

## 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 고압축비 디젤엔진에서의 연소 및 배기특성

김태영\* · 이석환\*† · 장영운\* · 김호승\*\* · 강건용\*

\* 한국기계연구원 그린동력연구실, \*\* 가천대학교 대학원 기계공학과

### Combustion and Emission Characteristics of High-Compression-Ratio Diesel Engine Fueled with Bio Oil-Ethanol Blended Fuel

Tae Young Kim\*, Seok Hwan Lee\*†, Young Woon Jang\*, Ho Seung Kim\*\* and Kern Yong Kang\*

\* Engine Research Team, Korea Institute of Machinery and Materials,

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Gachon Univ.

(Received January 22, 2014 ; Revised April 2, 2014 ; Accepted April 5, 2014)

**Key Words:** Fast Pyrolysis(급속 열분해), Bio Oil(바이오 오일), Biomass(바이오 매스), Diesel Engine(디젤엔진), High Compression Ratio(고압축비), Ethanol(에탄올)

**초록:** 바이오매스 원료로부터 급속열분해 반응을 통하여 생산되는 바이오 오일은 화석연료를 대체할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 하지만, 바이오 오일은 에너지 밀도와 세탄가가 낮고 점성도가 높은 연료의 한계성이 있으므로 디젤엔진에 적용하기에는 제한적이다. 따라서, 안정적인 연소를 얻기 위해서는 바이오 오일을 세탄가가 높은 연료와 유화하거나 혼합하여 사용하여야 한다. 하지만 바이오 오일과 화석연료는 극성이 달라서 서로 혼합되지 않으며 가장 손쉽게 혼합되는 연료는 알코올계 연료이다. 본 연구에서는 바이오 오일의 연료특성을 향상시키기 위하여 에탄올 연료와 혼합하였으며, 연료의 자발화 특성을 향상시키기 위하여 세탄가 향상제인 PEG 400, 2-EHN 도 첨가하였다. 또한 최대 15%의 바이오 오일이 혼합된 혼합연료를 디젤엔진에서 안정적으로 연소시키기 위하여 고압축비 피스톤도 적용하였다.

**Abstract:** Bio-oil derived from biomass through fast pyrolysis process has the potential to displace a significant amount of petroleum fuels. However, the use of bio-oil in a diesel engine is very limited because of its poor properties, e.g., its low energy density, low cetane number, and high viscosity. Therefore, bio-oil should be emulsified or blended with other fuels that have high cetane numbers. Because bio-oil has poor miscibility with petroleum fuels, the most suitable candidate fuels for direct mixing are alcohol fuels. In this study, bio-oil was blended with ethanol, and two types of cetane improvers were added to a blended fuel to improve the self-ignition property. The two types of cetane improvers, PEG 400 and 2-EHN, made it possible for bio-oil blended fuels to combust in a diesel engine with a maximum bio-oil content of 15 wt%. A high-compression-ratio piston is also proposed for the combustion of bio-oil in a diesel engine.

### 1. 서론

화석연료의 고갈, 지구온난화, 환경오염 문제가 전세계적인 이슈로 대두됨에 따라 화석연료를 대체할 수 있는 재생 가능한 에너지원에 대한 관심

이 높아지고 있다. 하지만, 현재 사용중인 바이오 디젤, 바이오 에탄올과 같은 1 세대 바이오 연료는 식용작물로부터 생산되므로 전세계적인 곡물값 증가, 기아 문제 유발 등과 같은 부작용이 발생할 우려가 있다. 반면에, 본 연구에서 사용하는 바이오 오일은 폐목재, 역새, 갈대, 폐휴지 등의 비식용 작물로부터 생산되기 때문에 1 세대 바이오 연료의 단점을 극복할 수 있는 2 세대 바이오 연료이다. 바이오 매스를 연료로 전환하는 방법에는

† Corresponding Author, shlee@kimm.re.kr

물리적인 방법, 생물학적인 방법, 열화학적인 방법 등이 존재하며 바이오 오일은 열화학적 방법 중 급속 열분해 과정을 통해서 생산된다. 고체상의 바이오 매스를 급속열분해 장치로 공급하면 산소가 없는 환경 속에서 2 초 이내에 열분해 되어 증기상으로 배출되며, 그 중 휘발성 물질(Volatiles)이 열교환기를 통과하여 액상으로 응축되는 것이 바이오 오일이다. 바이오 오일은 에너지 밀도가 약  $22 \text{ GJ/m}^3$  으로 고체상의 원재료 바이오 매스(약  $9 \text{ GJ/m}^3$ )나 가스화 공정으로 얻은 연료에 비해 높은 에너지 밀도를 가지며, 액상 연료로서 보관 및 수송 측면에 장점을 가지고 있다.

이러한 바이오 오일의 장점 때문에 목재가 풍부한 나라에서는 일찍이 바이오 오일의 제조 방법, 연소 특성, 발전 시스템으로의 적용 기술에 대한 연구가 수행되어 왔다. Kasper 등<sup>(1)</sup>의 연구를 시작으로 바이오 오일을 가스터빈을 비롯한 발전 시스템에 적용하려는 연구가 수행되었다.<sup>(2-6)</sup> 또한 바이오 오일의 터빈에서의 연소특성을 다른 연료의 연소특성과 비교한 연구도 수행되었다.<sup>(7)</sup> 터보 기계류에서의 바이오 오일의 연소특성은 바이오 오일의 미립화와 밀접한 연관이 있어서 바이오 오일의 터빈 내 분무특성 및 연료 입경 크기 분석, 분사노즐에 의한 영향에 대한 연구도 주목 받고 있다.<sup>(8,9)</sup> 바이오 오일을 디젤엔진에 적용하려는 연구도 다양하게 진행되어 왔다.<sup>(10-14)</sup> 이 연구들에서 나온 공통적인 결과로는 바이오 오일 단독으로는 기존 디젤엔진에서 연소가 되지 않는다는 점과 바이오 오일이 연료 공급계를 비롯한 엔진 구성 요소의 심각한 손상을 야기한다는 점이다. 이러한 결과는 바이오 오일의 물성이 기존 화석 연료와 다르기 때문에 나타나는 것으로 바이오 오일의 대표적인 물리 화학적 특성을 정리하면 다음과 같다.

- 바이오 오일은 세탄가가 낮기 때문에 기존의 디젤엔진에서는 자발화되지 않는다.<sup>(15)</sup> 따라서 세탄가 향상제 등의 첨가를 통해 자발화 특성을 향상시키거나 자발화 특성이 우수한 연료를 파일릿 분사하여 고온의 분위기를 만들어 주어야 연소가 가능하다.
- 바이오 오일은 동점도가 높으며 화학적으로 불안정하기 때문에 중합 작용에 의해 끈적이는 고체상 물질이 스스로 생성되어 시간에 따라 점도가 더욱 증가한다. 바이오 오일의 높은 동점도 및 중합 작용에 의해 발생하는 고체상 물질 때문에 기존의 디젤용 연료 공급계

에 바이오 오일을 적용하는 경우 막힘 현상이 발생한다. 또한 바이오 오일 연소시 탄소계 입자들이 발생하여 엔진 연소실과 밸브, 피스톤 등에 퇴적되어 성능이 저하될 수 있다. 따라서 바이오 오일을 알코올 용매 혼합하여 점도를 낮추고 중합 작용을 억제하여 사용할 필요가 있다.

- 바이오 오일은 높은 산도(Acidity)와 수분 함유량을 갖는다. 높은 산도와 수분 함유량은 금속 재질의 부식을 유발하여 장시간 엔진을 작동시킬 경우 고장이 발생할 수 있다. 또한 수분을 포함하고 있는 바이오 오일은 극성 연료로서 비극성물질인 탄화수소로 대부분 이루어진 기존의 화석연료와 혼합되지 않는다. 이러한 이유로 바이오 오일은 단독으로 사용하기 보다는 첨가제를 이용하여 물성을 향상시켜 사용되어야 하며, 첨가제는 바이오 오일과 혼합되었을 때 서로 간의 분리(Separation)가 일어나지 않고 안정적인 상태를 유지할 수 있는 물질이어야 한다.

이와 같은 바이오 오일의 단점을 극복하여 디젤 엔진에 적용하고자 하는 연구가 진행 되었다<sup>16-19)</sup>. 대표적인 방법으로는 유상화(Emulsification) 방법인데, 이는 바이오 오일을 세탄가가 높은 다른 연료와 혼합하여 물성이 향상된 바이오 오일 유상액(Emulsion)을 제조하는 방법이다. 바이오 오일을 적절한 계면활성제(Surfactant)와 함께 디젤이나 바이오 디젤과 혼합하고 고온에서 교반하면 바이오 오일이 함유된 유상액 연료가 생성된다. 이 유상액 연료를 엔진에 적용할 경우 엔진의 내구에 문제를 미치지 않고 디젤이나 바이오 디젤과 비슷한 수준의 연소 특성을 얻을 수 있다. 본 연구 그룹에서는 디젤이나 바이오디젤 등을 파일릿 분사하여 생성된 화염으로 바이오 오일을 연소시키는 이중 분사 연구도 진행하였다.<sup>(19,20)</sup> 파일릿 연료를 바이오 오일 혼합 연료와 비슷하거나 조금 더 진각된 시기에 분사하여 화염을 생성하는 경우 연소 효율 및 배출가스 특성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 유상화 방법과 파일릿 분사를 이용하는 이중 분사 방법은 각각 바이오 오일 유상액 제조가 복잡하고 바이오 오일 함유량이 제한적이며, 이중 분사 장치가 필요하기 때문에 실차 적용성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 바이오 오일과 혼합되었을 때 서로간의 분리가 일어나지 않고 안정적인 상태를 유

지하면서 연료의 발열량, 동점도, 세탄가를 향상시키기 위하여 알코올계 용매 및 세탄가 향상제를 혼합하여 바이오 오일의 연료 물성치를 향상시켰다. 이에 더하여 파일럿 분사 없이 바이오 오일 혼합 연료가 연소실 내에서 자발화(Auto-ignition) 할 수 있는 환경을 조성할 수 있는 고압축비 엔진을 활용함으로써 실차 적용성을 향상시키는 연구를 수행하였다. 바이오 오일 함량이 다른 4 종류의 혼합 연료를 제조하여 고압축비 디젤엔진에서의 연소 및 배출가스특성을 파악하였으며 디젤 연료의 연소와 비교 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 연료 및 고압축비 피스톤

실험에 사용한 바이오 오일은 본 연구원에서 보유하고 있는 바이오 오일 생산 플랜트를 이용하여 제조되었으며, 바이오매스 원료로는 톱밥을 사용하였다. 생산된 바이오 오일의 밀도 및 동점도는 비중계와 진동형 점도계(Vibro viscometer, A&D company, limited)로 측정하여 Table 1에 나타냈다. 수분 함유량, 발열량, 성분 등은 한국석유관리원(K-Petro)에 의뢰하여 측정하였다. 바이오 오일은 40° C에서 약 7.5 cSt의 동점도를 보이며 이것은 디젤유(약 2.7 cSt) 대비 약 3배에 가까운 수치이다. 바이오 오일은 높은 동점도를 가지고 있기 때문에 연소실 내에 분사되었을 때 미립화특성이 악화된다. 높은 동점도와 더불어 바이오 오일 내에 존재하는 고체상 입자나 중합 작용에 의해 생성되는 끈적이는 고체상 물질은 유동을 저해하고 펌프나 연료 공급 라인 내에 퇴적되어 기계 장치의 고장이나 연료 공급의 차단 등의 문제점을 유발한다. 발열량의 경우 바이오 오일은 15.9 kJ/kg의 저위 발열량을 가지며 45.8 kJ/kg의 디젤유 대비 약 1/3 수준이며 이것은 바이오 오일의 높은 산소 함유량에 기인한다. 본 연구에서 사용된 바이오 오일은 약 34%의 수분을 함유하고 있는 것으로 측정되었으며 pH 2.5 정도의 높은 산도를 띠고 있다. 바이오 오일의 세탄가는 보고서마다 다르지만 약 5~25 정도로 밝혀져 있으며<sup>15)</sup> 디젤에 비하여 약 1/2에서 1/10 수준으로 볼 수 있다. 이처럼 디젤과 매우 다른 물성을 가진 바이오 오일을 직접 엔진에 적용할 경우 단기간 내에 연료 공급 계통 및 엔진 구성 요소의 고장이 발생할 뿐만 아니라 낮은 자발화특성으로 연소가 이루어 지지 않는다.

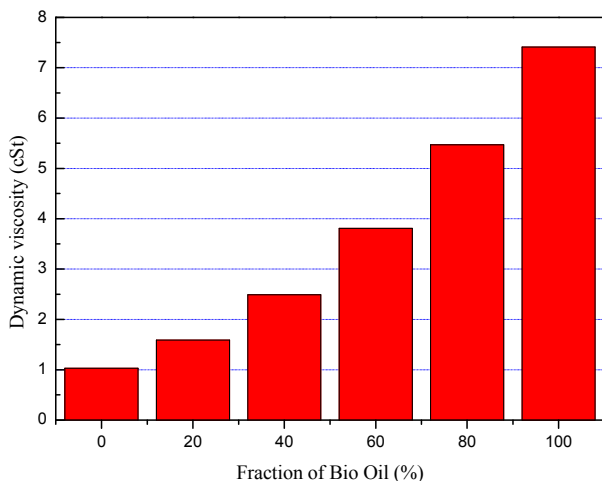
본 연구에서는 바이오 오일을 알코올계 용매와

세탄가 향상제와 혼합하여 물성을 향상시켜 연료분사계의 고장 없이 엔진에 적용할 수 있도록 하였다. 혼합에 사용된 알코올계 용매는 에탄올이며, 에탄올은 유기용매로서 바이오 오일 내에 존재하는 고체상의 물질을 용해할 수 있고 바이오 오일의 중합 작용에 의한 고체상 물질 발생을 억제할 수 있다. 또한 에탄올은 1.07 cSt의 낮은 동점도를 갖기 때문에 바이오 오일과 혼합될 경우 혼합 연료의 동점도를 적당한 수준으로 낮출 수 있다. Fig. 1은 바이오 오일을 에탄올과 혼합하였을 때 바이오 오일 함량에 따른 동점도를 비중계와 진동형 점도계로 측정된 결과이다. 동점도 측정 결과로부터 바이오 오일과 에탄올이 4:6 정도의 비율로 혼합될 경우 디젤과 비슷한 수준의 동점도를 가지는 것을 알 수 있다. 에탄올의 세탄가는 약 8-10으로 낮기 때문에 바이오 오일과 에탄올의 혼합 만으로는 기존 디젤 엔진에서 자발화 연소가 일어나지 않는다. 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 바이오 오일-에탄올 혼합 연료와 상 분리 없이 안정적으로 혼합되면서 혼합 연료의 세탄가를 향상시켜 줄 수 있는 두 종류의 세탄가 향상제, PEG(Polyethylene Glycol) 400과 2-EHN(Ethylhexyl Nitrate)를 첨가하였다. 바이오 오일이 연소 및 배출가스특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 바이오 오일 함량이 다른 4 종류의 혼합 연료를 조성하여 실험에 사용하였다. 먼저 질량 기준으로 에탄올 75%, PEG 400 20%, 2-EHN 5%, 윤활성 향상제인 Lubrizol을 500 ppm 혼합하여 기본 연료를 조성하였다. 기본 연료에 바이오 오일을 혼합하여 혼합 연료를 조성할 경우 바이오 오일의 함량만큼 에탄올의 함량을 감소시켰다. Table 1은 실험에 사용된 연료의 특성을 보여준다. Blend A~D는 바이오 오일 혼합 연료로서 Blend A에서 Blend D로 갈수록 바이오 오일의 함량이 질량 비율 0%에서 최대 15%까지 5%씩 증가한다.

바이오 오일-에탄올 혼합 연료에 두 종류의 세탄가 향상제를 혼합하여 자발화특성이 향상된 연료를 제조하였지만, 이 연료는 기본 디젤 엔진(압축비 17.1)에서 자발하지 않는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 엔진의 압축비를 증가시켜서 바이오 오일-에탄올 혼합 연료가 안정적으로 자발할 수 있는 환경을 조성하였다. 기본 엔진에 사용되는 피스톤 형상으로부터 피스톤 보울(Bowl)의 깊이와 직경을 감소시켜 보울의 공간을 94.08에서 66.31 cm<sup>3</sup>로 줄임으로써 압축비를 22로 증가시켰다. Fig. 2는 엔진 압축비가 22로 향상된 엔진 피스톤의 형상을 보여준다.

**Table 1** Properties of the tested fuels

Fuel	Viscosity (cSt at 40 °C)	LHV (kJ/kg)	Water (%)	C (wt%)	H (wt%)	O (wt%)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Cetane number
Diesel	2.7	45.8	-	85.0	12.6	-	821	52.6
Bio oil	7.5	15.9	33.6%	41.0	19.1	48.8	1194.5	5~25 <sup>15)</sup>
Blend A (Bio oil 0 wt%)	9.0	26.3	0.2	52.3	12.2	35.1	853.5	N/A
Blend B (Bio oil 5 wt%)	9.3	25.7	1.9	21.7	12.5	35.8	874.6	N/A
Blend C (Bio oil 10 wt%)	9.6	25.2	3.6	51.2	12.8	36.5	895.8	N/A
Blend D (Bio oil 15 wt%)	9.9	24.6	5.2	50.6	13.1	37.2	916.9	N/A

**Fig. 1** Dynamic viscosities of bio oil-ethanol blended fuels according to the variation of bio oil content**Fig. 2** A newly fabricated piston with the compression ratio of 22

## 2.2 실험 방법

Table 2 는 실험에 사용한 엔진 시스템의 제원을

보여준다. 엔진은 4 행정 직접 분사식 단기통 디젤 엔진이며 배기량은 1858 cc 이다. 바이오 오일에 존재하는 고체상 물질이 연료 분사 계통에 퇴적될 가능성이 있는 경우 기계식 펌프와 분사기를 사용하는 것이 유리하나,<sup>(21)</sup> 본 연구에서는 에탄올을 적용하여 바이오 오일 내의 고체상의 물질을 용해하였기 때문에 연료를 고압으로 분사할 수 있는 전자식 분사 시스템을 적용하였다. Fig. 3 은 실험 장치의 개략도를 나타내고 있다. 단기통 디젤 엔진의 동력특성을 제어하기 위해서 100 kW 급 DC 동력계를 사용하였으며, 연소특성 분석을 위하여 글로우 플러그 위치에 압력 센서(Kistler, 6052C)와 이의 설치를 위한 어댑터(Kistler 6542Q27)를 장착하여 엔코더 신호와 동기시켜 연소실 압력을 크랭크각 1 도 단위로 측정하여 열방출율 곡선을 계산하였다. 흡입 공기량 측정은 저장소(Reservoir) 상단에 설치한 충류 유량계(Meriam Inst. Co.)를 이용하여 측정하였다. 연료 분사량 및 소비 에너지는 스톱 위치와 저울을 사용하여 단위 시간당 공급된 연료의 질량과 발열량 정보를 이용하여 계산하였으며, 공연비 측정에는 광대역 공연비 센서(ETAS, LA4)를 이용하였다. 가스상 배기배출물은 배출가스 분석기(AVL, AMA i-60)를 이용하여 분석하였으며, 입자상물질의 중량 농도를 측정하기 위해 광산란 방식의 Aerosol monitor(TSI, Dusttrak 6550)를 사용하였다. 배출가스의 입경별 개수 농도를 측정하기 위하여 5.6~523 nm 의 입경 크기를 가지는 입자들의 수농도 및 입경별 수농도 분포를 1 초에 한 번씩 측정할 수 있는 FMPS(Fast Mobility Particle Sizer, TSI, 3091)를 이용하였다.

본 연구에서 사용된 엔진은 대형 디젤엔진을 베이스로 단기통으로 개조한 엔진이므로 엔진의 성

Table 2 Engine specifications

Specifications	Resources
Type	4 stroke DI diesel engine
Cylinders	1
Displacement	1,858 cc
Intake system	Natural aspiration
Bore×Stroke	130×140 mm
Compression ratio	22
Injection system	Common rail injection
Nozzle diameter	8×φ 0.124 mm

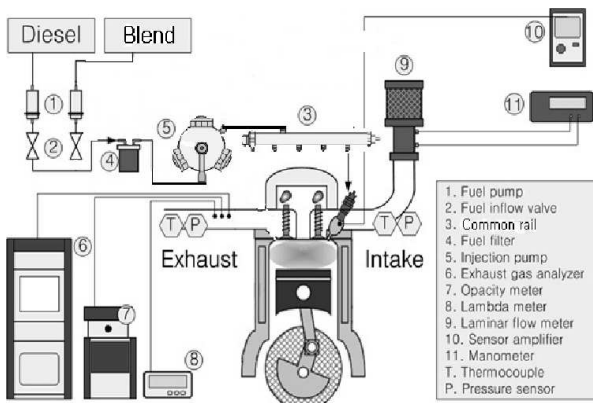


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

능 및 안정성을 고려하여 엔진 회전 속도를 1,000 rpm 으로 고정하였다. 분사기로 공급되는 연료의 분사압을 120 MPa 로 고정한 후 분사시기 및 엔진 부하 변화(IMEP 0.2 ~ 0.8 MPa)에 따라서 수행되었으며 연소특성, 배출가스의 배출특성을 파악하였다. 바이오 오일 함유량이 다른 4 종류의 바이오 오일-에탄올 혼합 연료와 디젤 연료가 실험에 사용되었으며, 연료 교체시 연료 공급 라인에 잔존하는 기존 연료를 모두 제거하여 연료 혼합에 의한 효과를 배제하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 엔진 연소특성

##### 3.1.1 연소 안정성

Fig. 4 는 실험에 사용한 5 종류의 연료에 대하여 IMEP 0.2~0.8 MPa 의 엔진 부하 범위에서의 연소 안정성을 나타낸 것이다. 연소 안정성은 해

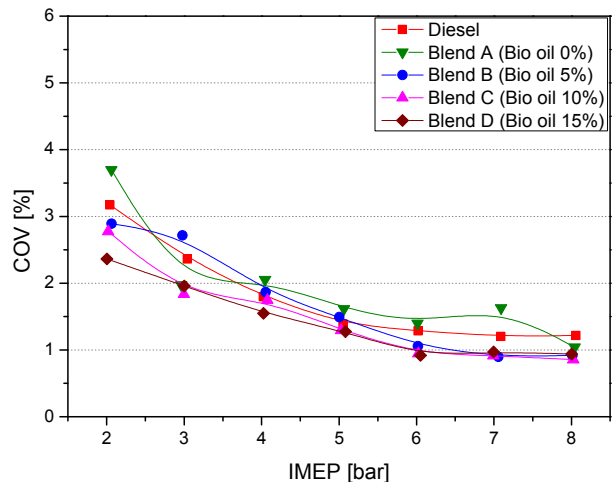


Fig. 4 Combustion stability (COV) for diesel fuel and bio oil blended fuels under the engine loads of IMEP 0.2 MPa ~ 0.8 MPa

당 연료가 연소실 내에서 200 사이클에 걸쳐 연소하는 동안 획득한 압력 결과로부터 도시평균 유효압력 변동계수(COV<sub>IMEP</sub>, Coefficient of variance in indicated mean effective pressure)를 도출한 것이다. 연료마다 각각의 부하조건에서 연료 분사시기를 크랭크 각도 3씩 변화시켜 가며 최적의 연료 분사 시기를 찾아낸 후 결과를 획득하였다. 모든 연료에 대해 부하가 증가할수록 연소 안정성이 대체적으로 향상되는 경향이 나타나며, 가장 연소 안정성이 낮은 것으로 나타난 IMEP 0.2 MPa 의 부하 조건에서도 본 연구에서 안정적인 연소의 기준으로 삼고 있는 COV<sub>IMEP</sub> 5% 이내의 결과가 나타남을 알 수 있다. 즉, 바이오 오일-에탄올 혼합 연료가 압축비 22 의 환경에서 안정적으로 연소가 됨을 확인할 수 있다. 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 경우 바이오 오일의 함량이 증가하고 에탄올 비율이 감소할수록 연소 안정성이 약간 더 향상되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 본 연구에서 사용한 바이오 오일의 세탄가가 에탄올의 세탄가보다 높기 때문인 것으로 파악된다.

##### 3.1.2 압력 선도 및 열방출률 곡선

모든 부하조건에 대하여 출력 및 배기특성을 기준으로 각각 연료의 최적 분사 시기를 찾은 후, 압력 선도와 열방출률 곡선 결과를 획득하였다. Fig. 5 는 저부하 조건인 IMEP 0.2 MPa 에서 각 연료에 대한 연소실 압력 선도와 열방출률 곡선을 나타낸다. IMEP 0.2 MPa 조건에서 디젤은 BTDC 9 CAD 에서 분사하였으며 바이오 오일-에탄올 혼합 연료는 BTDC 12 CAD 에서 분사하였다. 연소실 압력 결과를 살펴보면, 착화 지연이 매우 짧게 나타나는 디젤과 달리 바이오 오일-에탄올

혼합 연료는 착화 지연이 상당히 길게 나타나며 TDC 근방부터 열방출율이 양의 값으로 나타난다. 이것은 부하가 가장 낮은 IMEP 0.2 MPa 에서는 세탄가가 낮은 바이오 오일-에탄올 혼합 연료가 자발화할 만큼 충분히 높은 연소실 온도 조건이 조성되지 않기 때문이다. 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 경우 연료 분사부터 연소가 발생하기 전까지 열방출율이 음의 값으로 크게 떨어지는데, 이것은 바이오 오일-에탄올 혼합 연료에 포함된 물의 증발잠열 및 에탄올의 기화열에 의한 효과로 볼 수 있다. 바이오 오일-에탄올 혼합 연료는 디젤 대비 연소 기간이 짧게 나타난다. 이것은 연료의 낮은 세탄가와 높은 기화특성에 기인한 것으로 여겨진다. 연료 분사시 연료가 자발하지 않고 연료 중의 에탄올이 기화하면서 연료가 연소실 곳곳으로 분산된 후 압축 행정이 진행되어 연료가 자발할 수 있는 온도 조건이 되었을 때에 연소실에 넓게 분

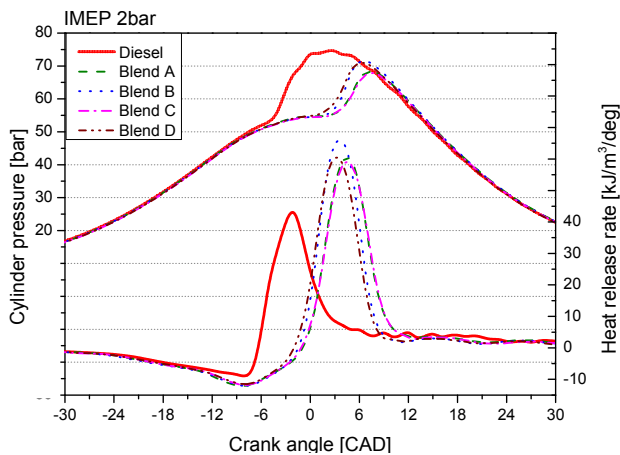


Fig. 5 Cylinder pressure and heat release rate curves for diesel fuel and bio oil blended fuels at IMEP 0.2 MPa

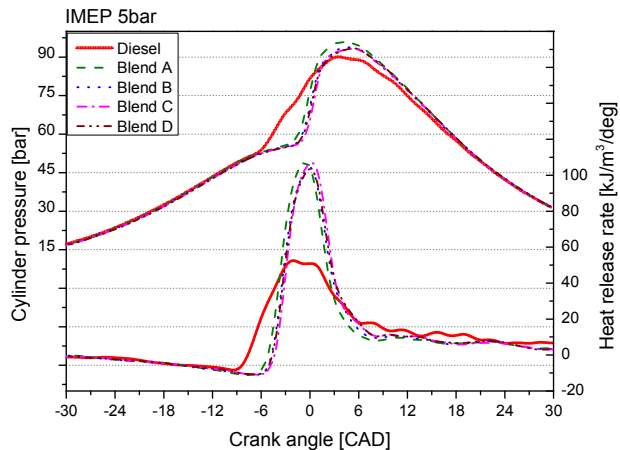


Fig. 6 Cylinder pressure and heat release rate curves for diesel fuel and bio oil blended fuels at IMEP 0.5 MPa

포한 연료가 한꺼번에 연소되기 때문에 판단된다. 따라서 디젤의 열방출률 곡선에서는 예혼합 연소 및 확산 연소특성이 모두 나타나는 것과 달리 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 경우는 예혼합 연소특성만이 지배적으로 나타난다.

Fig. 6 은 IMEP 0.5 MPa 조건에서 각 연료를 연소시켰을 때 나타나는 연소실 압력 선도와 열방출률 곡선을 보여준다. IMEP 0.5 MPa 조건에서는 모든 연료에 대해 최적 연료 분사 시기가 BTDC 10 CAD로 나타났다. IMEP 0.5 MPa 조건에서도 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 착화 지연이 디젤에 비하여 비교적 길게 나타나지만 IMEP 0.2 MPa 의 경우보다 상당히 짧아진 것을 알 수 있다. 엔진 부하가 증가할수록 바이오 오일-에탄올 혼합 연료가 효과적으로 연소될 수 있는 연소실 온도 조건이 조성되는 것으로 볼 수 있다. IMEP 0.2 MPa 조건에서와 마찬가지로 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 낮은 자발화특성과 높은 기화특성에 의해 연료가 연소실 내에서 동시다발적으로 연소되어 예혼합 연소특성이 두드러지며 디젤 대비 연소 기간이 짧고 최대 열방출량은 높게 나타난다.

### 3.1.3 도시 에너지 소비율 및 연료 전환 효율

혼합유의 경우 바이오 오일/에탄올/PEG 400/2-EHN 의 각기 발열량이 다른 네 가지 성분이 함유되어 있으므로 도시 연료 소비율(Indicated fuel specific consumption; ISFC)을 사용하여 연료 소모량을 비교하는 것은 적당한 방법이 아니다. 이 경우에는 도시 에너지 소비율(Indicated specific energy consumption; ISEC)를 사용하는 것이 더 타당하다. 도시 에너지 소비율과 각 연료의 발열량을 토대로 계산되어진 도시 연료 전환효율(Indicated fuel conversion efficiency)을 Fig. 7 과 8 에 각각 나타내었다. 모든 부하 조건에서 혼합 연료를 사용하는 경우 도시 에너지 소비율이 디젤에 비해 최대 15% 높은 것을 확인할 수 있는데, 이는 동일 부하조건 달성을 위해 많은 양의 에너지가 필요하다는 의미이다. 이와 동시에 도시 연료 전환효율은 혼합 연료를 사용하는 경우 디젤에 비해서 10% 이상 낮은 것으로 측정되었다. 이는 혼합 연료에 포함된 에탄올 성분이 연소실 내에서 기화되면서 열을 흡수하는 기화열 효과 및 바이오 오일에 포함된 수분성분이 연소 과정에서 열에너지를 흡수하는 효과에 기인하여 효율이 악화되는 것이다. 바이오 오일-에탄올 혼합 연료는 모든 부하 범위에서 비슷한 수준의 도시 에너지 소비율과 도시 연료 전환 효율이 나타나나, 바이오 오일 함유량

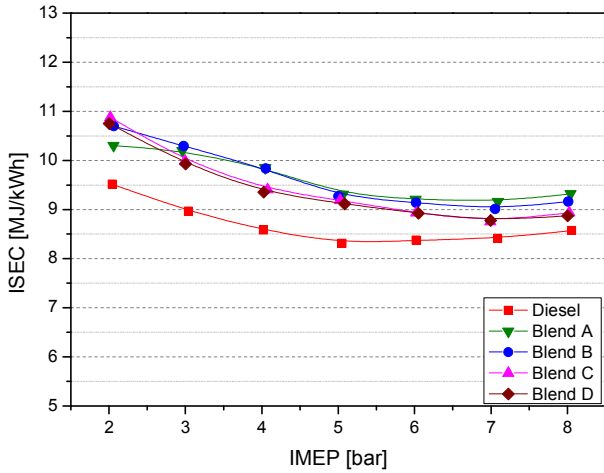


Fig. 7 Variation of indicated specific energy consumption for diesel and bio oil blended fuels

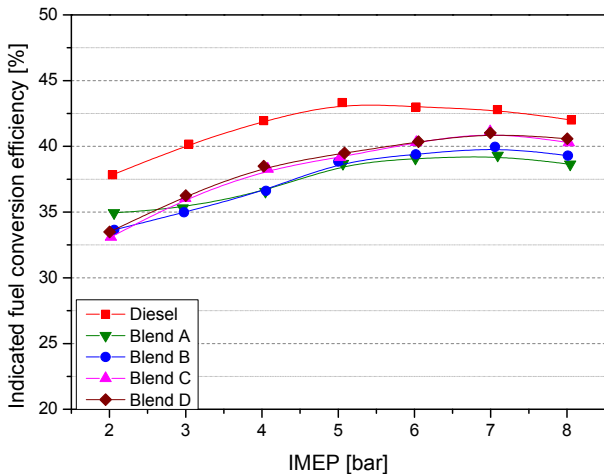


Fig. 8 Variation of indicated fuel conversion efficiency for diesel and bio oil blended fuels

이 증가할수록 에너지 소비가 감소하면서 연료 전환 효율이 약간 더 증가하는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 가스상 배출가스 배출특성

Fig. 9부터 11은 각각 연료별 부하에 따른 일산화탄소(CO), 미연탄화수소(THC), 질소산화물(NOx)의 배출량을 나타낸다.

#### 3.2.1 일산화탄소 배출특성

디젤의 경우 엔진 부하 조건에 무관하게 낮은 CO 배출특성을 보이며 부하가 증가할수록 배출량이 약간 증가한다. 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 경우, IMEP 0.2 MPa 조건에서 원활하게 자발하지 않기 때문에 불완전 연소에 의해 높은 일산화탄소 배출량을 보인다. IMEP 0.3 ~ 0.7 MPa의 부하 범위에서는 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 경우 낮은 일산화탄소 배출량을 보이며 디젤 연소의 경

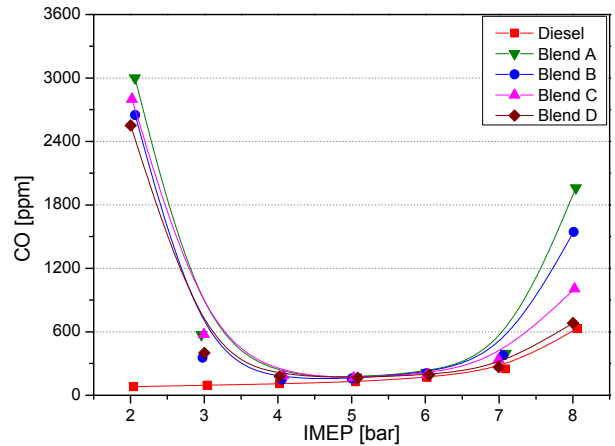


Fig. 9 Variation of CO emissions for diesel and bio oil blended fuels

우와 비교할만한 수준으로 나타난다. 그러나 부하가 IMEP 0.8 MPa로 증가하게 되면 대부분의 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 일산화탄소 배출량이 디젤 대비 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 주로 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 낮은 발열량과 바이오 오일 혼합 연료 연소에 최적화되지 않은 엔진 시스템에 기인한다. 실험에 사용된 바이오 오일-에탄올 혼합 연료는 발열량이 낮은 연료의 혼합으로 구성되어 있다. 디젤 대비 약 1/3 정도의 발열량을 갖는 바이오 오일(15.9 kJ/kg)을 비롯하여 에탄올(26.9 kJ/kg), PEG 400(23.5 kJ/kg), 2-EHN(27.6 kJ/kg) 모두 디젤의 발열량(45.8 kJ/kg)에 미치지 못한다. 따라서 동일 부하 조건에서 바이오 오일-에탄올 혼합 연료는 디젤 대비 오랜 기간 동안 연료가 분사된다. 부하가 증가함에 따라 연료 분사량이 증가하면서 IMEP 0.8 MPa의 부하에서는 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 경우 일부 연료가 TDC를 넘어서까지 분사되게 된다. 연료 분사 시기를 진각하여 배출특성을 향상시킬 수 있으나, IMEP 0.8 MPa 조건에서 BTDC 12 CAD보다 진각된 시기에 바이오 오일-에탄올 혼합 연료가 분사될 경우 상당한 수준의 진동 및 소음이 생기는 디젤 노킹이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 디젤 노킹이 심각하게 발생하지 않으면서 최대한 진각할 수 있는 BTDC 12 CAD를 최적의 분사 시기로 정하였으며, 이 경우 일부 연료가 TDC를 넘어서까지 분사되어야 IMEP 0.8 MPa를 만족할 수 있게 되어 연료의 불완전 연소에 의한 CO 증가가 나타난다.

#### 3.2.2 미연탄화수소 배출특성

미연탄화수소 배출량도 일산화탄소 배출량과 비

슷한 경향성을 보인다. 디젤의 경우는 부하에 관계없이 매우 낮은 수준의 미연탄화수소 배출특성을 보인다. 반면 자발화특성은 나빠면서 기화특성이 우수하여 연료의 분산이 잘 일어나는 바이오 오일-에탄올 혼합 연료는 비교적 높은 미연탄화수소 배출특성을 보인다. 가장 낮은 부하 조건인 IMEP 0.2 MPa 에서는 바이오 오일-에탄올 혼합 연료가 자발할 수 있는 환경이 갖추어지지 않고 착화 지연이 길어지면서 미연탄화수소가 많이 배출된다. 부하가 IMEP 0.3 MPa 이상으로 증가하면서 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 미연탄화수소 배출량이 감소하여 디젤과 비슷한 수준으로 나타났다가 엔진 부하가 IMEP 0.6 MPa 이상이 되면서 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 미연탄화수소의 배출량이 다시 증가하기 시작한다. 이것은 점도와 밀도가 높아 미립화특성이 떨어지고 연료 침투 거리가 길 것으로 예상되는 바이오 오일-에탄올 혼

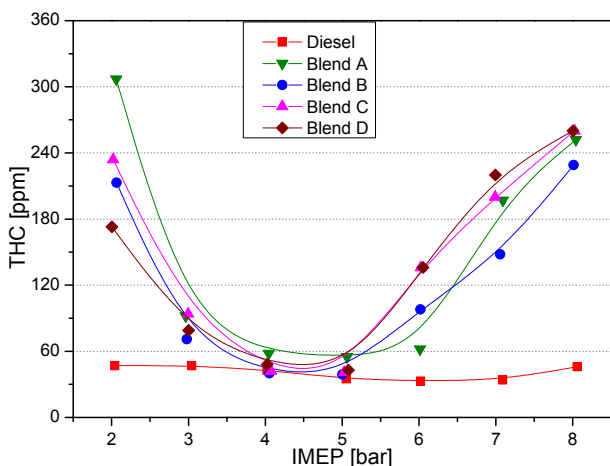


Fig. 10 Variation of THC emissions for diesel and bio oil blended fuels

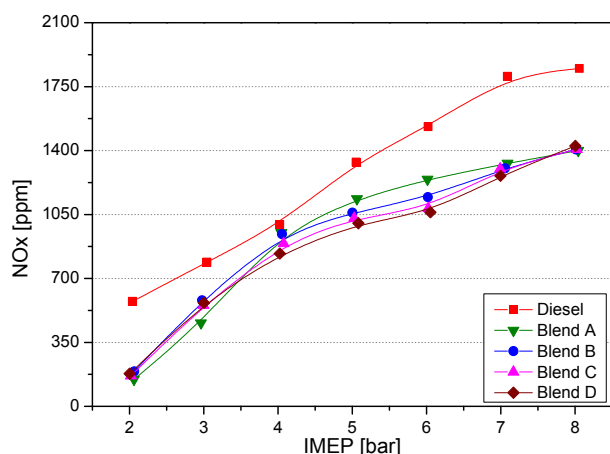


Fig. 11 Variation of NOx emissions for diesel and bio oil blended fuels

합 연료가 고부하에서 대량으로 분사되면서 고압 축비 피스톤의 얇은 크라운 부에 침적되는 영향과 발열량이 낮은 혼합 연료의 특성상 분사되는 연료량이 많아 농후한 영역이 넓게 형성되는 영향 때문으로 예상된다.

### 3.2.3 질소산화물 배출특성

바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 질소산화물 배출량은 동일 부하 조건에서 디젤 연소의 경우보다 낮게 나타난다. 이것은 바이오 오일의 높은 수분 함유량과 연료의 가장 많은 부분을 차지하는 에탄올의 기화특성에 의한 Thermal NOx 감소 때문이다. 앞선 연구에서 사용한 바이오 오일 유상화 연료는 바이오 오일의 함유량이 상대적으로 낮으며 연료의 대부분이 디젤 혹은 바이오 디젤로 구성된 연료이기 때문에 바이오 오일에 의한 NOx 저감 효과가 미비한 것과 대비된다. 더불어 본 연구에서 사용된 바이오 오일 혼합 연료는 낮은 세탄가 등 연료특성이 우수하지 못하여 효율적으로 연소가 일어나지 않아 상대적으로 낮은 연소 온도를 갖는 것으로 보인다. 부하가 낮은 IMEP 0.2 MPa 과 분사되는 연료량이 많은 IMEP 0.6 MPa 이상의 조건에서는 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 연소가 효율적으로 이루어지지 않으면서 질소산화물 배출량이 낮게 나타난다. 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 연소가 비교적 잘 일어나면서 미연탄화수소, 일산화탄소 배출량이 감소하는 IMEP 0.3~0.5 MPa 영역에서는 질소산화물 배출량이 비교적 크게 증가하는 것으로 나타난다.

### 3.3 입자상 물질 배출특성

Fig. 12 에서는 광산란 방식의 Aerosol monitor 인 Dusttrak 을 사용하여 측정된 시험연료에 따른 입자상물질(PM)의 중량 농도를 각각의 부하에 따라서 나타내고 있다. 본 연구에서 사용한 고압축비 피스톤은 압축비 향상을 위해 보울의 형상과 치수를 임의적으로 조절한 것이기 때문에 연료의 분무 및 연소특성이 반영되지 못했다. 이에 따라 디젤의 경우 매우 높은 PM 배출특성을 보였다. 디젤의 경우 IMEP 0.2 MPa 에서 0.3 MPa 의 조건에서는 바이오 오일-에탄올 혼합 연료와 비슷한 수준의 PM 배출량을 보이지만, 부하가 증가할수록 급수적으로 증가하여 IMEP 0.7 MPa 에서 0.8 MPa 조건에서는 100 배 이상의 배출량이 나타난다. 바이오 오일-에탄올 혼합 연료는 연료를 구성하는 바이오 오일(48.8%), 에탄올(34.7%), PEG 400(38.6%), 2-EHN(27.4%)이 모두 높은 산소 함량을 보이기 때



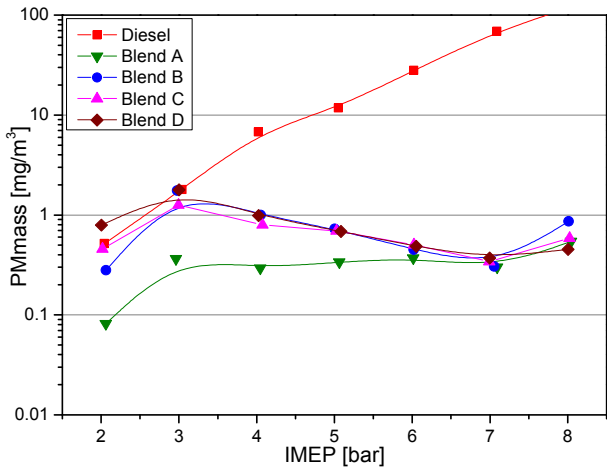


Fig. 12 Variation of PM emissions for diesel and bio oil blended fuels

문에 PM 배출량이 적다. 바이오 오일-에탄올 혼합 연료는 대부분의 부하 조건에서 PM의 배출량이  $1 \text{ mg/m}^3$  이하로 매우 낮게 측정되었다.

시험연료에 따른 미세입자의 개수농도 측정결과를 Fig. 13에 나타내었다. 사용 연료에 따른 PM의 중량농도를 측정한 Fig. 12의 결과를 살펴보면 디젤을 사용하는 경우 혼합 연료에 비하여 PM의 배출량이 훨씬 높게 나타났지만 미세입자의 수농도는 혼합 연료를 사용하는 경우 디젤보다 배출량이 높게 측정되었다. 이는 바이오 오일을 비롯하여 함께 혼합된 에탄올( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ), PEG( $\text{C}_{18}\text{H}_{38}\text{O}_{10}$ ), 2-EHN( $\text{C}_8\text{H}_{17}\text{NO}_3$ )의 경우 분자 간 결합 사이에 산소 분자가 연결되어 있는 구조를 갖게 되는데 혼합 연료에 포함된 높은 산소성분으로 인하여 연소 시 발생하는 탄소계 미세입자( $2.5 \mu\text{m}$  이하)가 초미세입자( $0.1 \mu\text{m}$  이하)나 나노입자들로 분열되면서 핵생성모드(Nuclei mode) 영역( $50 \text{ nm}$  이하)의 크기를 가지는 입자들이 증가하기 때문이다.

Fig. 14에서는 중부하 조건인 IMEP 0.5 MPa 조건에서 측정한 미세입자의 입경별 개수농도 분포를 나타내었다. 혼합 연료를 사용하는 경우  $50 \text{ nm}$  이하의 핵생성모드 영역에서 디젤을 사용하는 경우에 비하여 미세입자의 배출량이 많다. 이는 앞서서도 설명하였듯이 혼합 연료에 포함된 산소성분이 탄소 입자들을 분열시켜 나노입자들이 많이 생성되었기 때문이다. 큰 입자들의 응결(Agglomeration)로 인하여 실제로 검댕(Soot)이 생성되는 입경영역인  $50\text{-}1000 \text{ nm}$ 의 입경크기를 가지는 축적모드(Accumulation mode) 영역에서는 디젤의 경우 혼합 연료에 비하여 많은 입자들이 발생하였으며  $100 \text{ nm}$  부근에서는 50배 이상 농도가 높게 측정되었다. 이로 인하여 디젤을 사용하는 경우 Fig. 12의 결과에서 보듯이 혼

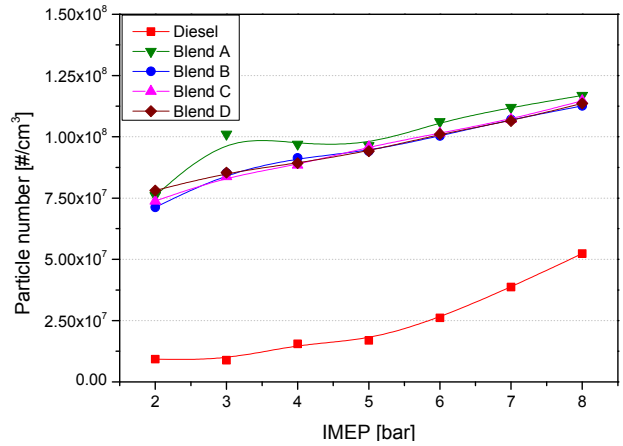


Fig. 13 Particle number emissions for diesel and bio oil blended fuels

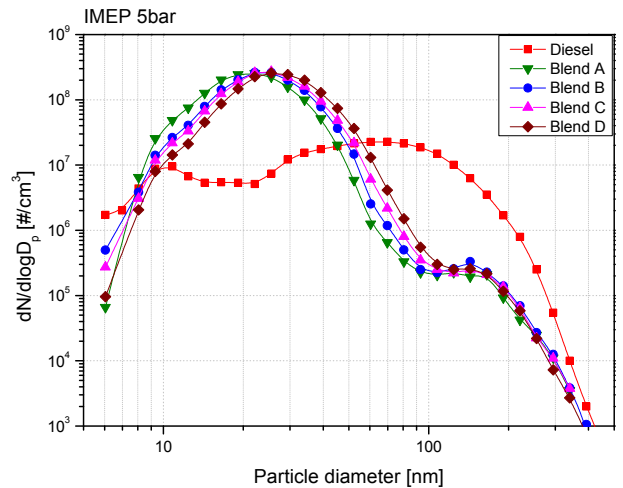


Fig. 14 Particle number size distribution for diesel and bio oil blended fuels at IMEP 0.5 MPa

합 연료에 비해서 입자상 물질의 중량 농도가 매우 높은 것이다. 바이오 오일의 함유량이 증가할수록  $50\text{-}100 \text{ nm}$ 의 크기를 가지는 입자들의 농도가 약간 더 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 바이오 오일에 포함된 고분자 물질들이 연소되면서 생성된 탄소계 입자들로 인한 현상으로 보인다.

### 3. 결론

본 연구에서는 디젤의 대체 연료로서 최근에 다양한 연구가 진행되고 있는 바이오 오일의 엔진 적용 가능성에 대해 살펴보았다. 바이오 오일의 연료로서의 물성을 향상시킬 수 있는 첨가제를 찾아 적용하였고 고압축비 엔진에 적용하였다. 다음은 본 연구를 통해 얻은 결과이다.

(1) 바이오 오일은 높은 점도, 낮은 세탄가, 중합 작용에 의한 고체상 물질 생성 등 연료로서의 물성이 우수하지 못하기 때문에 단독으로 엔진에

적용할 수 없다. 바이오 오일의 점도를 효과적으로 낮추고 중합 작용을 억제할 수 있는 알코올 용매의 혼합과 자발화특성을 향상시키기 위한 세탄가 향상제의 첨가가 요구된다.

(2) 바이오 오일-에탄올 혼합 연료는 세탄가 향상제를 첨가하더라도 기존 디젤 엔진에서 자발화되지 않기 때문에 본 연구에서는 고압축비 엔진으로 고온의 환경을 조성하여 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 연소를 가능케 하였다.

(3) 바이오 오일-에탄올 혼합 연료는 낮은 세탄가와 발열량을 갖기 때문에 낮은 부하 조건과 높은 부하 조건에서 일산화탄소 및 미연탄화수소 등의 배출 특성이 디젤 대비 나쁘게 나타났다. 첨가되는 용매와 세탄가 향상제의 종류나 비율을 바꾸면 모든 부하 범위에서 안정적인 연소가 가능할 것으로 보인다. 반면 높은 수분 함유량과 산소 함유량에 의해 질소 산화물 및 PM 배출량은 디젤 대비 낮게 나타난다.

(4) 본 연구에서 사용한 바이오 오일, 에탄올, PEG 400 등은 분자 사이에 산소가 결합되어 있는 형태로 연소시 분자 간 결합이 끊어지면서 여러 개의 작은 입자로 배출하는 특성이 있다. 따라서 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 경우, 수 농도는 많으나 핵생성 모드의 입자가 많은 부분을 차지하며 검정으로 배출되는 입경 50 nm 이상의 입자의 배출은 적다.

(5) 바이오 오일-에탄올 혼합 연료의 경우 바이오 오일 함량 변화에 따른 연소 및 배기 가스특성이 크게 변화하지 않았다. 이것은 바이오 오일 혼합 연료에서 바이오 오일이 차지하는 비중이 높지 않기 때문이며, 연료의 상당 부분을 차지하는 에탄올과 세탄가 향상제에 의한 효과가 크게 나타났을 것으로 보고 있다. 이와 관련하여 본 연구 그룹에서는 에탄올 보다 연소특성이 우수한 알코올 연료를 적용하고 보다 높은 압축비의 엔진을 사용하여 혼합 연료 중 바이오 오일이 차지하는 비중을 증가시킴으로써 바이오 오일에 의한 연소 및 배기특성에 대한 연구를 수행하고 있다.

## 후 기

본 연구는 한국기계연구원의 융합사업인 “Bio 원유 생산 고도화 활용기술개발” 사업의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Kasper, J. M., Jasas, G. B. and Trauth, R. L., 1983, “Use of Pyrolysis-Derived Fuel in a Gas Turbine Engine,” *ASME* paper no. 83-GT-96.
- (2) Boucher, M. E., Chaala, A., Pakdel, H. and Roy, C., 2000, “Bio-oils Obtained by Vacuum Pyrolysis of Softwood Bark as a Liquid Fuel for Gas Turbines. Part II: Stability and Ageing of Bio-Oil and Its Blends with Methanol and a Pyrolytic Aqueous Phase,” *Biomass Bioenergy*, Vol. 19, pp. 351~361.
- (3) Boucher, M. E., Chaala, A. and Roy, C., 2000, “Bio-Oils Obtained by Vacuum Pyrolysis of Softwood Bark as a Liquid Fuel for Gas Turbines. Part I: Properties of Bio-Oil and Its Blends with Methanol and a Pyrolytic Aqueous Phase,” *Biomass Bioenergy*, Vol. 19, pp. 337~350.
- (4) Oasmaa, A., Peacocke, C. and Gust, S., 2005, “Norms and Standards for Pyrolysis Liquids. End-User Requirements and Specifications,” *Energy Fuels*, Vol. 19, pp. 2155~2163.
- (5) Chiaramonti, D., Oasmaa, A. and Solantausta, Y., 2007, “Power Generation Using Fast Pyrolysis Liquids from Biomass,” *Renewable Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 1056~1086.
- (6) Razbin, V. and Coyle, I., 2004, “Emissions Tests on Magellan Aerospace Orenda Corporation, OGT 2500 Gas Turbine,” CETC Energy Technology Centre, Ottawa.
- (7) Lupandin, V., Thamburaj, R. and Nikolayev, A., 2005, “Test Results of the GT2500 Gas Turbine Engine Running on Alternative Fuels: Bio Oil, Ethanol, Bio Diesel and Heavy Oil,” *ASME* Paper Number: GT2005-68488.
- (8) Lopez, J. G. and Salva, M. J., 2000, “Preliminary Test on Combustion of Wood Derived Fast Pyrolysis Oils in a Gas Turbine Combustor,” *Biomass Bioenergy*, Vol. 19, pp. 119~128.
- (9) Garcia-Perez, M., Chaala, A., Kretschmer, D., Champlain, A., Huges, P. and Roy, C., 2004, “Spray Characterization of a Softwood Bark Vacuum Pyrolysis Oil,” *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion Conference*, Victoria (BC), Canada.
- (10) Solantausta, Y., Nylund, N. O., Westerholm, M., Koljonen, T. and Oasmaa, A., 1993, “Wood Pyrolysis Liquid as Fuel in a Diesel Power Plant,” *Biores. Tech.*, Vol. 46, pp. 177~188.
- (11) Frigo, S., Gentili, R., Tognotti, L. and Zanforlin, S., 1998, “Feasibility of Using Wood Flash-Pyrolysis Oil in Diesel Engines,” *SAE* Technical Paper 982529.
- (12) Solantausta, Y., Nylund, N. O., Oasmaa, A., Westerholm, M. and Sipila, K., 1994, “Preliminary Tests with Wood-Derived Pyrolysis Liquid as Fuel in a Stationary Diesel Engine,” In: *Biomass Pyrolysis Liquid Properties and Combustion Meeting*, Estes

- Park, Colorado, USA.
- (13) Shihadeh, A. and Hochgreb, S., 2000, "Diesel Engine Combustion of Biomass Pyrolysis Oils," *Energy & Fuels*, Vol. 14, pp. 260~274.
- (14) Bertoli, C., D'Alessio J., Del Giacomo, N. and Lazzaro, M., 2000, "Running Light-Duty DI Diesel Engines with Wood Pyrolysis Oil," *SAE Technical Paper 2000-01-2975*.
- (15) Suppes, G., Rui, Y. and Regehr, E., 1997, "Hydrophilic Diesel Fuels - Ignition Delay Times of Several Different Blends," *SAE Technical Paper 971686*.
- (16) Chiamonti, D., Bonini, M., Fratini, E., Tondi, G., Gartner, K., Bridgwater, A. V., Grimm, H. P., Soldaini, I., Webster, A. and Baglioni, P., 2003, "Development of Emulsions from Biomass Pyrolysis Liquid and Diesel and Their Use in Engines-Part 2: Tests in Diesel Engines," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 25, pp. 101~111.
- (17) Lee, S., 2012, "Performance and Emission Studies in a DI Diesel Engine Using Wood Pyrolysis Oil-Bio Diesel Emulsion," *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 17, No. 4, pp. 197~204.
- (18) Ikura, M., Stanculescu, M. and Hogan, E., 2003, "Emulsification of Pyrolysis Derived Bio-Oil in Diesel Fuel," *Biomass & Bioenergy*, Vol. 24, pp. 221~232.
- (19) Lee, S., Kim, T. and Kang, K., 2014, "Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Operated with Wood Pyrolysis Oil," *Proc. ImechE Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 228, pp. 180-189.
- (20) Lee, S., Jang, Y., Kim, T. and Kang, K., 2013, "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.
- (21) Lee, S., Park, J., Choi, Y., Woo, S. and Kang, K., 2012, "Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Operated with Wood Pyrolysis Oil," *Trans. KSAE*, Vol. 20, No. 5, pp. 102~112.