

< 논문 >

LIEF 와 Mie 산란 방법을 이용한 직분식 가솔린 엔진의 스윙 및 슬릿 인젝터의 분무 특성

이창희[†] · 이기형^{*} · 황규민^{**}

(2004 년 10 월 14 일 접수, 2004 년 12 월 30 일 심사완료)

The Spray Characteristics of Swirl and Slit Injector to DISI Engine Using LIEF and Mie-scattering Method

Changhee Lee, Kihyung Lee and Kyumin Hwang

Key Words : Turbulent Occurring Point(난류발생시점), Deceleration Point(감속점), LIEF(Laser-induced Exciplex Fluorescence: 레이저 유도 형광법), Velocity Coefficient(속도계수), DISI Engine (Direct Injection Spark Ignition: 직분식 가솔린 엔진)

Abstract

The spray characteristics of DISI injector have a great role in gasoline engine efficiency and emission. Thus, many researchers have studied to investigate the spray characteristics of swirl and slit injectors that are used in a DISI engine. In this study, we tried to provide spray parameters, which affect on the spray characteristics such as injection pressure, ambient pressure and ambient temperature. In addition, we calculated t_b and t_c to investigate the break up mechanism of test injectors and obtained C_v to evaluate the spray characteristics. As the ambient pressure increases in case of slit injector, C_v decreases. The laser-induced exciplex fluorescence (LIEF) technique, which is based on spectrally resolved two-color fluorescent emissions, has applied to measure the liquid and vapor phases for on evaporating spray simultaneously. The TMPD/naphthalene proposed by Melton is used as a dopant to detect exciplex signal. The temporal and spatial distribution of liquid and vapor phases during the mixture formation process was measured by this technique. In the LIEF technique, the vapor phase is detected by the monomer fluorescence while the liquid phase is tracked by the exciplex fluorescence. From this experiment, we found that the spray area of the vapor phase is increased with elapsed time after injection and the area of liquid is decreased when the ambient pressure is 0.1MPa. However, the area tends to increase until the end of injection when the ambient pressure is 1.0MPa.

기호설명

- t_b : 감속점 [msec]
- t_c : 난류발생지점 [msec]
- S : 분무도달거리 [mm]
- V_b : 분열전의 분무도달거리 속도 [m/s]
- t : 분무 시작 후 경과시간 [msec]
- P_{inj} : 분사압 [MPa]
- P_a : 분위기 압력 [MPa]
- T_a : 분위기 온도 [K]
- V_{inj} : 분무초기속도 [m/s]

- ΔP : 분무차압 [MPa]
- ρ_f : 액체연료의 밀도 [kg/m^3]
- C_v : 속도계수

1. 서론

현재 전 세계적으로 ULEV(ultra low emission vehicle)와 CAFE(corporate average fuel economy) 등과 같은 갈수록 강화되고 있는 배기 규제에 대응하기 위하여 자동차 산업업체는 연료 경제성이 뛰어나고 오염 물질의 배출이 적은 차량에 대한 요구가 증대되고 있다.

직분식 가솔린 엔진의 연구 진행 과정을 보면 제 1 세대 엔진과 제 2 세대 엔진 시스템으로 변천

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
E-mail : leemech@encod.hanyang.ac.kr

TEL : (031)418-9293 FAX : (031)406-5550

^{*} 회원, 한양대학교 기계공학과

^{**} 한양대학교 대학원 기계공학과

되어 왔다. 제 1 세대 직분식 엔진은 월 가이드 (wall guide) 개념이며, 양산에 대한 의지는 높지만 연비 향상이 10% 전후여서 충분한 효과를 얻지는 못하고 있는 실정이다. 현재는 제 2 세대로서 더욱 높은 연비 성능을 가지는 spray guide 개념과 초고압 분사압력 (30MPa)을 갖는 인젝터의 개발을 통해 실용화를 목표로 활발히 연구되고 있다. 특히 최근의 연구 동향을 보면 연료의 고압화를 통한 연료의 미립화 촉진과 더불어 연료를 점화플러그 주변으로 성층화하기 위하여 다양한 인젝터의 형상이 개발되고 있다. 이러한 특성을 충족시키기 위해서는 인젝터에 관한 성능 데이터 뿐만 아니라 여러 조건을 충족할 수 있는 정량적인 분무 특성에 관한 데이터 베이스화가 선행되어야 할 것이다.

최근까지 실린더 내 계측 방식으로서 여러 가지 방법이 있으나 GDI엔진은 실린더 내에서 직접 분사하기 때문에 연료분무의 분포 및 거동과 공기/연료 혼합기 형성과정에 대한 이해가 매우 중요하다. 실린더 내 연료분무의 공간적 분포를 계측하는 방법으로서 슈리렌 촬영법, Mie 산란, 레이저 유도형광법 등이 널리 사용되고 있다. 슈리렌 촬영법과 Mie 산란법 등이 액적과 주위 분위기와 굴절지수의 차이를 이용하는데 반해 레이저 유도형광은 연료 내의 자체 형광발생을 이용하게 된다. 레이저 유도형광법에는 사용 연료의 자체 형광발생을 이용하는 자연 형광법, 특정 형광물질을 첨가하는 형광법, Exciplex 형광 법으로 구분된다. 그 중 Exciplex 형광법은 다른 방법과는 달리 연료의 액상과 증기상을 분리하여 동시에 계측할 수 있다. 지금까지 엔진 내 분무의 거동에 대한 연구는 활발하지만 거의 대부분 액상의 거시적인 특성에 대한 연구였으며 최근에 Exciplex 형광법을 적용하여 액상과 증기상의 거동^(1-5,10)과 혼합기의 공간분포를 해석하려는 연구가 이루어지고 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 직분식 가솔린 인젝터의 분무 특성을 파악하기 위하여 Fig. 1 과 같은 Mie 산란 영상(Mie-scattering image)을 취득할 수 있는 시스템을 구성하였다. 엔진 내의 연소실 상태를 모사하기 위하여 고압 챔버 내의 분위기 압력과 분위

기 온도 변화에 따른 분무의 영상을 취득하였다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저 (200mJ, 532 nm)를 사용하였고, 레이저로부터 유도된 빔은 원통 렌즈군(spherical lens)을 통하여 0.5 mm의 두께를 갖는 쉬트 빔(sheet beam)형태로 관측영역으로 조사 되도록 하였다. 고속 카메라의 트리거와 인젝터의 분무 시간 및 레이저 트리거 신호는 LabVIEW 프로그램을 이용하여 제어하였다.

Fig. 2 는 연료의 기상과 액상을 분리 계측하기 위한 LIEF 시스템 개략도이다. 기상과 액상을 분리 계측하기 위하여 사용된 레이저의 파장 및 강도는 각각 355nm 와 100mJ/pulse 이다. 여기서, 분위기 온도를 조절하기 위하여 사용된 히터의 용량이 4KW 이며, 컨트롤러를 이용하여 온도를 제어하였다.

또한, Nd:YAG 레이저의 특성상 10Hz 로 펌핑(pumping)될 때 에너지 레벨 및 세기의 변화가 적기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위하여 Fig. 3 과 같은 동기 신호 시스템을 구성하였다. Table 1, Table 2 와 Table 3 에 본 연구에서 사용된 실험 조건 및 인젝터의 형상과 연료의 조성을 나타내었다.

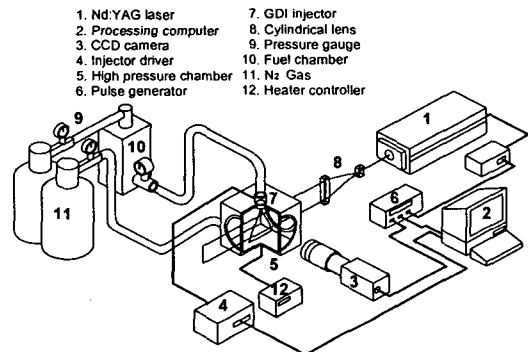


Fig. 1 Experimental apparatus

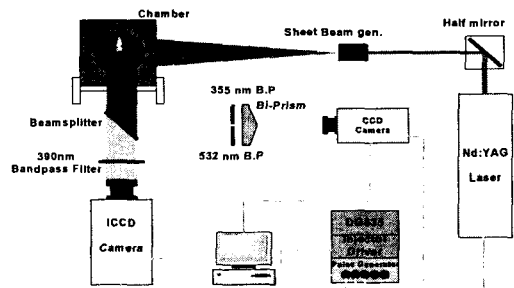


Fig. 2 Schematic diagram of LIEF system

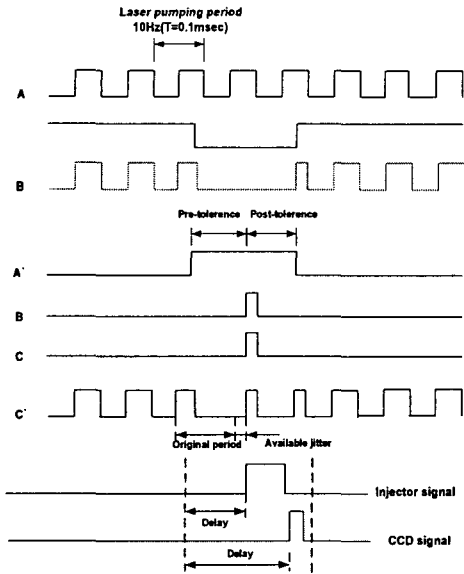


Fig. 3 Schematic diagram of the optimized pulse generation and timing chart

Table 1 Experimental conditions

Ambient temperature	283K, 373K, 432K
Ambient pressure [MPa]	0.1, 0.5 and 1.0
Spray	Injector: Swirl, Slit
	Fuel: Gasoline, n-Octane, n-Heptane
	Inj. Press. [MPa]: 5, 8, 10, 12
	Injection period: 3 msec

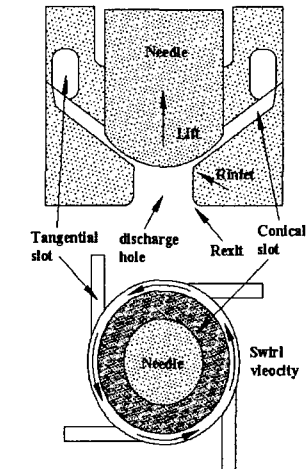
Table 2 Specification of test injectors

Type	θ_0, α_0	Injector hole [mm]	Injection Rate [mm ³ /sec]
Swirl (a)	$\theta_0 = 60^\circ$	0.5	10
Slit (b)	$\alpha_0 = 60^\circ$	$h_1 = 1.1$ $h_2 = 0.15$	11.3

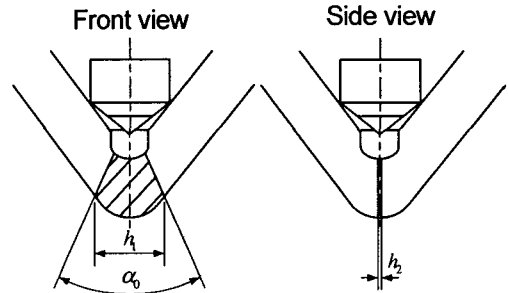
2.2 LIEF의 원리 및 광학계 구성

2.2.1 LIEF의 원리

LIEF를 이용한 가시화 기법은 기본적으로 레이저 유도 형광법(LIF)을 이용하며, 레이저 유도형광법이란 기저 전자 에너지 상태(bottom state)에 있는 원자나 분자들이 여기광을 흡수하여 여기 전자 에너지 상태(excited state)로 천이 된 후 다시 자가 방출(spontaneous emission) 하는 빛을 분석하



(a) Swirl injector



(b) Slit injector

Fig. 4 Schematic diagram of swirl and slit injector

Table 3 The properties of test fuels

	Boiling point [K]	Vapor press. [MPa]	Latent heat of vapor at 0.1MPa L[kj/kg]	Surface tension [mN/m]	Density [kg/m ³]	Critical temp. [K]	Critical press. [MPa]
n-Octane	399	0.0109	301.26	21.3	703	568.8	2.49
n-Heptane	372	0.0067	320	20.1	678	540	2.74
Gasoline	320~470		320	25.1	746		

는 방법이다. 여기된 형상 분자 M^* 는 액상 상태와 같은 농후한 영역에서 다른 분자 N 과 충돌 반응에 의해 새로운 형광 $(M+N)^*$ 로 쉽게 반응한다. 반응 가능성은 가스 상태보다 액상 상태가 더 크다. 소위 $(M+N)^*$ 를 Exciplex (excited-state complex)라 부른다. $(M+N)^*$ 는 M^* 의 형광 신호에 대하여 약 90nm 파장이 길어진다. 그러므로 에너지는 exciplex 상태를 유지하기 위하여 M^* 로 천이되게 된다. Felton et al⁽⁷⁾에 의하면, M^* 와 N 은 가역 반응이며, 소멸제의 농도를 적절히 조절하게 되면 M^* 와 Exciplex 가 각각 기상과 액상을 나타낼 수 있는 인자가 되게 할 수 있다. 기상과 액상에서 방출되는 형광 신호의 파장이 다를 경우 이용하여 적절한 필터를 사용하게 되면 각각의 상을 분리하여 가시화를 할 수 있다. Fig. 5는 기상과 액상에 대한 형광 시스템과 TMPD/ naphthalene(Np)의 형광에 대하여 도식화하였다. TMPD*와 $(TMPD+Np)^*$ 는 각각 M^* 와 $(M+N)^*$ 에 상응한다. 390nm 를 방출하는 TMPD* 형광물질은 기상상태를 나타내고, 480nm 의 $(TMPD+Np)^*$ 는 액상을 대표하는 신호이다.

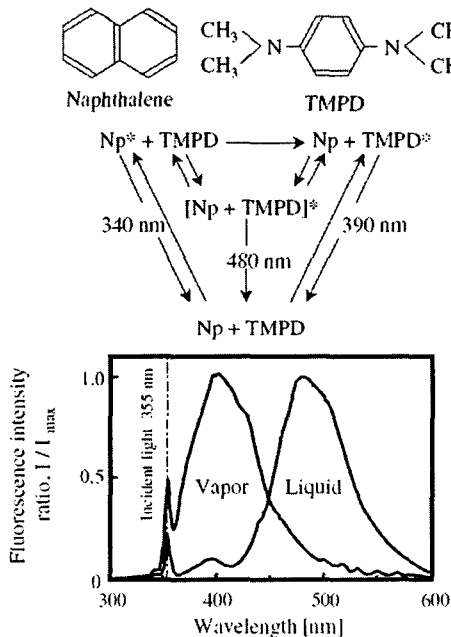


Fig. 5 Photophysics for TMPD/Np exciplex system and fluorescence spectra for vapor and liquid phases

2.2.2 LIEF의 광학계 구성

2 차원 LIEF 시스템에서 사용된 dichroic mirror, 투과 필터의 투과 특성을 Fig. 6 에 나타내었다. Nd:YAG 레이저는 조화파장이 355nm 이며, 원통형 렌즈(focal length=1000mm, 100mm)통과 후의 빔의 두께 및 넓이는 각각 0.5mm, 40mm 이다. 레이저 슈트광은 분사 방향을 따라 연소 챔버안으로 직접 조사하였다. 연소 챔버에 입사되는 레이저의 강도는 100mJ/pulse 이다. 105 UV 카메라 렌즈를 가진 CCD 카메라와 기상의 이미지를 취득할 수 있는 ICCD 카메라를 이용하여 액상과 기상을 동시에 측정할 수 있다. dichroic mirror(470 에 대해 투과와 반사비가 50:50)는 증발 분사로부터 액상과 기상까지의 방출되는 형광 신호를 분리하여 측정할 수 있다. 두 종류의 bandpass 필터를 각각 카메라 앞에 설치하여, 첫번째는 투과된 최대 파장은 기상으로부터 monomer 형광을 감지하기 위한 390nm(FWHM 10)이며, 두번째는 액상으로부터 exciplex 에서 감지된 532nm(FWHM 2)를 사용하였다. Fig. 6 에 나타낸 바와 같이 후자를 사용하는 이유는 480nm 부근에서 발생하는 monomer 의 형광신호의 방해를 최소화하기 위함이다. 레이저 빔의 355nm 에서 발생하는 액상으로부터 반사광의 영향은 카메라 게이트 작동과 광학 장치를 사용함으로써 완전히 제거된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 swirl 및 slit 인젝터의 분무 특성

Fig. 1 과 같은 시스템을 이용하여 분위기 압력

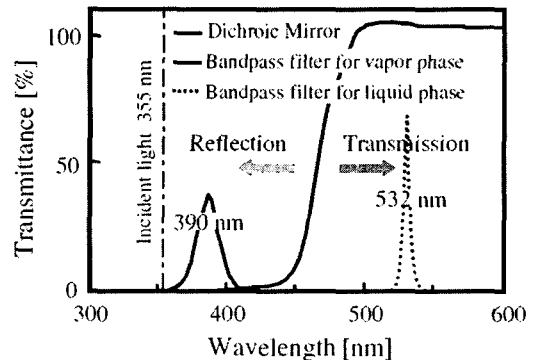


Fig. 6 Optical setup and transmission spectra of filter for LIEF

및 온도에 따른 가시화 결과를 Fig. 7 ~ Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 7 은 시간 경과에 따른 분무 도달 거리 특성을 가시화한 결과이다. 이 결과 그림으로부터 분위기 압력이 증가함에 따라 분무 도달거리와 분무각이 감소하는 특성을 보이고 있다. 이러한 이유는 주변 공기의 밀도가 증가함에 따라 인젝터에서 분사된 연료의 운동량의 감소로 인하여 분무 도달 거리가 감소되기 때문으로 판단된다.

Fig. 8 은 분위기 압력이 1MPa 로 일정하고, 분위기 온도를 변화시켰을 경우의 가시화 결과이다. 가시화 결과에 원으로 표기된 부분이

vortex cloud region 이 형성되는 부분이며, 이 영역은 주변 온도의 영향으로 인하여 와(vortex) 형성이 감소되는 특성을 보이고 있다. 또한 분무 도달거리는 분위기 온도의 증가로 인하여 분무 도달거리가 증가하는 특성을 보이고 있다. 또한 분무 말기에 해당하는 경우, vortex cloud region 에서는 와가 형성되는 영역의 액적이 기화되어 와의 크기가 감소하는 특성을 보이고 있다.

Fig. 9 은 slit 인젝터에서 분위기 압력이 0.1MPa이고, 분사압력을 변화시켰을 경우, front view와 side view에 관한 분무 거동 특성을

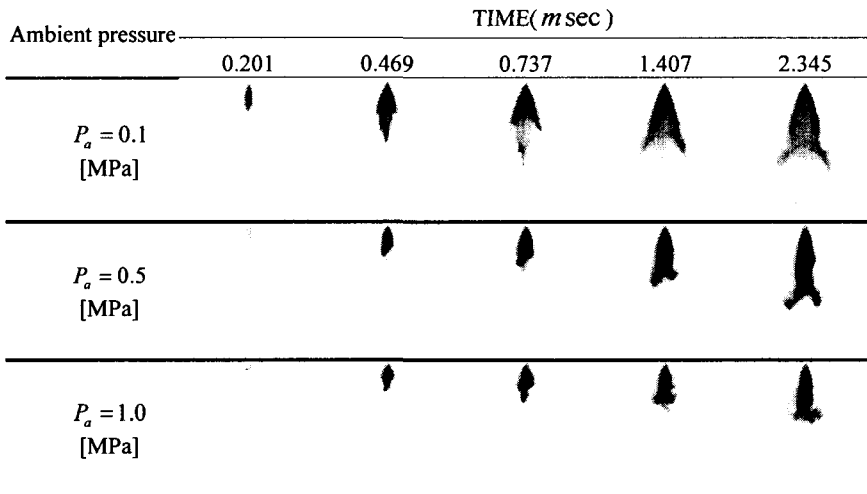


Fig. 7 Spray behavior according to ambient pressure with swirl injector ($P_{inj} : 5\text{MPa}$, ambient temperature : 283K)

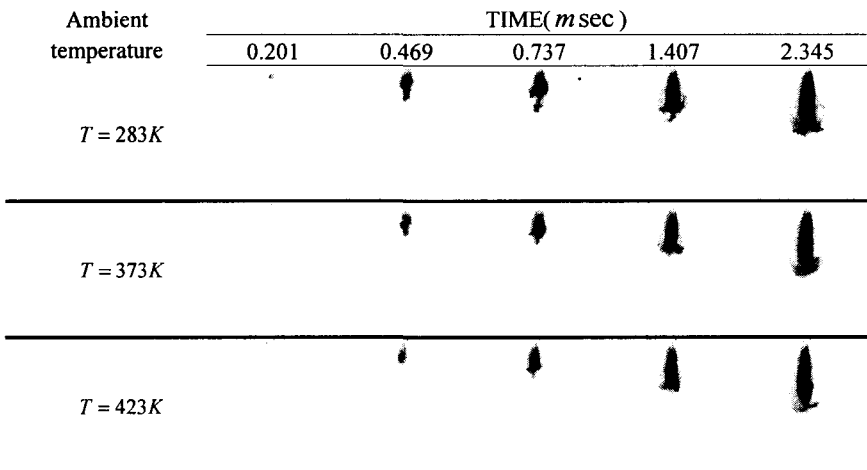


Fig. 8 Spray behavior according to ambient pressure with swirl injector ($P_a : 1.0\text{MPa}$, differential injection pressure : $\Delta P(p_{inj} - p_a) = 5\text{MPa}$)

나타낸 결과이다. 가시화 결과를 통하여 분사 압력이 증가할수록 분무 도달거리가 증가함을 관찰할 수 있었다. Table 2에 보여준 slit 인젝터의 특성으로 인하여 side view의 경우 중앙에 연료의 분리 현상을 볼 수 있었다. 이러한 현상은 Front view에의 결과를 통하여보면 전체적으로 분무 단면에 연료 밀도가 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있었으며, 액막의 면이 분무 단면에 일정하지 않기 때문에 생성된 불균일한 광산란 현상으로 생각된다. 또한 스윙 인젝터의 경우는 스윙러에 의해 반경 방향으로 연료가 회전하면서 분무되기 때문에 연료 분포가 균일한 반면, slit 인젝터의 경우는 인젝터의 형상(h_2)으로부터 고압 분사로 인하여 분무 중심에 연료가 분리되는 현상을 보이고 있으며, 인젝터의 출구 형상에 의해 연료의 분리 현상이 발생하는 것으로 생각된다.

3.2 t_b 와 t_c 의 상호관계 및 분무도달거리 분석

3.2.1 감속점(t_b)의 결정

감속점(t_b)은 분무가 시작되는 시점으로부터 분무도달거리가 $S \propto t$ 의 비율로 증가하다가 분무도달거리가 감소할 때까지의 시간으로 정의하였다.

감소되기 시작하는 시점부터는 $S \propto t^{1/2}$ 로 증가하는 특성을 보이고 있다. 본 실험에서는 Table 1에서 보여준바와 같이 분사량을 일정하게 하였기 때문에 t_b 를 포함해서 분무거동에 영향을 미치지 않고, 단지 분사시간을 기준으로 하였다.

3.2.2 난류발생 시점(t_c)의 상호 관계

본 실험에는 15000fps의 속도로 분무 거동을 측정하였으며, 프레임 당 측정 시간은 0.067ms이었다. Fig. 8과 Fig. 9의 가시화 결과로부터 분무 거동을 분석하여 분무 측면에 와가 발생하는 시점을 turbulence occurring point t_c 로 정의하였다. Cone region 끝단에서 크기가 작은 지상구조(branch like structure)가 형성되는데 이것은 노즐 출구에서 주위 공기와 분무의 경계에서 발생하는 Helmholtz's 불안정성 (instability)이 하류로 진행되면서 성장한 와(vortex)에 의하여 주위 공기는 분무 주위로 유입되고 액적들은 분무의 외측으로 모이면서 발생된다. 즉 와가 발생하는 원인은 축방향의 분무 액적 속도가 주변 공기의 저항으로 인한 상대 속도에 의하여 발생한다. 따라서 t_b 와 t_c 의 상호 관계를 파악함으로써 분무 거동 특성을 분석할 수 있다고 생각된다.

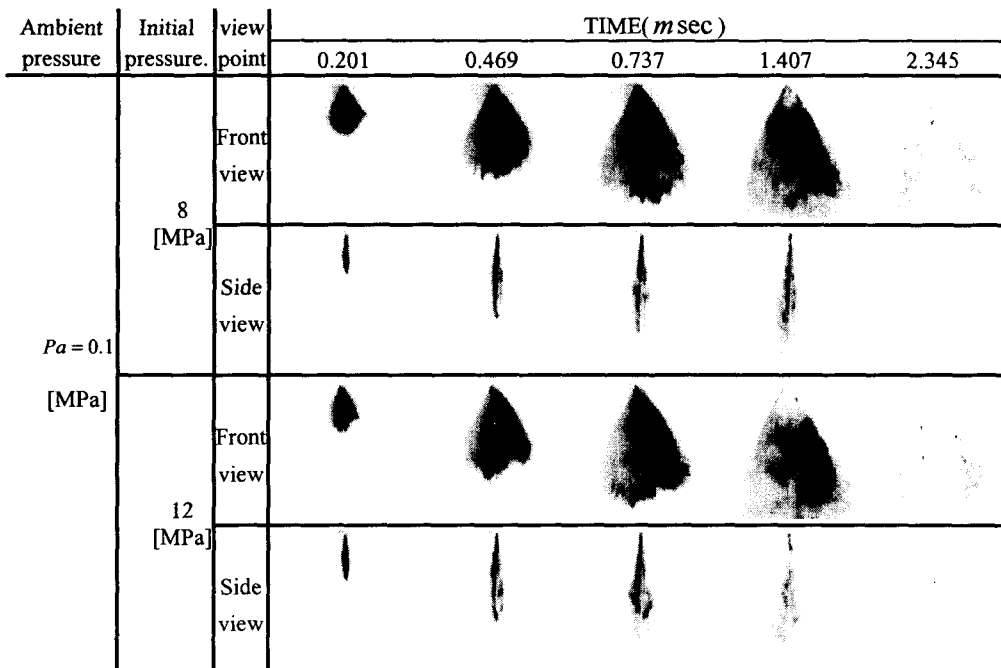


Fig. 9 Spray behavior according to injection pressure at the front and side view with slit injector ($T_a=283K$)

3.2.3 분무도달 거리 특성

Fig. 10 는 Fig. 8 에서 나타난 가시화 결과에 대해 여 분무 시작 후 분사 시간 경과에 따른 분무 도달거리를 나타낸 결과이다. 본 결과에서 나타난 기호 t_b 는 감속점(deceleration point)으로서, 분무 도달거리가 분무 시작 후 $S\propto t$ 로 증가하다가 어느 시점부터는 $S\propto t^{1/2}$ 로 감소하기 시작 하는 시점을 t_b 로 정의하였다. 본 실험을 통하여 얻은 t_b 시기는 디젤분무에서 사용된 Hiroyasu et. al^{rk} 제안한 식⁽⁷⁾과 일치하는 결과를 보이고 있다. 또한 분위기 압력이 증가함에 따라 분무도달거리에 대한 $S\propto t^{1/2}$ 의 관계는 일정하게 나타나고 있으며, 분위기 압력이 증가함에 따라 t_b 의 발생 시점이 짧아지는 특성을 보이고 있다. 이러한 이유는 주변 분위기 압력의 증가로 인하여 분무속도가 감소되며, 따라서 주변 밀도의 증가로 인한 분무 도달거리가 감소되었기 때문으로 생각된다.

분사압력(P_{inj})과 분위기 압력의 차(ΔP)를 5MPa 로 고정하였으며, 분위기 온도의 변화에 따른 실험을 하였을 때 $S\propto t$ 의 관계를 나타낸 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. Fig. 9 에서 보여준 결과와 비슷한 경향을 보이고 있으며, 분위기 온도가 증가함에 따라 주변 분위기의 밀도의 증가로 인하여 분사된 연료 액적에 운동량이 전달되어 분무 도달거리가 증가하는 특성을 보이고 있다. 이러한 이유는 주변 분위기 온도가 증가로 인한 분무 액적의 기화 특성으로 인하여 연료 액적의 속도가 증가했기 때문이라고 생각

된다. 또한, 분위기 온도가 증가함에 따라 온도가 373K 인 경우 t_b 는 길어진 반면 432K 의 경우는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 가솔린의 경우 비등점이상의 온도인 경우는 액상에서 기상 상태로 상태가 변화했기 때문에 Mie 산란 방법을 이용할 경우 고온상태에서의 산란 신호가 약하기 때문이다. 고온 고압 상태에서의 분무 거동 특성은 LIEF 측정방법을 이용하여 분무 특성을 정량적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.4 t_b 와 t_c 의 상호관계

Fig. 12 은 분위기 압력 및 온도 변화에 따른 t_b 와 t_c 의 상호 관계를 나타낸 결과이다. 주변 분위기 압력이 0.1MPa 인 경우는 분위기 온도가 증가함에 따라 t_b 와 t_c 는 감소하는 특성을 보인 반면, 분위기 압력이 0.5MPa 과 1.0MPa 인 경우는 turbulence 발생 시점(t_c)이 t_b 보다 빠르게 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 주변 분위기 밀도가 증가함으로 인하여 분무의 turbulence 발생 시점과 분무 도달 속도가 감소므로 시간이 단축되었기 때문으로 여겨진다.

Fig. 13 는 분위기 압력과 온도 및 연료 조성에 따른 와의 상호 관계를 나타낸 결과이다. Table 3 에서 보여준 연료의 물성치 특성을 통해 분무의 와에 가장 큰 영향을 주는 인자는 표면장력이라 생각된다. 표면 장력이 작을 경우 주변 분위기 온도의 영향으로 인하여 상변화가 빠르게 나타나는 특성을 볼 수 있다. O(가솔린-a.p

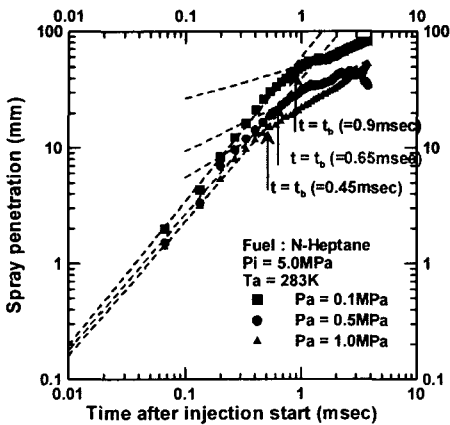


Fig. 10 Spray penetration according to ambient pressure at ambient temperature 283K

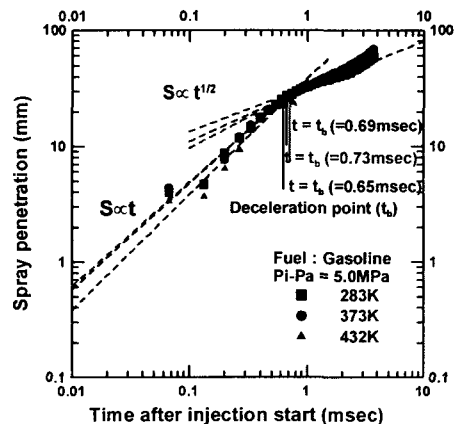


Fig. 11 Spray penetration according to ambient temperature at ambient pressure 1.0 MPa

1MPa), Δ (n-octane-a.p 1MPa)와 \square (n-heptane-a.p 1MPa)에 대하여 온도가 증가함에 따라 t_b 와 t_c 가 감소하는 특성을 보이고 있으며, 연료조성에 따라 n-heptane \geq n-octane \geq gasoline 순으로 t_b 와 t_c 의 발생 시점이 나타나고 있다. 이러한 특성은 연료 조성 중 표면장력이 가장 작은 n-heptane의 경우가 감속점(t_b)과 turbulence 발생 시점(t_c)가 가장 빠르게 나타나고 있다. 이로부터 t_b 와 t_c 의 발생 시점의 주요한 변수는 분위기 압력, 온도 및 연료 조성 중 표면장력이 작은 물성치순으로 발생하는 특성을 알 수 있다.

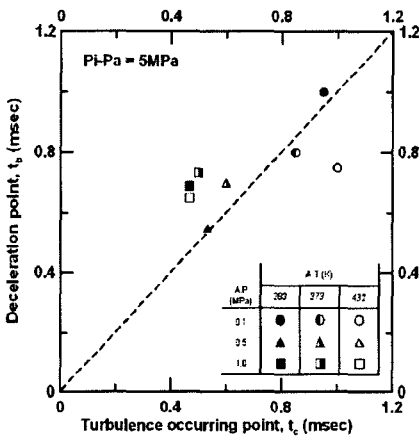


Fig. 12 The correlation between on t_b and t_c with ambient pressure and temperature

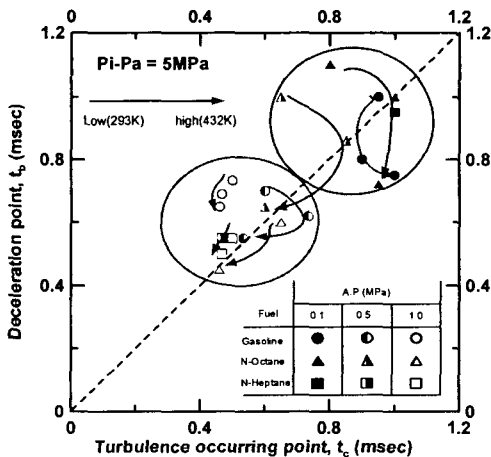


Fig. 13 The correlation between t_b and t_c with ambient pressure and various fuels

3.3 LIEF 를 이용한 기상과 액상의 분무 거동

분위기 온도와 압력이 각각 473K 와 0.1MPa 일 때 분사 시작 후 시간에 따른 기상과 액상의 가시화 결과를 Fig. 14 ~ Fig. 17 에 나타내었다.

3.3.1 액상의 분무 거동 특성

Fig. 13 은 분위기 압력이 0.1MPa 일 때 분사 시작 후 시간 경과에 따른 액상의 분포를 나타낸 결과이다. 액상의 강한 신호가 분무 초기에 관측되었지만 시간이 경과함에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉 분무가 끝나는 시점인 2.0ms 이후에는 액상의 강한 신호가 관측되지 않았다. 이러한 이유는 액상의 상태에서 기상의 상태로 상변화 되었기 때문으로 생각된다.

분위기 압력이 1.0MPa 일 때 액상의 분포를 나타낸 결과를 Fig. 15 에 나타내었다. Fig. 14 의 경우는 분무의 cone region 에 주로 액상의 강한 신호가 보였지만, 분위기 압력이 증가되었을 경우는 주로 분무의 중심과 인젝터의 팁 영역에 분포하고 있음을 보였다. 이러한 이유는 주변 밀도차의 증가로 인하여 연료의 운동량이 감소되었기 때문으로 생각된다.

3.3.2 기상의 분무 거동 특성

분위기 압력이 0.1MPa 인 경우, 분사 시작 후 시간 경과에 따른 기상의 분무 거동 특성을 Fig. 16 에 나타내었다. 액상의 신호는 주로 팁 영역 부분에서 강한 신호가 있는 반면, 기상의 신호는 시간 경과에 따라 분무의 주방향에 분포하고 있음을 알 수 있었다. 주변 분위기 온도의 영향 때문에 액상의 상태보다는 기상의 상태가 주로 분포하고 있기 때문이며, 이러한 영향으로 인하여 활발하게 액상에서 기상으로 상변화가 진행되고 있다고 생각된다.

분위기 압력이 1.0MPa 인 경우, 시간 경과에 따른 기상의 분포를 Fig. 17 에 나타내었다. 분위기 압력이 0.1MPa 일 때는 기상 분포는 넓게 분포하였지만, 분위기 압력이 증가됨에 따라 주변 밀도의 증가로 인하여 분무 중심 축방향에 주로 분포하고 있음을 확인 할 수 있었다.

3.3.3 기상과 액상의 분무 도달거리 및 분무 면적에 관한 특성

분위기 온도가 473K 이고, 분위기 압력이 0.1MPa 과 1.0MPa 일 때 분사 시작 후 시간 경과에 따른 기상과 액상의 분무 도달거리를 Fig. 18 에 나타내었다. 분위기 압력이 0.1MPa 일 때 액상의 분무 도달거리가 1.4ms 이후에 급격하게 감소

하는 특성을 보이고 있다. 이러한 이유는 액체적 (sac volume)에 고여있던 연료가 미리 분사되어 형성된 연료 때문이다. 그 영역을 타원형으로 표시 하였다. 반면에 기상의 분무 도달거리는 점진적으로 증가하는 특성을 보이고 있다. 또한 분

위기 압력이 1.0MPa 일 때 분무 도달거리는 액상보다는 기상이 크게 나타났다. 이러한 이유는 분위기 온도의 영향으로 액상에서 기상으로의 상변화가 빠르게 일어났기 때문으로 사료된다.

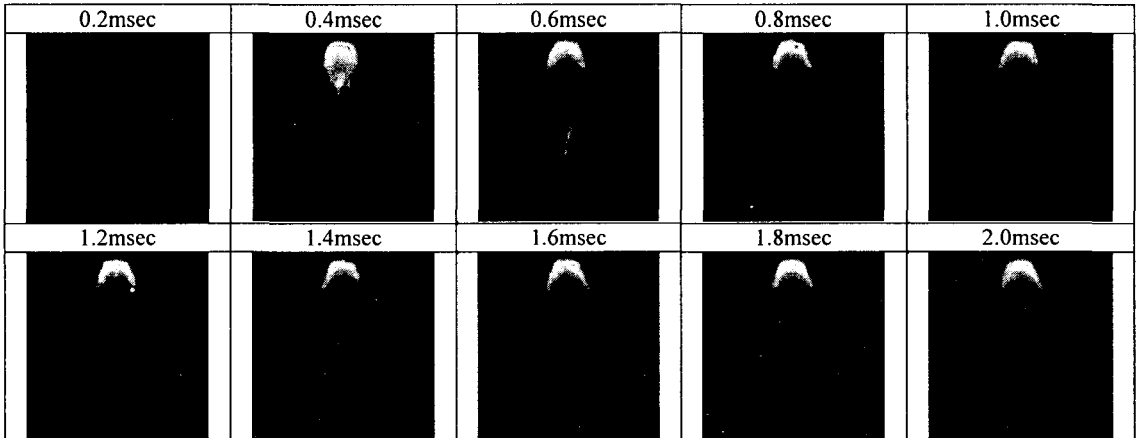


Fig. 14 The liquid phase of spray behaviors at ambient pressure 0.1MPa

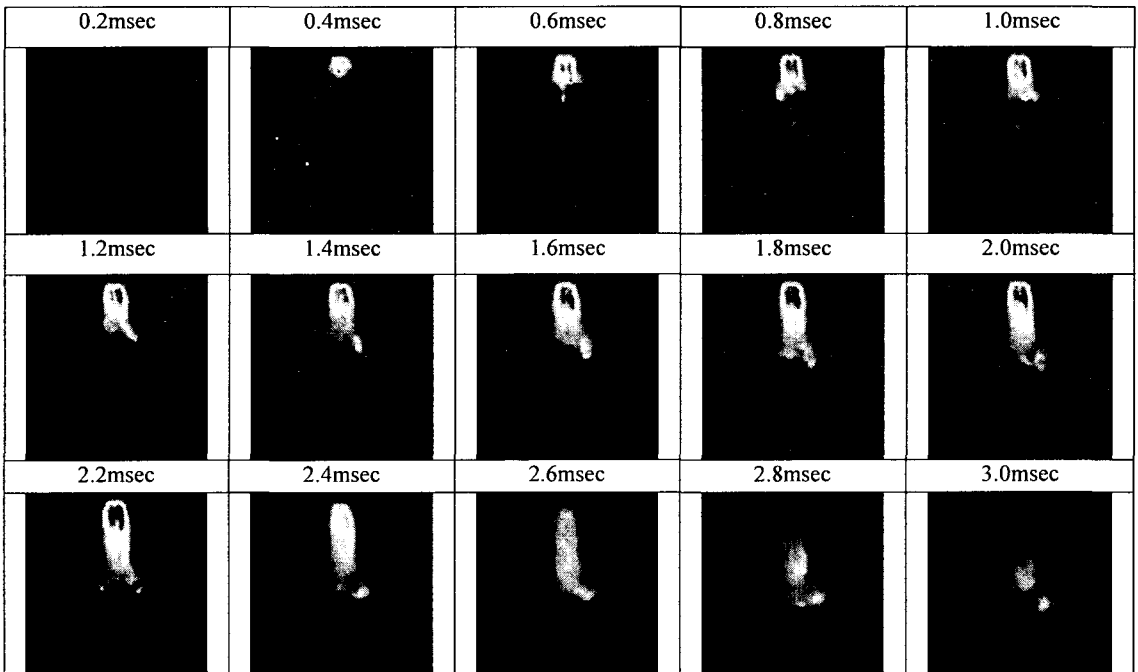


Fig. 15 The liquid phase of spray behaviors at ambient pressure 1.0MPa

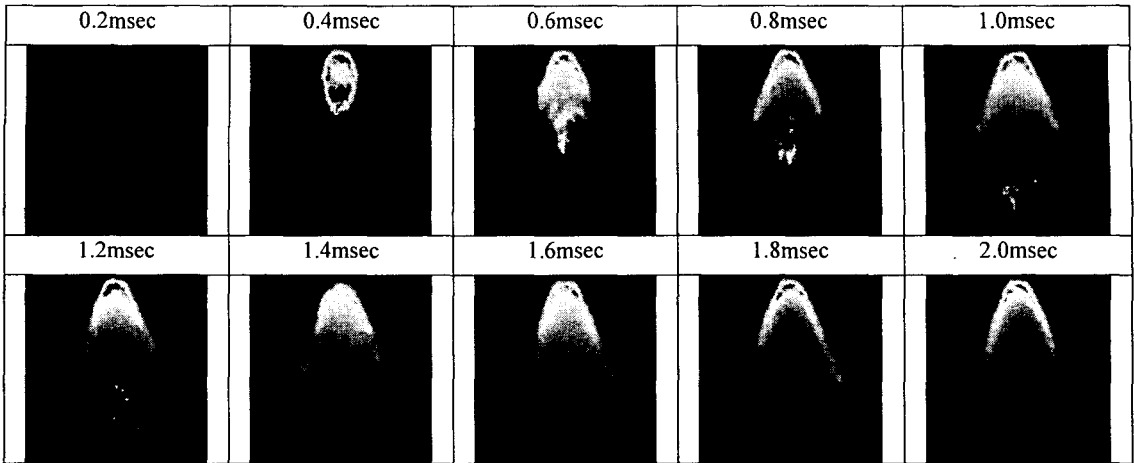


Fig. 16 The vapor phase of spray behaviors at ambient pressure 0.1MPa

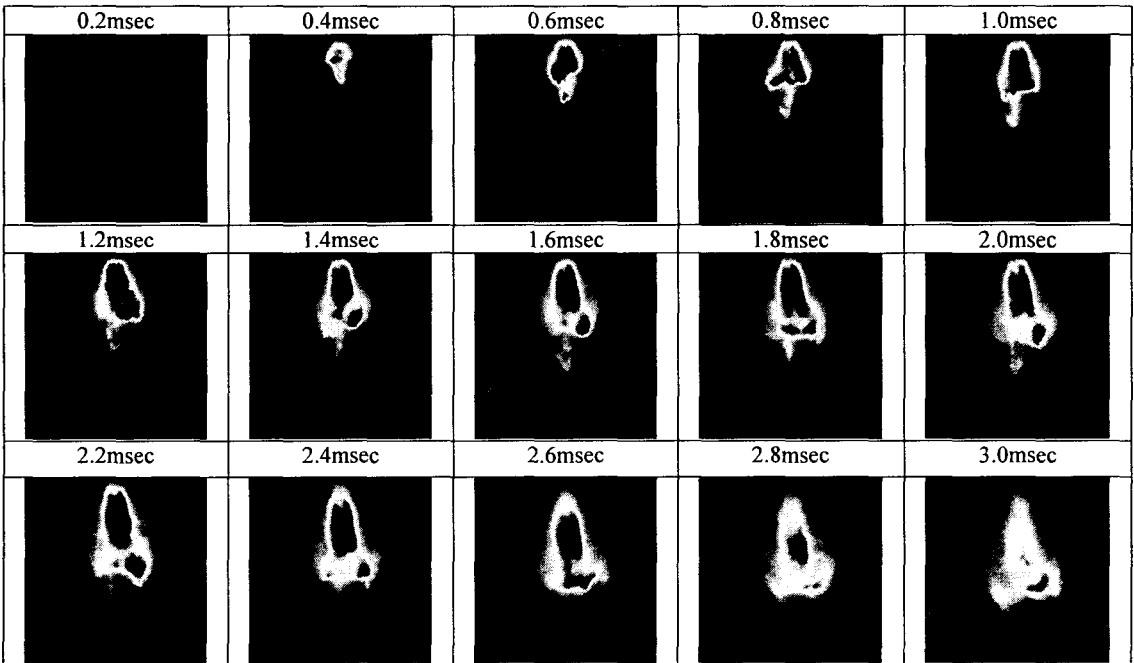


Fig. 17 The vapor phase of spray behaviors at ambient pressure 1.0MPa

Fig. 18 과 같은 실험 조건을 통하여 시간 경과에 따른 기상과 액상의 분무 면적의 변화를 Fig. 19 에 나타내었다. 기상의 분무 면적은 시간이 경과함에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있는 반면, 액상의 분무 면적은 증가하는 경향을 보이다가 0.8ms 이후에는 점차적으로 감소하는 특성을 보이고 있다. 이러한 결과를 통하여 기상의 분무 면적의 증가는 분무기 온도의 영향에 큰 영

향을 받고 있음을 확인할 수 있었다.

3.4 속도계수의 분석

Yoshinori et. Al⁽¹⁾의 결과를 통하여서 알 수 있듯이 분열 전($0 \leq t \leq t_b$)의 분무도달거리 속도 (penetration velocity)는 일정함을 알 수 있었다. 여기서 V_b 는 분사 속도 v_{inj} 와 같다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.⁽¹⁾

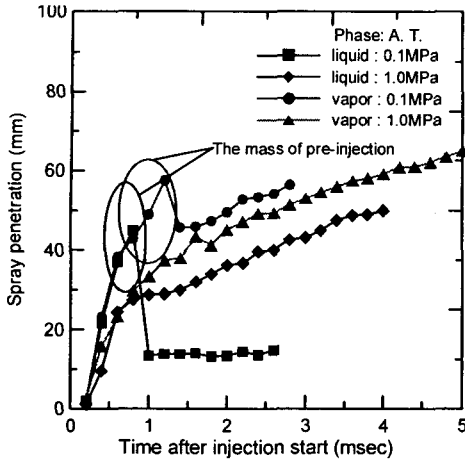


Fig. 18 Spray penetration of the liquid and vapor phase at 0.1MPa and 1.0MPa of ambient pressure

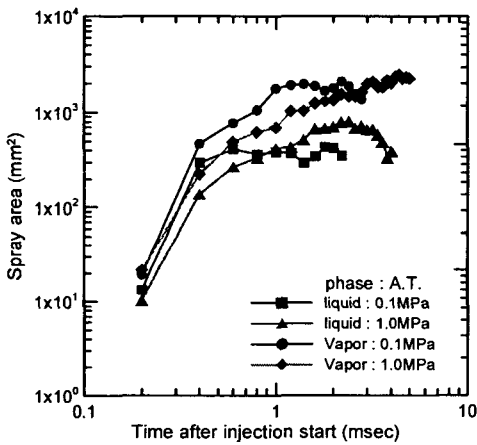


Fig. 19 The spray area of the liquid and vapor phase at 0.1MPa and 1.0MPa of ambient pressure

$$S = V_b \cdot t = C_V \left(\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_f} \right)^{1/2} \cdot t \quad (1)$$

여기서 ΔP 는 분사 압력의 차(differential injection pressure)이며, 액상 연료 밀도(ρ_f), 속도 계수(velocity coefficient: C_V)를 나타내고 있다. C_V 는 $C_V = V_b / (2 \cdot \Delta P / \rho_f)^{1/2}$ 식을 통하여 결정된다. S - t의 곡선을 이용하여 계산된 속도는 V_b 이다. 이와 같은 식을 이용하여 본 연구에서 사용된 인젝터에 대한 C_V 를 계산하여 Table 4에 나타내었다.

계산 결과를 통하여 보면, 슬릿 인젝터의 경우 분위기 압력이 증가함에 따라 C_V 값이 감소하는 특성을 보였으나, 스월형 인젝터의 경우 분위기 압력 변화에 따라 C_V 값은 영향을 알 수

Table 4 The determination of C_V values

	C_V		Conditions
	Range	Ave.	
Swirl injector (60°)	0.33~0.41	0.37	$P_{inj} = 5 \text{ MPa}$ $P_a = 0.1, 0.5, 1.0 \text{ MPa}$ $T_a = 283, 373, 432 \text{ K}$ Three fuels
Slit injector (60°)	0.36~0.41	0.385	$P_{inj} = 10 \text{ MPa}$ $P_a = 0.1 \text{ MPa}$ $T_a = 283, 373, 432 \text{ K}$ Three fuels
	0.28~0.33	0.31	$P_{inj} = 10 \text{ MPa}$ $P_a = 0.5 \text{ MPa}$ $T_a = 283, 373, 432 \text{ K}$ Three fuels

있었다. 이러한 이유는 인젝터의 출구 형상에 따라 C_V 값이 차이가 발생하는 것으로 판단되며, 분위기 압력의 변화에 따라서 형상에 대한 차이가 크게 나타나고 있다고 생각된다.

4. 결론

(1) 시간 경과에 따른 분무 가시화 결과, 분사압력이 증가함에 따라 분무 도달거리는 증가하며, 분위기 압력이 증가함에 따라 분무 도달거리는 감소하고 분무각 역시 감소하는 특성을 보였다.

(2) 분사 시작 후 분사시간 경과에 따른 분무 도달거리 특성을 분석한 결과, 분사시작 후 t_b 가 발생하는 시점까지는 분무도달거리가 시간에 비례하여 증가한 반면, t_b 발생 이후 시점부터는 시간의 제곱근에 비례하여 분무 도달거리가 증가하는 특성을 보였다.

(3) 분위기 온도 변화에 따른 분무 도달거리 특성을 측정된 결과, 분위기 온도가 연료의 비등점에 가까운 온도일 때 분무도달거리가 증가하는 경향을 보였다.

(4) S-t의 곡선을 이용한 C_V 값은 슬릿 인젝터의 경우 분위기 압력이 증가함에 따라 감소하는 특성을 보이고 있는 반면, 스월형 인젝터의 경우 분위기 압력 변화에 따라 비슷한 경향을 보이고 있다.

(5) slit 인젝터의 경우는 분사압력의 변화에 따라서도 C_v 값이 크게 변화하는 특성을 보이고 있으며, 이러한 특성을 통하여 균일한 혼합기를 이루기 위해서는 swirl 인젝터가 적당하며, 성층을 이루기 위해서는 slit 인젝터가 적당하고 사료된다.

후 기

본 연구는 연소기술센터(CERC)의 연구비에 의해 수행된 연구결과로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Yoshinori, T. et. al., 2003, "Analysis on Behavior of Swirl Nozzle Spray and Slit Nozzle Spray in Correlation to DI Gasoline Combustion," SAE 2003-01-0058.
- (2) Lee, C.H. and Lee, K.H., 2003, "New Technology of the Mixture Formation for the Spark Ignited Direct Injection Gasoline Engine," *Journal of KSAE*, Vol. 25, No. 6.
- (3) Michael, S. et. al., 1998, "Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engines," SAE 980160.
- (4) Lee, C. H. and Lee, K. H., "A Study on the Fuel Behavior and Mixture Formation in the Early Injection Timing of GDI Injector," *Trans. of the KSME B*, Vol. 26, No. 8, pp. 1138~1144.
- (5) Zhao, F.-Q., Yoo, J.-H. and Lai, M.-C., 1996, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines," SAE961925.
- (6) Toyosei, Y. et. al., 1996, "Computation of the Hollow-Cone Sprays from a High-Pressure Swirl Injector for a Gasoline Direct-Injection SI Engine," SAE 962016.
- (7) Hiroyasu, H. and Ari, M., 1980, "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel," *Trans. of JSAE*, No. 21, pp. 5~11.
- (8) Melton, L. A., 1983, "Spectrally Separated Fluorescence Emissions for Diesel Fuel Droplets and Vapor," *Appl. Opt.* 22, 2620-4.
- (9) Melton, L. A. and Verdick, J. F., 1984, "Vapor/Liquid Visualization in Fuel Sprays," *20th Int. Symp. on Combustion* (Combustion Institute), pp. 1283~1290.
- (10) Senda, J. et. al., 1997, "Quantitative Analysis of Fuel Vapor Concentration in Diesel Spray by Exciplex Fluorescence Method," SAE 970796.
- (11) Fujimoto, H., Kusano, S. and Senda, J., 1997, "Distribution of Vapor Concentration in a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall by Means of Exciplex Fluorescence Method-in Case of High Injection Pressure," SAE 9702916.