

압축착화 엔진에서 함산소 혼합연료의 연소 및 미세입자 배출물 특성

차 준 표¹⁾ · 윤 승 현¹⁾ · 전 문 수²⁾ · 이 창 식^{*3)}

한양대학교 대학원¹⁾ · 충주대학교 에너지시스템공학과²⁾ · 한양대학교 기계공학부³⁾

Combustion and Nano-particulate Emissions Characteristics of a Compression Ignition Engine Fueled with Oxygenated Blending Fuel

Junepyo Cha¹⁾ · Seung Hyun Yoon¹⁾ · Mun Soo Chon²⁾ · Chang Sik Lee^{*3)}

¹⁾Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Energy System Engineering, Chungju National University, Chungbuk 380-702, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 3 February 2009 / Accepted 25 March 2009)

Abstract : An experimental investigation was conducted to analyze the effects of biodiesel-ethanol and biodiesel-diesel blended fuels on the characteristics of combustion and exhaust emissions, and size distributions of particulate matter in a single cylinder diesel engine. The three types of test fuel were biodiesel and two blended fuels which were added ethanol and diesel by 20 % volume based fraction into biodiesel, respectively. In this study, the injection rate, combustion pressure, exhaust emissions and size distributions of particulate matter were measured under various injection timings and injection pressures.

The experimental results show that biodiesel-ethanol blended fuel has lengthened ignition delay and low combustion pressure in comparison with those of biodiesel and biodiesel-diesel blended fuel even if all fuels indicated similar trends of injection rate under equal injection pressures. In addition, the ethanol blended fuel significantly reduced nitrogen oxides (NOx) and soot emissions. And then the size distribution of particulate matters shows that blended fuels restrain the formation of particles which were beyond the range of 150nm comparison with biodiesel fuel.

Key words : Biodiesel(바이오디젤), Ethanol(에탄올), Combustion characteristic(연소특성), Emission characteristic(배기특성), Particulate emission(입자배출물)

1. 서론

최근 전 세계적으로 대기오염 및 지구 온난화 등의 환경문제와 한정적인 화석연료의 고갈로 에너지 수급의 불균형 등 많은 문제에 직면해 있다. 이에 따라 화석연료의 주 소비원인 자동차 산업에서는 더욱 강화되는 연비 및 배기규제를 대응하기 위하여 많은 연구가 필요한 실정이다. 그 중에서도 적용이 용이하고 친환경적인 대체연료에 대한 연구는 환경

문제 해결과 함께 신 에너지원 개발이라는 점에서 매우 중요하다. 대체연료 중 바이오매스 에너지는 식물 또는 폐기물 등에서 다양하게 추출할 수 있고 탄소의 재순환을 이용하기 때문에 CO₂의 증가를 억제할 수 있다. 또한 상대적으로 적은 비용으로 많은 생산량을 확보할 수 있는 친환경적인 재생 에너지원이므로 주목을 받고 있다.^{1,2)} 바이오매스의 대표적인 연료인 바이오디젤(Biodiesel)은 디젤 연료와 물리적 성질이 비슷하여 기존의 직분사식 디젤엔진에 적용이 용이하며 높은 세탄가로 인하여 착화성

*Corresponding author, E-mail: cslee@hanyang.ac.kr

이 우수하고 분자구조 내 산소를 포함하고 있는 합산소 연료이므로 탄화수소 배출물(HC) 및 입자상물질(PM)를 저감시킬 수 있다.³⁾

그러나 바이오디젤은 저온(0°C <)시 결정화되는 저온 유동성 문제점과 상대적으로 높은 표면장력과 점도에 의한 낮은 미립화 특성을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 바이오디젤에 상대적으로 낮은 점도와 높은 휘발성의 성질을 가진 에탄올(Ethanol)을 혼합하여 저온 유동성과 미립화를 향상시킬 수 있는 방법이 알려져 있다.^{4,5)}

그러나 디젤연료의 발열량(LHV, Low Heating Value)과 비교하여 바이오디젤은 약 12%, 에탄올은 37.2% 상대적으로 낮기 때문에 바이오디젤-에탄올 혼합연료는 출력 저하의 문제점을 가지고 있다.⁶⁾ 반면 바이오디젤-디젤의 혼합연료는 디젤연료의 낮은 표면 장력과 점도에 의하여 미립화 향상과 저온 유동성 특성을 보완할 수 있고 낮은 출력의 문제점 또한 보완 가능하기 때문에 바이오디젤에 디젤을 혼합한 경우도 연구되어 왔다.⁷⁾

따라서 본 연구에서는 체적기준으로 80:20으로 혼합한 바이오디젤-에탄올 혼합연료(BDE20)와 바이오디젤-디젤 혼합연료(BDD20)를 사용하여 연소 특성, 배기 배출물 특성 및 미세입자 분포 특성을 다양한 분사시기에 대하여 실험하고 그 결과를 바이오디젤(B100)과 비교함으로써 두 혼합연료의 특성에 대하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 엔진과 인젝터의 주요 제원은 Table 1에 나타내었다.

실험장치는 커먼레일 디젤엔진, 연료 공급 및 압력 제어장치, 연료 분사 제어장치, 연소 및 배기 분석을 위한 장치로 구성되며 Fig. 1에 나타내었다.

압축비가 17.8:1이고 배기량이 373.3cc인 커먼레일 분사시스템의 단기통 디젤엔진을 DC 동력계(55kW)를 이용하여 엔진의 운전속도 및 토크를 제어하였다.

연료 공급 및 압력 제어장치는 병렬로 연결된 두 개의 고압펌프(HSF-300, Haskel)를 이용하여 챔버

Table 1 Specifications of the test engine

Description	Specification
Type	Single cylinder DI engine
Bore×Stroke (mm)	75×84.5
Displacement volume (cc)	373.3
Compression ratio	17.8
Valve type	DOHC 4
Fuel injection system	Bosch common-rail
Number of injection hole	6
Nozzle hole diameter (mm)	0.128
Spray angle (°)	156

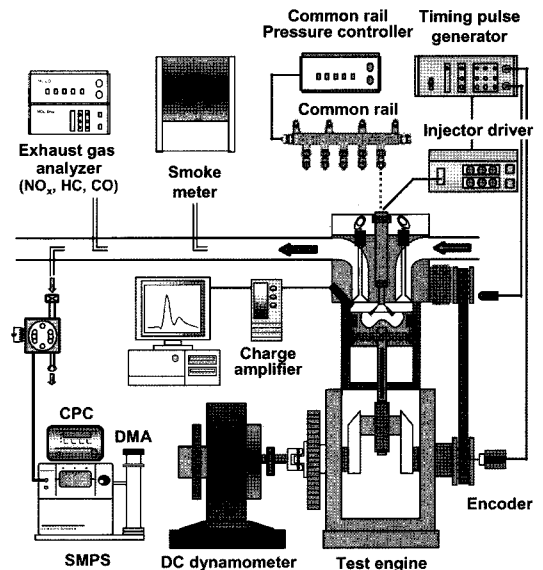


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

내에 연료를 가압하고 압력제어기를 통하여 커먼레일의 압력을 일정하게 유지하였다.

분사시스템은 크랭크 각 센서(1800pulse/rev)와 캠축 위치 센서를 설치하고 이 두 신호를 타이밍 펄스 발생기(Timing pulse generator)에서 논리연산에 의하여 TDC를 인식하여 이 시점을 기준으로 0.1° 단위로 분사시기 제어가 가능하도록 했다. 그리고 타이밍 펄스 발생기로부터 인가받은 지정된 분사시기에서 인젝터 드라이버(TDA 3300, TEMS)는 통전 시간을 조절하여 인젝터에서 분사량을 제어할 수 있도록 하였다.

연소해석을 위한 실린더 내의 압력 데이터 취득을 위하여 엔진 헤드에 피에조 압전 소자 방식의 압

력센서(6052C, Kistler)를 설치하였고, 이 신호를 DAQ보드(PCI-MIO-16E-1, NI)와 Labview 소프트웨어를 사용하여 실시간으로 취득하였다.

배기가스 분석을 위하여 soot의 농도를 측정하는 매연측정기(Smoke meter-415S, AVL)와 입자상 물질의 크기 10.4~392.4nm 범위 내에서 크기별 배출 분포를 측정하는 SMPS(Scanning mobility particle sizer)를 구성하였다. 또한 유해배출가스 농도를 측정하기 위하여 NO_x측정기(BCL-511, Yanaco)와 HC 및 CO 분석기(MEXA-554JK, Horiba)를 설치하여 측정하였다.

2.2 실험 조건

분사 압력과 분사시기에 따른 바이오디젤과 두 혼합연료의 연소 및 배기 배출물의 변화를 알아보기 위하여 70MPa, 130MPa의 분사압력으로 TDC에서 BTDC 15°까지 3°간격으로 분사시기를 진각 시키며 실험하였다. 또한 엔진의 회전속도는 1400rpm으로 유지하였고 바이오디젤과 혼합연료의 분사량도 12mg으로 유지하였다. 이와 같은 실험 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experimental conditions

Item	Experimental condition
Engine speed (rpm)	1400
Coolant temperature (°C)	70
Oil temperature (°C)	70
Intake air pressure	Naturally aspirated
Injection pressure (MPa)	70, 130
Start of energizing (°BTDC)	0, 3, 6, 9, 12, 15
Mass of fuel injection (mg)	12
Fuel	B100, BDD20, BDE20

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분사량 및 분사율 특성

Fig. 2는 분사압력 70MPa, 130MPa일 때 통전시간(energizing duration)을 변화시키며 정밀 천칭을 사용하여 측정한 각 연료의 분사량에 대한 결과이다. 분사압력이 70MPa인 경우에 B100과 BDE20은 동일한 분사량을 보이고 BDD20은 다소 적은 분사량을 보이고 있다. 즉 연료를 동일한 양으로 분사하기 위

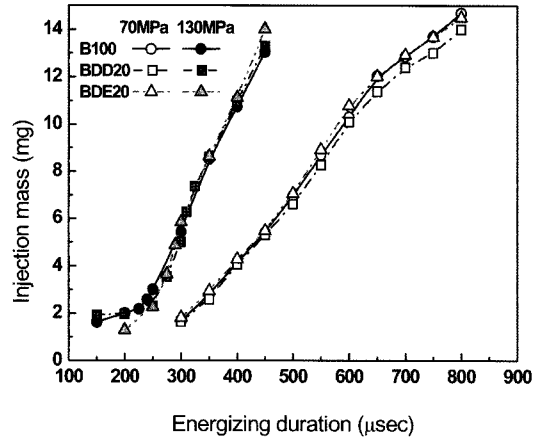


Fig. 2 Comparison of injected fuel mass according to energizing duration

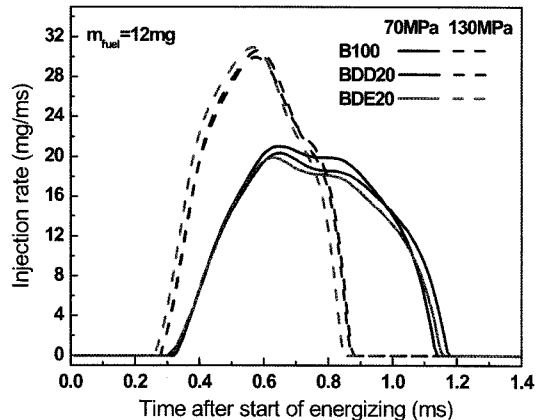


Fig. 3 Comparison of injection rate of test fuels according to injection pressure(mfuel=12mg)

해서는 BDD20은 통전시간을 조금 늘려야 함을 알 수 있다. 그러나 분사압력 130MPa에서는 세 연료 모두 매우 비슷하여 큰 차이점을 보이지 않는다.

Fig. 3은 B100과 BDD20, BDE20의 분사율을 분사 압력 70MPa, 130MPa에서 12mg으로 동일하게 분사하여 비교한 것이다. 세 연료 모두 분사압력이 증가하면 실제 분사 시간(actual injection duration)은 약 44% 감소하고 최대 분사율은 약 56.4% 증가한다. 분사압력 70MPa에서는 B100의 최대 분사율이 가장 높으며 이는 연료의 물성치 중에서 점성계수의 영향 보다 두 혼합연료보다 높은 B100의 밀도에 의한 것으로 판단된다. 그러나 130MPa에서는 B100이 두 혼합연료에 비하여 최대 분사율이 가장 낮지만 크

게 차이가 없음을 볼 수 있다. 또한 각 연료는 같은 분사압력에서 분사 지연 시간(injection delay time) 과 실제 분사 시간은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.2 연소 및 배기 특성

Fig. 4는 B100과 BDD20, BDE20을 분사압력 70, 130MPa일 때 엔진 회전속도를 1400rpm으로 유지하며 분사량 12mg과 분사시기 BTDC 3°에서 분사한 결과인 연소압력과 열발생율을 나타낸 것이다. 분사압력이 70MPa에서 130MPa로 증가시키면 세 연료 모두 최대 연소압력은 높아지고 열발생율이 더욱 급격히 높아지며 착화 지연 시간(ignition delay)은 짧아지는 결과를 나타낸다.

이는 동일한 분사시기에 같은 양의 연료를 분사해도 Fig. 3에서 나타나는 것과 같이 고압분사의 경우에는 상대적으로 짧은 시간에 분사를 완료하기 때문에 분무의 운동량이 더욱 크게 되어 난류 강도를 증가시키는 결과를 가져와 연소가 더 활발하게 진행된 것으로 판단된다.

B100과 BDD20은 착화 지연 시간과 최대압력 그리고 열발생율이 거의 비슷하게 나타나지만 BDE20은 더욱 길어진 착화 지연 시간을 가지고 최대 연소압력은 낮아졌으며 열발생율은 상대적으로 높게 나타난다. 착화 지연 시간의 주요 인자인 세탄가(cetane number)는 바이오디젤이 48~65이고 디젤이 40~55이며 에탄올은 6이다. 그러므로 B100과 BDD20의 세탄가는 매우 비슷하지만 BDE20은 두 연료와 비교하여 상대적으로 낮기 때문에 착화 지연 시간이 더 길어진 것으로 판단된다. 그리고 B100의 발열량은 37.4MJ/kg이고 BDD20의 발열량은 38.6MJ/kg으로 두 연료의 최대 연소압력은 비슷하지만 BDD20이 다소 높게 보이며 BDE20의 발열량은 31.1MJ/kg이므로 위의 두 연료에 비해 낮은 최대 연소압력을 나타내는 것으로 판단된다. 그러나 BDE20의 더 높은 열발생율은 에탄올 첨가로 인하여 연료 내 산소 함유량(15.2wt.)이 B100(10.8wt.)과 BDD20(8.8wt.)의 산소 함유량보다 높고 길어진 착화지연시간에 의하여 상대적으로 더 활발한 예혼합 연소에 의한 결과로 판단된다.

Fig. 5는 연료의 분사량(12mg)과 분사압력(70MPa)

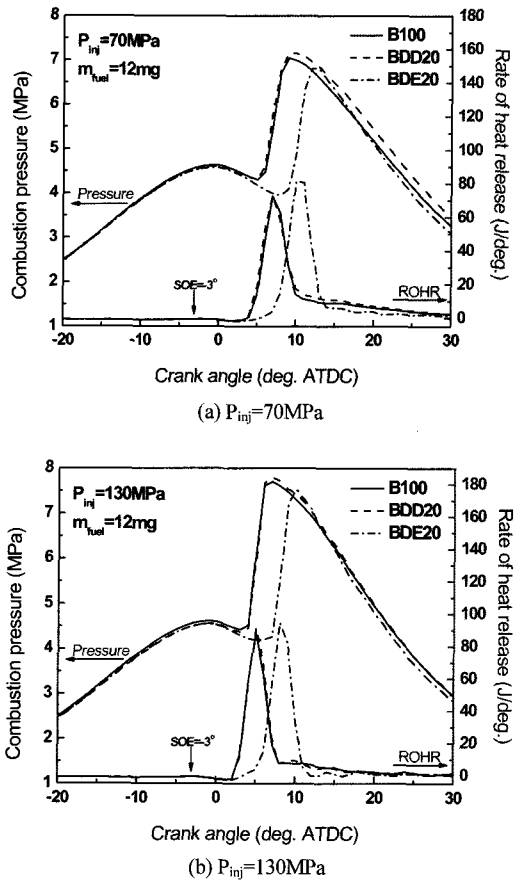
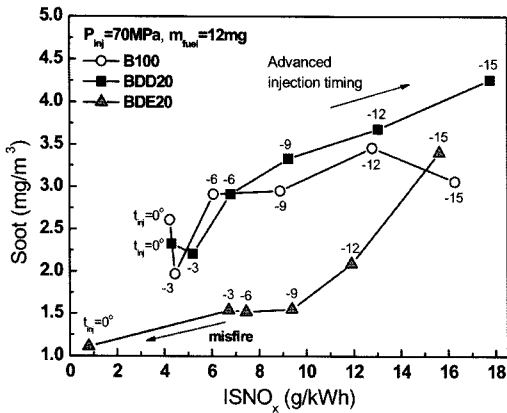


Fig. 4 Combustion characteristics of test fuels with injection pressure (1400rpm)

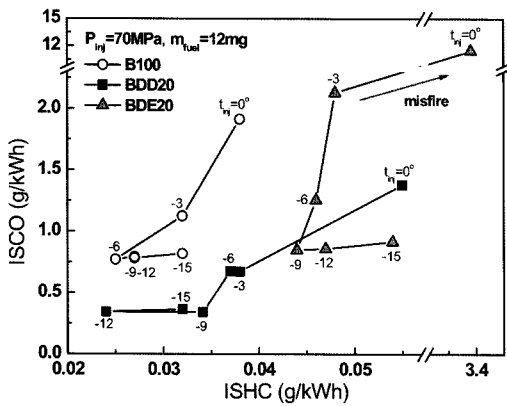
이 일정할 때 분사시기의 변화에 따른 배기 배출물의 특성을 각 연료에 대하여 비교하였다.

Fig. 5(a)는 NO_x와 soot에 대하여 나타내었으며 각 연료 모두 분사시기가 지각 될수록 NO_x와 soot의 동시저감을 보이고 있다. 특히 BDE20은 BTDC 0°에서 NO_x와 soot의 배출이 거의 없는데 이는 Fig. 6에서 나타나는 현저하게 낮은 IMEP와 Fig. 5(b)에서 불완전 연소물인 HC와 CO의 배출량이 매우 높은 것을 고려하여 불 때 연소가 거의 일어나지 못하고 있음을 알 수 있다.

B100과 BDD20은 NO_x와 soot의 배출 특성이 매우 비슷한 경향을 보이지만 BDE20의 경우 동일한 분사시기에서 위의 두 연료에 비하여 상대적으로 매우 적은 soot의 배출과 다소 많은 NO_x의 배출 특성을 보인다. 이는 BDE20의 연료 내 많은 산소 함유량으



(a) Soot and ISNO_x



(b) ISCO and ISHC

Fig. 5 Effect of injection timing on the exhaust emissions characteristics (1400rpm)

로 인하여 soot의 배출은 저감하고 높은 연소 온도와 연료 내 높은 산소 함유량에 의하여 연소시 NO_x의 배출이 다소 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 5(b)는 CO와 HC의 배출 특성을 나타내었으며 각 연료는 분사시기가 진각 될 수록 CO의 배출이 저감되지만 약 BTDC 9°부터는 더욱 진각된 분사시기에서도 CO의 배출량의 변화가 거의 없다. HC의 경우에는 연료에 따라 차이가 많이 나며 B100과 BDD20, BDE20의 순으로 적게 배출되는 경향을 나타내었다. 특히 BDE20에서 CO와 HC의 배출이 많은 것은 길어진 착화 지연 기간으로 인하여 배기행정에서 연소가 일어나고 또한 에탄올의 높은 증발 잠열에 인한 국부적인 냉각효과 때문에 많은 불완전 연소물이 생성되는 것으로 판단된다.

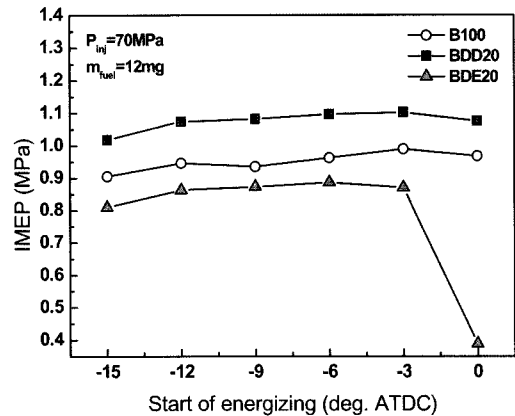


Fig. 6 Effect of start of energizing timing on the indicated mean effective pressure for test fuels (1400rpm)

Fig. 6은 12mg의 분사량과 70MPa의 분사압력에서 분사시기에 따른 각 연료의 IMEP(Indicated Mean Effective Pressure)를 비교한 것이며 연료의 발열량에 의한 IMEP 차이는 상대적으로 크게 나타나지만 분사시기에 의한 변화는 매우 적은 것으로 보여진다.

Fig. 7은 동일한 연소조건($P_{inj}=70\text{MPa}$, $m_{fuel}=12\text{mg}$, $t_{inj}=BTDC\ 3^\circ$, 1400rpm)에 대한 각 연료의 미세입자 입경 분포 특성을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 배기관에서 포집된 배기가스는 500:1로 희석하고 또한 측정 과정에서 미세입자들의 응축을 방지하기 위하여 희석온도를 120°C로 유지하였다. 일반적으로 직경 50nm 이하의 입자들은 배기과정 중에 희석과 냉각에 의해 형성되는 휘발성 유기물과 황화합물로 이루어져 있다.⁸⁾

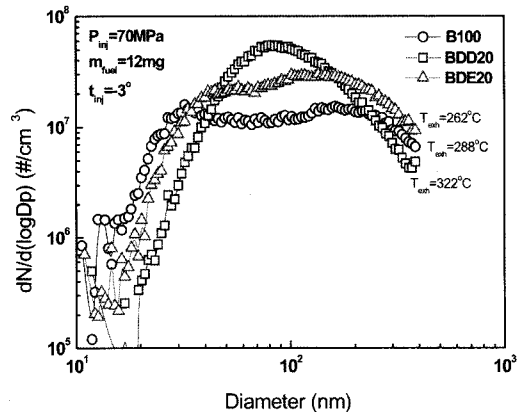


Fig. 7 Particle size distribution characteristics of test fuels (1400rpm)

BDD20의 경우에 50nm 이하의 직경을 가지는 미세입자의 수가 다른 두 연료보다 낮은 것은 상대적으로 높은 BDD20의 배기온도($T_{exh}=322^{\circ}\text{C}$)에 의하여 휘발성 유기물이 감소한 결과로 판단된다. 또한 체적과 질량 분포에 큰 영향을 미치는 150nm 이상의 입자의 경우에는 BDE20일 때에 가장 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 5와 같이 BDE20에서 soot의 배출은 다른 두 연료보다 상대적으로 적지만 불완전 연소 생성물인 CO와 HC의 배출이 매우 높은 것에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결론

커먼레일 시스템이 적용된 단기통 디젤엔진으로 바이오디젤, 에탄올과 바이오디젤-디젤 혼합연료를 다양한 조건에서 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) B100과 혼합연료인 BDD20과 BDE20의 분사량과 분사율은 연료에 따른 차이점이 크게 보이지 않지만 분사압력의 증가에 따라 분사량은 크게 증가하며 분사율도 매우 급격하게 증가함을 보였다.
- 2) 동일한 조건에서 분사압력을 증가시키면 각 연료 모두 연소압력과 열발생율이 증가하고 착화 지연 시간이 짧아지는 것이 확인되었다. 각 연료의 종별에 따라 분사압력의 영향을 비교해 보면 BDE20은 B100과 BDD20에 비하여 상대적으로 낮은 발열량과 세탄가로 인하여 낮은 연소압력과 지각된 착화시점의 특성을 보이지만 연료 내 높은 산소 함유량으로 인하여 더 높은 열발생율을 보였다.
- 3) 분사시기 변화에 따른 배기 배출물의 특성은 모든 연료에서 NO_x 와 soot의 배출이 분사시기가 지각될수록 감소하였으며 특히 BDE20은 두 연료에 비하여 매우 적은 양의 soot 배출 특성을 보였지만 미연소 배출물(HC, CO)은 증가하는 경향을 보였다.
- 4) 입경이 50nm 이하의 미세입자 분포에서는 BDD20인 경우에 상대적으로 B100과 BDE20보다 적은 미세입자 배출을 보였고, 체적과 부피에 영향을 미치는 150nm 이상의 미세입자 분포에서는 BDE20인 경우에 다른 두 연료보다 많은 미세입자 배출을 보였다.

후 기

본 연구는 두뇌한국21 사업의 지원과 2008년 정부재원으로 한국 학술진흥재단의 지원(KRF-2008-314-D00056)을 받아 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

References

- 1) H. K. Suh, S. W. Park, S. I. Kwon and C. S. Lee, "Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Bio-diesel Fuels," Transactions of KSAE, Vol.12, No.6, pp.23-29, 2004.
- 2) A. Mohammadi, T. Ishiyama, T. Kakuta and S. S. Kee, "Fuel Injection Strategy for Clean Diesel Engine Using Ethanol Blended Diesel Fuel," SAE 2005-01-1725, 2005.
- 3) S. H. Yoon, M. Y. Kim, S. I. Kwon, H. S. Jeon and C. S. Lee, "Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel Derived from Soybean in a Common-Rail Diesel Engine," Spring Conference Proceedings, Vol.1, KSAE, pp.1922-1928, 2006.
- 4) T. Shudo, A. Fujibe, M. Kazahaya, Y. Aoyagi, H. Ishii, Y. Goto and A. Noda, "The Cold Flow Performance and the Combustion Characteristics with Ethanol Blended Biodiesel Fuel," SAE 2005-0-3707, 2005.
- 5) S. H. Park, H. K. Suh, H. J. Kim and C. S. Lee, "Atomization Characteristics of Ethanol-biodiesel Blending Fuel," Spring Conference Proceedings, Vol.1, KSAE, pp.604-610, 2007.
- 6) S. H. Yoon, J. P. Cha, J. C. Kim and C. S. Lee, "Combustion and Particulate Emissions Characteristics of CI Engine Fueled with Bioethanol Blended Fuel," Spring Conference Proceedings, Vol.1, KSAE, pp. 534-539, 2008.
- 7) Y. T. Seo, H. K. Suh, S. H. Bang and C. S. Lee, "A Study of the Injection Characteristics of Biodiesel Fuels Injected through Common-rail System," Fall Conference Proceedings, Vol.1, KSAE, pp.570-575, 2006.
- 8) D. B. Kittelson, "Engines and Nanoparticles: A Review," J. Aerosol Sci. Vol.29 No.5/6, pp.575-588, 1998.