

직접분사식 압축착화엔진에서 DME의 2단 분사전략에 따른 엔진연소 및 배기특성에 관한 연구

정재훈¹⁾ · 정동원¹⁾ · 임옥택²⁾ · 표영덕³⁾ · 이영재³⁾

울산대학교 대학원 기계자동차공학과¹⁾ · 울산대학교 기계자동차공학부²⁾ · 한국에너지기술연구원 에너지효율연구단³⁾

An Investigation for 2-stage Injection Strategy on Combustion and Emissions in a D.I Compression-ignition Engine Fueled with DME

Jaehoon Jeong¹⁾ · Dongwon Jung¹⁾ · Ocktaek Lim^{*2)} · Youngduck Pyo³⁾ · Youngjae Lee³⁾

¹⁾Graduate of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

²⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

³⁾Energy Efficiency Department, Korea Institute of Energy Research, 102 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 4 March 2011 / Revised 11 July 2011 / Accepted 24 September 2011)

Abstract : This work was investigated 2-stage injection strategy on combustion and emissions in a direct injection compression-ignition engine fueled with DME. Single cylinder engine was equipped with common rail. Injection pressure was 700bar, dSOI between the main injection and the pilot injection was varied. Diesel was used as compared fuel of DME in all cases. The results was shown that maximum pressure was higher than all cases and its amount of DME and diesel was similar. Regardless the pilot injection, the main fuel injection timing was same. The heat release rate of the main injection for diesel was high while that of pilot injection for DME was high. The THC was very low regardless of the fuel type and injection strategy. In the single injection, NOx was increased to retard of main injection timing regardless of the fuel type. NOx emissions was decreased with the retardation of the main injection timing regardless of the fuel type in the case of 2-stage injection strategy.

Key words : DME(디메틸에테르), Main injection timing(주분사시점), Pilot injection(전분사), dSOI(분사시점간의거리), CRDI(커먼레일직분사)

1. 서론

최근 강화되어 가는 이산화탄소(CO₂: Carbondi-oxides) 및 배출가스 규제에 대응하기 위한 고효율·친환경 엔진으로써 압축착화엔진(Compression Ignition engine, CI engine)의 연구가 가속화 되고 있다. 그러나 압축착화엔진은 연소실 내의 공기와 연료가 불균일한 혼합기를 형성함으로써 연소과정 중 국부적인 고온영역 및 고당량비 영역이 발생하고, 이로 인해 유해배출물인 NOx(Nitrogen Oxides)와 PM(Particu-

late Matters)이 다량으로 발생된다.¹⁾

DME 엔진은 CO₂배출이 적으며, 후처리 시스템과 별개로 연소개선을 통한 배기가스 개선이 가능하다. 그리고 디젤엔진에 비해 전혀 뒤지지 않는 동적 특성을 가지고 있다. 그러나 연료특성상 디젤보다 발열량이 작기 때문에 동일한 동적 특성을 얻고자 더 많은 연료의 유량이 필요하며 연비향상과 NOx저감이 요구된다.²⁾ 파일럿 분사는 주 분사 이전에 연료를 분사함으로써 실린더 내부의 압력과 온도를 높여주고 혼합기 내부의 활성 라디칼의 농도를 높여 실린더 내부의 열역학적, 화학적 조건을 변

*Corresponding author, E-mail: otlim@ulsan.ac.kr

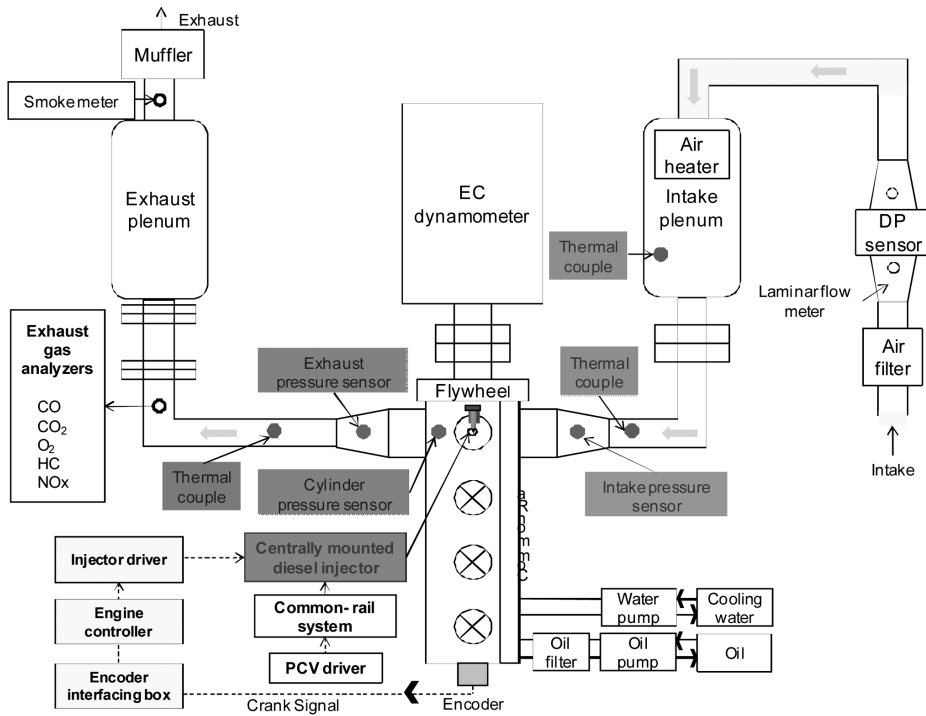


Fig. 1 Schematic of the CI engine facility

화시킨다. 그에 따른 효과는 주분사 시점의 점화 지연이 감소하게 되고 이에 따라 열 발생률, NO_x, 소음의 저감효과를 꾀할 수 있다.^{4,9)}

DME는 디젤과 동등 이상의 세탄가를 갖고 있기 때문에 디젤사이클 운전이 가능하며, PM의 배출이 거의 없다. 최근 DME를 제조할 수 있는 직접 합성 반응기술이 개발되고 천연가스, 석탄, 바이오매스, 폐플라스틱 등 다양한 원료에 의해 저가제조가 가능할 것으로 확인됨에 따라 디젤의 대체연료로써 연구가 가속화 되고 있다.³⁾

본 연구에서는 압축착화엔진의 문제점인 NO_x와 PM의 동시저감을 위해 디젤과 대체연료인 DME를 사용한 파일럿 분사를 실시하였다. 동시에 다양한 연료의 다분사에 따른 연소특성을 알고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 엔진은 커먼레일 분사시스템을 장착한 단기통 직접분사식 압축착화엔진이다. Fig. 1

Table 1 Engine specification

Engine type		Water-cooled 4 cycle diesel
Number of cylinder		1
Bore × Stroke		83 × 92 mm
Displacement		498 cc
Number of valves		2 intake, 2 exhaust
Compression ratio		19.5
Valve timing	Intake	8 °CA _b TDC / 44 °CA _a BDC
	Exhaust	54.6 °CA _b TDC / 7.4 °CA _a TDC
Fuel system		Common rail
Injection type		Direct injection
Nozzle holes		7 holes
Nozzle hole diameter		0.141 mm

은 실험용 엔진의 개략도이고, Table 1은 자세한 엔진의 제원을 나타내었다. 배기량은 498cc, 보어 및 스트로크는 각각 83mm, 92mm이며 기본 압축비는 19.5:1이다. 실험용 단기통 엔진은 ECU가 없기 때문에 엔진의 제어를 위해서 제어장치를 따로 구성해야 한다. 크랭크축에 장착된 로터리 엔코더로부터

나온 크랭크각도 신호는 엔코더 인터페이스 박스와 엔진 컨트롤러를 통해 인젝터 드라이버로 전달되어 분사기간, 분사횟수를 조절한다. 엔진의 운전 속도는 와전류형 동력계(Eddy current)를 엔진 크랭크축과 연결하여 제어하였다.

2.2 실험방법

엔진실험은 대기압 상태에서 냉각수 온도와 흡기 온도는 일정하게 유지하여 실험하였으며 실험조건은 Table 2와 같다. 엔진속도는 1200rpm로 일정하게 유지시켰으며 엔진을 제어하는 동력계는 150kW급 와류동력계를 사용하여 실험하였다. DME분사압력은 커먼레일 연료분사시스템을 사용하여 700bar에서 실험하였다. 본 연구에서는 파일럿분사만을 적용한 이단분사를 실시했으며 이단분사 전략은 Table 3과 같다. Fig. 2는 주분사(Main injection)와 파일럿분사(Pilot injection)시 나타나는 일반적인 분사 유량이고 dSOI(Distance between the start of main injection and pilot injection)는 주분사와 파일럿분사 간의 간격을 의미한다. 단일분사(Single injection) 실험시 단일분사 분사량은 46 mm³로 설정했다. 이단분사 실험시 파일럿분사 분사량은 단일분사 분사량의 1/8인 5.7 mm³로 설정했으며, 주분사 분사량은 7/8인 40.3 mm³으로 설정했다. 먼저 기준이 되는 주분사시점인 -4 °CA, -2 °CA, 0 °CA, 2 °CA, 4 °CA aTDC에서 실험을 한 후 이단분사를 적용하였다. 이단분사 실험시 5가지 주분사시점을 기준으로 dSOI 10 °CA, 16 °CA, 22 °CA간격을 두었으며 총 15가지 이단분사 조건에서 실험을 하였다.

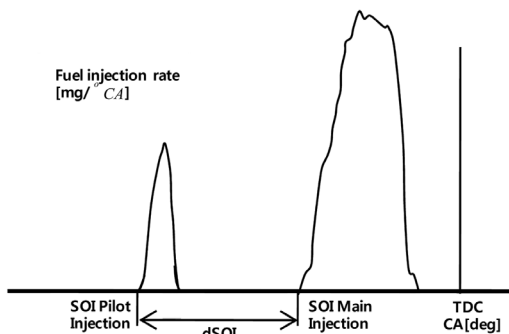


Fig. 2 Duration between the start of main injection and pilot injection

Table 2 Operating condition

Fuel	DME (with Bio-diesel 1%)
Engine speed	1200 rpm
Total input calories	1310.4 J/Cycle
Injection pressure	700 bar
Intake air temperature	353.15 ± 2 K
Coolant temperature	353.15 ± 1 K

Table 3 Strategies for multiple injections

SOI pilot injection	SOI main injection	dSOI
°CA aTDC	°CA aTDC	°CA
-	-4	0
-	-2	0
-	0	0
-	2	0
-	4	0
CASE 1		
-14	-4	10
-12	-2	10
-10	0	10
-8	2	10
-6	4	10
CASE 2		
-20	-4	16
-18	-2	16
-16	0	16
-14	2	16
-12	4	16
CASE 3		
-26	-4	22
-24	-2	22
-22	0	22
-20	2	22
-18	4	22

2.3 실험연료(DME)

DME는 세탄가가 높고(CN≥55), 자착화 온도가 낮아 압축착화방식이 가능하다. 이러한 특징이 디젤의 대체연료로써 DME가 각광받는 이유이다. 그리고 PM이 거의 배출 되지 않는다. PM의 배출이 적은 이유는 DME분자 구조상에 탄소(C)-탄소(C) 결합이 없고 분자 내의 산소 함유량이 높으며(34.8%) 탄소(C)와 수소(H)의 비율이 가장 작기 때문이다. 또한 비등점이 낮아(-25°C) 기화가 빨리 일어나기 때문에 혼합특성이 우수하고 적심현상(Wall wetting)

Table 4 Fuel properties

Property	DME	Diesel
Oxygen content	34.8 %	0 %
Boiling point [1atm]	-25.1 °C	180~370 °C
Liquid density [20°C, 2MPa]	668 kg/m ³	824 kg/m ³
Vapor pressure [20°C]	0.51 MPa	-
Cetane number	≥55	40~55
Lower calorific value	28.4 MJ/Kg	42.5 MJ/Kg

이 거의 없다. 그러나 DME는 점도가 낮아 연료가 누설되기 쉽고, 압력 및 온도 변화에 따라 탄성계수와 밀도가 크게 변화하여 안정된 분사량을 확보하기 어려운 문제가 있다. 또한 고무와 같은 탄성부품과 화학반응을 일으키므로 DME에 적합한 연료분사시스템개발에 관한 연구가 필요하다.³⁾ Table 4는 DME와 디젤의 연료 특성을 나타낸다.

3. 실험 결과

3.1 연소특성

DME, 디젤 연소특성을 알고자 실린더 내부 압력과 열 발생률의 데이터를 취득하였다. 여러 케이스 중 주분사 시점이 -4 °CA aTDC인 조건을 택하였다. Fig. 3, Fig. 4와 Fig. 5, Fig. 6은 각각 DME, 디젤을 이

용해 주분사 시점과 파일럿 분사 시점 간의 시간 변화에 따른 압력곡선 및 열 발생률을 나타낸다.

Fig. 3은 DME 연료에 대한 압력곡선이다. 이단분사가 적용된 경우 파일럿 분사 시점이 빠를수록 연소압력이 먼저 증가하였다. 그리고 파일럿 분사에 의해 주분사 조건에서 나타나는 압력곡선은 단일분사 조건에서 나타나는 11 bar/CA 곡선 기울기에 비해 완만한 3 bar/CA 압력곡선 기울기를 가졌으며, 최고 압력 또한 파일럿 분사 시점과는 관계없이 단일분사보다 대략 5 bar 정도 모두 높았다. 이는 파일럿 분사 기간에서 분사된 연료에 의해 실린더 내의 온도와 압력이 상승됨에 따라 주분사 기간에서 분사된 연료의 연소가 촉진되어 실린더 압력이 증가하였다.⁵⁾

Fig. 4는 DME 연료에 대한 열 발생률이다. 이단분사가 적용된 경우 파일럿 분사 시점이 빠를수록 분사된 연료에 의한 열 발생률이 먼저 발생하였으며, 주분사의 최대 열 발생률은 단일분사보다 대략 1/3로 줄었다. 파일럿 분사 기간에 분사된 연료에 의한 열 발생률이 dSOI 10 °CA와 dSOI 16 °CA인 경우 dSOI 22 °CA에 비해 비교적 크게 나타났다. 그리고 파일럿 분사 시점과는 관계없이 주분사 분사기간에

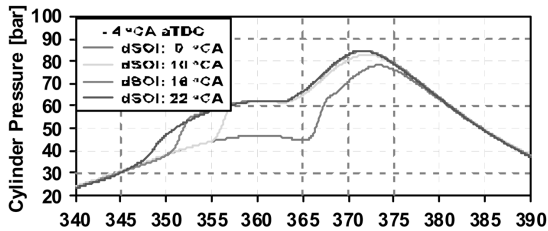


Fig. 3 Cylinder pressure in pilot injection with main injection at -4 °CA aTDC (DME)

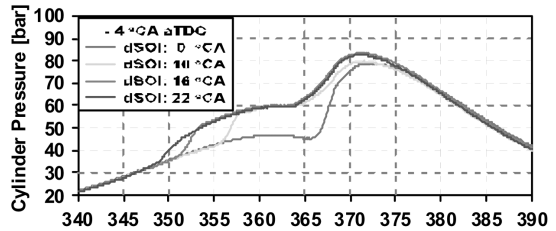


Fig. 5 Cylinder pressure in pilot injection with main injection at -4 °CA aTDC (Diesel)

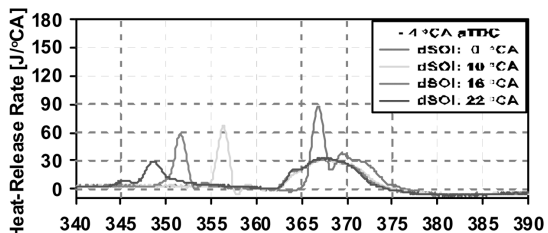


Fig. 4 Heat-release rates in pilot injection with main injection at -4 °CA aTDC (DME)

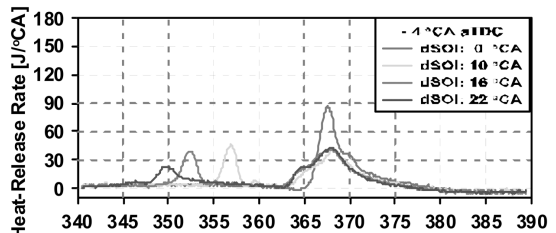


Fig. 6 Heat-release rates in pilot injection with main injection at -4 °CA aTDC (Diesel)

서 분사된 연료의 연소발생 시작점은 동일하였다. 이단분사가 적용된 경우 주분사 기간에 분사된 연료에 의해 나타나는 열 발생률은 단일분사 조건에서 나타나는 열 발생률에 비해 크게 완만하고 열 발생률 발생 시점도 빠르다. 이는 파일럿 분사기간에서 분사된 연료는 실린더 내의 온도와 압력을 상승 시킴에 따라 주분사 기간에서 분사된 연료의 연소가 촉진되어 점화 지연시간이 감소되었고, 이로 인해 급격한 예혼합 연소의 열 발생률이 감소되었다. 또한 주분사를 나눠 분사하기 때문에 단일분사보다 연소실 화염이 연소실내의 공기와 접촉이 증가하게 되어 국부적으로 고온의 화염 형성을 저감시킬 수 있다. 하지만 주분사 기간에 분사된 연료에 의해 나타나는 열 발생률은 주분사 시점과 파일럿 분사 시점 간의 기간 변화에 상관없이 열 발생기간, 열 발생률의 시작점, 열 발생률의 크기가 거의 동일하게 나타났다.

다음은 디젤 연료에 대한 해석이다. Fig. 5, Fig. 6은 연료를 사용해 이전과 동일한 조건에서 주분사 시점과 파일럿 분사 시점 간의 기간 변화에 따른 압력곡선 및 열 발생률을 나타낸다. 디젤의 압력곡선은 DME 연료와 크게 다르지 않은 경향을 보이고 있다. 이단분사 적용 시 투입된 열량이 단일분사와 같음에도 불구하고 DME, 디젤 모든 경우에서 단일분사보다 높은 최대 압력 값을 가진다. 디젤의 열 발생률 또한 DME와 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 디젤 열 발생률이 DME와 다른 점은 DME의 경우 파일럿 분사에 의한 열 발생률이 높은 반면 디젤의 경우 DME보다 파일럿 분사의 열 발생률이 작으며 주분사에 의한 열 발생률이 높았다.

타 연구결과와 비교 검토 시 압력 및 열 발생률은 파일럿 연소에 의해 연소압력과 온도의 상승효과로 주분사의 착화지연이 단일분사 보다 짧아졌음을 확인하였다. 그리고 다단분사 시 단일분사 보다 연소압력이 높으며 열 발생률의 최고값은 반대의 경향인 단일 분사가 다단분사보다 높은 열 발생률을 보인다. 또한 파일럿 연소의 열 발생률 최고값이 파일럿 분사 시기가 진각됨에 따라 감소하였다. 본 연구의 연소 특성 또한 다단분사 시 착화지연이 짧아졌으며, 열 발생률 또한 감소된 위와 동일한 결과를 얻었다.⁽⁶⁻⁸⁾

3.2 배기특성

Fig. 7은 고정된 주분사 시점 -4, -2, 0, 2, 4 °CA aTDC에 대하여 DME와 디젤의 주분사 시점과 파일럿 분사 시점 간의 기간 변화에 따른 BMEP를 나타낸다. 투입된 열량을 동일하게 맞추고 DME, 디젤연료에 이단분사가 적용된 경우 단일분사 조건에서 나타나는 BMEP보다 대부분 높았다.

Fig. 8은 이전과 마찬가지로 고정된 주분사 시점에 대하여 DME와 디젤의 주분사 시점과 파일럿 분사 시점 간의 기간 변화에 따른 NOx를 나타낸다. 단일분사 조건에서는 연료에 상관없이 주분사 시점이 지각될수록 감소하다가 크게 증가하였으며 DME의 경우가 디젤의 경우보다 발생량이 많았다. 이단분사가 적용된 경우 디젤과 DME에 상관없이 주분사 시점이 지각될수록 NOx 발생량이 감소하였으며, 감소량은 DME가 컸다. DME는 디젤에 비해 NOx의 발생량이 많았지만, 주분사 시점이 지각됨에 따라 4 °CA aTDC인 조건에서는 NOx 발생량이 유사하였다.

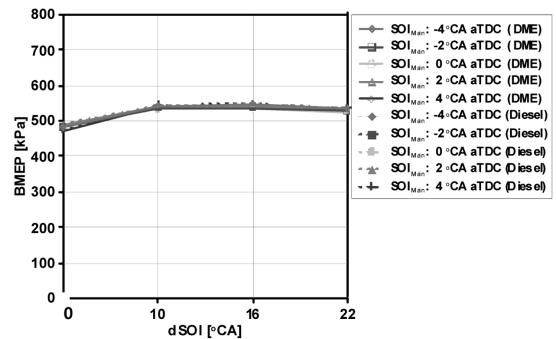


Fig. 7 BMEP in various SOI of main injection and pilot injection

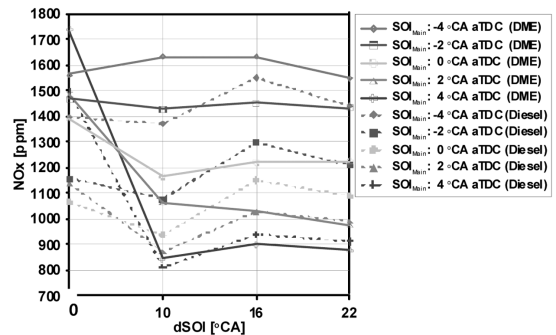


Fig. 8 NOx in various SOI of main injection and pilot injection

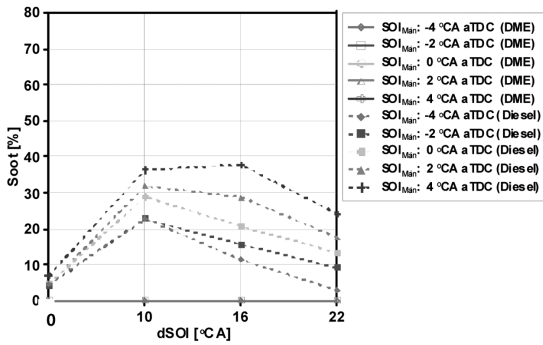


Fig. 9 Soot in various SOI of main injection and pilot injection

DME의 경우 이단분사가 적용된 dSOI 10 °CA, dSOI 16 °CA, dSOI 22 °CA인 경우 모두 NO_x의 발생량은 비슷했으며, 주분사 시점 변화에 따른 감소량도 거의 동일하였다. 압축착화엔진에서 연료를 실린더 내에 직접 분사할 경우, 점화 지연기간이 길어지면 분사된 연료의 연소가 한꺼번에 일어나 NO_x의 발생량이 증가한다. 이는 이단분사가 적용된 경우에는 파일럿 분사에 의해 상승된 실린더 내부 압력과 온도가 주분사 기간에 분사된 연료의 착화를 유도하기 때문에 점화 지연기간이 감소되고 이 영향으로 급격한 연소와 가파른 압력상승이 줄어들어 열 발생률이 감소하게 된다. 또한 주분사 시점이 지각될수록 피스톤 팽창효과에 의해 연소온도가 감소하기 때문에 NO_x의 발생량은 더욱 감소하였다.⁶⁻⁸⁾ 디젤의 이단분사 조건에서는 dSOI 16 °CA인 경우에 NO_x의 발생량이 가장 많았으며 dSOI 10 °CA인 경우가 가장 낮았다.

Fig. 9는 고정된 주분사 시점 -4, -2, 0, 2, 4 °CA aTDC대하여 DME와 디젤의 주분사 시점과 파일럿 분사 시점 간의 기간 변화에 따른 Soot를 나타낸다. 앞서 언급하였듯이 DME는 디젤의 비해 기화가 빠르고 합산소 연료이기 때문에 Soot의 배출이 거의 없다고 하였다. 예상하였듯이 DME의 Soot의 배출은 거의 배출되지 않았다. 디젤 같은 경우 이단분사 적용 시 상대적으로 단일분사 보다 많은 Soot가 배출되었으며, 주분사 시점이 지각될수록 발생량이 증가하는 경향을 보인다. 또한 주분사 시점과 파일럿 분사 시점 간의 기간 변화에 따른 Soot의 발생량은 시점 간의 거리가 커질수록 계속 감소하였다. 그

러나 단일분사 적용 시 Soot의 발생량 보다는 거의 모든 조건에서 낮아지지는 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 압축착화엔진의 문제점인 NO_x와 PM을 동시에 저감하고자, PM의 발생이 거의 없는 DME를 실린더 내에 직접분사하고 NO_x의 저감을 위하여 파일럿 분사를 실시하였다. 다양한 실험 조건에 따른 연소 및 배기특성을 확인 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 다단분사에 따른 연소특성인 실린더 내부압력 해석 결과 연료에 상관없이 최고압력은 단일분사 보다 모든 조건에서 높았다.
- 2) 열 발생률 최고값은 다단분사가 단일분사 보다 모든 조건에서 낮았으며 상승률이 완만하였고, 파일럿 분사 시점에 상관없이 주분사 기간에 분사된 연료의 연소시점은 동일하였다. 또한, DME의 경우 파일럿 분사에 의한 열 발생률이 높은 반면 디젤의 경우 주분사에 의한 열 발생률이 높았다.
- 3) 단일분사 조건에서 NO_x의 발생량은 디젤을 분사 한 경우보다 DME를 분사한 경우가 많았으며, 다단분사 조건에서 디젤과 DME에 상관없이 주분사 시점이 지각될수록 NO_x발생량은 계속 감소하였다.
- 4) DME는 모든 실험 조건에서 Soot가 디젤에 비해 거의 발생되지 않았다. 디젤의 경우 Soot 발생량은 단일분사보다 이단분사에서 더 많이 발생하였다.

후 기

이 논문은 2012년 울산대학교 기계공학부 일류화 사업단의 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- 1) Korea Automotive Technology Institute, Development States of Future Environmental Friendly Vehicle, 2007.
- 2) Korea Institute of Science and Technology Information, Future Environmental Friendly

- Vehicle, 2008.
- 3) Korea Auto Forum, 2007 Automotive Environmental White Paper Eng., Secretariat of the Korea Auto Forum, 2007.
 - 4) W. A. Majewski and M. K. Khair, Diesel Emissions and Their Control, SAE, Warrendale, 2006.
 - 5) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, Mc Graw-Hill, New York, 1988.
 - 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, KSAE, pp.596-601, 2006.
 - 7) H. S. Yoon and C. S. Bae, "The Effects of Pilot Injection on Combustion in Dimethyl-ether (DME) Direct Injection Compression Ignition Engine," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.364-369, 2007.
 - 8) A. Vanegas, H. Won, C. Felsch, M. Gauding and N. Peters, "Experimental Investigation of the Effect of Multiple Injections on Pollutant Formation in a Common-rail DI Diesel Engine," SAE 2008-01-1191, 2008.
 - 9) R. D. Reitz, "Controlling DI Diesel Engine Emissions Using Multiple Injections and EGR," Combustion Science and Technology, Vol.138, pp.257-278, 1998.