

비증발 디젤분무의 분열과 미립화 과정의 가시화

원 영 호^{*1)} · 김 우 태²⁾

울산대학교 기계자동차공학부¹⁾ · 울산대학교 대학원²⁾

Visualization of Breakup and Atomization Processes in Non-evaporating Diesel Sprays

Youngho Won^{*1)} · Wootae Kim²⁾

¹⁾School of Mechanical·Automotive Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

²⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

(Received 26 August 2003 / Accepted 5 November 2003)

Abstract : Two-dimensional laser visualization methods have been used in the study of breakup and atomization processes of non-evaporating diesel sprays. A single-hole spray injected into a quiescent atmospheric environment was visualized by the LIF(Laser Induced Fluorescence) and scattering technique. The LIF technique could be implemented to take the images which are magnified enough to show the shape of liquid ligaments and small droplets. The spontaneous scattering and fluorescent images of sprays were also taken to investigate the atomization of droplets. In the tip and periphery of a spray, the scattering light is bright and the ratio of fluorescent/scattering intensity is lower. This characteristics indicate the very high number density of small droplets which are well atomized.

Key words : Diesel spray(디젤분무), Droplet breakup(액적분열), Droplet atomization(액적미립화), Spray visualization(분무가시화), Fluorescence of droplet(액적의 형광)

1. 서론

디젤엔진에서 연료의 분사특성은 열효율 및 배기가스 배출 성능에 큰 영향을 미친다. 연료노즐에서 분사된 연료가 분열되고 미립화하는 과정을 분무 가시화를 통하여 명확히 하는 것은 연료분무 성능을 향상하는데 필요하고, 아울러 분무의 수치계산을 위한 액적 분열모델을 검증하는데 중요한 자료가 된다.¹⁾

노즐 근처에서 분무내 액적은 일반적으로 액주 혹은 액막이 분열한 큰 액적과 큰 액적이 다시 분열된 작은 액적들로 형성되어 있다. 이 영역에서 분무

를 가시화하는 경우 액적의 수밀도가 아주 높아 분무 내부의 가시화가 매우 곤란하다. 특히 분열과정에 있는 분무를 가시화하는 경우 액적이 다수 중첩하여 촬영되어 명료한 관찰에 방해가 된다.

분무를 가시화하는 방법에는 먼저 투과광을 촬영하는 shadow법이 있다.²⁾ 이 방법은 분무에 대하여 광원과 카메라를 정반대 위치에 고정하여 분무의 투과광을 촬영한다. 이에 비하여 분무에 의한 산란광을 촬영하는 방법에는 직접사진법이 있다.³⁾ 대다수의 가시화 방법은 이 두 방법을 기본으로 하고 있다. 그러나 이러한 방법에 의해 분무내부만을 가시화하는 것은 분무 가장자리의 액적도 함께 촬영되어 곤란하다.

본 연구는 대기 중에 분사된 디젤분무의 분열 및

*To whom correspondence should be addressed.
yhwon@mail.ulsan.ac.kr

미립화 과정을 가시화하기 위하여 형광물질을 혼합한 연료에 LIF법(레이저여기형광법)을 사용하여 액주 혹은 액적으로부터 형광을 확대 촬영함으로써 기존 촬영 법으로는 관찰할 수 없는 분무내부의 미시적 분열과정과 액적의 크기 및 형상의 가시화를 시도하였다. 또한 액적의 산란광과 형광을 동시 촬영하여 액적의 미립화 과정을 거시적으로 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략을 나타낸다. 광원으로는 발광기간 10ns, 파장 532nm, 빔직경 10mm, 출력 900mJ/pulse의 Nd:YAG 레이저를 사용한다. 레이저를 시트 광으로 만들기 위해 원통형 렌즈를 사용한다. 분사펌프는 Bosch형 6기통 직렬형 jerk 펌프이며 분사노즐은 개변압이 22MPa, 분공경 0.37mm의 단공 노즐이다. 연료펌프는 3.7kW 모터를 이용하여 구동하며 회전속도는 600rpm이다. 연료는 펌프의 랙을 솔레노이드에 의해 작동시킴으로서 분사된다. 연료는 다음과 같은 방법으로 필요한 시점에 단발 분사된다. 펌프 축에 장착된 근접센서에서 펌프 1회전 당 하나의 주신호가 발생한다. 이 신호를 트리거 신호로 하여 펄스 발생기(DG535)를 이용하여 원하는 시간과 폭의 펄스를 발생시켜 릴레이(SSR)에 인가하면 펌프 랙에 연결한 솔레노이드가 왕복 작동하여 연료가 정지 대기 중에 1회 분사된다. 분사 압력센서는 노즐 연료입구로부터 50mm 지점에 설치되어 있으며 Fig. 2는 5회분사시의 평균 분사압력을 나타낸 것이다. 1회 분사량은 평균 35.9mg이다.

레이저 시트광에 의한 분무사진은 시트광과 수직 방향에서 CCD 카메라로 촬영한다. 카메라는 Kodak사의 ES1.0/MV 모델로 분해능은 1008×1008 화소, 8bit이고 샷터는 127μsec까지 노출이 가능하다. 분사의 시작 시점을 정확히 알기 위하여 레이저빔을 노즐 분출공에 근접시켜 통과시키고 분무에 의해 레이저광이 감쇄하는 것을 포토센서로 감지하여 센서출력이 하강하는 시점을 분사 시작시점으로 간주하였다.

사용연료는 일반 디젤유이며 LIF 가시화법에 의한 형광촬영을 위하여 형광물질(Rhodamine 590)을

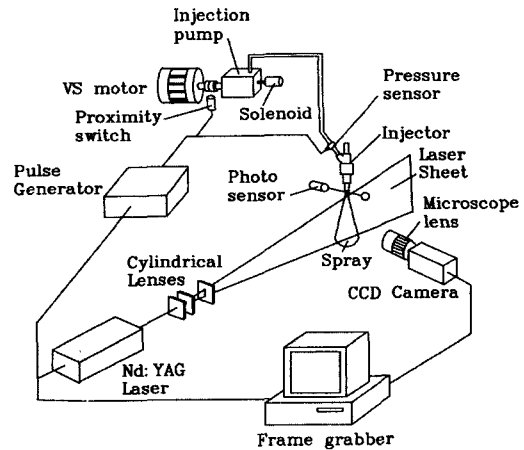


Fig. 1 Experimental setup

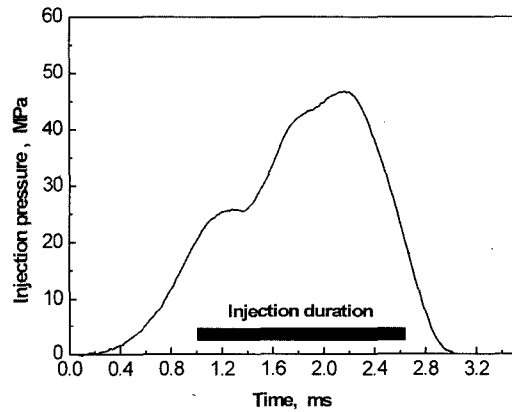


Fig. 2 Profile of fuel injection pressure

3000 ppm농도로 용해한 에탄올과 옥탄을 혼합액을 체적비로 10% 디젤유에 첨가시켰다.

노즐근처의 분무의 분열을 미시적으로 파악하기 위해서 배율 8의 현미경 렌즈를 사용하여 1.2×1.2 mm의 영역을 화면에 가득 차게 확대하여 촬영하였다. 이 때 분해능은 1.2μm/pixel이다. 분무의 미립화 정도를 거시적으로 파악하기 위하여 액적의 산란광과 형광물질이 여기될 때의 형광을 카메라 화면의 좌우에 나누어 촬영하였다. 이 때 렌즈 앞에 더블링 프리즘을 사용하였고, 프리즘 수직 중심선의 좌우면에 각각 산란광과 형광 투과필터를 설치하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 분무 분열길이

Fig. 3은 분무의 선단도달거리를 측정된 결과이다. Chehroudi⁴⁾에 의하면 분무의 분열기간에는 분무의 선단 도달거리는 시간에 비례한다. 또한 분열길이는 대략 Hiroyasu와 Arai⁵⁾가 제안한 식에 의하여 계산된 값의 1/2 정도이다. Hiroyasu와 Arai가 제안한 분열길이, L_b 는 다음과 같다.

$$L_b = 15.8 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_a}} d_o \quad (1)$$

여기서 ρ_l : 연료밀도

ρ_a : 분위기 밀도

d_o : 노즐분출공 직경

이러한 결과를 본 실험에 적용하면 분열길이는 대략 70 mm이고, 이 영역에서는 분무 선단도달거리가 시간에 직선적으로 비례함을 그림에서 확인할 수 있다. 그러나 본 연구의 대상인 분무는 Hiroyasu와 Arai의 분무와 달리 고압, 간헐분무이므로 실제 분열길이는 앞에서 예측한 값보다 작을 것으로 예상된다.

본 연구는 분무의 분열과정을 가시화하는 것이 목적이므로 확대촬영범위를 노즐에서 70mm 이내의 영역으로 국한하였다.

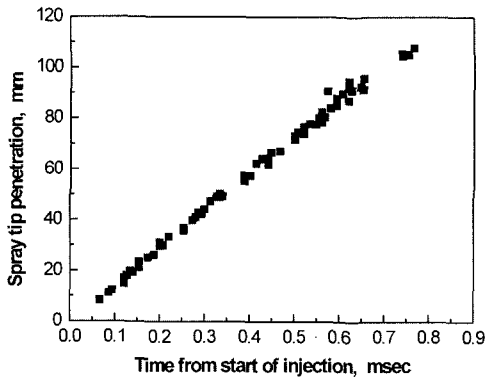
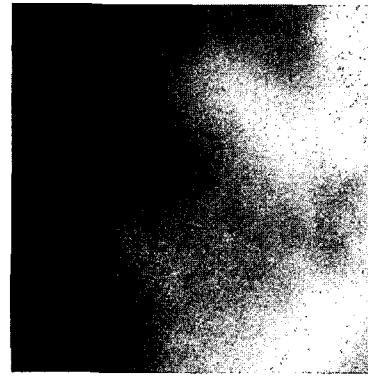


Fig. 3 Spray tip penetration

3.2 산란광과 형광의 확대사진 비교

Fig. 4는 노즐에서부터 20mm 거리에서 산란법과 LIF법을 사용하여 분무를 확대하여 촬영한 사진을 비교한 것이다. 사진이 나타내는 영역의 크기는 $1.2 \times 1.2\text{mm}$ 이다. 사진(b)의 형광사진에서 액주나 액막이 분열하는 것을 볼 수 있으나 사진(a)의 산란 광



(a) scattered image



(b) Fluorescent image

Fig. 4 Comparison of scattered and fluorescent images

사진에서는 이러한 것을 볼 수 없고, 아주 작은 점들로 구성된 큰 형상이 보이기는 하나 미립화 과정을 관찰하기에는 부적합하다. 이런 특징은 액막이나 액적 내에서 여러 번 반사된 고차 산란 광들이 서로 간섭을 일으키기 때문으로 생각된다.⁶⁾ 따라서 확대 촬영에는 형광법만을 사용하였다.

3.3 분무의 확대사진

Fig. 5는 분무 중심축 상에서 노즐로부터 촬영위치까지의 거리, X 를 변화시키면서 LIF법으로 촬영한 분무의 확대사진이다. 촬영시점은 분사시작 후 0.5 ms로 전체사진에서 동일하다. $X = 5\text{mm}$ 일 때 분무는 중심에는 분열이 없는 액주 형이고 액주 표면에서 아주 얇은 파형의액막이 생기는 것을 볼 수 있다. 이보다 바깥쪽에는 액막에서 분열되어 나온 것으로 보이는 아주 작은 액적들이 점점이 관찰된다.

$X = 10\text{ mm}$ 에서는 액주 표면의 액막의 스케일이

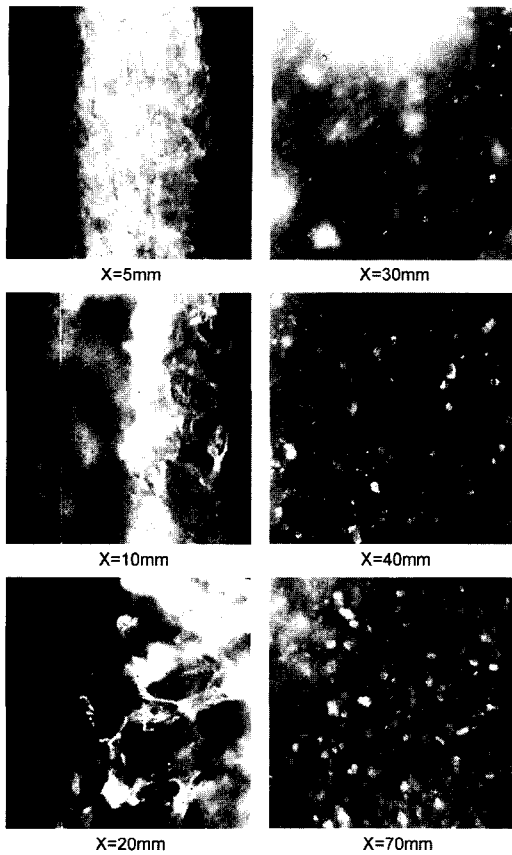


Fig. 5 Magnified images of sprays using LIF. X denotes the location of an image from the nozzle tip. The size of image is 1.2×1.2 mm

커지고 분무 중심에 교란되지 않은 영역이 좁아진다. 그러나 아직 액주가 중심부까지 완전히 분열하여 소멸하였다고 보기는 어렵다.

X= 20mm에서는 거의 모든 영역에서 분열이 활발하여 액주 형상은 더 이상 보이지 않고 액막이 얇게 늘어나 분열하여 작은 액적들로 미립화하는 것이 보인다. X=30mm에서는 액막이나 액주 형상은 보이지 않고 다소 일그러진 크고 작은 액적들이 관찰된다. X= 40 mm 이상에서는 상류에서 생긴 큰 액적이 재미립화하여 생긴 것으로 추측되는 작은 액적들이 관찰된다.

위의 사진으로부터 액적형상을 정량화하기 위하여 동일 조건에서 촬영한 20매의 사진에서 초점이 맞았다고 생각되는 액적을 추출하고 이들 액적을 원반형으로 간주하여 장축직경과 단축직경을 측정

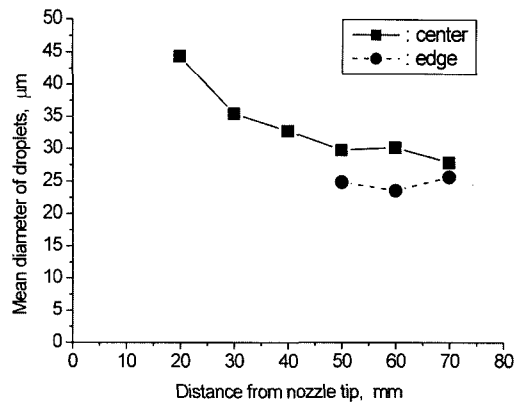


Fig. 6 Variation of mean droplet diameter by the distance from nozzle tip, X

하였다. 액적의 상당직경, d_m 은 원반의 체적과 같은 구의 직경으로 다음과 같이 계산된다.

$$d_m = (a^2 \cdot b)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

여기서 a = 장축직경
b = 단축직경

노즐에서 촬영위치까지의 거리, X의 변화에 따른 액적의 평균직경의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 액주가 소멸한 X = 20mm에서부터 X = 50 mm까지 하류로 갈수록 액적 직경은 감소하고 있고, 이보다 하류에서는 거의 변하지 않는다. 그림에서 edge로 나타낸 값은 분무 가장자리에서 평균직경이다. 노즐에서 거리가 20~40mm에서 edge값이 없는 이유는 매 촬영시마다 분무 중심축 위치가 다소 변하여 분무 중심축과 가장자리의 구별이 모호하기 때문이다. 노즐에서 거리가 50~70 mm에서 edge의 액적의 직경 값은 중심 축에서보다 다소 작으나 큰 차이를 보이지 않는다.

Fig. 7은 원반형 액적의 단축직경/장축직경의 비를 나타낸 그림이다. 그림에서 mv는 평균값을sd는 정규분포의 표준편차이다. 액적들의 직경분포를 정규분포로 생각하면 단축직경/장축직경비, b/a비가 (mv - 2×sd)보다 작은 액적의 비율은 2.25%로 이러한 액적은 거의 없다고 보아도 무방하다. b/a비는 X=40 mm까지는 다소 증가하나 이후에는 거의 일정하게 유지된다.

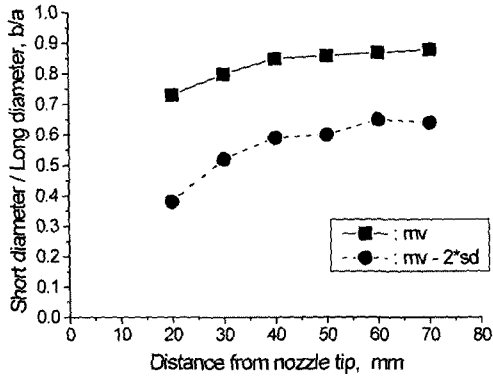


Fig. 7 Variation of short/long diameter ratio by the distance from nozzle tip, X. (mv : mean value, sd : standard deviation)

액적 분열모델인 TAB 모델⁷⁾에 의하면 액적이 공기항력으로 변형되어 b/a비가 0.296보다 작아지면 작은 액적으로 미립화한다. Fig. 7에서 X = 20mm 이상의 영역에서 (mv - 2 × sd)의 값은 0.296보다 크므로 액적의 변형에 의한 분열은 생기지 않는다고 볼 수 있다. 그러나 Fig. 6을 보면 X = 20~50mm 영역에서 액적 평균직경은 감소한다. 이것은 Reitz가 제안한 WAVE모델¹⁾과 같이 액적 표면에 생긴 교란파에 의하여 액적 표면이 박리하여 액적의 크기가 작아지기 때문으로 추론된다.

3.4 산란광과 형광의 동시촬영사진

분무의 미립화 과정을 거시적으로 파악하기 위하여 산란광/형광 동시촬영법을 사용하였다. Fig. 8은 액적의 산란광과 형광을 더블링 프리즘을 사용하여 한 화면의 좌우에 각각 분리하여 찍은 사진이다. 사진의 좌측이 산란광이고 우측이 형광이다. 촬영범위는 노즐에서부터 108mm 떨어진 위치까지의 영역으로 사진의 밑변이 노즐에서 108mm 떨어진 위치이다.

Yeh⁸⁾에 의하면 산란광 강도는 액적들의 표면에 비례하고 형광강도는 액적들의 체적에 비례하므로 사진에서 형광/산란광 강도비가 작을수록 액적 크기가 작아 미립화가 잘 이루어진 영역을 나타낸다.

분사초기인 t = 0.15와 0.25ms의 사진을 보면 산란광 강도가 낮아 형광/산란광 강도비(F/S비)는 크고,

전 영역에서 비교적 균일하다. 이는 분무 전 영역에서 아직 미립화가 활발하지 않기 때문으로 추측할 수 있다.

t = 0.52ms 이후의 사진을 보면 대략 X = 20 mm 이상에서 분무선단 와류⁸⁾ 전까지 분무의 중간부분에서 산란광 강도가 높고 형광강도는 낮아 F/S비가 작아진다. 이것은 이 영역에 미립화된 액적들이 분포하고 있음을 나타낸다. 또한 산란광의 강약이 주기적으로 반복되고 있으나 형광사진에는 이러한 현상이 약하다. 이는 미립화가 정상적이지 않고 주기적으로 변동하고 있는 것을 나타낸다.

한편 분무 선단부의 주변에는 산란광 강도는 아주 강하지만 형광 강도가 작다. 이것은 이 영역에 미립화가 종료된 작은 액적들이 높은 수밀도로 존재하는 것을 나타낸다.

Fig. 9는 Fig. 8의 분무사진의 광강도를 정량화하여 F/S비를 측정된 결과를 나타낸다. 그림에서 F/S비는 X 위치에서 분무의 반경방향의 평균값을 나타낸다. 이 값이 감소하는 것은 액적의 미립화가 진행되고 있는 것을 나타낸다. 그림에서 X = 10~20mm 영역에서 F/S비가 급격히 감소하고 있는데 이러한 결과는 Fig. 5에서 관찰한 바와 같이 이 영역에서 분열이 활발히 일어나고 있기 때문으로 생각된다.

이 보다 하류영역에서는 F/S비가 거의 일정해 이는 액적의 미립화가 거의 발생하지 않는 것을 나타낸다. 분무 선단에 다시 F/S비가 다소 감소하는데 이것은 액적의 분열 때문이 아니고 선단에 발생한 와류 유동에 의하여 이 영역보다 상류에서 생긴 작은 액적들이 이곳으로 많이 이동하였기 때문으로 생각된다.

분사개시 후 촬영시점, t가 변화여도 대체적인 경향은 앞의 설명과 거의 유사하나, t가 커질수록 노즐로부터 F/S비가 감소하는 거리 즉 분열거리가 길어지는데 이는 분사가 진행될수록 액적이 받는 공기항력이 작아져서 분열거리가 다소 길어지는 것을 보여준다.

4. 결론

대기 중에 분사된 비증발 디젤분무를 LIF법을 이용한 확대촬영과 산란광과 형광을 분리하여 동시에

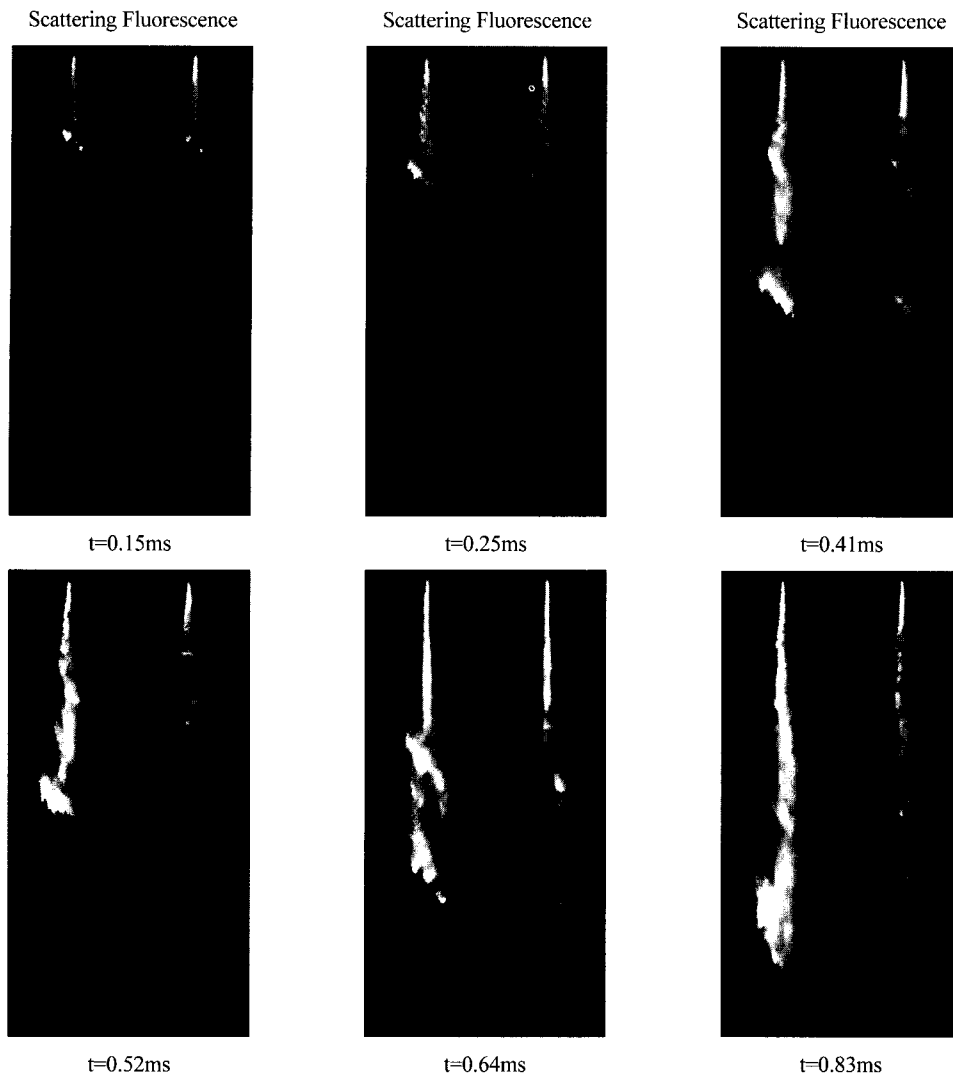


Fig. 8 Instantaneous image pairs of scattering lights (left half) and fluorescent lights (right half). t is the imaging time after start of injection

촬영하는 방법으로 가시화하여 분무내의 분열과 미립화 과정을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 직접 사진 법으로 분무를 개개의 액적을 관별할 정도로 확대 촬영하여 액적의 미립화과정을 해석할 때는 LIF법이 산란법에 비하여 더 유효한 방법이다.
- 2) 분무는 노즐에서 10mm의 영역 내에서는 액주를 형성하고 액주 표면에 교란 파가 생겨 얇은 액막을 형성하고 이 액막이 분열하여 작은 액적을

형성한다.

- 3) 노즐에서 거리가 20mm 이내의 영역에서는 액주 내부에서 생긴 큰 교란파 공기의 항력으로 생긴 액적의 변형으로 인하여 분열된 액적이 생긴다. 이보다 하류에서는 액적의 표면에 생긴 교란파에 의해 표면 박리가 발생하여 액적 크기가 작아진다.
- 4) 분무 선단부 주변에는 산란광은 강하지만 형광/산란광 강도비가 작은 영역이 관찰된다. 이는 아주 작은 액적이 높은 수밀도로 존재하는 것을 나타낸다.

후 기

본 연구는 2001년 한국과학재단 목적기초연구 (R02-2001-01140) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) A. B. Liu, D. Mather, R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays," SAE 930072, 1993.
- 2) H. Yokota, T. Kamimoto, H. Kobayashi, "A Study of Diesel Spray and Flame by Image Processing Technique," Transactions of JSME (B), Vol.54, No.499, pp.741-748, 1987.
- 3) T. Oda, H. Hiroyasu, "Spray Visualization by Laser Sheet Tomography," Transactions of JSME (B) Vol.62, No.599, pp.2861-2860, 1996.
- 4) B. Chehroudi, S. H. Chen, F. V. Bracco, "On the Intact Core of Full-Cone Sprays," SAE 850126, 1985.
- 5) H. Hiroyasu, M. Arai, "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel Engines," Transactions of JSAE, No.21, pp.5-11, 1980.
- 6) Y. H. Won, C. R. Lim, "Impinging Atomization of Intermittent Gasoline Sprays," Transactions of KSAE, Vol.6, No.5, pp.174-181, 1998.
- 7) P. J. O'Rourke, A. A. Amsden, "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE 872089, 1987.
- 8) C. N. Yeh, H. Kosaka, T. Kamimoto, "Fluorescence/Scattering Image Technique for Particle Sizing in Unsteady Diesel Spray," Transactions of JSME (B), Vol.54, No.499, pp.4008-4013, 1993.

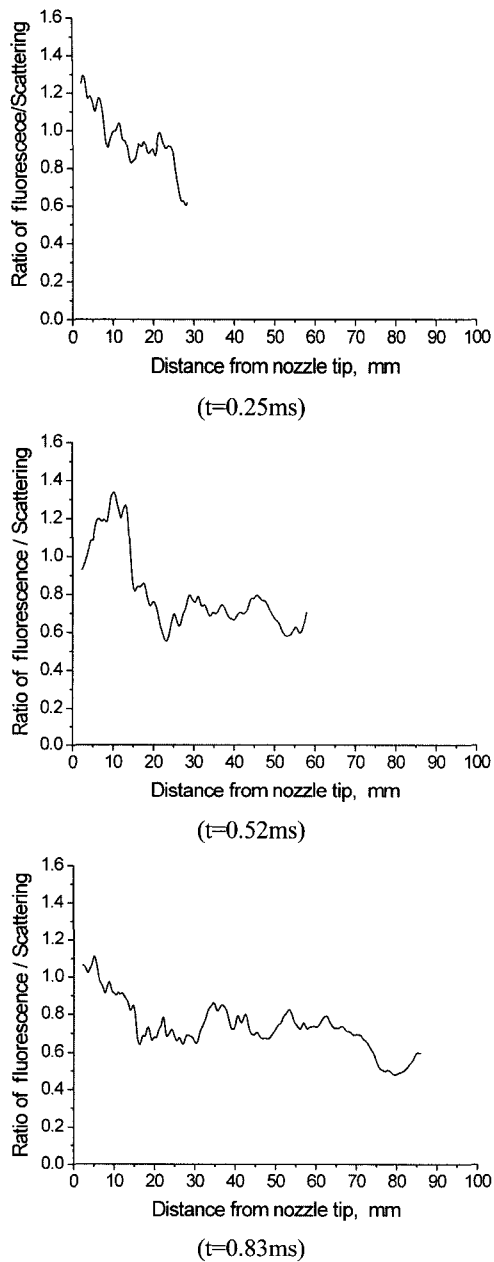


Fig. 9 Variation of the ratio of fluorescence / scattering intensity(F/S ratio) along the distance from nozzle tip, X. (t : time after start of injection)