MPI 가솔린 기관용 인젝터의 분무 거동 및 미립화 특성에 관한 연구

A Study on the Fuel Spray and Atomization Characteristics of MPI Gasoline Injector

서 영 호*, 이 창 식**, 이 기 형**

Y. H. Seo, C. S. Lee, K. H. Lee

ABSTRACT

Fuel spray in the MPI gasoline injector and its atomization characteristics are investigated with both macroscopic and microscopic visualization systems. The Bosch injector is inserted into an air-assist spray adapter which is designed to be fabricated and assembled easily. Particle motion analysis system is used to measure the SMD of injector, where the assistant air pressure is varied from 0.0 to 1.5bar with fuel pressure 2.8bar. Droplet size decreased with higher air pressure and fine fuel spray with below 60 ㎛ of SMD is acquired at the assistant air pressure over 0.5bar.

주요기술용어 : Air-Assist Spray(공기보조분무), Particle Motion Analysis System(입자운동 해석장치), Image Processing(화상처리), Sauter Mean Diameter(SMD : Sauter평균입경)

1. 서 론

가솔린 엔진의 발달은 시대적인 요구와 주변 산업 기술의 발달 등에 연계하여 끊임없이 변화를 추구해 오고 있다. 특히 최근의 전자 제어 기술의 급속적인 향상에 힘입어 마이크로 프로세서에 의한 엔진의 연료 분사 제어 장치와 점화 시기 제어 장치 등은 그 대표적인 예이다[1].

한편 연료 공급 장치 및 연료와 공기의 혼합기 형성 등에 관한 연구도 최근의 광계측 기술의 획기적인 발전에 부응하여 활발하게 이루어지고 있으며, 이로부터 연소실 형상의 개선, 흡기포트의 최적 설계 등에 적극 활용되고 있다[2],[3].

엔진에서의 연료 분사에 의한 미립화는 대부분 액적의 분열과 연속제트의 분열에 의한 결과로서 발생된 분무를 이용하고 있다. 이때 연료 액적이나 제트의 미립화는 단순한 독립된 과정으로 생성되지 않으며, 입자의 분열과 재결합이 거듭되는 상당히 복잡한 과정을 거친다.

분무된 액적을 미립화시키는 것은 근본적으로 액체의 표면적을 증가시키기 위한 에너지를 공급해 주므로써 분산된 액체와 주위 기체사이의 열 및 물질 전달, 그리고 화학반응(연소)을 활발하게 해 주기 위한 것이 주목적이 된다. 이러한 미립화 에너지를 공급해 주는 방법으로는 여러 가지가 있으며 대표적으로는 압력형 분무장치, 회전형 분무장치, 2-유체 분무장치, 그리고 기타 특수한 형태의 분무 장치 등이 사용되고 있다[4]-[6].

* 한양대학교 대학원

** 한양대학교 기계공학과

본 연구에서는 기존의 가솔린 엔진에 적용 가능한 연료 무화 장치를 설계, 제작하고 이를 분무의 입자 운동 해석 장치를 사용하여 그 미립화 특성을 해석하였다. 연료 무화 촉진 장치로는 2-유체 무화 방식을 적용한 두 가지 형태의 공기보조 어댑터를 가공하였으며, 이를 MPI 엔진용 Bosch 인젝터에 장착한 후 CCD 카메라와 방전 광원 등으로 구성된 입자 운동 해석 장치(PMAS)와 shadowgraphy 기법을 이용한 거시 촬영 장치를 사용하여 화상 처리함으로써 분무 거동과 평균 입경 등을 관찰하였다.

2. 연료의 분무 특성 해석

2-1 분무의 미립화 해석

실제 분무 현상에서 평균 입경을 사용하는 것이 그 유동을 간단히 해석하는데 편리한 경우가 많다. 평균 입경은 액적수, 지름, 표면적 및 체적 등을 조합하여 그 크기를 나타내는데, 일반화된 식은 다음과 같다[4].

$$D_{ab} = \left[\frac{\sum n_i d_i^a}{\sum n_i d_i^b} \right]^{1/(a-b)} \qquad (1)$$

여기서 i는 액적크기의 구간이고, n_i와 d_i는 각각 구간 i에서의 액적수와 지름을 나타낸다. a, b는 상수이고, 그들의 합 $(a+b)$를 평균입경의 차수라고 한다.

Table 1 Examples and kinds of mean diameter

a	b	$a+b$	symbol	mean diameter	applications
1	0	1	D_{10}	산술 평균입경	단순비교, 증발
2	0	2	D_{20}	표면적 평균입경	표면적 (흡수)
3	0	3	D_{30}	체적(질량) 평균입경	체적 (액적의 운동)
2	1	3	D_{21}	표면적-직경 평균입경	흡착
3	1	4	D_{31}	체적-직경 평균입경	증발, 확산
3	2	5	D_{32}	Sauter 평균입경	물질전달, 화학반응
4	3	7	D_{43}	De Brouckere	연소평형

a와 b의 조합에 의해서 여러 가지 평균 입경이 정의될 수 있으며, 그 종류와 용도에 따라 정리하면 표 1과 같다.

특히 기관의 연료 분사 등과 같이 질량 전달이나 화학반응이 수반되는 경우에는 액적의 표면적에 대한 체적의 비로써 Sauter 평균 입경(Sauter Mean Diameter; SMD)을 이용하며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$SMD = D_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \qquad (2)$$

Sauter 평균입경은 액적군의 총체적에 대한 총표면적의 역수에 비례하므로 결국 분사된 액체가 주위 기체와 표면을 통해 접촉하기 위하여 얼마나 잘 미립화하였는가를 보여주는 유용한 척도가 된다. 따라서 본 연구에서는 인젝터에서 분사되는 연료의 무화 정도를 분무운동해석장치로 계측하고 Sauter 평균입경을 적용하여 무화특성을 해석하고 평가하도록 하였다.

2-2 연료의 미립화를 위한 장치

기존의 인젝터 분무에 대하여 연료의 미립화를 촉진시키기 위한 방법의 하나로써 2-유체 무화 방식을 적용한 외부 혼합형 공기 보조 분무 장치(air-assisted spray adapter)를 제작하였다.

이 장치는 그림 1과 같이 일반적인 MPI형 Bosch 인젝터를 삽입할 수 있도록 하였으며, 특히 실제 엔진의 흡기포트 및 매니폴드 부위에 장착이 편리하고 가공이 용이하도록 일체형으로 설계하였다.

보조 공기는 외부로부터 인젝터 몸체와 어댑터 사이의 원통형의 공간에 공급된 다음 인젝터 선단부의 좁은 홈을 통하여 노즐 출구에 분사된다.

분사된 연료와 보조공기가 원활하게 혼합될 수 있도록 노즐 출구 통로를 테이퍼 가공하여 인젝터 팁에서 약 5mm지점에서 연료와 공기가 충돌할 수 있도록 구성함으로써 전체 구성은 공기보조형이지만 공기충돌형의 효과를 최대한 활용하도록 하였다.

인젝터 선단부에 있는 보조공기를 공급하기 위한 좁은 홈의 방향에 따라 두가지 형태의 어댑터를 제작하였다. 하나는 보조공기가 6개의 직선형의 홈을 따라 분사방향과 나란하게 공급되게 한 것이고, 다른 하나는 직선형 홈의 끝부분에 1/2회전의 피치를 가지는 나선형 홈을 가공함으로써 분출되는 보조공기가 와류를 형성할 수 있도록 한 것이다.

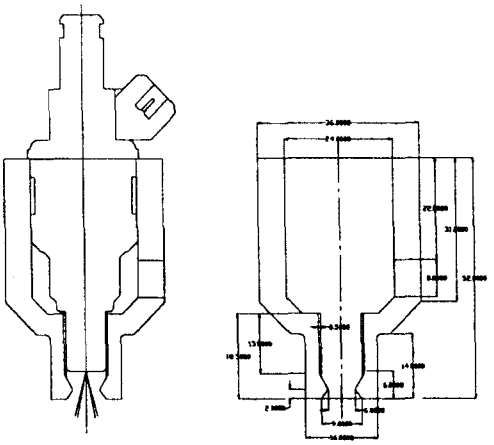


Figure 1 Drawing of air-assist injection adapter

3. 분무 특성 시험 장치 및 방법

액체의 분무에 따른 무화 특성을 해석하기 위한 실험적 연구로는 이미 여러 가지 방법이 알려져 있으며 그 중 대표적인 것으로 화상 처리 기법이나 레이저의 산란 기법을 응용하여 분무 유동을 관측하고 분무 입경을 측정하는 장치들을 들 수 있다[2),(7)].

본 연구에서는 기존의 MPI 가솔린 엔진용 인젝터의 분무 특성을 해석하기 위하여 입자 운동 해석 장치(PMAS)를 사용하였으며, 이로부터 분무의 분열과정과 분무액적의 크기, 액적수 밀도 및 입자 운동속도 등의 미시적 특성과 분무각이나 분무도달거리 등의 거시적 거동을 관찰하였다.

3-1 입자 운동 해석 장치(PMAS)의 구성

본 계측 장치는 광원, 렌즈, 필터, CCD카메라, 실시간 제어장치와 이미지보드 및 제어보드가 내장된 컴퓨터 등으로 이루어져 있으며, 그림 2와 같이 구성된다[8].

분무입자의 미시적 특성을 촬영하기 위하여 사용된 CCD(Charge-coupled Device) 카메라는 화상 분해능이 682(H)×492(V) 화소(pixel)이고, δ 특성이 1인 카메라를 선택하여 출력 전압이 방사광 에너지에 선형적으로 비례하도록 하였다.

화상 취득 장치(image frame grabber, DT2853)의 분해능은 512(H)×480(V) 화소이고, 8bit로 그레이레벨을 구분하며 실시간 제어장치의 trigger mode와 동기하여 원하는 순간의 화상을 획득할 수 있다. 수광용 렌즈는 초점거리 105mm인 Nikon렌즈를 사용하였고, 렌즈 전면에는 장파장 광을 차단하기 위하여 간섭거리가 682.8nm인 Nikon B12 필터를 부착하였다.

컴퓨터에 내장되어 있는 4채널 제어보드는 인젝터의 솔레노이드 밸브와 광원장치, 그리고 화상 취득 장치를 실시간 동시 제어하게 된다.

3-2 분무 특성 시험 방법

분무측정용 광계측 장치를 사용하여 인젝터에서 분사된 연료 입자의 지름 및 액적수 등을 계측하기 위하여는 인젝터의 분사와 광원의 방전, 그리고 화상취득장치의 원시화상의 저장 등이 실시간 동시 동기에 의하여 이루어져야 한다. 본 실험에서 사용된 PMAS에서는 인젝터의 분사기간을 0~1sec까지 1 μs단위로 조절하며, 광원과 화상취득은 연료의 분사개시로부터 1μs단위로 조절가능한 임의의 지연시간이 경과한 후 동시에 작동되도록 되어 있다.

따라서 본 실험에서는 연료를 5.0ms동안 분사하면서 분사 개시로부터 6.5ms 지연 후의 CCD카메라에 맺혀진 실시간의 화상을 프레임 그래버를 통해 컴퓨터에 저장되도록 하였다. 인젝터의 분무 영역에 대한 측정 위치는 공기보조 어댑터의 선단에서 인젝터 중심축을 따라 40mm 떨어진 지점을 관찰하였다.

105mm 렌즈를 장착한 CCD 카메라의 관찰 영역은 4.5×4.5mm이며 관찰 깊이는 2mm로 하였다. 먼저 실제 입자의 크기와 CCD 카메라에서 관측한 이미지의 입자 크기를 동일화시키기 위하여, 사용한 렌즈의 초점거리에 대한 확대비를 계산하고, 심도수정(depth of field correction)을 위한 보정데이터를 구하여 8~300μm 이내의 입경을 측정할 수 있도록 하였다. 데이터 취득은 각 실험 조건에 따라 동일 측정 위치에서 1000개 이상의 액적이 누적될 때까지 포착하여 평균 입경의 오차를 최소화하도록 하였다.

이상과 같은 분무 입자 측정 장치와 연료 분사 장치 및 보조 공기 공급 장치가 장착된 인젝터를 사용하여 다음과 같이 보조공기의 공급에 따른 분무 특성을 해석하였다.

압력 레귤레이터 및 연료 유량 조절 밸브에 의하여 연료의 분사 압력을 2.8bar로 일정하게 유지되도록 하였고, 아울러 압축기로부터 공기 유량 조절 밸브를 통하여 어댑터로 공급되는 보조 공기 압력을 0~1.5 bar까지 0.25 bar 간격으로 변화시켜 보았다.

3-3 거시 촬영 기법

이와 같이 인젝터의 분무에 따른 입경분포 등을 미시적으로 분석함과 동시에 본 연구에서는 동일한 연료 분사 실험조건에 따른 분무형상 및 분무각 등을 거시적으로 관측하기 위하여 실험장치를 구성하였다.

분무의 거시촬영을 위한 이 장치는 앞에서 설명한 PMAS와 유사하며, 다만 CCD카메라와 이미지 그래버 대신 초점거리 50mm 렌즈를 가진 스틸 카메라(Nikon, FM-II)를 장착한 것이 특징이다. 렌즈 전면에는 ND 필터를 장착하여 광량을 조절하고, 릴리즈를 사용하여 조리개가 개방된 상태에서 연료분사와 광원의 방전이 이루어지도록 하였다. 이 때 colimator lens를 통과한 화상은 직경 4.5cm의 원형 가시영역을 형성하는데 이를 ASA-400의 흑백필름으로 현상하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4-1 분무 유동의 거시촬영

가솔린엔진용 인젝터의 연료분사는 솔레노이드 밸브에 의한 압력 분무로써 흡기포트의 형상, 분사시기, 실린더 내의 유동 등에 의해 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다. 특히 MPI 방식과 같은 포트 내 분사의 경우 연료 액적이 미립화하고 공기와 혼합하기에 충분한 시간적 여유를 갖지 못하기 때문에 그 영향은 더욱 지배적이며, 불완전 연소와 미연 탄화수소 생성 등의 원인이 된다.

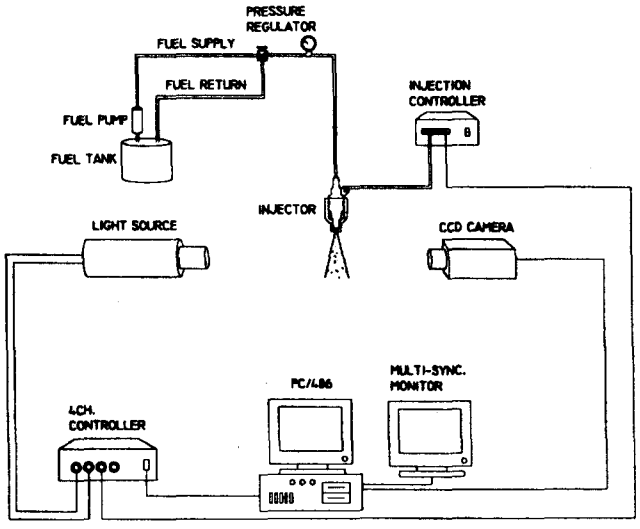
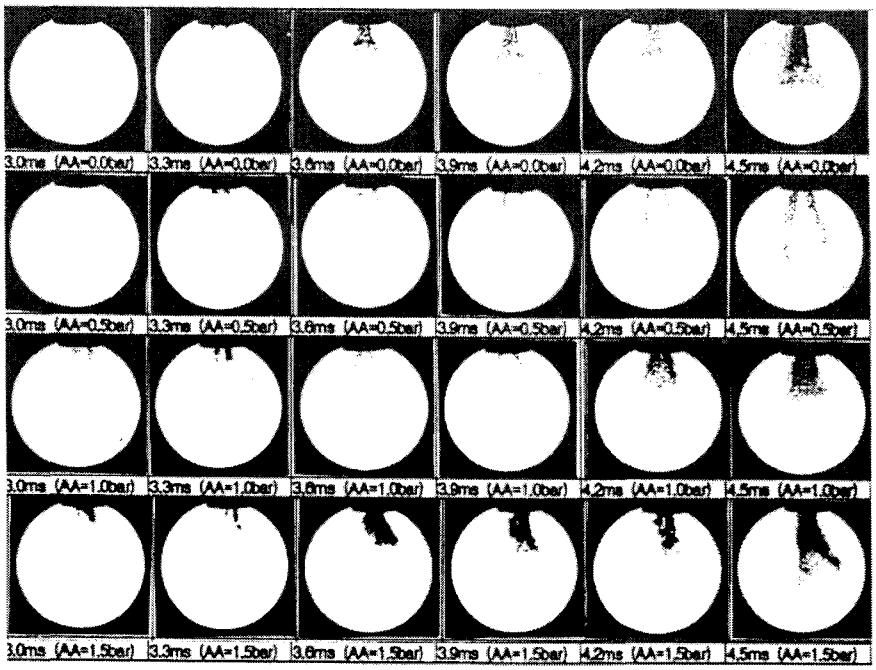
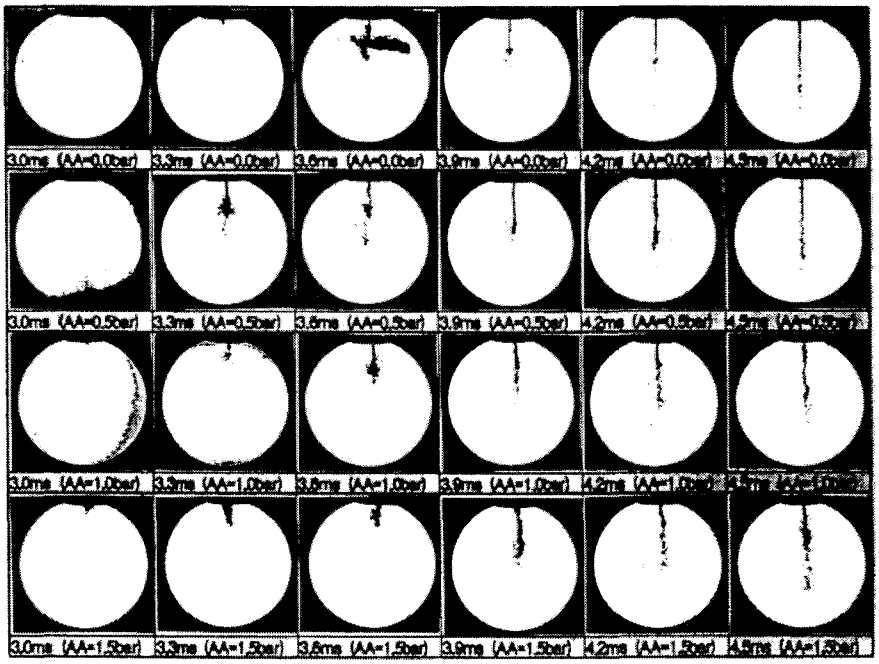


Figure 2 Schematic diagram of PMAS



(a) pintle type injector



(b) 1-hole type injector

Figure 3 Macroscopic visualizations of air-assist injection

그림 3은 본 연구에서 기존의 가솔린 엔진용 인젝터의 연료 미립화 촉진을 위하여 제작한 air-assist adapter를 장착하여 무화 특성을 거시적으로 관측한 사진이다. 보조공기는 직선형으로 분사되고, 인젝터는 pintle형과 1-hole형의 두가지를 적용하여 보았다. 보조공기의 압력을 0.5bar간격으로 변화시켜가면서 각각의 경우에 대하여 분사개시후 3.0ms에서부터 0.3ms간격으로 광원이 방전되도록 하였다. 상단에 어댑터의 선단이 보이며, 직경 4.5cm정도의 영역이 관측 가능하다.

사진에서 보는 바와 같이 공기보조 분사의 경우 액적군이 상당히 미세하게 무화되는 것을 알 수 있으며, 특히 1.4bar의 경우 액적운의 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 첫 번째 열의 3ms에서의 사진을 살펴보면 보조공기의 압력이 높아질수록 액적의 분출속도도 빨라짐을 보게 된다. 한편 보조공기의 압력이 1.0bar를 넘을 경우 분사각이 지나치게 커지고 있어 실제 엔진에 적용할 경우 포트벽면으로의 벽류량이 많아질 것으로 예상된다. 이로부터 보조공기 분사에 의한 분무의 미립화 효과를 거시적으로 확인할 수 있었으며, 실제 응용에 대하여는 분무각과 액적의 크기 및 분무도달거리 등의 영향을 종합하여 보조공기의 압력을 조절할 필요가 있음을 알 수 있다.

4-2 PMAS에 의한 분무 입경 측정

CCD카메라의 화상을 동일 위치, 동일 조건에서 여러번 취득함으로써 그로부터 화상처리 장치에 의하여 각각의 분무에 대한 평균 입경(SMD)을 계측하였다. 먼저 인젝터의 분사에 대하여 시간변화에 따른 pintle형 인젝터의 분무특성을 확인하기 위하여 분사 개시후 5.0㎳에서부터 0.2㎳씩 측정시간을 변화시켜가면서 인젝터 선단에서부터 4.5㎝하단의 평균입경과 입자수를 측정해 보았다. 그림 4는 그 결과를 나타낸 것으로 분사 개시후 6.4㎳ 정도가 경과하면서 입경과 입자수가 모두 안정됨을 알 수 있다.

그림 5와 같은 분사 방향에 대한 수평위치 변화에 따른 분무입경을 air-assist adapter가 장착된 pintle형 인젝터에 대하여 보조공기 압력을 변화시켜가면서 측정해 본 결과를 그림 6에 나타내었다. cone형으로 분사되는 인젝터의 특성상 중심부에서 멀어질수록 SMD가 증가하고 있으며, 보조공기의 압력이 증가할수록 중심부에서의 입경감소가 두드러짐을 알 수 있다.

그림 7은 보조공기 압력의 변화에 따른 분무의 평균입경을 계측한 것으로, 본 연구를 위하여 제작한 두가지 종류의 어댑터에 pintle형과 1-hole형의 인젝터를 장착한 것과 기존에 실용화되고 있는 4-hole형 공기보조 인젝터를 적용해 보았다. 그림에서 AD-1은 앞서 거시촬영에서 사용했던 것으로써 직선형으로 보조 공기가 분출되는 것이고, AD-2는 보조공기가 노즐에서 나선형으로 분출되도록 설계된 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 pintle형 인젝터에 대하여 직선형 공기보조의 경우 압력이 0.75bar정도에서 SMD가 60㎛이하로 되지만 나선형의 경우 0.5bar에서 이미 그 정도의 작은 입경이 얻어지고 있다. 따라서 일반적으로 가솔린엔진의 연료분사에 있어서 SMD가 60㎛정도이면 충분히 무화된 것으로 판단되는 점을 감안한다면, 나선형 공기보조의 경우가 직선형에 비하여 다소 낮은 공기압력으로 보다 작은 액적들을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 보조공기의 압력이 1.0bar정도가 되면 40㎛가량의 액적이 얻어지며 이는 기존의 4-hole형 보조공기 인젝터에 비하여 보다 나은 미립화 효과를 보여준다.

hole형 인젝터의 경우 보조공기의 압력이 높아짐에 따라 pintle형에 비하여 상당히 큰 입경을 나타내고 있는데, 이는 크게 두가지로 해석할 수 있다. 첫째는 hole형의 경우 분사각이 상당히 좁고 이에 비해 보조공기의 분출방향 및 압력이 적절하지 않다는 점이고, 둘째는 충분히 무화하기 위한 시간적 여유와 도달 거리가 필요한데 비하여 측정점이 너무 가까웠다는 점이다.

본 실험의 공기보조 어댑터를 적용한 인젝터 분무에 대한 분무 입경을 측정한 결과 hole형 인젝터보다는 pintle형 인젝터에 적합하며, 나선형 공기보조의 경우가 직선형 공기보조의 경우보다 다소 낮은 압력에서 충분한 무화를 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 특히 이때의 보조공기의 압력이 실제 엔진의 부분부하운전에 대하여는 부압만으로도 공급이 가능하므로 희박연소 운전시와 같은 부분부하에서 적용할 경우 별도의 압축공기 공급장치가 필요없을 것으로 생각된다.

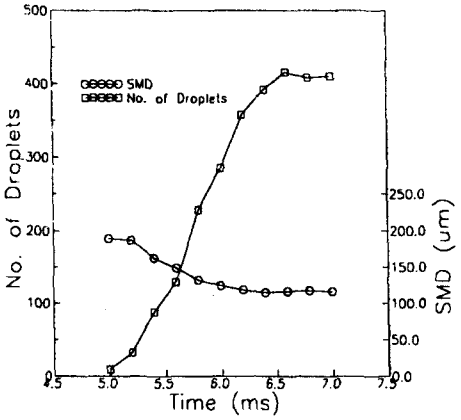


Figure 4 SMD variations with elapsed time of measurement

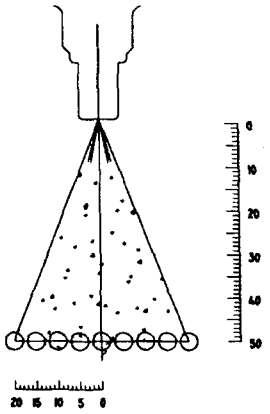


Figure 5 Schematic Diagram of measuring points

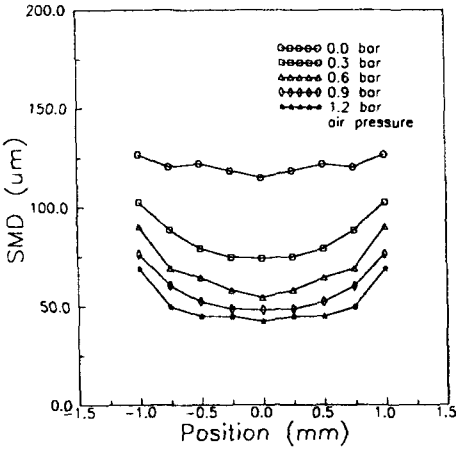


Figure 6 SMD variations with measuring points

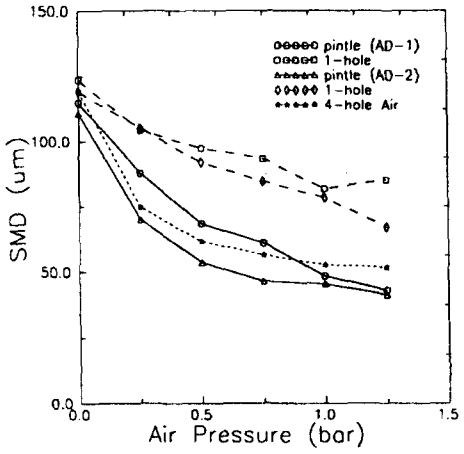


Figure 7 SMD variations vs. assisted air pressure

5. 결 론

기존의 MPI 가솔린 엔진용 인젝터에 대하여, 보조공기 공급장치를 장착하여 인젝터의 연료분사에 대한 미립화를 피함으로써 균일 혼합기를 형성할 수 있도록 하기 위한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존의 가솔린 엔진용 인젝터(Bosch)에 장착이 편리하고 가공이 용이한 보조 공기 공급 장치를 설계·제작하였으며, 이를 입자 운동 해석 장치을 사용하여 분무 거동을 해석하였다.

(2) 방전 광원을 사용한 shadowgraphy 기법을 이용하여 인젝터의 분무에 대한 거시 촬영을 실시한 결과 보조 공기의 압력 변화에 따라 분사된 연료의 액적이 무화되는 과정을 확인할 수 있었다.

(3) pintle형 및 hole형의 두가지 인젝터을 적용하여 화상처리에 의한 분무의 평균입경을 측정해 본 결과 pintle형의 경우 보조 공기 압력이 0.5~1.0bar정도에서 SMD가 60㎛이하의 분무를 얻음으로써 상당한 미립화 효과를 볼 수 있었다. 그러나 hole형 인젝터의 경우 분무각이 작고, 분무길이가 상당히 길어서 보조 공기 공급 장치의 영향이 그다지 크게 나타나지 않았다. 또한 나선형 공기보조의 경우 직선형에 비하여 보다 낮은 압력에서 충분한 무화를 얻을 수 있었다.

(4) 따라서 본 실험을 위하여 제작된 보조 공기 공급 장치는 pintle형 인젝터에 적합하며, 이때의 공기의 압력(0.5bar 정도)이 실제 엔진의 부분 부하 운전에 대하여는 부압만으로도 공급이 가능하므로 별도의 압축공기 공급장치가 필요없을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. N. Tomisawa, H. Kubo, S. Furuhashi, "Development of a High-Speed High-Precision Learning Control System for the Engine Control", SAE Paper 860594, 1986.

2. Ming-Chia Lai, Fu-Quan Zhao, Amer Ahmad Amer, and Tsan-Hai Chue, "An Experimental and Analytical Investigation of the Spray Structure from Automotive Port Injectors", SAE Paper No. 941873, 1994.

3. S. Shiga, K. Kobayashi, T. Kon-no, T. Karasawa, "Effect of Fuel Atomization at a Fuel Supply System on the Lean Burn Characteristics in a Spark-Ignition Engine", SAE Paper No. 910568, 1991.

4. A. H. Lefebvere, "Atomization and Sprays", pp.1~243, Hemisphere Publishing Co., 1989.

5. J. B. Kennedy, "High Weber Number SMD Correlations for Pressure Atomizer", Trans. of ASME, Journal of Eng. for Gas Turbines and Power, Vol.108, pp.194~195, Jan. 1986.

6. K. Harada, R. Shimizu, K. Kurita, M. Muramatsu, T. Makimura, M. Ohashi, "Development of Air-Assisted Injector System", SAE Paper No. 920294, 1992.

7. R. A. Mugele, H. D. Evans, "Droplet Size Distribution in Sprays", Ind. and Eng. Chem., Vol.43, No.6, pp.1317~1324, 1951.

8. 이창식, 이기형, 조병욱, 서영호, "연료 분사 장치의 혼합기 형성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제11호, pp.2690~2698, 1995.