

HCCI 디젤엔진의 배기특성에 미치는 예혼합 연료의 영향

김명윤¹⁾ · 윤영훈¹⁾ · 황석준²⁾ · 김대식³⁾ · 이창식⁴⁾

한양대학교 대학원¹⁾ · 현대·기아 자동차²⁾ · 한양대학교 기계기술연구소³⁾ · 한양대학교 기계공학부⁴⁾

Effect of Premixed Fuels Charge on Exhaust Emission Characteristics of HCCI Diesel Engine

Myung Yoon Kim¹⁾ · Young Hoon Yoon¹⁾ · Suk Jun Hwang²⁾ · Dae Sik Kim³⁾ · Chang Sik Lee⁴⁾

¹⁾Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾R & D Division for Hyundai Motor Company, 772-1 Jangduck-dong, Whasung-Si, Gyeonggi 445-706, Korea

³⁾Mechanical Engineering and Technology Research Institute, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

⁴⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 19 January 2005 / Accepted 7 June 2005)

Abstract : In order to investigate the effect of premixed gasoline, diesel fuel, and n-heptane charges on the combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection (DI) diesel engine, the experimental studies are performed. The premixed fuels are injected into the premixing chamber that installed upstream of the intake port in order to minimize the inhomogeneity effect of premixed charge. The injection nozzle for directly injected fuel is equipped in the center of the combustion chamber. The air temperature control system is equipped in the intake manifold to examine the effect of air temperature. The experimental results of this study show premixing fuel is effective method to reduce the NO_x and soot emissions of diesel engine. NO_x emissions are linearly decreased with increasing premixed ratio for the three kinds of premixed fuels. The heating of intake air (80°C) reduced the deterioration of BSFC in high premixed ratio, because it promotes evaporation of premixed diesel droplet in the premixing chamber.

Key words : HCCI(Homogeneous charge compression ignition, 균일 예혼합 압축 착화), Premixed fuel(예혼합 연료), NO_x(질소 산화물), Soot(수트)

1. 서론

디젤엔진은 연소실 내부에 연료가 직접 분사되기 때문에 공간적으로 불균일한 공연비 분포가 형성되어 입자상 물질(P.M., Particulate matters)과 질소산화물(NO_x)을 배출하는 문제점이 있다. 따라서 세계적으로 점차 강화되고 있는 배기규제에 대응하여 NO_x와 P.M.의 동시 저감을 실현하기 위한 대책으로 다양한 연료를 이용하여 예혼합 압축착화를 시도하는

연구가 활발하게 이루어지고 있다.¹⁻³⁾

균일 예혼합 압축착화 엔진(HCCI, homogeneous charge compression ignition)은 희박한 혼합기를 압축 착화시키기 때문에 연소온도가 낮다. 또한, 공연비 분포가 희박하기 때문에 NO_x와 P.M.의 배출이 매우 적어 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 HCCI 연소의 경우에는 연소온도가 낮고 연소과정 중의 불완전 연소와 연소실 벽면 또는 틈새 체적 등에서 소염 등의 영향으로 인해서 HC나 CO와 같은 불완전 연소 생성물의 배출이 증가하게 된

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

다. 또한 혼합기의 압축착화 과정에 의해 연소가 진행되므로 능동적인 착화제어가 힘들고 한정된 공연비 및 운전조건에서만 실현이 가능하므로, 실제 엔진의 운전조건과 같이 넓은 영역에서의 운전이 힘들게 되어 실용화에 어려움이 있다.⁴⁾

최근 디젤엔진에 균일 예혼합기를 공급하여 유해 배출가스를 저감시키는 방식으로 많은 연구가 진행되어 오고 있으며 Osses 등⁵⁾은 디젤엔진에 예혼합기를 공급하는 방식으로 NO_x와 입자상 물질의 저감을 이루었다. 그러나 불완전 연소의 증가로 인하여 HC와 CO의 배출이 증가하고 연료소비율이 악화되는 결과를 보였으며, Simescu 등⁶⁾은 대형 디젤엔진에 EGR의 적용과 함께 예혼합기를 공급하여 착화하는 방식으로 NO_x 배출물을 저감시킬 수 있다고 보고하였다. 또한, HCCI 연소를 위해 사용되는 연료도 가솔린, LPG, 디젤, DME, 알코올 등을 이용하여 많은 연구가 수행되고 있으며 이러한 예혼합 연료의 종류에 대한 심층적인 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 예혼합 연료의 특성이 연소 및 배출물 특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 내연기관의 연료로 널리 사용되는 가솔린, 디젤유와 기화온도가 98.4°C로 낮아 예혼합기 형성이 유리하고 착화성이 매우 우수한 n-헵탄에 대한 예혼합 연소 특성을 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 적용한 엔진은 배기량이 673 cc인 4 사이클 직접 분사식 디젤엔진으로서, Table 1에 엔진의 주요 제원을 나타내었다.

Fig. 1은 실험장치의 실제 사진을 나타낸 것이며, 직분식 디젤엔진에 균일한 예혼합기를 공급하기 위하여 체적이 0.009 m³인 예혼합실을 흡기포트에 설치하고 고압 인젝터로 연료를 분사하여 예혼합기가 공기와 충분히 혼합된 후에 연소실에 공급될 수 있도록 하였다.

실험 장치는 디젤엔진과 동력계 시스템, 예혼합기 공급 및 제어장치, 흡기온도 제어장치, 연소 및

Table 1 Specifications of test engine

Description	Specification
Type	DI diesel engine
Combustion chamber type	Toroidal
Injector	4 hole DI injector
Displacement volume	673 cc
Number of cylinder	1
Bore×Stroke	95 mm × 95 mm
Compression ratio	18:1

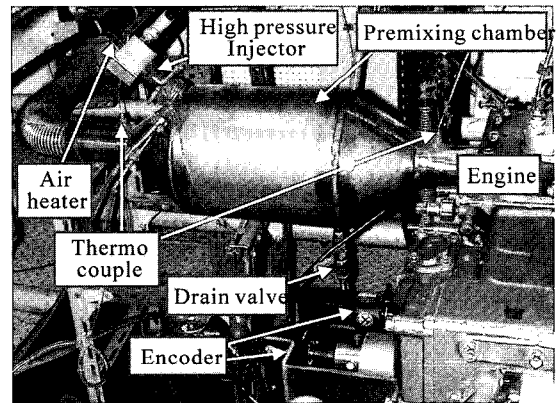


Fig. 1 Photograph of experimental apparatus

배기 분석 장치로 구성하였다. 예혼합 연료는 범용 ECU(Motec research, M8)를 통하여 제어되도록 하였다. 또한, 흡기의 가열과 조절을 위한 흡기가열 및 제어장치와 유량측정을 위한 열선식 유량계를 설치하였다.

동력계는 최대 흡수마력이 75kW인 와전류식 동력계를 사용하였으며, 배기 배출물의 분석을 위하여 NO_x 분석기와 수트 측정기, 그리고 HC·CO 분석기 등이 사용되었다.

또 연소 압력 및 열발생률의 측정을 위하여 압전식 압력센서(6052B1, Kistler)를 연소실에 설치하였고, 데이터 취득 보드(National instrument, PCI-MIO-16E-1)를 이용하여 작성된 프로그램으로부터 실험 데이터를 취득하였다.

2.2 실험 방법

엔진의 속도와 부하는 1200 rpm, 20 Nm로 일정하게 유지시켰으며, 흡기온도의 영향을 알아보기 위하여 흡기온도를 20°C와 80°C로 변화시켰다. Table 2는 실험에 적용된 운전조건을 나타낸 것이다.

Table 2 Experimental conditions

Item		Test conditions
Engine speed (rpm)		1200
Load (Nm)		20
Intake air temperature (°C)		20, 80
Coolant temperature (°C)		70
Fuel	Premixed	Gasoline, Diesel fuel, n-heptane
	DI	Diesel
Injection pressure (MPa)	Premixed	5.5
	DI	22
SOI(deg ATDC)	Premixed	0
	DI	-20

예혼합 연료와 직접 분사되는 연료의 비율을 나타내기 위하여 연소실 내로 공급되는 연료의 총열량에 대한 예혼합 되는 연료의 열량비인 예혼합률(r_p)은 다음과 같이 정의하였다.

$$r_p = \frac{m_p H_p}{m_p H_p + m_{DI} H_{DI}} \quad (1)$$

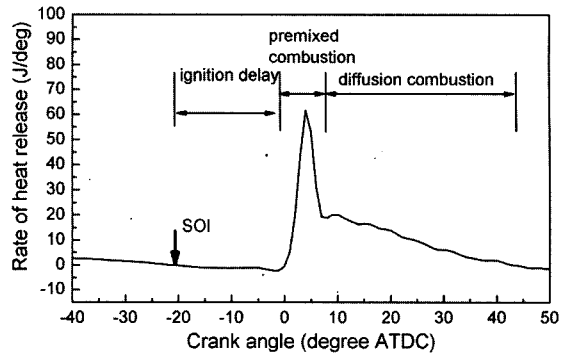
여기서, m_p 는 예혼합 연료(가솔린, 디젤유, n-헵탄)의 분사량, m_{DI} 는 연소실 내로 직접 분사된 디젤유의 분사량, H_p 는 예혼합 연료의 저위발열량이고, H_{DI} 는 직분 연료의 저위발열량이다.

직분 연료의 분사시기는 BTDC 20°로 하였으며, 예혼합기 공급 시스템에서 인젝터와 흡기밸브 사이의 거리가 0.5 m로 길어 예혼합기의 분사시기에 의한 영향은 없는 것으로 나타났기 때문에⁷⁾ 예혼합기의 분사시기는 TDC로 일정하게 하였다.

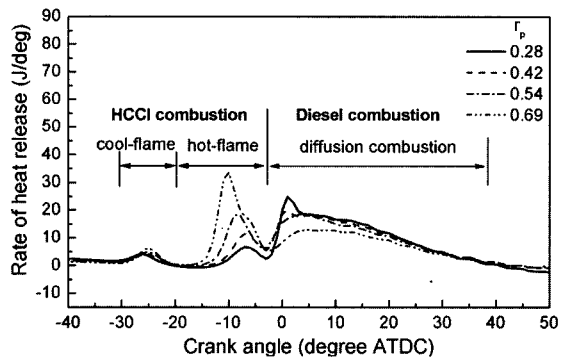
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 예혼합 연소특성

Fig. 2는 디젤연소의 특성과 HCCI 디젤연소의 열발생률 특성을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)의 디젤엔진에서는 압축말기에 분사된 연료가 일정기간의 착화지연을 거치면서 공기와 혼합되어 증발되어 착화하게 된다. 이때의 연소특성은 예혼합기의 급격한 착화에 의한 예혼합 연소(premixed combustion)와 완만한 열발생률을 나타내는 확산연소(diffusion combustion)로 구별되게 된다. 이 경우, 예혼합 연소 구간에서는 급격한 열발생과 함께 소음과 진동이 발



(a) DI diesel combustion ($T_{in}=20^{\circ}\text{C}$)



(b) HCCI diesel combustion (diesel fuel premixed, $T_{in}=80^{\circ}\text{C}$)

Fig. 2 Comparisons of combustion characteristics of diesel combustion and premixed diesel charge compression ignition diesel combustion (1200 rpm, 20 Nm)

생하게 된다. 따라서 디젤엔진의 착화지연 기간을 줄여 급격한 연소를 줄이게 하는 방법의 일환으로 파일럿 분사가 적용되고 있다.

또한 디젤엔진에서는 공기량의 조절을 하지 않으므로 연소실 전체로는 희박 공연비로 연소가 되지만, 연소실에 연료가 직접 분사되어 연소되는 과정을 거치게 되므로 국부적으로 농후한 혼합기가 형성되게 된다. 따라서 연소온도가 높고 농후 혼합기가 존재하게 되어 NO_x 와 입자상 물질이 다량으로 배출되는 문제점을 가지고 있다.

Fig. 2(b)는 직분식 디젤엔진에 디젤유를 예혼합한 경우의 열발생률을 나타내고 있다. 예혼합된 연료는 2단연소의 전형적인 HCCI 연소과정으로 연소되고 있으며⁸⁾, 연소실에 직분되는 연료는 예혼합기간이 줄어든 확산연소과정을 보이고 있다. 따라서 이러한 예혼합 연소로 기존의 디젤엔진에서 NO_x 와 입자상 물질 발생의 원인인 농후한 혼합기 분포와

국부적인 고온 연소조건이 감소하게 되고 위의 연소특성에서 보는 바와 같은 최고 열발생률의 감소 등의 결과로 배기 배출물이 감소하는 효과를 나타내게 된다.

3.2 예혼합 연료의 종류에 따른 영향

Fig. 3~5는 예혼합 연료의 종류에 따른 연소특성을 나타낸 것이다. 사용된 예혼합 연료의 종류는 가솔린, 디젤유, n-헵탄이며 예혼합률에 따른 연소 압력 및 열발생률 특성을 비교하였다. 흡기온도는 20°C, 엔진의 부하는 20 Nm로 일정하게 유지시켰다.

모든 경우에 예혼합률(r_p)이 증가함에 따라 디젤 엔진의 예혼합 연소에 해당하는 급격한 열발생률의 발생이 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 연소의 형태는 예혼합 연료의 종류에 따라 다르게 나타나고 있다.

Fig. 3은 가솔린을 예혼합한 경우의 연소특성을 나타낸 것이며, TDC 이후에 나타나는 직분 디젤유의 연소 이전에 HCCI 연소의 특징중의 하나인 냉염(cool flame)은 발생하지 않고 있다. 예혼합률이 증가함에 따라 디젤의 예혼합 연소에 의한 급격한 열발생은 감소하고 있으며, 확산연소에 해당하는 열발생은 r_p 의 증가에 따라 오히려 증가하고 있다. 따라서 예혼합된 가솔린 혼합기의 착화는 직분 디젤의 착화 이후에 발생하며, 디젤연소에 의해 예혼합기의 착화가 제어됨을 알 수 있다.

Fig. 4의 디젤을 예혼합한 경우에서는, BTDC 20° 부근에서 HCCI 연소의 특징적인 냉염이 발생하고 있으며, 이로 인하여 직분 디젤유의 착화 이전에 연소실의 온도와 압력이 상승하게 되어 r_p 가 증가할수록 직분 디젤유의 착화시기가 진각 되고 있다.

n-헵탄을 예혼합한 경우의 연소특성은 Fig. 5에 나타내었으며, 착화 지연 시간이 매우 짧고 냉염이 발생한 이후 열염이 발생할 때까지의 연소지연시간이 매우 짧은 n-헵탄의 특성^{9,10}으로 인하여 HCCI 연소구간과 직분된 디젤유의 확산연소구간이 뚜렷하게 구분되고 있다. 또한 직분 디젤의 연소는 n-헵탄의 빠른 HCCI 연소로 인하여 거의 예혼합 연소 없이 확산 연소되고 있다. 이런 경우에는 예혼합 연료의 HCCI 연소가 직분 디젤연소를 제어하게 되며, 예혼

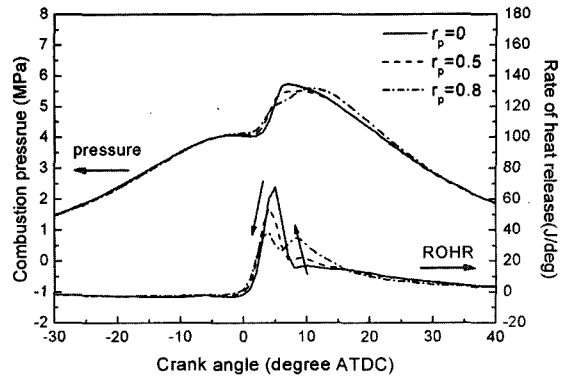


Fig. 3 Effect of premixed gasoline on combustion characteristics (1200 rpm, load=20 Nm, $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$)

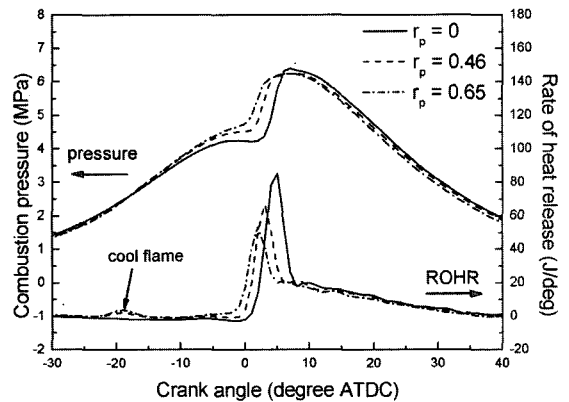


Fig. 4 Effect of premixed diesel fuel on combustion characteristics (1200 rpm, load=20 Nm, $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$)

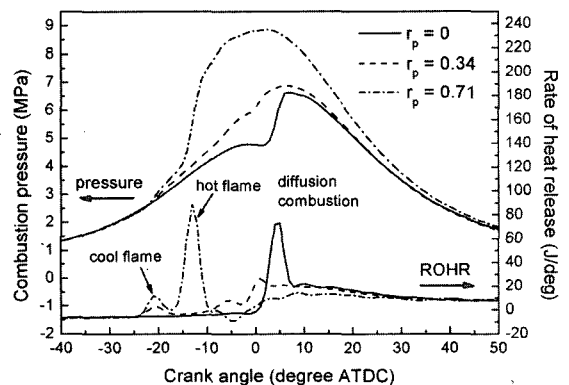


Fig. 5 Effect of premixed n-heptane on combustion characteristics (1200 rpm, load=20 Nm, $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$)

합 연료의 연소가 직분 디젤연소에 의하여 제어되는 Fig. 3의 가솔린 예혼합의 경우와는 반대가 되고 있다. 또한 예혼합 연료의 종류에 따라 그 정도의 차

이는 있지만 r_p 가 증가할수록 디젤엔진의 예혼합 연소에 해당하는 열발생이 감소하며 착화시점도 앞당겨지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 6은 예혼합 연료의 종류에 따른 연비 특성을 나타낸 것이다. BSFC(brake specific fuel consumption)는 예혼합률이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 보이고 있으며 예혼합 연료의 종류에 따라 디젤유 > 가솔린 > n-헵탄의 순서로 나타났다. 디젤을 예혼합한 경우가 BSFC가 가장 높게 나온 이유는 상온에서 예혼합한 경우, 기화 온도가 높은 디젤이 증발하지 못하고 벽류된 양이 증가했기 때문으로 보인다. 반면에 가솔린과 n-헵탄을 예혼합한 경우는 예혼합률의 증가에 따라 BSFC가 매우 완만하게 증가하는 경향을 보이고 있으며 n-헵탄의 경우가 BSFC가 가장 낮아 연비가 우수한 것으로 보인다.

Fig. 7은 예혼합 연료의 종류에 따른 NO_x와 수트의 배출량을 나타낸 것이다.

가솔린과 디젤유를 각각을 예혼합 연료로 사용한 경우에는 예혼합률의 증가에 따라 NO_x의 배출량은 선형적으로 감소하는 경향을 보였으며, n-헵탄을 예혼합한 경우는 $r_p < 0.5$ 인 경우는 NO_x 저감 특성이 다른 예혼합 연료보다 우수한 것으로 나타났으나, $r_p > 0.5$ 에서는 오히려 NO_x의 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 Fig. 5의 연소특성에서도 볼 수 있듯이 $0 < r_p < 0.5$ 의 범위에서는 n-헵탄의 예혼합기가 조기에 연소되어 직분 디젤엔진의 급격한 예혼합 연소가 감소하나 예혼합률이 더 증가하게 되면 TDC 이전에서 예혼합기의 조기연소로 인해 연소실의 온도와 압력이 과도하게 상승하여 예혼합 연소에 의한 NO_x 저감의 측면보다는 혼합기 온도·압력의 상승에 따른 NO_x 증가의 요인이 더 크게 작용했기 때문으로 보인다.

수트의 배출량은 가솔린을 예혼합한 경우가 가장 저감률이 큰 것으로 나타났으며 n-헵탄을 예혼합한 경우는 오히려 배출량이 증가하였다.

Fig. 8은 세 가지 예혼합연료를 사용한 경우의 HC와 CO의 배출 특성을 나타낸 것이다. 일반적으로 균일 예혼합 연소는 희박 혼합기가 저온으로 연소되므로 연소과정 중 또는 연소실 벽면과 틈새체적 등에서의 소화로 인하여 HC와 CO의 발생이 증가하게 된다.¹¹⁾

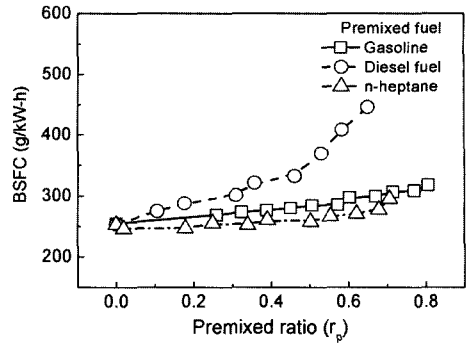


Fig. 6 Effect of premixed fuel on brake specific fuel consumption

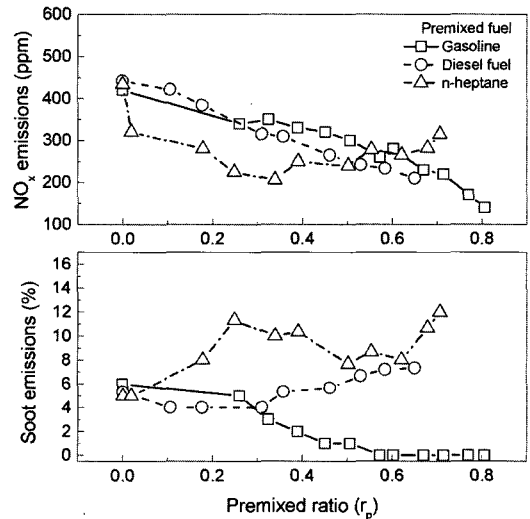


Fig. 7 Effect of premixed fuel on NO_x and soot emissions

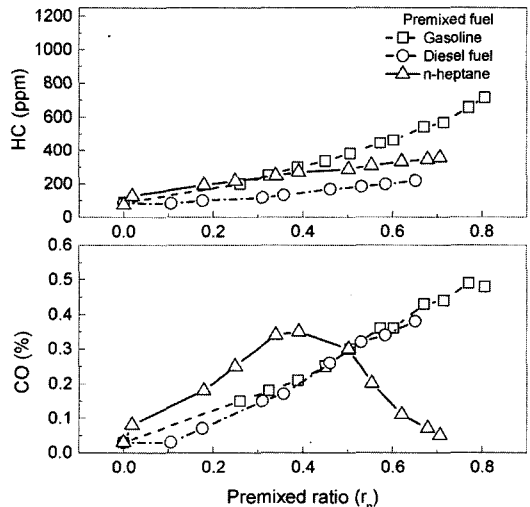


Fig. 8 Effect of premixed fuel on the HC and CO emissions

HC의 배출량은 가솔린을 예혼합한 경우가 가장 높았으며, 디젤유 예혼합의 경우가 가장 낮았다. CO의 배출량은 가솔린과 디젤 예혼합의 경우는 예혼합률에 비례하여 선형적으로 증가하나, n-헵탄을 예혼합한 경우는 예혼합률이 0.4 부근까지는 계속 증가하다가 이후부터는 예혼합기의 공연비가 높아져서 예혼합기의 HCCI 연소가 활발히 일어나서 CO의 배출량은 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.3 흡기가열의 영향

흡기의 가열은 HCCI 엔진에서 예혼합기의 착화를 제어하는 중요한 인자의 하나이며 특히 희박 공연비에서 HCCI 연소를 촉진시켜 실화를 방지할 수 있다고 알려져 있다.

Fig. 9~11은 예혼합기의 종류에 따라 흡기온도를 20°C와 80°C로 변화시킨 경우의 BSFC 변화를 나타낸 것이다. 흡기의 가열은 디젤연료를 예혼합한 경우에 BSFC를 감소시키는 효과가 가장 큰 것으로 나타났다.

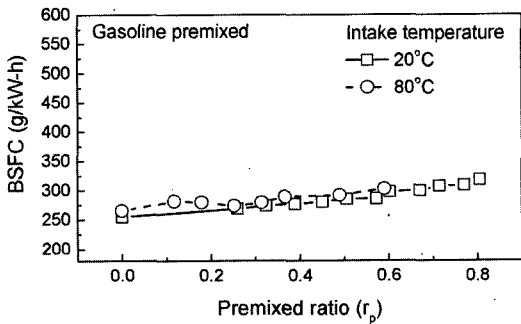


Fig. 9 Effect of intake air temperature on the BSFC (gasoline premixed)

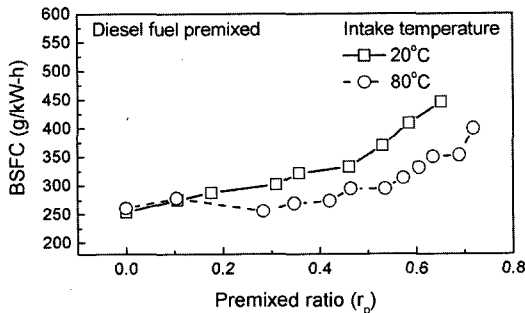


Fig. 10 Effect of intake air temperature on the BSFC (diesel fuel premixed)

디젤유를 예혼합한 경우, 상온의 흡기조건에서는 5.5 MPa의 고압으로 예혼합 연료를 분사하였지만 다량의 연료가 기화하지 못하고 예혼합실에 벽류되는 것이 관측되었다. 그러나 흡기온도를 80°C로 가열한 경우는 거의 대부분의 연료가 기화되어 엔진에 공급되는 것이 확인되었다. 따라서 디젤유를 예혼합한 경우에 흡기를 가열하면 예혼합 연료의 기화성 향상에 따른 벽류의 감소로 BSFC가 감소하였다고 판단되며, 상온에서도 기화성이 좋은 가솔린과 n-헵탄을 예혼합한 경우, 본 운전조건에서는 흡기가열에 의한 BSFC 향상은 거의 없는 것으로 보인다.

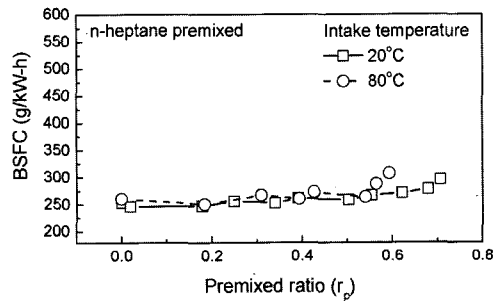


Fig. 11 Effect of intake air temperature on the BSFC (n-heptane premixed)

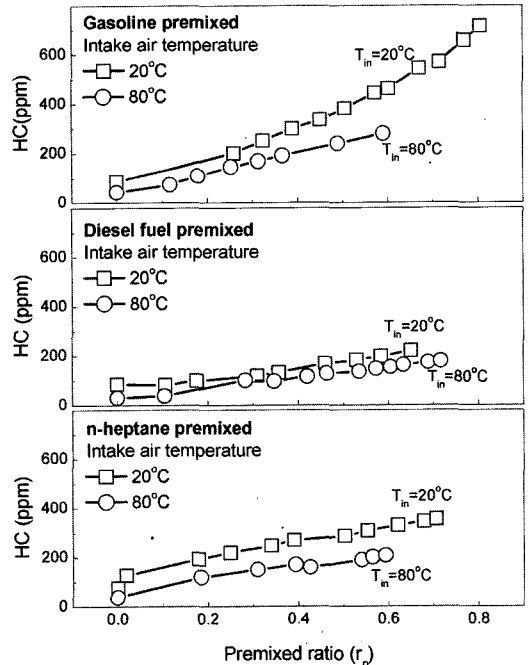


Fig. 12 Effect of intake air temperature on the HC emissions

한편, Fig. 12는 흡기가열에 따른 HC 배출량의 변화를 나타낸 것이다. 세 가지 예혼합 연료의 경우에서 모두 흡기온도를 80°C로 가열하면 HC 배출량이 감소하는 결과를 보이고 있으며, 이것은 흡기가열로 연소실내의 혼합기 온도가 상승하여 예혼합기의 HCCI 연소가 촉진된 결과로 판단된다. 특히 자칫화성이 낮은 가솔린의 경우, 흡기온도 20°C에서는 예혼합율의 증가에 따라 HC 발생량이 급격히 증가하는 경향을 보였으나, 80°C로 흡기를 가열하면 HC 배출량이 최고 60% 이상 감소되었다.

4. 결 론

직접 분사식 디젤엔진에 예혼합기 공급 시스템을 적용하여 예혼합 압축 착화 디젤엔진에 예혼합연료로 가솔린, 디젤, n-헵탄을 예혼합한 경우의 연소 및 배기 특성을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) n-헵탄 또는 가솔린을 상온에서 예혼합한 경우는 예혼합률 r_p 가 증가하여도 BSFC의 악화는 거의 없었으나, 디젤유를 예혼합한 경우에는 예혼합 연료의 벽류로 인하여 BSFC가 악화되는 결과를 보였다.
- 2) 가솔린을 예혼합한 경우가 NO_x와 수트의 동시저감 효과가 가장 우수하였고, 디젤유의 경우는 NO_x 저감효과는 높았으나, 수트 저감에는 그다지 효과적이지 못하였다.
- 3) 디젤유를 예혼합한 경우, 80°C로 흡기를 가열하면 예혼합기의 기화가 촉진되어 BSFC가 향상되는 것으로 나타났다.
- 4) 자칫화성이 낮은 가솔린을 상온에서 예혼합한 경우 HC의 배출량이 높게 나타났으나, 흡기를 80°C로 가열하면 HC의 배출량이 60% 이상 저감되는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project (무·저공해 자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1) R. H. Stanglmaier and C. E. Roberts, "Homo-

geneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications," SAE 1999-01-3682, 1999.

- 2) C. S. Lee, K. H. Lee and 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.
- 3) C. S. Lee, M. Y. Kim, S. J. Hwang and D. S. Kim, "Effect of Operation Condition on the Characteristics of Combustion and Exhaust Emissions in a Gasoline Fueled HCCI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.48-54, 2004.
- 4) M. Christensen, A. Hultqvist and B. Johansson, "Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio," SAE 1999-01-3679, 1999.
- 5) M. Osses, G. E. Andrews and J. Greenhough, "Diesel Fumigation Partial Premixing for Reduced Particulate Soot Fraction Emissions," SAE 980532, 1998.
- 6) S. Simescu, T. W. Ryan III, G. D. Neely, A. C. Matheaus and B. Surampudi, "Partial Premixed Combustion with Cool and Uncooled EGR in a Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 2002-01-0963, 2002.
- 7) D. S. Kim, M. Y. Kim and C. S. Lee, "Effect of Premixed Gasoline Fuel on the Combustion Characteristics of Compression Ignition Engine," Energy & Fuels, Vol.18, No.4, pp. 1213-1219, 2004.
- 8) S. Simescu, S. B. Fiveland and L. G. Dodge, "An Experimental Investigation of PCCI-DI Combustion and Emissions in a Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 2003-01-0345, 2003.
- 9) A. A. Pekalski, J. F. Zevenbergen, H. J. Zevenbergen, H. J. Pasman, S. M. Lemkowitz, A.E. Dahoe and B. Scarlett, "The Relation of Cool Flame and Auto-ignition Phenomena to Process Safety at Elevated Pressure and Temperature", Journal of Hazardous Materials, Vol. 93, pp.93-105, 2002.

- 10) S. Tanaka, F. Ayala, J. C. Keck and J. B. Heywood, "Two-stage Ignition in HCCI Combustion and HCCI Control by Fuels Additives," *Combustion and Flame*, Vol.132, pp.219-239, 2002.
- 11) M. Christensen, A. Hultqvist and B. Johansson, "Demonstration the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio," SAE 1999-01-3679, 1999.