

분무각이 다른 GDI인젝터에 대한 증발특성

최 동 석* · 김 덕 줄†

(2000년 10월 13일 접수, 2001년 3월 3일 심사완료)

Vaporizing Characteristics of Spray from Two Different GDI Injectors

Dong-Seok Choi and Duck-Jool Kim

Key Words: GDI(가솔린 직접 분사), Exciplex Fluorescence Method(Exciplex 형광법), Fluorescence Intensity(형광강도), Quenching(소광), Hollow Cone Spray(중공 원추형 분무)

Abstract

Vaporizing characteristics of two GDI injectors with different spray angles were investigated using exciplex fluorescence method. Injector I has narrower spray angle, while injector II has wider one. The exciplex system of fluorobenzene and DEMA in a non-fluorescing base fuel of hexane was employed. In quantifying concentration of fuel vapor, quenching of concentration and temperature was corrected. Droplet size and velocity were also measured by PDPA under non-vaporizing condition. From obtaining the images of liquid and vapor phases, vaporizing GDI sprays could be divided as two regions: cone and mixing regions. For injector I, vortex region was not developed. High concentration of fuel vapor due to vaporization of many fine droplets was distributed near the spray axis. For injector II, droplets with the diameter of about $10\mu\text{m}$ were distributed in the vortex region. The vortex region had high concentration of fuel vapor due to vaporization of these droplets. Particularly, higher and lower concentrations of fuel vapor were balanced at 2ms after the start of injection for injector II.

1. 서론

와류형 분무는 분무각의 조절이 용이하고 와류의 형성으로 인하여 비교적 균일한 입경을 얻을 수 있다.⁽¹⁾ 또한 중공 원추형의 분무형태를 가지므로 GDI(Gasoline direct injection) 엔진에서 요구하는 분사모드를 잘 충족시켜준다.^(2~4) 따라서 와류형 고압 인젝터는 GDI인젝터로 널리 사용되고 있다. GDI분무의 외형적 특성은 Evers⁽⁵⁾에 의하여 선단영역(leading edge), 원추영역(cone region), 후미영역(trailing edge), 및 와 구름영역

(vortex cloud region)의 4단계로 나누어 졌다. 특히 분무의 외곽에서 형성된 와(vortex)영역이 와 구름영역으로 발달한다고 보고하였다. 그 후 많은 연구자들에 의해 비증발 GDI분무에 대한 분무특성이 규명되었다.^(6~8)

한편, GDI엔진은 연소실내로 연료를 직접 분사하기 때문에 분무의 증발과정에 대한 이해가 필요하다. 지금까지 증발분무에 대한 연구는 주로 디젤분무를 대상으로 수행되었다. 대표적으로 Yeh 등⁽⁹⁾은 레이저 유도형광법을 사용하여 디젤 자유분무에 대하여 증기상을 정량적으로 측정하였다. Senda 등⁽¹⁰⁾은 디젤분무를 대상으로 벽면 충돌후의 증기상의 거동 및 농도의 정량화를 수행하였다. GDI분무는 솔리드콘의 디젤분무와는 달리 중공 원추형의 분무 형태를 가짐으로 디젤 분무의 증발과정과는 다른 양상을 나타낸다. 그

* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

Email : djkim@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3072 FAX : (051)516-9598

러나 이에 대한 실험적인 정량적 연구는 미흡한 실정이다. 수치적 연구로 Han 등⁽¹¹⁾은 실제 엔진 작동조건에 해당하는 고온·고압의 분위기에서 GDI분무의 구조를 해석한 바 있다. 실험적 연구로 Ipp 등⁽¹²⁾은 exciplex형광법으로 GDI분무내 증기상의 정성적인 농도 분포를 나타낸 것이 대표적이다. 저자 등⁽¹³⁾은 선행연구를 통하여 GDI분무내 증기상의 농도를 정량적으로 구한 바 있으나 농도와 온도의 소광현상에 대한 보정은 미흡하였다.

따라서 본 연구에서는 분무각이 작아 솔리드콘에 가까운 분무형태를 가지는 인젝터와 분무각이 크고 완전한 증공 원추형 분무형태를 가지는 두 종류의 GDI인젝터를 대상으로 증발특성을 정량적으로 비교하고자 한다. 증기상을 정량화하는데 있어 증기상의 형광에 큰 영향을 미치는 농도 및 온도의 소광현상을 보정하여 증기상 농도의 정량화에 대한 정도를 향상시켰다. 또한 액상과 증기상의 화상으로부터 증발 GDI분무에 대한 원추영역과 혼합영역을 구분하고 그 특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

Fig. 1은 증발 GDI분무를 조사하기 위한 실험장치의 개략도이다. 분무실은 증발 분무의 구조와 거동을 조사하기 위하여 고온·고압의 분위기를 형성할 수 있도록 설계되었다. 즉 최대 허용압력과 온도는 각각 3MPa과 600K이다. 또한 상부에 냉각용 자켓을 만들어 인젝터의 과열을 방지하였다.

산소분자에 의한 형광의 소광현상을 줄이기 위하여 분위기 기체로 질소를 사용하였다. 분무실내 측정면적의 온도분포를 균일하게 만들기 위하여 질소를 분무유동에 영향을 미치지 않을 정도의 속도인 약 0.1m/s 이하로 유동시켰다. 1회 분사 후 분무실 내부에 잔류된 형광물질 제거하기 위하여 질소 퍼징과 진공펌프를 사용하였다.

연료탱크는 분사시 발생하는 맥동을 최소화하

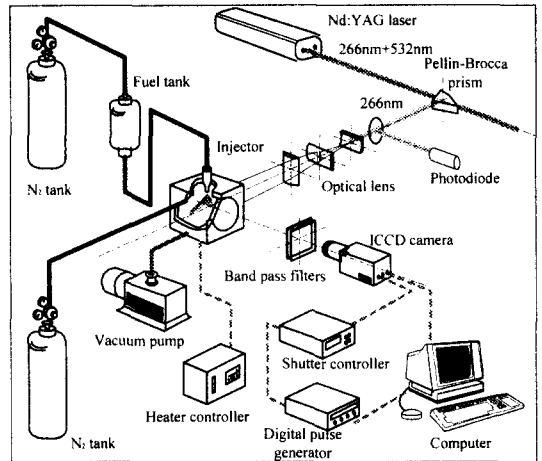


Fig. 1 Experimental setup

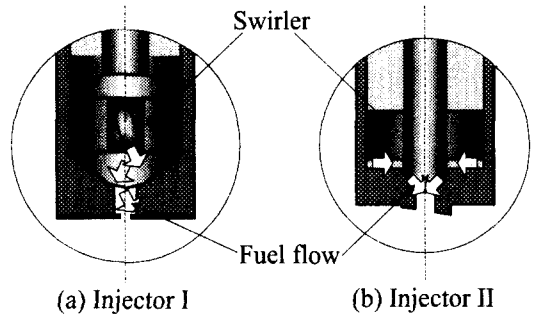


Fig. 2 Tip configurations of injector I and II

도록 축압기를 사용하였으며, 질소로 가압하여 분사압력을 설정하였다.

여기광원으로 Nd:YAG레이저의 4차 조화파인 266nm를 사용하였으며, 원통형렌즈의 조합으로 길이 60mm, 두께 약 300 μ m의 평면광을 만들었다. 증기상과 액상의 신호를 취득하기 위하여 사용한 광학필터는 각각 반치폭 25nm, 피크파장 300nm(증기상), 반치폭 25nm, 피크파장 400nm(액상)이었다. 또한 여기광원의 파장인 266nm에 의한 산란신호를 제거하기 위하여 sharp cut 필터(280nm이상 투과)를 사용하였다.

형광화상을 취득하기 위하여 ICCD카메라(640 \times 480화소)를 사용하였다. ICCD카메라와 레이저의 동기는 레이저의 Q-switch sync 출력신호를 입력신호로 사용한 동기회로를 사용하여 맞추었다.

Fig. 2는 인젝터 I과 II에 대한 팁의 형상을 나타낸 그림이다. 인젝터 I의 니들은 원추형이며 선회기 홈의 경사각이 작아 분무의 축방향 속도성분이 강하게 작용하도록 설계된 구조이다. 반면에 인젝터 II는 볼형 니들과 반경방향에서 연료가 유입되어 와류를 형성함으로써 인젝터 I에 비하여 분무가 반경방향으로 넓게 퍼지는 특성을 가지고 있다. 분공의 크기는 인젝터 I과 II에 대하여 각각 $420\ \mu\text{m}$, $930\ \mu\text{m}$ 이다.

2.2 실험조건

Fig. 3은 두 인젝터에 대한 분무형태와 관찰영역을 나타낸 그림이다. 본 연구에서 사용한 인젝터는 분무각이 약 30도인 인젝터 I과 분무각이 약 70도인 인젝터 II이다. 특히 인젝터 II는 분무축이 수직축에 대하여 5도 경사져 있다.

Exciplex형광법을 적용하기 위하여 용매로 헥산, 첨가제로 플루오로벤젠과 DEMA(N,N-diethymethylamine)를 사용하였다. 이들의 혼합비는 체적비로 헥산 89%, 플루오로벤젠 2%, DEMA 9%이다. 분무실험의 경우, 두 인젝터 모두 1회 분사 당 15mg을 분출시키도록 분사기간을 2ms로 설정하였다. 이것은 GDI엔진의 중부하조건에서의 분사량과 유사하다.⁽¹⁴⁾ 분사압력은 5.1MPa, 분위기 압력과 온도는 각각 0.1MPa, 473K으로 설정하였다. 교정 실험의 경우, 선행연구⁽¹³⁾와 같이 분무실내에

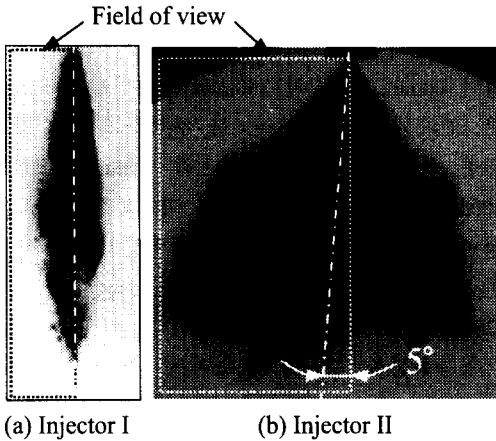


Fig. 3 Spray patterns and fields of view

소형의 챔버를 설치하고 분무실험과 동일한 분위기 압력과 온도에서 수행하였다. 농도는 당량비 0.5에서 3 사이의 범위에서 설정하였다. 또한 상온, 대기압 상태에서 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 사용하여 분무 입경과 속도를 측정하였다. 연료로 헥산을 사용하였으며, 산란각은 30도, 굴절률은 1.379이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무의 액상 및 증기상의 발달과정

일반적으로 중공형 분무는 분무거동에 의하여 외부공기의 역순환이 일어나고 액적과 혼합하는 혼합영역(mixing region)과 분무주류로 둘러싸인 원추영역(cone region)으로 구분된다. 다음은 이 영역의 공간적 구분과 영역별 분무 발달과정을 조사하였다.

Fig. 4는 인젝터 I에 대한 분무의 발달과정을 액상과 증기상에 대하여 나타낸 것이다. 앞서 언급한 관찰영역에서 취득된 액상 및 증기상의 화상을 대칭적으로 나타내었다. 왼쪽이 액상, 오른쪽이 증기상의 화상을 나타낸다. 또한 분사 후

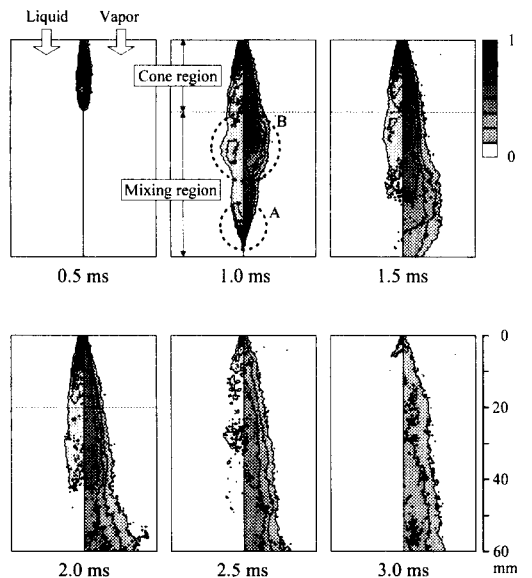


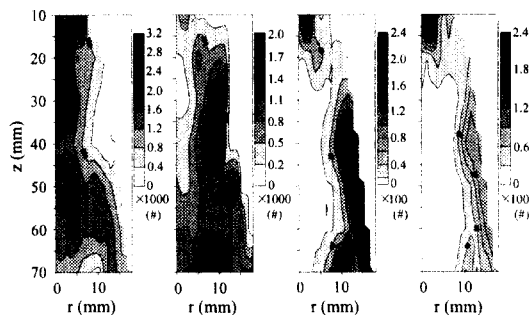
Fig. 4 Development of liquid and vapor phases of spray for injector I

3ms까지의 화상 중 각각의 상에 대한 최대강도의 값으로 나누어 0에서 1의 값을 가지는 상대적인 형광강도로 나타내었다. 그림에서 lookup table에 없는 검게 표시된 부분은 컨투어 선들이 겹쳐져 있기 때문이다. 측정영역의 공간적 범위는 인젝터 팁으로부터 축 아래방향으로 60mm까지이다.

분무의 형태는 앞서 언급한 인젝터 팁의 기하학적 형상으로 인하여 분무가 반경방향으로 넓게 퍼지지 못하고 축방향으로 성장하고 있다. 원추 영역은 액상의 형광강도가 강하고 원추의 형태를 유지하며 증기상 화상에서 와의 형성이 시작되는 영역인 인젝터 팁으로부터 약 20mm까지, 그 이후는 혼합영역으로 구분하였다. 액상의 경우, 주로 원추영역인 인젝터 팁 부근과 분무의 외곽에서 강한 형광강도를 나타내는 반면, 분무내부와 혼합영역인 하류로 갈수록 형광강도가 약해졌다. 또한 1ms에서 분무의 하단부에 선두질량(leading mass)으로 보이는 부분(A)을 볼 수 있다. 이것은 인젝터 I의 니들 형상이 원추형이며 분공이 약 420 μ m로 작기 때문에 생성된 것이다. 한편 증기상 화상의 경우, 분무 중심축 부근에서 강한 형광강도가 나타나고 있다. 약 1ms를 기준으로 이전 시간에서는 증기상의 형태가 액상과 유사한데 반하여 이후시간에서는 혼합영역에서 활발한 증발로 인하여 증기상의 형태가 크게 넓어진 것을

볼 수 있다. 또한 1ms에서 화상의 중간부분에 볼록한 모양(B)을 볼 수 있는데, 이것은 와류형 고압 인젝터의 특징인 와(vortex) 영역이 형성된 것이며 분무하류로 이동하면서 성장하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 인젝터 I에 대하여 상온(293K)에서 PDPA로 측정된 입경별 수밀도 분포를 나타낸 것이다. 분사압력과 분사기간은 Fig. 4와 동일하다. 입경의 측정은 10Hz로 단발 분사시켜 5000개의 데이터를 취득하였다. 그 후 분사개시부터 분사 종료 후인 10ms까지의 입경 데이터를 분리한 후 앙상블 평균하여 2차원적으로 나타내었다. 비증발 조건에서의 입경별 수밀도 분포를 통하여 증발조건이 되었을 때 어떤 크기의 액적이 증발에



(a) $0\mu\text{m} < d < 10\mu\text{m}$ (b) $20\mu\text{m} < d < 30\mu\text{m}$ (c) $40\mu\text{m} < d < 50\mu\text{m}$ (d) $60\mu\text{m} < d$
Fig. 5 Number density distribution of size-classified droplets for injector I

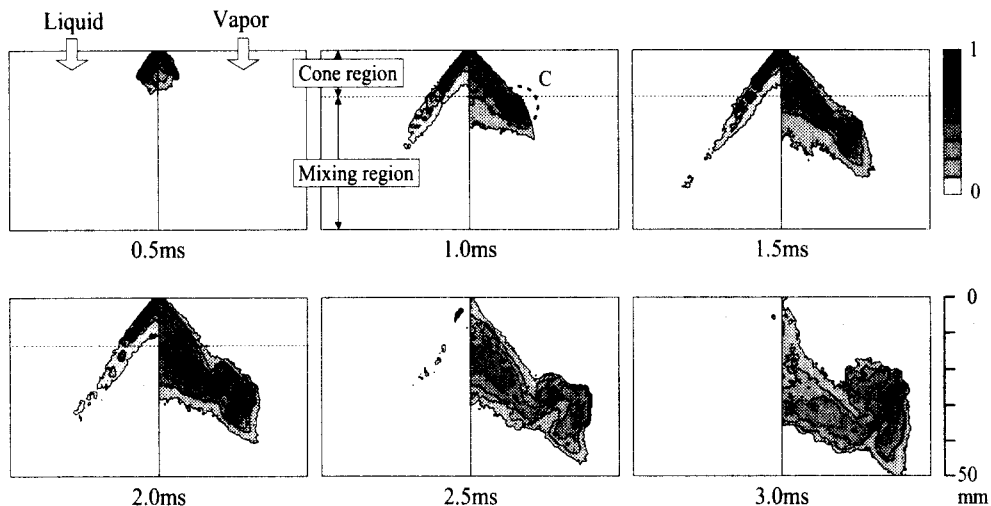


Fig. 6 Development of liquid and vapor phases of spray for injector II

크게 영향을 미치는지를 알 수 있다.

분무주류에 의한 와류로 분무의 외곽에서 수밀도가 낮은 큰 액적($60\mu\text{m}$ 이상)이 존재하고 내부는 다수의 미세한 액적($10\mu\text{m}$ 이하)이 분포한다. 따라서 분위기 온도가 상승된 증발조건(473K)에서는 큰 액적이 주로 분포하는 팁 부근과 분무의 외곽에서 강한 액상의 형광신호가 검출되며, 분무의 중심으로 갈수록 미세한 액적의 증발로 액상의 형광강도가 약해지는 반면 증기상의 신호는 강하게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 인젝터 II에 대한 분무의 발달과정을 Fig. 4와 동일한 방법으로 나타낸 것이다. Fig. 4와는 달리 액상의 화상으로부터 선두질량은 관찰되지 않으며, 증공형 분무의 형태가 뚜렷이 나타난다. 액상과 증기상의 화상으로부터 원추영역은 와영역의 발생지점(C)인 인젝터 팁으로부터 약 13mm 까지, 그 이후는 와의 발달과 주위공기와 증기가 활발히 상호작용하는 혼합영역으로 구분하였다. 액상의 경우, 원추영역에서 와류의 영향으로 분무의 외곽에서 강한 형광신호를 나타내며, 분무의 내부는 고온의 분위기로 인한 증발로 액상신호가 거의 검출되지 않고 있다. 혼합영역에서의 액상은 증발되어 감소하고 있음을 볼 수 있다. 증기상의 경우, 주로 분무 내부에 분포하며, 특히 와가 형성되는 혼합영역에서 증기상의 신호가 높게 나타난다.

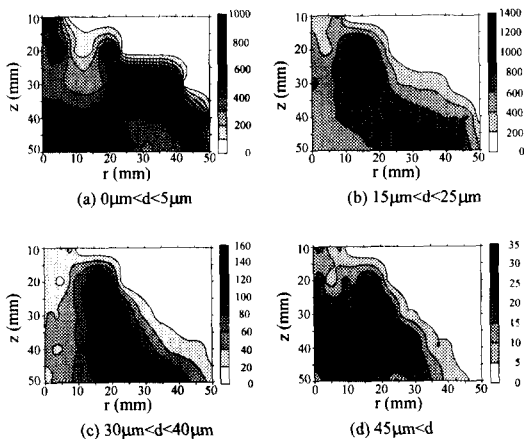


Fig. 7 Number density distribution of size-classified droplets for injector II

Fig. 7은 Fig. 5와 같이 인젝터 II에 대한 액적의 입경별 수밀도 분포를 2차원적으로 나타낸 것이다. Fig. 6에서 언급한 와 영역 부근에서 다수의 미세한 액적($5\mu\text{m}$ 이하)이 존재함을 볼 수 있다. 큰 액적($40\mu\text{m}$ 이상)은 주로 분무의 외곽에 분포하고 있다. 이것은 분무주류에 의한 와류의 영향으로 큰 액적은 외곽으로 밀려나가고 미세한 액적은 공기 유입의 영향으로 분무내부로 들어오기 때문이다. 특히 와 영역은 분무속으로 유입된 분위기 기체의 운동에 의해 형성되며, 작은 액적이 운동량을 잃어버려 말려올라간 것이다. 증기상도 이와같은 액적의 운동에 수반되어 말려올라가서 생성된다. 이 영역에서 분위기 기체와의 혼합과 활발한 증발로 인하여 증기상의 농도가 짙을 것으로 생각된다. 이것은 다음절의 증기상의 정량화를 통하여 검증할 것이다.

3.2 증기상의 교정

분무 단면적을 레이저 입사방향으로 n 개의 등간격의 격자로 분해하면, 레이저 입사측으로부터 i 번째 격자로 입사되는 레이저광의 강도 I_i 는 식 (1)과 같다.

$$I_i = I_0 \exp(-\epsilon \cdot L \cdot \sum C_i) \tag{1}$$

여기서 I_0 는 초기 입사광의 강도, ϵ 은 몰 흡광계수 ($\text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{m})$), L 은 격자의 길이(m)이다. i 번째 격자에서의 형광의 발광강도 I_i 는 식 (2)로 표시되며 형광강도로부터 형광물질의 농도를 구할 수 있다.

$$I_i = A \cdot K \cdot I_0 \cdot \exp(-\epsilon \cdot L \cdot \sum C_{i-1}) \cdot \{1 - \exp(-\epsilon \cdot C_i \cdot L)\} \tag{2}$$

여기서 A 는 광학계의 장치 정수, K 는 발광 천이되는 속도 정수, C_i 는 i 번째 격자의 형광물질 농도(mol/m^3) 이다.

Fig. 8은 $T_a=473\text{K}$, $P_a=0.1\text{MPa}$ 의 분위기 조건에서 증기 농도비에 따른 형광강도의 변화를 나타낸 것이다. 종축과 횡축은 각각 최소농도(C_{min})에

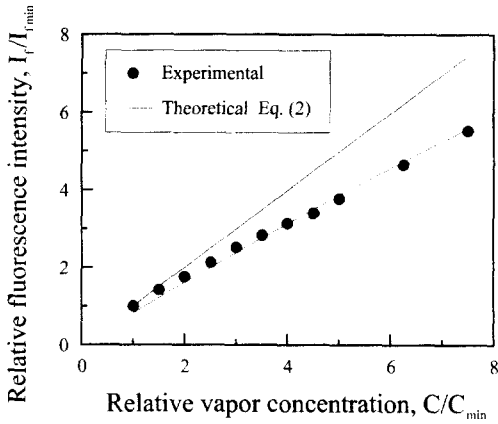


Fig. 8 Calibration curve of vapor concentration

서의 형광강도(I_{fmin})와 농도로 정규화시켰다. 점선은 교정실험에서 얻은 값의 피팅 곡선이며, 실선은 식 (2)로부터 계산된 값이다. 이때 격자의 길이(L)는 $1.4 \times 10^{-4}m$ 이며, ϵ 은 266nm의 입사광에 대해 $73.56m^3/(mol \cdot m)$ 를 사용하였다. Fig. 8에서 실험값과 이론식에 의한 계산값의 차이는 증기농도에 의한 소광효과로 인한 것이다. 따라서 식 (2)는 다음과 같이 수정된다.

$$I_f = A \cdot K \cdot K_{cq} \cdot I_0 \cdot \exp(-\epsilon \cdot L \cdot \sum C_{i-1}) \cdot \{1 - \exp(-\epsilon \cdot C_i \cdot L)\} \quad (3)$$

여기서 K_{cq} 는 증기 농도에 의한 소광계수로 1 이하이다. Fig. 9는 농도비에 따른 소광계수 K_{cq} 를 나타낸 것이다.

직분식 가솔린분무와 같이 액체연료가 증발되면서 혼합기가 형성되는 경우, 혼합기 온도는 증발잠열로 인해 분위기 온도보다 낮게 된다. 동시에 증기상 중의 형광물질의 발광강도도 혼합기 온도에 의해 변한다. 따라서 혼합기의 온도(T)를 식 (4)와 같이 고려해 주어야 할 필요가 있다.

$$T = \frac{-C_v(c_n(T_{sat} - T_{f0}) + h_f) + \rho_a c_a T_{ent} + C_v c_{fv} T_{sat}}{C_v c_{fv} + \rho_a c_a} \quad (4)$$

여기서 C_v 는 연료증기의 농도 (kg/m^3), ρ_a 는 분위기 기체의 밀도 (kg/m^3), c_n 는 연료증기의 비열 ($J/(kg \cdot K)$), c_n 은 액체연료의 비열 ($J/(kg \cdot K)$), c_a

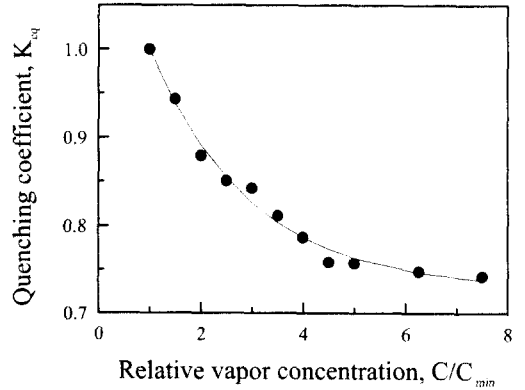


Fig. 9 Concentration quenching coefficient with different concentration ratios

는 분위기 기체의 비열 ($J/(kg \cdot K)$), h_f 는 연료의 증발잠열 (J/kg), T_{sat} 는 연료의 포화온도 (K), T_{f0} 는 액체연료의 초기온도 (K), 그리고 T_{ent} 는 분무내로 유입되는 분위기기체의 온도 (K)이다. 각각의 격자에서의 혼합기의 온도와 증기상의 농도는 식 (3)과 식 (4)를 동시에 만족하도록 분무외곽에서 분무축쪽으로 계산된다. 각각의 격자로 유입된 분위기 기체의 온도는 인접한 외곽영역의 온도와 분위기 기체온도의 평균값으로 대입하였다.

한편, 형광강도는 저온영역에 있어서는 어떤 온도에서 극대치 I_0 에 도달하고 온도의 상승에 따라 감소하며 고온상태에서는 0에 접근한다. 이 온도와 형광강도의 함수는 문헌⁽¹⁵⁾으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{I_0 - I_f(T)}{I_f(T)} = K_{Tq} \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

여기서 I_0 는 저온 영역에서의 형광강도의 극대치, $I_f(T)$ 은 온도 T 에서의 형광강도, K_{Tq} 는 온도 소광계수, E 는 진동준위와 관계된 열 에너지 (J/mol), R 은 기체상수 ($J/(mol \cdot K)$)이다. 어떤 기준 온도 T_0 에서의 형광강도를 $I_f(T_0)$ 라 하면, 기준 온도 T_0 와 국소 온도 T 에서의 형광강도비는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_f(T)}{I_f(T_0)} = \frac{1 + K_{T_0} \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right)}{1 + K_{T_0} \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)} \quad (6)$$

Fig. 10은 온도에 의한 소광현상을 보정하기 위하여 분위기 온도에 따른 증기상의 형광강도를 나타낸 것이다. 393K의 분위기 온도에서의 형광강도를 기준으로 각각의 분위기 온도에서의 형광강도로 나누어 상대 형광강도를 나타내었다. Fig. 10으로부터 온도 소광계수 K_{T_0} 를 구하였다.

이상과 같은 과정의 식들을 사용하여 Senda 등⁽¹⁰⁾이 제안한 알고리즘을 사용하여 증기상의 형광강도로부터 농도를 구하였다.

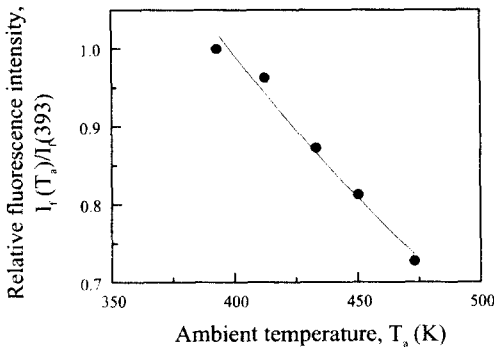


Fig. 10 Change in fluorescence intensity with different ambient temperatures

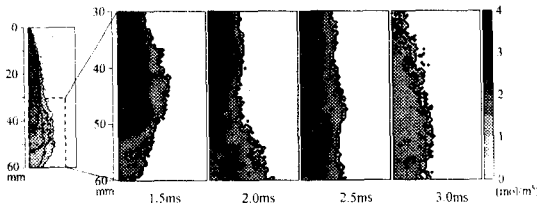


Fig. 11 Distribution of vapor concentration for injector I

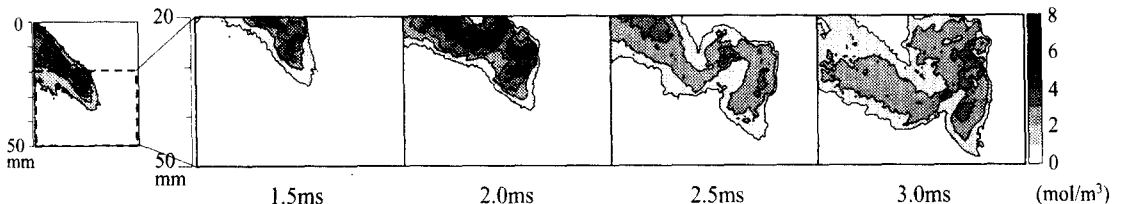


Fig. 12 Distribution of vapor concentration for injector II

3.3 분무의 증발특성

증기상 교정의 결과를 분무에 적용할 때 제한이 있다. 즉 여기원인 레이저광이 수밀도가 높은 액적을 통과할 때 여기광의 흡수 및 산란이 강하게 발생하는 경우이다. 이 경우는 교정의 결과를 직접 분무에 적용하기가 어렵다. 따라서 3.1절의 결과에서 액상이 거의 없거나 상대적으로 적은 부분인 혼합영역을 대상으로 정량화하였다.

Fig. 11은 인젝터 I에 대한 증기상의 정량화 결과이다. 분사 후 1.5ms에서부터 0.5ms 간격으로 분사종료 후인 3ms까지 나타내었다. 위치는 혼합영역의 일부인 인젝터 팁으로부터 30mm로부터 60mm 사이를 대상으로 하였다.

분사 후 시간의 경과에 따라 분무중심 축 부근에서 짙은 농도를 나타내었으며, 분무외곽으로 갈수록 농도가 얇아졌다. 이것은 인젝터 I의 경우, 분무각이 작고 혼합영역에서 와의 발달이 활발하지 못하여 분무축 부근에 존재한 미세한 액적을 분무외곽으로 이동시키지 못하기 때문으로 생각된다. 따라서 분무내부에 다수 존재하는 10 μm 이하의 액적들이 증발되어 3mol/m³ 이상의 비교적 높은 농도를 나타내었다. 2ms 이후에는 농도가 균일해지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 분무주류가 축 방향의 속도성분이 강하므로 관찰영역에서 역 방향의 와류를 크게 형성시키지 못하고 축하방향으로 진행되었기 때문이며, 분사후의 액적들의 증발로 균일한 농도분포를 가지는 것으로 생각된다.

Fig. 12는 인젝터 II에 대한 증기상의 농도분포이다. 혼합영역의 일부인 인젝터 팁으로부터 20mm에서 50mm 사이를 정량화 대상으로 하였다. 시간의 경과에 따라 혼합영역에 와가 형성되어 크게 발달하고 있다. 이것은 인젝터 II 팁의

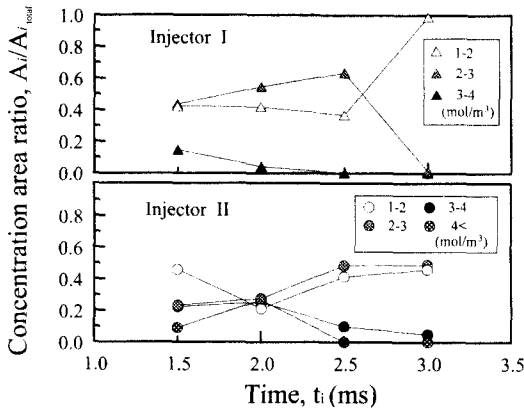


Fig. 13 Comparison of vapor concentration for injector I and II

기하학적 형상에 의하여 분무각이 크고 주위공기의 유입이 활발하여 와 구름영역의 형성이 보다 큰 것으로 생각된다. Fig. 6에서 언급했듯이 와 영역에서는 작은 액적($10\mu\text{m}$ 이하)이 운동량을 잃어버려 말려 올라가며, 증기상도 이와 같은 액적의 운동과 더불어 이동함으로써 와가 성장해 나간다. 농도분포도 2ms에서 다수의 미세한 액적의 증발로 고농도(4mol/m^3 이상)를 나타내며 시간의 경과에 따라 주위 공기와의 혼합에 의하여 농도가 균일해져 감을 볼 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 11과 Fig. 12에서 각각의 시간에서 정량화 영역내 분무의 전체면적(A_{total})에 대한 각각의 농도에 해당하는 면적(A_i)으로 나누어 무차원화 시켰다. 이 농도 면적비를 통하여 분무각이 서로 다른 인젝터 I과 II에 대한 증발특성을 비교하였다.

인젝터 I의 경우, 분무의 중심부에서 발생한 3mol/m^3 이상의 농도가 분사 후 1.5ms에서 약 15%차지하며 그 외의 농도영역은 비슷한 비율을 나타내고 있다. 시간의 경과에 따라 $2\sim 3\text{mol/m}^3$ 의 농도범위가 분무에서 주요한 농도범위를 나타낸다. 분사 종료 후에는 분무가 급격히 하류로 진행되기 때문에 $2\sim 3\text{mol/m}^3$ 의 농도범위는 사라지고 앞서 언급한 분사 후의 액적들에 의한 증발로 $1\sim 2\text{mol/m}^3$ 의 농도범위로 균일해진다. 반면에 인젝터 II의 경우, 분사종료 후인 3ms에서 3mol/m^3 이하의 농도가 발달된 와구름 영역내에서 소멸되지 않고 잔류하고 있다. 따라서 3mol/m^3 을 기준으

로 이하를 저농도, 이상을 고농도로 구분하였다. 또한 2ms에서 저농도 영역과 고농도 영역 모두가 비슷한 비율을 나타내고 있다. 따라서 분사 후 약 2ms가 고농도와 저농도가 평형을 이루는 시간으로 생각된다.

4. 결론

분무각이 서로 다른 두 종류의 GDI 인젝터를 대상으로 exciplex 형광법을 사용하여 상분리를 통한 증발과정을 조사하고 증기상의 농도를 정량화하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 증발 GDI분무의 형상구분은 분무외곽에서 초기에 형성된 와를 기준으로 상류를 원추영역, 하류를 혼합영역으로 구분할 수 있었다.
- (2) 분무각이 작고 축방향의 속도성분이 강한 GDI분무(인젝터I)의 경우, 와 영역이 크게 발달하지 못하며 $10\mu\text{m}$ 이하의 액적이 분무의 중심부에서 증발되어 짙은 농도(3mol/m^3)의 혼합기가 생성되었다.
- (3) 분무각이 크고 반경방향의 속도성분이 강한 분무(인젝터II)의 경우, 와 영역이 크게 발달하며 수밀도가 높은 약 $10\mu\text{m}$ 전후의 액적들이 이 영역에서 증발되어 고농도(4mol/m^3)의 혼합기가 생성되었다.
- (4) 인젝터II의 경우, 혼합영역에서 저농도(3mol/m^3 이하)와 고농도(3mol/m^3 이상)가 분무내에서 차지하는 비율이 거의 같아지는 평형점은 분사 후 2ms였다.

참고문헌

- (1) Lefevre, A. H., 1989, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing.
- (2) Kume, T., Iwamoto, Y., Iida, K., Murakami, M., Akishino, K., and Ando, H., 1996, "Combustion Control technologies for Direct Injection SI Engines," *SAE Paper*, No. 960600.
- (3) Dodge, L. G., 1996, "Fuel Preparation Requirements for Direct-Injected Spark-Ignition Engines," *SAE Paper*, No. 962015.
- (4) Zhao, F., Lai, M. -C. and Harrington, D. L.,

- 1999, "Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 25, No. 5, pp. 437~562.
- (5) Evers, L. W., 1993, "Characterization of the Transient Spray from a High Pressure Swirl Injector," *SAE Paper*, No. 940188.
- (6) Naitoh, K. and Takagi, Y., 1997, "Synthesized Spheroid Particle(SSP) Method for Calculating Spray Phenomena in Direct-Injection SI Engines," *SAE Paper*, No. 962017.
- (7) Preussner, C., Döring, C., Fehler, S. and Kampmann, S., 1998, "GDI: Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance," *SAE Paper*, No. 980498, pp. 147~164.
- (8) 최동석, 류경훈, 차건중, 김덕줄, 1999, "와류형 고압 분무의 속도 및 입경분포에 관한 연구," *대한기계학회논문집(B)*, Vol. 23, No. 10, pp. 1310~1319.
- (9) Yeh, C., Kamimoto, T., Kosaka, H., and Kobori, S., 1994, "Quantitative Measurement of 2-D Fuel Vapor Concentration in a Transient Spray via Laser-Induced Fluorescence Technique," *SAE Paper*, No. 941953.
- (10) Senda, J. Kanda, T., Kobayashi, M. and Fujimoto, H., 1997, "Quantitative Analysis of Fuel Vapor Concentration in Diesel Spray by Exciplex Fluorescence Method," *SAE Paper*, No. 970796.
- (11) Han, Z. and Reitz, R. D., 1997, "Internal Structure of Vaporizing Pressure-Swirl Fuel Sprays," *Proc. ICLASS-97*, pp. 474~481.
- (12) Ipp, W., Wagner, V., Kramer, H., Wensing, M. and Leipertz, A., 1999, "Spray Formation of High Pressure Swirl Gasoline Injectors Investigated by Two-Dimensional Mie and LIEF Techniques," *SAE Paper*, No. 1999-01-0498.
- (13) 황순철, 최동석, 차건중, 김덕줄, 1999, "중발 조건에서 직분식 가솔린 분무의 증기농도의 분포," *한국액체미립화학회지*, Vol. 4, No. 4, pp. 1~8.
- (14) Parrish, S. E., 1997, "Spray Characterization in a Motored Direct-Injection Spark-Ignition Engine," Ph.D thesis, University of Wisconsin-Madison.
- (15) Yagi, K., Yoshida, Y. and Ohata, T., 1958, *Fluorescence(Theory·Measurement·Application)*, Nankou dou, (in Japanese).