

압축착화기관에서 DME-바이오디젤 혼합연료의 분무 및 배기 특성에 관한 연구[§]

차준표* · 박수한* · 이창식* · 박성욱*†

* 한양대학교 기계공학과

Study on Spray and Exhaust Emission Characteristics of DME-Biodiesel Blended Fuel in Compression Ignition Engine

Junepyo Cha*, Su Han Park*, Chang Sik Lee* and Sung Wook Park*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received May 26, 2010 ; Revised September 25, 2010 ; Accepted September 29, 2010)

Key Words : Biodiesel(바이오디젤), Dimethyl-Ether(디메틸에테르, DME), Spray Characteristic(분무 특성), Combustion Characteristic(연소 특성), Emission Characteristic(배기 특성)

초록: 본 연구는 DME-바이오디젤 혼합연료의 분무 및 연소, 배기 특성을 바이오디젤과 비교한 실험적 연구이며 실험연료는 바이오디젤 (BD100)과 중량 기준으로 DME를 20% 혼합한 DME-바이오디젤 혼합연료 (B-DME20)이다. 거시적 분무 특성을 연구하기 위하여 분무 이미지로부터 분무도달거리, 분무각을 측정하였으며, 연소 및 배기 특성은 단기통 직접 분사식 압축착화 기관을 이용하여 분석하였다. 실험결과 바이오디젤과 DME-바이오디젤 혼합연료는 분사울에서는 큰 차이가 없었지만 혼합연료의 경우에 착화지연기간이 짧고 연소압력이 높았으며 soot 배출물이 현저하게 줄어들었다.

Abstract: The purpose of this study is to investigate experimentally the spray-atomization and combustion-emission characteristics of biodiesel-DME blended fuel. In this study, two types of test fuels pure biodiesel (BD100) and blended fuel (B-DME20) were used, and the spray and combustion characteristics of different fuel compositions were analyzed. DME constitutes 20% and biodiesel constitutes 80% (by mass fraction) of the blended fuel. The overall spray characteristics, spray tip penetration, and cone angle were evaluated using frozen spray images. In addition, the combustion and emission characteristics were analyzed on the basis of the evaluated data for a single-cylinder CI engine with common-rail injection system. It was revealed that the injection profiles of both the test fuels for a given injection pressure showed similar trends. However, the injection profiles of the blended fuel (B-DME20) indicated shorter ignition delay than those of biodiesel.

1. 서 론

전 세계적으로 강화되는 배기규제와 함께 환경오염 문제가 부각되고 있으며, 이에 대응하기 위해 배출가스 저감 기술 및 청정 연료를 사용한 에너지 개발에 관한 연구들이 많이 이루어지고 있다. 일반적으로 디젤연료는 질소산화물(NO_x)과 입자상 물질(particulate matter, PM) 등의 유해 배출물을

배출하므로 이에 대한 해결책으로 대체연료에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 합산소 연료인 바이오디젤, DME, 바이오에탄올 등은 연소 과정 시 유해 배출물의 저감이 가능하며 제조 과정이 복잡하지 않아 대체 연료로 주목받고 있다. 하지만 바이오디젤의 경우에는 장기보관 시에 산화되고 높은 점도로 인하여 연료미립화 특성이 좋지 않으며 DME는 낮은 점도와 고무를 부식시키고 대기압에서 기체상태이기 때문에 연료 보관 및 공급라인의 개선이 필요하다. 이러한 합산소 연료의 단점들을 보완하고 연소 및 배출물 특성을 분석하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾

Kim 등⁽⁶⁾은 바이오디젤과 DME의 분무 및 증발

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

† Corresponding Author, parks@hanyang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

특성을 디젤연료와 비교하여 DME는 디젤과 바이오디젤에 비하여 현저히 낮은 점성과 표면장력을 갖고 있어 분무 미립화와 증발이 잘 되는 것으로 보고하였다. 이러한 연구들 이외에도 두 가지 이상의 연료의 장점을 활용한 혼합연료에 관한 연구들도 진행되고 있다. Park 등⁽⁷⁾은 디젤과 바이오에탄올을 바이오디젤에 혼합하여 분무도달거리 및 분무각과 같은 거시적 분무특성과 평균 분무 입경과 같은 미시적 분무 특성을 실험적으로 연구하였으며, Cha 등⁽⁸⁾은 위의 분무 특성을 기초로 연소 및 미세입자 배출물 특성에 관하여 실험적 연구를 하였다.

따라서 본 연구에서는 바이오디젤-DME 혼합연료의 분무 및 연소와 배기 특성을 순수 바이오디젤과 비교 분석하였다. 바이오디젤과 DME의 혼합은 압축착화기관에 가장 적용이 용이한 바이오디젤의 단점인 높은 점도를 윤활성에 문제점이 야기될 정도로 낮은 점도를 가진 DME를 혼합하여 낮춤으로써 미립화를 향상시키며 연료 내 더 많은 산소를 포함시킴으로써 연소를 더욱 촉진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1는 연료의 분사율을 측정하기 위한 장치로써 커먼레일식 연료 분사장치, 분사율 측정장치로 구성되어 있다. 연료 분사장치는 커먼레일에 고압의 연료를 안정적으로 공급하기 위해 두 개의 고압펌프(Haskel, HSF-300)를 병렬로 연결하여 사용하였다. 분사율 측정장치는 인젝터, 압력과 측정을 위한 압력센서(Kistler, 4045A50)와 어댑터, 약 5m 길이의 측정관, 압력용기, 압력 조절용 밸브로 구성되었으며, 데이터 취득을 위해 DAQ 보드(National Instrument, NI6013)와 Labview 프로그램을 이용하였다. 분사율은 연료가 가득 채워진 관으로 연료가 분사될 때 관 내부의 압력변화를 측정하여 분사량과 함께 분사율을 계산하는 방법인 Bosch법⁽⁹⁾을 사용하였다.

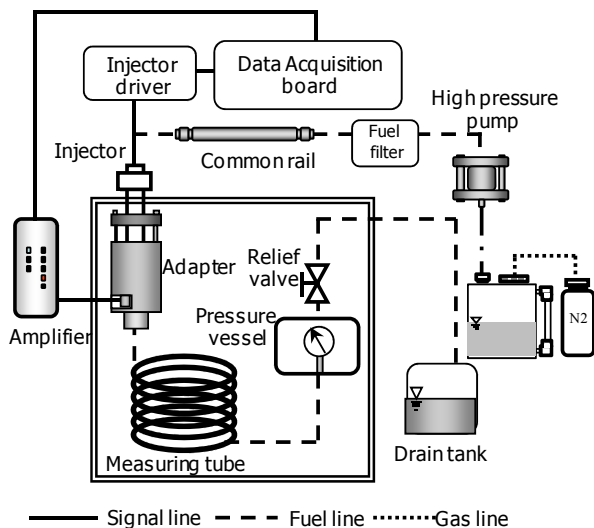


Fig. 1 Schematic of the injection rate meter

본 연구에서는 바이오디젤 및 DME-biodiesel 혼합연료의 분무특성을 분석하기 위해 Fig. 2와 같은 분무 가시화 장치를 구성하였다. DME는 대기압에서 기체상태이므로 0.5MPa 이상 가압하여 액체상태로 연료를 공급할 수 있도록 하였다. 실험연료는 필터를 통과하며 연료 내 포함된 불순물이 제거되도록 하였으며, 고압펌프와 커먼레일 분사시스템을 통해 인젝터로 공급되었다. 실험연료는 3MPa로 가압된 챔버 내로 분사하였으며, 분사된 연료는 메탈-할라

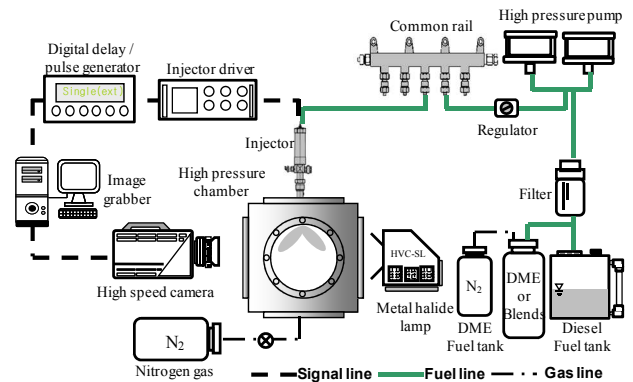


Fig. 2 Schematic of the DME-biodiesel spray visualization system

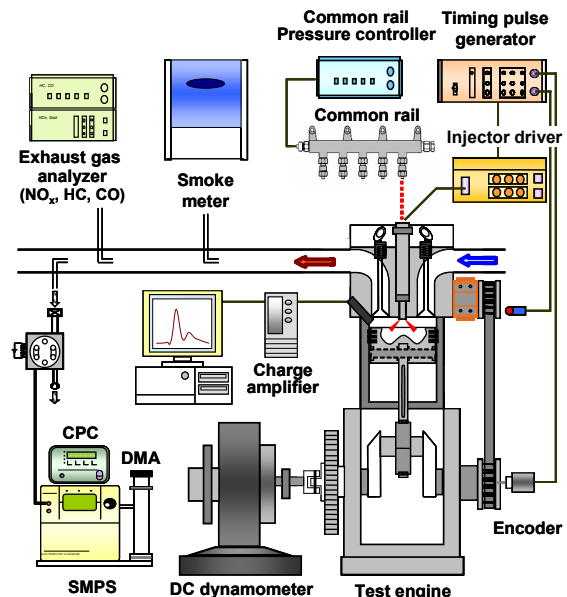


Fig. 3 Schematic diagram of test engine and emission analyzer system

Table 1 Specifications of test engine and injector

Description		Specification
Type		Single cylinder DI engine
Bore × Stoke (mm)		75 × 84.5
Displacement volume (cc)		373.3
Compression ratio		17.8
Valve type		DOHC 4
Intake valve	Open	BTDC 8°
	Close	ABDC 52°
Exhaust valve	Open	BBDC 8°
	Close	ATDC 38°
Number of injection hole		6
Fuel injection system		Bosch common-rail
Nozzle hole diameter (mm)		0.128
Spray angle (°)		156

이드 램프를 광원으로 하는 고속 카메라(Photron, Fastcam-APX RX)를 이용하여 분무영상을 촬영하였다. 분무 영상은 영상 취득 및 분석 장치가 장착된 컴퓨터에 저장하였으며, 고속카메라와 인젝터의 분사신호는 디지털 파동 발생기(Berkeley Nucleonics Corp., Model 555)를 이용하여 동기화하였다.

또한 연소 및 배기 특성을 실험하기 위한 단기통 압축 착화 엔진의 구성을 Fig. 3에 나타내었으며 주요 제원은 Table 1과 같다.

압축비가 17.8:1이고 배기량이 373.3cc인 커먼레일 시스템의 단기통 디젤엔진을 DC 동력계(55kW)를 이용하여 엔진의 운전속도를 제어하였다. 분사시스템에서는 병렬로 연결된 두 개의 고압펌프(HSF-300, Haskel)를 이용하여 연료 분사압을 제어하였고, 타이밍 펄스 발생기(Timing pulse generator, Blue planet)와 인젝터 드라이버(TDA 3300, TEMS)를 이용하여 분사량과 분사시기를 제어하였다. 연소해석을 위하여 엔진 헤드에 피에조 압전 소자 방식의 압력센서(6052C, Kistler)를 설치 하였고, DAQ보드(PCI-MIO-16E-1, NI)와 Labview 소프트웨어를 사용하여 연소실 내 압력데이터를 실시간으로 취득하였다. 배기가스 분석을 위하여 Soot의 농도를 측정하는 매연측정기(Smoke meter-415S, AVL)와 유해배출가스 농도를 측정하는 배기분석기(MEXA-554JK, Horiba)를 이용하였다.

2.2 실험방법

본 실험은 바이오디젤-DME 혼합연료의 특성을 알아보기 위하여 중량기준으로 바이오디젤 80 wt%와 DME 20 wt%를 혼합한 B-DME20을 순수 바이오디젤(B100)과 그 특성을 비교하였다. Table 2는 실험연료의 기본이 되는 바이오디젤과 DME

Table 2 Properties of fuels

Property	Biodiesel	DME
Chemical formula	-	CH ₃ OCH ₃
Carbon content (wt %)	77	52
Hydrogen content (wt %)	12	13
Oxygen content (wt %)	11	35
Density (kg/m ³)	884	660
Viscosity (mm ² /s)	4.022	0.12-0.15
Boiling point temp. (°C)	315-350	-23
Cetane number	48-65	68
Low heating value (MJ/kg)	37.4	28.6

Table 3 Experimental conditions

Test	Conditions	
Spray Analysis	Injection pressure (MPa)	100
	Ambient pressure (MPa)	3
	Injection quantity (mg/cycle)	4, 8, 12
	Ambient Temperature (K)	293
	Fuel Temperature (K)	293
Combustion and Emissions Analysis	Engine speed (rpm)	1500
	Coolant temperature (K)	343
	Injection pressure (MPa)	50, 100
	Injection quantity (mg/cycle)	12
	SOE timing	-8 ~ 0 (TDC)
Test fuels	BD100, B-DME20	

의 물성치를 나타내었고 Table 3은 본 연구의 실험조건으로 분무 실험과 연소 및 배기실험에 대하여 나타내었다.

연소 해석에서 연소시작점 또는 착화시점(start of combustion, SOC)은 누적 열발생량(accumulated heat release)의 10%일 때의 크랭크 각으로 정의하며 CA10으로 나타내었다. 또한 연소종료시점(end of combustion, EOC)은 누적 열발생량의 90%일 때의 크랭크 각으로 정의하며 CA90으로 나타내었다. 연소기간(combustion duration)은 연소시작점과 연소 종료시점 사이 구간으로 정의 하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{comb} = CA90 - CA10 \quad (1)$$

θ_{comb} 는 연소기간이며 단위로는 °CA이다.

배기 해석에서는 IS-emission(Indicated Specific-emission)과 EI-emission(Emission Index-emission)의 단위를 사용하였으며 그 정의는 다음과 같다.

$$IS - emission = \frac{\dot{m}_{emission}}{P} \quad (\text{g/kWh}) \quad (2)$$

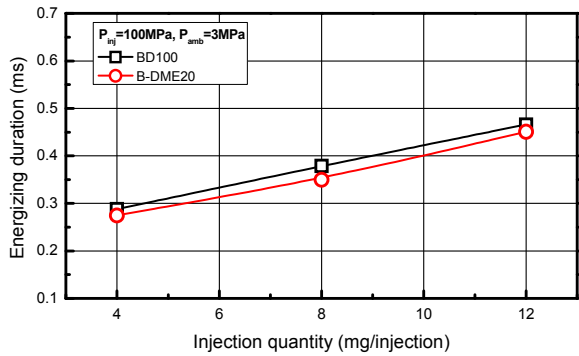
$$EI - emission = \frac{\dot{m}_{emission}}{\dot{m}_{fuel}} \quad (g/kg_{fuel}) \quad (3)$$

$\dot{m}_{emission}$ 은 배기의 질량유량이고, \dot{m}_{fuel} 은 실험연료의 질량유량이며 P (Power)는 전체 사이클의 출력이다. 즉, IS-emission은 단위 출력당 배기 배출량이고, EI-emission은 단위 연료량당 배기 배출량으로 정의된다.

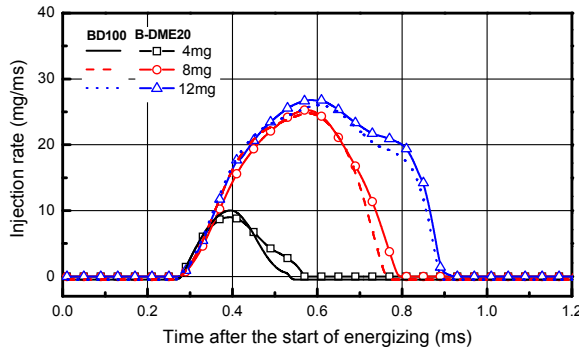
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분무 특성

Fig. 4는 바이오디젤 연료와 DME-biodiesel 혼합연료의 분사특성을 나타낸 것이다. 분사특성은 분사량과 분사율로부터 분석하였다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 DME가 혼합된 바이오디젤 연료는 순수 바이오디젤과 동일한 양을 분사하기 위해서는 통전시간을 다소 줄여야 하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 Fig. 4(b)에도 나타난 바와 같이 DME의 혼합으로 인해 실제 분사기간이 다소 길어지기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4(b)에서는 분사량의 변화에 따른 바이오디젤과 DME 혼합 바이오디젤 연료의 분사율 특성을 나타낸 것이다.



(a) Energizing duration



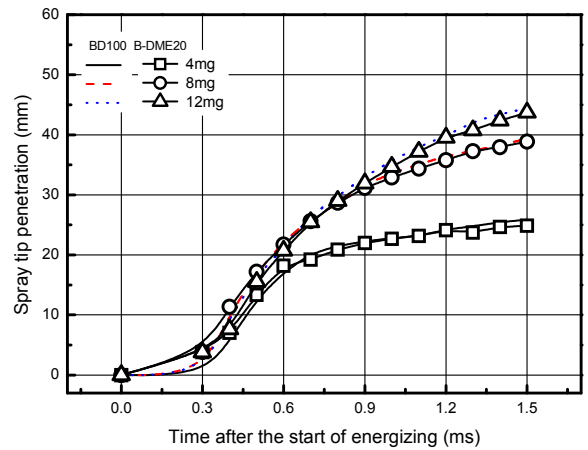
(b) Injection rate profile

Fig. 4 Injection characteristics of DME and DME-biodiesel blended fuel ($P_{inj}=100MPa$, $P_{amb}=3MPa$)

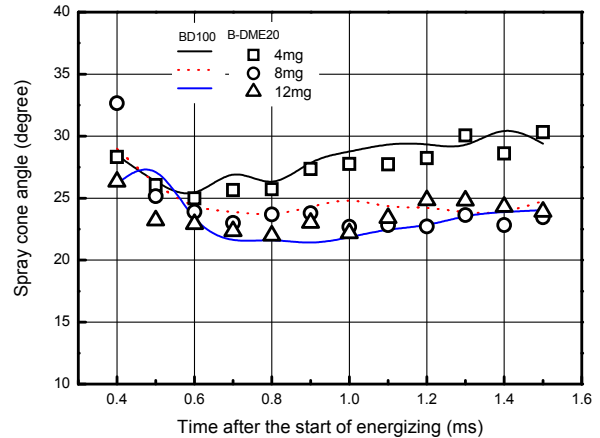
분사량의 증가로 인해 최고 분사율 값의 증가와 통전기간 및 실제 분사기간이 증가하는 결과를 확인할 수 있었다. 또한, DME가 20% 혼합된 바이오디젤의 경우 실제 분사기간이 다소 길어지는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 B100의 Drain압력(대기압≃1bar) 보다 높은 B-DME20의 Drain압력(20bar)이 길어진 실제 분사 기간에 영향을 미쳤으며, DME의 연료 특성인 높은 압축계수 또한 영향을 미친 것으로 판단된다.

고속카메라로부터 얻어진 분무영상을 통해 분무 도달 거리 및 분무각 특성을 분석하여 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 분무 도달 거리는 노즐팁과 인젝터 분공에서 분사된 연료 사이의 최대 거리로 정의하였으며, 분무각은 노즐팁과 분무의 좌우 반경방향의 가장 외곽지점이 이루는 사이각으로 정의하였다.

Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 분사량을 증가하면 분무 도달 거리 또한 증가하는 결과를 나타냈다.



(a) Spray tip penetration



(b) Spray cone angle

Fig. 5 Macroscopic spray characteristics of B100 and B-DME20 fuels ($P_{inj}=100MPa$, $P_{amb}=3MPa$)

이것은 분사량의 증가에 따른 초기 분무 운동량의 증가로 인한 것이며, BD100과 B-DME20은 분무 도달 거리에서 큰 차이가 없었다. 이것은 DME연료가 높은 분위기 압력 하에서는 액체연료와 유사한 분무 거동을 나타내며, 비증발장 영역에서는 바이오 디젤연료가 혼합연료의 분무 거동에 지배적인 영향을 끼치기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 분사량의 증가로 인해 분무각은 대체로 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 4(b)의 분사율 특성을 참고했을 때, 각각의 분무각은 분사가 끝난 이후 증가하는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 분사가 종료된 후에는 분무 자체의 운동량에 의한 영향이 감소되고, 주변기체의 공기역학적 영향을 함께 받기 때문인 것으로 판단된다.⁽¹⁰⁾ 분무 도달 거리 특성에서와 마찬가지로 BD100과 B-DME20은 거의 같은 분무각 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

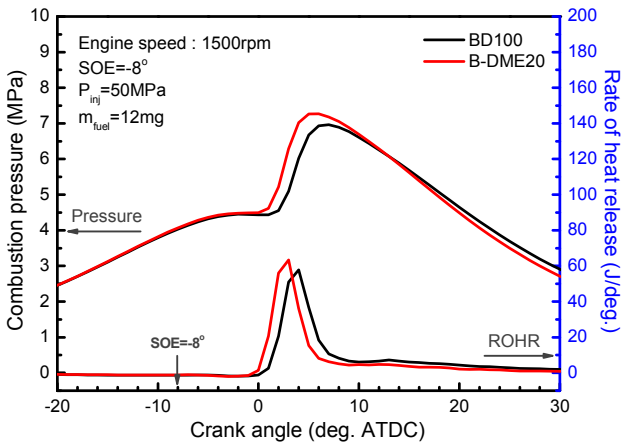
3.2 연소 및 배기 특성

Fig. 6과 7은 엔진 회전속도1500rpm, 연료 분사량

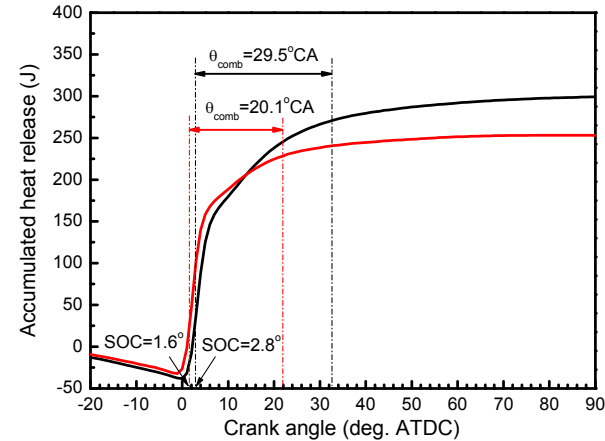
12mg/cycle, 분사시기 BTDC 8° 인 운전조건에서 50, 100MPa의 압력으로 연료를 각각 분사하였을 때의 연소 특성을 나타낸 것이다.

동일한 운전 조건에서 B-DME20은 BD100과 비교하여 분사압 $P_{inj}=50MPa$ 인 경우에는 1.2°, 분사압 $P_{inj}=100MPa$ 인 경우에는 1° 정도 진각되어 착화하였다. 착화지연기간(ignition delay)에 크게 영향을 미치는 인자로는 분사지연기간(injection delay)과 그 연료의 증발특성 세탄가(cetane number) 등이다. 본 실험에서는 Fig. 4(b)의 분사율 실험 결과로 보아 DME의 혼합은 분사지연기간에 영향을 거의 주지 않았지만 Table 2에 나타난 바와 같이 DME의 높은 세탄가가 크게 영향을 미친 것으로 판단된다. 이와 같이 B-DME20은 보다 진각된 시점에서의 착화가 시작되고 이때의 연소실 내의 압력은 BD100인 경우보다 높다. 그로 인하여 B-DME20의 최대 연소압력이 더 높고 급격한 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)와 7(b)를 보면 BD100의 누적 열발생량이 더 큰 것을 볼 수 있다. 이는 BD100 (37.4MJ/kg)의

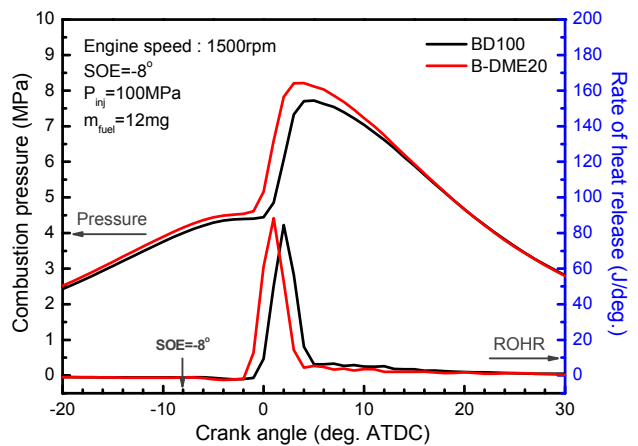


(a) Combustion pressure and ROHR

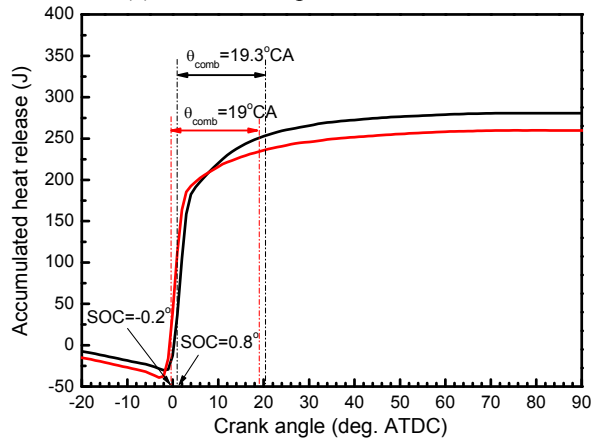


(b) Accumulated heat release

Fig. 6 Combustion characteristics of DME and DME-biodiesel blended fuel at $P_{inj}=50MPa$



(a) Combustion pressure and ROHR



(b) Accumulated heat release

Fig. 7 Combustion characteristics of DME and DME-biodiesel blended fuel at $P_{inj}=100MPa$

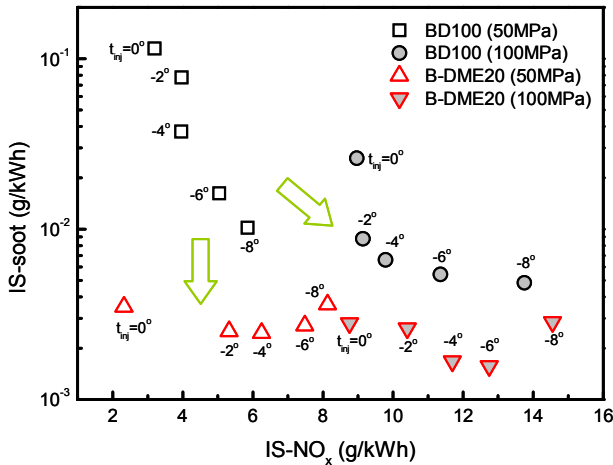


Fig. 8 ISNO_x and IS-soot emissions characteristics of DME and DME-biodiesel blended fuel

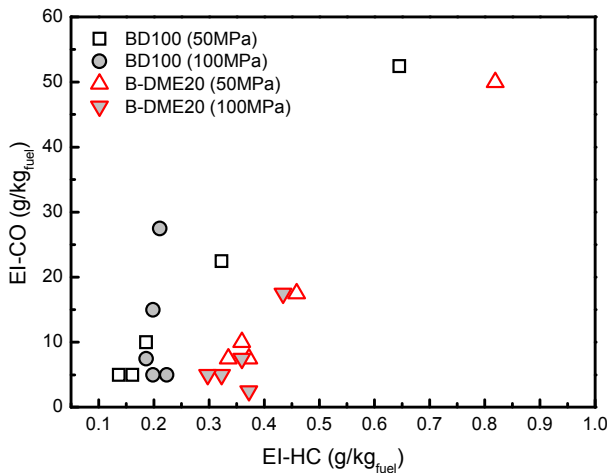


Fig. 9 EI-HC and EI-CO emissions characteristics of DME and DME-biodiesel blended fuel

연료 자체가 갖고 있는 발열량이 상대적으로 B-DME20 (32.04MJ/kg)보다 높기 때문인 것으로 판단된다.

연소구간의 경우에 각각의 연료 모두가 분사압력이 50MPa에서 100MPa로 높아짐에 따라 줄어드는 경향이 나타난다. 이는 높은 분사압력에 의하여 분무의 미립화가 향상되어 예혼합 연소가 활발히 이루어지고 확산연소 구간이 줄어드는 결과로 판단된다.

Fig. 8은 동일한 실험 운전조건에서 분사시기를 TDC에서 BTDC 8°까지 진각시키며 실험하였을 때의 ISNO_x와 IS-soot의 특성을 나타낸 것이다. ISNO_x의 경우에 두 실험연료에서 분사압을 높임에 따라 배출량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

이러한 NO_x의 생성조건 중에 가장 큰 인자로는 연소온도⁽¹¹⁾이며 이는 Fig. 6과 7에서 그 증가 원인을 확인할 수 있다. 즉, 분사압이 증가함에

따라 높아진 최대 열발생율과 더 급격해진 기울기가 ISNO_x 증가 원인으로 판단된다. 또한 IS-soot의 경우에는 분사압이 증가하면서 그 배출량이 확연하게 줄어드는 경향을 보인다. 이는 soot 발생구간으로 알려진 확산연소구간⁽¹²⁾이 활발한 예혼합 연소로 인하여 줄어들었기 때문으로 판단된다. 특히 B-DME20은 50, 100MPa의 분사압 조건에서 모두 IS-soot가 매우 적은 경향을 나타낸다. 이는 분자 구조 내 산소원자가 탄소 원자 사이에 위치하여 soot의 생성이 거의 없는 청정 연료로 알려진 DME의 첨가에 의한 영향으로 판단된다.

압축착화 기관에서는 그 배출량이 상당히 적지만 유해 배기물인 HC와 CO특성에 관하여 Fig. 9에 나타내었다. DME의 첨가로 B-DME20은 EI-CO가 다소 줄어드는 경향을 보인다. 반면에 EI-HC 다소 많은 경향을 보이지만 그 양이 극히 적어 큰 차이를 보이지 않는다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 DME-바이오디젤 혼합연료를 바이오디젤과 비교하여 분무 및 연소, 배기 특성에 관하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) B-DME20의 분사율은 BD100과 비교하여 크게 차이는 없으나 분사기간은 다소 늘어나는 경향을 보였다.

(2) 분사량의 증가에 따라 분무도달거리는 늘어나고 분무각은 다소 작아지지만 연료에 따른 차이는 크게 보이지 않았다.

(3) DME 첨가의 영향으로 B-DME20은 B100에 비하여 착화시점이 진각되며 연소기간이 짧은 경향을 나타내었으며 최대 연소압력과 그 기울기가 더 크게 나타났지만 상대적으로 낮은 발열량으로 인하여 누적 열발생율이 낮은 경향을 보였다.

(4) B-DME20은 DME 연료자체의 특성에 의한 영향으로 IS-soot가 B100에 비하여 현저히 낮았으며 분사압이 증가하는 경우에는 BD100과 B-DME20 모두 ISNO_x가 증가하는 경향을 나타내었다.

(5) EI-CO의 경우에 B-DME20은 다소 줄어드는 경향을 보였지만 EI-HC는 다소 증가하는 경향을 보였다.

후기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 인력 양성사업 및 클린 신연료 동력시스템 개발 사업과 환경부 Eco-STAR project(무-저공해 자동차

사업단), 2단계 두뇌한국 21사업의 지원으로 진행되었으며 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Suh, H. K., Park, S. W., Kwon, S. I. and Lee, C. S., 2004, "Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Bio-Diesel Fuels," *Transactions of KSAE*, Vol. 12, No. 6, pp. 23~29.
- (2) Mohammadi, A., Ishiyama, T., Kakuta, T. and Kee, S. S., 2005, "Fuel Injection Strategy for Clean Diesel Engine Using Ethanol Blended Diesel Fuel," *SAE 2005-01-1725*.
- (3) Yoon, S. H., Kim, M. Y., Kwon, S. I., Jeon, H. S. and Lee, C. S., 2006, "Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel Derived from Soybean in a Common-Rail Diesel engine," *Spring Conference of KSAE*, vol. 1, pp. 1922~1928.
- (4) Shudo, T., Fujibe, A., Kazahaya, M., Aoyagi, Y., Ishii, H., Goto, Y. and Noda, A., 2005, "The Cold Flow Performance and the Combustion Characteristics with Ethanol Blended Biodiesel Fuel," *SAE 2005-0-3707*,
- (5) Park, S. H., Suh, H. K., Kim, H. J. and Lee, C. S., 2007, "Atomization Characteristics of Ethanol-Biodiesel Blending Fuel," *Spring Conference of KSAE*, Vol. 1, pp. 604~610.
- (6) Kim, H. J., Park, S. H., Suh, H. K. and Lee, C. S., 2009, "Atomization and Evaporation Characteristics of Biodiesel and Dimethyl Ether Compared to Diesel Fuel in a High Pressure Injection System," *Energy & Fuels*, Vol. 23, pp. 1734~1742
- (7) Park, S. H., Suh, H. K., Kim, H. J. and Lee, C. S., 2009, "Spray Characteristics of Biodiesel Fuel by Blending Bioethanol and Diesel Fuel in a Common-Rail Injection System," *Transactions of KSAE*, vol. 17, No. 2, pp. 82~89.
- (8) Cha, J., Yoon, S. H., Chon, M. S. and Lee, C. S., 2009, "Combustion and Nano-Particulate Emissions Characteristics of a Compression Ignition Engine Fueled with Oxygenated Blending Fuel," *Transactions of KSAE*, vol. 17, No. 5, pp. 61~66.
- (9) Bosch, W., 1966, "The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection," *SAE Technical Paper*, SAE 660749.
- (10) Roisman, I. V., Araneo, L. and C. Tropea, 2007, "Effect of Ambient Pressure on Penetration of a Diesel Spray," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 33, pp.904~920.
- (11) Turns, S. R., 2006, "An Introduction to Combustion," Second Edition, *McGraw-Hill*, New York.
- (12) Heywood, J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," *McGraw-Hill*, New York.