

디젤-열분해유 유상액을 사용하는 직접분사식 디젤 엔진의 엔진성능 및 배기특성에 관한 연구

이석환** · 김호승** · 김태영* · 우세종* · 강건용*

Performance and Emission Studies in a DI Diesel Engine Fuelled with Diesel-Pyrolysis Oil Emulsion

Seokhwan Lee, Hoseung Kim, Taeyoung Kim, Sejong Woo and Kernyong Kang

Key Words: Fast pyrolysis(급속 열분해), Pyrolysis oil(열분해유), Biomass(바이오매스), Diesel engine(디젤엔진), Bio crude oil(바이오원유), Emulsion(유상액)

Abstract

Pyrolysis oil (PO), also known as Bio crude oil (BCO), has the potential to displace significant amounts of fuels that are currently derived from petroleum sources. PO has been regarded as an alternative fuel for petroleum fuels to be used in diesel engine. However, the use of PO in a diesel engine requires modifications due to low energy density, high water contents, low acidity, and high viscosity of the PO. One of the easiest way to adopt PO to diesel engine without modifications is emulsification of PO with the fuels that has higher cetane number. However, PO that has high amount of polar chemicals is immiscible with non polar hydrocarbons of diesel. Thus, to stabilize a homogeneous phase of diesel-PO blends, a proper surfactant should be used. In this study, a DI diesel engine operated with diesel and diesel-PO emulsions was experimentally investigated. Performance and gaseous & particle emission characteristics of a diesel engine fuelled by diesel-PO emulsions were examined. Results showed that stable engine operation was possible with the emulsions and engine output power was comparable to diesel operation.

1. 서 론

지구 온난화의 주범인 화석 연료의 사용을 대체하기 위하여 재생 가능한 에너지원(renewable energy)에 대한 중요성이 부각되고 있는데 이 중에서 목재 등의 바이오매스를 이용하여 액체, 고체, 기체상의 연료를 제조하는

기술들이 근래에 연구되고 있다⁽¹⁾. 바이오매스를 원료로 연료를 제조하는 경우 탄소 중립(carbon neutral) 효과를 가지고 있으므로 이와 관련된 연구가 전 세계적으로 진행되고 있으며⁽²⁾, 일부 연료는 상용화를 통해 화석연료를 대체하고 있다⁽³⁾. 하지만 현재 사용 중인 바이오디젤, 바이오에탄올과 같은 1세대 바이오연료는 식용작물을 이용하여 생산되는 단점을 갖고 있어 무분별한 바이오연료 개발의 부작용뿐만 아니라 윤리적인 문제에 대한 우려의 목소리 또한 높아지고 있다⁽²⁾. 반면에, 2세대 바이오연료는 폐목재, 톱밥 등의 농업 폐기물 및 목재를 이용하여 생산되기 때문에 1세대 바이오연료의 단점을 극복한 대체에너지원이라 할 수 있으며 북유럽과 북미에 위치한 목재가 풍부한 나라들을 중심으로 바이오연

Received: 26 February 2014, Received in revised form: 14 May 2014, Accepted: 27 May 2014)

*한국기계연구원 그린동력연구실

**가천대학교 대학원 기계공학과

*책임저자, 회원, 한국기계연구원 그린동력연구실

E-mail : shlee@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7050 FAX : (042)868-7380

료의 생산 및 적용 기술에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다⁽¹⁾.

급속 열분해(fast pyrolysis) 공정을 통해 생산되는 2세대 바이오연료 중 하나인 열분해유(pyrolysis oil)는 이미 상용화를 통하여 시간당 수톤 이상의 생산량이 가능하므로 공급 측면에서 문제가 없어 향후 더욱 기대되는 연료이다. 근래에는 열분해유를 수송용 디젤 엔진의 연료로 직접 적용하고자 하는 연구들이 수행되고 있는데, 세탄가 향상제를 첨가한 열분해유를 사용하여 디젤유와 동등한 수준의 연소성능을 확보하였다는 연구결과^(4,5) 및 질량기준 30%까지 디젤유와 혼합한 혼합유로 디젤 엔진에 적용하여 배출가스 성분 중 질소산화물(NOx)의 저감을 확인한 연구들이 발표되었다⁽⁶⁾. 하지만, 열분해유는 디젤 엔진에 적합하지 않은 물성치를 가지며⁽⁷⁾, 엔진 연소는 가능하지만 연료 공급 및 분사 시스템을 고착시키고 마모를 유발한다는 연구 결과들이 보고되었다⁽⁸⁾. 보고에 따르면 열분해유를 디젤 엔진에 적용하는 경우 높은 수분 함유량과 연료 내의 산소 성분으로 인하여 질소산화물과 입자상물질(PM)의 동시 저감을 기대할 수 있으나, 열분해유에 포함된 타르 성분이 점착성 물질로 변환되는 중합작용(polymerization)이 고온 조건에서 빠르게 발생한다. 이로 인하여 발생하는 중합체(polymer), 타르, 고체입자 등은 분사계에 퇴적되어 성능을 저하시키게 된다. 또한, 열분해유가 연소되면 탄소계 퇴적물이 생성되어 분사계 뿐만 아니라 연소실, 배기밸브, 피스톤 등에 퇴적되어 성능 저하를 일으킨다⁽⁷⁾.

또한 열분해유는 발열량이 디젤유 대비 1/3 수준에 불과하며 낮은 세탄가로 인해 자발화 시키는데 어려움이 있으며 높은 산도로 인하여 장시간 엔진을 구동할 경우 금속재질의 부식을 유발하여 연료공급계가 고장날 가능성이 있다. 위에서 언급한 열분해유의 특성을 고려할 때 열분해유를 단독으로 사용하기 위해서는 연료공급계를 이루고 있는 소재 교환, 분사기 분공 확장 등의 개조를 거쳐야한다^(9,10). 연료공급계의 개조 없이 열분해유를 엔진에 직접 이용하기 위해서는 디젤유와 같이 세탄가가 높은 연료와 혼합하여 엔진에 적용하는 방법이나⁽⁵⁻⁸⁾, 디젤유의 파일릿 분사로 발생한 화염을 이용하여 열분해유를 연소 시키는 이중분사(dual-injection) 전략이 연구되었다⁽¹¹⁾. 하지만, 극성물질(polar chemicals)이 많이 포함된 열분해유와 비극성물질(non-polar chemicals)인 탄화수소로 대부분 이루어진 디젤유는 극성이 달라서 서로 혼합되지 않으므로 상분리 없는 안정적인 혼합을 위해서는 적절한 계면활성제(surfactant)를

사용하여 유상액(emulsion)을 만들어야 한다^(8,12,13).

국내에서는 목질계 열분해유를 전자식 디젤 엔진에 적용한 연구가 거의 진행된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 목재에서 생산된 열분해유를 고압분사가 가능한 전자식 디젤 엔진에 적용함에 있어서 디젤과 유화(emulsification)하여 얻어진 유상액을 직접분사식 디젤 엔진에 적용하여 연소성능 및 배출가스 특성을 파악하고자 하였다. 이를 토대로 향후 열분해유를 사용하는 디젤 엔진의 최적화 연구에 기초 데이터로 제공이 가능하리라 사료된다.

2. 실험장치 및 구성

2.1 실험연료

본 연구에서 사용된 열분해유는 톱밥을 재료로 급속 열분해 반응을 통하여 생산된 것이다⁽¹⁴⁾. 생산된 열분해유는 특유의 짙은 검갈색을 지니고 있으며 탄내와 같은 자극적인 냄새가 난다. 열분해유의 경우 수분이 약 30~35% 함유되어 있으며 발열량이 3,800~4,100 kcal/kg으로 일반 디젤유에 비하여 1/3 수준이고 연료 조성에서 산소 성분의 비율이 50%에 이를 정도로 매우 높다. 열분해유는 발열량이 낮고 산성을 지니고 있으며 밀도 및 점도(viscosity)도 디젤유에 비해서 훨씬 높으므로 열분해유를 단독으로 디젤엔진에 장시간 적용하게 되면 연료공급계의 부식 및 손상이 일어난다. 따라서 열분해유를 단독으로 사용하기 위해서는 연료공급계를 이루고 있는 소재 교환, 분사기 분공 확장 등의 개조를 거쳐야 한다.

연료공급계의 개조 없이 이용하기 위해서는 열분해유에 디젤유를 적정량 혼합한 혼합유를 적용하는 것이 가장 쉬운 방법이다. 탄소계 연료들의 경우 대부분 서로 잘 혼합되는 반면에 바이오매스에서 생산되는 열분해유는 화석계 연료와 극성(polarity)이 달라서 혼합되지 않고 층이 지게 된다. 따라서 바이오매스 연료와 화석연료를 혼합하기 위해서는 적절한 계면활성제를 사용하여 유화시켜야 한다. 우선 계면활성제의 종류에 따른 유화 가능성을 살펴보았다. 일반적으로 널리 사용되는 계면활성제인 Hypermer 2234, Span 20, Polysorbate20을 메탄올과 5:2 비율로 희석한 액체를 사용하여서 70°C, 2,000 rpm의 교반기 회전조건으로 20분간 교반하여 유상액을 제조하였다⁽¹²⁾. Fig. 1에서는 각각의 계면활성제를 사용하여서 교반한 후 24시간 방치한 디젤-열분해유

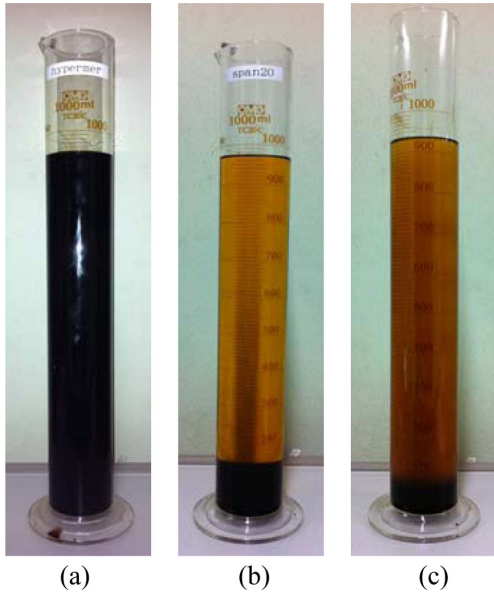


Fig. 1 PO-Diesel emulsion according to surfactants: (a) Hypermer 2234, (b) Span 20, (c) Polysorbate 20

유상액을 나타내고 있는데 Hypermer 2234를 계면활성제로 사용한 경우에는 여전히 혼합이 잘 되어 있지만 나머지 경우에는 섞이지 않고 층이 진 것을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 Hypermer 2234를 계면활성제로 사용하여 디젤-열분해유 유상액 연료를 제조하였다. 열분해유가 엔진 연소 및 배출가스 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 열분해유 함량이 질량 기준으로 5, 10, 15%가 포함된 3 종류의 유상액 연료를 조성하여 실험에 사용하였다.

디젤유, 열분해유, 3가지의 유상액에 대한 연료 물성치를 측정하여 비교한 결과를 Table 1에 나타내었다. 본 물성치는 공인분석기관인 한국석유관리원(K-Petro)에 의뢰하여 분석한 결과이다. 열분해유는 디젤 대비 저위

발열량(LHV; lower heating value) 값이 1/3로 이는 단위 중량당 에너지 함유량이 1/3밖에 되지 않는다는 의미이다. 또한 열분해유는 수분함유율이 33%에 달해 엔진에 직접 사용하기에는 적합하지 않은 연료라고 할 수 있다. 이에 비해서 유상액의 경우 디젤유에 비해서 에너지 함유량이 약간 낮으며 수분함유율도 열분해유에 비해 매우 낮게 측정되어서 디젤 대비 일정 수준의 성능을 나타낼 것으로 예측된다.

2.2 실험방법

실험에 사용된 엔진 시스템의 제원을 Table 2에 나타내었다. 엔진은 4행정 직접 분사식 단기통 디젤 엔진이며 배기량은 1858 cc이다. 열분해유에 존재하는 고체상 물질이 연료 분사 계통에 퇴적될 가능성이 있는 경우 기계식 펌프와 분사기를 사용하는 것이 유리하나⁽⁶⁾, 본 연구에서는 디젤유와 혼합한 유상액을 적용하여 고체상 물질의 함량을 줄이고 점도도 낮췄기 때문에 연료를 고압으로 분사할 수 있는 전자식 분사 시스템을 적용하였다. Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 단기통 디젤 엔진의 동력 특성을 제어하기 위해서 100 kW

Table 2 Base diesel engine specifications

Specifications	Resources
Type	4 stroke DI diesel engine
Displacement	1,858 cc
Cylinders	1
Intake system	Natural aspiration
Bore × Stroke	130 × 140 mm
Compression ratio	17.1
Injection system	Common rail injection
Nozzle diameter	8×Φ0.124 mm

Table 1 Properties of test fuels

Type	LHV (kJ/g)	Water (%)	C (%)	H (%)	O (%)	Viscosity (mm ² /s at 40°C)	Density (kg/m ³)
Diesel	45.8	-	86.3	12.8	-	2.7	821.0
BCO	15.9	33.62	41.0	10.1	48.8	9.5	1193.5
BCO5	44.0	1.52	83.2	12.3	4.4	3.0	840.5
BCO10	41.8	3.05	80.9	12.2	6.8	3.4	860.1
BCO15	40.5	4.75	78.0	12.0	9.9	3.8	878.2

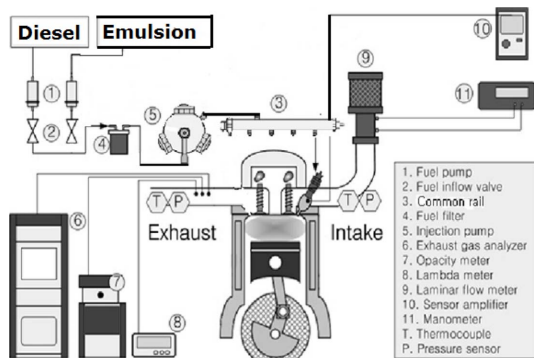


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

급 DC 동력계를 사용하였으며, 연소 특성 분석을 위하여 글로우 플러그 위치에 압력 센서(Kistler, 6052C)와 이의 설치를 위한 어댑터(Kistler 6542Q27)를 장착하여 엔코더 신호와 동기 시켜 연소실 압력을 크랭크각 1도 단위로 측정하여 열방출을 곡선을 계산하였다. 흡입 공기량 측정은 저장소(reservoir) 상단에 설치한 측류 유량계(Meriam Inst. Co.)를 이용하여 측정하였다. 연료 분사량 및 소비 에너지는 스톱워치와 저울을 사용하여 단위 시간당 공급된 연료의 질량과 발열량 정보를 이용하여 계산하였으며, 공연비 측정에는 광대역 공연비 센서(ETAS, LA4)를 이용하였다. 배출가스 측정을 위하여 HC, CO/CO₂, NO/NO₂의 동시 측정이 가능한 배출가스 분석기(AVL, AMA i-60)를 사용하여서 1s에 한 번씩 데이터를 수집하였다. 입자상물질의 중량 농도 및 입경별 개수 농도를 측정하기 위한 전처리 단계로 배출가스에 포함된 휘발성 물질(volatile materials)을 400°C의 고온 분위기에서 증발시키고 배출가스를 100~1000 수준으로 희석할 수 있는 엔진 배출가스 희석장치(engine exhaust diluter, Dekati, DEED)를 설치하였다. 입자상물질의 중량 농도를 측정하기 위한 광산란 방식의 Aerosol monitor(TSI, Dusttrak 6550) 및 입자상물질의 입경별 개수 농도를 측정하기 위하여 5.6~523 nm의 입경 크기를 가지는 입자들의 수농도 및 입경별 수농도 분포를 1초에 한 번씩 측정할 수 있는 FMPS (fast mobility particle sizer, TSI, 3091)를 엔진 희석장치와 동시에 연결하여 사용하였다.

실험은 디젤유 대비 열분해유가 질량 기준으로 5, 10, 15% 유화된 유상액에 대하여 분사압을 120 MPa로 고정된 후 부하 변화(IMEP 0.2~0.8 MPa)에 따라서 수행되었으며 연소 특성, 배출가스의 배출특성을 측정하였

다. 본 연구에서는 배기량이 1,858 cc인 대형 디젤 단기통 엔진을 사용하였으므로 대형 디젤 엔진의 일반적인 운전 조건인 1,000 rpm의 엔진 회전수 조건에서 실험을 수행하였다. 안정적인 실험을 위하여 각 연료의 연소 특성 및 배출가스 특성을 살펴보기 위해 연료 교체 시 연료 분사계 및 연료라인에 남아 있는 연료들을 완전히 제거하여 엔진 내에 남아있는 잔류 연료들과의 혼합을 방지하였다.

3. 실험결과

3.1 엔진 연소 특성

엔진회전속도 1,000 rpm, 엔진부하 IMEP 0.5 MPa 조건에서 디젤유 및 열분해유가 5, 10, 15% 포함된 유상액을 사용하는 경우 연소실 압력과 열방출을 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 연료 분사시기는 THC와 CO의 배출량이 낮게 유지되면서 엔진이 최대 토크값을 가지는 지점으로 정하였으며 모든 연료 조건에서 BTDC 12°CA로 고정하였다. 다른 부하 조건에서는 각 부하별로 최적의 시점을 찾아서 실험을 수행하였다.

연소실 압력 선도를 살펴보면 디젤유 및 5, 10%의 열분해유가 포함된 유상액을 사용하는 경우에는 연소압의 최대값 및 착화지연기간이 거의 동일함을 알 수 있다. 열분해유가 15% 포함된 유상액의 경우 세탄가가 낮은 열분해유가 가장 많이 유화되어 있으므로 타 연료에 비해서 세탄가가 제일 낮아서 연소압의 최대값을 나타내는 지점이 약간 더 지연된 것을 확인할 수 있었다. 열방출을 계산 결과를 살펴보면 디젤 및 5, 10% 유상액의

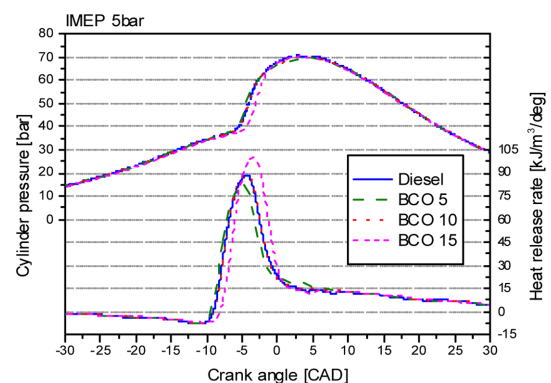


Fig. 3 Cylinder pressure & heat release rate according to test fuels at 1,000 rpm, IMEP 0.5 MPa)

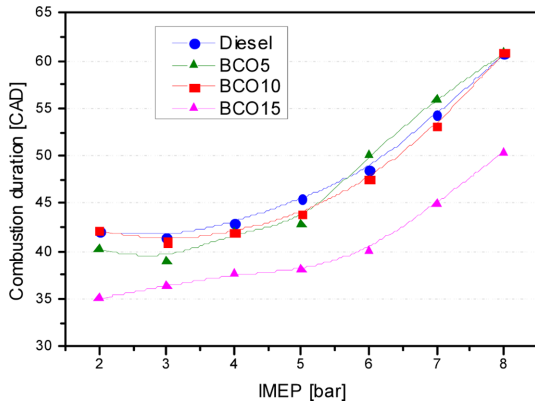


Fig. 4 Combustion duration of test fuels according to engine loads

경우 점화시기 및 열방출량도 거의 동일하지만 15% 유상액의 경우 열방출율 곡선의 최대값이 더 크게 측정되었는데 이는 압축행정에서 연소압이 전체적으로 약간 낮은 것으로 관찰되고, 연료 분사 후 수분의 증발로 인해서 실린더 내 온도가 상대적으로 낮아지므로 낮은 세탄가와 더불어 점화지연이 길어져 예혼합 연소되는 기간이 길어진다. 이에 따라 주연소(main combustion)의 강도가 강해져서 열방출율의 피크값이 크게 나타나는 것이다.

연료의 10% 에너지 발산점을 지칭하는 MFB10(mass fraction burned) 시점 및 MFB 10 시점과 MFB 90 시점 사이의 기간을 나타내는 전체적인 연소시간(combustion duration)을 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 디젤유 및 5, 10%의 열분해유가 포함된 유상액의 경우 연소시간이 거의 동일하게 측정되었지만 15%의 열분해유가 포함된 유상액의 경우 나머지 연료에 비하여 연소시간이 5~10°CA 정도 짧게 측정되었다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 15% 유상액의 경우에는 점화지연이 길어져 예혼합 연소기간이 길어지고 이에 따라 주연소의 강도가 강해져서 열방출이 짧은 시간에 강하게 발생하므로 연소시간도 짧다.

Figure 5는 실험에 사용한 4 종류의 연료에 대하여 IMEP 0.2~0.8 MPa의 엔진 부하 범위에서의 연소 안정성을 나타낸 것이다. 연소 안정성은 해당 연료가 연소실 내에서 200 사이클에 걸쳐 연소하는 동안 획득한 압력 결과로부터 도시평균 유효압력 변동계수(coefficient of variance in indicated mean effective pressure)를 도출한 것이다. 연료마다 각 부하조건에서 연료 분사시기를 크랭크 각도 3°CA씩 변화시켜 가며 THC와 CO가 낮은

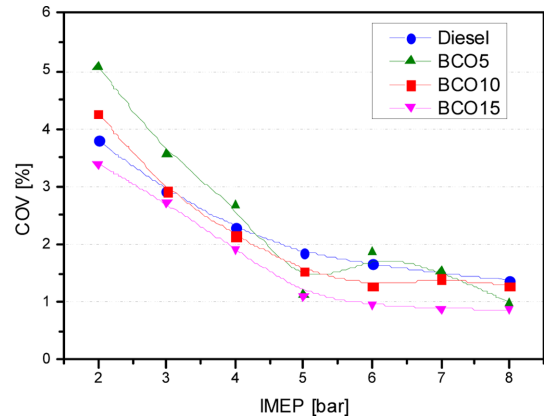


Fig. 5 Coefficient of variance in indicated mean effective pressure of test fuels according to engine loads

값을 유지하면서 토크값이 최대가 되는 최적의 연료 분사시기를 찾아낸 후 결과를 획득하였다. 모든 연료에 대해 부하가 증가할수록 연소 안정성이 대체적으로 향상되는 경향이 나타나며, 가장 연소 안정성이 낮은 것으로 나타난 IMEP 0.2 MPa의 부하 조건에서도 본 연구에서 안정적인 연소의 기준으로 삼고 있는 COV 5% 이내의 결과가 나타남을 알 수 있다. 디젤유에 비해서 15%의 열분해유가 함유된 유상액의 경우 연소가 더 안정적으로 일어났는데 이는 열분해유에 포함된 산소성분이 연소를 촉진시켜 연소안정성이 개선된 효과라고 할 수 있다.

도시에너지소비율(indicated specific energy consumption)과 도시연료전환효율(indicated fuel conversion efficiency)을 Fig. 6과 7에 나타내었다. 발열량이 다른 연료를 비교하기 위하여 연료의 소모량을 비교하는 것보다

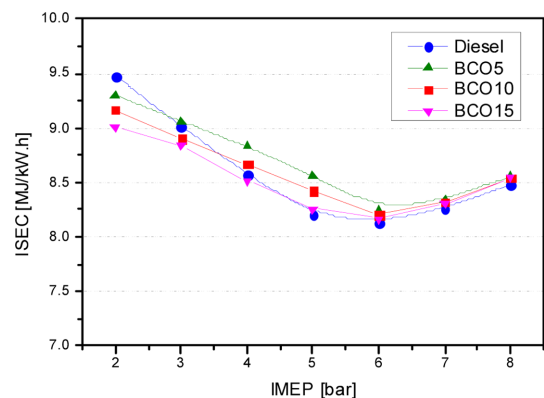


Fig. 6 Indicated specific fuel consumption of test fuels according to engine loads

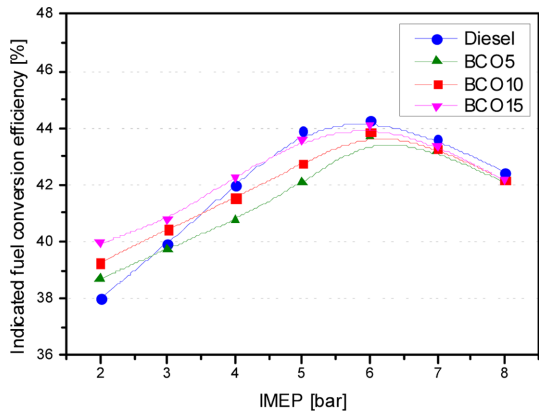


Fig. 7 Indicated fuel conversion efficiency of test fuels according to engine loads

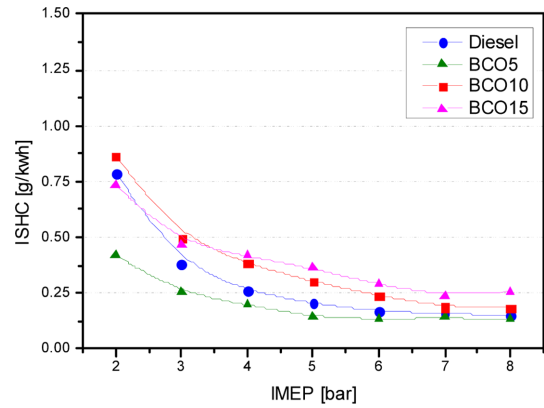


Fig. 8 Indicated specific HC emission of test fuels according to engine loads

에너지 소모량을 비교하는 것이 더 효과적이라고 할 수 있다. 결과를 살펴보면 도시에너지소비율은 열분해유의 함유량이 많을수록 더 낮게 나타났다. 이는 동일한 부하 조건을 내기 위하여 유상액의 경우 열분해유의 함량이 높을수록 더 적은 에너지가 공급되어야 한다는 것이다. 도시에너지소비율과 저위발열량과의 비로 계산할 수 있는 도시연료전환효율은 모든 시험 연료에 대하여 38~44% 수준으로 측정되었는데 디젤유에 비하여 유상액을 사용하는 경우 효율이 낮게 측정되었다. 이는 열분해유에 포함된 수분이 연소 시 발생하는 열에너지를 흡수하기 때문이다. 각 유상액의 경우 열분해유의 함유량이 증가할수록 효율이 증가하는 것을 알 수 있는데 열분해유의 함유량이 증가할수록 미세 폭발 현상이 나타나 연료의 미립화를 촉진시켜 연소성능을 개선시키기 때문인 것으로 파악된다⁽¹⁵⁾.

3.2 가스상 배출가스 측정 결과

사용 연료에 따른 미연탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx)의 도시출력당 배출량 결과를 Fig. 8~10에 나타내었다. 디젤유 및 유상액 연료의 HC 배출물 특성을 비교한 결과 모든 연료에서 부하에 관계없이 HC가 1 g/kWh 이하로 매우 낮은 배출량을 보여 주고 있다. 열분해유가 5% 혼합된 유상액의 경우 연료의 함산소 효과로 인하여 배출량이 디젤유에 비해서 낮게 측정되었다. 하지만 열분해유가 10, 15% 혼합된 조건에서는 세탄가 감소 및 연료 내에 존재하는 고분자 물질의 증가로 인하여 THC가 약간 증가하는 경향을 보이고 있는데 그 차이는 크지 않다.

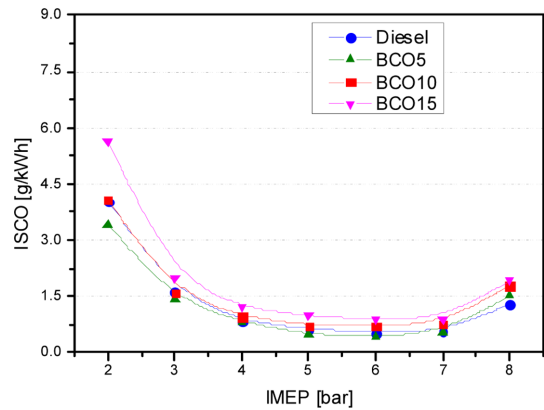


Fig. 9 Indicated specific CO emission of test fuels according to engine loads

CO의 경우에는 열분해유의 혼합 비율이 높을수록 배출량도 높은 경향을 보이고 있는데 IMEP 2 bar 조건을 제외한 전 영역에서 배출량이 2 g/kWh 이하로 낮은 수준을 보이고 있다. CO의 주된 발생요인 중 하나로 엔진 연소실로 분사된

연료의 미립화 성능이 있는데 유상액의 경우 점도가 디젤유에 비하여 약간 높으며 고분자 물질들이 포함되어 있으므로 연료의 미립화 성능이 좋지 않아서 열분해유의 함유량이 높을수록 CO의 발생량이 타 연료에 비해서 약간 높은 것으로 판단된다^(5,7,16).

NOx의 경우, 디젤유에 비하여 유상액은 연료 내의 함산소 효과로 인하여 연소실 내에서의 NOx 형성이 촉진되므로 NOx 배출량이 증가하는 경향을 보여야 하지만 열분해유에 포함된 수분 성분이 연소실 내의 열을 흡수하여 Thermal NOx를 감소시키는 역할을 하게 때문에

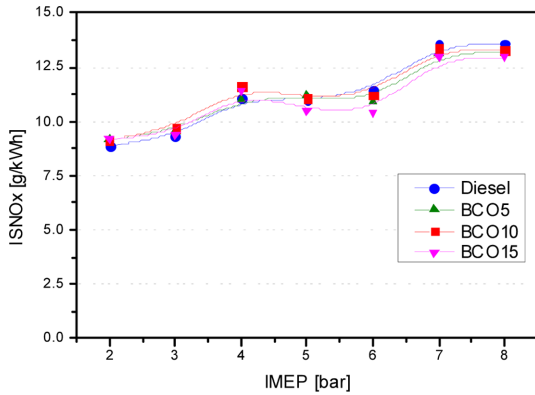


Fig. 10 Indicated specific NOx emission of test fuels according to engine loads

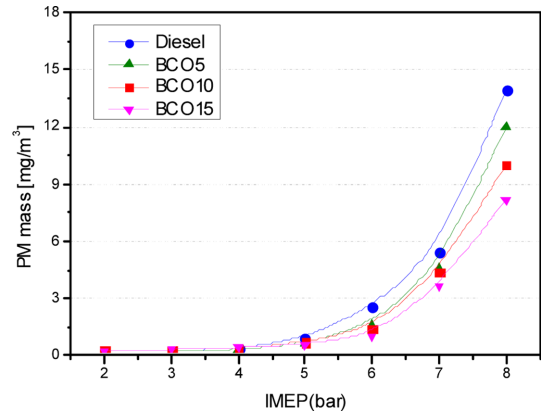


Fig. 11 Engine out soot emission of test fuels according to engine loads

연료별로 큰 차이를 보이지는 않는다. 하지만 열분해유의 함유량이 높을수록 수분 성분이 열을 흡수하는 효과가 조금 더 지배적으로 작용하여 NOx가 약간 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.3 입자상 배출가스 측정 결과

Figure 11에서는 광산란 방식의 Aerosol monitor인 Dusttrak을 사용하여 측정된 시험연료에 따른 입자상물질의 중량 농도를 각각의 부하에 따라서 나타내고 있다. IMEP 0.4 MPa 이하의 저부하 조건에서 연소실 내로 공급되는 연료의 양이 많지 않으므로 국부적으로 농후한 영역이 존재하지 않아 네 연료 모두 입자상물질을 거의 배출하지 않았다. IMEP 0.4 MPa 이상의 부하조건에서는 유상액에 포함된 열분해유의 산소 성분이 입자상물질의 산화를 촉진시켜 주므로 디젤유에 비하여 입자상물질의 배출량이 낮았으며 열분해유의 함유량이 높을수록 입자상물질의 발생량이 디젤유 대비 최대 40% 감소되는 것을 확인하였다.

시험연료에 따른 미세입자의 개수농도 측정 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 입자상물질의 중량 농도를 측정한 Fig. 11의 결과에서는 합산소 연료인 열분해유가 포함된 유상액을 사용하는 경우 연료 내에 포함된 산소 성분이 입자상물질의 산화를 촉진시켜서 입자상물질의 배출량이 감소하는 경향을 보였다. 하지만 미세입자의 개수농도는 유상액을 사용하는 경우 디젤유 대비 최대 10배 이상 많이 배출하는 것을 알 수 있다. 이는 유상액에 혼합유에 포함된 산소성분으로 인하여 연소 시 발생하는 탄소계 미세입자(2.5 μm 이하)가 초미세입자(0.1 μm 이하)나 나노입자들로 분열되면서 50 nm 이하의 입

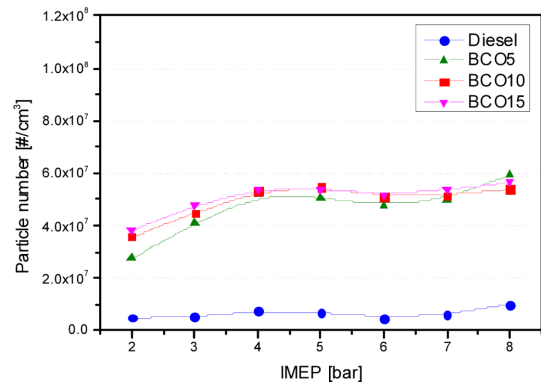


Fig. 12 Particle number concentration of test fuels according to engine loads

경크기를 가지는 핵생성모드 영역(nuclei mode)의 입자들이 증가하기 때문이다⁽¹⁷⁾. 또한, 유상액을 사용하는 경우 열분해

유의 함유량이 증가할수록 미세입자의 발생량이 약간 증가하는 경향을 보이는데 이는 열분해유가 고분자 물질로 이루어져 있으므로 핵생성 모드 영역의 입자들이 많이 발생하는 것이다⁽¹⁸⁾.

Figure 13은 엔진회전수 1,000 rpm 조건에서 저부하 조건인 IMEP 0.2 MPa과 고부하 조건인 IMEP 0.8 MPa 조건에서 측정된 미세입자의 입경별 개수농도 분포를 나타낸 그래프이다. IMEP 0.2 MPa 조건에서 측정된 결과를 살펴보면 유상액을 사용하는 경우 50 nm 이하의 핵생성모드 영역에서 디젤유에 비하여 미세입자의 배출량이 많다. 이는 앞서서도 설명하였듯이 유상액에 포함된 산소성분이 탄소입자들을 분열시켜 나노입자들이 많

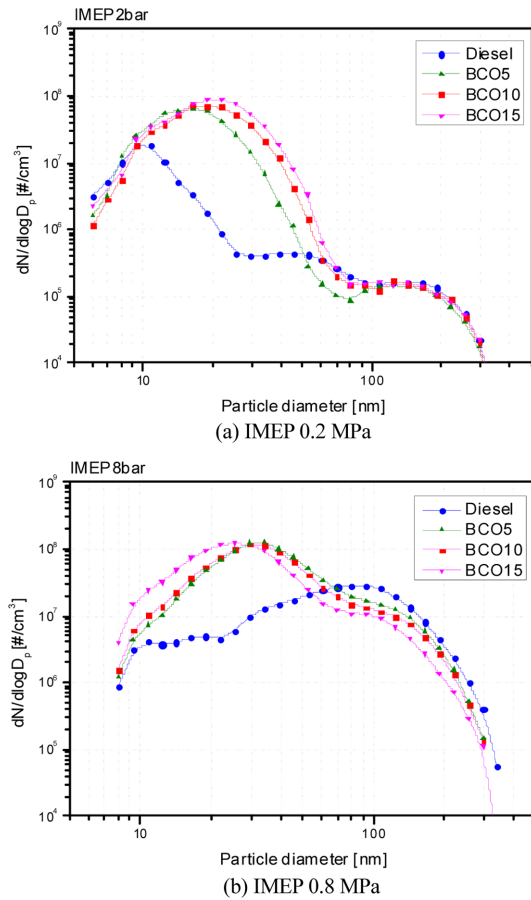


Fig. 13 Particle number size distribution of test fuels at IMEP 0.2 & 0.8 MPa

이 생성되었기 때문이다. 큰 입자들의 응결(agglomeration)로 인하여 실제로 검댕(Soot)이 생성되는 입경영역인 50-1000 nm의 입경크기를 가지는 축적모드(accumulation mode) 영역에서는

모든 연료에서 배출량이 낮았으며 이로 인하여 입자상물질의 배출량 또한 매우 낮은 것이다.

고부하 조건인 IMEP 0.8 MPa에서의 실험결과를 살펴보면 모든 연료 조건에서 부하가 증가하면 축적모드 영역에서 발생하는 미세입자의 농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 축적모드 영역에 존재하는 입자들은 입자상물질의 증량농도에 큰 영향을 미치게 되므로 부하의 증가에 따라서 입자상물질의 증량농도가 증가하는 것이다. 유상액을 사용하는 경우 여전히 핵생성 모드 영역에서 발생하는 미세입자의 농도가 디젤유에 비하여 10배 이상 높았으며 70 nm 이상의 영역에서는 디젤유를 사용

하는 경우 유상액에 비하여 미세입자의 발생량이 많았다. 유상액에 포함된 열분해유의 함유량이 증가할수록 30 nm 이상의 영역에서 미세입자의 발생량이 더 적은 것을 확인할 수 있으며 이로 인하여 고부하 조건에서 열분해유의 함유량이 높을수록 입자상물질의 증량농도가 감소하는 것이다.

4. 결 론

디젤유의 대체연료로써 근래에 연구가 진행되고 있는 목질계 열분해유를 디젤유와 유화시켜서 얻은 유상액을 사용하여 디젤엔진에서 엔진의 연소성능 및 배출가스 배출량을 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연소압 및 열방출율 곡선을 측정된 결과 유상액을 사용하는 경우 세탄가 감소로 인하여 디젤유에 비해 착화지연기간이 약간 더 길어지는 것을 확인하였다. 하지만 열분해유가 15% 함유된 유상액의 경우 예혼합연소기간이 길어지면서 열방출이 짧은 시간에 강하게 생성되므로 연소지연기간은 가장 짧게 측정되었다.

2. 모든 연료 조건에서 COV가 5% 이하로 안정적인 연소가 이루어졌다. 하지만 유상액을 사용하는 경우 열분해유에 포함된 수분이 연소 시 발생하는 열에너지를 흡수하므로 도시연료전환효율이 디젤유에 비하여 약간 낮게 측정되었다.

3. THC의 배출량은 각 연료에 따라서 동등한 수준으로 낮게 측정되었으며 CO의 경우에는 유상액이 디젤유에 비하여 점도가 높으므로 미립화 특성이 저하되어 배출량이 약간 증가하는 경향을 보였다.

4. 디젤유에 비하여 유상액을 사용하는 경우 연료에 포함된 열분해유의 산소성분으로 인하여 NOx의 배출량이 증가하여야 하지만 열분해유의 수분함유 효과로 연소 온도를 낮추어주므로 배출량은 모든 연료에서 거의 동일하게 측정되었다.

5. 유상액을 사용하는 경우 열분해유에 포함된 산소성분이 입자상물질의 산화를 촉진시켜주므로 디젤유를 사용하는 경우에 비해서 입자상물질의 배출량은 낮게 측정되었다. 하지만 연료 내의 산소성분으로 인하여 입자의 개수농도는 유상액을 사용하는 경우 디젤유에 비해서 더 높게 측정되었다.

6. 유상액을 사용하는 경우 연료 내의 산소성분으로 인해 모든 부하 조건에서 디젤유보다 핵생성 모드 영역

에서의 미세입자 농도가 더 높았다. 고부하 조건에서는 모든 연료 조건에서 축적 모드 영역에서의 미세입자 농도가 높아지는 경향을 보였으며 디젤유를 사용하는 경우 유상액에 비하여 축적모드 영역에서 농도가 높게 나타났다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 융합사업인 “바이오원유 고도화 활용기술 개발” 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) M. Ringer, V. Putsche and J. Scahill, “Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis”, *Technical Report, NREL/TP-510-377779*, 2006.
- (2) A. S. Roger, “Comparative Life Cycle Assessments : Carbon Neutrality and Wood Biomass Energy”, *RESOURCES*, Discussion paper, RFF DP 13-11, 2013.
- (3) R. T. Govinad and S. Ashish, “How much hope should we have for biofuels?”, *Energy*, Vol. 36, pp. 2055~2069, 2011.
- (4) C. Bertoli, J. D'Alessio, N. Giacomo, M. Lazzaro, P. Massoli and V. Moccia, “Running Light-Duty DI Diesel Engines with Wood Pyrolysis Oil”, *SAE paper 2000-01-2975*, 2000.
- (5) R. Prakash, R. Singh and S. Murugan, “Performance and Emission Studies in a Diesel Engine Using Bio Oil-Diesel Blend”, *2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology*, Vol. 6, pp. 428~433, 2011.
- (6) A. Shihadeh and S. Hochgreb, “Diesel Engine Combustion of Biomass Pyrolysis Oils”, *Energy & Fuels*, Vol. 14, pp. 260~274, 2000.
- (7) S. Lee, T. Kim and K. Kang, “Performance and emission characteristics of a diesel engine operated with wood pyrolysis oil”, *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 228, pp. 180~189, 2014.
- (8) D. Chiamonti, M. Bonini, E. Fratini, G. Tondi, K. Gartner, A. Bridgwater, H. Grimm, I. Soldaini, A. Webster and P. Baglioni, “Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines-Part 2: tests in diesel engines”, *Biomass & Bioenergy*, Vol. 25, pp. 101~111, 2003.
- (9) D. Chiamonti, A. Oasmaa and Y. Solantausta, “Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 1056~1086, 2007.
- (10) Y. Solantausta, N. Nylund, M. Westerholm, T. Koljonen and A. Oasmaa, “Wood-Pyrolysis Oil as Fuel in a Diesel-Power Plant”, *Bioresource Technology*, Vol. 46, pp. 177~188, 1993.
- (11) S. Lee, Y. Jang, T. Kim, K. Kang, H. Kim and J. Lim, “Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with pyrolysis oil-ethanol blend with diesel and biodiesel pilot injection”, *International Journal of Fuel and Lubricants*, Vol. 6, pp. 785~793, 2013.
- (12) M. Ikura, M. Stanculescu and E. Hogan, “Emulsification of pyrolysis derived bio-oil in diesel fuel”, *Biomass & Bioenergy*, Vol. 24, pp. 221~232, 2003.
- (13) X. Jiang and N. Ellis, “Upgrading Bio-oil through Emulsification with Biodiesel: Mixture Production”, *Energy & Fuels*, vol. 24, pp. 1358~1364, 2010.
- (14) H. Choi, Y. Choi and H. Park, “Fast pyrolysis characteristics of lignocellulosic biomass with varying reaction conditions”, *Renewable Energy*, Vol. 42, pp. 131~135, 2012.
- (15) J. Basha and R. Anand, “An experimental investigation in a diesel engine using carbon nanotubes blended water-diesel emulsion fuel”, *Journal of Power and Energy*, Vol. 225, pp. 279~288, 2011.
- (16) D. Chiamonti, G. Riccio, P. Baglioni, M. Bonini, S. Milani, I. Soldaini, R. Calabria and P. Massoli, “Sprays of biomass pyrolysis oil emulsions: Modelling and experimental investigation. Preliminary results on modelling”, *14th European Biomass Conference and Exhibition*, 17~21 October 2005.
- (17) P. Tan, Z. Hu, D. Lou and B. Li, “Particle Number and Size Distribution from a Diesel Engine with Jatropa Biodiesel Fuel”, *SAE Technical Paper*, 2009-01-2726, 2009.
- (18) A. Schonbon, N. Ladomatos, R. Williams, R. Allan and J. Rogerson, “The influence of molecular structure of fatty acid monoalkyl ester on diesel combustion”, *Combustion and Flame*, Vol. 156, pp. 1396~1412, 2009.