

EGR율에 따른 예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 연소 특성

Combustion Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Diesel Engine with EGR System

이창식*, 이기형*, 김대식**, 허성근**
C. S. Lee, K. H. Lee, D. S. Kim, S. K. Heo

ABSTRACT

A premixed charge compression ignition engine is experimentally investigated for the reduction of NO_x and smoke emissions from diesel engines. In this study, the premixed 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 concentrations of the exhaust emissions were reduced simultaneously as compared with the conventional diesel engine. But HC emission was increased with the increase of premixed ratio. Also, when EGR system was applied to the PCCI diesel engine, the effect of EGR rate on the combustion characteristics and the exhaust gas emissions was discussed.

주요기술용어 : Premixed charge compression ignition(예혼합 압축 착화), Premixed ratio(예혼합비), Combustion characteristics(연소 특성), Exhaust emissions(배기 특성), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환)

1. 서론

디젤 엔진은 높은 열효율과 뛰어난 신뢰성 및 내구성에도 불구하고, 배출 가스 중 다량의 입자상 물질(P.M.)과 질소 산화물(NO_x)을 함유하고 있어 이러한 결점을 극복하는 것이 가장 중요한 문제로 되고 있다. 이러한 P.M. 및 NO_x를 저감하기 위하여 고압 연료 분사 기술과 분사 시기의 지연, 미세 분공 노즐의 사용 등 여러 가지 방법이 적용되어 왔다.¹⁾ 그러나 이러한 여러 가지 대책

에도 불구하고, NO_x 농도는 크게 저감되지 않는 것으로 보고되고 있으며, 이러한 현상의 원인은 균일한 혼합기가 형성되지 못하고 국부적으로 농후한 혼합기의 연소에 의하여 NO_x가 생성되기 때문이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 기존의 디젤 엔진에 균일 희박 예혼합기가 형성되도록 하기 위하여 예혼합 연료로서 천연가스,^{2,3)} 에탄올,³⁾ 부탄⁴⁾ 및 가솔린⁵⁻⁸⁾ 등의 여러 가지 연료를 이용한 예혼합 압축 착화 기관에 대한 연구가 진행되고 있다. 이중 가솔린 연료에 의한 예혼합 압축 착화 기관은 다른 기관에 비해 흡기 포트 및 연소실 형상 등의 개조없이, 기존의 엔진

* 회원, 한양대학교 기계공학부

** 회원, 한양대학교 대학원

에 가솔린 분사 시스템만을 부가하여 넓은 운전 범위에서 쉽게 NOx 생성 억제와 예혼합 연소에 의한 입상물질의 저감을 동시에 이룰 수 있다.

따라서 본 연구에서는 균일 예혼합 압축착화 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성을 규명하기 위하여 단기통 디젤 엔진에 가솔린 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 특성을 비교하여 예혼합 압축 착화 디젤 기관의 연소 성능을 여러 가지 예혼합 비율에 대하여 비교 검토하였다. 또한 NOx 저감에 효과적인 방법으로 알려져 있는 EGR 시스템을 병행하여 실험하고 각각의 연소 및 배기 특성을 분석하여 EGR의 영향을 구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험에 적용한 단 실린더 기관은 배기량이 1425cc인 직립형 4사이클 수냉식 디젤 기관으로서 연소실 형식은 직접 분사식(M-연소실식) 기관을 적용하였다. Table 1은 실험용 기관의 주요 제원을 나타낸 것이다.

실험용 엔진의 구성은 베이스 엔진에 연료 공급 장치 및 연료 분사 시스템을 수정하여 예혼합기 공급이 가능한 가솔린 예혼합 연료 공급 장치를

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)	900
Number of cylinder	1
Bore×Stroke (mm)	110×150
Compression ratio	17.4

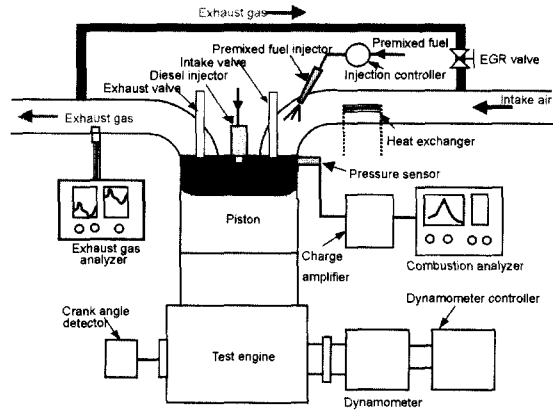


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

를 부가하고, 엔진으로 공급되는 디젤 연료 공급을 부분적으로 제어하도록 하였다.

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 구성되며 동력계는 150kW와전류식 동력계를 사용하였고, 기관의 연소 해석 장치는 압력 변환기로부터의 압력 신호와 크랭크축에 연결된 엔코더로부터의 펄스 신호를 받아 신호 처리하여 가스의 압력, 열발생률 등의 연소 특성을 구하였다.

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 신호 의하여 제어하도록 구성하였다.

Fig. 2는 본 실험에서 적용한 EGR 시스템의 개략도이다. 본 실험에서는 Duty type의 기계식 EGR 시스템을 적용하였다. EGR 밸브의 개폐 정

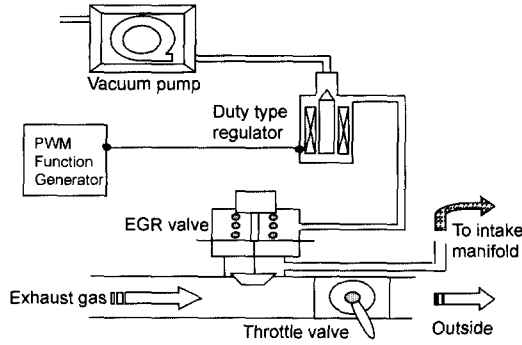


Fig. 2 Schematic diagram of EGR system

도에 따라 흡기관으로 흡입되는 EGR 가스의 양이 결정되고, 이를 제어하기 위한 조절기를 장착하였다. EGR이 이루어지기 위해서는 배기쪽의 배압이 흡기쪽보다 높아야 하므로 배압을 발생시키기 위한 스톱 밸브를 배기 파이프에 장치하였다.

2.2 실험 방법

예혼합용 연료인 가솔린과 점화원으로서는 연소실에 직접 분사되는 디젤 연료의 비를 나타내기 위해 예혼합비(MR)로 정의하고 다음의 식과 같이 나타내었다.

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

$$Q_g = m_g LHV_g \quad (1)$$

$$Q_d = m_d LHV_d$$

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

본 연구에서 예혼합기의 미립화를 위하여 흡입 공기의 온도는 40°C로 가열하였고, 냉각수의 온도는 70°C로 유지시켰다. 또한 가솔린의 예혼합비는 0에서 0.9까지, EGR율은 0%에서 30%까지 각각 변화시키면서 압력, 열발생률 및 질량 연소율 등의 연소 특성과 NOx와 Soot 등의 배기 특성을 동시에 측정하여 기존의 직분식 디젤 엔진과의 비교 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 예혼합 압축착화 기관의 연소특성

3.1.1 예혼합 비율에 따른 연소 특성

Fig. 3은 실험에 적용한 단기통 직분식 디젤 기관의 예혼합비에 따른 연소 압력 및 열발생율을 기존의 디젤 기관의 결과와 비교한 것으로서 기관의 회전 속도는 900rpm일 때이다. 실린더 내 연소 압력은 예혼합 연료의 분사에 의해 다소 감소하였으나 예혼합 비율을 더 증가시킬 경우 최고 압력은 거의 일정하게 유지하는 경향을 보였다. 또한 열발생율 선도에서 보는 바와 같이 예혼합비가 증가함에 따라 초기 연소 시작 시기는 다소 늦춰졌으나, 점화 이후에는 높은 예혼합 비율의 경우에는 더욱 급격한 연소가 진행되어, 열발생율의 최고치가 나타나는 위치가 앞당겨지고 있음을 알 수 있다. 이는 점화원으로 사용되는 디젤 연료의 감소로 인해 초기 착화는 늦어졌으나, 착화 이후에는 예혼합된 가솔린 연료에 의해 급격히 연소가 진행된 것으로 생각된다.

Fig. 4는 예혼합비에 대한 질량 연소율의 결과를 비교한 것이다. 열발생율의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 예혼합 비율이 증가함에 따라 연소 기간이 단축되는 것으로 나타났다. 특히 후연 기간에서의 연소가 크게 감소되고 있음을 볼 수 있다.

이러한 열발생률 곡선과 질량 연소율 곡선으

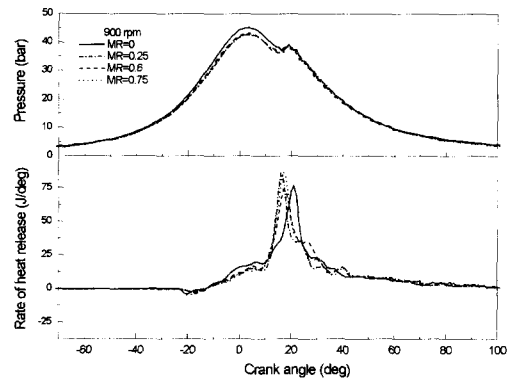


Fig. 3 Effect of premixed ratio on the combustion characteristics

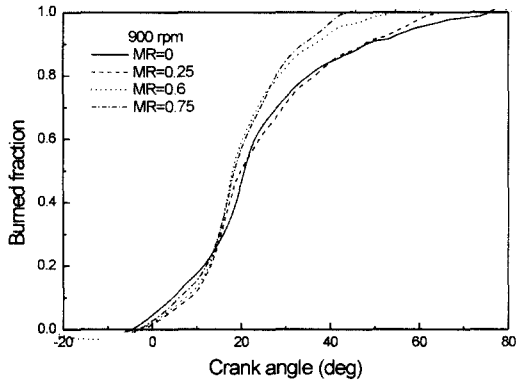


Fig. 4 Effect of premixed ratio on burned fraction

로부터 예혼합 압축 착화 기관에 있어서 고온 연소시간의 단축은 NOx의 저감에 기여할 것으로 보이며 또한 후연소 시간의 단축은 스모크의 저감에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

한편 Fig. 5는 EGR율이 10%와 30%일 때, 예혼

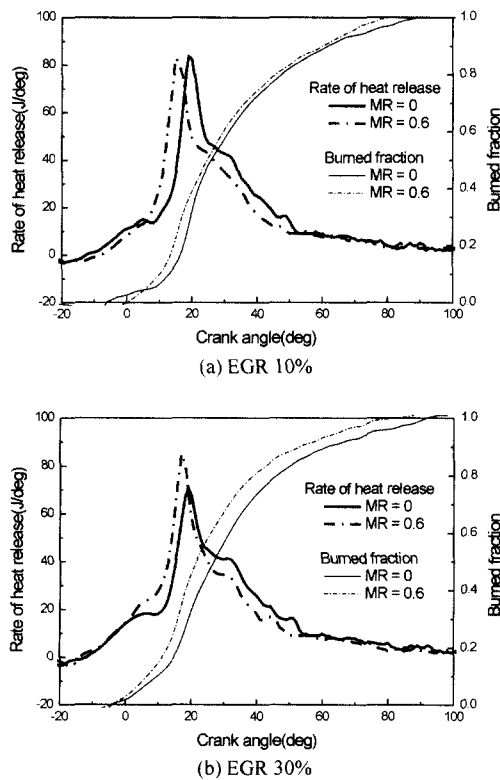


Fig. 5 Combustion characteristics at each EGR rate condition

합 비율에 따른 열발생률과 질량 연소율의 결과를 나타낸 것이다. EGR을 하지 않았을 경우와 마찬가지로, 예혼합 비율이 0.6인 경우 디젤 연료만이 분사될 때와 비교할 때, 더욱 급격한 연소가 진행되어 열발생률이 최고치가 되는 위치가 앞당겨 지고 있음을 알 수 있고, 또한 연소 기간이 다소 단축되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 EGR율이 30%일 경우 더욱 뚜렷해지는 것으로 나타났다.

3.1.2 EGR율에 따른 예혼합 압축 착화 기관의 연소 특성

Fig. 6은 예혼합 압축 착화 기관에 미치는 EGR의 영향을 더욱 명확히 규명하기 위하여 예혼합 비율을 각각 0.2와 0.6으로 일정하게 유지하였을 경우 EGR율의 증가에 따른 열발생률과 질량 연소율 특성을 비교한 것이다. 이 선도에서 보이는

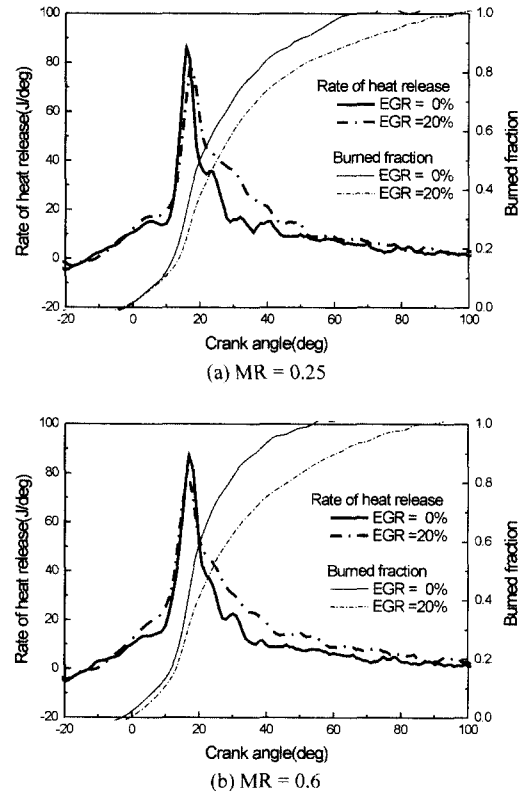


Fig. 6 Effect of EGR rate on the combustion characteristics

바와 같이 EGR 가스를 공급하지 않았을 경우에 비하여 20%의 EGR 가스가 유입될 경우, 흡입 산소 농도가 저감되고, 이는 연소 악화로 이어져 EGR을 하지 않을 경우와 비교할 때, 연소 속도가 감소되어 총 연소 기간이 길어지는 것으로 나타났다, 또한 열발생률의 최고치가 다소 감소하였음을 볼 수 있다.

3.2 예혼합 압축착화 기관의 배기특성

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

Fig. 7은 예혼합 비율과 EGR율이 예혼합 압축 착화 기관으로부터 배출되는 NOx에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 선도에서 보는 바와 같이 모든 EGR율의 경우에서 예혼합율의 증가에 따라 NOx의 배출은 거의 선형적으로 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이는 앞서서의 연소 해석 결과에서 살펴본 바와 같이 예혼합 비율이 증가함에 따라 고온 영역의 연소 기간이 단축됨으로써 얻어진 결과라고 생각된다. 또한 EGR 시스템을 예혼합 기관에 적용하였을 경우, 흡입 산소량의 감소와 비활성 가스량의 증가로 인하여 NOx의 배출량은 더욱 감소하는 것으로 나타났다.⁹⁾ 따라

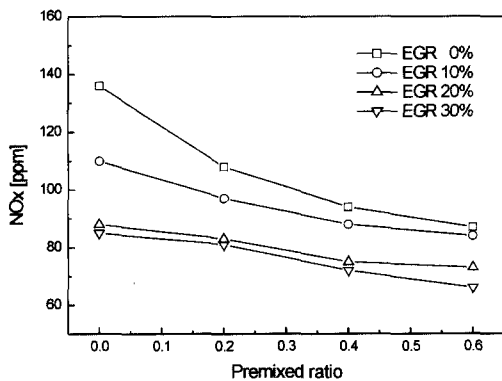


Fig. 7 Effect of premixed ratio on NOx emissions

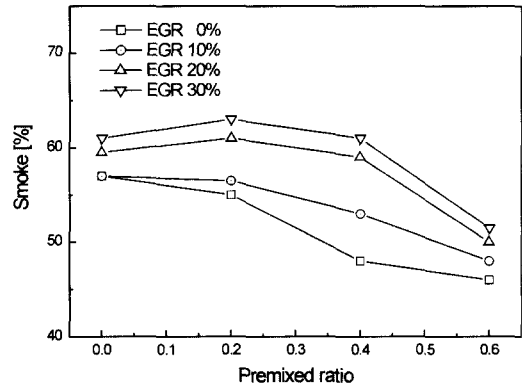


Fig. 8 Effect of premixed ratio on smoke emissions

서 기존의 디젤 엔진에 예혼합 공급 장치 및 EGR 시스템을 병행할 경우 효과적으로 NOx를 저감시킬 수 있음이 판명되었다.

예혼합 비율에 따른 스모크의 발생량을 Fig. 8에 도시하였다. NOx의 경우와 같이 예혼합비가 증가함에 따라서 스모크 배출량 또한 급격히 감소하였다. 이는 Fig. 4에서와 같이 예혼합 비율의 증가에 따른 후연소 기간의 단축이 그 원인으로 판단된다. 그러나 EGR을 적용하였을 경우 연소 속도의 저하로 인한 연소 기간의 증가로 스모크의 농도가 증가하고 있음을 알 수 있다.

예혼합 압축착화 디젤엔진의 HC의 배출 농도를 확인하기 위하여 Fig. 9에 HC의 배출 농도를 측정하여 그 결과를 도시하였다.

앞에서도 지적한 바와 같이 예혼합 압축 착화

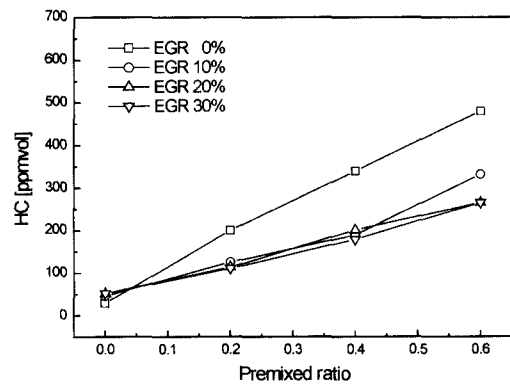


Fig. 9 Effect of premixed ratio on HC emissions

기관에서의 문제점 중의 하나는 예혼합 비율의 증가에 따른 미연 탄화수소의 증가이다.⁵⁻⁸⁾ 본 연구의 결과에서도 마찬가지로 예혼합율의 증가에 따라 HC의 배출 농도가 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 EGR율의 증가에 따라 그 증가 속도는 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 동일 예혼합 비율에서 EGR율에 따른 HC 배출량을 살펴보면, EGR에 의하여 HC의 배출 농도는 최고 50% 이상 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Christensen¹⁰⁾ 및 Morimoto²⁾ 등의 연구에서처럼 EGR을 적용할 경우 흡기포트에 고온의 배기가스의 유입으로 인하여 흡기 온도가 상승되고 이에 따라 예혼합 연료의 무화 및 공기와의 혼합이 촉진된 결과라 볼 수 있고, 또한 EGR율이 증가할 경우 연소 기간은 증가하고 따라서 배기가스의 온도 또한 상승하므로 이는 미연 탄화수소가 산화되기 쉬운 분위기가 조성되므로 HC가 저감되는 것으로 판단된다.

3.3 예혼합 압축 착화 기관의 성능 및 연비 특성

Fig. 10은 예혼합 비율에 따른 도시 평균 유효 압력 및 연료 소비율의 결과를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 예혼합 비율의 증가에 따른 평균 유효 압력 및 연료 소비율의 변화는 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 평균 유효 압력의 경우 예혼합율이 증가함에 따라 거의 일정하게 유

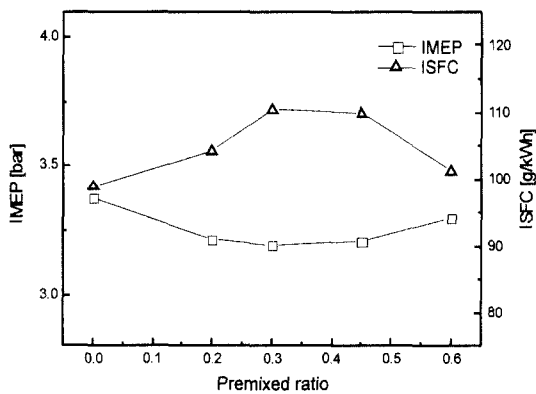


Fig. 10 Effect of premixed ratio on IMEP and ISFC

지되는 것으로 나타났고, 연료 소비율 역시 예혼합율이 0.3에서 약 10% 정도의 증가를 보였으나, 그 이후 다시 저감하여 기존의 디젤 엔진과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Suzuki⁵⁾ 등의 연구에서와 유사한 경향으로 예혼합 비율의 증가로 미연 탄화수소의 농도가 증가하고 이는 곧 연비의 악화를 초래하나, 예혼합 연료량이 증가할 경우 기존의 디젤 엔진에 비해 연소 반응이 더욱 빠르게 진행되고 이는 연비의 개선 요인으로 작용하여 이와 같은 결과가 나타나는 것으로 생각된다.

4. 결론

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

- 1) 예혼합 비율의 증가에 따른 연소실 내의 압력의 최고치는 감소하였고, 열발생률이 최고가 되는 시기는 진각되는 경향을 나타내었다.
- 2) 예혼합 비율의 증가함에 따라 초기 연소 구간에서 연소의 시작은 지연되고 있으나, 착화 이후 고온 구간의 연소 기간이 단축되고, 또한 후연소 기간이 단축되는 것으로 나타났다.
- 4) 배출 가스중의 NO_x와 스모크의 배출 농도는 예혼합비가 증가함에 따라 현저하게 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 EGR의 적용으로 NO_x 배출 농도는 더욱 저감될 수 있음이 확인되었다.
- 5) 미연 탄화수소의 배출 농도는 예혼합 비율에 따라 거의 선형적으로 비례하는 것으로 나타났으나, EGR 가스의 도입으로 50% 정도의 저감이 가능하였다.
- 6) 예혼합 기관의 평균 유효 압력 및 연료 소비율 특성은 예혼합 비율에 따라 큰 변화 없이 일정 수준을 유지하는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 청정생산기술사업 균일 예혼합 압

축착화 디젤 엔진의 최적 연소 기술 개발사업(99-1-K-3)과 BK21의 지원에 의하여 연구되었으며 연구를 지원해주신 관계 제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) J. M. Desantes, A. Delage, "Influence of the Fuel Characteristics on the Injection Process in a DI Diesel Engine," SAE 980802, 1998.
- 2) Y. Kawabata, S. Morimoto, "Operating Characteristics of Natural Gas-fired Homogeneous Charge Compression Ignition Engine, SAE 2001-01-1034, 2001.
- 3) M. Christensen, B. Johansson, "Homogeneous Charge Compression Ignition Using Isooctane, Ethanol and Natural Gas," SAE 972874, 1997.
- 4) 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, 1998.
- 5) H. Suzuki, N. Koike, M. Odaka, "Exhaust Purification of Diesel Engines by Homogeneous Charge with Compression Ignition Part 1: Experimental Investigation of Combustion and Exhaust Emission Behavior under Premixed Homogeneous Charge Compression Ignition Method, SAE 970313, 1997.
- 6) H. Suzuki, N. Koike, M. Odaka, "Combustion Control Method of Homogeneous Charge Diesel Engines," SAE 980509, 1998.
- 7) 이창식, 이기형, 김대식, 허성근, "예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성," 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp.232-237, 2001.
- 8) 이창식, 김대식, 허성근, "예혼합 압축 착화 기관의 연소 특성에 관한 연구," 한국연소학회 춘계학술대회 논문집, pp.187-192, 2001.
- 9) G. Eifler, H. Endres, "Exhaust-gas Recirculation - a Measure to Reduce Exhaust Emission of DI Engines, SAE 920725, 1992.
- 10) M. Christensen, B. Johansson, "Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition, SAE 982454, 1998.