

DME와 Diesel의 HCCI 연소특성 비교

이 주광*, 국 상훈*, 박 철웅*, 배 충식**

DME and Diesel HCCI Combustion Characteristics

Jookwang Lee*, Sanghoon Kook*, Cheolwoong Park*, Choongsik Bae**

ABSTRACT

HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) combustion is an advanced combustion process explained as a homogeneously premixed charge of a fuel where air is admitted into the cylinder and compression ignited. It has possibility to reduce NOx by spontaneous auto-ignition at multiple points that allows very lean combustion resulting in low combustion temperatures. Particulate matters (PM) could be also reduced by the homogeneous combustion and no fuel-rich zones.

Injection timing is extremely advanced to achieve homogeneous charge where a diesel fuel could not be vaporized sufficiently due to low pressure and low temperature condition. Also the over-penetration could be a severe problem. The small injection angle and multi-hole injectors were applied to solve these problems.

Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel was also applied to relieve the bad vaporization problem associated with early injection of diesel fuel. Neat DME has a very high cetane rating and high vapor pressure. Contained oxygen reduces soot during the combustion. Experimental result shows DME can be easily operated in an HCCI engine. PM shows almost zero value and NOx is reduced more than 90% compared to direct-injection diesel engine operating mode but problem of early ignition needs more investigation.

Key Words : DME, HCCI

기 호 설 명

HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition, HSDI: High Speed Direct Injection, BTDC: Before Top Dead Center, IMEP: Indicated Mean Effective Pressure, CA: Crank Angle

1. 서 론

디젤 엔진은 열효율이 높아 차량의 동력원으로 널리 쓰이고 있으며 최근 커먼레일 분사 시스템을 이용한 고압 분사가 가능해져 고속 운전을 하는 승용 엔진으로도 각광 받고 있다. 그러나 디젤 엔진은 그 연소 과정에 있어 피스톤 압축으로

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, csbae@kaist.ac.kr

만들어진 고온, 고압 상태의 연소실에 연료가 분사되고 미립화 되어 기화되면서 주변 공기와 혼합된 후에 착화되는 과정을 거침으로 이론 공연비 영역에서 높은 연소 온도로 인한 NOx의 발생이, 미처 혼합기가 형성되지 못한 농후한 영역에서는 PM (Particulate Matter) 발생이 일어나는 문제점을 갖고 있다. 즉, 점화 지연이라 하여 분사 후 혼합기가 형성된 후 착화되기까지의 시간이 필요하고 이 때 형성된 혼합기가 연소되는 시간인 예혼합 연소와 착화된 지역으로부터 확산되는 화염으로 인한 확산 연소가 순차적으로 이어지는 특징을 가지고 있다.

HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition; 균일 예혼합 압축 착화) 연소는 이처럼 공간적으로 불균일한 디젤 엔진의 연소를 균일한 예혼합기 형성을 통해 개선한 것으로 연료의 과농 부분이 없어 PM이 크게 저감되고 연소실 전체에서 다점점화 됨으로 인해 연소 온도가 낮아 NOx가 저감되는 장점을 갖고 있다[1].

HCCI엔진의 연소를 직접분사식 디젤 엔진에서 구현하기 위해서는 극히 이른 시기의 연료 분사를 통해 예혼합기를 형성해야 한다. 그러나 극히 이른 시기에 연료를 분사할 경우 연소실 내 온도와 압력이 낮게 형성됨으로 인해 디젤 연료는 쉽게 기화되지 않아 예혼합기의 형성과 압축 점화가 어렵고 Wall-wetting의 문제가 발생하므로 이를 해결하기 위해 흡기 온도의 상승을 요하게 된다. 이러한 흡기 온도의 상승은 점화 시기가 이르게 됨으로 인해 일 측면에서 손해를 보게 되고 연소를 직접 제어할 수 없는 문제점을 동시에 갖게 된다.[1,2]

이를 해결하기 위한 방안으로 디젤 대체 연료인 DME(Di-Methyl Ether)를 이용한 HCCI 연소의 구현이 널리 연구되고 있다[3,4]. DME는 디젤과 유사한 성상을 갖는 합산소 연료로 디젤 연료와 달리 쉽게 기화됨으로 인해 HCCI 연소를 위한 예혼합기 형성에 유리하다. 따라서 배기가스 저감에 있어 DME에 함유된 산소가 연소 중 발생하는 soot를 산화시켜 PM을 저감시키는 장점을 극대화 하면서도 낮은 연소 온도를 통한 NOx 저감을 동시에 이룰 수 있다.

본 연구에서는 디젤 연료를 이용한 HCCI 연소를 구현하는 중에 발생한 문제점을 지적하고 흡기온 가열과 분사기 변경을 통해 이를 개선한 결과를 제시하였다. 또한 동일 엔진을 변경하여 DME 연료를 이용한 HCCI 연소를 구현하였으며 이를 통해 PM과 NOx를 성공적으로 동시 저감한 결과를 제시하였다. 이 때 각 운전 인자 별로 DME 및 Diesel HCCI 연소 결과를 실험적으로 비교, 분석하였다.

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 (150°, 100°), 분공 0.168mm

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 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.

DME HCCI 운전을 위해서는 Diesel HCCI 운전과 동일한 연료 분사 제어 방법을 사용하되 1.5MPa로 외부의 저장 탱크에서 공급된 DME를 공압 펌프(Haskel Pump)로 가압하는 별도의 커먼레일 시스템을 구축하였다. 이를 통해 DME의 부식성 문제를 해결하면서 연료 분사 압력은 55MPa까지 가능하도록 하였다.

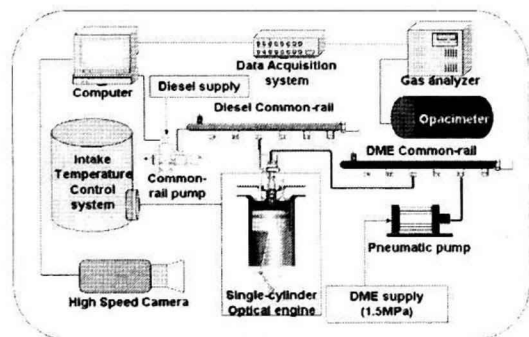


Figure 1 Experimental Setup

엔진은 모터(140 Nm, 25HP-15 kW, 6극)에 연결하고 회전 수를 인버터 (HYDRIVE-J300)로 귀환 제어하였으며 데이터 계측에 있어 Piezo-Resistive형 압력 센서 (KISTLER 6052A, Range 0~25 MPa)를 실린더 헤드에 장착하여 실린더내 압력을 측정하였다. 배기가스는 광투과식 매연측정기인 Opacimeter (EplusT)를 이용해 Smoke의 양을, 배기 가스 측정 장치 (HORIBA; MEXA1500D)를 이용해 NOx, HC, CO양을 계측하였다. 계측된 각 데이터는 Data Acquisition System (IOtech WaveBook512)을 이용해 PC에 저장하여 분석되었다.[Fig. 1]

2. 2 분사기 변화

분사기 변화는 기존 디젤 엔진용 분사기의 over-penetration 문제를 해결하기 위해 적용되었다. Figure 2(a)는 분사각의 정의로 기존 150° 분사각과 개선된 100° 분사각을 나타내고 있다. 기존 연구자들은 본 연구에서와 동일한 분사기를 사용하여 연소실 내부가 최대 압축된 경우와 대기압조건인 각각의 경우에 분무도달거리를 분석하여 제시하였다[5]. 이를 이용해 축방향과 반경방향으로의 분무도달거리를 엔진 내부에 적용하여 분무의 연소실 내 직접 충돌의 가능성을 분석한 결과가 Figure 2(b)와 2(c)에 제시되었다.

Figure 2(b)는 흡입행정부터 압축행정까지 피스톤 상부의 위치 변화에 대한 축방향(Pz) 분무도달거리의 결과로 분사각 150°와 100° 분사기 모두 분무와 피스톤 상부의 충돌이 없이도 이른 시기에 분사가 가능함을 보이고 있다. 그러나 Figure 2(c)에 제시한 반경방향의 분무도달거리는 사선으로 표시한 연소실 벽면으로의 충돌이 심각함을 보여주고 있다. 실험에서 사용한 연료량을 분사하기 위해서는 120MPa로 분사할 시 1.7°CA(crank angle) 동안의 분사 시간이 소요되는데 분사각 150°인 분사기는 0.4°CA 동안 분무가 실린더 벽면에 직접 충돌하는 over-penetration 문제점을 보이고 있다. 이에 따라 본 실험에서는 분사각 100°인 분사기를 사용하여 반경방향 충돌 기간을 0.1°CA로 줄이면서도 축방향에 대해 분사시기를 BTDC 290°CA까지 전각시킬 수 있도록 개선하였다.

이를 통해 over-penetration으로 인해 wall-wetting이 발생하여 이것이 미연연료의 배출로 이어져 연소 효율을 떨어뜨리고 PM과 HC의 배출량을 증가시키던 기존의 문제점을 개선하고자 하였다.

2. 3 실험 방법

Table 2에 나타낸 바와 같이 엔진 운전 속도는 디젤의 공회전 속도에 해당하는 800RPM이며 열

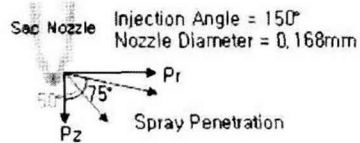


Figure 2(a) Injection Angle

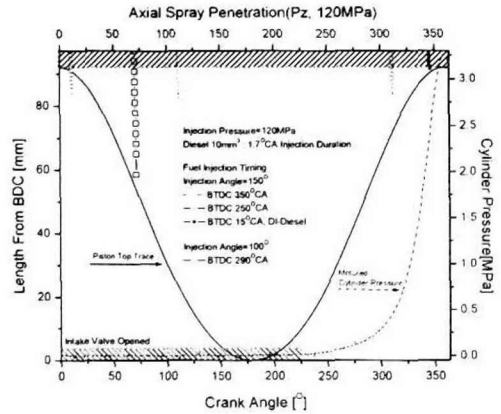


Figure 2(b) Axial (Pz) Spray Penetration

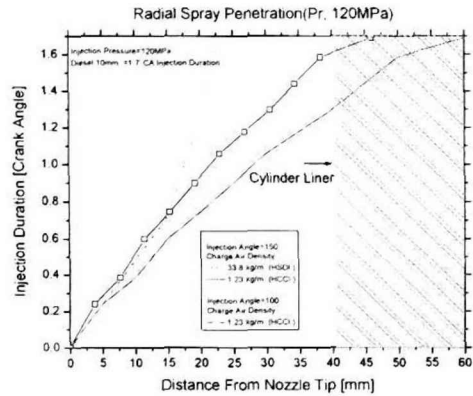


Figure 2(c) Radial (Pr) Spray Penetration

전달 등에서 실제 엔진 운전 조건과 유사한 상황이 되도록 냉각수온도는 80°C로 디젤 연료 온도는 40°C로 제어하였다. 연료 분사법에 있어서는 디젤은 120MPa까지 고압 분사를 통해 미립화를 촉진시키고자 하였으며 DME는 기화되기 쉬운 특성에 따라 최대 55MPa의 분사압력 까지 구현하였다. 분사시기는 Figure 3에 제시된 고전류 측정장치를 통한 분사 신호 취득 결과와 같이 기

Table 2 엔진 운전 조건

항 목	내 용
rpm	800rpm
Diesel injection pressure	30, 120MPa
DME injection pressure	25, 55MPa
Injection timing	BTDC 50~200°CA
Diesel injection quantity	10mm ³
DME injection quantity	18mm ³
Compression ratio	18.9
Intake air temperature	30, 160°C
Injection angle	150, 100°
Coolant Temperature	80°C
Diesel Temperature	40°C

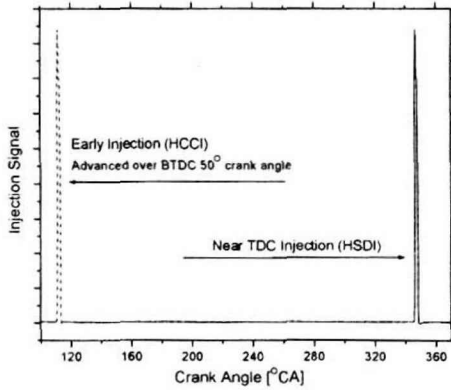


Figure 3 Injection signal

존 분사 시기에 비해 극히 이른 시기에 연료를 분사하도록 하였으며 이를 BTDC 50°CA부터 BTDC 250°CA까지 폭넓게 적용하여 예혼합기 형성에 필요한 시간을 확인하고자 하였다. 분사량은 디젤 연료의 경우 기존 디젤 엔진의 공회전 시 분사량에 해당하는 10mm³을, DME는 18mm³을 분사하였는데 이는 디젤의 분사량에 해당하는 열량을 동일하게 계산한 값이다. 디젤을 사용할 경우는 흡기 온도를 30°C부터 160°C까지 가열하여 기화 촉진의 효과를 보고자 하였고 분사기는 앞 절에서 분석한 바와 같이 over-penetration 저감을 위해 분사각이 작은 분사기를 사용하였다. 모든 결과는 기존의 디젤 연소 혹은 DME 연소 결과와 비교하였는데 디젤의 경우 120MPa의 분사 압력을, DME의 경우 25MPa의 분사 압력의 경우에 분사 시기는 BTDC 15°CA로 하였다. 이러한 다양한 인자 변화에 대해 실험 결과는 150회의 엔진 Cycle에 대한 Data를 취득해 평균하여 IMEP 및 Heat Release Rate 계산에 이용하였다.

3. 실험 결과

3.1 Diesel HCCI 연소

Figure 4는 Diesel 연료를 이용한 HCCI 연소의 결과로 100°와 150° 분사각을 가진 분사기 각각에 대해 흡기 온도를 30°C와 160°C로 변경하며 분사 시기에 따른 결과를 제시한 것이다. 앞 절에서 분석한 바와 같이 150° 분사각을 가진 분사기의 경우 over-penetration 문제를 가지고 있는데 따라 30°C 흡기온도와 160°C 흡기 온도 모두에 대해서 낮은 IMEP 값과 미연 연료의 배출로 인한 높은 opacity 및 HC 그리고 CO 값을 보이고 있다. 그러나 30°C 흡기온도의 경우보다는 160°C 흡기온도의 경우가 IMEP가 높고 opacity는 저감되는 것으로부터 흡기온도의 증가가 디젤 연료의 기화를 촉진시켜 연소효율을 높인 것을 알 수 있다. 이런 효과는 분사각을 100°로 줄이면서 over-penetration이 저감되어 더욱 두드러져 나타나고 있다. 즉, 분사각을 작게 하고 흡기온도를 올려 가장 높은 IMEP값을 얻을 수 있었고 opacity 역시 모든 분사 시기에 대해 가장 낮은 값을 보였으며 HC도 저감된 결과를 보였다.

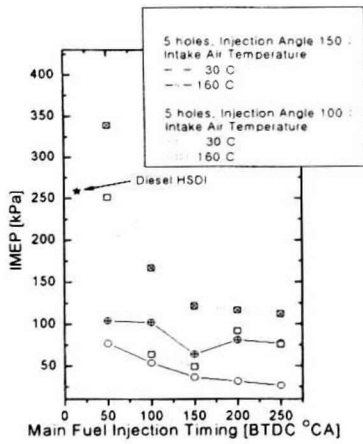
NOx는 대부분의 결과에 대해 크게 저감되어 HCCI 연소를 통한 장점을 보여주고 있으나 분사각 100°의 경우에 흡기온도가 160°C일 때 높은 NOx 배출이 발생하고 있다. 이는 균일한 예혼합기가 형성되지 못하고 기존 디젤과 유사하게 공간적으로 불균일한 연소가 일어난 결과이며 예혼합기 형성을 위한 충분한 시간이 확보되지 못한 것으로 판단된다.

모든 결과에 대해 HC와 CO는 기존 디젤에 비해 증가된 값을 보이는데 이는 낮은 연소 온도도 인해 HC와 CO가 쉽게 산화되지 못해 나타난 결과이다.

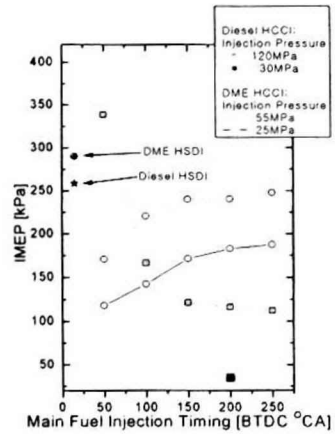
3.2 DME HCCI 연소

Figure 5를 통해 DME를 이용한 HCCI 연소 특성에 대한 결과를 제시하였다. 함께 제시된 Diesel HCCI 연소의 경우 분사각 100°, 흡기온도 160°C의 조건으로서, 가장 최적화된 값으로 제시하였다. 분사압력은 DME의 경우 25, 55MPa로 Diesel HCCI의 경우 30, 120MPa에 대한 결과를 제시하였는데 이는 DME가 쉽게 기화됨으로 더 이상의 고압 분사가 필요치 않기 때문이다.

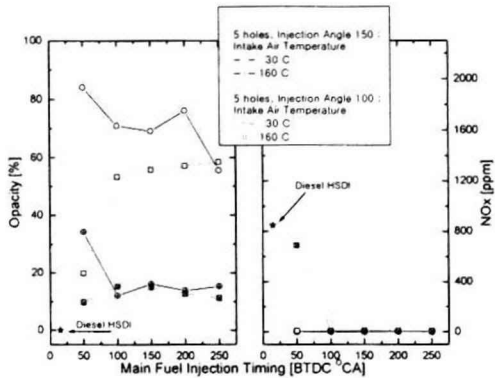
Diesel HCCI 결과는 고압 분사를 통해 IMEP가 크게 개선된 결과를 보여주고 있으나 기존의



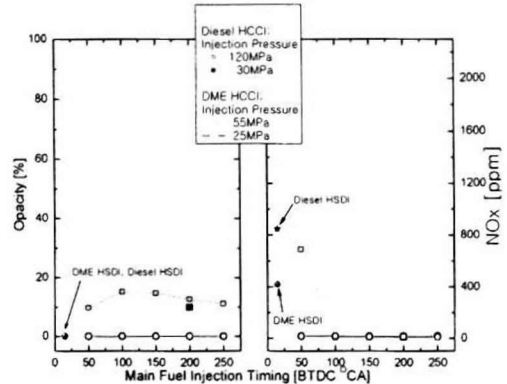
(a) IMEP



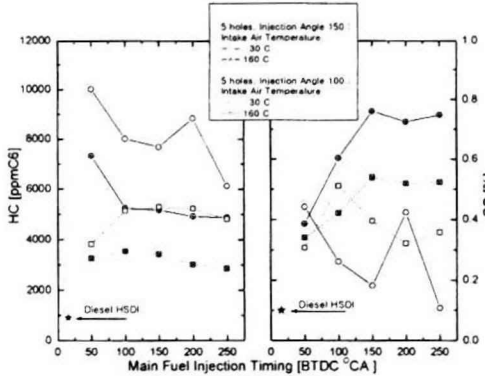
(a) IMEP



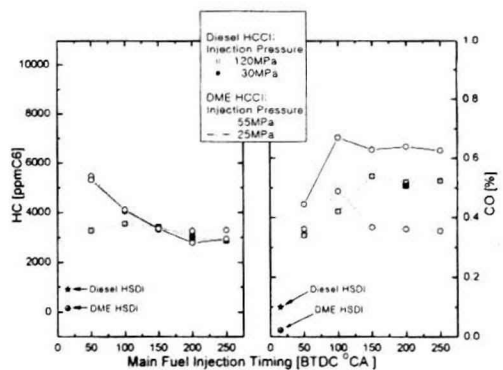
(b) opacity and NOx



(b) opacity and NOx



(c) HC and CO



(c) HC and CO

Figure 4 Diesel HCCI; effect of intake air temperature and injection angle with injection timing variation

Figure 5 DME HCCI; effect of injection pressure with injection timing variation, compared with diesel HCCI (injection angle 100°, intake air temperature 160°C)

Diesel HSDI 경우에 비해서도 낮은 IMEP와 미연 연료 배출로 인한 높은 opacity 값의 문제점을 보여주고 있다. 이 결과는 디젤 연료가 쉽게 기화되지 못함으로 인해 발생하는 문제점이다.

DME를 통한 HCCI 운전은 Diesel HCCI 운전과 달리 높은 IMEP 값과 '0'에 가까운 opacity, 90% 이상 저감된 NOx의 성과를 보이고 있다. 이는 DME가 쉽게 기화되어 착화 전에 균일한 예혼합기가 형성됨으로써 나타난 결과이다.

분사 시기에 있어서는 최대한 이른 분사가 높은 출력, HC와 CO의 저감에 유리한 것으로 나타나고 있는데 예혼합기 형성을 위한 충분한 시간의 확보가 중요한 것으로 판단된다.

3.3 조기착화 문제

Figure 6는 저압, 고압 분사시 DME HCCI 운전을 HSDI 운전의 경우와 비교하여 나타낸 실린더 압력과 열방출율 그래프이다. Figure 5를 통해 DME HCCI 운전이 PM과 NOx의 동시저감을 훌륭히 달성할 수 있음을 확인 했으나 IMEP는 DME 혹은 Diesel HSDI 운전에 비해 낮은 값을 보이고 있다. 이는 Figure 6의 열방출율 그래프를 통해서 보이는 바와 같이 조기착화로 인한 결과이다.

DME HCCI의 조기착화는 균일한 예혼합기를 형성한 공기와 연료에서 cool combustion이 발생한 후 hot combustion이 순차적으로 이어지는 특성에 따른 것으로 600~700°C 정도의 낮은 온도에서 일어나는 cool combustion이 hot combustion의 시기를 앞당겨 일어나는 문제점이다. 이의 해결을 위해서는 EGR (exhaust gas recirculation)의 적용으로 Dilute mixture 통해 착화시기를 지연시키는 방법 등이 요구된다.

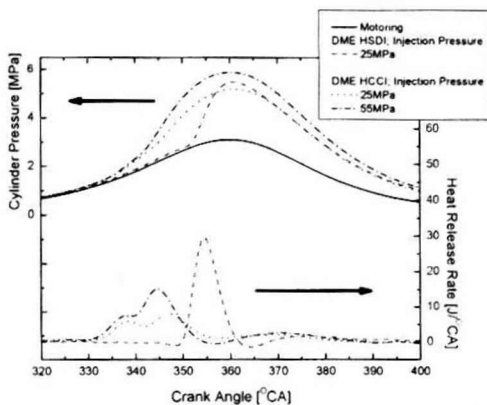


Figure 6 In-cylinder pressure and heat release rate of DME HCCI combustion

4. 결론

DNE 및 Diesel HCCI 엔진에 대한 운전을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Diesel HCCI 운전은 고온흡기를 통한 기화 촉진과 작은 분사각을 통한 over-penetration 저감을 통해 최적화 될 수 있다.
- 2) DME는 Diesel과 달리 쉽게 기화됨으로 인해 HCCI 운전에 유리하고 이를 통해 zero PM과 90% 이상의 NOx 저감을 동시 달성 할 수 있다.
- 3) Cool combustion 발생으로 인한 조기착화가 출력을 제한하고 있으며 EGR 등을 이용한 개선이 필요하다.

후기

이 연구는 KAIST 연소기술연구센터(CERC)의 연구비 지원에 의해 수행된 결과입니다.

참고 문헌

- [1] Hisashi Akagawa, Takeshi Miyamoto, Akira Harada, Satoru Sasaki, Naoki Shimazaki, Takeshi Hashizume and Kinji Tsujimura, "Approaches to Solve Problems of the Premixed Lean Diesel Combustion", SAE Paper 1999-01-0183, 1999
- [2] Bruno Wa'ter 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
- [3] Zhili Chen, Mitsuru Konno, Mitsuharu Oguma and Tadanori Yanai, "Experimental Study of CI Natural-Gas/DME Homogeneous Charge Engine", SAE Paper 2000-01-0329, 2000
- [4] Nobuyuki Kawahara, Eiji Tomita, Hisashi Kagajyo, "Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion with Dimethyl Ether - Spectrum Analysis of Chemiluminescence", SAE 2003-01-1828, 2003
- [5] Choongsik Bae, Jun Yu, Jinsuk Kang and Jangsik Kong, Kyeong Ook Lee, "Effect of Nozzle Geometry on the Common-Rail Diesel Spray", SAE Paper 2002-01-1625, 2002