

## 2단 분사 방식을 적용한 디젤 DI-HCCI 연소특성에 관한 연구

정재우<sup>1)</sup> · 강정호<sup>1)</sup> · 김병수<sup>2)</sup> · 강우<sup>1)</sup> · 김현철<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>자동차부품연구원 첨단동력/IT 종합연구센터 · <sup>2)</sup>자동차부품연구원 연구개발본부

### A Study on the Diesel DI-HCCI Combustion Characteristics using 2-stage Injection Method

Jaewoo Chung<sup>\*1)</sup> · Jungho Kang<sup>1)</sup> · Byoungsoo Kim<sup>2)</sup> · Woo Kang<sup>1)</sup> · Hyunchul Kim<sup>1)</sup>

<sup>1,2)</sup>Korea Automotive Technology Institute, 74 Youngjung-Ri, Pungse-Myun, Chonan, Chungnam 330-912, Korea

(Received 15 July 2004 / Accepted 5 October 2004)

**Abstract :** In this study, combustion characteristics and various performances of a Diesel fuel DI-HCCI engine using 2-stage injection method were investigated. From these researches, application ability of 2-stage injection strategy to a DI-HCCI engine was confirmed and improvement methods of performances were considered.

As the results, Using 2-stage injection method, without change of engine specifications and loss of IMEP, exhaust of NOx and Smoke emissions could be reduced to about 1/3 (at 1400rpm, IMEP 6bar) compared to conventional Diesel combustion.

**Key words :** DI-HCCI(직분식예혼합압축착화엔진), Multiple injection(다단분사), Diesel fuel(디젤연료), Early injection(조기분사), Heat release rate(열발생율), Emission gas(배기가스)

### 1. 서론

현재 전 세계적인 자동차 배기물질에 의한 대기 오염의 심각성으로 인하여 배기 규제가 더욱 강화되고 있으며, 지난 30년간 배기가스 규제치는 5%정도로 격감하였으며, 추후의 규제치는 더욱 강화될 것으로 예상되고 있다. 따라서 연소의 차원에서 NOx와 PM의 저감을 이룰 수 있는 새로운 개념의 연소 기술이 절실히 요구되어지고 있으며, 기술 선진국에서는 급격히 강화되고 있는 배기 규제에 대응하기 위하여 범 국가적 차원에서 환경친화적 자동차용 엔진개발을 위하여 노력하고 있다. 이러한 차세대 엔진용 신연소방식의 중심에 있는 것이 예혼합압축착화(이하 HCCI) 연소이며,<sup>1-8)</sup> 그 응용은 실

용성의 확대를 위하여 다중연소 모드, 직분식 연료 공급방식의 채용과 부분예혼합(partial Premixed) 연소까지 그 범위를 넓혀가고 있는 상황이다.<sup>1,2)</sup>

본 연구는 실용성을 고려한 HCCI 엔진의 기술개발을 목표로 하고 있으며, 본 논문에서는 진행 중인 연구의 일부로서 엔진의 운전영역에 적합한 예혼합기 형성 방안을 설정하여 이의 동력 및 배기 그리고 연소율 특성등의 고찰 결과를 제시하였다.

본 연구에서는 HCCI 엔진의 기술과제인 운전 영역확대를 위하여 중부하이상(IMEP 5~6bar)의 영역에서 다단분사방식<sup>3,6)</sup>을 적용하였으며, 이러한 연료 공급방식은 부분 예혼합의 특성을 가질 수 있으나, 엔진의 기본 형상의 변화와 IMEP의 손실이 비교적 적은 상태에서도 질소화합물(NOx)와 스모크(smoke)의 저감을 실현할 수 있었다. 이러한 기본 성능 실험

\*To whom correspondence should be addressed.  
jwchung@katech.re.kr

과 분석을 통하여 추후 성능 향상을 위한 방안을 설정할 수 있었으며, 추후 지속적인 성능 개선을 수행하고자 한다.

## 2. 실험조건 및 장치

### 2.1 운전범위와 분사전략의 설정

현재 다양한 예혼합방식이 존재하고 있으나, 운전영역의 확대, 착화제어, 연비악화, 천이영역에서의 운전성등의 문제점에 당면해 있다. 따라서 본 연구에서는 현재의 기술상황을 고려하여 1차적으로 성능개선을 위한 운전영역의 설정과 운전영역에 따른 분사방식의 설정 및 실험을 수행하였다. Fig. 1의 예시 그림을 참조로하여 시험영역 설정 시 차량상태의 배기 측정영역을 포함하는 것을 목표로 하고 있으며, 대략 회전속도 2000rpm, 그리고 BMEP는 8bar 정도인 것으로 고려되어졌다. 또한 상용화가 진행된 HCCI 엔진의 경우 BMEP 5bar 정도까지를 1차적인 목표범위로 설정하고 있으며, 이의 설정을 참조하였다.

단, 본 연구에서는 단기통엔진을 사용하기 때문에 BMEP에 대한 비교는 무의미한 것으로 고려되어, IMEP를 기준으로 설정하였다. IMEP 설정시 BMEP와 약 2bar정도의 균일한 차이가 있는 것으로 설정하였다. 현재까지의 연구결과<sup>3-6)</sup>를 토대로 나타낸 Fig. 2에 보이듯이 대체적으로 단일 조기 분사에 의한 HCCI 연소 방식 보다는, 다단분사 전략이 다중 연소모드와 실용성 면에서 엔진 제원의 큰 변경이 없이 HCCI 연소를 적용하기 용이할 것으로 판단되

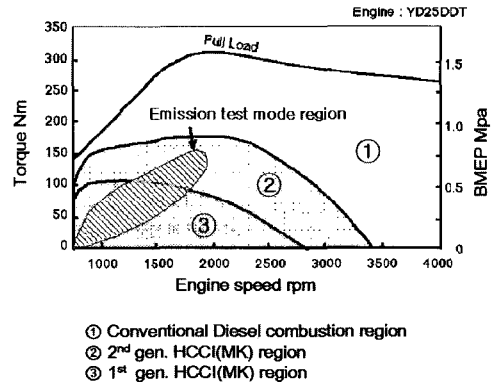


Fig. 1 Example of HCCI combustion region (ref. 5)

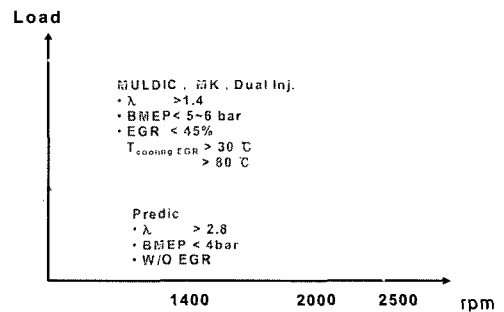


Fig. 2 HCCI region according to injection methods

있다.

이러한 개념으로부터 연료량이 적은 경우는 안정적인 분사를 위한 인젝터의 최소 통전시간을 고려하여 단일 분사를, 연료량이 비교적 많은 구간부터는 2단 분사 방식을 적용하였으며, 단일 분사방식에 대한 2단 분사 방식의 특징을 Fig. 3에 종합하여 나타내었다.

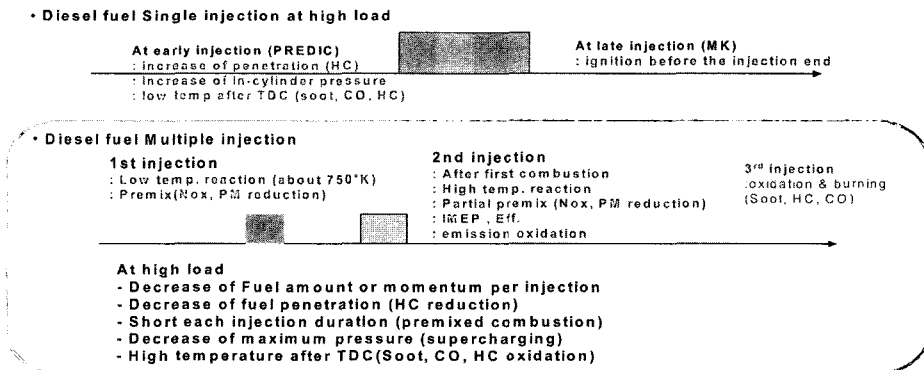


Fig. 3 Theoretical benefits of the multiple injection method in a Diesel DI-HCCI engine

본 논문에서는 2단 분사 방식의 연소 특성을 중점적으로 제시하며, Table 1에 2단 분사시의 주요 실험 조건을 나타내었다.

실험은 분사방식의 비교를 위하여 동일 연료량에서의 다양한 분사시기에 대한 단일 분사 및 2단 분사방식에서의 연소 실험이 수행되었다. 2단 분사 시 첫 번째 분사와 두 번째 분사의 연료량은 동일(각 분사량 15mm<sup>3</sup>/st)하게 하였다.

Table 1 Engine test conditions

Fuel amount	1400rpm		2000rpm	
	Inj.P	Inj. No	Inj.P	Inj.No
30 (mm <sup>3</sup> /st)	1000 (bar)	Single inj. 2-stage inj.	1000 (bar)	Single inj. 2-stage inj.

## 2.2 엔진제원 및 실험장치

엔진실험장치의 주요 구성은 단기통 엔진, 동력계, 배기분석계, 분사제어기 및 데이터 취득시스템, 각종 센서류 등으로 구성되어 있으며, 사용된 동력계와 배기 분석계의 제원은 Table 2에 나타내었다.

연소실내 압력측정을 위하여 압전소자형의 압력 센서(Kistler사, 6051B1)를 실린더헤드에 부착하였으며, 센서신호의 보정을 위하여 흡기관내에 반도체형의 압력센서(Kistler사, 4045A2)를 부착하였다.

본 연구를 위하여 실험용 단기통엔진을 제작하였으며, 연료계는 다단분사가 가능한 커먼레일형의 연료공급계와 상용 연료 펌프로 구성되어 있다. 이외에 데이터 취득 장치 및 연료계 제어용 시스템을 구축하였다. 다음의 Table 3은 실험엔진의 주요 제원을 나타낸다.

Table 2 Dynamometer and exhaust gas meter

Items	Specifications
Dynamometer	AVL, AC type, 126KW
Emission analyser	Horiba, MEXA 9100D
Smoke meter	AVL 415

Table 3 Specifications of a test engine

Items	Specifications
Fuel injection system	Common rail Direct injection
Bore × Stroke	102 × 100(mm)
Stroke volume(cc)	817
valve	DOHC, 4Valve
Compression ratio	Max 17.8(Variable)

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 2단분사방식의 IMEP 및 배기성능

본 연구에서 적용한 다단분사방식의 동력(IMEP) 및 배기 특성을 첫 번째 및 두 번째 분사의 시기를 변화시키며 조사하였다. Fig.3에 제시하였듯이 다단분사의 적용은 HCCI 엔진에서의 단일분사시 문제가 되고 있는 탄화수소(THC)의 배출 성능 향상, 촉매활성을 위한 배기온도의 확보, 동력의 확보와 함께 질소화합물과 스모크를 동시에 저감시키기 위함이었다.

다음의 Fig. 4~7에 나타났는 실험결과로부터 전반적으로 다단분사의 적용 목적에 부합되는 결과를 얻었으나, 질소화합물 저감 성능에 비하여 스모크 저감은 좀 더 성능 개선이 필요함을 알 수 있었다.

Fig. 4의 IMEP 결과로부터 단일분사 HCCI 경우 보다 엔진의 형상 변경 없이 동력 확보 면에서 우수한 것을 볼 수 있으며, 분사시기 변화에 대하여 비교적 균일한 IMEP 성능을 가지는 것으로 보여진다. 이는 기존의 디젤 연소 방식과 조기 분사 HCCI 연소방식이 분사시기에 따라 동력성능에 많은 영향을 받는 것과 달리 좀 더 폭넓은 분사시기의 자유도를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 HCCI 엔진의 문제점으로 제시되는 분사시기에 따른 착화변동 및 동력 변동에 긍정적인 특성인 것으로 보여진다.

Fig. 5의 질소화합물의 경우 첫 번째 분사시기(그래프의 횡축)가 진각 될수록 단일분사 및 기존의 연소방식에 대한 저감 성능이 뛰어났으며, 두 번째 분사시기에는 비교적 영향을 적게 받고 있다.

그러나 Fig. 6에 나타낸 스모크의 경우에는 첫 번째 및 두 번째 분사시기 모두가 영향을 미치고 있으며, 첫 번째 분사는 진각 될수록 그리고 두 번째 분사는 TDC로부터 지연될수록 저감성능이 좋아짐을 알 수 있다.

Fig. 7(a)의 탄화수소의 경우 일반적인 디젤 엔진의 경우 보다 높은 배출량을 보여주고 있으나, 단일분사의 경우보다는 낮은 배출 특성을 나타내고 있다. 또한 질소화합물과 마찬가지로 첫 번째 분사에 좀 더 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 조기분사를 최적 매칭할 수 있는 인젝터의 형상 변경과 연소실형상과의 최적 매칭을 통한 성능개선은

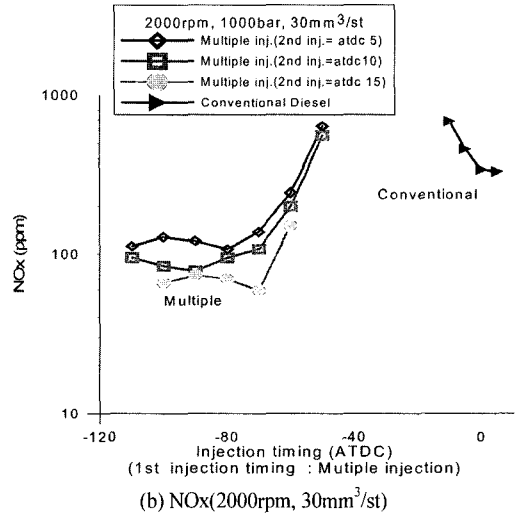
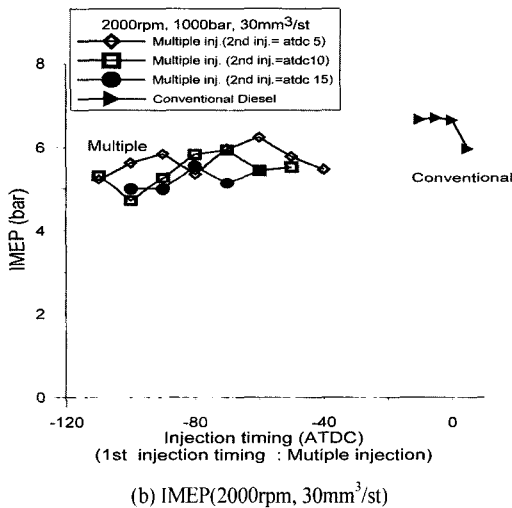
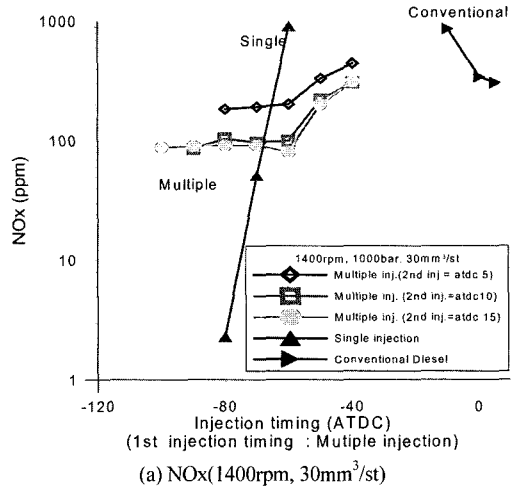
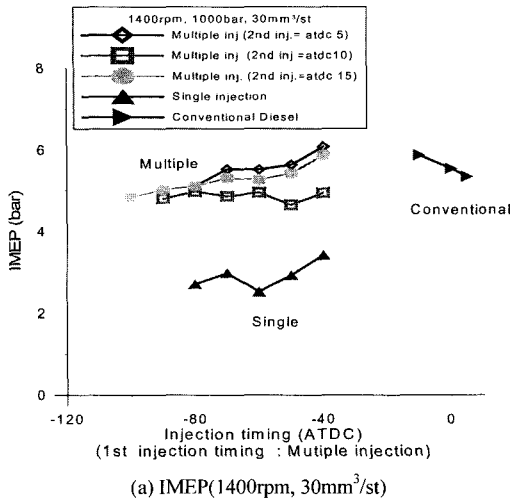


Fig. 4 Performance of 2-stage injection Diesel DI-HCCI combustion - IMEP(1400, 2000rpm)

Fig. 5 Performance of 2-stage injection Diesel DI-HCCI combustion - NOx (1400, 2000rpm)

계속 추진되어야 할 연구대상임을 확인할 수 있었다.

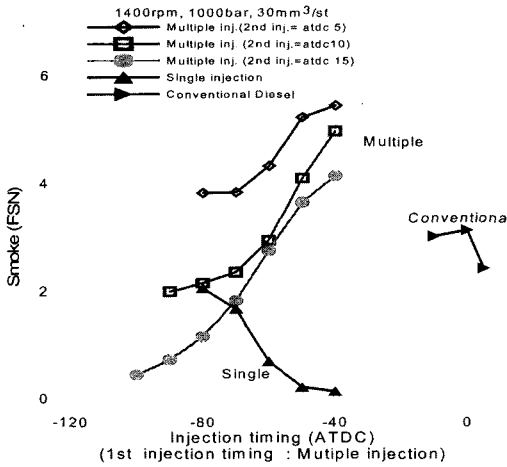
Fig. 7(b)의 배기온도 측면에서는 다단분사시 촉매의 활성을 위한 충분한 온도가 조성되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 연소해석 및 연소 특성 고찰

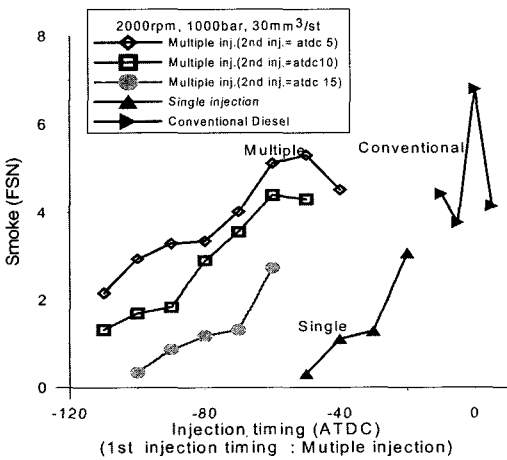
전절에서 제시되었던 질소화합물과 탄화수소등이 다단분사시의 첫 번째 분사시기에 주된 영향을 받는다는 분석의 확인과 예혼합기 형성에 적합한 첫 번째 분사시기 선정을 위하여 다양한 연소조건에서의 단일분사 HCCI 연소 특성을 고찰하여 볼 필

요가 있다.

Fig. 8(a)의 실험결과 그림에서 보이듯이 엔진회전속도, 분사 압력등에 관계없이, 분사시기가 빨라짐에 따라 질소화합물 발생량은 BTDC 30도를 기점으로 줄어들기 시작하여 BTDC 60 부근의 분사부터는 안정적인 최저발생량을 유지하는 것을 보여주고 있다. 이러한 결과는 Fig. 5의 다단분사의 질소화합물 배출 특성과 동일한 결과이며, 이는 분사된 연료의 연소 불량에 기인한 결과도 있을 수 있으나, HCCI 연소의 착화 특성에 영향을 받는 것으로 생각된다. Fig. 8(b)의 단일분사 HCCI 연소의 열발생



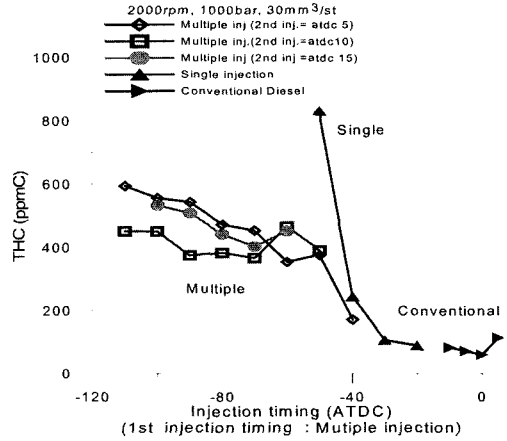
(a) Smoke(1400rpm, 30mm<sup>3</sup>/st)



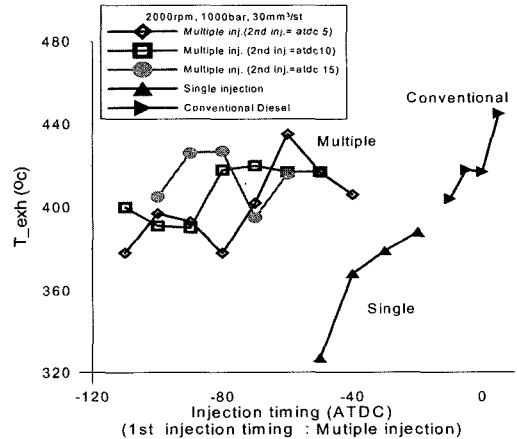
(b) Smoke(2000rpm, 30mm<sup>3</sup>/st)

Fig. 6 Performance of 2-stage injection Diesel DI-HCCI combustion - Smoke (1400, 2000rpm)

결과에서는 분사시기를 충분히 진각시킨 BTDC 60도 분사에서도 BTDC 25도 근방에서부터 저온반응이 발생되는 것을 알 수 있다. 이러한 착화 특성은 압축 온도의 영향을 가장 주요하게 받는 것으로 보인다. 즉, 본 연구의 실험엔진에서 분사종료가 대략 BTDC 30도 이전의 범위에 존재하는 경우에는 분사가 착화 이전에 모두 완료될 수 있는 시기이며, 따라서 광의적으로 예혼합기 형성이 가능한 것으로 보여진다. 그러나 분사시기가 BTDC 30도 이전이라 하더라도 분사시기에 따라 그 혼합율이 다르므로 비교적 HCCI 연소에 부합된 연료공기 혼합기의 형



(a) THC(2000rpm, 30mm<sup>3</sup>/st)



(b) Exhaust gas temperature (2000rpm, 30mm<sup>3</sup>/st)

Fig. 7 Performance of 2-stage injection Diesel DI-HCCI combustion - THC, T<sub>exe</sub>(2000rpm)

성을 위하여서는 좀더 빠른 BTDC 60 근방의 분사 시기에 분사되는 것이 타당할 것으로 보인다.

이와함께 단일분사 및 다단분사 모두 조기에 일정 연료가 분사되고 있으므로, 추후 분사각의 조절을 통한 성능 향상에 대한 추가 연구가 필요한 것을 알 수 있다.

다단분사를 적용한 HCCI 방식은 그 연소 특성상 다음의 Fig. 9의 두 가지 정도로 구분이 가능할 것으로 보이며, 물론 그 구분이 명확하지 않은 과도 현상도 존재할 것으로 보인다. 두 경우 중 case 1은 각 분사가 독립적인 HCCI 연소 형태를 가지도록 하는 형태<sup>3)</sup>이며, case2는 새로운 연소의 형태로서 1단 분사

2단 분사 방식을 적용한 디젤 DI-HCCI 연소특성에 관한 연구

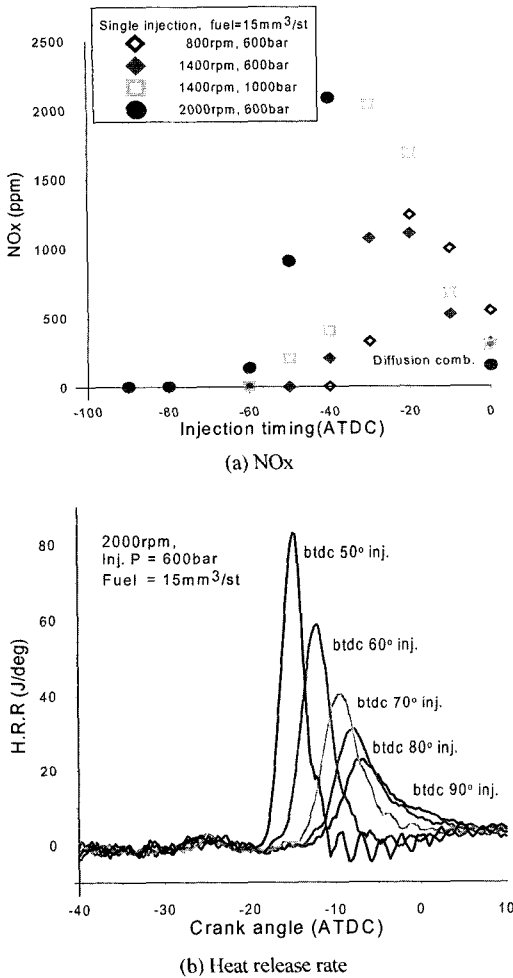


Fig. 8 HCCI Combustion characteristics of early injection (single injection) Method

는 저온반응을 유지시킨 채 2단분사를 착화제어수단으로 활용하는 방안<sup>5)</sup>이다. 두 가지 경우 모두 단일 분사의 문제점 개선에 효과가 있을 것으로 보이며, 본 실험에서의 열발생율을 고찰하여 그 연소의 성격과 특성을 조사하였다.

먼저 다단분사의 연소율 형태와 각 분사가 각각의 연소에 미치는 상호작용을 확인하기 위하여 연료 15mm<sup>3</sup>/st인 경우의 단일분사 HCCI 연소와 15mm<sup>3</sup>/st 씩 두 번 분사되는 다단분사 HCCI 연소의 열발생율 특성을 비교하였다. 다음의 Fig. 10에 나타내듯이 2단 분사의 경우 다단분사에 의한 팽창압력의 증가와 이에 기인한 잔류가스 비율의 증가에 의한 온도 상승으로 첫 번째 분사의 착화시기가 진각

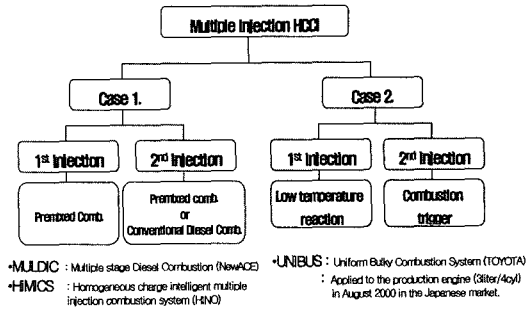


Fig. 9 Assumption of the combustion characteristics of 2-stage injection DI-HCCI

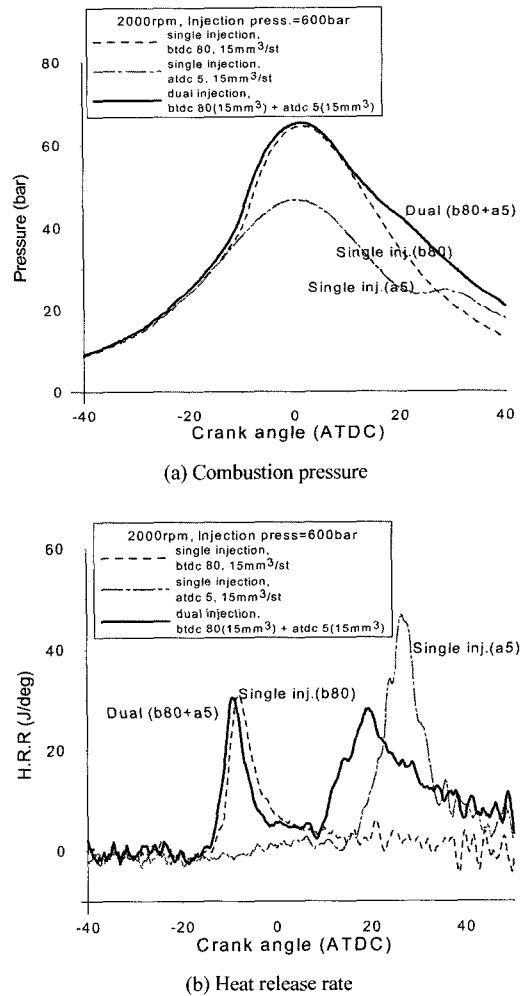


Fig. 10 Comparison of Heat release rate and combustion pressure between single and 2-stage injection HCCI combustion

되는 경향을 보여주었으며, 본 실험조건에서 두 번

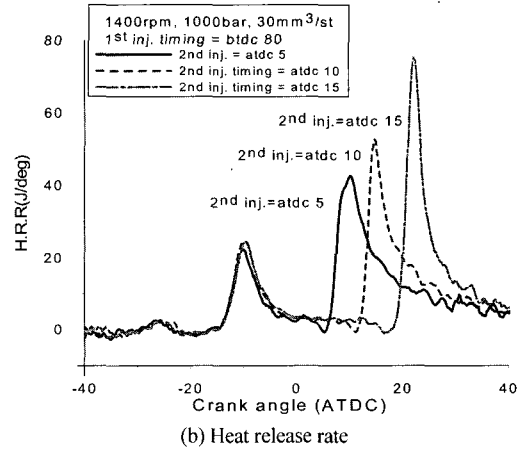
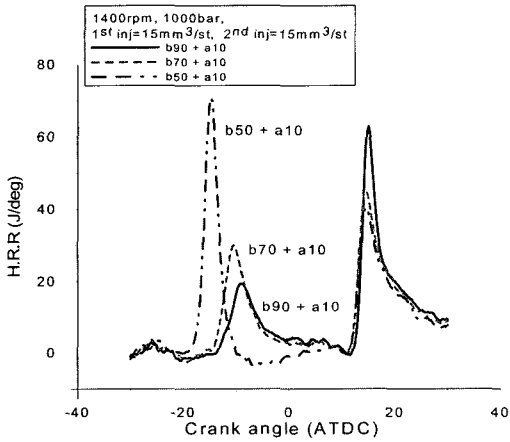
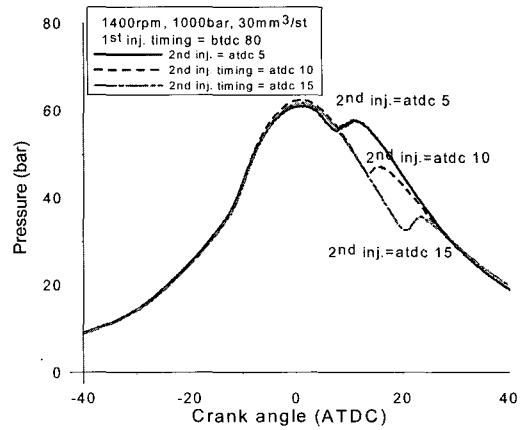
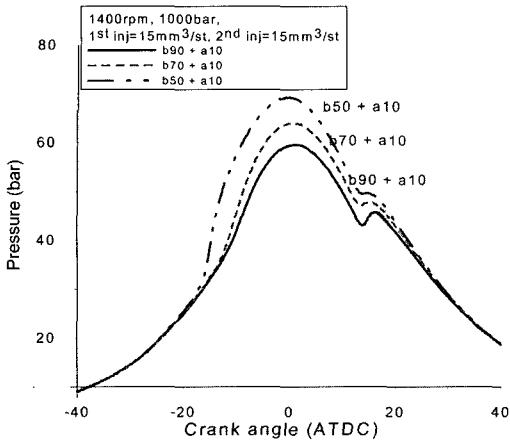


Fig. 11 Combustion characteristics of 2-stage injection method according to 1st injection timing

째 분사는 첫 번째 분사연료의 연소에 의한 고온화에 기인하여 착화 지연과 최고 열발생율이 저감되는 특성을 보여주고 있다.

다단분사에서 첫 번째 분사시기는 전술되었듯이 질소화합물 배출 저감에 매우 중요한 인자이며, Fig. 11에서 보이듯이 첫 번째 분사시기의 진각에 따라 최고 연소 압력이 저감되는 것을 알 수 있었다. 또한 첫 번째 분사시기의 지연은 Fig. 9의 Case 1에 그리고 지연은 Case 2에 가까운 성질을 가지는 것으로 보여진다. 따라서 착화제어 성능이 좀더 우수할 것으로 보여지는 Case 2의 연소 형태를 좀더 확실히 유지하기 위하여서는 첫 번째 분사연료의 착화를 억제하기 위한 엔진조건의 설정이 필요한 것을 알

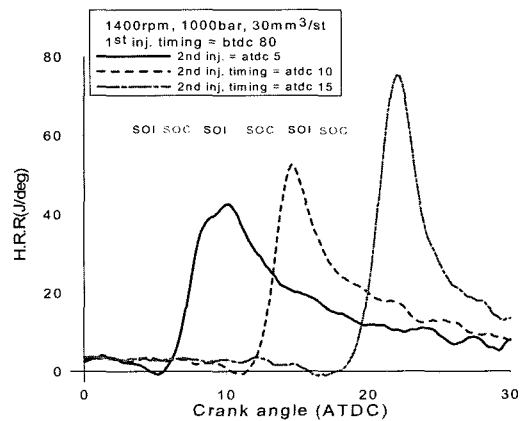


Fig. 12 Combustion characteristics of 2-stage injection method according to 2nd injection timing

수 있다. 한편으로 다단분사에서 두 번째 분사는 스

모크에 많은 영향을 미치는 것으로 파악이 되었으며(Fig. 6참조), 두 번째 분사시기 변화에 대한 열발생율 특성의 고찰을 수행하여 그 원인을 파악하여 보았다. 두 번째 분사 시기의 지연은 Fig. 12의 (c)에 나타낸 두 번째 분사 및 연소기간의 확대 그림에서 보이듯이 두 번째 분사의 지연의 따라 착화지연이 길어지는 특징을 가지는 것을 볼 수 있다. 즉, 착화지연의 증대는 두 번째 분사 연료의 예혼합연소비율의 증대를 의미한다. 즉, 다단분사에서 두 번째 분사의 예혼합연소비율의 증대를 통한 완전 HCCI 연소의 확보는 스모크 저감 성능의 향상시킬 수 있음을 의미한다.

전반적으로는 본 실험에서의 두 번째 연소는 착화제어기구보다는 지연분사(Late injection)형의 HCCI 연소 형태를 가지고 있었으며, 추후 압축비의 하향 조정을 통하여 두 번째 분사의 착화제어 수단으로서의 활용성과 그 성능 특성에 대한 고찰을 수행할 필요가 있다.

#### 4. 결론

이상과 같은 실험을 통하여 얻은 결과를 다음에 간략히 정리하였다.

- 1) 인젝터의 작동 특성을 고려하여, 연료량에 따른 운전영역별로 단일분사와 다단분사 방식을 설정하여 연소 및 배기 성능 특성을 제시하였다.
- 2) 다단분사의 경우 단일분사에 비하여 실용성면에서 우수한 특성을 나타내었으며, 첫 번째 분사는 질소화합물 배출 저감에 그리고 두 번째 분사는 스모크 배출 저감에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.
- 3) 다단분사의 경우 두 번째 분사된 연료의 연소에서 예혼합비율이 커질수록 스모크 배출 저감 성능이 우수함을 알 수 있었다.
- 4) 단일분사 및 다단분사의 경우 탄화수소의 발생을 추가 저감할 필요성이 있음을 다시 한번 확인하였으며, 이를 위한 인젝터 및 연소실 형상개선 등의 필요성을 확인하였다.
- 5) 단일분사 및 다단분사시 추후 압축비의 조정을 통하여 착화제어성능 향상 및 연소와 배기 특성의 개선등의 지속적인 연구를 수행하고자한다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 자동차기반기술개발사업에 의하여 진행 중인 [예혼합압축착화연소엔진의 기반 및 실용화 기술개발]사업의 연구결과 중의 일부로서 관계 기관에 감사를 표합니다.

#### References

- 1) S. Simescu, T.W. Ryan III, G. D. Neely, A. C. Matheaus and B. Suampudi, "Partial Pre-Mixed Combustion with Cooled and Uncooled EGR in a Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 2002-01-0963, 2002.
- 2) R. H. Stanglmaier and C. E. Roberts "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Application," SAE 1999-01-3682, 1999.
- 3) H. Yukota, Y. Kudo, H. Nakajima, T. Kakegawa and T. Suzuki, "A New Concept for Low Emission Diesel Combustion," SAE 970891, 1997.
- 4) 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.
- 5) S. Kimura, O. Aoki, H. Ogawa, S. Muranaka and Y. Enomoto "New Combustion Concept for Ultra-clean and High-Efficiency Small DI Diesel Engine," SAE 1999-01-3681, 1999.
- 6) R. Hasegawa and H. Yanagihara, "HCCI Combustion in DI Diesel Engine," SAE 2003-01-0745, 2003.
- 7) O. Y. Kwon, J. D. Ryu, K. H. Lee and C. S. Lee, "Flame and Combustion Characteristics of D.I. HCCI Diesel Engine using a Visualization Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.6, pp.100-107, 2002.
- 8) B. H. Song, D. K. Kim and N. H. Cho, "A Cycle Simulation Method for an HCCI Engine using Detailed Chemical Kinetics," Transactions of KSAE, Vol.11, No.6, pp.51-58, 2003.