

DISI 엔진용 스월인젝터와 슬릿인젝터의 분무 거동에 관한 연구

이 창 희¹⁾ · 이 기 형²⁾ · 최 영 종¹⁾

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

An Experimental Study on the Spray Behaviors of Swirl and Slit Injector to Direct Injection Spark Injection Engine

Changhee Lee¹⁾ · Kihyung Lee²⁾ · Youngjong Choi¹⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 135-080, Korea

(Received 22 June 2004 / Accepted 20 October 2004)

Abstract : The spray characteristics of DISI injector has a great role in engine efficiency and emission. Thus, many researchers have been studied to investigate the spray characteristics of hollow cone type and slit type injector which are used in DISI engine. In this study, we tried to provide spray parameters which effect 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 also obtained C_v to evaluate the spray characteristics. From this study, As the ambient pressure increases in case of slit injector, C_v decreases.

Key words : DISI(Direct Injection Spark Ignition : 직분식 가솔린 엔진), Vortex(와도), Deceleration point(감속 시점), Turbulent occurring point(난류발생 시점)

Nomenclature

- t_b : deceleration point [msec]
- t_c : turbulent occurring point [msec]
- S : spray penetration [mm]
- V_b : velocity of spray penetration [m/s]
- C_v : coefficient of velocity
- t : time after injection start [s]
- ΔP : differential pressure of $(P_{inj} - P_a)$ [MPa]
- P_{inj} : injection pressure [MPa]
- P_a : ambient pressure [MPa]
- T_a : ambient temperature [K]

ρ_f : density of liquid fuel

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 생산업체는 연료 경제성이 뛰어나고 오염 물질의 배출이 적은 차량에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 차세대 가솔린 엔진 연소기술로서 직접 분사식 희박 연소 엔진 개발에 심혈을 기울이고 있는 추세이다. 이와 같이 연료를 연소실내에 직접 분사하는 직분식 가솔린 엔진은 초 희박 연소를 가능하게 함으로써 펌프 손실과 냉각 손실 저감을 통해 엔진의 초저

*To whom correspondence should be addressed.
leemech@encod.hanyang.ac.kr

연비를 실현할 수 있을 뿐만 아니라 엔진 내에 분사된 연료의 증발시 야기되는 분위기 온도의 냉각 효과는 고압축비와 고출력을 가능하게 한다. 또한 연료의 미립화 기술로는 분사압력의 증가를 통해 연료 미립화를 촉진하는 기술이 가장 대표적인 기술이라 할 수 있다. 이러한 기술을 통해 분무 특성을 파악함으로써 실린더 벽면의 충돌에 의한 젖음현상(well-wetting)을 파악하고 실린더 내에서의 연료의 균질성을 파악함으로써 배기가스의 감소를 얻을 수 있다.¹⁻⁵⁾

직분식 가솔린 엔진의 연구 진행 과정을 보면 제 1 세대와 제 2 세대 직분식 가솔린 엔진 시스템으로 연구가 진행되고 있다.²⁾ 제 1 세대 가솔린 엔진은 wall guide 개념이며, 양산에 대한 의지는 높지만 연비 향상이 10% 전후여서 충분한 효과를 얻지는 못하고 있는 실정이다. 현재는 제 2세대로서 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 보면⁸⁻¹¹⁾ 연료의 고압화를 통한 연료의 미립화 촉진과 더불어 성층 연소시의 연료를 점화플러그 주변으로 농후한 혼합기를 이루기 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 DB화가 선행되어야 할 것이다. 인젝터 성능 데이터로는 분무 지연시간, 분무 입경 및 분포, 분무각 및 분무 형상, 연료 압력, 분무 도달거리등이 있다. 또한 이러한 인젝터가 흡입유동과 상호관계를 파악함으로써 개발 엔진에 적합한 특성을 파악해야 할 것이다.

본 연구에서는 현재 직분식 가솔린 엔진에 주로 적용되고 있는 스월형 인젝터와 슬릿형 인젝터에 대하여 분위기 압력, 분사압력, 분위기 온도 및 연료 특성에 따른 분무 거동 특성을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 연구방법

본 연구에서는 직분식 가솔린 인젝터의 분무 특성을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같은 Mie 산란 영상

(Mie-scattering image) 취득 시스템을 구성하였다.

엔진 내의 연소실 상태를 모사하기 위하여 고압 챔버 내의 분위기 압력과 분위기 온도를 변화 시켜 가며 분무의 영상을 분무 시작 후 시간 경과에 따라 취득하였다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저(200mJ, 532nm)를 사용하였고 레이저로부터 유도된 빔은 원통 렌즈군을 통하여 1~1.5mm의 두께의 쉬트(sheet) 형태로 관측영역으로 조사되도록 하였다. CCD 카메라의 노출시간, 인젝터의 분무와 레이저 주사 타이밍은 LabVIEW 프로그램을 이용하여 제작한 펄스 발생 프로그램으로 제어하였으며, Nd:YAG 레이저의 특성상 10Hz로 펄핑될 때 에너지 레벨 및 세기의 변화가 적기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위하여 Fig. 2와 같은 신호동기 시스템을 구성하였다.

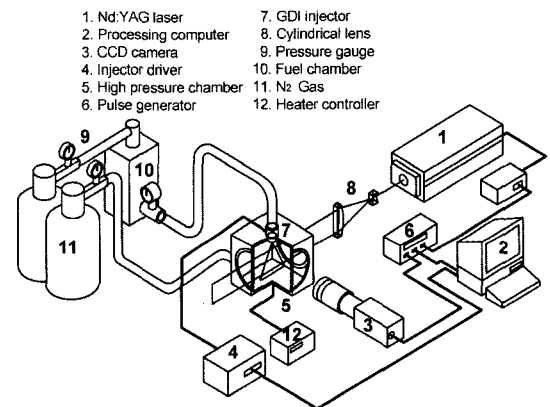


Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2와 같은 신호 동기를 통하여 레이저 트리거(trigger)신호의 지연시간(delay time)을 제어함으로써 분무 성장과정에 따른 산란 영상을 취득할 수 있었다. 분사압력은 고압 질소 가스를 가압하여 사용하였으며, 고압 챔버내의 분위기 온도를 증가시키

Table 1 Experimental conditions

| | | |
|-----------------------|--------------------|-------------------------------|
| Ambient temperature | | 283K, 373K, 432K |
| Ambient pressure[MPa] | | 0.1, 0.5, 1.0 |
| Spray | Injector | Swirl type, Slit type |
| | Fuel | Gasoline, n-Octane, n-Heptane |
| | Fuel pressure[MPa] | 5, 8, 10, 12 |
| | Injection period | 3ms |

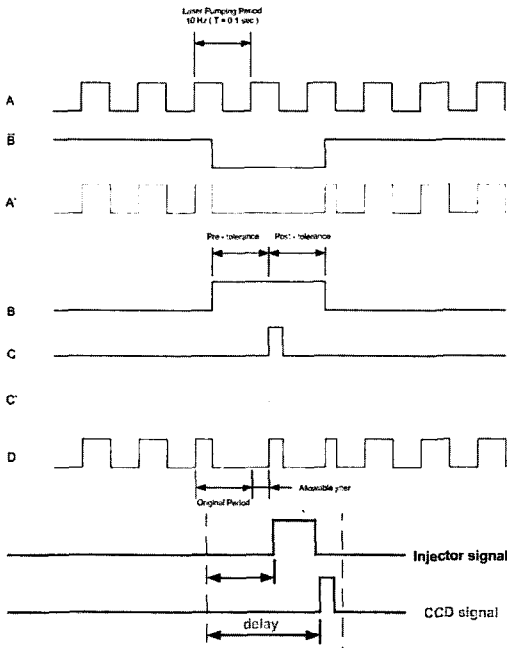


Fig. 2 Schematic diagram on the optimized pulse generation and timing chart

기 위하여 챔버 내부에 히터(4KW)를 장착하였다. Table 1은 본 실험에서 사용된 실험 조건을 나타내었으며, Table 2는 인젝터의 특성 및 인젝터의 개략도를 나타내었다. Table 3은 본 실험에서 사용된 연료의 조성을 나타냈다.

2.2 분무도달거리 측정 방법

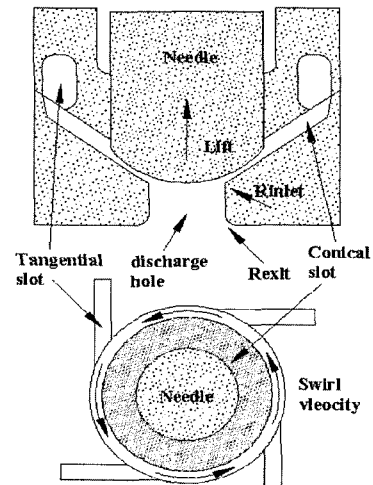
Fig. 3과 같이 고압 연료 분사기의 성능지표를 선정하여 각 실험 조건에 대하여 측정하였다. 분무도달거리(penetration)는 고압 연료 분사기로부터 분사된 액적이 도달하는 최대거리로 정의하였다.

Table 2 Specifications of test injectors

| Type | θ_0, α_0 | Nozzle hole (mm) | Injection rate (mm^3/ms) |
|-----------|----------------------|-------------------------|------------------------------|
| 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** |

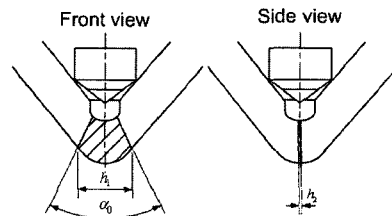
*: at $P_{inj} = 5MPa$

** : at $P_{inj} = 10MPa$



(a) Swirl type injector

- 1) θ_0 = spray cone angle for swirl injector
- 2) α_0, h_1, h_2 = dimensions of slit injector



(b) Slit type injector

Table 3 The properties of test fuels

| | Boiling point [K] | Vapor pressure [MPa] | Latent heat of vaporization at 0.1MPa L [Kj/kg] | Surface tension σ_s [mN/m] | Density ρ_s [kg/m^3] | Critical temp. T_c [K] | Critical press. P_c [MPa] |
|-------------------|----------------------|-------------------------|--|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| N-Octane (C8H18) | 399 | 0.0109 | 301.26 | 21.3 | 703 | 568.8 | 2.49 |
| N-Heptane (C7H16) | 372 | 0.0067 | 320 | 20.1 | 678 | 540 | 2.74 |
| Gasoline | 320~470 | . | 320 | 25.1 | 746 | . | . |

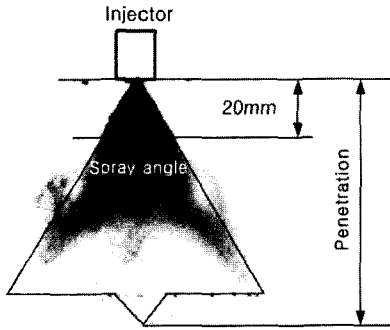


Fig. 3 Definition of spray penetration

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 스웰 인젝터와 슬릿 인젝터의 분무 거동 특성

Fig. 1과 같은 시스템을 이용하여 분위기 압력 및 온도에 따른 가시화 결과를 Fig. 3 ~ Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4는 시간 경과에 따른 분무 도달거리 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. 5는 분위기 압력이 1MPa로 일정하고, 분위기 온도를 변화시켰을 경우의 가시화 결과이다. 가시

화 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 region에서는 와가 형성되는 영역의 액적이 기화로 인하여 와의 크기가 감소하는 특성을 보이고 있다.

Fig. 6은 slit 인젝터에서 분위기 압력이 0.1MPa이고, 분사압력을 변화시켰을 경우, front view와 side view에 관한 분무 거동 특성을 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 분리현상을 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 불균일한 광산란의 현상으로 생각된다. 또한 스웰 인젝터의 경우는 스웰러에 의해 반경방향으로 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 있다

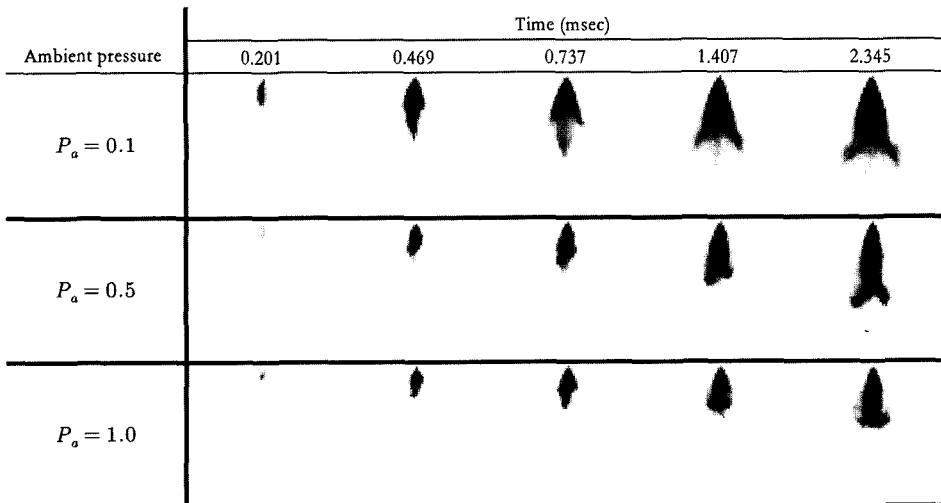


Fig. 4 Spray behavior according to ambient pressure with swirl injector($P_{inj} : 5MPa$, ambient temperature : 283K)

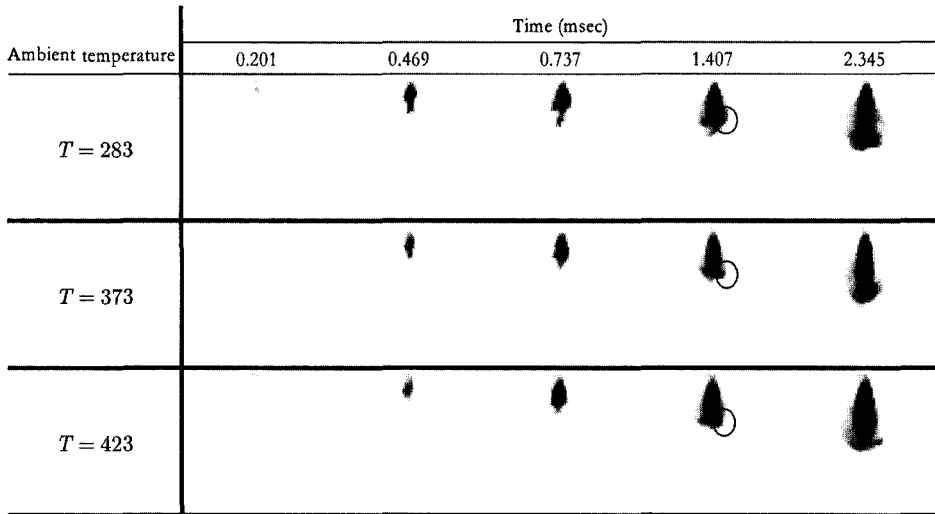


Fig. 5 Spray behavior according to ambient temperature with swirl injector (ambient pressure : 1MPa, differential injection pressure ($\Delta P = P_{inj} - P_a$: 5MPa))

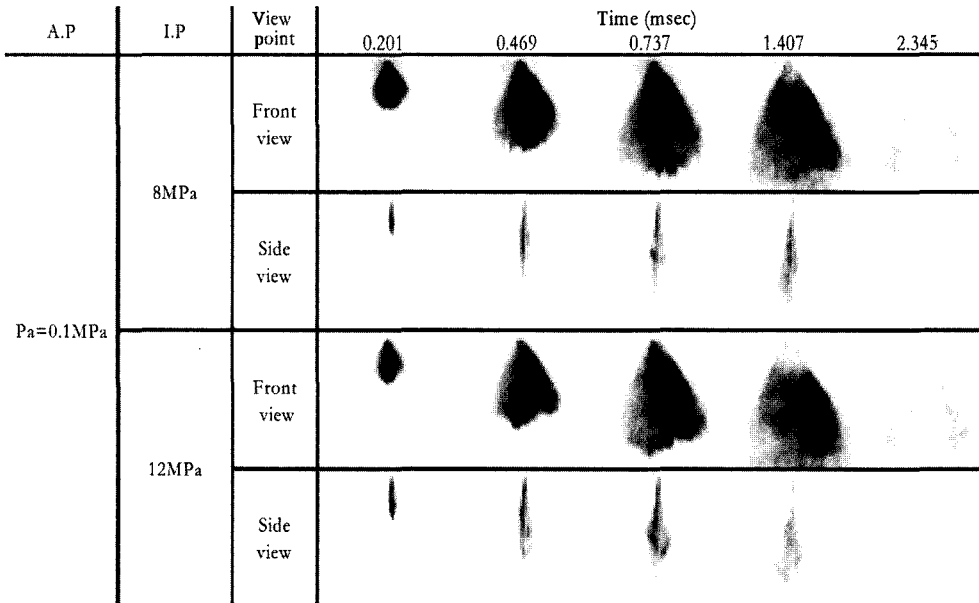


Fig. 6 Spray behavior according to injection pressure at the front view and side view with slit injector (ambient temperature : 283K)

며, 인젝터의 출구 형상에 의해 액주의 분리 현상이 발생되는 것으로 생각된다.

3.2 t_b 와 t_c 의 상호 관계 및 분무 도달거리 분석

3.2.1 Deceleration point (t_b) 결정

분무의 deceleration point를 명확하기 위하여 분무가 시작되는 시점으로부터 분무 도달거리가 $S \propto t$ 의 비율로 증가하다가 분무도달거리가 감소할 때까지의 시간으로 정의하였다. 즉 감소되기 시작하는

시점부터는 $S \propto t^{1/2}$ 로 증가하는 특성을 보이고 있다. 본 실험에서는 Table 2에서 보여준 분사량을 일정하게 유지함으로써 분무 거동의 변화를 최소화하였으며, 같은 조건에서의 t_b 값은 변화가 없음을 확인할 수 있었다. 또한 분사압력의 증가에 따른 분사량의 변화는 분사시간을 기준으로 하였다.

3.2.2 Turbulence occurring point (t_c) 결정

본 실험에는 15000fps의 속도로 분무 거동을 측정하였으며, 프레임 당 측정 시간은 0.067msec이었다. Fig. 4와 5의 가시화 결과로부터 분무 거동을 분석하여 분무 측면에 와가 발생하는 시점을 turbulence occurring point t_c 로 정의하였다. t_c 값은 3번의 반복 실험을 통한 평균값을 이용하였다. 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 분무주류로 유입되고 액적들은 분무의 외측으로 모이면서 발생된다.¹²⁾ 즉 와의 발생하는 원인은 축방향의 분무 액적 속도가 정지된 주변 공기의 저항으로 인하여 발생한다. 따라서 t_b 와 t_c 의 상호 관계를 파악함으로써 분무 거동 특성을 분석할 수 있다고 생각된다.

3.2.3 분무도달거리 특성 분석

Fig. 7은 Fig. 4에서 나타낸 가시화 결과에 대하여 분무시작 후 분사시간 경과에 따른 분무 도달거리를 나타낸 결과이다. 본 결과에서 나타낸 기호 t_b 는 감속점(deceleration point)으로서, 분무 도달거리가 분무 시작 후 $S=t$ 로 증가하다가 어느 시점부터는 $S=t^{1/2}$ 로 감소하기 시작하는 시점을 t_b 로 정의하였다. 본 실험에서 구한 t_b 시기는 디젤분무에서 사용된 Hiroyasu의 제안한 식⁷⁾과 일치하는 결과를 보이고 있다. 또한 분위기 압력이 증가함에 따라 분무 도달거리에 대한 $S=t^{1/2}$ 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 분무 속도가 감소되며, 따라서 주변 밀도의 증가로 인한 분무 도달거리가 감소되었기 때문으로 생각된다.

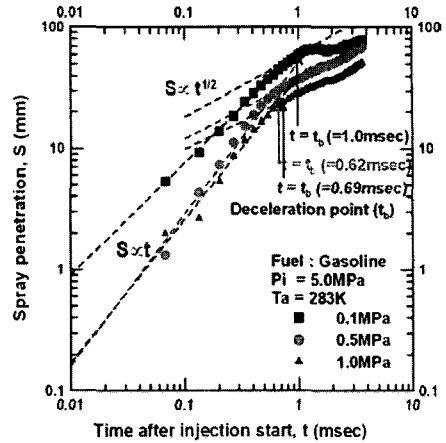


Fig. 7 Spray penetration according to ambient pressure at ambient temperature 283K

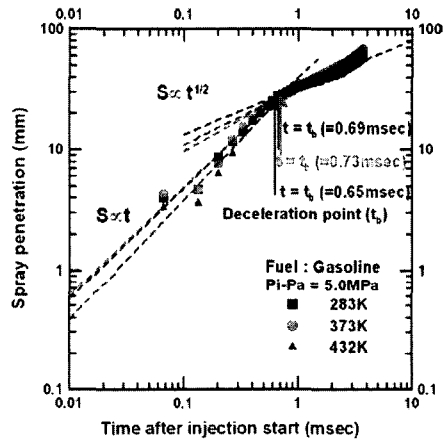


Fig. 8 Spray penetration according to ambient temperature at ambient pressure 1.0MPa

분사압력(P_{inj})과 분위기 압력의 차(ΔP)를 5MPa로 고정하였으며, 분위기 온도의 변화에 따른 실험을 하였을 때 $S \propto t$ 의 관계를 나타낸 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 6에서 보여준 결과와 비슷한 경향을 보이고 있으며, 분위기 온도가 증가함에 따라 분무 도달거리가 증가하는 특성을 보이고 있다. 이러한 이유는 분위기 온도가 증가로 인하여 주변 밀도의 증가로 액적의 증발 속도가 증가했기 때문에 분무 말기에 분무 도달거리가 증가하였다고 생각된다. 또한, 분위기 온도가 증가함에 따라 온도가 373K인 경우 t_b 는 길어진 반면 432K의 경우는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 가솔린의 경우 비등점이

상의 온도인 경우는 액상에서 기상 상태로 상태가 변화했기 때문에 Mie 산란 방법을 이용할 경우 고온 상태에서의 산란 신호가 약하기 때문이다.

고온 고압상태에서의 분무 거동 특성을 파악하기 위해서는 슈리렌 방법을 이용한 기상과 액상의 분포를 파악하는 것이 더 유리할 것으로 생각되며, LIEF(laser induced exciplex fluorescence) 계측방법을 이용하여 기상과 액상을 분리 계측함으로써 분무의 특성을 정량적으로 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

3.2.4 t_b 와 t_c 의 상호 관계

Fig. 9는 분위기 압력 및 온도 변화에 따른 t_b 와 t_c 의 상호 관계¹⁾를 나타낸 결과이다. 주변 분위기 압력이 0.1MPa인 경우는 분위기 온도가 증가함에 따라 t_b 와 t_c 는 감소하는 특성을 보인 반면, 분위기 압력이 0.5MPa와 1.0MPa인 경우는 turbulence 발생 시점(t_c)이 t_b 보다 빠르게 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 주변 분위기 밀도가 증가함으로 인하여 분무의 turbulence 발생 시점과 분무 도달 거리의 상대 속도가 감소되기 때문에 시간이 단축됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 분위기 압력과 온도 및 연료 조성에 따른 t_b 와 t_c 의 상호 관계를 나타낸 결과이다. Table 3에서 보여준 연료의 물성치 특성을 통해 분무의 t_b 와 t_c 에 가장 큰 영향을 주는 인자는 표면장력이라

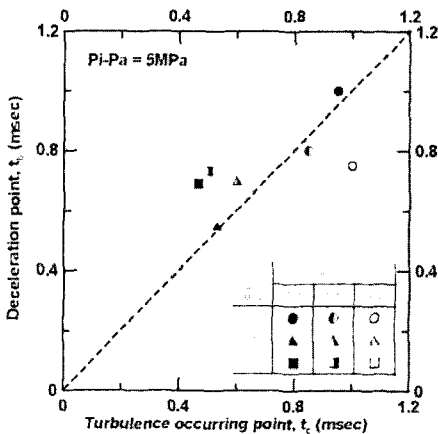


Fig. 9 The correlation on t_b and t_c with ambient pressure and temperature

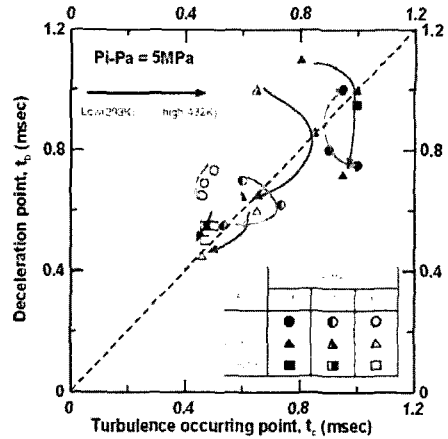


Fig. 10 The correlation on t_b and t_c with ambient pressure and various fuel

생각된다. 표면 장력이 작을 경우 주변 분위기 온도의 영향으로 인하여 상변화가 빠르게 나타나는 특성을 볼 수 있다. ○(가솔린-a.p 1MPa), △(n-octane-a.p 1MPa)와 □(n-heptane-a.p 1MPa)에 대하여 온도가 증가함에 따라 t_b 와 t_c 가 감소하는 특성을 보이고 있으며, 연료조성에 따라 n-heptane ≥ n-octane ≥ gasoline 순으로 t_b 와 t_c 의 발생시점이 나타나고 있다. 이러한 특성은 연료 조성 중 표면장력이 가장 작은 n-heptane의 경우가 감소점(t_b)과 turbulence 발생 시점(t_c)가 가장 빠르게 나타나고 있다. t_b 와 t_c 의 발생 시점의 주요한 변수는 분위기 압력, 온도 및 연료 조성 중 표면장력 작은 물성치순으로 발생하는 특성을 알 수 있다.

3.3 분무도달거리 대한 분석

분무내부의 유동이 준정상상태(quasi-steady)라고 가정하고, 운동량 보존 법칙을 분무에 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{m}_{inj} \cdot V_{inj} = (\dot{m}_{inj} + \dot{m}_a) \cdot V = const \quad (1)$$

여기서, \dot{m}_{inj} 는 분사량 [kg/s]이고, V_{inj} 는 초기 분무속도[m/s]이다. \dot{m}_a 는 유입 공기량[kg/s], V는 분무 도달거리 속도 [m/s]이다. t_b 의 변화에 따른 분무 도달거리 속도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

먼저 $t \leq t_b$ 인 경우, V=일정($\equiv V_{inj}$)하며, \dot{m}_a 은 영

(zero)이다. 또한 $t > t_b$ 인 경우, t_b 발생 시점 이후의 경우 유입 공기량의 증가로 인하여 $\dot{m}_a > 0$ 이 증가하는 특성을 가지화 결과를 통하여 확인할 수 있었다. 이러한 이유로 인하여 일정하게 분무 도달거리가 증가하다가 t_b 시점을 기준으로 하여 분무 도달거리가 감소하는 특성을 보이고 있다.

따라서 분열 전 ($0 \leq t \leq t_b$)의 분무도달거리 속도 (penetration velocity)는 일정함을 알 수 있었다. 여기서 V_b 는 분사속도 V_{inj} 와 같다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.¹⁾

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

여기서 ΔP 는 분사 압력의 차(differential injection pressure : $P_{inj} - P_a$)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.

Table 4 The determination of C_v values

| | C_v | | Condition |
|--------------------|-----------|-------|--|
| | Range | Ave. | |
| 60° Swirl injector | 0.33~0.41 | 0.37 | Pinj = 5MPa Pa = 0.1, 0.5, 1.0MPa Ta = 283, 373, 432K Three Fuels |
| 60° Slit injector | 0.36~0.41 | 0.385 | Pinj = 10MPa Pa = 0.1MPa Ta = 283, 373, 432K Three Fuels |
| | 0.28~0.33 | 0.31 | Pinj = 10MPa Pa = 0.5MPa Ta = 283, 373, 432K Three Fuels |

계산 결과를 통하여 보면, 슬릿 인젝터의 경우 분위기 압력이 증가함에 따라 C_v 값이 감소하는 특성을 보였다. 그러나 스웰형 인젝터의 경우 분위기 압력 변화에 따라 C_v 값은 영향을 없음을 알 수 있었다. 이러한 이유는 인젝터의 출구 형상에 따라 C_v 값이 차이가 발생하는 것으로 판단되며, 분위기 압력

의 변화에 따라서 형상에 대한 차이가 크게 나타나고 있다고 생각된다.

4. 결론

- 1) 시간 경과에 따른 분무 가지화 결과, 분사압력이 증가함에 따라 분무 도달거리는 증가하며, 분위기 압력이 증가함에 따라 분무도달거리는 감소하고 분무각 역시 감소하는 특성을 보였다.
- 2) 분사 시작 후 분사시간 경과에 따른 분무 도달거리 특성을 통한 $S \propto t$ 분석 결과, 분사시작 후 t_b 가 발생하는 시점까지 $S \propto t$ 의 비율로 증가한 반면, t_b 발생이후 시점부터는 $S \propto t^{1/2}$ 로 비율이 분무도달거리가 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, 스웰형 인젝터의 경우 분위기 압력 변화에 따라 비슷한 경향을 보이고 있다.

후 기

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

참고문헌

- 1) Y. Tanaka, H. Sami, T. Takano, K. Sakai and N. Osumi, "Analysis on Behavior of Swirl Nozzle Spray and Slit Nozzle Spray in Correlation to DI Gasoline Combustion," SAE 2003-01-0058, 2003.
- 2) C. H. Lee and K. H. Lee, "New Technology of the Mixture Formation for the Spark Ignited Direct Injection Gasoline Engine," Journal of KSAE, Vol.25, No.6, 2003.
- 3) M. Shelby and S. Hochgreb, "Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engines," SAE 980160, 1998.

- 4) F.-Q. Zhao and M.-C. Lai, "A Review Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignition Direct-Injection Gasoline Engines," SAE970627, 1997.
- 5) F.-Q. Zhao, J.-H. Yoo and M.-C. Lai, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines," SAE 961925, 1996.
- 6) T. Yamauchi and T. Wakisaka "Computation of the Hollow-Cone Sprays from a High-Pressure Swirl Injector for a Gasoline Direct-Injection SI Engine," SAE 962016, 1996.
- 7) H. Hiroyasu and M. Ari, "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel," Trans. of JSAE, No.21, pp.5-11, 1980.
- 8) F.-Q. Zhao, J.-H. Yoo and M.-C. Lai, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines," SAE 961925, 1996.
- 9) G. M. Choi, D. S. Choi, and D. J. Kim, "Spray Structures and Vaporizing Characteristics of a GDI Fuel Spray," KSME International Journal, Vol.16, No.7, 2002.
- 10) M. Yamakawa, S. Isshiki, T. Yoshizaki and K. Nishida, "Measurement of Ambient Air Motion of D.I. Gasoline Spray by LIF-PIV," COMODIA, pp.499-504, 2001.
- 11) J. H. Rhim and S. Y. No, "Breakup Length of Conical Emulsion Sheet Discharged by Pressure-swirl Atomizer," Int. J. Automotive Technology, Vol.2, No.3, pp.93-101, 2001.
- 12) Y. W. Woo, C. H. Lee, K. H. Lee and C. S. Lee, "An Investigation on the Spray Homogeneous Characteristics of a GDI Spray for Entropy Analysis Method Using Laser Scattering Images," Transactions of KSAE, Vol.10, No.6, pp.44-50, 2002.