 증가할 것으로 예상하였으나 위에서 언급하였듯이 1-옥탄올의 낮은 CN과 분자 내 산소로 인해 연소과정에서 열효율이 증가하여 BSEC가 낮아진 것으로 파악된다.

3.2 제동 연료 소비율(brake specific fuel consumption, BSFC)

Fig. 4는 실험 연료에 대한 BSFC를 나타낸다. BSFC는 단위 출력당 소비되는 연료량을 의미하며, BSFC가 낮을수록 연료 경제성이 좋아진다. 1-옥탄올 혼합 연료는 모든 조건에서 D100 대비 높은 BSFC를 나타내며 1-옥탄올 혼합 비율이 증가할수록 BSFC가 증가하였다. 혼합연료로 사용된 1-옥탄올은 경유 대비 약 10% 낮은 LHV를 가지고 있어 동일 출력을 발생시키기 위해 D100 대비 많은 양의 연료를 소비한 것으로 파악된다.

3.3 배기가스 특성

Fig. 5는 배기가스 중 NO_x 농도를 나타낸다. 실험 연료는 BMEP가 높아질수록 NO_x 농도가 증가하였지만, BMEP가 가장 높은 조건에서의 NO_x 농도는 가장 낮게 측정되었다. 디젤 엔진에서 NO_x 생성은 대부분 고온 고압에 의한 thermal NO_x이며, thermal NO_x의 생성에 영향을 주는 요인으로 연소 온도, 산소 농도 등이 있다. 1-옥탄올의 증발 잠열은 경유보다 크기 때문에 저온 연소를 통한 NO_x 감소 효과를 기대할 수 있지만, 알코올 내부의 산소는 NO_x 생성을 촉진하므로 알코올 혼합 연료의 NO_x 배출 특성에 대해 단정 짓기는 어렵다. 실험 결과 모든 실험 조건에서 혼합연료의 사용은 D100 대비 NO_x 배출을 낮췄으며, 1-옥탄올 혼합 비율이 증가함에 따라 NO_x 배출이 감소한 것으로 보아 전체 실험 조건에서 1-옥탄올의 증발 잠열로 인한 냉각 효과가 지배적인 것

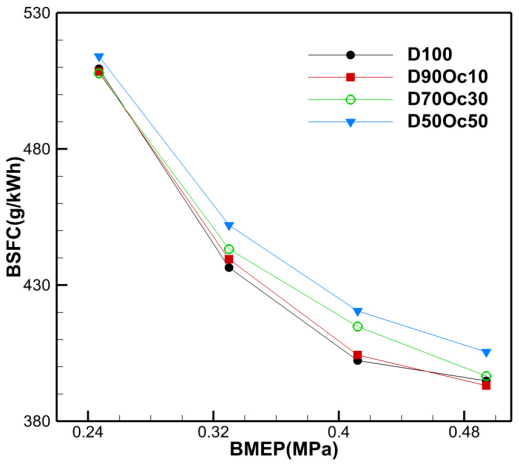

Fig. 4. Variation in BSFC with BMEP

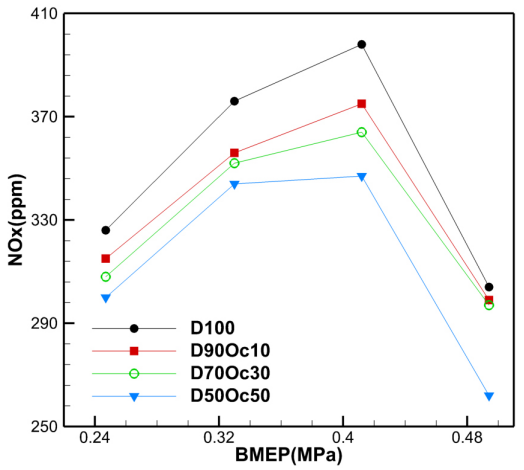

Fig. 5. Variation in NO_x with BMEP

으로 판단된다. 또한 BMEP가 낮은 조건(0.25/0.33 MPa)인 저부하 조건에서 배기가스 온도 변화는 크지 않지만 1-옥탄올 혼합 연료에 따른 NO_x 배출은 상대적으로 큰 차이를 보인다. 이는 1-옥탄올의 낮은 CN으로 인한 점화 지연으로 실린더 내부에서 균일한 혼합기가 형성되어 연소 과정에서 국부적 고온 영역이 감소하게 되면서 thermal NO_x가 감소하였기 때문인 것으로 보인다. 그리고 본 연구에 사용된 실험 연료는 BMEP 0.49 MPa 조건에서 NO_x 배출량이 가장 낮게 측정되었는데, 실험에 사용된 디젤 엔진 시스템은 BMEP가 높아질수록 연료 분사량이 증가하고, 엔진에 흡입되는 공기량이 감소하여 연소과정 중 공기 부족으로 인한 연료의 불완전연소로 NO_x가 가장 적게 배출된 것으로 파악된다.

Fig. 6은 배기가스 온도를 나타낸다. 배기가스 온도는 배기 물질의 형성에 미치는 중요한 변수 중 하나이다. 실험 결과 부하가 증가함에 따라 연료 분사량이 증가하여 배기가스 온도가 상승하였으며 저부하 영역에서는 실험 연료에 따른 배기가스 온도에 큰 차이가 나타나지 않지만, 1-옥탄올 혼합연료는 BMEP가 높은 조건(0.42/0.49 MPa)인 고부하 조건에서 증발 잠열로 인한 냉각 효과로 배기가스 온도가 감소하는 경향이 관찰된다.

Fig. 7은 배기가스 중 일산화탄소(carbon monoxide, CO)의 농도를 나타낸다. CO는 연소 과정에서 연료의 불완전연소 정도를 파악할 수 있는 중요한 지표이다. CO 생성 원인은 공기 부족으로 인한 불완전연소와 낮은 연소 온도 등이 있다. 연소실에 산소가 부족하게 되면 연료의 산화 반응이 느려지면서 CO 배출이 증가하게 되며, 낮은 연소 온도는 연소 과정에서 탄소와 산소의 산화 과정을 제한하게 된다. 실험 결과, BMEP가 증가함에 따라 CO 배출량은 증가하였다. 연료에 따른 CO 배출 경향은 고부하 조건에서는 확인할 수 있지만, 저부하 조건에서는 희박연소로 CO 배출 경향이 명확하게 나타나지 않는다. Fig. 8은 실험 연료에 따른 실제 공연비를 나타내었으며, 혼합연료 D90Oc10, D70Oc30, D50Oc50의 이론 공연비는 각각 14.80, 14.41, 13.99이다. 부하가 증가할수록 공연비는 감소하게 되는데 저부하 조건에서 연소 과정은 이론 공연비보다 실제 공연비가 20-50% 높아 희박연소에 의한 완전연소로 CO가 적게 배출되었다. 혼합연료를 사용한 경우 모든 실험 조건에서 CO 농도가 D100을 사용한 경우보다 낮게 배출되었으며, 1-옥탄올 혼합 비율이 증가함에 따라 CO 배출 감소율도 증가하였다. 1-옥탄올의 분자에 포함된 산소는 실린더 내부에 산소를 공급하여 연소 반응을 촉진하므로 CO 배출 저감에 기여하며, 1-옥탄올의 분자 내 탄소수가 경유보다 적기 때문에 혼

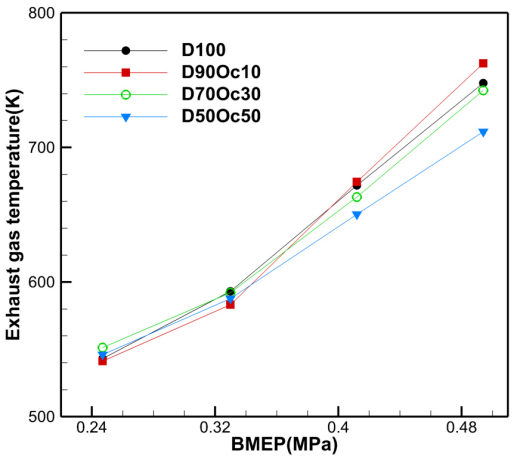

Fig. 6. Variation of exhaust gas temperatures with BMEP

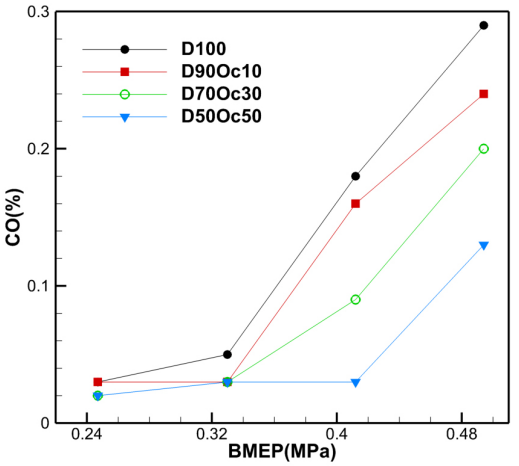

Fig. 7. Variation of CO with BMEP

합연료 사용 시 CO 농도가 감소된 것으로 파악된다.

Fig. 9은 배기가스 중 미연 탄화수소(unburned hydrocarbon, HC)를 나타낸 그래프이다. HC는 연소 과정에서 혼합기의 일부가 연소되지 않고 배출되는 배기가스로 연료 특성, 연소 시간에 영향을 받고, 소염현상(flame quenching)으로 발생된다. 실험 결과 혼합연료를 사용한 경우 모든 실험 조건에서 HC 농도가 D100 대비 높게 측정되었다. 경유보다 낮은 CN을 가진 1-옥탄올을 혼합연료로 사용하게 되면 디젤 엔진에서 점화 지연이 발생하여 실린더 상사점에서 연료의 점화가 발생하지 않고 피스톤이 하사점에 도달하는 과정에서 점화가 발생하기 때문에 혼합기가 국부적으로 연소 하한계(lower flammability limit) 미만으로 떨어져 불완전연소가 발생하며, 연소 시간도 짧아지기 때문에 HC가 증가한 것으로 판단된다.

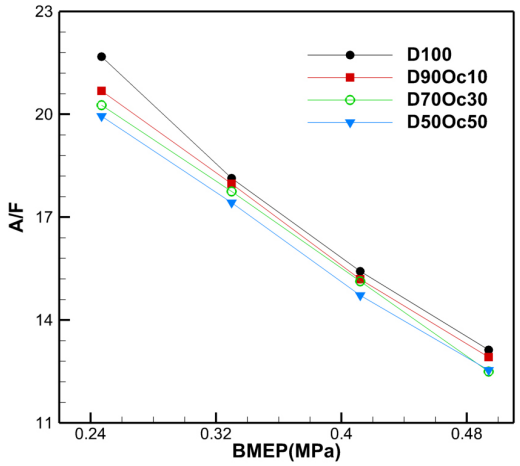

Fig. 8. Variation of A/F with BMEP

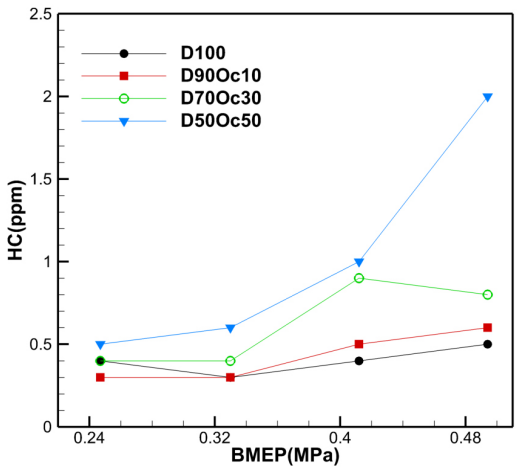

Fig. 9. Variation of HC with BMEP

Fig. 10은 스모크 불투명도(smoke opacity)를 나타낸다. 스모크는 연료의 점도, 산소 농도, 분사 기술 등의 차이로 연료 분사 후 국부적으로 농후한 영역에서 산소 부족에 의한 불완전연소로 인해 발생된다. 실험 결과 혼합연료는 스모크 배출을 효과적으로 감소시켰으며, 1-옥탄올 혼합 비율이 증가함에 따라 스모크 감소율 역시 증가했다. 알코올은 탄소 원자에 하이드록시기(-OH)가 결합되어 있는데, 하이드록시기는 스모크 성분 중 그을음(soot)과 입자상 물질(particulate matter)의 산화 반응을 촉진하여 스모크를 줄일 수 있다. 그리고 1-옥탄올의 비율이 높아짐에 따라 연료 내 산소량이 증가하기 때문에 결과적으로 스모크 생성을 감소시킨 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 1-옥탄올/경유 혼합연료를 직분사식 디젤 엔진에 적용하여 연소 및 배기 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

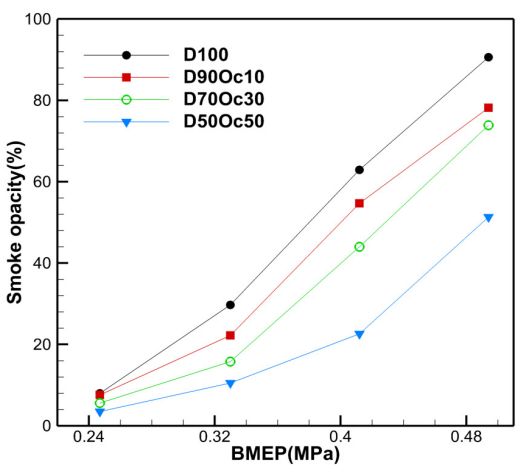

Fig. 10. Variation of smoke opacity with BMEP

1) 실험에 사용된 3종의 혼합연료는 모든 조건에서 D100보다 연료 변환 효율과 BSFC가 증가하였으며, BSEC는 감소했다.

2) 혼합연료는 모든 실험 조건에서 NO_x 배출을 낮췄으며, 1-옥탄올 혼합 비율이 50%일 때 NO_x가 가장 낮게 측정되었다.

3) CO 농도는 저부하 조건에서는 희박연소로 인한 배출 경향이 명확하게 관찰되지 않지만, 고부하 조건에서는 혼합연료의 사용으로 인해 CO 농도가 효과적으로 감소했다.

4) HC 농도는 혼합연료 사용 시 점화 지연으로 HC 배출이 증가하게 되었고, 1-옥탄올 혼합비율이 증가함에 따라 모든 실험 조건에서 HC 농도가 증가하였다.

5) 스모크 불투명도는 혼합연료 사용 시 D100을 사용할 때보다 낮게 배출되었으며, 1-옥탄올 혼합 비율이 증가함에 따라 스모크 불투명도 감소율이 증가하였다.

References

1. Y. Devarajan, D. B. Munuswamy, B. Nagappan, and A. K. Pandian, "Performance, combustion and emission analysis of mustard oil biodiesel and octanol blends in diesel engine", Heat Mass Transfer, Vol. 54, 2018, pp. 1803–1811, doi: https://doi.org/10.1007/s00231-018-2274-x.
2. S. K. Kim and D. J. Yoo, "A study on the driving characteristi cs of microbial fuel cell using mixed strains in domestic wastewater", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 32, No. 6, 2021, pp. 506-513, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.6.506.
3. H. K. Imdadul, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, N. W. M. Zulkifli, A. Alabdulkarem, M. M. Rashed, Y. H. Teoh, and H. G. How, "Higher alcohol–biodiesel–diesel blends: an approach for improving the performance, emission, and combustion of a light-duty diesel engine", Energy Conversion and Management, Vol. 111, 2016, pp. 174-185, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.066.
4. L. Li, J. Wang, Z. Wang, and H. Liu, "Combustion and emissions of compression ignition in a direct injection diesel engine fueled with pentanol", Energy, Vol. 80, 2015, pp. 575-581, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.013.
5. S. Kim, J. K. Kim, C. K. Park, and J. H. Ha, "Study on fuel characteristics depending on mixing ratio of bio-butanol and bio-ethanol", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 704-711, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.6.704.
6. K. N. Balan, U. Yashvanth, P. Booma Devi, T. Arvind, H. Nelson, and Y. Devarajan, "Investigation on emission characteristics of alcohol biodiesel blended diesel engine", Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Vol. 41, No. 15, pp. 1879-1889, doi: https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549166.
7. J. H. Lee and H. Y. Park, "Combustion reactivity assessments of oils used for the cold start-up operation of large scale boiler", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 33, No. 1, 2022, pp. 77-84, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.1.77.
8. M. Lapuerta, O. Armas, and J. M. Herreros, "Emissions from a diesel–bioethanol blend in an automotive diesel engine", Fuel, Vol. 87, No. 1, 2008, pp. 25-31, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.04.007.
9. S. S. Ali and M. R. Swaminathan, "Effective utilization of waste cooking oil in a diesel engine equipped with CRDi system using C_8 oxygenates as additives for cleaner emission", Fuel, Vol. 275, 2020, pp. 118003, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118003.
10. M. Nour, A. M. A. Attia, and S. A. Nada, "Improvement of CI engine combustion and performance running on ternary blends of higher alcohol (pentanol and octanol)/hydrous ethanol/diesel", Fuel, Vol. 251, 2019, pp. 10-22, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.026.
11. Q. Wang, J. Ni, and R. Huang, "The potential of oxygenated fuels (n-octanol, methylal, and dimethyl carbonate) as an alternative fuel for compression ignition engines with different load conditions", Fuel, Vol. 309, 2022, pp. 122129, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122129.
12. J. Campos-Fernandez, J. M. Arnal, J. Gomez, N. Lacalle, and M. P. Dorado, "Performance tests of a diesel engine fueled with pentanol/diesel fuel blends", Fuel, Vol. 107, 2013, pp. 866-872, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.066.
13. J. M. Algayyim, A. P. Wandel, T. Yusaf, and I. Hamawand, "The impact of n-butanol and iso-butanol as components of butanol-acetone (BA) mixture-diesel blend on spray, combustion characteristics, engine performance and emission in direct injection diesel engine", Energy, Vol. 140, Pt. 1, 2017, pp. 1074-1086, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.044.
14. Radheshyam, K. Santhosh, and G. N. Kumar, "Effect of 1-pentanol addition and EGR on the combustion, performance and emission characteristic of a CRDI diesel engine", Renewable Energy, Vol. 145, 2020, pp. 925-936, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.043.

15. J. Preuß, K. Munch, and I. Denbratt, "Performance and emissions of long-chain alcohols as drop-in fuels for heavy duty compression ignition engines", Fuel, Vol. 216, 2018, pp. 890-897, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.122.
16. Y. H. Jeong and O. T. Lim, "A study on injector durability test with diesel and BD20 using common rail". Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 26, No. 5, 2015, pp. 393-401, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2015.26.5.393.
17. Sidharth and N. Kumar, "Performance and emission studies of ternary fuel blends of diesel, biodiesel and octanol", Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Vol. 42, No. 18, 2020, pp. 2277-2296, doi: https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1607940.