

압축착화 디젤엔진에서 펜탄올/경유 혼합유의 연소 및 배기 특성에 관한 실험적 연구

권재성 · 김범수 · 양정현[†]

경상국립대학교 기계시스템공학과

An Experimental Study on Combustion and Emission Characteristics of a CI Diesel Engine Fueled with Pentanol/Diesel Blends

JAESUNG KWON, BEOMSOO KIM, JEONGHYEON YANG[†]

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

[†]Corresponding author :
jh.yagi@gnu.ac.kr

Received 31 January, 2024
Revised 17 February, 2024
Accepted 19 February, 2024

Abstract >> In this study, combustion experiments were conducted to assess engine performance and exhaust gas characteristics using four blends of 1-pentanol and diesel as fuel in a naturally aspirated 4-stroke diesel engine. The blending ratios of 1-pentanol were 5, 10, 15, and 20% by volume. The experiments were carried out under four different engine torque conditions (6, 8, 10, and 12 Nm) while maintaining a constant engine speed of 2,000 rpm for all fuel types. The results showed that the use of 1-pentanol/diesel blended fuel generally led to a decrease in brake thermal efficiency, attributed to the low calorific value of the blend and the cooling effect due to the latent heat of vaporization. Additionally, both brake specific energy consumption and brake specific fuel consumption increased. However, the use of the blended fuel resulted in a general decrease in NO_x concentration, a decrease in CO concentration except some conditions, and a reduction in smoke opacity across all conditions.

Key words : Diesel engine(디젤엔진), 1-pentanol(1-펜탄올), NO_x(질소산화물), Smoke opacity(스모크 불투명도), Brake thermal efficiency(제동 열효율), Brake specific fuel consumption(제동 연료 소비율)

1. 서론

디젤엔진은 높은 열효율과 출력, 저속에서의 높은 토크 특성 및 우수한 내구성으로 수송, 중장비, 발전 및 농업 분야에서 널리 활용되고 있으며, 가솔린엔진

대비 일산화탄소(carbon monoxide, CO), 탄화수소(hydrocarbons) 및 이산화탄소(carbon dioxide)의 배출이 적다. 그러나 환경과 인체에 유해한 질소산화물(nitrogen oxides, NO_x)과 입자상 물질(particulate matter, PM)의 배출이 많아 연료의 질을 개선하고 배기

가스 후처리를 통해 대기 중으로의 오염물질 배출을 감소시켰다. 디젤엔진용 대체연료에 대한 연구는 대기오염을 비롯한 환경 문제를 해결하고, 기존 화석 연료에 대한 의존도를 낮추려는 사회적 요구를 충족시키기 위해 필수적이며, 지구온난화에 대한 대응책으로 바이오연료를 포함한 재생에너지원에 대한 연구도 꾸준히 수행되고 있다^{1,6)}.

알코올은 바이오매스로부터 생산 가능한 재생에너지원으로 분자에 포함된 탄소 원자의 수와 결합 구조에 따라 물리화학적 특성에 큰 차이를 나타낸다. 다양한 알코올 연료 중에서 저탄소알코올로 분류되는 에탄올과 메탄올에 대한 연구가 가장 광범위하게 수행되었으며 브라질과 미국을 포함한 일부 국가에서는 가솔린엔진의 연료로 사용되고 있다^{7,8)}. 저탄소 알코올은 NOx 및 PM 감소에 효과적이며, 옥탄가가 높아 엔진의 성능 및 효율 향상에 도움이 된다. 그러나 에너지 밀도가 낮고 수분을 흡수하는 성질 때문에 연료 계통의 부식 문제가 발생할 수 있으며, 저온에서의 시동성이 나빠 추운 환경에서 압축 착화 방식의 디젤엔진에 사용하기에는 적합하지 않다. 또한 경유와의 혼합이 어렵기 때문에 저탄소알코올을 디젤엔진의 연료로 사용하기 위해서는 이중 분사 방식을 채택하거나 연료의 혼합 안정성을 확보하기 위한 설계 개선 및 내식성 강화를 위한 소재 변경 등이 필요하다^{9,10)}.

반면, 펜탄올과 같은 고탄소알코올은 저탄소알코올 대비 상대적으로 세탄가(cetane number, CN)가 높아 압축 착화 방식의 엔진에 적합하고, 높은 에너지 밀도를 가지기 때문에 효율 측면에서도 우위에 있다. 또한 소수성을 나타내어 경유와의 혼합 시 상 분리 문제가 없고 연료 공급 시스템의 부식 문제에서도 장점을 나타낸다. 아울러 NOx, PM, CO 등 규제 물질의 배출이 경유를 사용할 때보다 감소하기 때문에 환경적인 장점도 있다¹¹⁻¹⁴⁾. 과거에는 펜탄올과 같은 고탄소알코올의 생산 비용이 높고 공급에 한계가 있었기 때문에 내연기관 연료로서의 가능성을 기대하기 어려웠으나 미생물 발효 또는 대장균을 이용한 포도당 생합성 기술의 발전으로 지금은 생물

학적인 경로로 펜탄올을 생산할 수 있다¹⁵⁻¹⁷⁾. 따라서 펜탄올은 지구온난화 억제를 위한 재생에너지로써도 좋은 대안이 될 수 있으며, 연료의 다변화라는 관점에서 보면 급격한 유가 변동에 취약한 국가들이 에너지 안보를 강화하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 에탄올이나 메탄올 대비 연구가 부족하던 펜탄올의 연소 및 배기 특성을 파악하기 위하여 단기통 디젤엔진을 대상으로 1-펜탄올/경유 혼합유를 연료로 사용하여 고정된 엔진 속도에서 부하 증가에 따른 엔진 성능 및 배출가스 변화에 대한 연소 실험을 수행하였고, 네 가지 혼합 비율에 대한 실험 결과를 비교 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 연구에서는 1-펜탄올/경유 혼합유를 직분사 디젤엔진의 연료로 사용하여 엔진의 연소 및 배기 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 실험 장치의 개요는 Fig. 1에 나타내었으며, 엔진의 주요 제원은 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 엔진은 단기통 자연 흡기 방식으로 흡입 공기량과 부하를 조절하여 다양한 조건에서 연소 실험을 수행하였다. 배기가스 온도, 제동 토크, 공기 및 연료 유량 등 주요 물리량에 대한 계측기는 모두 계기판에 연결되며, 엔진의

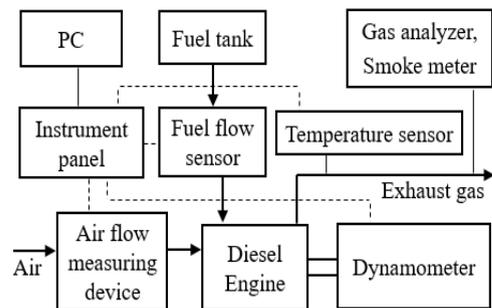


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

제동 출력, 열효율, 제동 연료 소비율 등 성능 및 연소 특성 관련 물리량은 측정된 데이터를 기반으로 MT-502E 소프트웨어 (ESSOM, Bangkok, Thailand)를 사용하여 계산하였다.

연소 후 발생하는 주요 배기가스 측정을 위해 비분산 적외선 방식의 QRO-402 가스 분석기(QroTech, Bucheon, Korea)를 사용하였고, 매연 불투명도 측정을 위해 광투과식 OPA-102 스모크 측정기(QroTech)를 사용하였다. Table 2는 배출가스 성분별 농도 측정 범위, 정확도 및 분해능을 나타낸다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 1-펜탄올의 혼합 비율에 따른 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성 변화를 관찰하기 위해, 1-펜탄올을 부피 기준 5, 10, 15, 20%를 혼합하였으며 각각의 혼합유는 D95P05, D90P10, D85P15, D80P20으로, 순수 경유는 D100으로 명명하였다. Table 3은 실험에 사용된 경유와 1-펜탄올의 물리화학적 특성

Table 1. Engine specifications

Parameters	Specification
Model	MIT-178F
Rated power	5.22 kW @ 3,000 rpm
Engine type	Single-cylinder, 4-stroke
Swept volume	298.6 cm ³
Compression ratio	21:1
Fuel injection	Direct
Injector nozzle	Hole type
Cooling system	Air-cooled
Intake system	Naturally aspirated

Table 2. Specifications of the gas analyzer and smoke meter

Parameters	Measuring range	Accuracy	Resolution
NOx	0-5,000 ppm	±15 ppm	1 ppm
CO	0-10%	±0.02%	0.01%
Smoke opacity	0-100%	±1%	0.1%

을 나타내며, lower heating value (LHV), 연료 내 산소 농도, CN 등에서 명확한 차이를 확인할 수 있다. 실험은 엔진 속도 2,000 rpm에서 제동 토크 6, 8, 10, 12 Nm의 조건에 대해 수행하였으며, 연료의 변화에 따라 엔진에 흡입되는 공기량과 부하를 조절하여 엔진 속도와 제동 토크를 동일한 조건으로 보정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 엔진 성능

제동 열효율(brake thermal efficiency, BTE), 제동 에너지 소비율(brake specific energy consumption, BSEC) 및 제동 연료 소비율(brake specific fuel consumption, BSFC)은 다음과 같이 정의된다.

$$BTE = \frac{P_b}{\dot{m}_f LHV} \quad (1)$$

$$BSEC = \frac{\dot{m}_f LHV}{P_b} \quad (2)$$

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (3)$$

여기서 P_b 는 제동 출력, \dot{m}_f 은 연료 유량을 나타낸다. Fig. 2는 5종의 연료유를 사용했을 때 발생하는 BTE의 변화를 나타낸 것으로 모든 연료에 대해 brake mean effective pressure (BMEP) 증가에 따라 BTE는

Table 3. Properties of diesel and 1-pentanol

Properties	Diesel	1-pentanol
Lower heating value (MJ/kg)	42.5	34.7
Latent heat of vaporization (MJ/kg)	0.27	0.31
Cetane number	52	18.2
Self-ignition temperature (°C)	260	320
Density (m ³ /kg)	840	814
Kinematic viscosity at 40°C (mm ² /s)	2.72	2.89
Oxygen (wt%)	0	18.15
Stoichiometric A/F	14.9	11.73

증가하는 경향을 나타낸다. 1-펜탄올/경유 혼합유의 경우 D80P20의 고부하 조건을 제외한 나머지 조건에서 D100보다 BTE가 감소하였다. Table 3에 나타난 것처럼 펜탄올의 LHV는 경유보다 약 18% 정도 낮고, 기화열은 약 15% 크기 때문에 증발 과정에서의 냉각 효과로 연소 반응이 억제되고 낮은 발열량에 의해 경유 대비 BTE가 감소하는 것으로 이해할 수 있다. 반면, 연료에 포함된 산소는 국부적으로 연소 반응을 촉진하는 요인이 되고, 낮은 CN의 영향으로 점화가 지연되면서 균일한 혼합기가 형성되면 점화 초기 연소 효율이 개선되는 긍정적인 효과도 있다. 따라서 1-펜탄올의 혼합 비율 변화에 따라 연소 과정에서의 지배적인 요인이 바뀌면 BTE에 대해서도 상반된 결과가 나타날 것으로 예상된다. 동일한 엔진 속도와 BMEP에서 1-펜탄올의 혼합 비율을 변화시켰을 때 BTE는 D90P10에서 가장 나쁘게 나타나며, 1-펜탄올의 혼합 비율을 10%로부터 20%까지 증가시키면 BTE가 다시 증가하는 경향을 보인다. 혼합유를 사용한 대부분의 조건에서 D100보다 BTE가 감소하며, D80P20을 사용했을 경우에는 높은 BMEP (0.412, 0.494 MPa)에서 D100보다 BTE가 증가한다. 이는 해당 조건에서 D100에 비해 공연비(air/fuel ratio, AFR)가 높아지고, 펜탄올에 함유된 산소 성분이 연소 반응에 기여하면서 보다 완전한 연소가 촉진되는 것으로 해석될 수 있다. 실험에서 측정된 AFR은 공기와 연료의 질량비로 정의되고, Fig. 3에 나타난

것과 같이 BMEP가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내며 혼합유를 사용하면 전반적으로 D100보다 AFR이 증가한다. AFR은 엔진 성능 및 배출가스 농도에 영향을 미치는 중요한 변수이며, 1-펜탄올의 이론적인 AFR은 경유보다 약 21% 낮다. BMEP가 낮은 조건(0.247, 0.330 MPa)에서는 모든 혼합유에 대해 이론적인 AFR보다 약 두 배 이상 높은 AFR이 형성되면서 희박 연소가 전개되고, 과잉 흡입된 공기로 열손실이 증가한다. 연료의 증발 과정에서도 혼합유는 더 많은 기화열을 요구하므로 불완전연소가 발생할 가능성이 있고, 이것으로 저부하 조건에서 1-펜탄올 첨가로 인한 BTE 감소 경향을 설명할 수 있다. 반대로 BMEP가 높은 조건(0.412, 0.494 MPa)에서는 모든 연료유에 대한 AFR이 감소하여 보다 완전한 연소 반응이 진행되며, 혼합유와 경유 사이의 AFR 차이가 감소함에 따라 BTE 차이도 감소함을 확인할 수 있다.

BSEC는 단위 출력을 생산하기 위해 소비되는 에너지로 1-펜탄올/경유 혼합유의 경제성을 나타내는 중요한 지표다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 BMEP 증가에 따라 BSEC는 감소하는 경향을 보이는데, 이는 더 높은 엔진 부하에서 연료의 효율성이 향상되었음을 의미한다. 낮은 BMEP (0.247, 0.330 MPa)에서 혼합유의 BSEC는 D100보다 높으며 혼합유 사용 시 저부하 조건에서 동일한 출력을 생산하는 데 더 많

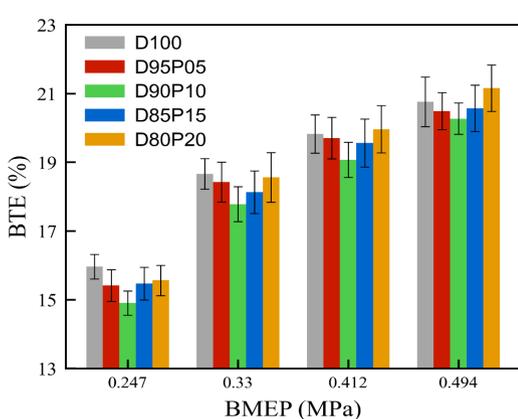


Fig. 2. Variations of BTE against BMEP

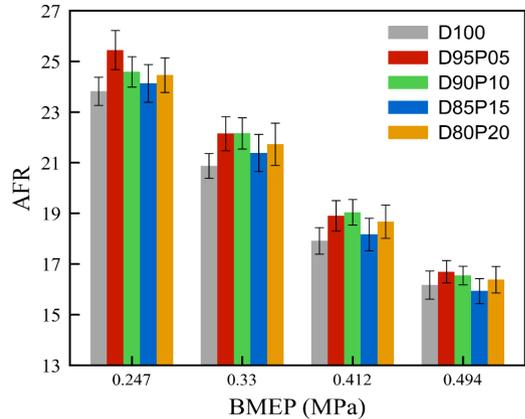


Fig. 3. Variations of AFR against BMEP

은 에너지가 필요하다는 것을 의미한다. 그러나 BMEP가 증가할수록 혼합유와 D100 사이의 BSEC 격차는 좁혀지며, 최고 BMEP인 0.494 MPa에서 D80P20의 BSEC는 D100보다 작다. 혼합유 중에서는 전반적으로 D80P20의 BSEC가 가장 작게 나타나는데, 혼합유 내부의 산소 성분이 증가할수록 연소 효율이 높아져 낮은 LHV에 의한 효율 감소를 상쇄하는 것으로 보인다.

BSFC는 단위 출력을 생산하는 데 필요한 연료량을 의미하며 연료의 경제성에 대해 보다 직관적으로 이해할 수 있도록 해준다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 모든 연료에 대해 BMEP 증가에 따라 BSFC는 감소하는 경향을 나타낸다. BSEC와는 달리 혼합유를 사

용한 모든 실험에서 D100보다 높은 BSFC를 확인할 수 있으며, D95P05의 BSFC가 혼합유 중에서는 제일 낮게 관찰된다. D95P05보다 높은 농도의 혼합유는 더 높은 CN 및 산소 함량으로 향상된 연소 특성을 기대할 수 있지만 더 낮은 LHV에 의한 효율 저하가 발생하여 BSFC가 D95P05보다 증가하는 것으로 보인다.

Fig. 6은 BMEP 증가에 따른 배기가스 온도(exhaust gas temperature, EGT)의 변화를 나타내며, EGT 분석을 통해 엔진의 열부하, 연소 상태, 배기가스 특성에 대한 이해를 높일 수 있다. 본 실험에 사용된 모든 연료에 대해 EGT는 BMEP가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 엔진에 작용하는 부하가 증가하면 출력을 높이기 위해 연료 분사량이 증가하면서 AFR이 낮아진다. 따라서 혼합기의 연소 반응이 보다 완전하게 진행되면서 효율이 증가하고, 과잉 흡입된 공기로의 열손실이 줄어들어 EGT가 증가하게 된다. 혼합유 중에서는 D95P05의 EGT가 전반적으로 높게 나타나며, 높은 BMEP (0.412, 0.494 MPa) 조건에서는 D100보다도 더 높은 EGT를 보여준다. 혼합유 사용 시 EGT 증가는 연료 내부의 산소 함량 증가로 인한 연소 반응 촉진이 주요한 원인이지만, 1-펜탄올의 혼합 비율이 증가할수록 혼합유의 LHV도 감소하여 특정 비율을 넘어서면 EGT를 감소시키기도 한다. 따라서 EGT를 적절한 수준으로 관리하기 위해서는 연료의

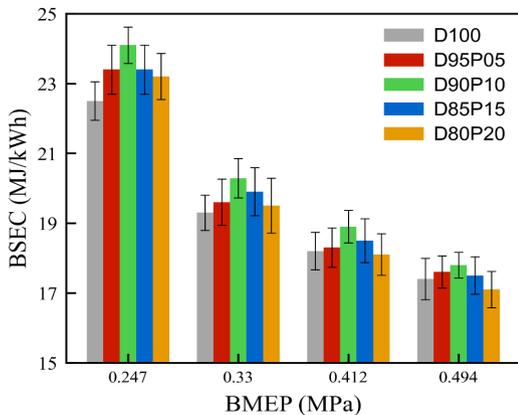


Fig. 4. Variations of BSEC against BMEP

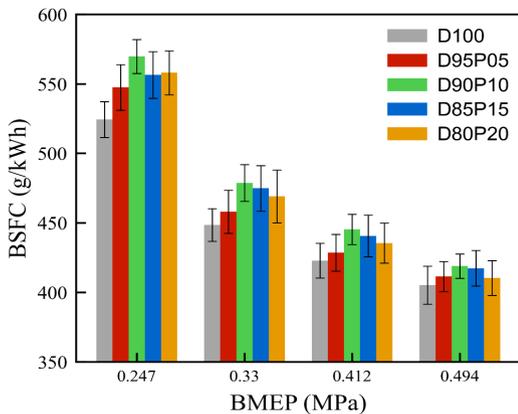


Fig. 5. Variations of BSFC against BMEP

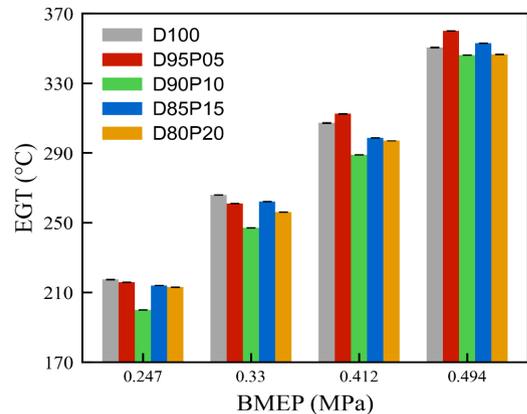


Fig. 6. Variations of EGT against BMEP

정교한 배합이 필요하며, AFR을 포함한 엔진 매개변수에 대한 최적화가 요구된다.

3.2 배기가스 특성

디젤엔진에서 발생하는 주요 오염 물질인 NO_x는 고온 연소 반응의 부산물로 Fig. 7에 나타난 바와 같이 BMEP가 증가할수록 NO_x 배출 농도가 증가함을 알 수 있다. 혼합유 사용 시 NO_x 농도는 전반적으로 D100보다 낮게 측정되었으며, D90P10과 D85P15을 사용한 모든 조건에서 NO_x 농도의 유의미한 감소가 관찰된다. 디젤엔진에서 발생하는 대부분의 NO_x가 thermal NO_x인 점을 고려할 때, NO_x 배출 경향은 EGT의 변화 경향과 유사함을 예상할 수 있으나, 혼합유 사용 시 D100보다 높은 기화열과 AFR 증가에 따른 연소실 냉각 효과로 점화 지연 기간이 증가해 NO_x 농도가 감소하는 것으로 추정된다. NO_x 농도가 제일 많이 감소하는 D90P10의 경우 BTE는 제일 낮으므로, 환경적 측면과 경제성 사이의 적절한 균형점을 찾기 위한 다방면의 노력이 필요해 보인다.

Fig. 8은 CO 배출 농도의 변화를 보여준다. D100의 경우 BMEP 증가에 따라 CO 농도가 증가하는 경향을 보여주지만 혼합유 사용 시 BMEP가 낮을 때의 CO 농도는 D100과 유사한 수준이거나 증가하는 반면, BMEP가 높을 때는 전반적으로 D100보다 감소

한다. D90P10의 경우 D100보다 CO 농도가 높게 측정되는데, D90P10의 BTE가 제일 낮다는 점을 고려하면 불완전 연소로 인해 D90P10의 CO 배출이 증가하고, NO_x 배출이 감소한 것으로 이해된다. 펜탄올의 점도는 경유보다 크기 때문에, 연료 분사 후 미립화 과정이 지연되어 불균일 혼합기가 증가할 우려가 있고, 고부하 조건에서는 AFR이 감소하기 때문에 국부적으로 불완전 연소의 가능성이 높아진 것으로 보인다.

Fig. 9는 부하에 따른 스모크 불투명도(smoke opacity)의 변화를 나타내고 있으며, BMEP 증가에 따라 스모크 불투명도가 증가하는 경향이 관찰된다. 스모크 불투명도는 PM의 배출 척도가 되는데 수치가 높

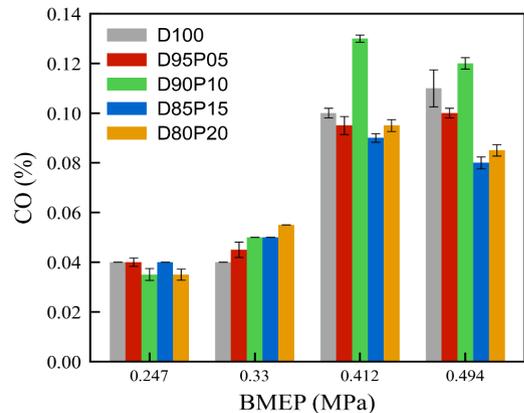


Fig. 8. Variations of CO emissions against BMEP

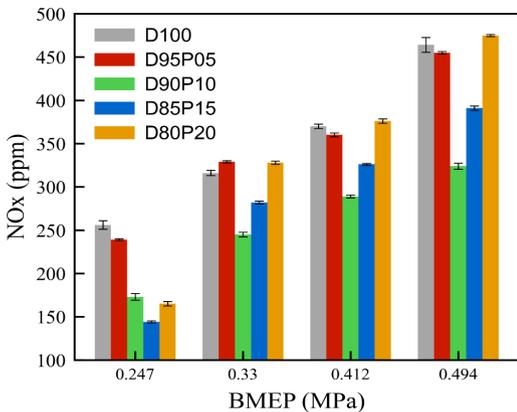


Fig. 7. Variations of NO_x emissions against BMEP

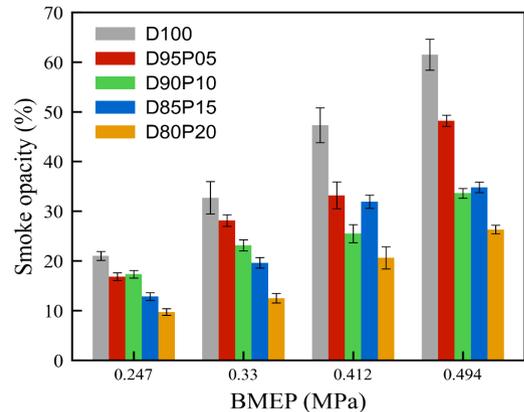


Fig. 9. Variations of smoke opacity against BMEP

을수록 가시성과 대기질이 나빠짐을 의미한다. 스모크 불투명도는 AFR이 너무 낮거나 연료 분사 후 미립화 과정이 불량하여 균일 혼합기가 형성되지 못하는 등 국부적으로 농후한 영역이 형성되면서 불완전 연소가 발생할 때 수치가 높아진다. 혼합유 사용 시 모든 조건에서 스모크 불투명도가 D100대비 감소하였으며, 펜탄을 혼합 비율이 증가할수록 전반적으로 스모크 불투명도 감소율이 높다. 이를 통해 에탄올이나 메탄올과 마찬가지로 펜탄올도 합산소연료로 스모크 불투명도 감소에 효과적임을 알 수 있으며, BTE가 가장 낮았던 D90P10의 경우에도 최대 46%까지 스모크 불투명도가 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 1-펜탄올/경유 혼합유를 자연 흡기 공랭식 디젤엔진의 연료로 사용하여 엔진의 성능 및 배기가스 특성에 대한 실험을 수행하였으며 아래의 결과가 도출되었다.

1) 펜탄올 혼합유 사용 시 펜탄올의 경유 대비 낮은 LHV와 높은 기화열에 의한 냉각 효과 때문에 대부분의 실험 조건에서 BTE가 감소하였으며, D90P10 사용 시 최대 6.7%의 BTE 감소가 나타났다.

2) BSEC는 D80P20의 일부 조건을 제외하면 혼합유에서 더 높았고, BSFC는 모든 조건에서 경유보다 혼합유가 더 높은 수치를 보였다.

3) BMEP 증가에 따라 NO_x 농도는 증가하며 혼합유 사용 시 전반적으로 NO_x 농도는 감소하여 D90P10의 저부하 조건에서는 최대 33%의 감소율을 나타내었다.

4) CO 농도는 BMEP가 높은 조건에서는 혼합유 사용 시 감소하는 경향이 있으나, D90P10의 경우 불완전 연소에 의한 낮은 BTE와 함께 높은 CO 농도를 나타냈다.

5) 스모크 불투명도는 혼합유를 사용한 모든 조건에서 감소하였으며, BTE가 제일 낮은 D90P10의 경우에도 최대 46%까지 감소하였다.

위 결과를 통해 펜탄올 혼합이 NO_x 및 매연과 같은 규제 대상 물질의 감소에 효과적이라는 것을 확인할 수 있다. 그러나 BTE의 감소가 운영 비용 증가로 이어질 수 있는 문제가 있으므로, 경제성과 환경성 사이의 균형을 찾기 위해서는 연료 배합비와 함께 다양한 설계 변수들의 영향을 이해하기 위한 추가 연구가 필요하다.

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 and 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 characteristics of microbial fuel cell using mixed strains in domestic Wastewater", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 32, No. 6, 2021, pp. 506-513, doi: <https://doi.org/10.7316/KH NES.2021.32.6.506>.
3. H. K. Imdadul, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, N. W. M. Zulkipli, 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. 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", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 704-711, doi: <https://doi.org/10.7316/KH NES.2017.28.6.704>.
5. K. N. Balan, U. Yashvanth, P. B. 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, 2019, pp. 1879-1889, doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549166>.
6. C. O. Park, J. Yang, B. Kim and J. Kwon, "Investigation of the combustion and emission characteristics of 1-octanol/diesel fuel blends in a direct injection diesel engine", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 1, 2023, pp. 69-76, doi: <https://doi.org/10.7316/KH NES.2023.34.1.69>.
7. Z. Huang, H. Lu, D. Jiang, K. Zeng, B. Liu, J. Zhang, and X. Wang, "Combustion behaviors of a compression-ignition engine fuelled with diesel/methanol blends under various fuel delivery advance angles", *Bioresource Technology*, Vol.

- 95, No. 3, 2004, pp. 331-341, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.018>.
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. 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>.
 10. 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>.
 11. 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>.
 12. 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>.
 13. V. Vinodkumar and A. Karthikeyan, "Effect of manifold injection of n-decanol on neem biodiesel fuelled CI engine", *Energy*, Vol. 241, 2022, pp. 122856, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122856>.
 14. G. Valentino, F. E. Corcione, S. E. Iannuzzi, and S. Serra, "Experimental study on performance and emissions of a high speed diesel engine fuelled with n-butanol diesel blends under premixed low temperature combustion", *Fuel*, Vol. 92, No. 1, 2012, pp. 295-307, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.07.035>.
 15. D. Antoni, V. V. Zverlov, and W. H. Schwarz, "Biofuels from microbes", *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 77, 2007, pp. 23-35, doi: <https://doi.org/10.1007/s00253-007-1163-x>.
 16. S. H. Desai, C. A. Rabinovitch-Deere, Z. Fan, and S. Atsumi, "Isobutanol production from cellobionic acid in *Escherichia coli*", *Microbial Cell Factories*, Vol. 14, 2015, pp. 52, doi: <https://doi.org/10.1186/s12934-015-0232-6>.
 17. B. Gainey and B. Lawler, "The role of alcohol biofuels in advanced combustion: an analysis", *Fuel*, Vol. 283, 2021, pp. 118915, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118915>.