

커먼레일 분사장치를 이용한 Dimethyl Ether와 디젤연료의 연소특성

최 욱·이 주 광·배 총 식*

한국과학기술원 기계공학과

Combustion Characteristics of Dimethyl Ether (DME) and Diesel Fuel Using a Common-rail Fuel Injection System

Wook Choi · Jukwang Lee · Choongsik Bae*

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received 4 May 2004 / Accepted 8 October 2004)

Abstract : The combustion and emission characteristics of a direct injection CI engine fuelled with DME(Dimethyl Ether) and diesel fuel were compared at idle engine speed(800 rpm) with various injection parameters. An optical single cylinder diesel engine equipped with a common-rail fuel injection system was constructed to investigate combustion processes of DME and diesel fuel. The combustion images were recorded with a high-speed video camera system. The results demonstrated that the DME-fuelled engine was superior to the conventional diesel engine in terms of engine performance and emissions. The optimal injection timing of DME was located around TDC(Top Dead Center), which was roughly same as that of diesel fuel. As the injection timing was advanced much earlier than TDC, NO_x (Nitric Oxides) level increased considerably. NO_x emission of DME was equal or a little higher than that for diesel fuel at the same injection pressure and timing because of higher evaporation characteristics of DME. Throughout all experimental conditions, DME did not produce any measurable smoke level.

Key words : Dimethyl ether(DME), Common-rail fuel injection system(커먼레일 분사장치), Diesel(디젤)

Nomenclature

ATDC : after top dead center
BTDC : before top dead center
CA : crank angle
HSDI : high speed direct injection
IMEP : indicated mean effective pressure
TDC : top dead center

1. 서론

청정대체연료 중 하나인 DME(Dimethyl Ether)는 천연가스, 석탄, 바이오매스 등의 원료를 이용한 합성제조가 가능하고, 발암물질이나 돌연변이를 유발하지 않는 등 인체에 무해하며, 수송 에너지뿐만 아니라 발전소나 연료전지 등에 다양한 용도로 활용될 수 있는 다목적(multi-purpose) 에너지원이다. DME를 디젤엔진의 주연료로 활용하는 경우, 디젤엔진의 가장 큰 장점 중 하나인 높은 열효율을 유지할 수 있음은 물론, 연료자체의 함산소 특성으로 인한 현저한 입자상물질 배출저감을 이룰 수 있는 것으로 평가되고 있어, 기존의 디젤연료를 대체하려

*To whom correspondence should be addressed.
csbae@kaist.ac.kr

는 연구가 활발하게 진행되고 있다.^{1,3)} DME의 배기 배출 특성에 관해서는 기존 디젤엔진에 비하여 CO (Carbon Monoxide) 및 HC(Hydrocarbon)는 적게 배출되는 반면, NOx는 저감될 수 있다는 일부 연구결과도 발표되고 있지만, 아직 NOx에 관한 경향은 일관되게 규명되지 않고 있다.^{4,5)} 다만, 현재까지는 DME 자체의 물리적 특성에 의한 NOx의 저감보다는 EGR(Exhaust Gas Recirculation)을 적용하여 NOx를 감소시키려는 연구가 보다 활발하게 진행 중이다.^{6,7)}

본 연구에서는 고압 분사가 가능하고 분사압력, 분사량 및 분사시기를 독립적으로 제어할 수 있는 커먼레일 분사시스템을 장착한 직접분사식 단기통 디젤엔진을 이용하여 DME와 디젤연료의 성능 및 배기특성을 비교하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 단기통 가시화 엔진

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 단기통 디젤 가시화 엔진의 개략도이고, Table 1에는 상세 제원을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 가시화 엔진에는 피스톤 상부에 레이저 시트를 입사시킬 수 있는 피스톤 상부 가시화창(석영, 두께 5 mm), 실린더 측면에서 연소 현상을 관찰할 수 있는 측면 가시화창(석영, 높이 40 mm)을 장착하였다. 또한 피스톤 가시화창(석영, 유효관찰면적비 31.4%), 기존의 피스톤 길이를 연장한 확장 피스톤, 그리고 45° 반사거울을 설

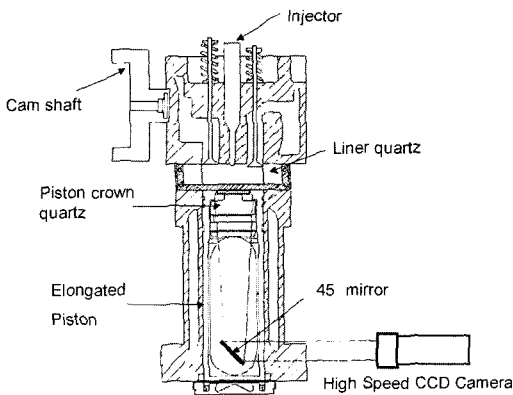


Fig. 1 Schematic of the single-cylinder optical diesel engine

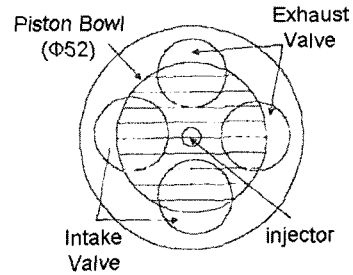


Fig. 2 Location of piston quartz window

Table 1 Engine specifications

Specifications	Dimensions
Bore (mm)	83
Stroke (mm)	92
Displacement (cc)	489
Compression ratio	18.9
Stroke/Bore ratio	1.108
Injector	five-hole sac type (∅0.168mm)

치하여, 피스톤 하부에서 피스톤 크라운을 통하여 연소실 내부를 관찰할 수 있도록 하였다(Fig. 2). 이를 이용해 실린더 내의 흡기 및 배기 밸브의 일부분과 실린더 중앙에 수직 방향으로 장착되어 있는 분사기로부터 발달하는 분무 형상 및 화염 변화를 관찰할 수 있었다.

2.2 커먼레일 분사 장치

DME와 디젤연료(이후 디젤로 표기)의 운전시에는 별도의 커먼레일 분사시스템을 구축하여 연료의 혼합을 미연에 방지하였다. DME의 연료를 가압하기 위하여 연료 펌프(MS188, 100 MPa, Huskel Ltd)를 병렬로 연결하여 공급하였으며, 분사압력은 디젤의 경우와 마찬가지로 커먼레일에 장착되어 있는 PCV(Pressure Control Valve, TEMS Ltd.)로 제어하였다. 단, DME의 고무부식성을 우려하여 PCV에 사용된 오-링(o-ring)은 퍼플루오르일레스토머(Perfluoroelastomer, FFKM-Kalrez, DuPont Dow Ltd) 재질로 교체하였다.

Fig. 3은 DME 커먼레일 분사장치의 개략도이다. 보관소에서 질소로 1.5 MPa로 가압된 DME가 실험실 내부로 공급된다. 공급된 연료는 PCV 밸브의 윤활과 냉각을 위하여 PCV를 지나 체적이 60 mm³정

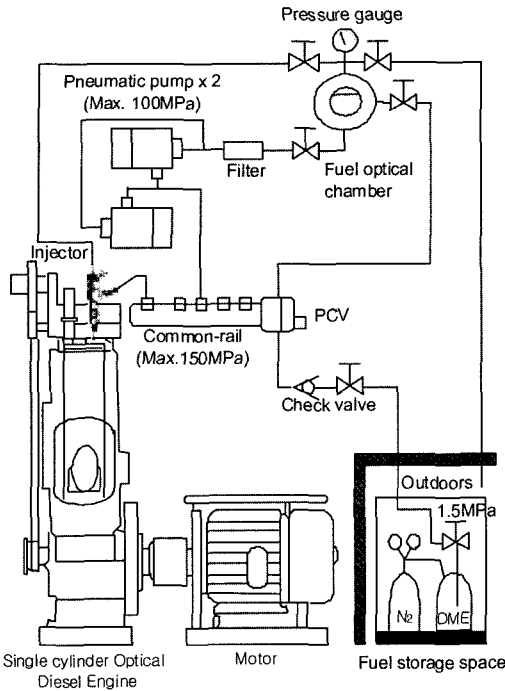


Fig. 3 Schematic diagram of DME common-rail injection system

도 되는 연료가시화챔버(fuel visualization chamber)로 공급된다. 연료라인 중간에 가시화챔버를 설치한 이유는 분사기로부터 귀환되는 연료와, PCV를 지나면서 발생할 수 있는 기상이 제거된 액상의 연료를 펌프로 보내주기 위함이다. 연료가시화챔버에는 강화유리와 테프론(teflon)이 코팅된 오-링을 사용하였다. 연료가시화챔버를 나온 연료는 필터를 거쳐서 연료펌프로 공급된다. 2개의 연료펌프는 별도의 설치대를 제작하여 엔진헤드 위에 설치하였다.

2.3 엔진 실험장치

Fig. 4는 엔진실험 장치의 개략도를 나타낸다. 단기통 엔진의 구동을 위해 엔진의 크랭크축을 유도전동기(정격 토크140 Nm, 15 kW, 6극)에 연결하고 유도전동기의 회전수를 인버터(inverter, HYDRIVE-J300, HYUNDAI)로 귀환제어 하였다. 엔진의 캠축에 장착되어 있는 엔코더(3600 pulses/rev, TRD-GK, KYOKO)의 신호를 이용하여 분사시기를 제어하였고 연료분사량을 제어하기 위해 전용 분사기 구동

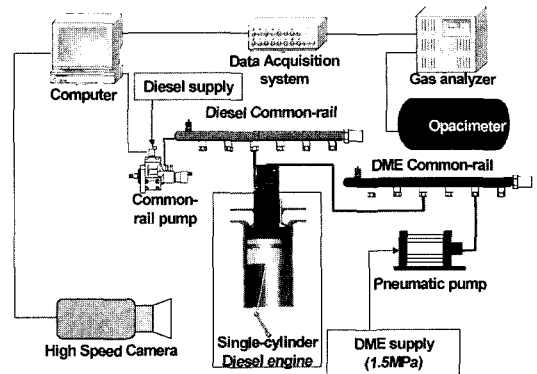


Fig. 4 Schematic diagram of the engine test bench

장치(TDA 3000H, TEMS Ltd)를 사용하였다. 광투과식 탁도계(Opacimeter, OP 100, EplusT Ltd.)를 이용하여 스모크(smoke)에 상당하는 측정값, 즉 탁도(opacity)를 취득하였고, HC, NOx, CO 등의 분석에는 배출가스 분석장치(MEXA1500d, HORIBA)를 사용하였다. 또한, 실린더 헤드에 장착한 압전(piezoelectric)형 압력센서(6052A, range 0~25 MPa, KISTLER)를 통해 실린더 내부의 압력을 측정하였다. 측정된 압력과 유해배출물의 분석 데이터는 데이터취득시스템(WaveBook512, IOtech)으로 컴퓨터에 저장하였다. 연소실 내의 화염영상은 고속카메라를 사용하여 취득하였다. 피스톤 보울(piston bowl)에 장착된 석영창을 통해 관찰되는 연소 자발광은 45° 반사거울을 거쳐 촬영되도록 하였다. 고속카메라는 10,000 frame/s에서 11 μs의 노출 시간을 적용하여 구동하였으며, 이로부터 0.48° CA 간격으로 512×384의 해상도를 갖는 연속적인 화염 영상을 취득할 수 있었다.

3. 실험 결과 및 토의

DME와 디젤의 분사압력은 25 MPa, 55 MPa, 그리고 분사시기는 BTDC 20°CA부터 ATDC 5°CA까지 변화시켰다. DME의 분사량은 디젤의 10 mm³를 기준으로 하여 동일한 열량의 체적인 약 18 mm³을 분사하였으며, 엔진실험에 앞서 DME와 디젤의 분사율을 각각 측정하였다. 실험 조건은 Table 2에 나타내었다. 150회의 사이클에 대한 실험결과를 취득하고 평균하여 IMEP 및 열방출률 계산에 이용하였다.

Table 2 Experimental conditions

Fuel	Injection pressure	Injection timing	Injection quantity
DME	25MPa	BTDC 20 °CA	18 mm ³
Diesel	55MPa	~ATDC 5 °CA	10 mm ³

3.1 엔진 성능과 배출가스 특성

Fig. 5는 DME와 디젤의 분사압력과 분사시기에 따른 IMEP의 변화를 나타낸다. 연료의 종류에 관계없이 분사압력이 상승하면 연료의 미립화가 촉진되고 연소실 내의 공기이용률이 개선되기 때문에 IMEP가 증가하는 것을 볼 수 있다. 분사압력의 상승에 따라 단축된 착화지연에 의해 TDC 전후의 적절한 시기에서 압력상승이 시작될 경우, 이른 예혼합 연소에 의한 압축일의 손실을 줄이고, 상대적으로 이어지는 확산연소의 증가가 팽창일에 기여하게 되므로 IMEP는 상승하게 된다. 그리고 DME의 경우 디젤과 동일 발열량을 갖도록 분사량을 제어하였으나 이전 연구들에서 확인할 수 있듯이, DME의 기화 및 미립화 특성이 디젤보다 양호하기 때문에, 동일 압력에서 디젤보다 높은 IMEP 값을 보이고 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 탁도, NOx 및 THC, CO의 분석결과를 각각 나타낸다. DME의 탁도는 분사압력이나 시기에 관계없이 '0'에 가까운 값을 보이고 있다. 반면 디젤은 분사압력이 증가할수록 미립화 수준의 향상에 따른 탁도의 저감효과가 뚜렷하다. 분사시기를 TDC 이후로 지각시키면, 디젤의 경우에는 실화가 발생하거나 불완전 연소로 인해 탁도 및 THC가 증가하는 결과를 볼 수 있으나, DME의 경우 탁도는 '0'에 가까운 값을 유지하고, 높은 THC 배출만을 보이고 있다. 이러한 원인은 DME가 연소실로 분사되면 연소되지 않아도 완전히 기화되어 탁도계에는 측정되지 않기 때문으로 추정할 수 있다. 디젤의 경우에 실화나 불완전 연소는 또한 THC의 증가로 이어졌다. 분사압이 높을수록 미립화의 향상으로 인해 탁도는 감소하지만, 지나친 희박 가연혼합기의 조성으로 인해 THC는 다소 증가한다. 그러나 정량적인 차이는 매우 미미하다. 다만, 정상적인 연소가 이루어지는 경우에는 THC와 CO는 연료에 관계없이 낮은 배출수준을 보이고 있다. THC는 DME가 디젤보다 약간 낮은 수준이고 분사압력에는 영

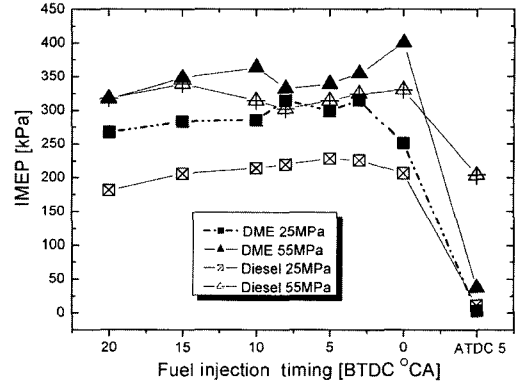


Fig. 5 Comparison of engine performance for DME and diesel fuel

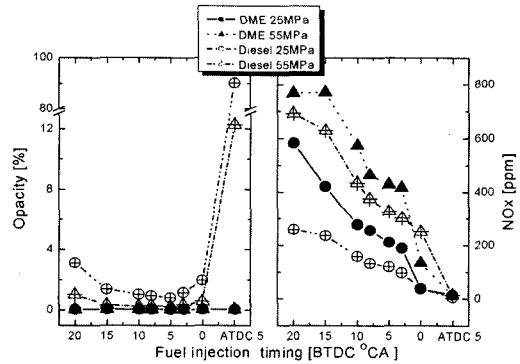


Fig. 6 Comparison of opacity and NOx for DME and diesel fuel

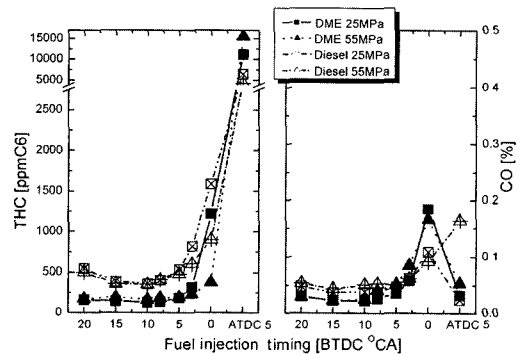


Fig. 7 Comparison of THC and CO for DME and diesel fuel

향을 받지 않는다.

연료에 관계없이 분사시기가 진각되거나 분사압력이 상승하면 NOx는 증가한다. 분사시기가 진각된 경우에 해당하는 BTDC 20° 및 BTDC 10° 분사의 경우, 이른 열방출로 인한 TDC 부근에서의 최고압

력상승시점의 형성으로 NOx의 생성에 유리한 고온 분위기 조건을 갖게 된다. 반면 BTDC 5°, BTDC 0°의 분사조건에서는 팽창행정기간에 열방출이 일어나므로 NOx의 생성에는 불리한 환경이 조성된다. 또한 분사압력이 상승할수록, 주어진 기간 동안의 미립화 및 공기이용률의 개선으로 열방출률이 증가하여 연소장의 온도 및 압력이 상승하므로 NOx의 배출은 증가하게 된다.

3.2 연소압력과 열방출률

앞서 기술한 연료 및 분사압, 분사 시기에 따른 나타난 경향을 연소압력 변화선도와 열방출률 선도를 통해 확인할 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9는 DME의 분사압력이 각각 25 MPa, 55 MPa일 경우 분사시기에 따른 연소 압력변화와 열방출율 선도와 분사율의 변화를 나타낸다. 분사시기가 이르거나 분사압이 증가하면 최고 연소압력은 상승하고 열방출율도 증가하데, 이는 NOx의 증가로 나타난다. 앞서 설명한 바와 같이 분사압이 높으면 분사지연 및 착화지연이 짧고 분사율이 높기 때문에 이른 압력 상승과 더불어 높은 연소압력 및 급격한 열방출율의 증가를 가져온다. 또한 분사시기가 이룰수록 TDC 부근에서 압력의 최대값이 형성되기 때문에 NOx가 증가하는 결과를 낳는다. 분사시기와 분사압력의 영향은 Fig. 10과 Fig. 11에 나타난 디젤의 연소압력 변화선도와 열방출률 선도에서도 찾을 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 분사압력을 25 MPa, 55 MPa, 그리고 분사시기를 BTDC 5° CA와 BTDC 20° CA

로 고정한 경우의, 연료에 따른 연소압력, 열방출률, 분사율 변화를 각각 나타낸다. 분사시기가 동일할 경우, DME가 디젤보다 짧은 착화지연과 높은 연소압력, 급격한 열방출율 증가를 보인다. 이는 디젤보

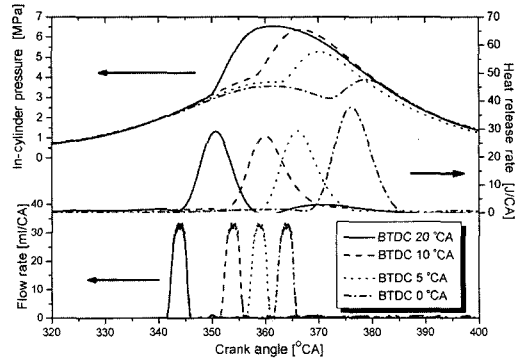


Fig. 9 Effect of injection timing on combustion characteristics of DME at injection pressure of 55 MPa

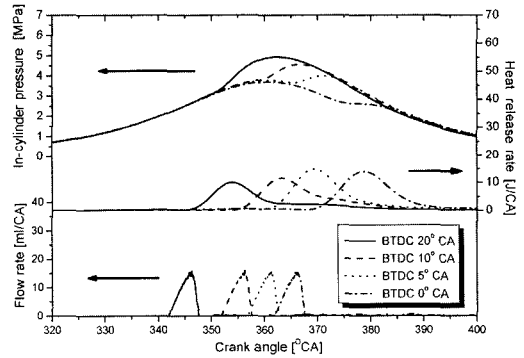


Fig. 10 Effect of injection timing on combustion characteristics of diesel fuel at injection pressure of 25 MPa

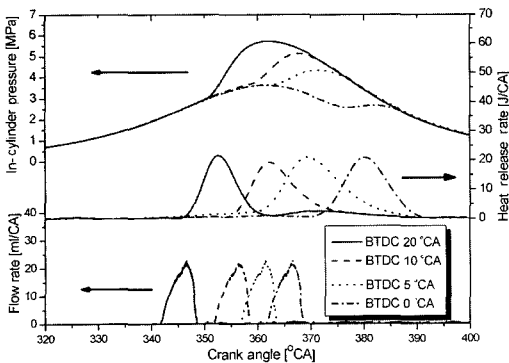


Fig. 8 Effect of injection timing on combustion characteristics of DME at injection pressure of 25 MPa

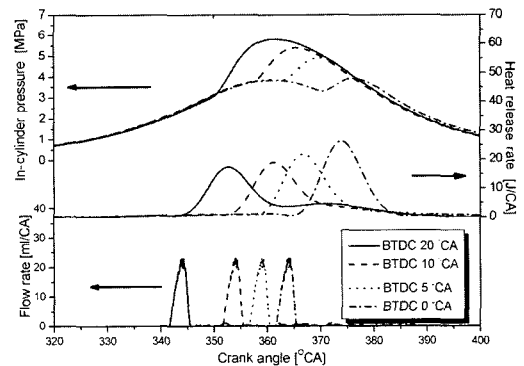


Fig. 11 Effect of injection timing on combustion characteristics of diesel fuel at injection pressure of 55 MPa

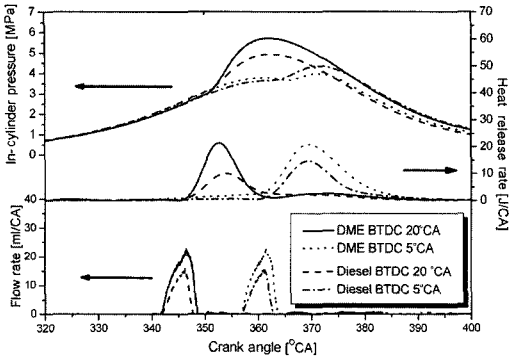


Fig. 12 Comparison of combustion characteristic curves of DME with diesel fuel at injection pressure of 25 MPa

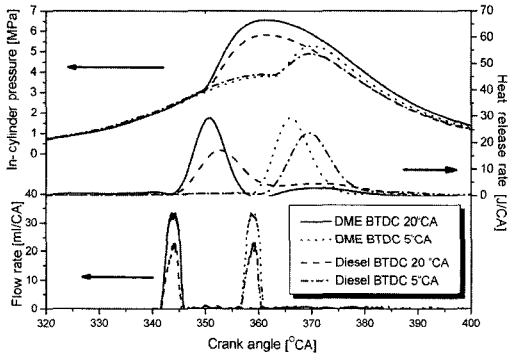
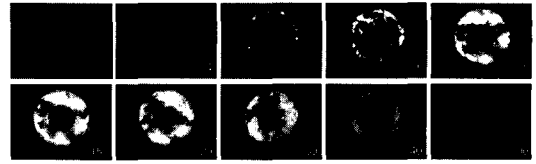


Fig. 13 Comparison of combustion characteristic curves of DME with diesel fuel at injection pressure of 55 MPa

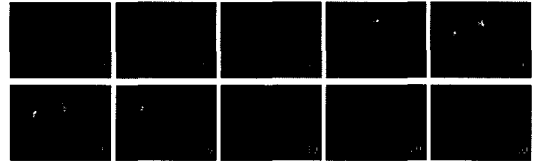
다 우수한 DME의 혼합기 조성능력 때문으로 추정되며, 이를 통해 출력은 향상되지만, 반면 NOx 증가의 원인이 되기도 한다.

3.3 화염 영상을 통한 연소특성

Fig. 14와 Fig. 15는 가시화 엔진을 통하여 각각 분사압력과 분사시기를 달리하여 취득한 DME 연소사진이다. Fig. 14와 Fig.15에서 볼 수 있듯이 분사압력에 관계없이 분사시기가 진각되면 지각된 경우에 비해 상대적으로 균일한 혼합기를 형성할 수 있으나, 조기 착화에 따른 TDC 이전의 압력상승으로 인해 압축일의 손실이 커지고, 상대적으로 팽창기간의 연소가 짧아진다. 분사시기가 늦을수록 확산화염 구간이 증가하고 화염 지속기간도 긴 것을 볼 수 있다. 긴 화염지속은 팽창기간의 실린더 내 압력을 전반적으로 상승시켰으며, 이는 IMEP의 증가로 이어졌다. 분사압력이 증가하면 착화지연이 짧아지

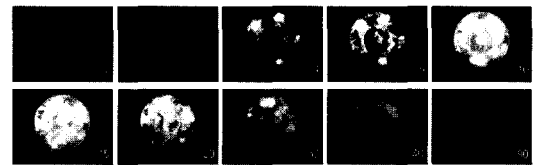


(a) Injection timing : BTDC 5° CA

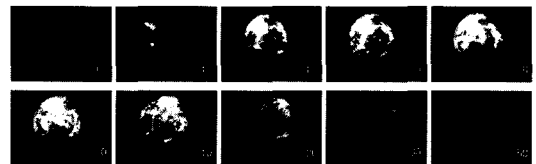


(b) Injection timing : BTDC 20° CA

Fig. 14 High-speed combustion images of DME at injection pressure of 25 MPa



(a) Injection timing : BTDC 5° CA



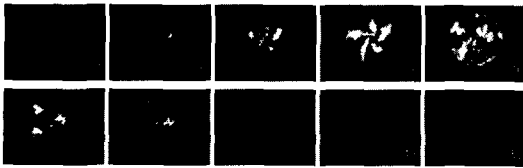
(b) Injection timing : BTDC 20° CA

Fig. 15 High-speed combustion images of DME at injection pressure of 55 MPa

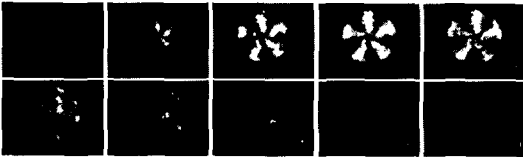
고, 화염이 발달이 빨리 가시화 보울을 짧은 시간에 채우는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 본 연소 압력 변화 선도와 열방출률 선도에서 본 결과와 일치하는 것이다.

저압인 경우는 화염이 도우넛 모양, 즉 분무선단을 중심으로 발달하고 있으며 고압인 경우에는 화염이 넓은 영역에 걸쳐 발달하는 것을 볼 수 있다. 특히 고압이고 분사시기가 이른 Fig. 15(b)의 경우에는 착화영역이 분무선단부에 국한되지 않고, 광범위한 영역에 걸쳐 급속히 화염이 발달하고 있으며, 에혼합연소 부분이 많음을 확인할 수 있다.

Fig. 16과 Fig. 17은 DME와 동일한 조건에서 취득한 디젤분무의 연소현상을 나타낸다. 분사시기가

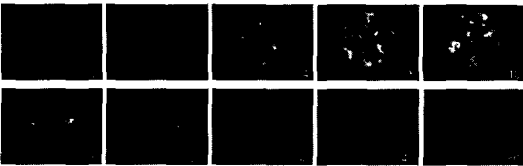


(a) Injection timing : BTDC 5° CA



(b) Injection timing : BTDC 20° CA

Fig. 16 High-speed combustion images of diesel fuel at injection pressure of 25 MPa



(a) Injection timing : BTDC 5° CA



(b) Injection timing : BTDC 20° CA

Fig. 17 High-speed combustion images of diesel fuel at injection pressure of 55 MPa

분사압력이 화염발달에 미치는 영향은 DME와 동일한 것을 볼 수 있다. 즉 이른 분사시기는 상대적으로 균일한 혼합기를 형성하므로 IMEP 및 NOx값의 변화 요인과 같은 맥락에서 설명할 수 있다. 또한 분사압력이 증가하면 분사율의 증가와 미립화 수준의 향상으로 인해 착화지연이 짧아지고 화염이 발달이 촉진됨을 알 수 있다. 이는 앞서 본 연소압력 변화와 열방출률 선도에서 관찰된 결과와 일치하는 것이다. 저압인 경우에는 연료가 분무 경계 부근에서 착화되고 화염이 발달되는 반면, 고압인 경우에는 연소실 전체에 화염이 발달하고 분사시기가 이룰수록 균일해지는 현상을 관찰할 수 있다. 따라서 분사압

력의 증가로 인한 화염 공간분포도의 개선효과는 디젤의 경우가 더 크다.

분사압력이 25 MPa로 동일한 DME와 디젤의 화염 사진을 비교하면 DME는 저압임에도 불구하고 기화가 매우 잘 되어 연료가 액적으로 존재하지 않고 기상으로 존재하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 화염이 분무 주변뿐만 아니라 넓은 범위에 걸쳐 분포한다. DME의 경우, 화염의 분열보다는 기상연료가 주위 공기와 혼합되어 벌크(bulk) 형태로 연소되는 반면, 디젤의 경우는 착화영역이 분무경계에 한정되기 때문에 분무의 공간분포와 화염의 분포가 거의 일치한다.

4. 결론

커먼레일 분사장치를 적용한 단기통 가시화엔진을 이용하여 DME와 디젤 연료의 연소 특성을 연소실 압력, 배출가스 분석, 그리고 화염 가시화법을 통해 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일 열량의 연료 분사시 DME가 디젤보다 높은 출력을 보였다.
- 2) 엔진 성능과 배기측면의 장단점을 고려했을 때, DME 압축착화엔진의 최적분사시기는 일반적인 디젤연소의 경우와 마찬가지로 TDC 부근에 존재한다.
- 3) 분사시기가 이룰수록 NOx가 증가하고, 동일한 분사압력과 분사시기에는 DME가 우수한 기화 특성으로 인하여 디젤보다 더 높은 수준의 NOx를 배출한다.
- 4) THC는 DME의 경우가 디젤보다 낮은 값을 보였으며, CO는 거의 유사한 수준을 나타내었다. THC는 분사압력의 영향을 거의 받지 않는다.
- 5) 모든 실험 조건에서 DME는 '0'에 가까운 스모크(smoke) 수준을 나타내었다.

후 기

본 연구는 KAIST 연소 기술 연구 센터(CERC)의 연구비 지원에 의해 수행된 결과입니다. DME 유틸리티 첨가제 Infineum R655를 기증해주신 Infineum Korea Ltd에 감사드립니다.

References

- 1) R. Verbeek and J. Van der Weide, "Global Assessment of Dimethyl Ether Comparison with Other Fuels," SAE 971607, 1997.
- 2) S. Kajitani, "Fundamental Research of DME Diesel Engine Operated with a Common Rail Injection System," 14th ISAF, 2002-VT-13, 2002.
- 3) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Compression Ignition Delay (Physical+ Chemical) of Dimethyl Ether," SAE 2003-01-0759, 2003.
- 4) Z. Lonbao, W. Hewu, J. Deming and H. Zuohua, "Study of Performance and Combustion Characteristics of a DME-Fuelled Light-duty Direct-injection Diesel Engine," SAE 1999-01-3669, 1999.
- 5) S. Kajitani, Z. L. Chen, M. Kono and K. T. Rhee, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct Diesel Engine Operated with DME," SAE 972973, 1997.
- 6) Y. Sato, A. Noda, T. Sakamoto and Y. Goto, "Performance and Emission of a DI Diesel Engine Operated on Dimethyl Ether Applying EGR with Supercharging," SAE 2000-01-1809, 2000.
- 7) S. H. Nam, Y. K. Kim and Y. J. Lee, "Effect of Cooled-EGR on the Emission Characteristics of DI DME Fuelled Engine," pp. 203-209, 2003 KSAE Spring Conference, 2003.