

증발 조건에서 직분식 가솔린 분무의 증기 농도의 분포

Distribution of the Concentration of Fuel Vapor in DI Gasoline Sprays Under Evaporation Condition

황 순철*, 최 동석**, 차 건중***, 김 덕출***

S. C. Hwang, D. S. Choi, K. J. Cha, D. J. Kim

ABSTRACT

The concentration and spatial distribution of vapor phases in DI (Direct Injection) gasoline spray were measured quantitatively by exciplex fluorescence method. Fluorobenzene and DEMA (diethylmethylamine) in a solution of hexane were used as the exciplex-forming dopants. The fluorescence intensity of vapor phase were obtained by ICCD camera with the appropriate filter. The relationship between fluorescence intensity and vapor concentration was induced for the purpose of a quantitative analysis. The 2-D vapor/liquid images of fuel spray were captured under the evaporation condition, and the spatial distribution of vapor concentration was obtained. The spatial distribution of liquid phase had hollow-cone shape. And the vapor phase was widely distributed in the whole spray. The behavior of vapor phase was significantly affected by second flow such as entrainment, vortex, while that of liquid phase was scarcely affected.

주요기술용어 : GDI (가솔린 직접 분사), Exciplex (여기상태 혼합물), Exciplex Fluorescence Method (Exciplex 형광법), Dopant (첨가제), High-pressure swirl injector (와류형 고압 인젝터)

1. 서 론

최근 PFI(Port Fuel Injection) 가솔린 기관의 한계를 극복하고 연료의 고연비화와 고출력화를 양립시키기 위해 새롭게 개발된 것이 가솔린 직접 분사 기관이다. GDI 기관은 부분 부하 영역에서는 성층화 연소에 대한 초회박 연소가 가능하기 때문에 유해 배기 가스의 저감 및 열효율 향상을

실현 할 수 있으며, 고부하 영역에서는 이른 공연비 조건에서의 연소에 의한 고출력을 기대할 수 있으므로 최근 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다^(1~5). GDI 방식은 기존의 PFI 방식과는 달리 실린더 내에 연료를 직접 분사하기 때문에 실린더 내에서 일어나는 연료 분무의 분포 거동과 공기/연료의 혼합기 형성과정에 대한 이해가 매우 중요하다고 할 수 있다. 또한 고온, 고압 분위기에서 발생하는 분무의 증발 현상에 대한 이해를 더욱 필요로 하게 되었다.

가연 혼합기의 형성과정을 예측하기 위한 방법으로 1983년 Melton⁽⁶⁾은 증발분무에 대해 액상과

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 기계기술연구소

*** 부산대학교 기계공학부

증기상을 분리 및 동시에 측정할 수 있는 exciplex 형광법을 소개하였다. 초기에는 분무 과정이 상대적으로 중요한 디젤기관에 exciplex 형광법을 적용하였으나⁽⁷⁻⁸⁾, 1993년 Melton⁽⁹⁾은 가솔린용 첨가제로 TEA(triethylamine), 플루오르벤젠, 4FT(4-fluoretoluene), NPDEA(n-propyldiethylamine) 등을 제안하였다. Ghandhi 등⁽¹⁰⁾은 공기보조 인젝터를 사용한 2행정 기관에서 연료의 분포를 조사하기 위하여 첨가제로 플루오르벤젠과 DEMA(diethylamine)를 사용하였다.

한편 최근에는 분리 가시화하여 취득된 형광강도와 연료의 농도를 관련 지워 정량적인 측정을 시도하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 형광강도는 형광화합물의 질량 농도에 비례하므로 형광화상의 정량적인 해석이 가능하다. Rotunno 등⁽¹¹⁾은 알고 있는 양의 액체와 증기에 대한 형광강도의 직접 교정을 통한 정량화 방법을 개발하였으며, Senda 등⁽¹²⁾은 디젤분무에 TMPD와 나프탈렌을 첨가제로 사용하여 증기상의 교정을 통한 충돌분부의 거동을 정량적으로 분석을 하였다. 그리고 Choi 등⁽¹³⁾은 플루오르벤젠과 DEMA를 사용하여 증기상의 교정에 의한 정량화를 시도하였다.

본 연구에서는 고온의 분위기에서 직접 분사식 가솔린 인젝터를 대상으로 exciplex 형광법을 적용하여, 액상과 증기상을 분리 가시화 함으로써 증발조건에서의 기/액상의 거동에 대한 자료를 제시하고자 하며, 또한 증기의 농도에 따른 형광강도의 교정을 통하여, 기상의 농도 분포를 정량적으로 측정하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 GDI 분사계 및 분무실, 광학계 및 화상취득장치, 신호처리계로 구성되어 있다. 본 실험에서의 분사계는 와류형 고압 인젝터, 연료탱크 및 가압용 질소탱크로 구성되어 있다. 질소가스로 bladder형 연료탱크를 가압하여 조절함으로써 분사시 발생하는 맥동과 압력변동을 줄일 수 있도록 하였다. 정적 분무실의 재질은 알루미늄이며, 크기는 $8 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 이다. 가시창은 직경 130mm, 두께 13mm인 석영유리창을 설치하였다.

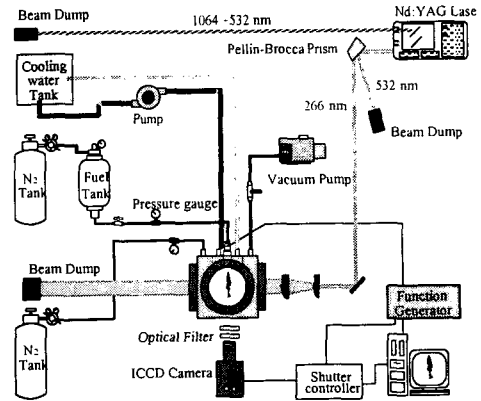


Fig. 1 Experimental setup

분무실의 측면과 하부에 히터를 설치하고, 열전대(k-type)를 설치하여 온도 조절기를 통해 분무실 내의 온도를 조절하였다. 그리고 냉각수를 분무실 상부에 설치된 냉각용 재킷으로 순환시켜 인젝터의 과열을 방지하였다.

광원으로는 UV영역의 10Hz Nd-YAG레이저(60mJ/pulse)의 4차 조화파(266nm)를 사용하였다. Pellin-Brocca 프리즘으로 266 nm와 532nm의 광을 분리하여 266nm의 광만을 원통형 렌즈와 구면렌즈의 조합으로 평면광을 만들어 분무실 내로 조사하였다. 형광화상의 취득은 이중 MCP(Micro-channel plate)가 장착된 ICCD 카메라를 사용하였다. MCP 계인은 10^6 , 화소의 크기는 $8.4 \times 9.8 \mu\text{m}$ 이고 해상도는 $640 \times 480 \text{pixels}$ 이다.

Fig. 2는 기상의 농도 교정을 위해 분무실 내부에 설치할 수 있도록 제작된 교정용 챔버로서 재질은 황동이다. 내부의 체적은 $45 \times 10^{-6} \text{m}^3$ 이다. 가시창으로서 직경 25.4mm, 두께 6.35mm인 석영유리창을 설치하였고, 분무실의 창들과 방향을 같게 설치함으로써 분무실로 조사된 레이저 평면광이 교정용 챔버를 지나도록 하였다.

2.2 분무 실험

Table 1은 가솔린과 본 실험에 사용된 시료의 물성치를 나타낸 것이다. 가솔린을 대표하기 위해 가솔린의 성분중의 하나인 헥산을 용매로 사용하였으며, 비등점이 용매와 유사한 플루오르벤젠과 DEMA(N,N-diethylmethanimine)를 체적비로 각각 2%와 9% 혼합하였다.

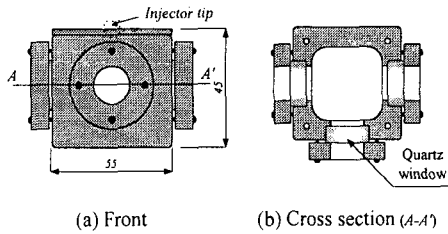


Fig. 2 Schematic diagram of calibration chamber

266nm의 레이저광으로 여기된 모노머와 exciplex의 형광방출은 각각 기상과 액상을 대표하게 되는데, 290nm와 380nm의 서로 다른 파장대에서 최대값을 가지게 된다. 이를 토대로 증기상의 취득을 위해서는 295nm에서 투과율이 약 25%, 반치폭 25nm인 광학필터를 사용하고, 액상의 취득시에는 400nm에서 투과율이 약 50%, 반치폭이 25nm인 광학필터를 사용하였다.

Table 2는 본 분무실험의 조건이다. 비교적 증발 현상을 잘 관찰할 수 있는 0.1MPa의 분위기 압력과, 473K의 분위기 온도로 정하였고, 분사량은 17mg, 분사시간은 2ms으로 하였으며, 분사압력은 일반적인 직분식 가솔린 인젝터의 분사압력인 5.1 MPa로 하였다. 인젝터는 60°

Table 1 Fuel properties

	Fuel	Composition (% by volume)	T _{boil} (K)	ρ _{fuel} (kg/m ³)
Solution	n-hexane (C ₆ H ₁₄)	89	342	660
	Fluorobenzene (C ₆ H ₅ F)	2	358	896
Dopants	DEMA (C ₅ H ₁₃ N)	9	338	720

*Gasoline (C₈H_{18.76}) ; T_{boil} = 300~500K, ρ_{fuel} = 720~780 kg/m³

Table 2 Experimental conditions

Ambient gas	N ₂
Ambient temperature, T _a (K)	473
Ambient pressure, P _a (MPa)	0.1
Injection pressure, P _i (MPa)	5.1
Injection quantity, Q _i (mg)	17

의 분무각과 5°의 분사각을 가진 직분식 가솔린 기관용 상용 와류형 고압 인젝터를 사용하였다.

2.3 교정 실험

Table 3은 교정실험의 조건이다. 측정 형광강도와 연료의 증기 농도와의 관계를 구하기 위한 교정실험은 분무실험에서와 동일한 분위기와 온도와 압력인 474K와 0.1MPa에서 수행하였다. 교정용 챔버는 분무실 내에 설치되며, 교정용 챔버로 직접 일정량의 연료가 분사되어 농도를 조절하게 된다. 분사 후 교정 챔버 내의 농도가 균일해지고 형광강도의 변화가 거의 없어지는 시점을 찾기 위해 Fig. 3과 같이 분사 후 10ms부터 90ms까지 10ms 간격으로 기상의 화상을 취득하여 시간에 따른 형광 강도의 변화를 조사하였다. 분사 후 40ms 전후부터 안정해지는 것을 볼 수 있으며, 교정 챔버 내의 연료는 모두 증발했다고 볼 수 있다. 따라서 증기상의 교정을 위한 화상의 취득 시간은 분사 후

Table 3 Calibration conditions

Ambient gas	N ₂
Ambient temperature, T _a (K)	473
Ambient pressure, P _a (MPa)	0.1
Concentration, C (mol/m ³)	2.39, 3.82, 5.06, 6.47, 7.87, 9.29, 10.7

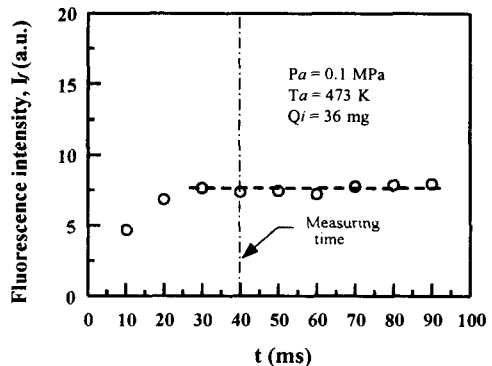


Fig. 3 Variation of vapor fluorescence intensity with time

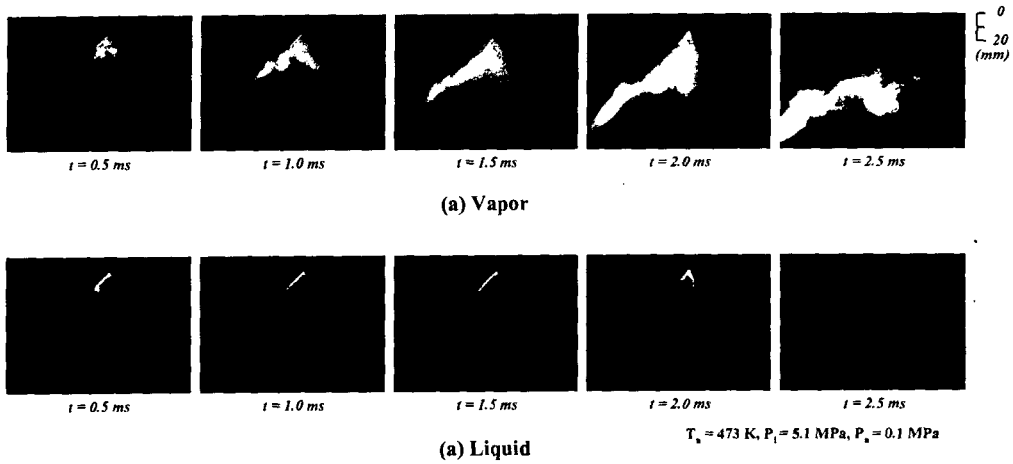


Fig. 4 Spray images of vapor and liquid phase with time

40ms으로 설정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 액상과 기상 분무의 거동

Fig. 4는 분사개시 후 0.5ms에서부터 2.5ms까지 0.5ms의 시간 간격으로 취득된 기상과 액상의 분무 화상들이다. 기상과 액상이 모두 왼쪽으로 크게 치우치고 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 분사각이 수직축에 대하여 5°의 경사각을 가지기 때문이다. 그림을 보면 0.5ms에서는 액상의 신호가 강하게 나타나지만, 액상과 기상의 분무 거동 형태에 있어서 크게 차이를 보이고 있지 않았다. 하지만, 1ms 이후의 화상에서부터 액상은 분무각을 따라 외곽의 좁은 영역에만 주로 존재하는 반면, 기상은 그 분포 영역이 하부로 내려가면서 크게 넓어지고 있는 형태를 나타내었다. 그리고, 액상의 경우 1ms에서 2ms까지 거의 비슷한 분포형태를 띄고 있지만, 기상의 경우 분포영역이 분무 하단에서 크게 확장되고 있는 차이를 관찰 할 수 있었다. 분사가 종료되는 2ms를 지나면서 액상 신호는 그 강도가 현저하게 감소하여, 분사 후 2.5ms부터 거의 신호가 나타나지 않는 반면, 기상은 여전히 넓은 분포를 가지면서 존재하고 있었다. 이러한 사실은 Fig. 5를 통해서 확실해진다.

Fig. 5는 각 시간대에 취득한 화상에서 기상

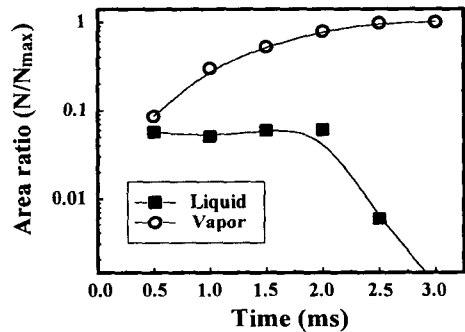


Fig. 5 Area ratio for liquid and vapor phase with time

과 액상 분포 면적을 최대 기상분포를 가지는 3.0ms에서의 기상 분포 면적(N_{max})으로 나눈 면적비이다. 따라서 시간 경과에 따른 기상과 액상의 분포 변화를 알 수 있다. 액상의 경우, 분사 후 종료까지 거의 비슷한 액상 면적을 유지하고 있으며, 분사종료 후 급격히 감소를 하게 된다. 반면 기상은 분사 후 계속 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 인젝터 팁으로부터 수직축 방향으로 일정 거리(Z)만큼 떨어진 곳에서, 반경방향으로의 형광강도의 변화를 분사개시 후 시간에 따라 나타낸 것이다. 횡축은 인젝터 팁에서의 반경방향으로의 거리(R)를 나타내고 있으며, 종축은 각 상의 최대형광강도에 대한 각각의 시간에서의 형광강도의 비(I/I_{max})이다. 점선은 기상

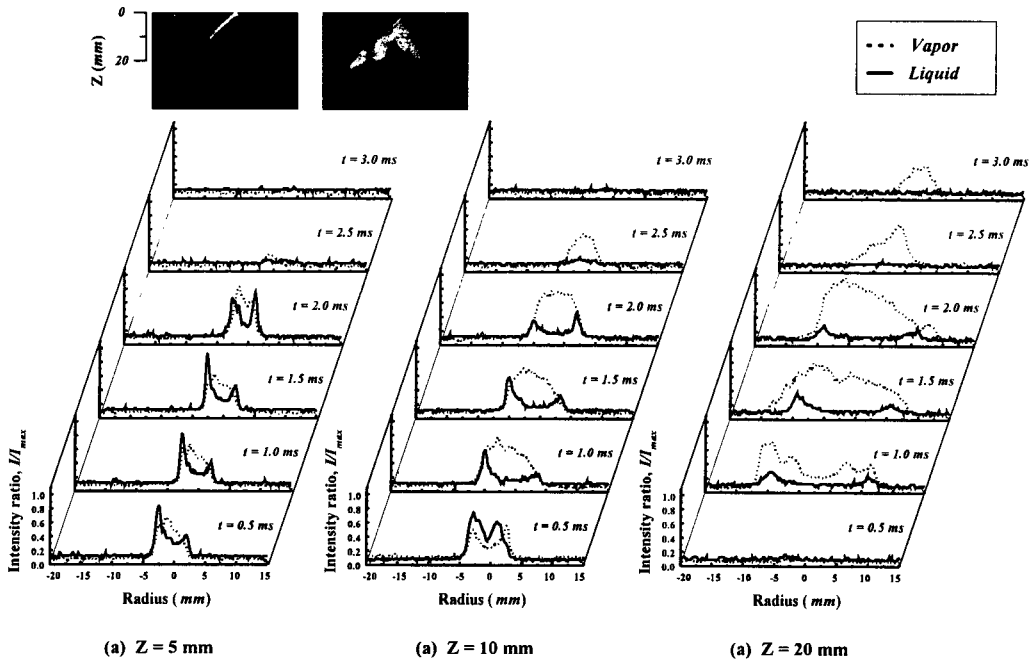


Fig. 6 Fluorescence intensity ratio profiles for each phase with time after injection

을 실선은 액상을 나타내며, 동일한 시간과 위치에서 각 상의 형광강도의 비교를 통해 각 위치와 시간에 따른 분포특성을 알 수 있도록 하였다.

액상의 경우, 전 영역에 걸쳐 증공 분무의 특성으로 외곽에서 강한 형광강도를 나타내고 있었다. 대체로 동일한 인젝터로부터의 거리, 즉 같은 Z 값에 대해서는 시간에 관계없이 비슷한 패턴을 가지고 있는데, 분사가 종료되면 곧 그 신호가 사라지는 것을 볼 수 있다. 인젝터로부터 하류로 갈수록 그 신호는 약해지고 신호의 폭이 넓어지는 것을 알 수 있었다. 단, Z=10mm에서 분사 후 0.5ms인 경우에는 다른 시간대와는 다른 형태를 보이는데, 이것은 와류형 인젝터의 특성으로 나타나는 선두질량(leading mass)의 영향 때문인 것으로 생각된다.

기상의 경우, 액상과는 아주 다른 특성을 보이고 있다. 액상이 분무 외곽에서 주로 강한 신호를 보이는데 반해, 기상은 분무 내부 전체에서 고르게 분포함을 알 수 있다. 그리고, 액상이 동일한 Z값에 대하여 시간의 변화에 대하

여 비슷한 패턴을 보이는 것에 반하여, 기상은 시간에 따라 분포특성이 변화하였다. 즉 분사 후 초기에는 액상 신호가 강한 곳에서 기상도 강하게 나타나지만, 시간이 지남에 따라 분무 내부 전체에 걸쳐 강하게 나타나고 있다. 그리고 액상과는 달리 하류로 갈수록 더욱 강한 형광강도를 나타내었다. 이것은 분무하단으로 갈수록 액상의 분포면적이 커지고, 선회류(vortex)에 의한 혼합의 활성화로 증발이 매우 활발해지기 때문으로 생각된다.

3.2 기상 농도의 교정

일반적으로, 형광 방출의 강도는 형광 물질의 농도에 비례하게 된다. 이러한 형광강도와 형광 물질의 농도와 관계는 Lambert-Beer의 법칙에 따라 계산할 수 있다. 두께 L(m)인 균일한 매질을 투과된 레이저의 강도 I_t 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_t = I_0 \exp(-\epsilon CL) \quad (1)$$

여기서 I_0 는 입사 레이저의 강도, ϵ 는 물 흡광

계수($\text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{m}$), C는 몰농도(mol/m^3)를 나타낸다. 그리고 매질에 흡수되는 빛의 강도는 식 (1)에 의해 다음 식으로 전개된다.

$$I_a = I_0 - I_t = I_0 \{1 - \exp(-\epsilon CL)\} \quad (2)$$

형광강도는 흡수된 광의 크기에 비례하므로,

$$I_f = A K I_0 \{1 - \exp(-\epsilon CL)\} \quad (3)$$

여기서, A는 광학계에 따른 상수이고, K는 여기 변화에 따른 형광량 수득률(rate coefficient for the excited transition)로서 압력과 온도의 영향을 받는 상수가 된다.

Fig. 7는 교정실험을 통해 구한 증발된 시료의 농도에 대하여 취득된 화상에서의 화소당 강도를 나타낸 것이다. 본 실험에서 온도와 압력은 일정하며, 분무장에서 온도가 구배와 레이저 입사광의 흡수로 인한 광 강도의 감소를 무시한다고 가정하면, 식 (3)에서의 각 상수 값을 실험 결과를 통해 구할 수 있으며, 농도에 따른 형광강도의 교정 곡선으로 나타낼 수 있다. 또한, 교정용 챔버의 석영유리창에 의해 강도는 약 8% 감소하므로⁽¹³⁾, 분무화상의 증기상에 대한 정량화를 위한 교정 식은 다음과 같다.

$$I_f = 1.08 \times 57.71 \{1 - \exp(-0.087C)\} \quad (4)$$

3.3 증기상의 농도 분포

Fig. 8은 식 (4)의 교정식을 이용하여 분무 실험에서 취득하였던 분사 후 1ms에서의 기상 화상에서 농도 분포를 구하여 나타낸 것이다. 상대적으로 많은 액상 영역을 가진 분무 외곽에서 기상의 농도가 높아지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8과 같이 구한 농도 분포에서 농도범위에 따라 A($2 \leq C < 5$), B($5 \leq C < 8$), C($8 \leq C < 12$)의 세 가지의 농도층으로 분리하여 농도별 거동을 시간에 대하여 나타낸 것이다. A 농도층을 보면 전체적인 기상 영역에 걸쳐 분포하고 있는데, 그 분포 영역을 형태에 따라 크게 상부의 원뿔형 영역과 하부의 vortex cloud 영역으로 나눌 수 있다. 상부의 경우 기상의

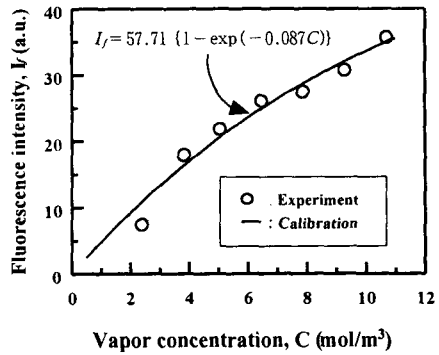


Fig. 7 Comparison of experiment and calibration

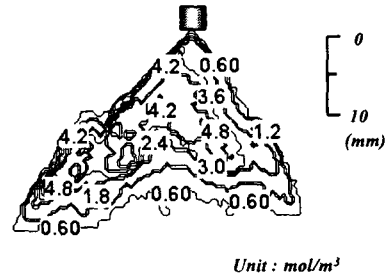


Fig. 8 Contour of concentration distribution for fuel vapor spray [$t = 1.0 \text{ ms}$]

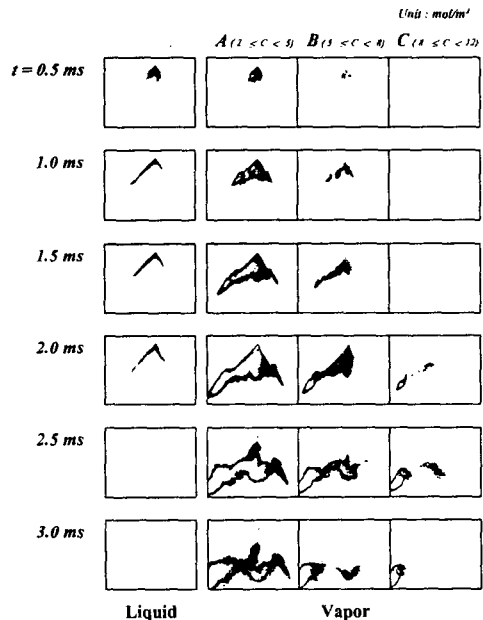


Fig. 9 Spray images for different concentration region with time

분포는 액상의 원추형 내부에만 주로 분포하고 있으며, 이러한 사실은 Fig. 6을 통해서도 분명하게 관찰할 수 있다. 반면, 하부로 갈수록 액상 영역이 줄어들면서, 이러한 기상영역의 경계가 없어지고 외곽으로 크게 휘어지는 지상구조(branch-like structure)가 나타나며, 점차 발달하면서 vortex cloud 영역을 형성하게 된다.

B 농도층의 거동은 액상에 따른 경계현상을 더욱 확실하게 볼 수 있었다. B 농도층의 경우 원추형 내부의 액상 근처에서만 나타났으며, 하부로 가면 반대로 원추형 경계의 외부로 격여서 나타났다. 이러한 현상은 분사 후 1.5ms와 2.0ms에서 잘 나타나고 있다. 분사가 종료된 후 B 농도층은 아래로 내려가 vortex cloud의 중심을 이루고 있으며, 이때 더 농도가 짙은 C 농도층도 발생하는 것을 관찰 할 수 있다.

Fig. 9에서 주목해야 할 것은 증발 거동의 특징으로서, 상대적으로 낮은 농도인 A 농도층이 액상이나 높은 농도층의 주위에 넓게 퍼져서 분포하는 것이 아니라, 상부의 경우 분무의 내부에만 존재하며, 하부로 가면서 외부로 많이 치우쳐 진다는 것이다. 이러한 현상은 기상이 액상에 비해 외부의 유동에 영향을 많이 받으며 거동함을 보여준다. 즉, 큰 액적들로 이루어진 액상은 상대적으로 큰 운동량으로 인해 외부 유동의 영향을 덜 받으면서 그 형태를 일정하게 유지한다. 그러나 기상은 대체로 원추형 외부에서 내부로의 2차유동을 따라 이동하고, 확산되는 것으로 생각된다. 또한 같은 이유로 하부에서는 와류에 의한 영향을 많이 받는다. Fig. 10은 이러한 현상을 나타낸 도식도이다.

Fig. 11은 분사 후 시간의 흐름에 따른 증기상의 각 농도층 별로 분포면적의 변화를 나타낸 것이다. 3.0ms에서의 기상 면적 전체를 최대값($N_{tot, t=3.0}$)으로 하여 각 시간에서의 각 농도별 분포 면적을 나누어 농도 분포 면적비를 구하였다. A 농도층은 시간이 지남에 따라 분사가 종료되는 2.0ms를 제외하고는 계속 거의 일정한 증가량 보이고 있다. 반면 B 농도층은 2.0ms를 기준으로 감소가 되었다. 이것은 분사가 종료됨에 따라, 액적으로부터의 증발은 감소되고 높은 농도의 기상의 확산으로 인한 분

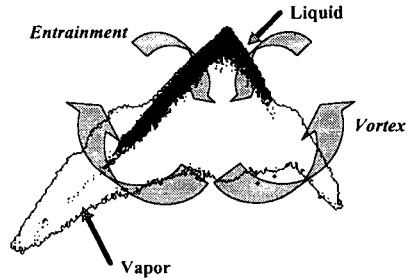


Fig. 10 Mechanism of air/fuel interaction

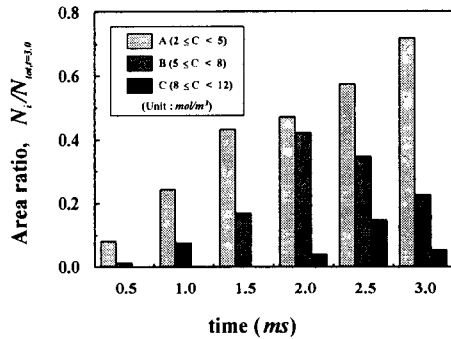


Fig. 11 Area ratio on different concentration regions in spray with time

포면적의 증가가 주가 되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 증발의 활성화로 C 농도층과 같은 고농도 영역이 일부 나타나는 것으로 생각된다.

4. 결론

직분식 가솔린 인젝터를 대상으로 exciplex 형광법을 적용하여 기/액상의 거동 분석과 기상 농도 분포의 측정을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 직분식 가솔린 인젝터에서, 액상은 분무 외곽의 좁은 영역에 주로 존재하며 증공원추형의 형상을 보였다. 그러나 기상은 분무의 내부에 넓게 분포하였다.
2. 액상은 분무 외곽에서 강한 형광강도를 나타내었으며, 하부로 갈수록 그 신호는 약해졌다. 그러나 기상은 분무 내부 전체에 걸쳐 분포하며, 하부로 갈수록 강한 형광강도를

나타내었다.

3. 교정실험을 통해 형광강도에 대한 농도의 교정식을 얻을 수 있었으며, 기상의 정량적인 농도 분포를 구할 수 있었다.
4. 기상은 공기유입이나 와류와 같은 2차 유동의 영향을 크게 받으며 거동한다. 반면, 액상은 외부 유동의 영향을 상대적으로 적게 받으며, 일정한 분포 형태를 유지하였다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 기계공학 연구과제(1998-001-E00245)의 연구비에 의해 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계기관에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Iwamoto, Y., Noma, K., Nakayama, O., Yamauchi, T. and Ando, H., "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE paper, No.970541.
2. M. Wirth, W. F. Piock, G. K. Fraidl, P. Schoeggel and E. Winkhofer, "Gasoline DI Engines: The Complete System Approach by Interaction of Advanced Development Tools", SAE paper, 980421.
3. Toysei Yamauchi and Tomoyuki Wakisaka, "Computation of the Hollow-Cone Sprays from a High-Pressure Swirl Injector for a Gasoline Direct Injection SI Engine", SAE paper, No.962016.
4. Micheael H. Shelby, Brad A. Van DerWege and Simone Hochgreb, "Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engines", SAE paper, No.980160.
5. Wolfgang Ipp, Volker Wagner, Hanno Kramer, Michael Wensing and Alfred Leipertz, "Spray Formation of High Pressure Swirl Gasoline Injectors Investigated by Two-Dimensional Mie and Lief Techniques", SAE paper, No. 1999-01-0498.
6. L. A. Melton, "Spectrally separated fluorescence emissions for diesel fuel droplets and vapor", Applied Optics, Vol. 22, No. 14, pp. 2224~2226, 1983.
7. M. E. A. Bardsley, P. G. Felton and F. V. Bracco, "2-D Visualization of a hollow-cone spray in a cup-in-Head, Ported, I.C. Engine", SAE paper, No.890315.
8. 김덕줄, 차건중, "Exciplex법에 의한 디젤 분무의 구조와 분사제 개선에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 B권, 제 19권 제 9호, pp. 2373~2385, 1995.
9. Lynn A. Melton, "Exciplex-Based Vapor/Liquid Visualization Systems Appropriate for Automotive Gasolines", Applied Spectroscopy, Vol. 47, No. 6, pp.782~786, 1993.
10. J. B. Gandhi, P. G. Felton, B. F. Gajdeczko and F. V. Bracco, "Investigation of the Fuel Distribution in a Two-Stroke Engine with and Air-Assisted Injector", SAE paper, No. 940394.
11. A. A. Rotuno, M. Winter, G. M. Dobbs, and L. A. Melton, "Direct Calibration Procedures for Exciplex-Based Vapor/Liquid Visualization of Fuel Sprays", Combust. Sci. and Tech., Vol. 71, pp. 247~261, 1990.
12. Jiro Senda, Tomoyuki Kanda, Masaaki Kobayashi and Hajime Fujimoto, "Quantitative Analysis of Fuel Vapor Concentration in Diesel Spray by Exciplex Fluorescence Method", SAE paper, No. 970796.
13. 최동석, 박형호, 김덕줄, "Exciplex 형광법에 의한 가솔린 직접분무의 기상과 액상 분포 및 농도측정", 대한기계학회 논문집 B권, 제 23권 제 4호, pp. 531~539.