

# Common Rail을 이용한 대형 디젤 가시화엔진에서의 연소특성

김영민\* · 이장희\* · 김상호\*\* · 이용건\*\* · 홍창호\*\*\* · 최병철\*\*\*

## Combustion Characteristics of Common Rail System by Using a Heavy Duty Transparent Engine

Y. M. Kim, J. H. Lee, S. H. Kim, W. G. Lee, C. H. Hong, B. C. Choi

**Key Words:** Common Rail Injection System(축압식 연료 분사장치), Fuel Pressure(연료압력), Injection Timing(분사시기), Heat Release Rate(열발생율), Fuel Spray(연료 분무)

### Abstract

To meet strict emission regulation while improving engine performances, common rail injection system which is suitable for electronic control, and capable of controlling injection quantity, timing, rate and pressure individually as well as realizing high pressure has been developed.

At present study, a 8L DI diesel engine was converted to a single-cylinder experimental engine allowing optical access through an extended piston and a prototype of common rail injector in progress was applied to the engine. The combustion characteristics of the engine were analysed by using direct images and characteristics of the injector were analysed. We can not say that the results are always the same to general common rail injection system but that they are just characteristics of specific prototype injector.

### 1. 서론

디젤엔진은 SI 엔진에 비해 높은 열효율 때문에 주목받고 있으나 배기가스 특히 NOx와 PM의 동시저감이 문제가 되어왔다. 그렇지만 최근에는 디젤엔진도 고압분사계에 전자제어가 결합된 Common Rail 시스템이 도입되어 엔진회전수에 관계없이 분사압력, 분사시기, 분사기간, 분사율을 엔진의 운전조건에 따라 최적화하는 것이 가능하여 저속구간에서 토크향상, Pilot 분사를 통한 NOx 및 소음저감과 고압분사에 의한 PM저감이 가능해졌다. 현재 Common Rail 시스템은 승용 디젤엔진의 경우 이미 상용화되어 보급되고 있으며, 앞으로의 배기규제에 대응하기 위해 더욱 더

배기가스를 저감하고 성능을 향상시키기 위한 연구가 계속되고 있다. 대형 디젤엔진의 경우는 선진국에서는 개발 완료단계에 있으나 상용화는 아직 이루어지지 않은 상태이다. 국내에서는 G7 환경과제로서 대형디젤엔진을 위한 Common Rail 시스템개발과 엔진적용 연구가 동시에 진행되고 있으며 본 연구에서는 적용 대상엔진인 대형 디젤엔진을 이용하여 대형 가시화엔진을 제작하고 개발 중에 있는 Common Rail 시스템을 적용하여 연소특성을 해석하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 단기통가시화 엔진의 제작

본 실험에 사용된 Base 엔진의 사양은 Table.1과 같으며 단기통 가시화 엔진으로 개조하기 위해 Fig.1과 같이 연장 피스톤의 제작, 연장실린더 라이너와 블록의 제작, 푸시 로드와 연장, 냉각수

\* 한국기계연구원  
\*\* 대우중합기계  
\*\*\* 전남대학교

와 윤활통로의 차단 등의 작업이 진행되었다. 엔진에 열을 위해 냉각수 자켓을 가지는 연장 실린더 블록을 제작하여 히터로 가열된 온수를 엔진 헤드까지 순환할 수 있도록 하였다. 대기통 엔진을 한기통만 연장할 경우 언밸런싱에 의한 진동이 심하게 발생하므로 연장되는 피스톤의 무게를 나머지 5기통에 달아주어 왕복운동에 의한 주기적인 불평형력이 상쇄되도록 하였다.

Table.1 Spec. of experimental engine

Model	D1146
기통수	6 → 1
Bore	111
Stroke	139
압축비	17.6:1
과급	Screw Compressor

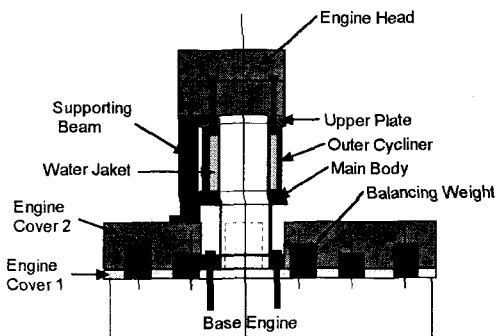


Fig.1 Heavy duty transparent engine

## 2.2 연료장치 구성

실험장치구성은 Fig.2와 같으며 실험에서 사용된 연료가압장치는 축압펌프인 Haskel 펌프를 사용하여 연료를 가압하여 챔버로 공급하고 연료공급압은 릴리프밸브에 의해 조절되도록 되어 있다. 연료공급압은 엔진회전수와 관계없이 제어되며 챔버에 저장된 연료는 Fig.3에서 보이는 Common Rail로 공급되어 인젝터로 공급되도록 구성되어 있다.

## 2.3 실험장치 구성 및 실험방법

엔진 연소실 내부의 연료분사 및 연소촬영은

Cordin 사의 고속드럼카메라를 사용하여 촬영하였으며, 연료의 분사제어와 고속카메라의 촬영을 위한 신호는 엔진의 분사펌프축에 장착된 캠신호와 엔진축에 연결된 엔코더 신호로부터 분사횟수, 분사기간, 분사시기와 카메라의 동기신호를 제어하였다. 먼저 연소가시화실험에 앞서 광학창 대신 알루미늄 피스톤을 장착하여 600 rpm에서 분사시기, 분사압력, 분사량, 압축압력을 변화시키면서 연소압력을 측정하여 연소특성을 해석하였다.

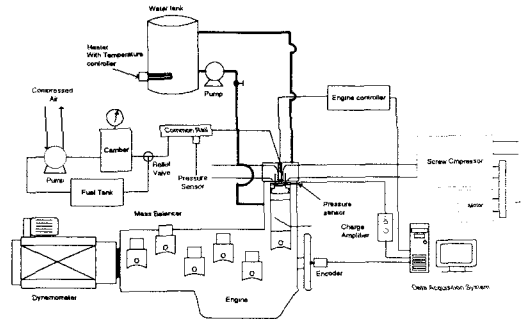


Fig.2 Schematic diagram of a test apparatus

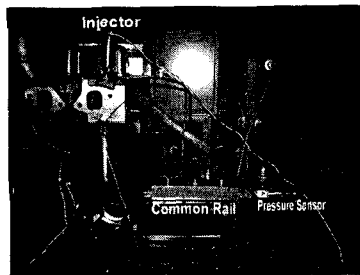


Fig.3 Common rail system

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 연소가시화 촬영

Common Rail 분사계의 연소가시화 실험에 앞서 제작된 가시화엔진 및 고속촬영장치의 동작을 테스트하기 위해 기존 기계식 분사계의 연소가시화실험이 수행되었다. 연료분사과정의 촬영은 광원을 필요로 하는데 반해 선명한 연소과정의 촬영을 위해서는 광원이 없어야 한다. 연료분사과정과 연소과정을 동시에 촬영하기 위해서는 광원

의 작동시간을 제어함으로써 연소가 발생하기 전까지만 광원을 사용하여 연료분사와 연소과정을 한번에 동시 촬영하는 방법과 한번은 광원을 사용해서 촬영하고 한번은 광원없이 촬영하여 조합하는 방법이 가능하다. Fig.4는 분사를 촬영한 결과이며 Fig.5는 분사와 연소과정을 동시에 촬영한 결과이다. 분사된 연료가 엔진내 유동에 의해 혼합기가 형성되고 압축착화가 시작되면서 확산 연소가 발생함을 볼 수 있다.

### 3.2 분사압력의 영향

Fig.6은 본 실험에 사용된 Common Rail 인젝터의 연료공급압에 따른 분사량을 나타내고 있으며 그래프에서는 나타내지 않은 구간인 분사량이 0.5ms이하에서는 선형성이 좋지 않은 영역이라고 할 수 있다.

Fig.7은 600rpm에서 솔레노이드 구동시간을 0.8ms(실제 분사기간 약1.6ms), 분사시기 BTDC 5° 일 때 Common Rail 압력에 따른 분사특성을 기존 기계식 분사계(개변압 220bar)의 분사특성과 1ms동안에 걸쳐 비교하였다. 분사압력이 증가함에 따라 대체적으로 분사특성이 좋아지는 것을 볼 수 있으며 분무도달거리에 있어서는 분사압력이 증가함에 따라 조금씩 증가함을 알 수 있다.

기존 기계식 분사계와 가장 큰 차이점은 500 bar, 700bar, 900bar 모든 경우에 대해서 분무도달거리가 현저히 증가하며 분무가 넓게 분포함을 볼 수 있다. 현재 인젝터 제작사에서는 Inlet/Outlet Orifice 의 변화가 분사율에 미치는 영향을 조사하여 분사율의 최적화가 진행된 상태이나 본 실험에 사용된 인젝터는 분사압력증가에 따른 초기 분사율이 기존 기계식 분사계에 비해 현저히 증가하는 것으로 나타난다.

Fig.8은 동일조건에서 분사압력에 따른 열발생 선도를 나타낸 것으로서 높은 초기분사율에 의해 착화지연후 많은 예혼합 혼합기에서 동시에 압축점화가 발생하면서 연소압력이 급격히 상승하는 예혼합 연소구간이 두드러지게 나타나고 있다. 분사압력이 낮을수록 초기분사율이 감소하기 때문에 예혼합연소에 의한 열발생율이 약간씩 감소하기는 하지만 여전히 매우 크다고 할 수 있다.

Fig.9는 600rpm에서 각각의 분사압력에서 연료량에 따른 지시평균유효압력(IMEP)를 나타낸 것

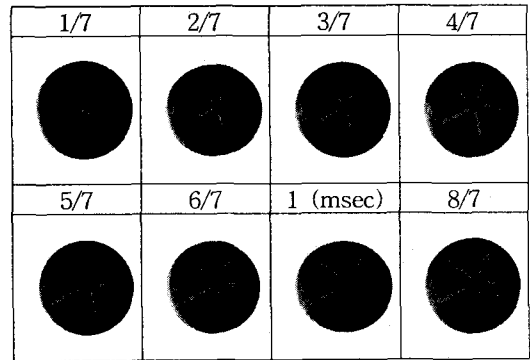


Fig.4 Fuel spray images

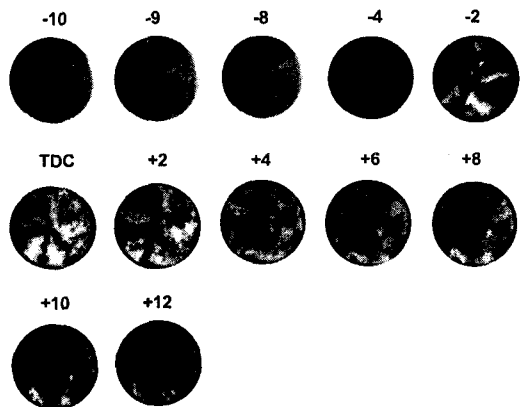


Fig.5 Combustion process images (600rpm)

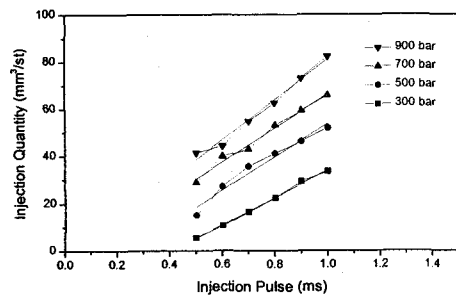


Fig.6 Fuel supply characteristics of test injector

으로 500bar에서 최고 열효율과 출력을 보인다. 또한 20% 부하에서 70%부하까지는 연료량에 대해 IMEP가 급격하게 증가하나 80% 이상의 부하에서는 불완전연소에 의해 효율이 나빠지게 됨을 알 수 있다..


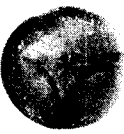













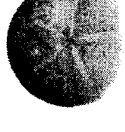












System Time(ms)	Mechanical	Common Rail		
	220 bar	500bar	700bar	900bar
1/7				
2/7				
3/7				
4/7				
5/7				
6/7				
1				

Fig.7 Fuel spray comparison for different fuel pressures

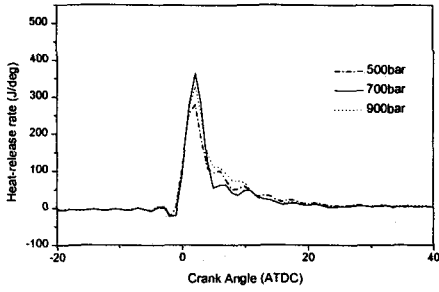


Fig.8 Heat release rate comparison for different fuel pressure

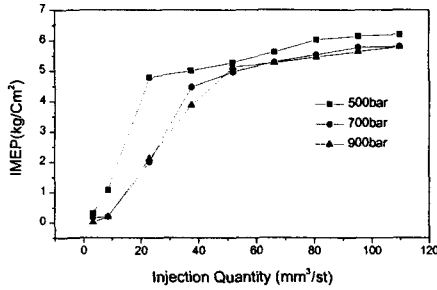


Fig.9 IMEP comparison for different fuel pressure

### 3.3 모터링압력의 영향

Fig.10은 TDC 근처에서 모터링압력의 영향을 알아보기 위하여 과급압을 조절하여 600rpm에서 모터링압력이 30bar, 39bar, 50bar 가 되도록 하여 솔레노이드 구동시간을 0.8ms, 분사시기 BTDC 5° 일 때 열발생선도를 나타낸 것이다. 모터링압력이 30bar 일 때는 실제분사가 종료한 후인 ATDC 5° 에서 연소가 시작되며 거의 예혼합 혼합상태에서 연소가 발생함을 볼 수 있다. 모터링압력이 39bar 이상이 되면 착화지연이 크랭크 각으로 2° ~ 3° 로 크지 않지만 초기분사율이 높기 때문에 예혼합연소에 의한 열발생율이 높게 나타난다고 할 수 있다. 모터링압력이 50bar가 되면 39bar일 때에 비해 착화지연이 약 1° 감소하여 예혼합연소에 의한 열방생율이 약간 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험의 결과로부

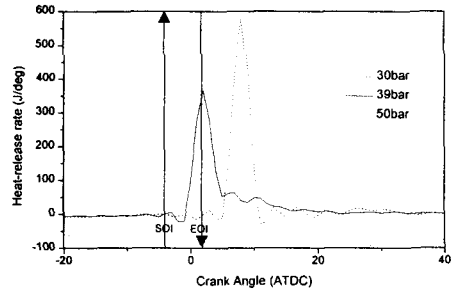


Fig.10 Heat release rate comparison for different compression pressure

터 초기분사율이 매우 클 경우 압축압력에 따른 착화지연의 차이가 연소에 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

### 3.4 분사량의 영향

Fig.11과 Fig.12은 600rpm에서 분사시기 BTDC 5° 에서 최소 분사량부터 최고 부하까지 솔레노이드 구동시간을 변화시킬 때의 연소압력과 열발생선도를 나타낸 것이다. 열발생선도에서 SOI (Start of Injection)는 실제로 인젝터가 열리는 시간을 나타내며 EOI(End of Injection)는 인젝터가 닫히는 시간을 나타낸다. 최소분사량인 0.13msec 일 때는 연료분사후 연료 증발에 의한 (-) 열발생이 크게 나타나지 않고 점화지연도 매우 짧은 것을 볼 수 있다. 그러나 분사량이 0.8msec 이상 일 때는 연료분사 후 연료증발에 의한 (-) 열발생이 현저하게 나타나며, 초기분사율이 높기 때문에 분사량에 관계없이 거의 일정하게 예혼합연소에 의한 열발생율이 매우 높고 분사량이 증가할수록 예혼합연소 후 확산 연소에 의한 열발생율이 증가함을 볼 수 있다.

### 3.5 분사시기의 영향

Fig.13와 Fig.14은 600rpm에서 솔레노이드 구동시간을 0.8msec로 고정하고 분사시기를 BTDC 10° 에서 ATDC 5° 까지 변화시킬 때의 연소압력과 열발생선도를 나타낸 것이다. 분사시기가

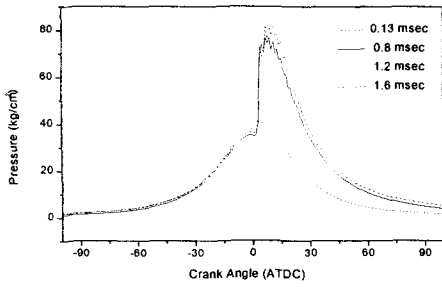


Fig.11 Combustion pressure for different fuel quantity

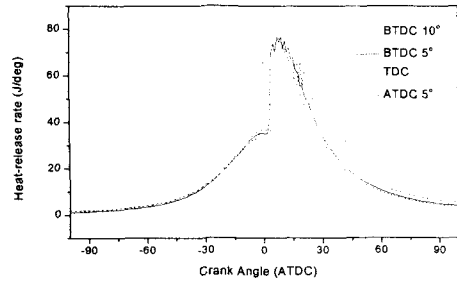


Fig.13 Combustion pressure for different fuel injection timing

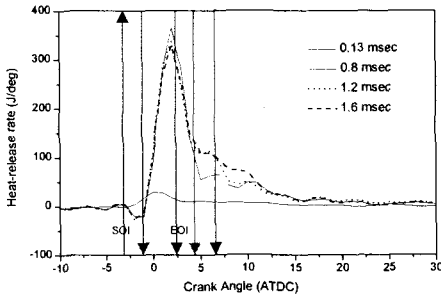


Fig.12 Heat release rate for different fuel quantity

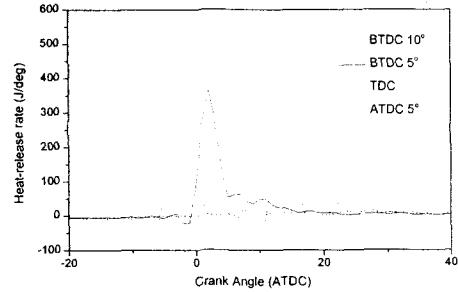


Fig.14 Heat release rate for different fuel injection timing

지연됨에 따라 연소압력은 감소하지만, 열발생선도에서 보면 연료분사시 피스톤이 상승하는 BTDC 10° 와 BTDC 5° 일 때는 착화지연이 약 3° 이며 피스톤이 하강하는 TDC와 ATDC 5° 일 때는 착화지연이 4° 와 5° 로 증가하며 예혼합연소에 의한 열발생율이 더욱 증가함을 알 수 있다.

### 3.6 연소가시화결과

가시화엔진에서는 장시간 운전이 불가능하기 때문에 엔진을 예열시키기 위한 별도의 장치가 필요하며 본 실험에서는 엔진냉각수를 90℃ 로 가열하여 연장실린더 블록과 엔진헤드를 예열하였다. 디젤 연소가시화 실험에서는 광학창의 오염으로 아주 짧은 시간(약 10싸이클 정도) 연소를 시키면서 3~4 번째 싸이클에서 영상을 취득하기 때문에 냉각수로 엔진을 충분히 예열하더라도 엔진 연소실내부와 피스톤의 온도는 연속운전하는

실제엔진보다는 상당히 낮아 TDC 근처에서 분사된 연료가 피스톤에 충돌할 경우 연료의 기화는 실제엔진과 큰 차이가 발생할 가능성이 있다. 이러한 차이를 줄이기 위해서 냉각수에 의한 엔진의 충분한 예열과 더불어 연소가시화 촬영에 앞서 몇 번의 단발 연소 후 연소가시화 촬영을 하였다. 그러나 연소가시화 촬영을 한 결과 기존 기계식 분사계에 비해 높은 초기 분사율로 인해 연료기화에 필요한 충분한 열량이 공급되지 못하여 연속운전시 보다 착화지연이 증가하고 싸이클 변동도 심해지는 것으로 나타났다. Fig.15는 연소가시화 결과의 한 예로서 600 rpm에서 솔레노이드 구동시간을 1ms로 하고 분사시기를 BTDC 5° 로 했을 때 점화지연이 증가하여 연료분사 종료 후 연소가 시작되는 것으로 나타나며 연속운전시와 연소의 차이가 발생함을 볼 수 있다.

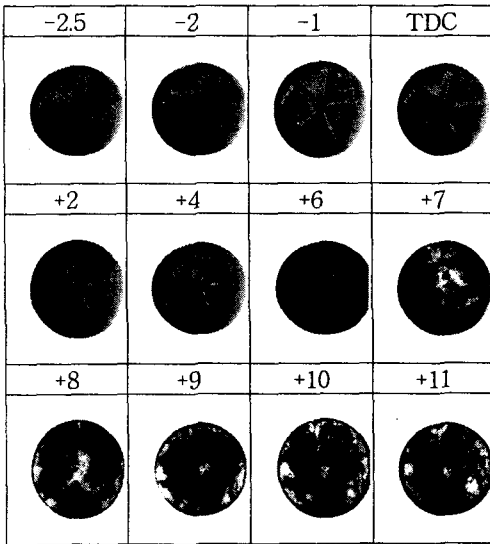


Fig.15 Combustion process images using test common rail injector (600rpm)

#### 4. 결론

본 연구에서는 개발중인 Common Rail 시스템을 적용 대상엔진인 대형 디젤엔진을 이용하여 제작된 가시화엔진에 적용하여 연소특성을 해석하였다.

1. 600rpm에서 연료압력이 500bar, 700bar, 900 bar로 증가할 때 기존 기계식 분사계에 비해 현저하게 분무도달거리가 증가하고 연료가 넓게 분포됨을 볼 수 있으며 초기 분사율이 연료고압화에 따라 증가함을 알 수 있다.

2. 초기분사율 증가에 따른 예혼합연소에 의한 열발생이 매우 크게 나타나며 이를 해결하기 위해서는 delta형태의 분사율의 최적화와 pilot 분사 등에 의한 착화지연기간의 초기분사율의 억제가 반드시 요구된다.

3. 분사시기가 지연될수록 착화지연이 증가하여 예혼합연소에 의한 열발생은 크게 나타나지만 연소압력은 감소한다.

4. 디젤엔진의 연소가시화에서 매우 짧은 기간(약 10사이클)동안 연소를 하고 촬영하기 때문에

엔진 예열을 위해서 가열된 냉각수로 충분히 예열하고 몇 번의 단발 연소 후 연소가시화 촬영을 하였으나, 초기 분사율이 높을 경우 착화지연은 연속운전시보다 증가하는 것으로 나타난다.

#### 참고문헌

- (1) 이재기, 나형규, 안성일, 2000, "Common Rail 용 Injector 성능에 영향을 주는 Parameter와 설계변경에 따른 분사특성 파악-II", 한국자동차공학회 추계 학술논문집, pp.314-319.
- (2) Masahiko Miyaki, Hideya Fujisawa, Akira Masuda, and Yoshihisa Yamamoto, 1991, "Development of New Electronically Controlled Fuel Injection System ECD-U2 for Diesel Engines", SAE Paper NO. 910252.
- (3) Long Zhang, Toshitaka Minami, Tokatsuki, and Katsuhiko Yokota, 1993, "An Analysis of the Combustion of a DI Diesel Engine by Photograph Processing", SAE Paper NO. 930594.
- (4) N. Guerrassi and P. Dupraz, 1998, "A Common Rail Injection System For High Speed Direct Injection Diesel Engines", SAE Paper NO. 980803.
- (5) Haruyuki Yokota, Yugo Kudo, Hiroshi Nakajima, Toshiaki Kakegawa, Takashi Suzuki, 1997, "A New Concept for Low Emission Diesel Combustion", SAE Paper NO. 970891.
- (6) Long Zhang, Toshiaki Takatsuki, and Katsuhiko Yokota, 1994, "An Observation and Analysis of the Combustion Under Supercharging on a DI Diesel Engine", SAE Paper NO. 940844.