

# 초고압 디젤분무의 적정분사압력에 관한 실험적 연구

정대용\* · 김홍준\*\* · 이종태\*\*\*

## An Experimental Study on Suitable Injection pressure in High Pressure Injection Region

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

Key Words: High pressure injection (초고압분사), Suitable injection pressure(적정분사압력), Spray characteristic(분무특성), Spray visualization(분무가시화), Spray radius(분무반경), Spray height(분무높이)

### Abstract

Impinging spray characteristics were investigated to find suitable injection pressure by using high pressure injection system. Spray radius and spray height were increased continuously until 2,500bar but the rate of enhancement was decreased suddenly over this injection pressure region. It is expected that the maximum suitable injection pressure of impinging spray exists at around 2,500bar.

### 1. 서론

연료분사압력의 고압화는 입자상 물질 및 NOx 의 저감뿐만 아니라 출력 및 연료 소비율의 향상을 도모할 수 있는 장점이 있다. 한편 직분식 디젤기관에서는 분무액적과 벽면사이의 충돌 현상이 발생된다. 특히 초고압 충돌분무인 경우 연료와 공기와의 상호작용에 기인한 1차 분열에 의해 기화량이 증가할 것이다. 또한 분무액적의 분무속도 증가에 의한 분무에너지가 증가하므로 인해 고속으로 벽면에 충돌하여 발생하는 2차 분

열에 기인하여 미립화가 촉진되고 연료입자의 미립화에 의한 액적의 실린더내 공간분포가 향상되리라 예측된다.

H.Tanabe와 M.Takahashi<sup>(1)</sup>, Kato<sup>(2)</sup>, 이종태<sup>(3)</sup> 박권하<sup>(4)</sup>, 구자예<sup>(5)</sup>, 차건종<sup>(6)</sup> 등은 충돌분무에 따른 분무선단도달거리, 분무두께, 분무액적들의 공간분포 등을 해석하였다

그러나 현재까지 2,000bar 이상의 초고압영역에서의 충돌분무특성 및 그 향상이 최대가 되는 적정분사압력이 어느 정도인지 명확히 밝혀지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 3,000bar 정도의 분사압력을 형성할 수 있는 초고압 분사장치를 이용하여 초고압의 분사압력을 달성함은 물론 초고압분사에 따른 충돌분무의 가시화 및 분무거동과 분무특성의 해석을 통하여 분무의 특성 향상이 최

\* 성균관대학교 대학원  
\*\* 성균관대학교 대학원  
\*\*\* 성균관대학교

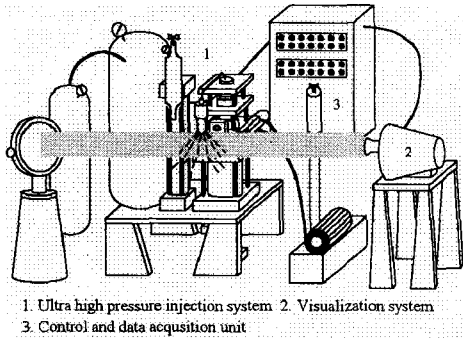


Fig. 1 Diagram of experimental system.

대가 되는 초고압영역에서의 적정분사압력을 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 고압분사시스템

초고압 분사의 충돌분무특성을 파악하기 위한 전체 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 실험장치는 크게 초고압분사시스템, 분무가시화장치, 제어장치 및 데이터 취득 장치로 구성된다.

Fig. 2는 초고압분사장치의 실물사진을 나타낸다. 고압분사장치는 크게 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

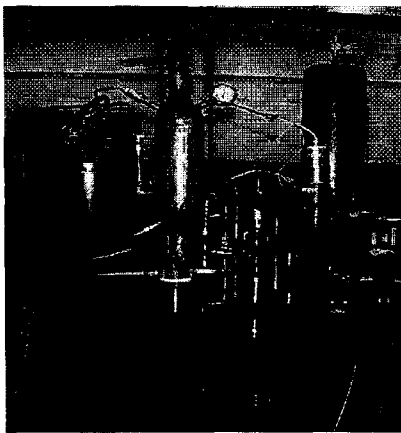


Fig. 2 Photograph of high pressure injection system.

1차 압축된 연료는 고압가스에 의해 가압된 작동유가 순간적으로 플런저구동실린더에 공급됨으로서 2차 압축되어 초고압의 실현이 가능한 장치이다. 초고압분사장치의 플런저 구동실린더에 의해 플런저 펌프가 가압할 수 있는 연료의 설계 최대 압축압력은 작동유 압력이 80bar인 경우 약 12,000bar이며, 플런저 펌프는 상용의 PE-P형을 고압분사펌프를 사용하였다. 고압인젝터는 분사공 직경 $d$ ; 0.2mm, 분사공이 1개, 분사각  $75^\circ$ , 니들리프트 0.3mm의 DLL-S type의 인젝터를 개조하여 사용하였다.

### 2.2 분무 가시화장치

충돌분무의 양상을 가시화하기 위한 분무가시화 장치는 고속 드럼 카메라, 고속 카메라 제어장치, 고압분사장치, 충돌분무실, 광원 등으로 이루어진다. Fig. 3은 분무 가시화 장치의 개략도를 나타낸다.

충돌분무의 가시화 및 특성해석을 위해 최대 35,000 frame/sec의 속도로 사진촬영이 가능한 고속카메라(Cordin 350)를 이용하여 촬영하였다. 렌즈는 105mm zoom렌즈를 사용하였으며, 광원은 3,250 W의 Halogen 램프(650W×5개)를 사용하였다. 카메라와 광원사이에는 광원의 직접 노출방지와 균일한 산란을 위하여 반투명 스크린을 설치하였다.

충돌분무실은 200×200×300mm(w×b×l)인 직육면체이다. 충돌분무실의 양쪽면과 정면에는 200×300×10mm(w×h×t)의 화이렉스 가시화창

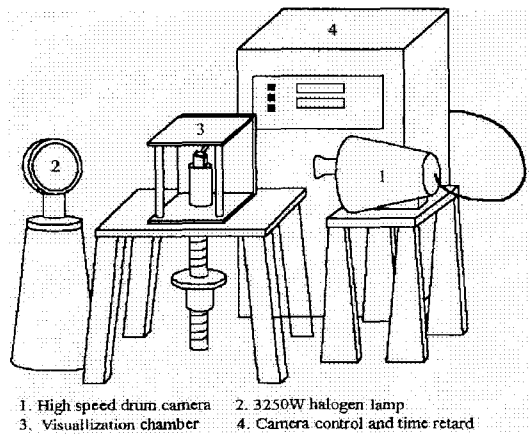


Fig. 3 Visualization system for high pressure impinging spray.

을 설치하였다. 인젝터의 설치위치는 인젝터의 분사각을 고려하여 분무실 뒷쪽에 고정설치 하였다.

충돌분무실의 중앙에는 직경 40mm의 충돌판을 설치하였다.

### 2.3. 제어 및 데이터 취득장치

Fig. 4에 분무양상을 시간경과에 따라 가시화 하기 위한 고속 드럼 카메라, 카메라 controller 그리고 고압분사장치의 제어도를 나타낸다.

걸림장치가 개방되면 가압장치부의 로드가 구동되며 이때 가압장치부의 로드가 걸림장치부에 장착된 광센서의 신호를 발생시킨다. 이 신호는 time retarder(Model 555pulse /delay generator, BNC)에 의해 일정시간 지연된 후 고속드럼카메라의 controller를 통해 고속드럼카메라에 입력되고, 이 신호에 의해 카메라의 셔터가 분사 직전에 작동하게 된다.

연료분사 인젝터 전방의 연료공급라인에는 분사압력을 측정하기 위해 측정압력이 최대 10,000 bar인 piezo type의 압력변환기(6213B, Kistler)를 삽입하였다.

### 2.4 실험방법

디젤연료의 초고압분사에 따른 충돌분무특성을 해석하기 위해 분사압력을 1,500bar에서 초고압 영역인 3,000 bar까지 500bar간격으로 단계적으로 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

충돌거리는 노즐선단으로부터 충돌판까지의 거리로서 크랭크각 30°의 분사시기에 해당하는

30mm 지점으로 하였다.

## 3. 초고압분사의 충돌분무에 따른 분무특성

### 3.1.1 분사압력에 따른 가시화 양상

Fig. 5는 초고압 충돌분무의 분사압력을 변화시킨 경우, 가시화 사진을 시간의 경과에 대해 나타낸 것이다.

초고압 충돌분무는 각각의 분사압력에서 시간의 경과에 따라 반경방향 및 축방향으로 퍼져나가다가 진행이 둔화되는 경향을 보이고 있다.

축방향 분무의 퍼짐은 충돌판 중심에서 반경방향으로 갈수록 증가하고 전체적으로 타원형의 분무를 형성함을 보이고 있다. 반경방향으로 갈수록 충돌분무의 두께가 증가하는 것은 분무분열기간이 긴 충돌분무와피에서의 미립화 촉진으로 인해 분무입자가 상대적으로 현저히 퍼져나가기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 분무초기의 분무양상은 분무끝이 뾰족한 양상을 나타낸 후 분무가 축방향으로 퍼져나가면서 분무끝이 무더지는 양상을 보이고 있다.

분사압력이 증가함에 따라 충돌분무반경 및 충돌분무높이는 전반적으로 증가하는 경향이다. 이것은 분사압력이 증가함에 따라 분무속도의 증가로 인해 액적들의 운동량이 증가하므로 충돌 후 액적의 반사가 강하게 일어나는데 기인하는 것으로 볼 수 있다. 그러나, 분사압력 2,500bar이상이 되면 이러한 경향은 상당히 둔화되어 분사압력이 증가하여도 충돌분무반경 및 분무높이의 증가율이 크게 감소함을 나타내고 있다. 이는 분무속도 증가에 의한 운동에너지증가 영향이 분무입자 미립화에 기인한 질량감소의 영향으로 상쇄되는 것이라 생각된다.

### 3.1.2 충돌분무반경

Fig. 6은 상기 분사조건하에서 분사시간 0.53 ms인 경우의 충돌분무반경을 각각의 분사압력에 대해 나타낸 것이다.

분사압력이 증가함에 따라 충돌분무반경은 증가하는 경향을 보이나 분사압력 2,500bar 이상에서는 그 증가폭은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 전술한 바처럼 분사압력이 증가하면 분무액적의 운동량은 증가하나 분사압력 2,500bar 이상에서는 분무입자의 미세화에 따른 질량감소의 영

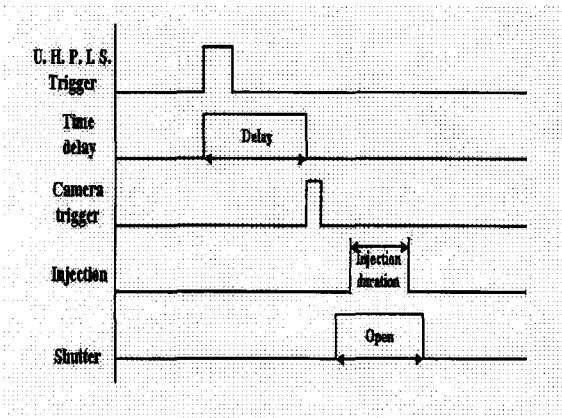


Fig. 4 Signal diagram for control and visualization

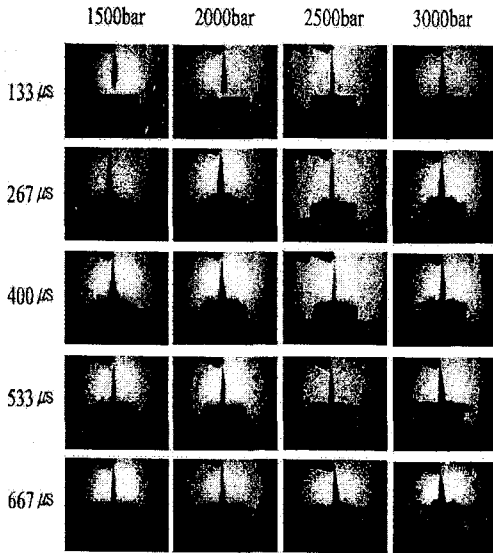


Fig. 5 Photograph of impinging spray pattern as a function of time history

향 및 벽면충돌에 의한 연료의 2차 미립화로 인하여 액적의 운동에너지와 운동량이 저하되기 때문으로 볼 수 있다.

따라서 액적의 분출속도와 분무입자 질량과의 상관관계에 의하여 분무도달거리가 분사압력 2,500bar까지 선형적으로 증가하다 2,500bar 이상의 영역 내에서 충돌분무반경의 증가가 현저히 감소하는 것이라 판단된다.

분사압력 1,500bar에 비해 분사압력 3,000bar인

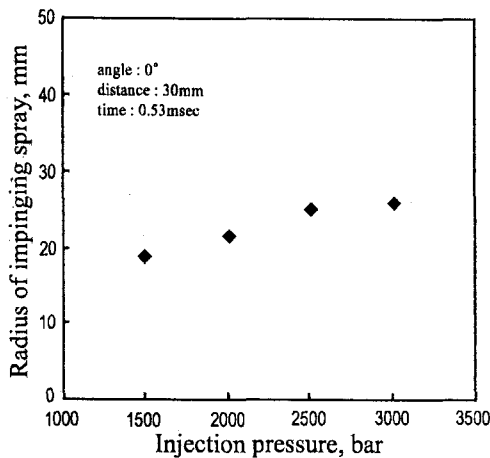


Fig. 6 Radius of impinging spray as a function of injection pressure.

경우 약 36%의 증가율을 보이고 있다. 분사압력 2,500bar 까지는 약 31%정도의 증가하나 분사압력 2,500bar 이후에는 약 5%정도의 증가를 보이고 있다.

### 3.1.3 충돌분무높이

Fig. 6은 초고압 충돌분무시 충돌분무높이를 각각의 분사압력에 대해 나타낸 것이다.

초고압 충돌분무의 축방향 충돌분무높이는 분사압력이 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보인다. 분사압력 1,500bar에 비해 분사압력 3,000bar인 경우 약 30% 정도 충돌분무높이가 증가한다. 분사압력 2,500bar 까지는 대체로 선형적으로 증가하여 분무높이의 증가폭은 30%에 달하나 분사압력 2,500bar 이후의 압력에 대해서는 완만히 증가하고 증가율이 약 1% 정도임을 나타내고 있다.

상기의 결과로부터 노즐로부터 분출된 연료액적은 벽면과 충돌한 후 재미립화가 이루어지고 분사압력 2,500bar 이상의 영역에서 미립화의 극대화가 이루어짐을 예측할 수 있다. 그리고 약 2,500bar 이후의 초고압 영역에서는 분사압력증가에 의한 연료 액적의 에너지 증가가 크지 않으리라 생각된다. 그러므로 미립화를 통한 액적의 질량감소로 인해 2,500bar 이후의 영역에서는 분무 축방향으로 퍼져나가는 충돌분무높이의 증가율이 둔화되는 것으로 판단된다.

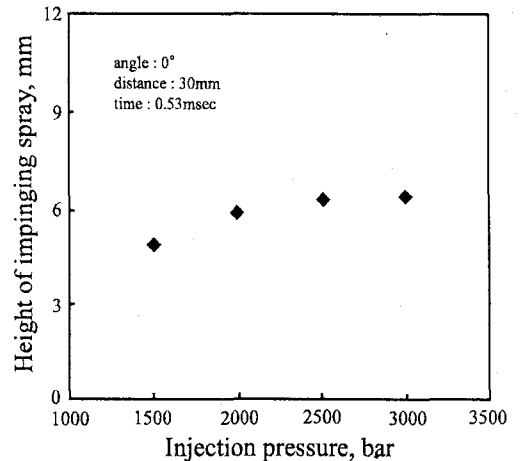


Fig. 7 Height of impinging spray as a function of injection pressure.

### 3.1.4 분무성장률

분무의 성장 경향을 보다 정량적으로 파악하기 위하여 분사 후 임의기간 ( $t_n - t_{n-1}$ ) 동안 성장한 길이 ( $X_{t_n} - X_{t_{n-1}}$ )를 최대길이 ( $X_{max}$ )로 나눈 값을 분무성장률 ( $\lambda$ )로 정의하였다.

성장률은 분무가 각 시간대에서 일정 시간간격 동안에 총길이에 대해 어느 시점에서의 성장정도를 평가할 수 있는 지수가 된다.

Fig. 7은 분사압력에 변화에 따른 충돌분무반경 성장률( $\lambda_p$ )을 나타낸다.

그림에서 나타난 바와 같이 분사압력에 대해 충돌분무반경 성장율은 시간이 경과함에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 분무성장율의 감소는 연료 분사후 0.27msec까지 현저하다가 그 이후 완만해지는 양상이다. 이러한 경향은 분사압력이 클수록 크게 나타나고 있다. 연료 분사초기의 반경방향의 충돌분무반경 성장율은 연료분사후 분사초기는 분사압력이 큰 3,000bar인 경우가 가장 크다. 그러나, 0.27msec 이후에는 경향이 역전되어 가장 작은 것을 나타낸다.

충돌초기에는 분사압력이 큼에 따라 분무속도의 증가로 인해 액적들의 운동량이 크다. 따라서 분사초기의 분무성장률은 분사압력이 증가할수록 초기의 성장이 빠르게 이루어지는 것으로 판단된다. 그리고 0.27msec 이후 분사압력이 높은 경우 증가율이 낮게 나타나는 것은 연료입자가 충돌 후 반경방향으로 퍼져나가면서 액적의 미립화로

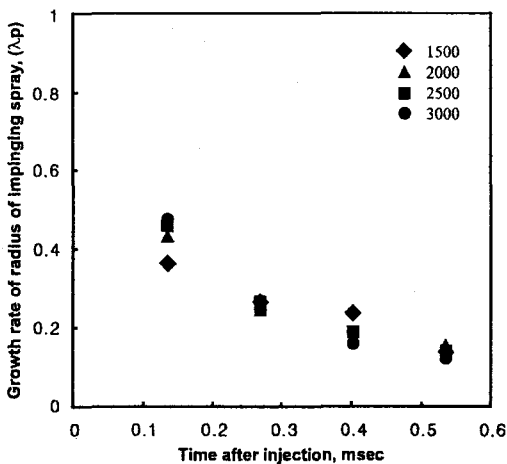


Fig. 8 Growth rate of radius of impinging spray as a function of time history.

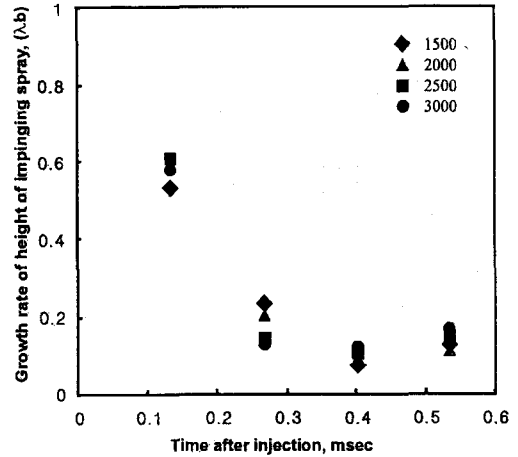


Fig. 9 Growth rate of height of impinging spray as a function of time history.

인한 연료액적의 운동에너지의 감소에 기인하는 것으로 생각된다. 충돌분무반경 성장률은 0.53 msec 이후 분사압력이 2,500bar보다 높으면 약 0.124 정도로 일정해지는 것이 보여졌다.

Fig. 8은 분사압력에 따른 충돌분무높이 성장률( $\lambda_b$ )을 나타낸다.

분사압력에 대해 충돌분무반경 성장율은 시간이 경과함에 따라 전반적으로 감소한 후 증가하는 경향을 보이고 있다. 연료분사후 0.27ms까지 충돌분무높이 성장율의 감소가 급격하며, 분사압력이 높을수록 초기의 충돌분무높이 성장률의 감

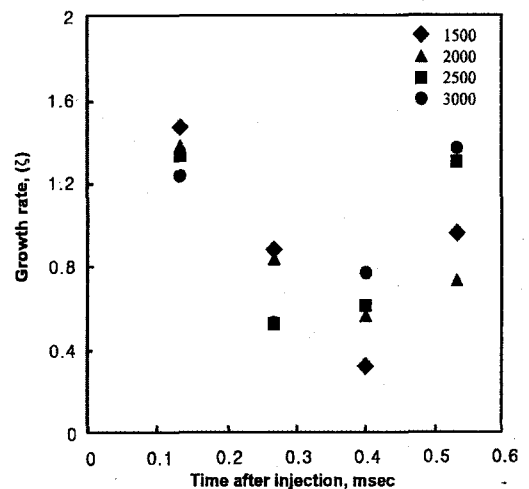


Fig. 10 Growth ratio as a function of time history.

소는 큰 것을 나타낸다.

0.27msec에서는 분사압력이 높은 경우 오히려 성장률이 작으나 그 이후에서는 초기와 동일하게 분사압력이 큰 경우 성장률이 크게 나타남을 보이고 있다. 또한 분사압력이 클수록 다시 성장률이 크며, 분사압력 2,500bar 이후의 극초고압에서는 성장률이 유사한 것을 보이고 있다.

### 3.1.5 성장률비

성장률 비는 충돌 후 액적의 공간상의 분포를 예측할 수 있는 지표가 된다.

Fig. 10은 충돌분무에서 충돌분무높이와 분무반경의 성장률비 ( $\xi = \lambda_b / \lambda_p$ )를 나타낸 것이다.

분무성장률비는 분사후 감소하다가 0.27msec 이후에는 다시 증가하는 경향이며 모든 분사압력에 대해 동일하다.

분사초기 분무성장률비가 분사압력이 증가할수록 감소하는 것은 분사초기에 상대적으로 충돌분무반경이 분사압력 증가에 대해 증가한다는 것을 나타내는 것이다. 그리고 0.27msec 이후 분무성장률의 비가 반대로 분사압력 증가에 따라 증가하는 것은 분무높이의 증가율이 향상되고 있음을 나타내는 것이다.

충돌분무반경 및 분무높이 성장률은 분사압력 증가에 대해 증가한다. 이는 연료액적의 공간분포도가 분사압력의 증가에 따라 향상되는 것을 의미한다. 그러나 분사압력이 2,500bar보다 높은 경우 Fig. 8 및 Fig. 9에서 전술한 바와 같이 분무높이의 성장이 증가하지만 충돌분무반경의 성장은 대체로 동일하므로 분사압력 2,500bar 이후의 연료의 공간분포정도가 거의 일정하게 유지된다는 것을 예측할 수 있다.

## 5. 결론

3,000bar 정도의 분사압력을 형성할 수 있는 초고압 분사장치를 이용하여 디젤연료의 초고압 분사에 따른 충돌분무의 가시화 및 분무거동과 분무특성의 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 분사압력이 증가함에 따라 충돌분무반경, 분무높이 및 그 성장률은 모두 증가하지만, 분사압력 2,500bar이후의 초고압 충돌분무 영역에서는

증가 경향이 둔화되어짐을 확인할 수 있었다.

2. 분사압력을 1,500bar에서 3,000bar로 초고압시키는 경우 충돌분무반경은 약 36%로 증가하나 분사압력 2,500bar 이후의 증가율은 약 5% 정도 증가함을 나타내었다.

3. 분사압력을 1,500bar에서 3,000bar로 초고압시키는 경우 충돌분무높이는 약 30%정도 증가하나 분사압력 2,500bar 이후에는 약 1%로 미미함을 나타내었다.

4. 이상과 같은 초고압 충돌분무시의 가시화결과와 정성적, 정량적 해석으로부터, 분사압력이 초고압화 되는 경우 충돌분무반경 및 분무높이와 같은 분포도는 향상되며, 초고압 충돌분무시 적정분사압력의 최고치는 약 2,500bar정도에 존재함을 예측할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1]. H. Tanabe, M. Takahashi, G. T. Sato, S. Kato, S. Onishi : "Experimental Study on Unsteady Fuel Spray Impinging onto a Projection on a Wall," international Symposium COMODIA 94, pp. 379~384, 1994.
- [2]. Kato, Tsujimura, Shintani, Minami, Yamaguchi: "Spray Characteristics and Combustion Improvement of D. I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection," SAE paper, NO. 890265, 1989.
- [3]. 박성진, 김홍준, 정대용, 이종태 : "초고압분사의 적정분사압력에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 913~918, 2000
- [4]. 박대순, 김문현, 박권하: "주위압력 및 충돌면 위치 변화가 디젤분무에 미치는 영향," 한국자동차공학회논문집 제5권 제3호, pp. 95~105, 1997
- [5]. 문석범, 구자예 : "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on the Hot Plate," SAE paper, NO. 99370251, 1999.
- [6]. 차건중, 김덕줄 : "충돌판에 의한 원판형분무의 공간분포에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제 19권, 제1호, pp. 251~262, 1995.