

가솔린 균일 예혼합 압축 착화 디젤기관의 연소 및 배기 특성에 미치는 운전조건의 영향

이 창 식^{*1)} · 김 명 윤²⁾ · 황 석 준²⁾ · 김 대 식³⁾

한양대학교 기계공학부¹⁾ · 한양대학교 대학원²⁾ · 파라다이스 산업³⁾

Effect of Operation Condition on the Characteristics of Combustion and Exhaust Emissions in a Gasoline Fueled HCCI Diesel Engine

Chang Sik Lee^{*1)} · Myung Yoon Kim²⁾ · Seok Jun Hwang²⁾ · Dae Sik Kim³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾Paradise Industry, Keuk dong Bldg #583-116, Hannam-dong, Yongsan-gu, Seoul 140-889, Korea

(Received 5 August 2003 / Accepted 17 November 2003)

Abstract : The purpose of this work is to investigate the effect of premixing condition on the combustion and exhaust emission characteristics in a HCCI diesel engine. To form homogeneous charge before intake manifold, the premixed gasoline fuel is injected into a premixed tank by fuel injection system and the premixed gasoline fuel is ignited by direct injected diesel fuel. Experimental result shows the NOx and soot emissions are decreased linearly with the increase of premixed ratio. In the case of intake air temperature 20°C with light load, the specific fuel consumptions are increased with the rise of premixed ratio and HC and CO emissions are also increased. But the intake air heating can improve the specific fuel consumption at light load condition because increased air temperature promotes the combustion of premixed mixture. In the case of high intake air temperature with high load condition, premixed fuel is auto-ignited before diesel combustion and soot emission is increased.

Key words : HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition, 예혼합 압축 착화), Premixed ratio(예혼합비), Combustion characteristics(연소 특성), Exhaust emissions(배기 배출물)

Nomenclature

BSFC : brake specific fuel consumption
MR : premixed ratio
H : heating value
m : mass of the fuel
str : stroke

Subscripts

l : lower
g : gasoline fuel
d : diesel fuel

1. 서론

최근 자동차 배기규제의 강화에 따라 자동차로부터 배출되는 유해가스에 의한 대기 오염을 저감시키기 위한 방법의 하나인 균일 예혼합 압축 착화

*To whom correspondence should be addressed.
cslee@hanyang.ac.kr

(HCCI) 기관에 관한 관심이 높아지고 있다.

균일 예혼합 압축 착화 기관에서는 균일한 연료-공기 혼합기를 형성하여 압축 행정 때에 혼합기의 온도가 자연착화 온도 이상으로 올라가게 하면 연소실 전체에 걸쳐서 저온으로 균일하게 압축착화하게 된다. 따라서 연소실에 혼합기가 균일하게 분포하게 되어 희박공연비로 연소되기 때문에 연소온도가 낮아 기존의 압축착화기관의 문제점으로 지적되던 질소산화물(NO_x)과 soot의 배출이 매우 적은 특성이 있다.

하지만 HCCI 기관의 연소에는 연료의 착화 특성, 연료의 공간적 분포, 혼합기의 균일도, 압축비, 흡기 온도, 잔류가스 등의 인자들이 영향을 미치므로 기관의 전 운전영역 범위에서 연소를 제어하는 것이 매우 중요한 과제이다.¹⁾

이러한 착화 제어의 어려움을 해결하기 위하여 많은 연구가 진행 중에 있으며, 예혼합 연료의 착화를 제어하기 위한 인자에 관한 여러 가지 연구결과들이 보고되고 있다.^{2,5)} 그 예로서 예혼합 연료의 착화를 촉진하기 위하여 높은 세탄가의 연료를 예혼합기와 혼합하여 분사하는 방법,⁶⁾ 예혼합기를 형성하여 공급한 후 높은 세탄가의 연료를 연소실에 직접 분사시켜 점화하여 연소실의 온도와 압력을 상승시켜 예혼합 연료의 자발화를 촉진하는 방법,^{7,9)} 고온의 잔류가스를 이용하는 방법¹⁰⁾에 관한 연구가 진행 중이다.

가솔린 연료는 연료의 분사제어가 용이하고, 연료의 기화 특성이 우수하여 연료가 흡기관에 부착되기 전에 기화시킬 수 있어 균일한 혼합기를 만들 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 직접 분사식 디젤기관의 유해 배출가스인 NO_x와 soot를 저감시킬 목적으로 가솔린 연료의 균일 예혼합기를 공급하고 디젤연료를 착화원으로 사용하는 예혼합 압축 착화 기관의 연소 및 배출물 저감 특성을 예혼합률, 부하조건, 흡기 온도 등의 여러 가지 운전 조건에 대하여 분석하여 이들 조건이 예혼합 압축착화기관의 연소 및 배기 배출물 저감 특성에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 기관 및 실험 장치

본 실험에 사용된 기관은 배기량 673cc의 단기통 직접 분사식 디젤기관을 기본으로 하여 실험을 수행하였으며 Table 1은 기관의 주요 제원을 나타낸 것이다.

Table 1 Specification of test engine

Engine type	4 cycle diesel engine
Combustion chamber shape	Toroidal
Number of injector holes	4
Displacement volume	673 cm ³
Bore × Stroke	95 mm × 95 mm
Compression ratio	18 : 1
Number of cylinder	1

Fig. 1은 실험장치의 계통도를 나타낸 것으로서 디젤기관과 동력계 시스템, 예혼합기 공급 및 제어 시스템, 흡기온도 제어시스템, 연소 및 배기분석 시스템으로 구성하였다. 불균일한 예혼합기에 의한 영향을 없애고 충분히 공기와 혼합된 혼합기를 형성하기 위하여 기관의 흡기 포트 상류에 약 9000cm³ 체적의 예혼합실을 설치하였고, 고압 인젝터를 흡기밸브로부터 약 50cm 거리에 설치하였다. 예혼합실의 직경은 연료 인젝터로부터 분사된 연료의 벽류를 방지하기 위하여 직경 20cm로 설계하였으며, 인젝터 주위에는 금속관을 설치하고 냉각수를 순환시켜 흡기가열에 따른 인젝터의 과열을 방지하였다.

예혼합 연료는 유니버설 ECU(Motec Research,

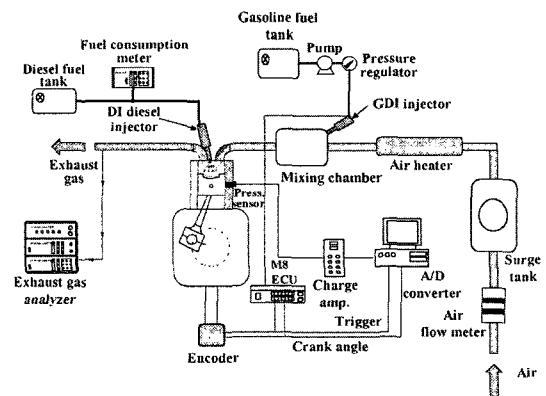


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

M8)를 통하여 제어되도록 하였으며, 흡기의 가열을 위한 흡기를 가열하고 제어하기 위한 가열 및 제어 장치와 정확한 유량을 측정하기 위한 열선식 유량계(EPI, 8000MP)를 설치하였다. 동력계는 최대 흡수 마력이 75kW인 와전류식 동력계를 사용하였으며, 기관으로부터 배출되는 배기가스의 분석을 위하여 NO_x 분석기(Yanaco, BCL-511)와 매연 측정기(DBC -1000), 그리고 HC, CO 가스 분석기(Horiba, MEXA-554JK) 등이 사용되었다. 또한 연소압력을 측정하기 위하여 압전식 압력 센서(Kistler, 6061B)를 연소실에 설치하여 여기서 나오는 압력 신호와 기관에 설치된 엔코더의 신호를 받아 해당 구간의 연소압력 및 열발생률을 구하였다.

2.2 실험조건

Table 2는 본 실험에서의 운전조건을 나타낸 것이며 기관의 회전속도는 1200rpm으로 일정하게 하여 여러 가지 부하 및 흡기온도 조건등을 변화시켰다. 예혼합률은 디젤기관에 해당하는 MR=0에서부터 시작하여 착화원이 되는 디젤연료의 감소로 인하여 연소불안정성이 증가하여 기관의 정상적인 운전이 불가능한 구간까지 예혼합률을 증가시키면서 실험을 수행하였다.

Table 2 Experimental conditions

Item	Test condition
Engine speed	1200 rpm
Load	0, 10, 20, 30 Nm
Intake air temp.	20, 50, 80, 120°C
Cooling water temp.	70°C
Fuel	Gasoline (premixed) Diesel (DI)
Injection pressure	5.5 MPa (premixed) 22 MPa (DI)
SOI	TDC (premixed) BTDC 20°(DI)

2.3 실험방법

예혼합 연료인 가솔린과 연소실 내로 직접 분사된 디젤 연료의 비율을 나타내기 위하여 총연료의 공급 열량에 대한 예혼합 가솔린 연료의 열량의 비

를 예혼합률(MR)로 정의하고 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$MR = \frac{m_g H_{lg}}{m_g H_{lg} + m_d H_{ld}} \quad (1)$$

여기서, m_g 는 예혼합 가솔린연료의 분사량, m_d 는 연소실 내로 분사된 디젤연료의 분사량, H_{lg} 는 가솔린연료의 저위발열량이고, H_{ld} 는 디젤연료의 저위발열량이다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 흡기온도가 20°C이고 기관의 부하가 20Nm인 경우의 균일 예혼합 압축 착화 디젤 기관의 예혼합률 증가에 따른 연료소비율과 배기 특성을 나타낸 것이다. 예혼합률이 증가할수록 NO_x와 soot의 배출량은 거의 선형적으로 감소하여 soot의 경우 MR=0.6 이상에서는 거의 발생하지 않았으며, NO_x의 배출량도 MR=0.8 정도까지 증가시킨 경우에는 디젤 기관의 1/3 정도까지 감소시킬 수 있었다. 그러나 예혼합률이 증가함에 따라, 균일 예혼합된 가솔린 연료가 저온으로 회박 연소됨에 따라 연소실 벽면에서 소염 등의 영향으로 미처 연소되지 못한 혼

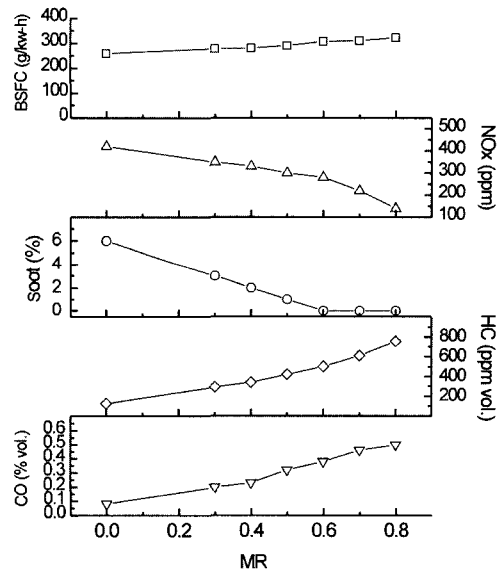


Fig. 2 Effect of premixed ratio on BSFC and exhaust emissions

합기가 HC, CO 등의 형태로 배출되는 것으로 보인다. 이로 인하여 연료소비율은 MR=0.8인 경우는 MR=0일 때보다 약 25%정도 증가하는 결과를 보이고 있다.

Fig. 3은 흡기온도가 20°C이고 기관의 부하가 20Nm인 경우의 연소실 내의 연소압력과 열발생률을 각각의 예혼합률에 대하여 나타낸 것이다.

MR=0인 경우는 기존의 직분식 디젤기관이며, 이 경우의 연소특성은 전형적인 디젤기관의 연소특성인 예혼합 연소와 확산 연소구간으로 구분되고 있다.

예혼합률이 증가할수록 연소실에 직분되는 디젤 연료의 양은 감소하지만 착화시점은 약간씩 빨라지는 경향을 볼 수 있으며 이것은 예혼합 가솔린 연료의 일부가 연소반응하여 연소실의 온도 및 압력 상승함에 따른 것으로 보인다. 열발생률의 최고값은 예혼합률이 증가함에 따라 연소실로 직분되는 디젤 연료의 비율이 하고 앞서서 설명한 바와 같이 예혼합 연료에 의한 점화촉진으로 인하여 디젤 연료의 예혼합 연소과정에서 발생하는 급격한 열발생이 점차 감소하는 경향을 보이고 있다.

그러나 MR=0.8인 경우에는 연소실에 직분되는 디젤 연료의 양이 극히 적음에도 불구하고 디젤기관에서의 확산화염에 해당하는 열발생률구간은 증가하는 경향을 보인다.

이상의 연소 특성으로 볼 때, MR이 증가할수록 디젤기관의 열발생률에서 나타나는 예혼합 연소와 확산 연소를 감소시켜 NO_x 와 soot의 발생이 저감될 수 있음을 알 수 있다.

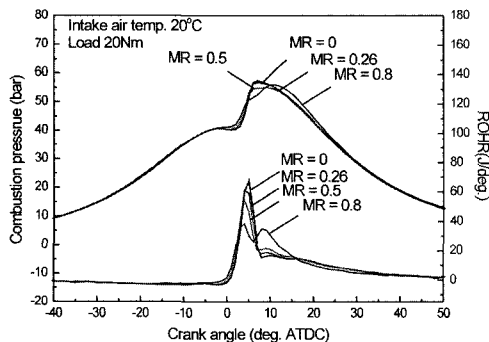


Fig. 3 Effect of premixed ratio on the combustion characteristics at a 20°C of intake air temperature

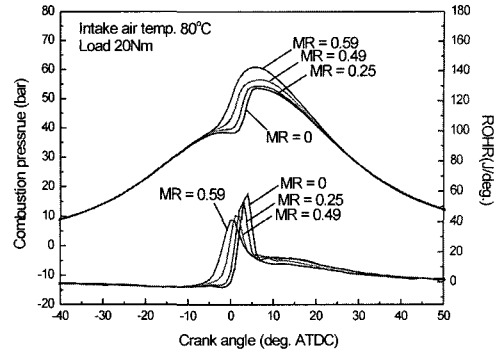


Fig. 4 Effect of premixed ratio on the combustion characteristics at 80°C of intake air temperature

Fig. 4는 기관의 부하가 20Nm이고 흡기온도가 80°C인 경우의 예혼합률의 변화에 따른 연소압력 및 열발생률 곡선을 나타낸 것이다.

행정당 공기 흡입량은 흡기온도가 20°C인 경우는 0.689g/str 이나, 흡기온도를 80°C로 가열한 경우는 체적효율의 감소로 인하여 행정당 흡기량은 0.584g/str으로 감소하였다. 이에 따라 연료의 공급량이 같은 경우라도 흡기온도를 가열하였을 경우는 보다 농후한 혼합기가 형성되었다. 흡기 온도가 20°C인 경우는 앞에서 설명한 바와 같이 가솔린 연료의 주된 연소가 디젤연료의 예혼합 연소 이후에 일어났으나, 흡기 온도가 80°C인 경우에는 예혼합률이 증가할수록 가솔린 연료의 균일 예혼합 연소가 디젤 연료의 예혼합 연소보다 앞서서 발생하여 디젤기관의 예혼합연소에 해당하는 열발생률 구간이 빨라지고 있으며 그 연소구간이 길어지는 경향을 보이고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 흡기의 가열에 의한 체적효율의 감소로 예혼합 가솔린 연료의 당량비가 증가하였고, 연소실 내 혼합기의 온도가 상승함에 따라 가솔린 연료의 균일 예혼합 연소가 촉진되었기 때문에 판단된다. 또한 예혼합률이 증가함에 따라 가솔린 연료에 의한 균일 예혼합 연소에 의하여 전체적인 열발생률 곡선은 완만한 경사를 이루나 디젤 연료의 확산연소 구간이 단축됨에 따라 후연소 구간이 감소함을 볼 수 있으며 이로 인하여 soot의 발생이 저감됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 흡기온도가 20°C이고 기관의 부하가 각각 10, 20, 30Nm인 경우의 예혼합률 증가에 따른 연료소비율과 HC 배출량의 변화를 나타낸 것이다.

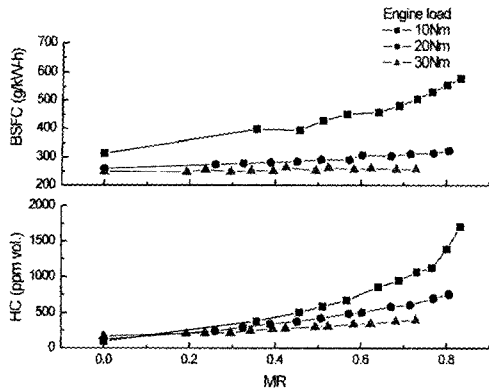


Fig. 5 Dependence of BSFC on HC emission ($T_{in}=20^{\circ}\text{C}$)

MR=0인 경우는 순수한 디젤 기관으로써 연료소비율은 부하 30Nm의 고부하 조건에서 가장 우수하였고, HC 배출량은 디젤 기관의 특성상 매우 낮게 나타났다.

기관의 부하가 10Nm인 경우, 예혼합률이 증가할수록 예혼합된 가솔린 연료의 착화원이 되는 디젤 연료의 양이 적어짐에 따라 연소되지 못하고 배출되는 가솔린 연료의 양이 증가하여 연료소비율이 악화되는 경향을 나타내고 있으며, 이는 HC 배출량의 증가로 확인할 수 있다. 그러나 기관의 부하를 20Nm로 증가시킨 경우에는 예혼합률의 증가에 따른 연료소비율과 HC 배출량이 그다지 악화되지 않는 경향을 볼 수 있으며, 이는 기관 부하의 증가에 따라 연소실에 공급된 가솔린과 디젤의 당량비가 증가하였고 연소실 내의 온도가 예혼합 연소가 일어나기에 충분한 온도로 상승한 결과로 볼 수 있다.

기관의 부하가 30Nm인 경우는 예혼합률을 증가시켜도 기관의 연료소비량은 거의 증가하지 않으며 HC 배출량도 부하가 10Nm인 경우에 비하여 상당히 감소함을 알 수 있다. 따라서 낮은 예혼합률의 경우에는 예혼합된 가솔린 연료의 공연비가 낮지만, 예혼합 연료의 착화원이 되는 디젤 연료의 양이 충분하여 예혼합 연료의 착화가 촉진된 것으로 판단되며, 높은 예혼합률의 경우에는 착화원이 되는 디젤 연료의 양이 감소하여도, 예혼합 가솔린 연료가 자발화에 충분한 당량비에 도달하였음을 알 수 있다.

3.1 흡기온도의 영향

Fig. 6은 흡기온도의 변화에 대한 NO_x 발생량의 변화를 나타낸 것이다. 예혼합률이 증가하면 연소실 전체에서의 균일 예혼합 연소 구간이 증가하여 NO_x 의 발생량은 감소하는 경향을 보였다. 또한, 연소실 전체에 걸친 공연비가 희박한 저부하 영역에서는 예혼합률을 증가시켰을 경우에 NO_x 의 발생량은 거의 0ppm 근처까지 감소하는 경향을 나타내었다.

흡기온도를 80°C 로 가열한 경우, 저부하 영역에서는 예혼합률을 증가시킬수록 NO_x 발생량은 감소하였으나, 기관의 부하가 30Nm인 경우는 예혼합률을 증가시킬수록 NO_x 의 발생량은 증가하였으며, 이러한 결과는 흡기의 가열로 인하여 예혼합 가솔린 연료의 착화가 피스톤의 상사점 이전으로 진각되어 연소실 압력과 온도가 상승되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 흡기온도가 각각 20°C 와 80°C 인 경우의 부하변동에 따른 soot 배출 특성을 나타낸 것이다. 흡기온도가 20°C 인 경우, 예혼합률이 증가할수록 균일 예혼합 연소의 증가로 soot의 발생량은 급격히 감소하고 있으며 기존의 연구 결과들⁽¹¹⁻¹³⁾과 잘 일치하고 있다.

흡기 온도가 80°C 이고 저부하 영역에서는 soot의 발생량은 전체적으로 낮게 나타났으며 가솔린 연료의 예혼합에 의하여 그 발생량이 대체적으로 감소하는 경향을 보였으나 부하가 30Nm인 경우는 많은 soot가 발생하였으며 예혼합률이 증가해도 그 발생량이 줄어들지 않았다. 이는 흡기를 가열할 경우 앞

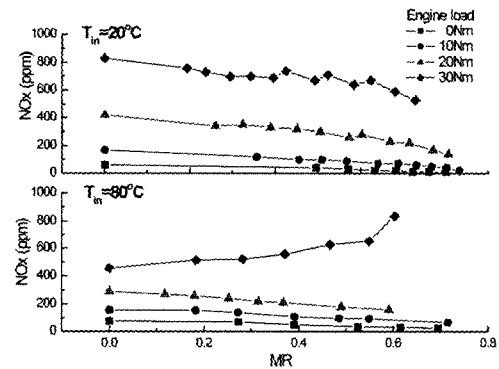


Fig. 6 Effect of intake air temperature on NO emission

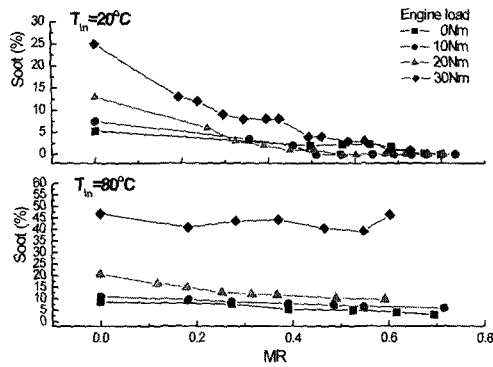


Fig. 7 Effect of intake air temperature on soot emissions

에서 언급한 바와 같이 흡입 공기량의 감소에 의하여 연소실내의 당량비가 상승하여 고부하 영역에서의 soot의 발생량이 증가하게 된다. 그리고 흡기가 열에 의하여 예혼합 가솔린 연료의 예혼합 연소의 발생시점이 디젤연료의 연소보다 선행하여 농후한 공연비를 가지는 디젤혼합기의 연소에 필요한 산소를 감소시킨 원인이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다.

Fig. 8과 9는 기관의 부하가 20Nm인 경우의 흡기 온도 변화에 따른 HC와 CO 배출량을 나타낸 것이다. 흡기 온도가 20°C인 경우, 예혼합률이 증가할수록 예혼합 가솔린 연료의 실화에 의하여 HC 배출량은 증가하였으나, 흡기 온도가 올라갈수록 예혼합 연료의 연소 촉진에 의하여 배출량의 증가 경향은 감소하였다.

Fig. 9의 CO 배출량의 경우도 HC와 비슷한 경향을 나타내었으나, 흡기온도가 80°C와 120°C인 경

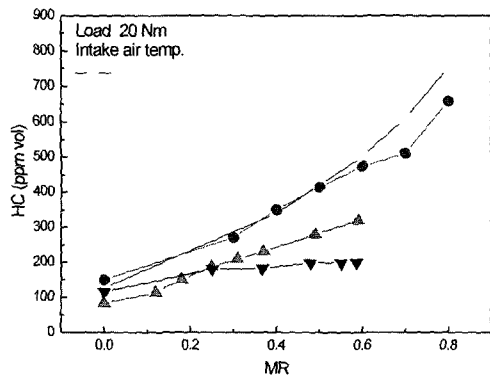


Fig. 8 Effect of intake air temperature and premixed ratio on the HC emissions at 20 Nm load

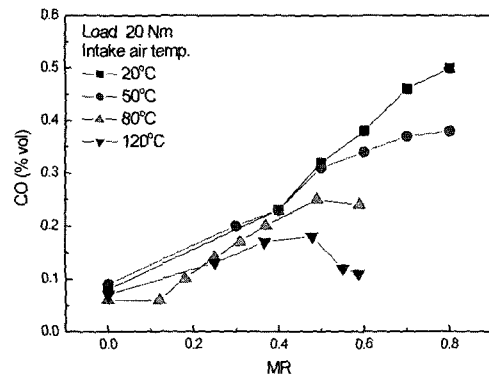


Fig. 9 Effect of intake air temperature and premixed ratio on the CO emissions at 20 Nm load

우, MR=0.5 이상에서는 오히려 예혼합률이 증가할수록 CO의 발생량이 감소하였으며, 이것은 예혼합 가솔린 연료가 노킹에 가깝게 급속 연소된 때문으로 판단된다.

4. 결론

가솔린 예혼합 압축 착화 디젤기관의 연소 및 배기 특성에 대한 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 균일 예혼합 압축 착화 디젤기관의 연료 소비율 특성은 흡기가열을 하지 않았을 경우, 저부하 영역에서는 MR의 증가에 따라 연료 소비율이 다소 악화되는 경향을 보였으나 고부하 영역에서는 연료 소비율의 악화가 거의 발생하지 않았다. 또한 흡기를 가열하면 저부하 영역에서의 예혼합기의 연소가 촉진되어 연료소비율의 악화를 막을 수 있었다.
- 2) 흡기 가열이 없는 경우에 예혼합 가솔린 연료의 연소는 디젤 연료의 예혼합 연소 이후에 나타나며, 흡기를 가열한 경우에는 예혼합 가솔린 착화가 앞당겨져서 디젤 연료의 연소보다 선행되는 경향을 보였다.
- 3) 높은 예혼합률 구간에서는 예혼합 연료의 착화원이 되는 디젤 연료의 양이 감소하여 HCCI 디젤기관의 운전 영역이 제한을 받았다.
- 4) NO_x의 발생량은 예혼합률의 증가와 함께 모든 부하조건에서 감소하였으며, 흡기가열을 한 경우에도 고부하영역 외에는 예혼합률의 증가에 따라

NO_x 발생량은 감소하였다.

- 5) Soot의 발생량은 예혼합률의 증가와 함께 급격히 감소하여 MR=0.8에서는 거의 발생하지 않았다. 흡기온도를 가열(80°C)한 경우에도 가솔린 연료의 예혼합은 soot의 발생을 억제하는데 효과가 있었으나 고부하 영역에서의 soot 발생은 오히려 악화되었다.
- 6) 예혼합률의 증가에 따라 HC 및 CO 배출량은 증가하였으나, 흡기가열에 의하여 HC의 배출 증가는 감소하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 청정생산기술사업(99-1-K-93)의 연구 지원에 의하여 수행된 연구의 일부로써 연구를 지원하여 주신 관계 기관에 감사드립니다.

References

- 1) M. Christensen, B. Johansson, "Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition," SAE 982454, 1998.
- 2) R. H. Stanglmaier, C. E. Roberts, "Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications," SAE 1999-01-3682, 1999.
- 3) M. Furutani, Y. Ohta, M. Kono, M. Hasegawa, "An Ultra-Lean Premixed Compression-Ignition Engine Concept and its Characteristics," The Fourth International Symposium COMODIA 98, 1998.
- 4) C. S. Lee, K. H. Lee, S. K. H. Heo, D. S. Kim, "Combustion Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Diesel Engine with EGR System," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.66-72, 2002.
- 5) J. W. Hwang, D. S. Kim, Y. Ryu, K. H. Lee, C. S. Lee, "Effect of Premixed Fuel on the Combustion Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Engine," Transactions of KSAE, Vol.11, No.1, pp.49-54, 2003.
- 6) J. D. Ryu, O. Y. Kwon, K. H. Lee, C. S. Lee, "Flame and Combustion Characteristics of D.I. HCCI Diesel Engine Using a Visualization Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.6, pp.100-107, 2002.
- 7) K. Yoshida, H. Shoji, H. Tanaka, "Engine Performance of Lean Methanol-Air Mixture Ignited by Diesel Fuel Injection Applied with Internal EGR," SAE 2000-01-2012, 2000.
- 8) R. H. Stanglmaier, T. W. R. III, J. S. Souder, "HCCI Operation of a Dual-Fuel Nature Gas Engine for Improved Fuel Efficiency and Ultra-low NO_x Emissions at Low to Moderate Engine Loads," SAE 2001-01-1897, pp.1036-1042, 2001.
- 9) T. Kaimai, H. Tsunemoto, H. Ishitani, "Effects of a Hybrid Fuel System with Diesel and Premixed DME/Methane Charge on Exhaust Emissions in a Small DI Diesel Engine," SAE 1999-01-1509, 1999.
- 10) A. Oakley, H. Zhao, N. Ladommatos, T. Ma, "Dilution Effects on the Controlled Auto-ignition (CAI) Combustion of Hydrocarbon and Alcohol Fuels," SAE 2001-01-3606, 2001.
- 11) C. S. Lee, K. H. Lee, D. S. Kim, S. W. Jang, "Combustion Characteristics of Homogeneous Charge Combustion Diesel Engine with Load Condition," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.9, 2002.
- 12) D. S. Kim, K. H. Lee, C. S. Lee, "Experimental and Numerical Study on the Compression Characteristics of a Premixed Charge Compression Ignition Engine," Proceedings of the 2002 Fall Technical Conference(ASME), ICE-Vol. 39, pp.89-96, 2002.
- 13) C. S. Lee, K. H. Lee, D. S. Kim, "Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of Partially Premixed Charge Compression Ignition Engine with Dual Fuel," Fuel, Vol.82, No.5, pp.553-560, 2003.