

커먼레일 디젤엔진에서 DME의 연소 및 배기 특성

안 상 규¹⁾ · 김 명 윤¹⁾ · 윤 승 현¹⁾ · 이 제 형²⁾ · 이 창 식^{*3)}

한양대학교 대학원¹⁾ · 현대자동차²⁾ · 한양대학교 기계공학부³⁾

Combustion and Exhaust Emission Characteristics of DME in a Common-rail Diesel Engine

Sang Gyu An¹⁾ · Myung Yoon Kim¹⁾ · Seung Hyun Yoon¹⁾ · Je Hyung Lee²⁾ · Chang Sik Lee^{*3)}

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

²⁾Hyundai Motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

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

(Received 16 June 2006 / Accepted 4 October 2006)

Abstract : An experiment was conducted with a common-rail direct injection diesel engine operated with neat dimethyl ether (DME). In order to investigate the effect of combustion characteristics and emission reduction of DME fuel, the experiment was performed at various injection pressure from 35 MPa to 50MPa. Also, the exhaust emissions from the engine were compared with that of diesel fuel. In this work, Cooled EGR was implemented to reduce NO_x exhaust emissions.

The results showed that DME has shorter ignition delay than that of diesel fuel. Despite of the increased NO_x emissions with DME at an equal engine power compared to the case of fueling diesel, the engine emitted zero soot emissions all over the operating conditions in this work. NO_x emission can be decreased greatly by adopting 45% of EGR while maintaining zero soot emission. Judging from the result of engine test, DME is a suitable fuel for common-rail diesel engine due to it's clean emission characteristics.

Key words : Dimethyl ether(DME, 디메틸에테르), Oxygenated fuel(함산소연료), Combustion characteristics(연소 특성), Emission characteristics(배기특성), Common-rail diesel engine(커먼레일 디젤 엔진)

1. 서 론

최근 원유의 수급 불균형으로 인하여 유가가 급격히 상승하고 있고, 석유자원의 고갈 가능성 또한 점차 현실화 되고 있어 기존의 석유계 연료를 대체할 수 있는 에너지원의 개발이 급진전되고 있다. DME(dimethyl ether)는 GTL(gas to liquid) 합성연료의 하나로서, 1990년대 중반부터 차세대 청정 대체 연료로 주목받고 있다. 또한 압축착화 엔진에 적용성이 매우 우수하고,¹⁻⁴⁾ 직접 합성반응기술이 개발

되어,⁵⁾ 낮은 가격으로 DME를 제조할 수 있게 되었다. 이에 따라 기존의 디젤연료의 대체연료로서 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

DME는 약 0.5MPa 이상으로 가압하면 액화되므로 운반 및 보관이 용이하다. 또한 DME는 충전용 인프라의 구축이 필요하나, 국내의 경우 LPG 충전망이 구축되어 있어 기존의 LPG 충전시설을 사용할 수 있기 때문에 실용화에 매우 유리한 실정이다.

Table 1은 DME와 디젤연료, 그리고 Butane의 물성치를 나타낸 것이다. DME는 산소함유율이 34.8%로 높으며 분자구조상 탄소 고리를 형성하지 않기

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

Table 1 Properties of DME and other fuels

Characteristic	DME	Diesel	Butane
Chemical formula	CH ₃ -O-CH ₃	C ₁₆ H ₃₄	C ₄ H ₁₀
Oxygen(% wt.)	34.8	-	-
Cetane number	>55	40~55	10
Viscosity (kg/ms)	0.12~0.15	2~4	0.2
LHV(MJ/kg)	28.8	42.7	45.7
Liquid density(kg/m ³)	667	831	570
Auto ignition temp(°C)	235	250	365
Stoichiometric A/F ratio	9.0	14.6	15.5

때문에 입자상 물질의 배출이 거의 없다. 또한 세탄가가 55로 높고 착화 온도가 235°C로 낮아 착화성이 우수하다.^{6,7)} 그러나 상대적으로 점도가 낮고 윤활성이 나빠서 연료펌프 등에서의 마멸과 연료계통에서 누설의 위험성이 크기 때문에 연료공급계의 개선이 필요하다.

DME의 경우에는 입자상 물질의 배출이 없으므로 NO_x 배출량의 저감이 중요한 문제로 되고 있으며, 이를 저감시키기 위한 방법으로 다량의 EGR 및 HCCI연소를 적용하는 방법 등이 시도되고 있다.^{8,9)}

본 연구에서는 DME 연료의 연소 및 배출물 저감 특성을 연구하기 위하여 고압분사 및 전자제어가 가능한 커먼레일 분사 시스템이 적용된 디젤엔진을 이용하여 분사압력 및 분사시기의 변화에 따른 연소 및 배출물 특성을 분석하고, DME 연소시의 NO_x 배출물의 저감을 위하여 30, 45%의 EGR을 수행하

여 NO_x 저감효과 및 연소 특성에 미치는 영향 등을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 엔진

실험에 사용된 엔진은 배기량이 373.3cc인 단기통 커먼레일 디젤엔진이며 주요 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Specifications of the test engine

Description	Specification
Stroke(mm)	84.5
Bore(mm)	75
Displacement volume(cc)	373.3
Compression ratio	17.8
Valve type	DOHC 4
Injector hole number	6
Fuel injection system	Bosch common-rail
Nozzle hole diameter (mm)	0.128
Spray angle(°)	156

2.2 실험 장치

실험 장치는 커먼레일 디젤 엔진, 연료 공급 제어 장치, EGR 시스템, 연소 및 배기 분석을 위한 장치로 구성하였으며, Fig. 1은 연료 공급 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 고압펌프에 공급되는 DME연료

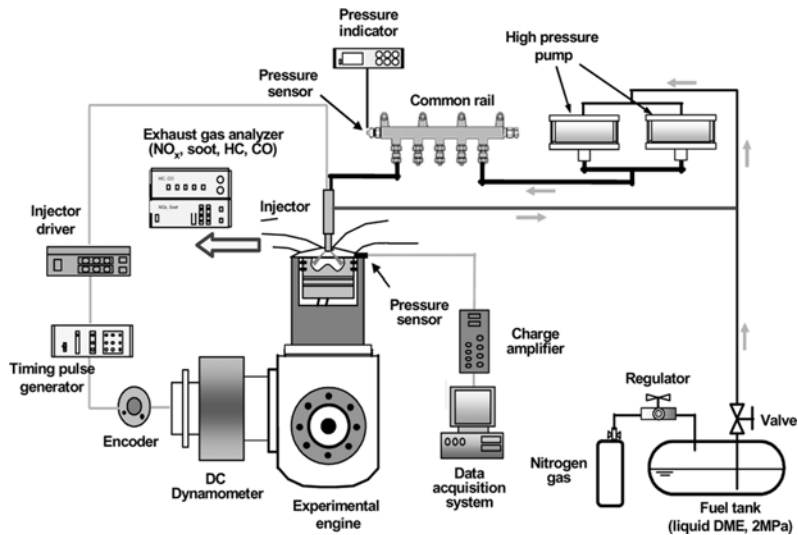


Fig. 1 Schematic of fuel injection system

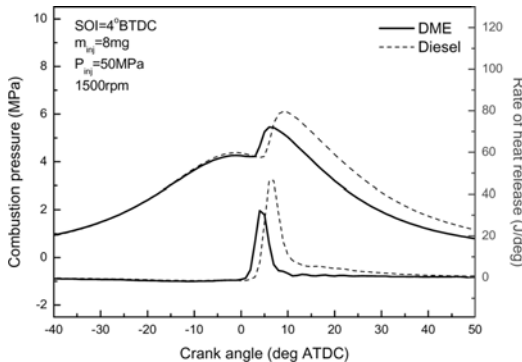
는 질소가스를 이용하여 2MPa의 압력으로 가압하여 액상 상태를 유지하였고, 커먼레일로 고압의 연료를 안정적으로 공급하기 위하여 두 개의 고압연료 펌프(Haskel, HSF-300)를 병렬로 연결하여 사용하였으며, 펌프로 공급되는 압축 공기의 압력을 이용하여 커먼레일 내의 압력을 조정하였다.

엔진은 55kW의 DC 동력계를 이용하여 제어되었으며 인젝터의 동기화 및 분사시기 제어를 위하여 크랭크 각 센서(1800 pulse/rev)와 캠축 위치 센서를 설치하였으며, 인젝터 드라이버(TEMS, TDA3300)에 의하여 통전시간을 조절하여 원하는 분사량을 제어할 수 있도록 하였다. 그리고 연소 압력 및 열 발생율과 같은 연소 특성을 파악하기 위해 압력센서(6052B1, Kistler)를 설치하였다. 압력센서의 압력 데이터를 측정하기 위해 데이터 취득보드와 소프트웨어(LabVIEW)를 사용하여 실시간으로 데이터를 취득하였다. 또한, 배기가스 분석을 위해 매연 측정기(AVL407, AVL), NO_x 측정기(BCL-511, Yanaco), H C · CO 분석기(MEXA-554JK, Horiba) 등을 사용하였다.

EGR에 의한 흡기온도의 상승을 억제하기 위하여 냉각 EGR 장치를 이용하여 EGR을 수행하였으며, EGR율은 EGR에 의해 감소된 신기의 흡입량을 이용하여 계산하였다.

2.3 실험 조건

엔진의 회전속도는 1,500rpm으로 일정하게 유지하였으며, 연료의 분사압력은 35, 50MPa로 하였다.



(a) Injection mass=DME, diesel 8mg

연료의 분사량은 DME와 디젤 모두 8, 12, 16mg을 분사하였고, 추가적으로 동일 발열량에 대한 비교를 하기 위해 디젤유 8mg의 발열량에 해당하는 DME 12.3mg을 분사하는 실험을 수행하였다. 분사 시기는 BTDC 12°에서부터 ATDC 4°까지 2°BTDC 15°부터 BTDC 70°까지는 5°간격으로 수행하였다. EGR율은 0, 30, 45%로 하였다. EGR 수행에 따른 고온의 배기가스 유입으로 인한 흡기온도의 상승을 억제하기 위하여 냉각 EGR을 적용하여 EGR 수행 중에도 흡기온도의 상승을 10°C 이내로 유지하도록 하였다. Table 3은 본 연구에 적용된 실험 조건을 나타낸 것이다.

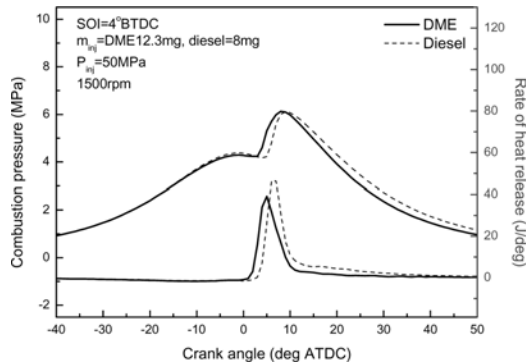
Table 3 Experimental conditions

Item	Test condition	
Oil temperature (°C)	70	
Coolant temperature (°C)	70	
Engine speed (rpm)	1500	
Injection timing(deg ATDC)	-70 ~-4	
Injection pressure (MPa)	DME	35, 50
	diesel	50, 100
Injection mass (mg/cycle)	DME	8, 12, 12.3, 16
	diesel	8, 12, 16
EGR rate(%)	0, 30, 45	

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 DME 엔진의 연소 및 배기특성

Fig. 2의 (a), (b)는 DME와 디젤연료의 연소특성을 BTDC 4°에서 동일 분사량과 동일 발열량에 대해



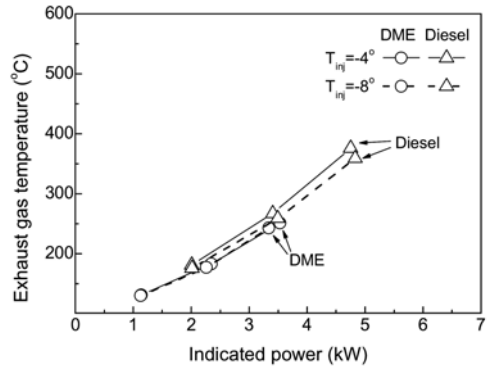
(b) Injection mass = DME 12.3mg, diesel 8mg

Fig. 2 Combustion characteristics of DME and diesel fuel

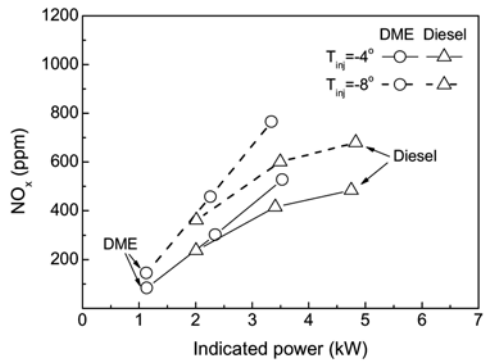
비교한 것이다. DME와 디젤연료의 분사압력은 50MPa로 동일한 조건하에서 실험하였다.

DME의 경우, 디젤연료보다 착화지연시간이 다소 짧아서, 최고연소압력 발생시점 또한 약간 빠르게 나타났다. 그 이유로는 DME가 디젤 연료보다 세탄가가 약 20% 정도 높고, 착화온도도 15°C가량 낮기 때문으로 판단된다. 또한, 동일 분사량의 경우는 총 연소기간도 DME가 짧은 것으로 나타났는데, 이는 DME의 경우에 미립화 특성이 우수하고 기화성이 좋아 보다 짧은 시간에 혼합기를 형성하여 빠르게 연소된 결과인 것으로 판단된다.

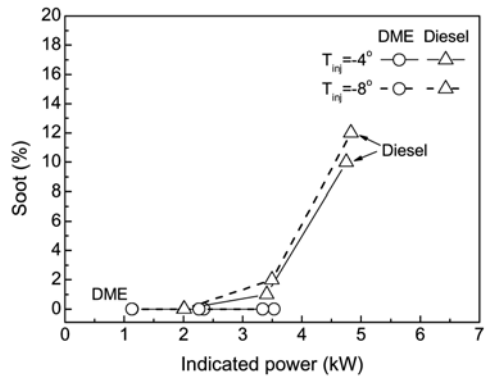
Fig. 3은 도시출력에 따른 배기가스온도, NO_x, soot의 배출량을 나타낸 것이다. DME를 사용하였을 때의 배기가스 온도가 디젤연료를 사용하였을 때보다 15°C이상 낮게 나타났다. 이 결과는 DME의 경우, 미립화의 촉진에 의하여 균일혼합기 상태에서 연소가 이루어지기 때문에 국부적인 고온 연소가 감소하고, 열에너지의 많은 부분이 기계적인 일로 전환되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 BTDC 8°에 분사하였을 때의 온도가 BTDC 4°에 분사하였을 때의 온도보다 낮은 것도 열에너지가 효과적으로 기계적인 일로 전환된 결과로 판단된다. NO_x의 경우 DME를 사용하였을 때 동일한 출력에 대해서 디젤연료보다 배출량이 많았다. 이것은 DME가 연료 중 산소를 함유하고 있고, 조기착화에 의하여 연소실 온도가 상승하였기 때문으로 판단된다. 분사시기의 영향을 살펴보면 분사시기가 BTDC 4°에서 BTDC 8°로 앞당겨지면 연소실 온도가 상승하고 연소실 내부에 고온의 연소가스가 오래 잔류하기 때문에 NO_x 발생량이 두 가지 연료 모두에서 증가하는 것으로 나타났다. 또한 NO_x의 배출량은 엔진출력에 비례하여 증가하는 특성을 보이고 있다. Soot는 DME의 경우, 본 실험에서 수행된 모든 운전조건에서 발생되지 않았으며 이것은 잘 알려진 바와 같이 DME는 직접적인 탄소 사이의 결합이 없고, 약 35%의 산소를 함유하고 있기 때문으로 보인다. 그러나 디젤연료의 경우에는 엔진출력에 비례하여 soot의 발생량 또한 증가하는 특성을 보이고 있으며, 분사시기가 앞당겨지면 soot의 발생량도 증가하는 경향을 보이고 있다.



(a) Exhaust gas temperature



(b) NO_x



(c) Soot

Fig. 3 Indicated power versus exhaust gas temperature, NO_x and soot emissions

3.2 분사시기 및 분사압력에 따른 연소특성

Fig. 4(a)는 분사시기에 따른 DME의 연소특성을 알아보기 위하여 분사시기를 BTDC 12°에서 TDC까지 4°씩 지각시키면서 실험한 결과이다. 열발생율의 특성은 전형적인 예혼합 연소로 인한 급격한 열

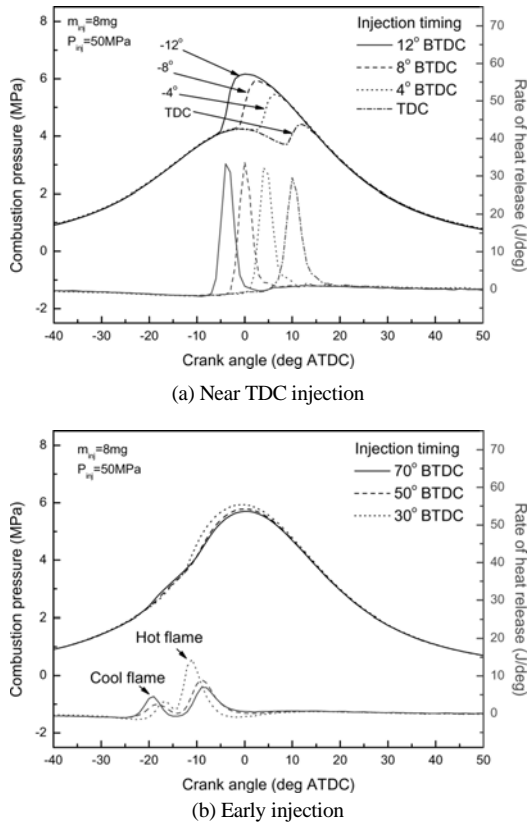


Fig. 4 Effect of injection timing on the combustion characteristics of DME

발생율을 보이고 있으며, 분사시기가 지각될수록 착화시기가 지연되어 최고연소압력이 낮아지고 있으며, 열발생률의 최고값 또한 낮아지고 있다.

Fig. 4(b)는 분사시기를 BTDC 30°, 50°, 70°로 조기분사 하였을 때의 연소특성을 나타낸 것이다. 디젤연료를 조기분사 하였을 경우, 상대적으로 연소실 내의 압력과 밀도가 낮은 상태에서 분무가 이루어지게 되어 과도한 분무도달거리에 의한 연소실 벽면에서의 연료의 벽면부착현상(wall-wetting)이 발생되어 최고연소압력이 낮아지고, 팽창행정 과정인 TDC 이후에서의 압력이 낮아, 엔진 출력면에서 상당한 손실이 있는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 이와 달리 DME는 상온에서 기체 연료이기 때문에, 조기 분사를 하여도 피스톤 윗면이나 연소실 벽면에서의 벽면부착현상이 나타나지 않아, 최고연소압력이나 TDC 이후의 압력에서도 큰 차이를 보이지는 않았지만, TDC 이전에 착화가 시작되어 연소되므로 출

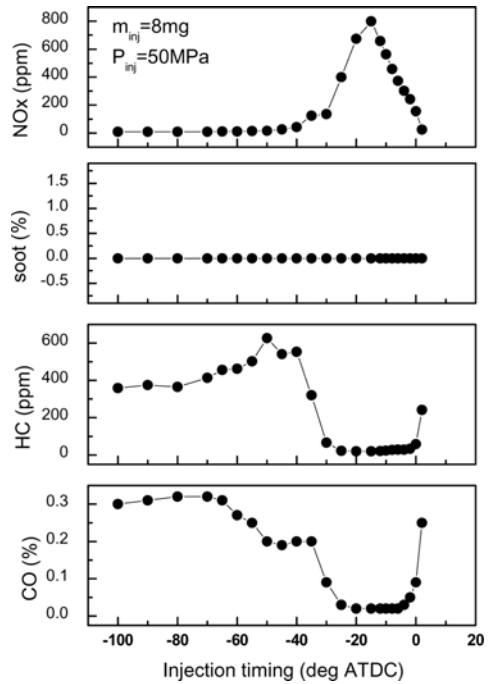


Fig. 5 Effect of injection timing on the exhaust emissions

력에서 어느 정도의 손실이 발생한다. 따라서 착화시기를 제어하기 위해 다량의 EGR 또는 압축비 감소 등의 적용이 필요한 것으로 판단된다.

분사시기를 BTDC 70~30°에 조기분사한 경우는 착화전에 DME와 공기가 균일하게 혼합되어 예혼합기를 형성하였기 때문에 HCCI 연소의 특징인 냉염(cool flame)이 BTDC 20°부근에서 나타나고 있으며 이후 열염(hot flame)이 나타나고 있다.

Fig. 5는 분사시기에 따른 배기 배출물 중의 NO_x, soot, HC 및 CO의 배출 농도를 나타낸 것이다. 분사시기가 BTDC 30°이전으로 진각되면 상당한 양의 NO_x를 저감할 수 있는 것으로 나타났고, 이 때 soot는 전혀 발생하지 않았다. 그러나 HC와 CO는 불완전 연소로 인하여 배출량이 매우 증가하였다. 따라서 조기분사에 의한 HCCI를 실현하기 위해서는 다단분사의 도입을 통해 불완전 연소생성물의 연소를 촉진하여 연소효율을 증가시키는 것이 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 DME를 35MPa과 50MPa의 압력으로 분사한 경우의 연소특성을 나타낸 것이다. 두 경우 모두 분사량은 12mg으로 일정하게 하였다. 분사압력

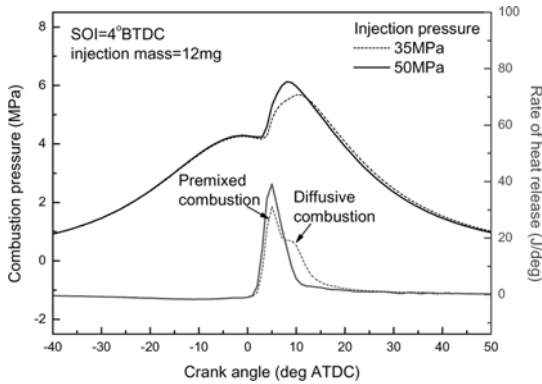


Fig. 6 Effect of injection pressure on the combustion characteristics of DME

이 35MPa에서 50MPa로 증가하게 되면, 인젝터에서의 단위시간당 분사량이 증가하여 분사기간이 단축되고 연료와 공기의 혼합이 촉진되어 착화지연기간과 연소기간이 감소하였으며, 예혼합 연소는 활발히 일어난 반면 확산연소는 나타나지 않았다. 또한 고압분사로 인하여 최고연소압력은 0.5MPa 정도 높아지는 결과를 보였다.

3.3 Cooled-EGR의 영향

Fig. 7은 NO_x 저감을 위해 30%, 45%의 EGR을 적용하였을 때의 연소특성을 나타낸 것이다. EGR 적용시 배기가스의 유입으로 인해 흡기중의 산소농도가 감소하여 착화지연기간이 길어져 최고연소압력과 열발생률은 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 EGR을 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 경우의 열효율을 비교한 그래프이다. EGR을

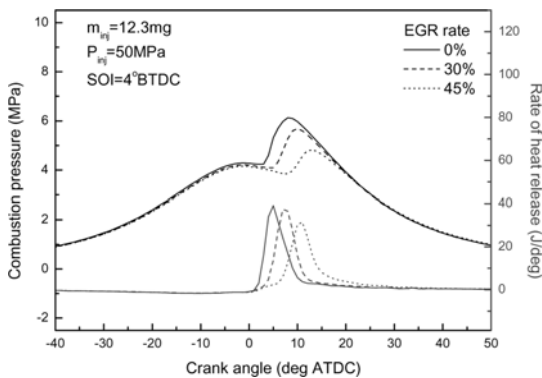


Fig. 7 Effect of EGR on the combustion characteristics

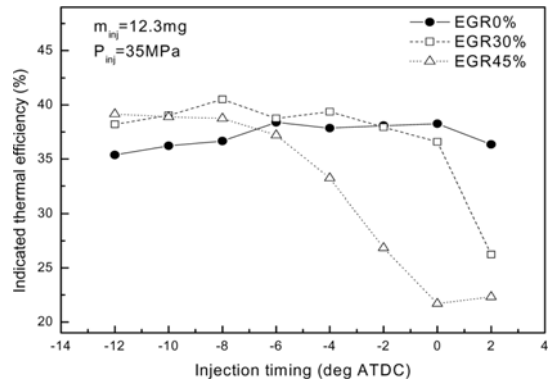


Fig. 8 Effect of EGR rate on the indicated thermal efficiency

적용하였을 경우 착화지연기간이 길어져 연소발생시점이 늦어지게 되고, 그에 따라 최고연소압력 발생시점이 압축행정 말기 또는 팽창행정 중으로 옮겨가게 됨으로써, 열효율이 높아지는 효과가 있다.

그러나 EGR율이 높아짐에 따라 분사시기가 지각되면 착화 및 연소구간이 과도하게 팽창행정 중으로 늦춰지게 되어 연소온도 강하에 따른 실화가 발생하게 되어 열효율이 급격하게 감소하는 결과를 보이고 있다.

Fig. 9는 분사시기와 EGR율에 따른 배출가스의 양을 나타낸 것이다. EGR을 적용하면 연소과정 중

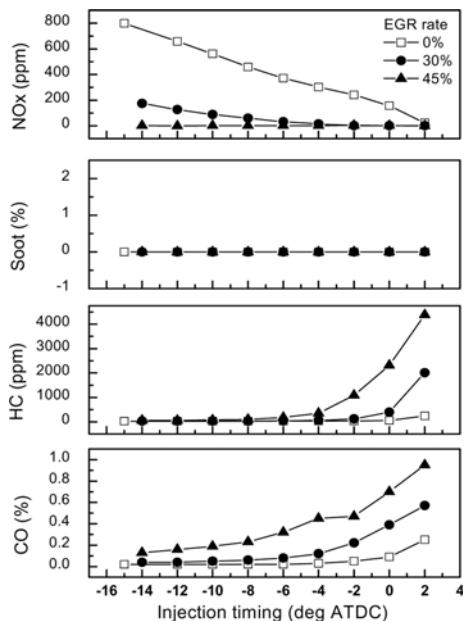


Fig. 9 Effect of EGR on the emissions characteristics

의 온도와 압력이 저하되어 NO_x 배출물을 상당량 저감할 수 있다. 그러나 일반적인 디젤연료의 경우 EGR 적용시 NO_x 배출물은 저감되지만, 입자상물질이 증가하는 단점이 있다. 그러나 DME의 경우 EGR을 적용하여도 입자상물질이 발생되지 않아 엔진출력이 과도하게 감소하지 않는 범위 안에서 NO_x의 충분한 저감이 가능한 것으로 판단된다.

4. 결론

소형 직접분사식 커먼레일 DME엔진의 성능과 배출물 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) DME는 착화지연기간이 짧아 최고연소압력 발생시점이 디젤연료의 경우보다 빠르고, 동일 분사량일 경우 총 연소기간도 짧게 나타났다.
- 2) 동일출력 기준으로 DME는 NO_x 배출이 증가하지만, soot는 모든 운전조건 하에서 발생되지 않았다.
- 3) 기체 연료인 DME는 조기분사를 실시하여도 벽면부착현상이 나타나지 않아 디젤연료와 같은 큰 출력 저하는 나타나지 않았다.
- 4) 분사압력을 35MPa에서 50MPa로 증가시키면 연료의 미립화가 촉진되어, 확산연소 구간이 사라지고 예혼합연소 구간만이 나타났다.
- 5) EGR 적용시 대폭적인 NO_x 저감이 가능하였으며, 이 때 열효율은 특정영역에서 분사시기에 따라 다소 증가하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업 및 환경부 Eco-STAR project(무·저공해자동차사업단) 및 한국과학재단 특정기초연구(01-2006-000-10932-0)의 지원으로 수행되었으며, 연구를 지원하여 주신 관계기관에 감사드립니다.

References

- 1) S. Kajitani, C. L. Zhen, M. Konno and K. T. Rhee, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct-Injection Diesel Engine Operated with DME," SAE 972973, 1997.
- 2) R. Verbeek and J. Van der Weide, "Global Assessment of Dimethyl Ether Comparison with Other Fuels," SAE 971607, 1997.
- 3) H. K. Seo, S. W. Park, M. S. Chon and C. S. Lee, "Effect of Ambient Conditions on Spray Characteristics of DME Fuel," Proceedings of the 10th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia, pp.41-47, 2005.
- 4) J. H. Park, H. K. Seo, S. W. Park and C. S. Lee, "Spray Development Process of Dimethyl Ether," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.369-374, 2005.
- 5) J. B. Hansen, B. Voss, F. Joensen and I. D. Siguroardottir, "Large Scale Manufacture of Dimethyl Ether-A New Alternative Diesel Fuel from Natural Gas," SAE 950063, 1995.
- 6) S. Kajitani, M. Oguma and T. Mori, "DME Fuel Blends for Low-Emission, Direct-Injection Diesel Engine," SAE 2000-01-2004, 2000.
- 7) Y. J. Lee, "Dimethyl-Ether as Alternative Diesel Fuel," Journal of KSAE, Vol.23, No.2, pp.43-49, 2001.
- 8) S. H. Yoon, D. J. Lee, M. Y. Kim, J. H. Lee and C. S. Lee, "Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion and Exhaust Characteristics of a Common-rail Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.13, No.5, pp.75-81, 2005.
- 9) M. Alam, O. Fujita, K. Ito, S. Kajitani, M. Oguma, H. Machida, "Performance of NOX Catalyst in a DI Diesel Engine Operated with Neat Dimethyl Ether," SAE 1999-01-3599, 1999.
- 10) M. Y. Kim, J. W. Kim, C. S. Lee and J. H. Lee, "Effect of Compression Ratio and Spray Injection Angle on HCCI Combustion in a Small DI Diesel Engine," Energy & Fuels, Vol.20, No.1, pp.69-76, 2006.