

극초고압영역에서의 디젤연료의 자유분무특성에 관한 연구

A Study on Spray Characteristics Analysis of Free Spray of Diesel Fuel with Ultra High Pressure

정대용* · 이종태** · 홍기배***

D. Y. Jeong, J. T. Lee, G. B. Hong

ABSTRACT

The characteristics of free spray with ultra injection pressure was analyzed to clear the limit pressure of diesel engine. To obtain final goal, ultra high pressure injection equipment was developed, spray patterns were visualized under various ultra injection pressures. Spray penetration and spray width, volume and entrained air mass were increased with the increase of injection pressure. Sauter mean diameter and injection duration were decreased. But over 3,000bar of ultra injection pressure region the rates of increase show almost similar and finally the reversed tendencies at 4,140bar.

주요기술용어(Key Words) : Free Spray(자유분무), Ultra High Pressure(극초고압), Ultra High Pressure Injection Equipment(극초고압분사장치), Sauter mean diameter(평균입경), Shock wave(충격파), Limit Pressure(한계압력).

1. 서론

연료의 분사압력을 초고압화시키는 경우 분무에너지의 증가로 연료의 미립화 촉진 및 실린더내의 공기이용율의 증가로 인해 분무 및 연소향상효과가 기대되지만, 분사압력의 증가에 따른 상기 향상효과의 증가율이 완만해지는 영역이 존재한다. 또한, 이보다 분사압력을 더욱 높여 극초고압화시키면, 노즐로부터의 분무는 임계상태에 이르게 되어 분무특성의 향상에 한계가 있거나 오히려 역효과가 나타날 수 있을 것으로 생각된다. 이와 함께 분사압력의 극초고압화에 따른 분사시스템의 제어성 및 내구성의 저하와 고비용화를 고려하면 분사압력의 고압화에는 한계압력이 어느 정도인지에 대한 규명이 필수 불가결이다.

지금까지의 고압분사에 관한 연구는 Tomohisa¹⁾, L. Araneo²⁾, Sasaki³⁾ 및 Kato⁴⁾와 Yawata⁵⁾ 등의 연구에서 보는 바와 같이 대부분 2,000bar 전후의 분사압력이 대상이었다. 최근 이종태⁶⁾ 등에 의한 분무특성의 향상율이 최대가 되는 적정분사압력의 해석과 Nishida⁷⁾ 등에 의한 초고압시의 분무특성을 해석하기 위하여 약 2700bar 정도의 초고압분사가 실현된 바 있다.

전술한바와 같은 분사압력의 한계압력을 해석하기 위해서는 3000bar 이상의 극초고압의 달성이 선구되어야 한다. 그러나 극초고압 분사장치 개발의 어려움으로 인하여 상기 영역에서의 분무거동 및 분무특성에 관한 해석은 아직 보고된 바 없는 상황이다.

본 연구에서는 분사압력의 한계압력을 밝히

* 정회원, 성균관대학교 원

** 정회원, 성균관대학교

*** 정회원, 충주대학교

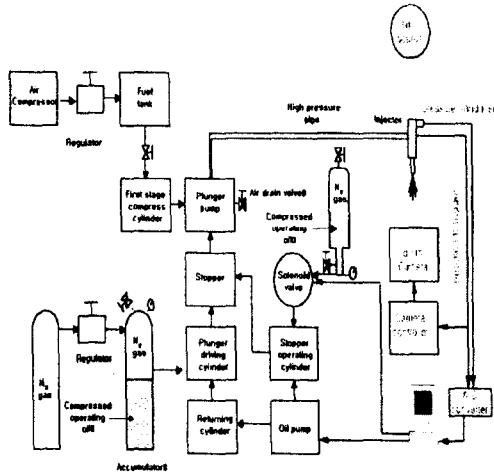


Fig.1 Block diagram of experimental apparatus.

기 위한 초기단계로서 단발초고압다젤분사장치를 개선하여 4,000bar 이상의 극초고압분사를 실현시켰다. 그리고 극초고압으로 대기중에 분무되는 자유분무의 분무양상을 가시화하여 극초고압분무양상과 분무도발기리, 분무폭, 분무체적, 혼입공기량 및 분무액적 등과 같은 제반 분무특성의 거동을 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 극초고압 자유분무의 양상을 가시화 하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것

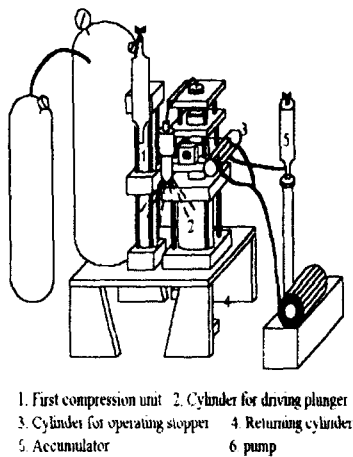


Fig. 2 Schematic diagram of modified UHPIE.

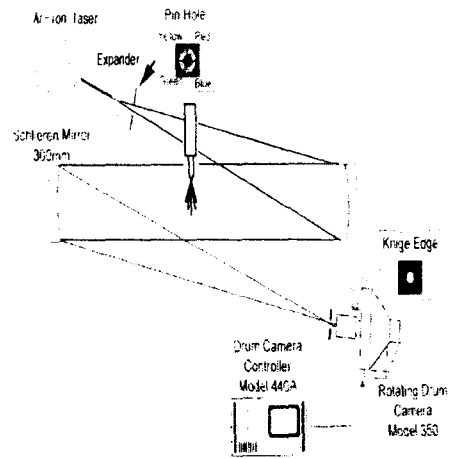


Fig.3 Schematic diagram of visualization system.

이다. 실험장치는 크게 극초고압분사장치, 분무가시화장치, 제어장치 및 데이터 취득장치로 구성된다.

극초고압분사장치는 Fig. 2에 나타난바와 같이 연료를 1차 가압하는 1단 압축부, 플런저 펌프에 의해 2차 가압하는 2단 압축부, 플런저 구동용 실린더를 원상태로 복귀시키는 복귀장치부로 구성된다. 극초고압의 달성에는 플런저 펌프에 공급하는 연료의 초기압력을 별도의 압축펌프로 가압하여 플런저펌프에 공급한 후 고압의 작동유로 작동되는 플런저구동 유압실린더에 의해 급속히 압축하는 방식이 사용되었

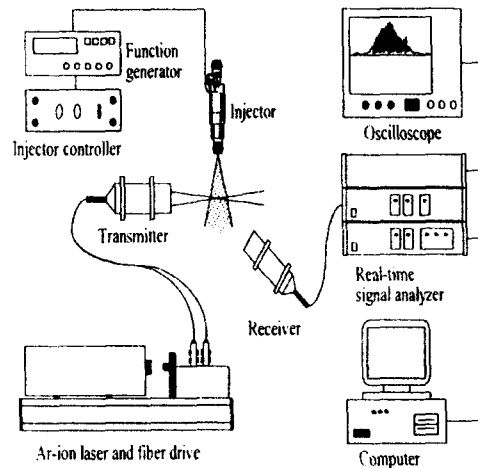


Fig. 4 The schematic diagram of PDPA.

다. 플런저구동실린더의 급속한 구동제어에 걸림장치를 사용하는데 기존의 장치는 걸림장치부와 걸림장치 구동유압실린더의 운동방향 불일치로 구동력이 감소되는 단점이 있었다. 따라서 걸림장치와 걸림장치구동 유압실린더사이의 운동방향을 일치시키는 링크기구로 개선하여 플런저구동실린더의 구동압력을 높일 수 있도록 하였다. 이로 인해 실용분사압력 약 4,200bar정도의 극초고압의 실현이 가능하였다.

고압인젝터는 특수제작한 분사공직경 $d = 0.2\text{mm}$ 인 DLL-S type의 단공인젝터를 사용하였다.

극초고압영역에서의 분무양상을 가시화하기 위한 분무가시화 장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 분무가시화 장치는 고속드럼카메라, 고속카메라 제어장치, 광원 등으로 구성된다. 분무가시화는 극초고압인 경우 분사초기의 빠른 분무속도로 인하여 분무주위에 충격파 생성 가능성이 있으므로 분무양상 가시화 및 충격파를 동시에 가시화 할 수 있는 schlieren기법을 사용하였다. 고속카메라는 최대 35,000fps의 고속촬영이 가능한 드럼카메라(Cordin 350), 광원은 5W의 Ar-ion 레이저를 사용하였다. schlieren

mirror는 분무가시화영역을 극대화하기 위하여 $\phi 300\text{mm}$ 의 concave mirror를 사용하였다.

극초고압영역에서의 분무입경을 측정하기 위한 PDPA 장치의 개략도는 Fig. 4와 같다. PDPA는 Transmitter, Receiver, Signal analyzer, PC로 구성되었다. 광원은 5W의 Ar-ion 레이저를 사용하였다.

2.2 실험방법

디젤연료의 극초고압분사에 따른 분무양상의 가시화 및 해석을 위한 주요 실험변수는 분사압력이다. 본 연구실에서 분사압력 2,600bar까지의 분무특성을 해석한 바 있으므로 분사압력은 분사압력 2,500bar에서 극초고압 분사영역인 4,140bar까지 단계적으로 변화시켰다. 분무가시화는 전술한 바와 같이 쉐리렌 기법을 사용하였으며, 분무입경의 측정에는 PDPA를 사용하였다.

3. 극초고압 자유분무특성

3.1 분무양상 가시화

Fig. 5는 극초고압 영역에서의 분무가시화 양상을 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다.

분사압력이 3000bar 정도의 극초고압화 됨에 따라 축방향 및 반경방향으로의 분무퍼짐은 크게 증가하나, 이후 약 3500bar까지 변화가 미소하게 되며 액주의 흔들림에도 큰 차이가 없는 것을 보이고 있다. 분사압력 4,140bar에서는 축방향으로의 분무퍼짐이 반대로 현저히 감소되는 양상을 나타낸다.

한편, 2800bar 이상의 모든 분사압력에 대해 분무주위로 물결모양의 파동이 형성됨을 보인다. 이는 분무선단속도가 음속 이상이 되어 발생하는 충격파로 생각된다. 물결모양의 파동은 분무초기에 형성된 후 분무선단보다 먼저 진행되고 있다. 이는 밀폐된 공간 내에서 극초고압으로 분사된 연료가 되돌아오는 압력파에 의해 실린더내의 공간분포 등이 영향받는 것에 의한 것으로 생각되나 이에 관한 상세한 해석이 요구된다.

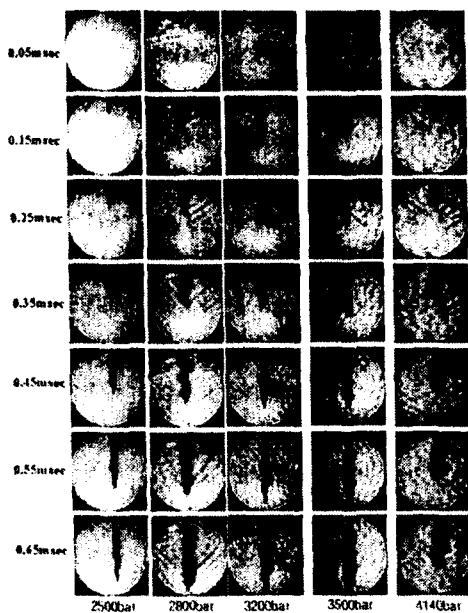


Fig. 5 Photograph of spray.

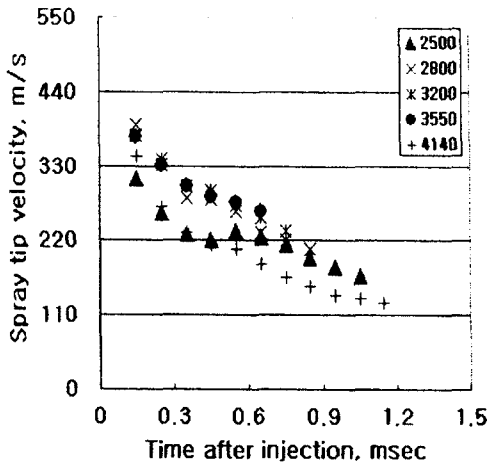


Fig. 6 Spray tip velocity as a function of injection pressure.

3.2 분무속도 및 분무도달거리

시간의 경과에 따른 분무속도의 변화를 각각의 분사압력에 대해 나타낸 것이 Fig. 6이다.

모든 분사압력에 대해 분무선단속도는 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향이다. 분무선단속도의 감소폭은 분사초기에 현저하며 이후 점차 작아지는 것을 나타낸다.

분무선단속도는 분사압력의 증가에 따른 분무액적의 운동에너지의 증가에 기인하여 분무초기에 전반적으로 증가하는 것을 보인다. 그 후 시간의 경과에 따른 액적의 미립화에 의해

분사압력이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다.

분사압력 4,140bar에서의 분무선단속도는 다른 분사압력의 경우에 비하여 분무초기에 음속 이상의 빠른 속도를 나타낸다. 그러나 분무선단속도는 이후 급격히 감소하여 약 0.25msec부터 가장 느리게 되며, 이 경향은 분무 후반부까지 대체로 유지되는 것을 보이고 있다.

분사압력 2,800bar 이후에 초기의 분무선단속도는 330% 이상임을 보이고 있다. 이와 같이 분무선단속도가 음속이상인 것은 가시화 결과에서 보는 바와 같이 분무주위에 물결모양의 파동이 충격파임을 입증하는 결과로 볼 수 있다.

Fig. 7은 시간의 경과에 따른 분무도달거리를 분사압력에 대해 나타낸 것이다. 분무도달거리는 시간이 경과함에 따라 계속 증가하는 경향이다. 또한 동일시간에 대한 분무도달거리는 분사압력이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

그러나 분사압력 4,140bar인 경우에는 분무도달거리가 큰 폭으로 감소함을 볼 수 있다. 이것은 분사압력 증가에 의해 분사초기의 분무에너지가 증가하나 이후 분무입자의 급격한 미립화 및 액적의 속도 감소로 인해 분무운동에너지를 급격히 감소하기 때문인 것으로 생각된다

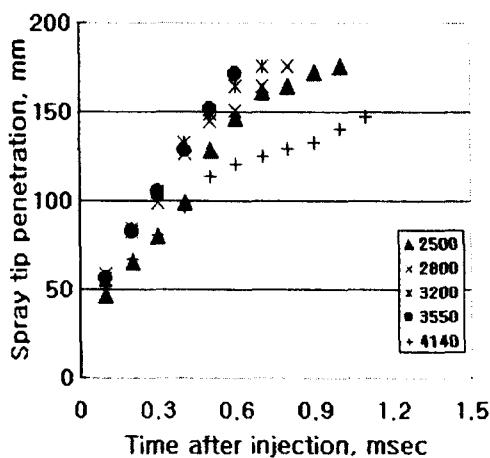


Fig. 7 Spray tip penetration as a function of injection pressure.

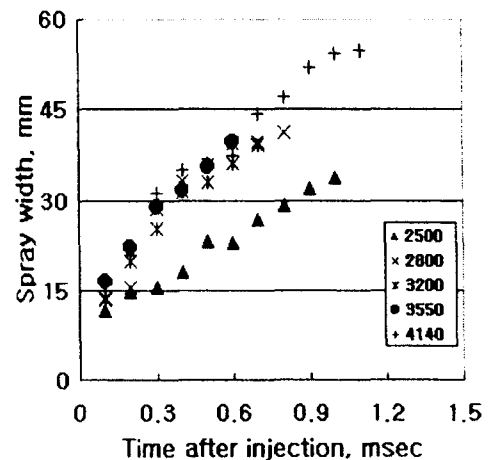


Fig. 8 Spray width as a function of injection pressure.

다. 분사압력 4,140bar에서의 분무도달거리는 분사압력 2,000 bar와 상당히 유사함을 보이며 분사 후반에는 가장 작게 나타나고 있다.

3.3 분무폭

Fig. 8에 각각의 분사압력에 대한 분무폭을 시간의 경과에 대해 나타낸다. 분무폭은 분사압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 증가율은 분사압력이 극초고압이 되는 2,800bar에서 가장 크며 이후 약간 완만해진다. 이것은 분사압력이 증가함에 따른 분무입자의 공기와의 상호작용 증가에 기인하여 미립화가 촉진되며, 미립화된 입자가 분무의 반경방향으로 멀리 퍼져나가기 때문인 것으로 판단된다. 한편 분사압력 4,140bar에서의 증가는 극히 미약함을 보이며 분사압력 3,500bar와 유사함을 나타낸다.

3.4 분무체적 및 혼입공기량

Fig. 9는 시간의 경과에 따른 분무체적을 각각의 분사압력에 대해 나타낸 것이다. 분무체적은 시간의 경과에 따라, 분사압력이 증가함에 따라 모두 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 극초고압분사영역에서 분무체적의 증가는 완만해지며, 이것은 전술한 바와 같이 분사압력 2,800bar 이후에서의 분무도달거리 및 분

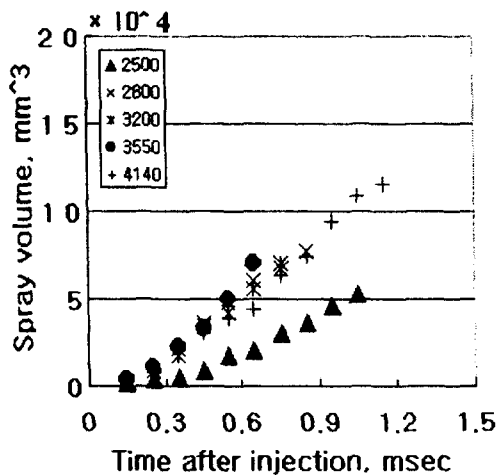


Fig. 9 Spray volume as a function of injection pressure.

무폭이 큰 차이가 없는데 기인하는 것으로 판단된다. 한편, 분사압력 4,140bar인 경우 다른 분사압력에 비해 분무체적이 작게 나타나는 것은 분무폭이 증가하나 분무도달거리의 감소폭이 상대적으로 크기 때문으로 볼 수 있다.

분사압력이 3,500bar에서 4,140bar로 증가하는 경우 분무체적은 약 60% 정도의 감소함을 보이고 있다.

Fig. 10은 각각의 분사압력에 대한 혼입공기량을 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 여기서, 혼입공기량은 분무체적에서 동일시간까지의 연료 분사량을 뺀 공기의 질량으로 정의한다.

혼입공기량은 시간이 경과 및 분사압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 분사압력의 증가에 대한 혼입공기량의 증가는 미약하며, 분사압력 3,500bar에서 최대치를 나타낸다. 한편, 분사압력 4,140bar에서는 오히려 혼입공기량이 작아지는 것을 나타내고 있다. 이는 연료분사량은 크게 차이가 없으나 연료의 공간분포 영역, 즉 분무체적이 상대적으로 작고 또한 분사 후기 연료의 분무속도가 상대적으로 작는데 따른 복합적인 영향에 기인하는 것으로 판단된다.

3.5 분사기간

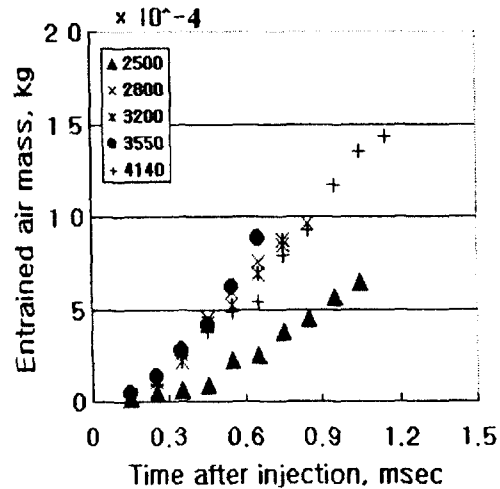


Fig.10 Entrained air mass as a function of injection pressure.

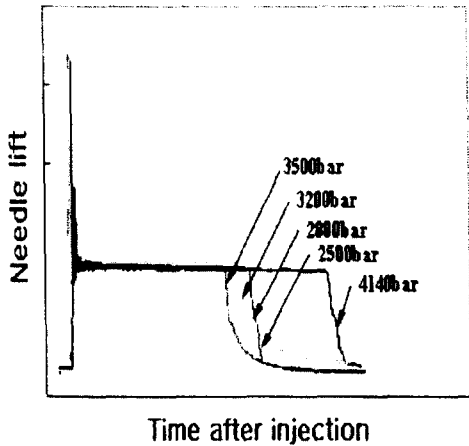


Fig. 11 The needle lift as a function of injection pressure.

Fig. 11은 극초고압 영역에서 분사되는 연료의 분사시간을 파악하고자 각 분사압력에 대한 분사밸브의 니들리프트 곡선을 나타낸 것이다.

극초고압영역에서 연료의 분사시간은 분사압력이 증가함에 따른 분무에너지의 증가로 인해 전반적으로 감소함을 나타내고 있다.

그러나 분사압력 4,140bar에서는 분사압력이 증가함에도 불구하고 오히려 분사시간이 큰 폭으로 증가함을 보이고 있다. 이것은 분사압력 4,140bar에서 캐비테이션 및 충격파에 의한 분

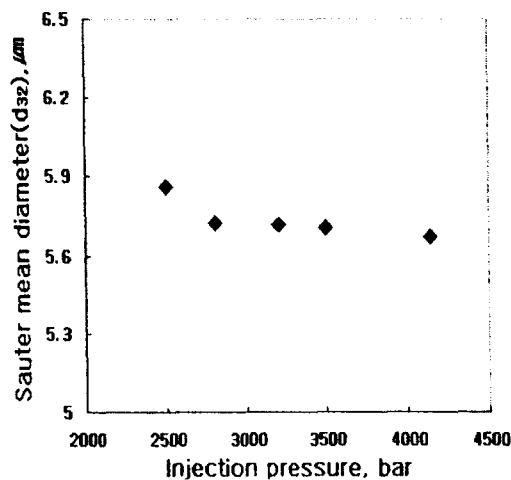


Fig. 12 Sauter mean diameter as a function of injection pressure

무초기에 분무선단의 높은 압력으로 인하여 연료의 분사가 지연되는 것으로 인해 분사압력이 높아지게 되며, 상대적으로 높은 분사압력이 오랫동안 지속됨으로 인해 분사시간이 길어지는 것으로 생각된다.

3.6 Sauter mean diameter

Fig.12는 극초고압영역에서의 분무입경을 나타낸 일례이다. 분무입경은 PDPA를 이용해서 측정을 했으며 노즐팁으로부터 60mm떨어진 지점에서 측정한 결과이다.

극초고압영역에서의 분무입경은 분사압력 증가에 따른 분무입자와 공기와의 상호작용 증가로 인해 분사압력이 증가함에 따라 계속적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 분사압력 2,800bar까지 분무입경의 감소폭이 크고 이후에는 완만해져 거의 일정한 값으로 수렴한다고 볼 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 분사압력 2,800bar이후 분무선단속도 및 분무에너지의 크기가 유사한데 따른 공기와 연료와의 상호작용 차이가 미미한데 의한 것으로 생각된다. 그리고 분사압력 4,140bar급의 극초고압 분사영역에서 연료액적의 미립화로 인하여 분무도달거리가 현저히 감소함에도 불구하고 액적의 크기가 현저히 감소하지 않는 것은 분사 초기 급격한 미립화 뒤에 후발의 연료와 연료액적이 재결합하는데 기인하는 것으로 생각된다.

4. 결론

디젤기관에서 분사압력의 한계압력을 밝히기 위한 초기단계로서 극초고압 단발디젤분사장치를 개선하고 극초고압 분무되는 자유분무의 분무양상을 가시화하여 제반분무특성의 거동을 해석한 결론은 다음과 같다.

1. 분사압력이 극초고압화 됨에 따라 분무 축방향 및 반경방향으로의 분무퍼짐은 미약하게 증가하며, 분사압력 2,800bar 이후에서는 분무선단속도가 음속 이상이 되어 충격파가 발생됨을 알 수 있었다.

2. 분사압력의 극초고압화에 따라 분무도달거리 및 분무폭은 약간 증가함을 보였다. 그러나, 분사압력 4,140 bar에서는 연료입자의 극미립화 및 분무속도의 감소와 충격파동의 복합적인 요인으로 등으로 인해 분무에너지가 급격히 감소하여 분무도달거리가 크게 작아지는 것으로 생각된다.

3. 분사압력의 극초고압화에 따라 분무체적이 과공기혼입량이 다소 증가함을 보이거나 분사압력 4,140bar에서는 다시 크게 감소함을 알 수 있었다.

4. 분사압력의 증가에 따라 분무에너지의 증가로 인해 연료의 분사시간이 감소함을 보였다. 그러나 분사압력 4,140bar에서는 오히려 크게 증가함을 알 수 있었다.

5. 분사압력이 극초고압화됨에 따라 연료 액적의 크기는 감소하나, 분사압력 2,800bar 이후에서는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

6. 상기와 같은 극초고압 자유분무의 해석으로부터 분사압력 4,000bar 정도에서 분무특성의 한계압력이 존재함을 유추할 수 있으나, 추후 극초고압 충돌분무 및 극초고압 디젤연소 등의 다각적인 측면에서 해석한 결과와 종합적으로 판단하여야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2001

-00386-000(2002))지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Tomohisa, Sayo Takagishi, Jiro Senda, Hajime Hujimoto : "Effect of Ambient Gas Properties for Characteristics of Non-Reacting Diesel Fuel Spray", SAE 970352
2. L. Araneo, A. Coghe, G. Brunello, G. E. Cossali, : "Experimental Investigation of Gas Density Effects on Diesel Spray Penetration and Entrain -ment", SAE 1999- 01-0525
3. Satoru Sasaki, Hisashi Akagawa, Kinji Tsuji -mura, : " A Study on Surrounding Air Flow Induced by Diesel sprays", SAE, 980805
4. Kato, Tsujimura, Shintani, Minami, Yamagu -chi: "Spary Characteristics and Combustion Improvement of D.I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection", SAE paper, NO. 890265, 1989.
5. Yawata, Togashi, Akagi : "High Pressure Fuel Injection pump KP21", 内燃機關, Vol. 30, NO. 379, 1991. 5.
6. 정대용, 김홍준, 박성진, 이종태 : 초고압 분사의 적정분사압력에 관한 연구", 대한기계학회, 2000. 4. 20 pp913-918
7. Keiya Nishida, Hiroaki Ochiai, Masataka Arai, Hiroyuki Hiroyasu: ' Characterization of Diesel Fuel Spray by Ultra High Pressure Injection" 일본기계학회논문집, 1997, v63, n. 605, pp. 344-349