J. Korean Soc. Combust. 28(4) (2023) 30-35

《학술논문》 DOI: https://doi.org/10.15231/jksc.2023.28.4.030 ISSN 1226-0959
eISSN 2466-2089

경유/1-부탄올 혼합유가 디젤 엔진 성능에 미치는 영향

권재성 · 김범수†
경상국립대학교 기계시스템공학과

Effects of Diesel/1-Butanol Fuel Blends on the Performance of a Diesel Engine

Jaesung Kwon and Beomsoo Kim†
Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University

(Received 25 November 2023, Received in revised form 18 December 2023, Accepted 18 December 2023)

ABSTRACT

This study compared the changes in engine performance variables using diesel/1-butanol blended fuels for a naturally aspirated compression ignition diesel engine. The concentrations of 1-butanol were 10%, 30%, and 50% by volume. The experimental results showed a decrease in brake torque and brake power using blended fuels due to the lower calorific value and the cooling effect caused by the high heat of vaporization that suppresses combustion reactions. The oxygen contained in 1-butanol can promote combustion reactions and increase thermal efficiency. However, as the 1-butanol volume ratio increases, overall thermal efficiency decreases due to the ignition delay and the lower combustion temperatures. As the engine speed increases, the air-fuel ratio decreases, forming a richer mixture, and the longer ignition delay leads to an increasing trend in exhaust gas temperature.

Key Words : 1-Butanol, Diesel engine, Brake torque, Brake thermal efficiency

1. 서 론

디젤 엔진은 높은 효율성과 내구성으로 인해 육상 및 해상의 수송 분야에서 널리 사용되고 있으나 온실가스와 미세먼지 배출로 환경오염 문제를 심화시키는 원인이 되고 있다. 따라서 디젤 엔진에서 발생하는 유해가스를 저감시켜 대기오염 문제를 개선함과 동시에 탄소배출 감소를 통한 지구온난화 문제 해결을 위해서는 지속 가능한 친환경 연료로의 전환이 필수적이며 이에 대한 연구 활동이 지속되고 있다.

내연기관의 대체 연료로 주목받고 있는 알코올 연료는 매연 저감에 효과적이며, 저온 연소나 분사 기술 개선을 통해 질소산화물 감소에도 효과가 있는 것으로 보고되었다[1,2]. 알코올 연료 중에서는 바이오매스로부터 재생가능한 원료를 얻을 수 있는 에탄올에 대한 연구가 활발히 수행되었으며, 천연가스나 재생 가능한 자원에서 파생되는 메탄올 역시 높은 옥탄가와 낮은 생산 비용으로 인해 주목을 받고 있다. 그러나 에탄올이나 메탄올과 같은 저탄소알코올은 에너지 밀도가 낮고, 저온에서의 점화 특성이 나쁘기 때문에 이를 보완하기 위한 첨가제 사용 또는 별도의 연료 시스템 개발이 요구된다. 또한 연료 장치를 구성하는 특정 금속이나 고무 부품 등을 부식시킬 수 있어 유지관리 측면에서도 상당한 주의를 요구하며, 연료의 친수성 때문에 대기 중의 물을 흡수하므로 경유와의 혼합 시 상 분리 문제가 발생한다. 따라서 연소실에 공급되는 연료의 질을 유지하기 위한 혼합기를 설치하거나 분사 방식을 변경하는 등 기존 시스템의 개선이 필요하다[3,4].

알코올 연료 중에서도 부탄올은 저탄소알코올에 비해 세탄가(cetane number, CN)가 높아 연소 효율이 향상되며, 연료에 포함된 산소 성분의 영향으로 국부적으로 생성되는 입자상 물질의 감소에 기여할 수 있다[5,6]. 그리고, 경유와의 혼합 특성도 우수하여 별도의 혼합기나 연료공급장치 없이 직접 경유와 혼합하여 디젤 엔진에 사용할 수

†Corresponding Author, kimbs@gnu.ac.kr

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

있다. 연료 시스템의 부식 문제에 있어서도 부탄올이 저탄소알코올보다 유리하여[7] 특수소재에 대한 필요성이 낮아지고, 기존 연료 인프라 및 엔진 구성품과 잘 호환되기 때문에 엔진 관련 시스템의 수정을 거의 요구하지 않는다는 장점이 있다. 반면, 부탄올은 경유 대비 낮은 저위발열량(lower heating value, LHV)으로 인해 엔진의 동력 성능 저하의 우려가 있고, 저탄소알코올보다 복잡한 발효 및 증류 공정을 거쳐야하므로 생산단가가 높으며, 생산량도 저탄소알코올보다 적기 때문에 유통과 저장을 위한 인프라도 부족하다.

부탄올이 재생가능한 연료로 평가받는 이유는 농업 잔여물, 에너지 작물 또는 폐기물로 구성된 바이오매스를 Clostridium 종과 같은 박테리아를 사용하여 발효시킨 후 부탄올을 분리하고 정제하는 과정을 거치기 때문이다[8]. 최근에는 미생물 조작을 통한 합성 기술의 발달로 부탄올의 생산량 증대를 기대할 수 있으며[9], 미생물을 이용한 전기적인 방법을 통해 이산화탄소로부터 부탄올을 생산하는 기술도 발표되어 대기 중의 온실기체 감축 효과도 거둘 수 있다[10].

앞서 설명한 생물학적인 부탄올 생산공정은 대량생산에 한계가 있고 부산물인 아세톤과 에탄올이 동시에 생산된다. 따라서 이러한 단점을 극복하고 생산원가를 낮추기 위해 최근에는 촉매반응을 이용한 생산공정이 연구되고 있으며, 이는 부탄올을 대체 연료로 활용할 수 있는 가능성을 더욱 높여준다[11,12]. 또한 바이오매스의 가스화를 통해 생산된 합성가스를 이용한 촉매반응을 통해서도 부탄올을 생산할 수 있어 생산 측면에서의 기술적인 진전은 상당히 이루어졌다고 볼 수 있다[13].

이러한 부탄올의 경제성 확보를 위한 노력과 더불어 내연기관 대체 연료로서의 가능성을 파악하기 위한 연구도 다수 수행되었으나, 다양한 형식의 디젤 엔진과 넓은 범위의 운전 조건에 따른 엔진의 성능 및 배출가스 특성에 대해서는 일관된 결과를 도출하지 못하고 있으므로 부탄올의 상용화를 위해서는 추가적인 연구가 필요해 보인다. 따라서, 본 연구에서는 경유/부탄올 혼합유를 소형 단기통 엔진의 연료유로 사용하여 전부하 조건의 다양한 엔진 속도에 대한 연소 실험을 수행하였고, 부탄올 혼합비율에 따른 엔진의 성능 변화에 대한 이해를 높이고자 제동토크와 열효율 등 주요 성능 변수를 비교 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

경유/부탄올 혼합유가 디젤엔진 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 실험 장치를 구성하였고, 실험에 사용된 엔진은 자연흡기 압축착화 방식의 디젤 엔진으로 상세 제원은 Table 1에 나타내었다. 엔진 부하는 와전류 다이나모미터를 통해 부여하며, 엔진 부하 및 흡입 공기량 조절을 위한 스로틀 밸브 개도량은 계기판에 연결된 PC를 통해 제어한다. 배기가스 온도와 유량을 포함한 다양한 실험데이터 수집을 위해 각종 센서류는 계기판에 연결되며, 수집된 데이터를 기반으로 PC에 내장된 데이터 분석 프로그램(MT-502, ESSOM, 방콕, 태국)을 이용하여 열효율, 제동출력 등 엔진성능 변수를 계산하였다.

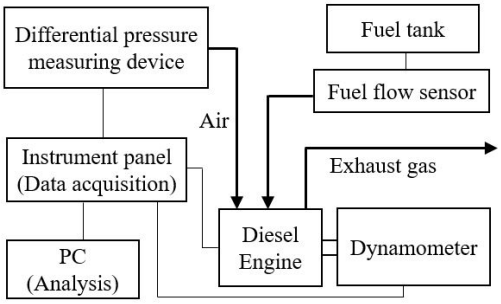

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

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
Cooling system	Air-cooled
Ignition	Compression ignition
Compression ratio	21.1
Injector	ITACO PB42P01
Engine start system	Recoil

2.2 실험 방법

본 연구에서는 경유에 부탄올을 첨가하여 디젤엔진의 성능 변화를 관찰하였으며, 경유에 대한 부탄올의 혼합 비율은 부피 기준 10%, 30%, 50%이며 각각의 혼합유는 D90B10, D70B30, D50B50으로 명명하였고, 경유는 D100으로 명명하였다. 경유와 부탄올의 물리화학적 특성은 Table 2에 나타내었으며, LHV, 기화열 및 산소 함유율에서 경유와 부탄올의 차이점을 확인할 수 있다. 상기 4종의

Table 2. Properties of diesel and 1-butanol

Properties	Diesel	1-Butanol
LHV (MJ/kg)	42.9	33.1
Latent heat of vaporization (MJ/kg)	0.25	0.58
CN	>52	17
Density (m^3/kg)	840	814
Kinematic viscocity @ 20°C (mm^2/s)	3.4	3.6
Oxygen (wt.%)	0	21.6
Stoichiometric AFR	14.9	11.16

연료유에 의한 엔진 성능 변화를 비교하기 위해 실험은 전부하 조건에서 수행하였으며, 엔진 속도는 1400-2500 rpm 범위에서 100 rpm 간격으로 변화시켜 측정된 데이터를 비교 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 제동토크(brake torque) 및 제동출력(brake power) 비교

Fig. 2는 다양한 엔진 속도에서 경유/부탄올 혼합유를 포함한 4종의 연료유 사용에 따른 제동토크 측정 결과를 보여준다. 엔진의 제동토크는 크랭크 축에 연결된 다이나모미터에서 측정한 것으로 엔진의 회전력을 나타내는 중요한 성능 변수이다. 모든 연료유에 대해 엔진 속도 증가에 따라 제동토크가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 순수 경유인 D100을 사용했을 때의 제동토크가 모든 속도에서 제일 크게 측정되었다. 경유/부탄올 혼합유를 사용한 실험에서는 부탄올의 혼합 비율이 증가할수록 전반적으로 제동토크가 감소하는 경향이 관찰되며, 엔진 속도 1900 rpm 이하의 영역에서 D100 대비 혼합유의 제동토크 감소가 현저하게 나타난다. 본 연구에서는 부탄올 혼합 비율이 제일 높은 D50B50 연료유 사용 시 1700 rpm에서 최대 5.7%의 제동토크 감소가 나타났으며, 이는 부탄올의 LHV가 경유보다 약 23%가 낮다는 점을 감안했을 때 연료에 함유된 산소의 영향으로 연소 효율이 D100보다 높아져서 LHV 감소에 따른 성능 저하를 부분적으로 상쇄한 것으로 해석된다.

Fig. 3은 엔진 속도 증가에 따른 제동출력 변화를 나타낸 것으로 부탄올 혼합에 따른 출력 감소 경향은 제동토크의 감소 경향과 유사하게 나타난다. 부탄올은 재생 가능 연료로서 매연 감소와 같은 환경적 이점을 가지고 있지만, 혼

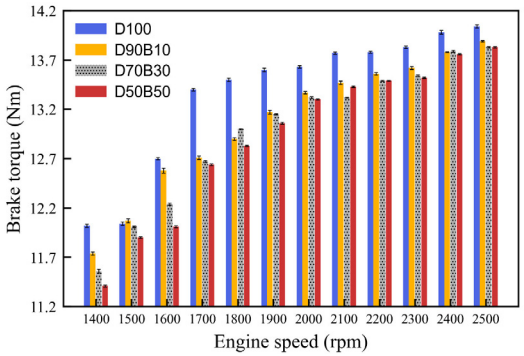

Fig. 2. Brake torque with engine speed.

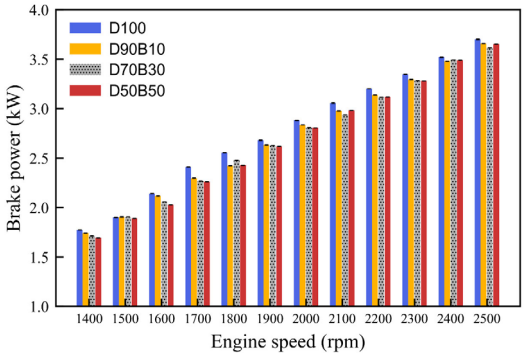

Fig. 3. Brake power with engine speed.

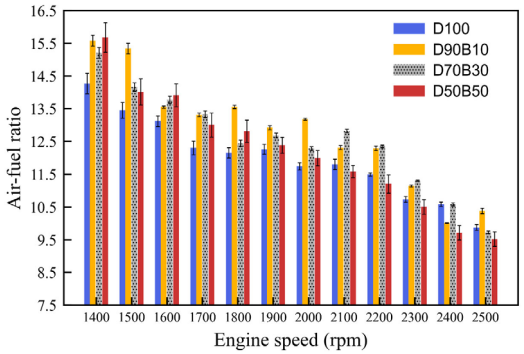

Fig. 4. Air-fuel ratio with engine speed.

합유 내 부탄올의 비율이 증가함에 따라 엔진의 제동출력이 저하될 수 있으므로 디젤 엔진에 부탄올을 효과적으로 적용하기 위해서는 성능 저하를 최소화하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

공연비(air-fuel ratio, AFR)는 연소 효율, 엔진 성능 및 배기가스 농도에 영향을 미치는 중요한 변수로서 연료유 변화에 따른 공연비 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 모든 연료유에 대해 엔진 속도 증가에 따라 공연비는 감소하는 경

향을 확인할 수 있으며, 엔진 속도 2000 rpm 이하에서 경유/부탄올 혼합유의 공연비 증가가 명확하게 나타난다. 완전 연소를 위한 화학양론적 공연비는 Table 2에 나타낸 바와 같으며, 부탄올은 함산소 연료로서 이론 공연비가 경유보다 낮음을 알 수 있다. 대부분의 엔진 속도에서 D100은 이론 공연비보다 낮은 농후한 혼합기 영역에서 연소가 진행되며, 경유/부탄올 혼합유의 경우에는 2200 rpm 이하에서 희박 연소가 진행된다. 이러한 저속 영역에서의 희박 연소는 연료의 증발 과정에서 발생하는 냉각 효과가 과잉 흡입된 공기에 의해 일정 부분 희석되어 연소 반응 억제가 완화됨을 의미하나 연소 반응으로 인한 열 방출 과정에서 과잉 공기로의 열 손실이 발생하는 원인이기도 하므로 연소 활성화 측면에서 지배적인 요인이 무엇인지 단정짓기는 어렵다.

Fig. 5는 연료유 변화에 따른 배기가스 온도(exhaust gas temperature, EGT)의 변화를 나타낸다. EGT는 연소 효율과 밀접한 관련이 있고, 엔진에 작용하는 열부하를 나타내기 때문에 엔진 연구에서 중요한 변수이다. 온도가 높을수록 일반적으로 완전 연소가 더 많이 이루어지거나 엔진의 부하가 높아졌음을 의미하며, 본 실험에 사용된 모든 연료유에 대하여 엔진 속도 증가에 따라 EGT는 전반적으로 증가하는 경향을 보여준다. D100의 경우 대부분의 엔진 속도에서 가장 높은 EGT를 나타내며, 이는 경유의 열 함량이 혼합유보다 높고, 높은 세탄가로 인한 우수한 점화 특성으로 인해 혼합유를 사용한 경우보다 효율적인 연소가 일어난 것으로 파악된다. 혼합유의 경우 부탄올 함량이 증가할수록 전반적으로 EGT가 높아지는 경향을 보여주는데, 연료에 포함된 산소 성분의 증가로 인한 연소 활성화가 증발열의 증가로 인한 냉각 효과를 상쇄한 것으로 이해된다. 또한, 엔진 속도 증가에 따른 AFR의 감소는 동일한 연료 유량에 대한 가열 매체 유량의 감소를 의미하므로 열 방출 이후 혼합기의 현열 증가로 이어져 EGT 상승을 초래할 가능성이 있다. 엔진의 손상 없이 성능을 유지하기 위해서는 EGT 관리가 중요한 부분인데, 실험 결과 2200 rpm 이하에서는 부탄올 첨가에 따라 EGT가 감소하였다. 따라서, 저온 연소에 의한 질소산화물 배출 저감을 기대할 수 있으나 연소 온도가 특정 수준 이하로 낮아지면 불완전 연소로 인한 미연탄화수소 또는 일산화탄소의 발생이 증가할 수 있으므로 엔진 설계 및 보정 과정에서 혼합기 온도의 최적화를 위한 노력이 요구된다. 또한, 2400/2500 rpm에서는 부탄올 첨가에 따라 EGT가 증가하는데, 이것은 낮은 AFR로 인해 농후한 혼합기가 형성됨에 따라 연소 반응이 지연되어 연소실로부터 배기가스가 배출되는 과정에서도 잔여 공기와 화학 반응이 진행되어 D100을 사용했을 때보다 온도가 더 높아진 것으로 이해된다.

3.2 열효율(brake thermal efficiency, BTE) 및 제동연료소비율(brake specific fuel consumption, BSFC) 비교

열효율과 제동연료소비율은 각각 아래와 같이 정의된다.

$$BTE = \frac{P_b}{\dot{m}_f LHV} \tag{1}$$

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \tag{2}$$

여기서 P_b는 제동출력, $\dot{m}_f$은 연료 유량을 나타낸다. Fig. 6는 실험에 사용된 4종의 연료유에 대한 열효율을 엔진 속도에 대해 나타낸 것으로 모든 연료유에 대해 엔진 속도 2200 rpm에서 최대효율이 관찰되며, 열효율의 변화 경향은 모든 연료유에 대하여 유사하게 나타난다. 일반적으로 압축비가 높아지면 BTE가 증가하지만 시험용 엔진의

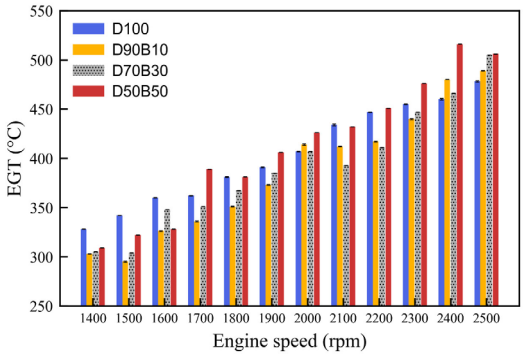

Fig. 5. Exhaust gas temperature with engine speed.

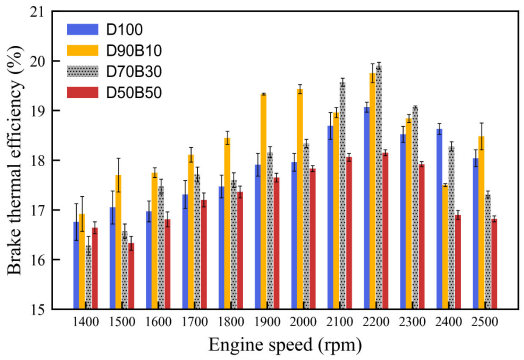

Fig. 6. Brake thermal efficiency with engine speed.

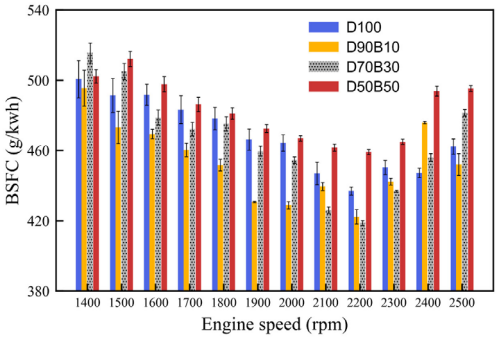

Fig. 7. Brake specific fuel consumption with engine speed.

BTE는 다소 낮게 관찰된다. 모든 실험 조건에서 측정된 D100의 AFR은 경유의 화학양론적 AFR보다 낮으며 엔진 속도가 증가할수록 AFR이 감소하기 때문에 BTE에는 부정적인 영향을 미친다. 시험에 사용된 엔진은 자연 흡기 방식이므로 터보차져를 이용한 BTE 개선이 가능할 것으로 판단되며, 이 밖에도 연료의 분사 압력이나 분사 시기 최적화를 통한 BTE 개선이 가능할 것으로 보인다. 경유/부탄올 혼합유 사용 시 2000 rpm 이하에서는 D90B10의 효율증가가 두드러지며, 2100 rpm 이상에서는 D70B30의 효율증가가 두드러지게 나타난다. 부탄올 분자에는 질량 기준 21.6%의 산소가 포함되어 있어 연소 반응 촉진에 기여하지만 경유보다 높은 점도로 인해 연료 분사 이후 연료의 미립화에 상대적으로 불리하고, 증발 과정에서 경유보다 높은 기화열로 인해 점화시기를 더 길게 지연시킴과 동시에 점화 초기 혼합기에 대한 냉각 효과를 나타낸다. 이러한 요인들이 복합적으로 작용하여 부탄올 혼합 비율에 따라 상이한 열효율 특성을 나타내므로 이에 대한 최적화가 필요해 보인다.

BSFC는 단위 출력을 발생시키기 위해 엔진이 소비하는 연료량을 의미하며, 연료의 경제성을 판단하는 유용한 지표이다. Fig. 7은 모든 연료유에 대하여 엔진 속도 변화에 따른 BSFC 변화를 보여준다. 엔진 속도 증가에 따라 모든 연료유에 대해 BSFC는 감소하다가 최솟값을 나타내는 2200 rpm을 기점으로 다시 증가하며, 부탄올 혼합 비율이 증가할수록 BSFC 변화율은 낮게 나타난다. D90B10은 2400 rpm을 제외한 모든 엔진 속도에서 D100보다 BSFC가 낮았으며, D90B10 사용 시의 높은 열효율이 낮은 열 함량으로 인한 성능 저하를 상쇄시킨 것으로 이해된다. D70B30를 사용한 경우에는 2100/2200 rpm을 제외한 엔진 속도에서 전반적으로 D100과 BSFC의 수준이 유사하게 나타났으며, D50B50은 모든 엔진 속도에서 D100보다 BSFC가 높았다.

본 실험 결과를 바탕으로 재생 부탄올을 디젤 엔진의 대체 연료로 사용할 경우 환경적인 장점이 있음에도 불구하고 엔진 성능의 저하와 비용 문제가 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 부탄올의 상용화를 위해서는 엔진의 압축비, 분사 기술, 연소실의 형상 등 주요 설계 변수가 엔진 작동에 미치는 영향을 이해하고, 경제성과 환경적 영향 사이의 절충점을 찾기 위한 많은 노력이 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 자연흡기 압축착화 방식의 단기통 디젤 엔진을 대상으로 경유/부탄올 혼합유를 연료유로 사용하여 부탄올 혼합 비율에 따른 엔진 성능 변수의 변화를 관찰하였으며, 순수한 경유를 기준 조건으로 실험 결과를 분석하여 아래의 결론을 도출하였다.

1) 경유/부탄올 혼합유는 경유보다 낮은 열 함량과 높은 기화열로 인한 냉각 효과 때문에 연소 반응이 억제되어 제동토크와 제동출력이 경유를 사용한 조건보다 감소했다.
2) 부탄올에 함유된 산소는 연소 반응을 촉진시켜 열효율 증가에 기여할 수 있으나 부탄올의 혼합 비율을 높일수록 기화열에 의한 점화지연이 연장되고, 연소실 내부의 냉각 효과로 인해 연소 효율이 감소하므로 혼합 비율에 대한 최적화가 필요하다.
3) 저속 영역에서는 공연비가 높아 희박한 조건에서의 연소 반응이 일어나고 과잉 공기로의 열 손실로 인해 배기가스 온도가 감소하는 경향이 있으나 2400 rpm 이상에서는 이론 공연비보다 낮은 농후한 조건에서의 불완전연소 및 점화지연으로 인해 배기가스 온도가 높아진다.
4) 엔진의 열효율은 2200 rpm에서 최댓값을 나타내고, 부탄올을 10% 혼합했을 때의 효율 증가가 현저하게 나타난다. 그러나 부탄올 혼합 비율을 30% 이상으로 더 높이게 되면 엔진의 열효율은 감소하고 제동연료소비율은 증가한다.

References

[1] M. R. Chao, T. C. Lin, H. R. Chao, F. H. Chang, C. B. Chen, Effects of methanol-containing additive on emission characteristics from a heavy-duty diesel engine, Sci. Total Environ. 279 (2001), 167-179.
[2] C. Sayin, A. N. Ozsezen, M. Canakci, The influence of operating parameters on the performance and

emissions of a DI diesel engine using methanol-blended-diesel fuel, Fuel 89 (2010), 1407-1414.

[3] 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 (2009), 2484-2490.

[4] 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.

[5] G. Valentino, F. E. Corcione, S. E. Iannuzzi, 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 92 (2012), 295-307.

[6] Z. Şahin, O. N. Aksu, Experimental investigation of the effects of using low ratio n-butanol/diesel fuel blends on engine performance and exhaust emissions in a turbocharged DI diesel engine, Renew. Energ. 77 (2015), 279-290.

[7] S. J. M. Algayyim, A. P. Wandel, T. Yusaf, I. Hamawand, The impact of n-butanol and iso-butanol as components of butanolacetone (BA) mixture-diesel blend on spray, combustion characteristics, engine performance and emission in direct injection diesel engine, Energy 140 (2017), 1074-1086.

[8] B. Gainey, B. Lawler, The role of alcohol biofuels in advanced combustion: An analysis, Fuel 283 (2021), 118915.

[9] D. Antoni, V. V. Zverlov, W. H. Schwarz, Biofuels from microbes, Appl. Microbiol. Biotechnol. 77 (2007), 23-35.

[10] H. Li, P. H. Opgenorth, D. G. Wernick, S. Rogers, T. Y. Wu, W. Higashide, P. Malati, Y. X. Huo, K. M. Cho, J. C. Liao, Integrated electromicrobial conversion of CO2 to higher alcohols, Science 335 (2012), 1596-1596.

[11] H. Choi, J. Han, J. Lee, Renewable butanol production via catalytic routes, Int. J. Environ. Res. Public Health 18 (2021), 11749.

[12] X. Y. Xi, Z. H. Sun, H. T. Cao, Y. T. Pei, G. H. ten Brink, P. J. Deuss, K. Barta, H. J. Heeres, Catalyst performance studies on the Guerbet reaction in a continuous flow reactor using mono-and bi-metallic Cu-Ni porous metal oxides, Catalysts 10 (2020), 996.

[13] R. Andersson, M. Boutonnet, S. Järås, Higher alcohols from syngas using a K/Ni/MoS2 catalyst: Trace sulfur in the product and effect of H2S-containing feed, Fuel 115 (2014), 544-550.

저자정보

권재성

권재성은 경상국립대학교 기계시스템공학과 부교수이며, 관심분야는 난류연소 수치해석 및 모델링, 내연기관 대체 연료 연구이다.

김범수

김범수는 경상국립대학교 기계시스템공학과 교수이며, 관심분야는 AI, 수치기법응용 및 Wavelet 해석이다.