

자연흡기식 디젤 엔진에서 경유/1-부탄올 혼합 연료의 성능 및 배출가스 특성 평가

권재성 · 양정현 · 김범수[†]

경상국립대학교 기계시스템공학과

Performance and Emission Characteristics of Diesel/1-Butanol Blended Fuel in a Naturally Aspirated Diesel Engine

JAESUNG KWON, JEONGHYEON YANG, BEOMSOO KIM[†]

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

[†]Corresponding author :
kimbs@gnu.ac.kr

Received 3 February, 2025
Revised 23 February, 2025
Accepted 25 February, 2025

Abstract >> This study investigated diesel/1-butanol blended fuels' combustion performance and emissions using a naturally aspirated single-cylinder diesel engine at varying speeds and blending ratios. Results showed improved brake thermal efficiency with butanol blends compared to pure diesel, while brake specific energy and fuel consumption slightly decreased. Higher butanol ratios increased NO_x but reduced CO and smoke emissions. CO₂ emissions peaked at 1,600 rpm, dropped at 2,000 rpm, and rose again above 2,400 rpm due to varying combustion efficiency and fuel consumption. While demonstrating potential for maintaining performance and reducing CO/smoke emissions, addressing increased NO_x requires exhaust gas recirculation and combustion optimization.

Key words : Diesel engine(디젤 엔진), 1-Butanol(1-부탄올), NO_x(질소산화물), Brake thermal efficiency(제동 열효율), Brake specific energy consumption(제동 에너지 소비율)

1. 서론

디젤 엔진은 높은 열효율과 우수한 토크 특성으로 인하여 전 세계 운송 및 산업 분야에서 주요 동력원으로 활용되어 왔다. 그러나 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)가 제시한 2050 탄소중립 목표¹⁾와 유럽의 Euro 7 배출가스 기준²⁾이 점차 강

화됨에 따라 기존 디젤 엔진만으로는 대기환경 규제를 충족하기가 어려워졌기 때문에 대체 연료 기술 개발이 필수적이다. 이러한 배경 속에서 바이오매스 기반 합산소 연료가 주목받고 있으며 특히 1-부탄올은 C4 구조의 긴 탄소 사슬과 높은 산소 함량 덕분에 매연 저감 효과가 크면서도 경유와의 우수한 혼화성을 지녀 대체 연료로서 실용화 가능성이 높다고 평

가받고 있다^{3,4)}.

부탄올은 다른 알코올 연료인 메탄올이나 에탄올에 비해 발열량과 에너지 밀도가 높고 디젤 연료와의 혼합 안정성이 비교적 양호하여⁵⁾ 가혹한 운전 환경에서도 연료 특성이 쉽게 변하지 않는다는 강점을 지닌다. 또한 엔진 금속 부품에 대한 부식성이 낮아 운용 및 유지보수 측면에서의 부담이 줄어들고⁶⁾ 현존하는 디젤 연료 인프라와도 호환성이 높아 실용적 측면에서도 주목받고 있다. 아울러 부탄올 혼합 연료는 낮은 점도로 인하여 미세한 분무가 형성되어 매연 배출을 줄이는 효과가 있으나 높은 증발잠열로 인하여 점화 지연이 발생하고 분무 각도가 감소하는 경향이 보고되었다⁷⁾.

디젤 엔진의 연료로 부탄올을 사용하면 연소실 내 산소 공급이 원활해지고 높은 증발잠열로 인하여 저온 연소(low temperature combustion, LTC) 조건이 형성되며 그 결과 질소산화물 배출이 감소할 가능성이 높다⁸⁾. 또한 연소 효율 증가로 인하여 부탄올 혼합물이 일정 수준에 도달할 때까지는 제동 열효율(brake thermal efficiency, BTE)이 개선되며 매연 배출 저감에 긍정적인 효과를 나타낸다⁹⁾. 그러나 일부 연구에서는 부탄올 혼합으로 인하여 NO_x 배출이 증가하거나 저부하 조건에서 착화 지연 및 불완전 연소가 발생하는 문제가 보고되었다^{10,11)}.

바이오디젤-디젤-알코올(1-부탄올, n-펜탄올) 3성분 혼합 연료를 이용한 실험에서는 NO_x 및 CO 배출 감소에 부탄올이 효과적이었으나 알코올 첨가에 따라 출력이 감소하고 제동 연료 소비율(brake specific fuel consumption, BSFC)이 증가하는 문제가 확인되었다¹²⁾. 특히 상당수의 선행 연구는 커먼레일 고압 분사 및 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation, EGR) 시스템을 갖춘 엔진을 대상으로 수행되어^{13,14)} 개발도상국이나 농업, 건설 기계 등에서 아직까지 폭넓게 사용되는 자연흡기 디젤 엔진에 대한 실험적 데이터는 상대적으로 제한적이다. 또한 반응 표면 기법(response surface method, RSM)과 인공신경망(artificial neural network, ANN)을 활용하여 대체 연료의 성능 및 배출 특성을 최적화하는 모델이 개발되었으며 이

는 실험 결과와 높은 상관관계를 보였다. 그러나 대부분의 연구가 고정 부하 및 속도와 같은 정적 운전 조건에서 수행되어 실제 변속 주행 환경을 충분히 반영하지 못하는 한계가 지적되고 있다¹⁵⁾.

이에 본 연구에서는 공랭식 단일 실린더 자연흡기 디젤 엔진을 활용하여 경유/1-부탄올 혼합 연료 적용 시 나타나는 엔진 성능과 배출가스 특성을 정량적으로 비교 분석하였다. BTE, 제동 에너지 소비율(brake specific energy consumption, BSEC), BSFC를 측정하여 연료 효율 및 소모 특성을 평가하고 NO_x, CO, CO₂, 스모크 배출 특성을 함께 살펴봄으로써 혼합 연료의 장단점을 종합적으로 파악하였다. 본 연구는 자연흡기 디젤 엔진을 기반으로 한 대체 연료 기술이 실용적으로 적용될 가능성을 탐색하며 특히 탄소 중립 및 대기오염 저감을 목표로 한 지속 가능한 연소 기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 배출가스 저감과 열효율 향상 간의 균형을 고려하여 저탄소 연료 전략 수립 및 친환경 내연기관 기술 발전을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 연구에서는 경유/1-부탄올 혼합 연료를 자연흡기식 단기통 디젤 엔진에 사용하여 연소 및 배출 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 실험 장치 개요는 Fig. 1에 나타내었으며 엔진의 주요 제원은

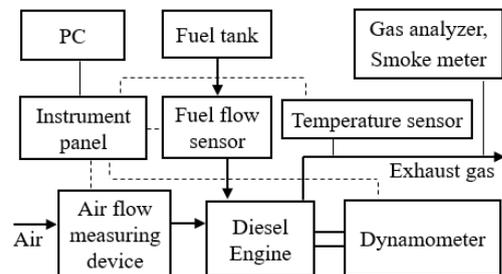


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1에 정리하였다.

엔진 부하 조절을 위하여 공랭식 와전류 동력계(eddy current dynamometer)가 사용되었으며 주요 계측기는 엔진과 계측 패널에 연결되어 배기가스 온도, 제동 토크, 공기 및 연료 유량 등을 측정하였다. 배기가스 분석을 위해 비분산 적외선 방식의 QRO-402 가스 분석기(QroTech, Bucheon, Korea)를 사용하여 NO_x, CO, CO₂ 농도를 측정하였으며 스모크 불투명도 측정을 위해 광투과식 OPA-102 스모크 측정기(QroTech)를 사용하였다. 배출가스 성분별 농도 측정 범위, 정확도 및 분해능은 Table 2에 요약하였다. 또한 엔진 성능 및 연소 특성은 MT-502E 엔진 분석 소프트웨어(ESSOM, Bangkok, Thailand)를 통해 계산되었다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 1-부탄올의 혼합 비율에 따른 엔진 성능 및 배출 특성 변화를 관찰하기 위하여 경유에 1-부탄올을 부피 기준으로 각각 5%, 10%, 15% 혼합

하여 실험을 수행하였다. 그리고 순수 경유를 D100, 1-부탄올 혼합유는 혼합 비율에 따라 각각 D95B05, D90B10, D85B15로 명명하였다.

연소 특성을 분석하기 위하여 엔진 속도 조건을 1,600, 2,000, 2,400, 2,800 rpm으로 설정하였으며 모든 실험 조건에서 50% 부분 부하를 부여하여 실험을 진행하였다. 이와 같은 부하 조건 설정은 실제 운행 환경을 고려하여 연료의 혼합 비율이 연소 특성과 배출가스에 미치는 영향을 비교하기 위한 것이다.

또한 Table 3은 실험에 사용된 경유와 1-부탄올의 주요 물리화학적 특성을 나타내며 각 연료 간 저위 발열량(lower heating value, LHV), 연료 내 산소 함량, 증발잠열 등의 차이를 비교하였다. 이러한 연료 특성의 차이는 엔진의 연소 성능과 오염물질 배출 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되며 본 연구에서는 이를 정량적으로 분석하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 엔진 성능

본 연구에서는 엔진 속도를 1,600 rpm에서 2,800 rpm으로 증가시키는 동안 D100과 1-부탄올 혼합 연료(D95B05, D90B10, D85B15)를 사용하여 BTE, BSEC, BSFC를 측정하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 모든 연료에서 엔진 속도가 증가함에 따라 BTE가 지

Table 1. Engine specifications

Parameter	Specification
Model	MITSUKI MIT-178F
Rated power	5.22 kW @ 3000 rpm
Engine type	Single-cylinder, 4-stroke
Swept volume	298.6 cm ³
Compression ratio	21:1
Injection type	Direct injection
Injector nozzle	Hole type
Cooling system	Air-cooled
Intake system	Naturally aspirated

Table 2. Specifications of the gas analyzer and smoke meter

Parameter	Measuring 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%
Smoke opacity	0-100%	±1%	0.1%

Table 3. Fuel properties

Property	Diesel	1-Butanol
LHV (MJ/kg)	42.9	33.1
Latent heat of vaporization (MJ/kg)	0.25	0.58
Cetane number	52	17
Self-ignition temperature (°C)	260	345
Density (m ³ /kg)	840	814
Kinematic viscosity @ 40°C (mm ² /s)	3.75	2.69
Oxygen (wt%)	0	21.6
Stoichiometric air/fuel ratio	14.97	11.16

속적으로 상승하는 경향이 나타났다. 특히 D100의 경우 1,600 rpm에서 BTE가 16.23%로 측정되었고 2,800 rpm에서는 19.17%로 약 3%p 이상의 상승 폭을 기록하였다. 1-부탄을 혼합 연료 또한 비슷한 상승 추세를 나타냈으며 1-부탄을 혼합 비율이 높아질수록 모든 속도 구간에서 BTE가 상대적으로 더 높게 측정되었다.

이러한 결과는 1-부탄의 물리화학적 특성과 직접적으로 연관이 있다. 1-부탄은 디젤에 비해 점도가 낮아 연료의 분무 특성이 개선되고 미립화가 향상되며¹⁶⁾ 연료-공기 혼합이 더 균일하게 이루어진다. 이에 따라 연소실 내 연료의 증발 및 초기 연소 단계에서의 효율 상승이 이루어진다. 또한 부탄을 혼합 비율이 증가하면 연료 내 산소 함량이 높아져 연소 과정에서 산소 부족으로 인한 불완전 연소가 줄어들고 열 방출이 더욱 활성화된다. 이는 열 방출 기간 단축으로 이어져 BTE가 상승한 것으로 해석된다.

반면 1-부탄은 경유보다 높은 증발잠열로 인하여 착화 지연을 유발한다. 이는 초기 연소 과정에서 연료-공기 혼합 온도가 낮아지는 현상을 초래할 수 있으나 본 연구에서는 부탄을 혼합 연료의 산소 함량 증가와 분무 개선에 따른 연소 촉진 효과가 LTC로 인한 단점을 상쇄하였음을 보여준다.

BSEC는 단위 출력 생산을 위해 소비되는 연료의 에너지를 나타내는 지표로 연료의 효율성을 평가하는데 사용된다. Fig. 3에 제시된 바와 같이 본 연구

에서는 BSEC가 낮은 회전수(1,600 rpm)에서 높은 값을 보이다가 엔진 속도가 증가할수록 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 엔진 속도가 증가함에 따라 연소실 내 혼합기 형성 및 연소 효율이 개선되고 펌핑 손실이 감소하기 때문으로 분석된다.

또한 1-부탄을 혼합 연료는 D100과 비교하여 대체로 낮거나 유사한 BSEC 값을 나타냈으며 혼합 비율이 높아질수록 BSEC의 감소 폭이 다소 커지는 경향이 관찰되었다. 이러한 결과는 1-부탄이 경유에 비해 LHV가 낮음에도 불구하고 연소 과정에서 산소 함량 증가 및 분무 특성 개선으로 인하여 연소 효율을 증가시켰기 때문으로 해석된다. Fig. 3은 이러한 결과를 명확히 보여주며 특히 D85B15의 경우 전 구간에서 BSEC 값이 가장 낮아 높은 연소 효율을 유지하였음을 시사한다.

Fig. 4에서 보면 BSFC 결과는 전반적으로 낮은 엔진 속도에서 높은 값을 보이고 고속으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. D100의 경우 1,600 rpm에서는 516.6 g/kWh로 가장 높은 값을 기록하였으나, 2,800 rpm에서는 437.3 g/kWh까지 하락하여 약 15% 감소하였다.

1-부탄을 혼합 연료에서도 유사한 경향이 관찰되었으며 전 구간에서 약 5% 내외의 편차 범위 내에서 D100과 비슷한 수준을 유지하였다. 특히 1,600 rpm 구간에서는 D90B10과 D85B15가 D100보다 낮은 BSFC

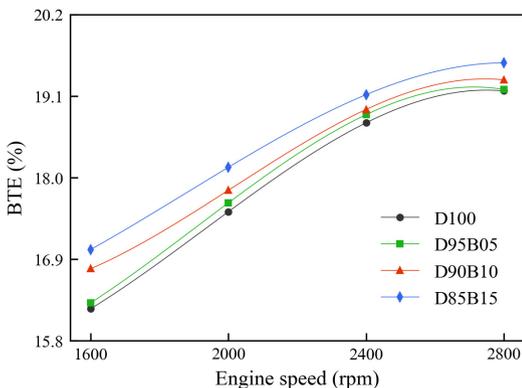


Fig. 2. Variation of brake thermal efficiency with engine speed

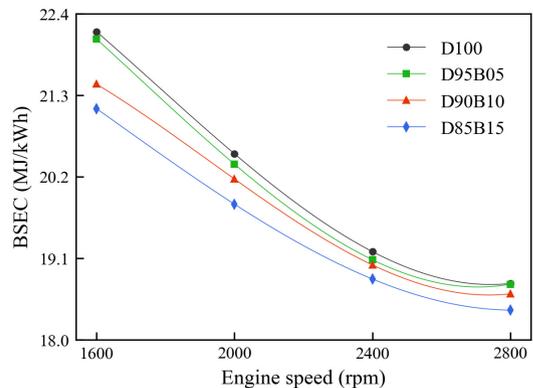


Fig. 3. Variation of brake specific energy consumption with engine speed

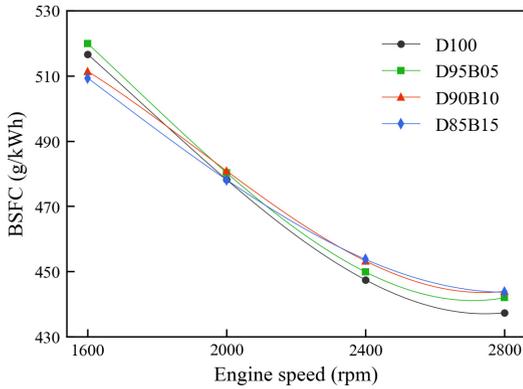


Fig. 4. Variation of brake specific fuel consumption with engine speed

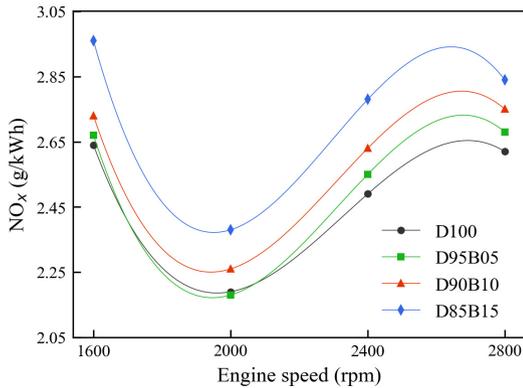


Fig. 5. Variation of NO_x emissions with engine speed

값을 나타내는데 이는 1-부탄올 혼합으로 인하여 연료 내 산소 공급량이 증가하여 저속 영역에서 발생할 수 있는 불완전 연소를 감소시킨 것으로 해석된다.

반면 2,400 rpm 이상 고속 영역에서는 1-부탄올의 낮은 발열량으로 인하여 동일 출력을 유지하기 위해 연료를 더 많이 분사해야 하는 경향이 있다. 그러나 실험 결과 혼합 연료와 경유 간의 BSFC 차이가 크지 않게 나타났으며 이는 1-부탄올의 높은 산소 함유량으로 인한 연소 효율 향상이 혼합 연료의 발열량 감소로 인한 단점을 상당 부분 상쇄하였기 때문으로 해석된다.

3.2 배기가스 특성

NO_x는 디젤 엔진에서 배출되는 대표적인 대기오염 물질로, 일반적으로 산소 농도가 높은 고온 조건에서 생성량이 증가하는 경향을 보인다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 D100의 경우 1,600 rpm에서 2.64 g/kWh로 시작하여 2,800 rpm에서는 2.62 g/kWh 수준을 기록하며 상대적으로 안정적인 NO_x 배출량을 유지하였다.

반면 1-부탄올 혼합 연료는 혼합 비율이 증가할수록 NO_x 배출량이 증가하는 경향이 나타났다. 예를 들어 D85B15는 1,600 rpm에서 2.96 g/kWh로 D100보다 약 12% 높은 값을 기록하였으며 엔진 속도가 증가해도 이러한 차이는 지속적으로 유지되었다.

이러한 결과는 1-부탄올의 높은 산소 함유량이 국부 연소 온도를 상승시켜 NO_x 생성 반응을 촉진하였기 때문으로 해석된다. 1-부탄올은 연료 자체에 산소를 포함하고 있어 연소 과정에서 공기-연료 혼합비가 높은 희박 연소 조건에서도 추가 산소를 공급하여 연소 효율을 개선하는 역할을 한다. 하지만 이는 동시에 국부적인 화염 온도를 상승시키며 NO_x 생성이 급증하는 원인으로 작용할 수 있다.

또한 본 실험에서 사용된 기계식 분사 엔진의 한계도 이러한 결과에 영향을 미쳤을 가능성이 있다¹⁷⁾. 기계식 분사 시스템에서는 연료 분사 시기를 정밀하게 최적화하기 어려워 1-부탄올과 같은 함산소 연료를 사용할 경우 특정 영역에서 연소 온도가 급격히 상승할 가능성이 크다. 특히 혼합 연료의 높은 증발 잠열로 인해 착화 지연이 발생할 경우 연료-공기 혼합이 완료된 상태에서 폭발적인 연소가 이루어질 가능성이 있으며 이는 NO_x 배출량을 증가시키는 주요 요인으로 작용할 수 있다.

CO 배출은 불완전 연소의 대표적인 부산물이며 일반적으로 공기-연료 혼합이 불균일하거나 연소 온도가 낮은 조건에서 증가하는 경향을 보인다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 D100의 경우 1,600 rpm에서 2.24 g/kWh로 측정되었으며 2,800 rpm에서는 2.55 g/kWh로 약 14% 증가하는 경향을 보였다. 이는 엔진 속도가 증가함에 따라 혼합기 형성이 최적화되지만 짧아진 체

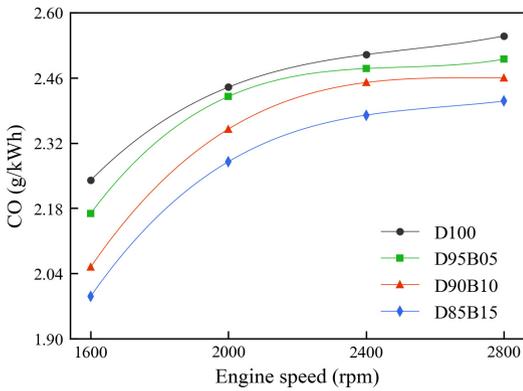


Fig. 6. Variation of CO emissions with engine speed

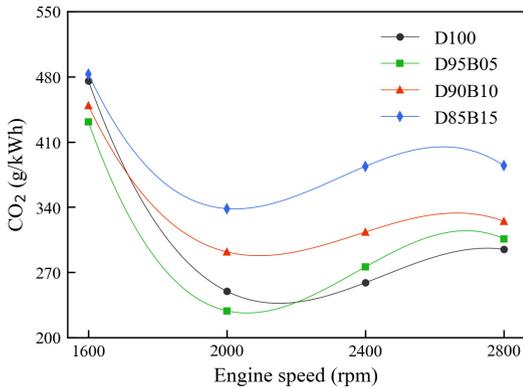


Fig. 7. Variation of CO₂ emissions with engine speed

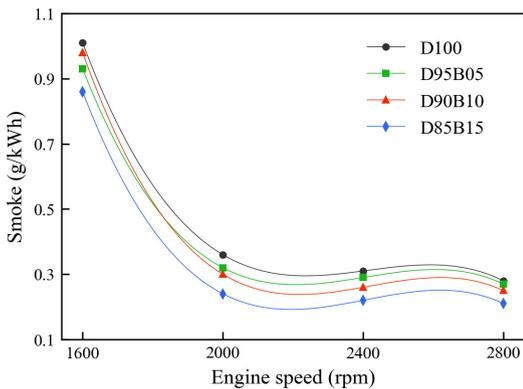


Fig. 8. Variation of smoke emissions with engine speed

류 시간이 일부 불완전 연소를 초래하였기 때문으로 해석된다.

반면 1-부탄을 혼합 연료는 동일한 rpm에서도 D100 대비 낮은 CO 배출량을 기록하여 합산소 연료가 연소 반응을 개선함을 입증하였다. 예를 들어 1,600 rpm에서 D85B15는 1.99 g/kWh를 기록하여 D100 대비 약 11% 감소한 수치를 보였다.

1-부탄을은 경유 대비 낮은 점도를 가지기 때문에 분무의 미립화와 연료-공기 혼합이 더욱 원활하게 진행된다. 또한 연료 자체에 산소를 포함하고 있어 연소 과정에서 산소 결핍으로 인하여 발생하는 CO 생성을 줄이는 역할을 한다.

고속 영역(2,400 rpm 이상)에서도 CO 배출량은 전반적으로 증가하는 경향을 보였으나 1-부탄을 함량이 높은 혼합 연료일수록 더 낮은 CO 배출량을 유지하는 것이 확인되었다. 이는 높은 속도에서 체류 시간이 짧아지더라도 1-부탄을 혼합으로 인하여 보다 완전한 연소가 이루어졌음을 의미한다.

CO₂ 배출량은 연소 효율과 연료 소비량의 영향을 받으며 엔진 속도에 따른 CO₂ 배출량 변화는 Fig. 7에 나타냈다. 이를 보면 모든 연료에서 1,600 rpm에서 매우 높은 값을 기록한 후 2,000 rpm 부근에서 감소하였다가 다시 증가하는 패턴을 보였다.

먼저 1,600 rpm에서는 BTE가 낮기 때문에 동일 출력을 생산하기 위해 연료 소비량이 증가한 것으로 해석된다. 이후 중속(2,000 rpm 전후)에서는 연소 효율이 개선되면서 CO₂ 배출량이 감소하지만 고속(2,400 rpm 이상)에서는 연료 분사량 증가 및 연소 온도 상승의 영향으로 인하여 CO₂ 배출량이 다시 증가하는 경향을 보였다.

1-부탄을 혼합 연료의 경우 이론적으로 탄소 함량이 낮아 CO₂ 배출이 감소할 가능성이 있지만 연료 소비량 증가 및 연소 온도 상승 효과가 이를 상쇄할 수 있다. 실제 측정에서는 고속 영역에서 1-부탄을 혼합 연료가 D100보다 높은 CO₂ 배출량을 기록하였으며 이는 연소 온도가 상승하면서 완전 연소 반응이 증가한 결과로 해석된다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 본 실험에서는 엔진 속도가 증가함에 따라 스모크 배출량이 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며 부탄을 혼합 비율이 높아질

수목 스모크 배출이 더욱 줄어드는 경향이 확인되었다. 1,600 rpm에서 D100의 스모크 배출량이 1.01 g/kWh를 기록한 반면 D85B15는 0.86 g/kWh로 약 15% 감소하는 경향을 보였다. 또한 모든 엔진 속도에서 1-부탄올 혼합 비율 증가가 스모크 저감에 효과적임을 보여준다.

1-부탄올의 높은 산소 함유량은 공기-연료 혼합비를 개선하여 더 완전한 연소를 촉진한다. 또한 낮은 점도로 인하여 연료의 미립화 특성이 향상되면서 연소실 내 연료 분무가 더욱 균일하게 분포할 수 있게 된다. 이와 함께 높은 증발잠열은 연료 증발 특성을 조절하여 국부적인 고온 영역을 감소시키고 입자상 물질의 형성을 억제하는 효과를 가져올 수 있다.

결과적으로 스모크 배출 저감은 경유/1-부탄올 혼합연료의 가장 중요한 환경적 장점 중 하나로 평가될 수 있으며 디젤 엔진의 배출가스 저감 전략에서 유용한 대체 연료로 활용될 가능성이 크다. 이러한 연구 결과는 디젤 엔진의 환경 규제를 충족하는 동시에 연소 성능을 유지할 수 있는 기술적 방향을 제시하며 향후 분사 기술 최적화 및 배출가스 후처리 시스템과의 결합을 고려한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 자연흡기식 단기통 디젤 엔진을 이용하여 경유/1-부탄올 혼합 연료의 연소 및 배기가스 특성을 분석하였다. 엔진 속도와 1-부탄올 혼합 비율을 조정하여 실험을 수행하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 1-부탄올 혼합 비율이 증가할수록 BTE가 향상되었으며 이는 연료의 산소 함량 증가와 미립화 개선 효과로 인한 연소 효율 상승 때문으로 해석된다. 또한 BSEC 및 BSFC는 경유와 유사하거나 다소 감소하는 경향을 보였다.
- 2) NO_x 배출량은 1-부탄올 혼합 비율이 높아질수록 증가하는 경향을 나타냈으며 이는 국부 연소 온도 상승 때문으로 판단된다. 반면 CO 및 스모크 배출량은 감소하였으며 이는 1-부탄올

의 산소 공급 효과가 연소를 촉진하고 불완전 연소를 줄인 결과로 해석된다.

- 3) CO₂ 배출량은 1,600 rpm에서 최대치를 기록한 후 2,000 rpm에서 감소하고 2,400 rpm 이상에서 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 저속에서 연소 효율 저하, 고속에서 연료 소비 증가가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

본 연구 결과는 경유/1-부탄올 혼합 연료가 친환경 대체 연료로 잠재력이 있음을 보여준다. 그러나 NO_x 배출 증가 문제를 해결하기 위해서는 EGR 적용 및 연료 분사 최적화를 위한 추가 연구가 필요하다. 향후 보다 정밀한 분석을 위해 3차원 수치 해석을 활용하여 경유/1-부탄올 혼합 연료의 분무 및 연소 메커니즘을 심층적으로 규명할 계획이다.

References

1. Marine Environment Protection Committee, "2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions From Ships", Marine Environment Protection Committee, 2023. Retrieved from <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/PressBriefings/Documents/Clean%20version%20of%20Annex%201.pdf>.
2. J. Dornoff and F. Rodríguez, "Euro 7: the new emission standard for light- and heavy-duty vehicles in the European Union", International Council on Clean Transportation, 2024. Retrieved from https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/03/ID-116-%E2%80%93Euro-7-standard_final.pdf.
3. M. I. Al-Hasan and M. Al-Momany, "The effect of iso-butanol-diesel blends on engine performance", *Transport*, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 306-310, doi: <https://doi.org/10.3846/1648-4142.2008.23.306-310>.
4. B. R. Kumar and S. Saravanan, "Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, 2016, pp. 84-115, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.085>.
5. H. Liu, B. Hu, and C. Jin, "Effects of different alcohols additives on solubility of hydrous ethanol/diesel fuel blends", *Fuel*, Vol. 184, 2016, pp. 440-448, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.037>.
6. S. 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>.

7. M. U. Haq, A. T. Jafry, S. Ahmad, T. A. Cheema, M. Q. Ansari, and N. Abbas, "Recent advances in fuel additives and their spray characteristics for diesel-based blends", *Energies*, Vol. 15, No. 19, 2022, pp. 7281, doi: <https://doi.org/10.3390/en15197281>.
8. Q. Zhang, M. Yao, Z. Zheng, H. Liu, and J. Xu, "Experimental study of n-butanol addition on performance and emissions with diesel low temperature combustion", *Energy*, Vol. 47, No. 1, 2012, pp. 515-521, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.020>.
9. D. C. Rakopoulos, C. D. Rakopoulos, E. G. Giakoumis, A. M. Dimaratos, and D. C. Kyritsis, "Effects of butanol-diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 10, 2010, pp. 1989-1997, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.032>.
10. 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>.
11. K. H. Kim, B. Choi, S. Park, E. Kim, and D. Chiamonti, "Emission characteristics of compression ignition (CI) engine using diesel blended with hydrated butanol", *Fuel*, Vol. 257, 2019, pp. 116037, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116037>.
12. M. K. Yesilyurt, T. Eryilmaz, and M. Arslan, "A comparative analysis of the engine performance, exhaust emissions and combustion behaviors of a compression ignition engine fuelled with biodiesel/diesel/1-butanol (C4 alcohol) and biodiesel/diesel/ n-pentanol (C5 alcohol) fuel blends", *Energy*, Vol. 165, Pt. B, 2018, pp. 1332-1351, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.100>.
13. X. Han, Q. Tan, M. Wang, J. Tjong, and M. Zheng, "Fuel burn rate control to improve load capability of neat n-butanol combustion in a modern diesel engine", In: *SAE 2016 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting*; 2016 Oct 24-26; Baltimore (MD), USA. Warrendale (PA): SAE International; c2016, doi: <https://doi.org/10.4271/2016-01-2301>.
14. H. Xiao, F. Guo, S. Li, R. Wang, and X. Yang, "Combustion performance and emission characteristics of a diesel engine burning biodiesel blended with n-butanol", *Fuel*, Vol. 258, 2019, pp. 115887, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115887>.
15. I. M. Yusri, A. P. P. A. Majeed, R. Mamat, M. F. Ghazali, O. I. Awad, and W. H. Azmi, "A review on the application of response surface method and artificial neural network in engine performance and exhaust emissions characteristics in alternative fuel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 90, 2018, pp. 665-686, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.095>.
16. Y. I. Lee and J. S. Han, "A study on the spray characteristics of hydrocarbon - fuels with viscosity variations", *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 6, No. 3, 2001, pp. 23-31. Retrieved from https://ocean.kisti.re.kr/IS_mvpopo213L.do?ResultTotalCNT=6&pageNo=1&pageSize=10&method=view&acnCn1=&poId=ilask&kojic=OMHBBZ&svnc=v6n3&id=3&setId=&iTableId=&iDocId=&sFree=&pQuery=%28kojic%3AOMHBBZ%29+AND+%28voliss_ctrl_no%3Av6n3%29.
17. J. Kwon, B. Kim, and J. Yang, "An experimental study on combustion and emission characteristics of a CI diesel engine fueled with pentanol/diesel blends", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 97-104, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.97>.