

다공 디젤분무의 액적-공기 상대속도 측정에 관한 실험적 연구

권명훈* · 신형민* · 이지근** · 강신재*** · 노병준***

An Experimental Study on the Measurement of the Droplet-Air Relative Velocity in the Multi-hole Diesel Spray

M.H. Kweon, S.H Shin, J.K. Lee, S.J. Kang and B.J. Rho

Key Words: Multi-hole Nozzle(다공노즐), Inermittent Spray(간헐분무), PDPA(phase Doppler particle analyzer)

Abstract

This experimental study is to investigate the intermittent spray characteristics of a multi-hole nozzle in a heavy-duty DI diesel engine. Multi 8 hole($d_n=0.25\text{mm}$), Multi 3 hole($d_n=0.42$) and Sing hole nozzle($d_n=0.25\text{mm}$) were used in this experiment. By using the 2-D PDPA(phase Doppler particle analyzer), the droplet diameter and the velocity of a diesel spray injected intermittently from the multi and the single-hole nozzle into a still ambient were measured.

In order to calculate the mean values such as mean velocity, SMD, AMD etc. and to analyze the intermittent characteristics, the time-window of 0.15ms were applied. In the spray, the small droplet($D<10\mu\text{m}$) was regarded as an air flow, and the correlation between the fuel droplet($10\mu\text{m}<D<500\mu\text{m}$) and the air flow was examined. The normalized axial droplet-air relative velocity of the 8 hole, the 3 hole and the single hole nozzle was evaluated as 0.081, 0.067, 0.06 and in case of the radial droplet-air relative velocity, the normalized value is 0.014, 0.013 and 0.008 respectively.

기호설명

- B : 분무반폭(mm)
- d_n : 노즐 오리피스 직경(mm)
- U_{cl} : 분류중심에서 축방향 속도
- U_{rel} : 액적-공기의 축방향 상대속도
- V : 반경방향 평균속도
- V_{rel} : 액적-공기의 반경방향 상대속도
- X : 반경방향 좌표
- Z : 축방향 좌표

1. 서론

환경오염문제가 날로 심각해짐에 따라 현재 전 세계적으로 내연기관의 개발은 환경오염물질의 배출을 저감시키는 데 중점을 두고 있다. 이에 따라 디젤 연료를 사용하는 자동차의 오염물질 배출 규제가 날로 강화되고 있으며, 특히 낮은 분사 압력에서 많이 발생하는 PM이 최근 폐암에 원인으로 밝혀짐에 따라 직접분사식 디젤기관의 오염물질을 저감시키고 엔진성능을 향상시키기 위해 연소장의 최적화가 요구되고있어, 연료분사계에 있어서 주어진 연소실 형상에 적합한 연료 분사 노즐의 분무거동 및 미립화 특성을 최적화해야할 필요성이 증가하고 있다.

본 연구는 다공 및 단공노즐의 형상변화가 분사계 특성과 분무의 미립화 및 유동특성에 끼치

* 전북대학교 대학원
 ** 전북대학교 국제사업단
 *** 전북대학교 기계공학부

는 영향을 고찰하였다. 다공 및 단공 노즐의 분무특성과 유동특성을 보다 정량적으로 연구하기 위하여 PDPA 시스템을 이용하여 간헐적으로 대기 중에 분사되는 디젤분무의 액적 크기와 속도 분포를 측정하고, 측정결과로부터 간헐특성을 고찰하기 위하여 분사시작으로부터 0.15ms 간격으로 액적의 평균속도 및 평균액적의 변화를 측정하였다.⁽¹⁻³⁾ PDPA에서 얻어진 데이터를 바탕으로 액적크기에 따른 속도분포와 액적-공기와 상대속도를 10 μ m 이하에 액적들과 10 μ m 이상에 액적들에 속도차로 정의하여 노즐 각각의 상대속도를 측정하였다.

본 연구를 통하여 고성능 미립화 분무노즐의 설계에 대한 기본 자료로 활용될 수 있는 실험적으로 규명된 데이터를 제시함으로써 현재 국내외에서 연구개발에 전력하고 있는 직접분사식 고성능 노즐의 개발과 연소효율을 향상 분무시스템의 개발에 중요한 기본 자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

단공 및 다공 디젤노즐에 의해 형성되는 디젤분무를 실험적으로 연구하기 위하여 Fig.1과 같이 연료분사장치, PDPA 측정장치로 구성된 실험장치를 구성하였다. 연료분사장치는 상용 디젤엔진과 동일한 조건으로 DC모터에 의해 구동되는 연료분사펌프와 분사노즐로 구성되고, PDPA 측정장치는 레이저 광원, 광학계통부, 신호처리부 및 3차원 이송장치로 구성된다.

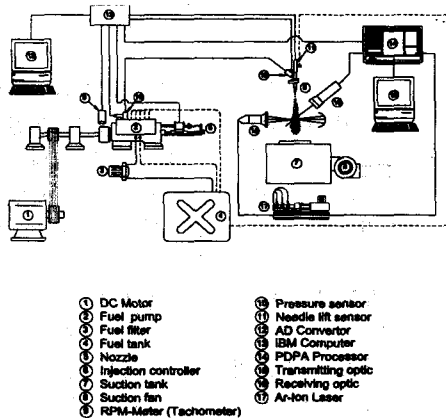


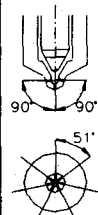
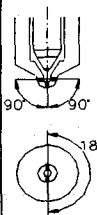

Fig.1 Schematic diagram of the experiment apparatus

연료분사장치는 연료분사펌프, 구동 모터, 분사된 연료 액적 포집장치 및 고정 프레임 등으로 구성하였다.

연료분사펌프는 V8기통 in-line PE 펌프로서, 직경이 12mm인 우권 양리드의 플런저를 사용하고 있고 DC 모터에 의해 구동된다. 정확한 연료분사펌프의 회전수를 측정하기 위하여 분사시기 조절장치 가까이 근접센서를 설치하였고, 그 신호를 타코메터를 이용하여 측정하였다. 실험에 이용된 연료분사 펌프는 배기량 17,200cc, V8기통 대형 디젤엔진에 사용되는 펌프로서 최대 출력 및 토크점에서 펌프 1행정당 분사량(mm³/st)과 펌프의 회전수(rpm)는 각각 147mm³/st / 1100rpm, 143mm³/st / 700rpm이다. 시험에 사용된 연료는 20℃에서 비중 0.8315, 동점도 3.522cSt, 굴절률 1.4545의 물성치를 가진 KS 2호 경유를 사용하였다.

실험에 이용된 분사노즐은 2-스프링 홀더를 가진 미니 색(mini-sac) 형의 다공(multi-hole) 노즐이다. 노즐의 예양정은 0.06 \pm 0.02mm로 설정되어 있으며, 니들의 전체 양정은 0.39mm로 설정되었고, 또한 1, 2차 개변압은 150bar, 220bar로 각각 설정되었다.

Table 1 Specification of the injection nozzle

Nozzle type	multi 8 hole	multi 3 hole	single
Nozzle shape			
Nozzle hole number	8 hole	3 hole	1 hole
Nozzle hole diameter(mm)	ϕ 0.25 \times 8	ϕ 0.42 \times 3	ϕ 0.25 \times 1
Nozzle hole length(mm)	0.9	0.9	0.9
Length /Diameter	3.6	2.14	0.36
Nozzle hole total area(mm ²)	0.412	0.412	0.412

액적의 속도와 크기의 측정은 5W 아르곤 이온(Ar-ion) 레이저를 사용한 PDPA(phase Doppler

particle analyzer) 시스템을 사용하여 수행하였다.

다공노즐의 분무 특성을 고찰하기 위하여 3공, 8공 노즐에 대한 실험을 펌프속도 500rpm, 분사량 30mm³/st 수행하였다. 다공노즐과 단공노즐에 의해 형성되는 분무 유동장의 특성을 비교하기 위하여 8공 노즐의 홀 직경에 해당하는 0.25mm 노즐에 대하여 단공과 다공 노즐의 관찰대상 홀의 분사량을 일정하게 한 후 실험을 수행하였다.

축방향 위치변화는 노즐 선단에서 10mm 떨어진 위치에서부터 20mm, 30mm, 50mm, 70mm, 90mm, 120mm, 150mm, 180mm까지 총 9 위치에서, 반경방향으로 모두 17 위치에서 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무유동장

8공 노즐의 분무 구조를 알아보기 위하여 유동장의 축방향 및 반경방향의 합성속도의 속도 벡터와 등속도 분포를 Fig.2에 나타내었다. 분사기 작동중 분무는 지속적으로 발달되어 중심부에서 높은 속도분포를 나타내며, 분사가 종료되어 에너지 공급이 중단됨과 동시에 분무의 발달은 더 이상 지속되지 못함을 알 수 있다.

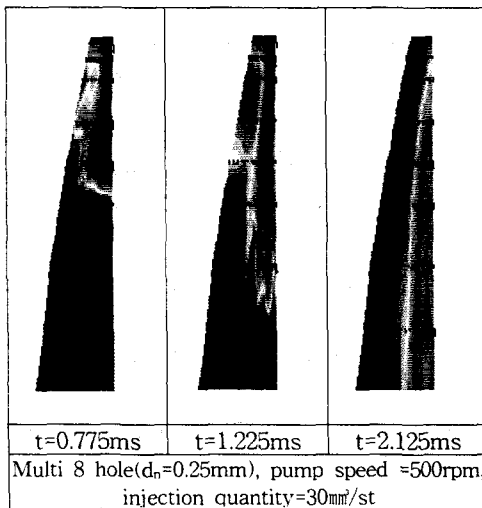


Fig.2 Iso-velocity contours and vector plots of the resultant velocity for the multi 8 hole nozzle

분무장에서 액적의 거동과 분리하여 공기의 유동특성을 직접 고찰할 수 있는 방법이 아직까지 존재하지 않으므로, 이를 대신하여 비교적 관성

력의 영향을 덜 받는 작은 액적의 거동을 공기의 유동특성으로 가정하여 해석하는 방법이 이용되고 있다. 본 연구에서는 액적크기분포와 수밀도 등을 조사하여 간헐분무의 분무 및 유동특성 해석에 적합하도록, 직경이 10 μ m 이하인 액적의 거동을 공기의 유동특성으로 가정하여 분무장 내의 액적-공기에 대한 특성을 고찰하였다. 또한 10 μ m 이상 500 μ m이하의 액적 거동을 분무유동장의 액적 특성으로 평가하였는데, 이것은 실험이 수행된 모든 조건에서 분무를 형성하는 액적의 최대 직경 등을 고려하여 결정한 값이다.

3.2 액적-공기 상대속도

액적과 공기의 유동특성을 각각 고찰하기 위해 액적 크기별로 나누어 각각의 유동특성을 시간에 따라 나타내었다.

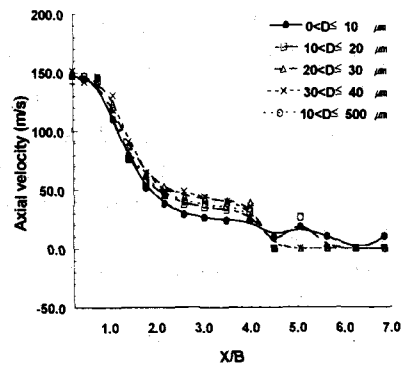


Fig.3(a) Axial velocity profiles with time for multi 8 hole nozzle(T=0.0ms)

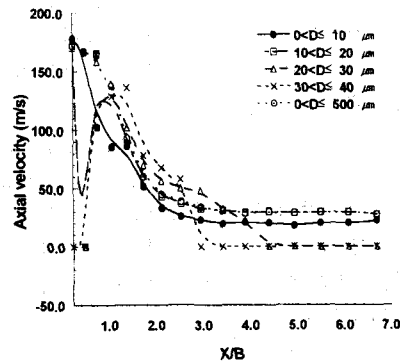


Fig.3(b) Axial velocity profiles with time for multi 8 hole nozzle(T=0.3ms)

Fig.3(a)와 (b)는 8공노즐에 의해 형성되는 분무 유동장의 $Z=20\text{mm}$ 에서 액적크기에 따른 축방향 속도분포를 시간 변화에 대하여 나타낸 것이다. 액적 크기에 따라 서로 다른 속도를 가지고 발달해 가며, 큰 액적이 유동장 전체에 걸쳐 높은 속도를 나타내고 있다. 그러나 유동장에서 최대 액적 크기 범위로 판단되는 $30\mu\text{m} < D \leq 40\mu\text{m}$ 의 액적은 분무 반폭 이상의 외곽부분에서 불규칙적인 변화를 동반한 낮은 속도를 나타내며 결국 액적이 검출되지 않는 현상을 관찰할 수 있다. 이것은 중심부에 존재하는 큰 액적이 작은 액적과 비교하여 공기와의 저항을 상대적으로 크게 받아 분무 외곽부분을 형성하는 작은 액적으로 변환되는 것으로 사료된다. 따라서 액적과 공기의 상대속도 중에서도 특히 큰 액적과 공기의 상대속도가 더 중요하게 고려되어야 함을 알 수 있다.

액적 거동을 나타내는 $10\mu\text{m} < D \leq 500\mu\text{m}$ 의 분포와 공기의 속도분포를 살펴보면 액적 속도가 공기 속도보다 높게 나타나고 있으며, 반폭 근처에서부터 외곽부로 갈수록 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 분무선단부 보다 꼬리부분에서 큰 차이를 나타내고 있다. 특히, $Z=20\text{mm}$ 의 분무 중심부에서는 액적과 공기속도가 불명확한 시간대가 존재함을 볼 수 있고, 다공에 경우 0.3ms 와 단공에 경우 0.15ms 로 액적과 공기의 속도 차이를 판별할 수 없는 영역이 존재함을 볼 수 있다. 이러한 시간대는 분무 중심부가 지나가는 시간대로 분무 중심부에서 액적들이 충분히 검출되지 않기 때문으로 생각된다.

전체적으로는 측정 위치와 관계없이 $10\mu\text{m} < D \leq 20\mu\text{m}$ 액적 분포가 액적 거동을 나타낸다고 생각되는 $10\mu\text{m} < D \leq 500\mu\text{m}$ 분포와 거의 유사하게 나타남을 볼 수 있으며, 이것은 액적 크기에 따른 수밀도 변화 때문으로 생각된다.

3공노즐의 경우 전체적인 경향은 8공노즐에 비해 완만한 경향을 보이며, 3공노즐에서도 마찬가지로 분무 중심부가 지나가는 것으로 여겨지는 0.3ms 에서 분무 중심부의 액적들 사이에 속도 분포가 불분명하게 나타남을 알 수 있다. 홀 직경이 0.25mm 인 단공노즐은 다공노즐의 경우와 유사하게 액적 크기에 비례하여 높은 축 방향 속도를 나타내지만 분무 중심부에서는 거의 모든 시간대에 불분명한 속도 분포를 보이고 있다.

지금까지는 다공 및 단공노즐에 의해 형성되는

분무 유동장의 액적 크기에 따른 특성을 살펴보고 공기속도와 액적 속도를 정의하였다. 분무 유동장의 발달은 합착과 재분열 등을 포함한 2차분열에 크게 영향을 받으며 결국 액적-공기의 상대속도차이로 정량화 될 수 있다.

Fig.4는 8공노즐의 $Z=20\text{mm}$ 측정단면의 액적-공기의 축방향 및 반경방향 상대속도를 분무중심축 방향속도로 무차원화하여 측정시간에 대하여 나타낸 것이다.

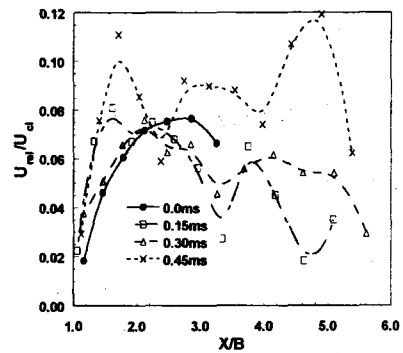


Fig.4 Axial relative velocity for multi 8 hole nozzle ($Z=20\text{mm}$)

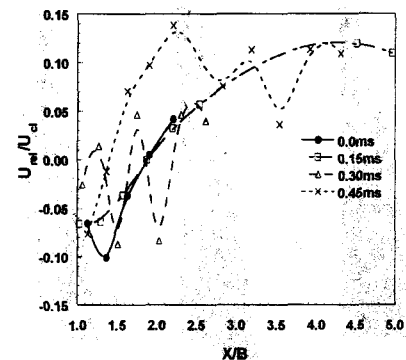


Fig.5 Axial relative velocity for single hole nozzle ($Z=20\text{mm}$)

이 때 공기속도 측정이 불가능한 분무 중심부는 제외시켰으며, 공기속도 측정 한계는 분무 반폭을 기준으로 $\pm 0.5\text{mm}$ 범위에서 측정기준을 정하였다. 또한 상대속도측정이 가능한 분무 외곽부분의 한계는 측정시간에 따라 달라지고, 공기속도가 거의 영의 값을 갖게 되면 액적과 공기의

속도차가 무한 발산되어 일정한 수준에서 차단할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 액적과 공기의 속도가 거의 일정해지는 지점을 기준으로 축방향 속도에 대해 10~11m/s의 쓰레쉬홀드(threshold)를 적용하여 단면 평균값을 결정하였다.

8공 노즐의 경우를 살펴보면 분무 중심부 근처에서 분무외곽으로 갈수록 증가하다가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이런 감소경향은 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향이 작아지고 분무 말기에는 오히려 증가하는 경향을 보여준다.

반면에 단공 노즐에 대한 Fig.5를 살펴보면 축방향 상대속도의 경우 분무 선단부는 분무 외곽으로 갈수록 증가하는 경향을 그리고 분무 중심부 및 꼬리부의 경우에도 계속해서 증가하는 경향을 보여준다. 또한 반경방향 상대속도의 경우 측정 시간에 관계없이 분무 외곽으로 갈수록 다소 증가하는 경향을 보여주고 있다.

3공 노즐은 축방향 상대 속도를 살펴보면 X/B가 2인 지점에서 다른 노즐들과는 다른 상대 속도분포를 나타내고 있으며 분무 외곽지역으로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 반경방향 상대 속도에서는 두 노즐과 반대로 분무 초기에 가장 높은 상대 속도를 나타내고 있고 시간이 지남에 따라 분무 중심부에서 상대속도는 감소한다.

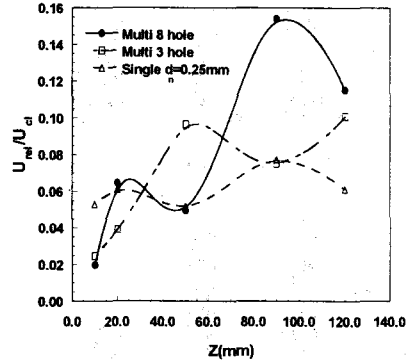
3.3 무차원 상대속도 분포

Fig.6은 축방향 상대속도와 반경방향 상대속도를 측정시간 0.0ms에서 0.45ms까지 평균을 취하여, 각 측정 단면의 평균값을 나타낸 것이다. 각 노즐의 간헐적인 특성을 알아보기 위해서 축방향 최대 속도로 무차원화 하였다.

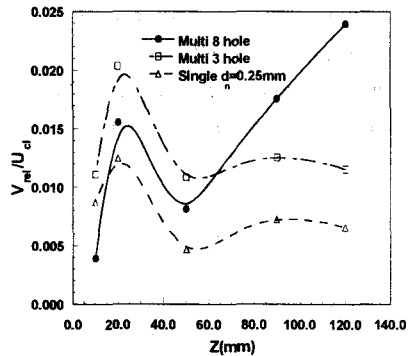
8공노즐이 단공 노즐보다 높은 상대속도를 가지고 있으며 3공 노즐은 단공노즐보다 약간 높은 축방향 상대속도를 나타낸다. 8공 노즐은 20mm와 90mm에서 가장 높은 값에 이르며, 3공 노즐은 50mm에서 낮은 축방향 속도에도 불구하고 가장 높은 값을 나타낸다. 축방향의 상대속도가 반경방향의 것보다 훨씬 높은 값을 가지고 있다.

반경방향 상대속도는 20mm위치에서 모두 높은 값을 나타내고 있으며 8홀의 경우 120mm위치에서 축방향 상대속도가 90mm보다 감소하는 반면 반경방향 상대 속도는 오히려 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 8공 노즐에서는 액적들에 운동량이 거의 소멸된 분무의 하류방향에서도 분무에

확산작용이 활발하게 일어나고 있음을 보여준다. 10mm의 위치에서는 축방향 상대속도와 반경방향 상대속도모두 8공노즐이 가장 낮은 값을 나타내고 있고 50mm이후에는 가장 큰 값을 나타내고 있다.



(a) Axial relative velocity

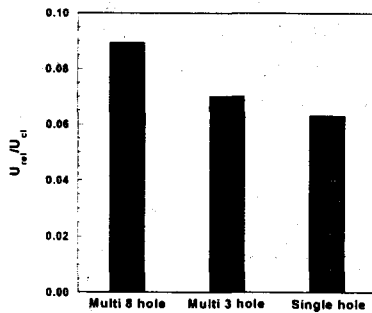


(b) Radial relative velocity

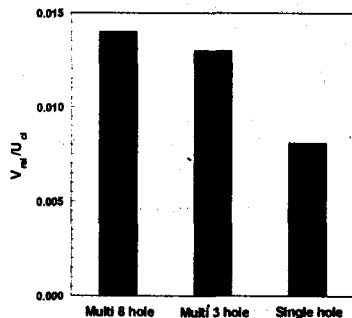
Fig.6 Overall mean relative velocity with axial distance for each nozzle

Fig.7은 축방향과 반경방향의 평균 상대속도의 전체 평균값을 나타낸 그림이다. 축방향 상대속도의 경우 3공 노즐과 단공노즐의 차이가 적지만 반경방향 상대속도에서는 다공노즐과 단공노즐의 상대속도차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

8공 노즐은 0.081, 3공은 0.067이고, 단공은 0.06이었다. 반경방향평균 상대속도는 8공이 0.014, 3공이 0.013, 단공이 0.008로 평가되었다.



(a) Axial relative velocity



(b) Radial relative velocity

Fig.7 Overall mean relative velocity for multi 8 hole multi 3 hole and single hole nozzle

4. 결론

PDPA를 이용한 다공 디젤노즐의 분무 액적 중 10μ m이하의 직경을 가진 액적의 유동을 공기의 유동으로 간주하여 분무유동특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 8 공노즐의 분무유동장에서 액적속도는 공기속도보다 높게 나타나며, 분무중심부에서 비교적 높은 액적-공기 상대속도를 나타냈다. 또한 분무외곽으로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보인다.

(2) 중심속도로 무차원화된 축방향 액적-공기 상대속도는 8공노즐의 경우 0.081, 3공은 0.067이고, 단공은 0.06으로 측정되었고 반경방향 상대속도는 8공노즐의 경우 0.014, 3공이 0.013, 단공이 0.008로 평가되었다.

(3) 분무장 전체에서 중심속도로 무차원화된 축방향 상대속도 및 반경방향상대속도의 평균값은 8공노즐이 3공 노즐보다 각각 17.28%, 단공 노즐

보다 25.93% 높은 값을 나타내고 반경방향 속도는 3공 노즐보다 7.14% 단공 노즐 보다는 42.86% 높게 나타남을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Xu, M. and Hiroyasu, H., "Development of a New Optical Technique for Measuring Diesel Spray Penetration," SAE 902077.
- (2) Arcoumanis, C., Cossali, E., Paal, G. and Whitelaw, J. H., "Transient Characteristics of Multi-Hole Diesel Sprays," SAE 900480.
- (3) Arcoumanis, C. and Chang, J-C., Morris, T., "Spray Characteristics of Single-and Two-Spring Diesel Fuel Injectors," SAE 930922.
- (4) Koo, J. Y. and Martin, J. K., "Droplet Size and Velocities in a Transient Diesel Fuel Spray," SAE 900397.
- (5) Koo, J. Y. and Martin, J. K., "Ambient Gas Density Effects on Droplet Diameter and Velocity in a Transient Diesel Fuel Spray," International Symposium COMODIA 90, pp.225-230, 1990.
- (6) Dan, T., Takagishi, S., Senda, J. and Fujimoto, H., "Organized Structure and Motion in Diesel Spray," SEA, 970641.
- (7) Bracco, F. V., "Modeling of Engine Sprays," SAE 850394.
- (8) Takeuchi, K., Senda, J. and Shikuya, M., "Transient Characteristics of Fuel Atomization and Droplet Size Distribution in Diesel Fuel Spray," SAE 830449.