

극초고압 디젤 자유분무의 미시적 분무특성에 관한 연구

정대용* · 이종태

성균관대학교 기계공학부

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

Daeyong Jeong* · Jongtai Lee

Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

(Received 1 December 2004 / Accepted 29 July 2005)

Abstract : In order to analyze the microscopic spray characteristics of free spray in ultra high pressure region, the droplets size and velocity of free spray injected, under atmosphere condition were measured by PDPA. As injection pressure became ultra high pressure, the droplets size was decreased continuously due to the increase of mutual reaction between droplets and air. But the decreasing rate became moderate. The velocity was increased until 250 MPa, and then decreased over that of injection pressure. It was seemed that the droplet size was similar in range of 280~350 MPa, but increased in 414 MPa, even though injection pressure was increased. The microscopic spray characteristics of free spray got worse in 414 MPa.

Key words : Ultra high pressure(극초고압), Microscopic spray characteristics(미시적 분무특성), Ultra high pressure injection equipment(극초고압분사장치), Free spray(자유분무), PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)

1. 서론

연료입자의 미립화는 공기와 연료의 혼합율을 촉진시키는 유효한 수단으로 대두되고 있으며, 연료입자의 미립화를 촉진시키는 방법으로 노즐 분공경의 감소 등 여러 가지가 제시되고 있으나 현재 가장 주목 받고 있는 것이 연료의 고압분사이다. 이로 인해 연료의 고압분사에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 현재 130 MPa 정도의 고압분사가 상용화되고 있다. 한편, EUI(electronic unit injector)에 의해 200 MPa의 초고압 분사압력이 실현되고 있다.

한편, 분사압력 동향에 의하면 향후 몇 년 후에는

분사압력은 240 MPa 이상의 극초고압이 될 것으로 예측되고 있으며, 분사압력은 점점 더 높아질 것으로 예상되고 있다.

분사압력의 초고압화에 따른 분무특성 연구는 대부분 분무거동, 분무도달거리, 분무각 등의 분무특성 해석에 국한되어 있다.¹⁻⁴⁾

분사압력의 극초고압화에 따른 분무거동, 분무도달거리 분무각 등의 제반 분무특성은 이⁵⁾ 등에 의해 연구된 바가 있으나 분사압력의 극초고압화에 따른 분무액적의 미립화 특성에 관한 해석은 전무한 상황이다. 연료 액적의 미립화 정도는 연소특성에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 그러므로 극초압영역에서의 미립화 특성에 관한 연구는 필수 불가결하다. 특히, 300 MPa 이상의 극초고압 영역에서

*To whom correspondence should be addressed.
dyjeong@mail.skku.edu

극초고압 영역에서의 미시적 분무특성을 해석하기 위하여 분무입경과 속도의 측정위치는 노즐 팁으로부터 분무 축 방향으로 60 mm, 90 mm, 120 mm, 반경방향으로 분무중심, 5 mm, 10 mm인 지점에서 측정을 하였다. 실험데이터는 수 백회 이상 데이터를 취득한 후 평균하였으며, 이 경우 valid data rate은 약 5,000 이상이었다. 분무는 축을 중심으로 서로 대칭임을 가정하였다.

3. 극초고압 자유분무의 미시적 분무특성

3.1 극초고압 분무양상

Fig. 4는 각 분사압력에 대한 분무양상을 시간의 경과에 대해 나타낸 것이다.

분사압력이 150~200 MPa인 경우 분사초기 분무액주의 모양은 곧고 매끈한 양상이며, 시간이 경과해도 분사압력이 낮은 경우의 분무액주의 흔들림은 거의 없는 것을 보이고 있다. 그러나 압력이 더욱 증가되면 분무액주는 흔들리기 시작하며 분사압력이 300 MPa 이상의 극초고압화됨에 따라 흔들림이 커지는 것을 나타내고 있다.

한편, 분사압력이 낮은 경우 분무 끝이 뾰족하고 반경방향으로 퍼져나가는 분무액적이 적지만 분사압력이 극초고압화됨에 따라 분무 끝이 무더지며, 분무외곽에 안개처럼 퍼져나가는 분무액적들이 증가하고 있다. 그러나 분사압력 280 MPa 이후에는 분무의 축방향 및 반경방향으로의 퍼짐은 미소하게

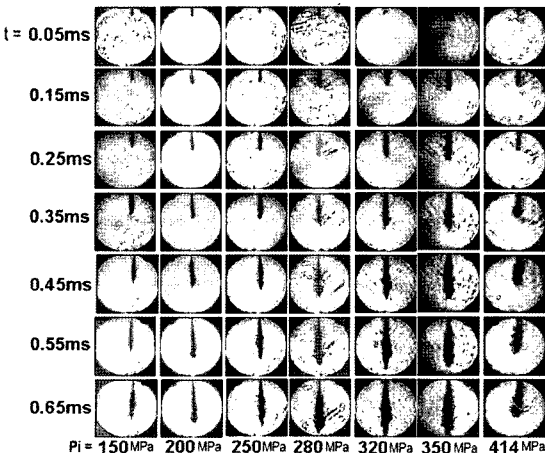


Fig. 4 Photograph of spray pattern

증가하며, 액주의 흔들림도 큰 차이가 없는 것을 보이고 있다.

분사압력 414 MPa에서는 축 방향으로의 분무퍼짐은 현저히 감소되는 양상을 나타낸다. 한편, 분사압력 280 MPa 이전에는 보이지 않았던 분무주위로 물결 모양의 파동이 형성됨을 보인다. 이는 분무선단속도가 음속 이상이 되어 발생하는 압력파로 생각된다. 압력파는 분무초기에 형성된 후 분무선단 보다 먼저 진행되고 있다. 이는 밀폐된 공간 내에서 극초고압으로 분사된 연료는 되돌아오는 충격파에 의해 실린더내의 공간분포 등에 영향을 받을 수 있다고 생각된다.

3.2 극초고압 분사 시 분무입경

Fig. 5는 분사압력의 극초고압화에 따른 분무입경을 나타낸 것이며, 노즐 팁으로부터 축 방향 60 mm 떨어진 축 중심에서 측정된 일례이다. 분무입경은 반복실험을 통해 평균값으로 나타내었다.

분사압력이 증가함에 따라 분무입경은 분사압력 증가에 따른 분무입자와 공기와의 상호작용 증가로 인해 전반적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 분사압력 280 MPa까지 분무입경의 감소 폭이 현저하며, 분사압력이 극초고압 영역인 280 MPa 이후에서는 감소가 완만해져 거의 일정한 값으로 수렴함을 볼 수 있다. 이것은 분사압력 280 MPa 이후 공기와 연료와의 상호작용 차이가 미미한데 의한 것으로 생각된다.

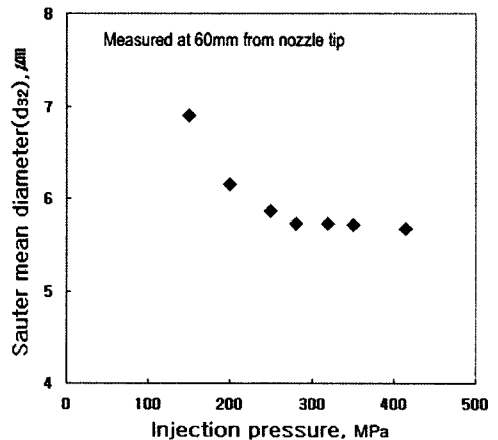


Fig. 5 Sauter mean diameter as a function of injection pressure at 60-0 mm

분사압력이 280 MPa까지 증가하는 경우 약 16.4 %의 분무입경의 감소를 보였으며, 이후 극초고압 영역에서의 증가에 대해서는 약 1.7 %의 미약한 감소를 나타내었다.

3.3 축방향에 대한 분무입경

Fig. 6은 분사압력 각각의 분사압력에 대한 축 중심에서의 분무성장에 따른 분무입경 변화를 나타낸 것이다.

분무입경은 모든 분사압력에 대해 노즐 팁에서 분무축방향으로 멀어질수록 전반적으로 작아지는 경향을 보이고 있다. 그리고 분사압력이 낮은 경우 노즐 팁으로부터 멀어질수록 분사압력이 증가함에 따라 분무입경의 감소 폭이 크며, 분사압력이 증가함에 따라 작게 나타나고 있고 극초고압 영역인 경우에는 큰 차이가 없음을 보이고 있다. 이는 연료분사 후 분무액적이 노즐 팁에서 멀어질수록 계속적인 공기와 연료와의 상호작용으로 인해 미립화가 이루어짐으로 인하여 분무입경이 작아지는 것으로 판단되며, 극초고압 영역에서는 분사압력에 의한 분사초기의 미립화에 의한 영향으로 인해 분무가 진행되더라도 분무입경이 크게 감소되지 않는 것으로 생각된다. 한편, 분사압력 414 MPa인 경우 분무가 성장함에 따라 분무입경이 오히려 약 2.4 % 정도 증가함을 보이고 있다.

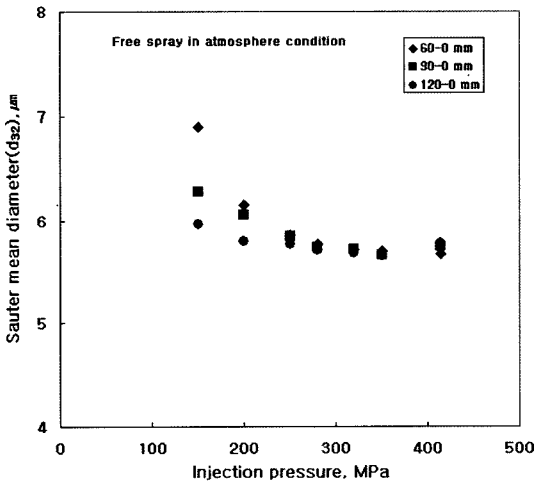


Fig. 6 Sauter mean diameter as a function of injection pressure at each position

3.4 반경방향에 대한 분무입경

Fig. 7은 각각의 분사압력에 대해 노즐 팁으로부터 120 mm 떨어진 지점에서의 분무반경방향의 분무성장에 따른 분무입경 변화를 나타낸 것이다.

분사압력이 증가함에 따라 분무입경은 작아지는 것을 보이고 있으며 경향은 반경방향의 모든 지점에서 동일하다. 그리고 각 지점에서 분사압력 280 MPa 이후 분무입경의 감소 폭은 완만해져 크게 변화하지 않음을 나타내고 있다. 그리고 분무반경방향으로 갈수록 분무액적의 크기는 모든 분사압력에 대해 감소함을 보이고 있다. 이는 분무반경방향으로 갈수록 공기와 연료액적과의 상호작용이 활발한 데 기인하는 것으로 판단된다. 그리고 분사압력이 극초고압화되는 경우 모든 지점에서의 분무입경의 감소율은 크게 작아짐을 보이며 일정한 크기로 수렴함을 보이고 있다. 한편, 분사압력 414 MPa에서의 분무입경은 모든 위치에서 오히려 증가함을 보이고 있다. 이러한 경향은 분무 축 중심으로 갈수록 증가 경향이 크게 나타나고 있다. 분무중심에서의 분무입경이 분무외피에 대해 약 4 % 정도 증가함을 보이고 있다.

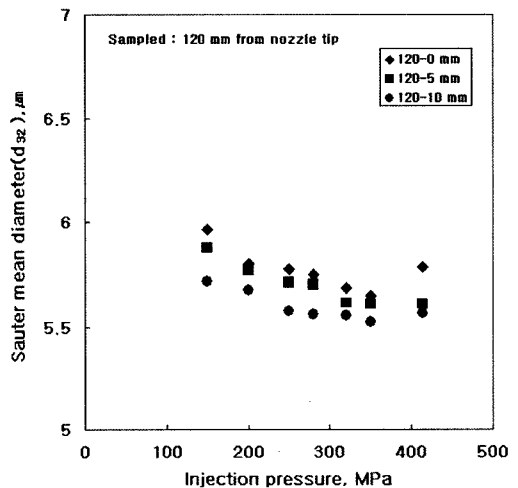


Fig. 7 Sauter mean diameter as a function of injection pressure

3.5 분무외피의 축방향 분무입경

Fig. 8은 분무외피의 축방향 성장에 따른 분무입경 변화를 나타낸 것이다.

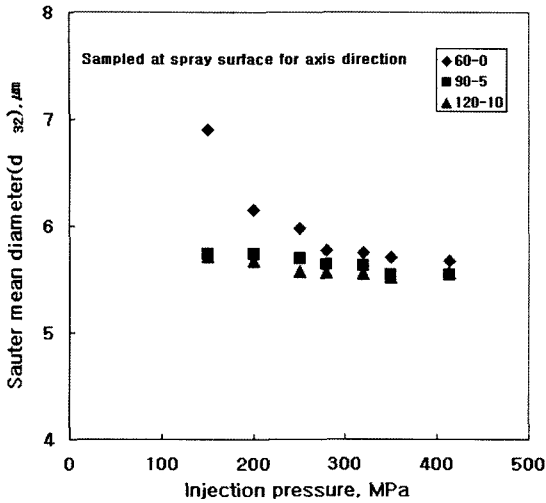


Fig. 8 Sauter mean diameter as a function of injection pressure

분사압력이 증가함에 따라 분무외피의 각 위치에서의 분무입경이 전반적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 분사 후 60-0 mm 지점에서의 분사압력 증가에 따른 분무입경의 감소 폭이 크며 90-5 mm, 120-10 mm 위치에 대해서는 분사압력이 극초고압화되더라도 분무입경의 감소 폭은 극히 미약함을 나타내고 있다. 따라서 분사압력의 극초고압화에 따른 분무외피에서의 분무입경의 변화는 분무초기에 두드러지며 분무가 성장할수록 분무입경은 분사압력에 의해 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

한편, 분사압력 414 MPa인 경우 분무외피의 축방향 성장에 따라 분사압력 3,500 bars에 비해 분무입경이 약간 증가하는 것을 나타내고 있다. 분사압력 280 MPa까지 분무입경은 약 7.5% 정도 감소하며 이후의 극초고압 영역에서의 감소는 약 1.1%로 극히 미약함을 보였으며, 분사압력이 414 MPa로 증가하는 경우 평균 약 0.01 μm 정도 증가함을 나타내었다.

3.6 액적속도

액적속도는 분사압력이 증가함에 따라 증가하여 280 MPa 정도에서 최대치를 나타낸 후 전반적으로 감소하는 경향이다. 액적속도의 감소는 분사압 400 MPa 전후에서 현저하며 414 MPa에서의 액적속도 크기는 150 MPa의 경우와 유사한 범위이다. 통상 액적속도는 분무가 진행함에 따라 감소하며, 이는 380 MPa 미만

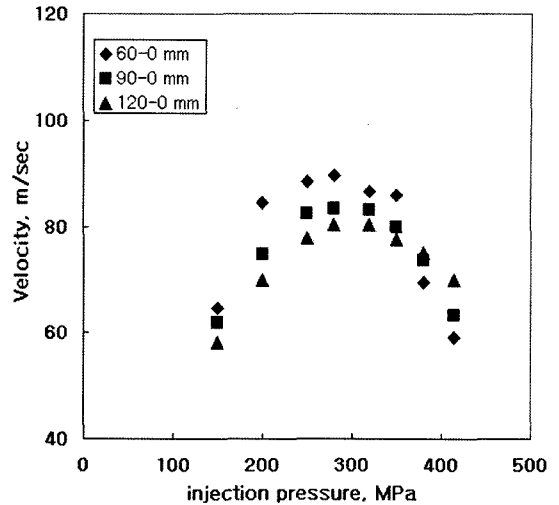


Fig. 9 Droplets velocity as a function of injection pressure at each position

의 분사압력의 경우에도 동일하다. 그러나 분사압력 380 MPa부터는 오히려 증가하는 특이한 현상을 나타낸다.

전술한 바와 같이 280 MPa 이상의 분무주위에는 충격파로 생각되는 물결모양의 파동이 발생된다. 이 파형은 414 MPa의 극초고압 분사 시 분무선단보다 앞으로 진행되는 것을 설명한 바 있다.

분무초기의 충격파에 의한 분무선단의 높은 압력은 분무액주의 속도를 감소시킬 수 있다. 또한 분무보다 앞서 진행되는 충격파에 의한 분무주위와 분무내부와의 낮은 압력구배는 분무가 성장함에 따라 액적속도를 증가시키는 영향으로 작용할 수 있다.

상기와 같은 충격파의 복합적인 상호작용에 의해 400 MPa 전후의 분무입경과 액적속도가 통상의 경우와 다르게 나타나는 것이라 생각된다. 그러나 이에 관련된 것은 미지이므로 추후 충격파와 분무성장과의 상관관계 등에 관한 해석이 필요한 것으로 생각된다.

4. 결론

분사압력의 극초고압화에 따른 자유분무의 미시적 분무특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분무 축 방향 및 반경 방향으로의 분무퍼짐은 분

사압력이 극초고압화됨에 따라 증가하는 것을 보였다. 분사압력 280 MPa까지 현저하며 이후 증가가 완만함을 나타낸 후 분사압력 414 MPa에서 축방향의 분무퍼짐은 급격히 감소함을 나타내었다.

- 2) 분사압력 280 MPa 이상에서는 분무선단속도가 음속 이상이 되어 분무주위에 물결모양의 충격파가 발생됨을 보였으며, 충격파는 분무선단보다 빠르게 진행하며 밀폐된 공간에서는 벽면에 충돌하여 되돌아오는 충격파가 분무특성에 영향을 미칠 것을 예측할 수 있었다.
- 3) 분사압력이 극초고압화됨에 따라 분무 액적의 크기는 감소하나 분사압력 280 MPa 이후의 극초고압 영역에서의 분무입경은 큰 차이가 없으며 일정한 값으로 수렴함을 나타내었다.
- 4) 분무 축 방향의 분무성장에 따른 분무입경의 변화는 분사압력이 낮은 경우에는 큰 차이를 보였으나 분사압력이 극초고압인 경우 별 차이가 없음을 보였으며, 414 MPa에서는 오히려 약간 증가함을 알 수 있었다.
- 5) 분무외피에서의 축 방향 분무성장에 따른 분무입경 변화는 분사압력이 낮은 경우에는 크게 감소하나 분사압력이 극초고압인 경우 감소 폭이 완만하며 분무입경이 큰 차이가 없음을 나타내었고 분무가 어느 정도 성장하면 분무입경은 분사압력에 의해 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.
- 6) 액적의 속도는 분사압력이 증가함에 따라 증가하다가 감소함을 보였으며, 분사압력 380 MPa 이

후에서는 분무가 성장함에 따라 통상의 경우와 반대의 경향이 나타남을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2001-00386(2003))지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- 1) Tomohisa, S. Takagishi, J. Senda and H. Hujimoto, "Effect of Ambient Gas Properties for Characteristics of Non-Reacting Diesel Fuel Spray," SAE 970352, 1997.
- 2) L. Araneo, A. Coghe, G. Brunello and G. E. Cossali, "Experimental Investigation of Gas Density Effects on Diesel Spray Penetration and Entrainment," SAE 1999-01-0525, 1999.
- 3) T. Kato, K. Tsujimura, M. Shintani, T. Minami, and I. Yamaguchi, "Spray Characteristics and Combustion Improvement of D.I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection," SAE 890265, 1989.
- 4) K. Nishida, H. Ochiai, M. Arai and H. Hiroyasu, "Characterization of Diesel Fuel Spray by Ultra High Pressure Injection," JSME, Vol.63, No.605, pp.344-349, 1997.
- 5) D. Y. Jeong and J. T. Lee, "A Development of Ultra High Pressure Injection Equipment for Study on Diesel Spray Characteristics with Ultra High Pressure," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.50-59, 2003.