

자연흡기 디젤엔진의 부분부하 조건에서 경유/1-데칸올 혼합 연료가 연소 및 배기 특성에 미치는 영향

강찬우 · 서동진 · 아이샤 무니르 · 권재성[†]

경상국립대학교 기계시스템공학과

Effects of Diesel/1-Decanol Blended Fuels on Combustion and Exhaust Characteristics in a Naturally Aspirated Diesel Engine under Part Load Conditions

CHANWOO KANG, DONGJIN SEO, AYESHA MUNIR, JAESUNG KWON[†]

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

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

Received 8 December, 2025
Revised 26 December, 2025
Accepted 29 December, 2025

Abstract >> This study evaluates diesel/1-decanol blends (5–15%) in a naturally aspirated single-cylinder diesel engine under 50% load. Increasing the decanol ratio slightly reduced thermal efficiency and increased fuel consumption, primarily due to higher viscosity and lower heating value hindering atomization. NO_x emissions rose as increased fuel injection and poor mixing formed locally rich zones where fuel-bound oxygen promoted oxidation. CO also increased due to mixture inhomogeneity and reduced excess air. In contrast, smoke opacity decreased significantly for all blends as decanol's oxygen content suppressed soot precursors. The findings indicate that 1-decanol offers clear smoke reduction benefits but requires optimization to address efficiency losses and increased NO_x/CO emissions.

Key words : Diesel engine(디젤엔진), 1-Decanol(1-데칸올), NO_x(질소산화물), Smoke opacity(스모크 불투명도), Viscosity(점도)

1. 서론

디젤엔진은 높은 열효율과 신뢰성으로 인해 운송·발전·산업 장비 분야에서 핵심적인 동력원으로 사용되고 있다. 그러나 강화되는 배출가스 규제와 탄소중립 요구는 기존 화석 연료 기반의 디젤 연소 기술만

으로는 대응하기 어렵다는 점을 시사한다¹⁾. 이러한 배경에서 산소함유 대체연료(oxygenated fuel)는 매연 저감, 혼합기 균일화, 연소 효율 개선 등에서 특히 주목받고 있다^{2,3)}.

알코올 기반 연료는 비교적 높은 산소 함량과 재생 가능 자원 기반의 생산 가능성으로 인해 다양한

연구가 이루어져 왔다. 메탄올·에탄올은 그동안 많은 연구가 축적되었으나, 낮은 발열량 및 낮은 점도로 인해 중·대형 디젤엔진에 적용하기 위해서는 연료 시스템 개선이 필요하다는 한계가 보고되었다⁴⁾. 이에 따라 최근에는 탄소수가 증가한 고급 알코올(higher alcohols)에 대한 관심이 확대되고 있으며, 부탄올·펜탄올 등은 디젤과의 혼합 안정성이 높고 분사·착화 특성이 비교적 양호하여 다양한 엔진 조건에서 실험적으로 검증되어 왔다^{5,6)}.

그러나 1-데칸올(1-decanol)과 같은 장쇄 알코올(long-chain alcohol)은 기존의 저탄소 알코올과 상이한 물리·화학적 특성을 지니며, 이에 따른 연소·배출 특성 변화가 충분히 규명되지 않았다. 데칸올은 상대적으로 높은 점도와 끓는점을 지녀 분무 미립화(droplet atomization) 과정에서 질적 저하를 야기할 수 있으며⁷⁾, 증발잠열이 디젤보다 높아 연소 초기의 기화 지연을 동반하여 착화지연 증가 및 후기 연소 강화와 같은 경향을 초래할 가능성이 있다⁸⁾. 반면 분자 내부 산소는 혼합기 내에서 부분 산화 반응을 강화하여 연소 완전도 개선에 기여할 수 있으며, 이는 CO 및 매연 배출 감소와 관련이 있다고 보고되었다^{9,10)}. 이러한 상반된 영향은 데칸올 혼합 연료의 엔진 적용에서 열효율 변화, 배기가스 온도(exhaust gas temperature, EGT) 증가 또는 감소, NO_x 형성 메커니즘 변화 등을 복합적으로 유도하는 것으로 알려져 있다¹¹⁾.

고급 알코올류에 관한 기존 연구들은 주로 부탄올과 펜탄올에 집중되어 있다. 여러 연구에서 이들 연료는 점도가 디젤보다 낮아 분무 미립화가 개선되고, 적절한 혼합비에서는 제동열효율(brake thermal efficiency, BTE) 향상과 매연 저감에 긍정적인 결과가 보고되었다^{12,13)}. 그러나 알코올의 탄소수가 증가하면 이러한 이점이 항상 유효하지 않다는 사실도 제시되고 있다. 일부 연구에서는 장쇄 알코올 혼합 시 높은 점도와 낮은 휘발성으로 인해 분무 후 미기화 및 증발 과정이 제한되고, 특정 부하 영역에서는 오히려 후연소 및 CO 증가가 나타나는 사례가 보고되었다¹⁴⁾. 또한, 산소함유량 감소와 느린 증발 특성은 연소실 내 온도장과 화염 구조에 영향을 주어 NO_x 생성 경향을

단순히 예측하기 어렵다는 지적도 존재한다¹⁵⁾.

이처럼 데칸올의 연소 메커니즘은 연료 물성, 혼합비, 엔진 부하 및 속도에 따라 크게 달라질 수 있음에도 불구하고, 디젤-데칸올 혼합 연료에 대한 실험적 연구는 제한적이며 정량적 검증 자료도 충분하지 않다는 점이 문헌 고찰을 통해 확인된다^{9,16)}. 특히 단기통 자연흡기 디젤 엔진을 기반으로 한 기초 실험은 매우 드물며, 기계식 분사계와 저속·중속 운전 특성을 반영한 연구 역시 충분히 축적되어 있지 않다.

본 연구에서는 이러한 연구 공백을 해소하기 위해, 디젤/1-데칸올 혼합 연료를 적용한 디젤엔진의 성능과 배출 특성을 다양한 속도 조건에서 평가하였다. 특히 데칸올 혼합비 변화에 따른 연소 거동 차이를 명확히 규명하기 위해, 동일한 실험 장치 및 환경 조건에서 속도 변화에 따른 특성을 비교 분석하였다. 본 연구 결과는 고급 알코올 기반 대체연료의 엔진 적용 가능성 평가뿐만 아니라, 향후 혼합비 최적화 및 후처리 기술 연계 연구의 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구의 실험은 공랭식 4행정 단기통 디젤엔진을 기반으로 구축된 엔진 동력계 시스템에서 수행되었다. 실험 장치의 전체적인 개략도는 Fig. 1에 도시하였으며, 엔진의 상세 제원은 Table 1과 같다. 엔진의 출력측에는 와전류 방식의 동력계(eddy current dynamometer)를 직결하여 부하를 정밀하게 제어하였으며, 제동토크와 회전수를 실시간으로 모니터링하였다. 흡입 공기 유량 및 연료 소비량은 계측 패널에 부착된 센서를 이용하여 측정하였다. 연소 특성 분석에 필요한 배기가스 온도는 배기관에 설치된 K-type 열전대를 이용해 측정하였다. 배출가스 성분 분석을 위해 엔진 배기관 끝단에 프로브를 설치하고 가스 분석기 QRO-402 (QroTech, Bucheon, Korea)와 매연 측정기 OPA-102 (QroTech)로 샘플 가스를

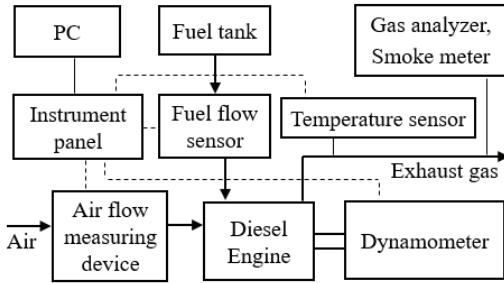


Fig. 1. Schematic diagram of the single-cylinder diesel engine test rig

유도하였다. 가스 분석기는 비분산 적외선 방식을 이용하여 NO_x, CO, CO₂ 농도를 측정하며, 매연 측정기는 광투과 방식을 통해 불투명도(smoke opacity)를 측정한다. 주요 계측 장비의 측정 범위와 분해능은 Table 2에 정리하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 1-데칸올의 혼합 비율이 디젤엔진의 연소 및 배출 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 시중에서 판매되는 초저유황 경유를 기저 연료(D100)로 사용하였으며, 여기에 1-데칸올을 부피 기준으로 5%, 10%, 15% 혼합한 연료(D95De05, D90De10, D85De15)를 준비하였다.

실험 조건은 엔진 회전수 1,600 rpm부터 2,800 rpm까지 400 rpm 간격으로 설정하였으며, 실제 운

Table 1. Engine specifications

Parameters	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

Parameters	Measuring range	Accuracy	Resolution
NO _x	0-5000 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%

전 환경에서 빈번하게 사용되는 영역인 정격 부하의 50% 조건을 모든 회전수 구간에 동일하게 인가하였다. 실험 전 엔진을 충분히 예열하여 정상 운전 범위에 도달한 상태에서 데이터를 취득하였으며, 실험에 사용된 엔진은 스로틀 조절이 가능하여 엔진의 부하 유지 상태에서 속도 조절이 가능하였다.

Table 3은 실험에서 측정된 공기-연료 당량비(λ)를 나타내며 엔진 속도 증가에 따라 전반적으로 λ값이 감소하였고, 1-데칸올 혼합비율이 증가할수록 λ가 감소하는 경향이 나타난다.

Table 3. Air-fuel equivalence ratio, λ

Engine speed (rpm)	D100	D95De05	D90De10	D85De15
1600	1.59	1.56	1.54	1.49
2000	1.61	1.56	1.55	1.51
2400	1.50	1.47	1.44	1.41
2800	1.41	1.39	1.35	1.33

Table 4. Physicochemical properties of tested fuels

Properties	Diesel	1-Decanol
Lower heating value (LHV) (MJ/kg)	42.9	41.9
Latent heat of vaporization (MJ/kg)	0.27	0.51
Cetane number (CN)	>52	52
Self-ignition temperature (°C)	260	254
Density (m ³ /kg)	840	826
Kinematic viscosity @ 40°C (mm ² /s)	3.4	6.5
Oxygen (wt%)	0	10.1
Stoichiometric air-fuel ratio	14.97	13.1

Table 4는 본 연구에 사용된 경유와 1-데칸올의 주요 물리·화학적 특성을 비교한 것이다. 1-데칸올은 메탄올이나 에탄올과 같은 저급 알코올류와 달리 비교적 높은 세탄가(cetane number, CN)를 지니고 있어 디젤엔진에서의 착화성 저하 문제가 크지 않은 장점이 있다. 다만 경유에 비해 점도가 높아, 연소실 내 분무 및 미립화 과정에서 불리하게 작용할 수 있으며, 이러한 물성 차이가 실제 연소 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 본 연구에서 중점적으로 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 엔진 성능

본 연구에서는 엔진 회전수를 1,600 rpm에서 2,800 rpm으로 증가시키며 50% 부하 조건에서 경유(D100)와 데칸올 혼합 연료(D95De05, D90De10, D85De15)의 BTE, 제동 에너지 소비율(brake specific energy consumption, BSEC), 제동 연료 소비율(brake specific fuel consumption, BSFC)을 비교 분석하였다.

Fig. 2는 엔진 회전수에 따른 BTE의 변화를 나타낸다. 모든 연료 조건에서 엔진 회전수가 증가함에 따라 BTE가 상승하는 경향을 보였다. D100의 경우 1,600 rpm에서 16.23%, 2,800 rpm에서 19.17%로 증가하였으며, 이는 고속 영역으로 갈수록 열 손실 비

중이 감소하여 연소 효율이 개선되었기 때문이다. 반면, 1-데칸올 혼합 비율이 증가할수록 전 속도 구간에서 BTE는 소폭 감소하는 경향을 보였다. 예를 들어, 1,600 rpm에서 D85De15의 BTE는 15.29%로 D100 대비 약 0.94%p 낮게 나타났다.

이러한 BTE 감소는 1-데칸올의 복합적인 연료 특성에 기인한 것으로 분석된다. 첫째, 점도 증가로 인한 미립화 성능 저하이다. 1-데칸올은 경유보다 점도가 높아 분사 시 액적의 크기가 커지는 경향이 있으며, 이는 공기와의 혼합 과정을 저해하는 요인이 되어 연소 초기의 반응 속도를 제한한다. 둘째, 높은 증발잠열로 인한 연료-공기 혼합기의 냉각 효과이다. 증발 과정에서 다량의 열을 흡수하기 때문에 착화가 지연되기 쉬우며, 초기 화염 발달이 둔화될 수 있다. 셋째, 낮은 LHV에 따른 전체 열 발생량 감소이다. 1-데칸올의 에너지 밀도가 낮아 동일한 질량을 연소하더라도 생성되는 유효 열량이 감소하고, 이로 인해 연소 온도가 상대적으로 낮아져 열효율이 하락하는 결과를 초래한다.

Fig. 3은 엔진 회전수에 따른 BSEC를 보여준다. BSEC는 단위 출력을 생산하기 위해 투입된 연료의 총 에너지를 의미하며, 열효율과 역의 상관관계를 가진다. 실험 결과, 저속(1,600 rpm)에서 가장 높은 값을 보였으며 회전수가 증가할수록 지속적으로 감소하여 2,800 rpm에서 최저치를 기록하였다. 연료 간 비교에

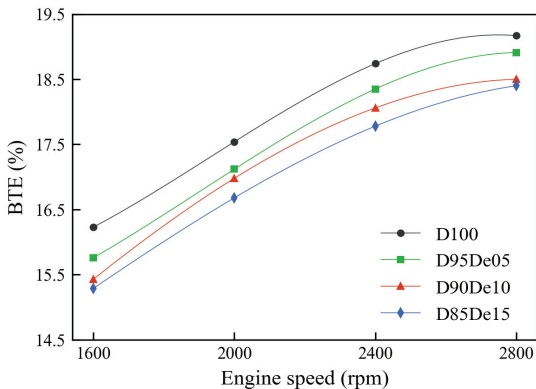


Fig. 2. Variation of brake thermal efficiency with engine speed

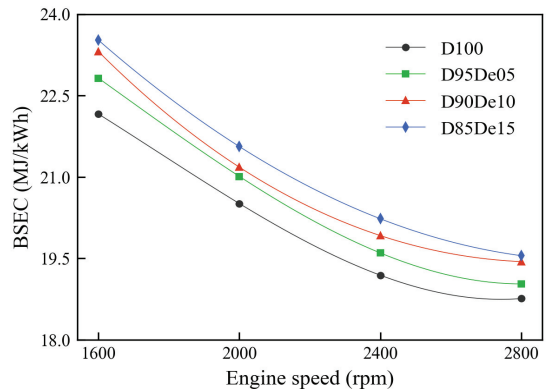


Fig. 3. Variation of brake specific energy consumption with engine speed

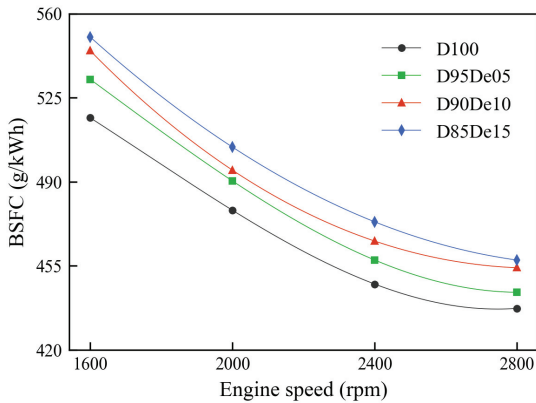


Fig. 4. Variation of brake specific fuel consumption with engine speed

서는 1-데칸올 혼합비 증가에 따라 BSEC가 일관되게 상승하였다. D100이 전 영역에서 가장 낮은 에너지 소비율(가장 높은 열효율)을 보였고, D85De15는 1,600 rpm에서 23.52 MJ/kWh로 D100(22.16 MJ/kWh) 대비 증가하였다. 이는 BTE 감소와 동일한 메커니즘에 기인하는 결과로, 점도 상승과 냉각 효과로 인해 연소 효율이 저하되면서 동일 출력을 생성하기 위해 더 많은 연료 에너지가 요구된 것으로 판단된다.

Fig. 4는 BSFC의 변화를 나타낸다. 모든 연료 조건에서 엔진 회전수가 증가함에 따라 BSFC는 감소하였다. 연료 간 비교에서는 1-데칸올 혼합비가 높아질수록 BSFC가 유의미하게 증가하였다. 1,600 rpm에서 D100의 BSFC는 516.6 g/kWh인 반면, D85De15는 550.2 g/kWh로 약 6.5% 증가하였다. 이러한 BSFC 증가는 주로 1-데칸올의 낮은 에너지 밀도에 기인한다. 데칸올의 발열량이 경유보다 낮기 때문에 동일 출력을 유지하려면 더 많은 질량의 연료 분사가 필요하다. 더불어 본 실험에서는 미립화 저하와 높은 증발잠열로 인한 냉각 효과가 중첩되면서 BTE가 추가적으로 감소하였기 때문에, 이를 보상하기 위한 연료 소비량 증가가 더욱 두드러진 것으로 해석된다.

3.2 배기가스 특성

Fig. 5는 엔진 회전수에 따른 NO_x 배출 농도의 변

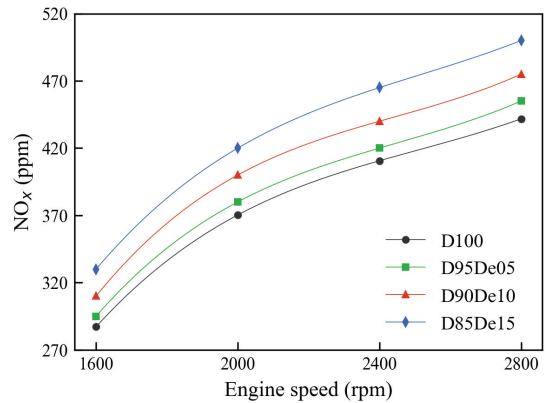


Fig. 5. Variation of NO_x emissions with engine speed

화를 나타낸다. 실험 결과, 모든 엔진 속도에서 데칸올 혼합비가 증가함에 따라 NO_x 농도가 꾸준히 상승하는 경향을 보였다. 구체적으로 2,400 rpm 조건에서 D100의 NO_x 농도는 410 ppm이었으나, D95De05, D90De10, D85De15에서는 각각 420 ppm, 440 ppm, 460 ppm으로 증가하여 뚜렷한 상승세를 나타냈다. 이와 같은 NO_x 농도 증가 현상은 데칸올의 연료적 특성이 복합적으로 작용하여 국부적인 고온 연소 영역을 확대시켰기 때문으로 분석된다.

구체적으로, 데칸올 투입은 두 가지 경로를 통해 국부적으로 농후한 혼합기 형성을 촉진할 수 있다. 첫째, BSFC 분석에서 확인된 바와 같이 데칸올의 낮은 LHV를 보상하기 위해 연료 분사량이 물리적으로 증가하였다. 둘째, 데칸올의 높은 점도는 연료 액적의 미립화를 방해하여 공기와의 불균일 혼합을 초래한다. 즉, 증가된 연료량과 불충분한 미립화가 동시에 작용하여 연소실 내부에 국부적으로 연료가 농후한 영역이 다수 형성된 것으로 판단된다. 일반적으로 농후한 영역은 불완전 연소를 유발하기 쉬우나, 합산소 연료인 데칸올은 자체적으로 산소를 포함하고 있어 이러한 농후 구간에서도 활발한 산화 반응을 일으킬 수 있다. 따라서, 국부적인 화염 온도가 급격히 상승하게 되며, 이는 결과적으로 thermal NO_x 생성을 주도하는 원인이 된다.

선행 연구¹⁷⁾에 따르면 데칸올의 높은 증발잠열은

연소실 내 냉각 효과를 유발하여 NO_x 저감에 기여할 수 있다. 그러나 본 연구의 50% 부분 부하 조건에서는 냉각 효과보다 국부적 농후 구간에서의 급격한 산화 반응이 NO_x 생성에 더 지배적인 영향을 미쳤기 때문에, D100 대비 NO_x 농도가 증가하는 결과가 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 6은 엔진 회전수에 따른 CO 배출 특성을 나타낸다. CO는 혼합기의 균질화 정도 및 연소실 내 산소 가용성에 매우 민감하게 반응한다. 실험 결과, 저속 영역(1,600 rpm)에서는 연료 간 배출 농도 차이가 미미하였으나(D100: 0.026%, D85De15: 0.038%), 엔진 회전수가 증가할수록 데칸올 혼합 비율 증가에 따라 CO 농도가 뚜렷하게 상승하는 경향이 확인되었다. 구체적으로 2,400 rpm 조건에서 D100의 CO 농도는 0.051%였으나, D85De15는 0.065%로 약 27% 증가하였으며, 2,800 rpm에서는 그 차이가 0.053% 대 0.070%로 더욱 확대되었다.

이러한 데칸올 혼합 연료의 CO 증가 현상은 합산 소 연료의 일반적인 특성(CO 저감)과는 상반되는 결과로, 그 주요 원인은 다음의 세 가지 기제로 설명된다. 첫째, 데칸올의 높은 증발잠열로 인한 연소실 냉각 효과이다. 이는 초기 연소 단계에서 국부적인 온도를 낮추는 원인이 되며, 결과적으로 CO가 CO₂로 산화되는 반응 속도를 지연시켜 최종 배출가스 내 잔류 CO 농도를 증가시킨 것으로 해석된다. 둘째, 높은 점도에 따른 미립화 악화와 혼합 불안정성이다.

거대해진 연료 액적은 공기와의 혼합을 저해하여 연소실 내부에 불균질한 혼합기를 형성하게 되며, 이는 연소 후기까지 완전 산화를 방해하여 CO 배출을 높이는 직접적인 요인으로 작용한다. 셋째, 공기-연료비 감소 및 λ 저하에 따른 산소 부족이다. 데칸올의 낮은 발열량을 보충하기 위해 연료 분사량이 증가함에 따라, 동일 흡기 조건에서 실제 공연비(air-fuel ratio, AFR)와 λ가 감소하는 경향을 보였다. 이는 연소실 내 전체적인 산소 농도를 낮추어 CO의 완전 산화를 제한하는 요인이 된 것으로 분석된다. 종합하면, 본 실험의 중부하(50%) 조건에서는 데칸올이 가진 산소 함유에 따른 산화 촉진 효과보다, 높은 점도와 증발잠열 등 연료의 물성 악화가 연소 반응에 더 지배적인 영향을 미쳐 결과적으로 CO 농도가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 엔진 회전수에 따른 CO₂ 배출 농도의 변화를 보여준다. 실험 결과, 모든 속도 구간에서 데칸올 혼합 비율이 증가함에 따라 CO₂ 농도가 상승하는 경향이 확인되었다. 구체적으로 2,800 rpm 조건에서 D100의 CO₂ 농도는 8.20%였으나, 혼합비가 가장 높은 D85De15에서는 8.94%까지 상승하였다. 이러한 CO₂ 농도 증가는 다음의 두 가지 주요 원인에 기인한다. 첫째, 동일 출력 유지를 위한 연료 분사량 증가가 CO₂ 상승을 직접적으로 유발하였다. 데칸올은 경유 대비 LHV가 낮기 때문에 동일한 50% 부하 출력을 내기 위해서는 질량 기준으로 더 많은 연료가 소

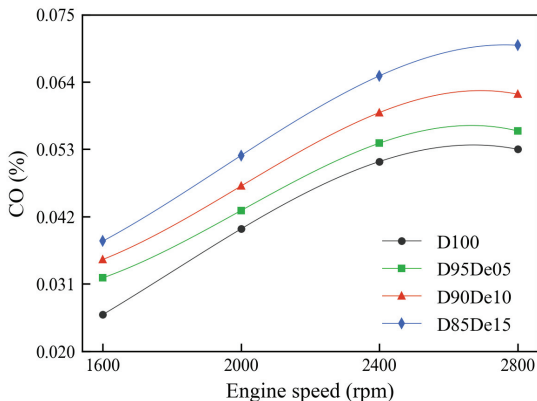


Fig. 6. Variation of CO emissions with engine speed

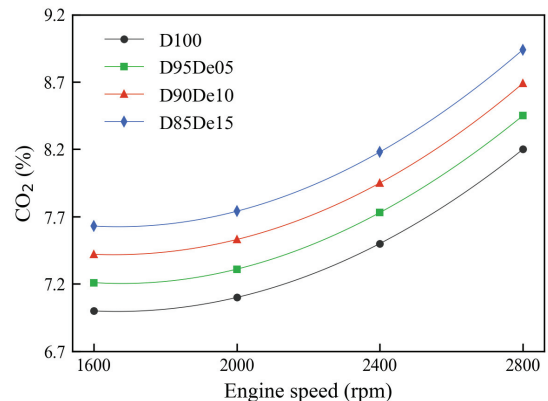


Fig. 7. Variation of CO₂ emissions with engine speed

모되어야 한다. 비록 데칸을 분자 내 탄소 함유율이 경유보다 낮다 하더라도, 투입되는 연료의 총 질량이 크게 증가함에 따라 연소 반응에 참여하는 총 탄소 원자의 수가 증가하였고, 이것이 결과적으로 CO₂ 농도를 높이는 결과를 초래하였다. 둘째, EGT 상승에 따른 산화 반응 활성화이다. Table 5에서 확인되는 바와 같이, 데칸을 혼합에 따른 EGT의 상승은 연소 실 내 열적 환경이 고온화되었음을 의미한다. 이러한 온도 상승은 미연 탄화수소의 산화 반응 속도를 가속화하는 핵심 요인으로 작용하여 연소 완전도를 높이는 데 기여한다. 앞선 분석에서 점도 문제로 인해 불완전 연소물인 CO가 일부 증가하였으나, 증가된 연료량의 절대다수는 고온 환경에서 활발히 산화되어 최종 생성물인 CO₂로 전환된 것으로 판단된다.

즉, 본 실험의 50% 부하 조건은 연소 온도가 비교적 높게 유지되는 영역이므로, 연료 소비량 증가에 따른 탄소 배출 증가분이 불완전 연소 손실보다 CO₂ 전환으로 이어지는 비중이 더 컸음을 의미한다. 따라서 데칸을 혼합유에서의 CO₂ 증가는 연료의 에너지

밀도 차이에 따른 필연적인 결과인 동시에, 고온 연소 특성이 잘 반영된 현상으로 해석된다.

Fig. 8은 엔진 회전수에 따른 스모크 불투명도(smoke opacity)의 변화를 나타낸다. 실험 결과, 모든 회전수 영역에서 데칸을 혼합 비율이 증가할수록 스모크 불투명도는 일관되게 감소하였다. 예를 들어, 2,400 rpm에서 D100의 불투명도는 13.00%였으나 D85De15는 9.20%를 기록하여 약 29%의 감소율을 보였다.

이러한 스모크 감소는 다음의 세 가지 요인에 기인한다. 첫째, 데칸올의 높은 산소 함유량은 확산화염 영역에서도 자체적으로 산소를 공급하여 매연 전구체의 생성을 억제하고, 이미 생성된 입자의 산화를 촉진한다. 둘째, 증발잠열 증가에 따른 착화지연 확대는 예혼합 연소 비율을 증가시켜 미세하고 균일한 혼합기를 형성하며, 이는 국부적으로 농후한 영역에서 발생하는 매연 생성을 줄이는 방향으로 작용한다. 셋째, 연료 내 방향족 성분의 감소는 매연 형성의 주요 전구체 농도를 낮추어 기본적으로 스모크 배출 저감에 유리한 연료 조성을 제공한다. 결과적으로, 데칸을 혼합 연료는 NO_x 증가 경향과는 별개로, 입자상 물질 저감 측면에서 뚜렷한 장점을 가지는 것으로 나타났다.

Table 5. Exhaust gas temperature

Engine speed (rpm)	D100 (°C)	D95De05 (°C)	D90De10 (°C)	D85De15 (°C)
1600	218	226	238	252
2000	247	250	265	285
2400	279	286	295	315
2800	289	298	310	335

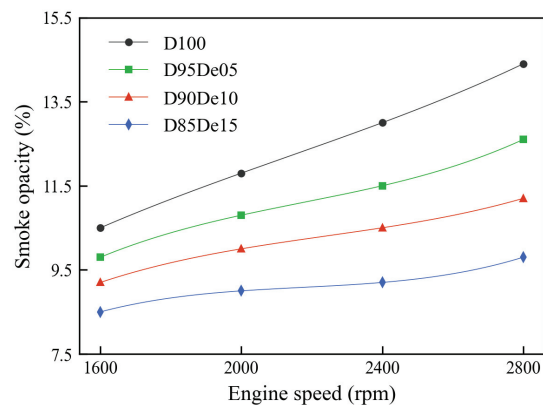


Fig. 8. Variation of smoke opacity with engine speed

4. 결론

본 연구에서는 자연 흡기 단기통 디젤엔진의 50% 부하 조건에서 1-데칸을 혼합 연료(5~15%)의 연소 및 배기 특성을 분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 엔진 성능: 데칸을 혼합비가 증가함에 따라 BTE는 소폭 감소하고 BSFC는 증가하였다. 이는 데칸올의 낮은 발열량으로 인해 필요 연료량이 증가했고, 높은 점도가 미립화를 방해하여 연소 효율을 저하시켰기 때문이다.
- 2) NO_x 및 CO₂ 배출: 두 항목 모두 증가하는 경향을 보였다. NO_x는 연료 내 산소가 국부적 고온 연소를 촉진하여 생성되었으며, CO₂는 낮은 발열량을 보상하기 위한 연료 소비 증가로 인해 총 탄소 투입량이 늘어난 결과이다.

- 3) CO 및 스모크 불투명도: 높은 점도와 증발잠열로 인한 소염 효과로 CO 배출은 증가했으나, 스모크 불투명도는 현저히 감소하였다. 이는 데칸올의 산소 함유량이 그을음 전구체 생성을 억제하고 산화를 촉진하는 효과가 물리적 단점(점도)을 상쇄할 만큼 지배적이었음을 의미한다.
- 4) 향후 높은 점도 문제를 완화하기 위한 연료 예열 시스템의 적용이나, NO_x 저감을 위한 배기가스 재순환 등의 후처리 기술과 병행한다면, 데칸올은 친환경 대체연료로서 충분한 활용 가능성을 지닐 것으로 기대된다.

References

1. International Energy Agency (IEA), "Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector", IEA, Paris, 2021, Retrieved from <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
2. B. Rajesh 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>.
3. Z. Zhang, J. Hu, D. Zhang, G. Jia, B. Zhang, S. Wang, W. Zhong, Z. Zhao, and J. Zhang, "Overview of the impact of oxygenated biofuel additives on soot emissions in laboratory scale", *Fuel Processing Technology*, Vol. 254, 2024, pp. 108046, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2024.108046>.
4. S. Verhelst, J. W. Turner, L. Sileghem, and J. Vancoillie, "Methanol as a fuel for internal combustion engines", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 70, 2019, pp. 43-88, doi: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.10.001>.
5. Y. Zhang, S. Gao, Z. Zhang, W. Li, T. Yuan, D. Tan, L. Duan, and G. Yang, "A comprehensive review on combustion, performance and emission aspects of higher alcohols and its additive effect on the diesel engine", *Fuel*, Vol. 335, 2023, pp. 127011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127011>.
6. S. B. Ogunjide, W. Zhong, T. Pachianan, and Y. Zhu, "Combustion and emission characteristics of high n-pentanol blends at low load: a pathway to eco-friendly internal combustion engine operation", *Fuel*, Vol. 393, 2025, pp. 135032, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135032>.
7. 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>.
8. A. I. EL-Seesy, T. Xuan, Z. He, and H. Hassan, "Enhancement the combustion aspects of a CI engine working with Jatropa biodiesel/decanol/propanol ternary combinations", *Energy Conversion and Management*, Vol. 226, 2020, pp. 113524, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113524>.
9. A. I. El-Seesy, M. S. Waly, A. Nasser, and R. M. El-Zoheiry, "Improvement of the combustion, emission, and stability features of diesel-methanol blends using n-decanol as cosolvent", *Scientific Reports*, Vol. 12, 2022, pp. 18963, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20326-0>.
10. B. Ashok, K. Nanthagopal, S. Darla, O. H. Chyuan, A. Ramesh, A. Jacob, G. Sahil, S. Thiyagarajan, and V. E. Geo, "Comparative assessment of hexanol and decanol as oxygenated additives with calophyllum inophyllum biodiesel", *Energy*, Vol. 173, 2019, pp. 494-510, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.077>.
11. 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>.
12. S. Yu, C. Cao, and W. Lv, "Combustion and emission characteristics investigation of a marine diesel engine powered by diesel/biodiesel/n-butanol blends", *Energy Science & Engineering*, Vol. 10, No. 9, 2022, pp. 3317-3330, doi: <https://doi.org/10.1002/ese3.1220>.
13. H. Deviren, "Enhancing diesel engine efficiency and emission performance through oxygenated and non-oxygenated additives: a comparative study of alcohol and cycloalkane impacts on diesel-biodiesel blends", *Energy*, Vol. 307, 2024, pp. 132569, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132569>.
14. S. Rajasekaran, D. Damodharan, K. Gopal, B. R. Kumar, and M. V. De Pours, "Collective influence of 1-decanol addition, injection pressure and EGR on diesel engine characteristics fueled with diesel/LDPE oil blends", *Fuel*, Vol. 277, 2020, pp. 118166, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118166>.
15. K. Madhu babu, N. Sivanagaraju, and R. Nagendra babu, "An experimental investigation on characteristics of a diesel engine with pine oil blends and by adding decanol as an additive", *Materials Today: Proceedings*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.401>.
16. Y. Hua, "Research progress of higher alcohols as alternative fuels for compression ignition engines", *Fuel*, Vol. 357, 2024, pp. 129749, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129749>.
17. R. Adhinarayanan, A. Ramakrishnan, G. Kaliyaperumal, M. De Pours, R. K. Babu, and D. Dillikannan, "Comparative analysis on the effect of 1-decanol and di-n-butyl ether as additive with diesel/LDPE blends in compression ignition engine", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 46, 2024, pp. 9211-9228, doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1773967>.