

## 예혼합 연료에 따른 균일 예혼합 압축 착화 엔진의 연소특성

황진우<sup>1)</sup> · 김대식<sup>2)</sup> · 류열<sup>3)</sup> · 이기형<sup>4)</sup> · 이창식<sup>\*4)</sup>

국립환경연구원 자동차 공해연구소<sup>1)</sup> · (주)파라다이스 산업<sup>2)</sup> · 주식회사 두원정공<sup>3)</sup> · 한양대학교 기계공학부<sup>\*4)</sup>

## Effect of Premixed Fuel on the Combustion Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Engine

Jinwoo Hwang<sup>1)</sup> · Daesik Kim<sup>2)</sup> · Youl Rhyu<sup>3)</sup> · Kihyung Lee<sup>4)</sup> · Changsik Lee<sup>\*4)</sup>

<sup>1)</sup>Motor Vehicle Emission Research Laboratory, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Kyungseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-170, Korea

<sup>2)</sup>Paradise Industry Co. Ltd., 65-2 Chuneui-dong, Wonmi-gu, Bucheon, Gyeonggi-do 420-858, Korea

<sup>3)</sup>Doowon Precision Industry, 180 Gunji-ri, Daeduk-myeon, Anseong, Gyeonggi-do 456-830, Korea

<sup>4)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 10 May 2002 / Accepted 31 October 2002)

**Abstract** : The purpose of this work is to investigate the effect of premixed fuel on the reduction of exhaust emissions in premixed charge compression ignition engine. The premixed fuel is injected into the intake manifold to form homogeneous pre-mixture in the combustion chamber. The pre-mixture is ignited by a small amount of diesel fuel directly injected into the cylinder. In the case of gasoline as a premixed fuel of the engine, NO<sub>x</sub> and smoke concentration of exhaust emissions were reduced compared with the conventional diesel engine. But in the event of diesel fuel for premixed fuel, the rate of smoke reduction was small compared with the case of gasoline as a premixed fuel. HC and CO emissions were increased at high premixed ratio in the case of two premixed fuels. The combustion characteristics of the engine such as the combustion pressure, the rate of heat release, and other characteristics are compared.

**Key words** : PCCI (Premixed Charge Compression Ignition 예혼합 압축 착화), Premixed ratio(예혼합비), Combustion characteristics(연소 특성)

### Nomenclature

MR : mixing ratio

### Subscripts

p : premixed fuel mass

D : direct injected fuel mass

l<sub>p</sub> : lower heating value of premixed fuel

l<sub>d</sub> : lower heating value of direct injected fuel

### 1. 서론

디젤 엔진으로부터 배출되는 다량의 입자상 물질과 질소산화물의 동시 저감을 위하여 착화시기까지 연소실 내를 공간적으로 보다 균일한 예혼합기가 형성되도록 예혼합기를 공급하는 균일 예혼합 압축 착화 디젤 기관에 대한 다양한 연구가 현재 진행되고 있다.<sup>1-4)</sup>

이와 같이 기존의 디젤 엔진에 균일 희박 예혼합기가 형성되도록 예혼합 연료 분사 시스템을 부가하여 균일 희박 예혼합기를 형성시킴과 동시에 자

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

기 착화를 위한 점화원으로서 소량의 연료를 직접 분사하여 압축 착화시킴으로써 실린더 전체의 균일 예혼합기 연소에 의한 NO<sub>x</sub> 생성 억제와 입자상 물질의 저감을 동시에 이룰 수 있는 새로운 연소 기술이 균일 예혼합 압축 착화 방식이다.

지금까지 수행된 2종 연료 분사 및 디젤 연료만에 의한 예혼합 압축 착화 디젤 기관의 연구<sup>5,6)</sup>를 바탕으로 본 연구에서는 가솔린을 예혼합 연료로 사용한 경우와 디젤 연료를 예혼합 연료로 사용한 경우의 예혼합 착화 연소 특성을 중심으로 실험한 것이다.

따라서 본 연구에서는 균일 예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 예혼합 연료의 종류에 따른 연소 및 배기 특성을 규명하기 위하여 단기통 디젤 엔진에 가솔린과 디젤을 각각 예혼합 연료로 사용하는 예혼합기 공급장치를 부가하여 엔진의 연소 및 배기 특성을 실험적으로 구하고 그 결과를 기존의 직분식 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성과 비교하여 예혼합 연료의 종류 및 공급 조건에 따른 예혼합 압축 착화 디젤 기관의 연소 성능을 구하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험에 적용한 단기통 기관은 배기량이 673cc인 직립형 4사이클 수냉식 디젤 기관으로서 연소실 형식은 직접 분사식 기관을 적용하였다.

Table 1은 실험용 기관의 주요 제원을 나타낸 것이다.

Fig. 1은 실험 장치의 계통도를 나타낸 것이다. 실험 장치는 엔진과 동력계 시스템, 예혼합기 공급 시스템, 연료 제어 장치, 연소 해석 장치로 구성하였다. 동력계는 최대 엔진 흡수 마력이 75kW인 와전류식 동력계를 사용하였고, 기관의 연소 해석 장치는 압력 변환기로부터의 압력 신호와 캠축에 연결된 엔코더로부터의 펄스 신호를 받아 신호 처리하여 가스의 압력, 열발생 등을 구할 수 있도록 하였다.

예혼합기 공급 시스템은 예혼합용 가솔린 인젝터를 흡기관에 설치하여 예혼합기가 실린더 내로 흡입되는 구조로 제작하였고, 흡기 온도를 일정하게

Table 1 Specification of test engine

| Item               | Specification         |
|--------------------|-----------------------|
| Engine type        | 4 cycle diesel engine |
| Combustion chamber | Direct injection      |
| Output(PS)         | 10                    |
| Engine speed (rpm) | 1,200                 |
| Number of cylinder | 1                     |
| Bore×Stroke (mm)   | 95×95                 |
| Compression ratio  | 18                    |

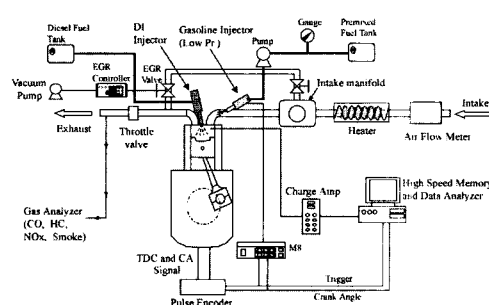


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

제어하기 위하여 흡기관에는 흡기 유동을 방해하지 않는 고출력 원통형 흡기 가열기를 설치하였다. 그리고 흡기 가열로 인한 흡입 유량 변화와 EGR율을 알기 위해 흡기 가열기 전에 열선식 디지털 공기 유량계를 설치하였다. 또한 기관으로부터 배출되는 배기 가스의 분석을 위하여 NO<sub>x</sub> 분석기(Best, BCL-511)와 매연 측정기(DBC-1000), 그리고 HC, CO 분석기(Horiba, MEXA-554JK) 등이 사용되었다. 측정은 1/4 부하, 1/2 부하에서 예혼합 연료로 가솔린을 사용했을 때와 디젤을 사용했을 때를 각각 실시하였으며 동일 조건에서 측정하여 그 평균값을 취하였다.

### 2.2 실험방법

예혼합용 연료와 점화원으로서 연소실에 직접 분사되는 디젤 연료의 비를 나타내기 위해 예혼합비(MR)를 정의하고 다음의 식과 같이 나타내었다.

$$MR = \frac{m_p H_{L_i}}{m_p H_{L_i} + m_d H_{L_d}} \quad (1)$$

여기서,  $m_p$ 는 예혼합 연료의 분사량,  $m_d$ 는 직분 연료의 분사량,  $H_p$ 는 예혼합 연료의 저발열량이고,  $H_d$ 는 직분 연료의 저발열량이다.

본 연구에서 기관의 회전 속도는 1200rpm으로 운전하였으며 디젤 연료를 예혼합 연료로 사용할 경우에는 예혼합기의 미립화를 위하여 흡입 공기의 온도는 120℃로 가열하였다. 또한 예혼합비는 0에서 0.8까지 변화시키면서 압력 및 열발생을 등의 연소 특성과 NO<sub>x</sub>와 매연 및 HC와 CO 등의 배기 특성을 동시에 측정하여 각각의 결과를 비교 분석하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 가솔린 예혼합 연료의 연소 해석

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 1/4 부하와 1/2 부하 조건에서 가솔린을 예혼합 연료로 사용하는 단기통 직분식 디젤 기관의 예혼합비에 따른 연소 압력과 열발

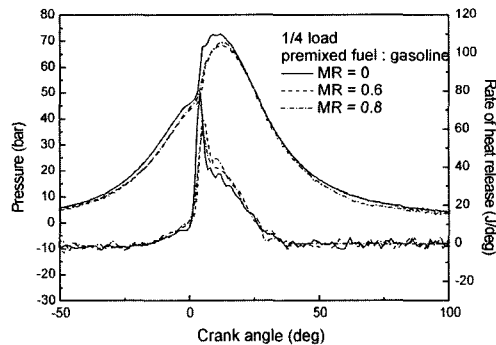


Fig. 2 Comparison of pressure and rate of heat releases with gasoline premixed ratio at 1/4 load

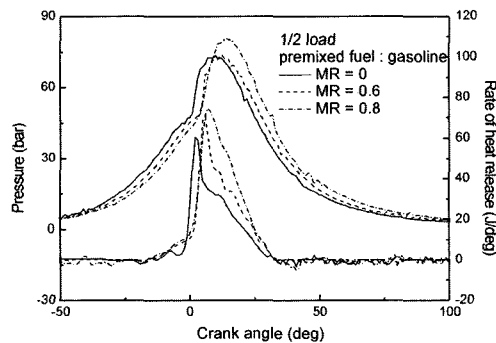


Fig. 3 Comparison of pressure and rate of heat releases with gasoline premixed ratio at 1/2 load

생율을 기존의 디젤기관의 결과와 비교한 것이다.

1/4 부하의 경우 예혼합 비율이 증가함에 따라 점화원으로써 사용되는 디젤 연료의 감소로 인하여 착화원의 부족으로부터 착화시기가 다소 지연되고 이에 따라 최고 연소 압력도 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 열발생을 결과에서 알 수 있는 바와 같이 착화전 연소실 내의 균일한 예혼합기의 형성으로부터 예혼합비가 0인 기존의 디젤 기관에서 보였던 급격한 열발생율은 조금씩 감소하여 완만한 열발생을 곡선을 나타내었다. 이러한 경향은 Fig. 3의 1/2 부하 조건에서 더욱 두드러진다. 이 조건에서 높은 예혼합비에서는 거의 예혼합 화염과 확산 화염 구간의 경계가 나타나지 않고, 가솔린 기관에서의 열발생을 곡선과 유사한 형태를 보였다. 또한 최고 압력은 고부하에서는 상대적으로 디젤 분사량이 증가하므로 충분한 착화원의 확보와 예혼합기의 형성으로부터 예혼합시 기존의 디젤 엔진의 경우보다 오히려 증가하는 경향을 나타내었다.<sup>1)</sup>

#### 3.2 디젤예혼합 연료의 해석

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 1/4 부하와 1/2 부하에서 디젤 연료를 예혼합 연료로 사용하는 경우의 예혼합비에 따른 연소 압력과 열발생율을 기존의 디젤 기관의 결과와 비교한 것이다. 이들 결과에서 보는 바와 같이 1/4 부하와 1/2 부하에서 모두 가솔린을 예혼합 연료로 사용하는 경우와 압력 곡선의 경향은 거의 일치하지만 열발생율 곡선은 상당한 차이를 보이고 있다. 열발생율 곡선으로부터 디젤 예혼합 기관의 경우 2개의 연소 과정으로 구분되어지고, 직분 연료의 착화에 의해 발생하는 2차 연소 과정에 앞서 BTDC 20° 근처에서 예혼합 연료의 자발화에 의한 1차 연소 현상을 발견할 수 있는데, 이는 Suzuki<sup>5)</sup> 등의 연구 결과와 유사한 결과이다. 이러한 1차 연소에 의한 열발생량은 예혼합비의 증가에 따라 더욱 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 기존의 디젤 엔진에서의 착화 지연 이후의 예혼합 연소 구간에서의 급격한 열발생율의 증가와 달리 열발생율의 증가가 구분되면서 그 상승률도 저하하는 것으로 나타났다.

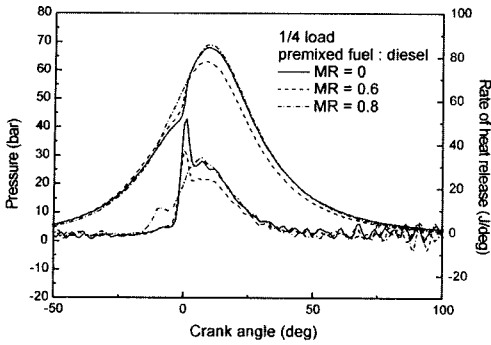


Fig. 4 Comparison of pressure and rate of heat release with diesel premixed ratio at 1/4 load

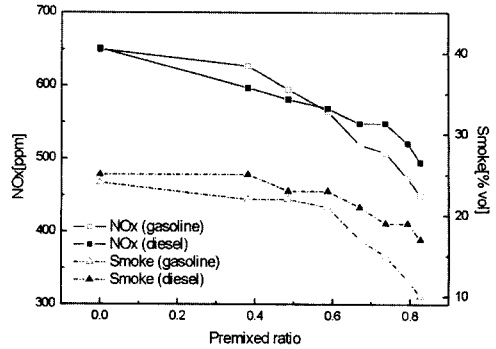


Fig. 6 Effect of premixed ratio on NOx and smoke emission at 1/4 load condition

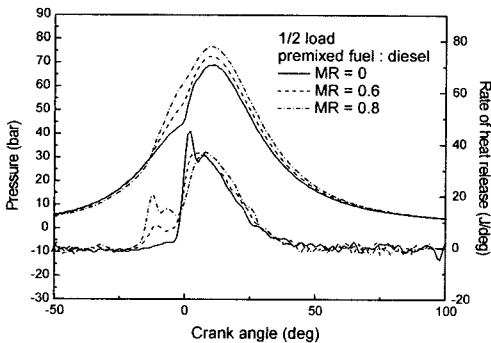


Fig. 5 Comparison of pressure and rate of heat release with diesel premixed ratio at 1/2 load

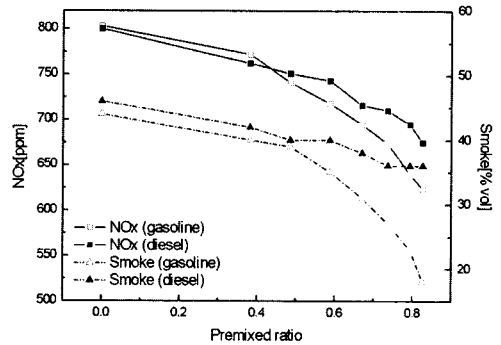


Fig. 7 Effect of premixed ratio on NOx and smoke emission at 1/2 load condition

### 3.3 배기 가스 분석

Fig. 6과 Fig. 7은 각 부하 조건에서 두가지 예혼합 연료에 대한 예혼합비의 변화에 따른 배기 가스 중의 NO<sub>x</sub>와 매연 입자 농도의 측정 결과를 도시한 것이다.

NO<sub>x</sub>는 가솔린을 예혼합 연료로 사용했을 경우와 디젤 연료를 예혼합 연료로 사용했을 경우 모두에서 예혼합비가 증가함에 따라 현저하게 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 앞서서도 지적한 바와 같이, 실린더 전체의 희박 균일 예혼합기 연소에 의해 NO<sub>x</sub> 생성이 억제되고 있음을 의미한다.

매연 농도 역시 두 가지 예혼합 연료 모두에서 예혼합 비율이 증가함에 따라 저감되었는데, 디젤 연료를 예혼합 연료로 사용했을 경우 가솔린을 예혼합 연료로 사용했을 경우보다 감소되는 기울기가 더 완만해지는 것으로 나타났다. 이는 기화 온도가

낮은 디젤 연료를 저압 인젝터로 3bar의 압력으로 분사함에 따라 흡기관 도중에 미립화가 잘 이루어지지 않아 예혼합 비율의 증가에 따라 혼합기의 액적의 불균일성이 개선되지 않기 때문으로 사료된다.

디젤 연료의 미립화에 관여하는 인자 즉 분사압, 흡기 온도, 흡기압 등을 최적으로 적용시킨다면 이 불균일 혼합이 개선되어 예혼합 압축 착화 디젤 엔진은 기존의 디젤 엔진이 가지고 있는 배출 가스 중의 질소 산화물 뿐만 아니라 입자상 물질 또한 더욱 저감시킬 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 다른 예혼합 연료의 경우에서 예혼합 비율에 따른 HC와 CO 배출량의 관계를 비교한 것이다. 두 가지 경우에서 예혼합비가 증가함에 따라 HC와 CO의 배출량이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 증가 요인으로는 다량의 예혼합 연료 분사로 인한 미연 가스의 배출 및 기존의 디젤 엔

예혼합 연료에 따른 균일 예혼합 압축 착화 엔진의 연소특성

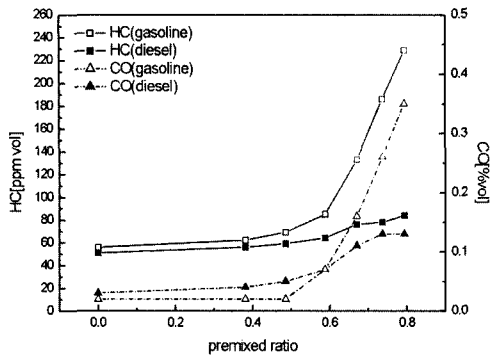


Fig. 8 Effect of premixed ratio on HC and CO emission at 1/4 load condition

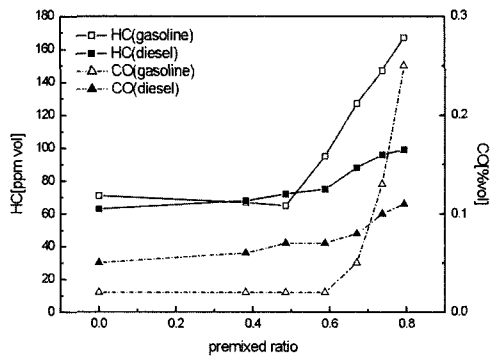


Fig. 9 Effect of premixed ratio on HC and CO emission at 1/2 load condition

진에 비하여 농후한 공연비 조건에서의 불완전 연소 등에서 기인한 것으로 분석된다.

HC 배출 농도의 경우 낮은 예혼합 비율에서는 두 예혼합 연료에서 모두 비슷한 배출 농도를 보이다가 예혼합 비율이 0.5 이상으로 증가될 경우 가솔린을 예혼합 연료로서 사용할 때가 디젤의 경우보다 더욱 급격한 증가를 보이는 것으로 나타났다.

CO의 배출 농도에서도 이와 비슷한 경향을 보였는데, 초기 낮은 예혼합 비율에서는 예혼합 연료로서 디젤을 사용하였을 때, 가솔린의 경우보다 약간 더 농후한 CO의 농도가 측정되었으나, 예혼합 비율이 0.6 이상으로 증가시킬 경우 가솔린을 예혼합 연료로 사용할 때 더욱 급격한 증가율을 보였다. 이는 디젤 예혼합 경우에 미립화를 위하여 흡기 온도를 100°C 이상으로 유지시킨 결과 실린더 내에서 연료의 소염층이 적어지고 가열에 의한 벽류가 감소하

여, 연소실 내에서 불완전 연소 및 실화 등이 적어지기 때문인 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

직접 분사식 디젤 기관에 예혼합기 공급 시스템을 적용한 예혼합 압축 착화 디젤 기관의 연소 및 배기 특성을 실험적으로 연구한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가솔린을 예혼합 연료로 사용하는 경우에 예혼합 비율의 변화에 따른 연소실 내 압력의 변화는 작았으나, 예혼합비의 증가에 따라 1/4 부하에서는 열발생율의 최고치가 감소하고, 1/2 부하에서는 열발생율의 최고치는 증가하지만 발생시기가 늦어져서 가솔린 기관의 연소 형태와 유사한 패턴으로 나타났다.

2) 디젤 연료를 예혼합 연료로 사용하는 경우에는 높은 예혼합 비율에서 직분 연료의 분사 전 예혼합 연료의 자발화로 인하여 주연소 기간의 급격한 온도 상승을 억제할 수 있는 것으로 나타났다.

3) 배출 가스중의 NO<sub>x</sub>, 스모크 배출 농도는 예혼합비가 증가함에 따라 두 예혼합 연료 모두감소하는 경향을 나타내었다.

4) HC와 CO 농도 측정 결과, 더 높은 흡기 온도의 가열로 인하여 디젤 예혼합시 급격한 HC와 CO 농도의 증가를 막을 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 청정생산기술사업(99-1-K-93)과 BK21의 연구지원에 의하여 수행된 연구의 일부로써 연구를 지원하여 주신 관계 기관에 감사드립니다.

#### References

- 1) Chang Sik Lee, Ki Hyung Lee, Dae Sik Kim, Si Woong Jang, "Combustion Characteristics of Homogeneous Charge Combustion Diesel Engine with Load Condition," Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.10, No.2, p.9, 2002.
- 2) Chang Sik Lee, Ki Hyung Lee, Dae Sik Kim, Seong

- Geun Heo, "Combustion Characteristics of Premixed Charge Combustion Ignition Diesel Engine with EGR System," Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.10, No.2, p.66, 2002.
- 3) K. Nakagome, N. Shimazaki, K. Niimura, "Combustion and Emission Characteristics of Premixed Lean Diesel Combustion Engine," SP-1246, p.163, 1997.
- 4) T. W. Ryan III, T. J. Callahan, "Homogeneous Charge Compression Ignition of Diesel Fuel," SAE 961160, 1996.
- 5) Dae Sik Kim, Ki Hyung Lee, Chang Sik 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.
- 6) Chang Sik Lee, Ki Hyung Lee, Dae Sik Kim, "Effect of Premixed Ratio on Nitric Oxide Emission in Diesel Engine," SETC Technical Papers 2001011807/4226, 2001.
- 7) H. Suzuki, N. Koike, M. Odaka, "Combustion Control Method of Homogeneous Charge Diesel Engines." SAE 980509, 1998.