

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.7.529

비정상 증발디젤분무의 측정과 그 응용해석

염정국[†] · 박종상* · 김시범* · 정성식* · 하종률*
(2008년 2월 11일 접수, 2008년 4월 20일 수정, 2008년 6월 22일 심사완료)

Advanced Analysis and Measurement of the Unsteady Evaporative Diesel Spray

Jeongkuk Yeom, Jongsang Park, Sipom Kim, Sungsik Chung and Jongyul Ha

Key Words: Disturbance(흐트러짐), Evaporative Spray(증발분무), Exciplex Fluorescence Method(엑시플렉스 형광법), Fractal Analysis(프랙탈 해석), Mixture Formation Process(혼합기형성과정)

Abstract

The characteristics of combustion process in an internal combustion engine are affected by the mixing process between injected fuel and ambient gas. Therefore, it is necessary to understand the mixture formation process of diesel spray. In this study, the spray structure was visualized by the exciplex fluorescence method, which can provide the simultaneous 2-D images of vapor and liquid phase in inner spray. For accurate investigation, the liquid-phase images were recorded with a 35mm still camera and CCD camera. Consequentially, it could be confirmed that the high-concentration vapor phase is formed in the region of spray tip and the edge of the liquid phase where droplets exist in the evaporating diesel spray, and the formed vapor is spread by diffusion. Also, the distribution of vapor is determined by the motion of droplets that exist in the edge of the liquid phase and the spray-tip region.

———— 기호설명 ————

1. 서론

- p : 분사압력, MPa
- R : 반경방향 거리
- T : 주위온도, K
- Z : 노즐로부터 거리, mm

그리스문자

- μ : 점성, N·s/m²
- ρ : 주위기체 밀도, kg/m³
- σ : 표면장력, N/m

하첨자

- a : 주위기체
- inj : 분사

디젤기관에서 배출되는 유해배출성분인 NO_x (Nitrogen oxides)와 PM(Particulate matter)은 기관 실린더내의 혼합기 분포에 의해 그 생성이 지배된다. 이 때문에 그 유해배출물을 저감하기 위해서는 연소의 전단계인 혼합기 분포 및 그 생성과정의 해석은 매우 중요하다. 소형 고속직분식 디젤기관에서는 노즐로부터 분사된 연료가 미립화, 증발, 확산 그리고 혼합의 과정을 거쳐서 혼합기를 형성한다. 이 과정에서 연료는 액체에서 기체로 상변화를 동반한다. 이 때문에 분무의 혼합기 형성과정을 해석하기 위해서는 액상과 기상을 동시에 분리하여 측정하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 디젤분무를 대상으로 Melton⁽¹⁾ 등이 제안한 엑시플렉스(Exciplex) 형광법을 이용하여, 분무의 액상과 기상을 동시에 2차원분리해서 가시화촬영을 행하였다. 증발 디젤분무에 대한

[†] 책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학부
E-mail : laser355@dau.ac.kr
TEL : (051)200-7640 FAX : (051)200-7656
* 동아대학교 기계공학부

연구^(2,3)는 많이 있지만 본 연구에 있어서는 엑시플렉스 형광법을 이용하여 획득한 이미지에 대해서 3가지의 화상응용해석을 실시하여 그 측정법 및 이미지의 이용도를 높이는 것이다. 또한 이러한 진보된 화상해석을 통하여 비정상증발디젤분무의 혼합기형성과정에 대한 정보를 얻고자 한다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 고온·고압 정용용기(Constant volume chamber, CVC)

그림 1에 본 실험에 사용한 고온·고압용기의 개략을 나타낸다. 용기의 재질은 SS41이고, 설계압력은 3.4MPa, 최대사용압력은 3.0MPa이다. 고

Table 1 Fuel properties

	n-Tridecane (C ₁₃ H ₂₈)	Naphthalene (C ₁₀ H ₈)	TMPD (C ₁₀ H ₁₆ N ₂)
Mass fraction [%]	90.0	9.0	1.0
Boiling point T _b [K]	509	491	533
Density(293K) ρ [kg/m ³]	756	-	-
Viscosity(293K) μ [N·s/m ²]	1.88 × 10 ⁻³	-	-
Surface tension σ [N/m]	26.13 × 10 ⁻³	-	-
Critical pressure p _{cr} [MPa]	1.72	3.97	3.32
Critical temperature T _{cr} [K]	677	748	741
Critical density ρ _{cr} [kg/m ³]	240	314	-

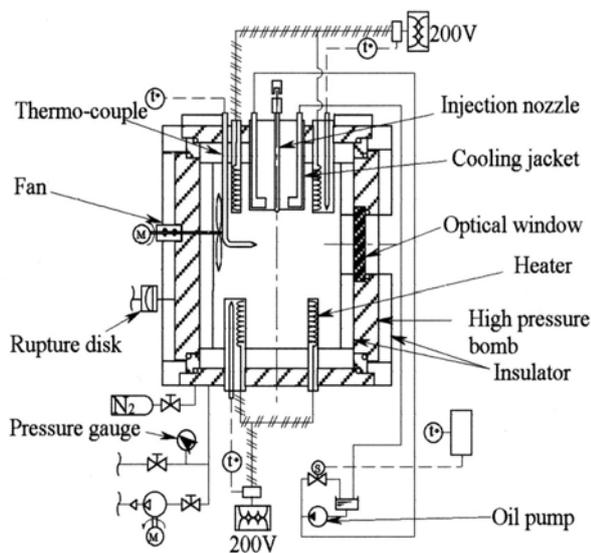


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

압용기에는 레이저 시트(Sheet)광 입사 및 관측용 유리창(F120, t45)이 서로 직각이 되도록 설치되어 있다. 유리창은 자외선의 투과성 및 내열성을 고려해서 합성석영유리로 제작하였고, 또한 입사 레이저 광의 감쇠를 막기 위하여 무반사 코팅을 하였다. 용기 내 체적은 분사된 분무체적보다도 훨씬 크므로 분무에 대한 용기 벽의 영향은 무시할 수 있다.

표 1에 엑시플렉스 형광법에 사용한 시험연료의 물성치들을 나타낸다. 시험연료로 n-Tridecane(순도 99%, C₁₃H₂₈) 90wt%, 나프탈렌(순도 99.9%) 9wt% 및 TMPD(순도 98%) 1wt%를 예혼합한 것을 사용했다.^(1,4,5) 또한 나프탈렌은 공기 중에 산화하지 않지만, TMPD의 산화를 막기 위하여 시험연료의 혼합 및 보존은 질소분위기 중에서 실시하였다.

본 연구에서는 고온·고압용기 중에 ECD-U2 커멘레일(Common rail)식 연료분사장치를 이용하고, 고온·고압분위기 중에 연료를 단발분사해서 증발분무를 형성시켰다. 촬영광학계의 개략을 그림 2에 나타낸다. Nd:YAG 레이저(파장 :355nm)에서 발진하는 도넛모양의 빔을 3장의 실린드리컬 렌즈(Cylindrical lens)로 폭 50mm, 두께 0.2mm의 시트 빔(Sheet beam)으로 만들어 분무중심축에 입사시킨다. 이것에 의해 얻어진 2차원 단면화상을 다이크로익 미러(Dichroic mirror: D.M.) 및 간섭필터(Band pass filter)를 이용해 분광한 후 이미지 인테시파이어(Image intensifier)로 광을 증폭시켜 CCD 카메라에 결상하여 CPU에 저장한다.

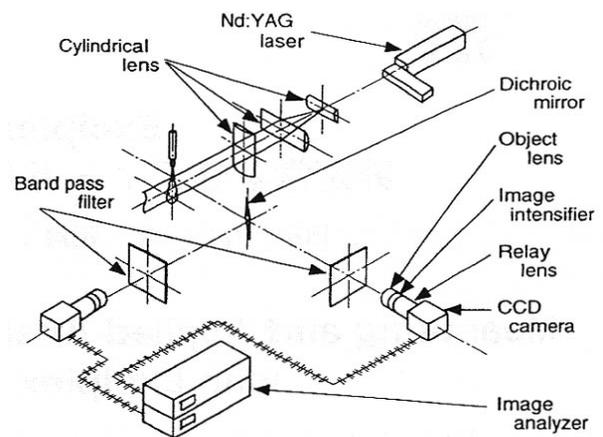


Fig. 2 Schematic diagram of laser sheet optical system and photography system

Table 2 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]		22, 42, 72, 112	
Injection quantity Q_{inj} [mg]		12.0	
Injection duration t_{inj} [ms]		2.82, 1.98, 1.54, 1.20	

사한 고온·고압의 분위기이고, 분위기온도 $T_a=700K$, 분위기압력(배압) $p_a=2.55MPa$ 및 분위기 밀도 $\rho_a=12.3kg/m^3$ 로 했다. 분위기가스로는 연료의 착화 및 형광제의 산화를 방지하기 위해 고순도 질소가스(순도 99.9%)를 이용했다. 분사노즐은 단공 홀 노즐이고, 홀 직경 및 홀 길이는 각각 0.2mm, 1.0mm($l/d=1.0mm/0.2mm$)이다. 분사압력은 $p_{inj}=72MPa$, 분사기간 $t_{inj}=1.54ms$ 로 하여 촬영을 행하였다. 또한 분무의 재현성에 대해서는 실험 전에 충분히 확인을 하였고, 그 결과 충분한 재현성을 얻었다.

3. 디젤 자유분무의 해석

3.1 엑시플렉스(Exciplex) 형광법에 의한 해석

그림 4에 분사압력 $p_{inj}=72MPa$ 인 경우의 엑시플렉스 형광법으로 얻은 자유분무의 2차원단면화상을 나타낸다. 그림 4에 나타난 바와 같이 분무상류부에서 저휘도(低輝度)의 증기가 분무반경방향으로 퍼져있음을 알 수 있다. 이것은 노즐에서 고속으로 분사된 연료가 정지 상태인 분위기기체와의 접촉면에서 속도차로 인해 발생하는 저항력인 전단응력($\tau=\mu du/dy$) 발생에 의해 미립화의 촉진 및 증발이 활발히 일어나고 있는 것을 나타낸다. 또한 분무가 노즐선단 약 $Z=40mm$ 부근에서 분무의 반경방향으로 성장함과 함께 분무주류부에서 분무의 사행(蛇行, Meandering flow)이 시작되고 있다. 이러한 결과로부터 증발분무에 있어서 혼합기형성은 주로 분무 하류부에서 이루어지고 있음을 알 수 있다.

3.2 프랙털해석(Fractal analysis)을 이용한 분무의 흐트러짐(Disturbance) 평가

상술(3.1절)한 분무구조의 해석에 대해서는 엑시플렉스 형광법은 유용한 수단이다. 그리고 엑시플렉스 형광법에 의해 얻은 화상에 대해 프랙털해석을 적용함으로써 혼합기형성에 있어서 중요한 요소인 분무의 흐트러짐 평가를 행하는 것이 가능하다. 여기서 프랙털해석에 대해서 설명하고자 한다.

그림 5의 왼쪽에 나타난 곡선은 코흐 곡선(Koch curve)이라고 하며, 선분(a)를 3등분하고 3

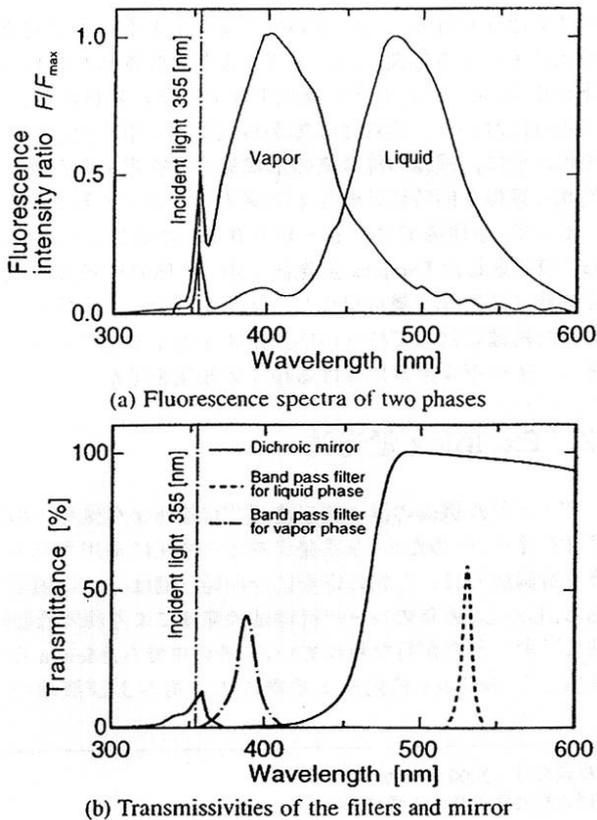


Fig. 3 Fluorescence spectra of vapor and liquid phases and transmittance of filters and mirror

그림 3-(a)에 기상 및 액상에서 얻은 형광 스펙트라를, 3-(b)에 D.M. 및 간섭필터의 분광특성을 보인다.

2.2 실험조건

표 2에 본 연구의 실험조건을 나타낸다. 용기 내의 분위기조건은 실제 소형 고속직접분사식 디젤기관의 분사개시 때의 실린더 내 분위기를 모

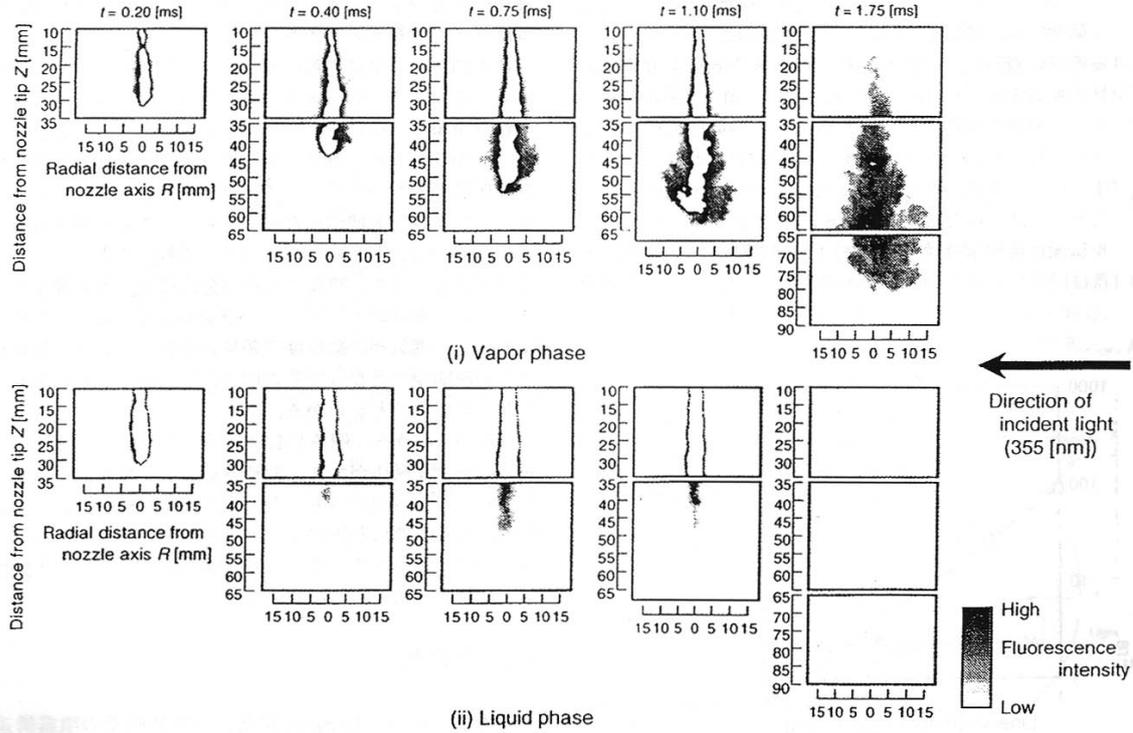


Fig. 4 Temporal change in the free spray images taken by exciplex fluorescence method ($p_{inj}=72$ [MPa], $Q_{inj}=12.0$ [mg], $T_a=700$ [K])

등분 중 중간부분을 밀변으로 하는 정삼각형을 그리고 그 밀변을 제거하면 그림 (b)와 같이 된다. 그림 (b)중의 각 선분에 대해서 동일한 작업을 실시하면 그림 (c)와 같이 되고, 이 작업을 반복하는 것에 의해 그림 (d)와 (e)로 된다. 이 곡선들은 (e)곡선의 1/3 부분을 선택하여 크기를 3배 하면 그림 (d)와 동일한 모양으로 되는 자기상사성(自己相似性)을 가지고 있다. 일반적으로 자기상사성을 가지고 있는 도형을 “프랙털도형”이라 한다. 그림 (a)에서 (e)의 곡선에 대해서 (a)와 동일한 길이 l 의 선분 크기를 비교하면 (a)~(e) 곡선 모두 길이 l 의 선분과 양단(兩端)이 일치한다. 다음으로 1/3 길이의 선분으로 각 곡선을 시작단과 끝단까지 선분을 따라 그 길이를 측정하면 (a)에서는 3회 측정하여야 하지만 (b)부터 (e)에서는 4회 측정으로 전체를 잴 수 있다. 선분의 길이를 1/9로 하면 (a)에서는 9회, (b)에서는 12회 그리고 (c)~(e)에서는 16회로 되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 (a)에 있어서는 선분의 길이와 측정하는 횟수가 반비례하는 것에 대해서 (e)와 같이 복잡한 곡선에서 측정회수는 선분 길이의 지수승(指

數乘)에 반비례한다. 이 측정결과를 그림 5의 오른쪽 부분에 나타내었고 이러한 해석 기법을 프랙털해석이라 한다. 결과에 나타난 식 중에 l 의 지수는 “프랙털차원”으로 불리며 형상의 복잡함을 나타내는 지표이고, 이 값이 클수록 많은 요철을 갖는 형상으로 된다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 각 분사압력의 무차원시간 t/t_{inj} 가 약 0.75로 되는 기상분무를 대상으로 노즐선단에서부터 거리 $Z=35$ mm 이상 하류영역 증기 분무를 대상으로 그 분무 외곽곡선(외주(外周), 가장자리)의 길이가 $l=1, 3, 5, 10$ 및 15 mm의 선분에 몇 배에 해당하는 가를 측정했고 그 결과를 그림 6에 나타낸다. 분사압력의 상승에 따라 분무의 흐트러짐이 증가하고, 동시에 그 외형의 형상이 더욱 복잡하게(흐트러짐이 심화) 되는지를 확인하는 것이 본 해석의 목적 이었다.

각 분사압력 대하여 평균치로 얻은 결과를 그림 6에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 프랙털차원은 각 분사압력에 관계없이 하나의 값 약 1.1로 정리 할 수 있고, 이것은 각 분사압력에 관계없이 분무는 거의 동일한 정도의 요철형상(외

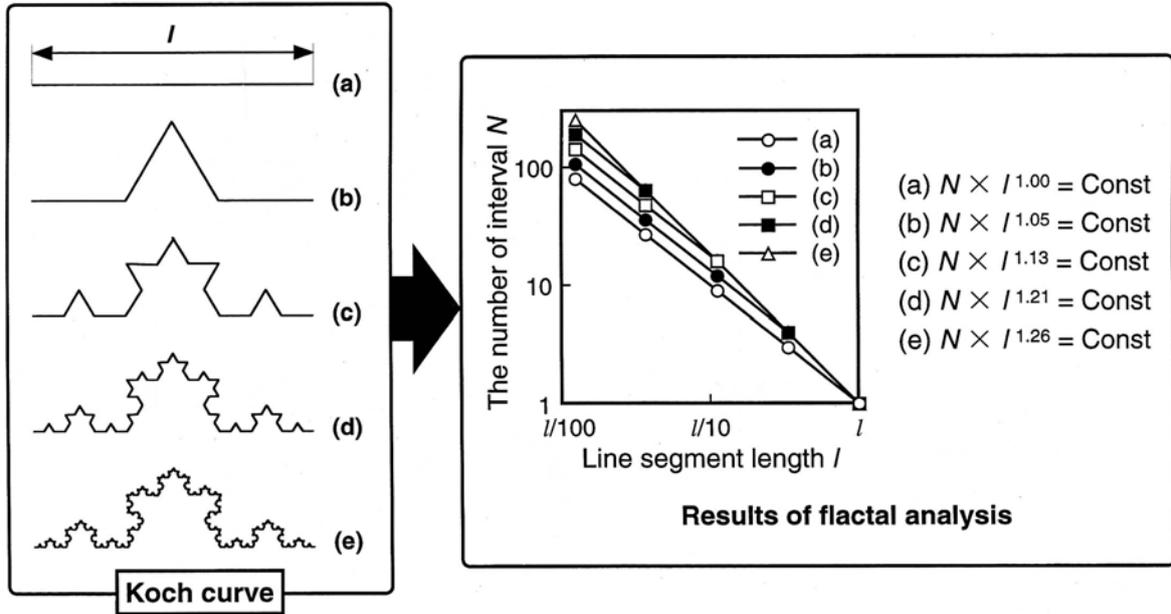


Fig. 5 Schematic diagram for fractal analysis⁽⁴⁾

주 흐트러짐)을 갖는 것을 보여주고 있다. 이러한 결과로부터 분사압력의 변화는 와(渦, Vortex)구조가 분무성장을 지배하는 영역에 있어서 분무외형을 결정하는 대규모와의 공간적인 크기와 분포에 대해서 영향을 미치지 않는다고 생각된다. 속도차를 가진 기체의 평행류가 형성하는 혼합층(混合層)의 연구⁽⁷⁾에 있어서 대규모와구조는 Reynolds($Re=rvd/m$)수의 영향을 받지 않지만, 그 내부의 흐트러짐 스케일은 변화하는 것이 관측되었다. 이러한 이유로 인해 대규모의 와구조가 분무형상을 지배하고, 그 와구조에 포함된 작은 와가 연료와 분위기기체의 혼합을 지배한다고 생각된다. 본 연구에 있어서 분사압력을 증가시키는 것은 분무의 속도증대, 즉 Reynolds수의 증가를 의미하고, 대규모의 와구조는 변화하지 않지만 그 내부의 흐트러짐 스케일은 증대하고 있다고 판단된다. 또한 기·액간(氣·液間)의 열전달률은 Reynolds수의 지수승(지수는 Reynolds수에 의해 변화함)에 비례하는 것으로부터 속도에 비례하기 때문에, 분사압력의 증가에 따른 분무의 성장속도 증가는 증발을 촉진시킨다. 따라서 분사압력의 증가는 미립화의 촉진과 흐트러짐의 증대에 의해 상승적(相乘的)으로 연료의 증발속도를 증가시키고, 연료의 확산을 빠르게 함과 동시에 분

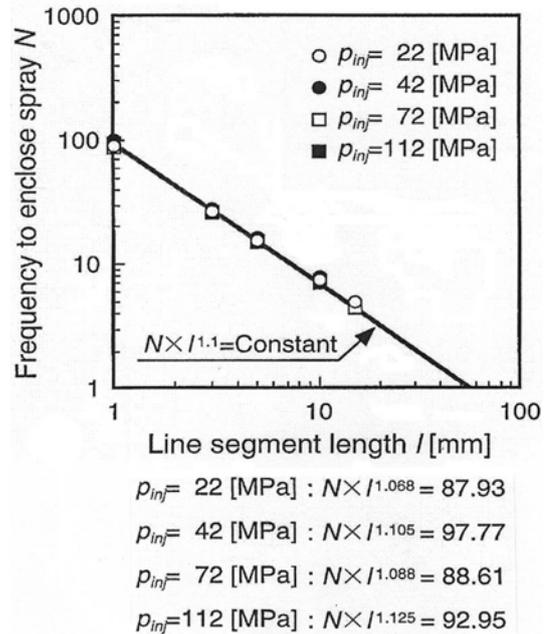


Fig. 6 Fractal analysis results for evaporating spray($t/t_{inj}=0.75, Z \geq 35$ [mm])

위기기체와의 혼합을 활발히 하고, 조기에 희박한 혼합기를 형성시킨다고 판단된다.

3.3 분무하류부에서의 기액(氣液)분포

상기의 그림 4의 분석으로부터 자유분무의 경우 주로 분무하류부에서 혼합기가 활발히 형성되

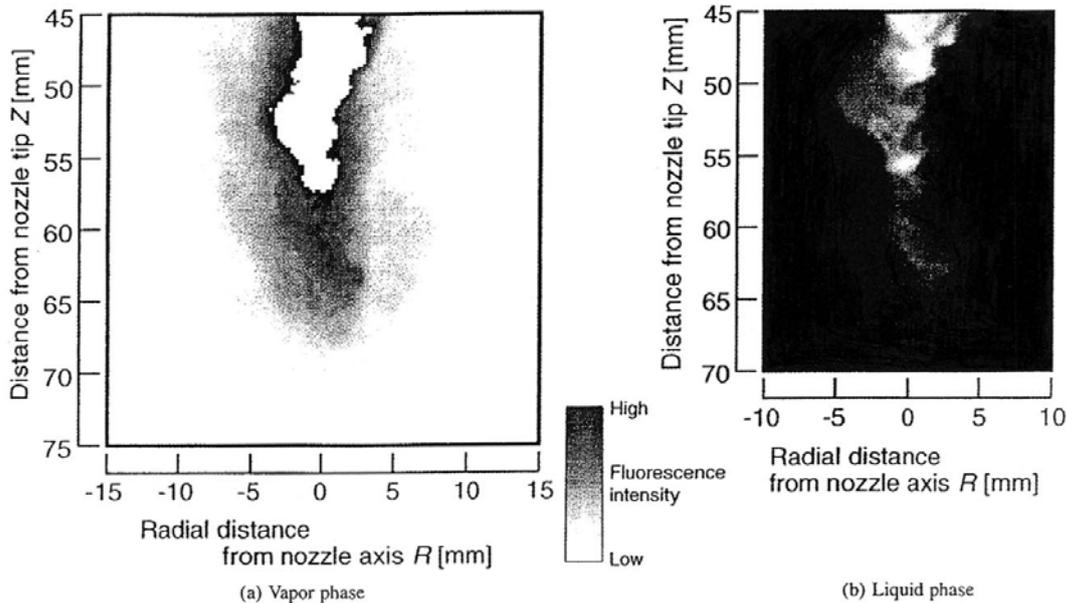


Fig. 7 Spray images taken by exciplex fluorescence method at the downstream region

고 있는 것을 알 수 있었다. 그래서 특히 분무하류부를 대상으로 보다 상세한 기액구조의 분석을 행한다. 촬영광학계는 그림 2와 동일하지만, 액상부의 촬영을 위해서 CCD 카메라보다도 해상도가 뛰어난 고 해상도 필름을 이용한 35mm 스틸카메라(Still camera)를 사용했다.

그림 7에 엑시플렉스 형광법으로 촬영한 분무선단영역의 기상 및 액상의 2차원 단면화상의 촬영결과를 나타낸다. 각 화상(이미지)은 분사압력 $p_{inj}=72\text{MPa}$, 분사개시 후 시간 $t=1.12\text{ms}$ 에 촬영한 것으로 그림 중의 (a)는 증기상의 형광강도분포를 (b)는 액상의 형광강도분포이다. 횡축은 분무중심축에서의 거리를, 종축은 노즐선단으로부터의 거리를 나타낸다. 그림으로부터 분무내부의 액상과 기상부의 존재영역에 대해서 고찰하면, 우선 분무화상의 액상부분에서 액상의 사행(Meandering flow)현상 및 액상 내부에 있어서 흰색부분, 즉 액상(액적의 밀도가 높음)이 존재하는 고휘도의 영역을 확인할 수 있다. 그러나 비증발디젤분무 연구에서 확인할 수 있는 정도의 명확한 가지구조(枝狀構造, Branch-like structure)는 확인할 수가 없다.^(8,9) 그리고 액상의 가장자리(외주)에는 흰색의 안개(Mist)와 같은 영역이 존재하고 있고, 이것은 분무 가장자리에 존재하는 미소액적에서 발하는 형광이 서로 겹쳐져(Overlap) 관찰되기 때문

이라고 판단된다. 또한 분무의 선단부에는 증류부와 비교해 상대적으로 큰 액적의 존재를 관찰할 수 있다. 이와 같이 액적이 존재하는 2개의 영역에 있어서 기상부의 고휘도 영역이 분포하고 있으며, 미립화한 액적이 핵(Core)으로 되어 그 주변에 높은 농도의 연료증기가 존재하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 분무내부에 액적의 존재영역과 증기의 분포에는 밀접한 관계가 있고, 액상 가장자리 및 분무선단의 액적이 존재하는 영역에서 높은 농도의 증기가 형성되어지며, 형성된 증기가 확산에 의해 주변으로 퍼져나가는 것을 알 수 있다. 그리고 액상 가장자리와 분무선단에 존재하는 액적의 움직임에 의해 연료 증기의 분포가 결정되어짐을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 디젤분무를 대상으로 엑시플렉스 형광법을 이용하여, 증발분무의 액상과 기상을 동시에 2차원 분리 가시화촬영을 실시하였다. 또한 획득한 화상에 대해서 3가지의 화상응용해석을 실시하였고, 그 결과를 아래에 정리한다.

(1) 디젤 증발 자유분무의 경우, 분무상류부에서는 분사연료와 분위기 기체와의 전단작용에 의

한 미립화의 촉진 및 증발이 시작되고, 분무하류부에서는 분무의 반경방향으로 성장함과 함께 혼합기형성이 활발히 이루어진다.

(2) 프랙털해석을 이용한 분무 흐트러짐(Disturbance)의 평가에서 프랙털차원은 각 분사압력에 관계없이 하나의 값, 약 1.1로 정리 할 수 있고, 따라서 각 분사압력에 대한 분무 기상외곽곡선(외주)은 거의 동일한 정도의 요철형상을 갖는다. 이것은 분사압력의 변화는 와(渦, Vortex)구조가 분무성장을 지배하는 영역에 있어서 분무외형을 결정하는 대규모와의 공간적인 크기와 분포에 대해서 영향을 미치지 않는 것을 의미한다. 그러나 증발 디젤분무 내부의 흐트러짐 스케일은 증대하고 그 결과 분사압력의 증가는 연료의 확산을 빠르게 함과 동시에 분위기기체와의 혼합을 활발히 하고, 조기에 희박한 혼합기를 형성시킨다.

(3) 증발디젤분무에 있어서는 액적의 움직임에 의해 액상의 가장자리(외주)와 분무선단부에 2부분의 고농도 증기영역이 존재한다.

후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Melton, L. A., 1983, "Spectrally Separated Fluorescence Emissions for Diesel Fuel Droplets and Vapor," *Applied Optics*, Vol. 22, No. 14, pp. 2224~2226.
- (2) Kim, T. W. and Ghandhi, J. B., 2003, "Quantitative Vapor Phase Exciplex Fluorescence Measurements at High Ambient Temperature and Pressure," *KSME International Journal(JMST)*, Vol. 17 No. 1, pp. 157~167.
- (3) Kim, D. J. and Cha K. J. 1995, "A Study on the Structure of a Diesel Spray and the Improvement of the Injection System by the Exciplex Method," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 19, No. 9, pp. 2373~2385.
- (4) Senda, J., Kanda, T., Kobayashi, M., Tanabe, Y. and Fujimoto, H., 1997, "Quantitative Analysis of Fuel Concentration Fields in Diesel Spray (1st Report, Quantitative Analysis of Fuel Vapor Concentration)," *JSME(B)*, Vol. 63, No. 607, pp. 1068~1073(in Japanese).
- (5) Kanda, T., Kobayashi, M., Senda, J. and Fujimoto, M., 1997, "Quantitative Analysis of Fuel Concentration Fields in Diesel Spray (2nd Report, Vapor Concentration Distribution in Impinging Spray and Quantitative Analysis for Liquid Phase Concentration)," *JSME(B)*, Vol. 63, No. 607, pp. 1074~1079(in Japanese).
- (6) Takaki, R. 1994, Popular Science, Mazekoze-wokagakusuru(Turbulence, Chaos, Fractal) *Syoukabou*, pp. 72~76(in Japanese).
- (7) Brown, G. L. and Roshko, A., 1974, "On Density Effects and Large Structure in Turbulent Mixing Layers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 64, pp. 775~816.
- (8) Dan, T., Takagishi, S., Onishi K., Senda J. and Fujimoto, H., 1996, "The Study of the Spray Structure in the High Injection Pressure," *JSME(part2)*, Vol. 62, No. 597, pp. 2079~2085(in Japanese).
- (9) Dan, T., Takagishi, S., Onishi K., Senda J. and Fujimoto, H., 1996, "Effect of Ambient Gas Viscosity on the Structure of Diesel Fuel Spray," *JSME(part2)*, Vol. 62, No. 599, pp. 2867~2873(in Japanese).