

< 논문 >

HCCI 디젤엔진의 연소 및 배기 특성에 미치는 예혼합 연료와 EGR의 영향

윤영훈* · 김대식** · 이창식†
(2005년 2월 3일 접수, 2005년 7월 20일 심사완료)

Effects of Premixed Fuel and EGR on the Combustion and Emissions Characteristics of HCCI Diesel Engine

Young Hoon Yoon, Dae Sik Kim and Chang Sik Lee

Key Words: HCCI(균일 예혼합 압축 착화), Premixed Ratio(예혼합률), Premixed Fuel(예혼합 연료), EGR(배기 재순환)

Abstract

The effects of premixed fuels(diesel or n-heptane) and exhaust gas recirculation on combustion and exhaust emission characteristics in a DI diesel engine were experimentally investigated. To improve homogeneity of fuel-air mixture in the conventional diesel engine, the premixed fuel is injected by high pressure(5.5 MPa) into the premixing chamber prior to engine cylinder. And several additional systems such as an EGR system, air heating system and back pressure control system were equipped in the DI diesel engine. The results showed that premixed fuel-air mixture undergoes typical HCCI combustion prior to the combustion of DI diesel fuel. The ignition timing of HCCI combustion is delayed by application of EGR, and it also shows that HCCI combustion can be controlled by an EGR.

1. 서론

각종 연소장치 및 자동차로부터 나오는 유해가스에 의한 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비, 대기오염 등의 환경 공해가 심각한 사회 문제로 대두됨에 따라 자동차의 유해 배기 저감은 자동차 산업에서 매우 중요 연구 방향이 되고 있다.

균일 예혼합 압축 착화(Homogeneous Charge Compression Ignition; HCCI) 엔진은 디젤엔진의 높은 열효율을 유지하면서 질소산화물(NO_x)과 입

자상 물질(PM)을 획기적으로 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있어서 전세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁾

지금까지 디젤연료에 대한 HCCI 연소의 연구는 예혼합 연료를 흡기 포트에서 공급하여 압축착화하는 방식과 연료를 실린더 내에 조기 분사하여 예혼합 연소를 달성하는 방식 등이 연구되어 왔다. 그러나 이전 연구 결과들로부터 착화 및 연소율의 직접적인 제어 수단없이 연소실 내 온도 및 혼합기의 화학반응에 의하여 결정되는 HCCI 엔진 고유의 연소 특성상 운전 범위가 크게 제한되는 단점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.⁽²⁻⁶⁾

본 연구에서는 연소실 내에 균일한 예혼합기를 형성시킴과 동시에 착화원 및 연소율의 제어인자로서 소량의 연료를 압축 말기에 직접 분사하여, 실린더 전체에 걸쳐서는 예혼합 연료에 의해 연

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : cslee@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2281-8963 FAX : (02)2281-5286

* 회원, 한양대학교 대학원

** 한양대학교 기계기술연구소

Table 1 Specifications of test engine

Description	Specification
Type	DI diesel engine
Combustion chamber shape	Toroidal
Number of injector holes	4
Displacement volume(cc)	673
Number of cylinder	1
Bore(mm)×stroke(mm)	95×95
Compression ratio	18

소가 진행되면서도, 직분 연료에 의한 연소율의 제어가 가능한 HCCI 엔진을 구현하였다. 예혼합 연료의 공급은 균일한 예혼합기 형성을 위하여 흡기 포트 분사 방식을 적용하였다.

본 연구의 목적은 직분 연료와 동일한 디젤연료를 예혼합 연료로 사용한 경우와 디젤연료와 착화 특성이 유사하면서도 뛰어난 증발 특성을 갖는 노멀 헵탄을 예혼합 연료로 사용한 경우에 대하여 예혼합률과 EGR률의 변화에 따른 연소 및 배출물 특성을 실험적으로 구한 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 예혼합 압축착화 엔진 시스템

Table 1은 실험에 적용한 엔진의 주요 제원을 나타낸 것으로, 673cc의 배기량과 18:1의 압축비를 가지는 단기통 직접 분사식 디젤엔진을 사용하였다.

Fig. 1은 실험기관 및 흡·배기 시스템을 나타낸 것이다. HCCI 연소 및 배출 특성은 예혼합기의 균일도에 의하여 많은 영향을 받는다고 알려져 있으므로, 직분식 디젤엔진에 균일한 예혼합기를 공급하기 위하여 예혼합실을 흡기포트에 설치하고 고압 인젝터로 연료를 분사하여 연료가 공기와 충분히 예혼합된 후에 연소실로 공급될 수 있도록 하였다. 그리고 배출가스의 압력을 일정하게 유지시키기 위해 배압실과 압력조절 밸브를 설치하였다. 또한 EGR 냉각기와 EGR 조절 밸브를 통하여 배출가스가 냉각된 후 재유입될 수 있도록 구성하였다.

실험장치는 디젤엔진과 동력계 시스템, 예혼합기 공급 및 EGR 제어장치, 흡기온도 제어장치,

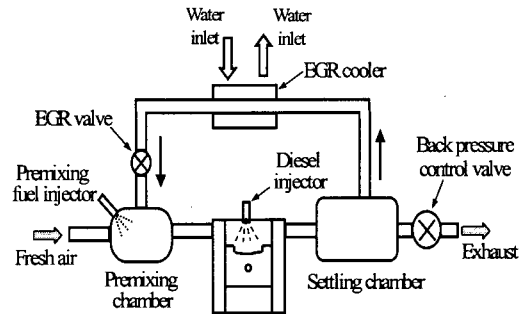


Fig. 1 Schematic diagram of intake and exhaust system

연소 및 배기 분석장치로 구성하였다. 예혼합 연료는 범용 ECU를 통하여 제어하도록 하였다. 또한, 흡기의 가열과 조절을 위한 흡기가열 및 제어장치와 유량 측정을 위한 열선식 유량계를 설치하였다.

엔진 동력계 시스템은 최대 흡수 마력이 75 kW인 와전류식 동력계를 사용하였으며, 엔진으로부터의 배출가스 분석을 위하여 NO_x 분석기(Yanaco, BCL-511)와 매연 측정기(DBC-1000), 그리고 HC-CO분석기 등을 사용하였다.

또 엔진의 연소해석을 위하여 압력센서로부터 얻어진 압력신호와 크랭크축에 연결된 엔코더로부터 펄스 신호를 받아 신호 처리하여 연소실의 압력, 열발생률 등을 구할 수 있도록 하였다. 연소압력은 내부에 흐르는 냉각수를 통해 연소실에서 전달되는 열에 의한 변형과 손실이 일어나지 않는 압전식 압력센서(6052B1, Kistler)를 실린더 헤드에 부착하여 데이터 취득 시스템과 연산 프로그램을 이용하여 데이터를 취득하였다.

2.2 예혼합률 및 EGR률의 정의

예혼합 연료와 연소실 내로 직접 분사된 디젤 연료의 비율을 나타내기 위하여 총연료의 공급 열량에 대한 예혼합 연료의 열량비를 예혼합률(r_p)로 정의하고 다음 식으로 나타내었다.

$$r_p = \frac{m_p H_{i,p}}{m_p H_{i,p} + m_d H_{i,d}} \quad (1)$$

여기서, m_p 는 예혼합 연료의 분사량, m_d 는 연소실내로 직접 분사된 디젤연료의 분사량, $H_{i,p}$ 는 예혼합 연료의 저위 발열량이고, $H_{i,d}$ 는 직분 연료의 저위 발열량이다.

Table 2 Experimental conditions

Engine speed(rpm)	1200, 1800
Load(Nm)	20
Cooling water temperature(°C)	70
Premixed fuel	Diesel oil n-heptane
Intake air temperature(°C)	20, 50, 80(Diesel) 20, 100(n-heptane)
Start of injection	TDC(premixed) BTDC 20°(DI)
Injection pressure(MPa)	5.5(pewmixed) 22(DI)

또한 EGR률의 정의는 EGR을 하지 않은 상태에서의 흡기 유량에 대한 EGR시의 흡기 유량의 감소율로 다음과 같이 정의하였다.

$$EGR \text{ rate} = \frac{V_o - V_{EGR}}{V_o} \quad (2)$$

여기서, V_o 는 EGR을 하지 않았을 때의 흡기유량이고, V_{EGR} 은 EGR을 하였을때의 흡기유량이다.

일반적으로 EGR을 수행하는 경우에는 고온의 배출가스를 흡기로 유입하게 되어 흡기온도가 상승하는 문제점이 있으나,⁽⁷⁾ 본 연구에서는 냉각 EGR을 적용하여 고온의 배출가스를 EGR칼러를 통해 냉각시켜 EGR을 수행한 경우에도 흡기온도의 상승을 10°C 이내로 유지하도록 하였다.

2.3 실험방법

Table 2는 실험에 적용한 엔진의 운전조건을 나타낸 것이다. 엔진의 회전속도는 1200, 1800 rpm으로 일정하게 유지하였으며, 디젤연료와 노멀헵탄을 예혼합한 경우에 대하여 예혼합률을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 예혼합률은 예혼합 연료없이 연소실에 직접 분사되는 디젤연료만으로 운전되는 경우로부터 시작하여 예혼합 연료를 증가시켜 가며 실험을 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 디젤 예혼합 HCCI 엔진

Fig. 2는 디젤연료를 예혼합한 경우의 연소특성을 흡기 온도(T_{in})별로 나타낸 것이다. 이 경우 엔

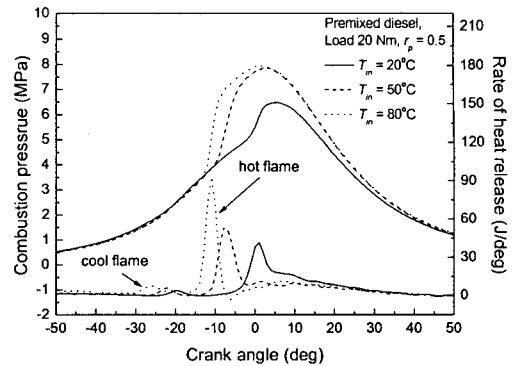


Fig. 2 Effect of intake air temperature on combustion characteristics (Premixed diesel, 1,800 rpm)

진 부하는 20 Nm, 예혼합률은 0.5로 설정하여 비교하였다.

흡기 포트 예혼합 방식의 HCCI 엔진이 안고 있는 문제점 중의 하나는 예혼합 연료의 불완전 무화로 인한 예혼합실의 벽류량의 증가이다. 이러한 현상은 디젤연료를 사용하는 엔진의 경우 더욱 두드러지는 현상이다. 벽류량의 증가는 연료소비율의 증가 및 유해 배출물의 증가로 이어진다. 이와 관련된 사항들은 이전 발표된 논문에서 보고된 바 있고, 흡기 가열은 해결 방안 중의 하나로 여겨진다.⁽⁶⁾

그림에서 보여지듯이 흡기 온도의 증가에 따라 냉염(cool flame) 발생 시기가 진각되는 것을 확인할 수 있었으며, 이것은 저온 화학반응이 연소실 내의 온도에 민감하게 반응하기 때문이다. 냉염으로 인한 열발생이 미소하게 나타난 후 예혼합 연료의 연소에 의한 열염(hot flame)이 나타나는 HCCI 연소과정을 거친 후, 직분 디젤연료의 확산 연소의 순서로 연소가 진행되고 있다.^(6,8)

Fig. 3은 엔진 부하 20 Nm일 때, 다양한 흡기 온도에서 예혼합률의 변화에 따른 NO_x의 배출특성을 나타낸 것이다. 본 실험에서 사용된 NO_x의 농도는 각 실험조건에서 계산된 습도 보정 계수를 반영하여 얻어진 값이다. 결과에서 보여지듯이 NO_x 배출물은 예혼합률의 증가에 따라 선형적으로 감소하고 것으로 나타났다. 그러나, 높은 예혼합률과 높은 흡기온도에서는 동일 부하조건에서의 기존 디젤엔진보다 NO_x 농도가 오히려 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 높은 예혼합률 및 흡기온

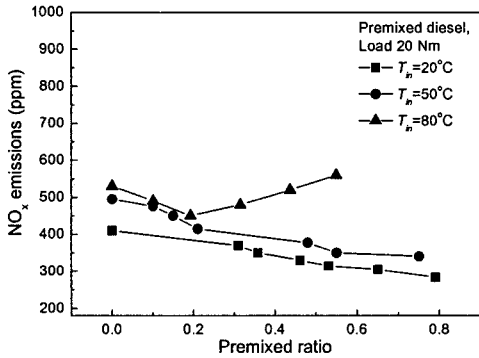


Fig. 3 Effect of premixed diesel on NO_x emissions (1,800 rpm)

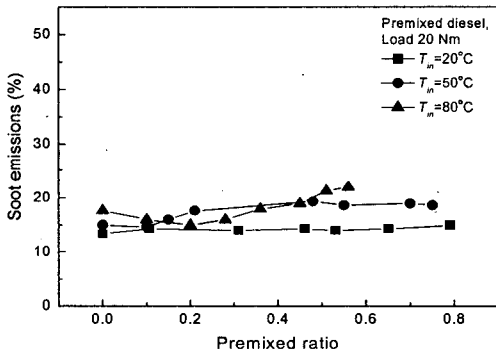


Fig. 4 Effect of premixed diesel on soot emissions (1,800 rpm)

도에서는 예혼합 연료의 연소가 압축행정으로 크게 앞당겨 지고 이에 따른 연소온도의 상승으로 인한 것으로 판단된다.

Fig. 4에서의 경우 수트 배출물은 NO_x 배출물의 결과와 차이를 보이는 것으로 측정되었다. 상술한 바와 같이, 이상적인 HCCI 연소는 수트 생성으로부터 자유로운 연소기술로 받아들여지나, 국내외의 디젤연료를 사용한 HCCI 연소에 관한 많은 연구결과에서는 감소폭이 NO_x에 비해 작거나 본 연구에서처럼 거의 일정한 배출을 보여주는 것으로 보고되고 있다. 이는 실제 엔진에서의 연소와 이상적인 연소 개념에서의 차이로부터 기인한다고 여겨진다. 본 연구에서도 예혼합률의 증가는 균일 혼합기에 의한 연소가 증가됨으로 인하여 수트가 감소되어야 함에도 불구하고, 실제 실험결과로부터 여러 영향들에 의해 감소효과

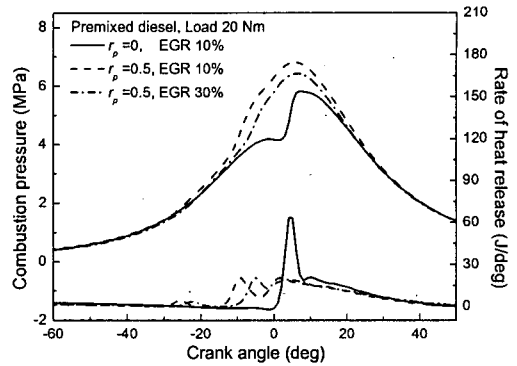


Fig. 5 Effect of EGR rate on combustion characteristics (premixed diesel, 1,200 rpm)

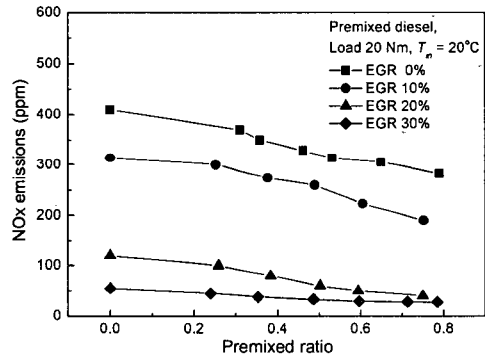


Fig. 6 Effect of EGR rate and premixed ratio on NO_x emission (premixed diesel, 1,200 rpm)

가 상쇄되어 배출되기 때문에, 거의 일정 수준의 수트가 측정되어지는 것으로 분석된다.

이러한 원인들로는 예혼합 연료의 불균일한 혼합기 분포로부터 생성된 수트와 또한 예혼합 연료의 연소가 직분 연료분사 시기 전에 선행함으로써, 직분 연료 주위의 산소농도 소모로 인한 직분 연료의 확산연소시 발생하는 수트 등의 영향들이 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 디젤연료 예혼합률의 경우 냉각EGR에 따른 연소특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 EGR률의 증가는 냉염의 발생시기를 크게 늦추는 것으로 나타났다. 이것은 디젤연료를 예혼합하는 HCCI 엔진에서 냉염으로 인한 연소시기의 과도한 진각을 효과적으로 상쇄할 수 있는 가능성을 보여준다.⁽²⁾

Fig. 6과 7은 EGR률과 예혼합률에 따른 NO_x와

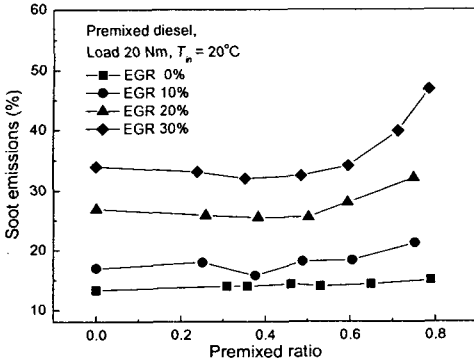


Fig. 7 Effect of EGR rate and premixed ratio on soot emission (premixed diesel, 1,200 rpm)

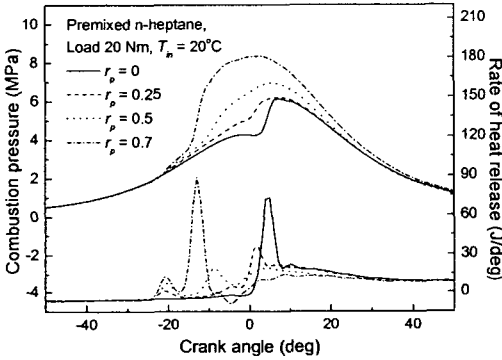


Fig. 8 Effect of premixed ratio on the combustion characteristics (premixed n-heptane, 1,200 rpm)

수트의 배출특성을 나타낸 것이다. NO_x의 배출 특성은 EGR률 30%와 예혼합률 0.75의 HCCI 디젤엔진의 경우 EGR를 적용하지 않은 DI 디젤엔진의 배출량에 비해 1/10 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 7에서 수트의 배출 특성은 EGR률의 증가에 따라 비례해서 수트 배출물도 증가하는 일반적인 결과를 나타내었다. 예혼합률 및 EGR률을 동시에 증가시켰을 경우, 흡기포트에서 다량의 예혼합 연료가 불완전 증발 및 불균일한 혼합기 분포 특성으로 인하여 수트의 증가를 초래하게 되고, 이러한 경향은 높은 EGR률에서 더욱 두드러진 것으로 분석된다.

3.2 노멀 헵탄 예혼합 HCCI 엔진

Fig. 8은 흡기 가열을 하지 않은 상태에서 노멀

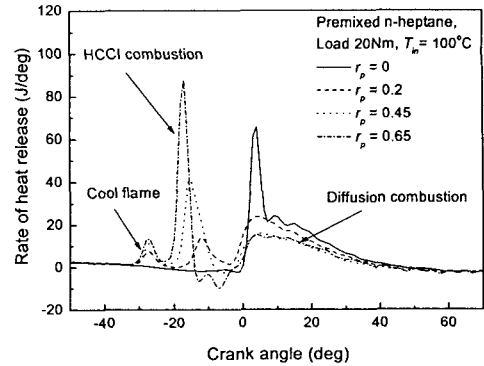


Fig. 9 Effect of premixed ratio on the heat release rate (premixed n-heptane, 1,200 rpm)

헵탄을 예혼합하였을 경우의 연소압력 및 열발생률 특성을 도시한 것이다.

노멀 헵탄의 뛰어난 증발 및 착화 특성으로 인하여 흡기 가열을 하지 않은 조건임에도 불구하고, 예혼합률에 상관없이 BTDC 25° 근처에서 냉염이 발생하는 것으로 나타났다.

그러나 냉염에 의한 열발생량은 예혼합률에 따라 비례하여 증가하였고, 디젤연료 예혼합시의 결과와 비교할 때, 냉염 구간의 열발생률은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 노멀 헵탄의 높은 반응성 때문에 예혼합 연료의 착화지연 시간이 짧아졌기 때문이다.⁽¹⁰⁾

Fig. 9는 흡기를 가열한 경우에 대해 노멀 헵탄을 예혼합하였을 때의 예혼합률에 따른 열발생률 특성을 나타낸 것이다. 노멀 헵탄의 흡기가열의 경우, 연료의 증발 온도인 98.4도보다 높은 100도로 가열하여 증발 특성이 향상되도록 하여, 이상적으로 균일한 혼합기를 얻을 수 있도록 하였다.

이 경우, 노멀 헵탄의 열발생률의 형태는 세 가지 연소 단계로 뚜렷하게 구분되는 것으로 보여진다. 처음 두 단계는 디젤연료 및 노멀 헵탄 연료를 이용한 HCCI 엔진에서 볼 수 있는 전형적인 연소 형태로서, 냉염 구간과 예혼합 연료의 압축착화에 의한 HCCI 연소 구간이다. 마지막 단계는 직분 연료에 의한 확산연소 구간이다.

냉염의 발생시기는 앞서서의 결과와 마찬가지로 예혼합률에 상관없이 동일한 시기에 발생하는 데 반하여 HCCI 연소 발생시기는 예혼합률의 증가에 따라 크게 진각된다. Peng 등⁽¹¹⁾은 이와 유

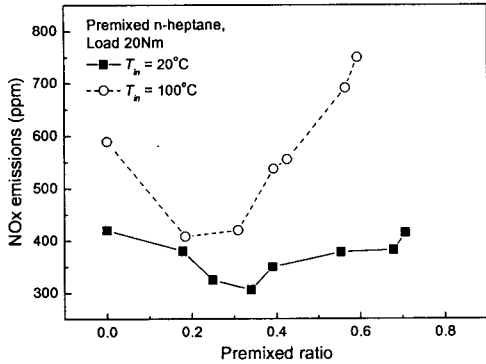


Fig. 10 Effect of premixed n-heptane on NO_x emissions (1,200 rpm)

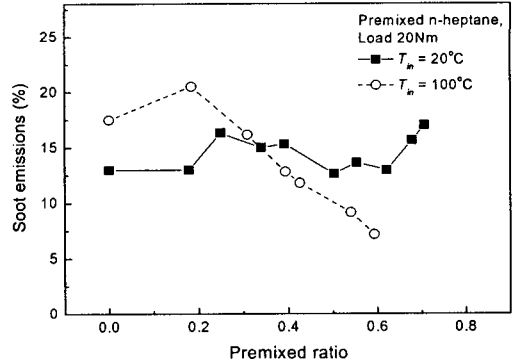


Fig. 11 Effect of premixed n-heptane on soot emissions (1,200 rpm)

사한 연구결과에서 냉염의 발생시기는 연소실 내의 온도에 크게 의존하는 반면, 냉염 구간에서의 열발생량은 주로 예혼합기의 공연비에 의존한다고 하였다. 또한 높은 예혼합률에서의 HCCI 연소 시작시기는 냉염구간에서의 활발한 연소에 의하여 크게 진각되는 것으로 나타났다.

Fig. 10과 11은 흡기를 가열한 경우와 가열하지 않은 경우에 대해 노멀 헵탄을 예혼합 하였을 때, 예혼합률에 따른 NO_x와 수트의 관계를 나타낸 것이다.

NO_x 배출 특성은 두 경우 모두 대략 0.3 부근의 예혼합률까지는 감소하는 경향을 보였다. 또한 디젤연료를 예혼합하였을 경우와 비교할 때, 그 감소 효과는 훨씬 큰 것으로 나타났는데, 이는 디젤연료에 비하여 노멀 헵탄의 뛰어난 증발 특성으로 인하여 좀 더 균일한 혼합기가 형성될 수 있었고, 이에 따라 실린더내 평균 공연비에 비해 국부적으로 농후한 영역에서의 연소가 줄어들면서 얻어진 결과로 보여진다. 이러한 효과는 흡기를 가열하였을 경우 더욱 두드러진다. 그러나 0.3 이상의 예혼합률에서 NO_x 농도는 예혼합률의 증가에 따라 오히려 증가하는 것으로 나타났다. 이는 디젤연료 예혼합의 결과와 유사한 경향으로 연소의 진각에 따른 연소온도의 상승으로부터 기인한 것으로 보여진다.

Fig. 11에 나타낸 바와 같이 노멀 헵탄 예혼합의 경우, 흡기가열 여부에 따라 수트 배출 특성은 전혀 다른 경향을 나타내었다. 흡기를 가열하지 않은 경우(20°C)에서는 디젤 예혼합의 수트 배출 결과에서 보는 바와 같이 예혼합률의 증가에

따라 약간의 변동은 있지만 거의 일정한 배출 특성을 나타내었다.

그러나 흡기를 가열하였을 경우, 예혼합 연료를 공급하자마자 미소하게 수트 배출량이 증가하였으나 예혼합률이 증가할수록 수트 발생은 선형적으로 감소하였다. 이는 예혼합 연료의 향상된 증발 특성으로 인하여 흡기 미가열시 발생하였던 불균일한 예혼합기에 의해 초래된 수트 발생이 억제된 것으로 판단된다.

4. 결 론

균일 예혼합 압축착화 디젤엔진 시스템을 구성하여, 디젤연료 및 노멀 헵탄을 예혼합한 경우에 대하여 연소 및 배기 특성에 미치는 EGR의 영향을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 디젤연료를 예혼합한 결과 흡기온도의 증가에 따라 냉염의 발생시기가 빨라지는 경향을 보였고 냉각 EGR을 적용한 경우는 EGR률의 증가에 따라 냉염의 발생시기가 크게 지연되는 경향을 보였다.

(2) 디젤연료를 직분식 디젤엔진에 예혼합한 결과, NO_x 배출량은 예혼합률의 증가에 따라 선형적으로 감소하고, 수트의 배출량은 20°C의 경우 예혼합률에 관계없이 거의 일정했고, 80°C의 경우 $r_p=0.2$ 까지는 점차 감소하다가 그 이상의 예혼합률에서는 $r_p=0$ 에서의 값보다 높아졌다.

(3) NO_x 배출량은 EGR 30%와 $r_p=0.75$ 의 경우, EGR을 적용하지 않은 DI 디젤 엔진의 배출량에 비해 1/10 수준으로 감소하였고 수트의 배출량은

EGR률의 증가에 따라 증가하였다.

(4) 100℃로 흡기 가열시, 노멀 헵탄을 예혼합 하였을 경우의 열발생률의 형태는 예혼합 노멀 헵탄의 연소에 의한 냉염구간과 HCCI 연소구간 이 나타난 후 직분 디젤연료에 의한 확산연소 구간으로 구성되는 3단계의 연소로 나누어지는 것으로 나타났다.

(5) 노멀 헵탄 예혼합시 NO_x의 농도는 흡기가 열에 상관없이 어느 일정 지점까지의 예혼합률까지는 감소하다가 이 지점 이상의 예혼합률에서는 다량의 예혼합 연료의 조기 착화에 의한 연소실 온도의 증가로 인하여 다시 상승하는 것으로 나타났다.

(6) 수트 배출 특성은 흡기 온도 20℃일 때 약간의 변동이 일어나지만, 예혼합률의 증가에도 불구하고 대체로 일정한 값을 나타냈고 100℃의 경우에는 수트 농도가 $r_p=0.2$ 까지 증가하다가 그 이상 예혼합률이 증가하면 선형적으로 감소하기 시작했다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Rudolf, H. Stanglmaier and Charles, E. Roberts, 1999, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) : Benefits, Compromises and Future Engine Applications," SAE paper 1999-01-3682.
- (2) Fuquan, Z., Thomas, W. A., Dennis, N. A., John, E. D., James, A. E. and Paul, M. N., 2003, "Homogeneous Charge Compression Ignition Engine," *Society of Automotive Engineers*, PT94, pp. 151~154.
- (3) Lee, C. S., Lee, K. H. and Kim, D. S., 2002, "Effect of Premixed Ratio on Nitric Oxide Emission in Diesel Engine," SAE paper 2001-01-1806.
- (4) Lee, C. S., Lee, K. H. and Kim, D. S., 2003, "Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of Partially Premixed Charge Compression Ignition Engine with Dual Fuel," *Fuel*, Vol. 82, pp. 553~560.
- (5) Kim, D. S., Kim, M. Y. and Lee, C. S., 2004, "Effect of Premixed Gasoline Fuel on the Combustion Characteristics of Compression Ignition Engine," *Energy & Fuels*, Vol. 18, pp. 1213~1219.
- (6) Kim, D. S., Kim, M. Y. and Lee, C. S., 2005, "Combustion and Emission Characteristics of Partial Homogeneous Charge Compression Ignition Engine," *Combustion Science and Technology*, Vol. 177, pp. 107~125.
- (7) Cha, J. Y., Kwon, J. H., Cho, Y. H. and Park, S. S., 2001, "The Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion Stability, Engine Performance and Exhaust Emission in a Gasoline Engine," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 10, pp. 1442~1450.
- (8) Stefan, S., Scott, B. F. and Lee, G. D., 2003, "An Experimental Investigation of PCCI-DI Combustion and Emissions in a Heavy-Duty Diesel Engine," SAE paper 2003-01-0345.
- (9) Hua, Z., Peng, Z., John, W. and Nicos, L., 2001, "Understanding the Effects of Recycled Burnt Gases on the Controlled Autoignition (CAI) Combustion in Four-Stroke Gasoline Engines," SAE paper 2001-01-3607.
- (10) Magnus, C., Anders, H. and Bengt, J., 1999, "Demonstrating the Multi-Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine With Variable Compression Ratio," SAE paper 1999-01-3679.
- (11) Peng, Z., Zhao, H. and Ladommatos, N., 2003, "Effects of Air/Fuel Ratios and Egr Rates on Hcci Combustion of N-Heptane, a Diesel Type Fuel," SAE paper 2003-01-0747.