

고압 스월분무 내부의 압력분포 및 유동특성에 대한 연구

문석수* · Essam Abo-Serie** · 최재준*** · 배충식†

The Static Pressure Distribution and Flow Characteristics Inside the High-Pressure Swirl Spray

Seoksu Moon, Essam Abo-Serie, Jaejoon Choi and Choongsik Bae

Key Words: High-pressure swirl spray(고압스월분무), Static pressure distribution(정압분포), Flow characteristics(유동특성)

Abstract

The static pressure distribution and flow characteristics inside the high-pressure swirl spray were investigated by measuring the static pressure inside the spray and applying the computational fluid dynamics (CFD). The static pressure difference between inner and outer part of spray was measured at different axial locations and operating conditions using a piezo-resistive pressure transducer. To obtain the qualitative value of swirl motion at different operating conditions, the spray impact-pressure at the nozzle exit was measured using a piezo-electric pressure transducer, and the flow angle was measured using a microscopic imaging system. The flow characteristics inside the high pressure swirl spray was simulated by the 1-phase 3-dimensional CFD model. The effect of pressure alternations on spray development was discussed with macroscopic spray images and a mathematical liquid film model. The results showed that the static pressure drop is observed inside the swirl spray as a result of the dragged air motion and the centrifugal force of the air. The recirculation vortex inside the spray was also observed inside the swirl spray as a result of the adverse pressure gradient along the axial locations. The results of analytical liquid film model and macroscopic spray images showed that the static pressure structure is one of the main parameters affecting the swirl spray development.

기호설명

α : 유동각 θ : 경사각
 U : 축방향 속도 W : 접선방향 속도
 S_n : 스월수 δ : 액막두께
 ΔP : 분무 내부와 외부의 압력차
 We : 웨버수

1. 서 론

현재까지 적용되어 온 대표적인 직접분사식 가솔린 엔진(DISI; direct-injection spark-ignition)의 연소방식은 분사된 연료가 흡입공기 유동과 피스톤볼의 상호 작용에 의해 점화플러그 주변에 혼합기를 형성시켜 주는 벽면유도방식으로써, 이에 주로 적용되어 온 인젝터는 스월인젝터(swirl injector)이다. 이는 스월분무가 연료의 선회운동을 통해 비교적 저압분사에서도 향상된 미립화도를 나타냈기 때문이다^(1, 2). 그러나 스월인젝터는 운전 조건에 의해서 분무 형태의 변화가 발생하며 이는 성층 연소를 구현하는 직접분사식 가솔린 엔진에 최적화시켜야 할 또 다른 변수를 제공하게 된다. 또한 최근의 추세라고 할 수 있는 분무유도방식의 경우에는 분무의 변동

(2006년 9월 7일 접수 ~ 2006년 9월 20일 심사완료)

*한국과학기술원

**Loughborough University

***한국에너지기술연구원

†책임저자, 회원, 한국과학기술원

E-mail : csbae@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3044 FAX : (042)869-5023

자체가 연소의 불안정성과 직결되기 때문에 이는 스월 분무의 적용자체를 어렵게 하고 있다. 따라서 이러한 스월분무를 향후의 DISI엔진에 적용하기 위해서는 분무형태에 변화를 주는 중요인자에 대한 파악이 명확히 이루어져야 한다. 지금까지의 대부분의 연구는 운전조건 및 주변조건에 따른 스월분무의 분무모멘텀 및 미립화 특성의 변화, 분무에 의해 유도되는 공기유동 특성의 변화에 초점이 맞추어져 있었다⁽²⁻⁵⁾. 그러나 특정조건들에서는 이러한 기존의 인자들만으로는 분무의 형태 변화를 설명하기 힘들기 때문에 분무를 제어하는 또 다른 중요한 인자가 있을 것이라고 판단하였다. 본 연구에서는 그 중요한 제어인자가 분무의 선회운동에 의해서 발생하는 분무 내부압력 특성 및 내부유동 특성의 변화라고 판단하였다. 분무의 선회운동이 발생하게 되면 분무내부의 공기는 끌림힘(drag force)에 의해 원심력을 가지게 되고 이로 인해 분무 내부의 압력이 강하게 될 것이다. 이 내부의 압력강하가 커지게 되면 특정조건에서 분무의 형태에 변화를 초래할 것이라 예상하였다^(6, 7).

따라서 본 연구에서는 인젝터 운전조건에 따라 변화하는 분무 내부의 압력변화 및 유동 특성을 실험적, 계산적으로 취득하여 이에 영향을 미치는 인자를 분석하고, 실제적으로 측정된 분무 내부 압력 및 유동의 변화가 분무의 발달에 미치는 영향에 대해서 살펴보고자 하였다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

Figure 1은 인젝터 운전조건에 따른 분무 내부의 정압 및 출구에서의 분무 충돌압을 측정하기 위한 실험장치를 보여주고 있다. 분무내부의 압력을 측정하기 위해서 응답시간 1 kHz, 측정범위 -5~5 kPa의 피에조타입(piezoresistive) 상대압센서를 이용하였으며, 원추중공(hollow cone) 형태의 분무 내부에 접근함과 동시에 유동변화를 최소화시키기 위하여 외부 직경 0.6 mm, 내부직경 0.4 mm의 연장 탐침(probe)을 장착하였다. Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이 분무 내부의 정압만을 측정하기 위하여 연장 탐침에 노즐 측과 수직방향으로 작은 구멍을 만들었으며, 이를 분무내부에 노출하였다. 분무출구에서의 분무충돌압(spray impact pressure)을 측정하기 위해 직경 5 mm의 피에조타입(piezoelectric) 압력센서를 이용하였으며 이 경우 분무의 되튐(rebound) 현상을 제

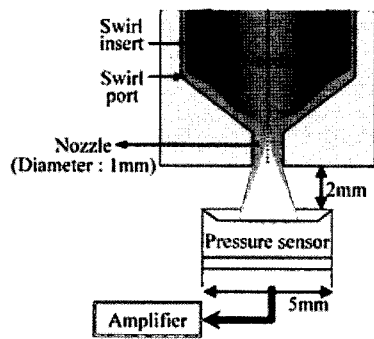
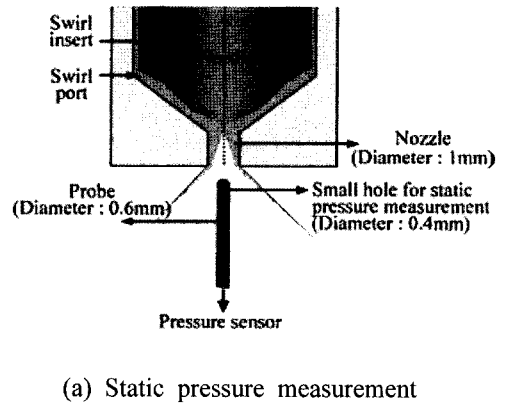


Fig. 1 Experimental setup for pressure measurement

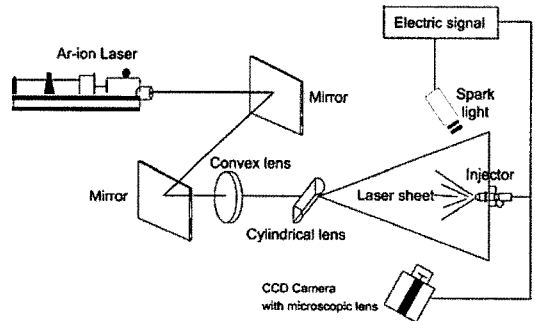


Fig. 2 Experimental setup for spray imaging

거하고 분무가 5 mm의 측정영역에 모두 포함될 수 있도록 Fig. 1(b)에 나타난 것과 같이 노즐로부터 2 mm 지점에 센서를 장착하였다. 측정된 압력은 데이터 취득장치(data acquisition system)를 통해 자료화되었으며, 압력의 순간적인 변동을 감지하기 위하여 데이터 취득률을 100 kHz로 설정하였다. 실제적으로 측정된 내부 압력 값이 분무에 미치는 영향을 살펴보기 위해 미산란(Mie-scattering) 기법을 이용하였으며 그 장치 구성을 Fig. 2에 나타내었다. 레이저 단면(laser sheet)를 형성하

Table 1 Test conditions

Injection pressure	30 bar, 50 bar, 70 bar
Fuel temperature	25°C, 55°C, 85°C
Injection duration	1.5 ms, 3 ms, 4 ms
Injector	DISI swirl injector
Fuel	Commercial gasoline

기 위해 6 W급의 Ar-ion 레이저와 볼록렌즈, 원통형 (cylindrical) 렌즈를 이용하였다. 분부이미지의 취득은 CCD(charge coupled device) 카메라를 통해서 이루어졌고, 노출시간은 10 μs로 설정하였다. 또한 노즐 출구에서의 유동특성을 미시적으로 살펴보기 위해 점화광 (spark light)을 광원으로 이용하였다. 이 경우에도 이미지의 취득은 CCD 카메라를 통해서 이루어졌다. 연료 가압을 위하여 질소탱크를 이용하였으며 압력조절기 (regulator)를 통해서 분사압력조건을 변화시켜 주었다. 실제 엔진의 연소 및 냉각수 온도에 의해 변화되는 연료 온도를 제어하기 위하여 인젝터를 감싸는 히터를 장착하였으며, 온도조절기를 통해 인젝터의 온도를 제어하였다.

2.2 실험 조건

Table 1은 인젝터 운전조건의 변화에 따른 내부 압력 및 분사특성의 변화를 살펴보기 위한 실험 조건을 보여주고 있다. 분사압은 Mitsubishi 스월인젝터의 일반적인 작동조건인 30~70 bar로 설정하였으며, 분사시간은 1.5~4 ms로 설정하였다. 인젝터 온도는 상온조건에서부터 일반적인 엔진의 냉각수 온도인 85°C까지 설정하였다. 연료는 상용 가솔린을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인젝터 운전조건에 따른 분무 내부압력 분포

3.1.1 시간에 따른 분무 내부압력의 변화

Figure 3은 분사 시작 후 시간의 흐름에 따른 분무 내부 정압의 변화를 나타내고 있다. 분사가 시작된 후 일정한 시간 후에 분무 내부의 압력은 강하하기 시작하며, 이러한 압력의 강하가 최고점에 이른 후에 압력이 점차 상승으로 다시 상승해감을 알 수 있다. 압력강하가 일어나기 시작점까지의 지연시간은 분무에서 선회운동이 형성되기까지의 시간이라 생각되며, 분무의 이미지를 통

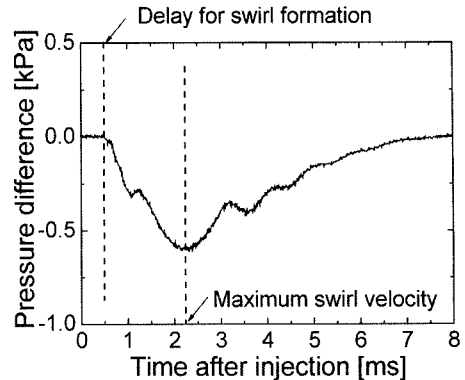


Fig. 3 Temporal static pressure development [Injection duration: 1.5 ms, Injection pressure: 50 bar, Swirl number: 1.26]

해서 살펴보았을 때 초기분무가 선회운동을 형성하는데까지 걸리는 시간은 대략 0.4 ms 임을 감안할 때 이는 취득된 압력곡선의 지연시간과 잘 부합됨을 알 수 있다. 선회운동이 형성되기까지의 지연시간은 인젝터 니들 (needle)이 완전히 열리는데 필요한 시간에 기인한다. 분무 내부의 압력강하 현상은 분무가 선회운동을 함에 따라 주변공기가 끌림힘(drag force)에 영향을 받음으로써 원심력에 의해 분무 중심에서 바깥쪽으로 이동했기 때문이다⁽⁸⁻¹¹⁾.

3.1.2 거리에 따른 분무 내부 압력의 변화

Figure 4는 상온(25°C) 조건에서 노즐로부터의 수직거

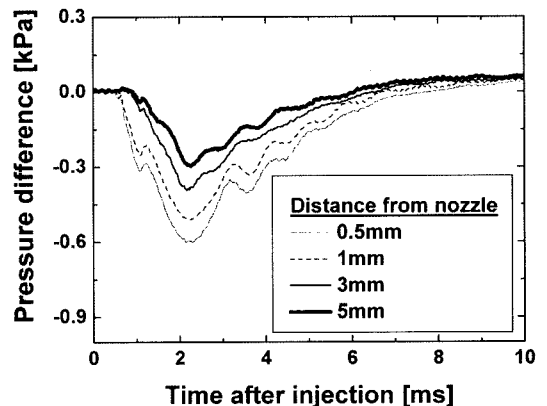
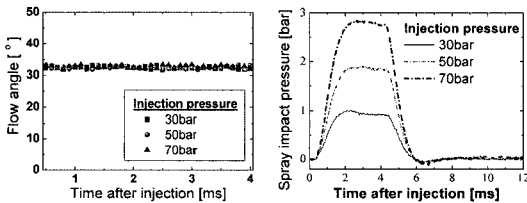


Fig. 4 Temporal static pressure development at different axial locations [Injection duration: 1.5 ms, Injection pressure: 50 bar, Swirl number: 1.26]

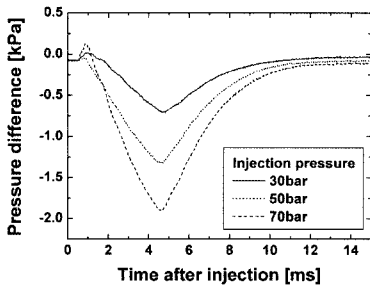
리에 따른 분무 내부의 압력변화를 나타내고 있다. 노즐 출구에서 거리가 멀어질수록 분무 중심부의 압력강하 정도가 점차 감소함을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 분무 내부 공기유동으로 설명할 수 있다. 노즐로부터 거리가 멀어질수록 분무의 폭이 커지게 되고, 따라서 분무의 선회운동에 의해 분무 중심축의 공기가 받는 영향이 점차 줄어들기 때문이다. 또한 분무가 하류로 내려갈수록 입자의 미립화 및 공기의 저항에 의해 선회운동의 강도 역시 감소했기 때문이다. 이와 같은 축방향 역압력구배 (adverse pressure gradient)에 의해 스웰분무 내부에는 역유동(reverse flow)이 발생할 것이라 예상된다. 또한 공기의 역유동은 결과적으로 스웰분무의 내부에 회전와류(recirculation vortex)를 형성시킨다⁽⁸⁾. 기존의 스웰유동 관련 연구들에서 스웰수(swirl number)가 0.6을 넘을 시 스웰유동 내부에 회전와류가 형성되는 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 스웰수를 아래의 Eqn. (1)을 통해 계산하였다. 이 때 회전하는 액막을 회전하는 중공 실린더로 가정하여 은 노즐반경, 은 노즐축으로부터 액막까지의 거리로 설정하였으며 는 유동각을 나타낸다.

$$S_n = (\sin 2\alpha)(R_{out}^3 - R_{in}^3) / (3 \cos 2\alpha)(R_{out}^2 - R_{in}^2)R_{in} \quad (1)$$

계산된 스웰분무의 스웰수는 1.26으로써 기존의 임계치보다 높은 값이었다^(8,11).



(a) Flow angle and spray impact pressure



(b) Static pressure development

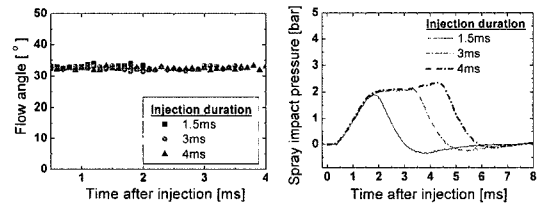
Fig. 5 Flow angle and static pressure development at different injection pressure conditions [Injection duration: 4 ms]

3.1.3 분사압에 따른 분무 내부압력의 변화

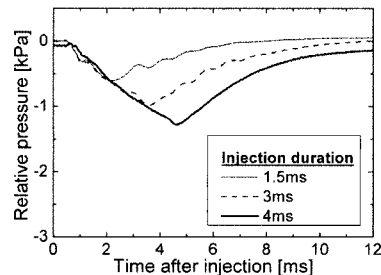
Figure 5는 노즐출구로부터 3 mm 지점에서 분사압에 따른 유동각(flow angle), 분무 내부압력, 분무충돌압의 변화를 나타내고 있다. 분사압의 증가에 따라 유동각의 변화는 없음을 알 수 있으며, 이는 축방향 속도와 접선방향 속도의 비가 항상 동일함을 나타낸다. 분사압의 증가에 따라 내부 압력의 강하 정도가 더 커짐을 알 수 있는데 이는 분사압의 증가에 따라 노즐 출구에서의 축방향 속도 증가에 의해 접선방향의 속도가 증가했기 때문이다. 이는 주변공기에 작용하는 끌림힘의 증가를 가져오게 되어 분무 축에서 분무쪽으로 향하는 공기의 속도를 증가시키는 결과를 가져온다. 이러한 분사압의 증가에 따른 분무의 모멘텀 및 축방향 속도의 증가는 노즐 출구에서의 분무 충돌압 (impact pressure)의 증가를 통해 설명할 수 있다. 이 결과를 통해 분무 내부의 압력변화는 분무의 시간에 따른 축방향 속도 변화와 밀접한 관계가 있음을 판단할 수 있다.

3.1.4 분사시간에 따른 분무 내부압력의 변화

Figure 6은 분사시간의 증가에 따른 유동각, 분무 충돌압 및 내부압력의 변화를 나타내고 있다. 분사시간의 증가가 유동각의 변화에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 분사시간의 증가에 따라 분무 내부 압력의 강하정도는 증가하는 경향성을 나타내었다. 이는 분무



(a) Flow angle and spray impact pressure



(b) Static pressure development

Fig. 6 Flow angle and static pressure development at different injection duration conditions [Injection pressure: 50 bar, Location: 3 mm from nozzle exit]

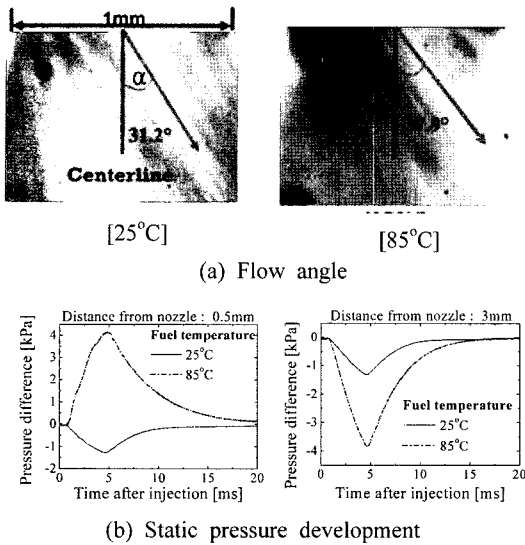


Fig. 7 Flow angle and static pressure development at different fuel conditions [Injection pressure: 50 bar, Injection duration: 4 ms]

충돌압의 변화에 기인한다고 판단된다. 분사시간의 증가에 따라 분무충돌압은 증가하는 경향성을 보이고 있으며, 이는 기존의 분사율(injection rate) 특성과의 밀접한 관련을 가지고 있다.

3.1.5 연료온도에 따른 분무 내부압력의 변화

Figure 7은 연료온도의 변화에 따른 유동각 및 분무 내부압력의 변화를 나타내고 있다. Fig. 7(a)에서 알 수 있듯이 연료온도의 증가에 따라서 유동각은 20%정도 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 연료온도 증가에 따른 점성 및 마찰력의 감소, 공기기둥(air column) 부분의 증기압 상승에 기인한다고 판단된다. 이러한 유동각의 증가는 접선방향 속도의 증가를 가져와 분무내부의 압력강하현상이 강화되리라 판단했으나⁽¹²⁾, 노즐출구 0.5 mm 지점에서는 상온보다 정압이 높고 양의 값을 가지는 경향성이 나타났다. 이는 연료의 급작스런 증발에 의해 공기기둥 부분에 증발해 있던 연료들이 순간적으로 노즐 밖으로 나오면서 내부압력을 상승시켰기 때문이라 판단된다^(3, 5). 그러나 점차 하류로 내려가면서 순간적으로 증가했던 압력이 주변에 동화되고, 증가된 접선방향 속도의 영향을 받아 상온 조건보다 압력강하현상이 강화되는 결과가 나타났다. 이러한 압력의 급격한 변화가 연료 온도 상승 시나 플래쉬 비등 시 노즐 출구에서 분무의 급격한 팽창 및 분무 하류에서의 급격한

수축의 한 원인이라 판단된다^(3, 5).

3.2 스월분무 내부의 유동특성 및 압력분포

실제 노즐 내부의 액막유동과 출구부분의 액막 유동을 모사하기 위해 CFD를 이용하였다. 노즐 내부는 축방향으로 움직이면서 회전하는 원통으로 가정하였으며, 출구는 회전하면서 축방향, 반경방향으로 움직이는 원추로 가정하였다. 노즐 내부의 액막의 두께는 실험을 통해서 얻어졌으며 이를 바탕으로 모델에 적용된 원통의 반경은 0.35 mm로 설정하였다. 측정된 액막 두께를 근거로 분사압 50 bar 조건에서의 축방향 속도인 35 m/s를 초기조건으로 삼았다. 원추의 경우 역시 축방향 속도는 35 m/s를 초기 조건으로 삼았으며 접선방향 속도 성분은 축방향 속도와 측정된 유동각(30°)을 통해서 계산하였다. 적용된 접선방향속도는 21.8 m/s였으며, 반경방향 속도는 24 m/s였다. Fig. 8은 1상 3차원 CFD 모델을 통해 얻어진 스월분무 내부의 유동특성 및 공기유동의 속도벡터를 보여주고 있다. 결과를 통해 알 수 있듯이 50 bar의 분사압 조건에서 역유동이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 역압력 구배로 인해 역유동이 발생할 것이라 예상한 앞의 실험결과와 일치하는 결과라고 할 수 있다. Fig. 9는 동일한 실험 조건에서 계산된 분무내부의 정압분포를 나타내고 있다. 축방향 거리에 따라 역압력 구배가 존재함을 확인할 수 있으며 이는 실제 측정된 압력의 결과와 동일한 경향성을 가진다. 또한 계산된 결과 값이 동일 조건에서 측정된 내부 정압의 값과 근사한 값을 가짐을 알 수 있다.

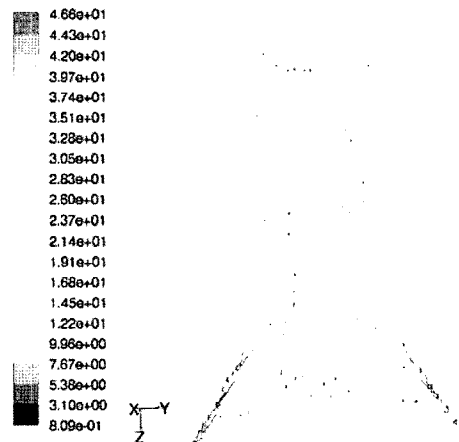


Fig. 8 Velocity vector of the air flow inside the swirl spray [Unit: m/s, Radius of cylinder: 0.35 mm]

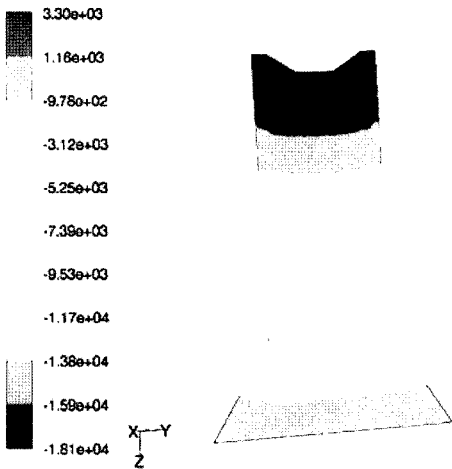


Fig. 9 Static pressure distribution inside the swirl spray [Unit: Pa]

3.3 분무 내부압력의 변화가 분무의 형상에 미치는 영향

3.3.1 액막 모델을 통한 분석

스웰분무의 내부압력 변화가 분무의 형태에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Ramamurthis 등에 의해 제안된 액막모델(liquid film divergence model)을 도입하였다. 노즐 출구에서 액막의 궤적은 액막에 작용하는 모든 힘에 의해서 영향을 받게 되며 이 힘들의 균형을 통해 미분방정식을 도출해 낼 수 있게 된다. Ramamurthis 등에 제안된 이 모델은 Eqn. (2)과 같이 단순화 될 수 있다. Eqn. (2)은 반경방향 압력분포는 존재하지 않는다고 가정하고 있으며, 점성에 의한 영향은 무시하였다^(13, 14).

$$\frac{\bar{r}'''}{(1+\bar{r}'^2)} \left(\frac{We}{\bar{r}} - 2 \right) + \frac{We \tan^2 \alpha}{\bar{r}^3} - \frac{2}{\bar{r}} - (1+\bar{r}'^2)^{1/2} \bar{P} = 0 \quad (2)$$

where,

x = axial location, r = film radius, We = Webernumber

$$\bar{r} = \frac{r}{R_0}, \bar{x} = \frac{x}{R_0}, \bar{\delta} = \frac{\delta_0}{R_0}, \bar{P} = \frac{\Delta P}{(\sigma/R_0)} \quad \text{and} \quad We = \frac{\rho_l R_0 \bar{\delta} U^2}{\sigma}$$

(R_0 = nozzle radius, δ_0 = initial film thickness inside nozzle, ΔP = pressure difference between inner and outer part of spray, U = injection velocity, ρ_l = liquid density, σ = surface tension)

Equation (2)의 가장 중요한 인자는 Weber수(Weber number)와 유동각(α), 분무내부와 외부의 압력차(ΔP)이다. 실험에 의한 측정값을 Eqn. (2)에 대입함으로써 분

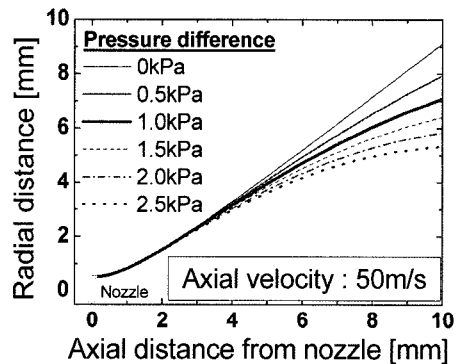
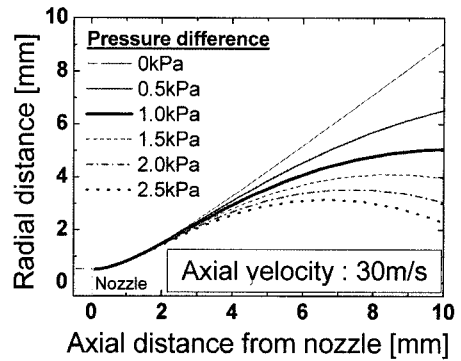


Fig. 10 Calculated liquid film profile at different value of pressure difference between inner and outer parts of the spray envelop

무내부 압력강하의 증가에 따라 액막의 궤적변화를 구할 수 있었으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10을 통해 압력강하 현상이 분무 내부에 발생할 시, 분무의 형태가 노즐출구 근처에서부터 영향을 받게 됨을 알 수 있으며, 분사압력 또는 출구속도가 증가할수록 그 영향을 적게 받음을 알 수 있다. 이는 분사압 증가 시, 분무의 모멘텀이 상승했기 때문이다. 일반적으로 액막의 분열(break-up)이 노즐출구 1~2 mm 사이에서 일어남을 고려할 때, 분열된 액적들은 노즐내부와 외부의 압력차이에 의해 더 크게 영향을 받을 것이라 판단된다.

3.3.2 거시적 분무 형태를 통한 분석

Figure 11은 인젝터 운전조건의 변화에 따른 분무의 거시적 형태 변화를 나타내고 있다. 분사압이 증가함에 따라 분무의 초기모멘텀이 증가하는 것을 의미한다. 그러나 Fig. 11(a)에서 살펴볼 수 있듯이 분사압이 증가하였음에도 분무는 수축하였다. 기존의 결과를 통해 분사압의 증가에 따른 입자크기의 감소폭이 크지 않으며, 일반적

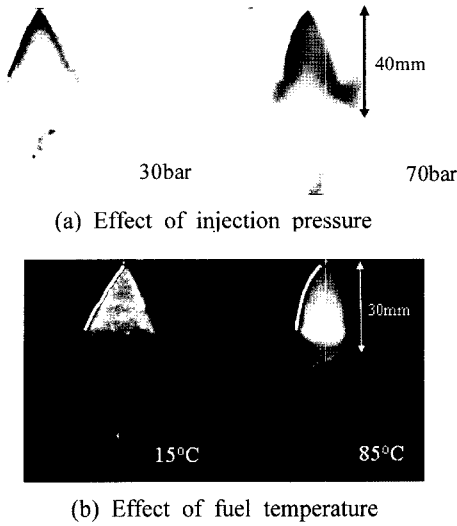


Fig. 11 Macroscopic spray images at different injector operating conditions

으로 40 mm지점까지는 분무의 진행속도가 유입되는 공기의 속도에 비해 상당히 크다는 점을 감안할 때, 이러한 분무의 수축은 공기의 유입이나 입자크기의 감소 만으로는 설명하기 힘들다. 또한 연료의 온도를 25°C에서 85°C로 증가 시 이전 연구에서 입자크기의 감소폭이 20%정도임을 확인하였으나, 이러한 입자크기의 감소로는 노즐출구에서의 분무의 급작스런 팽창 및 분무하류에서의 급작스런 수축을 설명하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 분무 내부의 압력변화가 분무의 형태를 변화시키는 중요한 인자임을 인지하였으며, 이를 정량적으로 해석하기 위해서는 보다 진행된 연구가 필요하리라 여겨진다.

3.4 경사노즐을 통한 압력강하 현상의 완화

스웰분무의 압력강하 현상을 완화시키고 분무의 형태 변화를 최소화시키기 위해 스웰분무의 거동에 영향을 주는 경사 노즐을 이용하였다. Fig. 12는 경사각에 따른 분무 형태의 변화를 보여 주고 있다. 경사각이 감소할수록 스웰분무의 형태는 점차 비대칭이 되며, 경사각이 유동각(30°)보다 작아지게 되면 분무가 원추형태가 아닌 열린 형태의 원추형태가 된다. 이 경우 분무 내부의 공기가 주변 공기와 접촉하게 됨으로써 압력 강하 현상이 완화될 것이라 기대된다. 또한 경사노즐 적용 시, 선회 운동이 경사노즐에 의해 방해받게 됨으로써 유동특성의 변화를 가져와 압력강하 현상이 감소되리라 기대된다. Fig. 13은 여러 경사각 조건에서의 분무 내부 정

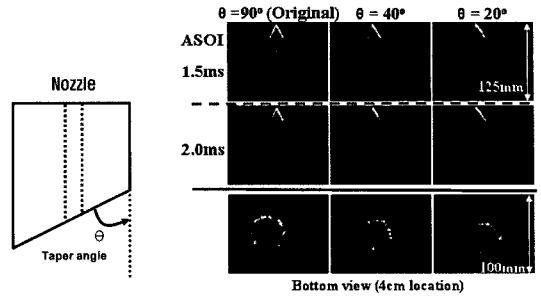


Fig. 12 The definition of taper angle and spray development at different taper angles

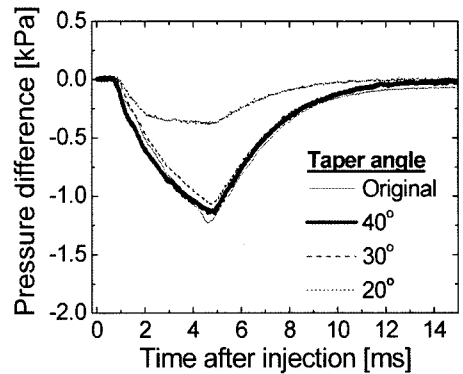


Fig. 13 Static pressure inside the spray at different taper angles

압을 보여 주고 있다. 기대했던 바와 같이 분무 내부의 압력은 경사각이 증가함에 따라 점차 감소하였으며, 경사각이 유동각보다 작아졌을 경우에는 압력강하 현상이 급격히 감소하였다. 이를 통해 경사노즐은 향후 강성한 스웰분무를 형성하고자 할 시, 적용 가능성이 있을 것이라 판단된다.

4. 결 론

직접분사식 가솔린 엔진용 스웰인젝터의 분무내부압력 구조를 실험적, 계산적으로 규명하고 해석하였으며, 이러한 내부압력 구조가 스웰분무의 발달에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 스웰분무 내부에 압력강하가 발생함이 확인되었으며, 강하 정도는 노즐로부터의 거리가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 축방향 역압력 구배를 발생시킨다.
- 2) 분사압 및 분사시간의 증가에 따라 분무의 축방향

속도는 증가하게 되고, 유동각은 일정하게 유지됨을 확인하였다. 이는 결론적으로 접선방향 속도성분을 증가시켜 분무내부의 압력강하 현상을 강화시켰다.

3) 연료온도 증가 시, 유동각이 증가함을 확인하였으며 이는 접선방향 속도성분이 증가하였음을 의미한다. 노즐출구 부분에서는 연료의 급작스런 증발에 의해 분무 내부의 정압이 양의 값으로 증가하게 되나, 하류로 갈수록 증가된 접선방향 속도성분에 영향을 받게 되어 연료온도가 높을 시 압력의 강하 정도가 강화되게 된다.

4) CFD 결과를 통해 스월분무 발달 시 분무 내부에 회전와류가 형성되고, 압력강하 현상 및 축방향 역압력 구배가 발생함을 재확인하였다.

5) 분사압력 및 연료온도의 증가에 따라 분무는 수축하는 경향성을 보였으며, 이러한 분무의 변화는 분무 내부압력 변화에 영향을 받았음을 액막 모델과 거시적인 분무이미지를 통해서 확인할 수 있었다.

6) 경사노즐을 통해서 스월분무의 압력강하 현상을 완화시킬 수 있었으며, 이는 향후 강성한 스월분무를 형성하는데 유용하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 CERC(Combustion Engineering Research Center) 및 미래형자동차사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

- (1) F. Zhao, D. L. "Harrington and M. Lai, Automotive Gasoline Direct-Injection Engines," Published by Society of Automotive Engineers, 2002, pp. 29~119.
- (2) T. Tomoda, S. Sasaki, D. Sawada, A. Saito, and H. Sami, "Development of Direct Injection Gasoline Engine-Study of Stratified Mixture Formation," SAE Paper 970539, 1997.
- (3) S. Moon, J. Choi, E. Abo-Serie and C. Bae, "The Effect of Temperature on Spray and Combustion Characteristics in a Single Cylinder DISI Engine," SAE Paper 2005-01-0101, 2005.
- (4) Jaejoon Choi, Seokhwan Lee, and Choongsik Bae, "Spray and Flow-Field Interaction of Gasoline Direct Injection," *Atomization and Sprays*, Vol. 14, No. 2, 2004.
- (5) Brad A. VanDerWege and Simone Hochgreb, "Effects of Fuel Volatility and Operating on Fuel Sprays in DISI Engine: (1) Imaging Investigation," SAE Paper 2000-01-0535, 2000.
- (6) C. Arcoumanis and M. Gavaises, "Pressure-Swirl Atomizers for DISI Engines: Further Modeling and Experiments," SAE paper 2000-01-1044, 2000.
- (7) Ayumu Miyajima, Yoshio Okamoto, Yuzo Kadomukai, Shigenori Togashi and Mineo Kashiwaya, "A Study on Fuel Spray Pattern Control of Fuel Injector of Gasoline Direct Injection Engines," SAE Paper 2000-01-1045, 2000.
- (8) O. Lucca-Negro and T. O'Doherty, "Vortex breakdown: a review," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, 2001, pp. 431~481.
- (9) Yongqinag Fu, San-Mou Jong and Robert Tacina, "Characteristics of the swirling flow generated by an axial swirler," GT2005-68728, Proc. ASME Turbo Expo 2005, June 6-9, Reno-Tahoe, Nevada, USA, 2005.
- (10) Brena de La Rosa. A, Wang. G, Bachalo. W. D., "The effect of swirl on the velocity and turbulence fields of a liquid spray," *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, Brussels, Belgium, June 11-14, 1990.
- (11) N. A. Chigier and J. M. Beer, "Velocity and Static Pressure Distributions in Swirling Air Jets Issuing from Annular and Divergent Nozzles," *J. Basic Eng., Ser. D*, Vol. 86, 1964, pp. 788~796.
- (12) M. Gavaises, E. Abo-serie and C. Arcoumanis, "Nozzle Hole Film Formation and its Link to Spray Characteristics in Swirl-Pressure Atomizers for Direct Injection Gasoline Engines," SAE Paper 2002-01-1136, 2002.
- (13) K. Ramamurthis and T. J. Tharakan, "Flow Transition in Swirled Liquid Sheets," *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 3, 1998.
- (14) D. P. Schmidt, I. Nouar, P. K. Senecal, C. J. Rutland, J. K. Martin, R. D. Reitz and J. A. Hoffman, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field," SAE Paper 1999-01-0496, 1999.