

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.2.137

ISSN 1226-4881

## 4 실린더 직접분사식 디젤엔진에서 바이오디젤 혼합연료의 연소 및 배기특성<sup>§</sup>

이동곤\* · 노현구\*\* · 최석천\*\*\* · 이창식\*†

\*한양대학교 기계공학과, \*\*인덕대학 기계자동차과, \*\*\*한국생산기술연구원

### Combustion and Emission Characteristics of 4 Cylinder Common-Rail DI Diesel Engine with Biodiesel Blended Fuel

Donggon Lee\*, Hyun Gu Roh\*\*, Seuk Cheun Choi\*\*\*, and Chang Sik Lee\*†

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

\*\* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Induk Univ.,

\*\*\* Korea Institute of Industrial Technology

(Received May 26, 2010 ; Revised November 20, 2010 ; Accepted November 29, 2010)

**Key Words:** Combustion Characteristics(연소특성), Emission Characteristics(배기특성), Alternative Fuel(대체연료), Biodiesel(바이오디젤), Oxygenated Fuel(함산소 연료)

**초록:** 본 연구는 4실린더 커먼레일 디젤엔진에 바이오디젤 혼합 디젤연료를 적용하였을 경우 엔진의 연소특성과 배출물 저감효과를 실험적으로 구한 것이다. 실험 연료는 바이오디젤 20%와 디젤연료 80%(체적분율)를 혼합한 BD20과 저유황디젤연료(ULSD)를 사용하였으며, 연료분사압과 엔진회전수를 변수로 하여 실험을 수행하였다. 실험결과 B20과 ULSD 모두 연료분사압력이 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 배출농도는 증가하고, Soot 배출량은 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 BD20의 경우 ULSD와 비교하여 NO<sub>x</sub> 배출농도는 다소 증가하였으나, Soot 배출량은 현저하게 감소하였다. 또한, 회전속도가 1000rpm에서 2000rpm으로 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 배출농도는 감소하고, Soot 배출량은 낮은 분사압력에서 현저히 증가하는 경향을 나타내었다.

**Abstract:** This paper describes the effects of biodiesel blended fuel on the engine combustion and emission characteristics in a four cylinder CRDI(Common-rail direct injection) diesel engine. In this work, the biodiesel-diesel blended fuel(20% of biodiesel and 80% of ULSD(ultra low sulfur diesel) by volume ratio, BD20) and ULSD fuel are used under the various injection pressures and engine speeds. The experimental results of BD20 and ULSD fuel show that NO<sub>x</sub> emissions were increased and soot emissions were decreased with the increase of injection pressure. In particular, NO<sub>x</sub> emissions were slightly increased for the BD20 fuel, however, soot emissions were significantly reduced compared to the ULSD fuel. When the engine speed is increased from 1000rpm to 2000rpm, NO<sub>x</sub> emissions are decreased at all tested conditions, and soot emissions are largely increased at lower injection pressure.

#### 1. 서 론

디젤 연료는 각종 산업용을 비롯하여 각종 가열 시스템, 동력발전장치, 각종 자동차 등에 많이 사용되고 있으며 사용량 또한 점차 증가하는 추세이다. 그 중 가장 보편적이고 일반적으로 많이 사용되는 차량용 디젤엔진은 우수한 성능과 연비

특성으로 인하여 차량의 수요가 점차 증가되는 추세이다. 또한 디젤엔진은 가솔린엔진과 대비하여 희박 연소의 특성으로 인한 유해 배출물 중 CO(일산화탄소)와 HC(미연탄화수소)는 적게 배출되는 장점이 있으나 NO<sub>x</sub>(질소산화물)와 PM(입자상 물질)은 가솔린엔진에 비하여 많이 배출되는 것이 디젤엔진의 단점으로 지적되고 있다.

이 중 NO<sub>x</sub>는 인체에 유해한 배출물로 기관지염이나 각종 호흡기 질환을 유발하며, 특히 이산화질소의 경우 혈색소와는 친화력이 강하여 용혈

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 열공학부문 춘계 학술대회(2010. 5. 13.-14., 전북대) 발표논문임

† Corresponding Author, cslee@hanyang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

을 일으킨다. 또한 태양광과 반응하여 오존을 생성하고 산성비나 광화학 스모그를 발생시켜 코나눈의 점막을 자극하는 등 환경적인 문제로 주목받는 유해 배출물 중의 하나이다. 그리고 PM은 장기간 노출이 될 경우 두통이나 인체에 치명적인 영향을 미칠 수 있다는 연구가 보고되고 있으며,<sup>(1,2)</sup> 환경적으로는 대기 중에 부유한 PM이 빛을 흡수하거나 산란시키기 때문에 시야를 악화시키고, 식물의 잎 표면에 쌓여 광합성을 저해하는 등 많은 문제점을 야기하고 있다. 이에 세계적으로 NO<sub>x</sub>와 PM의 배기규제를 강화하고 있는 실정이며, 강화되고 있는 배기규제에 맞추어 많은 대처 방안들이 모색되고 있다.<sup>(3,4)</sup>

배기가스를 저감하기 위한 방법으로는 신 연소 기술의 적용과 후처리 장치의 적용, 그리고 대체 연료를 적용하는 방법 등이 있다. 이 중 대체 연료를 사용하는 것은 기존 엔진 시스템을 크게 변경시키지 않고 유해 배출물의 저감을 이룰 수 있는 기술로, 디젤의 대체 연료 중 합산소 연료인 DME(Dimethyl ether)와 에탄올 혼합연료, 바이오디젤 등을 적용하여 배기가스를 저감하는 방법이 연구되고 있다.<sup>(5,6)</sup> 이 중 Lin,<sup>(7)</sup> Haas<sup>(8)</sup> 등은 합산소 연료인 바이오디젤 혼합연료를 적용한 경우 기존 디젤연료와 비교하여 NO<sub>x</sub> 배출량은 다소 증가하는 반면에 PM과 CO, HC 배출량을 감소하는 연구결과를 발표하였다. 또한, Jung<sup>(9)</sup>은 바이오디젤이 입자상물질에 미치는 영향에 대해 분석하여 바이오디젤 적용 시 PM의 크기가 감소하는 결과를 확인하였고, Tsolakis<sup>(10)</sup>은 바이오디젤의 EGR율에 따른 입자상물질 크기변화에 관한 연구에서 바이오디젤의 경우 디젤에 비해 EGR율이 증가함에 따라 큰 NO<sub>x</sub> 배출량의 감소량을 보였으며, 모든 실험 조건에서 PM의 질량 및 크기가 감소한다는 연구결과를 보고하였다.

선행연구를 종합하여 분석을 해보면 바이오디젤 연료를 사용함으로써 PM의 배출량과 크기는 감소하는 반면에, 전반적으로 NO<sub>x</sub>의 배출량은 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

본 연구는 바이오디젤 연료의 사용으로 인한 NO<sub>x</sub>의 배출량을 저감시키기 위한 방법으로 과일

릿분사를 적용하여 바이오디젤 혼합연료의 연소 및 배출물 저감특성을 여러 가지 분사압력과 회전속도의 변화에 대하여 실험적인 연구를 수행하였다. 또한 과일릿분사 적용 시 바이오디젤 혼합연료가 연소 및 배출물 저감에 미치는 영향을 분석하기 위하여 동일한 조건의 저유황디젤(ULSD)과 비교 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 실험 장치

Table 1은 저유황디젤(ULSD)과 바이오디젤(대두유)의 물성을 나타낸 것으로 바이오디젤은 세탄가가 높아 착화성이 우수하여 디젤엔진에 적용이 용이하다. 특히 바이오디젤은 연료 분자구조 내에 산소를 포함하고 있어 연소 과정에서 PM이 저감되는 효과를 얻을 수 있다. 반면에 합산소 연료에 의한 연료 계통의 산화에 대한 문제점을 해결해야 하며, 저온에서의 저유동 특성을 해결하기 위한 예열장치의 보완이 필요하다.

본 연구에 사용한 엔진은 배기량 1.58L인 4 실린더 커먼레일 직접분사식 디젤엔진으로 연료 분사 최고 압력은 160MPa이며 엔진의 주요 제원은 Table 2와 같다.

Table 1 Property of ULSD and biodiesel fuel

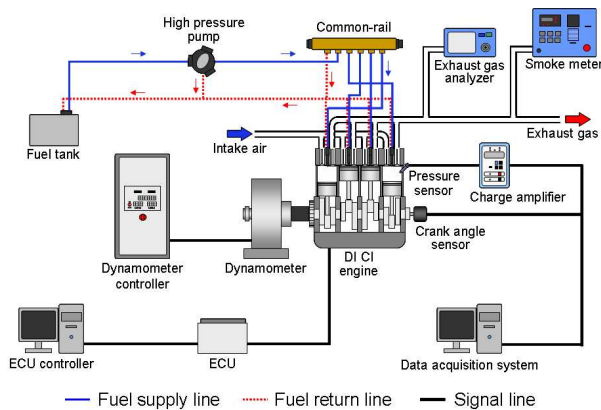
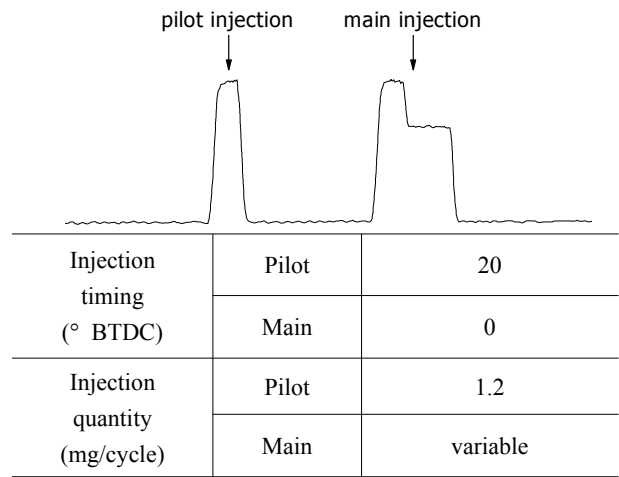
Characteristic	Diesel (ULSD)	Biodiesel (Soybean oil)
Cetane number	40~55	48~65
C:H:O molar ratio	16:30:0	19:34:2
Sulfur content (wt%)	0.01	0
Oxygen content (wt%)	-	11
Viscosity at 40°C (cSt)	2.4	3.0
Liquid density at 20°C (kg/m <sup>3</sup> )	828	884
Cloud point temp. (°C)	-15~5	-3~12
Flash point temp. (°C)	60~80	100~170
Low heating value (MJ/kg)	42.5	37.4
Stoichiometric A/F ratio	14.6	14.1

**Table 2** Specifications of test engine

Engine type	4-stroke VGT DI Diesel	
Number of cylinder	4	
Bore × Stroke (mm)	77.2 × 84.5	
Displacement volume (cc)	1,582	
Fuel injection system	Bosch Common rail	
Valve type	DOHC 4 valve per cylinder	
Compression ratio	17.3	
Engine Management System	Bosch EDC 16	
Intake valve	open(° BTDC)	6
	close(° ABDC)	34
Exhaust valve	open(° BBDC)	46
	close(° ATDC)	4
Max. Power (kW/rpm)	86/4,000	
Max. Torque (Nm/rpm)	260/2,000	
Max. Speed (rpm)	4,750	

**Table 3** Experimental conditions

Item	Test conditions
Fuel	ULSD, B20
Engine speed (rpm)	1000, 2000
Engine load (Nm)	40
Injection pressure (MPa)	30, 50, 70, 90

**Fig. 1** Schematic diagram of test engine

실험 장치는 디젤엔진과 연료 공급장치 및 엔진 제어장치, 그리고 EC 동력계(AG150)와 연소 및 배기가스 분석을 위한 장치로 구성하였으며 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

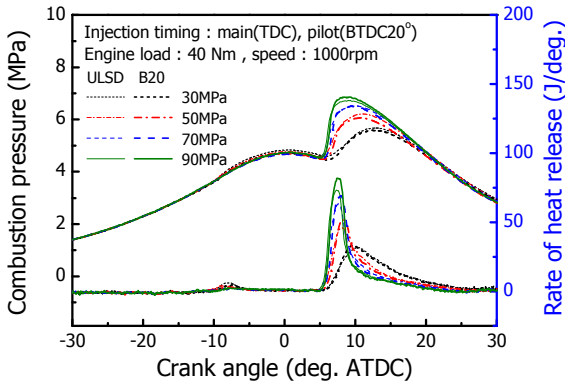
엔진 실험에서는 엔진제어 프로그램(ETAS사, INCA V5.4)과 ECU(Bosch, EDC16 ETK ECU)를 사용하여 실험하였다. 그리고 엔진의 연소특성을 파악하기 위해 연소압력센서(Kistler, 6057ASP)와 크랭크각 센서를 장착하고, 입력되는 신호를 DAQ보드(NI, PCI 6251 & SC2345)와 소프트웨어

(NI, Labview 8.2)를 사용하여 실시간으로 사이클 당 7200개의 데이터를 취득하였다. 또한 엔진에서 배출되는 유해 배출물을 분석하기 위해 배기가스 분석기(Horiba, MEXA-554JK NO<sub>x</sub>)와 매연 측정기(AVL, Smoke meter 407)를 사용하였다.

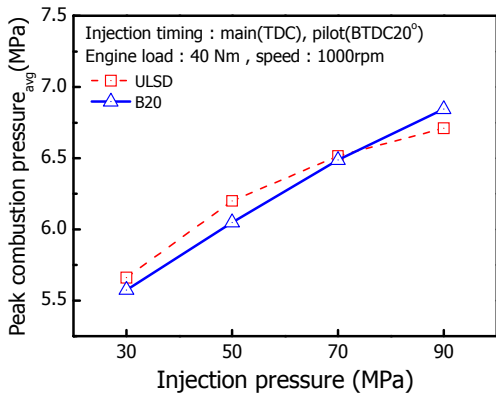
## 2.2 실험 방법

Table 3은 세부적인 실험조건을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 바이오디젤(대두유)과 ULSD를 2:8의 체적비로 혼합한 B20과 ULSD를 사용하여 실험을 수행하였다.

분사방식은 파일럿 분사를 적용하였고, 이 때 파일럿 분사 연료량을 1.2mg/cycle로 일정하게 분사하였다. 또한 파일럿 분사시기를 BTDC 20°로 주분사 시기를 TDC로 고정하였으며, 엔진의 부하는 40Nm로 유지하였다. 또한 연료 분사압과 엔진회전속도의 변화가 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 비교 분석하기 위해 연료 분사압을 30MPa부터 90MPa까지 20MPa간격으로 나누어 수행하였고, 엔진회전속도는 1000rpm과 2000rpm 두 가지의 경우로 나누어 수행하였다.

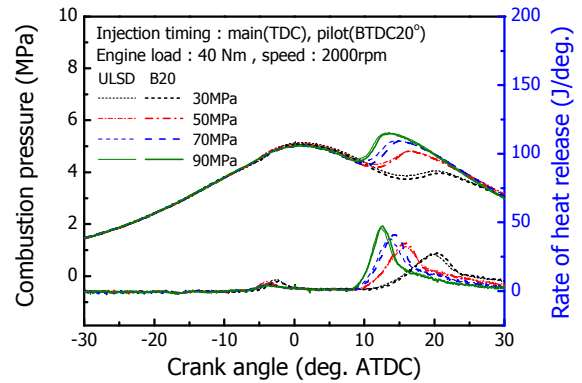


(a) Combustion pressure and ROHR

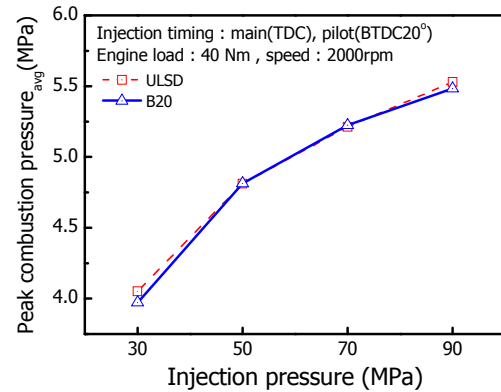


(b) Peak combustion pressure

Fig. 2 Combustion characteristics according to the injection pressure at 1000rpm



(a) Combustion pressure and ROHR



(b) Peak combustion pressure

Fig. 3 Combustion characteristics according to the injection pressure at 2000rpm

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 바이오디젤 혼합연료의 연소특성

Fig. 2는 1000rpm의 경우에서의 연료 분사압력 변화에 따른 연소특성을 나타낸 그래프이다. Fig. 2(a)의 그래프에 나타난 바와 같이 분사압력이 증가함에 따라 연소압력 및 열발생률이 상승하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 분사압력이 높아질수록 분사되는 연료의 미립화가 촉진되어 주분사되는 연료의 연소촉진과 착화지연기간이 감소되어 연소 성능이 상승한 것으로 판단된다. 또한 B20의 경우 ULSD와 비교하여 분사압력이 낮아질수록 착화지연기간이 다소 길어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 바이오디젤이 ULSD 대비 상대적으로 높은 점성으로 인하여 연료 분사시 미립화가 적게 일어난 것으로 판단된다. 그러나 바이오디젤에 포함된 산소성분으로 인하여 주분

열발생률이 증가하는 경향을 보이며, B20의 경우에 ULSD와 비교하여 착화지연기간이 길어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 1000rpm의 경우와 비교하여 모든 분사압력에서 연소압력 및 열발생률이 낮아지는 경향을 보이는데, 이는 엔진회전속도가 증가함에 따라 흡기 용량이 저하와 연소기간의 단축에 기인하는 경향으로 볼 수 있다.

Fig. 3 (b)에서 보는 바와 같이 2000rpm의 경우 모든 조건에서 연소최고압력이 거의 비슷하게 나타났다. 이는 엔진회전속도 증가에 따른 연소시간의 단축에 기인하는 것으로 판단된다.

#### 3.2 바이오디젤 혼합연료의 배기특성

Fig. 4는 1000rpm의 경우 연료 분사압력 변화에 따른 배기특성을 나타낸 그래프이다. Fig. 4(a)에서 두 연료 모두 NO<sub>x</sub>는 분사압력이 증가할수록 증가하는 경향을 보이는데, 이는 연료 분사압력이 높아짐에 따라 연료의 미립화가

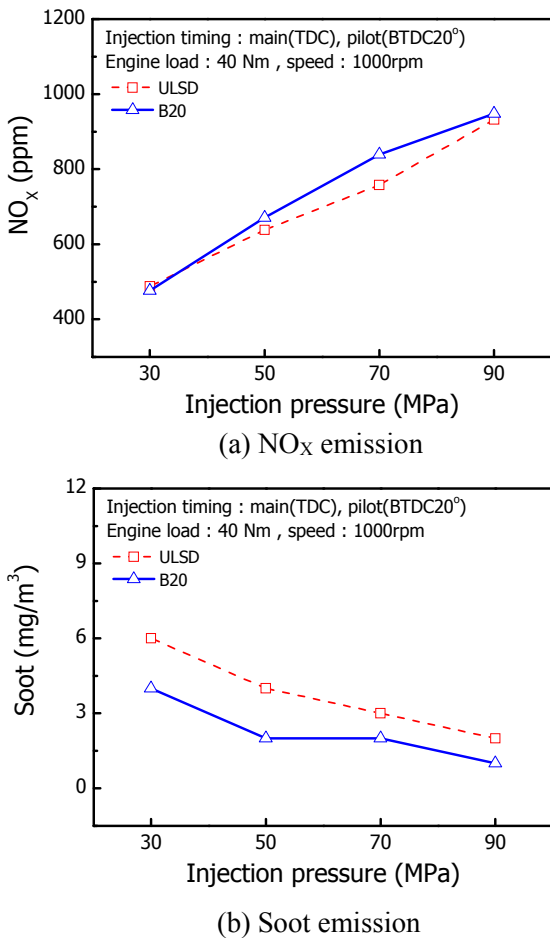


Fig. 4 Emission characteristics according to the injection pressure at 1000rpm

촉진되어 착화지연시간이 단축되고, 이로 인하여 연소압력과 열발생률이 상승한데 기인하는 것으로 판단된다. 또한 바이오디젤 내에 함유된 11% 정도의 산소성분이 연소를 더욱 활성화시켜 연소 온도가 높아지고 이에 따라 NO<sub>x</sub> 배출량은 증가한다. 특히 연료를 70MPa의 분사압력으로 분사한 경우 B20이 ULSD의 경우보다 NO<sub>x</sub> 배출량이 10%정도 증가하는 것으로 측정되었다.

Fig. 4(b)에서 두 연료 모두 분사압력이 증가할수록 미립화가 촉진되어 연소실 내의 공기이용률이 개선됨에 따라 soot의 배출량이 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 B20의 경우 ULSD와 비교하여 적게 배출되는 경향을 보이는데, 이는 일반적으로 soot는 고온이면서 당량비가 약 2.0 부근의 영역에서 많이 생성되는 것으로 알려져 있는데,<sup>(12)</sup> B20의 경우 바이오디젤에 포함되어 있는

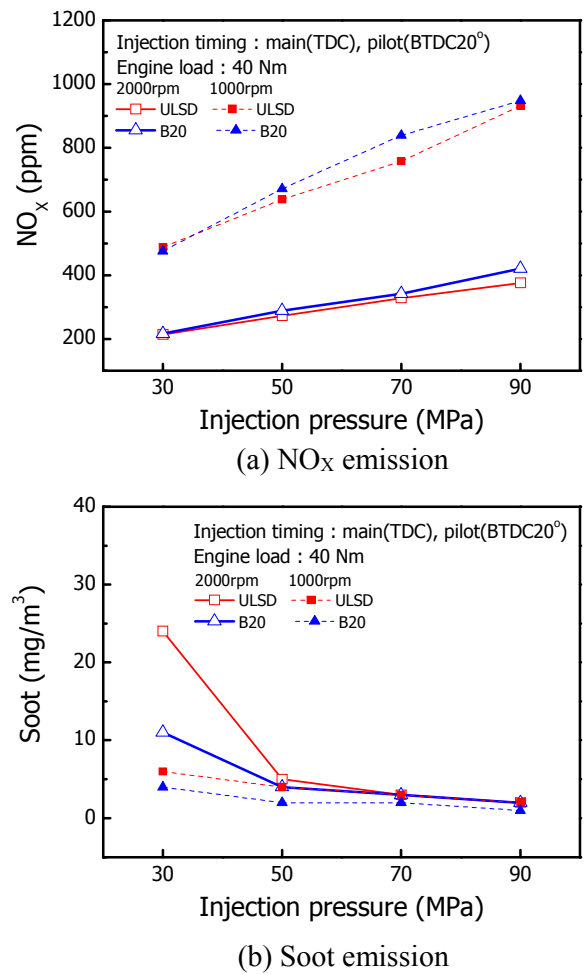


Fig. 5 Comparison of emission characteristics between 1000rpm and 2000rpm

산소성분의 영향으로, ULSD와 비교하여 동일 조건에서 상대적으로 과농한 당량비 영역이 감소하여 soot 배출량이 적은 것으로 판단된다.

Fig. 5는 2000rpm에서의 연료 분사압력 변화에 따른 배기특성을 1000rpm의 경우와 비교하여 나타낸 그래프이다.

Fig. 5(a)에서 NO<sub>x</sub>는 2000rpm의 경우에서도 1000rpm과 동일하게 두 연료 모두 분사압력이 증가할수록 연료의 미립화가 촉진되어 NO<sub>x</sub>가 많이 배출되는 경향을 보였으며, 모든 구간에서 B20의 경우가 ULSD에 비해 다소 많이 배출되었다. 그러나 엔진회전속도 1000rpm의 경우의 NO<sub>x</sub> 배출량은 2000rpm의 경우에 비하여 Fig. 2, 3에서 보는 바와 같이 연소압력과 열발생률 특성이 감소하여 전 실험범위에서 NO<sub>x</sub>의 배출량이 현저하게 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 5(b)에서 확인할 수 있는 바와 같이 soot의 경우에도 2000rpm에서 1000rpm과 마찬가지로 분사압력이 증가할수록 배출량이 감소하는 경향을 보이며, 모든 조건에서 B20의 경우 ULSD와 비교하여 적게 배출되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 1000rpm의 경우와 비교하여 2000rpm에서는 엔진회전속도가 증가에 따른 연소시간 단축의 영향으로 모든 조건에서 soot의 배출량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 분사압력이 낮은 경우 회전속도의 영향을 크게 받으나 분사압력이 증가함에 따른 회전속도의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 엔진회전속도가 증가하면 모든 조건에서 NO<sub>x</sub>의 배출량이 저감되는 반면에 soot의 배출량은 증가하여 NO<sub>x</sub>와 soot의 trade-off 관계를 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

4 실린더 커먼레일 직접분사식 디젤엔진에 파일럿분사를 적용하여 바이오디젤 혼합연료의 연소 및 배출물 저감특성을 다양한 연료분사압력과 엔진회전속도의 변화에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ULSD와 B20 모두 분사압력이 증가함에 따라 연소압력 및 열발생률이 증가하였다. B20의 경우 ULSD와 비교하여 분사압력이 낮아질수록 바이오디젤의 높은 점성으로 인하여 연료 착화 지연시간이 길어졌으나, 연소특성은 바이오디젤이 함유하고 있는 산소성분으로 인하여 ULSD보다 급격한 압력상승률과 높은 열발생률을 보였다.

(2) 두 연료 모두 분사압력이 증가할수록 NO<sub>x</sub>는 증가하였으며, soot는 감소하는 경향을 보였다. 또한 B20의 경우 바이오디젤 내에 함유된 11% 정도의 산소성분이 연소를 활성화시켜 ULSD에 비해 NO<sub>x</sub>는 다소 많이 배출되었으나, soot는 배출량이 감소하였다.

(3) 엔진회전속도가 1000rpm에서 2000rpm으로 증가한 경우 모든 분사압력에서 연소압력 및 열발생률이 낮아지는 경향을 보였다. 또한 전 영역에서 NO<sub>x</sub>의 배출량이 저감되는 반면에 soot의

배출량은 증가하는 배기특성을 보여 NO<sub>x</sub>와 soot의 trade-off 관계를 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project(무·저공해 자동차 사업단) 및 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지인력양성사업의 연구결과이며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Sydbom, A., Blomberg, A., Parnia, S., Stenfors, N., Sandstrom, T. and Dahlen, S-E., 2001, "Health Effects of Diesel Exhaust Emissions," *Eur Respir J*, Vol. 17, pp.733~746.
- (2) Kennedy, I. M., 2007, "The Health Effects of Combustion Generated Aerosols," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp.2757~2770.
- (3) Hallstrom, K. and Schiavon, J. M., 2007, "Euro IV and V Diesel Emission Control System Review," *SAE 2007-01-2617*.
- (4) Chatterjee, S., Walker, A. P. and Blakeman, P. G., 2008, "Emission Control Options to Achieve Euro IV and V on Heavy Duty Diesel Engines," *SAE 2008-28-0021*.
- (5) Chen, H., Shuai, S. J. and Wang, J. X., 2007, "Study on Combustion Characteristics and PM Emission of Diesel Engines Using Ester-Ethanol-Diesel Blended Fuels," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 2981~2989.
- (6) Baik, D. S. and Park, M. J., 2005, "Emission Characteristics in The Application of ULSD, Biodiesel and DOC in Heavy Duty Diesel Engine," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 28, No. 1, pp. 52~58.
- (7) Lin, Y., Wu, Y. G. and Chang C., 2007, "Combustion Characteristics of Waste-Oil Produced Biodiesel/Diesel Fuel Blends," *Fuels*, Vol. 86, pp.1772~1780.
- (8) Hass, M. J., Scott, K. M., Alleman, T. L. and McCormick, R. L., 2001, "Engine Performance of

- Biodiesel Fuel Prepared from Soybean Soapstock: A High Quality Renewable Fuel Produced from a Waste Feedstock," *Energy & Fuels*, Vol. 15, pp.1207~1212.
- (9) Jung, H., Kittelson, D. B. and Zachariah, M. R., 2006, "Characteristics of SME Biodiesel- Fueled Diesel Particle Emissions and the Kinetics of Oxidation," *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 40, pp.4949~4955.
- (10) Tsolakis, A., 2006, "Effects on Particle Size Distribution from the Diesel Engine Operating on RME-Biodiesel with EGR," *Energy & Fuels*, Vol. 20, pp.1418~1424.
- (11) Seo, Y. T., Seo, H. K. and Lee, C. S., 2007, "A Study on the Injection Characteristics of Biodiesel Fuels Injected through Common-rail Injection System," *Trans. of KSAE*, Vol. 15, No. 5, pp. 97~104.
- (12) Stiesch, G., 2003, *Modeling Engine Spray and Combustion Process*, Springer Verlag, Germany, pp. 261~ 263.