

증발디젤분무의 공간적 구조해석에 관한 기초 연구

Basic Study on the Spatial Structure Analysis of the Evaporative Diesel Spray

염 정 국
J. K. Yeom

(접수일 : 2010년 3월 2일, 수정일 : 2010년 4월 7일, 채택확정 : 2010년 4월 21일)

Key Words : Branch-Like Structure(지상구조), Exciplex Fluorescence Method(엑시플렉스형광법), Heterogeneous Distribution(불균일분포), Meandering Flow(사행유동), Vortex(와)

Abstract : The purpose of this study is to analyze heterogeneous distribution of branch-like structure at downstream region of inner spray. The previous many studies about diesel spray structure have yet stayed in the analysis of 2-D structure, and there are very few of informations which are concerned with 3-D analysis of the structure. The heterogeneous distribution of droplets in inner spray affects the mixture formation of diesel spray, and also the combustion characteristics of the diesel engines. Therefore, in order to investigate 3-D structure of evaporative spray the laser beam of 2-D plane was used in this study. Liquid fuel was injected from a single-hole nozzle ($l/d=5$) into a constant-volume vessel under high pressure and temperature in order to visualize the spray phenomena. The incident laser beam was offset on the central axis. From the images analysis taken by offset of laser beam, we examine formation mechanism of heterogeneous distribution by vortex flow at the downstream of the diesel spray. As the experimental results, the branch-like structure formed heterogeneous distribution of the droplets consists of high concentration of vapor phase in the periphery of droplets and spray tip of branch-like structure. Also the 3-D spatial structure of the evaporative diesel spray can be verified by images obtained from 2-D measurement methods.

1. 서 론

지금까지의 분무의 연구에서는 Shadow photograph^{1,2)}나 Schlieren법^{3,4)}을 활용한 계측이 많이 행하여졌으나, 이것들은 각 단면의 적산(積算)정보이기 때문에 국소적(局所的)인 평가는 곤란하였다. 그러나 최근 레이저 계측기술의 진보에 따라 레이저 시트광(laser sheet light)을 사용한 2차원 단면촬영이 분무구조해석에 유효하고 LIF법, LII법 및 PIV법 등 다양한 가시화 수법에 이용되고 있다. 한편, 디젤분무는 원래 3차원에서의 현상이기 때문에, 분무의 한 특정영역(분무중심축 영역 등)의 2차원 단면화상만을 이용한 연구로는 실제의 현상 규명이 충분하다고는 할 수 없다. 예를 들면, 상온·고압장

의 연구에서 얻은 분무의 지상구조(枝狀구조, branch-like structure)⁵⁾나 고온·고압에서의 연구에서 얻은 분무액상부의 사행(蛇行, meandering flow)현상⁶⁾은 실제의 분무현상(3차원)의 일부를 나타낸 것이지만, 분무구조 상세에 대해서는 아직 부족한 실정이다. 이러한 이유로부터 3차원 계측을 이용한 연구가 각 분야에서 주목받고 있다. 현재 이용되고 있는 3차원 계측법에는 2대의 카메라를 이용한 스테레오 촬영에 의한 3D-PIV법이나 홀로그래피(holography) 촬영, PDPA법 등이 존재한다. 특히 3D-PIV법의 기술진보는 상당하지만 분무의 중심축 방향으로 충분한 시야를 확보할 수 없는 실정이다. 또한 PDPA법에서 얻은 정보는 대부분이 포인트 계측이기 때문에 비정상분무의 계측에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 통상 분무중심축에 입사하는 레이저 시트광을 반경방향으로 오프셋(offset)하고, 각 단면에서의 정보를 비교·검토하는

염정국(교신저자) : 동아대학교 기계공학과
E-mail : laser355@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7640

것에 의해 분무의 3차원 구조해석을 실시했다. 그러나 각 단면의 화상정보는 동시에 획득할 수가 없기 때문에, 본 연구에서는 3차원 분무구조해석의 첫 단계로서 분무의 2차원 해석(평면이미지)으로 구한 정보를 3차원 구조까지 확장하여 증발디젤분무의 구조해석을 행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 Mie 산란광(Scattering Light)을 이용한 PIV를 위한 연속촬영 광학계

Fig. 1에 본 실험에 사용한 레이저 시트광에 의한 액적 Mie 산란광신호를 이용하는 PIV 광학계를 보인다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저(Spectra-Physics : PIV400)를 사용했다. 본 연구에 이용한 레이저 시스템 PIV400에는 광원으로 하는 Nd:YAG레이저(GCR170)가 2기 설치되어 있고, 발진된 2개의 레이저광은 고주파발생기(Quanta-Ray : HG-2)에 입사되어 제 2고주파(파장532nm)의 레이저광을 방출한다. F10mm 원형빔을 핀 홀(Pin Hole)에 통과시켜 F5mm의 원형빔으로 한 뒤, f15mm의 실린더리칼 렌즈(cylindrical lens)에 의해 타원 단면의 광으로 한 후, f1000mm의 실린더리칼 렌즈에 의해 시트광으로 집광시킨다. 그 결과, 고온·고압 용기내의 측정부에 있어서 폭100mm, 두께 약 0.2mm의 레이저광이 얻어진다. 촬영에는 고해상도 고속 디지털 화상처리 시스템을 이용했다. 실험에 사용한 연료는 n-Tridecane($C_{13}H_{28}$, 순도99%)이며, 주위기체로서는 질소를 충전시켰다.

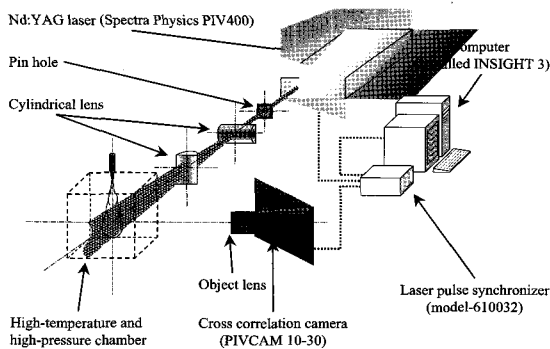


Fig. 1 Schematic diagram of the optical system

2.2 실험조건

Table 1에 본 실험의 조건을 나타낸다. 용기내의 분위기 조건은 실제의 소형·고속 직분식 디젤 기관의 분사개시 초기의 실린더 내 분위기를 모사한

고온·고압의 분위기이다. 분위기 온도 $T_a=700K$, 분위기 압력(배압) $p_a=2.55MPa$, 분위기 밀도 $\rho_a=12.3kg/m^3$ 로 설정했고, 연료분사량은 12mg이다.

Table 1 Experimental conditions

Injection nozzle	Type : Hole nozzle DLL-p	
	Diameter of the hole d_n [mm]	0.2
	Length of the hole L_n [mm]	1.0
Ambient gas	N_2 gas	
Ambient temperature T_a [K]	700	
Ambient pressure P_a [MPa]	2.55	
Ambient density ρ_a [kg/m^3]	12.3	
Injection pressure P_{inj} [MPa]	72	
Injection quantity Q_{inj} [mg]	12.0	
Injection duration t_{inj} [ms]	1.54	

그리고 본 실험에서 사용한 분사장치는 직사각형(矩形)의 분사울을 가지고, 각 촬영시간 ($t/t_{inj}=2/4, 3/4, 4/4$)에 있어서 분사량은 동일하다. 또한 분사된 연료분무 거동의 재현성은 자료 채취 전 확인을 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Mie 산란광 분무 계측

Fig. 2에 분무액상으로부터 Mie 산란신호를 High-speed 비디오 카메라로 촬영한 결과를 나타낸다. 실험조건은 표 1에 나타난 것과 동일하다. 그리고 분무 하류부를 측정영역으로 설정했기 때문에 분사시간 $t_{inj}=0.77\sim 1.54ms$ ($t/t_{inj}=2/4\sim 4/4$)의 이미지를 그림으로 보인다. 레이저시트 광원에 의해 비증발분무의 2차원 단면을 가시화한 연구⁽⁵⁾에서는 “분무 내부는 연료농도가 국소적으로 높은 영역이 존재하는 불균일한 구조로 되어 있다”것을 밝혔다. 이 구조는 Azetsu 등⁽⁷⁾에 의해 “枝狀구조(branch-like structure)”로 특성 지을 수 있다. 한편, 증발장에서 분무는 연료액적의 상변화가 발생하여 기·액 2상이 존재하기 때문에 측정의 어려움이 있다. 그 결과 Fig. 2에 나타난 고속도 비디오에 의해 촬영한 액상이미지에 확실한 枝狀구조는 관측되지 않았지만, 분무중심측 부근에 휘도가 높은 영역이 단속적으로 보이고, 분무 가장자리에는凹凸의 유동을 관찰할 수 있다. 더욱이 이것들은 액상의 성장과 함께 분무 하류부로 이동한다. 그리고 그림 중 점선 원내에 표시한 것처럼 액상의 사행(蛇行) 거동을 알

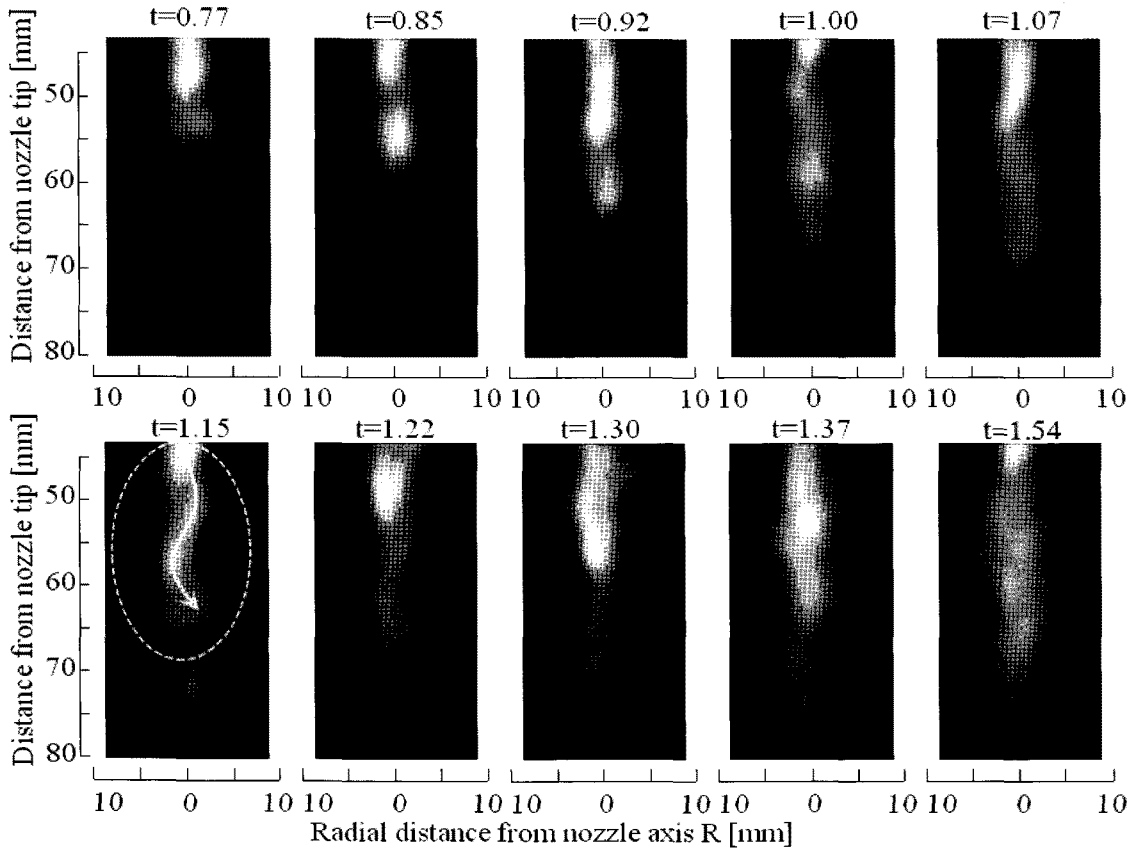


Fig. 2 Temporal change in free-diesel spray taken by Mie scattering method at $p_{inj}=72\text{MPa}$

수 있다. 또한 실제 엔진의 실린더 내와 같은 증발장에 있어서는 대규모 와구조에 의한 액적의 미립화나 분급작용이 국소적으로 연료액적의 증발을 촉진시키고, PM(particulate matter)배출의 원인인 분무연료의 불균일성을 유발한다. 뿐만 아니라 연료증기의 농도로부터 기체의 점도는 변화하기 때문에 연료와 주위기체와의 전단력은 동일하지 않다. 그 결과 증발분무의 대규모 와구조는 비증발분무와 비교해 복잡한 구조를 나타낸다고 생각된다. 따라서 분무의 액상이 사행하고 있다고 하는 표현은 2차원 단면상의 현상론이고 사행현상의 발생 및 거동에 대해서 보다 상세한 해석을 실시할 필요가 있다.

3.2 엑시플렉스 형광법을 이용한 분무 계측

Fig. 3에 촬영범위(視野)와 레이저 입사위치를 나타낸다. 레이저 시트광을 분무 중심축으로부터 2.5mm(A단면), 5.0mm(B단면) 오프셋한 위치에서 촬영을 행하였다. 이 이후 중심으로부터 2.5mm의 위치를 축 A 및 A단면, 5.0mm의 위치를 축 B 및 B단면으로 한다. 촬영영역은 Takahashi⁽⁶⁾의 연구결과에서 정의된 액상길이보다 하류의 위치로 설정했다.

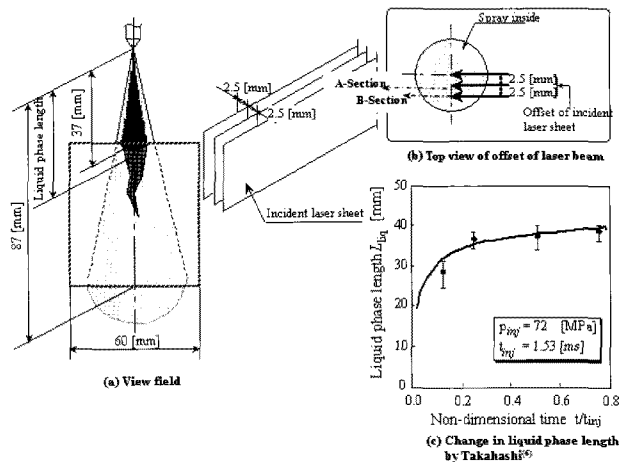


Fig. 3 Schematic diagram of measurement region

Fig. 4에 엑시플렉스 형광법에 의해 얻은 분무 중심축선 상의 2차원 단면화상을 나타낸다. 중심축선의 2차원 단면으로부터 중심으로부터 2.5mm 오프셋한 축 A영역에서는 액상과 기상의 경계면 근방에서의 화상을 얻을 수 있었고, 이로부터 5.0mm 오프셋한 축 B영역에서는 기상의 분포만을 얻을 것으로 예측되고, 그 결과를 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 5-(a)에 Fig. 4에 나타낸 축 A의 위치(중심으로부터

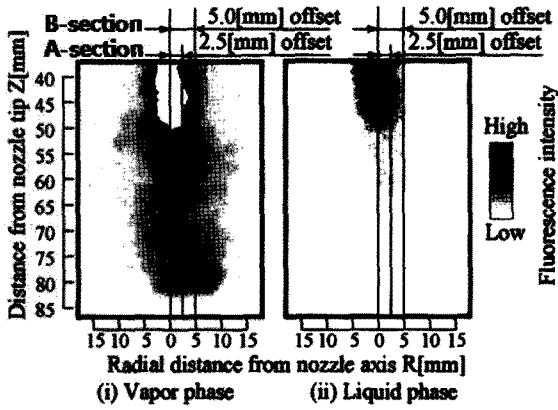


Fig. 4 Image at the center region of the spray⁸⁾
 ($p_{inj}=72$ [MPa], $Q_{inj}=12$ [mg], $r_a=12.3$ [kg/m³], $T_a=700$ [K])

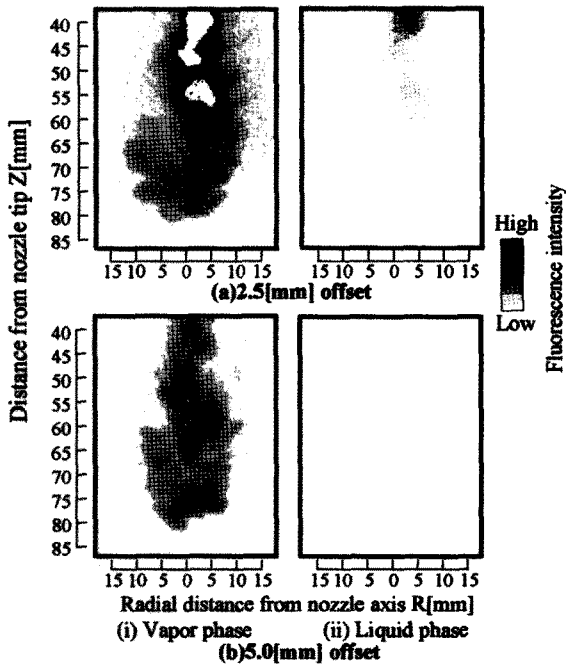


Fig. 5 Image of 2.5 [mm] and 5.0 [mm] offset from spray center at $t=1.54$ [ms] from injection start⁸⁾

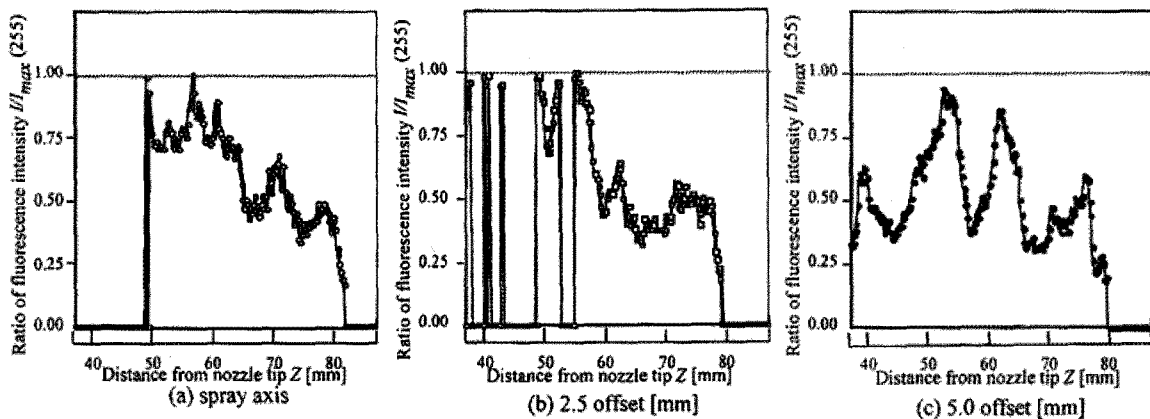


Fig. 6 Relative fluorescence intensity of vapor phase at axial direction of spray

2.5mm의 위치)에 레이저 시트광을 입사해서 얻은 분무 2차원 단면화상을 나타낸다. Fig. 5-(b)에 중심으로부터 Fig. 4에 나타난 축 B의 위치(중심으로부터 5.0mm의 위치)에서의 2차원 단면화상을 나타낸다. Fig. 4에 나타난 분무중심축상의 화상에 대해서는 액상의 사행거동은 거의 관측할 수 없지만 기상은 분무외곽부[외주(外周), 가장자리]에 몇 개의 요철부가 존재하고, 중간 정도의 휘도를 가진 영역이 하류부로 진행함에 따라 사행의 거동특성을 보이고 있다. 중심부의 흰색의 영역은 액상존재 영역과 일치하고 있지만, 하류에 고휘도의 영역이 나타나고 있고, Fig. 2의 분무액상의 연속화상에서 관찰된 고휘도 영역의 연속적인 출현과 대응하는 것을 알 수 있다. 한편, 액상과 기상의 경계 부근을 통과하는 축 A의 위치에 레이저 시트광을 입사해 얻은 화상 Fig. 5-(a)에서는 기상에 고휘도의 영역이 연속적으로 나타나는 등 분무 중심축상의 화상과 동일한 경향이 얻어졌지만, 중심에서는 봉상(棒狀)이었던 액상이 극단적으로 사행거동 특성을 보이고 있다. 더욱이 5.0mm 오프셋한 축 B에 있어서의 화상 Fig. 5-(b)에서는 액상은 거의 관측되지 않는다. 그리고 (a)의 기상 화상과 비교해 면적이 감소하고 전체적인 휘도치도 낮지만, 분무외곽부의 요철이 선명하고 분무중심축상의 연속적인 휘도의 변화도 급격하다. 이것으로부터 분무외곽부에서는 와구조(渦構造)에 의해 국부적인 확산·혼합이 진행되고 불균일한 연료증기가 형성되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 이것은 액상의 사행현상을 단편적으로 나타낸다고 할 수 있다. 이상의 결과로부터 분무중심축 단면촬영에서 획득한 비증발분무의 지상구조(枝狀構造)와 증발분무의 액상 사행거동 특성은 3차원적으로 조사할 필요가 있다고 판단된다.

Fig. 6에 Fig. 4에서 얻은 각 화상에 있어 최대강도로 정규화한 상대형광강도의 각 화상 중심축상의 분포를 나타낸다. 분무중심축을 포함하는 평면 (a)에서는 하레이션(halation)영역 ($Z \leq 50\text{mm}$)을 초과하면, 형광강도는 분무 하류부를 향해서 서서히 감소한다. (b)의 상류부(약 $Z \leq 55\text{mm}$)에서는 하레이션 영역의 존재 때문에 상대형광강도의 변화는 크지만 이것을 통과하면 형광강도 변화는 (a)의 경우와 거의 유사하다. (c)의 경우는 하레이션 영역이 존재하지 않기 때문에 상대형광강도의 불연속 부분은 나타나지 않고, 형광강도는 위치에 따라 변화를 보인다. 즉, 기상부의 농도분포가 장소에 의해 차이가 있다. 이상의 경향으로부터 분무 축방향의 분무내부의 분무액적군의 분포와 기상부의 농도 형성에는 밀접한 관계가 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에 분무 중심축을 포함하는 단면에서 2.5mm 오프셋한 경우의 기상 화상을 대상으로 하여, 노즐로부터 거리 Z 가 각각 45mm, 50mm, 55mm, 60mm, 65mm 경우의 반경방향에 있어서의 상대형광강도 변화를 보인다. 이 상대강도는 A점에 있어서 최대형광강도로 정규화하고 있다. 이것들의 거리는 Takahashi⁽⁶⁾의 실험결과에서 얻은 운동량

교환길이 약 40mm를 기준으로 해 결정했다. 그림 (a)에서는 하레이션 영역을 중심으로 분무 반경방향으로 진행함에 따라 형광의 강도는 감소하고, 거의 대칭으로 분포한다. 그림(b)에 있어서는 하레이션 영역이 존재하지 않기 때문에 (a)와 같은 강도의 불연속영역은 없으나, 형광강도는 분무축에 대해 비대칭의 분포를 보인다. 또한, 그림(c)에서는 다시 하레이션 영역이 나타나지만 (b)와 같이 비대칭 분포를 보인다. 그림 (d) 및 (e)의 경우는 기상부의 선단부가 주위기체의 저항을 받아 분무 반경방향으로의 폭이 증가하고, 상대형광강도의 최대치가 분무 중심축으로부터 떨어져위치하며, 그 분포는 역시 비대칭을 보인다. 이러한 현상은 분무액상부의 사행(蛇行)거동에 대응한다.

3.3 PIV법을 이용한 분무 계측

Fig. 3에 나타낸 측정단면에 있어서 분무액상의 산란광 화상에 PIV 처리를 실시하여 얻은 결과를 이용해 분무 3차원 거동의 해석을 행한다.

Fig. 8에 전술한 Fig. 3의 A단면에 있어서 분무액상의 화상을 보인다.

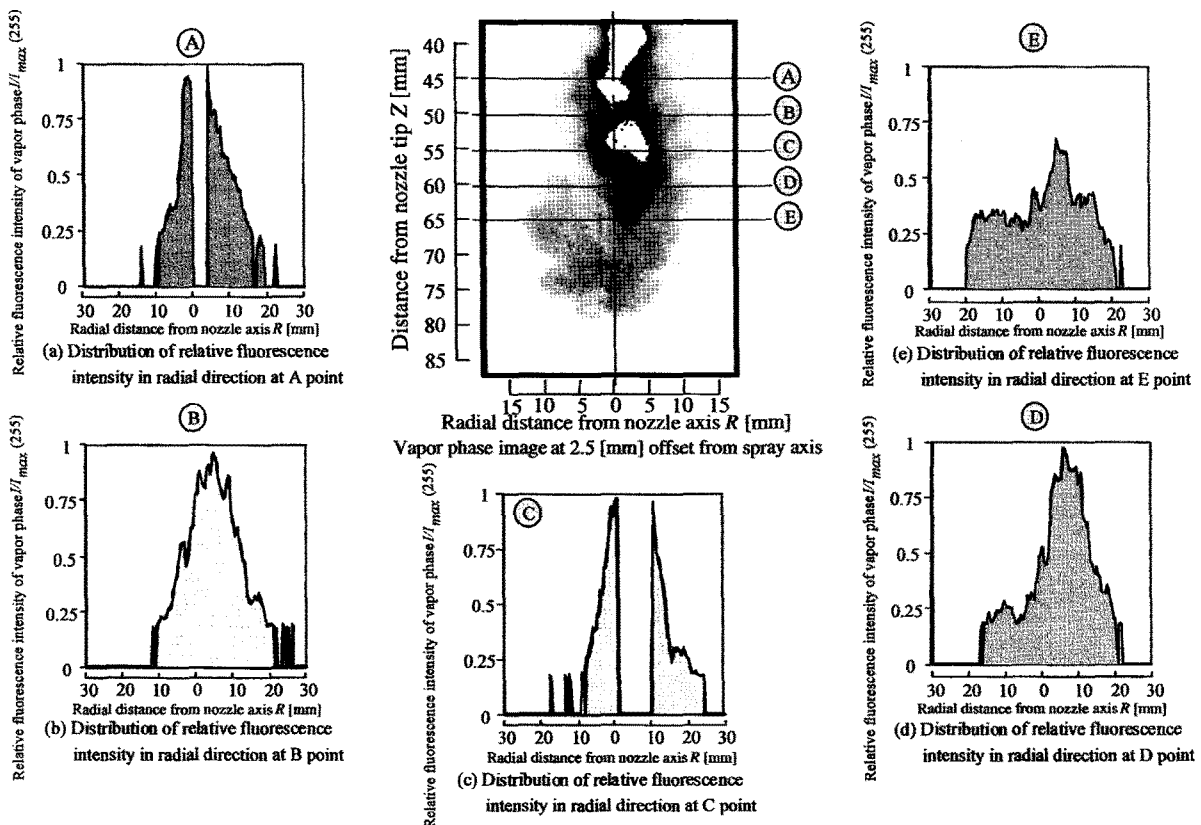


Fig. 7 Relative fluorescence intensity of vapor phase at radial direction of spray

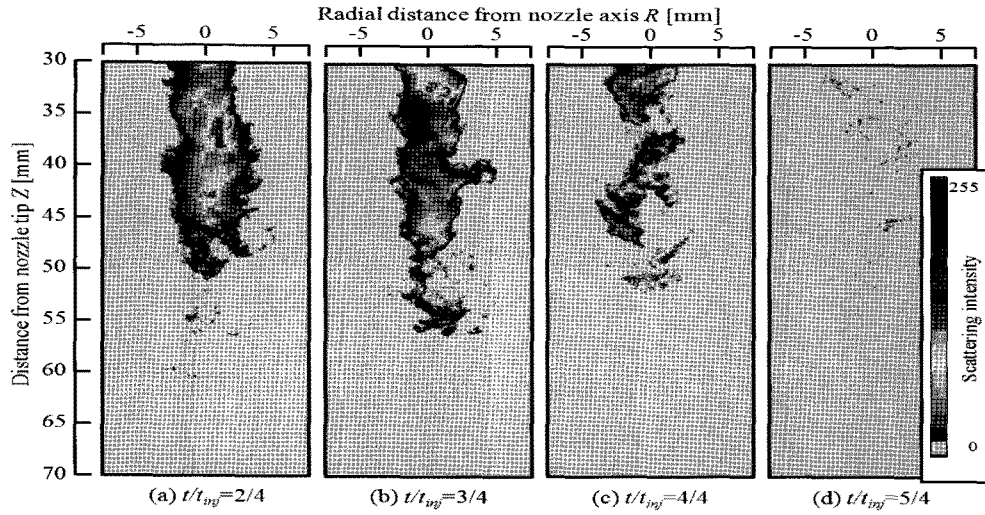


Fig. 8 Temporal change in free-diesel spray taken by Mie scattering method at offset 2.5[mm]

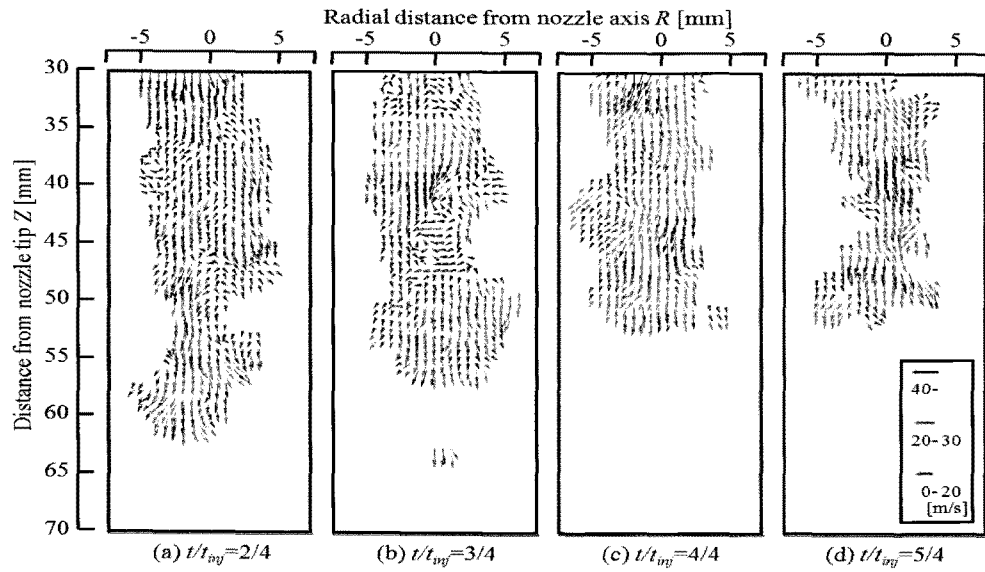


Fig. 9 Calculated results of velocity taken by PIV at offset 2.5[mm]

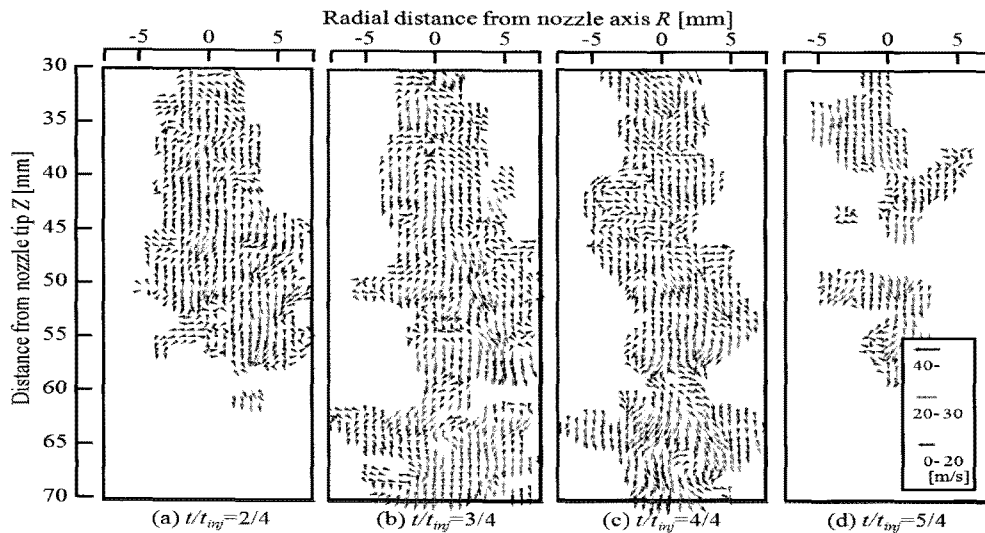


Fig. 10 Temporal change in free-diesel spray taken by Mie scattering method at offset 5.0[mm]

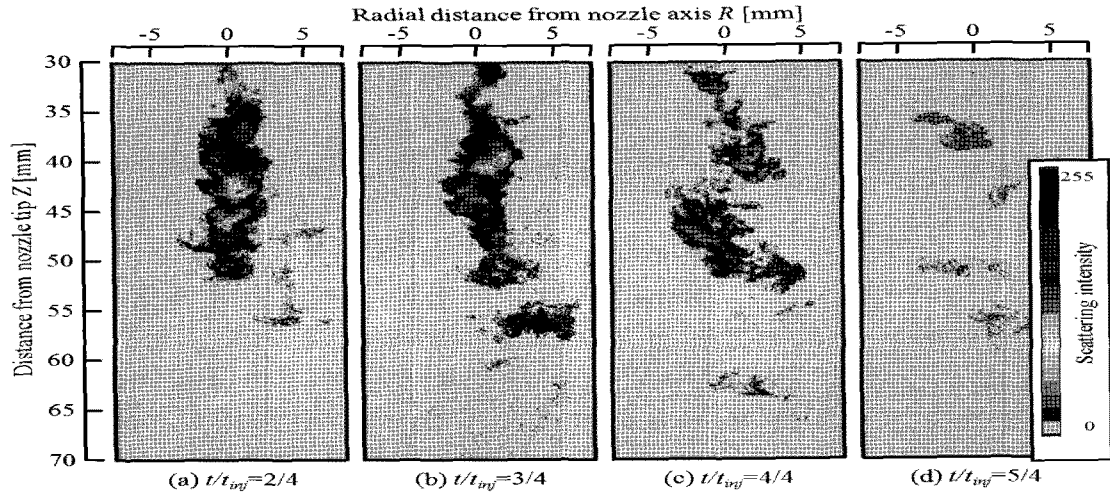


Fig. 11 Calculated results of velocity taken by PIV at offset 5.0[mm]

그리고 Fig. 9에는 Fig. 8의 화상에 PIV 처리를 해 얻은 속도분포이고, 동일하게 Figs. 10, 11에 B단면에 있어서 분무액상화상과 속도분포를 나타낸다.

A단면의 액상휘도분포를 나타낸 Fig. 8에서는 시간의 경과와 함께 액상의 사행이 현저하게 되고, 분무선단 부근은 연료액적의 증발이 진행됨을 알 수 있다. 또한 분무 중심축상의 휘도분포와 비교해 액상분포의 사행형태를 확실히 볼 수 있다. 그리고 Fig. 9에 나타낸 A단면의 속도분포 그림에서는 분무외곽부의 액상가지구조와 유사한 유동은 관측할 수 없었다. 전체 유동의 방향은 분무 하류로 향하고 있지만 분무외곽부 뿐만이 아니고 중심축 부근에서도 와와 같은 유동을 볼 수 있다. 어느 시간에 있어서도 액상전체가 사행하는 것과 같은 결과는 얻을 수 없고, 국부적으로 사행한 유동이 관측되어진다. 이 국부적인 사행은 와구조와 주변 액적군 및 주위 기체와의 혼합에 의해 형성된다고 판단된다. 주위 기체와의 혼합이 활발하다고 생각되는 B단면에서의 액상휘도분포를 나타낸 Fig. 10에서는 중심축과 A 단면에 비해 액상이 불연속적으로 분포해 있고 사행형상에 관해서도 시간의 경과와 함께 크게 된다. 또 그림 Fig. 10-(c)의 $t/t_{0j}=4/4$ 의 화상에서는 2개의 경사진 액상이 분무 중심축에 걸쳐 존재한다. 그리고 B단면에서 속도분포를 나타낸 Fig. 11에서는 벡터의 방향변동이 심하고 주위기체와의 혼합이 활발히 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 A 단면처럼 액상전체가 사행하는 것과 같은 유체가 사행하는 유동은 볼 수 없었다. 또한 사행거동은 관측할 수 없다. A, B 양단면에 있어서 액상전이 가장 강하게 나타난 B 단면에서는 시간의 경과 함께 사행형

태가 분열하고 있다. 이 액상의 단면형상은 나사의 단면과 비슷하다. 이 결과로부터 분무의 확산에 영향을 미치는 와가 증발분무의 액상과 기상 사이의 영역에 걸쳐 연속적으로 존재하고, 그 결과 분무의 발달이 사행 거동의 특성을 나타낸다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온·고압장에 있어 디젤자유분무의 3차원 구조해석을 명확히 하는 것을 목적으로 하였다. 연료와 주위기체와의 혼합이 활발히 진행되는 분무하류부에 초점을 두고 Mie scattering법, Exciplex 형광법 및 PIV법에 의해 실험해석을 실시하였고, 그 결과는 아래와 같다.

- 1) 비정상 증발분무에 있어서도 비증발분무의 경우와 같이 분무내부의 액적군의 가지구조(枝狀構造)에 기인하는 농도의 불균일분포가 기상부에 존재한다.
- 2) 비정상 증발분무에 있어서 기상부의 3차원적 분무구조는 반경방향을 향해 서서히 증발하여 사라진다. 그리고 농도분포는 비대칭으로 존재하며, 이것은 분무의 사행(蛇行)현상에 대응한다.
- 3) 증발분무를 대상으로 레이저 입사광의 오프셋에 의해 구한 2차원 분무화상으로 3차원의 공간적 분무구조 해석은 가능하다.

후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. Jang Y. J. and Kamimoto T., 1988, "A Study on the Diesel Spray by Means of Image Analysis of Shadow Photographs", Trans. of the KSME(B), Vol. 12, No. 2, pp. 319~327.
2. Jang Y. J., Park H. J. and Kamimoto T., 1990, "A Study on the Diesel Flame by Means of Image Analysis of Shadow Photographs", Trans. of the KSME(B), Vol. 14, No. 5, pp. 1234~1243.
3. Nishida K., Hiroyasu H. and Suzuki M., 1988, "Analysis of Fuel Jet and Vaporizing Spray by Combined Schlieren and Computed Tomographic Technique", KSME/JSME THERMAL and FLUID Engineering Conference, Vol. 1, pp. 423~428.
4. Lee S. W., Lee J. S. and Kuk K., 2002, "Effect of Convex Wall Curvature on Three-Dimensional Behavior of Film Cooling Jet", KSME International Journal(JMST), Vol. 16 No. 9, pp. 1121~1136.
5. Dan T., 1996, "Turbulent structure and formation mechanism of diesel sprays", Doshisha University Doctoral Thesis, Japan.
6. Takahashi T., 1999, "Analysis on the vaporization, dispersion and mixing process in unsteady diesel spray", Doshisha University Master's Thesis, Japan.
7. Azetsu A. et al., 1990, "A Study on the Structure of Diesel Spray(2-D) Visualization of the Non-Evaporating Spray", COMODIA90(in Kyoto), pp. 199~204.
8. Yeom J. K. et al., 2007, "A Study of the Mixture Formation Process of a Diesel Spray Under Phase Change", KSME International Journal(JMST), Vol. 21, pp. 1120~1128.