

2단 분사방식을 적용한 부분 예혼합 디젤압축착화연소엔진의 성능에 미치는 압축비 및 EGR의 영향

정재우* · 강정호 · 이성만 · 강우 · 김병수

자동차부품연구원 첨단동력/IT종합연구센터

A Study on the Effect of Compression Ratio and EGR on the Partial Premixed Diesel Compressed Ignition Combustion Engine Applied with the Split Injection Method

Jaewoo Chung* · Jungho Kang · Sungman Lee · Woo Kang · Byoung Soo Kim

Advanced Power and IT Research Center, KATECH, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 30 November 2005 / Accepted 13 March 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 NO_x 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 homogenous 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. In addition, this study confirmed the possibility of securing optimum fuel economy emission reduction in the IMEP 8bar range (which could not be achieved with existing partially premixed combustion) through forced charging, exhaust gas recirculation (EGR), compression ratio change and application of DOC catalyst.

Key words : HCCI(예혼합압축착화), Diesel fuel(디젤연료), Split injection(2단분사), EGR(배기 재순환), Compression ratio(압축비), Intake pressure(흡기압)

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 NO_x와 PM의

저감을 이룰 수 있는 새로운 개념의 연소 기술이 절실히 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

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

다중연소 모드, 촉매의 적용, 직분식 연료공급방식의 채용과 부분예혼합(Partially Premixed) 연소까지 그 범위를 넓혀가고 있는 상황이다.¹⁻³⁾

본 연구기관에서는 디젤을 이용한 [HCCI 엔진의 기반 및 실용화기술개발]에 관한 연구를 진행 중이다. 본 연구에서는 기존의 연구결과를 참고로 하여,⁴⁾ 다중 연소모드와 실용성 면에서 엔진 제원의 큰 변경이 없이 HCCI 연소 방식을 응용하기 위하여 2단 분사방식을 사용하고 있다. 본 연구에 적용한 2단 분사방식의 경우 완전한 HCCI 연소의 구현보다는 부분 예혼합디젤연소의 성향이 존재하며, 이의 연소 및 배기 성능을 개선하기 위한 다양한 연소인자에 대한 영향을 고찰하여 그 결과를 정리하였다.

2. 실험방법 및 실험장치

2.1 엔진실험장치

Table 1에 실험에 사용된 엔진의 제원을 나타내었다. 엔진실험장치의 주요 구성은 동력계, 엔진, 제어기 및 데이터 취득시스템, 각종 센서류 등으로 구성되어 있으며, 동력계 및 배기 분석계의 제원은 Table 2에 간단히 나타내었다. 압력센서는 연소실내 압력 측정을 위하여 Piezo electric 형의 압력센서(Kistler사, 6051B1)를 실린더헤드를 가공하여 부착하였으며, 연소실내 압력센서의 보정을 위하여 흡기관내에 Piezo-resistive형의 압력센서(Kistler사, 4045A2)를 부착하였다.

압축비 변화는 spacer를 사용하여 실린더 헤드의 높이를 조정하는 방법을 사용하였다. EGR율은 흡기관과 배기관의 연결 통로 상에 있는 EGR 밸브의 개폐를 통하여 조절하였으며, EGR 밸브만으로 더 이상의 EGR율의 증가가 불가능한 경우는 배기관의 배압을 증가시켜 EGR율을 조절하였다. 실험시의 EGR율의 측정에는 배기분석기를 통한 흡기관중의 CO₂와 배기가스중의 CO₂의 비율을 이용하여 계산하였으며, 다음의 식 (1)에 계산식을 제시하였다.

한편 실험시의 과급의 구현은 자동차용 슈퍼차저를 응용하여 과급시스템을 구성하였다.

$$EGR(\%) = \frac{CO_{2(f)} - CO_{2(amb)}}{CO_{2(exh)} - CO_{2(amb)}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, 첨자 int : 흡기관내 농도

첨자 exh : 배기관내 농도

첨자 amb : 대기 중 농도

Table 1 Specifications of a test engine

항목	제원
형식 및 연료공급계	단기통, 직분식 C/R
분사압력	1000bar
직경 × 행정	102×100(mm)
행정 체적(cc)	817
밸브계	DOHC, 4Valve
실험 압축비	17.8, 15

Table 2 Specifications of a engine dynamometer and a emission analyser

항목	제원
동력계	AVL, AC type, 126KW
배기분석계	Horiba, MEXA 9100D
Smoke meter	AVL 415

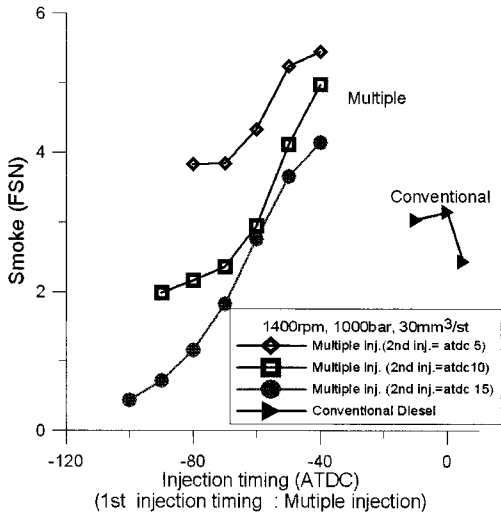
2.2 실험조건의 설정

본 연구기간동안, 그간의 연구결과⁴⁾를 토대로 하여 성능을 개선하기 위한 각종 연소인자의 영향을 파악하고자하였다. 따라서 2단 분사방식에 의한 기본적인 연소 및 배기 특성을 확인하고 이로부터 성능을 개선하기 위한 연소인자의 선별적용 방안이 필요하였다.

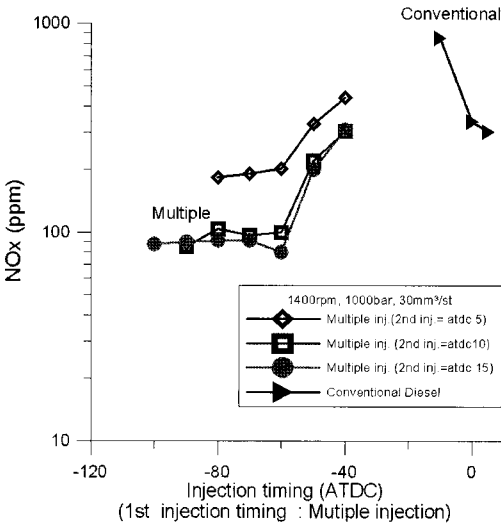
이를 위하여 이전의 연구(Fig. 2 참조)에서는 연료량변화와 분사시기 변화에 대한 연소 및 배기 특성을 조사하였으며, 그 특성에 대한 정성적인 개략을 Fig. 3에 나타내었다.

기존의 발표 논문에 제시되었듯이, 기존의 실험 결과에서는 1단(첫번째)의 분사시기를 진각시키거나, 2단(두번째)분사시기를 지연시키는 경우에, NO_x 및 smoke 등의 배기성능은 우수하나, IMEP 성능이 나빠지는 특성을 확인하였다. 한편 연료량이 많은 경우 동력손실은 더욱 커지는 것을 알 수 있었다. 분사시기의 영향 면에서는 첫 번째 분사는 NO_x와 smoke, 그리고 두 번째 분사는 특히 smoke의 발생에 매우 많은 영향을 미치는 특성을 확인할 수 있었다.

이러한 분사시기와 배기가스 및 IMEP 특성을 고려하여, 1단(첫번째)의 분사시기는 BTDC 80 -60도



(a) Smoke



(b) NOx

Fig. 1 Emission performance of split injection Diesel DI-HCCI combustion (1400rpm, 30mm³/st)

정도가 적당한 것으로 판단되었으며, 2단(두번째)의 분사시기는 ATDC 10도 부근이 적당할 것으로 판단되었다. 이상과 같은 결과 특성으로부터 성능개선을 위한 방안을 간구하였으며, 성능 개선방안의 주요 개요는 첫 번째 분사된 연료의 착화는 되도록 지연시켜 TDC에 근접하게 연소가 이루어지도록 하며, 두 번째 분사된 연료 또한 가능한 한 착화를 지연시켜 예혼합율을 증진시키는 것이다. 이러한 내용을 구현하기 위한 기술 방안을 Fig. 3에 나타내었다.

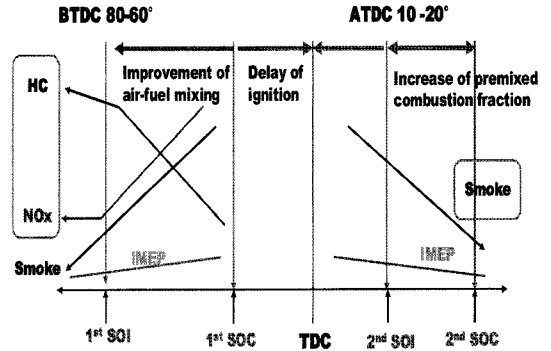


Fig. 2 Effects of injection timing of split injection method

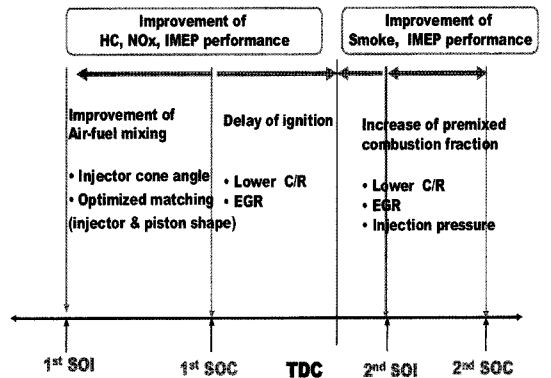


Fig. 3 Engine performance improvement of split Injection Method

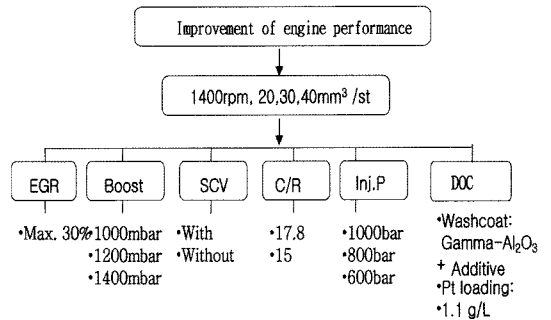


Fig. 4 Test parameters and conditions

이와 함께 본 연구에서 수행된 실험 조건을 Fig. 4에 간단히 나타내었다. 본 논문에는 이 중 주요한 몇 가지에 대하여만 서술하였다.

3. 실험 결과

3.1 압축비의 영향

현재 DI-HCCI 또는 Partially-premixed Diesel의 문

제점 중의 하나로서, 동력손실의 증대가 있으며, 그 주된 원인으로 연소시점의 부적절함일 가능성이 있다. 따라서 압축비 저감을 통한 착화시기의 지연과 이에 기인한 동력손실의 저감을 실험을 통하여 조사하여 보았다.

본 연구에서의 압축비의 저감은 압축 시 주위압력의 저감과 함께 압축온도의 저감을 초래하여 착화지연을 증대시키며, 따라서 동일 분사시기가 하더라도 길어진 착화지연기간동안 연료공기의 혼합촉진과 TDC에 근접한 연소를 구현함으로써 동력성능의 회복을 목적으로 적용되었다.

Fig. 5에 나타낸 IMEP 성능 특성에서는 압축비가 낮은 경우(압축비 15)가 높은 경우(압축비 17.8)에 비하여 상대적으로 높은 IMEP 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다.

열발생율의 비교결과인 Fig. 6(a)의 연료량 20mm³/st의 실험조건에서 압축비의 저감은 첫 번째 및 두 번째 분사 연료의 연소지연특성을 보여 주고 있으며, 이는 동력성능의 증가 가능성을 보여준다고 생각된다.

연료량이 상대적으로 많은 경우인 Fig. 6의 (b)의 연료량 40mm³/st의 실험조건에서는 첫 번째 분사된 연료의 연소가 두 압축비의 경우 모두 진각되는 경향을 나타내었으며, 두 압축비 사이의 연소의 차이는 비교적 작아지는 것을 볼 수 있었다. 특히 두 번째 분사의 연소시기의 차이가 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 smoke 저감의 측면에서는 연료량이 많은 경우 그 효과가 저감될 수 있음을 보여준다.

연소압력의 측면에서는 압축비가 15인 경우에 최고 연소압력이 대부분의 연료량 조건에서 10bar 이상 적게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

이러한 낮은 연소압력 특성은 smoke 저감을 위한 과급의 적용에 좀더 유리할 수 있을 것으로 판단되었으며, 다음에 두 가지 압축비에서 과급이 적용된 경우의 smoke 배출성능을 비교하여 나타내었다.

Fig. 7에는 흡기관압을 1400mbar로 강제 과급하였을 때, 동일 흡기관압력조건에서의 smoke 배출 특성을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이, 상대적으로 동력성능이 우수한 분사시기조건인 BTDC60도(첫번째 분사)와 ATDC5도(두번째 분사)(Fig. 7의

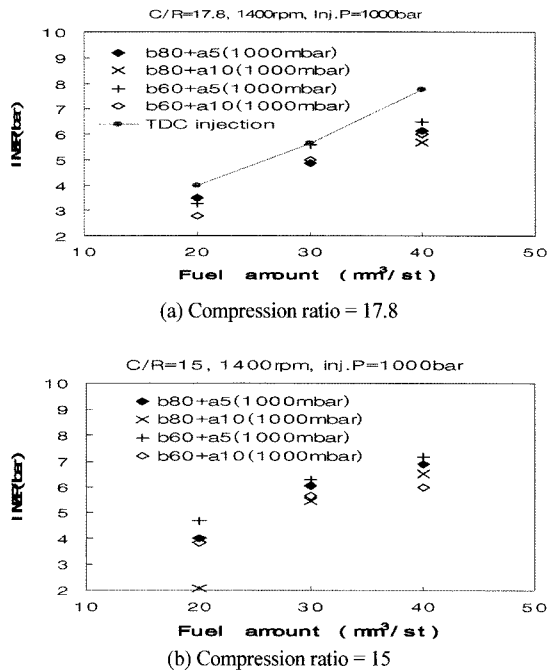


Fig. 5 Comparison of IMEP

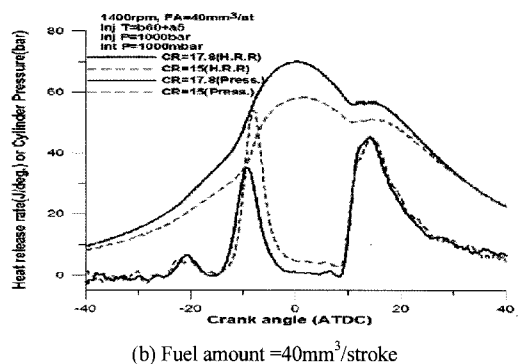
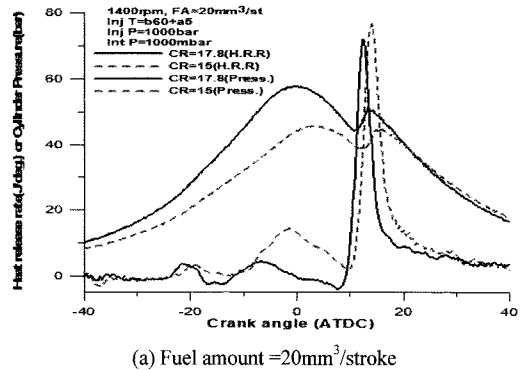


Fig. 6 Comparison of heat release rate and pressure (Compression ratios: 17.8 and 15)

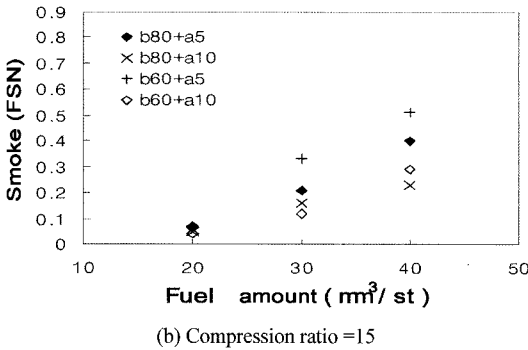
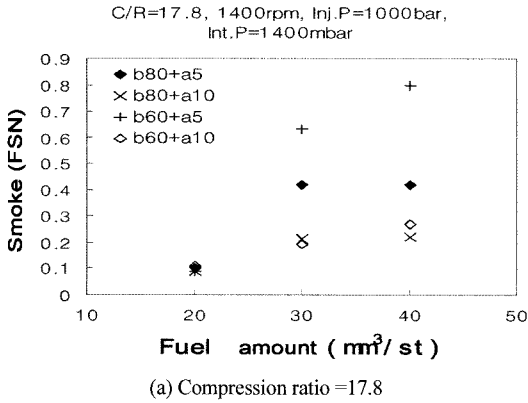


Fig. 7 Comparison of smoke emission according to boost pressure (Compression ratio: 17.8 and 15)

b60+a5조건)의 경우 낮은 압축비에서의 smoke의 저감효과가 더욱 크게 나타나는 특성을 제시하고 있다.

3.2 EGR의 영향

EGR의 적용은 확산연소에서는 연소온도의 저감에 의한 NO_x 발생량의 저감기술로 적용되어져 왔으며, HCCI 엔진의 경우 이러한 기본적인 NO_x 저감 특성 이외에도, 착화시기의 제어인자로서 활용되고 있다. 따라서 HCCI 엔진에서는 EGR의 적극적인 활용을 통한 NO_x 저감 및 착화제어방안이 간구되고 있으나, 한편으로는 과도한 EGR은 연소불안정 및 HC, CO의 증대 등 문제점을 불러일으키기도 한다.

본 연구에서는 2단분사에 의한 부분예혼합 연소의 경우에 적절한 EGR율을 고찰하기 위한 실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 8에 간략히 나타내었다.

2단 분사의 경우 EGR의 10% 적용만으로도 연료량 30 및 20mm³/st 모두에서 NO_x 배출이 50ppm 이하 정도의 수준을 확보할 수 있었으며, 이러한 수치는

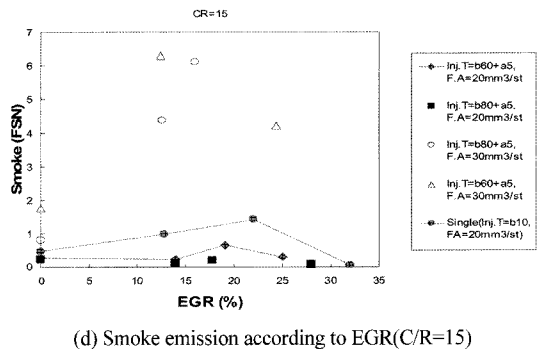
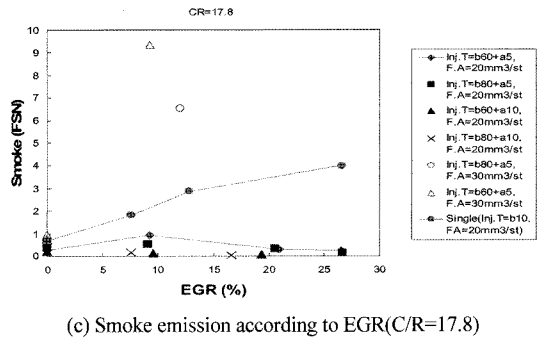
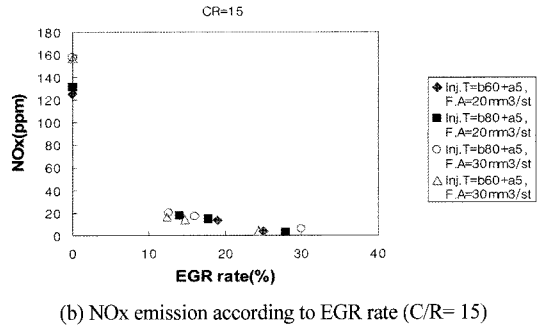
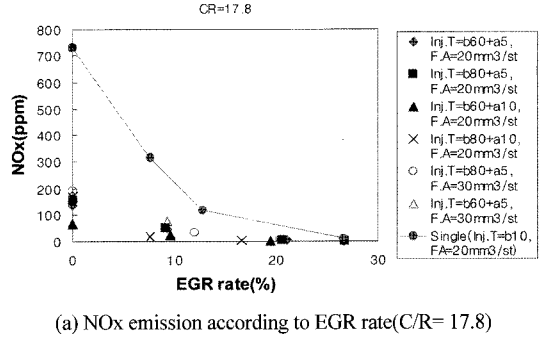


Fig. 8 NO_x and smoke emission according to EGR rate

기존연소의 분사시기(BTDC 10도)의 경우 약 20% 이상의 EGR율에서 가능한 결과였다. 그러나 기존

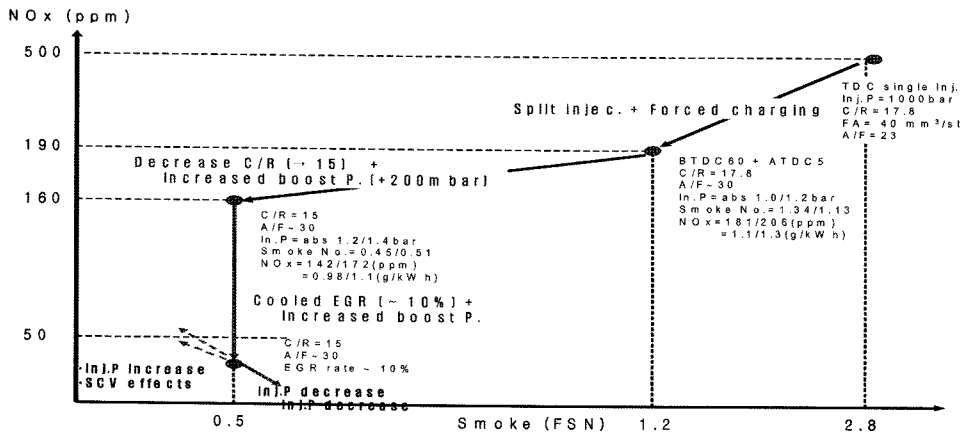
연소의 경우 EGR율이 높아질수록 smoke의 생성이 증가되는 특성이 있으므로, 이 경우 smoke no.는 약 3 이상으로 매우 높은 배출상태가 된다. 이에 반하여 HCCI방식을 응용한 2단 분사의 연료량 20mm³/st인 경우 오히려 EGR율의 증가에 대하여 smoke는 저감되는 특성을 나타내고 있다. 그러나 연료량이 30mm³/st인 경우 EGR율의 증가는 smoke의 급격한 증가를 초래하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 성능 개선 결과 및 계획

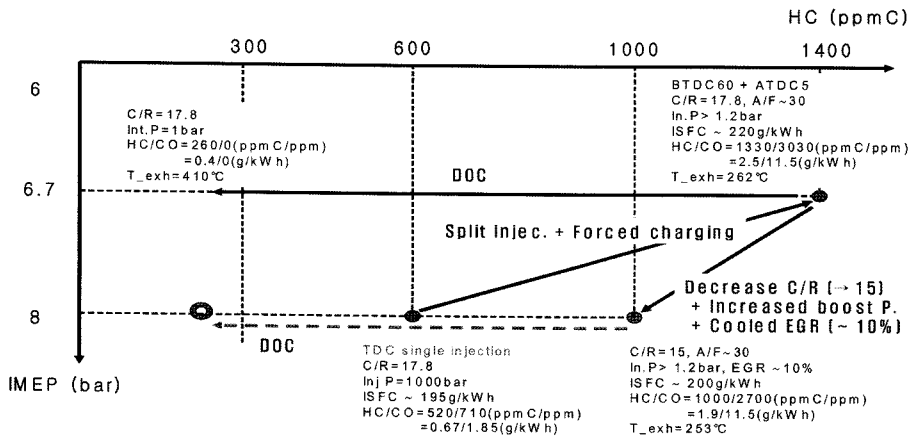
이상의 실험결과들과 실험을 통한 예측 성능을 정리하여 IMEP 8bar에서의 배기성능을 Fig. 9에 나타내었다. 그림 중의 g/kWh 단위의 배출가스농도는

연소실압력으로부터 계산한 지시 동력(indicated power)을 사용하여 계산하였다.

그림에서 나타내듯이 초기의 정상 분사시기에서의 배출 가스 농도(NOx=500ppm, Smoke No. 2.8)는 A/F를 30으로 유지하기 위한 과급의 적용 및 2단 분사의 적용 그리고 압축비의 저감을 통하여 NO는 160ppm, Smoke는 0.5 정도까지 낮출 수 있었다. 또한 2단 분사방식의 적용은 매우 낮은 EGR 율(약 10% 이내)에서 매우 높은 NOx 저감 특성을 나타내었으며, 연료량 변화(20, 30mm³/st)의 범위에서 EGR율에 대하여 거의 동일한 NOx 배출 특성을 나타내었다. 따라서 이러한 실험결과를 근거로 하여 추후 EGR 및 과급의 혼합적용을 통하여 EGR율 10%이내, 과



(a) Smoke and NOx performance (Based exp. data : A/F ~ 30, FA=30, 40mm³/st, 1400rpm)



(b) HC and IMEP performance (Based exp. data : A/F ~ 30, FA=40mm³/st, 1400rpm)

Fig. 9 Test results and performance prediction from test results

급을 통한 A/F의 30정도의 유지는 smoke no.의 0.5 수준의 유지와 함께 NOx 배출을 약 50ppm 이하로 낮출 수 있을 것으로 기대하고 하고 있다. 이와 함께 연소실 형상 및 분사계의 매칭 개선은 A/F 30수준을 좀더 낮은 25 이내로 유지시켜 과급의 부담을 줄일 수 있도록 하고자한다.

이와 함께 이러한 연소개선인자의 적용을 통하여 Fig. 9의 (b)에 나타내었듯이 IMEP 8bar를 유지함으로써 연비 측면에서도 손실이 없이 운용이 가능함을 제시하고 있으며, DOC(Diesel oxidation catalyst)의 적용을 통하여 HCCI 엔진의 주요 문제점 중의 하나인 HC 및 CO의 저감이 가능한 것을 볼 수 있다. DOC의 적용은 무과급 및 무EGR 조건에서 2단 분사에 대하여만 수행되었으나, 과급적용, 압축비 15 등의 조건에서 배출가스온도가 253°C임을 고려할 때 충분히 DOC의 활성이 이루어질 것으로 예측되며, 이의 경우 HC는 300ppmC이하로 낮출 수 있을 것으로 예상된다. 추후 이의 확인 실험을 수행예정이다.

4. 결론

이상과 같은 실험을 통한 연구결과를 다음에 간략히 정리하였다.

- 1) 2단분사를 적용한 부분예혼합연소에서 EGR의 적용은 NOx의 발생 저감 효과를 나타내었으며, 적절한 EGR을 일반적인 디젤 연소의 경우보다 낮은 10%정도였다. 또한 적은 연료량(20mm³/st)의 경우에는 EGR의 적용은 A/F의 감소를 유발함에도 불구하고, 일반적인 디젤 연소와는 달리 smoke의 증가 현상이 나타나지 않았다.
- 2) 과급압에 대한 smoke의 배출특성은 전반적으로 과급압의 증가로 희박하여지는 경우 그 배출량이 적어지는 경향을 나타내고 있으며, 동일한 과

급압에서 smoke의 발생 저감은 낮은 압축비가 좋은 특성을 보여주는 것을 알 수 있었다.

- 3) 연료량이 적은 경우, 압축비가 작아짐에 따라 첫 번째 분사된 연료의 착화시기가 지연과 함께 두 번째 분사된 연료의 착화 또한 지연되었으나, 연료량이 많은 조건에서는 첫 번째 분사의 착화지연과 이로 인한 연소실내의 온도상승과 연료농도로 인하여 두 번째 분사의 착화지연 효과는 없는 것으로 보여 진다.

후 기

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

References

- 1) R. Hasegawa and H. Yanagihara, "HCCI Combustion in DI Diesel Engine," SAE 2003-01-0745, 2003.
- 2) H. Yokota, H. Nakajima, T. Kakegawa and T. Suzuki, "A New Concept for Low Emission Diesel Combustion," SAE 970891, 1997.
- 3) 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.
- 4) 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.