

# 초고압 분사의 적정분사압력에 관한 연구

정대용\* · 박성진\* · 김홍준\* · 이종태\*\*

## A Study on Suitable Injection Pressure of Ultra High Pressure Injection System

D. Y. Jeong, S. J. Park, H. J. Kim and Jong T. Lee

Key Words: Ultra High Pressure Injection(초고압분사), Suitable Injection Pressure(적정분사압력), Spray and Combustion characteristic(분무 및 연소특성), Spray Visualization(분무가시화)

### Abstract

Spray and combustion characteristics were investigated to find suitable injection pressure by using ultra high pressure injection and single shot diesel combustion systems. As injection pressure was increased, spray penetration and spray angle were increased continuously until 2,000bar, but after this injection pressure region the rate of increase was decreased suddenly. Combustion characteristics were also enhanced until 2,000bar of injection pressure.

### 1. 서론

연료분사압력의 고압화는 분무입자의 운동에너지를 증가시켜 분무도달거리, 분무각 및 분무속도 등을 증가시킨다. 이로 인한 연소실내 분무입자와 공기와의 전단력의 증가로 연료의 미립화가 촉진된다. 연료 미립화 촉진에 의한 연료의 기화 촉진과 연료와 공기와의 혼합을 증가는 입자상 물질의 저감뿐만 아니라 출력 및 연료소비율의 향상을 도모할 수 있다. 그리고 연소향상에 의해 분사시기를 대폭적으로 지연시킬 수 있으므로 연소가스 온도의 상승에 의한 NOx의 증가를 해결할 수 있는 장점도 수반된다

따라서 분사압력을 고압화 하고자 하는 시도가 다방면으로 이루어지고 있으며 최근 1,000bar 이상의 초고압분사가 제시되고 있다.

연료분사압력의 고압화에 따른 분무특성 및 연소특성은 Kato<sup>(1)</sup>와 Yawata<sup>(2)</sup>, 이종태<sup>(3)</sup> 그리고 G. stump<sup>(4)</sup>, D.A.Pierpont<sup>(5)</sup>, 김상호<sup>(6)</sup> 등에 의해 해석된바 있다. 일반적으로 분사압력을 고압화함

에 따라 분무 및 연소특성은 향상되지만 압력증가에 따른 향상율은 완만하게 된다. 또한 분사압력을 초고압화함에 따라 분사시스템의 신뢰성 및 경제성이 결여되어 실용화하는 데 어려움이 있다.

그러므로 분사압력을 초고압화하는 경우 분무 및 연소의 향상율이 최대인 분사압력, 즉 적정분사압력이 어느 정도인가 알아야 할 필요가 있으나 이에 대한 것은 명확히 보고되고 있지 않은 상황이다.

따라서 본 연구에서는 초고압 분사장치와 디젤 연소장치를 사용하여 각각의 분사압력에 따른 제반분무특성과 연소특성 해석의 측면에서 적정분사압력을 파악하고자 하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 초고압분사시스템

적정분사압력을 파악하기 위한 전체 실험장치의 개략을 Fig. 1에 나타낸다. 실험장치는 크게 초고압분사시스템, 디젤연소장치, 분무가시화장치, 데이터 취득장치 및 제어장치로 구성된다.

초고압분사시스템은 가능한 초고압의 달성, 실제기관과 같은 분사파형의 재현 및 요구되는 분사 조건에 대응한 제어가 필요하다. 이를 위해 제작한 초고압분사장치의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다.

\* 성균관대학교 대학원

\*\* 성균관대학교

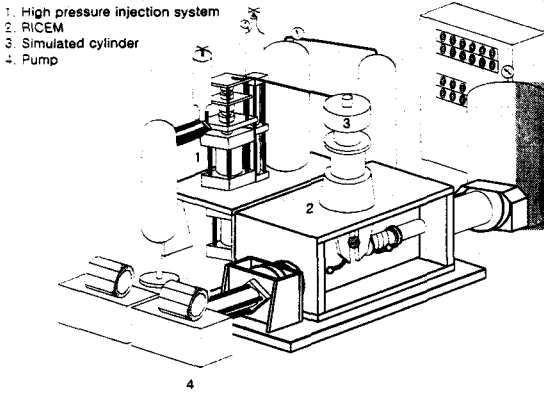


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

초고압분사장치는 플런저에 공급되는 연료를 1차 가압하는 1단 압축부, 가압된 연료를 플런저 펌프에 의해 2차 가압하는 2단 압축부, 작동된 플런저구동용 실린더를 원상태로 복귀시키는 복귀장치부로 구성된다. 압축실린더에 의해 1차 압축된 연료는 고압가스에 의해 가압된 작동유가 순간적으로 플런저구동실린더에 공급됨으로서 2차 압축되어 초고압의 실현이 가능한 장치이다.

플런저 구동실린더에 의해 플런저 펌프가 가압할 수 있는 연료의 실제압축압력은 1단 압력이 80bar인 경우 최대 약 12,000bar이며, 현재 약 3,200bar까지 정상적인 작동이 가능하다. 플런저 펌프는 상용의 PE-P형 고압분사펌프를 사용하였다. 고압인젝터는 분사공( $\phi=0.23\text{mm}$ )이 5개, 분사각  $150^\circ$ , 니들리프트 0.3mm의 DLL-S type의 인젝터를 개조하여 사용하였다.

## 2.2 단발디젤연소장치

디젤연소장치는 고압으로 분무된 연료를 자기 착화시켜 확산연소시키는 단발연소용 실험장치로

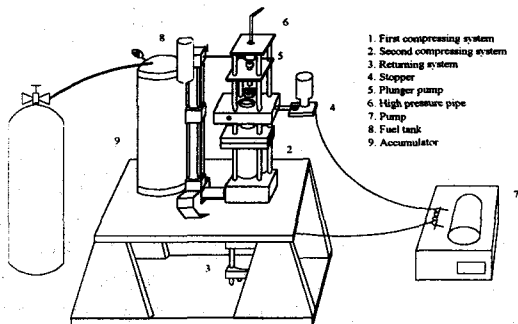


Fig. 2 Schematic diagram of UHPIS.

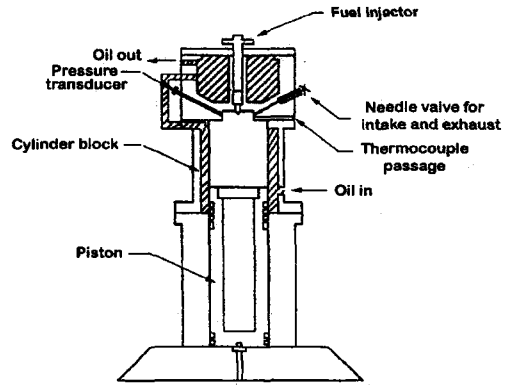


Fig. 3 Schematic diagram of simulated cylinder.

서 유동연구용 단발 급속흡입압축팽창기(RICEM)를 개조하였다.

디젤연소용 RICEM은 디젤연소용 모사실린더부, 피스톤 구동부, 피스톤 가이드부, 구동된 피스톤 가이드부를 정지시키는 제동부, 초기상태로 복귀시키는 복귀 장치부 및 오일 가열장치부로 구성된다.

주요 개조부는 디젤연소용 모사실린더부이며 Fig. 3에 개략도를 나타낸다.

모사실린더부의 bore 및 stroke은 86.5mm 및 90mm이며, 압축비는  $\epsilon=17.3$ 이다. 연소실 형상은 내경  $\phi 65\text{mm}$ , 높이 9.53mm인 bowl형으로 하였다. 피스톤 크라운형상은 flat type으로 하였다. 피스톤에는 기밀 및 윤활을 위해 3개의 압축링과 1개의 오일링을 설치하였다. 연소실 외측에는 흡·배기용 니들밸브를 설치하였다. 실린더헤드 및 실린더블록 주위는 실제기관과 같은 가스온도를 재현시키고자 가열된 고온의 오일을 순환시켰다.

## 2.3 분무 가시화장치 및 data 취득장치

분무각 및 분무도달거리 등의 분무양상 가시화에는 최대촬영속도 35,000fps의 고속카메라(Cordin 350)를 사용하였다. 광원은 1500W의 Halogen 램프를 사용하였다.

분무입경의 측정에는 실리콘 오일(Silicon oil, 1000cst)이 도포된 샤알레( $\phi 12\text{cm}$ )에 분무입자를 포집하여 측정하는 액침법을 사용하였다. 획득된 분무액적의 화상은 광학 현미경(Epiphoto-DX, Nikon)과 카메라(FX-35DX)로 400배 확대 촬영하였다.

분사압력은 최대측정압력이 10,000bar인 초고압 압력변환기(Kistler 6213B)로 측정하였다. 고

압 인젝터의 needle lift 측정은 측정범위 0~2mm의 gap sensor(VE-231 type)를 사용하였다. 실린더내의 가스압력은 piezo type의 압력변환기(Kistler, 601A)로 측정하였다. 실린더의 벽표면 온도는 K-type의 열전대로 측정하였다. 피스톤 변위는 피스톤 로드 에 부착한 rack과 pinion을 이용하여 2상원점 출력형 TRD J 360-RZ type rotary encoder로 측정하였다. 피스톤의 상하사점은 photo sensor(BF3RX)로 검출하였다.

측정된 압력, 온도 및 각종 변위 data는 고속 A/D변환장치를 통해 PC로 입력한 후 필요한 해석을 하였다.

### 2.4 실험방법

실험은 디젤연료의 분사압력을 1000bar에서 2600bar 까지 단계적으로 변화시켜 초고압분무시의 분무 및 연소특성을 해석하는 것이다. 분무가시화 경우의 분사는 대기압하에서 자유분무를 시켰다. 연료는 상용의 디젤유를 사용하였다. 각 실험에서 인젝터의 개변압은 500bar. 상당기관회

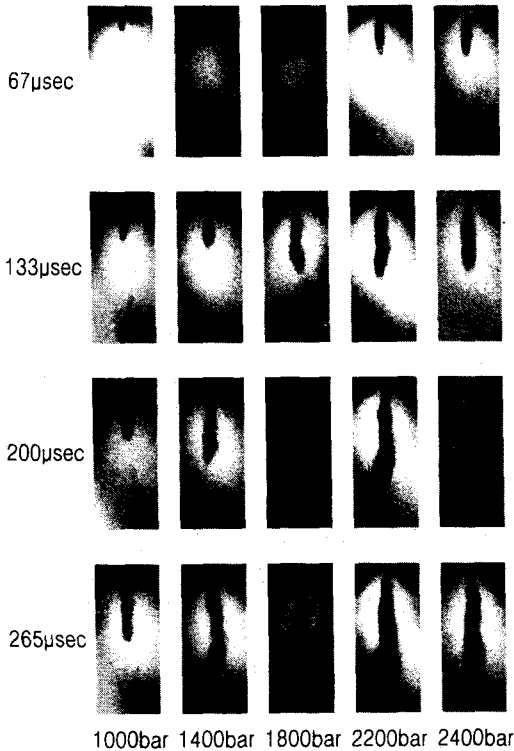


Fig. 4. Photograph of spray pattern in case of ultra high pressure injection.

전수는 500rpm, 분사시기는 BTDC 5 °CA로 고정하였다.

## 3. 분무특성

### 3.1 초고압분무의 가시화 결과

Fig. 4는 각 분사압력에 대한 디젤연료의 분무 양상을 가시화하여 시간의 경과에 대해 나타낸 것이다.

분사압력 1000bar인 경우 분무폭이 작고 분무 끝이 뾰족하며 분무액주는 곧은 모양을 나타내고 있다. 분무외피는 매끄러운 양상이며 반경방향으로 퍼져나가는 분무액적이 적은 것을 보이고 있다. 분사압력을 이보다 고압화시키는 경우 분무 외피에는 안개처럼 퍼져나가는 분무액적들이 증가하는 것을 보이고 있다. 또한 분무액주가 흔들리는 것도 분사압력을 초고압화함에 따라 증가하는 경향이다. 이는 초기에 저속으로 분사된 연료와 후발의 고속분무가 부딪히면서 분무액주가 크게 흔들리는 것이라 생각된다. 그러나 분사압력이 2,200bar보다 큰 경우에는 반경방향으로 퍼져나가는 액적의 양에 큰 차이가 없으며, 액주의 흔들림도 거의 유사한 것을 나타내고 있다.

### 3.2 분무도달거리

Fig. 5는 상기의 분무가시화 결과로부터 구한 분무도달거리와 분무도달거리의 증가율을 나타낸 것이다. 여기서 분무도달거리의 증가율은 압력증가에 대한 분무도달거리의 증가분으로 정의하였다. 분사압력을 초고압화하는 경우 분무도달거리는

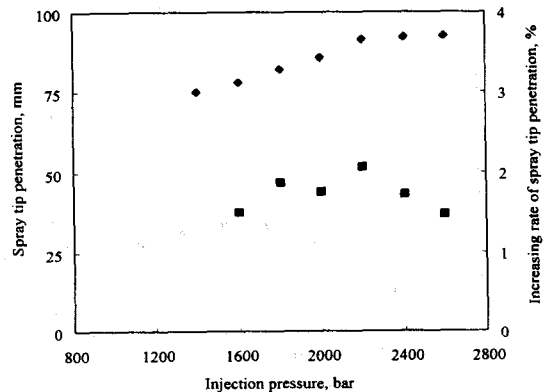


Fig. 5 Spray tip penetration and rate of increase as a function injection pressure.

증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 그 증가율은 분사압력이 증가함에 따라 증가하다 분사압력 2,000bar 이후 감소하는 것을 나타낸다.

상기와 같이 일정압력 이후 분무도달거리가 증가하지 않는 것은 분사압력 증가에 따라 분무에너지는 증가하나 분무입자의 미세화에 의한 액적의 운동에너지 감소에 의한 영향이라 생각된다.

분사압력을 2,000bar로 초고압화 하는 경우의 분무도달거리는 분사압력 1,000bar인 경우에 비하여 약 74% 정도 증가되는 것이 보여졌다.

### 3.3 분무각

디젤연료를 초고압분사한 경우 각 분사압력에 따른 분무각의 변화를 나타낸 것이 Fig. 6 이다.

분사압력을 초고압화하는 경우 분무각은 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 압력 증가에 따른 분무각의 증가율은 분사압력 2,000bar 정도에서 최대치를 나타내다가 그후 감소하는 경향이다. 이는 전술한 분무도달거리의 경우와 동일한 경향이다.

분사압력의 증가에 따라 분무의 운동에너지는 증가하며, 공기와의 전단력은 커지게 된다. 전단력 증가로 인해 연료액적은 미립화가 촉진되며, 아주 작은 질량의 미립화된 액적이 반경방향으로 확산되기 때문에 분무각이 커지게 된다. 그러나 분사압력을 더욱 증가시키면 전술한 바처럼 미립화가 극대화되어 반경방향으로 퍼져나가려는 입자의 에너지 변화가 크지 않으므로 분사압력을 약 2,000bar 이상으로 증가시키더라도 분무각이 대체로 일정한 것으로 생각된다.

분사압력 증가에 의한 분무각 증가는 분사압력

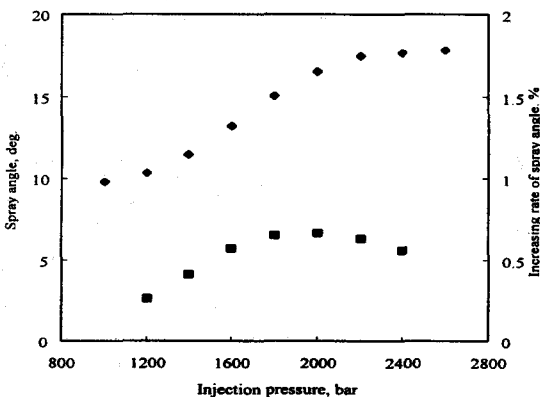


Fig. 6 Spray angle and rate of increase as a function of injection pressure.

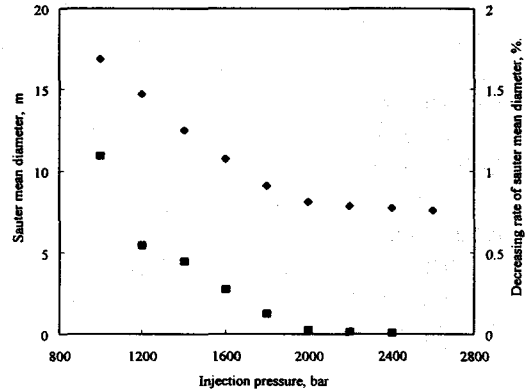


Fig. 7 Sauter mean diameter and rate of increase as a function of injection pressure.

이 약 2,000bar 정도에서 최대치가 보여졌다.

### 3.4 분무입경

각각의 분사압력에 대하여 디젤연료의 분무 액적을 SMD로 나타낸 결과가 Fig. 7이다. 분무액적은 인젝터 노즐 팁 중심에서 하류방향 50cm인 지점에서 포집하였다.

분사압력을 초고압시킴에 따라 분무입경은 급격히 감소하는 것을 보인다. 그러나 분사압력이 2,000bar 이상이 되면 분무입경의 크기는 거의 일정하며, 감소율이 거의 0에 근접하는 것을 보이고 있다.

이는 분사압력을 고압화 함에 따라 분사된 분무 액적의 미립자가 이후에 고압으로 분사된 분무 액적과 서로 충돌하여 다시 합쳐지므로 분무입경이 일정하게 되는 것으로 생각된다.

2,000bar 이상으로 초고압시킨 경우의 분무입경은 1,000bar로 고압분사시킨 경우에 비해 약 1/2 정도로 그 크기가 감소되며 이보다 압력을 높여도 입경의 크기는 약 7 $\mu$ m 정도로 수렴함을 보이고 있다.

상기의 결과로부터 초고압분사를 하더라도 분사압력이 2,000bar 이상이 되면 분무특성이 크게 변하지 않고 액적의 총 표면적이 수렴하여 증발율이 크게 변하지 않을 것을 예측할 수 있다.

## 4. 연소특성

### 4.1 착화지연기간 및 열발생기간

초고압분사압력을 변화시킨 경우의 착화지연기간

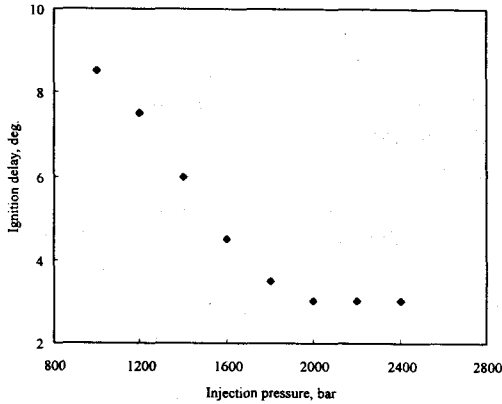


Fig. 8 Ignition delay as a function of injection pressure.

을 Fig. 8에 나타낸다. 착화지연기간은 인젝터의 니들이 상승되는 시점부터 열발생율이 음에서 양으로 바뀔 때까지의 기간으로 정의하였다.

그림에서 나타난 바와 같이 분사압력이 증가함에 따라 착화지연기간은 현저히 감소하는 경향이다. 그러나 분사압력이 2,000bar 정도에서는 착화지연기간의 감소는 급격히 저하되고 이보다 분사압력을 높여 이더라도 착화지연기간은 거의 변화가 없는 것을 나타내고 있다.

분사압력 고압화에 따라 착화지연기간이 짧아지는 것은 고압화에 따른 분무 입자의 미립화 증대로 분무 액적의 증발율이 촉진되고 분무각 및 도달 거리가 향상되어 공기과 연료가 혼합되는 물리적 지연기간과 이들이 화학반응하는 기간이 감소되는 영향에 의한 것으로 볼 수 있다.

착화지연기간의 감소는 예혼합연소량을 감소시켜 디젤노크를 억제하는 데 기여한다. 동시에 연소실

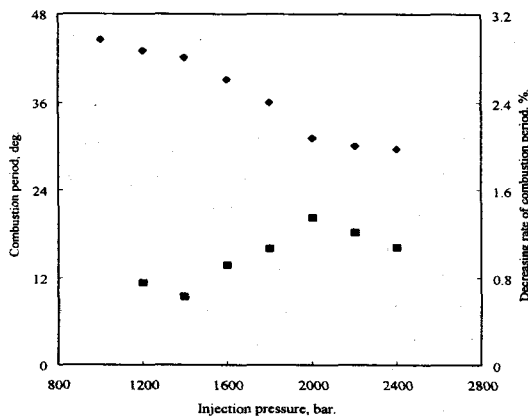


Fig. 9 Combustion period as a function of injection pressure.

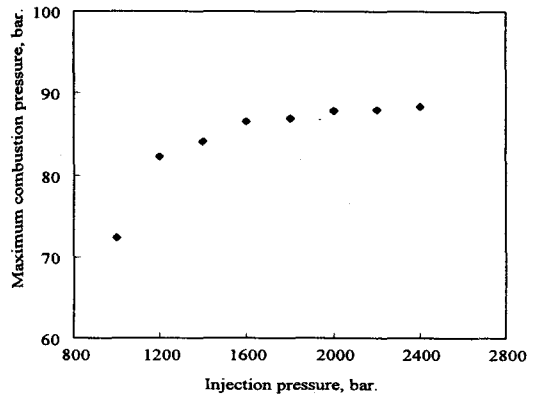


Fig. 10 Maximum combustion pressure as a function of injection pressure.

벽면으로의 열전달 기간을 단축시켜 압력 상승율의 증가로 인해 최고연소압력의 상승에 기여한다.

한편 분사압력 2,000bar 이후 착화지연기간은 더 이상 감소하지 않고 약 3° CA의 크기로 수렴하는 것을 보인다. 이는 분무특성이 분사압력 2,000bar 이상에서 더 이상 개선되지 않는 것으로 설명할 수 있다.

Fig. 9는 분사압력의 변화에 따른 열발생기간과 열발생기간의 감소율을 나타낸 것이다. 열발생기간은 누적된 열발생량이 전체의 80%가 될 때까지의 기간으로 정의하였다.

분사압력이 증가함에 따라 열발생기간은 현저히 감소하다 감소가 완만해지는 경향을 보이고 있다. 감소가 둔화되는 시점에서 분사압력 증가에 대한 열발생기간의 감소율은 최대치를 보이다가 이후 감소하는 경향이다.

열발생기간의 감소율이 가장 큰 분사압력은 2,000 bar 정도이며, 분사압력을 1,000bar에서 2,000bar로 초고압분사시킨 경우 열발생기간은 약 30%정도 단축되는 것이 보여졌다.

#### 4.2 최고연소압력

초고압분사의 분사압력을 변화시킨 데 따른 최고연소를 Fig. 10에 나타낸다.

분사압력을 1000bar에서 1200bar로 약간 초고압화하여도 최고연소압력은 급격히 증가하며, 그 후 증가율이 완만하지만 분사압력의 증가에 따라 지속적으로 증가되는 경향을 보이고 있다. 실린더내의 연소압력은 착화지연기간의 변화에 따른 예혼합연소량, 열발생율, 연소가스로부터 실린더 벽면으로의 열손실 등에 좌우되므로 상기경향은

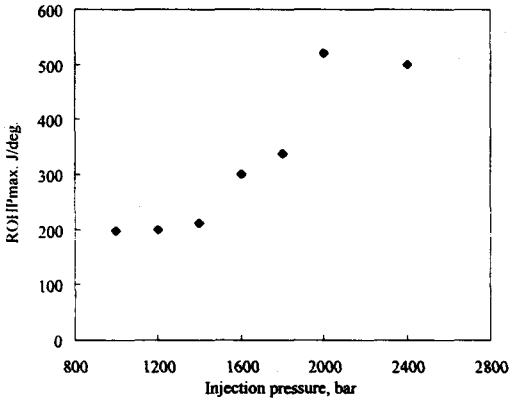


Fig. 11 Maximum rate of heat release as a function of injection pressure.

이들의 복합적인 영향에 의한 것이라 생각된다.

그러나 최고연소압력 역시 분사압력증가에 대한 분무 및 연소특성의 향상율이 가장 큰 분사압력 2000bar 이상에서는 거의 변화하지 않는 것을 나타낸다. 상기결과는 이보다 분사압력을 초고압화하여도 출력에 큰 변화가 없을 것이라는 것을 의미하는 것이다.

분사압력을 2000bar로 초고압화한 경우의 최고연소압력은 분사압력이 1000bar인 경우에 비해 약 22%정도 증가함이 보여졌다.

#### 4.3 열발생율

Fig. 11은 초고압분사의 분사압력을 변화시키는데 따른 최고 열발생율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 최고 열발생율은 분사압력 1400bar정도까지 증가가 미미하다가 열발생기간이 급격히 감소하는 구간에서 현저히 증가하는 것을 나타낸다.

상기의 결과들과 같이 연소특성 역시 분사압력 2000bar정도부터는 큰 차이가 없으며 이와 같은 결과는 분무특성시의 해석결과와 일치한다.

#### 5. 결론

초고압분사장치와 디젤연소장치를 이용한 분무특성 및 연소특성의 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

분사압력을 초고압화 함에 따라 분무도달거리와 분무각은 분사압력 2,000bar까지 지속적으로 증가하나 이후의 영역에서는 증가율이 현저히 둔화되는 것을 알 수 있었다. 분무입경 역시 2,000bar까지 지속

적으로 감소하지만 이보다 분사압력을 더욱 초고압시켜도 크기는 거의 변하지 않음이 보여졌다.

분사압력을 초고압화함에 따라 착화지연기간 및 열발생기간은 지속적인 감소, 최고열발생율은 증가를 하나 분사압력 2,000bar 이상에서는 대체로 일정한 값으로 수렴하는 것이 보여졌다.

최고연소압력은 분사압력 1,200bar에서 급격한 상승을 하고 2,000bar까지는 작으나 지속적인 증가를 보였다. 그러나 분사압력 2,000bar 이후 상승률은 둔화되어 약 0.5% 정도에 불과하였다.

상기와 같이 분무 및 연소특성은 모두 분사압력 2,000bar까지는 향상이 되나 이보다 초고압화하여도 큰 변화가 없었다. 따라서 본 연구의 분무 및 연소특성의 해석 결과의 입장에서 초고압분사의 적정분사압력을 평가하면 약 2,000bar 정도라고 추정된다.

그러나 기관출력 및 유배가스배출 등을 포함한 종합적 측면에서 적정분사압력을 정확히 평가 할 필요가 있다고 생각된다.

분사압력을 1,000bar로부터 본 실험에서 평가된 적정분사압력까지 초고압화 시키면 분무입경은 약 반으로, 착화지연기간은 약 1/3 정도로 감소하고, 최고연소압력은 22%정도 향상되는 것이 보여졌다.

#### 참고문헌

- (1) Kato, Tsujimura, Shintani, Minami, Yamaguchi : "Spary Characteristics and Combustion improvement of D.I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection", SAE paper, NO. 890265, 1989.
- (2) Yawata, Togashi, Akagi: "High Pressure Fuel Injection pump KP21", 内燃機關, Vol. 30, NO. 379, 1991. 5.
- (3) 하현상, 이종태 : "초고압분무 디젤연소 연구를 위한 기초연구", 성균관대 석사학위 청구논문, 1998.
- (4) G.Stump, W.Polach, N.Muller and J.Warga: "Fuel -injection Equipment for Heavy Duty Diesel Engines for U.S. 1999/1994 Emission Limits", SAE Trans. NO. 890851, 1989.
- (5) D.A. Pierpont and R.D. Reitz: "Effect of Injection Pressure and Nozzle Geometry D.I. Emission and Performance", SAE paper 950604, 1995.
- (6) 김상호, 김석준, 김용서 : "디젤 증발분무 연소 특성에 관한연구", 한국자동차공학회지, NO. 933894, 1993.