

〈 논문 〉

경사노즐 선회분사기의 가솔린 미립화 및 분무 내부 압력 분포

문석수* · 최재준** · 배충식*

(2006년 11월 7일 접수, 2007년 2월 2일 심사완료)

The Gasoline Atomization Characteristics and Static Pressure Distribution of Tapered Nozzle Swirl Spray

Seoksu Moon, Jaejoon Choi and Choongsik Bae

Key Words: DISI(직접분사식 가솔린), Tapered Nozzle(경사 노즐), Static Pressure Distribution(정압 분포), Atomization Characteristics(미립화 특성)

Abstract

The static pressure distribution, atomization characteristics and velocity distribution of tapered nozzle swirl spray is analyzed and then compared with original swirl spray. The static pressure distribution inside the swirl spray is measured using a piezoresistive pressure transducer. Phase Doppler anemometry (PDA) is applied to measure and analyze the droplet size and velocity distribution of tapered nozzle and original swirl spray. The static pressure inside the spray shows the lower value compared to the atmospheric pressure and this pressure drop is getting attenuated as the taper angle is increased. The droplet size of tapered nozzle spray shows similar value compared to the original swirl spray at the horizontal mainstream while it shows increased value at vertical mainstream. The deteriorated atomization characteristics of tapered nozzle spray is improved by applying high fuel temperature injection without causing the spray collapse. The velocity results show that the larger portion of fuel is positioned with higher injection velocity, and the smaller portion of fuel is positioned with lower injection velocity with causing spatially non-uniform mixture distribution.

기호설명

- α : 유동각
- Θ : 경사각
- δ : 유동차각

1. 서론

선회분무는 직접분사식 가솔린엔진에 이용되어 온 대표적인 분무 형태이며, 현재까지도 이를 다양한 엔진과 연소시스템에 적용하고자 하는 노력

들이 이어지고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 다양한 연소시스템에 선회분무를 적용하기 위해서는 연소시스템의 요구에 맞게 선회분무의 운동량(momentum) 및 미립화 특성을 제어할 수 있어야 한다.^(5,6) 기존의 연구들에서는 선회분무를 제어하기 위해서 다양한 형태의 노즐을 적용해 왔으며, 그 중에 가장 대표적인 것이 경사노즐이라고 할 수 있다. 경사노즐의 경사각이 증가함에 따라 분무 및 속도분포가 점차 비대칭(asymmetric) 형태로 바뀌게 되며, 이는 한 쪽 방향의 분무 운동량을 강화시킴으로써 분무의 강성을 향상시키게 된다.⁽⁷⁻⁹⁾ 그러나 이러한 비대칭 분무가 연료의 미립화를 저해시킬 가능성이 있음에도 불구하고, 경사노즐의 미립화 특성에 대한 연구는 이루어지지 않았으며, 비대칭적인 속도분포에 대한 실험적인 검증 역시 이

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : csbae@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3044 FAX : (042)869-5023

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국에너지기술연구원

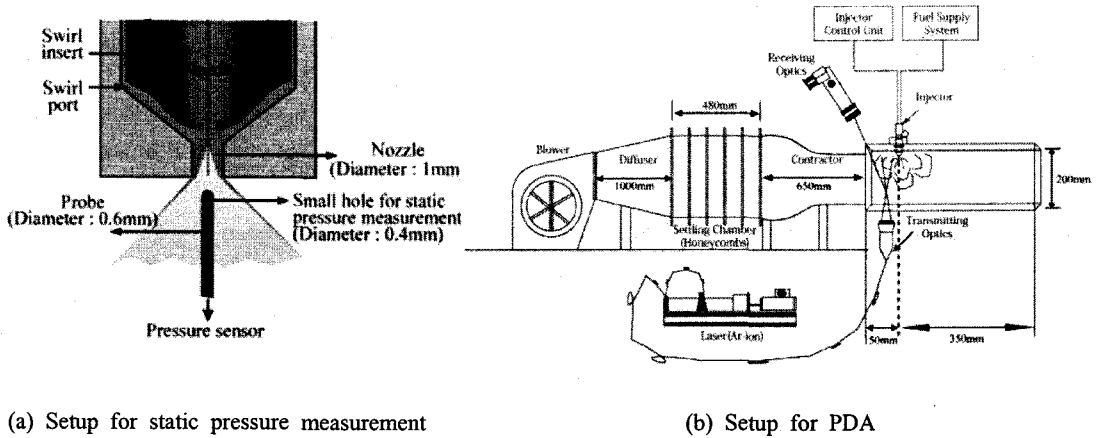


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

루어지지 않았다. 또한, 이전의 연구에서는 경사노즐의 경사각 및 주변압력 조건에 따른 분무형태의 변화에만 초점이 맞추어져 있었으며, 선회분무의 형태 변화에 중요한 인자 중의 하나인 분무 내부의 압력구조에 대한 고려는 이루어지지 않았다.⁽¹⁰⁾

따라서 본 연구에서는 엔진 연소시스템의 요구에 따라 선회분무를 제어하기 위한 기초 자료를 제공하기 위하여, 경사노즐과 기존 노즐의 내부 압력분포, 미립화특성, 속도분포를 비교하여 분석하였다. 이를 통해 경사노즐 및 기존노즐을 적용했을 때에 변화되는 분무의 강성 및 미립화특성에 대한 고찰을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 조건

Fig. 1은 분무내부 압력, 입자분포, 속도분포를 측정하기 위한 실험 장치를 나타내고 있다. 분무내부의 압력을 측정하기 위해서 Fig. 1(a)과 같이 응답시간 1kHz, 측정범위 -5~5kPa의 피에조타입(piezoresistive) 상대압센서를 이용하였으며, 분무내부에 접근함과 동시에 유동변화를 최소화시키기 위하여 외경 0.6mm의 연장 탐침(probe)을 장착하였다. 연장 탐침은 내경이 0.4mm로써 가운데가 빈 중공형태를 취하고 있으며, 분무내부의 정압만을 측정하기 위하여 직경 0.4mm의 구멍을 노즐 축의 수직방향으로 만들었다. 연장 탐침은

분무 내부에 노출하였으며, 다른 하나의 탐침을 상압상태에 노출하여 상압과 노즐 내부의 상대압을 측정하였다. 측정된 압력은 데이터 취득장치(data acquisition system)를 통해 자료화되었으며, 압력의 순간적인 변동을 감지하기 위하여 데이터 취득률을 100kHz로 설정하였다.

입자의 크기 및 속도분포를 측정하기 위해서 Ar-ion 레이저를 이용한 위상도플러기법(PDA; phase Doppler anemometry)을 적용하였으며, 실험장치도를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 6W 급의 Ar-ion 레이저를 이용하여 1W(multi-line)의 강도로 레이저를 방사하였고, 여기에서 514.5nm의 빛만 분리해 내어 TSI 사의 분광기(beam splitter)를 이용하여 빔을 두 개로 나누었다. Transmitting optics에서 평행하게 나가는 두 개의 레이저 빔을 초점거리 362.6mm의 볼록렌즈로 집광시켜서 측정체적을 만들었다. 측정가능한 입자의 속도범위는 -5~56m/s로 설정하여 측정체적을 지나는 모든 입자를 측정하도록 하였으며, 측정을 위한 설정인자들은 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 2는 실험조건을 나타내고 있다. 경사각(θ : taper angle)은 0°, 50°, 70°로 설정하였으며, 연료 온도는 상온과 120°C로 설정하였다. 분사압은 50bar로 고정하였으며, 분사기간은 1.5ms에서 4ms까지 적용하였다. 본 연구에서는 적용된 연료는 일반적인 가솔린차에 적용되는 상용 가솔린이다.

Table 1 Specifications of the phase Doppler anemometry system (TSI APV)

Fringe Spacing	3.73 μ m
Number of Fringes	24.2
Received data range	3~20MHz
Frequency shift	5MHz
Scattering angle	30°

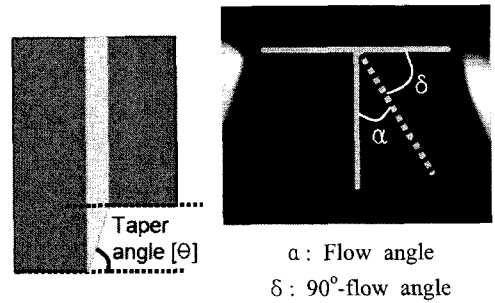
Table 2 Experimental conditions

Taper angle	0°, 50°, 70°
Fuel temperature	25°C, 120°C
Injection pressure	50bar
Injection duration	1.5ms, 3ms, 4ms
Fuel	Commercial gasoline

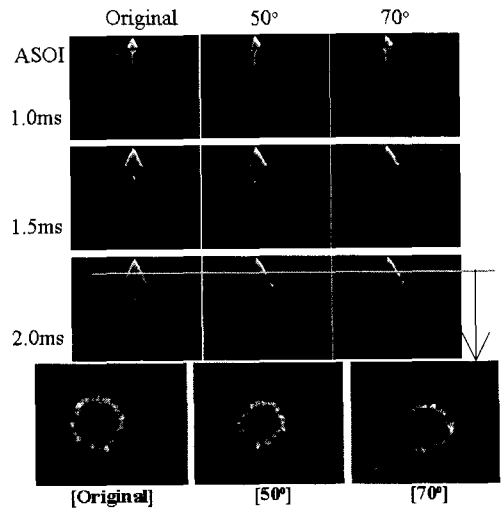
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 경사각 및 유동각의 정의

Fig. 2는 경사각(θ : taper angle), 유동각(α : flow angle), 유동차각(δ : 90°-flow angle)의 정의를 나타내고 있다. 경사각은 노즐의 바닥면과 노즐이 잘려진 단면이 이루는 각으로 정의되었으며, 기존의 노즐은 경사각이 0°인 경우이다. 유동각(flow angle)은 연료가 노즐 출구에서 가지는 축방향 속도와 접선방향 속도의 비로써, 분무각(spray angle)과는 다른 개념이다.^(11,12) 유동각은 일반적으로 인젝터 내부의 선회기 형상에 의해서 좌우되는 것으로 알려져 있다. 실제적인 유동각의 값을 측정하기 위해서, 노즐 출구의 매우 미세한 영역을 촬영하였다. 액막이 가진 파동(wave)에 의해 이미지의 일정부분은 밝게 나오고 일정부분은 어둡게 나오게 되며, 이러한 명암의 차이에 의해 유동이 진행되는 방향의 궤적이 나타나게 된다.⁽¹¹⁾ 본 연구에서는 이러한 궤적이 분무의 유동각이라 판단하였으며, 선회기의 연료 유입각인 30°와 유사한 31°의 유동각을 가짐을 확인하였다. 또 한 가지 정의된 각은 유동차각이다. 유동차각은 90°에서 측정된 유동각을 뺀 값으로써, 유동각과 경사각과의 상호관계에 의한 내부 압력 및 미립화 특성의 변화를 해석하는데 이용하기 위하여 정의되었다. 선회분무의 유동각이 선회기 형상에 의해 결정됨을 감안할 때, 경사각이 바뀌더라도 노즐출구에서의 유동차각은 동일하게 유지된다.



(a) Definition of taper angle and flow angle



(b) Spray development of tapered nozzle

Fig. 2 Definition of taper angle and flow angle and spray development of tapered nozzle

Fig. 2(b)는 경사각의 변화에 따른 분무 발달을 나타내고 있다. 측면이미지에 나타난 바와 같이 경사각의 증가에 따라 분무의 비대칭성이 증가하며, 분무각 및 분무도달거리가 증가하는 경향성은 이전 연구에서 확인된 바 있다.⁽⁹⁾ 또한 하방이미지를 통해 분무각이 유동차각보다 클 경우에는 분무의 한 쪽이 열린 형태의 분무가 형성됨이 이전의 연구에서 이미 확인된 바 있다.⁽⁹⁾

3.2 경사노즐 분무의 내부 정압 분포

3.2.1 분무 내부 정압구조에 대한 이해

Fig. 3은 분사 시작 후 시간의 흐름에 따른 분무 내부 정압의 변화를 나타내고 있다. 분사 후 일정한 시간 후에 분무 내부의 압력은 강해하기 시작하며, 이러한 압력의 강하가 최고점에 이르는

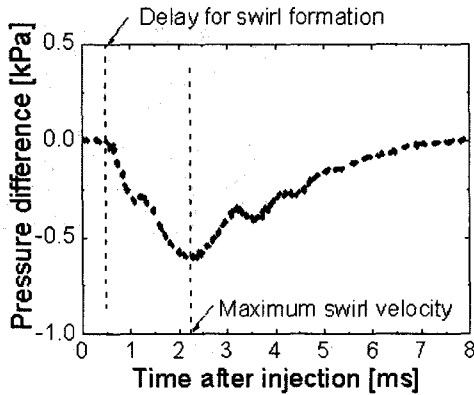


Fig. 3 Temporal static pressure development inside the swirl spray

후에 압력이 점차상압으로 다시 상승해간다. 압력강하가 일어나는 시작점까지의 지연시간은 분무에서 선회운동이 형성되기까지의 시간이며, 이는 대략 0.4ms 임을 확인하였다. 분무 내부의 압력강하 현상은 분무가 선회운동을 함에 따라 주변공기가 항력(drag force)에 영향을 받음으로써 원심력에 의해 분무 중심에서 바깥쪽으로 이동했기 때문이다. 이러한 선회분무 내부의 압력 강하값은 최대 3kPa 이상의 값을 나타내며, 이는 선회분무의 형태를 결정하는 주요한 인자임이 확인된 바 있다.⁽¹⁰⁾

3.2.2 경사각에 따른 분무내부 정압의 변화

Fig. 4는 경사각의 증가에 따른 분무 내부의 압력을 나타내고 있다. 경사각이 증가하더라도 그 값이 유동차각보다 작을 때는 노즐 내부의 압력강하현상이 완화되기는 하나, 그 정도는 매우 작음을 알 수 있다. 그러나 경사각이 유동차각보다 커지게 되면 분무 내부의 압력강하 현상은 급격히 완화됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 연료의 일부분이 노즐 단면에 충돌하게 되어 선회운동이 방해를 받게 됨으로써, 내부 공기가 받게 되는 원심력이 감소했기 때문이라고 판단된다. 또한 중공 분무의 한쪽이 열리게 됨으로써 분무 내부와 외부가 서로 접촉하게 되고, 이로 인해 분무 내부와 외부의 압력이 서로 동화되었기 때문이다. 이러한 분무 내부 압력강하 현상의 완화는 주변 조건의 변화에 따른 경사노즐 분무의 수축을 감소시킬 수 있는 중요한 요인으로 작용할 것으로 판단된다.^(10,13,14)

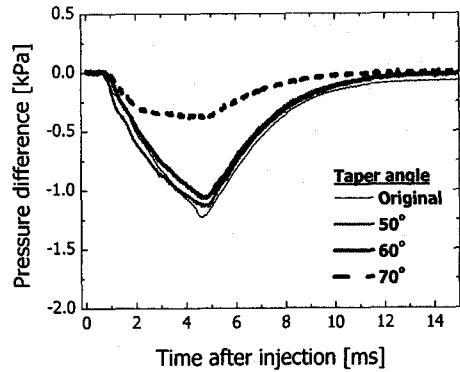


Fig. 4 The effect of taper angle on the static pressure inside the spray

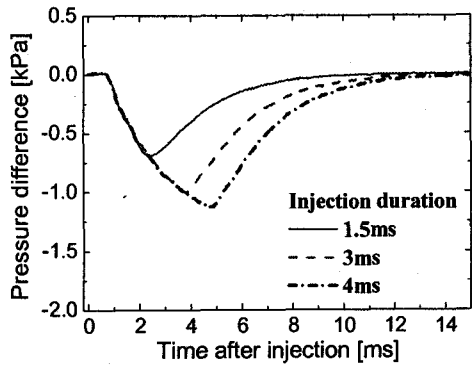


Fig. 5 Static pressure of 50° taper nozzle at different injection durations

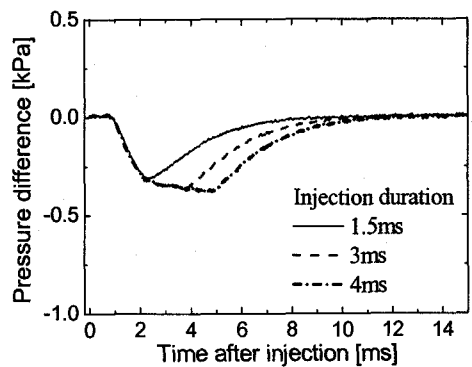


Fig. 6 Static pressure of 70° taper nozzle at different injection durations

Fig. 5와 Fig. 6은 50° 경사노즐과 70° 경사노즐에서 분사기간 증가에 따른 분무 내부압력의 변화를 나타내고 있다. 50° 경사노즐의 경우 분사기간의 증가에 따라 내부압력의 강하가 점차 더 증

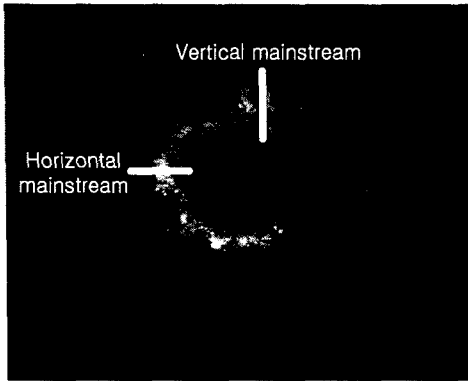


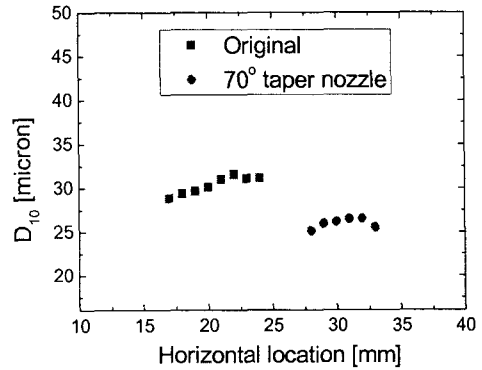
Fig. 7 PDA test points (A plane 50mm distance from the nozzle exit)

가 되었으며, 이는 분사시간의 증가에 따른 축방향 속도 또는 접선방향 속도 증가가 내부 압력의 변화에 그대로 반영되었기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 그러나 70° 경사노즐의 경우에는 분사시간의 증가에 따라 내부 압력 강하 현상이 약간 증가하기는 하나, 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 이는 선회 운동의 약화와 주변 압력과의 동화에 의해 축방향 속도 성분의 증가를 그대로 반영하지 못했기 때문이다. 따라서 경사각이 90°에서 유동차각보다 클 경우에는 운전 조건의 변화에 따른 노즐 내부의 압력 변화 현상이 거의 발생하지 않음을 나타내며, 이는 운전 조건의 변화에 따라 분무 형태가 크게 변하지 않음을 말해 준다.

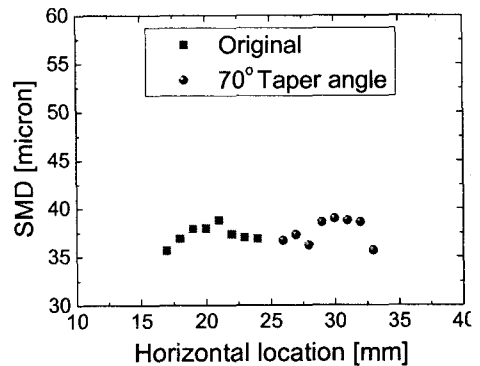
3.3 기존 분무와 경사노즐 분무의 미립화 특성 및 속도 분포 비교

3.3.1 입자크기 측정 지점

Fig. 7은 기존 선회분무와 경사노즐 분무의 미립화 특성을 비교하기 위해 설정된 PDA 측정 지점을 나타내고 있다. 기존의 선회분무의 경우 분무가 분무 축을 기준으로 대칭이기 때문에, 입자의 미립화 특성이 하방 이미지를 기준으로 볼 때 반경 방향으로 동일하게 나타나게 된다. 그러나 경사 노즐의 경우는 비대칭형이기 때문에, 미립화 특성이 반경 방향으로 각각의 각도에 따라서 다르게 나타날 수 있다. 따라서 측정지점은 노즐로부터 수직으로 50mm 떨어진 단면에서 수평방향 주류(horizontal mainstream)와 수직방향 주류(vertical mainstream)로 각각 설정하였다.



(a) D₁₀

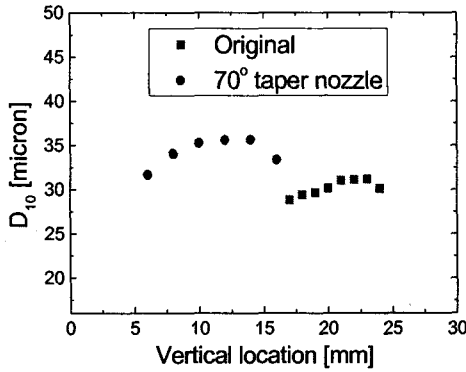


(b) SMD

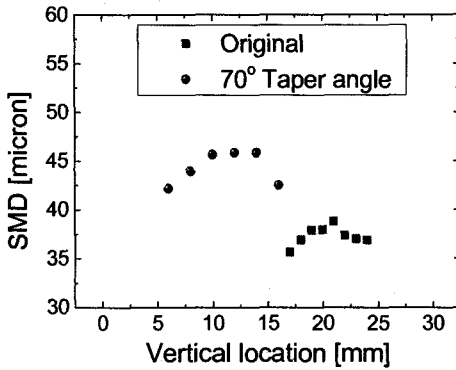
Fig. 8 D₁₀ and SMD distribution of original nozzle and 70° taper nozzle a horizontal mainstream

3.3.2 기존분무와 경사노즐 분무의 미립화 특성

Fig. 8과 Fig. 9는 수평주류와 수직주류에서 기존 노즐과 경사 노즐의 미립화 특성을 비교해서 나타내고 있다. 각각의 분무 주류가 지나가는 지점이 다르기 때문에 PDA의 반경방향 측정지점은 노즐에 따라 다르게 적용되었다. 평균입경의 크기는 D₁₀과 SMD(Sauter mean diameter)를 통해서 해석하였다. D₁₀은 측정된 입자의 단순 평균을 나타내고 SMD는 측정된 입자들의 체적의 합과 표면적의 합의 비를 나타낸다. Fig. 8에 나타난 수평주류의 D₁₀값을 볼 때, 전체적인 입자의 단순평균값은 70° 경사노즐의 경우가 작은 것을 알 수 있으며, 이는 증가된 분무의 속도에 발생하는 현상이라 여겨진다. 이는 기존의 비선회 분무 관련 연구에서 발표된 분사속도의 증가에 따른 입자크기 감소 결과를 통해서 확인할 수 있다. 그러나



(a) D_{10}



(b) SMD

Fig. 9 D_{10} and SMD distribution of original nozzle and 70° taper nozzle at vertical mainstream

SMD값을 볼 때, 70° 경사 노즐의 경우와 기존 노즐의 경우가 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 70° 경사 노즐의 경우 분사속도가 증가하였다고는 하나 연료의 대부분이 우측 수평 주류에 위치함으로써 큰 입자의 분포 역시 증가했기 때문이다. 그러나 Fig. 9에서 살펴볼 수 있듯이, 수직주류의 경우는 70° 경사 노즐의 경우가 기존의 노즐보다 D_{10} 과 SMD 모두에서 큰 값을 나타내었다. 이는 수직주류의 경우는 연료의 운동량이 약한 구역이기 때문에 입자의 미립화도가 상대적으로 약화되었기 때문이기도 하지만, 노즐 단면에 충돌한 연료가 이 영역에 떨어져서 분포하기 때문이다. 이러한 현상의 원인을 살펴보기 위하여 수평주류 및 수직주류에서의 확률밀도함수(PDF; probability density function)를 Fig. 10에 나타내었다. 70° 경사 노즐의 경우 수평주류에서는 기존 분무보다 $20 \mu\text{m}$ 이하의 작은 입자 및

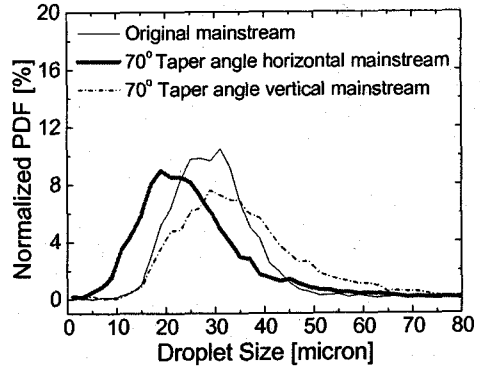
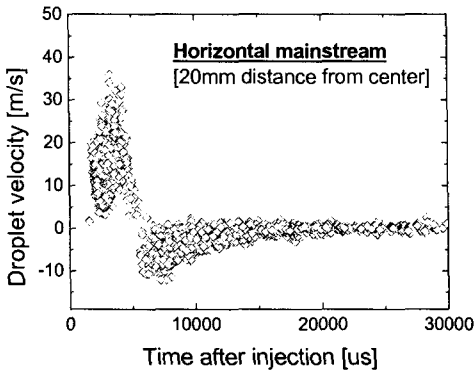


Fig. 10 Normalized probability density function (PDF) of original nozzle and 70° taper nozzle

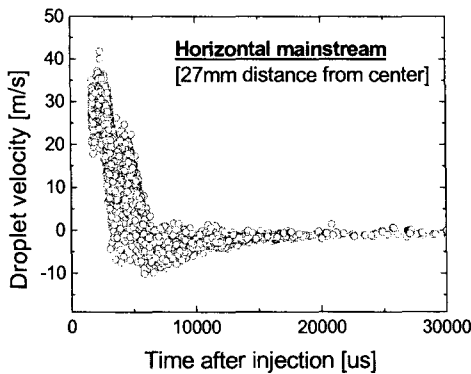
$50 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자분포가 큰 것을 알 수 있다. 작은 입자분포가 증가한 것은 분무의 운동량이 증가하였기 때문이라 판단되며, 큰 입자분포가 증가된 것은 초기 분사되는 연료가 대부분 이 영역으로 분포했기 때문이라 판단된다. 수직주류에서는 70° 경사 노즐의 경우가 기존노즐보다 $40 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자분포가 상당히 크게 나타내는데, 이는 70° 경사 노즐의 경우 일정량의 연료가 노즐 절단면에 충돌하고 수직주류에서 연료의 초기 속도가 느리기 때문에 발생한 현상이라 볼 수 있다. 이러한 현상은 3.3.3절의 속도분포 결과에서 확인할 수 있다. 따라서 해당 단면을 지나 는 전체적인 입자의 미립화도는 경사노즐의 분무가 악화된 특성을 보였다.

3.3.3 기존분무와 경사노즐 분무의 속도분포

Fig. 11은 수평주류에서 기존분무와 경사노즐의 속도 분포를 비교해서 나타내고 있다. 수평축은 분사 후의 시간을 나타내며 수직축은 각 해당 시간대에 측정된 입자의 속도분포를 나타내고 있다. 각각의 노즐에서의 비교는 최고 속도를 가진 측정지점에서 이루어졌다. 기존 노즐의 경우 최고 속도를 가진 지점은 노즐 축으로부터 반경방향으로 20mm 떨어진 지점이었으며, 70° 경사 노즐의 경우에는 27mm 떨어진 지점이었다. 결과를 통해서 살펴볼 때, 70° 경사 노즐의 경우가 최고 속도가 더 빠르게 나타남을 알 수 있으며, 그 값은 $6\sim 7\text{m/s}$ 정도로 나타났다. 그러나 속도가 측정된 지점이 70° 경사 노즐의 경우 분무도달거리가 더 큰 지점임을 고려할 때, 실제 속도차이는 이보다 좀 더 클 것이다. 이는 분사속도 증가에 의



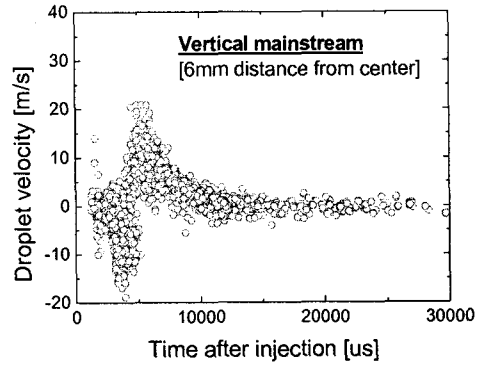
(a) Original nozzle



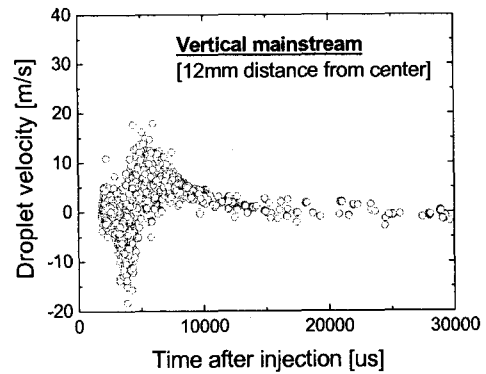
(b) 70° taper nozzle

Fig. 11 Droplet velocity of original nozzle and 70° taper nozzle at horizontal mainstream

한 70° 경사노즐 분무의 작은 입자 분포 증가를 뒷받침하는 근거라고 할 수 있다. Fig. 12는 70° 경사노즐의 수직주류에서 얻어진 분무 속도 정보를 분사 후의 시간에 따라서 나타내고 있다. 기존 노즐 및 70° 경사 노즐 수평 주류에서의 속도 분포와 비교할 때 속도의 최대값은 분무중심으로부터 6mm, 12mm 떨어진 지점 모두에서 낮게 나타난다. 두 지점에서의 최대속도는 모두 20m/s 내외였다. 이 결과를 통해 경사노즐 분무의 속도는 비대칭적으로 분포한다는 사실을 확인하였다. 수직주류의 속도결과에서 또 한 가지 주목할 점은 공기의 유입이 주분무가 해당 지점을 지나가기 전에 발생한다는 점이다. 수평주류의 빠른 속도를 가진 연료에 의해 유도되는 공기유동에 휩쓸린 작은 연료입자가 해당 지점을 통과한 후, 속도가 느린 연료가 해당지점에 도달했기 때문에 이와 같은 현상이 나타났다고 여겨진다.



(a) 6mm distance from center



(b) 12mm distance from center

Fig. 12 Droplet velocity of 70° taper nozzle at vertical mainstream

경사노즐 적용 시 발생하는 위와 같은 속도분포의 변화는 앞 장에서 설명한 입자분포를 설명하는 충분한 근거가 된다.

3.3.4 연료온도 증가에 따른 입자크기의 변화

이전의 연구결과에서 연료온도의 증가에 따라 경사노즐 분무가 수축되지 않는다는 결론을 얻은 바 있다.⁹⁾ 이러한 특성은 경사노즐의 경우 연료온도를 상승시켜도 분무 형태에 큰 변화가 초래되지 않음으로써, 연료온도 상승에 의한 입자크기 감소효과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. Fig. 13은 분사 후 시간에 따른 입자크기의 분포를 각각의 온도별로 나타내고 있다. 이 결과는 해당 분무의 모든 지점에서 측정된 입자를 취합하여 나타낸 것으로서, 연료온도가 상승함에 따라 50 μm 이상의 입자분포가 대폭 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이 경우 상온의 기존분무에 비해 입자크기가 유사 또는 감소하는 값을 보였다.

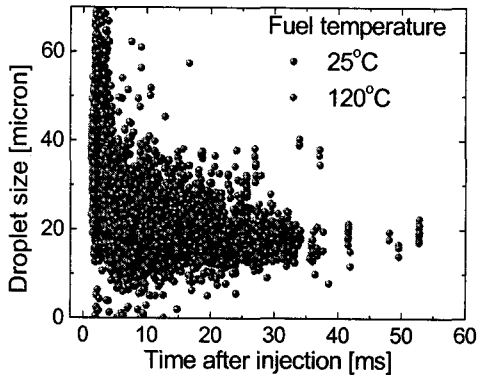


Fig. 13 Effect of fuel temperature on droplet size distribution of 70° taper nozzle

4. 결론

기존의 선회분무와 경사노즐 선회분무의 내부 정압, 입자 미립화 특성, 속도 분포 등에 대해 비교 분석하였으며, 연구를 통해서 얻어진 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 선회 분무가 발달함에 따라 선회분무 내부의 압력강하 현상이 발생하였다. 압력의 강하 정도는 경사각의 증가에 따라 점차 감소하였으며, 특히 경사각이 유동차각보다 클 시에는 대폭 감소하였다.

(2) 분무의 수평주류에서는 경사노즐 분무가 기존 분무에 비해 D_{10} 값은 감소하였으나 전체적인 SMD값은 거의 동일한 값을 나타내었다. 그러나 분무의 수직주류에서는 경사노즐 분무가 기존 분무에 비해 D_{10} 과 SMD 모두에서 증가된 값을 보였다.

(3) 속도 결과를 통해서, 경사노즐 분무의 수평 주류에는 빠른 속도를 가진 많은 양의 연료가 분포하는 것을 확인하였으며, 수직주류에서는 느린 속도를 가진 적은 양의 연료가 분포하는 것을 확인하였다.

(4) 경사노즐 분무의 경우 고온연료 분사를 적용하여도 분무가 수축하지 않으며, 이 경우 기존 분무와 유사하거나 작은 입자분포를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC) 및 미래형

자동차사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Zhao, F., Lai, M. C. and Harrington, D. L., 1999, "Automotive Spark-ignited Direct-Injection Gasoline Engines," *Prog. Energy Combustion Sci.*, Vol. 25, pp. 4~8.
- (2) Moon, S., Choi, J., Abo-Serie, E. and Bae, C., 2005, "The Effect of Temperature on Spray and Combustion Characteristics in a Single Cylinder DISI Engine," SAE Paper 2005-01-0101.
- (3) Choi, Y., Sohn, J., Cha, G. and Kim, D., 2001, "Effects of Different Fluid Properties on Velocity and Size of Droplets from Pressure-Swirl Nozzles," *2001 KSME Annual Spring and Fall Conferences*, Vol. 1, No. 4, pp. 909~914.
- (4) Honda, T., Kawamoto, M., Katashiba, H., Sumida, M., Fukutomi, N. and Kawajiri, K., 2004, "A Study of Mixture Formation and Combustion for Spray Guided DISI," SAE paper 2004-01-0046.
- (5) Berifui, B., Kneer, R., Breuer, S., Reckers, W., Robart, D., Wanlin, H. and Weiten, C., 2002, "Investigation of a DISI Fuel Injector for a Close-Arranged Spray-Guided Combustion System," SAE paper 2002-01-1133.
- (6) Drake, M. C., Fansler, T. D. and Lippert, A. M., 2005, "Stratified-charge Combustion: Modeling and Imaging of a Spray-guided Direct-injection Spark-ignition Engine," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2683~2691.
- (7) Miyajima, A., Okamoto, Y., Kadomukai, Y., Togashi, S. and Kashiwaya, M., 2000, "A Study on Fuel Spray Pattern Control of Fuel Injector of Gasoline Direct Injection Engines," SAE Paper 2000-01-1045.
- (8) Abe, M., Okamoto, Y. and Kadomukai, Y., 2004, "Fuel Spray Pattern Control Using L-Step Nozzle for Swirl-Type Injector," SAE Paper 2004-01-0540.
- (9) Moon, S., Bae, C. and Choi, J., 2006, "The Generation of Robust Swirl Spray Using Tapered Nozzle," *KSAE Spring Conference*.

- (10) Moon, S., Abo-Serie, E., Shin, H. and Bae, C., 2006, "Static Pressure Distribution Inside the Swirl Spray," *ICLASS 2006*, August 2006, Kyoto, Japan.
- (11) Gavaises, M., Abo-serie, E. and Arcoumanis, C., 2002, "Nozzle Hole Film Formation and its Link to Spray Characteristics in Swirl-Pressure Atomizers for Direct Injection Gasoline Engines," SAE Paper 2002-01-1136.
- (12) Abo-Serie, E., 2003, "Internal Flow and Spray Characteristics of a Swirl Pressure Atomiser for Gasoline Engines," Ph. D thesis, Imperial College.
- (13) Brena de La Rosa, A., Wang, G. and Bachalo, W. D., 1990, "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.
- (14) Fu, Y., Jong, S. and Tacina, R., 2005, "Characteristics of the Swirling Flow Generated by an Axial Swirler," GT2005-68728, *Proc. ASME Turbo Expo 2005*, June 6-9, Reno-Tahoe, Nevada, USA.