

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0085

공기보조 분사기와 고압 선회식 분사기의 특성 비교 - Part II: 미시적 분무특성

Comparison of Overall Characteristics between an Air-Assisted Fuel Injector and a High-Pressure Swirl Injector - Part II: Microscopic Spray Characteristics

장 창 수*, 최 상 민*
Changsoo Jang, Sangmin Choi

ABSTRACT

As a second part of the comparison study, microscopic features of an air-assisted fuel injector (AAFI) and a high-pressure swirl injector (HPSI) were characterized. They consist of the internal spray structure in terms of fuel mass and drop diameter, the overall atomization performance with respect to operating parameters and the drop size distribution. Large droplets are concentrated in around the head part of a spray field of the HPSI, while in the case of the AAFI, they were distributed in the tail part. Although the AAFI showed the better atomization performance, the feasible ranges of operating parameters such as injection and ambient pressure were found to be wider in the HPSI. Drop size distribution of the AAFI sprays was more dispersed than that of the HPSI. However, at the well-atomized condition, it appeared to be very uniform.

주요기술용어 : gasoline direct injection engine(직접분사식 가솔린 엔진), air-assisted fuel injector(공기보조 분사기), high pressure swirl injector(고압 선회식 분사기), drop size distribution(입경분포)

Nomenclature

ALR : air liquid mass ratio ($=m_A/m_L$)
c : coefficient of atomization
 D_{32} : Sauter mean diameter, m

k : constant
L : length, m
m : mass, kg
P : pressure, Pa
R : gas constant, 0.287kJ/kgK for air
 γ : polytropic constant
 ρ : density, kg/m^3
 η : efficiency
 σ : surface tension of liquid, kg/s^2

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

Subscripts

- A, a : air
- amb : ambient
- ai : air injection
- fi : fuel injection
- L : liquid
- n : nozzle
- sh : sheet

1. 서론

가솔린 직접분사식 엔진에서의 연료분사는 일반적으로 이른분사(early injection)시 흡기과정 중 혹은 흡기 직후부터, 늦은분사(late injection)시 압축행정 초반 및 중반에서부터 시작된다. 이것은 기존의 포트 분사식 엔진에 비해 연료가 연소가능한 정도의 기화 수준까지 이르는데 요구되는 시간이 상당히 감소됨을 의미한다. 따라서 이 엔진에 적용되는 분사기는 어느 정도 이하의 평균입경을 가지는 분무장을 생성시키며 연료를 분사할 수 있어야 한다. 일반적으로 $25\ \mu\text{m}$ 이하의 Sauter 평균입경 ($= \frac{\sum D_i^3}{\sum D_i^2}$; 이하 D^{32})이 요구된다고 알려져 있다.¹⁾

미립화 성능에 대한 요구로 인해 기존의 연료 분사장치와는 다른 새로운 분사장치가 개발되고 적용되기 시작했다. 현재는 공기보조 분사기 (air-assisted fuel injector; 이하 AAFI)와 고압 선회식 분사기(high-pressure swirl injector; 이하 HPSI)가 여러 자동차 회사와 분사기 회사, 연구소 등에 의해 개발되거나 적용 중에 있다.

여러 연구결과들은 AAFI의 평균입경을 $10\ \mu\text{m}$ 대로, HPSI는 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 대로 발표하고 있다.^{2,3,4,5)} 이러한 결과들은 각 분사기의 엔진 적용성 평가에 도움을 줄 수는 있지만, 각각의 실험장치와 실험조건에서 측정되었기 때문에 양쪽 분사기의 비교평가에 적절한 도움을 주기에는 미흡한 점이 있다. 특히, 측정장치와 주변조건에 차이는 같은 분사기와 분무장 내에서도 상당한 오차를 유발시킬 수도 있기 때문에 1대1 비교에는 무리

가 따른다.

많은 적용의 예와 증대되는 관심에도 불구하고 두 분사기의 적용방법의 차이, 제작 상의 어려움 등으로 인해 아직까지는 이러한 1대1 비교가 이루어진 바가 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 두 종류의 분사기 시제품을 제작하여 동일한 실험장치와 유사한 조건하에서 미립화 특성을 파악하고 이를 비교하고자 하였다.

비교연구에 있어 고려할 점은 현재 비교대상이 되고 있는 분사기 시제품이 전체 분사기들에 대한 대표성을 가지느냐 하는 문제가 될 것이다. 두 분사기 모두 분사기간 중에 과도 모드와 정상상태 두 가지의 유량모드를 경험하게 된다. 이때 정상상태의 경우는 거의 모든 분사기들의 작동원리가 유사하기 때문에 미립화 과정이나 분무장 형태에 있어 크게 다른 점이 없다. 하지만, 분사 초기와 말기의 과도 모드에서는 분사기 노즐의 구조와 설계방법에 따라 달라진다.

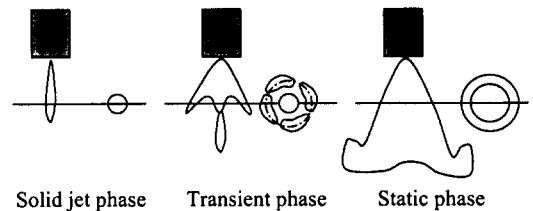


Fig. 1 Schematics showing typical spray development of HPSI

AAFI의 경우 시간에 따른 유량변화의 특성상 초기와 말기 유량이 많지 않기 때문에⁶⁾ 이 부분의 영향이 그리 크지 않다. HPSI의 경우 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 과도기에 입경이 크고 침투 속도가 빠른 솔리드 제트(solid jet)가 형성되는데, 이 부분의 양이 커지게 되면 전체적인 평균입경에 영향을 미칠 수 있게 된다. 현재 HPSI를 개발하고 있는 연구자들은 이 부분을 최소화하는데 많은 노력을 기울이고 있다.⁷⁾ 본 연구에서 사용된 분사기의 경우 기존의 제품에 비해 가시화를 통해 확인할 수 있는 솔리드 제트의 양이 감소된 분무장을 형성시킨다.⁸⁾ 따라서, 솔리드 제트가 같

수축 감소되어질 앞으로의 추세를 고려할 때 적절한 테스트 분사기가 될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실험장치

두 분사기 분무장의 평균입경을 측정하기 위해 사진영상처리기법(photographic imaging method; 자세한 설명은 참고문헌⁹⁾에 기술되어 있음)이 활용되었다. 동일한 실험장치(Fig. 2) 내에서 분사기만 교체할 수 있도록 만들었으며, 연료와 공기는 각각의 고압공급장치를 사용하여 공급하였다.

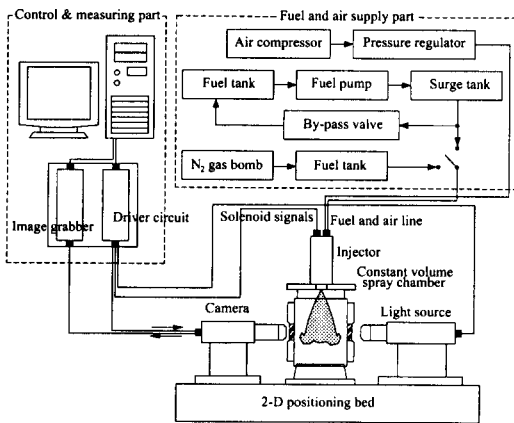


Fig. 2 Spray test system setup for injector driving and drop sizing

간헐식 분사에서의 분무장은 측정지점(measurement position)과 측정지연시간(measurement delay time)의 조합인 측정점(measuring point)을 어떻게 설정하느냐에 따라 동일 분무장에 대해서도 측정값이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 이러한 영향을 최소화하기 위해 전 분무장 영역에서 액적들의 평균입경을 파악하는 두 가지 방법을 택했다. 시간스캔 모드(time scanning mode)에서는 측정지점을 고정된 상태에서 측정지연시간을 분무장이 도달하는 시점부터 분사가 마치는 시점까지 일정한 간격으로 변화시키면서 입경을 측정하였다. 이러한 방법은 기화의 영향에 의한 평균입경 변화가 최소화되기

때문에 분사기 자체의 미립화 특성과 분무장의 전체적인 평균입경을 구하는데 이용하였다. 공간스캔 모드(space scanning mode)에서는 측정지연시간을 고정시킨 상태에서 측정지점을 변화시켜가며 측정을 수행하였다. 이 방법을 통해 평균입경과 질량으로 정의되는 분무장 내부구조를 파악하였다. Fig. 3은 이러한 두 가지 방법을 위해 설정한 측정지점을 보여주고 있다.

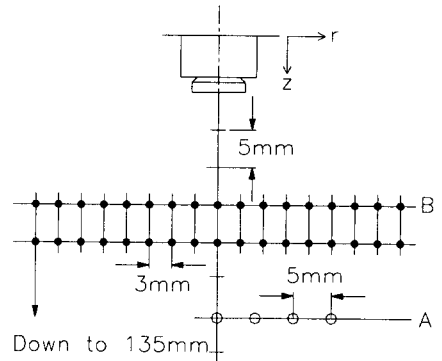


Fig. 3 Measuring positions for time scanning (line A) and space scanning (matrix B)

3. 결과 및 토의

3.1 분무장 내부구조

Fig. 4는 공간스캔 모드에서 분무장의 전 영역에 대하여 분사 완료 직후의 입경과 질량분포를 측정된 결과를 보여주고 있다. 두 분사기의 침투속도와 정도는 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타나지만¹⁰⁾ 분사기간(injection duration)이 다르기 때문에 측정된 분무장의 길이는 약간 다르게 나타났다.

강한 주변공기의 분무장 유입유동은 AAFI의 분무장을 초기의 중공원추형(hollow cone)에서 바로 솔리드 콘(solid cone) 형태로 변화시키는 동시에 연료분포가 분무장 중앙부에 집중되도록 만드는 것을 볼 수 있다. HPSI에서는 이러한 유입유동이 AAFI의 경우보다 약하기 때문에 주변압력 대기압 조건에서는 분무장 중앙부에 연료가

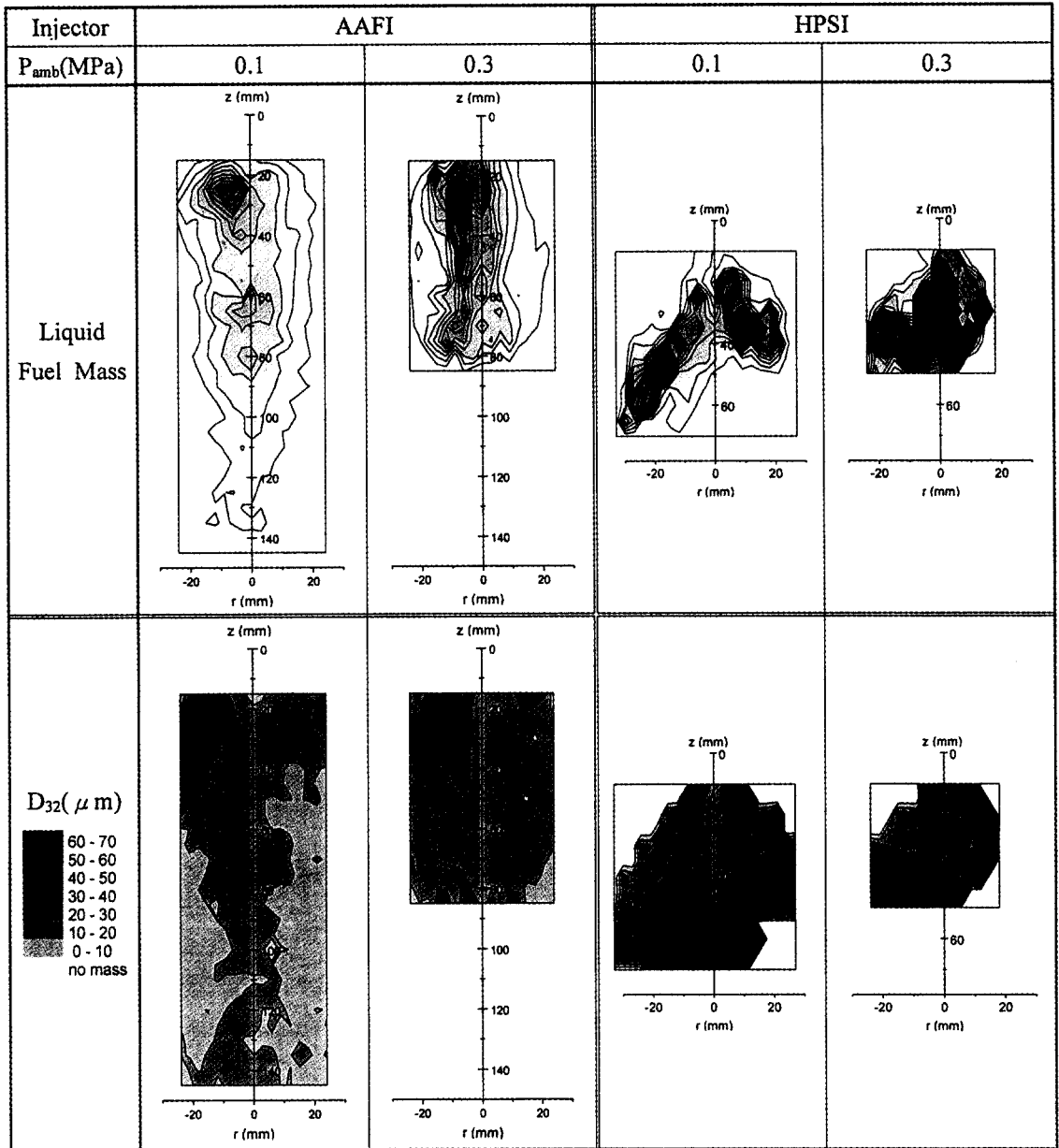


Fig. 4 Spray structures of the AAFI and the HPSI at the end of injection

분포하지 않는 부분이 존재하고 있다. 하지만, 주변압력이 높아지면서 유동도 강화되어 연료의 중앙부 집중현상이 강하게 나타났다. 성층연소에는 이러한 솔리드 콘 형태의 분무장이 유리한 것으로 알려져 있다.¹¹⁾

두 분사기 모두 분무장의 솔리드 콘화가 이루

어지는 공통점을 가지는 반면 그 경향은 상반되게 나타났다. 전술한 바와 같이 HPSI는 주변압력이 높아지면서 유입유동이 강해져서 분무장의 솔리드화가 강해진다. 반면에 AAFI는 높아진 주변압력으로 인해 상대적으로 공기분사압력이 낮아지기 때문에 분사 공기-연료의 유동속도가 낮아

Table 1 Atomization trends of the AAFI and the HPSI by previous studies

Operating parameters	AAFI	HPSI
Injection pressure difference	D ₃₂ decreases with higher air supply pressure	D ₃₂ is inversely proportional to the square root of the fuel injection pressure
Ambient pressure	D ₃₂ enlarges with its increase	Same trend as the AAFI
Injected fuel mass	D ₃₂ increases with more mass and such an effect increases at coarsely-atomized conditions	Almost no effect
Air-liquid mass ratio (ALR)	Its increase reduces D ₃₂ . However, this effect disappears as ALR increases over than 2.	—

진다. 이것은 주변 공기의 유입을 감소시켜 오히려 솔리드 콘 형성을 저해시킴을 볼 수 있다. HPSI에서는 AAFI(0.5~1.0MPa)보다 비교적 고압(5~10MPa)에서 분사하기 때문에 이러한 유동속도의 감소가 상대적으로 크지 않고, 주변압력의 영향을 크게 받지 않는다. 오히려 주변 밀도의 증가에 따라 유입유동장의 모멘텀이 증가하여 분무장 중앙부로 휩쓸려 들어가는 액적들의 양이 증가하게 된다.

공간적인 입경분포의 경우 가장 큰 차이점은 큰 액적들의 분포인 것으로 나타났다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 큰 액적들은 AAFI에서는 분무장의 꼬리 부분에서 존재하고, HPSI에서는 분무장의 머리 부분에 주로 존재하였다. 이것은 AAFI의 경우 큰 액적들은 주로 분사 말기에 형성되어 보조공기의 유동에 휩쓸리지 않고 후방에 남아있는 반면, HPSI에서는 유동장이 형성되어 가는 분사 초기에 형성되어 솔리드 제트 형태로 빨리 전방으로 침투하기 때문이다. 이러한 현상으로부터 AAFI가 HPSI보다 실린더 벽면이나 피스톤에의 연료 점착(wetting) 측면에서 유리할 것이라는 것을 예측할 수 있다. 반면에 점착 문제만 없다면 큰 액적들의 기화 측면에서는 초기에 분사가 이루어지는 HPSI가 유리할 것으로 사료된다.

3.2 운전조건에 따른 미립화 성능변화

AAFI와 HPSI에 대하여 분사압력, 주변압력 등의 운전변수가 미립화 성능에 미치는 영향에 대한 포괄적인 실험 및 해석 연구가 이루어진 바가 있다.^{6,12)} 이를 통하여 얻어진 경향들은 Table 1에 정리되어있다. 기존의 연구를 통해 얻어진 해석식과 실험식은 AAFI와 HPSI에 대해 각각 아래와 같이 표현된다.

$$D_{32} = \frac{3}{\left[K + c \frac{\rho_L RT_0 ALR}{2\sigma_L(\gamma-1)} \left\{ 1 - \left(\frac{P_{ai}}{P_{amb}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\} \right]}$$

where $K = k_{sh} \frac{\pi \rho_L D_n L_n}{m_L}$, (1)

$$D_{32} = 8.36 \times 10^{-3} \frac{(P_{amb})^{0.15}}{(P_{fi} - P_{amb})^{0.5}}$$
 (2)

각 상수들은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} D_n &= 6 \times 10^{-3} (m) & L_n &= 3 \times 10^{-2} (m) \\ \rho_L &= 750 (kg/m^3) & \sigma_L &= 2.18 \times 10^{-2} (N/m) \\ R &= 287 (J/kgK) & \gamma &= 1.4 \text{ (for air)} \\ T_0 &= 300 (K) & c &= 0.00012 \\ k_{sh} &= 2.64 \end{aligned}$$

두 분사기의 작동원리가 다르고 운전변수가 다르기 때문에 비교를 위해서 전형적으로 적용되고 있는 표준조건을 설정하였다. 측정실험도 이러한 표준조건에서 이루어졌다.

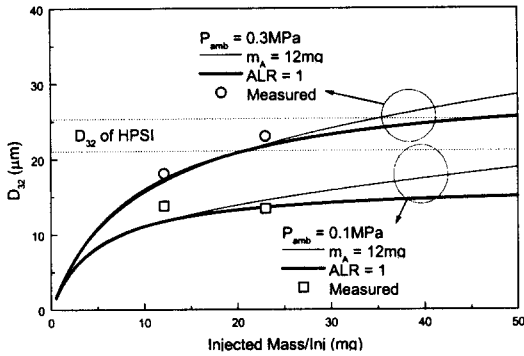


Fig. 5 Influence of injected fuel mass on mean drop diameter of the AAFI compared with that of the HPSI

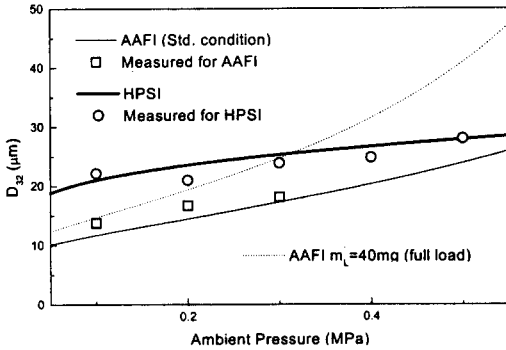
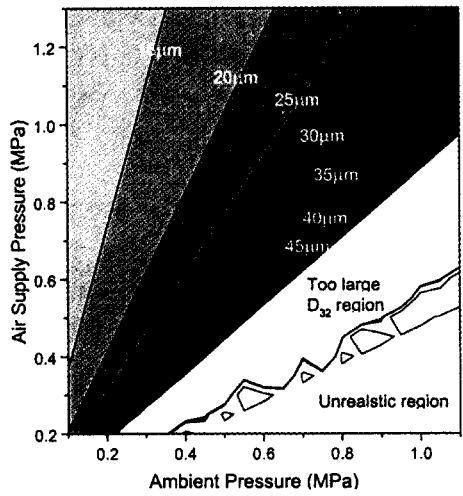


Fig. 6 Influence of ambient pressure on mean drop diameter of both injectors

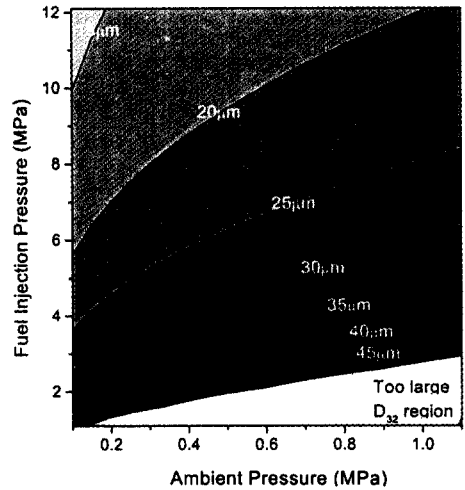
$$\begin{aligned}
 m_L &= 1.2 \times 10^{-5} \text{ (kg)} & m_A &= 1.2 \times 10^{-5} \text{ (kg)} \\
 ALR &= 1.0 & P_{amb} &= 1.0 \times 10^5 \text{ (Pa)} \\
 P_{ai} &= 8.0 \times 10^5 \text{ (Pa)} & P_{fi} &= 5.1 \times 10^6 \text{ (Pa)}
 \end{aligned}$$

이러한 값들이 적용될 때 AAFI는 $11.7 \mu\text{m}$ (측정치 $13.8 \mu\text{m}$), HPSI는 $21.0 \mu\text{m}$ (측정치 $22.1 \mu\text{m}$)의 D_{32} 값을 가진다.

Fig. 5는 분사연료량에 따른 평균입경 변화를 보여주고 있다. 공기연료질량비(air-liquid mass ratio; ALR)를 고정시켰을 경우와 분사공기량을 고정시킨 경우 양쪽에 대하여 성능변화를 파악하였다. HPSI의 경우 분사연료량에 대하여 거의 영향을 받지 않는다. 주변압력이 대기압인 경우 모든 조건에서 AAFI의 평균입경이 HPSI보다 작은



(a)



(b)

Fig. 7 Mean drop diameter maps showing relation between ambient pressure and (a) air supply pressure in the AAFI (b) fuel injection pressure in the HPSI

것으로 나타났다. 하지만, 주변압력 0.3MPa 조건에서는 분사연료량이 어느 이상 되면 AAFI의 평균입경이 HPSI보다 더 크게 증가하는 경향을 보였다.

주변압력의 변화에 대한 평균입경 변화는 Fig. 6에 나타나있다. 두 분사기의 증가경향은 약간 다르게 나타났다. AAFI에서는 한정된 공기분사

압력으로 인해 주변압력이 증가하면 분사압력차 (injection pressure difference)가 상대적으로 크게 감소하기 때문에 평균입경이 점점 가파른 곡선을 그리며 증가한다. 또한 분사연료량이 작은 경우는 그러한 기울기가 작은 반면 연료량이 커질수록 증가의 기울기가 더 커지는 것으로 나타났다.⁶⁾ 주변압력이 커지는 운전조건, 즉 늦은분사는 연료분사량을 작게 하여 성층화를 목적으로 하는 경우가 대부분이기 때문에 이러한 단점은 약간 보완이 가능한 것으로 사료된다.

식 (1)과 (2)로부터 분사압력과 주변압력의 조합에 따른 두 분사기의 평균입경의 변화가 구해졌다(Fig. 7). 전반적으로 적용 가능한 범위는 HPSI가 넓고, D32 15 μm 이내의 뛰어난 미립화 성능을 보이는 구간은 AAFI가 넓은 것으로 나타났다. 직접분사식 가솔린 엔진용 분사기의 평균입경의 한계를 25 μm 라고 할 때, HPSI의 경우 분사압력을 7MPa 이상으로 하게 되면 적용범위가 상당히 넓어지는 것을 알 수 있다. 반면에 AAFI는 분사기의 특성상 고압의 주변압력에서 단점을 가지고 있기 때문에 늦은분사 적용시 주의가 필요하다.

3.3 입경분포(drop size distribution)

일반적으로 단상 분사기인 HPSI의 입경은 AAFI보다 균일한 분포를 보여주는 것으로 알려져 있다. Houston and Cathcart²⁾의 실험결과에서도 평균입경은 AAFI가 작지만 입경분포는 HPSI보다 더 넓게 분포되어있는 모습을 보여주고 있다. Fig. 8에는 본 연구에 사용된 분사기들의 입경분포가 나타나 있다. 언급된 일반적인 경향을 잘 따라가고 있음을 알 수 있다.

한편, 평균입경이 충분히 작은 조건에서는 뛰어난 미립화 성능 때문에 AAFI의 입경분포가 HPSI보다 균일하게 나타났다. 하지만, 상대적인 입경분포—입경을 질량평균입경(mass median diameter)으로 정규화하여 구한 분포—는 HPSI와 비슷하거나 약간 넓게 퍼진 형태를 띠고 있다.(Fig. 9)

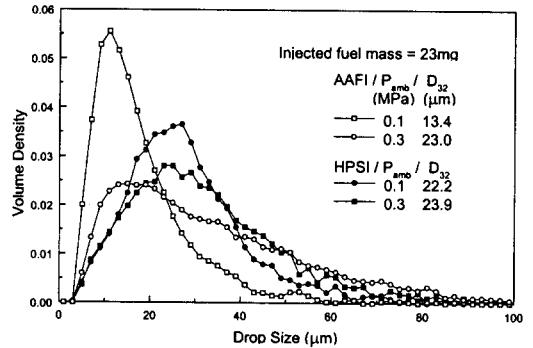


Fig. 8 Drop size distributions of sprays from the AAFI and the HPSI

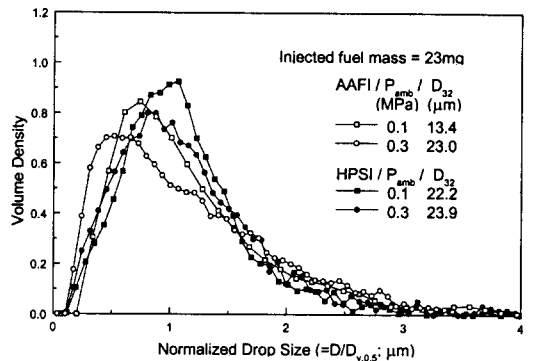


Fig. 9 Drop size distributions by normalizing drop diameter with mass median diameter

4. 결 론

현재 직접분사식 가솔린 엔진에 적용되고 있는 두 가지 분사기인 AAFI와 HPSI의 미시적 분무 특성을 동일한 실험장치와 운전조건에서 파악하고 상호 비교하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 주변압력 증가에 따라 두 분사기로부터 나오는 분무장의 형태가 다르게 나타났다. AAFI의 경우 주변공기의 유입으로 인한 연료의 중앙부 집중이 약화되는 반면, HPSI에서는 더 강화되어 솔리드 콘 분무장이 형성되었다.

- AAFI 분무장에서는 큰 액적들이 분무장의 꼬리 부분에 주로 분포하는 반면, HPSI에서는 분

무장의 머리 부분에 분포하였다. 이러한 경향은 큰 액적들이 AAFI에서는 분사 말기에, HPSI에서는 분사 초기에 형성되기 때문이다. 이로부터 연료의 벽면 점착 측면에서는 AAFI가 큰 액적의 기화 측면에서는 HPSI가 유리함을 알 수 있다.

- 전반적인 분무장 평균입경은 AAFI가 더 작게 나타나는 반면, 엔진에 적용 가능한 분사압력과 주변압력의 조합 범위는 HPSI가 더 넓게 나타났다. AAFI에서는 주변압력의 증가에 대해 평균입경이 민감하게 증가하기 때문이다.

- 분무장의 입경분포는 HPSI가 더 균일하게 나타났다. AAFI의 경우 미립화 성능이 뛰어난 조건에서는 HPSI의 경우보다 더 균일한 입경분포를 보였다.

참 고 문 헌

- 1) F.Q. Zhao, M.C. Lai and D.L. Harrington, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engine", SAE Technical Paper 970627, 1997.
- 2) R. Houston and G. Cathcart, "Combustion and Emissions Characteristics of Orbitals Combustion Process Applied to Multi-Cylinder Automotive Direct Injected 4-Stroke Engines", SAE Technical Paper 980153, 1998.
- 3) Y.P. Lee, S.S. Kim and S.M. Choi, "A Study of Two-Phase Injector Performance for Direct-Injection Stratified-Charge Engines", Atomization and Sprays, Vol.8, pp.199-215, 1998.
- 4) T. Kume, T. Iwamoto, K. Iida, M. Muramaki, K. Asishino and H. Ando, "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine", SAE Technical Paper 960600, 1996.
- 5) J. Harada, T. Tomita, H. Mizuno, Z. Mashiki and Y. Ito, "Development of a Direct Injection Gasoline Engine", SAE Technical Paper 970540, 1997.
- 6) C. Jang, S. Kim and S. Choi, "An Experimental and Analytical Study of the Spray Characteristics of an Intermittent Air-Assisted Fuel Injector", Atomization and Sprays (in press), 2000.
- 7) C. Preussner, C. Döring, S. Fehler and S. Kampmann, "GDI: Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance", SAE Technical Paper 980498, 1998.
- 8) C. Jang, C. Bae and S. Choi, "Characterization of Prototype High Pressure Swirl Injector Nozzles - Part I: Prototype Development and Initial Characterization of Sprays", Atomization and Sprays (in press), 2000.
- 9) K.S. Kim and S.S. Kim, "Drop Sizing and Depth-of-Field Correction in TV Imaging. Atomization and Sprays", Vol.4, No.1, pp.65-78, 1994.
- 10) 장창수, 최상민, "2유체 분사기와 고압 선회식 분사기의 특성 비교 - Part I: 유량 및 거시적 분무특성", 한국자동차공학회 논문집 (submitted), 2000.
- 11) M. Ohsuga, T. Shiraiishi, T. Nogi, Y. Nakayama and T. Sukegawa, "Mixture Preparation for Direct-Injection SI Engine", SAE Technical Paper 970542, 1997.
- 12) C. Jang, S. Choi, C. Bae, J. Kim and S. Baik, "Performance of Prototype High Pressure Swirl Injector Nozzles for Gasoline Direct Injection", SAE Technical Paper 1999-01-3654, 1999.