

<논 문> SAE NO. 97370119

디젤노즐의 분무 거동에 관한 연구

A Study on Spray Distribution of Diesel Nozzles

송 규 근*, 오 영 택*, 안 진 근**, 김 강 출***
K. K. Song, Y. T. Oh, J. G. An, G. C. Kim

ABSTRACT

A diesel engine is one of the major prime movers owing to its high thermal efficiency. But due to the recent attention for the environmental pollution, the emissions of diesel engine became a important problem. So it is needed to understand the characteristics of diesel spray injected into a combustion chamber. Because the diesel combustion is strongly controlled by a fuel spray injected into a combustion chamber.

This study provides the informations for the diesel spray with the atmosphere condition in combustion chamber by PMAS. As the results, the spray tip penetration and angle is increased with the increase of spray pressure and nozzle diameter. And the comparisons between the measured outline of the free-spray and the calculated model have been conducted and obtained the reasonable results.

주요기술용어 : Diesel Engine(디젤기관), Diesel Spray(디젤분무), Combustion Chamber(연소실), Spray pressure(분사압력), Nozzle diameter(노즐직경), Spray tip penetration(분무도달거리)

1. 서 론

디젤기관은 다른 열기관에 비해 높은 열효율을 가지고 있을 뿐만 아니라 내구성, 신뢰성도 탁월하여 미국 및 일본 등의 선진국에서도 연구가 활발하다.

디젤기관에 대한 지금까지의 연구는 엔진의 성능 향상과 효율 향상이 주된 관심사였다.^{1)~2)}

하지만, 최근에는 산성비, 스모그 현상, 지구온난화 등에 의한 환경 파괴에 대한 의식의 고조와 쾌적한 생활 환경에 대한 욕구가 점점 증가하면서 성능향상은 물론이고, 배기 가스에 대한 연구도 주요 과제로 대두되고 있다.³⁾

디젤 기관은 다른 내연기관에 비해 열효율이 매우 높고 여러 연료를 사용할 수 있는 장점이 있지만, NOx, Particulate 등의 배기 가스가 가

*정회원, 전북대학교 자동차신기술연구소

**정회원, 한국전력

***정회원, 한국에너지기술연구소

장 큰 문제점으로 대두되고 있으며, 디젤 기관의 연소는 매우 복잡하여 현재까지도 정확한 메카니즘이 규명되지 못한 실정이다.

디젤 기관의 연소는 연소실 내에 분사된 연료 분무의 상태에 따라 크게 의존하기 때문에, 유해 배출물 저감 및 고효율의 엔진을 개발하기 위해서는 이에 크게 영향을 미치는 혼합기 형성 과정에 대한 정확한 기초 지식이 확립되어야 한다.^(4~8)

Hiroyasu는 이러한 분무과정이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 밝히기 위해 고온 고압용기에서의 분무특성을 연구하였다.⁹⁾

본 논문에서는 디젤 분무의 형성에 크게 영향을 미칠 것으로 판단되는 분사 압력, 노즐 직경의 변화에 대한 분무 특성을 고찰하였으며, 또한 실험 데이터를 바탕으로 디젤분무의 형성 과정을 컴퓨터를 이용하여 기초적인 시뮬레이션을 시도하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 실험장치 부분은 크게 분사 장치, 촬영 장치, 분무 입자의 크기 측정 장치로 나눌 수 있다.

2.1 분사 시스템

상온, 대기압 상태에서 노즐의 직경과 분사 압력의 변화에 따른 분무 특성의 변화를 관찰하기 위해서 Fig.1과 같은 분사 장치를 만들었다. 인젝션 펌프(⑥, Type VE)는 전동모터(②, DC 5마력)에 의해 구동되며, 모터의 회전 속도는 RPM 조절 장치(①)에 의해 설정된 회전수로 항상 일정하게 회전되면서 노즐(KP-DNOSD193)을 통해 연료를 분사한다.

2.2 분무 촬영 시스템

Fig.2 촬영 시스템의 개략도에서 보이는 것처럼, 시간에 따른 분무 도달거리 및 분무각을 측정하기 위해 고속 카메라(Dynafax Model 350, ①)와 광원으로는 스트로보(CORDIN, Model359) 그리고 포토센서를 사용하여 동기시켜 사용하였다. 이때 촬영시간은 0.2ms 간격으

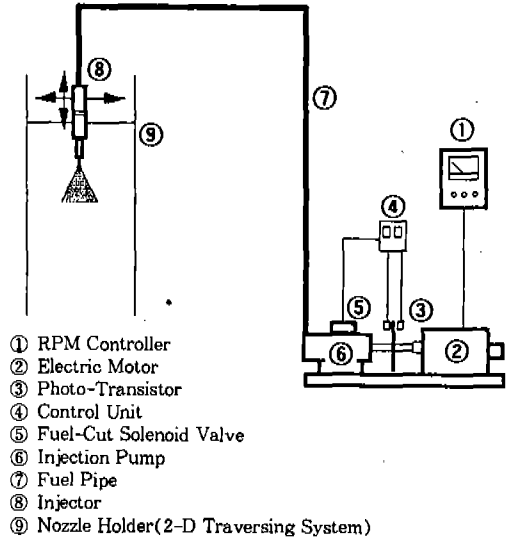


Fig.1 Schematic Diagram of Injection System

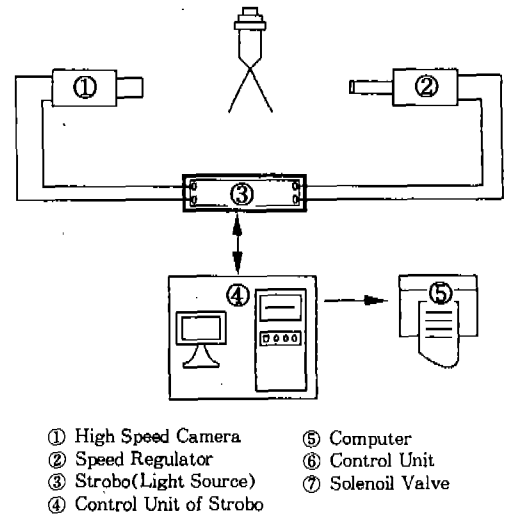


Fig.2 Photographing System

로 분무 변화 상태를 관찰하였다.

2.3 분무입자의 크기 측정 시스템

분무입자의 크기를 측정하기 위해서 PMAS (Particle Motion Analysis System)를 사용하였다. PMAS는 광 지속 기간이 50ns인 광원과 CCD카메라, 렌즈, 필터, 화상을 기록하기 위한

Frame Grabber, 4-채널 콘트롤 보드 및 PC 등으로 이루어져 있다. Fig.3에 PMAS의 구성도를 보인다.

3. 실험결과 및 고찰

디젤분무 특성을 나타내는 것으로 분열길이, 분무도달거리, 분무각, SMD분포 등을 들 수 있다. Fig.4에 디젤분무의 일반적인 형태를 나타내었다.

3.1 분무 특성에 미치는 분사압력의 영향

본 실험에서는 분사 압력이 변함에 따라 분무 특성이 어떻게 변화되는지를 관찰하기 위해서 분사 압력을 6, 10, 14MPa로 설정하고, 그 때의 분무 도달거리, 분무각, SMD 등을 측정하였다.

3.1.1 분무 도달거리의 변화

Fig.5는 노즐의 직경이 1.03mm이고 분사 압력이 6MPa인 경우에 고속 카메라로 촬영한 후에 컴퓨터로 영상 처리한 그림이다. Fig.6은 분사 압력을 14MPa인 경우의 분무사진이다.

두 경우의 사진을 비교하면 분사압력이 6MPa인 경우의 사진에서는 거의 선형적으로 분무선단의 도달거리가 증가하는 것을 볼 수 있으며 분무의 전체적인 농도 또한 진한 것을 볼 수 있다. 이

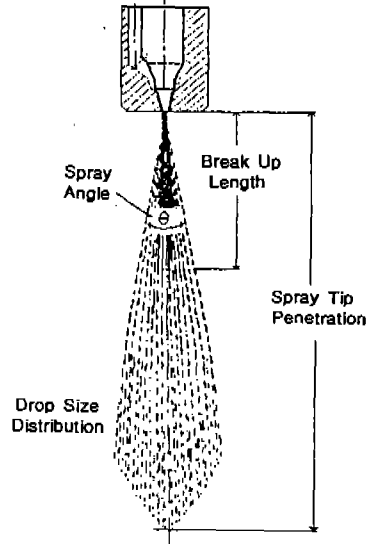


Fig.4 Parameters of Spray Characteristics

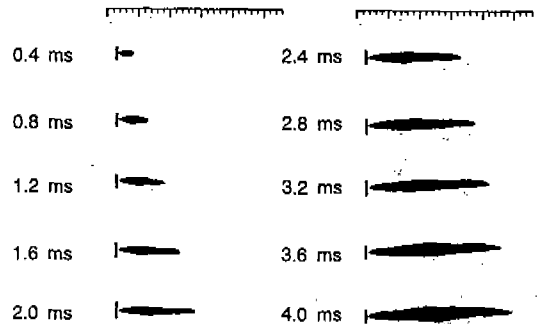


Fig.5 Photographs of Spray Tip Penetration ($d_0 = 1.03\text{mm}$, $P_{inj} = 6\text{MPa}$, $N = 500\text{rpm}$)

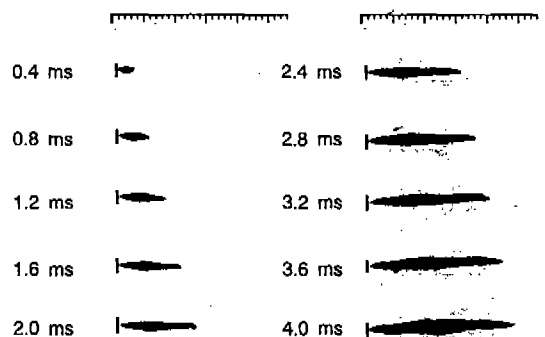


Fig.6 Photographs of Spray Tip Penetration ($d_0 = 1.03\text{mm}$, $P_{inj} = 14\text{MPa}$, $N = 500\text{rpm}$)

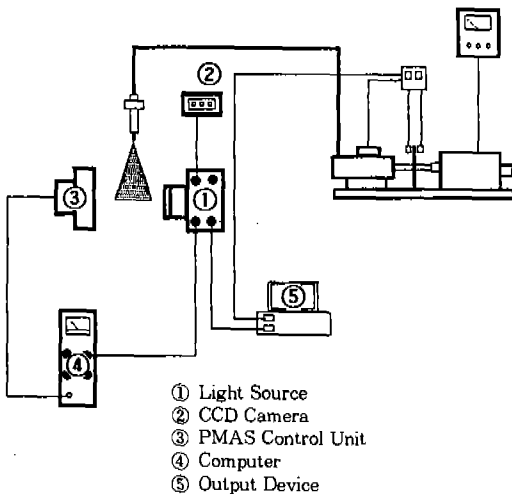


Fig.3 Schematic Diagram of the PMAS

로부터 6MPa인 경우는 분열이 일어나지 않고, 활영한계거리(노즐팁으로부터 30cm)까지 분무가 도달한다고 생각할 수 있다. 그러나 14MPa인 경우의 사진을 보면 어느 정도 시간이 지난 후에는 분무의 도달 속도도 감소하고, 전체적인 분무의 형태도 액주 주변에 농도가 옅은 영역이 상당히 넓게 분포하고 있어, 분사압력이 14MPa인 경우에 있어서는 6MPa인 경우보다 먼저 분열이 일어나고, 분무의 미립화가 활발하게 이루어지는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 노즐 직경이 1.03mm인 경우에 분사 압력을 6, 10, 14MPa로 변화시켜가면서 분사 압력에 따른 도달거리의 변화를 비교한 것이다.

그림에서 알 수 있는 것처럼 분사 압력이 증가함에 따라 분무 도달거리가 증가하고, 시간과 분무 도달거리의 관계는 거의 선형적인 형태로 나타내고 있으나, 압력이 높은 경우에는 어느 정도 시간이 지난 후에 기울기 값이 작아지면서 선형적으로 변화되는 경향을 보이고 있다. 이것은 압력이 높아짐에 따라 분열이 빨리 일어나 어느 시간 후에는 분무도달거리의 증가율이 미립화로 인해 감소된다고 생각된다.

3.1.2 분무각(Spray Angle)의 변화

Fig.8에서는 분사 압력이 6, 10, 14MPa일 때, 노즐 직경이 1.03mm인 경우 분무각의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수

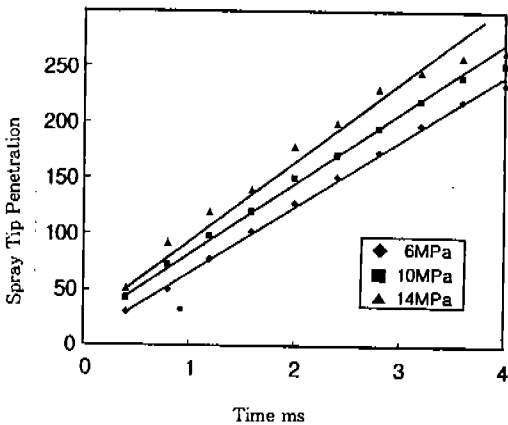


Fig.7 Spray Tip Penetration ($d_0=1.03\text{mm}$, $N=500\text{rpm}$)

있듯이 분무각은 분무 압력이 높아짐에 따라 커지고 있음을 알 수 있다.

3.1.3 SMD에 미치는 분사 압력의 영향

Fig.9는 분무 액적의 크기를 측정하기 위하여 PMAS(Particle Motion Analysis System)로 분무의 모습을 촬영한 후에 이미지 프로세싱(Image Processing) 프로그램에 의해 액적의 경계를 찾아 액적의 크기를 나타낸 것이다. 이때의 측정위치는 노즐팁으로부터 150mm인 지점이다.

Fig.9와 Fig.10을 비교하면 6MPa인 경우가 액적의 크기가 큰 것이 많이 분포되어 있는 것을 볼 수가 있으며 14MPa인 경우에는 상대적으로 작은 액적들이 많이 분포되어 있다.

Fig.11은 분사 압력의 증가에 따른 SMD의 변화를 나타낸 그림이다. 분사 압력의 증가와 함께 SMD가 감소하고 있는데, 이것은 분사 압력의 증가에 따라 분무 속도가 증가하게 되어 주위 기체와의 상대 속도가 커져 마찰력에 의해 미립화가 촉진되기 때문이라 생각된다.

3.2 분무 특성에 미치는 노즐 직경의 영향

노즐 직경의 변화가 분무 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위해서 노즐 직경이 1.03, 1.05, 1.07mm인 경우에 대해서 분무 도달거리, 분무각, 액적의 크기 등을 측정하였다.

3.2.1 분무 도달거리의 변화

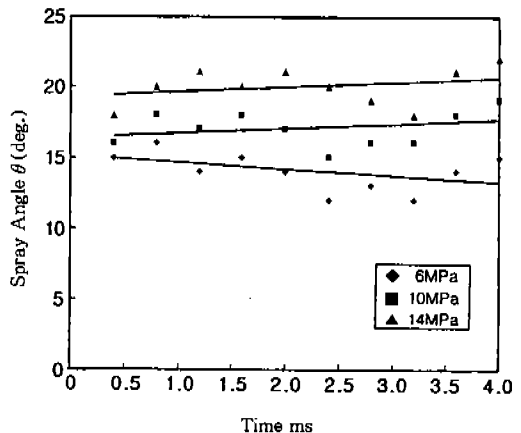


Fig.8 Spray Angle for Various Injection Pressures($d_0=1.03\text{mm}$, $N=500\text{rpm}$)

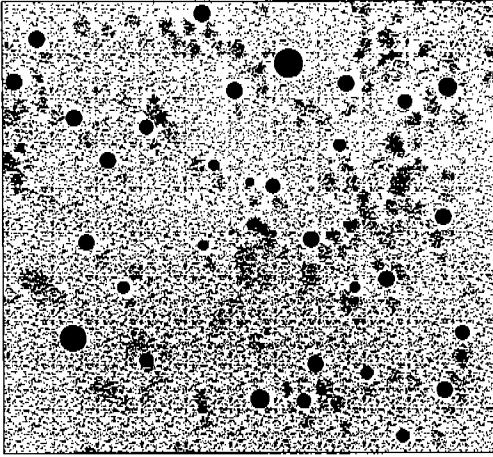


Fig.9 Droplet Size Distribution ($d_0=1.03\text{mm}$, $P_{inj}=6\text{MPa}$, $N=500\text{rpm}$)

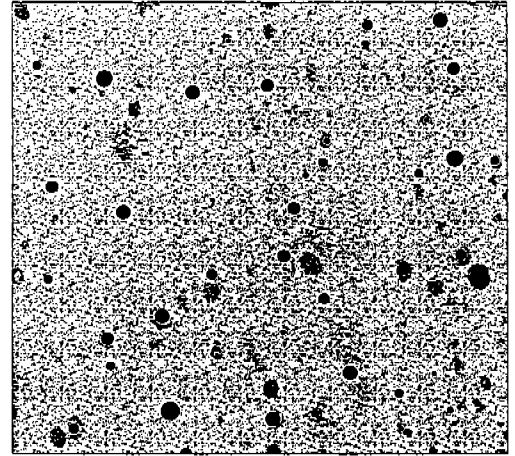


Fig.10 Droplet Size Distribution ($d_0=1.03\text{mm}$, $P_{inj}=14\text{MPa}$, $N=500\text{rpm}$)

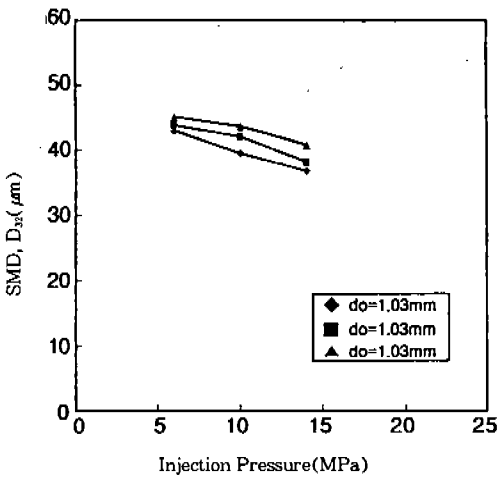


Fig.11 Effect of Injection Pressure on Sauter Mean Diameter ($N=500\text{rpm}$)

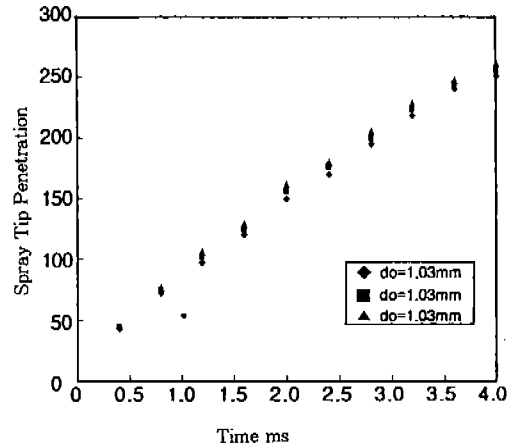


Fig.12 Spray Tip Penetration for Various Diameters of Nozzle

분무 도달거리는 고속 카메라의 촬영에 의해 0.2ms간격으로 측정하였으며, Fig.12는 분사 압력을 10MPa로 설정하고 각각의 노즐 직경에 대한 도달거리를 측정하여 표시한 그래프이다. 그림에 보이는 것처럼 노즐의 직경이 증가함에 따라 도달거리가 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 이로서 노즐 직경은 분무도달거리에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3.2.2 분무각(Spray Angle)의 변화

Fig.13은 노즐 직경에 대한 분무각을 나타낸다. 그림에 보이는 것처럼 노즐 직경이 커짐에 따라 분무각이 약간 감소하였다. 이것은 노즐의 직경이 작을 때는 액체가 노즐을 통과할 때 저항이 커서 반경 방향의 속도가 증가하는 반면에, 노즐의 직경이 증가할수록 저항이 작아져서 반경 방향의 속도가 감소되기 때문이라 생각된다.

3.2.3 SMD에 미치는 노즐 직경의 영향

Fig.14에 노즐 직경이 변화할 때 SMD를 측정

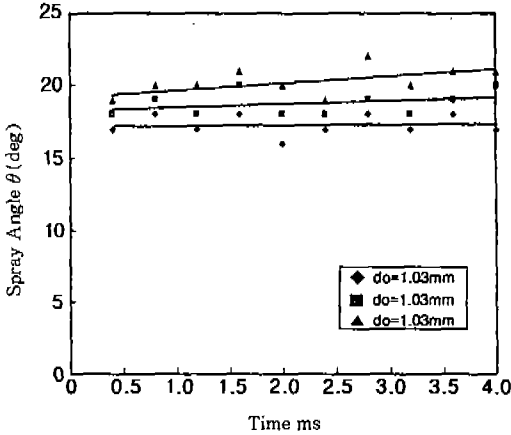


Fig.13 Spray Angle for Various Diameters of Nozzle

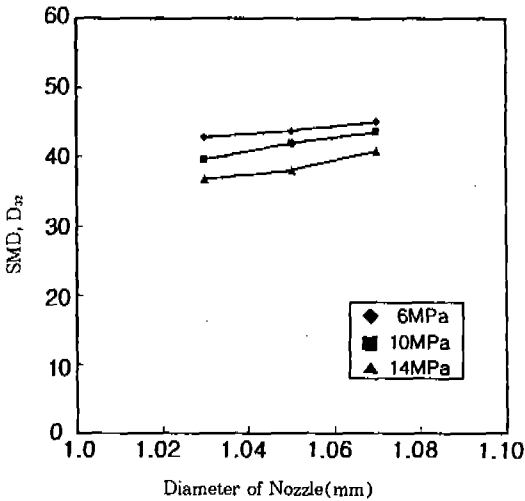


Fig.14 Effect of Nozzle Diameter on Sauter Mean Diameter

한 결과를 나타내었다. 노즐 직경이 커짐에 따라 SMD가 다소 커지는 경향을 보이고 있는데, 이것은 노즐 직경이 증가하면 분무각이 감소하고 결국은 분무각이 감소함에 따라 공기와의 마찰이 줄어들어 미립화가 잘 이루어지지 않아서 SMD가 커지는 것으로 생각된다.

4. 분무 형성 과정의 시뮬레이션

최근 컴퓨터의 급속한 발전으로 인해 디젤 분

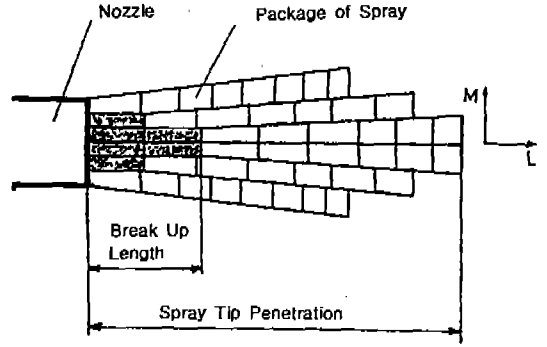


Fig.15 Spray Model

무의 수치해석적인 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 많은 시뮬레이션 프로그램들이 개발되어 사용되고 있다.

4.1 분무모델

본 연구에서는 노즐에서 분사된 분무는 많은 입자들로 분열이 일어나기 때문에 Fig.15와 같이 여러 요소로 이루어진 모델을 이용하여 분무의 궤적을 계산하였다.⁴⁾ 분무의 축 방향(L)은 분무의 도달거리를 표현했으며, 분무 반경방향(M)으로는 6부분으로 분할하여 분무각을 표현했다.

4.2 시뮬레이션의 계산 과정

분무의 궤적은 분무속도와 분무각에 관한 식을 기초로 하여 계산하였다.

분무의 속도는 분무의 도달거리를 시간에 대해 미분하여 구할 수 있다. 실험 결과에서 나타났듯이 분열이 일어나는 시점에서 속도의 변곡점이 생겼으므로, 분무의 속도는 다음 두 부분으로 구분하여 계산하였다.⁹⁾

분무 도달거리(S)

① 분열이 일어나기 전(0<t<tb) :

$$S = K_1 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_1}} \cdot t \tag{1}$$

② 분열이 일어난 후(t>tb) :

$$S = K_2 \left(\frac{\Delta P}{\rho_1}\right)^{0.25} \sqrt{d_0 t} \tag{2}$$

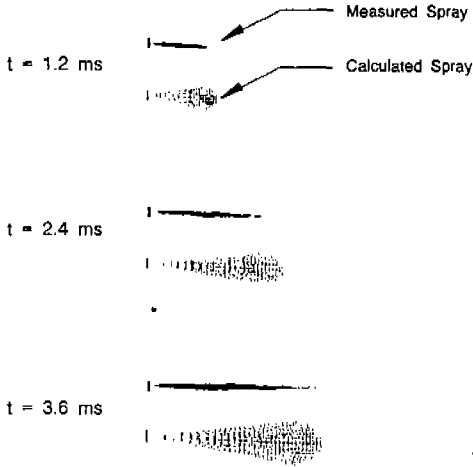


Fig.16 Comparison Between the Measured Outlines of the Free-Spray and the Calculated Ones

여기서

$$t_b = K_3 \frac{\rho_1 d_0}{\sqrt{\rho_a \Delta P}} \quad (3)$$

분무각(θ)는

$$\theta = 0.05 \left(\frac{\rho \Delta P d_0^2}{\mu_a} \right)^{0.25} \quad (4)$$

여기서 S (분무도달거리), K_1 , K_2 , K_3 (상수), ΔP (연료의 분사차압, Pa), ρ_1 (연료의 밀도, kg/m^3), t (분사개시 후의 시간, s), ρ_a (공기의 밀도, kg/m^3), d_0 (노즐직경), θ (분무각), μ_a (공기의 점도, Pa·s)이다.

4.3 분무 사진과 이론 계산과의 비교

Fig.16에 노즐의 직경이 1.03mm이고 분사 압력이 14MPa인 경우의 사진과 비교한 결과를 나타내었다. 계산에 의한 그림에 있어서는 분무각이 항상 일정하고 분무 선단의 모습도 대칭적으로 처리를 하였지만, 실제 분무의 사진은 시간에 따라 분무각과 속도가 약간씩 변하고 분무 선단

에 있어서의 모양도 일정한 모양을 가지고 있지는 않다. 그러나 전체적인 형상에 있어서는 근접하게 일치함을 알 수 있어 시뮬레이션 프로그램의 타당성을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

분사 압력과 노즐 직경의 변화에 따른 디젤 노즐에서의 분무특성을 실험한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 분사 압력이 증가함에 따라 분무 도달거리 및 분무각이 증가하고, 액적의 크기들도 작은 입자들이 많이 분포되어 SMD가 감소했다.
- 2) 노즐 직경이 증가하면 분무 도달거리 및 분무각이 증가하였지만, 액적의 크기들은 큰 입자들이 많이 분포되어 SMD가 증가 하였다.
- 3) 분무사진과 이론계산의 비교결과, 본 연구의 시뮬레이션의 타당성을 확인할 수 있었다.

이러한 결과로부터 고압 분사하는 것이 분무의 미립화를 촉진하여 양호한 혼합기를 형성하므로 고부하 연소, 출력 성능 향상 및 매연 감소 등의 면에서 유리하다고 판단된다. 그러나 노즐의 직경이 너무 크게되면 미립화가 잘 일어나지 않고, 너무 작으면 도달거리가 짧아지는 문제점이 발생하기 때문에 노즐 직경은 연소실의 형상에 따라 최적의 상태로 정해져야 한다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. Masahiro Ishida, Zhi-Li Chen, Gjuj-Feng Luo and Hironobu Ueki, "The Effect of Pilot Injection on Combustion in a Turbocharged D.I. Diesel Engine", SAE Paper 941691.
2. Yiliang Huang, Limei Zhang and Weiguo Liu, "The Optimum of Heat Release Patterns in High Speed D.I. Diesel Engine", SAE Paper 941694.

3. Yoshinaka Takida, Naoya Ishikawa, Masanori Komori and Kinji Tsujimura, "Diesel Combustion Improvement and Emissions Reduction Using VCO Nozles with High Pressure Fuel Injection", SAE Paper 940899.
4. Kyu-Keun Song, Hiroyuki Hiroyasu, and Takuo Yoshizaki, "Three-Dimensional Spray Distributions in a Direct Injection Diesel Engine", SAE Paper 941693.
5. H. Hiroyasu, Y. Kadota and S. Tasaka, "Penetration of diesel Fuel Sprays", Trans. of JSME, Vol.44, No.385(1978).
6. H. Hiroyasu and T. Kadota, "Droplet Size Distributions in Diesel Engines", Trans. SAE, Vol.41, No.342(1975), pp.72~684.
7. J.C. Dent, "A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration", SAE Trans., Part 3J(1970), pp.67~76.
8. Arthur H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Purdue University, Hemisphere Publishing Coporation, 1989.
9. Hiroyasu H., and Arai M., "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel Engines", Trans. JSME, Vol. 21, 1980, pp.5~11.