

가솔린 직접분사식 고압 슬릿 노즐 분사기의 팬형 분무 특성 고찰

송 범 근¹⁾ · 김 원 태²⁾ · 강 신 재³⁾

전북대학교 대학원¹⁾ · 전북대학교 자동차 산학협력원²⁾ · 전북대학교 기계항공시스템공학부³⁾

Fan-shaped Spray Characteristics of GDI High Pressure Slit Nozzle Injector

Bhumkeun Song¹⁾ · Wontae Kim²⁾ · Shinjae Kang³⁾

¹⁾Graduated School of Precision Mechanical Engineering, Chonbuk University, Jeonju 561-156, Korea

²⁾Chonbuk National University Automobile Research institute, Chonbuk University, Jeonju 561-156, Korea

³⁾Division of Mechanical & Aerospace System Engineering, Chonbuk University, Jeonju 561-156, Korea

(Received 28 March 2005 / Accepted 11 August 2005)

Abstract : A new stratified charge combustion system has been introduced and developed for GDI engines. Before this new GDI system, the stratified mixture was formed by a high pressure swirl injector. But, the special feature of new system is employed of a thin fan-shaped fuel spray formed by a slit type nozzle. Also, this system has been adopted a shell-shaped piston cavity. We made high pressure gasoline injection system and investigated the fan-shaped spray characteristics such as spray tip penetration, spray angle, SMD and velocities of droplets using PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) system and spray visualization system to obtain the concept of the new design and the fundamental data for the next generation GDI system. The experiment was performed at the injection pressures of 5 and 9MPa under the atmospheric condition.

Key words : Stratified charge(성층급기), GDI(가솔린 직접 분사), Fan-shaped fuel spray(팬형 연료 분무), Slit nozzle injector(슬릿 노즐 분사기), PDPA(위상 도플러 입자 분석기)

Nomenclature

- D : distance (mm)
- T : time after injection (ms)
- P : pressure of injection (MPa)
- Q : quantity of fuel (mg/stroke)

Subscripts

- I = injection
- xo : radial distance $x = 0$

1. 서론

현재 가솔린 자동차의 엔진 성능향상 및 에너지 절약에 대한 연비향상에 대한 노력으로 GDI 엔진이 대두되었으며 GDI 엔진의 장점은 많이 소개되었다. 기존 GDI 엔진의 특징은 중공원추형 분무를 형성시키는 고압 선회 분사기와 함께 혼합적인 작동모드를 채택한 것으로 엔진의 부분부하에서는 성층화 모드, 그리고 전부하 영역에서는 균일 혼합 모드로 작동되어진다.¹⁻³⁾ 토요타(Toyota)에서 제작한 D-4 엔진의 성층화 연소 시스템의 특징들은 나선형의 오목한 피스톤, 고압 선회 분사기 그리고, 헬리컬 포트와 스웰 콘트롤 밸브를 가진 흡기 시스템이었고 이러한 연소 장치는 광범위한 영역에서 성층화 연

*To whom correspondence should be addressed.
kangsj@moak.chonbuk.ac.kr

소가 가능하도록 하였다.²⁾ 그러나, 헬리컬 포트의 채택은 고속 운용 조건에서 출력을 부분적으로 저하시켰고, 복잡한 작동 모드가 필요 없는 흡기 과정에 독립적인 연소 개념 개발의 필요성을 인식하였다. 따라서, 토요타는 최근에 엔진 성능을 향상시키는 팬형 분무를 분사하는 새로운 슬릿형의 분사기를 제작, 소개하였다.⁴⁻⁶⁾ 이러한 시스템에서 성층 혼합기는 이러한 팬형 분무와 조개형상의 피스톤 캐비티의 조합에 의해서 생성되어진다. 이러한 연소 시스템은 텀블 또는 스윙과 같은 특별한 급기 모션을 필요로 하지 않는다. 이것은 흡기포트 형상의 단순화로 전부하 성능의 향상을 가능하게 하였다. 부분부하에서 엔진 성능에 대한 새로운 시스템은 연료 소모율과 스모크, CO 그리고 HC 배출물 등의 감소로 현저한 향상을 보였다.⁴⁾ 새로운 연소 과정과 기존 GDI 엔진을 비교하면, 안정화된 성층연소의 범위가 확장되어졌고, 대부분의 엔진 속도에서 완전 부하 토크가 개선되었다.⁵⁾ 또한, Takeda 등은 새로운 엔진은 전형적인 PFI 엔진보다 20% 향상되어진 결과를 보였고 선회 분사기 보다 미립화도 향상되었다고 하였다.⁷⁾

슬릿 노즐에서 형성되는 팬형 분무는 중공원추형 분무에 비하여 분무 관통도가 매우 크다. 또한, 팬형 분무의 정면은 매우 넓은 분무각을 가지고 측면은 매우 얇은 액막을 형성하게 된다. 연료의 분무유동 특성이 연소에 큰 영향을 미치기 때문에, 혼합기 형성과정에 대한 분무 유동 특성이 매우 중요하다. 이에, 본 연구에서는 고압 슬릿 노즐에서 분사되는 분무의 형성 과정과 분무 유동 특성을 고찰하고자 하였다. 분사기에 고압 연료 분사를 유지시키기 위해 고압 연료 공급장치를 제작하였으며, 분무 가시화 실험을 통하여 가솔린 고압 팬형 분무의 발달 과정을 연구하였다. 가시화 실험으로 획득한 영상을 이용하여 분무 관통도와 분무각을 측정하였으며, PDPA system을 이용하여 평균 액적 직경과 액적의 속도를 측정하여 분무 유동 특성을 고찰함으로써 GDI 고압 팬형 분무 분사기에 대한 메카니즘을 고찰하고 분무 유동 특성을 실험적으로 규명하여 신기술 도입에 대한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 분사기는 일본에서 상용화된 토요타사의 GDI용 고압 슬릿 노즐 분사기이다. Fig. 1은 연구 분사기의 외형과 내부 단면형상, 그리고 노즐 팁에 크기 0.85mm×95μm, 그리고 편향각(off-set angle) 18°의 슬릿을 나타내고 있다.

직접분사식 가솔린 분사기에 안정적으로 고압을 공급시키기 위해 Fig. 2와 같이 고압 질소(N₂) 탱

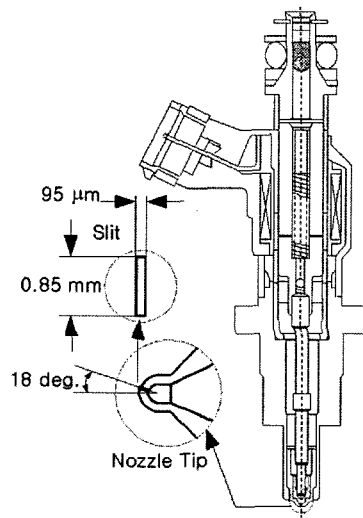
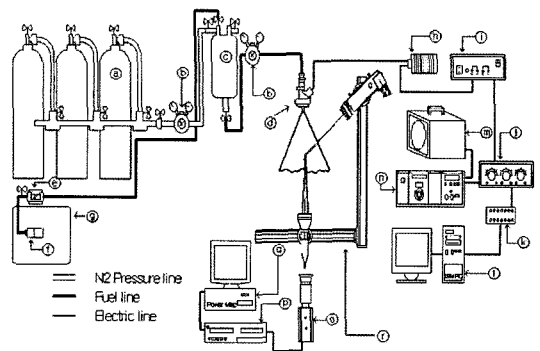


Fig. 1 Configuration of high pressure slit nozzle injector



(a) N₂ Tank (b) pressure regulator (c) high pressure fuel tank (d) injector (e) fuel filter (f) fuel pump (g) fuel tank (h) injection driver (i) injection unit (j) amplifier (k) A/D converter (l) injection control computer (m) strobo scope (n) strobo scope control panel (o) CCD camera (p) VTR (q) image analysis computer (r) PDPA

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

크 3개를 사용한 고압연료공급장치를 구성하였다. 연료 분사 제어부는 분사기의 솔레노이드 밸브를 개폐하여 간헐적인 분무를 생성하기 위하여, 연료 분사 조절장치를 A/D 변환기(A/D 3100)를 통하여 IBM PC와 인터페이스하여 컴퓨터에 의해 연료 분사시기와 기간을 조절할 수 있도록 하였다. 직접분사식 가솔린 선회 분사기의 분무 거동 특성을 관찰하기 위한 가시화 장치는 스트로보스코프(MSP-120)와 컨트롤 판넬(MSC-1)로 구성된 스트로보스코프 시스템으로 발광주기를 연료분사기의 분사 주기와 함께 컴퓨터로 동시에 조절할 수 있게 하여 스트로보스코프의 발광시기를 지연시킴으로서 분사 개시 이후 임의의 시간에 정지 분무 영상을 획득하였고, 영상처리 소프트웨어를 이용해서 분무 거동을 분석하였다.

연구 분사기의 액적들의 특성을 고찰하기 위하여 PDPA를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 레이저 광계측 장치는 공냉식 Ar-ion 레이저(Ion Laser Technology)를 사용하였고, 신호처리는 DANTEC (58N50)사 제품을 사용하였다.

2.2 실험 방법

상온(22±0.5℃)의 정지 대기중에 연료를 분사시켰으며, 분사기의 분사압은 5MPa과 9MPa의 두 가지 분사압의 변화에 따른 분무 특성을 고찰하였다. 분사시간은 2.5ms, 측정 위치는 가시화 실험으로 획득한 영상을 분석하여 팬형 분무가 좌우 대칭을 이루고 있으므로 Fig. 3과 같은 측정위치를 구성하였다. Table 1에 자세한 내역을 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연료 분사량

Fig. 4는 각 분사압력의 변화에 대하여 동일한 분사기간의 분사량을 고찰하기 위하여 각 분사압에 대해 분사기간 0.2ms에서 4.0ms까지의 연료 분사량을 각 분사기간에 대해 1회 분사시 분사되는 연료량을 나타낸 그래프이다. 동일한 분사압력에서는 분사기간이 증가함에 따라 선형적인 증가를 보이는데, 이는 니들이 열려있는 시간이 지속되어 분사기

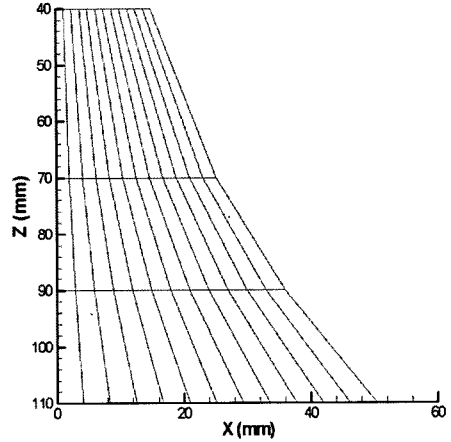


Fig. 3 Measuring positions for PDPA

Table 1 Summary of test grid

Axial Distance from Nozzle Tip(Dz)	Radial Distance (Dx)	
	Measurement Points	step
40 mm	13	1.25
70 mm		2.1
90 mm		3
110 mm		4.2

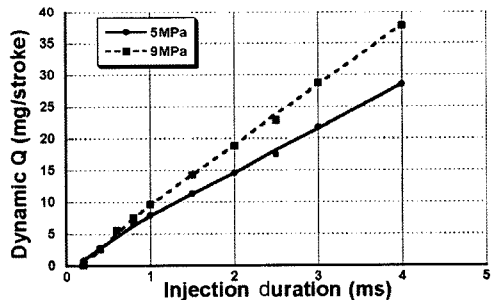


Fig. 4 Fuel flowrate of injectors

의 오리피스로부터 분출되는 연료량이 증가하기 때문이다. 동일한 분사기간에 대하여 압력의 증가에 따라 분사량이 증가하는 경향을 보이지만 0.2ms에서는 압력이 증가함에 따라서 오히려 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 기존의 GDI 분사기들에서 동일하게 나타나는 경향으로[8] 분사기에서 연료가 분사되기 위해서는 분사기에 분사펄스가 공급되면서 솔레노이드코일에 전류가 흘러 아마추어가 자기되어 일체로 구성되어 있는 핀틀 밸브의 플랜지부분이 스톱퍼에 닿을 때까지 흡인된다. 이 때, 코

일 스프링력에 의해 오리피스 출구에 밀착되어 있던 핀틀 밸브가 열리면서 연료가 분사되는데, 다른 분사기간보다 상대적으로 매우 짧은 시간인 0.2ms에서는 분사압이 증가함에 따라 전자기력에 의한 핀틀 상승이 고압에 의해 최대 양정까지 오르지 못하고 닫혀서 오히려 연료 분사량이 감소하는 경향을 보여주는 것으로 사료된다. 또한, 0.4ms에서 어느 정도 동일한 분사량을 보이다 그 이후는 분사압이 증가함에 따라 점진적으로 분사량이 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

3.2 분무 거동 가시화

Fig. 5는 각 분사압에 대하여 가시화 실험에서 획득한 정지분무 영상으로 시간의 전개에 따른 분무 거동 과정을 보여주고 있다. 좌측의 이미지는 팬형 분무의 전면부로 부채꼴 형상을 보여주고 있으며, 우측은 팬형 분무의 측면부에서 획득한 이미지이다. 분사압 4MPa의 증가에 비하여 팬형 분무의 크기나 형상에는 큰 변화가 나타나지 않는다. 이는 복잡한 작동 모드의 혼합이 필요 없고 흡기 과정에 텀블과 스윙에 큰 영향을 받지 않는 독립적인 연소 개념 개발의 필요성에 의한 팬형 분무의 채택 메카니즘이 나타나는 부분이라 할 수 있겠고 이는 다음의 분무 관통도와 분무각에서 확인할 수 있었다.

3.3 분무 관통도 및 분무각

GDI 엔진의 경우 연소실 내에 직접 연료를 분사하기 때문에 연료의 연소실 벽면젖음 현상이나 피스톤 헤드 또는 캐비티에 대한 충돌현상 등의 이유로 고려되어야할 중요한 인자들이다.

3.3.1 분무 관통도

Fig. 6의 분무 관통도는 분사 초기에 분사압 9MPa이 5MPa에 비해 2~3cm 정도 차이를 보이지만 분사 말기에는 1cm 이내의 차이로 유사하게 진행하고 있는 것을 보이고 있다. 일반적인 경향은 분사초기에는 빠르게 진행하고 있으나 시간의 경과에 따라 약 3ms 이후 증가폭이 완만해지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 분사 초기에는 분사압력에 의해 큰 운동량으로 분출되는 연료 액적들이 분무 하류 방향으로 진행하면서 정지 대기의 유체 역학적 항력과 운동

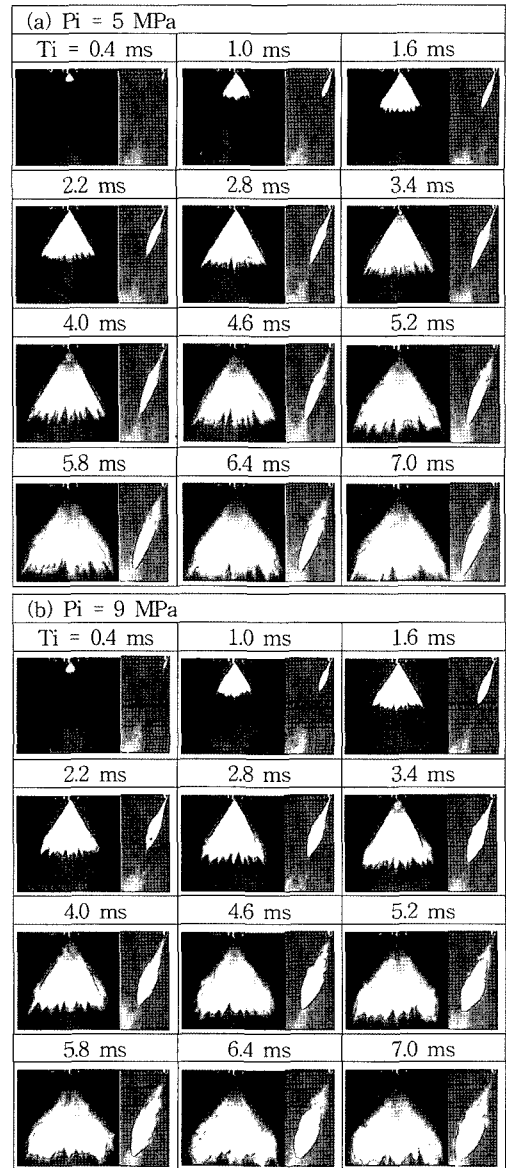


Fig. 5 Temporal spray development

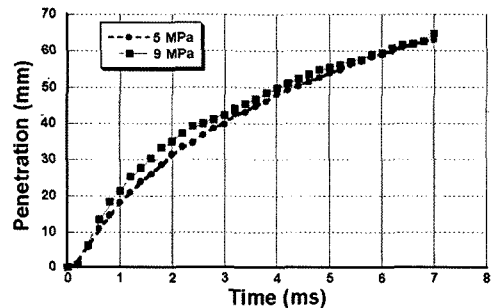


Fig. 6 Spray tip penetration

량의 교환, 그리고 액적들의 분열이 이루어지면서 운동량이 감소하여 분무 선단의 진행속도가 완화되어지기 때문이다.

3.3.2 분무각

Fig. 7의 분무각의 경우에도 약 62°내외로 오차 범위 안에서 매우 유사한 값을 보이고 있다. 따라서, 본 연구에 사용된 분사기의 경우 분무의 외형적인 변화는 분사압의 변화에 비하여 큰 차이를 보이지 않는다고 할 수 있겠다. 이는 앞서 언급한 것처럼, 외부적인 요소에 큰 영향을 받지 않는 독립적인 연소 개념의 팬형 분무 메카니즘을 분무 관통도와 분무각의 분석에서도 확인할 수 있었다. 슬릿형 노즐의 분사기는 분사기로부터 분사되는 연료가 분사 초기에 액막의 형태를 이루는데 이 액막이 주위 기체와의 마찰에 의해서 액막에 파가 발생하고, 주위 기체의 공기역학적인 힘에 의해 이 파의 진폭이 증가함에 따라서 액막은 한 파장 또는 반 파장의 크기로 일단 분리되었다가 표면장력에 의해 액주로 변형된다. 또한 이 액주가 다시 액적으로 분열되는 공기역학적인 파에 의한 분열이 발생하며 미립화가 진행되는 데 이 지점을 분열위치(breakup point)라 한다. Kanda⁵⁾ 등은 분열 위치는 액상의 분무 흐름이 순수한 액적의 흐름으로 변하는 것과 초기의 연료 분사 속도의 감소가 일어나게 되는 것을 의미한다고 했으며, 이러한 분열 위치는 피스톤 캐비티에 충돌하기 전에 발생되어야 하는데, 이는 액막이 분열되기 전에 피스톤 캐비티에 충돌하게 될 경우 충돌 후 증발이 늦어지고 분산이 약해지기 때문이다. Kanda⁵⁾ 등의 실험에서 분사압 12MPa일 때 액막의 분열이 40 mm 이후에 발생되었다고 하였다. 본 연

구에 사용된 분사기의 분석 결과, 분사압 5MPa는 40mm 이전에 액막의 분열이 일어나서 미립화가 진행되지만, 분사압 9MPa는 40mm인 지점 이후에 액막의 분열이 일어날 뿐만 아니라 높은 수밀도로 인하여 PDPA 데이터 획득이 거의 불가능하였다. 따라서 실험결과를 9 MPa의 40mm인 지점은 논의에서 제외하였다.

3.4 액적의 SMD

Fig. 8은 분사 압력에 대해 분사장 전체 액적들의 SMD를 나타낸 그래프이다. 본 논문에서는 대기압 조건의 공간에 분사압 5MPa일 때 약 61, 그리고 분사압이 9MPa일 때 약 55의 결과를 나타냈는데, Kanda⁵⁾ 등의 실험에서 SMD가 약 20 μ m로 나타난 것보다 큰 차이를 보인다. 이는 그들의 실험 조건이 실린더 내에서 0.6MPa의 가압상태에서 본 실험의 조건보다 고압인 12MPa로 실험이 이루어져 본 논문의 결과보다 상대적으로 작은 SMD값을 보이는 것으로 사료된다. 본 실험에서는 분사압 9MPa일 때, 분사압 5MPa에 비하여 약 7% 정도 SMD 값이 작게 나타났다. Fig. 9는 분사압력에 대한 각 Z축 단면 전체의 SMD를 보여주는 그래프이다. 분사압 5MPa의 경우 노즐 선단에서 멀어질수록 SMD가 커지고 있으나, 9MPa의 경우 90mm측정 위치에서 SMD값이 가장 작은 값을 보이지만, 55 \pm 1% 이내의 값으로 거의 동일하였다. 따라서 9MPa의 분사압이 분사장 전체에 걸쳐 액적들이 5MPa에 비해 균일하게 미립화가 이루어진다고 할 수 있다. Fig. 10은 분무축 중심, 즉 x=0인 지점에서 압력 변화에 대한 SMD의 변화율을 알아보기 위해서, 분무장 전체 액적들의 SMD

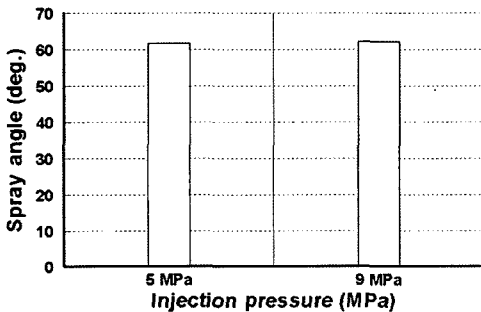


Fig. 7 Spray angle

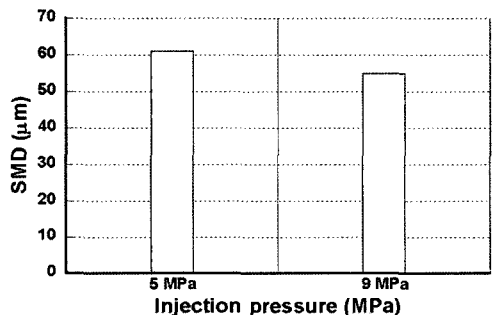


Fig. 8 SMD for all droplets

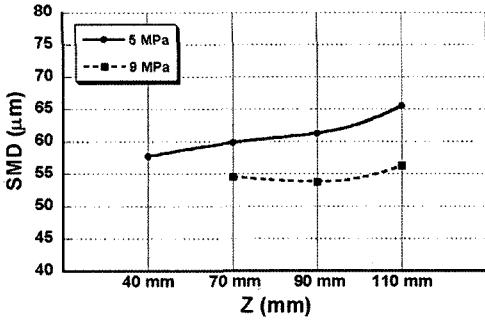


Fig. 9 SMD of each Z distance

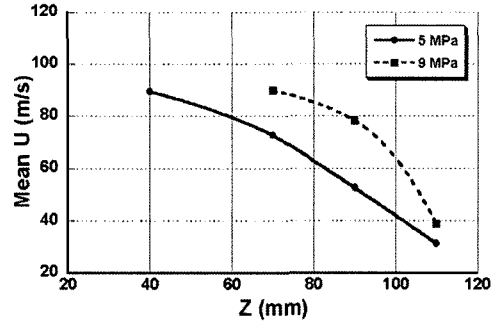


Fig. 11 Mean U-velocity

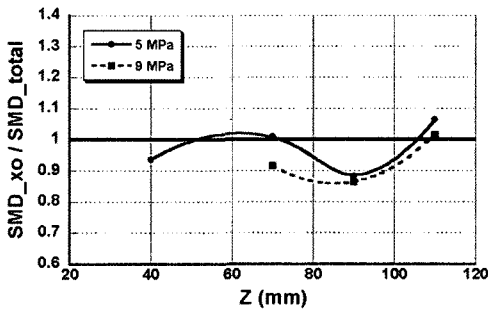


Fig. 10 SMD ratio for Total SMD at X=0

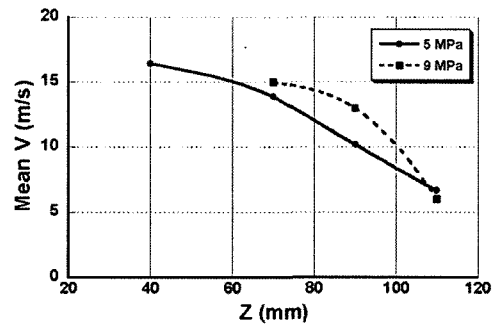


Fig. 12 Mean V-velocity

에 대한 분무축 중심에서의 SMD값의 비를 나타내었다. 1보다 작다는 것은 전체 액적들에 대한 SMD보다 SMD값이 작고 1보다 크다는 것은 전체 액적들의 SMD보다 그 지점에서의 SMD값이 크다는 것을 의미한다. 5MPa와 9MPa에서 유사한 물결과 형태의 그래프를 형성하고 있다. 이는 앞서 분무각에서 논의했던 것처럼 액막의 분열시 생기는 파의 영향과 무관하지 않을 것으로 사료된다. 5MPa의 경우는 1보다 작고 크고를 반복하지만 9MPa의 경우 110mm를 제외하고는 각각 8%, 14% 작은 값을 나타냈다. 이는 분사압이 9MPa일 때 주분무의 분무축 중심에서 미립화가 활발하다는 것을 의미한다.

3.5 액적의 속도

Fig. 11과 12는 각각 축방향과 반경방향 속도에 대한 거리와 분사압력의 영향을 나타낸 그래프이다. 두 그래프에서 수치적인 차이가 있을 뿐, 분사압력이 증가함에 따라 속도는 증가하고 거리가 멀어짐에 따라 속도가 감소하는 유사한 경향을 나타내었다. 하지만 분무축 중심, 즉 $x=0$ 인 지점에서 분사

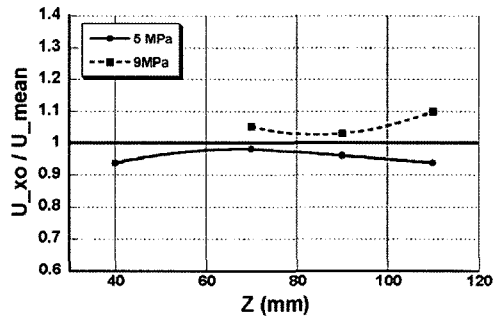


Fig. 13 U ratio for Mean U at X=0

압력 및 축방향 거리에 대한 속도 변화율을 나타낸 Fig. 13에서의 결과는 완전히 반대였다. Fig. 13은 축방향 거리의 평균 속도에 대한 $x=0$ 인 지점의 속도비를 나타낸 그래프이다. 5MPa의 경우 모든 지점에서 1보다 작게 나타나서 노즐 선단으로부터 거리(Z)에서의 평균속도보다 분무 중심축에서의 속도가 4% 이내에서 작게 나타나지만 9MPa의 경우 모든 지점에서 1보다 큰 값을 가지면서 노즐 선단으로부터 거리(Z)에서의 평균속도보다 분무 중심축에서의 속도가 3%에서 10%까지 빠른 값을 보였다.

4. 결론

가시화 실험 장치와 PDPA 시스템을 사용하여 가솔린 직접분사식 고압 슬릿 노즐 분사기의 팬형 분무 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가시화 실험을 통하여 획득한 이미지들을 분석한 결과 분사압의 증가에 비하여 팬형 분무의 분무 관통도 및 분무각의 변화는 크지 않았다. 따라서, 팬형 분무 분사기가 복잡한 작동 모드의 혼합이 필요 없고 흡기 과정 중의 텀블과 스웰 등 흡기 모션과 외부적인 요소에 큰 영향을 받지 않는 독립적인 연소 개념에 실용적임을 확인할 수 있었다.
- 2) 전체 SMD 값에 있어서 분사압 9MPa이 분사압 5MPa에 비하여 11% 정도 작게 나타났다. 9MPa의 경우 분무장 전체에 걸쳐 $55 \pm 1\%$ 이내의 값으로 거의 동일하였다. 따라서 9MPa의 분사압이 분무장 전체에 걸쳐 액적들이 5MPa에 비해 균일하게 미립화가 이루어진다고 할 수 있다.
- 3) 분무축 중심, 즉 $x=0$ 인 지점에서 분사압력 및 축방향 거리에 대한 속도 변화율의 연구 결과 5MPa의 경우 평균속도보다 분무 중심축에서의 속도가 4% 이내로 작게 나타나지만 9MPa의 경우 모든 지점에서 평균속도보다 분무 중심축에서의 속도가 3%에서 10%까지 빠르게 나타났다.

References

- 1) T. Kume, Y. Iwamoto, K. Iida, M. Murakami, K. Akishino and H. Ando, "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engines," SAE 960600, 1996.
- 2) J. Harada, T. Tomita, H. Mizuno, Z. Mashiki and Y. Ito, "Development of a Direct Injection Gasoline Engine," SAE 970540, 1997.
- 3) Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi and H. Ando, "Development of Direct Injection Gasoline Engines," SAE 970541, 1997.
- 4) M. Koike, A. Saito, T. Tomoda and Y. Yamamoto, "Research and Development of a New Direct Injection Gasoline Engine," SAE 2000-01-0530, 2000.
- 5) M. Kanda, T. Baika, S. Kato, M. Iwamuro and M. Koike, "Application of a New Combustion Concept to Direct Injection Gasoline Engine," SAE 2000-01-0531, 2000.
- 6) PS. Ueda, Y. Mori, E. Iwanari, Y. Oguma and Y. Monoura, "Development of a New Injector in Gasoline Direct Injection System," SAE 2000-01-1046, 2000.
- 7) K. Takeda, T. Sugimoto, T. Tuchiya, M. Ogawa, S. Ueda and K. Yoneshige, "Slit Nozzle Injector for A New Concept of Direct Injection SI Gasoline Engine," SAE 2000-01-1902, 2000.
- 8) B. K. Song, W. T. Kim and S. J. Kang, "Spray Characteristics for Specified Regions of High Pressure Swirl Injector in Gasoline Direct Injection Engine," Transactions of the KSME (B) Vol.27, No.1, pp.9-16, 2003.