

예혼합 압축착화 디젤엔진의 부하변동에 따른 연소특성 분석

Analysis of Combustion Characteristics for a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Load Condition

장 시 웅*, 이 기 형**, 이 창 식**
Siwoong Jang, Kihyung Lee, Changsik Lee

ABSTRACT

In order to reduce exhaust emissions from diesel engine under wide operating range, an experimental study based on a new concept of combustion called HCDC(Homogeneous Charge Diesel Combustion) was conducted. In this concept, most of the fuel is supplied as premixed homogeneous charge and the rest is directly injected into a cylinder to ignite.

In this study we compared combustion characteristics of an HCDC engine with those of conventional diesel engines. At high premixed fuel ratio and high load range, it was observed that premixed combustion heat release rate was low and diffusion combustion duration was shorten. From this experiment, it was found that NOx is reduced by the lower maximum temperature and soot is reduced by rapid combustion during diffusion combustion phase.

주요기술용어 : Emission(배기가스), HCDC(균일예혼합압축착화), Premixed combustion(예혼합연소), Diffusion combustion(확산연소), Premixed fuel ratio(예혼합연료비율)

1. 서 론

자동차 배출 가스에 의한 환경 문제가 심각하게 대두됨에 따라 지구 온난화의 주원인인 CO₂를 비롯한 NOx, Soot 등의 유해 물질의 배출 저감은 매우 중요한 연구 과제가 되고 있다.¹⁾ 디젤 엔진은 높은 열효율과 우수한 연비 성능 및 내구성 등의 장점을 가지고 있지만, 직접 분사식의 경우 실린더 내로 연료가 직접 분사되므로 분사된 연료 분무 주위에는 공간적으로 불균일한 공연비

분포가 발생되어 농후영역에서는 입자상 물질(Particulate Matter: PM)이 생성되며, 이온 공연비 영역에서는 질소산화물(NOx)의 배출이 증가하는 현상이 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다.²⁾ 따라서 점차 강화되고 있는 배기가스 규제와 연비 성능 향상에 대한 사회적인 요구에 대응할 수 있는 디젤 엔진의 분무 및 연소 특성에 대한 한 차원 높은 획기적인 연구가 절실히 필요한 실정이다.³⁻⁵⁾ 그러나 NOx와 PM의 생성과정은 서로 상반관계(trade-off)에 있으므로 해결하여야 할 많은 기술과제를 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 디젤 엔진을 기초

* 회원, 한양대학교 기계공학과 대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학과

로 하여 NOx와 PM의 동시저감을 만족시키기 위하여 디젤엔진에 균일 회박 예혼합기가 형성되도록 예혼합 연료분사 시스템을 부착하여 연소실 내에 균일 회박 예혼합기를 형성시킴과 동시에 자기 착화를 위한 점화원으로 소량의 연료를 직접 분사하여 압축 착화시킴으로써 실린더 전체의 회박 연소에 의한 NOx생성 억제와 예혼합 연소에 의한 입자상 물질의 저감을 동시에 이룰 수 있는 새로운 연소 기술인 균일 예혼합 압축착화 방식을 이용한 엔진 시스템을 구성하였다. 이러한 시스템을 이용하여 균일 예혼합 압축착화 엔진의 연소특성을 파악하였고, 기존의 디젤엔진과의 연소 성능과 비교함으로써 예혼합 압축착화 디젤엔진의 가능성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 예혼합 압축착화 엔진 시스템

본 실험에서는 Table 1과 같은 제원을 가진 단기통 디젤엔진을 기본으로 Fig. 1에서와 같이 흡

Table 1 Engine specification

Engine type	4 Stroke single diesel(Direct Injection)
Bore × Stroke	95mm × 95mm
Displacement volume	673cc
Compression ratio	19
Pump type	Bosch in_line (18MPa)
Injection nozzle	3 hole type

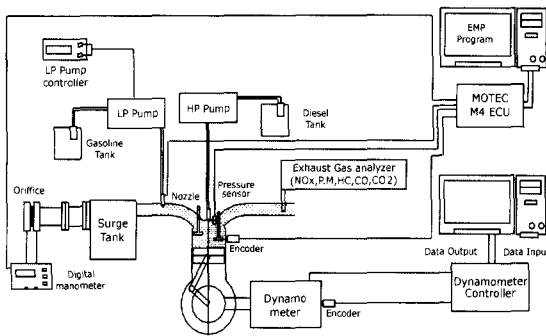


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

기관 내에 예혼합 압축착화의 개념을 실현시키기 위한 예혼합 연료 공급장치를 설치하였다.

또한 흡기관에 연료의 기화를 촉진시키기 위하여 흡기관의 온도를 일정하게 유지시킬 수 있도록 가열기를 설치하였고, 가솔린 연료는 상용 가솔린 자동차용 펌프를 사용하여 300kPa의 압력으로 공급하였으며, 기존에 부착된 보쉬내장형 펌프로는 경유를 18MPa로 분사하여 가솔린과 경유를 독립적으로 사용 가능하게 하였다. 실린더헤드 중앙부에 Kistler사의 피에조 방식의 압력센서를 부착하여 연소실내 압력을 획득하였으며, 캠축과 크랭크축에 각각 360개의 펄스를 발생시키는 엔코더를 설치하여 엔진의 회전수와 예혼합 연료의 분사시기를 조정하였다.

2.2 엔진 제어 장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 엔진 제어장치를 나타낸 그림으로 크게 동력계 제어부와 엔진 제어부 및 연료분사 제어부로 나누어 구성하였다.

엔진 동력계는 Daum사의 75kW출력의 DC 동력계로서 엔진 제어와 데이터 획득을 동력계 제어부에서 동시에 수행할 수 있으며, 엔진의 회전수와 부하는 제어 프로그램으로 조절되며, Motec사의 ECU(M4)를 사용하여 부하와 회전수에 따른 예혼합 연료의 분사시기 및 분사량을 조절하였다.

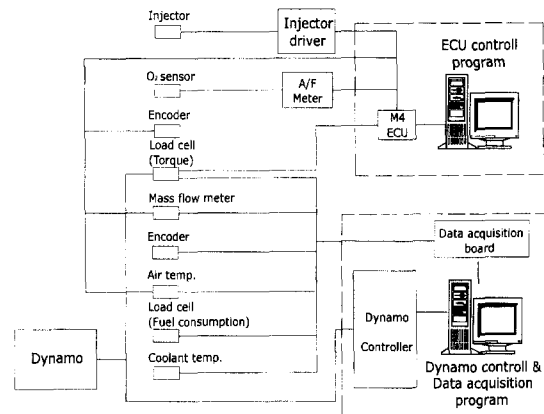


Fig. 2 Block diagram of engine control system

2.3 배기가스 측정장치

배기 밸브로부터 100cm 떨어진 배기관에 배기 분석기의 프로브를 삽입하여 배기가스 농도를 측정하였다. NOx를 측정하기 위하여 YANACO사의 NOx 측정기(BEST BCL-511)를 사용하였으며, Soot는 Nissalco사의 ST-100N형(ED-1949) 매연 측정기를 사용하였고, HC와 CO는 HORIBA사의 MEXA-554JK 가스분석기를 사용하였다.

2.4 실험조건 및 실험방법

본 실험에서의 조건들을 Table 2에 정리하여 나타내었다.

엔진의 냉각수 온도를 $80 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 유지하면서 1200rpm에서 부하와 예혼합 비율에 따른 변화를 실험하였다. 엔진의 부하는 전부하 실험을 통해 얻은 데이터를 기초로 무부하, $\frac{1}{4}$ 부하, $\frac{1}{2}$ 부하로 증가시키고 이와 동시에 연료의 예혼합 비율도 0%, 40%, 60%, 85%로 증가시켜가며 실험을 수행하였다.

이때 예혼합 연료의 분사시기는 흡기 밸브가 닫힌 후로 일정하게 유지하였으며, 연소실에서 380mm 떨어진 위치에 인젝터를 설치하여 흡기관 내로 분사하였다. 또한 흡입공기의 온도는 인젝터와 연소실 사이에 설치된 가열기로 50°C 로 일정하게 유지하여 예혼합 연료의 기화를 촉진시켰다. 연료의 예혼합 비율은 2ms에서 10ms까지 0.5ms간격으로 조절하면서 측정한 가솔린 분사량과 각각의 부하에서의 스로틀 개도에 따른 경유의 분사량을 측정함으로써 각 부하조건에서의 예혼합 비율을 일정하게 유지하였다. 이렇

Table 2 Conditions of experiment

Fuel	Direct-diesel Premixed-gasoline
Engine speed	1200rpm
Intake air temperature	50°C
Coolant temperature	$80^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$
Premixed fuel ratio	Gasoline 0%, 40%, 60%, 85%
Engine load	No-load, $\frac{1}{4}$ load, $\frac{1}{2}$ load

게 측정된 연소 데이터를 엔진의 연소해석 프로그램을 이용하여 열발생을 및 질량연소율을 계산하여, 이를 바탕으로 화염발달기간과 급속연소기간을 계산하여 두 연료를 비교하였다.

또한 디젤엔진과 예혼합 압축착화 엔진을 운전하였을 때 한 개의 실험 조건당 100사이클씩 5번의 실험에 대해 엔진의 순수일을 나타내는 평균유효압력(IMEP)을 산술평균하여 구하였으며, 연소의 안정성을 판단하기 위해 식(1)과 식(2)를 이용하여 사이클간의 변동계수를 계산하여 정량적으로 비교하였다. 식(1)은 100사이클의 산술평균을 나타내며 식(2)는 표준편차를 의미한다. 또한 식(3)은 어떤 물리량의 변동계수(coefficient of variance, COV)를 나타내며, 이러한 수치는 연소의 안정성에 대한 척도가 된다.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (1)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2)$$

$$COV(x) = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \times 100(\%) \quad (3)$$

예혼합 연료인 가솔린과 점화원으로 연소실에 직접 분사되는 직분연료인 디젤 연료의 비를 나타내기 위해 예혼합 비율을 정의하였으며, 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{Premixed Ratio} &= \frac{Q_g}{Q_g + Q_d} \times 100 \\ Q_g &= m_g \times LHV_g \\ Q_d &= m_d \times LHV_d \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, m_g : 가솔린 분사량
 m_d : 디젤 분사량
 LHV_g : 가솔린 발열량
 LHV_d : 디젤 발열량

본 연구에서는 엔진 부하에 따라서 압력과 열발생률 및 질량연소율 등의 연소 특성과 연료소모량과 열효율 등의 연비 특성 및 배기 특성을 동

시에 측정하여 상용 단기통 디젤엔진과 예혼합 압축착화 디젤엔진을 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 부하조건에 따른 엔진성능

Fig. 3은 엔진 부하와 예혼합 비율에 따른 연료 소비율을 나타낸 결과로서, 예혼합 비율이 증가할수록 연비가 악화되는 반면 고부하에서는 기존의 디젤엔진보다는 다소 떨어지지만 예혼합 비율의 증가와 더불어 향상되는 것을 볼 수 있다.

이러한 현상의 원인은 무부하 상태에서는 직분연료인 경유의 양이 적어 착화원으로서의 역할을 제대로 수행하지 못하였고, 예혼합 비율이 증가와 더불어 가솔린 연료의 양이 상대적으로 많아지기 때문에 확산연소가 발생되기 어려우므로 열효율과 SFC가 악화되는 것으로 생각된다. 반면, 고부하 상태에서는 부하의 증가로 인하여 점화원에 해당하는 직분연료가 충분히 확보된 상태이므로 예혼합 비율이 클수록 발열량이 높은 예혼합 연료의 비율이 많아지기 때문에 급속한 예혼합 연소에 의하여 열효율과 SFC가 향상된다고 판단된다.

Fig. 4는 실험조건에 따른 배기가스 온도를 비교한 것이다. 예혼합 비율이 증가함에 따라 무부하에서는 배기가스 온도가 소폭 증가하지만 고부하에서는 반대로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 고부하인 경우 확산 연소기간이 단축

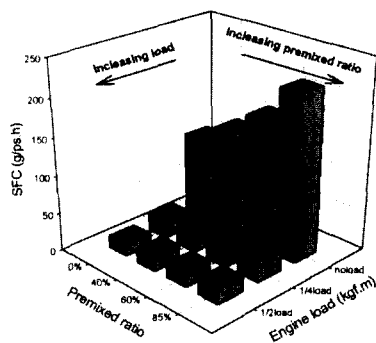


Fig. 3 Comparison of SFC with load and premixed ratio

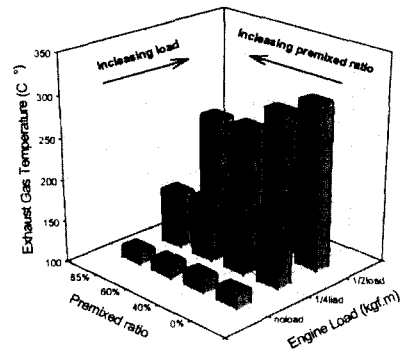


Fig. 4 Comparison of EGT with load and premixed ratio

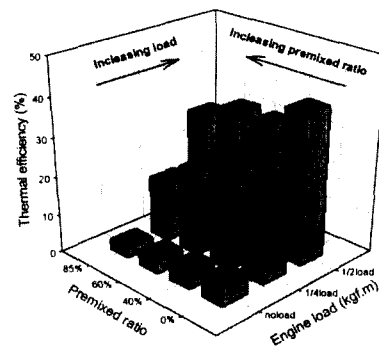


Fig. 5 Comparison of thermal efficiency with load and premixed ratio

되어 배기밸브가 열리는 시점에서의 연소실 내의 온도가 낮아지기 때문으로 판단된다.

그러나, 디젤엔진의 열효율과 비교한 Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 예혼합 압축착화 디젤엔진의 열효율은 본 실험범위 내에서 디젤엔진보다 저하되고 있음을 알 수 있다.

3.2 예혼합 비율에 따른 연소특성

3.2.1 저부하 영역의 연소특성

무부하 조건에서 예혼합 비율에 따른 연소실 내의 압력과 열발생률 특성을 측정하여 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

저부하 영역에서의 예혼합 압축착화 디젤엔진의 연소실 내의 압력은 기존 디젤엔진의 압력보다 낮은 경향을 보이고 있으며, 예혼합 연료의 비율이 증가할수록 연소 최고 압력은 저하되는

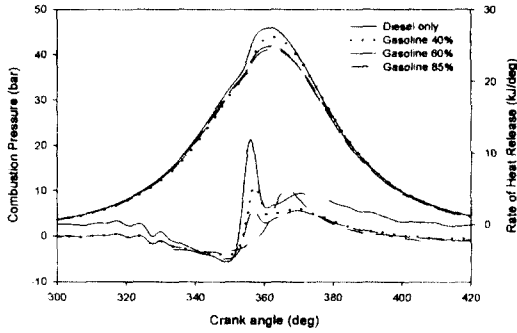


Fig. 6 Comparison of pressure and rate of heat releases with premixed ratio at low load condition

경향을 나타낸다. 혼합 연료의 열발생률 특성은 디젤연료보다 예혼합 연소 구간의 최고 열발생률이 조금 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 확산연소기간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 직분연료의 착화원 작용에 의하여 착화 지연기간이 단축되고, 가솔린 성분의 빠른 연소속도의 영향으로 판단된다. 특히 예혼합 비율이 85%인 경우는 예혼합연소 구간과 확산연소 구간의 구별이 없어지고 가솔린 엔진의 열발생률 특성과 유사한 경향을 보이고 있다.

3.2.2 고부하 영역의 연소특성

Fig. 7은 고부하 영역에서의 압력곡선과 열발생 곡선을 나타낸 것이다. 저부하 영역에서와는 달리 디젤엔진보다 최고압력이 높으며, 예혼합 비율의 증가와 함께 최고압력 발생시기가 ATDC 4~5°에서 ATDC 12° 정도로 늦어진다. 이는 가솔린 연료가 자기착화 온도가 높기 때문에 열발생이 나타나는 시기가 늦어지기 때문이다. 열발생률 곡선에서 예혼합 비율이 커짐에 따라 예혼합 화염구간의 감소와 확산화염구간의 단축이 확연하게 드러나고 있으며, 예혼합 비율 85%에서는 기존의 가솔린 엔진에서의 열발생률 곡선과 유사한 모습을 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 예혼합 연료의 비율을 증가시킬수록 NOx 생성에 영향을 미치는 착화지연으로 인한 급격한 초기 열발생 현상이 억제되고 있음을 알 수 있다.

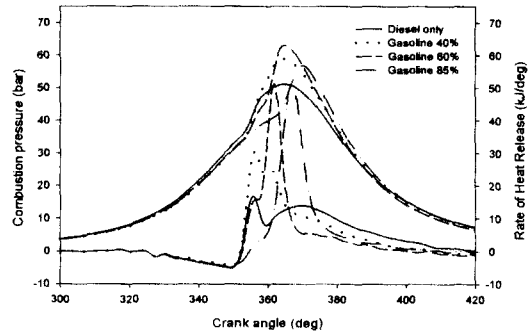


Fig. 7 Comparison of pressure and rate of heat releases with premixed ratio at high load condition

3.2.3 예혼합 비율에 따른 연소성능

엔진 부하와 예혼합 비율을 동시에 고려한 전체 실험영역에서의 연소특성을 비교하였다.

Fig. 8은 도시평균유효압력(IMEP)를 계산하여 나타낸 그림이다. 저부하 영역에서는 예혼합 비율이 낮을수록 IMEP가 커지지만 고부하 영역에서는 반대의 경향인 예혼합 비율이 높을수록 높은 IMEP를 나타내고 있다.

또한 Fig. 9는 측정된 연소실 내의 최고 압력의 사이클간의 변동계수(COVpmax)를 나타낸 것이다. 디젤엔진과 비교하여 예혼합 비율이 증가할수록 변동계수는 점차 증가하지만 증가율은 급격히 둔화되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 연소 불안정은 가솔린 엔진과 같이 점화시기가 최적화되지 않은 상용 디젤엔진을 사용한 결과로 생각되며, 직분연료의 분사시기, 즉 점화시기를 최

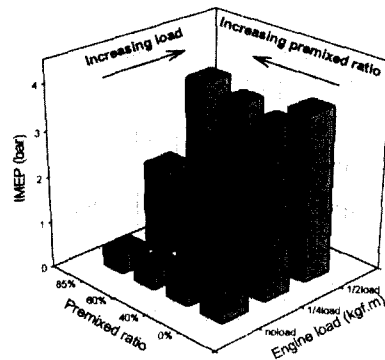


Fig. 8 Comparison of IMEP with load and premixed ratio

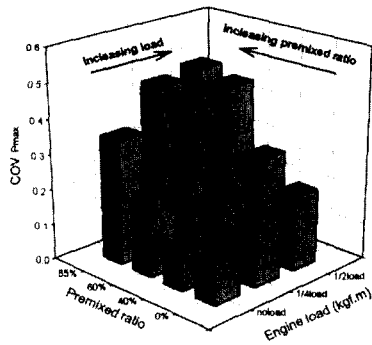


Fig. 9 Comparison of COVpmax with load and premixed ratio

적화시키면 감소될 것으로 기대된다.

여기서 초기 연소기간은 화염발달기간으로서, 보편적으로 실린더 안의 혼합기가 10%까지 연소될 때까지의 기간으로 정의하였고, 주 연소기간은 급속 연소기간으로서, 실린더 안의 연소상태가 난류 연소상태로 넘어가면서 급격히 연소되어 혼합기 질량의 대부분이 연소될 때까지의 기간을 나타내며 90%의 연소가 진행됨을 나타낸다.

Fig. 10은 연소해석을 통하여 얻은 질량 연소율로부터 계산한 초기 연소기간을 크랭크각으로 나타낸 그림이다.

예혼합 비율이 증가할수록 초기 연소기간이 증가되는 현상을 볼 수 있으며, 이는 가솔린 성분이 많아져 가솔린 연료가 자발화점에 도달하기 위한 시간의 증가가 원인으로 판단된다. 고부하

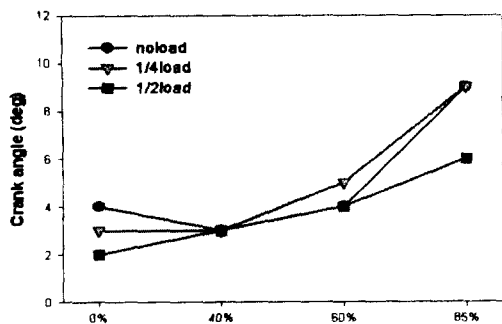


Fig. 10 Comparison of flame-development duration with load and premixed ratio

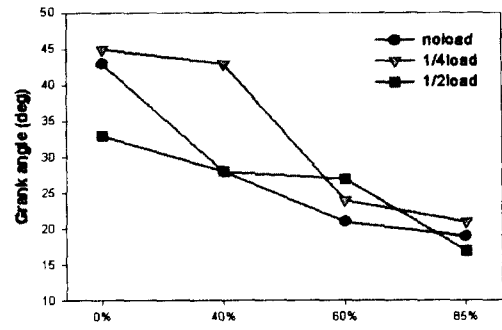


Fig. 11 Comparison of rapid-burning duration with load and premixed ratio

인 경우에도 비슷한 경향을 나타내고 있으나, 혼합 비율의 증가에 따른 초기연소 지연 정도가 저부하 영역보다는 감소되고 있다. 이는 저부하 영역에서 압축말 직분연료 분사시의 초기 압력이 높아짐에 따라 화염의 전파속도가 증가함으로 인하여 그 기간이 단축되는 현상으로 보여진다. 그러나 고부하 영역의 경우는 기존의 디젤엔진의 초기연소기간보다는 약 2배 이상 길어진 결과를 나타내고 있다.

또한 Fig. 11은 주 연소기간을 비교한 그림이다. 예혼합 비율이 증가할수록 주 연소기간은 대폭 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 예혼합 연료가 공기와 혼합상태가 양호한 상태로 연소실로 유입된 후, 직분연료의 초기 점화원에 의하여 급속하게 예혼합 연소가 이루어지기 때문으로 판단된다. 따라서 기존의 디젤엔진의 주 연소기간보다 50% 정도 감소됨을 알 수 있다.

3.3 예혼합 비율에 따른 배기특성

예혼합 비율에 따른 NOx와 Soot의 저감을 확인하기 위하여 배기가스 측정을 실시하여 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

예혼합 비율이 증가함에 따라서 NOx의 배출량이 현격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 1/2부하상태의 예혼합 비율 85%에서는 기존의 디젤엔진보다 1/10수준으로 감소하였다. 이는 예혼합 연소구간에서의 열발생률이 저하로 연소온도가 낮아지기 때문으로 판단된다.

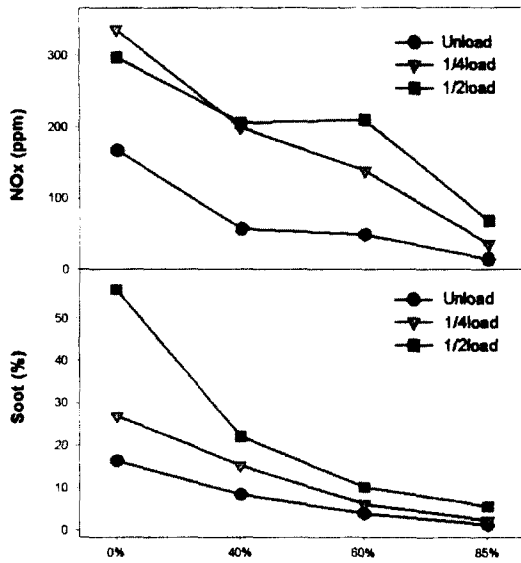


Fig. 12 Comparison of rapid-burning duration with load and premixed ratio

또한 Soot의 발생량은 NOx와 마찬가지로 예혼합 비율이 증가함에 따라서 급격히 감소하는데 그 감소폭은 부하의 증가와 더불어 더욱 커지게 된다. 1/2부하에서는 디젤엔진의 20% 수준으로 감소하였으며 이는 급속 연소가 가능하여 확산 연소기간이 단축되었기 때문으로 판단된다.

4. 결론

예혼합 압축착화 디젤엔진의 부하 변동에 따른 연소특성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 저부하 영역에서는 예혼합 연료 비율이 증가하면 연소성능과 연비성능이 저하되는 반면, 고부하 영역에서는 예혼합 연료의 비율이 증가함에 따라서 열효율, 연비, IMEP 등이 향상된다. 따라서 원활한 연소를 위해서는 일정량 이상의 직분연료가 요구된다.
- 2) 열발생률 곡선에서 예혼합 비율의 증가로

인하여 예혼합 연소구간의 열발생량 감소와 확산연소기간 단축이 발생되며, 예혼합 화염과 확산화염의 경계가 사라지는 것을 확인하였다.

3) 예혼합 비율이 증가할수록 초기 화염발달 기간은 3~4° 가량 증가하지만 주 연소기간이 50% 이상 감소하였다. 전체적으로 빠른 연소속도를 보이며 고부하 영역에서는 연소속도가 둔화되는 경향을 보였다.

4) 예혼합 비율의 증가에 따라서 NOx와 Soot의 동시 저감이 가능하였고, 저부하 영역보다 고부하 영역에서 더욱 뚜렷한 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 청정 생산 기술 및 BK21 사업의 지원에 의해 수행된 연구결과로서, 관계기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) K. Tsujimura, "Problems around the Development of Low Emission Diesel Combustion System," International Symposium on Advanced Spray Combustion, 1994.
- 2) K. Mori, "Worldwide Trends in Heavy-Duty Diesel Engine Exhaust Emission Legislation and Compliance Technologies," SAE 970753, 1997.
- 3) 辻村 敏司, "豫混合壓軸着火·ディーゼル機關の可能性," 日本機械學會 No.96-49, 講習會教材, エンジンにおける燃料噴霧の新展開 96-9, 13, 1996.
- 4) 赤川 久, 宮本 武司, "稀薄豫混合ディーゼル燃焼の問題點の解析と改善の試み," 自動車技術會學術講演會 前別集, 9931990, No.4-99, 1999.
- 5) R. Takatsuto, T. Igarashi, N. Iida, "Auto Ignition and Combustion of DME and n-Butane/Air Mixtures in Homogeneous Charge Compression Ignition Engine," The fourth international symposium COMODIA 98, 1998.