

예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 연소 특성

Combustion Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Diesel Engine

이 창 식*, 이 기 형*, 김 대 식**, 장 시 용**
C. S. Lee, K. H. Lee, D. S. Kim, S. W. Chang

ABSTRACT

A homogeneous premixed charge compression ignition engine has been experimentally studied for the reduction exhaust emissions of diesel engines. In this study, the gasoline fuel is injected into the intake manifold to form homogeneous pre-mixture in the combustion chamber and then this pre-mixture is ignited by small amount of diesel fuel directly injected into the cylinder. In the premixed charge compression ignition engine, NO_x and smoke concentration of the exhaust emissions were reduced simultaneously as compared with the conventional diesel engine. The combustion characteristics of premixed charged diesel engine such as the power output, the rate of heat release, and the other characteristics are discussed.

주요기술용어 : Premixed charge compression combustion(예혼합 압축 착화 디젤 연소), Premixed ratio(예혼합비), Combustion characteristics(연소 특성), Emission characteristics(배출 특성)

1. 서 론

지금까지 디젤 엔진에서는 입자상물질(P.M.)과 질소산화물(NO_x)의 저감을 위하여 고압 연료 분사 기술과 분사 시기의 지연, 미세 분공 노즐의 사용 등에 의한 여러 가지 방법이 적용되어 왔다.¹⁾ 그러나 이러한 여러 가지 노력과 대책에도 불구하고, NO_x 농도는 크게 저감되지 않는 것으로 보고되고 있다. 이러한 현상의 원인은 연소실 내에 희박한 균일 혼합기가 형성되지 못하고 국부적으로 농후한 혼합기 생성에 따른 연소에 의하여 질소 화합물이 생성되기 때문이다.³⁾ 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 기존의 디젤 엔

진에 균일 희박 예혼합기가 형성되도록 예혼합 연료 분사 시스템을 부가하여 연소실내에 균일 희박 예혼합기를 형성시킴과 동시에 자기 착화를 위한 점화원으로서 소량의 디젤 연료를 직접 분사하여 압축 착화시킴으로써 실린더 전체의 희박 연소에 의한 NO_x 생성 억제와 예혼합 연소에 의한 입자상 물질의 저감을 동시에 이룰 수 있는 새로운 연소 기술⁴⁾이 균일 예혼합 압축 착화 방식이다.

따라서, 본 연구에서는 균일 예혼합 압축착화 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성을 규명하기 위하여 단기통 디젤 엔진에 예혼합기 공급 장치를 장착한 예혼합 압축 착화 기관을 구성하고, 엔진의 연소 및 배기 특성을 실험적으로 구하여 그 결과를 기존의 직분식 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성

* 회원, 한양대학교 기계공학부

** 회원, 한양대학교 기계공학과 대학원

을 비교하여 예혼합 압축 착화 디젤 기관의 연소 성능특성을 구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험에 사용한 기관은 단기통 디젤 엔진을 기본으로 하는 Table 1과 같은 제원을 갖는 압축비 19의 디젤 기관을 사용하였다.

Fig. 1은 실험 장치의 계통도를 나타낸 것이다. 실험 장치는 엔진과 동력계 시스템, 예혼합기 공급 시스템, 연료 및 냉각수 제어 장치, 연소 해석 장치로 구성하였다. 기관 동력계 시스템은 와전류식 전기 동력계와 동력 제어 시스템으로 구성된다. 동력계는 150kW와전류식 동력계를 사용하였고, 기관의 연소 해석 장치는 압력 변환기로

부터의 압력 신호와 크랭크축에 연결된 엔코더로부터의 펄스 신호를 받아 신호 처리하여 가스의 압력, 열발생률 등을 해석할 수 있도록 하였다.

예혼합기 공급 시스템은 흡기관에 예혼합용 가솔린 인젝터를 설치하여 엔진의 TDC센서로부터 구동 신호를 받아 연료를 분사하여 실린더 내로 흡입되는 구조로 제작하였고, 흡기 온도를 일정하게 제어하기 위하여 흡기관에는 흡기 가열기를 설치하였다. 예혼합기 공급을 위한 연료 공급 시스템은 디젤 연료 공급 장치와 예혼합용 연료 공급 장치로 구성하며 이들의 연료 공급량은 각각 디젤 연료 분사량 제어 기구와 가솔린 인젝터 구동 회로로부터 보내지는 분사 신호에 의하여 제어하도록 구성하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에서 예혼합용 연료 분사에 적용한 인젝터는 핀틀형으로 분사압력은 3bar로 유지시켰으며, 또한 디젤연료는 연료펌프를 사용하여 18 MPa의 압력으로 연소실내로 직접 분사하였다. 인젝터의 부착 위치는 기초실험을 토대로 하여 흡기 밸브로부터 400mm 상부에 부착하였으며, 흡기 밸브와 인젝터 사이에는 흡기관 온도를 일정하게 유지시킬 수 있도록 가열 장치를 설치하여 흡입공기의 온도를 50°C로 일정하게 유지하였다.

예혼합 비율은 공급된 총 연료의 열발생량(Q) 중 예혼합 연료의 열발생량(Q_g)이 차지하는 비율을 백분율로 나타내었다. 예혼합용 연료인 가솔린과 점화원으로서 연소실에 직접 분사되는 디젤 연료의 열량비를 예혼합비(MR)로 정의하고 다음과 같이 나타내었다.

$$MR = \frac{Q_g}{Q_g + Q_d} \tag{1}$$

$$Q_g = m_g LHV_g$$

$$Q_d = m_d LHV_d$$

여기서, m_g 는 예혼합용 가솔린 분사량, m_d 는 디젤 분사량, LHV_g 는 가솔린의 저발열량이고, LHV_d 는 디젤 연료의 저발열량이다.

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Type	4 cycle single cylinder 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	19

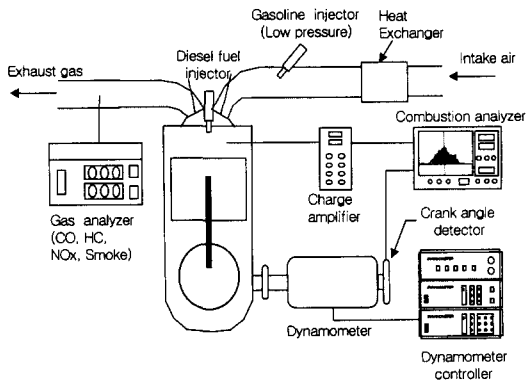


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2 Experimental conditions

Fuel	Diesel
	Gasoline (premixed fuel)
Engine speed	1200rpm
Intake air temp.	50°C
Coolant temp.	80°C
Premixed fuel ratio	0, 40, 60, 85%
Engine load	no-load, 1/4-load, 1/2-load

본 연구에서는 예혼합비를 0%에서 85%까지 변화시키면서 압력, 열발생을 및 출력 등의 연소 특성과 NOx, Smoke, HC 및 CO 등의 배기 특성을 측정하여 기존의 직분식 디젤 엔진의 배출 특성과 비교하였다. 이상과 같은 실험 조건들은 정리하면 Table 2와 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소 해석 결과 및 고찰

Fig. 2와 3은 동일한 부하 조건에서 예혼합기 혼합 비율의 변화가 연소실 내의 가스 압력에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 무부하에서는 예혼합 연소가 디젤엔진의 경우보다 다소 낮은 연소압력을 나타내고 있으며, 최고 연소압력 발생시기 또한 크랭크각으

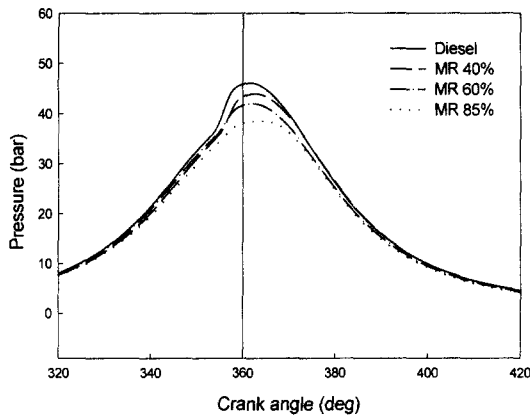


Fig. 2 Effect of premixed ratio on the combustion pressure at no load condition

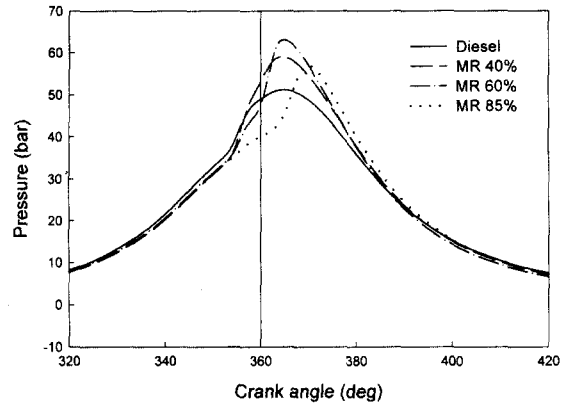


Fig. 3 Effect of premixed ratio on the combustion pressure at 1/2 load condition

로 2°~4° 정도 지연되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 1/2 부하일 때의 연소 압력을 나타낸 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 연소 압력은 무부하시의 압력 특성과는 다른 경향을 나타내었다. 예혼합기 공급의 경우가 베이스 엔진의 연소 압력보다 높은 값을 나타내었으며, 최고 연소 압력 발생시기는 예혼합 비율이 60%가 될 때까지는 비슷하지만, 예혼합 비율 85%인 경우에는 최고압력의 발생시기는 상사점 후 12° 정도로 나타났다.

Fig. 4와 5는 예혼합비의 증가에 따른 열발생을 변화를 도시한 것이다. Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 무부하의 경우 예혼합비의 증가에 따라

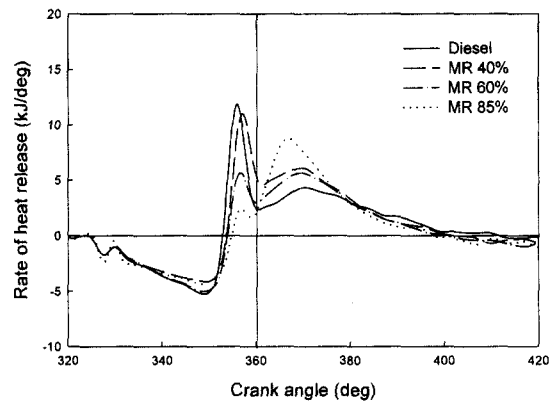


Fig. 4 Effect of premixed ratio on the rate of heat release at no load condition

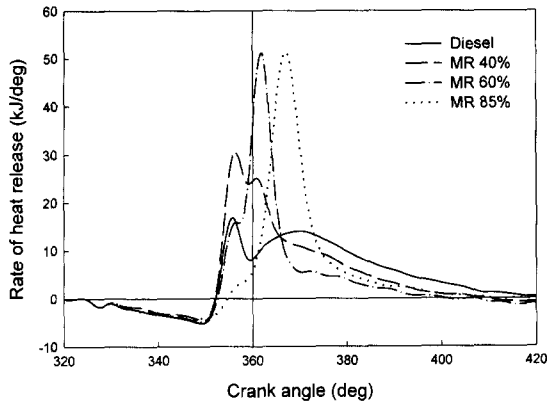


Fig. 5 Effect of premixed ratio on the rate of heat release at 1/2 load condition

급격 연소 구간의 비율이 감소하고 후연소 구간의 비율이 증가하는 경향을 보였다. 한편 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 1/2 부하의 경우에는 예혼합비가 증가함에 따라 급격 연소구간과 제어 및 후연구간의 경계가 거의 없어지게 된다. 이러한 예혼합비에 따른 열발생률 곡선의 변화는 예혼합비의 증가로 인하여 급격 연소구간에서의 연소가 약화되고 예혼합기의 연소가 주류를 이루기 때문인 것으로 판단된다. 또한 이러한 연소 패턴은 디젤 기관의 연소형태에서 가솔린 엔진의 예혼합기 연소형태로 변화되고 있음을 의미한다.

이러한 열발생률 결과로부터 연소 과정중의 연료가 소비된 비율을 나타내는 질량 연소율을 구하였고, 이 결과를 기초로 하여 연소과정을 초기 연소기간과 주 연소기간으로 나누어 각각의 연소특성을 해석하였다. 초기 연소기간은 화염 발달 기간(flame-development duration)으로서, 점화핵을 시작으로 실린더 안의 혼합기가 연소되기 시작하여 연료의 화학적 에너지가 방출되기 시작하는 기간이며, 보편적으로 실린더 안의 혼합기가 10%까지 연소될 때까지의 기간으로 정의된다. 이외에도 주연소기간은 급속 연소 기간(rapid-burning duration)으로서, 실린더 안의 연소상태가 난류 연소상태로 되면서 급격히 연소되어 혼합기질량의 대부분이 연소될 때까지의 기간을 나타내며 90%의 연소가 진행됨을 나타내는

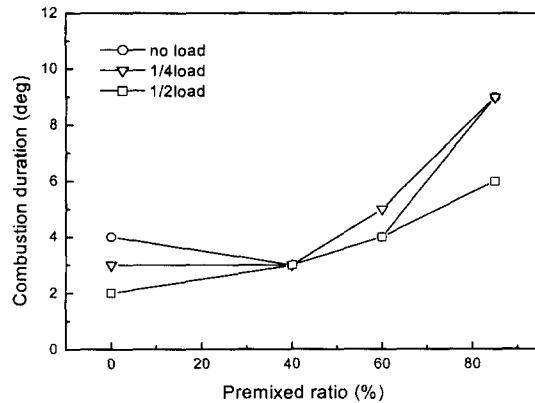


Fig. 6 Effect of premixed ratio on the flame development duration

구간이다.

Fig. 6은 부하와 예혼합 비율에 따른 초기화염 발달 기간을 나타내는 연소 기간의 변화를 나타낸 선도이다. 예혼합비가 증가하는 경우 직접 실린더 내로 분사되는 디젤 연료가 감소되고 이에 따라 초기 착화 지연 기간이 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

부하와 예혼합 비율의 변화에 따른 주연소기간의 변화를 구한 결과, 예혼합비가 증가함에 따라 주연소기간이 급격히 감소되는 경향을 나타내었다. 그리고 낮은 예혼합비에서는 부하에 따라서 연소기간이 상당한 차이를 보이고 있으나 높은 예혼합비에서는 주연소기간의 차이가 현저하게 저하하여 비슷한 연소 기간을 갖는 것으로 나타났다.

3.2 예혼합기 공급에 따른 배기 가스 분석

예혼합비에 따른 연소 특성의 변화에 따라 NOx와 Soot의 저감 효과를 확인하기 위하여 배출가스의 농도를 측정하여 비교하였다. 이와 아울러 예혼합 압축착화 디젤기관에서의 문제점으로 지적되는 연소의 불안정성으로 인한 HC와 CO 배출 농도도 측정하였다.

Fig. 7은 부하 변화에 따른 NOx의 배출량을 비교한 선도이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 각 부하에서 예혼합비가 증가함에 따라 NOx의 배

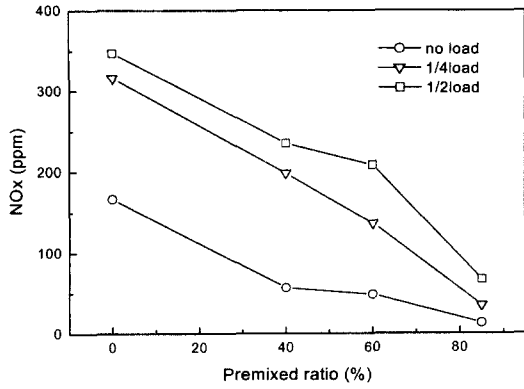


Fig. 7 Effect of the premixed ratio on NOx emission

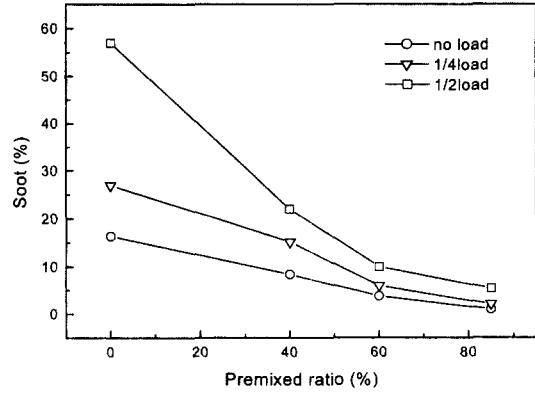


Fig. 8 Effect of premixed ratio on soot emission

출량이 현저하게 감소하는 경향을 보였으며, 특히 1/2 부하 상태의 예혼합 비율 85%에서는 1/10 수준으로 감소하였다. 이는 직접 분사되는 연료의 감소로 인하여 급격 연소구간에서의 열발생률의 감소에 따른 온도저하가 그 원인으로 판단된다. 이러한 경향은 Suzuki 등⁵⁾의 연구에서 나타난 변화의 경향과 비슷한 저하 경향으로 나타났다.

예혼합비에 따른 Soot의 발생량을 Fig. 8에 도시하였다. NOx의 경우와 같이 예혼합비가 증가함에 따라서 Soot 배출량 또한 급격히 감소하며 그 감소폭은 부하의 증가와 더불어 더욱 증가하는 경향을 보였다. 1/2 부하에서는 디젤 엔진의 배출량의 20% 수준으로 감소하였으며 이는 균일 예혼합 연소가 가능하였기 때문으로 판단된다. 예혼합 압축착화 디젤엔진의 HC와 CO 배출 농도를 확인하기 위하여 Fig. 9와 10에 HC와 CO 배출 농도를 측정하여 그 결과를 도시하였다.

디젤 연료만을 공급한 경우에는 부하에 상관없이 비슷한 배출량을 나타내고 있으나 예혼합 비율의 증가와 함께 부하별 HC의 배출량은 큰 차이를 나타내고 있다. 예혼합 비율이 85%인 경우 무부하에서 HC 배출량은 1/2 부하인 경우보다 1000ppm 이상 증가되는 경향을 나타내었다. 1/2 부하에서는 예혼합 연료의 연소를 위한 점화 원인으로 분사되는 연료가 무부하의 경우보다 많아서 농도가 저하하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 예혼합비에 따른 CO

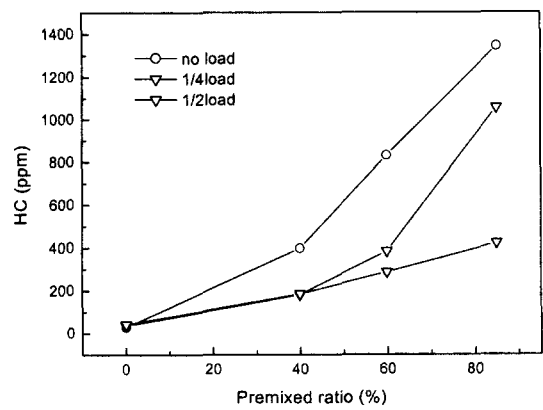


Fig. 9 Effect of premixed ratio on HC emission

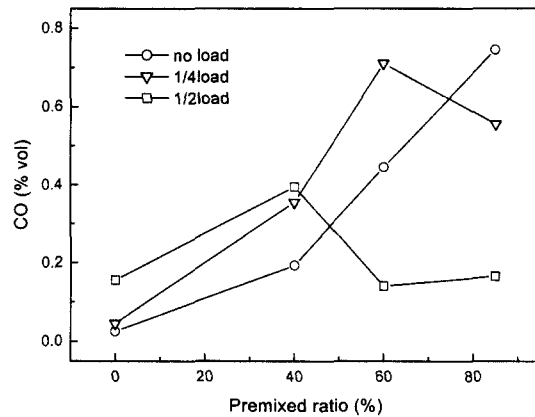


Fig. 10 Effect of premixed ratio on CO emission

의 배출량은 무부하에서는 예혼합 비율의 증가에 따라 계속적으로 증가하고 있으나 고부하 영

역에서는 일정한 예혼합비 이상에서 오히려 CO의 배출량이 감소하는 경향을 나타내었다.

4. 결 론

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) 예혼합기 공급에 따른 기관의 열발생을 곡선은 예혼합기의 공급 비율의 증가로 인하여 예혼합 영역 구간과 확산 영역 구간의 경계가 나타나지 않으며 부하가 증가할수록 이러한 경향은 가속되어 가솔린 엔진의 열발생률 형태로 변화되었다.

2) 예혼합 비율이 증가할수록 초기 화염 발달 기간은 3~4° 가량 증가하지만 주연소 기간이 50% 이상 감소하므로 전체적으로 연소속도가 증가하는 경향을 나타내었다.

3) 예혼합 비율의 증가에 따라서 NO_x와 Soot의 동시 저감이 가능하였으며, 고부하 영역에서는 그 효과가 더욱 현저하였다.

4) 저부하 영역에서 예혼합 비율의 증가와 더

불어 HC와 CO가 급격히 증가하지만 고부하영역에서 HC의 증가가 둔화되며 높은 예혼합 비율에서의 CO 배출량은 오히려 감소하였다.

후 기

이 논문은 청정생산기술사업(과제 99-1-K-3)과 BK 21의 지원에 의하여 연구되었으며 연구를 지원해주신 관계 제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) R. A. Baker, Chang-sik Lee, "The Effect of Combustion Parameter on the Nitric Diesel Engine," KSME International Journal, Vol.11, No.6, 1997.
- 2) C. Beatrice, "An Experimental Characterization of the Formation of Pollutants in DI Diesel Engines Burning Oxygenated Synthetic Fuels," Fuel and Energy Abstracts, Vol.38, Issue 3, p.176, 1997.
- 3) T. W. Ryan, T. J. Callahan, "Homogeneous Charge Compression Ignition of Diesel Fuel," SAE 961160, 1996.
- 4) H. Suzuki, N. Koike, M. Odaka, "Exhaust Purification of Diesel Engines by Homogeneous Charge with Compression Ignition, SAE 970313, 1997.