

DME를 이용한 승용 디젤 커먼레일 엔진의 연소 및 배기특성

이 동 곤¹⁾ · 연 인 모¹⁾ · 노 현 구²⁾ · 최 석 천³⁾ · 이 창 식^{*4)}

한양대학교 대학원¹⁾ · 인덕대학 기계자동차과²⁾ · 한국생산기술연구원³⁾ · 한양대학교 기계공학부⁴⁾

Combustion and Emission Characteristics of Passenger Car Common-rail Diesel Engine with DME Fuel

Donggon Lee¹⁾ · In Mo Youn¹⁾ · Hyun Gu Roh²⁾ · Seuk Cheun Choi³⁾ · Chang Sik Lee^{*4)}

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

²⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Induk University, Seoul 139-749, Korea

³⁾Korea Institute of Industrial Technology, 707-34 Yeoksam-dong, Gangnam-gu, Seoul 135-918, Korea

⁴⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 30 December 2009 / Accepted 22 June 2010)

Abstract : This paper described the effects of DME blended fuel on the engine combustion and emission characteristics of four cylinder CRDI diesel engine. Biodiesel was added into the DME fuel in order to improve the low kinematic viscosity of DME fuel. In this work, the experiment was performed under th various injection timings and injection strategy at constant engine speed and engine load. To maintain the fuel pressure and temperature, pressure and temperature controllers were installed to the DME fuel system. The results show that ignition delay was shortened and combustion duration was extended when DME blended fuel is supplied. Despite of slightly higher NO_x emission with DME blended fuel at equal conditions in comparison with those of diesel fuel, the engine showed lower HC and CO emission characteristics.

Key words : DME(Dimethyl ether, 디메틸에테르), Emission characteristics(배기특성), Alternative fueled engine (대체연료엔진), Oxygenated fuel(함산소 연료)

Nomenclature

PM : particulate matter
ULSD : ultra low sulfur diesel
DME8BD2 : DME 80% + biodiesel 20% (volume rate)
BTDC : before top dead center
ATDC : after top dead center

1. 서론

지구 온난화 및 배출가스에 의한 환경오염에 대응하기 위해 전 세계적으로 이산화탄소와 배출가스

에 관한 규제가 점차 강화되고 있는 추세이다. 또한 석유자원의 고갈 가능성이 현실화되고 있어, 자동차의 연비를 향상시키기 위한 기술들이 개발되고 있다.

디젤 엔진은 가솔린 엔진과 비교하여 연비 및 성능적인 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 또한 희박 연소로 인하여 CO와 HC의 배출량이 가솔린에 비해 적게 배출되는 반면 PM과 NO_x의 경우에는 많이 배출되어 이를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)}

더욱 강화되고 있는 배기가스 규제에 대응하기 위해 저공해 엔진개발에 관한 광범위한 연구가 요

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

구되고 있다. 최근 디젤 엔진에 고압 분사와 다단 분사기술로 인해 유해 배기가스의 배출 농도는 저감되었으나, 여전히 PM과 NO_x를 저감하기 위해 후처리 장치를 적용해야하는 문제점을 지니고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나로 대체 연료를 이용한 엔진 개발이 진행되고 있다. 기존 엔진에 대체 연료를 적용하는 것은 엔진 시스템을 크게 변경시키지 않고 성능 및 유해 배출물의 저감을 이룰 수 있는 기술이다.

디젤의 대체 연료로 주목받고 있는 DME는 제조 기술 중 직접합성반응 기술이 개발되어 제조 원가를 낮추게 되면서 최근 차세대 연료로 더욱 각광을 받고 있다. 또한 DME는 상온에서 약 0.5MPa 정도로 가압하면 쉽게 액화할 수 있기 때문에 저장 및 이동이 용이하다. 이에 DME를 디젤 엔진에 적용하기 위해 커먼레일 분사 방식을 이용한 DME의 분무 특성에 대한 연구^{3,4)}와 단기통 디젤 엔진에 DME를 적용한 유해 배출물 저감에 관한 연구가 진행되었다.⁵⁻⁷⁾ 그러나 DME 엔진은 그 자동차의 엔진 적용 기술이 아직 충분히 확립되지 않은 실정이다. 이러한 관점에서 본 연구는 승용 커먼레일 디젤 엔진 시스템을 개발하고, DME-바이오디젤 혼합연료를 적용하여 파일릿 분사 및 분사 시기의 변화에 따른 연소 특성 및 배기 배출물 농도에 미치는 영향을 분석하여 DME 엔진의 성능 및 배기특성을 구한 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Table 1은 저유황 디젤과 DME의 특성을 나타낸 것으로 DME의 경우 상대적으로 높은 세탄가로 인해 디젤 엔진에 적용이 용이하다.⁸⁾ 특히 DME는 분자구조상 산소를 함유하고 있으며 직접적인 탄소-탄소 결합이 없기 때문에 연소 과정에서 PM이 거의 발생하지 않는 장점을 가지고 있다.

반면에 DME는 주위 온도와 압력에 민감하고 실링과 같은 고무류와 반응하여 변형시키는 단점을 가지고 있다. 또한 연료의 점도가 낮아 연료의 압력 형성과 연료 장치의 내구성에 문제를 초래하게 되어 연료 공급 장치의 개발이 필연적이다.

실험 장치는 커먼레일식 디젤 엔진, 연료 공급 및

Table 1 Property of ULSD and DME fuel

Characteristic	ULSD	DME
Chemical formula	-	CH ₃ OCH ₃
Cetane number	40~55	> 55
Oxygen (%wt)	-	34.8
Viscosity (kg/ms)	2~4	0.12~0.15
Liquid density at 20°C (kg/m ³)	831	667
Auto ignition temp. (°C)	250	235
LHV (MJ/kg)	42.7	28.8
Heat of vaporization (kJ/kg)	250	460
Stoichiometric A/F ratio	14.6	9.0

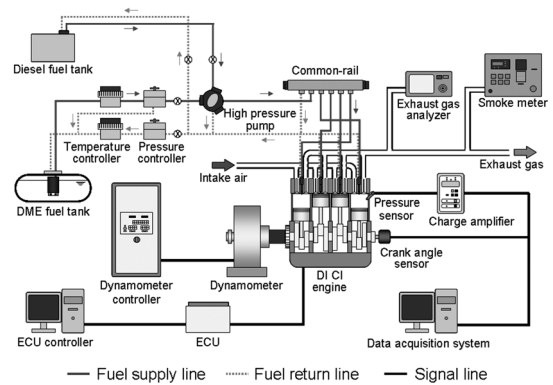


Fig. 1 Schematic diagram of test engine

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

엔진의 원활한 구동을 위해 저압 연료 장치에 연료 펌프 및 연료 압력 조절 밸브를 설치하여 DME를 액상으로 공급하도록 하였다. 그리고 DME가 주위 온도로부터 받는 영향을 최소화하기 위해 연료 공급 및 리턴라인에 연료 온도 조절 장치를 설치하여 일정한 온도로 유지되도록 구성하였다. 또한 DME의 낮은 점도로 인한 연료의 압축성 및 연료 장치의 윤활 및 내구성을 확보하기 위해 바이오디젤(대두유)을 혼합하였고,⁹⁾ DME로 인한 부식에 따른 누설을 방지하기 위해 연료 장치의 모든 부품의 내부 구조 및 재질을 모두 변경하였다.

엔진을 제어하기 위해 ETAS사의 INCA V5.4 프로그램과 ECU(Bosch, EDC16 ETK ECU) 사용하였다. 그리고 엔진의 연소특성을 파악하기 위해 연소 압력 센서(Kistler, 6057ASP)와 크랭크 각 센서를 장

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 cyliner
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

착하고, 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 배기 가스 분석기(Horiba, MEXA-554JKNO_x)와 매연 측정기(AVL, Smoke meter 407)를 사용하였다.

본 연구에 사용한 엔진은 배기량 1,582cc인 4행정 커먼레일 디젤 엔진으로 연료 분사 최고 압력은 165MPa이며 엔진의 주요 제원은 Table 2와 같다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 저유황 디젤(이하 ULSD)과 DME의 점도에 대한 문제점을 보완하기 위해 DME에 바이오디젤을 체적비를 기준으로 20% 혼합한 연료(이하 DME8BD2)를 사용하여 실험을 수행하였다. Table 3은 본 연구에 적용된 실험조건을 나타낸 것이다.

엔진의 회전속도는 1500rpm, 부하를 60Nm으로 연료의 분사압력은 50MPa로 일정하게 분사하였다. 또한 단일 분사와 1회 파일럿 분사 적용에 따른 엔진 성능 및 배기 배출 특성을 비교·분석하기 위해, 분사 시기를 단일 분사 시 BTDC 9°부터 ATDC 3°까지 3°간격으로 수행하였고, 파일럿 적용 시 파일럿 분사 연료량을 1.2mg/cycle로 고정하고, 주분사 시기를 ATDC 3°로 고정한 후에 파일럿 분사시기를 BTDC 10°부터 BTDC 50°까지 10°간격으로 수행하였다.

Table 3 Experimental conditions

Item		Test conditions
Fuel		ULSD, DME8BD2
Engine speed (rpm)		1500
Engine load (Nm)		60
Injection pressure (MPa)		50
Injection timing (° ATDC)	Single	-9, -6, -3, 0, 3
	1 pilot	-50, -40, -30, -20, -10 (main injection : 3)
Injection quantity (mg/cycle)	Single	variable
	1 pilot	1.2 (main injection : variable)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 단일 분사

3.1.1 연소 특성 및 출력

Fig. 2는 단일 분사의 경우 분사시기 변화에 따른 연소 및 엔진 출력 특성을 나타낸 그래프이다.

Fig. 2(a)의 그래프에서 DME8BD2의 경우 착화지연기간이 ULSD에 비해 짧은 것을 확인 할 수 있다. 또한 확산 연소기간이 ULSD에 비하여 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 DME8BD2가 ULSD와 비교하여 증발특성이 우수하므로 조기에 착화되고 이어서 분사되는 연료가 분사되는 즉시 확산하여 연소하기 때문인 것으로 판단된다.

반면에 ATDC 3°에서는 나머지 두 조건보다 착화지연기간이 길어 상대적으로 균일한 혼합기를 형성할 수 있음으로 확산연소기간이 뚜렷이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 확산연소기간의 영향으로 총 연소시간이 증가했으며, 최고 연소압력의 발생시점이 ULSD와 비교하여 늦게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2(b)에서 ULSD의 경우 ATDC 3°에서 출력이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 팽창과정에서 연료 분사가 이루어짐에 따라 연소 과정이 불완전하게 되어 감소한 것으로 판단된다. 반면에 DME 8BD2의 경우에는 ULSD와 비교하여 상대적으로 일정한 출력을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 DME의 우수한 증발 특성으로 인하여 DME8BD2가 팽창 과정에서 분사되어도 연소실 내에 균일한 혼합기가 형성되어 연소가 활발히 일어난 것으로 판단된다.

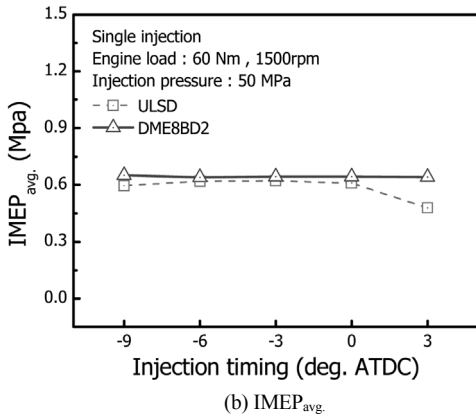
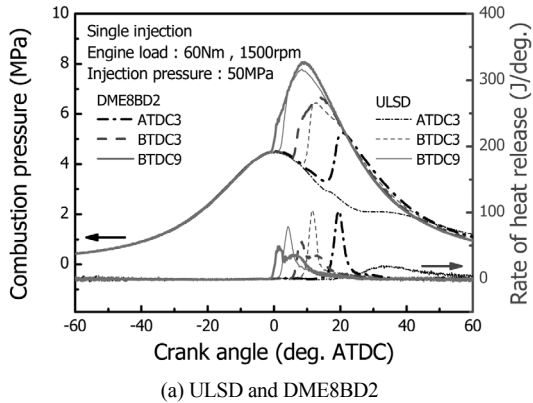


Fig. 2 Effect of single injection timing on combustion characteristics and IMEP_{avg}

3.1.2 배기 특성

Fig. 3은 단일 분사에서 분사시기 변화에 따른 ULSD와 DME8BD2의 배기 특성을 비교한 그래프이다. CO와 HC는 ULSD의 경우 TDC를 기점으로 하여 분사시기가 지각될수록 증가하는 경향을 보이는데, 이는 팽창과정에서 연료 분사가 이루어짐에 따라 불완전 연소가 일어나 증가한 것으로 판단된다. 반면에 DME8BD2는 DME의 우수한 증발특성으로 인하여 보다 균일한 혼합기를 형성하게 되어 모든 구간에서 큰 변화 없이 일정하게 배출되며, ULSD와 비교하여 적게 배출되는 것을 확인할 수 있다.

NO_x의 경우 두 가지 연료 모두 분사시기가 진각됨에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 DME8BD2의 경우 ULSD 대비 다소 증가한 것을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 ULSD와 비교하여 DME8BD2가 활발하게 연소하기 때문에 증

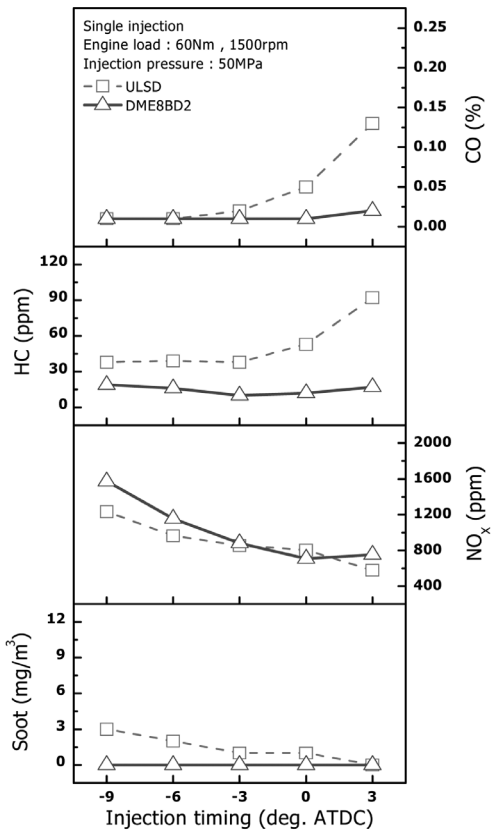


Fig. 3 Effect of single injection timing on the emission characteristics

가한 것으로 판단된다.

Soot는 ULSD의 경우 분사시기가 지각될수록 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 착화지연기간이 길어짐에 따라 상대적으로 균일한 혼합기를 형성하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 DME8BD2의 경우 모든 조건에서 거의 배출되지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 혼합연료 중 DME가 탄소-탄소 결합이 없는 합산소 연료이기 때문에 연소 시에 soot가 거의 발생하지 않는 것으로 판단된다.

3.2 파일럿 분사

3.2.1 연소 특성 및 출력

Fig. 4는 파일럿 분사시기 변화에 따른 연소 및 엔진 출력 특성의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)에서 ULSD 연소 시 파일럿 분사시기가 주분사에 가까워질수록 주 분사의 착화지연기간이

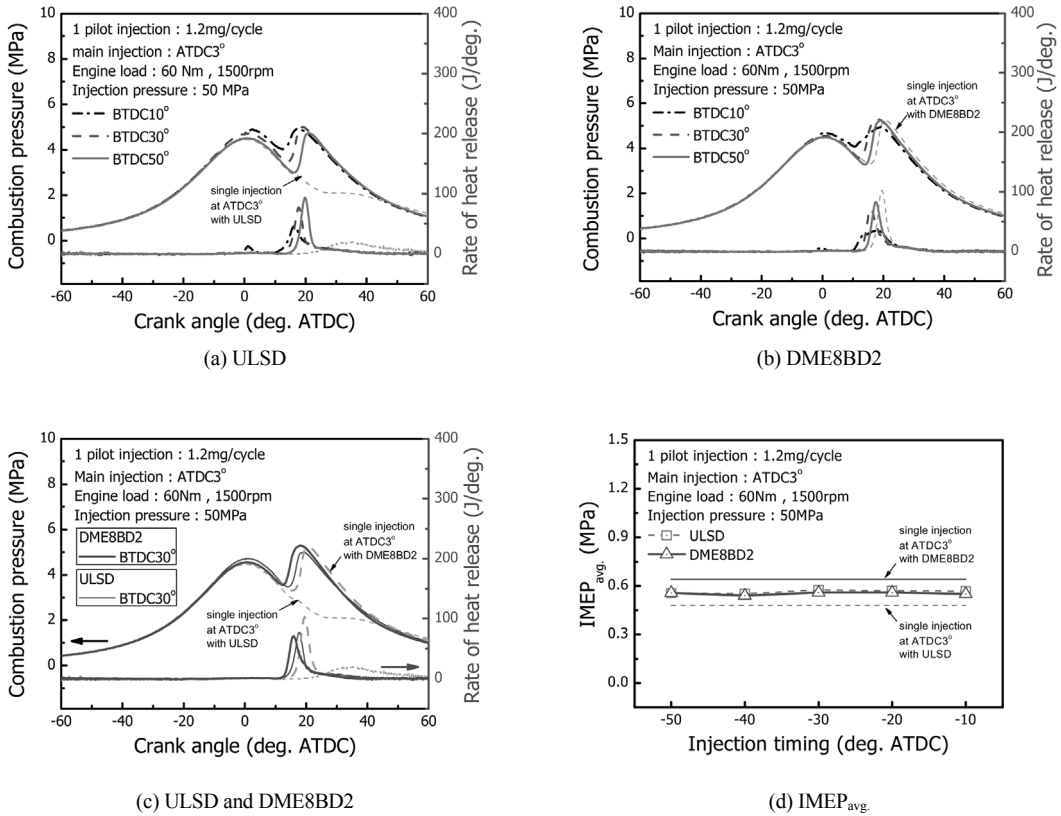


Fig. 4 Effect of pilot injection timing on combustion characteristics and IMEP_{avg}.

짧아지고 있으며, 이로 인하여 예혼합 연소의 열 발생률도 감소되고 있다. 또한 압축행정 후기에 파일럿 분사를 실시한 경우 파일럿 분사의 열 발생률이 두드러지게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4(b)의 DME8BD2 연소 시에도 ULSD와 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히 BTDC 10°에서 파일럿 분사를 수행한 경우에는 파일럿 분사된 연료의 연소로 인한 영향으로 주분사되는 DME 연료의 연소가 보다 쉽게 이루어지고,¹⁰⁾ 이로 인하여 분사되는 연료가 지속적으로 연소되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4(c)는 ULSD와 DME8BD2의 동일한 조건에서 파일럿 분사의 수행에 따른 연소특성을 나타낸 그래프이다. DME8BD2의 경우 ULSD와 비교하여 주분사된 연료의 착화지연기간이 짧아졌으며, DME의 낮은 발열량에 기인하여 최고 열 발생률이 8% 정도 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 4(d)의 그래프에서 보는 바와 같이 DME8BD2의 경우 ULSD대비 비슷한 출력을 얻을 수 있었고, 단일 분사(ATDC 3°)와 비교하였을 경우 출력이 저감되는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.2 배기 특성

Fig. 5는 파일럿 분사시기에 따른 배기특성을 나타낸 그래프로 CO와 HC의 경우 파일럿 분사시기를 진각 시킴에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 파일럿 분사시기와 주분사시기의 간격이 증가함에 따라 파일럿 분사의 효과가 감소하여 분사된 연료가 완전히 연소하지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 단일 분사(ATDC 3°)와 비교하였을 때 ULSD는 파일럿 분사의 효과로 인하여 배출량이 감소하는 경향을 나타내었다. 반면에 DME8BD2의 경우에는 파일럿분사의 영향이 적었으나, ULSD와 비교하여 모든 조건에서 적게 배출되는 것을 확인할 수 있다.

NO_x 배출물은 DME8BD2 연소 시 모든 구간에서

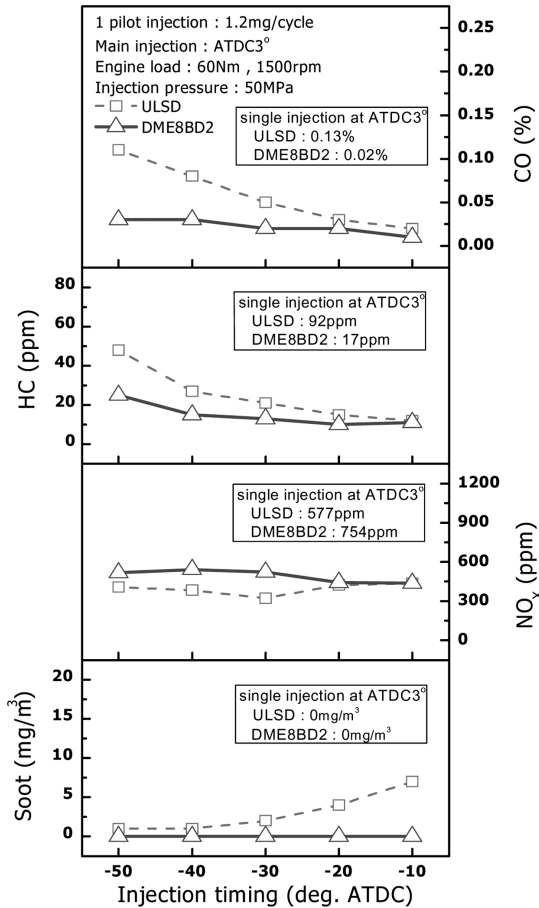


Fig. 5 Effect of injection timing on emission characteristics for 1 pilot injection

ULSD에 비하여 다소 많이 배출되는 경향을 보이나, 단일 분사(ATDC 3°)와 비교하였을 때 25% 이상 저감됨을 확인할 수 있다. 이는 파일럿 분사의 영향으로 착화지연기간이 줄어들어 급격한 예혼합 열 발생률이 낮아져 저감되는 것으로 판단된다.

Soot의 경우 ULSD 연소 시 파일럿 분사가 주분사에 근접할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 파일럿 분사의 영향으로 착화지연기간이 줄어들면서 연소실내 균일한 혼합기를 형성하는데 충분한 시간이 부족하여, 국부적으로 불균일하게 생성된 혼합기가 연료의 공기이용률을 감소시켜 Soot 발생률이 증가하는 것으로 판단된다. 반면에 DME8BD2의 경우 모든 구간에서 Soot가 거의 배출되지 않는 것이 확인되었다.

4. 결론

전자제어식 커먼레일 DME 디젤 엔진에서 ULSD 과 DME8BD2를 이용하여 단일 분사와 파일럿 분사가 성능 및 배기 특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단일 분사 시 DME8BD2는 ULSD와 비교하여 착화지연기간이 짧았으며, 예혼합연소에 의한 열 발생률이 적게 나타났다. 또한 ULSD는 ATDC 3°에서 분사했을 경우 불완전 연소로 인해 출력이 감소하였으나, DME8BD2는 DME 연료의 우수한 증발 특성으로 인해 모든 구간에서 일정한 출력을 얻을 수 있었다.
- 2) 단일 분사 시 DME8BD2는 ULSD와 비교하여 CO와 HC가 적게 배출되었으며, NO_x는 거의 모든 구간에서 다소 많이 배출되는 경향을 보였다. 그러나 Soot의 경우는 모든 구간에서 거의 배출되지 않아 DME의 우수한 Soot 저감 효과를 확인할 수 있었다.
- 3) 파일럿 분사 시 파일럿 분사시기가 주분사에 가까워질수록 착화지연기간이 짧아져 예혼합 연소의 열 발생률이 감소되었다. DME8BD2의 경우 ULSD와 비교하여 거의 대등한 출력을 얻을 수 있었으나, 단일 분사와 비교하였을 경우 출력이 다소 저감되는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 파일럿 분사 시 DME8BD2는 ULSD와 비교하여 CO와 HC의 저감효과가 적으나, NO_x의 경우에는 단일 분사와 비교하여 25%이상의 저감되는 결과를 얻었다. 또한 Soot는 모든 구간에서 거의 배출되지 않았다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 인력 양성사업 및 클린 신연료 동력시스템 개발 사업과 환경부 Eco-STAR project(무·저공해 자동차 사업), 2단계 두뇌한국 21 사업의 지원으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

References

- 1) P. Machiele, Low Sulfur Diesel Fuel an

- Enabling Thchnology For Future Low Emitting Diesel Engines, Presentation by the U.S.EPA at the Explore Future Diesel Engine Lube Oils, Scottsdale, Arizona, 2000.
- 2) R. R. Maly, V. Schaefer, H. Hass, G. F. Cahil, P. Rouveiolles, A. Roj, R. Wegener, X. Montagne, A. D. Pancrazio and J. Kashdan, "Optimum Diesel Fuel for Future Clean Diesel Engines," SAE 2007-01-0035, 2007.
 - 3) H. K. Suh, J. H. Park and C. S. Lee, "Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Dimethyl Ether," Transactions of KSAE, Vol. 15, No.5, pp.30-37, 2007.
 - 4) H. K. Suh, S. W. Park and C. S. Lee, "Atomization Characteristics of Dmethyl Either Fuel as an Alternative Fuel Injected through a Common Rail Injection System," Energy & Fuel, Vol.20, No.4, pp.1471-1481, 2006.
 - 5) M. Y. Kim, S. H. Yoon, K. H. Park and C. S. Lee, "Effect of Multiple Injection Strategies on the Emission Characteristics of DME Fueled Compression Ignition Engine," Energy & Fuel, Vol.21, No.5, pp.2673-2681, 2007.
 - 6) K. H. Park, M. Y. Kim, S. H. Yoon and C. S. Lee, "Reduction Characteristics of NO_x Emissions from Common-rail DME Engine by Using Multiple Injection Strategy," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.596-601, 2006.
 - 7) S. G. An, M. Y. Kim, S. H. Yoon, J. H. Lee and C. S. Lee, "Combustion and Exhaust Emission Characteristics of DME in a Common-rail Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.15, No.2, pp.74-80, 2007.
 - 8) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Thermodynamic Properties of Dimethyl Ether - An Alternative Fuel for Compression-Ignition Engines," SAE 2004-01-0093, 2004.
 - 9) K. H. Park, M. Y. Kim, S. H. Yoon, J. W. Hwang and C. S. Lee, "Effect of Oxygenated Fuel Blending on Biodiesel Combustion and Exhaust Emission Characteristics," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.330-335, 2006.
 - 10) H. G. Roh and C. S. Lee, "The Effect of Multiple Injection on the Stability of Combustion and Emission Characteristics in a Passenger Car Common Rail Diesel Engine," Spring Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.458-463, 2007.