

분사압력변화가 증발자유디젤분무의 혼합기형성과정에 미치는 영향

Effect of the Change in Injection Pressure on the Mixture Formation Process in Evaporative Free Diesel Spray

염정국 · 정성식

J. K. Yeom and S. S. Chung

Key Words : Diesel Engine(디젤엔진), ECD U2(디젤전자분사장치), Exciplex Fluorescence Method(엑시플렉스 형광법), Free Diesel Spray(자유디젤분무), Mixture Formation(혼합기형성)

Abstract : The effects of change in injection pressure on spray structure in high temperature and pressure field have been investigated. The analysis of liquid and vapor phases of injected fuel is important for emissions control of diesel engines. Therefore, this work examines the evaporating spray structure using a constant volume vessel. The injection pressure is selected as the experimental parameter, is changed from 72MPa to 112MPa by using a common rail injection system(ECD-U2). The images of liquid and vapor phase in the evaporating free diesel spray are simultaneously taken by exciplex fluorescence method. As a result, it can be confirmed that the distribution of vapor concentration is more uniform in the case of the high injection than in that of the low injection pressure.

1. 서 론

디젤엔진에 있어서 미립화(Atomization), 증발(Evaporation) 그리고 분사된 연료와 주위기체와의 상호작용인 혼합기형성(Mixture formation)의 과정은 엔진의 점화 및 연소특성에 큰 영향을 미친다. 그러나 상변화를 동반하는 고온·고압의 증발장에 있어서 디젤분무의 거동 및 혼합기형성과정은 아직 명확하지 않다. 디젤분무에 관한 연구로서 Wakuri et al. (1959)¹⁾, Hiroyasu et al. (1978 ; 1980)^{2),3)}, Dan et al. (1997)⁴⁾ 등이 있으나 Hiroyasu et al. (1978 ; 1980)^{2),3)}, Dan et al. (1997)⁴⁾의 실험조건은 저온의 분무 상변화가 일어나지 않는 비증발장이고, Wakuri et al. (1959)¹⁾의 연구결과는 분사압력이 낮은 경우이다. 그러므로 본 연구에서는 정용용기를 사용한 고온·고압장에 있어서 증발자유디젤분무의 거동해석을 통하여 혼합기형성과정을 해석한다. 증발자유디젤분무의 가시화를 위하여 분무의 액상과 기상을 동시에 독립적으로 촬영 가능한 엑시플렉스 형광법(Exciplex fluorescence method)을 이용했다.

2. 실험방법

2.1 고온·고압 정용용기(CVC)

Fig. 1에 본 실험에 사용한 고온·고압용기의 개략을 나타낸다. 용기의 재질은 SS41이고, 설계압력은 3.4MPa, 최대사용압력은 3.0MPa이다. 고압용기에는 레이저 시트(Sheet)광 입사 및 관측용 유리창(F120, t45)이 서로 직각이 되도록 설치되어 있다. 우리는 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. 실험에 사용한 연료는 n-Tridecane(C₁₃H₂₈, 순도 99%)이다. 엑시플렉스 형광법에 사용하는 형광제의 산소에 의한 소광(消光) 및 연료의 착화방지를 고려해서 용기 내는 질소가스를 충전 하였다. 형광제의 여기광원으로 Nd:YAG 레이저(Quanta-Ray:DCR-11), 고주파발생기(Quanta-Ray:HG-2) 및 고주파분해기(Quanta-Ray:PHS-1W)의 시스템을 통과하는 제 3 고주파(파장 355nm)를 이용했다.

2.2 연료분사장치

Fig. 2에 전자제어 축압식 연료분사장치(일본, Denso(주), ECD-U2 system, 이하 ECD-U2로 함)

접수일 : 2005년 10월 18일
 염정국(책임저자) : 동아대학교 기계공학부
 E-mail : laser355@donga.ac.kr Tel. 051-200-7654
 정성식 : 동아대학교 기계공학부

를 보인다. ECD-U2는 고압 펌프, 커먼레일(Common rail), 인젝터와 이들을 제어하기 위한 ECU 및 센서들로 구성된다. 커먼레일 내의 연료압력은 고압 펌프의 연료 토출량을 전자밸브(Pump control valve : PCV)의 개폐를 가감하는 것에 의해 제어된다. 설정압력으로 유지된 커먼레일 내의 연료는 플로우 댐퍼(Flow damper)를 통하여 인젝터에 도입된다. 인젝터에는 3 방향전자밸브가 장착되어져 있고, 인젝터 내부의 니들(Needle)밸브 제어 오리피스에 의해 분사율을 제어한다. 본 실험에 사용한 분사노즐은 분공경 $F=0.2\text{mm}$, 분공길이 $l=1.0\text{mm}$ (세장비 $l/F=5.0$)인 단공 홀 노즐이다.

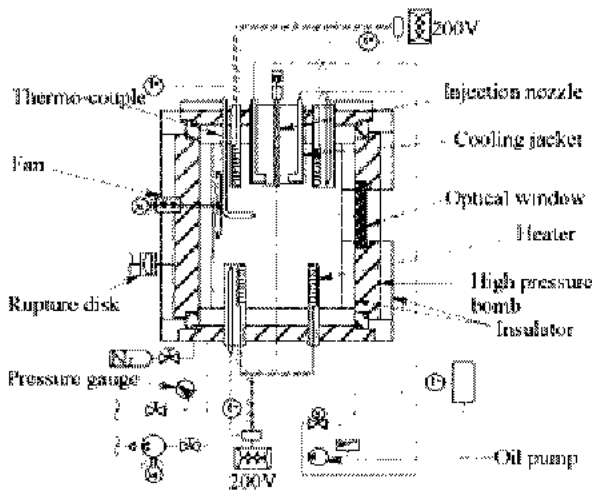


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

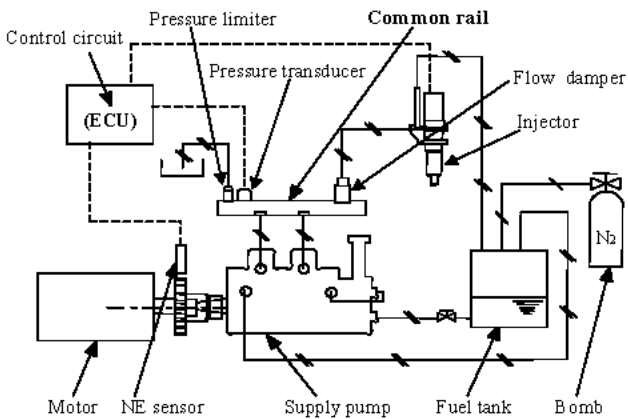


Fig. 2 Schematic diagram of ECD-U2 system

2.3 실험 조건

Table 1에 본 실험의 조건을 나타낸다. 용기내의 분위기조건은 실제의 소형·고속 직분식 디젤 기관의 분사개시초기의 실린더 내 분위기를 모사한 고온·고압이다. 분위기온도가 $T_a=700\text{K}$, 분위기압력

(배압, p_a)은 2.55MPa 이며, 주위기체의 밀도(ρ_a)는 12.3kg/m^3 로 각각 설정했다. 분사압력(p_{inj})은 $22\sim 112\text{MPa}$ 로 변화시켰다. 설정 분사압력에 대해서 각 분사시간은 2.82ms 에서 1.24ms 까지 변하고, 1회의 연료 분사량은 12mg 로 일정하게 했다. 또한, 분사되는 연료분무의 재현성은 실험 데이터 채취 전 확인을 하였다.

Table 1 Experimental conditions

Injection nozzle	Type - Hole nozzle D.L.-p		
	Diameter of hole	d_h [mm]	0.2
	Length of hole	l_p [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, 1.24	

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3에 분사압력(p_{inj})을 변화시킨 경우의 엑시플렉스형광법으로부터 구한 비정상증발자유분무의 기상 및 액상 2차원 형광강도분포화상을 보인다. 각 분사압력에 있어서 촬영시간은 분사된 연료량이 거의 같게 되는 시간, 즉 무차원시간 t/t_{inj} 이 같게 되도록 설정했다. 분사압력의 증가와 함께 분무상류부에 있어 저회도의 연료증기가 분무반경방향으로 넓게 분포함에 따라 분사연료와 주위기체와의 전단작용에 의한 미립화의 촉진 및 증발이 활발하게 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 비증발자유분무⁵⁾의 경우와 같이 분사압력이 높아지면 미립화의 촉진, 즉 액적경의 감소 효과 때문이라고 판단된다. 또 각 분사압력에 있어 노즐선단에서 $Z=40\text{mm}$ 부근부터 액상의 형광강도가 급격하게 감소하고, 분무의 반경방향으로의 성장과 함께 분무주류부의 사행(蛇行, Meandering flow)이 시작된다. 이 부근에서는 비증발분무와 같이 분사된 연료와 주위기체와의 운동량 교환이 현저하게 되고, 주위기체의 분무내부로 도입(Entrainment)이 활발하게 일어난다. 이러한 분무의 거동 해석으로부터 노즐에서 거리 약 $Z=40\text{mm}$ 인 지점에서 주위기체와의 와(渦, Vortex)유동이 분무의 성장을 지배하게 되는 천이점이라고 생각된다.

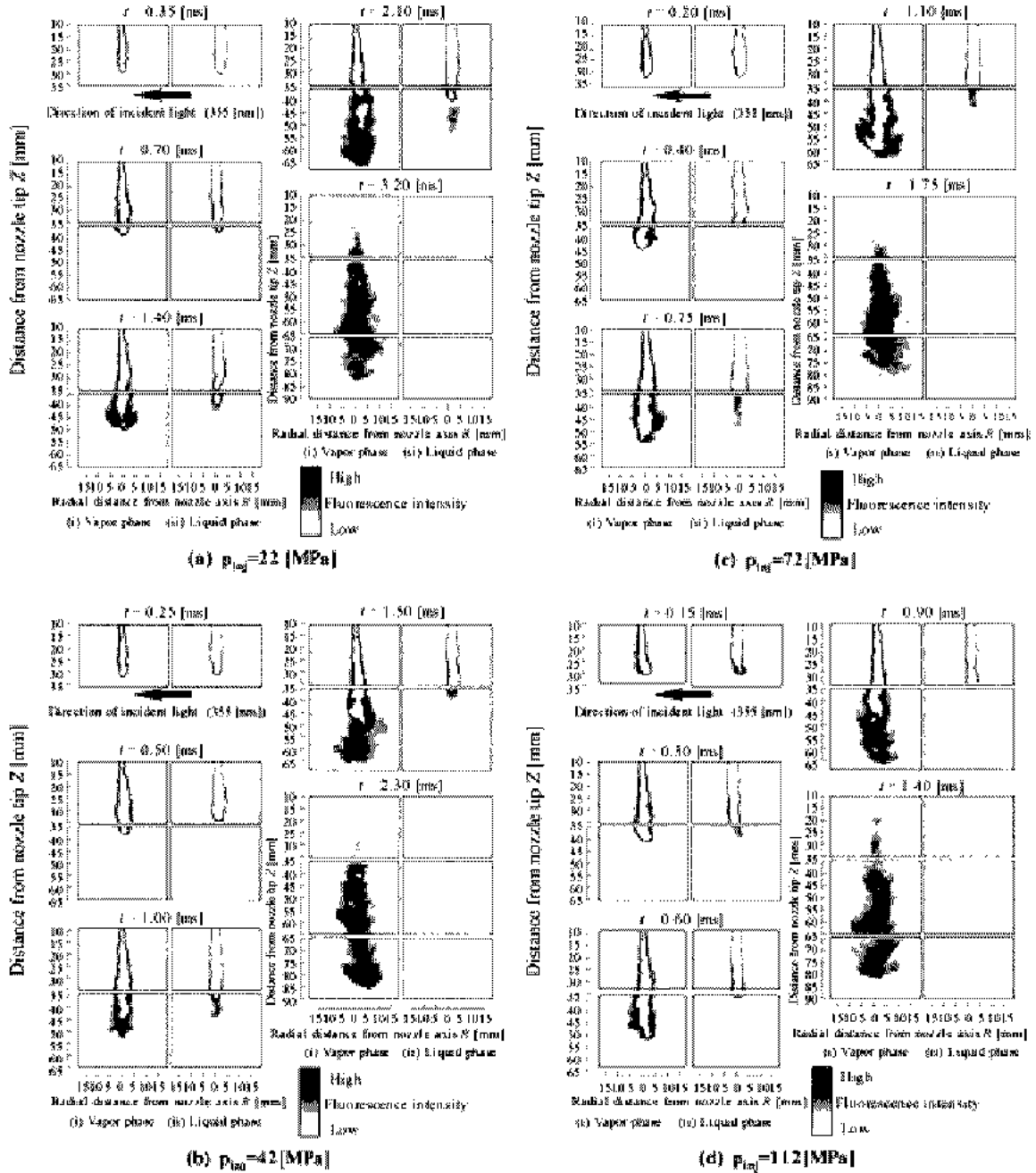
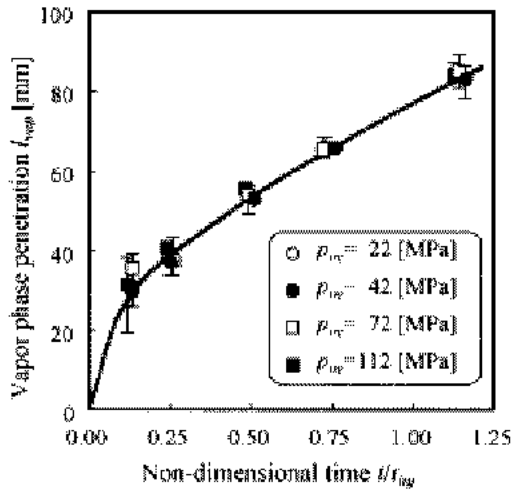


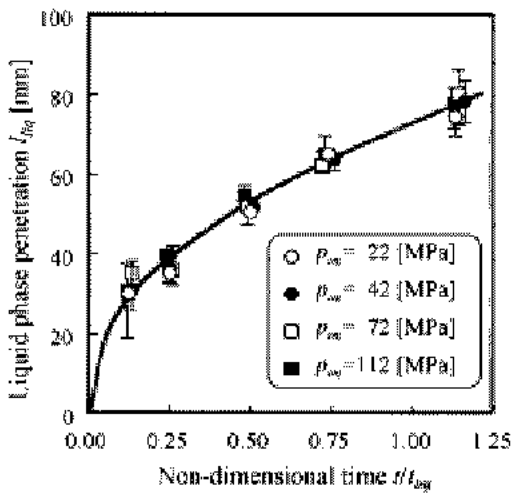
Fig. 3 Temporal change in free spray image taken by the exciplex fluorescence method

Fig. 4에 엑시플렉스형광법으로 얻은 증발분무의 기상 및 액상의 선단도달거리에 대한 시간변화를 나타낸다. 그림에서 횡축은 무차원시간, 즉 분사개시로부터의 시간 t 와 설정압력의 전분사시간 t_{inj} 와의 비이다. 이것은 연료분사율의 시간경과가 거의 사각형이기 때문에 분무내부의 연료질량이 같은 기간으로 비교하는 것을 의미한다. 기상 및 액상의 선단도달거리는 무차원시간변화에 대해서 분사압력과는 관계없이 거의 동일한 곡선 상에 있다. Dan⁵⁾ 등의 비증발분무의 연구에 있어서도 분무 내 연료

질량이 동일하면 분무선단도달거리는 분사압력에 의존하지 않는 결과를 얻었고, 증발분무의 기상 및 액상에 있어서도 같은 경향의 결과를 나타낸다. 한편, 다른 증발분무의 연구^{6) 10)}에서 지적되고 있는 분무액상의 선단도달거리가 시간의 경과와 함께 하나의 일정값에 수렴하는 현상은 볼 수 없다. 이 이유로서는 본 실험연구에 이용한 기시화 측정법인 엑시플렉스형광법의 경우, 산란광측정법과는 달리 측정대상자체의 액적을 트레이스(Tracer)로서 촬영하는 것이 아니고, 형광제 분자의 충돌 확률에 기



(a) Vapor phase penetration l_{vap}



(b) Liquid phase penetration l_{liq}

Fig. 4 Temporal change in penetration of vapor phase and liquid phase

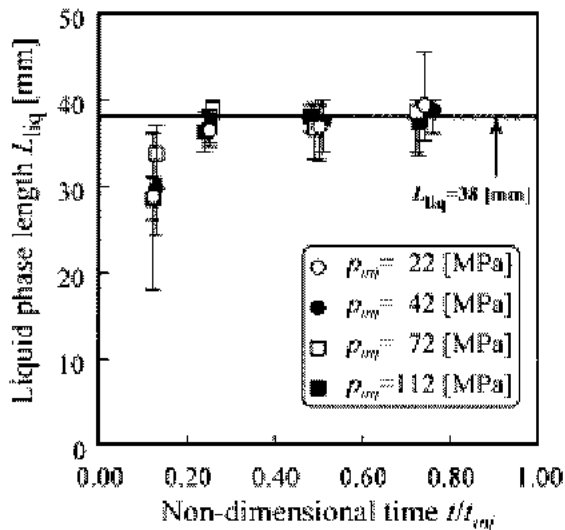


Fig. 5 Temporal change in liquid phase length

초하는 형광제의 여기광을 포착하는 것이기 때문에 액상길이를 과대평가하게 된다. 이러한 과대평가를 수정하기 위하여 화상의 액상부분을 2개의 영역으로 나눈다. 액적의 수밀도(Number density)가 아주 높은 분무노즐 부근영역과 액적의 수밀도가 낮은 분무액상과 기상이 혼재하는 영역, 두 영역으로 나누었다. 전자는 액상의 형광강도가 최고치(255)의 90% 이상인 230부터 255까지의 범위를 나타내고, 이 영역을 액상길이(Liquid phase length, L_{liq})라 정의했다. 그 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 액상길이는 분사압력에 관계없이 거의 동일 곡선 상에 존재하고 그 값은 약 38mm에 접근한다. 따라서 이와 같은 정의를 이용하면, 본 연구에 있어 구한 액상길이 변화의 경향은 다른 논문의 결과와 일치한다.

Fig. 6에 노즐에서부터 $Z=20, 30, 40, 50$ mm에 있어서 각 분사압력에 대한 분무의 반경방향으로의 발달(확산) $w_{20}, w_{30}, w_{40}, w_{50}$ 과 무차원시간과의 관계를 나타낸다. 노즐에서부터 거리가 $Z=20, 30$ mm에 있어서 분사압력이 높은 $p_{inj}=72, 112$ MPa의 경우는 분무반경방향으로의 폭이 증가한다. 즉, 노즐 근방에서는 분무와 주위기체 사이의 전단작용에 의한 미립화가 촉진되어 증발이 활발하게 일어난다. $Z=40$ mm의 경우는 각 분사압력의 의한 차이는 미미하다. $Z=50$ mm가 되면 $t/t_{inj}=0.5$ 에 있어 $p_{inj}=72, 112$ MPa의 분무 폭이 크지만, 그 후에는 역전되어 작게 된다. 이와 같이, 분무액상길이의 존재영역인 $Z=38$ mm 부근을 경계로 분무 폭 발달의 경향이 변화한다. 이상의 결과로부터, 본 연구의 액상길이 존재영역은 Dan⁽⁶⁾ 등의 비증발분무의 경우에 있어서는 분무 폭의 변화경향이 변화하는 길이로서 정의한 운동량길이에 상당한다고 판단된다. 즉, 액상길이 존재하는 영역에서 분사된 연료는 분사 시의 운동량을 유지하지만, 시간의 경과와 함께 그 운동량은 점차 주위기체로 전달되어간다. 액상길이 하류의 영역에서는 주위기체의 유동, 즉 와 운동이 분무의 성장을 지배하고 미소 액적 및 연료 증기가 그 유동을 추종하면서 분무가 성장한다고 예측된다. 이상과 같이 분사압력의 증가와 함께 분사노즐 부근의 미립화가 촉진되고 있는 것으로부터 분사연료와 주위기체와의 혼합기형성 촉진이 기대된다. 그러나 분무 기액상의 선단도달거리는 시간의 경과와 함께 증가하는 경향을 보이지만, 분무 액상길이 영역에 있어서 선단도달거리는 분사압력에는 관계없이 일정한 값에 수렴한다.

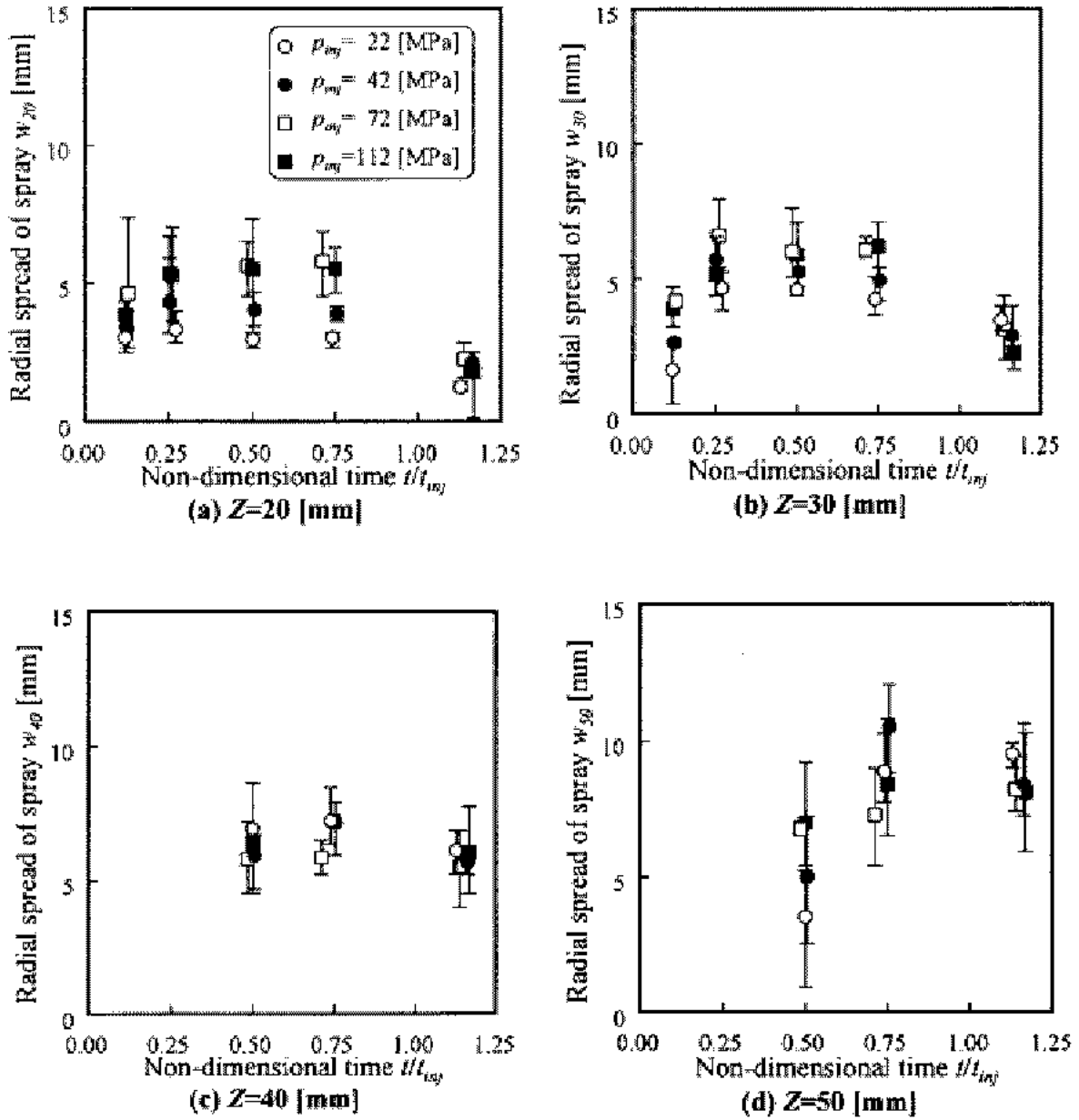


Fig. 6 Temporal change in radial spread of the spray

Fig. 7에 엑시플렉스형광법으로 얻은 기상자체의 면적, 분무기상의 256단계의 형광강도 적산면적 및 평균형광강도의 무차원시간 변화를 나타낸다. 먼저 기상 자체면적의 경우는 분사압력이 가장 낮은 $p_{inj}=22\text{MPa}$ 에서는 분사 종료 후에도 직선적으로 증가하지만, 그 외의 분사압력에 있어서는 분사기간 중과 분사종료 후에는 성장이 둔화되는 것을 알 수 있다. 이것은 분사압력이 증가하면 혼합기형성이 촉진되기 때문에 본 실험의 촬영제로는 촬영할 수 없을 정도로 낮은 농도의 증기가 증가했다는 것을 나타낸다. 또한, 형광강도에 의한 적산면적에 있어서도 분사압력이 가장 낮은 $p_{inj}=22\text{MPa}$ 에서는

증가하고 있지만, 그 외의 분사압력에 있어서 분사말기기간 중의 측정값과 분사종료 후의 측정값이 거의 동일하며 따라서 혼합기형성이 활발하게 된 것을 알 수 있다. 기상의 평균형광강도의 시간변화는 모든 분사압력에 있어서 원호를 그리며 감소한다. 이와 같은 감소현상은 분사압력이 $p_{inj}=42\text{MPa}$ 이상에서는 데이터의 흐트러짐은 다소 있으나, 서로 동일한 변화경향을 보인다. 이러한 경향은 전술한 바와 같이 분사압력의 증가와 함께 가시화가 불가능할 정도의 희박한 연료증기가 증가하기 때문이라고 판단하면, 분사압력의 증가는 보다 균일하고 희박한 혼합기의 형성을 가능하게 한다.

참고문헌

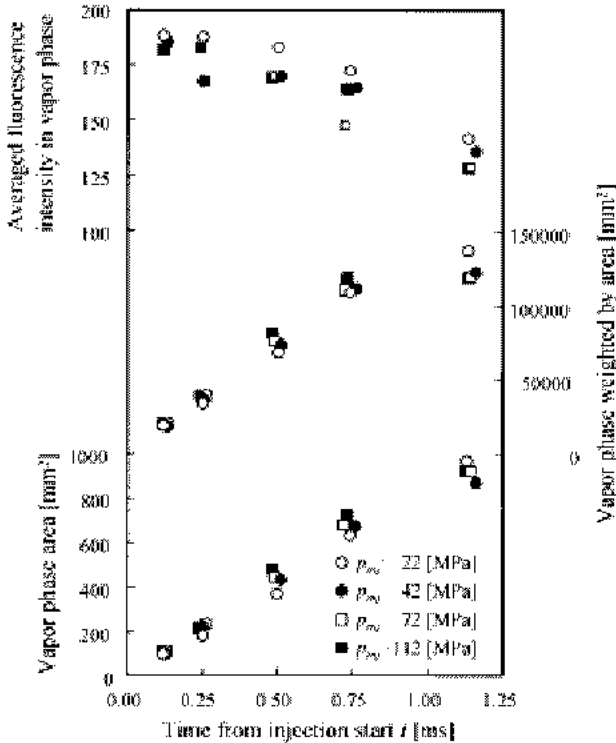


Fig. 7 Temporal change in area, area weighted by fluorescence intensity and averaged fluorescence intensity of the vapor phase

4. 결 론

고온·고압의 증발장에서 엑시플렉스형광법을 이용해 분사압력변화가 증발분무의 혼합기 형성과정에 미치는 영향을 해석하였고, 연구의 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 분사압력이 높을수록 증발분무의 기상 분포는 균일하다. 이것은 분사압력의 증가는 분사연료의 미립화를 촉진시키고, 그 결과 보다 신속하고 균일한 혼합기의 형성이 기대된다.
- 2) 증발분무의 거동특성은 액적의 수밀도(Number density)가 아주 높은 분무노즐부근영역과 액적의 수밀도가 낮은 분무액상과 기상이 혼재하는 2개의 영역으로 나눌 수 있다. 전자는 비증발분무에 있어 분사연료와 주위기체와의 운동량교환에 필요한 분무선단길이에 해당되며, 본 연구에서는 증발분무의 액상길이(Liquid phase length, L_{liq})라 정의했고, 그 값은 약 38mm이다.
- 3) 분무내부에 동일한 연료량이 존재하면, 분무의 선단도달거리는 분사압력에 의존하지 않는다.

1. Y. Wakuri, M. Fujii, T. Amitani and R. Tsuneya, 1959, "Studies on the penetration of fuel spray of diesel engine", JSME(part2), Vol. 52, No. 156, pp. 820-826(in Japanese).
2. H. Hiroyasu, T. Kadota and S. Tasaka, 1978, "Study of the penetration of diesel spray", JSME, pp. 3208-3219(in Japanese).
3. H. Hiroyasu and M. Arai, 1980, "Fuel spray penetration and spray angle in diesel engines", JSAE, No. 21, pp. 5-11(in Japanese).
4. T. Dan, S. Takagishi, J. Senda and H. Fujimoto, 1997, "Organized structure and motion in diesel spray", SAE Paper, No. 970641.
5. T. Dan, S. Takagishi, N. Oishi, J. Senda and H. Fujimoto, 1996, "The study of the spray structure in the high injection pressure", JSME 62-597, pp. 2079-2085.
6. C. Espey and J. E. Dec, 1995, "The effect of TDC temperature and density on the liquid-phase fuel penetration in a D.I. diesel engine", SAE Paper, No. 952456.
7. C. Espey, J. E. Dec, T. A. Litzinger and D. A. Santavicca, 1994, "Quantitative 2-D fuel vapor concentration imaging in a firing D.I. diesel engine using planar laser-induced Rayleigh scattering", SAE Paper, No. 940682.
8. C. Espey, J. E. Dec, T. A. Litzinger and D. A. Santavicca, 1997, "Planar laser Rayleigh scattering for quantitative vapor-fuel imaging in a diesel jet", COMBUSTION AND FLAME, pp. 65-86.
9. J. T. Hodges, T. A. Baritaud and T. A. Heinze, 1991, "Planar liquid and gas fuel and droplet size visualization in a D.I. diesel engine", SAE Paper, No. 910726.
10. T. A. Baritaud, T. A. Heinze and J. F. Le Coz, 1994, "Spray and self-ignition visualization in a D.I. diesel engine", SAE Paper, No. 940681.