

디젤 분무의 분무 형태와 입경 분포에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Spray Pattern and Droplet Size Distribution of Diesel Spray

지 요 한*, 이 종 화**, 김 응 서***
Y. H. Chi J. H. Lee E. S. Kim

ABSTRACT

To clarify the structure of a diesel spray, a transient non-evaporating diesel spray injected under different ambient pressure and different injection pressure was studied.

Spray tip penetration and spray angle were measured by taking the high speed shadowgraph of spray and Sauter mean Diameter(SMD) was also measured by light scattering technique at different positions along the spray axis and at different time from the start of injection.

The effects of the operating parameters on the spray shape and SMD were investigated. By increasing the injection pressure, the spray tip penetration and the spray angle increased and the change of the ambient pressure also resulted in the considerable change in the shape of the spray.

The analysis of SMD measurement showed that the atomization is a process that continues in space and time. As the injection pressure increases SMD decreases rapidly and with the increase of the ambient pressure the atomization process ends faster than the lower ambient pressure and at lower ambient pressure the atomization process continues to much farther downstream and far afterward.

1. 서 론

디젤 기관에서 노즐을 통하여 분사된 연료의 분무 형태와 무화(atomisation)의 특성은 연소 과정에 큰 영향을 미치는 공기와 연료의 혼합 과정을 지배하는 중요한 인자가 되며, 결과적으로는 기관의 출력과 배출물에 큰 영향을 주게 되므로 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

분무 형태를 나타내는 인자로는 분무 선단 침투 거리(spray tip penetration)와 분무 각(spray angle)이 있으며, 이들을 측정하고 예측하기 위한 많은 실험적, 이론적 연구가 이루어져 왔고, 이들에 영향을 미치는 제반 운전 조건에 따른 변화 특성에 대한 연구도 수행되어 왔다.¹⁻⁴⁾

한편, 디젤 분무의 내부 구조에 대한 연구를 실험적으로 수행하고자 하는 관점에서 직

* 정희원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

** 정희원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

*** 정희원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

면하게 되는 문제점은 분무 현상 자체가 비정상 (unsteady) 적이며, 분무의 내부 구조가 고속 (수십~수백 m/s) 으로 움직이는 아주 많은 수의 아주 작은 (수~수십 μm) 입자들로 구성되어 있다는 것이다. Hiroyasu와 Arai⁵⁾ 등은 광 산란법을 사용하여 정상 상태 (steady) 의 분무에 대한 SMD를 측정하였으며, Reitz와 Diwakar⁶⁾ 등은 정상 상태 분무의 입경 분포에 대한 수치적 해석을 시도한 바 있다. 또한, 비정상 상태 분무의 입경 분포를 측정하는 연구가 이루어지고 있는데, Bracco⁷⁾ 등은 순간 점등 광원을 사용한 사진 촬영을 통하여 분무의 SMD와 입경 분포를 측정하였으며, Kamimoto⁸⁾와 Alloca⁹⁾ 등은 light extinction 방법을 사용하여 비정상 분무의 분무 단면에 걸친 SMD를 측정하였다.

본 연구에서는 비정상 분무의 형태를 관찰하기 위하여 고속 카메라를 사용하여 분무의 속도우그래프를 촬영함으로써 분무 선단의 거리와 분무각 등을 측정하였으며, 광 산란법^{10,11)}을 사용하여 노즐 출구로부터의 축방향 거리 및 분사 시작으로부터의 시간 경과에 따른 분무 입경을 측정하고, 분사 압력 및 주위 공기의 압력 변화에 따른 분무 형태 및 SMD의 변화 등을 관찰하여 비정상 분무의 분무 및 무화 특성을 이해하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 연료 분사 장치는 분사 펌프, 분사 노즐, 분사 노즐 제어용 솔레노이드와 그 구동 회로로 구성되며, 분사 압력을 임의로 조절하며, 또, 분사 지속 기간중에 분사 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 분사 펌프로 기존의 디젤 기관용 분사 펌프 대신 압축 공기로 구동되는 공압 펌프 (air driven pump)를 사용하고, 축압기 (accumulator)를 설치하여 분사 압력의 급격한 변화를 방지하며, 축압기에 설치된 압력 조절장치로 분사 압력을 조절할 수 있도록 하였다.

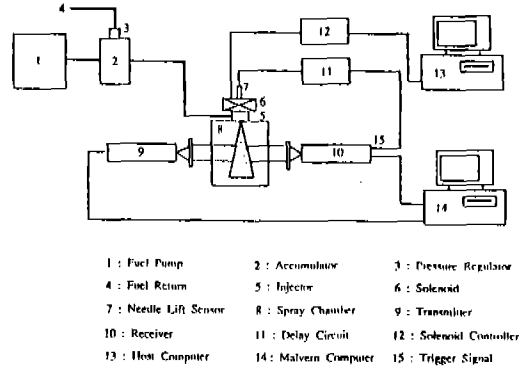
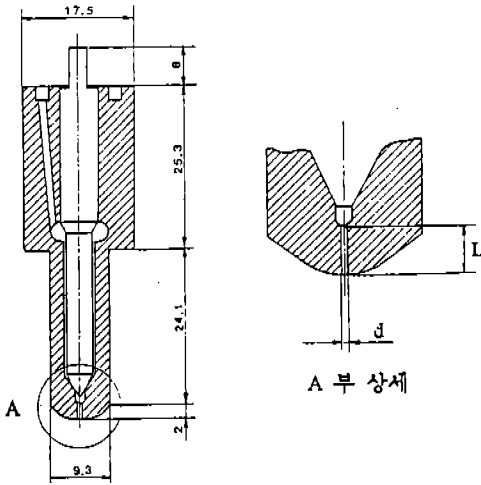


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

분무실 (spray chamber)은 연료 분사시의 주위 기체 조건을 기관의 압축조건과 유사한 상태로 만들 수 있도록 고압 용기로 만든 것으로 실험 체적은 지름 130mm, 길이 100mm의 원통형이며, 그 양단에는 분무의 사진 촬영 및 분무 입경의 측정을 위하여 지름 150mm, 두께 50mm의 석영판으로 제작된 관측창을 부착하였다. 분무실 내에서 연료를 분사시키던 분무실의 바닥에서 튀 연료의 일부가 관측창에 부착되며, 일부는 분무실 내에 미세한 액적의 상태로 부유하게 되어 (fogging) 반복 실험이 불가능하게 된다. 이를 방지하기 위하여 분무실 바닥에 실리콘 오일 베드를 설치하여 분사된 연료를 포집하도록 하였으며, 그 위쪽에 허니콤을 설치하여 비교적 큰 액적들이 관측창 쪽으로 비산되는 것을 방지하였다. 미세한 액적들이 분무실 내부에서 부유하는 것을 방지하기 위하여 분무실 내의 압력을 일정하게 유지하면서 분무 형태에 영향을 주지 않을 만큼의 미량의 질소 가스를 계속 흐르게 하여 미세한 액적들이 이 질소 가스와 함께 배출되도록 하였다. 또한, 빔 가이드를 설치하여 액적들이 관측창에 부착되는 것을 최대한 방지하였다.

Fig.2는 실험에 사용된 분사 노즐을 나타낸 것으로 분공의 지름은 0.2mm ($L/d = 4$)이며, Fig. 3은 솔레노이드를 사용하여 분사를 제어할 수 있도록 개조한 분사 노즐과 노즐 홀더의 단면도를 나타낸 것이다.



Injector Nozzle

Fig. 2 Shape of Injection nozzle and magnified view of nozzle orifice

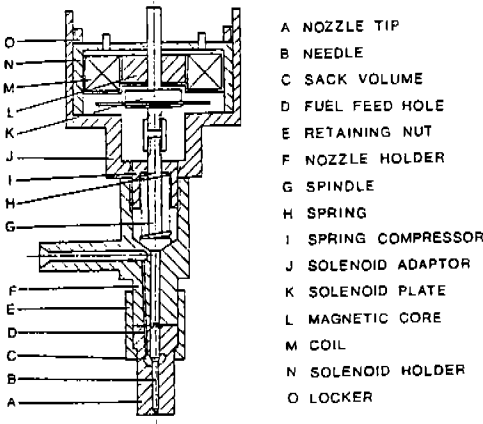


Fig. 3 Sectional view of modified nozzle controlled by solenoid

Table 1 Experimental test matrix

Nozzle Hole Diameter	0.2 mm ($L/d = 4$)
Injection Pressure	10, 20, 30, 40 MPa
Ambient Pressure	N_2 0.1 MPa ($\rho_a = 1.16 \text{ kg/m}^3$) N_2 1.0 MPa ($\rho_a = 11.6 \text{ kg/m}^3$) N_2 2.0 MPa ($\rho_a = 23.2 \text{ kg/m}^3$)
Measuring Point	2, 3, 4 cm downstream of nozzle exit
Measuring Time	from arrival of spray to 5.0 ms

Table 2 Typical properties of diesel fuel

Properties of Diesel Fuel		
Energy Density	41.88	MJ / kg
Density	840	kg / m ³
Modulus of Elasticity	1.6×10^8	N / m ²
Kinematic Viscosity	2.3×10^{-6}	m ² / s
Surface Tension	0.0285	N / m

분무 형태의 관찰을 위하여 고속 카메라를 사용하여 분무의 새도우그래프 (5000 frame/s)를 촬영하여 분무 선단 거리와 분무각 등을 측정하였다. 분무 입경은 분무의 축을 따라 노즐 출구로부터 각각 2, 3, 4 cm 하류의 세 위치에서 측정하였으며, 분무 시작으로부터의 시간 경과에 따른 변화를 측정하였다. Table 1은 본 연구에서의 실험 조건을 나타낸 것이다.

분사 액체로는 표준 디젤 오일을 사용하였으며, 그 특성을 Table 2에 나타내었다.

3. 실험결과 및 검토

Fig. 4는 주위 기체 압력이 2.0 MPa 이고 분사 압력을 각각 10 MPa (a), 40 MPa(b)로 하였을 때 분무의 새도우그래프를 촬영한 결과를 나타낸 것이다. 분사 압력의 증가에 따라 분무 선단 거리와 분무각 등이 큰 차이를 나타냄을 알 수 있으며, 분사 압력이 증가함에 따라 분무 선단 거리와 분무각이 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 분무가 하류로 진행해 나감에 따라 나뭇가지 형태의 수형 구조 (branch-like structure)가 나타나는데, 이러한 수형 구조의 생성 원인에 대해서는 Nishida¹²⁾ 등이 실험적으로 밝힌 바 있다.

Fig. 5는 분무 선단 침투 거리를 로그 그래프 상에 나타낸 것으로 분사압력을 40 MPa로 하였을 경우 분사 압력 10 MPa에 비해 전 영역에서 분무 선단 거리가 큰 것을 알 수 있다. 또, 두 경우 모두 분무가 진행에 나감에 따라 분무 시작으로부터 약 0.8~1.0 ms 인 점을 중심으로 그 이전의 기울기가 약 1인 직선과 그 이후의 기울기가 약 0.5인 직

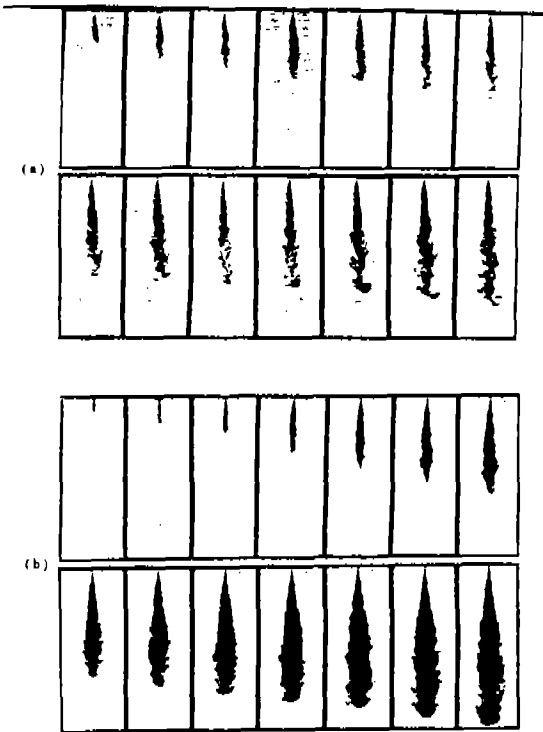


Fig. 4 Shadowgraph of spray injected into nitrogen at 2.0 MPa from the nozzle of 0.2 mm diameter with the injection pressure of (a) 10 MPa and (b) 40 MPa

선이 교차함을 알 수 있는데, 이는 Hiroyasu⁴⁾ 등이 행한 분무의 분산 과정을 밝힌 실험과 일치하는 경향을 나타낸다. Fig. 6는 분무각을 나타낸 것으로 분사 압력이 증가함에 따라 분무각이 커지는 결과를 보인다.

Fig. 7은 분무의 재현성을 평가하기 위하여 분사 압력을 10 MPa, 주위 기체 압력을 1.0 MPa로 하였을 때 노즐 하류 3 cm에서 측정 한 SMD 실험값의 평균값에 대한 최대값과 최소값을 에러바의 형태로 표시한 것이다. 이로부터 알 수 있듯이 분무 초기에 분무의 길이가 짧고 액적의 수밀도가 높은 경우가 분무 후기에 비해 개개 분무의 재현성이 떨어짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 분사 압력이 10 MPa 이고 주위 기체 압력이 0.1 MPa 일 때, 노즐 출구로부터 각각 2, 3, 4 cm 하류에서 측정 한 SMD와 AMD(arithmetic mean diameter) 값을 분

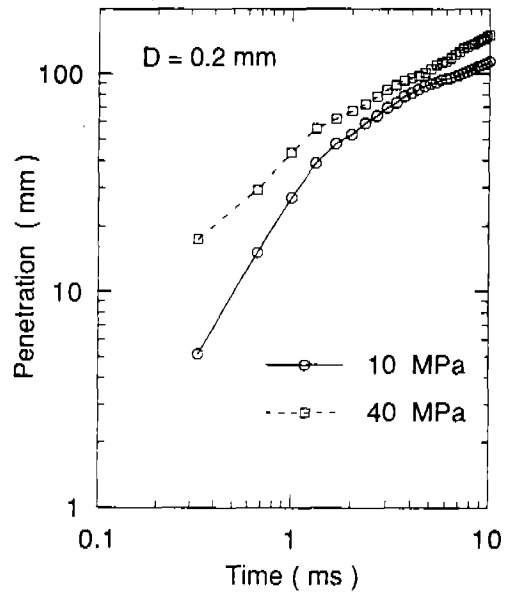


Fig. 5 Logarithmic spray tip penetration injected into nitrogen at 2.0 MPa with the injection pressures of 10 and 40 MPa plotted against time in logarithmic scale

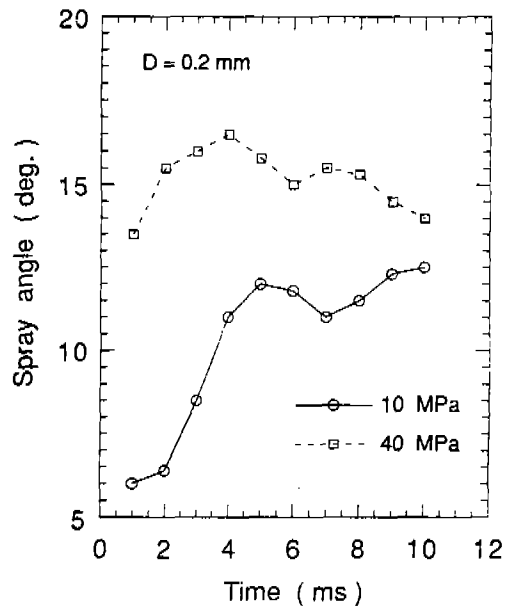


Fig. 6 Spray angle injected into nitrogen at 2.0 MPa with the injection pressures of 10 and 40 MPa plotted against time

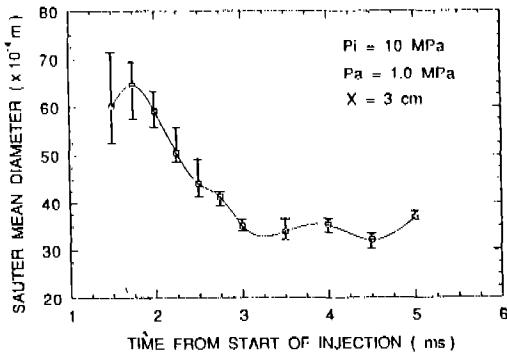


Fig. 7 Estimation of SMD errors at 3 cm downstream of nozzle injected into nitrogen at 1.0 MPa with the injection pressure of 10 MPa

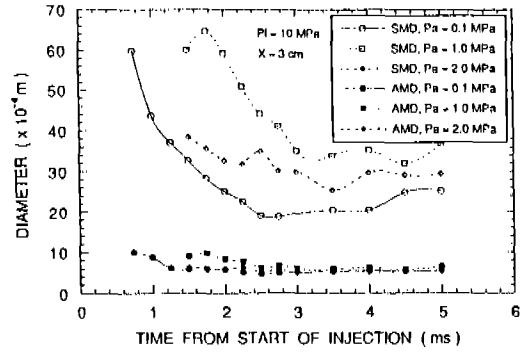


Fig. 10 SMD and AMD at 3 cm downstream of nozzle injected into nitrogen at 0.1, 1.0, and 2.0 MPa with the injection pressure of 10 MPa plotted against time from the start of injection

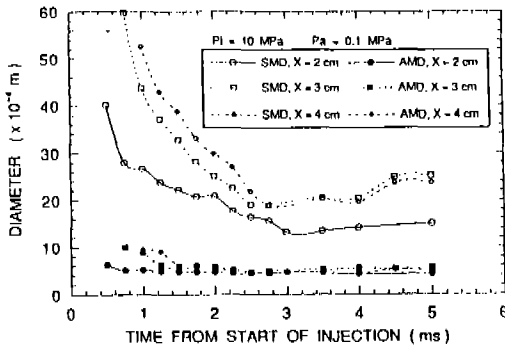


Fig. 8 SMD and AMD at 2, 3, and 4 cm downstream of nozzle injected into nitrogen at 0.1 MPa with the injection pressure of 10 MPa plotted against time from the start of injection

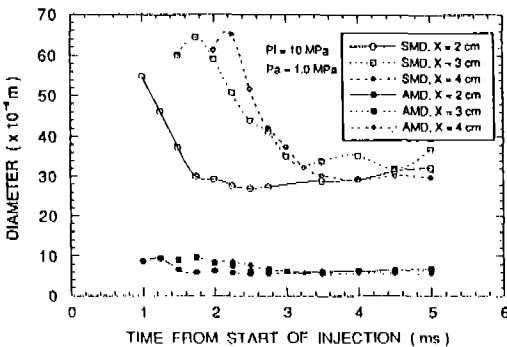


Fig. 9 SMD and AMD at 2, 3, and 4 cm downstream of nozzle injected into nitrogen at 1.0 MPa with the injection pressure of 10 MPa plotted against time from the start of injection

사 시작으로부터의 경과시간에 대해 나타낸 것이다. 각 측정위치에서의 SMD는 시간이 경과함에 따라 점점 감소하다가 비교적 일정한 값을 유지하게 되는데, 이는 고속으로 분사된 액체 분무의 무화 과정은 노즐 출구로부터 나온 직후에 종료되는 것이 아니고 시간의 경과와 함께 계속적으로 진행되는 현상임을 의미하며, 분무의 속도가 존재하는 액적의 크기에 대한 한계 속도까지 감소하거나, 또는 액적들의 크기가 한계값까지 작아졌을 때 무화 과정은 더 이상 진행되지 않고 준 평형 상태 (quasi-steady state)에 도달하게 됨을 알 수 있다. 또, 하류로 갈수록 SMD 값은 전체적으로 증가하는 경향을 보이는데, 이는 10 MPa의 분사 압력의 경우에는 하류로 내려갈수록 분무의 속도가 급격히 감소하여 액적들끼리의 결합(coalescence)이 분산(breakup)에 비해 지배적이 되기 때문이다.

Fig. 9은 분사 압력이 10 MPa이고 주위 기체 압력이 1.0 MPa 일 때의 결과를 나타낸 것으로 앞서와 유사한 경향을 보이나, 준 평형 상태에 도달했을 때의 SMD 값이 앞서의 경우보다 전반적으로 커지는 경향을 나타냈는데, 이는 주위 기체 압력의 증가에 따른 분무의 진행 속도의 감소에 그 원인이 있는 것으로 보인다.

Fig. 10은 주위 기체 압력의 변화가 분무의

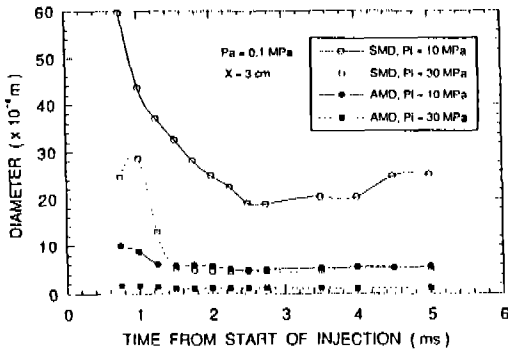


Fig.11 SMD and AMD at 4cm downstream of nozzle injected into nitrogen at 0.1MPa with the injection pressure of 30 MPa plotted against time from the start of injection

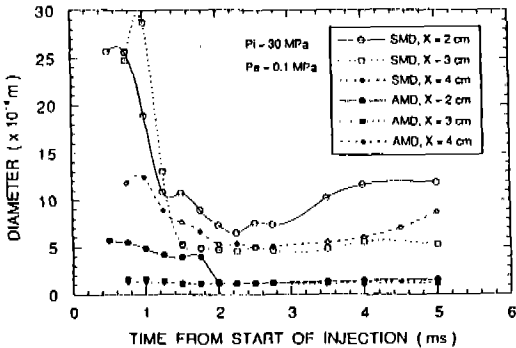


Fig.12 SMD and AMD at 3cm downstream of nozzle injected into nitrogen at 0.1MPa with the injection pressures of 10 and 30 MPa plotted against time from the start of injection

입경 분포에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 분사 압력을 10MPa로 하고 주위 기체의 압력을 각각 0.1, 1.0, 2.0MPa로 변화시켰을 때, 노즐 출구로부터 3cm 하류에서의 SMD와 AMD 값을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 주위 기체 압력이 0.1MPa에서 1.0MPa로 증가하였을 때 SMD 값은 전체적으로 증가하나 기체 압력이 2.0MPa로 증가하면 SMD 값은 오히려 감소하는 결과를 나타낸다. 이는 임계 Weber 수의 관점에서 볼 때, 주위 기체 압력의 증가에 따른 속도의 감소보다 기체 밀도의 증가에 따른 상호 작용의 증가가 무화를 촉진시키는 역할을 함으로써 나타난 결과

로 생각된다.

Fig.11은 분사 압력을 30MPa, 기체 압력을 0.1MPa로 하였을 때를 나타낸 것으로 Fig.8과 비슷한 경향을 보이나 준 평형상태에 도달하는 시간이 분사압 10MPa의 경우에 비해 짧고, 준 평형 상태에서의 SMD 값도 더 작아지는 결과를 보인다.

Fig.12는 분사 압력이 무화 과정에 미치는 영향을 보기 위하여 주위 공기 압력을 0.1MPa로 하고 분사 압력을 각각 10MPa과 30MPa로 하였을 때 노즐 출구로부터 3cm 하류에서의 측정값을 나타낸 것으로 분사 압력이 커짐에 따라 무화가 촉진되어 SMD 값이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

디젤 분무의 분무 형태를 관찰하기 위하여 분무의 새도우그래프를 촬영하고, 광 산란법에 의한 분무의 입경 측정을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분무 선단 거리와 분무각 등은 분무 압력과 주위 기체의 상태에 크게 영향을 받으며, 분무 선단 거리와 분무각은 분사 압력이 증가함에 따라 커진다.

(2) 분무 선단 거리를 로그 그래프 상에 도시하면, 천이점이 존재함을 알 수 있으며, 이 점은 분무의 형태가 액체 분류(intact core)에서 액적들의 형태로 무화되는 점을 나타낸다.

(3) 분무의 무화 과정은 분사 액체가 노즐로부터 분출됨과 동시에 종료되는 현상이 아니고, 시간적 공간적으로 계속적으로 진행되는 현상이다.

(4) 분무의 SMD 값은 분무 시작으로부터의 시간의 경과에 따라 감소하다가 비교적 일정한 값을 가지는 준 평형 상태에 도달하게 되는데, 이 상황은 분무의 속도와 존재하는 액적들의 크기와 관계가 임계 Weber 수에 도달했음을 의미한다.

(5) 분사 압력이 10MPa인 경우 노즐로부터 하류로 갈수록 SMD 값은 증가하는 경향

을 보이는데, 이는 하류로 내려갈수록 분무의 속도가 급격히 감소되어 액적들끼리의 결합이 분산에 비해 지배적이 되기 때문이다.

(6) 분사 압력이 커지면 분무의 속도 증가에 따른 무화가 촉진되어 낮은 분사 압력에 비해 준평형상태에 빨리 도달하며, SMD 값도 작아진다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다. 또한, 실험 장치의 제작과 실험에 도움을 주신 한국 디젤 공업과 해사 기술 연구소의 관계자 제위께도 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. I. Hakki. Oz. "Calculation of Spray Penetration in Diesel Engines," *SAE Paper*, 690254, 1969.
2. Keshav S. Varda and Daniel M. Popa, "Diesel Fuel Spray at High Injection Pressure," *SAE Paper*, 830448, 1983.
3. F. V. Bracco, "Modelling of Engine Sprays," *SAE Paper*, 850394, 1985.
4. H. Hiroyasu and T. Kadota, "Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber," *SAE Paper*, 740715, 1974.
5. H. Hiroyasu, M. Arai, M. Tabata, and M. Shimizu, "Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle," *SAE Paper*, 840275, 1984.
6. R.D. Reitz and R. Diwakar, "Structure of High-Pressure Fuel Sprays," *SAE Paper*, 870598, 1987.
7. K.J. Wu, R.D. Reitz, and F.V. Bracco, "Measurements of Drop Size at the Spray Edge Near the Nozzle in Atomizing Liquid Jets," *Phys. Fluids*, vol. 29, No.4, 1986.
8. Takeyuki Kamimoto, Haruyki Yokota, and Haruki Kobayashi, "A New Technique for Measurement of Sauter Mean Diameter of Droplets in Unsteady Dense Sprays," *SAE Paper*, 890316, 1989.
9. Luigi Allocca, Paolo Belardini, Claudio Bertoli, and Felice E. Corcione, "Experimental and Numerical Analysis of a Diesel Spray," *SAE Paper*, 920576, 1992.
10. P. Meyer and N. Chigier, "Droplet Measurement Using a Malvern 2200 Particle Sizer," *Atomisation and Spray Technology*, vol.2, pp. 261-298, 1986.
11. Reference Manual, Malvern Instruments.
12. Masahiko Nishida, Toshio Nakahira, Masanori Komori, and Kinji Tsujimura, "Observation of High Pressure Fuel Spray with Laser Light Sheet Method," *SAE Paper*, 920459, 1992.