

## 바이오디젤-에탄올 혼합연료의 분무 및 연소특성

엄 동 섭<sup>\*1)</sup> · 최 연 수<sup>2)</sup> · 조 용 석<sup>3)</sup> · 이 성 옥<sup>3)</sup>

국립환경과학원<sup>1)</sup> · 국민대학교 자동차전문대학원<sup>2)</sup> · 국민대학교 기계자동차공학부<sup>3)</sup>

### Spray and Combustion Characteristics of Biodiesel-Ethanol Blending Fuel

Dongseop Eom<sup>\*1)</sup> · Yeonsoo Choi<sup>2)</sup> · Yongseok Cho<sup>3)</sup> · Seangwook Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>National Institute of Environmented Research, Kyungseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-708, Korea

<sup>2)</sup>Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 7 March 2008 / Accepted 5 January 2009)

**Abstract** : Ethanol has properties of a lower setting point, higher oxygen contents, lower cetane numbers, and also higher volatility compared to biodiesel. Thus, biodiesel fuel can be improved in the fluidity of and exhaust emissions by blended ethanol fuel. This research aims to understand combustion characteristics of biodiesel-ethanol blending fuel inside a constant volume chamber by obtaining some fundamental data in order to improve combustion atmosphere. To understand the physics of combustion, high speed camera was applied to visualize the development of combustion processes, and combustion pressure and exhaust emission were measured at several blending ratios of ethanol and biodiesel fuel. This information may contribute to improve the performance of biodiesel engine and reduce emissions in future.

**Key words** : Biodiesel-ethanol blending(바이오디젤-에탄올혼합유), Constant volume chamber(정적연소기), Visualization(가시화)

#### Subscripts

- ASOI : after start of injection
- CFPP : cold filter plugging point
- BD20 : 20% biodiesel blended with diesel fuel
- BD20 + E20 : 20% ethanol blended with BD20
- BD100 : 100% biodiesel

#### 1. 서 론

식물성 기름으로 제조가 가능한 바이오 디젤은 재생 가능한 에너지인 동시에 지구온난화 억제에 효과적인 카본 뉴트럴(Carbon-Neutral) 연료로써 주

목을 받고 있다. 또한, 인체에 대하여 무해하며 생분해성이 높은 것 역시 낮은 환경부하 측면에서 이상적인 연료의 하나라고 말할 수 있다. 바이오디젤은 물리적인 성질 대부분이 디젤 연료와 비교해서 비슷하거나 더 우수하다. 특히 바이오디젤은 일반디젤 연료와 열량 값도 거의 같다.<sup>1)</sup> 그러나 바이오디젤은 저온유동성이 경유에 비해 대폭 떨어지기 때문에 상용화에 있어서 걸림돌이 되고 있다. 이를 개선하기 위한 최근의 연구에서는 바이오디젤에 에탄올을 첨가함으로써 저온유동점 저하 및 PM저감에 효과적이라고 보고되고 있다. 한편, 첨가된 에탄올 역시 식물로부터 제조가 가능하며, 그 혼합에 있어서 바이오디젤의 카본 뉴트럴(Carbon-Neutral)한 특

\*Corresponding author, E-mail: dseom@me.go.kr

정이 손상될 일은 없다.<sup>2)</sup> 본 연구에서 사용된 에탄올은 바이오에탄올과 동일한 특성을 가지는 99.9% 에틸알콜을 사용하였다.<sup>3)</sup>

바이오 디젤의 친환경적인 요소를 고려하여 정밀 제어가 가능한 커먼레일 기관과 정적연소기를 통해 바이오디젤-에탄올 혼합연료의 분무특성 및 연소 특성을 실험적으로 계측하고, 기존 디젤연료 및 바이오디젤 연료특성과 비교하여 바이오디젤-에탄올 연료의 적용 특성을 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험기기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 분무 및 연소현상을 가시화하기 위하여 실제 대형기관과 유사한 조건으로 보어 123 mm, 폭은 34~77 mm로 조절이 가능한 정적연소기를 제작하였다. 정적연소기 주변에 고속 디지털 카메라를 설치하여 연료 분무 및 화염의 확산 형상을 촬영하였다. 또한 정적연소기 주변장치에 흡·배기 밸브, 압력센서, 점화를 위한 스파크 플러그를 장착하였고, 촬영을 위해 양측에 직경 153 mm, 두께 68 mm의 가시화 창을 설치하였다. 연소기 내의 잔류가스는 진공펌프와 감압탱크를 이용하여 제거하였다.

커먼레일 시스템은 고압형성을 위한 고압펌프,

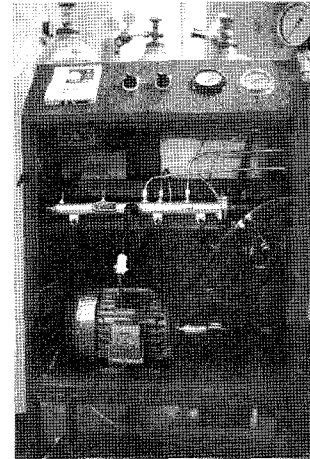


Fig. 2 Common rail system

고압연료를 축압하여 보내는 고압레일, 정밀제어를 위한 전자제어식 인젝터로 구성되어 있다. Fig. 2는 커먼레일 시스템의 사진을 나타내고 있다. 또한 인젝터 드라이버를 사용하여 연료 분사량 및 분사시기를 제어하였으며, 정적연소기 내에서 압력 변화 측정을 위해 피에조식 압력센서를 사용하였다.

Table 1에 실험조건들을 나타내었다. 정적연소기 내에서의 디젤연소의 조건을 구현하기 위해 수소와 산소, 질소를 예혼합 연소시켜 디젤기관과 비슷한 고온 고압의 분위기를 형성하였다. Fig. 3에 수소 예혼합연소와 혼합연료의 분사 개념을 나타내었다.

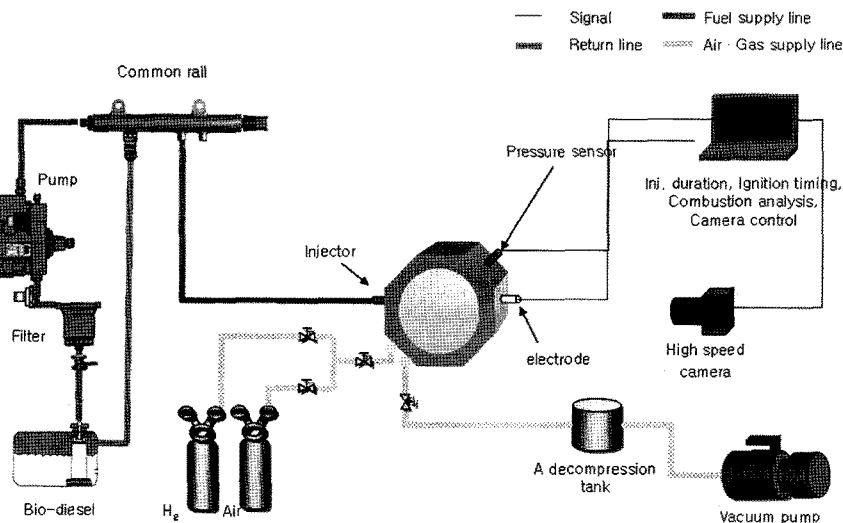


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Bore × Length	123 × 77 mm
Displacement	915 cm <sup>3</sup>
Fuel delivery	Direct injection
Injection pressure	70, 120 MPa
Injection duration	1 ms
Ambient O <sub>2</sub> concentration	2(Spray), 21(Combustion) %vol
Nozzle diameter	0.2 mm

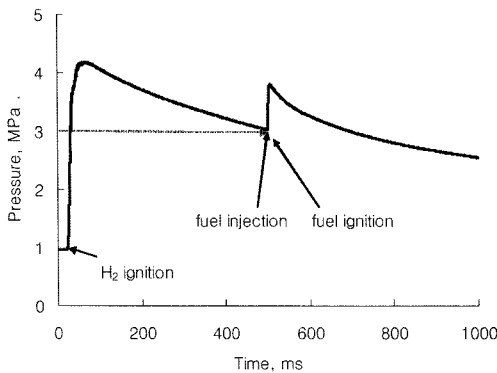


Fig. 3 Pre-ignition of hydrogen

예혼합기의 농도 조절은 각 가스의 분압으로 조절하였으며, 혼합연료의 분무 및 연소시 수소 예 혼합 연소 후 정적연소기 내의 산소 농도가 각각 2, 21%vol로 유지되도록 하였다.

혼합연료의 분무 및 화염 발달의 실사 촬영에는 고속 디지털 카메라를 사용하였으며 촬영속도는 각각 2,000, 4000 fps로 설정하였다. 또한 피에조식 압력센서를 이용하여 압력변화를 측정한다 뒤 열발생율을 계산하여 연소를 해석하고 각 혼합연료별 착화 지연 시간을 구하였다. 연소압력 데이터는 Labview를 기반으로 하는 DAQ(Data Acquisition: DAQ Card-6024E)를 사용하여 수집하였다. 커먼레일 압력 조절과 인젝터 구동전류는 인젝터 드라이버를 사용하여 제어하였으며, 점화시기, 촬영시기 등의 모든 신호는 CodeVision AVR C언어를 사용하여 제어하였다. 연소가 종료된 후 연소생성물 분석을 위해서 HORIBA사의 portable 가스분석기 MEXA -554JKNOx를 사용하였다.

## 2.2 실험방법

정적 연소기내 분위기 조건으로는 분위기 압력

3.0MPa로 고정시킨 후, 연료분사 압력을 70MPa, 120MPa로 하여 분무 및 연소실험을 수행하였으며, 인젝터의 분사기간은 1ms로 고정시켜 실험을 수행하였다. 바이오디젤의 종류는 BD20, BD100을 사용하였고, 설정한 연료 중 에탄올 비율은 0, 20, 40%vol이며, 대조군으로는 경유와 동일조건외 바이오디젤을 가지고 비교하였다. Table 2에 실험에 사용된 연료들의 특성을 나타내었다.

Table 2 Properties of fuels

Fuel	Diesel	Biodiesel	Ethanol
Cetane number	51.4	57.9	8
Oxygen content(wt %)	0	11.24	34.8
Boiling point(°C)	188~370	200~350	78.4
Density(g/cm <sup>3</sup> )	0.821	0.8815	0.7893
Lower heating value(MJ/kg)	45.88	39.16	26.82

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 각 연료별 물성치 분석 결과

실험에 사용된 9가지의 연료는 대기환경보전법 상 연료제조기준에 근거하여 분석항목을 선정하여 분석하였으며, 그 중에 유동및 연소에 직접관련된 내용만 정리 하였다.

Table 3은 시험에 사용된 9가지 연료의 검사 성적서이다. ULSD와 비교하면 바이오디젤 함량비가 증가할수록 동점도, 밀도가 증가하였고 다고리방향족과 지방산 메틸에스테르의 함량도 많아지는 경향을 볼 수 있다. 반면 황분, 세탄지수와 윤활성은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 바이오디젤에 에탄올을 첨가하면 황분에는 큰 변화가 없지만 나머지 특성은 모두 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 인화점의 경우는 디젤연료시험기준으로는 측정이 불가능하였다.

### 3.2 저온특성결과

#### 3.2.1 CFPP(Cold Filter Plugging Point)측정결과

Table 4는 하절기용 경유를 사용하여 바이오디젤과 에탄올 혼합연료의 필터막힘점을 측정된 값을 나타낸다. 디젤의 비율이 많은 BD20에서는 에탄올의 첨가량이 증가할수록 디젤의 감소량이 상대적으로

Table 3 Fuel quality assurance report

연료 검사항목	ULSD	BD5	BD20	BD50	BD100	BD20+E40	BD50+E20	BD100+E20	BD100+E40
황 분 SULFUR, Wtppm	7.00	6.00	3.00	5.00	1.00	3.00	3.00	1.00	1.00
동점도@40°C, cSt VISCOSITY (KINEMATIC)	2.86	2.903	3.018	3.338	4.066	1.946	2.572	3.019	2.612
밀도 @ 15°C DENSITY, g/cm <sup>3</sup>	0.8302	0.8329	0.8409	0.8565	0.8848	0.8229	0.8455	0.8707	0.8553
세탄지수 CETANE INDEX	55	54.6	54.5	52.6	-	-	-	-	-
윤활성 HFRR, $\mu m$	356	305	317	260	241	196	177	150	125
다고리방향족 함량, POLY AROMATICS wt%	1.7	3.2	8.5	16.6	30.71	3.36	8.29	26.13	16.72
지방산 메틸 에스테르 함량 FAME, Vol%	0.5	5.8	21.9	49.2	-	4.7	23.2	38.4	20.9

Table 4 The result of CFPP measurement

Item	Diesel	BD20	BD100	BD20		BD100	
				E20	E40	E20	E40
Temp. (°C)	-11	-8	-4	-8	-6	-7	-9

로 바이오 디젤의 감소량보다 커지므로 CFPP가 낮은 디젤 특성이 저하되어 CFPP가 나빠지는 것을 볼 수 있다. 그러나 상대적으로 CFPP가 높은 BD 100의 경우 에탄올을 첨가할수록 CFPP는 개선되었다.

Fig. 4는 바이오디젤-에탄올 혼합연료의 에탄올 함유별 온도에 따른 점도를 나타내고 있다. 기존 바이오디젤의 점도에 대하여 에탄올의 함유율이 증가함에 따라 점도가 낮아지는 경향을 확인할 수 있었

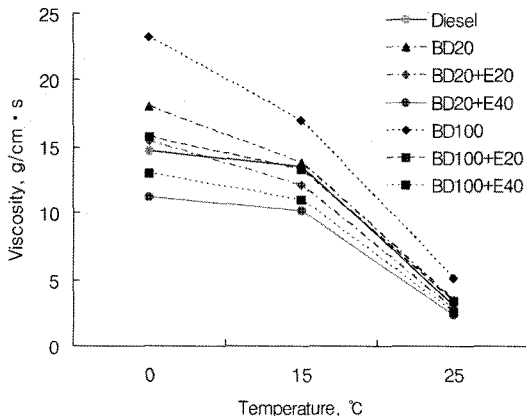


Fig. 4 Viscosity of biodiesel-ethanol fuels

으며, 이는 바이오디젤에 에탄올을 첨가함으로써 점도 변화를 주어 기존 디젤 엔진의 연료시스템에 적용 가능한 점도로 변화를 줄 수 있다고 기대된다. 또한 점도 특성 변화는 기존 바이오디젤의 분무 및 연소특성에도 영향을 줄 것으로 예상된다.<sup>4)</sup>

### 3.3 분무 가시화 실험 결과

각 연료의 분무형태를 관찰하기 위해 정적연소기 내에 분사압력에 따른 디젤, 바이오디젤, 바이오디젤-에탄올 혼합연료의 분무거동을 고속카메라를 이용하여 가시화 하였다.

Fig. 5는 분사압력 70MPa, 120MPa일 때, 분무 발달과정을 분사 시작 후의 시간에 따라 나타낸 것이다. 에탄올 혼합연료는 디젤 및 바이오 디젤의 분무 발달 과정과 큰 차이 없이 동일한 경향을 보임을 알 수 있었다. 이는 CRDI 시스템의 적용으로 분사압이 높아져서 점도의 차이에 의해서는 거시적으로 분무 형태에 크게 영향을 끼치지 않는다고 사료된다.

### 3.4 연소 가시화 실험결과

Fig. 6은 분사압 70, 120 MPa, 인젝터의 분사시간을 1ms로 일정하게 유지하였을 때 연소결과인 연소 가시화 사진을 보인다.

연소과정을 보면 분사압이 높을수록 착화가 빨리 일어나며, 연료 중 바이오디젤의 함량이 높을수록 연소속도가 빠르게 일어나는 것을 확인할 수 있었

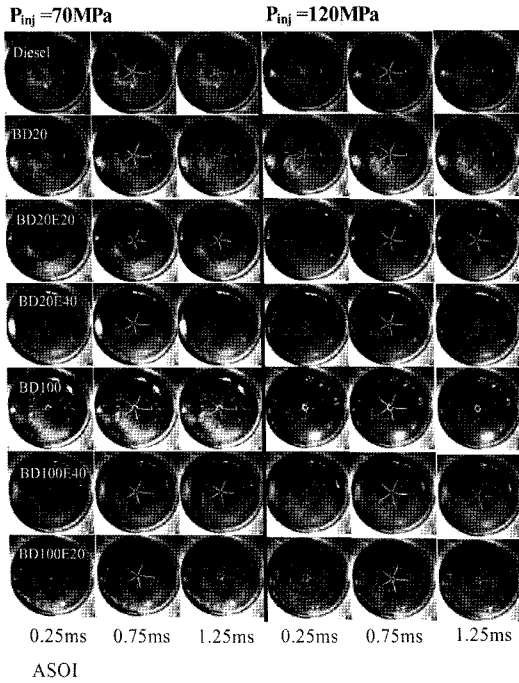


Fig. 5 Developing spray process of biodiesel-ethanol fuels in the ethanol ratios ( $P_{amb}=3MPa$ ,  $Temp.=800^{\circ}C$ )

다. 이것은 바이오 디젤의 높은 함산소 특성 때문에 연소가 촉진되는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 실험을 통해 측정된 연료별 착화지연시간을 나타내고 있다. 여기서 착화지연 시간은 분사가 시작되고 인지 가능한 열발생이 시작되는 시간까지의 간격을 측정하여 계산하였다. 우선, 연료의 분사압력이 높을수록 연료입자의 무화 및 공기와의 혼합성이 좋아져서 점화지연시간이 짧아지는 것을 알 수 있었다. 바이오디젤은 디젤보다 높은 점도를 가지지만, 세탄가가 상대적으로 높은 특징을 가지며, 혼합연료 내에 바이오디젤의 함량이 높을수록 점화지연시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 바이오디젤에 에탄올 혼합시에도 에탄올함량이 늘어날수록 점도가 상대적으로 낮아져서 무화특성이 개선됨을 예측할 수 있으나, 점화지연시간이 더 늘어나는 현상을 보인다. 이것은 커먼레일의 고압분사에서는 에탄올에 의한 점도개선효과보다 상대적으로 줄어든 바이오디젤의 양과 낮은 세탄가를 가진 에탄올의 증가에 대한 영향이 더 크다고 판단할 수 있다.

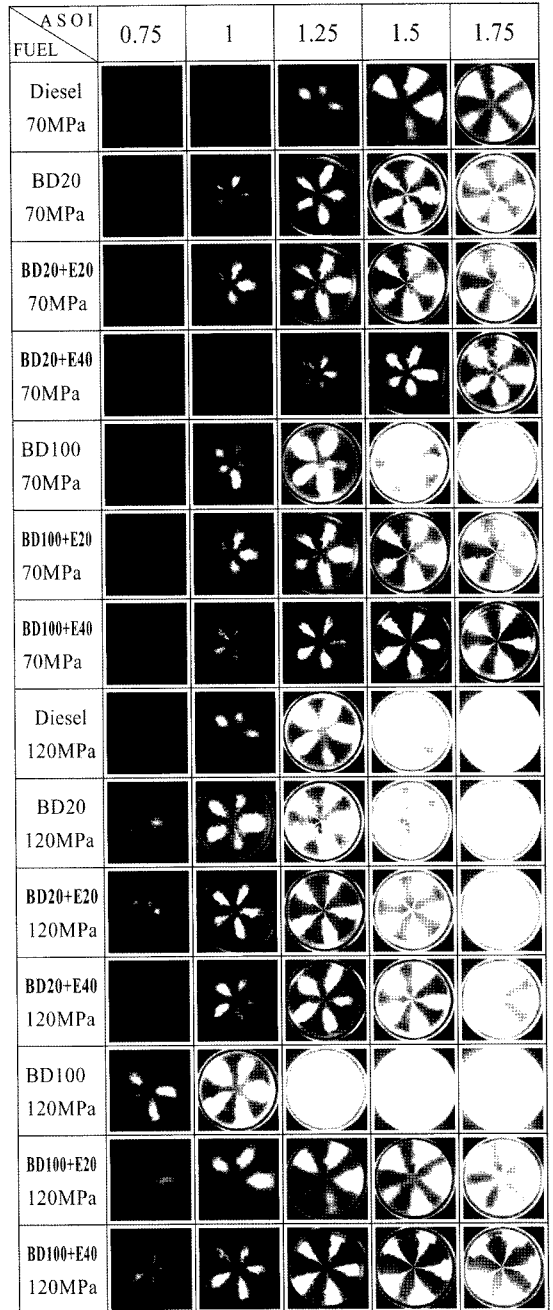


Fig. 6 Developing combustion process of biodiesel-ethanol fuels in the ethanol ratios ( $P_{amb}=3MPa$ ,  $Temp.=800^{\circ}C$ )

Fig. 8~11은 혼합연료에 따른 70MPa, 120MPa에서의 연소압력과 열발생을 그래프를 나타낸다. 착화지연의 시간 및 열발생의 최고점은 예혼합된 연료의 양이 많아짐에 따라 커지게 된다. 디젤연료

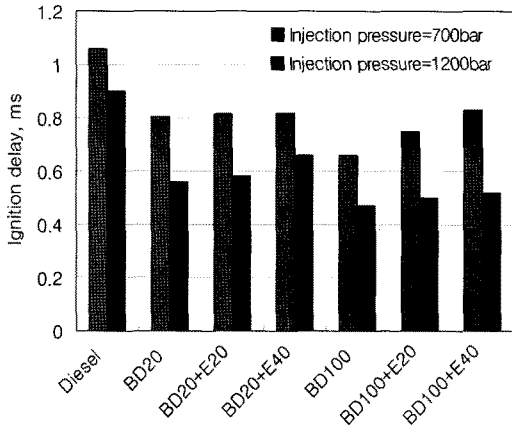


Fig. 7 Ignition delay of biodiesel-ethanol fuels

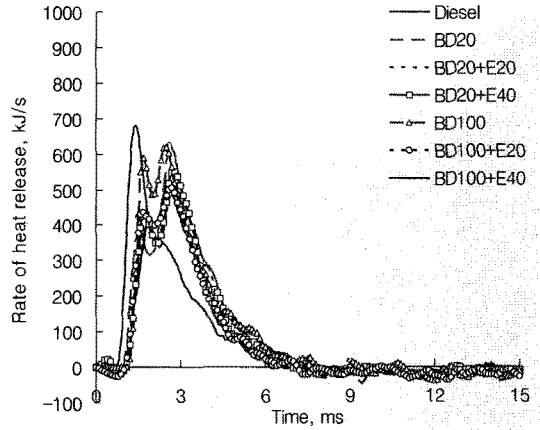


Fig. 10 Heat release rates of biodiesel-ethanol fuels(70MPa)

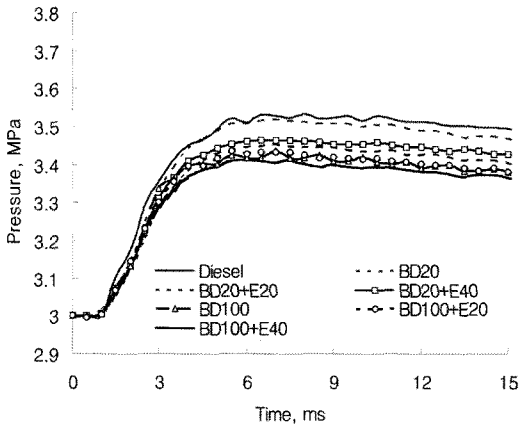


Fig. 8 Combustion pressure of biodiesel-ethanol fuels (70MPa)

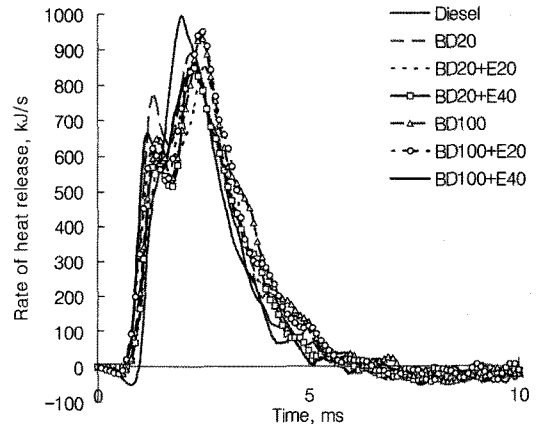


Fig. 11 Heat release rates of biodiesel-ethanol fuels (120MPa)

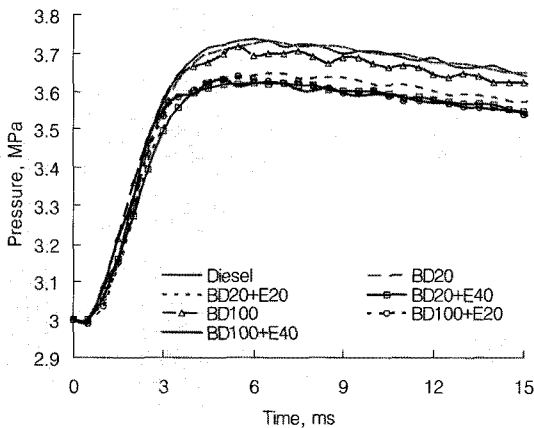


Fig. 9 Combustion pressure of biodiesel-ethanol fuels (120MPa)

의 경우 착화지연기간이 길고 연소압력이 순간적으로 크게 올라가는 것을 확인할 수 있었다. 바이오디젤과 에탄올 혼합연료의 경우 열발생율의 감소폭이 상대적으로 작게 나타난다. 이것은 에탄올이 가지고 있는 함산소량에 의해 연소가 지속적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 정적연소기 내에서 바이오디젤-에탄올 혼합연료를 연소시킨 후 생성된 가스를 배기가스 분석기를 이용하여 측정한 결과이며, 배출되는 CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>의 양을 각각 보여주고 있다. CO, HC, NO<sub>x</sub>는 에탄올 혼합비에 따라 큰 변화를 보이지 않았으며, CO<sub>2</sub>는 약간 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이것은 에탄올을 원료자체의 높은 함 산소량의 영향으로 완전연소가 이루어진 것으로 판단된다.

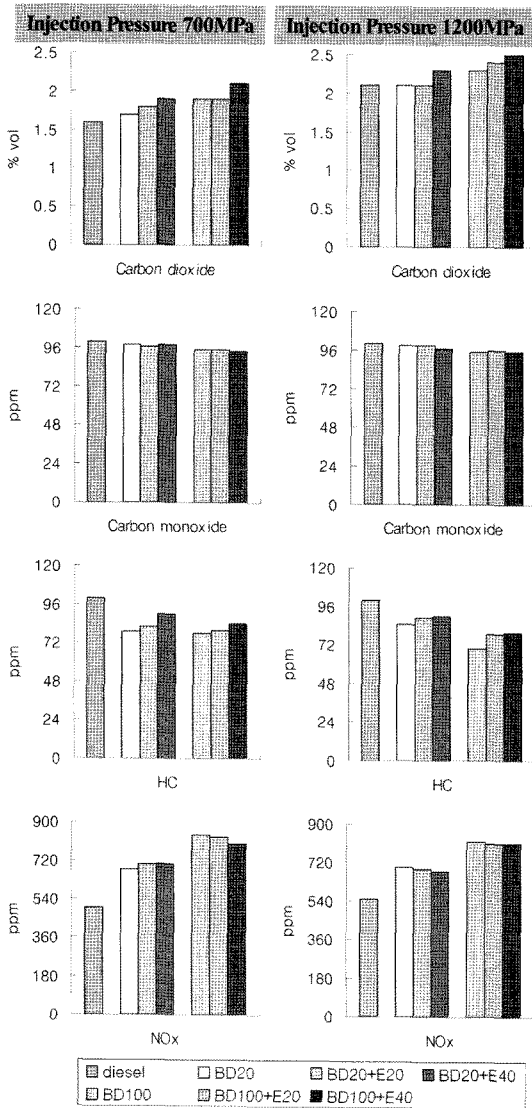


Fig. 12 Emission characteristics of biodiesel-ethanol fuels

#### 4. 결론

바이오디젤-에탄올 연료의 분무 및 연소 특성에

대해서 정적연소기와 커먼레일 시스템을 사용하여 바이오디젤연료의 에탄올혼합비율에 따른 분무 및 연소의 가시화로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 바이오디젤의 경유대비 높은 점도특성은 바이오 디젤에 에탄올의 혼입을 증가에 의해 낮출 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 2) 바이오디젤의 에탄올 혼입시 함산소량 증가 및 점도특성에 변화를 가져오게 되며, 연소시에는 에탄올의 혼합량보다는 연료내에 존재하고 있는 바이오 디젤의 연료특성이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 3) 연소후 배기가스분석결과 에탄올 혼합율이 증가함에 따라서 HC, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>는 기존 바이오 디젤과 대비하여 0~5% 차이를 보임을 확인하였다.

#### References

- 1) D. Y. Kim, I. E. Cho and S. W. Lee, "A Study on Spray and Combustion Characteristics Affected by Temperatures of Bio-Diesel Fuel," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.533-538, 2007.
- 2) T. Shudo, T. Nakajima and H. Ogawa "Reduction of Smoke and NO<sub>x</sub> in Biodiesel Combustion by Ethanol Blending and EGR," JSAE, pp.17-23, 2007.
- 3) Y. T. Seo, H. K. Suh, S. H. Bang and C. S. Lee "A Study on the Injection Characteristics of Biodiesel Fuels Injected through Common-rail Injection System," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.570- 575, 2006.
- 4) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1988.