

**디젤 예혼합압축착화엔진에서 주연료 분사 후
점화 연료 분사 방법을 통한 점화 촉진과 배기가스 개선 효과**
국 상훈^{**}, 배 충식^{*}

**Effects of Pilot Injection Method Following the Main Injection
on Ignition Promotion and Exhaust Gas Reduction
in a Diesel-Fueled HCCI Engine**

Sanghoon Kook^{**}, Choongsik Bae^{*}

ABSTRACT

Diesel-Fueled HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) Engine is an advanced combustion process explained as a premixed charge of diesel fuel and air is admitted into the cylinder and compression ignited. It has possibility to reduce NO_x by spontaneous auto-ignition at multiple points that allows very lean combustion resulting in low combustion temperatures. Also PM could be reduced by the premixed combustion and no fuel-rich zones. But HCCI couldn't be realized because of the difficulties in vaporizing the diesel, control of combustion phase directly.

To solve these problems, new fuel injection strategy, explained as the pilot fuel injection to promote ignition near TDC following the main fuel injection at the extremely advanced timing, is applied during the compression ratio is varied from 18.9:1 to 27.7:1. This is not a pilot fuel to promote the ignition but also the direct control method of the combustion phase.

Experimental result shows the pilot fuel injection promote the ignition and the compression ignition of the HCCI engine is achieved as compression ratio becomes higher. Also there is an optimal pilot fuel injection timing for the HCCI combustion. NO_x is reduced more than 90% compared to DI-Diesel case but PM and THC emission needs more investigation.

Key Words : HCCI, Pilot Injection, Compression Ratio

기 호 설 명

HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition, BTDC: Before Top Dead Center, IMEP: Indicated Mean Effective Pressure

1. 서 론

기존의 디젤 엔진의 연소는 피스톤 압축으로 만들어진 고압 상태의 연소실에 연료가 분사되어 점화 지연 기간을 거친 후 예혼합 연소와 확산 연소가 순차적으로 이어지는 특징을 가지고 있

* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, kooks@kaist.ac.kr

다. 분사된 연료는 기화 및 혼합에 유리한 분무의 끝단에서 발생한 화염이 연소실 전체로 확산되는 과정을 거치므로 연료의 과농 부분이 만들어내는 PM 및 높은 연소 온도로 인한 NOx의 발생이 문제점으로 지적된다. 이러한 유해분출물의 저감을 위한 노력의 일환으로 예혼합압축착화(HCCI)엔진에 대한 연구가 널리 진행되고 있다. [1-7]

HCCI엔진의 연소는 극히 이른 시기의 연료 분사를 통해 형성된 예혼합기가 피스톤 압축으로 압력이 상승하면서 연소실 전체에서 다점점화되는 과정으로, 균일한 점화로 연소 온도가 낮아 NOx가 저감되고 확산 연소가 없는 불휘염의 연소가 일어나게 되므로 PM 역시 저감되는 장점을 가지고 있다. 그러나 디젤 연료는 쉽게 기화되지 않아 예혼합기의 형성과 압축 점화가 어렵고 이를 해결하기 위해 흡기 온도의 상승을 요하게 된다.[3, 6] 이러한 흡기 온도의 상승은 열효율의 감소를 가져오게 되고 점화 시기가 이르게 만드는 문제점을 가지고 있다.

이를 해결하기 위한 방법으로 Weidong[8]등은 천연가스 연료를 주연료로 사용하는 경우에 디젤 연료를 점화연료로 사용하여 흡기 온도 상승 값을 저감시킬 수 있다는 가능성을 KIVA code를 이용한 계산 결과로 제시하였다. 또한 Koyanagi[9]등이 기존의 디젤 엔진 실험에서 Pilot Injection에 대해 연구한 결과 1.5mm 정도의 극히 적은 양의 디젤 연료는 soot 없이 예혼합 연소만이 일어난다는 결론을 내렸다. 이에 따라 HCCI 연소의 예혼합 연소를 유지하면서도 점화를 촉진시키기 위해 극히 이른 시기에 주 연료를 분사한 후 점화가 일어나기 원하는 TDC 인근에서 1.5mm의 적은 연료를 점화원으로서 분사하는 실험적 연구가 수행되었다.[7] 지난 연구를 통해 이러한 연료 분사법이 주 연료만을 이른 시기에 분사시키는 경우에 비해 HCCI의 연소 상황은 유지하면서도 출력을 크게 향상시킬 수 있다는 결과를 제시하였다.

본 연구에서는 이러한 연료 분사법을 확대 적용하면서 압축비의 변화가 좀 더 점화를 촉진시킬 수 있는지와 그 경우에 PM, NOx, THC, CO 등의 배기가스에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2. 1 HCCI 엔진 및 실험 장치

실험에 사용한 HCCI 엔진은 배기량 498cc의 단기통 디젤 엔진으로 그 제원은 Table 1과 같다. 기존의 디젤 엔진을 HCCI Mode로 운전하기

Table 1 단기통 HCCI 엔진 제원

항 목	제 원
엔진 형식	단기통 직접 분사식
Bore X Stroke	83 X 92mm
배기량	498 cc
압축비	18.3
분사기	5공 sac 타입, 분사각 152°, 분사경 0.168mm

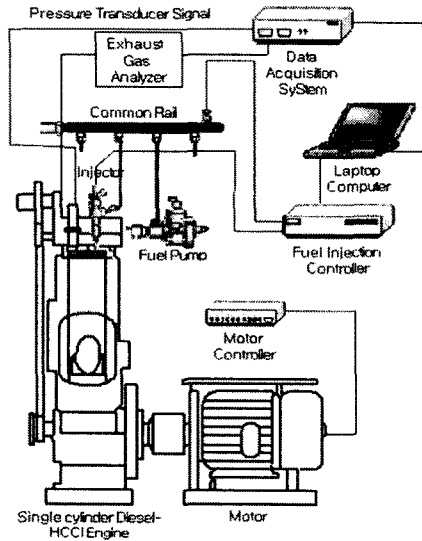


Fig. 1 Experimental Facility

위해서 최대 135MPa의 분사압력이 가능한 커먼레일 시스템(BOSCH)을 전용 분사기 구동 장치(TDA3000H, TEMS Ltd.)로 구동하되 연료 분사의 시기와 방법은 0.2° CA의 제어 정밀도를 보장하는 3600pulse/cycle의 Encoder(Koyo, Rotary Type)를 캠샤프트에 부착하여 신호를 얻어내고 PC에 장착된 Timing Card(National Instrument.)와 제어 프로그램(LabWindow)을 사용하여 HCCI를 위한 넓은 범위의 분사 시기를 구현하였다. 엔진은 구동 모터(140 Nm, 25HP-15 kW, 6극)에 연결하고 회전 수를 인버터(HYDRIVE-J300)로 귀환 제어하였다. 데이터 계측에 있어서는 Piezo-Resistive형 압력 센서(KISTLER 6052A, Range 0~25 MPa)를 장착하여 실린더내 압력을 측정하였고 광투과식 매연측정기인 Opacimeter(EplusT)를 이용해 Smoke의 양을, 배기가스측정장치(HORIBA MEXA1500D)를 이용해 THC, NOx, CO양을 계측하였다. 계측된 각 데이터는 Data Acquisition System(IOtech WaveBook512)을 이용해 PC에 저장하여 분석되었다.[Fig. 1]

2. 2 압축비 변화

압축비의 변화는 단기통 엔진의 확장피스톤부의 Dummy Block의 크기를 변경하여 연소실을 이루는 보울 부분의 부피가 달라지도록 하여 구현하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 기존의 18.9:1의 압축비를 만드는 피스톤 블록을 23:1과 27.7:1의 압축비가 가능하도록 보울부의 부피를 변화시켰다.



Fig. 2 압축비 변화를 위한 Piston Blocks

HCCI의 연소에서는 압축비가 높을수록 Cool Combustion이 일어나는 시기가 빨라지고 연소 효율을 저해하는 이른 점화시기의 문제가 발생한다. 따라서 기존 직접 분사식 디젤 엔진을 HCCI 엔진으로 변환 적용할 경우 이른 점화 시기를 예방하기 위해 압축비를 낮추는 방향으로 연구가 널리 진행 중이다.[3, 5, 6] 하지만 본 연구에서는 디젤이 기화되기 어려워 흡기온 상승이 요구되는 점을 점화원 연료의 공급으로 해결하려는 목적을 가지고 있고 따라서 점화 촉진의 방향으로 기존 디젤 엔진보다 압축비를 상승시켜 실험을 수행하였다.

2. 3 실험 방법

Table 2에 나타난 바와 같이 엔진 운전 속도는 대략 공회전 속도에 해당하는 800RPM이며 열전달 등에서 실제 엔진 운전 조건과 유사한 상황이 되도록 냉각수 온도와 디젤 연료 온도를 제어하였다. 연료 분사법에 있어서는 주 연료를 기존 디젤에 비해 극히 이른 시기인 BTDC 100도 이전에 분사하고 TDC 인근에서 점화연료를 분사하였다. 고진류측정장치를 통해 분사 구동기로부터 분사기로 들어가는 Injection Signal을 계측한 것이 Fig. 3에 나타난 그래프로 이와 같은 분사법을 분사 시기의 변화 및 압축비의 변화에 따라 폭넓게 시행하였다. 커먼레일 압력의 경우는, 높은 모멘텀을 가져 주연료를 예혼합기로 만드는데

유리함은 물론 점화연료의 침투거리가 길어 넓은 공간에서 점화원으로서 작용하는데 유리하다고 결론 내린[7] 고압분사의 경우를 적용하였다. 모든 실험 결과는 150회의 엔진 Cycle에 대한 Data를 취득해 평균하였다.

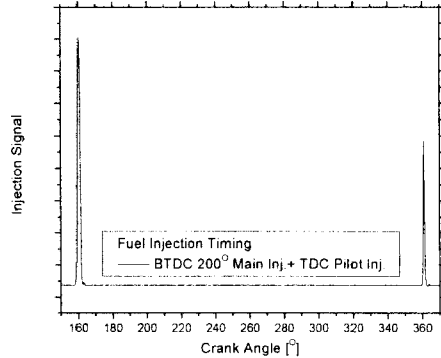


Fig. 3 주연료 분사 후 점화연료 분사방법

3. 실험 결과

3.1 DI-Diesel과 HCCI의 연소

Fig. 4은 ICCD Cameta를 이용해 취득한 DI-Diesel 연소의 경우 화염 가시화 사진이다. Fig. 5의 실린더 압력과 열방출율 그래프의 실험 조건에 해당하는 화염 사진으로 BTDC 15° 에서 분사된 연료가 10° 의 점화지연기간을 거친 후 강렬한 화염이 나타나는 전형적인 과정을 보여주고 있다. 열방출율의 경우에 있어 Fig. 5에 나타난 것처럼 예혼합연소와 확산 연소의 순차적인 진행이 나타나고 있다. 이 조건은 이후 배기가스와 IMEP등의 측면에서 실험 조건에 따라 DI-Diesel의 경우와 비교할 때에 사용되었다. Fig. 6은 본 연구에서 진행되는 HCCI 연소의 전형적인 실린더 압력과 열방출율을 보여주는 그래프로 압축비 18.9:1에서 120MPa의 분사 압력으로 주연료를 BTDC 200° 에서 분사하고 점화연료를 TDC에서 분사한 경우이다. 열방출율에 있어서 Cool Combustion 현상에 이어 TDC에서

Table 2 엔진 운전 조건

항 목	내 용
회전수	800RPM
Common-Rail Pressure	120MPa
10mm ³ Main Injection	BTDC100~200°
1.5mm ³ Pilot Injection	BTDC10° ~TDC
Compression Ratio	18.9~27.7:1
Coolant Temperature	80 °C
Diesel Temperature	40 °C

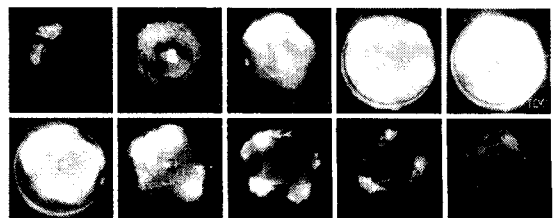


Fig. 4 DI-Diesel 화염가시화

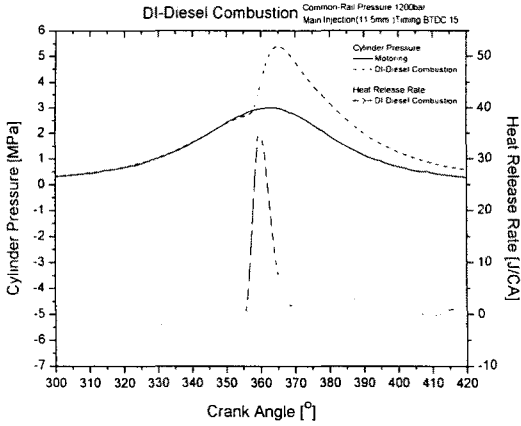


Fig. 5 DI-Diesel Combustion

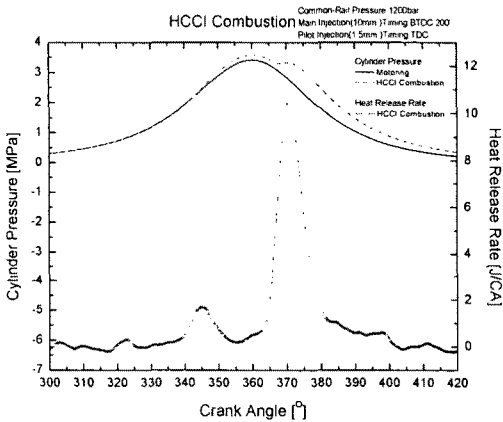


Fig. 6 HCCI Combustion

분사된 연료가 점화원으로 적절히 작용하면서 Fig. 5의 DI-Diesel의 경우와 달리 확산연소 과정이 없이 예혼합연소만이 나타나고 있다.

3.2 압축비 변화에 따른 영향

예혼합기의 점화를 촉진하기 위한 점화 연료의 사용에 있어 압축비 변화에 따른 경향을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 120MPa의 분사 압력에 주연료를 BTDC 200° 에서 분사하고 점화 연료를 TDC에서 분사한 경우 압축비 변화에 따른 영향이 Fig. 7에 나타나 있다. 그래프는 압축비가 높을수록 Cool Combustion이 발생하기 위해 필요한 연소실 내 공기의 온도와 압력 조건이 빨리 만족되어 Cool Combustion의 시점이

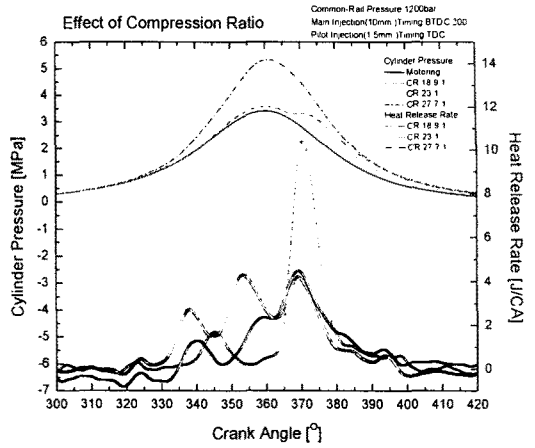


Fig. 7 압축비 변화 - Pilot Timing TDC경우

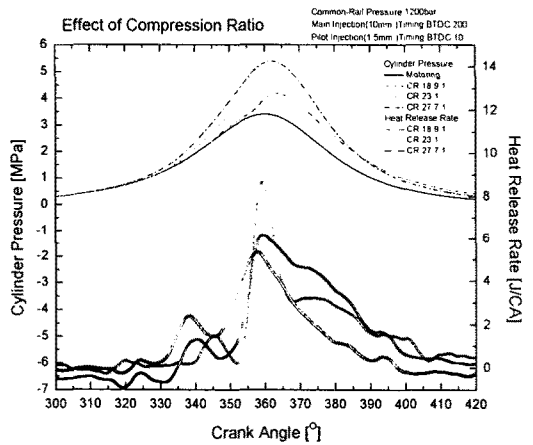


Fig. 8 압축비 변화 - Pilot Timing BTDC 10° 경우

빨라짐을 보여주고 있고 이에 따라 예혼합기의 연소도 이른 시기에 시작됨을 보여주고 있다. 또한 18.9:1 압축비의 경우에 TDC에서의 점화 연료 분사 이후에야 예혼합 연소가 진행되어 짧은 기간 안에 급격한 열방출을 보이나 압축비가 23:1, 27.7:1로 높아지면서 Cool Combustion 이후 피스톤 압축만으로 자발 점화되는 특성이 새롭게 나타나고 연소 기간이 길고 열방출율의 최고 값은 낮은 현상을 보이고 있다. 이로부터 고압축비 운전이 예혼합기의 압축 점화에 유리하게 작용함을 알 수 있다. 그러나 27.7:1의 경우에서 확연히 드러나듯 압축점화되는 연료는 한정되어 있으며 이 때문에 열방출이 감소하다가 TDC에서의 점화 연료 분사 이후 다시 열방출이 진행됨을 알 수 있다. 이에 따라 Fig. 8의 경우처럼

점화연료의 분사 시기를 BTDC 10° 로 전각시킴으로서 압축 점화의 단계가 끝나기 전에 점화연료가 분사되어 열방출이 지속되도록 할 수 있었다.

3.3 주연료 분사시기에 따른 영향

압축비 23:1의 경우에 대해 주 연료의 분사 시기에 따른 영향을 나타낸 그래프가 Fig. 9에 나타나 있다. 압축비 및 점화 연료 분사 시기가 일정하면 동일 시점의 Cool Combustion과 예혼합연소의 시작은 물론, 연소 기간도 같게 나타난다. 그러나 예혼합기 형성의 정도에 따라 열방출의 양에 차이가 있다. 주 연료 분사 시기는 흡기 행정 말기에 해당하는 BTDC 200° 의 경우가 열방출 양이 크게 나타나는 것으로부터 이 시기가 예혼합기 형성에 가장 유리하다고 판단된다. 이는 압축비가 18.9:1인 경우에 수행한 이전의 연구 결과와도 일치되는 점으로[7], 이른 주연료 분사시기가 예혼합기 형성을 위한 시간을 충분히 확보할 수 있어 나타난 결과로 판단된다.

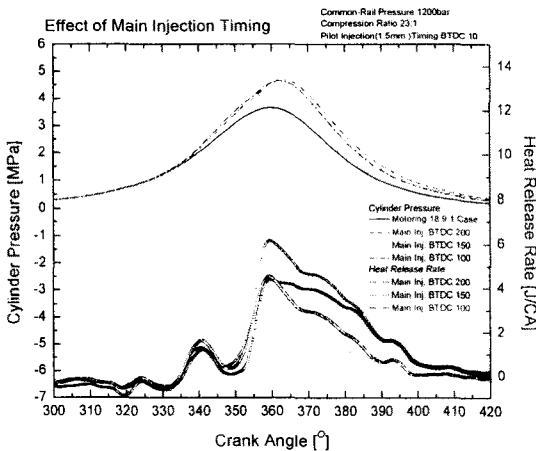


Fig. 9 주연료 분사 시기의 영향

3.4 실험 조건별 IMEP

2.3절을 통해 제시한 바와 같이 압축비, 주연료 분사시기, 점화연료 분사시기를 변화시키며 얻어낸 실험 결과에 대한 IMEP 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 압축비의 증가에 따라 IMEP 값은 전체적으로 크게 나타나는 경향을 보이는 것은 3.2절에서 설명한 바와 같이 고압축비로 갈수록 압축만으로 점화가 일어나는 연료가 생겼기 때문으로 분석되며 점화 연료의 분사에 있어서는 현재의 압축비 범위 내에서는 BTDC 10° 가 압축착화에 의한 연소를 유지시켜주며 남은 연료를 연

소시켜 주는데 유리하게 작용하며 이 때문에 IMEP 값도 전체적으로 큰 경향을 보이는 것으로 판단된다. 일부 실험 조건에서 고압축비보다 저압축비의 경우가 IMEP값이 크게 나타나는 경우도 있는데 이는 이른 점화 시기로 인해 연소 효율과 엔진이 하는 일 측면에서 손해를 보았기 때문으로 판단된다. 주연료 분사 시기는 3.3절을 통해 예혼합기 형성에 가장 오랜 시간을 확보할 수 있는 BTDC 200° 결과가 큰 IMEP를 가져오는 것을 확인할 수 있다. 그러나 내구성을 보장하기 힘들 정도로 극히 높은 압축비인 27.7:1에 대한 결과는 Cycle Variation이 지나치게 심하고 (COV 100이상) 연소가 불안정하게 진행되는 경우가 많아 경향을 판단하기 어렵다. Fig. 10에 함께 표시된 DI-Diesel Level의 경우 3.1절에 소개한 실험 조건에 대한 결과로 같은 연료량으로 운전했을 때 나타나는 DI-Diesel의 IMEP값이다. 현재 점화연료와 압축비의 증가를 통한 점화 촉진의 효과는 나타나고 있으나 IMEP의 최고값이 여전히 DI-Diesel 대비 76% 수준에 머무르고 있으며 이는 예혼합기 형성이 불안정하기 때문으로 판단된다.

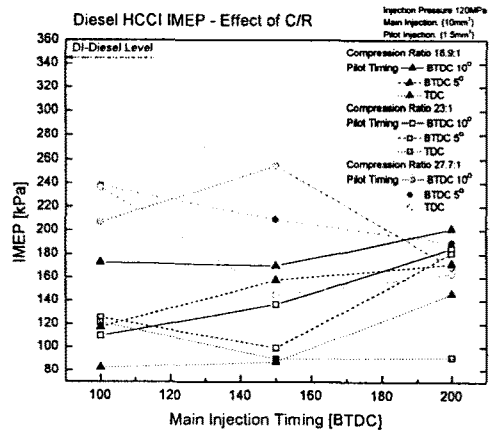


Fig. 10 실험 조건별 IMEP

3.5 압축비 변화에 따른 배기가스 특성

압축비 18.9:1의 경우에 지난 연구 결과[7]를 통해 제시한 최적의 연료 분사시기인 주연료 BTDC 200° , 점화연료 TDC와 압축비 23:1의 경우는 3.2절에 설명한 바와 같이 압축 점화에 의한 연소와 점화 연료에 의한 연소를 적절히 이어주는 분사시기인 주연료 BTDC 200° , 점화연료 BTDC 10° 를 압축비 27.7:1의 경우는 IMEP상 가장 높은 값을 보인 주연료 BTDC 150° , 점화연료 BTDC 10° 의 경우를 선택하여 Fig. 11에 Opacity(PM), THC, NOx, CO등의 배기가

스를 나타내었다. 특히 NOx는 함께 표시된 DI-Diesel 대비 90%이상 저감된 성능을 보이고 있으며 압축비 증가로 점화가 촉진되어 연소 상황이 점차 개선되면서 THC와 CO도 감소하는 경향을 보인다. 그러나 절대량에 있어서 기존의 연구 결과[1-6]와 같이 THC값이 크게 증가하였으며 이는 Piston Topland에 갖힌 혼합기에 의한 것으로 알려져 있다. 또한 이론적으로 DI-Diesel 대비 크게 저감 될 것으로 기대되었던 PM의 경우도 큰 값을 나타내고 있는데 이는 여전히 완전한 예혼합기가 형성되지 못하고 일부 미연연료가 배출되고 있기 때문으로 보인다. 이는 기존 디젤용 분사기를 사용하기 때문에 대기압 상태에서 연료를 분사할 경우 나타나는 Over-Penetration 문제[3-6]로 판단되며 예혼합기 형성이 촉진되도록 디젤 연료를 기화시키기 위해 흡기온의 상승도 일부 요구되는 것으로 판단된다.

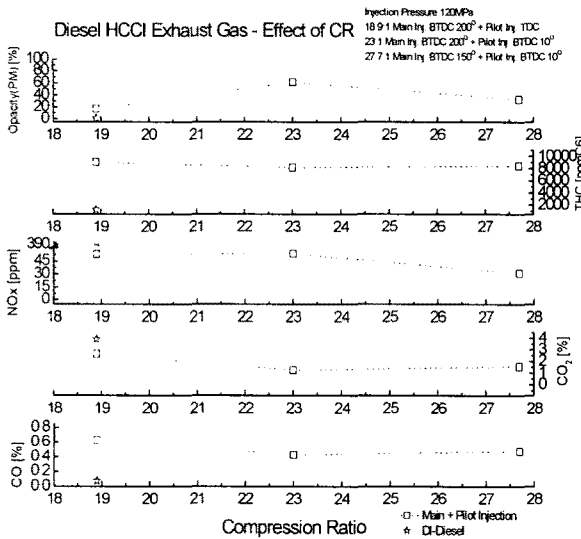


Fig. 11 압축비 변화에 따른 배기가스 특성

4. 결론

디젤 HCCI 엔진의 점화를 촉진하기 위해 주연료 분사 후 점화 연료 분사법을 폭넓게 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축비의 증가가 이른 점화 시기를 가져왔으며 압축 압력의 증가로 Cool Combustion, 압축 점화에 의한 연소, 점화 연료에 의한 연소의 단계별 연소 특성이 나타났다.
- 2) 압축비 변화에 따라 최적의 점화 연료 분사

시기는 다르며 주 연료 분사 시기는 흡기 행정 말기가 예혼합기 형성을 위해 적절하다.

3) DI-Diesel 대비, NOx가 90%이상 저감되거나 IMEP값이 최대 76%(260kPa) 정도이고 PM값이 높게 나타난다. 이는 Over-Penetration에 의한 결과로 판단된다.

후기

이 연구는 KAIST 연소가속연구센터(CERC) 및 국가 지정 연구실 (NRL) 산업의 연구비 지원에 의해 수행된 결과입니다.

참고 문헌

- [1] Yoshinaka Takeda et al., "Emission Characteristics of Premixed Lean Diesel Combustion with Extremely Early Staged Fuel Injection", SAE Paper 961163, 1996
- [2] Hashizume T. et al., "Combustion and emissions characteristics of multiple stage diesel combustion", SAE Paper 980505, 1998
- [3] Hisashi Akagawa et al., "Approaches to Solve Problems of the Premixed Lean Diesel Combustion", SAE Paper 1999-01-0183, 1999
- [4] Haruyuki Yokota et al., "A New Concept for Low Emission Diesel Combustion", SAE Paper 970891, 1997
- [5] Yoshinori Iwabuchi et al., "Trial of New Concept Diesel Combustion System-Premixed Compression-Ignited Combustion-", SAE Paper 1999-01-0185, 1999
- [6] Bruno Walter and Bertrand Gatellier, "Development of the High Power NADITM Concept Using Dual Mode Diesel Combustion to Achieve Zero NOx and Particulate Emissions", SAE Paper 2002-01-1744, 2002
- [7] Sanghoon Kook et al., "커먼레일 시스템을 장착한 단기통 예혼합압축착화 엔진의 Two-Stage 디젤 연료 분사법에 따른 연소 및 배기가스 특성", KSAE 2003 춘계학술대회, 2003
- [8] Weidong et al., "Using Pilot Diesel injection in a Natural Gas Fueled HCCI Engine", SAE Paper 2002-01-2866, 2002
- [9] K. Koyanagi et al., "Optimising common rail-injection by optical diagnostics in a transparent production type diesel engine", SAE Paper 1999-01-3646, 1999