Transactions of KSAE, Vol. 21, No. 3, pp.43-49 (2013)

Copyright ⓒ 2013 KSAE / 123-05
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2013.21.3.043

파일럿 분사시기에 따른 DME 부분 예혼합 압축착화 엔진의 연소 및 배기특성에 관한 연구

정 재 훈[1] · 임 옥 택[*2] · 표 영 덕[3] · 이 영 재[3]

울산대학교 대학원 기계자동차공학과[1] · 울산대학교 기계자동차공학부[2] · 한국에너지기술연구원 에너지효율센터[3]

An Investigation about Combustion and Emission Characteristics for Pilot Injection Timing on Partially Premixed Charge Combustion Ignition Engine Fueled with DME

Jaehoon Jeong[1] • Ocktaeck Lim[*2] • Youngduck Pyo[3] • Youngjae Lee[3]

[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 18 April 2012 / Revised 13 September 2012 / Accepted 16 September 2012)

Abstract : This work investigated the effects of engine speed and injection timing on combustion and emissions characteristics in a partially premixed charge compression ignition (pPCCI) engine fueled with DME. pPCCI engine especially has potential to achieve more homogeneous mixture in the cylinder, which results in lower NOx and smoke emission. In this study single cylinder engine was equipped with common rail and injection pressure is 700 bar. Total injected fuel mass is 64.5 mm^3 per cycle. The amount of pilot injection of the entire injection 12.5% is tested. Results show that NOx emission is decreased while IMEP is increased as the retard of injection timing. Besides, NOx emissions are slightly rised as well as IMEP is increased with the increase of engine speed.

Key words : pPCCI(부분예혼합압축착화), DME(디메틸에테르), Engine speed(엔진회전속도), SOIMain(주분사시점), SOIPilot(파일럿분사시점), dSOI(분사시점간의거리)

1. 서 론

전 세계적으로 배기 및 연비규제가 강화되고 있으며 열효율의 증가에 대한 요구가 심화됨에 따라 예혼합 압축착화(HCCI)에 관련해서 다양한 연구가 현재 진행되고 있다. 예혼합 압축착화 엔진은 흡기행정 혹은 압축행정 초기와 같은 이른 시기에 연료를 분사해 균일한 예혼합기를 형성하여 압축에 의해 동시다발적으로 점화시키는 신연소방식이다. 이로 인해 희박한 혼합기가 연소되어 연소온도가 낮아 질소산화물(NOx) 발생이 크게 저감되며, 균질한 혼합기 때문에 국부적인 농후한 영역이 줄어들어 입자상물질(PM)도 저감된다.[1] 그러나 낮은 연소온도로 인하여 일산화탄소(CO)가 산화되지 않으며, 소염 효과가 크게 작용하여 실린더와 피스톤 사이의 틈새에 들어 있는 연료와 공기의 혼합기가 연소되지 않는 경향이 있어 탄화수소(HC) 배출이 크다. 이는 예혼합 압축착화의 문제점으로 대두되고 있다.[2]

예혼합 압축착화의 조기 분사는 실린더 내 낮은 공기 밀도로 인해 연료의 분무 길이가 길어진다. 이 때문에 연료 손실과 실린더 벽면에 적심현상이 증가하게 되고, 연소 효율이 떨어지며 연소 상 제어의 어려움이 지적된다. 이를 해결하기 위한 방법 중 하

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

나로 부분 예혼합 압축착화의 연소방식이 있다. 이는 연료를 나눠 분사함으로써 각각 예혼합 형성과 연소시점을 결정한다. 앞서 문제점들을 보완하기 위해 본 연구에서는 첫 번째(파일럿) 분사를 지각시키고, 분사량 또한 감소시켜서 적심현상을 최소화하여 배기 및 연소효율을 향상 시키고자 한다.[1)]

이러한 배기 및 연소효율을 높이고자 연소 기술뿐만 아니라 연료분야에서도 기존의 연료에 대한 대체연료 개발이 진행되고 있다. 이 중 디젤의 대체연료로써 많은 연구가 진행되고 있는 DME의 경우 디젤과 비슷한 세탄가로 인해 압축착화가 가능하며, 증발특성이 우수하고, PM이 거의 발생하지 않는다.[3)] 이러한 특성을 가지는 DME를 부분 예혼합 압축화에 적용함으로써 좀 더 나은 혼합기 형성과 배기 및 연소특성을 예상해 본다.

본 연구에서는 디젤의 대체연료인 DME를 사용하여 부분 예혼합 압축착화에 따른 연소특성과 배기 배출을 확인하고자 한다. 또한 엔진의 회전속도 및 연료 분사시점에 따른 변화가 부분 예혼합 압축착화 연소에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 엔진은 커먼레일 분사시스템을 장착한 단기통 직접분사식 압축착화엔진이다. 배기량은 498 cc, 기본 압축비는 19.5:1이며, 자세한 엔진의 제원은 Table 1에 나타내었다. 실험용 단기통 엔진은 ECU가 없기 때문에 엔진의 제어를 위해서 제어장치를 구성해야 한다. 크랭크축에 장착된 로터리 엔코더(Autonics; E40S)로부터 나온 크랭크각도 신호는 엔코더 인터페이스박스(Zenobalti Co.; ZB-100)와 엔진 컨트롤러(Zenobalti Co.; ZB-8035)를 통해 인젝터 드라이버(TEMS; TDA-3300)로 전달되어 분사기간 및 횟수를 조절한다. 커먼레일압력은 PCV 드라이버(Zenobalti Co.; ZB-1100)를 사용해 압력을 제어한다. 엔진의 운전 속도는 150 kW급 와전류형 동력계를 엔진 크랭크축과 연결하여 제어하였다.

배기가스 분석장치(HORIBA; MEXA-7100 DEGR)를 이용하여 CO, THC, NOx를 측정하였으며 Smoke는 Smoke meter(AVL; 415)를 사용하여 분석하였다.

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 bTDC / 44 CA aBDC
	Exhaust	54.6 CA bTDC / 7.4 CA aTDC
Fuel system		Common rail
Injection type		Direct injection
Nozzle holes		7 holes
Nozzle hole diameter		0.141 mm

배기데이터의 모든 값은 각 조건에서의 정상 상태일 때 1분 동안 측정하여 평균한 값이다.

연소실 내 압력측정을 위해서 실린더헤드를 가공하였으며 Piezo electric형의 압력센서(Kistler; 6056A)를 장착해서 0.1 CA 간격으로 데이터를 취득하였다. 압력데이터 또한 엔진이 정상 상태일 때 50 cycle을 취득하여 1 cycle로 평균하였다.

연구에 사용된 연료는 DME이며, 연료가 가지는 물리·화학적 특성이 디젤과 다르기 때문에 DME 연료에 적절한 분사시스템을 구성하였다. DME는 점도가 낮고 윤활성이 좋지 않아 플런저 등의 극간에서 연료가 누설되기 쉬우므로 공압펌프(Haskel; ASF-100)를 이용하여 연료를 공급하였다. 그리고 DME의 기화점은 디젤에 비해 상당히 낮기 때문에 안정적으로 연료를 액화상태로 공급하기 위해서는 DME 연료탱크에 N_2를 약 15 bar 정도 가압하여 연료탱크에서 토출되는 압력을 약 10~15 bar로 유지시켰다. 또한, 디젤에 비해 점도와 윤활성이 낮으므로, 이를 향상하고자 바이오디젤을 1% 첨가하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도이다.

2.2 실험방법

엔진실험은 자연흡기 조건에서 냉각수와 흡기온도를 일정하게 유지시켜 실험하였으며 운전조건은 Table 2와 같다. 엔진속도는 900, 1200, 1500 rpm으로 설정하였고, 분사압력은 커먼레일 연료분사시스템을 사용하여 700 bar에서 실험하였다. 연료량은 각 조건에서 동일하게 맞춰 같은 열량으로 실린더

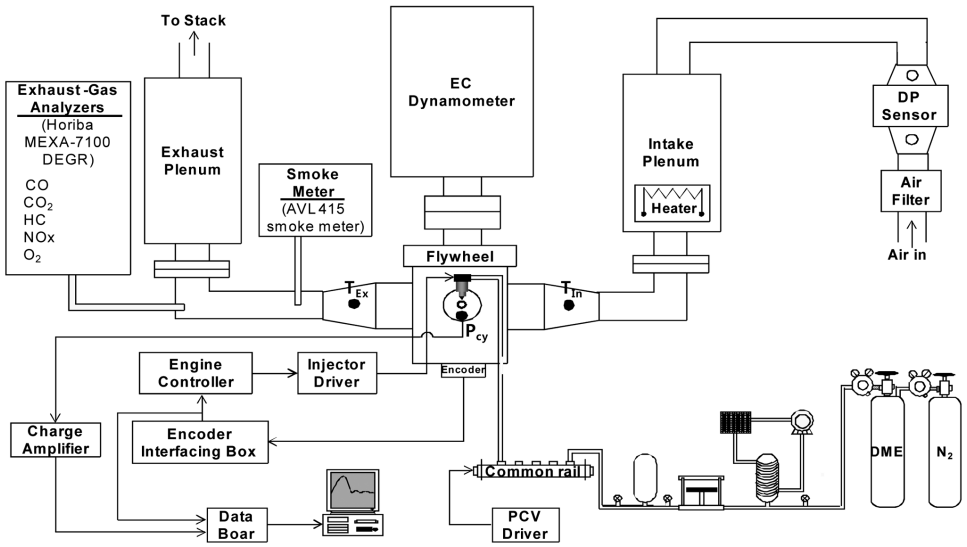

Fig. 1 Schematic of the CI engine facility

Table 2 Operating condition

Fuel	DME (with Bio-diesel 1%) / Diesel	
Engine speed	900 / 1200 / 1500 rpm	
Injection pressure	700 bar	
Injection timing	Main	356, 358, 360, 362, 364 CA
	Pilot	dSOI 10, 16, 22 CA
Injection quantity	Main	56.4 mm^3/cycle
	Pilot	8.1 mm^3/cycle
Intake air temperature	25 ± 2°C	
Coolant temperature	80 ± 1°C	

내 분사하였다. 총 투입된 DME 연료량은 64.5 mm^3/cycle 이다. 이단분사 실험 시 주분사 및 파일럿 분사량은 총 분사량의 각각 7/8, 1/8로 설정하였다. 본 연구에서는 파일럿분사만을 적용한 이단분사를 실시하였다. 분사시점은 5가지의 주분사 시점 356, 358, 360, 362, 364 CA을 적용하였으며 파일럿분사 시점은 위의 주분사 시점을 기준으로 dSOI 10, 16, 22 CA로 주분사 시점과 간격을 두어 이전에 분사하였다. Fig. 2에 주분사와 파일럿분사간의 간격인 dSOI (Distance between the start of main injection and pilot injection)의 정의를 나타내었다.

분사된 연료량을 측정하기 위해 가압챔버에 1000 cycle를 분사하여 주분사 및 파일럿 분사량을 확인하였다. 앞서 설명하였듯이 DME의 낮은 기화점 때문에 액화상태로 측정하기 어렵다. 이를 위해서는

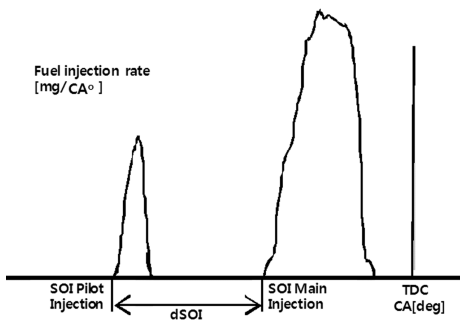

Fig. 2 Duration between the start of main injection and pilot injection

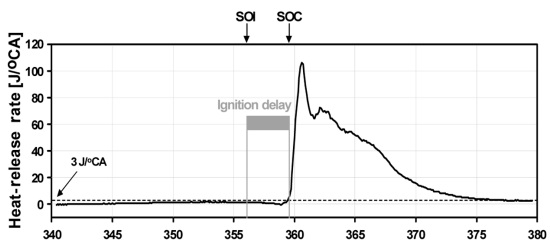

Fig. 3 Definition of ignition delay

가압챔버에 질소를 motoring시 실린더 내 최고압인 40 bar로 가압하여 분사된 연료를 액상으로 유지시켰다. 그래서 분사된 연료량은 챔버의 눈금을 통해 확인할 수 있으며, 1 cycle의 분사량을 알 수 있다.

Fig. 3은 점화지연에 대한 정의를 나타내었다. 본 실험에서는 열 발생률이 처음으로 3 J/CA 넘는 시점

을 연소시작점으로 정의하였다. 따라서 점화지연은 주분사 시점인 SOI와 연소 시작점인 SOC간의 시간 차이로 정의하였다.

3. 실험 결과

DME 부분 예혼합 압축착화 엔진연소에서 다양한 조건에 따른 연소 및 배기특성을 확인 하고자 실린더 내 투입된 연료량을 고정시키고 엔진회전속도와 분사시점을 변화시켜 실험하였다. 우선, 엔진회전속도 1200 rpm에서 분사시점 변화에 따른 연소 및 배기특성의 영향을 확인한 후, 한 분사 시점을 선정하여 추가적으로 900, 1500 rpm에 대한 실험을 적용하였다.

3.1 분사시점에 따른 연소 및 배기특성

DME 연소특성을 알고자 실린더 내부 압력의 데이터를 취득하였다. 여러 경우 중 주분사 시점이 356 CA인 조건을 나타내었다.

Fig. 4는 DME 연료를 이용해 주분사 시점과 주분사 및 파일럿 분사 시점 간의 기간 변화에 따른 압력곡선 및 열 발생률을 나타낸다. 실린더 내 압력곡선과 열 발생률을 살펴보면 이단분사가 적용된 경우, 단일분사보다 파일럿 분사의 연소압력 및 열 발생률이 먼저 증가하였으며, 이단분사 중에서도 파일럿 분사시점이 빠른 경우가 더 먼저 증가하였다. 파일럿 분사에 의해 주분사 조건에서 나타나는 최고 압력은 단일분사조건에서 나타나는 최고 압력보다 대략 5~10 bar 더 높다. 이는 파일럿 분사 기간에서 분사된 연료에 의해 실린더 내의 온도와 압력이 상승됨에 따라 주분사 기간에서 분사된 연료의 연소가 촉진되어 실린더 내 압력이 증가하였다. 반면에 파일럿 분사에 의해 주분사 조건에서 나타나는 최고 열 발생률은 단일분사보다 더 낮게 나타났다. 이는 파일럿 분사기간에서 분사된 연료는 실린더 내의 온도와 압력을 상승시킴에 따라 주분사 기간에서 분사된 연료의 연소가 촉진되어 점화 지연시간이 감소되었고, 이로 인해 급격한 예혼합 연소의 열 발생률이 감소되었다. 또한 분사를 나눠 분사하기 때문에 단일분사보다 연소실 화염이 연소실내의 공기와 접촉이 증가하게 되어 국부적으로 고온의 화염 형성을 저감시킬 수 있다.

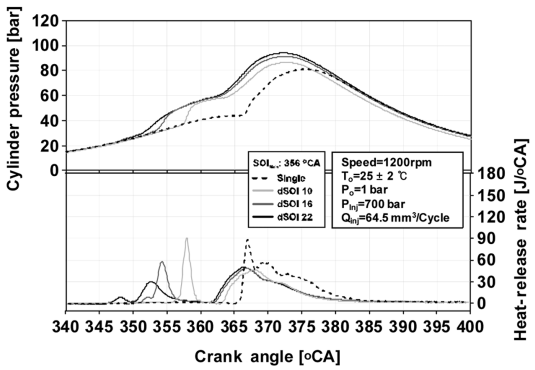

Fig. 4 Effect of pilot injection in cylinder pressure and heat-release rate for DME. SOI_{Main} = 356 CA

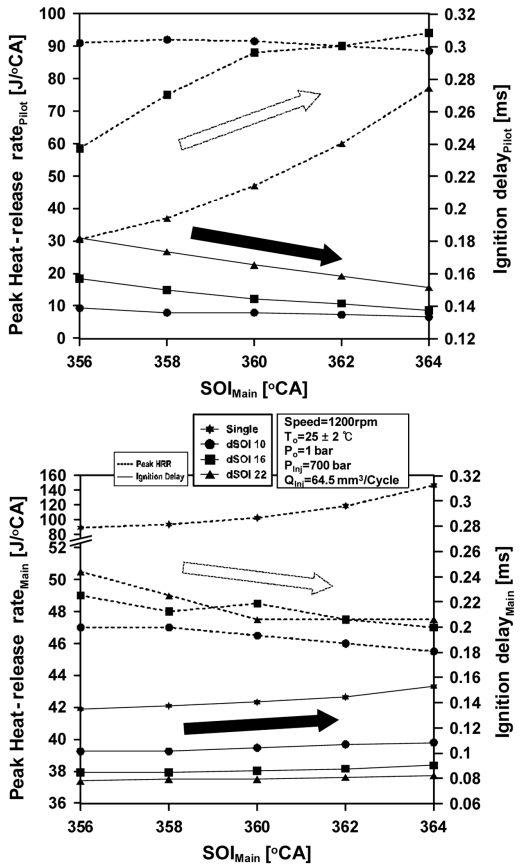

Fig. 5 Peak release rate and ignition delay as a function SOI_{Main} for dSOI. Engine speed = 1200rpm

Fig. 5는 엔진회전속도 1200 rpm에서 주분사 시기에 따른 최고 열 발생률 및 점화지연을 나타낸다.

우선, 파일럿 분사의 최고 열 발생률과 점화지연을 살펴보면, 파일럿분사의 최고 열 발생률은 주분사 시점이 지각 될수록 증가하고, 반면에 점화지연은 감소되는 경향을 보인다. 이는 주분사 시점이 356 CA에서 TDC를 넘어 364 CA 까지 지각될 때 파일럿 분사시점은 334~354 CA까지 지각된다. 즉 TDC 부근에 분사되므로 시점이 지각될수록 실린더 내 압력과 온도가 상승하여 점화지연이 짧아지고 연료의 연소가 급격히 일어난다. 또한, 점화지연이 짧아질수록 연료와 공기의 혼합기 형성 시간이 짧다. 이로 인해 혼합기의 분포가 고루 이루어지지 못하여 파일럿 분사의 최고 열 발생률이 증가하였다. 그리고 파일럿 분사시점이 이를수록, 실린더 내 압력 및 온도가 연료의 자착화 조건에 미치지 못하여 동일한 조건에서 비교 시 점화지연은 더 길어지는 것을 확인할 수 있다. dSOI 10 CA인 경우의 최고 열 발생률과 점화지연을 보면 dSOI 16, 22 CA처럼 주분사 시점이 지각 될수록 증가되지 않으며, 최고 열 발생률 및 점화지연 시간이 거의 일정하다. 최고 열 발생률 값은 대략 89~91 J/CA이다. 이는 dSOI 10 CA일 때 주분사 및 파일럿 분사시점간의 거리가 가장 짧기 때문에 파일럿 분사 범위가 346~354 CA인 TDC 부근에서 분사하게 된다. 이때의 실린더 내 압력과 온도는 소량의 파일럿 분사량을 완전 연소 할 수 있을 것으로 판단된다.

다음은 주분사의 최고 열 발생률 및 점화지연을 나타낸다. 그래프의 경향을 살펴보면, 파일럿 분사의 열 발생률 및 점화지연과 서로 반대인 경향을 나타낸다. 단일분사와 이단분사 시 주분사의 최고 열 발생률은 분사지점이 지각 될수록 각각 증가하고 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 단일분사 일 경우, 이단분사처럼 파일럿 분사로 인한 주분사 이전에 온도 및 압력이 상승하지 않으며, 분사시점이 지각될수록 피스톤 팽창효과에 의하여 실린더 내부 온도가 낮아짐에 따라 점화지연 기간이 길어진다.

또한 점화 지연기간 동안 분사된 연료가 증가하여 한번에 연소되었기 때문에 최고 열 발생률이 증가하였다. 반면에 이단분사 일 경우 분사시점 지각 시 감소하였다. 이는 단일분사와 달리 파일럿연소의 영향으로 주분사 이전에 온도 및 압력이 상승하였기 때문에 단일분사와는 다른 결과를 보인다. 또한 분사시점 지각 시, 점화지연이 증가하게 됨으로써 연료와 공기의 혼합 시간이 길어지게 되고, 그 결과 혼합기의 분포가 균일해 진 것으로 판단된다. 그리고 파일럿 분사시점이 dSOI 10 CA인 경우가 최고 열 발생률이 dSOI 16, 22 CA에 비해 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 점화지연에서 보여지듯이 dSOI 10 CA인 경우가 다른 두 조건보다 점화지연이 길기 때문에 균일한 혼합기를 형성할 수 있으며, 파일럿 분사의 최고 열 발생률에서 확인 하였듯이 dSOI 10 CA인 경우가 분사시점에 상관없이 일정하고 최고 열 발생률이 높기 때문에 실린더 내 온도 및 압력 상승률이 주분사의 급격한 연소를 일어나지 못하게 한 것이다.

Fig. 6은 엔진회전속도 1200 rpm에서 주분사 시기에 따른 IMEP를 나타낸다. 모든 경우에서 주분사 시점이 지각될수록 IMEP가 증가한다. 이는 TDC이전에 일어났었던 압축행정에서의 음의 일이 TDC이후인 양의 일로 전환되면서 IMEP가 증가한 것으로 보여진다. 그리고 이단분사 시 단일분사보다 IMEP가 낮은 이유는 파일럿 분사로 인한 TDC 이전에 음의 일이 증가하였기 때문이다. 그 증가한 음의 일은 파일럿 연소가 급격히 일어난 dSOI 10 CA인 경우가 제일 크므로 IMEP가 제일 낮은 것으로 생각된다.

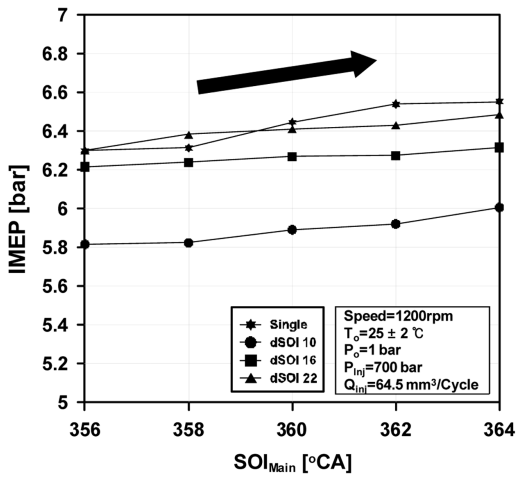

Fig. 6 IMEP as a function SOI$_{Main}$ for dSOI. Engine speed = 1200 rpm

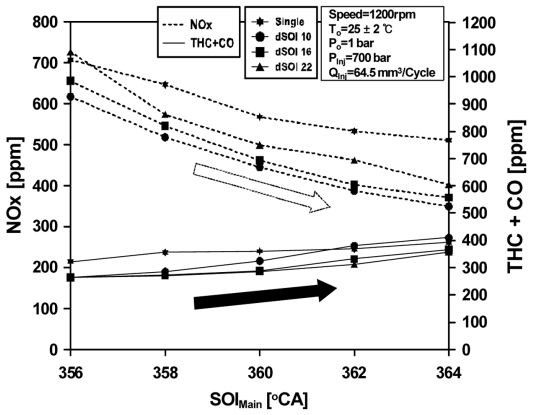

Fig. 7 NOx and THC+CO as a function SOI_{Main} for dSOI. Engine speed = 1200 rpm

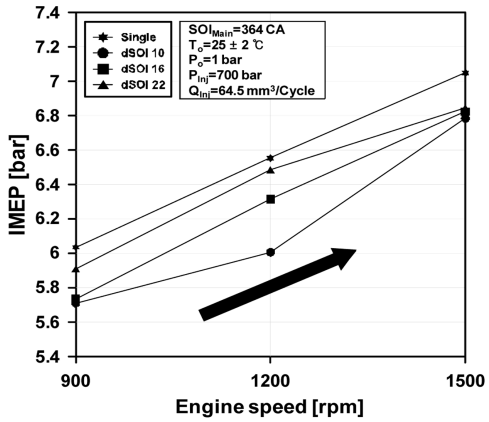

Fig. 8 IMEP as a function Engine speed for dSOI. SOI_{Main} = 364 CA

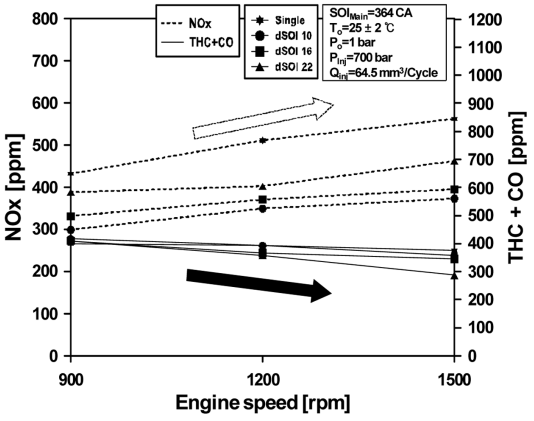

Fig. 9 NOx and THC+CO as a function Engine speed for dSOI. SOI_{Main} = 364 CA

Fig. 7은 엔진회전속도 1200 rpm에서 주분사 시기에 따른 NOx 및 THC+CO를 나타낸다. NOx는 주 분사 시점이 지각 될수록 감소되며, THC+CO는 증가하였다. NOx의 저감 원인으로는 주분사 시점이 지각 될수록 주분사의 최고 압력은 감소되고, 피스톤 팽창효과로 인해 실린더 내 연소온도가 낮아져 NOx가 감소된 것으로 보여진다. 그리고 이단분사일 경우, 주분사의 최고 압력이 가장 낮은 dSOI 10 CA의 NOx가 제일 작은 것을 확인 할 수 있다. 반면에 THC+CO는 분사시점 지각 시 증가하였는데, 이는 연소온도 감소로 인한 연소과정에서의 불완전 연소가스가 증가한 것으로 판단된다. 그리고 DME의 연료특성상 PM은 거의 배출되지 않았다.

3.2 엔진회전속도에 따른 연소 및 배기특성

Fig. 8은 주분사 시점 364 CA에서 엔진회전속도에 따른 IMEP를 나타낸다. IMEP는 엔진회전수가 증가될수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 엔진회전수가 증가할수록 점화지연의 절대시간(ms)은 감소하지만, 점화되는 시기(CA)는 지각되기 때문에 IMEP가 증가하였다. 그리고 이단분사일 경우, dSOI 10 CA이 제일 낮은 IMEP를 나타낸다. 이는 앞서 나타낸 분사시점에 따른 IMEP의 결과와 동일하다.

Fig. 9는 주분사 시점 364 CA에서 엔진회전속도에 따른 NOx 및 THC+CO를 나타낸다. NOx는 엔진회전속도가 증가할수록 증가하고, THC+CO는 감소하였다. 이는 엔진회전속도가 증가함에 따라 점화지연이 줄어들게 되고 이로 인해 공기와 연료의 혼합기 형성이 제대로 이뤄지지 않아서 농후한 영역에 국부적인 고온화염이 생성된 것으로 보여진다. 반대로 엔진회전수가 증가할수록 THC+CO는 고온영역에서 산화되어 감소된 것으로 판단된다. 그리고 이단분사 일 경우, dSOI 10 CA이 NOx가 제일 작게 나왔으며 반대로 THC+CO는 다른 이단분사 조건보다 높게 나타났다. 역시 Smoke는 거의 발생하지 않았다.

4. 결 론

1) 이단분사가 적용된 경우, 단일분사보다 파일럿 분사의 연소압력 및 열 발생률이 먼저 증가하였

다. 그리고 이단분사의 최고 압력은 단일분사조건에서 나타나는 최고 압력보다 대략 5~10 bar 더 높게 나타났다. 반면에 이단분사 시 주분사의 최고 열 발생률은 단일분사보다 낮았다.

2) 동일한 엔진회전속도(1200 rpm)에서 파일럿 분사의 최고 열 발생률은 주분사 시점이 지각 될수록 증가하고, 반면에 점화지연은 감소되는 경향을 보인다.
그리고 주분사에서 단일분사의 최고 열 발생률과 점화지연은 주분사 시점이 지각 될수록 증가한다. 반면에 주분사에서 이단분사의 최고 열 발생률은 감소하며, 점화지연은 증가한다.
3) 동일한 엔진회전속도(1200 rpm)에서 분사시점 지각 시 IMEP는 증가하였으며, NOx와 THC+CO는 각각 감소하고, 증가하였다. 그리고 주분사 시점이 제일 늦은 364 CA와 주분사 및 파일럿 분사 시점간의 거리가 짧은 dSOI 10 CA에서 NOx발생이 작았다.
4) 동일한 주분사시점(364 CA)에서 엔진회전속도 증가 시 IMEP는 증가하였고, NOx와 THC+CO는 각각 증가, 감소하였다. 그리고 본 실험 조건에서는 엔진회전속도 900 rpm와 주분사 시점 364 CA, dSOI 10 CA조건에서 최저 NOx 값을 보였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2012R1A1050573), 지식경제부의 동남권 광역경제권 선도산업 R&D를 지원받아 수행된 것입니다.

References

1) F. Zhao, T. W. Asmus, D. N. Assanis, J. E. Dec, J. A. Eng and P. M. Najt, Homogeneous Charge Compression Ignition Engines, SAE International, Warrendale, 2003.
2) Korea Auto Forum, Automotive Environmental White Paper Eng., Secretariat of the Korea Auto Forum, 2007.
3) W. A. Majewski and M. K. Khair, Diesel Emissions and Their Control, SAE International, Warrendale, 2006.
4) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.
5) W. L. Hardy and R. D. Reitz, “An Experimental Investigation of Partially Premixed Combustion Strategies Using Multiple Injections in a Heavy-duty Diesel Engine,” SAE 2006-01-0917, 2006.
6) Y. Wang, L. He, L. Zhou and W. Li, “Effects of DME Pilot Quantity on the Performance of a DME PCCI-DI Engine,” Energy Conversion and Management, Vol.51, Issue 4, pp.648-654, 2010.