

2단 분사방식을 적용한 부분 예혼합 디젤 압축착화 연소 엔진의 회전속도 및 부하 변화가 배출 가스 및 IMEP특성에 미치는 영향

강 정 호 · 이 성 만 · 정 재 우 · 강 우

자동차부품연구원 첨단동력/IT융합연구센터

The Effects of Engine Speed and Load of the Partial Premixed Diesel Compressed Ignition Engine Applied with the Split Injection Method on Exhaust Gas and IMEP Characteristics

Jeong Ho Kang · Sungman Lee · Jae Woo Chung · Woo Kang

Advanced Power & IT Research Center, KATECH, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea
(Received 26 June 2006 / Accepted 17 August 2006)

Abstract : Currently, due to the serious world-wide air pollution by substances emitted from vehicles, emission control is enforced more firmly and it is expected that the regulation requirements for emission will become more severe. A new concept combustion technology that can reduce the NOx and PM in relation to combustion is urgently required. Due to such social requirement, technologically advanced countries are making efforts to develop an environment-friendly vehicle engine at the nation-wide level in order to respond to the reinforced emission control. As a core combustion technology among new combustion technologies for the next generation engine, the homogeneous charge compression ignition (HCCI) is expanding its application range by adopting multiple combustion mode, catalyst, direct fuel injection and partially premixed combustion.

This study used a 2-staged injection method in order to apply the HCCI combustion method without significantly altering engine specifications in the aspect of multiple combustion mode and practicality by referring to the results of studies on the HCCI engine. And it is investigated that the effects of the engine rpm and load(or A/F) to emission characteristics.

Key words : HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition 예혼합압축착화), Diesel fuel(디젤연료), NOx (Nitrogen oxide 질소 산화물), PM(Particulate matter 입자상 물질)

1. 서론

현재 전 세계적인 자동차 배기물질에 의한 대기 오염의 심각성으로 인하여 배기 규제가 더욱 강화되고 있으며, 추후의 규제치는 더욱 강화될 것으로 예상되고 있다. 따라서 연소 차원에서 NOx와 PM의 저감을 이룰 수 있는 새로운 개념의 연소 기술이 절

실히 요구되어지고 있는 상황이다. 이러한 배경을 바탕으로 기술 선진국에서는 범 국가적 차원에서 연소개선을 통한 환경친화적 자동차용 엔진개발을 위하여 노력하고 있다. 이러한 차세대 엔진용 신연소방식의 중심에 있는 것이 예혼합압축착화(이하 HCCI) 연소이며, 그 응용은 실용성의 확대를 위한 다중연소 모드, 촉매의 적용, 직분식 연료공급방식의 채용과 부분예혼합(Partially Premixed) 연소까지

*Corresponding author, E-mail: jhkang@katech.re.kr

그 범위를 넓혀가고 있는 상황이다.^{1,2)}

본 연구에서는 기존의 연구결과를 참고로 하여,³⁾ 다중 연소모드와 실용성 면에서 엔진 제원의 큰 변경이 없이 HCCI 연소 방식을 응용하기 위하여 2단 분사방식을 사용하고 있다.

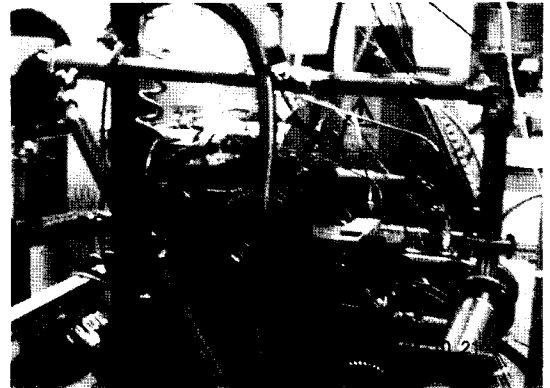
일반적으로 단일조기분사에 의한 예혼합압축착화 연소방식은 일정한 범위의 부하와 엔진회전속도 영역(2500rpm 이하)을 가지고 있으며, 부하 및 엔진의 회전속도 증가 시에 여러 가지 기술과제가 있는 것으로 알려져 있다.⁴⁻⁶⁾ 이러한 범위의 제한은 연소 원리에 기인한 것으로서, 완전한 예혼합압축착화 연소는 비교적 유동, 특히 난류의 영향을 덜 받는 완전한 화학반응에 의존하기 때문에 엔진의 회전속도 증가에도 불구하고 연소시간이 줄어들지 않는 원리적인 특성에 따라 과도한 착화 지연과 높은 연료 소모량 및 낮은 효율성을 가지는 것으로 알려져 있다.^{4,6)} 또한 연소실내의 직접분사방식의 연료 공급 시에는 엔진회전속도의 증가는 연료와 공기의 혼합 시간의 저감을 초래하여 연소성능에 악영향을 미칠 가능성이 있다.

본 연구에 적용한 2단분사방식의 경우 완전한 HCCI 연소의 구현보다는 부분 예혼합디젤연소의 성향이 존재하며, 이러한 연소방식에 대한 엔진회전속도와 부하에 대한 기본적인 배기 및 연소 특성에 대한 연구결과는 조기분사방식에서의 특성과는 다를 수 있다. 따라서 본 실험에서는 엔진 회전속도와 연료량 변화시의 배기가스농도를 측정하였으며, 이러한 배기가스 배출 특성의 원인 고찰을 위한 연소압력을 기초로 한 분석을 수행하였다. 이러한 분석을 통하여 추후 2단분사방식을 적용한 경우의 엔진회전속도 변화 시의 연소 최적화를 위한 기본 데이터로 활용하고자 한다.

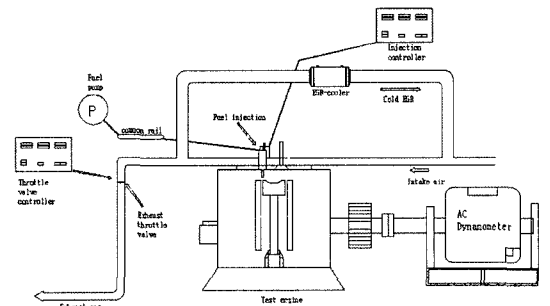
2. 실험방법 및 실험장치

엔진실험장치 및 방법

실험 장치의 구성은 Fig. 1에 나타내었으며, Table 1에는 실험에 사용된 엔진의 제원을 나타내었다. 엔진실험장치의 주요 구성은 동력계, 단기통 엔진, 제어기 및 데이터 취득시스템, 각종 센서류 등으로 구성되어 있으며, 동력계 및 배기 분석계의 제원은



(a) Photograph of a test single cylinder engine



(b) Schematic of engine test system

Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility

Table 1 Specification of a test engine

항목	제원
형식 및 연료공급계	단기통, 직분식 C/R
분사압력	1000bar
직경 × 행정	102×100(mm)
행정체적(cc)	817
밸브계	DOHC, 4valve
압축비	15

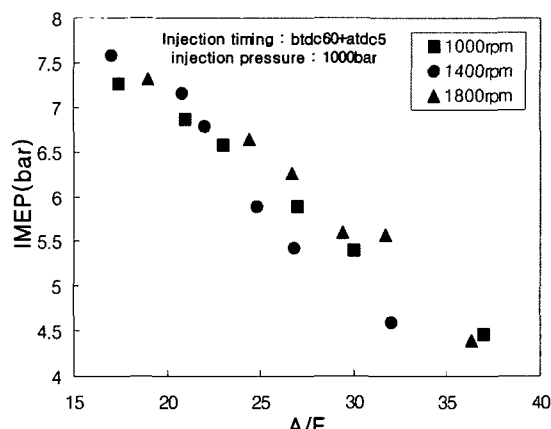
Table 2에 간단히 나타내었다. 압력센서는 연소실내 압력측정을 위하여 Piezo electric 형의 압력센서(Kistler사, 6051B1)를 실린더헤드를 가공하여 부착하였으며, 연소실내 압력센서의 보정을 위하여 흡기관내에 Piezo-resistive 형의 압력센서(Kistler사, 4045A2)를 부착하였다.

엔진의 운전범위는 1000rpm, 1500rpm, 2000rpm으로 설정하였으며, 연료량은 각 rpm에서 IMEP 범위 8bar 미만에서 변화되었다.

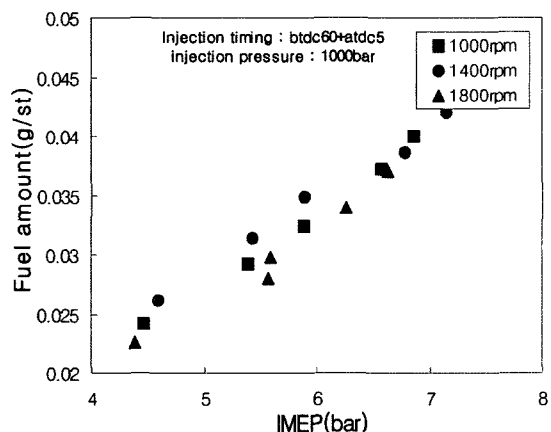
연료 분사 방법은 2단 분사법(split injection)을 적

Table 2 Specification of a engine dynamometer and a emission analyser

항목	제원
동력계	AVL, AC type, 67Kw
배기 분석계	Eurotron Greenline 9000
Smoke meter	AVL 415



(a) IMEP and A/F conditions of tests



(b) Fuel amount and IMEP conditions of tests

Fig. 2 Supplied fuel amount and IMEP of test conditions

용하되, 각 분사시의 통전시간은 동일하게 설정하여 최대한 분사되는 연료량이 동일하도록 하였다. 첫 번째 분사는 BTDC 60°에 두 번째 분사는 ATDC 5°를 각각 분사하였다.

Fig. 2에는 실험시 공급된 연료량과 연소실압력으로 계산된 IMEP 수준을 제시하고 있다. 본 논문에서의 그래프 내 표기는 Fig. 2에 제시된 A/F 또는 연료량으로 제시하였다.

3. 실험 결과

3.1 엔진 rpm과 A/F 변화에 따른 배기가스

다음의 Fig. 3에는 전술된 실험조건인 설정시의 배기가스 측정 결과를 보여주고 있다.

실험조건 내에서의 측정된 smoke, NOx, CO, HC 중 HC는 A/F보다는 오히려 엔진의 회전속도에 더 많은 영향을 받고 있으며, 엔진의 주요한 A/F설정구간인 A/F가 30이하의 구간에서는 엔진의 회전속도가 빠를수록 그 발생농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 엔진의 회전속도 증가에 따른 연료와 공기의 혼합시간 저감에 기인한 것으로 판단되며, 기존의 연구³⁾에서 HC는 두 번째 분사보다는 첫 번째 분사에 좀더 많은 영향을 받는다는 사실을 고려할 때, 엔진의 회전속도증가에 따른 첫 번째 분사의 혼합을 증가의 기술방안이 필요할 것으로 보인다.

한편으로 CO의 경우는 엔진의 회전속도에는 큰 영향을 받고 있지 않으며, A/F에 절대적으로 영향을 받는 것을 알 수 있다. CO는 A/F가 20에서 25사이에 최소의 발생이 이루어지고 있다.

NOx의 경우는 부하의 증가 또는 A/F의 감소에 따라 발생량이 증가되는 결과를 보여주고 있으며, 엔진의 회전속도증가에 따라 동일한 분사시기조건에서 NOx의 발생은 감소되는 특징을 보여주고 있다.

Smoke의 경우는 엔진의 회전속도가 가장 빠른 1800rpm에서 그 발생량이 가장 많았으나, 1000rpm과 1400rpm의 경우는 차이가 미소하거나 오히려 1400rpm에서의 smoke 발생이 더 작은 결과를 나타내고 있다.

3.2 연소 압력 및 연소 특성

연소압력 및 연소실내 온도

전절에서 엔진의 회전속도 증가에 따라 NOx의 발생농도는 줄어드는 것을 확인하였다. 이러한 원인을 좀 더 자세히 고찰하기 위하여 연소압력을 이용한 분석을 수행하였으며, 그 결과를 제시하였다.

다음의 Fig. 4에는 동일한 연료량에서의 엔진회전속도변화에 따른 연소실내의 압력을 보여주고 있다. 대부분의 압력곡선에서 최고연소실압력은 TDC 근방의 두 번째 분사된 연료의 연소이전에 형성되는 것을 보여주고 있으며, 엔진의 회전속도가 높아

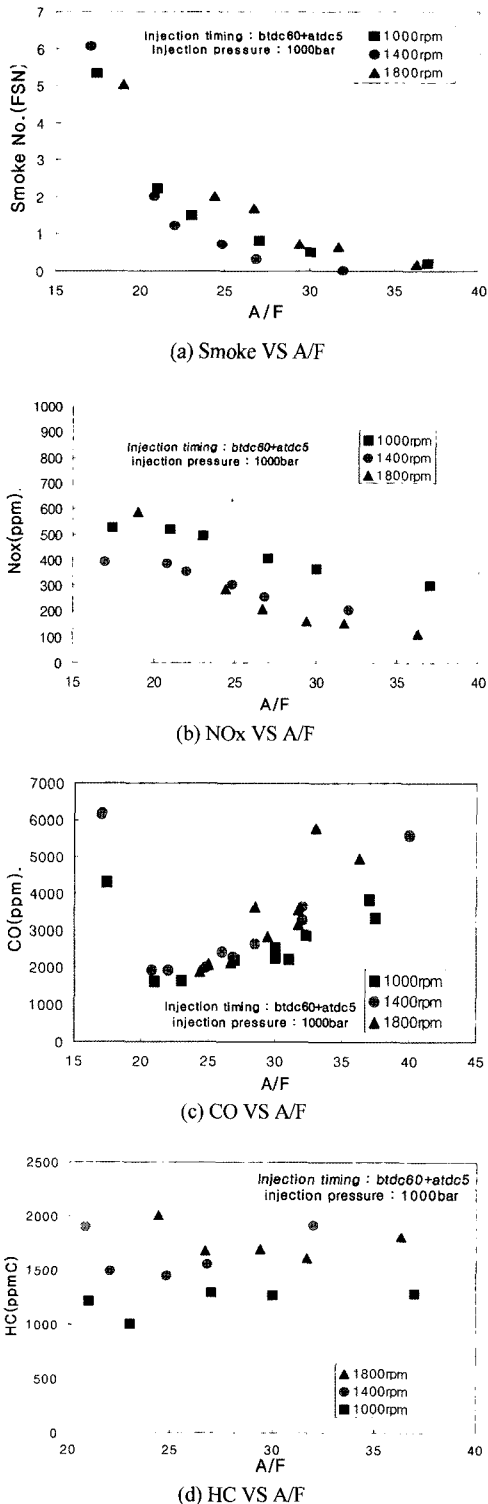


Fig. 3 Emission and the IMEP according to engine rpm and A/F(air-fuel ratio)

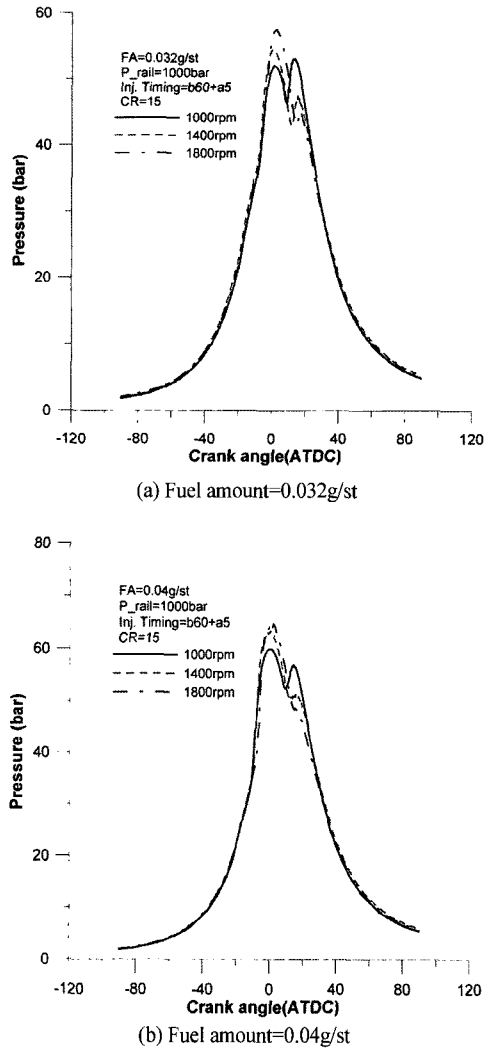


Fig. 4 Comparisons of cylinder pressure with engine rpm

질수록 최고압력은 증가하는 경향을 보여주고 있다.

따라서 연소실내의 최고압력은 첫 번째 분사에 지배적인 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5에 나타난 연소실내 평균온도는 이와는 다른 결과를 보여주고 있으며, 엔진회전속도의 증가에 따라 연소의 지연과 함께 두 번째 분사된 연료의 연소시에 최고온도가 형성되는 것을 볼 수 있다.

결과적으로 Fig. 6에 나타난 바와 같이 이러한 연소실내의 평균온도는 NO_x의 발생농도와 밀접한 관계를 보여주고 있으며, 이로부터 본 실험조건에서의 NO_x 발생농도는 엔진의 회전속도변화와 이에 따른 두 번째 분사연료의 연소시기에 매우 밀접한

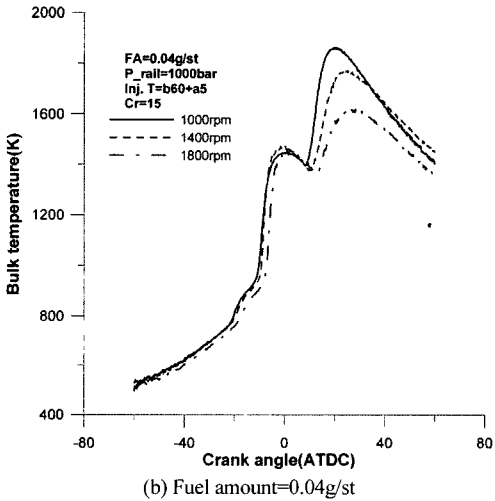
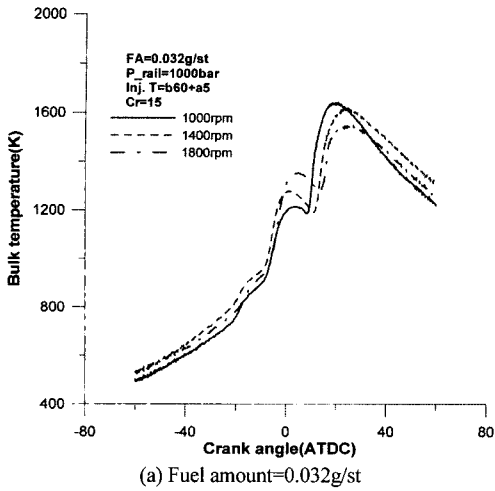


Fig. 5 Comparisons of bulk temperature in cylinder with engine rpm

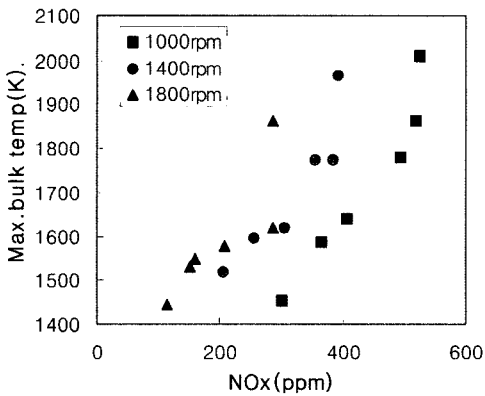


Fig. 6 Relationship between maximum bulk temperature in cylinder and exhausted NOx concentration

관계를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

다음의 Fig. 7에는 엔진회전속도 변화에 따른 열 발생율을 비교하여 제시하였다. 모든 실험 조건의 엔진회전속도에서 저온반응과 고온 반응은 연료량이 적은 경우는 거의 동일한 시기에 착화가 이루어지는 것을 볼 수 있으나, 연료량이 상대적으로 많은 경우는 엔진의 회전속도 증가에 따라, 그 반응 시기까지연되는 것을 알 수 있다.

한편으로 두 번째 분사의 연소는 엔진의 회전속도 증가에 따라 열발생율의 생성이 좀더 늦은 크랭크각도에서 생성되는 경향을 보여주고 있다. 기존의 연구³⁾에서는 두 번째 분사의 분사시작시기와 열발생율의 발생시기는 두 번째 분사된 연료의 예혼

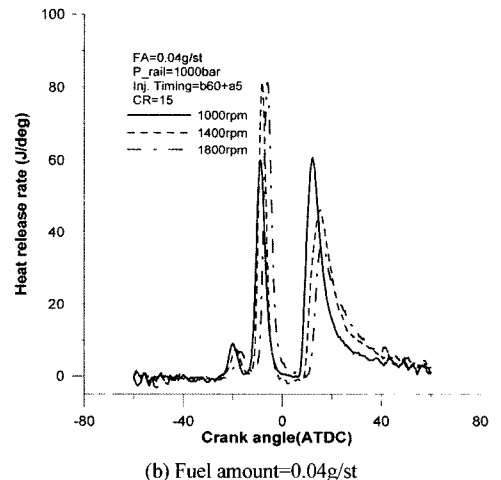
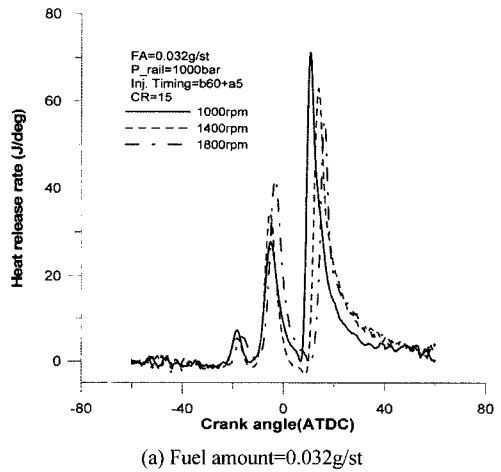
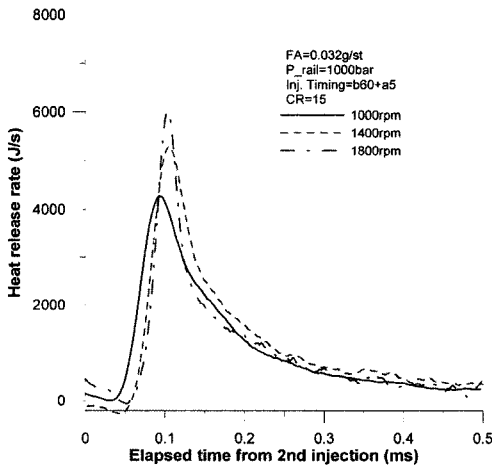


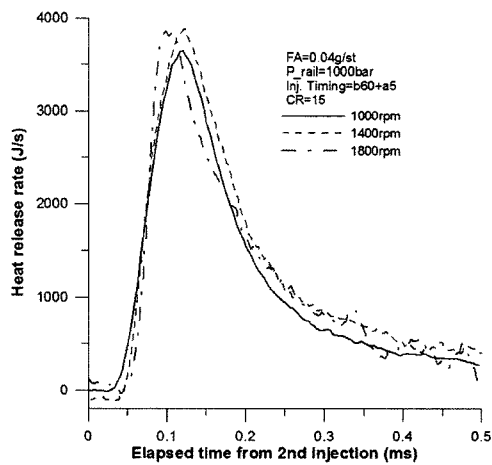
Fig. 7 Comparisons of Heat release rate profiles(J/deg) with engine rpm

합연소율과 함께 스모크 생성과 매우 밀접한 관계가 있음이 지적된바 있다. 그러나 본 연구에서 엔진 회전속도가 가장 빠른 1800rpm에서 두 번째 연료의 연소율이 늦게 나타나 예혼합연소율이 더 높을 것으로 보여지나, 스모크 발생은 오히려 많은 특성을 나타내고 있다. 이러한 차이점을 좀더 구체적으로 확인하기 위하여 두 번째 분사된 연료의 열발생율을 크랭크각도 기준이 아닌 분사 통전시작시로부터의 시간흐름에 대하여 재정리하였으며, 그 결과를 다음의 Fig. 8에 나타내었다.

전자제어 인젝터에서 동일한 분사압력하의 분사율 형태와 분사량은 인젝터의 통전시간에 의하여



(a) Fuel amount=0.032g/st



(b) Fuel amount=0.04g/st

Fig. 8 Comparisons of Heat release rate profiles(J/s) with engine rpm

결정되어지며, 실제 엔진의 연료분사는 전기적인 통전이 시작된 후, 니들 작동에 따른 기계적 분사 지연을 거쳐 통전시간보다 좀더 긴 시간동안 분사가 이루어진다.

따라서 엔진의 회전속도의 변화에 따른 분사된 연료의 예혼합연소율을 확인하기 위하여서는 크랭크각도에 대한 열발생율 특성보다는 시간에 대한 열발생율의 비교 검토가 좀더 정확한 결과를 제시할 수 있을 것으로 생각되었다.

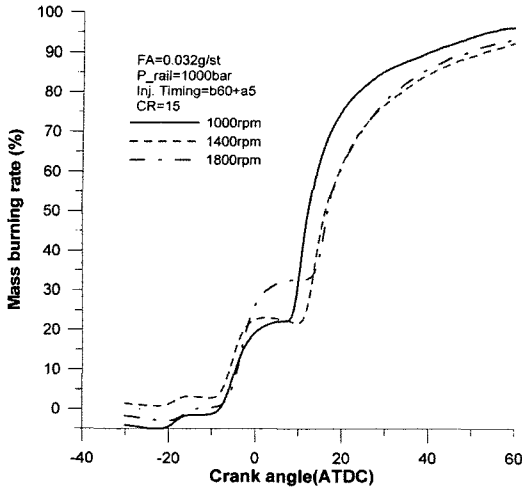
다음의 Fig. 8의 (a)에 나타내 있는 연료량이 적은, 즉 A/F가 희박한 경우(A/F~27)에는 엔진의 회전속도가 낮을수록 빠른 시간 내에 연소가 시작되는 특성을 보여주고 있으며, Fig. 8(b)의 연료량이 많아지는 경우(A/F~21) 각 엔진의 회전속도에 대한 두 번째 분사된 연료의 연소시작시기와 열발생 형태는 거의 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다.

그러나 이상의 특성 파악으로도 1800rpm에서의 smoke 발생이 증가되는 원인을 파악하기는 부족하며, 엔진의 회전속도 증가 시에는 두 번째 분사된 연료의 예혼합연소율 이외의 smoke 생성 원인이 부가적으로 존재하고 있음을 간접적으로 시사하고 있다. 따라서 1800rpm에서의 smoke 발생은 첫 번째로 분사된 연료의 연소특성과 관계가 있을 것으로 유추되어지며, 다음의 분사된 연료의 질량연소율을 계산하여 Fig. 9에 제시하였다.

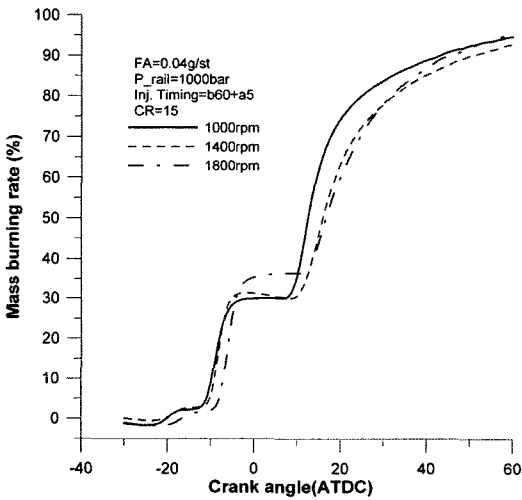
Fig. 9의 질량연소율은 두개의 단절된 상승곡선을 가지며, 각각은 첫 번째 분사된 연료와 두 번째 분사된 연료의 연소를 나타낸다. 결과로서는 1800rpm에서의 첫 번째 분사된 연료의 질량연소율이 다른 회전속도(1000rpm과 1400rpm)에 비하여 상대적으로 높은 특징을 보여주고 있다.

이러한 첫 번째 분사된 연료의 질량 연소율의 상대적 증가는 두 번째 분사된 연료의 연소에 대한 내부 EGR 효과의 증가 또는 실제 A/F를 농후하게 할 수 있으며, 이러한 특징이 smoke 발생에 영향을 미칠 수 있음을 보여주고 있다.

다음의 Fig. 10에는 첫 번째로 분사된 연료의 연소발열량과 smoke no.를 A/F에 대하여 비교하여 제시하였으며, 엔진회전속도와는 별개로 첫 번째로 분사된 연료의 열량과 smoke no.와는 상관성이 있음을 제시하고 있다.



(a) Fuel amount=0.032g/st



(b) Fuel amount=0.04g/st

Fig. 9 Comparisons of mass burning rate with engine rpm

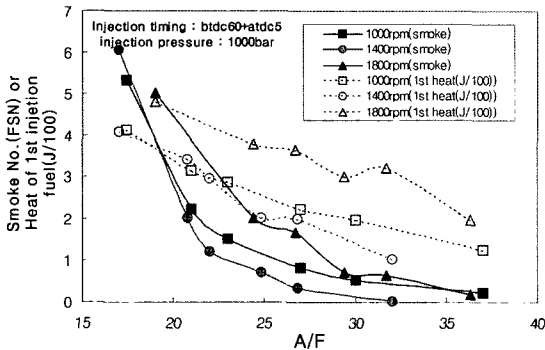


Fig. 10 Relationship of Smoke No. and heat release of 1st injection fuel

3.3 부하에 따른 연료소모특성

일반적으로 예혼합압축착화연소 엔진에서는 부하증가에 따라 연소효율이 떨어지는 것이 지적되어지고 있다.^{4,6)}

이러한 특성은 예혼합압축착화연소를 응용하고 있는 본 연구의 2단분사방식의 연소에서도 나타나고 있으며, 동일압축비에서의 BTDC 5도 단일분사의 일반적인 디젤 연소에 비하여 부하의 증가에 따라 소모연료량이 점점 많아지는 특성을 제시하였다.

본 연구에 적용된 분사방식은 2단 분사 방식이므로, 각각의 분사된 연료의 연소가 얼마나 효율적인지의 비교 평가로부터 개선하여야 할 점을 고찰하고자하였다. 이를 위하여 열발생율로부터 전체 연소 열량과 첫 번째 분사된 연료의 연소열량 그리고 두 번째 분사된 연소열량을 계산하였다.

Fig. 12의 결과그림에서 BTDC5도 단일분사연소 및 2단 분사방식의 전체 연소열량과 IMEP와는 동일선상에 존재하였으며, IMEP와 전체발열량과의 상관관계를 명확히 보여주었다.

각 분사의 연소의 효율성을 확인하기 위하여 각 분사 연료의 연소열량을 비교 평가하였다. 각 분사는 동일한 분사압력과 분사시간을 가지도록 설정되었으며, 따라서 각 분사는 전체 공급연료량의 1/2이라고 가정할 수 있다.

Fig. 13에 나타난 계산결과 첫 번째 분사된 연료는 부하의 증가에 따라 그 열량비율 변화가 거의 없는 반면, 두 번째 분사는 부하의 증가에 따라 저부하에서는 100% 넘는 연소, 즉, 첫 번째 연료의 미연소

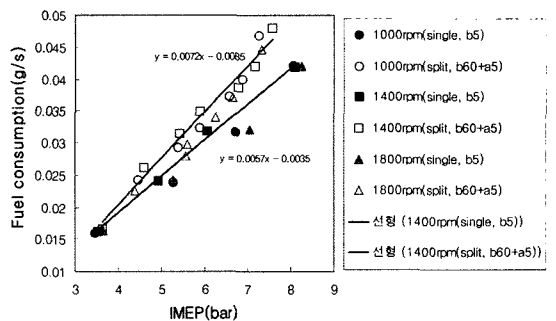


Fig. 11 Comparison of fuel consumption between convention combustion and split injection method

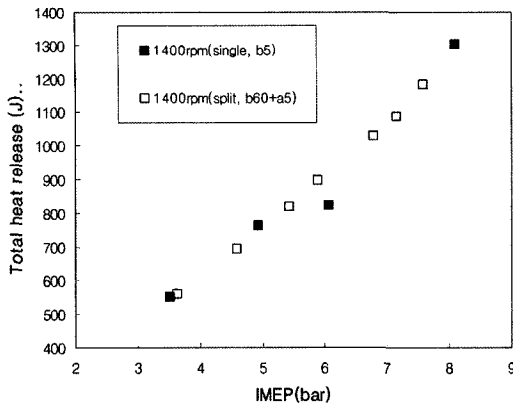


Fig. 12 Relationship between IMEP and total heat release of combustion

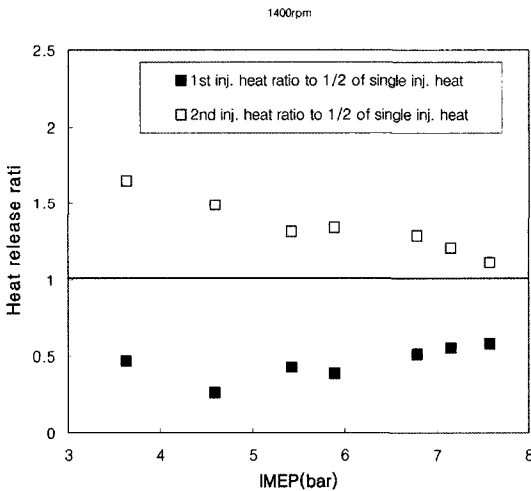


Fig. 13 Comparison of heat release of 1st injected fuel and 2nd injected fuel with 1/2 of heat release of single injection combustion

연료까지도 연소가 되고 있으나, 부하의 증가에 따라 그 비율이 감소되어 전체적인 연소의 효율이 저하되는 것으로 평가된다.

4. 결론

이상과 같은 실험을 통한 연구결과를 다음에 간략히 정리하였다.

- 1) 2단 분사 부분 예혼합 연소의 엔진 회전 속도 변화 실험에서는 동일분사시기에서 엔진 회전 속도가 증가 할수록 연소실의 연소 온도가 낮아져 NOx의 배출농도가 줄어드는 경향을 확인 할 수

있었다. 또한 연소실내의 최고압은 첫 번째 분사된 연료에 그리고 연소실내의 최고 평균온도는 두 번째 분사된 연료의 연소에 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

- 2) CO 배출농도는 엔진의 회전속도에는 큰 영향을 받지 않는 결과를 나타내었으며, 공기연료혼합비(A/F)에 주된 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. HC의 경우에는 엔진의 회전속도에 영향을 받는 것으로 평가되었으며, 회전속도의 증가는 첫 번째 분사된 연료의 혼합시간 저감을 초래하여 HC의 배출농도를 증가시키는 것으로 판단되었다.
- 3) 스모크의 경우 첫 번째 분사된 연료의 질량연소율과 관계가 있는 것으로 보이며, 이는 두 번째 분사연료의 연소시의 내부 EGR 효과 또는 실제적인 A/F의 변화를 초래하여 스모크 발생특성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 4) 2단분사시 두 번째 분사된 연료의 연소는 첫 번째 분사된 연료의 일부를 연소시키는 특징이 있으며, 부하의 증가에 따라 그 비율의 감소로 전체 연소 효율이 저감되는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 자동차기반 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계 기관에 감사를 드립니다.

References

- 1) H. Yokota, H. Nakajima, T. Kakegawa and T. Suzuki, "A New Concept for Low Emission Diesel Combustion," SAE 970891, 1997.
- 2) H. Yokota, H. Nakajima and T. Kakegawa, "A New Concept for Low Emission Diesel Combustion (2nd Rep.: Reduction of HC and CO Emission, and Improvement of Fuel Consumption by EGR and MTBE Blended Fuel)," SAE 981933, 1998.
- 3) J.-W. Chung, J.-H. Kang, B.-S. Kim, W. Kang and H.-C. Kim, "A Study on the Diesel DI-HCCI Combustion Characteristics using

- 2-stage Injection Method,” Transactions of KSAE, Vol.12, No.6, pp.66-73, 2004.
- 4) F. Zhao, T. W. Asmus, D. N. Assanis, J. E. Dec, J. A. Eng and P. M. Najt, “Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) Engines: Key Research and Development Issues,” PT-94, Society of Automotive Engineers, Inc, pp.147-149, 2003.
 - 5) A Report to the U. S. Congress, Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) Technology, U. S. Department of Energy, 2001.
 - 6) H. Akagawa, T. Miyamoto, A. Harada, S. Sasaki, N. Shimazaki, T. Hashizume and K. Tsujimura, “Approaches to Solve Problems of the Premixed Lean Diesel Combustion,” SAE 1999-01-0183, 1999.