

커먼레일 디젤 엔진의 균일 예혼합 연소 및 배기특성

윤 승 현¹⁾ · 이 두 진¹⁾ · 김 명 윤¹⁾ · 이 제 형²⁾ · 이 창 식³⁾

한양대학교 대학원¹⁾ · 현대 · 기아 연구개발본부²⁾ · 한양대학교 기계공학부³⁾

Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion and Exhaust Characteristics of a Common-rail Diesel Engine

Seung Hyun Yoon¹⁾ · Doo Jin Lee¹⁾ · Myung Yoon Kim¹⁾ · Je Hyung Lee²⁾ · Chang Sik Lee³⁾

¹⁾Graduate School of Hanyang University, Seoul 135-791, Korea

²⁾Research & Development Division for Hyundai Motor Company & Kia Motors Corporation
772-1, Jangduck-dong, Whasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 11 March 2005 / Accepted 10 June 2005)

Abstract : An experimental study on homogeneous charge compression ignition combustion with direct fuel injection was conducted using a single cylinder common-rail diesel engine. To improve the homogeneity of fuel-air mixture, the premixed fuel (gasoline) was injected into premixing chamber and the diesel fuel was injected into the combustion chamber as an ignition source for the gasoline premixture.

The experimental results show that soot emissions were dramatically reduced with the increase of fuel premixing ratio, however incomplete products such as HC and CO increased with the increase of the premixed ratio. Earlier injection of DI diesel fuel increased the IMEP with the decrease of HC and CO concentrations.

Key words : HCCI(균일 예혼합 압축 착화), Common-rail diesel engine(커먼레일 디젤 엔진), Combustion characteristics(연소특성), Exhaust emission(배기 배출물)

1. 서론

최근 환경 문제가 심각한 사회문제로 대두됨에 따라 자동차에서 발생하는 유해 배출물에 대한 규제도 점차 강화되고 있다. 이에 따라 내연기관에서 발생하는 배출물을 저감하기 위한 새로운 청정연소 기술 개발에 대한 관심이 집중되고 있다. 자동차 배출물의 저감을 위한 신 연소기술로는 여러 가지 방법이 제시되고 있으나 그 중 균일 예혼합 압축착화(HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition)

기술은 기존의 디젤 엔진 정도의 높은 열효율을 유지하면서도 NO_x(질소산화물)와 P.M.(입자상 물질)의 동시저감이 가능하기 때문에 CO₂ 배출량 규제 및 NO_x와 P.M.등의 유해 배출물에 대한 규제에 대응할 수 있는 기술로 평가되고 있다.¹⁾

따라서 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나 HCCI 엔진에서는 연소온도가 낮기 때문에 HC와 CO와 같은 불완전 연소가스의 배출이 증가하고, 운전 가능한 영역이 저속, 저부하의 일부 구간에 한정되는 등의 단점 때문에 아직 실용화에 많은 제약이 뒤따르는 것이 사실이다. 또한, 예혼합기의 착화 시기 및 연소 속도의 능동적인 제어가 어렵다는 문제

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

도 해결하여야 할 과제로 인식되고 있다.^{1,2)} 기존의 불꽃점화(SI)엔진과 압축착화(CI)엔진에서는 각각, 스파크 방전 시기와 연료 분사시기의 변경으로 착화시점을 쉽게 제어할 수 있었지만, HCCI 연소의 경우에는 연료의 분사 후에 착화까지의 기간이 길고, 경우에 따라서는 별도의 착화제어 인자가 없기 때문에 다양한 운전 조건에서의 능동적인 착화제어가 어렵게 된다.^{1,3)}

따라서 본 연구에서는 예혼합기의 착화를 연소실에 직접 분사되는 디젤 연료의 연소로 제어하는 방식을 적용하였다. 이를 위하여 기존의 커먼레일 디젤엔진에서의 확산연소를 이용하여 예혼합 연료의 착화를 제어하는 HCCI 방식을 적용하였다. 기존의 소형 커먼레일 디젤 엔진에 예혼합 연료 공급 장치를 설치하여 균일한 가솔린 예혼합기를 연소실에 공급한 후, 연소실로 직접 분사되는 디젤 연료를 이용하여 착화시키는 HCCI 디젤 엔진 시스템을 구성하고, 착화원이 되는 디젤 연료의 분사시기와 분사량을 다양하게 변화시켜가면서 연소 및 배기 특성을 비교 분석하였으며, 실험결과를 기존의 커먼레일 디젤 엔진과 비교하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 기관

본 실험에는 배기량이 373.6cc이고 최고 분사압력이 135MPa인 커먼레일 시스템이 적용된, DOHC 4밸브식 단기통 디젤엔진을 이용하여 실험을 수행하였다. Table 1은 실험용 엔진의 주요 제원을 나타낸 것이다.

Table 1 Specifications of test engine

Description	Specification
Stroke (mm)	83.5
Bore (mm)	75.5
Swept volume (cc)	373.6
Compression ratio	17.8
Valve	DOHC 4
Spray angle (°)	156
Injector hole number	6
Fuel injection system	Bosch common-rail

2.2 실험 장치

실험장치는 커먼레일 디젤 엔진, ECU제어 장치, 예혼합 연료 공급 및 분사 제어 장치, 연소 및 배기 분석을 위한 장치로 구성하였다. Fig. 1은 실험 장치 개략도를 나타낸 것으로 엔진의 출력은 DC 동력계(45kW)로 측정하였다. 인젝터에 공급되는 연료의 압력을 일정하게 유지하기 위하여 인터페이스 장치인 KIC-II를 통해 소프트웨어(ETAS, INCA ver. 4.0)를 사용, EDC ECU(Bosch)에 프로그램을 입력하여 사용하였다. 커먼레일 인젝터는 별도의 인젝터 드라이버(TEMS, TDA 3200H)에 의하여 통전시간을 조절하여 원하는 분사량을 제어할 수 있도록 하였으며, 예혼합 연료로는 가솔린을 사용하였으며 연료량 및 분사시기를 제어하기 위해 펌프 생성기와 GDI인젝터 드라이버를 사용하여 제어하였다. 두 인젝터의 동기화 및 분사시기 제어를 위해 크랭크 각 센서(1800 pulse/rev)와 캠축 위치 센서를 설치하였다. 그리고 실린더 내의 압력을 측정하고 열발생률을 계산하기 위하여 피에조 압전 소자 방식의 압력 센서(6052B1, Kistler)를 연소실에 설치하였으며, 데이터 취득 보드(NI, PCI-MIO-16E-1)와 소프트웨어(LabVIEW)를 사용하여 실시간으로 데이터를 취득하였다. 또한, 배기가스 분석을 위해 soot 측정기, NO_x 측정기, HC 및 CO 분석기 등을 사용하였다.

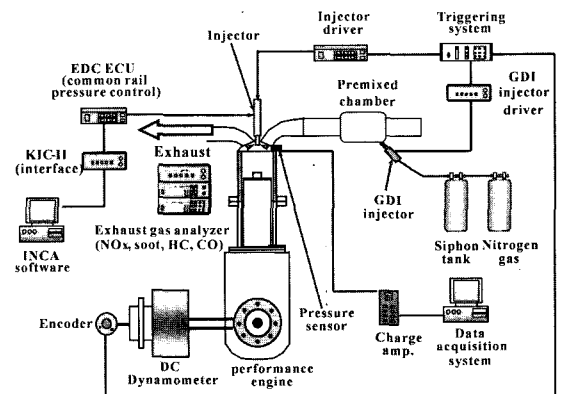


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.3 실험 조건 및 방법

Table 2는 본 실험의 조건을 나타낸 것으로 기관의 회전속도는 1500rpm으로 일정하게 하여 실험하

였고, 엔진의 성능 및 배기 특성을 규명하기 위해서 연료의 총 분사량은 디젤 연료 저위발열량 기준으로 6mg/cycle($\Phi=0.25$)에 해당하게 공급하였으며, 예혼합률의 변화와 연료의 분사시기 등을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.

Table 2 Experimental conditions

Item	Test condition	
Oil temperature (°C)	70	
Cooling water temperature (°C)	70	
Engine speed (rpm)	1500	
MR (mixing ratio)	0~0.9	
Injection timing (deg ATDC)	Premixed	0 (TDC)
	DI	-24~0
Injection pressure (MPa)	Premixed	5.5
	DI	50
Fuel	Premixed	Gasoline
	DI	Diesel

연소실로 직접 분사되는 디젤과 예혼합 연료로 사용된 가솔린의 비율을 나타내기 위하여 연소실 내로 공급되는 연료의 총열량에 대한 예혼합되는 연료의 열량의 비를 예혼합비(MR)라 하고 다음과 같이 정의하였다.

$$MR = \frac{Q_{pr}}{Q_{pr} + Q_{DI}} = \frac{m_{pr} H_{l,pr}}{m_{pr} H_{l,pr} + m_{DI} H_{l,DI}} \quad (1)$$

여기서, m_{pr} 은 예혼합 가솔린의 분사량, m_{DI} 는 직분되는 디젤의 분사량을 의미하며, $H_{l,pr}$ 은 가솔린의 저위 발열량, $H_{l,DI}$ 는 디젤의 저위 발열량을 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 예혼합의 영향

일반적으로 디젤 연소 현상에서는 연료의 분사시기의 변화에 따라 NO_x 와 soot 배출량의 관계는 trade-off 관계를 가지게 되어 두 배출물의 동시 저감은 상당히 어려운 기술로 되고 있다.

Fig. 2는 일반적인 디젤 연소의 연료 분사시기 변화와 HCCI 디젤 연소에서 디젤의 분사시기를 BTDC 3°로 고정한 상태에서 예혼합비(MR)의 변화에 따른 NO_x 와 soot 배출량의 상관관계를 나타낸 것

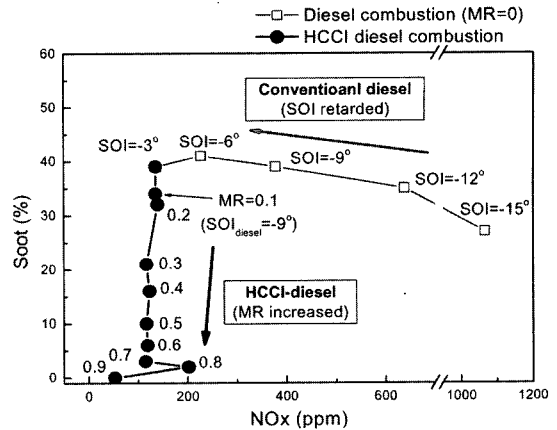


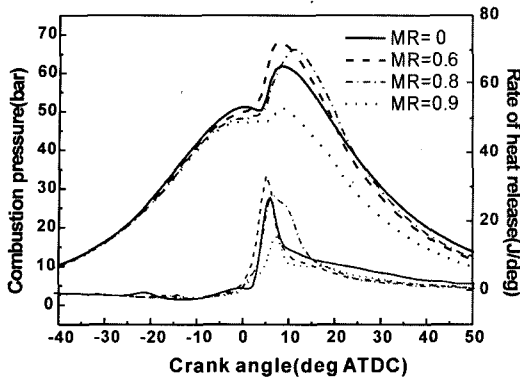
Fig. 2 NO_x -soot relationship for conventional diesel and HCCI-diesel combustion (1500rpm)

이다. 운전조건은 엔진의 회전수 1500rpm, 연료의 총 분사량은 디젤 연료 6mg/cycle에 해당하는 경우에 대하여 나타낸 것이다.

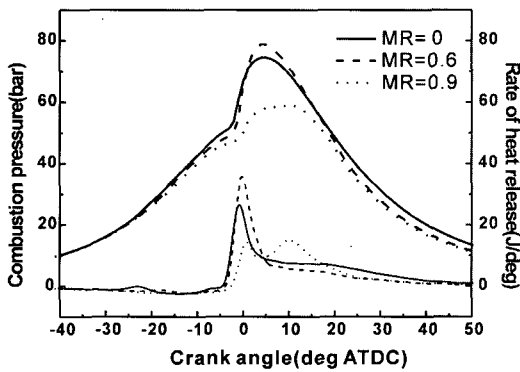
통상적인 디젤 엔진의 경우에는 분사시기가 늦어질수록 NO_x 배출량은 급격히 감소하지만, soot의 배출량은 다소 증가하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 디젤 연료의 분사시기를 ATDC -3°로 일정하게 하고 예혼합율을 증가시켜 디젤 연료의 분사량을 감소시키면 이전의 연구 결과들^{4,7)}과 마찬가지로 연소실 내의 혼합기 분포가 개선되어 soot의 발생량이 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. NO_x 의 발생량은 MR=0에서 0.7까지 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 보이다가 MR=0.8에 이르면 급격히 증가했다가 다시 MR=0.9에서 급격히 감소하는 특성을 보이고 있다. 이것은 MR=0.9에서는 착화원으로 작용하는 디젤의 양이 부족하여 총분사 연료의 대부분을 차지하는 가솔린 예혼합기의 연소가 제대로 되지 못하기 때문으로 판단되며, Fig. 3의 연소특성 결과에서 이러한 원인이 잘 나타나 있다.

Fig. 3은 연소실로 직접 분사되는 디젤 연료의 분사시기를 각각 BTDC 3°와 9°로 변경시킨 경우에, MR의 변화에 따른 연소 특성을 나타낸 것이다.

MR=0인 경우는 기존의 커먼레일 디젤 엔진의 연소특성을 나타내고 있다. 최고 연소압력은 예혼합율이 증가할수록 높아지다가 MR=0.9가 되면 급격히 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이것은 MR=0.9인



(a) SOI = -3° ATDC



(b) SOI = -9° ATDC

Fig. 3 Effect of premixed ratio on combustion characteristics for different SOI timings (1500rpm)

경우, 예혼합된 가솔린 연료의 착화원이 되는 디젤 연료의 양이 너무 적어서 예혼합 연료의 대부분이 연소 되지 못하고 배출되기 때문으로 보인다. 또한 예혼합율이 증가할수록 기존의 디젤 엔진에서의 확산연소구간(mixing controlled combustion phase) 중 후연소구간에 해당하는 열발생율은 감소하는 경향을 볼 수 있다.

일반적으로 디젤 엔진의 연소 과정 중에 발생한 soot는 화염으로의 재유입을 거쳐 다시 연소되지만, 후연소기간이 길어지면 이 때 발생한 soot는 피스톤의 팽창에 의해 연소실 온도가 급격히 냉각됨에 따라 재연소 되지 못하고 그대로 배출된다고 알려져 있다.³⁾ 따라서 Fig. 2에서와 같이 MR의 증가에 따라 soot의 배출이 감소하는 원인은 확산연소의 후연구간의 감소에 따른 결과임을 알 수 있으며, 다른 한 가지는 MR이 증가할수록 예혼합 연료에 의해 연소

실 내의 공연비 분포가 균일해져서 soot가 주로 발생하는 화염표면의 농후한 공연비 영역이 감소하였기 때문으로 설명될 수 있다.

Fig. 3(a)의 MR=0에서 0.6으로 증가한 경우, 예혼합 연료로 인하여 발생하는 저온연소반응으로 인한 열발생으로 인하여 연소시작 시점과 최고열발생 위치가 다소 앞당겨지고 있으며, 최고 연소압력이 증가하는 것을 알 수 있다.

MR=0.8인 경우는 디젤 연료에 의한 예혼합 연소 직후에 예혼합 가솔린 연료의 연소가 일어나는 것을 열발생율을 통하여 확인할 수 있으며, 열발생이 짧은 기간 동안에 급격히 발생함을 알 수 있다. 이러한 연소 특성은 앞서의 Fig. 2에서 MR=0.8일 때의 NO_x 발생량 증가를 설명해 주는 것이며, 이 경우에 직분된 디젤 예혼합 연소와 가솔린 HCCI 연소가 동시에 일어남으로 인하여 NO_x 발생이 증가한 것으로 설명될 수 있다.

디젤 분사시기를 BTDC 9°로 앞당긴 경우에는 TDC 이전에 연소가 일어나서 연소실 압력이 Fig. 3의 (a)보다 전반적으로 상승하는 경향을 보이고 있으며 MR이 증가할수록 직접 분사되는 디젤 연료의 양이 감소함에도 불구하고 기존 디젤 엔진의 예혼합연소 구간에 해당하는 부분에서 열발생율의 최고 값이 증가하는 경향을 보인다. 이것은 디젤 연료의 분사시기가 -3°에서 -9°로 앞당겨짐에 따라 연소실의 온도, 압력이 상승하여 예혼합 연료(가솔린)의 연소가 촉진되었기 때문으로 보인다. 그렇지만 MR=0.9일 때의 열발생율에서는 예혼합된 가솔린 혼합기의 당량비가 높아져서 직분 디젤연료의 연소 이후에 가솔린이 연소되는 2단 연소의 특성을 보이고 있다.

Fig. 4는 예혼합율에 따른 엔진 성능 특성과 미연 가스 배출량의 관계를 나타낸 것이다. 엔진의 출력을 나타낼 수 있는 IMEP(Indicated Mean Effective Pressure)는 예혼합율이 증가할수록 대체적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며 직분 디젤의 분사시기인 SOI_{diesel}가 -9°인 경우가 SOI_{diesel} = -3°인 경우보다 IMEP가 다소 큰 것으로 보아 디젤 연료를 조기에 분사하는 것이 예혼합된 가솔린 연료의 연소를 촉진하는 데에 효과적임을 알 수 있다.

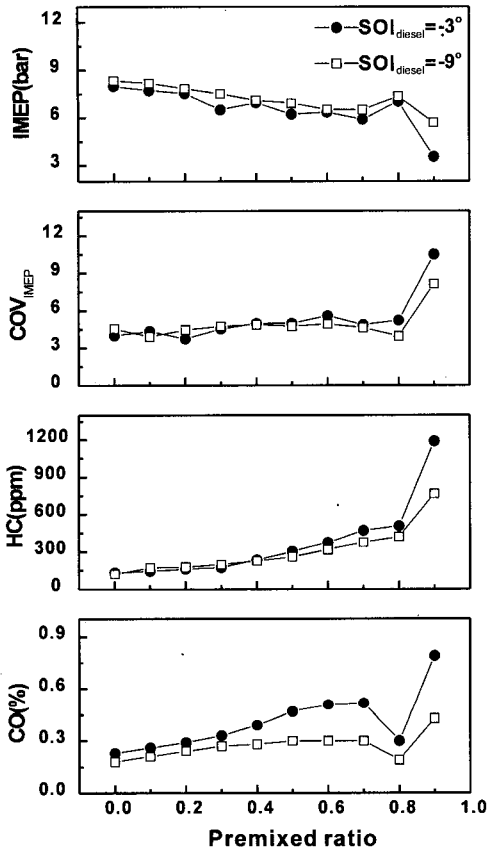


Fig. 4 Effect of premixed ratio on the engine performance and incomplete products of combustion

COV(Coefficient Of Variance)는 물리량에 대한 변동계수를 나타내는 것으로 본 연구에서는 IMEP에 대한 COV를 연소변동율에 대한 지표로 사용하였다. COV_{IMEP}는 예혼합율의 증가에 따라 대체적으로 커지는 경향을 보이다가 MR = 0.9에서 급격히 커지는 것으로 보아 이 구간에서 연소가 불안정해 짐을 알 수 있다. 이것은 착화원이 되는 디젤이 충분하지 못해 연소실의 온도와 압력이 충분히 상승하지 못하여 예혼합 연료가 연소 되지 못한 결과로 생각된다. SOI_{diesel} = -3°인 경우, MR = 0.8에서 IMEP가 증가하였다가 MR = 0.9가 되면 다시 감소하는 경향을 보이는 데 이것은 연소현상의 개선에 의한 것이 아니라 착화원의 부족으로 인하여 공급된 예혼합기가 거의 연소가 되지 못하고 배출되어 엔진이 DC 동력계에 의존하여 구동되면서 발생한 것이다.

SOI_{diesel} = -9°인 경우에는 SOI_{diesel} = -3°인 경우와

달리, MR=0.8인 지점에서도 연소가 안정적으로 일어나는 것으로 보이며, 또한 HC, CO배출물의 양도 분사시기가 BTDC 9°일 때가 적게 배출되고 있다. 이것은 앞서서 설명한 바와 같이 조기에 디젤 연료를 분사시키면 디젤 연료의 착화에 의해 연소실의 온도와 압력이 충분히 상승하여 예혼합 연료의 연소가 촉진되는 결과로 보인다.

HCCI 연소는 연소온도가 비교적 낮고 예혼합연소이기 때문에 피스톤 벽면 및 크레비스 체적에서의 예혼합된 가솔린 연료가 연소되지 않는 영향으로 다량의 HC와 CO가 배출되는 특징을 가지고 있으며, 본 실험결과에서도 MR이 증가할수록 그 발생량은 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 Fig. 3 연소 특성에서도 알 수 있는 바와 같이 MR=0.8이상일 경우 불안정한 연소로 인하여 미연소 배출물의 양이 급격히 증가하고 있다.

3.2 직접분사 디젤 분사시기의 영향

예혼합된 가솔린 연료의 HCCI 연소는 연소실 내에서의 온도 및 압력의 결과에 많은 영향을 받게 된다. 따라서 HCCI 디젤 엔진에서는 예혼합된 연료의 착화를 촉진할 수 있는 디젤 연료의 분사시기 변화에 따른 엔진의 성능 및 배기 특성을 연구하여 최적의 분사시기를 연구할 필요가 있다.

Fig. 5는 이러한 디젤 연료의 분사시기에 따른 영향을 알아보기 위하여, MR=0.6으로 일정하게 한 경우에 대하여 직접분사되는 디젤 연료의 분사시기를 ATDC -24°에서 TDC까지 3° 간격으로 변화시켜가면서 엔진의 성능 및 배기 특성을 나타낸 것이며, 이를 통상적인 커먼레일 디젤 엔진의 특성과 비교하여 나타낸 것이다. 일반적인 디젤 연소의 경우, 분사시기를 지연시킬수록 NO_x는 감소하지만 soot는 증가하는 trade-off 관계를 나타내고 있으며, HCCI 디젤 연소의 경우에도 분사시기에 따른 trade-off 관계를 나타내고 있지만 배출량의 절대량에 있어서는 크게 저감되고 있음을 알 수 있다. 연소변동율을 나타내는 COV_{IMEP}의 값은 HCCI 디젤 연소의 경우가 통상적인 디젤 연소의 경우보다 다소 높게 나타나고 있다. 또한, 디젤 연료의 분사시기가 진각 될수록 COV_{IMEP}값이 작아지고 있는 경향을 보이고 있다.

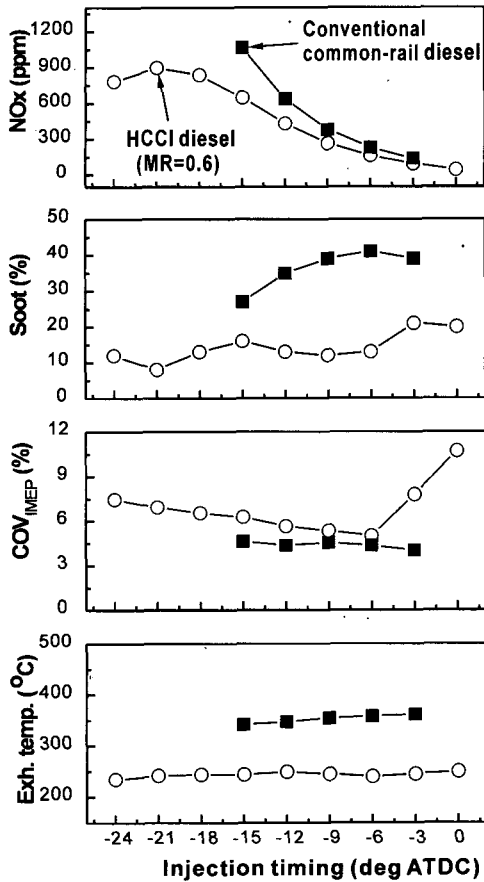


Fig. 5 Effect of diesel injection timing on the characteristics of performance and exhaust emission (MR=0.6)

이것은 디젤 연료를 조기에 분사하면, 디젤 연료의 착화가 빨라져서 예혼합기의 연소를 촉진시켜 보다 안정된 연소가 이루어진 결과로 보인다. 그러나 분사시기가 0°(TDC) 근처로 지각됨에 따라 연소가 TDC 이후의 팽창행정 중에 일어나게 되어 COV_{IMEP}가 커지는 경향을 보이고 있다.

통상적인 디젤 연소의 경우에는 분사시기가 늦춰질수록 배기가스의 온도가 높아지는 경향을 보이고 있으나 HCCI 디젤 연소의 경우에는 디젤 분사시기의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났으며, HCCI 연소의 경우가 일반 디젤 연소의 경우보다 배기가스의 온도가 100°C 정도 낮은 것으로 나타났으며 이로 인한 NO_x의 배출량이 일반적인 디젤 연소때 보다 작은 것을 알 수 있다.

4. 결론

균일 예혼합 압축 착화 연소 시스템을 커먼 레일 디젤 엔진에 적용하여 예혼합을 및 분사시기 등의 운전 조건을 변화시키면서 연소 및 배기 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 예혼합율이 증가할수록 soot의 발생량이 급격히 감소하는 경향을 보였으며, 연소실로 공급되는 디젤 연료의 분사시기를 지연시킬수록 NO_x의 발생량은 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) MR=0.7까지 증가시키면 예혼합기의 실화에 의하여 IMEP가 선형적으로 감소하면서 CO의 발생이 증가하는 경향을 보였으나, MR=0.8에서는 예혼합기의 당량비 증가의 영향으로 인하여 일시적으로 IMEP가 증가하고 CO의 발생이 감소되는 구간이 나타났다.
- 3) 가솔린 연료의 예혼합은 통상적인 디젤 엔진의 확산연소구간(mixing controlled combustion phase)을 감소시키는 결과를 보였으며, 이를 통하여 soot 배출의 저감에 효과적임을 알 수 있다.
- 4) 직분사 되는 디젤 연료의 분사시기가 지각될수록 NO_x의 배출량은 감소하고, soot 발생량은 다소 증가하나 통상적인 디젤 연소의 경우보다 크게 감소하였다.

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, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications," SAE 1999-01-3682, 1999.
- 2) M. Christensen and B. Johansson, "Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition," SAE 982454, 1998.
- 3) S. Simescu, S. B. Fiveland and L. G. Dodge, "An Experimental Investigation of PCCI-DI Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine,"

- SAE 2003-01-0345, 2003.
- 4) S. J. Hwang, M. Y. Kim, D. S. Kim, K. H. Lee and C. S. Lee, "The Combustion and Exhaust Emission Characteristics of HCCI Diesel Engine with Premixing Property," Autumn Conference of Proceedings, KSAE, pp.308-315, 2003.
 - 5) C. S. Lee, K. H. Lee, S. K. Heo and 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.
 - 6) C. S. Lee, M. Y. Kim, S. J. Hwang and D. S. Kim "Effect of Operation on the Characteristics of Combustion and Exhaust Emission in a Gasoline Fueled HCCI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.48-54, 2004.
 - 7) 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.