

극초고압 디젤분무의 충격파가 디젤분무특성에 미치는 영향

Effect of Shockwave on Diesel Spray Characteristics in Ultra High Pressure Injection

정 대 용†, 이 종 태*
Dae Yong Jeong†, Jong Tai Lee*

Abstract

To investigate the effect of shockwave on diesel spray characteristics under ultra high pressure injection, the velocity of spray tip and shock wave were investigated using the visualization of spray by schlieren method. Spray characteristics such as the spray radius, height, and droplets size were analyzed. It is found in this study that shock wave, produced by ultra high injection pressure, propagates faster than spray tip. Spray radius of right side of nozzle tip was shorter than that of left side and spray height of right side of nozzle tip was thicker than that of left side. Droplets size was increased at 414 MPa in injection pressure because of pressure gradient between inner and outer of the spray caused by shockwave.

Key words : Ultra high pressure injection (극초고압 분사), Diesel spray(디젤분무), Shockwave (충격파), Spray radius(분무반경), Spray height(분무높이), SMD(Sauter mean diameter)

기호 설명

Pi : injection pressure
a : sound velocity
t : time
u : fluid velocity
Ma : mach number
 μ : tangential Angle

직분식 디젤기관에서 연료를 실린더내로 분사하는 경우 분사된 연료는 실린더 벽면과 피스톤에 충돌하게 된다. 연료를 300 MPa 이상의 극초고압으로 분사하는 경우 빠른 분무속도에 의해 분무주위에는 물결모양의 충격파가 형성되는 것은 이미 밝혀진 바가 있다.⁽⁵⁾

발생된 충격파는 음속이상이므로 분무선단보다 빠르게 진행되리라 예측된다. 그러므로 밀폐된 공간 내에서 분무선단보다 빠르게 진행된 충격파는 피스톤 및 실린더 라이너에 충돌 후 반사되어 되돌아오게 되며, 성장하는 분무와 충돌하게 되어 분무의 성장을 억제하고 이로 인

1. 서론

† 성균관대학교 기계공학부
dyjeong@mail.skku.edu
* 성균관대학교 기계공학부

하여 실린더내 연료의 공간분포 및 연료액적의 미립화에 영향을 미치리라 판단된다.

상용화된 분사장치의 분사압력은 130 MPa이나 현재 분사압력 200 MPa 정도의 초고압의 상용화를 목표로 연구가 진행되고 있으며 향후 분사압력은 계속 증가하여 극초고압이 되리라 예측된다.

그러므로 본 연구에서는 디젤연료를 극초고압으로 분사하는 경우 극초고압 디젤분무 양상의 가시화 및 정량적인 해석을 통하여 극초고압 디젤분무에서의 충격파가 디젤연료의 공간분포 영역 및 미립화에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

극초고압 디젤분무에 미치는 충격파 영향을

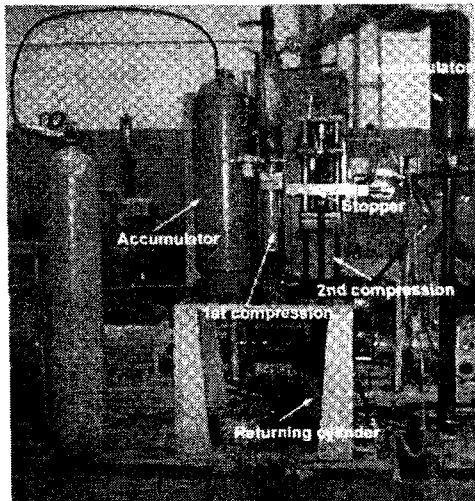


Fig. 1 The photograph of ultra high pressure injection equipment.

해석하기 위한 실험 장치는 극초고압분사장치, 분무가시화 장치, 충돌장치, 제어장치 및 데이터 취득 장치로 구성된다.

Fig. 1은 극초고압 분사장치의 실물을 나타

낸 것이다. 극초고압 분사장치는 1단압축부, 2단압축부, 걸림장치, 복귀실린더로 구성된다.

본 연구에서 고압 인젝터는 특수 제작한 분사공 직경 0.2 mm인 단공 인젝터(DLL-S type)를 사용하였다.

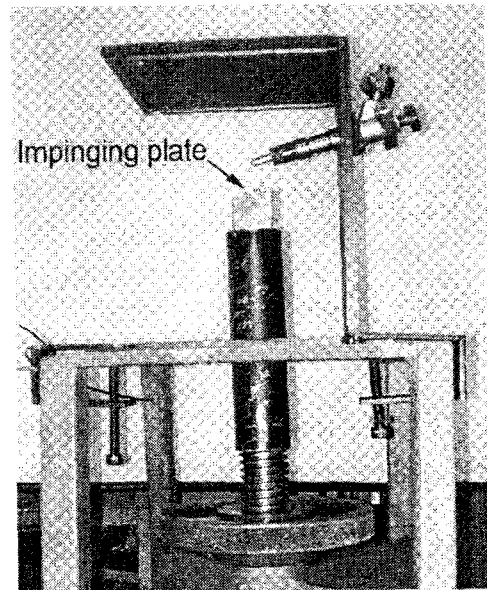


Fig. 2 Photograph of impinging system.

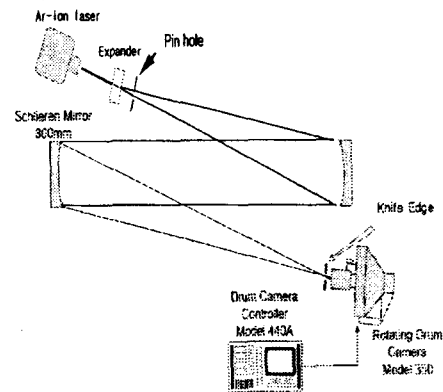


Fig. 3 Schematic diagram of visualization system.

Fig. 2는 극초고압 디젤충돌장치의 실물사진을 나타낸 것이다.

충돌분무실의 중앙에는 직경 40 mm의 충돌판을 설치하였다. 충돌 분무실 하단에는 추후 충돌판의 위치변화에 대한 실험을 수행하기 위해 0~250 mm까지 위치 변화가 가능한 가변변위장치를 장착하였다. 인젝터의 설치 위치는 인젝터의 분사각을 고려하여 분무실 뒤쪽에 고정, 설치하였다.

극초고압 디젤분무양상 가시화는 쉘리렌 기법으로 수행하였으며 가시화 장치의 개략은 Fig. 3에 나타낸다.

분무가시화 장치는, 고속 드림 카메라, 고속 카메라 제어장치, 고압분사장치, 쉘리렌 거울 및 광원 등으로 구성된다. 고속카메라(Cordin 350, Cordin, USA)는 최대 35,000 frame/sec의 속도로 촬영이 가능한 드림카메라를 사용하였다.

쉘리렌 거울은 가시화 영역을 충분히 확보하기 위하여 직경 300 mm인 것을 사용하였다. 광원은 5W의 Ar-ion 레이저를 사용하였다. 분무 가시화는 20,000 frame/sec로 하였다.

극초고압 디젤분무의 분사압력은 현재 상용의 디젤 분사압력이 최고 130 MPa인 점을 감안하여 분사압력을 150 MPa에서 극초고압 영역인 414 MPa까지 단계적으로 변화시켰다.

노즐선단으로부터 충돌판까지의 충돌거리는 30 mm로 하였다.

분무입경(Sauter mean diameter)은 PDPA(phase doppler particle analyzer)를 이용하여 측정하였다.

3. 극초고압 디젤분무 특성

Fig. 4는 극초고압 디젤분무의 자유분무 양상을 각각의 분사압력에 대해 나타낸 것이다.

그림에서 보는 것처럼 분사압력이 상대적으로 저압인 분사압력 250 MPa까지는 분무주위에 관찰되는 것이 없는 반면에 분사압력 280 MPa 이상의 극초고압 영역인 경우에는 분무주위에 물결모양의 파동이 형성되는 것을 알 수 있으며 이것이 충격파라는 것은 확인된 바 있다.⁵⁾

한편, 그림에서 보는 바와 같이 충격파는 분무 선단보다 빠르게 진행 되는 것을 보이고 있다. 이로 인해 밀폐된 공간에서 빠르게 진행된

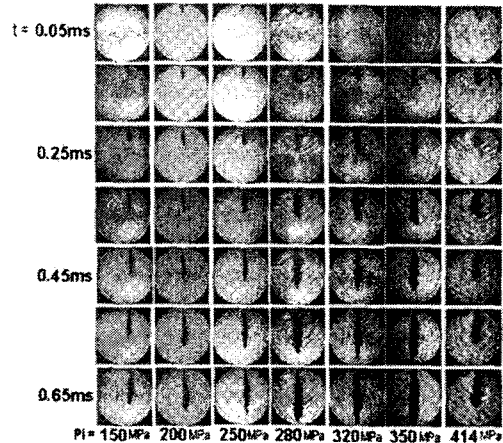


Fig. 4 Photograph of free spray pattern

충격파가 벽면에 충돌한 후 되돌아 올 수 있을 것을 예측할 수 있다.

그러므로 충격파가 분무특성에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 극초고압 디젤분무의 분무선단속도 및 충격파의 유동속도와 충격파에

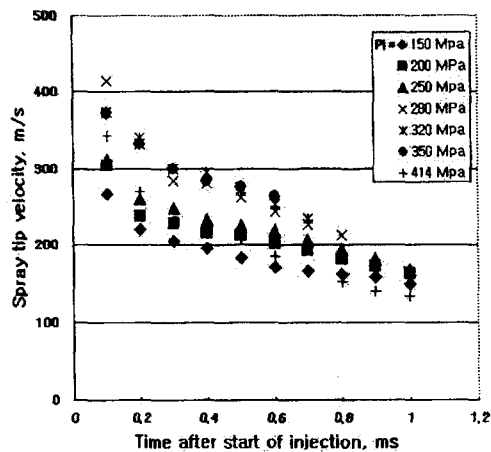


Fig. 5 Spray tip velocity as a function of injection pressure 의해 나타나는 분무특성의 변화에 대한 정량적인 해석이 요구된다.

Fig. 5는 극초고압 디젤자유분무의 각각의 분사압력에 대한 분무선단속도를 시간의 경과에 대해 나타낸 것이다.

모든 분사압력에 대해 시간이 경과함에 따라 분무선단속도는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 분사초기에 크게 감소하고 이후 감소 폭이 작아져 수렴하는 것을 나타낸다. 그리고 분사압력이 증가함에 따라 대체로 분무선단속도는 증가하는 것을 나타내고 있으나 분사압력 280 MPa 이상에서는 분무선단속도가 큰 차이가 없는 것을 나타내고 있다. 이는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 분사압력 280 MPa 이상에서 분무액적의 크기는 거의 유사한 것을 나타내고 있으며 이로 인해 액적의 운동에너지의 크기가 유사한 데 기인하는 것으로 생각된다.

한편, 그림에서 보는 바와 같이 분사 후 0.1 ms에서의 분무선단속도는 분사압력 280 MPa 이후에는 340% 이상임을 보이고 있다. 분무가 음속이상으로 진행되고 있음을 보인다. 이와 같이 분무선단속도가 음속이상인 것은 가시화 결과에서 보는 바와 같이 분무주위에 물결모양의 파동이 충격파라는 것을 입증하는 것이다.

분무주위에 발생하는 충격파의 유동 속도는 Mach의 이론에 의해 구할 수 있다.⁽⁸⁾ 이 경우 유체 유동방향에 대한 충격파의 접선각은 다음의 (1) 식과 같이 표시된다.

$$\mu = \sin^{-1} \frac{a}{u} \frac{\delta t}{\delta t} = \sin^{-1} \frac{a}{u} = \sin^{-1} \frac{1}{Ma} \quad (1)$$

여기서, a : 음속, u : 유체속도, Ma : 마하수
 상기의 식을 마하수에 대한 식으로 전개하면 다음의 (2) 식이 된다.

$$Ma = 1 / \sin \mu \quad (2)$$

따라서 유체유동방향과 충격파가 이루는 접

선각을 구하면 상기의 식으로부터 충격파의 유동속도를 구할 수 있다.

Fig. 6은 디젤연료를 극초고압으로 분사하는

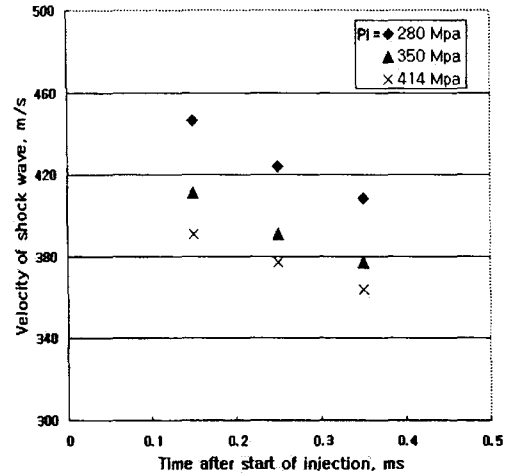


Fig. 6 Velocity of shock wave with time lapses

경우 분무주위에 발생하는 충격파의 유동속도를 나타낸 것이다.

충격파의 유동속도는 분사압력 280 MPa에서 가장 빠르며, 분무가 진행함에 따라 공기저항에 의해 감소하는 것을 알 수 있다. 감소 경향은 모든 분사압력에 대해 동일하게 나타나고 있으며, 분사압력 414 MPa에서의 충격파의 유동 속도가 가장 작게 나타나고 있다. 이것은 상기의 분무가시화에서 보듯이 분사압력 414 MPa에서의 분무속도가 가장 작은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

충격파의 유동속도는 분사압력 280 MPa에서 453% 로 가장 큰 것으로 나타났으며 모두 340% 이상임을 나타내었다.

상기의 결과에서 충격파는 분무선단의 속도보다 빠르게 진행되는 것을 확인하였다.

따라서 선단보다 빠르게 진행되는 충격파는 연소실 벽면에 부딪혀 성장하는 분무의 성장을 방해하여 연료의 공간분포 및 미립화에 영향을 미치리라 판단된다.

4. 극초고압 디젤분무의 충격과 영향

Fig. 7은 충돌각 0°, 충돌거리 30 mm에서 분사압력을 극초고압화한 경우의 충돌분무 가시화 사진을 시간의 경과에 대해 나타낸 것이다. 극초고압 충돌분무는 각각의 분사압력에 대해 모두 시간의 경과에 따라 반경방향 및 축 방향으로 퍼져나아가다 진행이 점차 둔화되는 경향이다. 축 방향 분무의 퍼짐은 분무 분열기간이 긴 충돌분무외피에서의 미립화 촉진으로 인해 분무입자가 상대적으로 현저히 퍼져나가는 데 기인하여 반경방향으로 갈수록 축방향의 분무퍼짐이 증가하는 것을 나타낸다. 그리고 분무양상은 전체적으로 타원형의 모양을 보이고 있다.

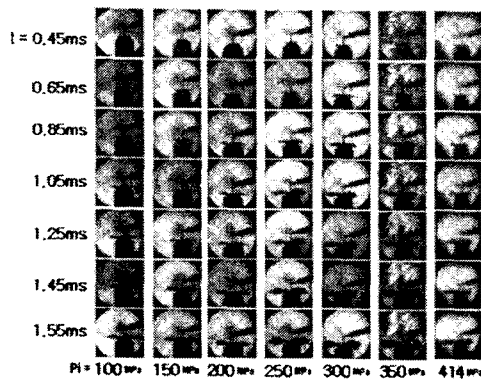


Fig. 7 Photograph of impinging sprays at impinging distance of 30mm and impinging angle of 0°

반경방향 및 축방향의 분무퍼짐은 분사압력이 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향이다. 이것은 분사압력이 증가함에 따른 분무속도의 증가로 인해 액적들의 운동에너지가 증가하므로 충돌 후 액적의 반사가 강하게 일어나는데 기인하는 것으로 볼 수 있다. 한편 분사압력이 증가함에 따라 시간의 경과에 따른 반경방향에 대한 분무퍼짐은 격판이 없는 분무왼쪽에서 크게 나타나고 있으며, 축방향에 대한 분무퍼짐은 격판이 있는 분무오른쪽

에서 크게 나타나는 것을 보인다.

분무초기의 분무 양상은 분무 끝이 뿔족한 양상을 나타낸 후 분무가 축 방향으로 퍼져나가면서 분무 끝이 무더지는 것을 보인다. 분무 끝이 무더지는 양상은 격판이 없는 분무왼쪽보다 격판이 있는 분무 오른쪽에서 현저한

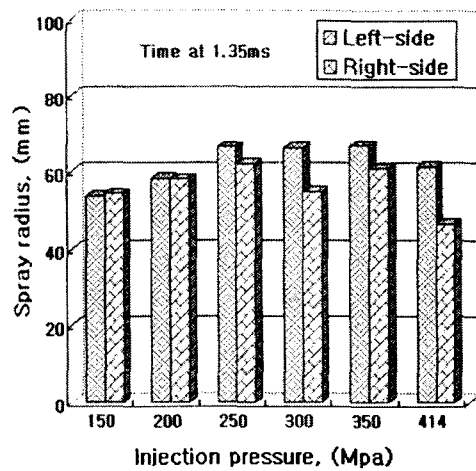


Fig. 8 Comparison of spray radius.

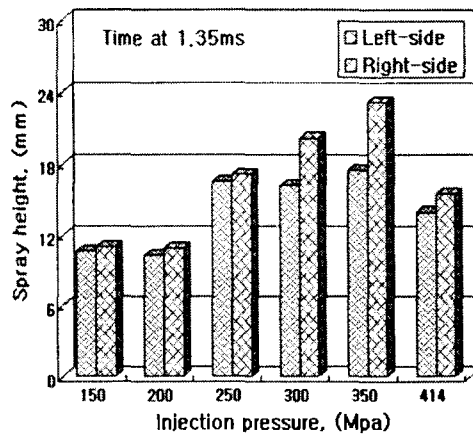


Fig. 9 Comparison of spray height.

것을 나타낸다. 이러한 경향은 분사압력이 극초고압화됨에 따라 현저해지는 것을 보이고 있다.

극초고압 디젤분무의 충격과가 미치는 영향

을 상세히 파악하기 위하여 극초고압 디젤 충돌분무의 반경방향의 분무도달거리와 축방향으로의 분무높이를 Fig. 2에서 보는 바와 같이 노즐 선단을 중심으로 격판이 있는 경우와 없는 경우에 대해 정량적으로 해석을 하였다.

Fig. 8 및 9는 분사압력 증가에 대하여 충돌각 0°, 충돌거리 30 mm에서의 극초고압 디젤분무의 충돌분무반경 및 충돌분무높이를 나타낸 것이다.

분사압력 300 MPa 이상의 극초고압 영역에서는 분무 오른쪽의 충돌분무반경이 분무 왼쪽의 경우에 비하여 현저히 작은 것을 나타내고 있다.

한편, 분사압력 300 MPa 이상에서의 충돌분무높이는 모두 분무왼쪽보다 분무오른쪽의 높이가 크게 나타나고 있다.

분사압력이 극초고압이 되는 경우 분무는 왼쪽으로 약간 빋겨가면서 아래로 성장하는 것을 확인한 바 있다.⁽⁷⁾ 이처럼 분무가 왼쪽으로 빋겨 내려가면서 충돌면과 충돌한다는 것은 충돌면과 분무와의 충돌각이 증가하는 것을 의미하는 것이다. 한편, 충돌각이 증가하는 경우 충돌분무 높이가 증가하는 것을 선행 연구에서 확인한 바가 있다.⁽⁷⁾ 그러나 상기의 결과는 통상의 결과와 차이를 나타내고 있다.

본 연구실의 충돌분무실은 노즐을 중심으로 왼쪽으로는 격막이 없으나 오른쪽에는 격막이 설치되어 있다.

분무 노즐 팁 좌우의 충돌분무반경 및 충돌분무높이가 현저히 차이가 나는 것은 분사압력이 극초고압화되는 경우 발생된 충격파가 분무선단보다 빠르게 진행하며 빠르게 진행된 충격파가 격판에 부딪혀 되돌아오면서 성장하는 충돌분무의 성장을 방해하기 때문에 상기의 결과가 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 분사압력의 극초고압화에 따른 자유분무의 분무입경 변화를 나타낸 것이다. 분

무입경은 노즐 팁으로부터 90 mm, 120 mm 떨어진 위치에서 측정하였다.

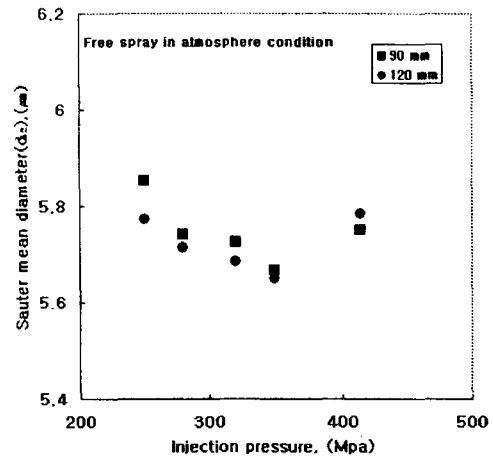


Fig. 10 Droplet size with the growing of the spray in free spray

분사압력이 극초고압화됨에 따라 분무입경은 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 분사압력 414 MPa에서의 분무입경은 오히려 미세하게 증가하는 것을 보이고 있다.

이는 분사압력 증가에 대한 캐비테이션 등에 의한 노즐내부의 특성변화로 인한 분무액적의 속도 감소와 분무선단에서 발생한 충격파로 인한 분무내부와 분무외부의 압력 구배로 인한 초기에 분사된 액적의 진행 속도는 급격히 감소하게 된다. 이에 후발의 분무액적이 앞서 진행하던 분무액적과 충돌하여 액적의 크기가 커지는 것으로 판단된다.

상기의 결과로부터 분무주위에 발생하는 충격파는 분무성장의 저해요소가 되며 이로 인하여 연소실내 연료의 공간분포는 변화되리라 판단된다.

따라서 기관의 연소실 설계 시에는 충격파가 연료의 공간분포 및 액적의 미립화에 영향을 미치므로 충격파를 고려한 연소실 설계가 요구된다.

5. 결 론

극초고압 디젤분무의 분무가시화 및 미립화 특성 해석을 통하여 300 MPa 이상의 극초고압 디젤분무의 충격파가 분무특성에 미치는 영향에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 분사압력을 극초고압으로 분사하는 경우 분무주위에는 물결 모양의 파동이 형성되며, 이것은 분무선단속도가 음속 이상을 나타내므로 충격파임을 확인할 수 있었다.
 2. 극초고압분사 시 분무선단속도와 충격파 진행속도를 비교한 결과 충격파의 진행속도가 분무선단속도에 비해 빠른 것을 확인할 수 있었으며, 충격파에 의해 분무특성이 영향을 받을 것을 예측할 수 있었다.
 3. 분사압력이 극초고압화됨에 충돌분무특성은 격판이 있는 경우와 없는 경우에 대해 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 격판이 있는 경우 충격파의 영향에 의해 분무반경방향의 도달거리는 감소하나 축방향의 분무높이는 오히려 증가되어 충격파가 연료의 공간분포에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.
 4. 극초고압 분사 시 노즐 내부의 특성 변화와 충격파에 의한 분무내부와 외부의 압력구배에 의해 분무입경이 분사압력 414 MPa에서는 오히려 증가하여 분무특성이 악화되는 것을 확인할 수 있었다.
- 이상과 같은 극초고압 충돌분무시의 가시화 결과의 정성적, 정량적 해석으로부터, 분사압력이 300 MPa 이상의 극초고압화됨에 따라 발생하는 충격파는 분무성장 및 미립화에 저해요소가 되며 연소실내 연료의 공간분포에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.
- 따라서 극초고압 분무에 의한 기관의 연소실 설계시에는 충격파가 연료의 공간분포 및 미립화에 영향을 미치므로 충격파를 고려한 연소실의 설계가 요구된다.

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2001-000-00386-0(2003)) 및 B.K. 연구지원(2004)에 의하여 수행되었습니다.

References

- (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) T. Kato, K. Tsujimura, M. Shintani, T. Minami, and I. Yamaguchi, "Spray Characteristics and Combustion Improvement of a D. I. Diesel Engine with High-Pressure Fuel Injection." SAE Paper No. 890265.
- (3) 김홍준, 정대용, 이종태, "초고압디젤 분무의 적 정분사압력에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집B권, pp.812-817, 2001.
- (4) 차건중, 김덕줄, "충돌판에 의한 원판형분무의 공간분포에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제 19권, 제1호, pp.251-262, 1995.
- (5) 정대용, 임희수, 이종태, "극초고압 영역에서의 미립화특성에 관한 연구", 한국자동차공학회, 추계학술대회 논문집, pp.240~245, 2002
- (6) 김종민, 강신재, 임주일, 이준호, "고압직분식 가솔린 분사기의 평판충돌 분무특성에 관한 실험적 연구", 한국액체미립학회 학술강연회 논문집, pp.153-164, 2003
- (7) 정대용, "극초고압 디젤분무의 적정분사압력 및 한계압력 규명에 관한연구", 성균관대학교, 박사학위 청구논문, 2004
- (8) F. M. White, "Fluid Mechanics," Second edition, McGraw Hill, pp.560-561, 1986