

## 2단분사법에 따른 예혼합압축착화엔진의 연소 및 배기특성

국 상 훈 · 박 철 응 · 최 욱 · 배 총 식\*

한국과학기술원 기계공학과

### Effects of Two-Stage Injection on Combustion and Exhaust Emission Characteristics in a HCCI Engine

Sanghoon Kook · Cheolwoong Park · Wook Choi · Choongsik Bae\*

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received 8 May 2004 / Accepted 30 June 2004)

**Abstract** : HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) combustion has a great advantage in reducing NOx (Nitrogen Oxides) and PM (Particulate Matter) by lowering the combustion temperature due to spontaneous ignitions at multiple sites in a very lean combustible mixture. However, it is difficult to make a diesel-fuelled HCCI possible because of a poor vaporability of the fuel. To resolve this problem, the two-stage injection strategy was introduced to promote the ignition of the extremely early injected fuel. The compression ratio and air-fuel ratio were found to affect not only the ignition, but also control the combustion phase without a need for the intake-heating or EGR (Exhaust Gas Recirculation). The ignition timing could be controlled even at a higher compression ratio with increased IMEP (Indicated Mean Effective Pressure). The NOx (Nitrogen Oxides) emission level could be reduced by more than 90 % compared with that in a conventional DI (Direct Injection) diesel combustion mode, but the increase of PM and HC (Hydrocarbon) emissions due to over-penetration of spray still needs to be resolved.

**Key words** : HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition, 예혼합압축착화), Two-stage injection (2단분사), Cool flame(냉염), Compression ratio(압축비), A/F(Air Fuel Ratio, 공연비)

#### 1. 서론

디젤엔진은 열효율 및 연비성능은 좋으나, 연소 과정에 있어서 불균일한 연료의 농후한 영역에서는 입자상물질 (Particulate Matter: PM)이, 이론공연비 영역에서는 질소산화물 (Nitric Oxides: NOx)가 발생하게 되는 문제점을 안고 있다. 이러한 입자상물질과 질소산화물의 동시 저감을 이루기 위한 방안으로 예혼합압축착화(HCCI; Homogeneous Charge Compression Ignition) 연소기술이 제시되어 연구되

고 있다.<sup>1-7)</sup>

예혼합압축착화 연소는 예혼합 및 확산연소로 이루어진 기존의 디젤엔진과 달리, 고온 휘염이 발생하는 확산 연소가 없고 연소실 전체에서 균일하게 착화되는 불휘염의 연소가 일어난다. 따라서 기존 디젤엔진에서 입자상 물질을 비롯한 유해배출물의 생성원인이 되는 국소적인 과농영역을 만들지 않으며 질소산화물 생성을 미연에 방지할 수 있다. 그러나 디젤 연료는 쉽게 기화되지 않아 예혼합기의 형성과 압축착화가 어렵기 때문에, 이를 해결하기 위해 흡기온도의 상승을 필요로 하게 된다.<sup>3,6)</sup> 그러나 흡기온도의 상승은 열효율의 감소를 가져오게 되

\*To whom correspondence should be addressed.  
csbae@kaist.ac.kr

고, 착화시기를 이르게 하는 문제점을 안고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 절반의 디젤 연료를 이른 시기에 분사해 예혼합기를 형성하고 나머지 절반은 기존 디젤 연소를 따르는 방법<sup>3,4,7)</sup> 등이 시도되었으나 획기적인 배기저감은 이루지 못했다.

따라서 본 연구에서는 1.5 mm<sup>3</sup> 정도의 극히 적은 양의 파일럿분사(Pilot Injection)를 적용하는 디젤연소방식의 경우, 매연 없이 예혼합연소만 일어난다는 기존의 연구결과<sup>8)</sup>를 참고로 하여, HCCI 연소의 완전한 예혼합 연소를 유지하면서도 착화를 촉진시키기 위한 방법을 시도하였다. 이것이 2단분사법(Two-Stage Injection Strategy)으로서, 기존의 연구<sup>3,7)</sup>보다 이른 시기에 주분사(Main Injection)를 수행한 후, 착화가 일어나기 원하는 상사점(Top Dead Center: TDC) 부근에서 1.5 mm<sup>3</sup>의 극히 적은 연료를 착화원으로써 2차분사한다. 이러한 기법을 통해 공연비 및 압축비 변화에 따른 연소성능 및 배기가스 탁도(Opacity: 입자상물질), 질소산화물, 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO) 등의 배기가스 특성을 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 실험 장치

단기동 직접분사식 디젤엔진을 디젤 예혼합압축 착화 엔진으로 변환하여 실험을 수행하였다. 변환된 주요 부분은 연료의 분사시기와 방법을 제어하는 분사기구동장치(Injection Driver) 및 분사시기 조절장치(Injection Timing Control System)이다. Table 1의 제원에 나타낸 바와 같이, 사용된 엔진은 배기량 498 cc에 18.9의 압축비를 갖고 있다. 또한 분사각 150도의 5공 분사기(0.168 mm/공)와 함께, 최대 분사압력 135 MPa에서 구동이 가능한 커먼레일시스템(BOSCH)을 전용 분사기구동장치(TDA 3000H, TEMS Ltd)와 압력조절장치(PCV Driver, TEMS Ltd)를 사용하여 연료 분사압력과 분사량, 분사시기를 제어하였으며, Fig. 1에 개략적인 실험장치의 구성도를 나타낸다. 분사시기는 캠샤프트에 부착한 0.2° CA(crank angle)의 제어정밀도를 갖는 3600회 신호/캠축 1회전의 신호발생기(Encoder, Rotary Type,

Table 1 Specification of engine

	Specification
Number of cylinder	1
Injection type	Direction injection
Bore (mm) × Stroke (mm)	83×92
Displacement volume (cc)	498
Compression ratio	18.9
Injector/Nozzle	5 hole sac type, Injectin angle: 150°, Nozzle diameter :0.168mm

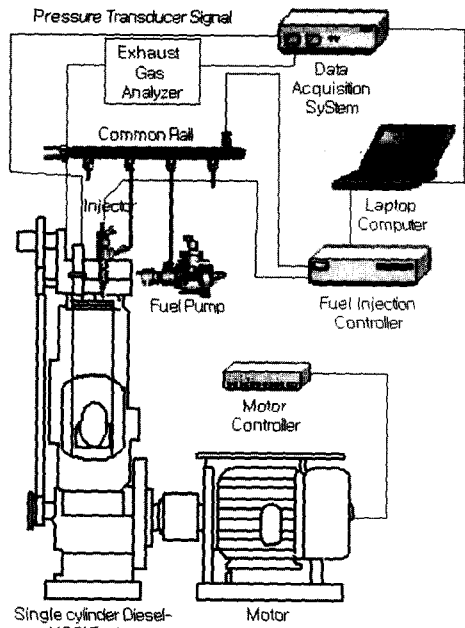


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Koyo)를 기준으로, 컴퓨터에 장착된 제어 시기 조정 카드 및 제어 프로그램(LabWindow, National Instrument)을 사용하여 자유로운 분사시기를 구현하였다. 엔진은 구동 모터(140 Nm, 25HP-15 kW, 6극)에 연결하고, 회전수를 변화기(HYDRIVE-J300)로써 귀환제어하였다. 압력센서(KISTLER 6052A, Range 0~25 MPa)를 장착하여 실린더 내 압력을 측정하였고, 광투과식 매연측정기인 Opacimeter (EplusT)를 이용해 입자상물질을, 배기가스측정장치(MEXA 1500D, HORIBA)를 이용해 탄화수소, 질소산화물, 일산화탄소의 배출량을 측정하였다. 측정된 각 데이터는 테이더취득장치(WaveBook512, IOtech)를 이용해 컴퓨터에 저장하고 분석하였다.



Fig. 2 Variable piston blocks to change the compression ratio

압축비의 변화는 단기통엔진 확장피스톤부의 피스톤 블록 크기를 변경하여 연소실을 이루는 보울 부분의 부피가 달라지도록 하여 구현하였다. 즉, Fig. 2에 나타난 바와 같이 기존의 18.9의 압축비를 갖는 피스톤 블록을 23과 27.7의 압축비가 가능하도록 크기를 변경하였다.

예혼합압축착화의 연소에서는 압축비가 높을수록 저온연소의 특징인 냉염(Cool Flame)의 발생 시기가 빨라지고 연소 효율을 저해하는 이른 착화시기의 문제가 발생한다. 따라서 기존 직접분사식 디젤엔진을 예혼합압축착화 엔진으로 변환·적용할 경우 발생하는 이른 착화를 방지하기 위해 압축비를 낮추는 방향으로 연구가 진행되어 왔다.<sup>3,5,6)</sup> 그러나, 디젤연료가 기화되기 어려워 흡기온 상승이 요구되기 때문에, 본 연구에서는 흡기온도의 가열없이 착화촉진의 목적으로 기존 디젤엔진보다 압축비를 상승시켜 실험을 수행하였다.

2.2 실험 방법

Table 2에 나타난 바와 같이 엔진 운전 속도는 해당 엔진의 공회전 조건에 해당하는 무부하, 800 rpm이며, 열전달 등의 측면에서 실제 엔진 운전조건과

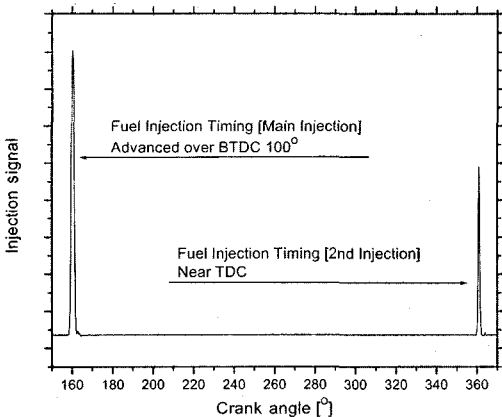


Fig. 3 Two-stage injection strategy

유사한 상황이 재현될 수 있도록 냉각수 및 연료온도를 제어하였다. 주연료의 분사는 기존 디젤연소에 비해 특히 이른 시기인 BTDC(before top dead center:상사점 이전) 100°CA 이전에 이루어지고, 착화연료는 상사점 부근에서 분사되었다. 고진류측정장치를 통해 분사구동기에서 발생하여 분사기로 전달되는 신호의 계측 결과를 Fig. 3에 나타내며, 분사시기의 모니터링을 위해 분사압력, 연료량 및 압축비의 변화에 따라 폭넓게 적용하였다. 실험 결과는 150회의 엔진 사이클에 대한 데이터를 취득해 평균하였다.

3. 실험 결과

3.1 디젤과 예혼합압축착화 연소

Fig. 4에 기존 직분식 디젤연소방식의 열방출을 선도 및 화염사진을 나타낸다. 이 때의 화염사진은 고속디지털비디오카메라(High Speed Digital Video Camera)를 이용해 초당 10,000 프레임, 즉 현재 운전 조건에서 매 0.48°CA당 1장에 상당하는 비율로 취득한 결과이다. 영상의 해상도는 512×384 픽셀, 노출 시간은 95 μs를 적용하여 선명한 영상을 얻을 수 있었다.

디젤엔진 연소방식의 경우, BTDC 15°CA에서 분사된 연료가 10°CA의 착화지연기간을 거친 후 강렬

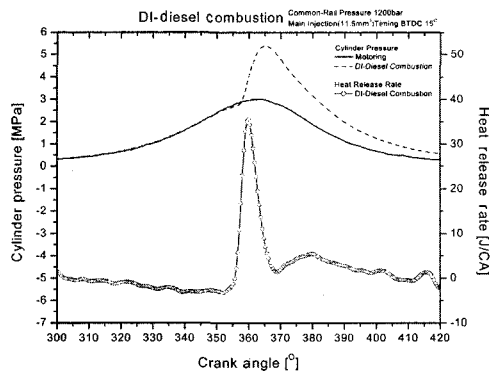
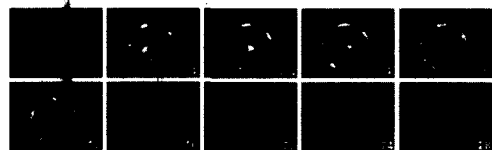


Fig. 4 DI-diesel combustion

한 휘염이 발생하며 연소하는 과정을 거친다. 또한 열방출율면에서는 예혼합연소에 의한 첫번째 열방출을 및 확산연소에 의한 두 번째 열방출율의 구분이 명확하게 나타나고 있다. 이 결과는 추후 도시유효평균압력(indicated mean effective pressure: IMEP)와 배기가스 계측결과의 분석을 위한 비교 데이터로 사용되었다.

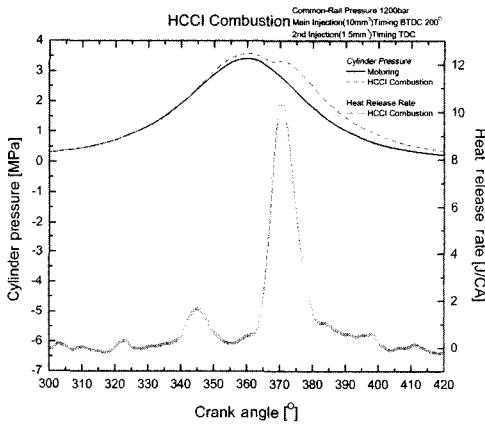
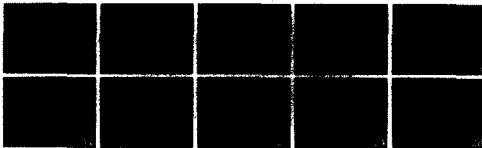


Fig. 5 HCCI combustion (two-stage injection)

Fig. 5는 예혼합압축착화 연소를 구현하기 위해 BTDC 200°CA의 극히 이른 시기에 주분사를 수행하고 상사점에서 2차분사한 경우로서, 휘염의 발생은 단지 2차분사시에만 미약하게 관찰되고 있다. 또한 열방출율선도에서 확인할 수 있듯이, 이른 시기에 조성된 예혼합기의 압축과정에서 냉염의 발생에 의한 낮은 수준의 열방출이 일어나고 이어서, 예혼합연소 과정으로만 이루어진 주열방출이 일어나고 있다. 이 때 열방출 최대값의 정량적인 수준은 Fig. 4의 직분식디젤연소의 경우에 비해 약 1/3 정도이다.

### 3.2 주분사(Main Injection Only)

기존의 직분분사식 디젤 엔진 운전 모드에서 연료의 분사시기만을 극히 이른 시기로 바꾸면서 그에 따른 예혼합압축착화 연소 가능성을 확인해 보

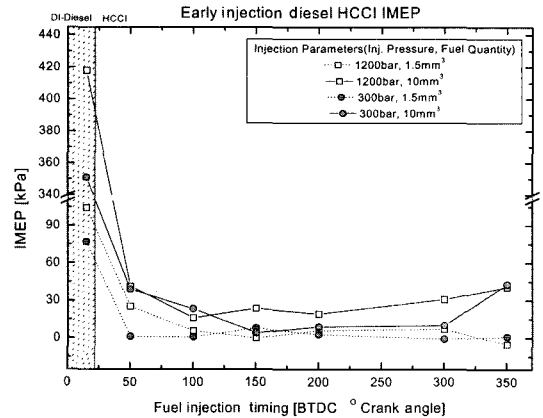


Fig. 6 Variation of IMEP versus fuel injection timing for diesel-fuelled HCCI combustion

고자 하였다.

Fig. 6에서 상사점에 가까운 연료 분사 시기의 결과들을 직분분사식 디젤 엔진 범위로 분류해 이를 사선 안에 표기하였고, 그보다 이른 분사시기를 예혼합압축착화 범위로 분류하였다. 결과를 통해 알 수 있듯이, 연료량, 분사압력 및 분사시기에 따라 크게 달라짐이 없이, 예혼합압축착화 범위에서의 도시평균유효압력은 디젤 연소 대비 최대 10% 정도에 그치고 있다. 이는 디젤연가 충분히 기화되지 못하고 극히 적은 양의 연료만이 연소되었기 때문으로, 이러한 연소 상태의 개선을 위해 2단분사기법을 도입하였다.

### 3.3 2단분사(Two-Stage Injection)

앞서 설명한 2단분사기법을 통해 Fig. 7에서와 같이 도시평균유효압력 값이 증가하는 결과를 얻었다. 이는 상사점부근에서 분사된 극히 적은 양의 2차 분사연료가 저온특성을 나타내는 희박예혼합연소에 있어, 기화촉진을 통한 가연혼합기 조성은 물론 착화촉진제로서의 역할을 충분히 수행하고 있기 때문으로 추정된다.

#### 3.3.1 분사 압력의 영향

Fig. 8은 고압분사의 경우를 상정한 120 MPa 및 저압분사에 해당하는 30 MPa의 경우의 연소압력 및 열방출을 변화를 나타낸다. 고압분사(120 MPa)인 경우의 열방출율은 저압분사(30 MPa)의 경우에

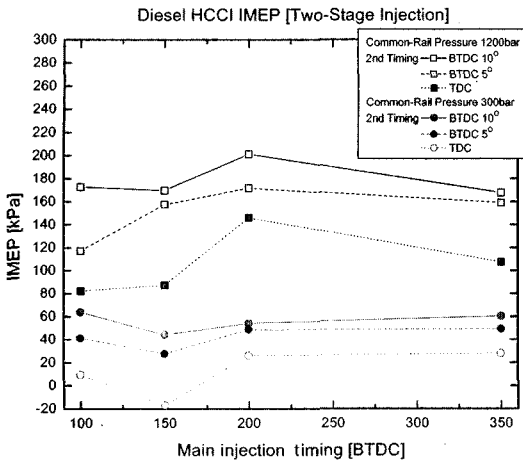


Fig. 7 IMEP of two-stage injection diesel HCCI

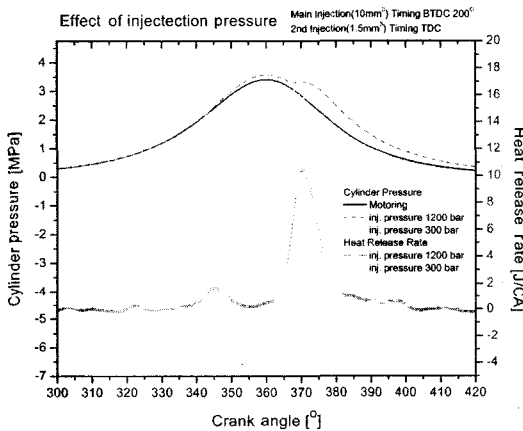


Fig. 8 Effect of injection pressure on combustion

비해 정량적으로 높은 수준을 유지하며, 연소압력의 상승에도 기여한다. 이는 높은 분사압력을 통해 부여된 큰 운동량이 주분사는 물론 2차분사에 있어서도, 연료의 무화 및 기화, 그리고 예혼합기 형성에 유리하게 작용한 결과로 판단된다.

### 3.3.2 주분사시기(Main Injection Timing)

Fig. 9의 주분사시기에 따른 연소압력 및 열방출을 변화 결과에서, BTDC 200°CA의 경우가 분사압력과 2차분사시기와 무관하게 가장 높은 열방출을 및 연소압력을 갖는다. 일반적으로 예혼합기 형성을 위한 충분한 시간을 갖기 위해서는 이른 분사시기가 요구되지만, 분사시기가 너무 이르르면 대기압 조건에서의 고압분사로 인해 벽면적심(Wall-

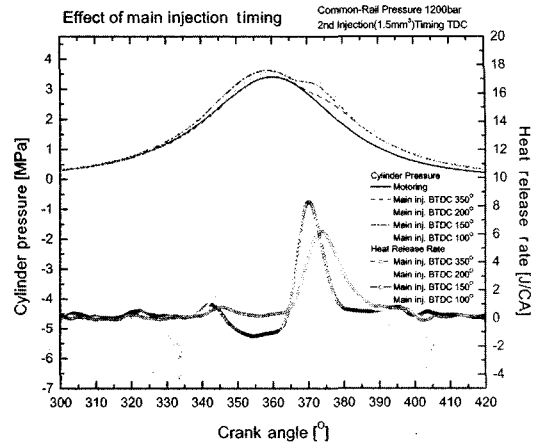


Fig. 9 Effect of main injection timing on combustion

wetting)이 발생할 수 있는 시간이 증가하게 된다. 따라서, 이를 최소화하면서도 예혼합기 형성시간을 확보할 수 있는 최적의 분사시기가 존재하게 되며, 본 연구의 실험조건에서는 흡기행정 말기와 압축행정 초기정도에 해당하는 BTDC 200°CA에서 최적의 값을 얻을 수 있었다.

### 3.3.3 2차분사시기 (2nd Injection Timing)

Fig. 7의 결과를 통해 2차분사시기가 이룰수록 도시평균유효압력이 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 이에 대한 보다 상세한 분석을 위해 도시한 Fig. 10의 열방출을 선도에서는 2차분사의 시점이 주 열방출의 시작 시점이 되는 현상을 보이고 있다. 이는 2차분사시기의 제어가 곧 연소상(Combustion Phase)의 제어 수단으로 활용될 수 있음을 보여준다. 또한 2차분사시기가 상사점까지 지각될수록, 2차분사시기에서의 연소실 내 압력이 고온·고압조건이 조성되므로 짧은 시간 내에 연소가 일어나고, 따라서 열방출 기간은 짧고 열방출의 최대값은 증가하는 결과를 보여주고 있다. 그러나 상사점에서 2차분사를 실시할 경우, 연소열의 최대발생시점이 ATDC (after top dead center: 상사점 후) 10°CA 부근에서 나타나므로 연소압력의 상승측면에서는 손실이 발생한다. 이러한 이유로 BTDC 10°CA에서의 2차분사를 적용하는 경우가 피스톤의 기구학적 타이밍과 적절한 조화를 이루므로 가장 높은 도시평균유효압력을 갖는다.

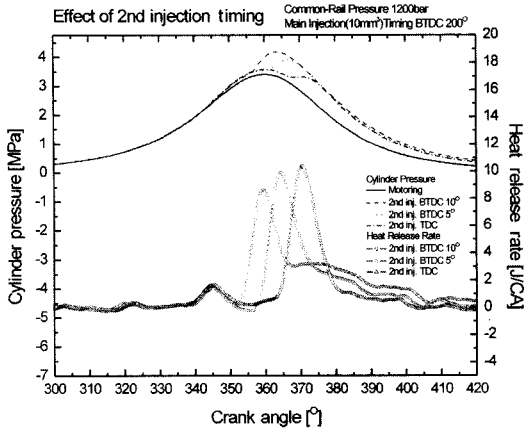


Fig. 10 Effect of second injection timing on combustion characteristics

### 3.4 공연비의 변화

공연비 변화에 따른 연소 상태의 분석을 위해 Table 3과 같이 분사 연료량을 변화시키며 실험을 수행하였다.

Fig. 11은 도시평균유효압력 및 배기가스 분석 결과로서, 기존 디젤연소모드의 해당 값과 비교하여 그 경향을 분석하고자 하였다. 도시평균유효압력에 있어서는 주분사만 수행한 경우와 2단분사법을 적용한 경우 모두 연료량의 증가가 곧 도시평균유효압력 상승으로 이어졌으나, 주분사만 적용했을 경우는 매우 낮은 값을 보였다. 또한 2단분사법을 적용한 경우에도 공연비 30 즉, 디젤연소에 비해 두 배 가까이 많은 연료를 분사할 경우에는 비슷한 출력을 얻을 수 있었다. 이는 대기압 상태의 실린더 내 조건에서 연료를 분사함에 따라 연료 분무 도달 거리가 길어졌고, 결과적으로 실린더 벽면에 충돌하는 연료가 존재하여 연료이용률이 악화되기 때문으로 판단된다. 이러한 충돌은 배기가스에도 영향을 주어 공연비가 낮아지면서 연소 상황이 개선되어 입자상물질 즉, Opacity 값이 크게 감소하는 경향을 보여도 여전히 높은 수준을 유지한다. 또한 기존 디젤연소에 비해 높은 HC와 CO 배출을 보이고 있는데, 이는 배기온도가 낮아 이들이 산화되지 못해 나타난 결과로 판단된다. 그러나 연료량의 증가에도 불구하고, 탄화수소와 일산화탄소 배출이 크게 증가하지 않으면서, 질소산화물은 기존 디젤 대비

Table 3 Air fuel ratio by fuel quantity

A/F	132	55	40	30
Fuel quantity [mm <sup>3</sup> ]	4.8	11.5	16.0	20.9

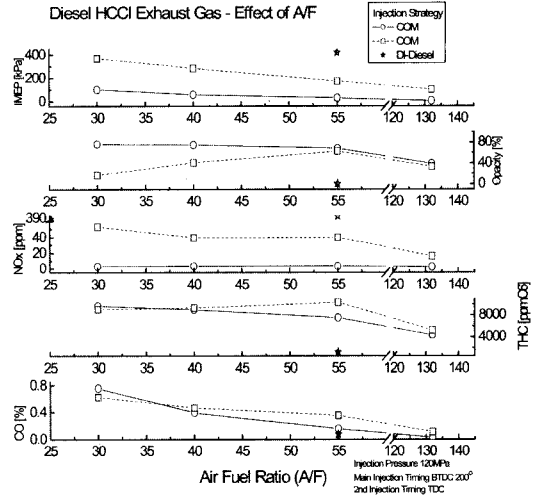


Fig. 11 Effect of air-fuel ratio on IMEP and emission level

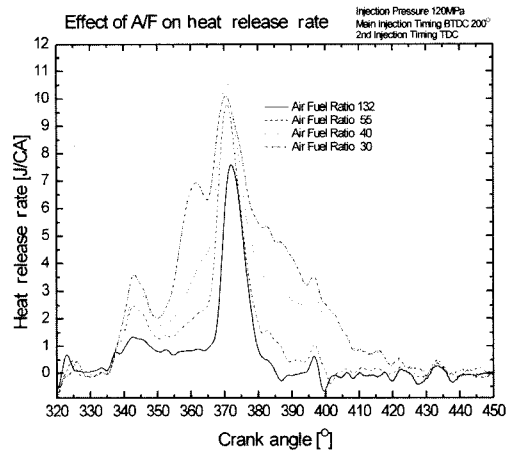


Fig. 12 Effect of air-fuel ratio on heat release rate

90% 이상 저감되는 큰 이점을 보여주고 있다.

Fig. 12의 열방출 변화를 살펴보면, 공연비에 관계없이 냉염의 발생 시점은 일정하며, 주 열방출은 연료량 증가에 따라 더욱 급격해지고 높은 최대값을 갖게 된다. 이에 따라 공연비 30의 경우에는 자착화에 의한 열방출 도중에 2차분사가 실시되어 두 개의 열방출 최대치가 나타나고 있다. 따라서 상온의 흡기온도 조건에서도 2단분사기법을 적용할 경우

에는 연료량이 증가하더라도 조기착화의 문제없이 연소상을 제어할 수 있는 가능성을 확인하였다.

### 3.5 압축비 변화

예혼합기의 착화를 촉진하기 위한 착화 연료의 사용에 있어, 압축비에 따른 연소상태의 변화를 살펴보았다. 즉, 120 MPa의 분사압력으로 주연료를 BTDC 200°CA에서 분사하고 착화 연료를 상사점에서 분사한 경우, 압축비 변화가 연소압력 및 열방출률에 미치는 영향을 Fig. 13에 나타내었다.

압축비가 높을수록 냉염의 발생에 필요한 연소실 내 온도와 압력 조건이 이른 시기에 만족되어 냉염의 발생시점이 빨라짐을 알 수 있으며, 이에 따라 예혼합기의 연소도 이른 시기에 시작된다. 또한 압축비 18.9인 경우에 상사점에서의 2차분사 이후에야 예혼합연소가 진행되어 짧은 기간 내에 급격한 열방출을 보이거나, 압축비가 23, 27.7로 각각 높아지면서 냉염 발생이후 피스톤 압축만으로 자발 착화되는 특성이 새롭게 나타나고, 이어서 상사점에서의 2차분사에 의한 열방출이 진행된다.

따라서 Fig. 14의 경우처럼 2차분사시기를 주 열방출 시작 이전인 BTDC 10°CA로 전각시킴으로써, 상사점 전후에서 조성되는 높은 열방출 수준이 보다 길게 유지될 수 있도록 제어할 수 있었다.

Fig. 15는 23:1의 고압축비를 갖는 경우의 연소변화를 나타낸 결과로서, 가장 높은 열방출을 얻을 수 있는 최적의 주분사시기는 Fig. 14의 결과와 동일하게 BTDC 200°CA으로 나타났다.

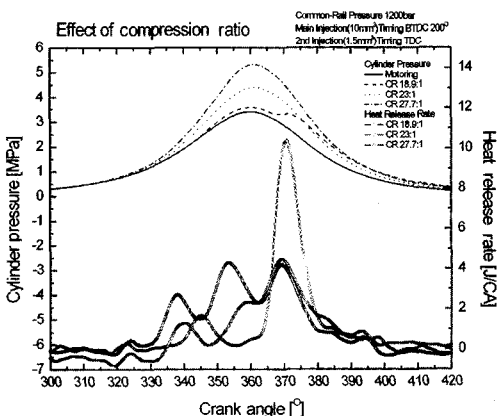


Fig. 13 Effect of compression ratio(2nd Injection at TDC)

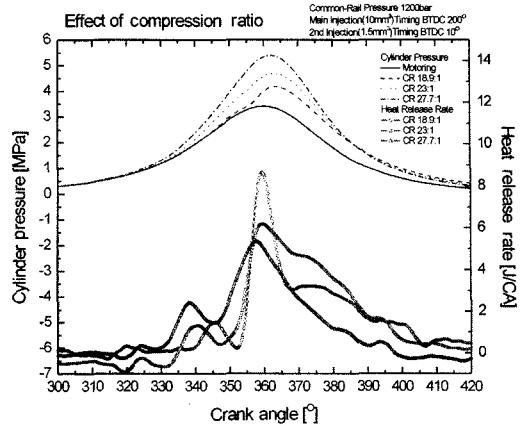


Fig. 14 Effect of compression ratio(2nd injection at BTDC 10°)

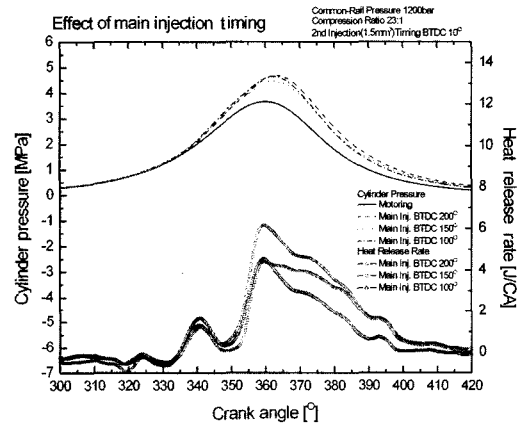


Fig. 15 Effect of main injection timing(23:1 Case)

도시평균유효압력 및 배기가스 특성은 Fig. 16에 제시되어 있다. 열방출을 선도를 통해 알 수 있듯이, 고압축비의 경우에는 기본적으로 예상할 수 있는 높은 열역학적 효율 외에도, 높은 연소압력을 통해 온도가 저하하는 팽창기간이라도 연소가 지속될 수 있는 환경을 조성하기 때문에 높은 도시평균유효압력 값을 보이고 있다. 이는 고압축비에 따른 이른 착화시기로 인해 입는 일의 손해보다도, 고압축비로 인한 자발착화의 촉진이 더 크게 작용하기 때문으로 판단된다.

배기측면에서는 압축비 증가에 따라 연소 상황이 개선되면서 배기가스 탁도가 저감되고, 기존 디젤에 비해 압축비 증가에 따라 질소산화물 배출은 크게 변화하지 않으면서도, 기존 디젤에 비해 크게 저

후 기

이 연구는 KAIST 연소기술연구센터(CERC) 및 국가지정연구실(NRL) 사업의 연구비 지원에 의해 수행된 결과입니다.

References

- 1) T. Ryan, T. Callanhan, "Homogeneous Charge Compression Ignition of Diesel Fuel," SAE 961160, 1996.
- 2) A. Hultqvist, M. Christensen, B. Johansson, A. Franke, M. Ricgter, M. Alden, "A Study of the Homogeneous Charge Compression Initiation Combustion Process by Chemiluminescence Imaging," SAE 1999-01-3680, 1999.
- 3) 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.
- 4) H. Yokota, Y. Kudo, H. Nakajima, T. Kakegawa, T. Suzuki, "A New Concept for Low Emission Diesel Combustion," SAE 970891, 1997.
- 5) Y. Iwabuchi, K. Kawai, T. Shoji, Y. Takeda, "Trial of New Concept Diesel Combustion System-Premixed Compression-Ignited Combustion-," SAE 1999-01- 0185, 1999.
- 6) B. Walter, B. Gatellier, "Development of the High Power NADITM Concept Using Dual Mode Diesel Combustion to Achieve Zero NOx and Particulate Emissions," SAE 2002-01-1744, 2002.
- 7) R. Hasegawa, H. Yanagihara, "HCCI Combustion in DI Diesel Engine," SAE 1999-01- 0185, 1999.
- 8) K. Koyanagi, H. Oing, G. Renner, R. Maly, "Optimising Commonrail-injection by Optical Diagnostics in a Transparent Production Type Diesel Engine," SAE 1999-01-3646, 1999.
- 9) C. S. Lee, K. H. Lee, D. S. Kim, S. W. Jang, "Combustion Characteristics of Homogeneous Charge Combustion Diesel Engine with Load Condition," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, p.9, 2002.

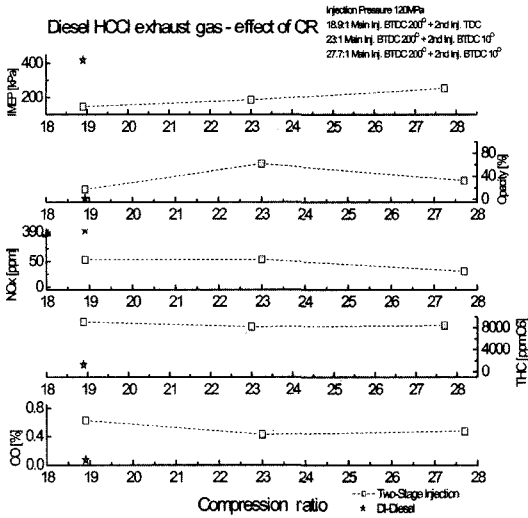


Fig. 16 Effect of compression ratio on IMEP and emission levels

감된 수치를 보이고 있으나, 여전히 긴 분무도달거리로 인한 높은 배기가스 탁도가 문제로 남아 있다.

4. 결론

2단분사법을 적용하여 디젤 예혼합압축착화 구현에 관해 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 예혼합압축착화 연소는 기존 디젤연소와는 달리 휘염이 거의 없고, 냉염에 의한 낮은 수준의 열방출과 예혼합연소에 의한 주 열방출의 특징을 갖는다.
- 2) 흡기 가열이 없이 조기분사만으로는 자착화를 일으키기 어려우며, 2단분사법으로써 착화를 촉진시켜 연소 상황을 크게 개선시킬 수 있다.
- 3) 예혼합기 형성은 고압으로 분사할수록, 주분사 시기가 이를수록 유리하다.
- 4) 상온 흡기조건에서 2단분사법은 2차분사시기의 변화를 통해 연소 제어수단으로 사용될 수 있다.
- 5) 연료량 증가는 연소 상황을 개선시켜 출력증가는 물론 배기가스 탁도가 저감되도록 한다.
- 6) 상온 흡기 조건에서 고압축비 운전은 자발 착화를 촉진해 출력을 증가시키고 배기가스가 저감되도록 한다.
- 7) 예혼합압축착화 연소의 구현으로 기존 디젤 연소 대비 90% 이상의 질소산화물 저감이 가능하다.