

다점 분사식 인젝터의 분무 및 벽류 생성 과정에 관한 연구

A Study on the Spray and Fuel-Film Formation Mechanism of MPI Injector

이 기 형*, 이 창 식*, 김 봉 규**, 성 백 규***
K. H. Lee, C. S. Lee, B. K. Kim, B. K. Sung

ABSTRACT

Mixture formation is one of the important factors to improve combustion performance of MPI gasoline engines. This is affected by spray and atomization characteristics of injector. Especially, in the case of EGI system, air-fuel mixing period is too short and formed a lot of fuel-film in the intake manifold and cylinder wall. This fuel-film is not burnt in cylinder, it is exhausted in the form of HC emission. In this paper, spray characteristics such as size distributions, SMD, and spray angle are measured by PMAS, and the fuel-film measuring device is developed specially. Using this device, the amount and distribution of fuel-film which flows into through valve can be measured quantitatively. As the result of these experiments, the information of optimal spray characteristics and injection condition that minimize the fuel-film can be built up.

Keywords : MPI(다점 연료 분사), fuel-film(벽류), liquid-fuel(액상 연료), SMD(sauter 평균입경), PMAS(분무 해석 장치), spray characteristic(분무 특성), atomized injector(미립화 인젝터)

1. 서 론

최근 자동차용 엔진 개발에 있어서 저공해에 대한 요구뿐만 아니라 고출력, 저연비, 운전 성능과 같은 기본 성능에 대한 요구 역시 여전히 증가되고 있는 추세이므로, 서로 상반되는 이러한 요구 조건들을 충족시킬 수 있는 기술로서 전자 제어식 다점 분사 방식(MPI)의 채택이 증가하고 있다^[1]. 이와 같은 MPI 연료 분사 시스템에 의한 연소 현상은 연료 분사 장치로부터 분사된 연료 분무의 미립화 상태와 수송과정 및 연소실내에서의 분무 확산 상태등과 같은 혼합기 형성과정에 지배적

인 영향을 받는다는 사실이 널리 알려져 있다. 이러한 혼합기 형성과정에는 분무각도와 분무입경 및 분무의 분산 과정등과 같은 분무 특성의 영향이 대단히 크다고 할 수 있다. 또한 인젝터로부터 분사된 연료는 흡기관의 벽, 흡기밸브 및 연소실 벽에 부착될 수도 있으며, 이와 같이 벽류로 부착된 연료는 실린더 내에서 불완전 연소를 초래하여 미연 탄화가스(HC)상태로 배출되어 공해를 유발하게 되므로, 저공해 및 저연비 엔진 개발을 위하여는 인젝터의 분무 특성의 개선기술과 동시에 벽류량을 최소화 할 수 있는 연료공급 기술 개발이 요구되고 있다^[2]. 이미 Lisa M.^[3]등과

* 한양대학교 기계공학과

**한양대학교 대학원 기계공학과

***주성전문대학 자동차공학과

T. Johnen^[4]등은 벽류량을 측정하는 기술을 이용하여 벽류량을 최소화하는 방안을 제시하였고, G. Brenn^[5]등은 포트내의 연료거동을 PDA(phase-Doppler anemometer)를 이용하여 측정한 예도 보고되고 있다. 이와 같은 연구들은 주로 흡기 포트 내에서의 연료 거동과 부착된 벽류의 양을 측정한 결과들로서 인젝터의 분사 조건과 분사 특성에 따라 벽류가 실제 엔진 밸브로 어떤 형식으로 유입되고 있는가에 대한 내용까지는 다루지 않고 있으며, 이러한 분무와 벽류 생성의 상호 관계들을 정량적으로 측정한 보고는 아직 드문 편이다.

본 연구에서는 MPI가솔린 엔진에 많이 이용되고 있는 핀틀(pintle)형, 2공2분무(2hole-2spray)인젝터 및 공기가압식 미립화 인젝터 등 세 종류의 인젝터 형식을 선정하여 각각의 인젝터에 대한 분무 형상 및 SMD등과 같은 분무특성을 파악하였고, 흡입유동을 발생시킬 수 있는 정상유동 실험장치를 제작하여 흡기관내의 분무특성에 대한 주위 공기유동의 영향과 흡입 밸브를 통하여 실린더내로 유입되는 벽류발생량 및 분포를 측정하여, MPI가솔린 엔진의 연료 분사 시스템 설계시 필요한 최적 분사 조건 및 분사 시스템에 관한 기초 자료를 구하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 분무 해석 장치

본 실험에 사용된 분무 해석 장치(PMAS : Particle Motion Analysis System)의 하드웨어를 구성하는 개략도를 Fig.1에 도시하였다. 이 시스템의 주요 구성품은 광원부(dual light source), CCD 카메라, 105mm 렌즈, 스파크 광원 구동부 그리고 이미지 보드(image board) 와 제어용 보드를 탑재한 컴

퓨터등이다. 광원부는 발광 지속 시간이 짧게 (50ns) 설계된 것으로 입자의 속도 측정이 가능하도록 이중 스파크(dual light) 기능이 추가되어 있고 두 스파크 간의 간격은 1μs 단위로 조절 할 수 있다. CCD 카메라는 화상의 크기가 6.55(H)×4.87(V)mm이고 화상 분해능은 682(H)×492(V)이다. 또한 화상 획득 장치(frame grabber : DT2853, Data Translation 제품)의 분해능은 512(H)×480(V)이고 8bit로 계조값(gray level) 분해능을 갖고 있다. 수광용 렌즈로는 Nikon 105mm 확대기 렌즈를 이용하였고, 장파장광을 차단하기 위하여 Nikon B12 필터를 렌즈 앞에 부착하였다. 컴퓨터에 내장되어 있는 제어용 보드에 의하여 인젝터의 솔레노이드 밸브와 스파크 광원부 그리고 화상 획득 장치를 제어하도록 구성하였다.

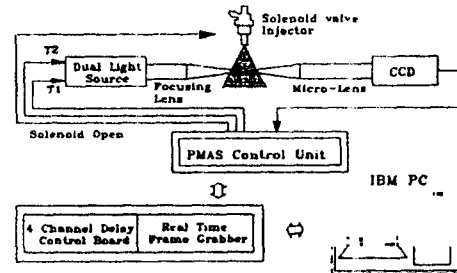


Fig.1 Block diagram of PMAS

2.2 흡기관내의 분무 및 연료 거동 측정 장치

실제 흡기관내 유동장에서의 분무 입경 분포 및 벽류량을 모사하기 위하여 Fig.2와 같은 정상류 실험장치를 제작하여 실험하였다. 실제 엔진에서의 분무 입경 분포 및 벽류량과 유사한 조건을 재현하기 위하여 1800cc용 엔진의 흡기관을 사용하였고 흡기관의 형상을 직선으로 모사하여 아크릴 원관(내경 37mm)으로 제작하였으며, 폭 10mm, 길이 40mm의

직사각형 아크릴 판으로 가공하여 원관에 끼워 넣어 측정단면(test section)으로 사용하였다. 이러한 측정부와 SMD의 측정위치를 Fig.3에 나타내었다.

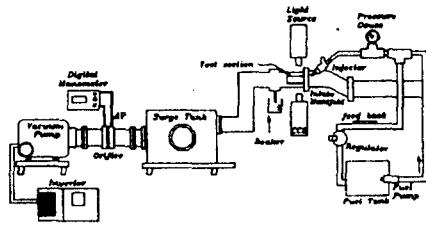


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

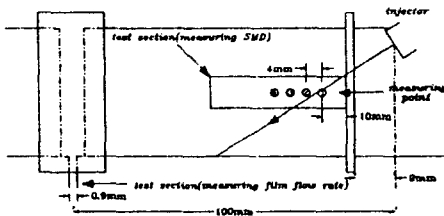


Fig.3 Measuring points of SMD in the intake port

2.3 벽류 유입 방향 및 분포량 측정 장치

본 실험에서는 흡기관 벽면을 통하여 연소실내로 유입되는 벽류량의 분포뿐만 아니라 실제 정량적인 유량까지 측정할 수 있도록 Fig.4에 나타낸 것과 같은 벽류량 측정 장치를 제작하였고, 벽류량 측정 방법은 그림과 같은 벽류 측정 장치를 실제 엔진의 밸브 시트(valve seat)를 제거하여 대신 장착하고, 측면부에 관통된 24개의 구멍에 외경 4mm, 내경 3mm의 호스를 삽입한 후, 이 호스를 통하여 흘러 나오는 벽류를 24개의 내경 6mm의 유리관으로 채집하여 그 부피를 측정하였다. 이 경우 벽류 측정용 호스의 외부 도출 문제와 부압으로 인하여 호스내로 벽류가 유입되지 않는 사실을 감안하여 Fig.5와 같이 흡기관에서 실린더내로 공기를 송출하는 방식

을 사용하여 실험장치를 구성하였다.

인젝터의 연료 분사 압력은 2.5kg/cm²으로 고정하였고, 유입 공기량은 0 //min, 119.4 //min, 167.5 //min 세가지 경우로 변화시켰으며, 흡기관내 공기의 온도는 30℃, 60℃, 90℃ 세가지, 그리고 인젝터는 2.4철에 나타낸 바와 같은 3가지 종류를 사용하였다. 이러한 인젝터를 구동시키기 위한 구동회로를 제작하였고, 인젝터의 구동신호는 100Hz, 분사기간은 5ms로 설정하여 연료를 분사하였다.

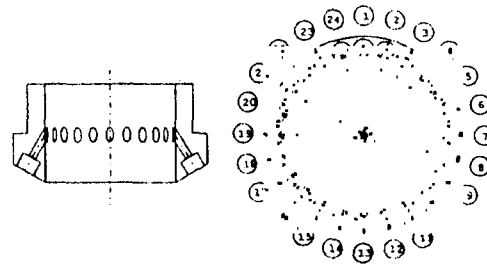


Fig.4 Measurement device of wall-fuel film

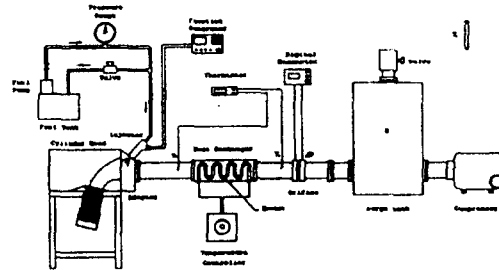


Fig.5 Schematic diagram of experimental apparatus

2.4 인젝터 형식 및 제원

MPI 가솔린 엔진의 연료 분사 장치로서 초기에는 핀홀형의 인젝터가 많이 사용되었으나, 최근 흡기포트가 사이아미즈(siamese)형상인 DOHC(double over head cam)엔진의 보급이 증가됨에 따라 흡기포트 형상을 고려하여 두 방향으로 분사되는 인젝터가 사용되

는 경우가 많다. 또한 가솔린 엔진의 혼합기 형성을 최적화하기 위해서는 분무입자의 증발 속도를 향상시켜 공기와의 혼합을 촉진시키고 동시에 액체상태의 벽류 부착률도 감소시키기 위하여 공기 가압식 미립화(air-assist) 인젝터를 채용하는 경우가 증가되고 있다. 따라서 본 실험에서는 핀돌형, 2공 2분무, 공기 가압식 미립화 인젝터 등 3종류의 인젝터를 사용하였으며 Fig.6에 대표적인 인젝터의 형상을 나타내었고, 각각의 제원은 Table1에 나타내었다.

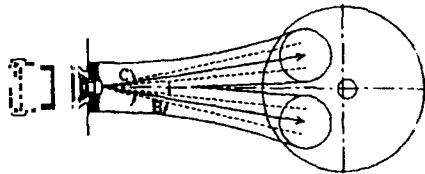


Fig.6 Configuration of test injector

Table 1 Specifications of test injectors

Injector Type	Stream Angle (B)	Spray Angle (C)
Pintle	—	8° ~ 30°
2hole 2spray	22° ± 4'	10°
Air-assist	22° ± 4'	10°

3. 결과 및 고찰

3.1 MPI용 인젝터의 자유 분무 특성

Fig.7은 본 실험에 사용한 인젝터의 분무 특성을 파악하기 위하여 대기중에 분사한 자유 분무 형상을 촬영한 사진결과이다. 각각의 특징에 대해 살펴보면 핀돌형 인젝터의 경우는 원주형의 한 개의 분무 형상으로 발달하고 있으므로 이 인젝터를 흡기 2밸브 엔진에 적용하면 흡기 포트의 분리벽에 부착될 가능성이 크다는 것을 예측할 수 있으며, 2공 2분무

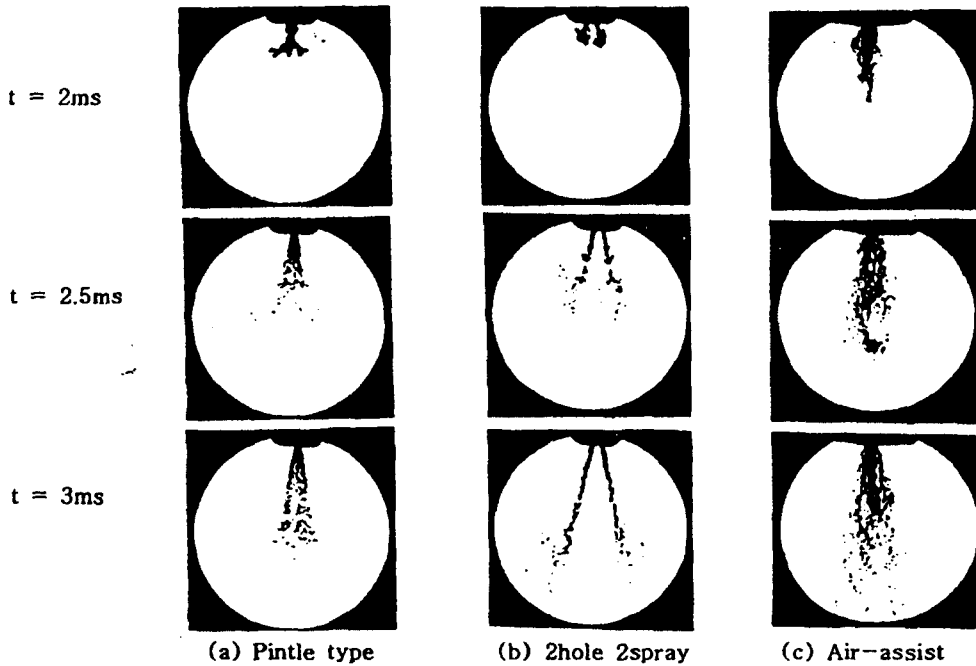


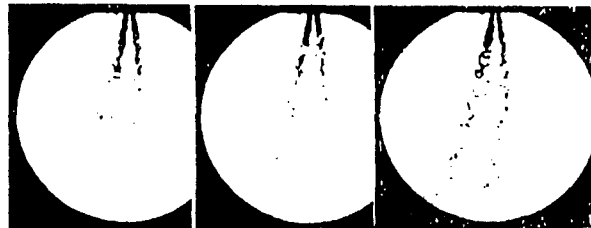
Fig.7 Spray characteristics of test injectors

인젝터의 경우에는 두 방향으로 두 개의 분무가 독립적으로 성장하고 있는 형상이므로 분리벽으로의 부착률이 비교적 적다는 것을 알 수가 있다. 마지막으로 공기 미립화 인젝터는 외부 공기의 도입으로 인하여 분무각이 다소 작아지는 경향을 보이고 있으나, 많은 양의 입자들이 분열되고 있는 것을 알 수 있으며, 이 미립화 효과가 연료의 기화에 커다란 영향을 미칠 것으로 사료된다.

3.2 MPI용 인젝터의 흡기관내 분무 및 벽류 거동 특성

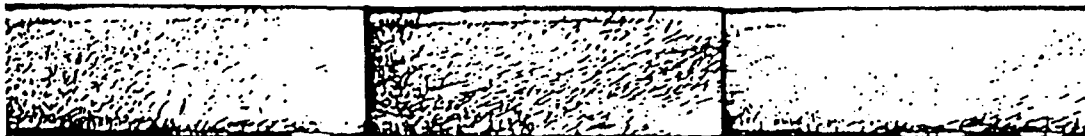
가솔린 엔진의 경우 스로틀 개도와 엔진 회전수등과 같은 운전 조건에 따라서 흡기관내에 형성되는 공기 유동장의 상태가 변화된다. 따라서 주위 공기 유속 변화에 대한 연료 거

동을 파악하는 일이 중요하다고 할 수 있다. 주위 유동장이 형성되었을 경우의 분무 형상 촬영 결과(Fig.8)로부터도 알 수 있는 바와 같이 대기중에 분사시의 자유 분무 형상과는 많은 차이점을 보이고 있으며, 분무 형상이 유동 방향으로 편재되는 사실을 알 수가 있다. 따라서 흡입 유동장이 형성되어 있을 경우에 인젝터로부터 분사된 연료에 대한 흡기관내의 거동을 관측하기 위하여 Fig.3과 같은 측정 단면에서의 흡입 유량 변화에 따른 정성적인 사진 측정 결과를 Fig.9에 나타내었다. 이 결과들 중 핀틀형 인젝터와 2공 2분무 인젝터의 경우, 흡기관내의 유속이 느릴 때는 분무 입자들이 측정단면의 하단부로 흘러 내려가는 것을 알 수 있고 이것이 벽류를 형성한다고 판단되며, 흡입되는 유량이 클 경우 즉 흡기관내 공기 유속이 빠를 때는 분무 입

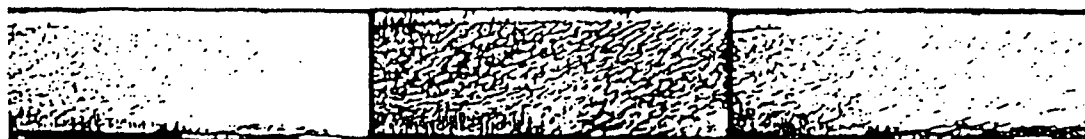


(a) $t = 3\text{ms}$ (a) $t = 3.5\text{ms}$ (a) $t = 4\text{ms}$
 Fig.8 Effect of air velocity on spray pattern ($V_{\text{air}} = 13\text{m/s}$)

i) Air flow velocity = 5m/s



ii) Air flow velocity = 13m/s

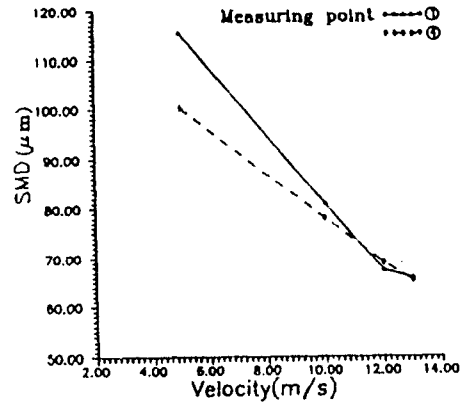


(a) Pintle type (b) 2hole 2spray (c) Air-assist(0.5kg/cm^2)

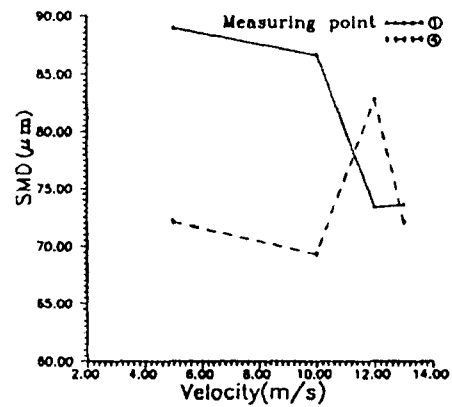
Fig.9 Fuel behavior in an intake port

자들이 유동장에 추종되어 측정단면의 중심부와 상단부로 모이는 것을 볼 수 있다. 그러나 공기 가압식 2공 2분무 인젝터의 경우는 전 단면을 아주 작은 입자들이 가득 채우고 있으며, 흡기관 벽면을 향한 큰 입자들이 존재하지 않으므로 벽류형성이 어렵다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 사진 촬영 결과로부터 흡기관내의 속도가 분무 입자에 미치는 영향을 기시적으로 확인할 수 있었다.

이상과 같은 정성적인 관측 결과를 정량화하기 위하여 두가지 흡입 유속에 대한 각 인젝터의 SMD를 측정하여 그 결과를 Fig.10에 나타내었다. 인젝터의 종류, 즉 분무 형상에 무관하게 주위 공기 유속이 증가할수록 SMD가 작아지는 경향을 볼 수 있으며, 이러한 경향은 핀틀형과 2공 2분무 인젝터에서 현저하게 나타나고 있다. 그러나 일부 측정점에서 흡입유량이 증가하여도 SMD가 크게 나타나는 것은 상대적으로 작은 입자들이 쉽게 공기와 혼합하여 측정점을 지나가 버리고 분무 해석 장치에는 비교적 큰 입자들이 잡히기 때문으로 생각된다.

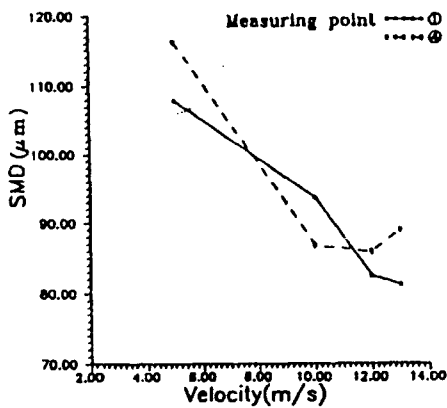


(b) 2-hole 2-spray injector



(c) air-assist injector (0.5kg/cm²)

Fig.10 SMD distribution of test injectors

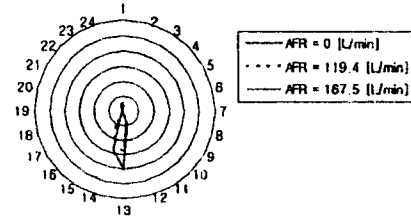


(a) pintle type injector

다음 단계로 흡기관내에 생성된 벽류가 어떤 경로를 통하여 연소실내로 유입되는지를 관측하기 위하여 Fig.4와 같은 벽류량 측정 장치를 이용하여 공기 유동장의 변화에 따른 밸브 주위의 벽류 유입 분포를 측정한 결과를 Fig.11에 나타내었다. 그림상의 번호는 벽류 측정 장치의 구멍 위치를 나타내며, 본 실험에 사용한 엔진의 흡기 포트는 좌우 대칭 형상이므로 한쪽 밸브에서만 벽류 측정을 수행하였다.

그림에서 보는 바와 같이 핀틀 타입 인젝터에서는 분무된 연료의 상당 부분이 모두 흡기

포트가 두 개로 갈라지는 분기면에 충돌하여 흡기관 벽면을 통해 그대로 실린더 내로 유입되어 다른 인젝터보다 위아래 방향 모두 많은 벽류량을 보이고 있으나 유동장의 속도가 증가할수록 빠른 공기의 영향으로 미립화 효과에 의해 그 양이 감소하고 있다. 2공 2분무 인젝터에서는 유동장 속도가 증가할수록 윗부분 즉 점화 플러그쪽으로 벽류가 많이 편재하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 유동 공기에 의해 분무된 연료가 흡기 포트 상부 방향으로 향하게 됨에 따른 결과라고 생각된다. 공기 미립화 인젝터의 경우에는 윗부분의 벽류가 현저히 감소 되는 결과를 나타내고 있으며, 이러한 현상은 노즐에서 분출되는 가압공기에 의하여 2차 미립화된 후에 인젝터로부터 분사되므로 많은 양이 기화되거나 실린더 내로 공기와 같이 유입되어 벽류로 부착된 양이 감소된 결과라고 판단된다.

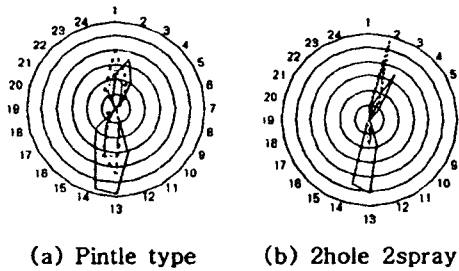


(c) Air-assist ($0.5\text{kg}/\text{cm}^2$)

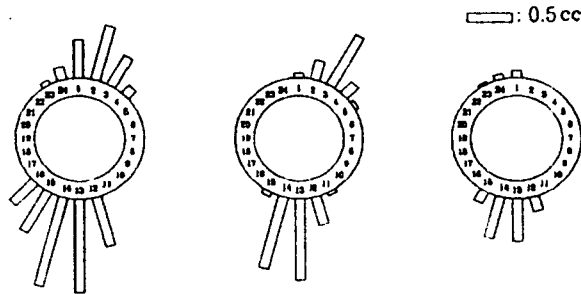
Fig.11 Fuel-film distribution with air flow rate (air temp.= 30°C , attachment angle= 32°)

3.3 분사 조건에 따른 벽류 유입량 및 벽류 분포 특성

Fig.12는 인젝터의 종류에 따른 벽류량 분포를 나타내는 그림이다. 여기에서는 인젝터만의 영향을 고려하기 위하여 주위 공기 유동이 없는 상태에서 분사하였다. 그림에서 보는 바와 같이 핀돌형 인젝터가 위아래 방향에 많은 벽류를 나타내고 있으며, 2공 2분무 인젝터에서는 분무 방향이 2방향이므로 사이아미즈 포트에서도 독립적으로 각각의 포트로부터 분사되기 때문에 벽면에 부착되는 양은 적고 밸브 중심으로 많은 양의 연료가 유입되는 것을 알 수가 있다. 세 번째 그림에서는 분출 공기의 압력이 $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 경우의 벽류 분포를 나타낸 것으로 많은 양의 액체 연료가 미립화



(a) Pintle type (b) 2hole 2spray



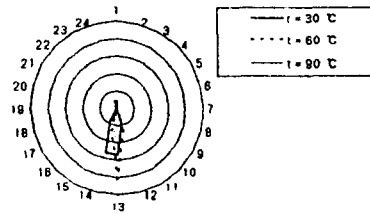
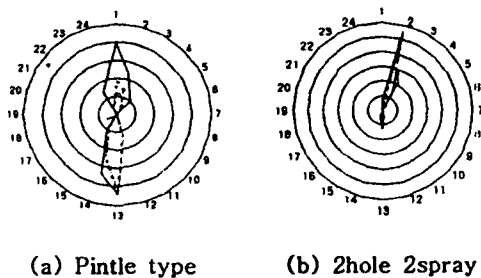
(a) Pintle type (b) 2hole 2spray (c) Air-assist

Fig.12 Fuel-film distribution with various injector type

되어 벽류량이 적어진 결과를 나타내고 있다.

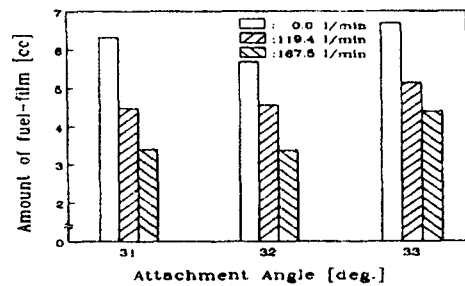
Fig.13은 공기 온도에 따른 벽류량을 비교한 그림이다. 세가지 인젝터 모두가 벽류량 분포의 경향은 앞의 Fig.11의 경우와 거의 동일한 양상을 보여주고 있지만, 그양은 많이 감소된 것을 볼 수가 있다. 이와 같은 현상은 공기의 온도가 상승할수록 분무된 연료와 이미 부착된 벽류의 증발을 촉진시켜 기화가 향상된 결과에 기인한다고 생각된다.

다점 분사식 인젝터의 분사 각도에 따라서도 연소실내에 액적 상태로 유입되는 연료량이 증가한다는 사실이 알려져 있으므로^[6], 본 실험에서는 인젝터의 부착각도에 따라 벽류량의 분포가 어떻게 달라지는가에 대한 벽류 측정 실험을 수행하여, 그 결과를 Fig.14에 나타내어 비교하였다. 여기서 부착각도 32°는 밸브 직격틀이 가장 큰 기준 분사 방향을 의미하며, 31°, 33°는 각각 포트 윗면과 아래면으로 1°씩 분사각도를 변형시킨 각도를 나타낸다. 결과에서 보는 바와 같이 두종류의 인젝터 모두 밸브에 직격하는 방향인 32°가 가장 벽류량이 적은 것으로 나타났다. 그 이유로서 인젝터로부터 흡기 밸브의 상부면을 향하여 분사된 연료는 기하학적으로 포트 윗면이나 아래면에 부착될 가능성이 다른 경우보다 적기 때문인 것으로 여겨진다. 따라서 인젝터의 부착각도 또한 벽류량의 형성에 중요한 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다.

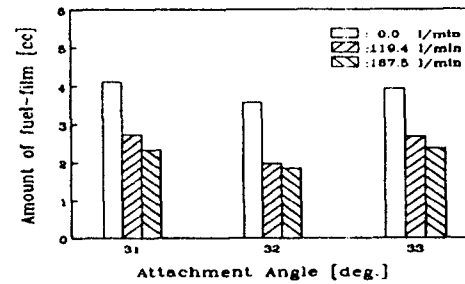


(c) Air-assist(0.5kg/cm²)

Fig.13 Fuel-film distribution with air temperature (air flow rate = 119.4 l/min, attachment angle=32°)



(a) for pintle type injector



(b) for 2hole 2spray injector

Fig.14 Comparison of total fuel film amount with attachment angle (air temp=30°C)

4. 결론

본 연구에서 수행한 분무 특성과 벽류의 측정결과에 의하여 다음과 같은 결과를 얻을 수가 있었다.

(1) 본 연구를 위하여 제작한 벽류 측정 장치는 밸브를 통하여 실린더내로 유입되는 벽류의 양을 분포뿐만 아니라 정량적인 계측을 가능하게 하였으며, 이 장치에 의하여 벽류의 형성에 대한 연료 공급계의 영향을 확인할 수 있었다.

(2) 편틀형 인젝터를 사이아미즈형 흡기 포트에 장착할 경우 포트의 분리벽에 많은 벽류가 부착되는 것을 정량적으로 확인할 수 있었고, 이로 인해 DOHC엔진의 흡기 포트에는 2방향 인젝터를 장착하여야 벽류량 감소와 정확한 공연비 제어가 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 벽류의 형성에는 유동장의 속도, 공기의 온도, 인젝터의 부착각도 등이 영향을 미치고 있으며, 특히 유동장의 속도가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보아 분사 시기가 연료의 기화에 미치는 영향이 중요함을 알 수 있었다.

(4) 유동이 존재하는 흡기관에 연료를 분사 시 대기중 분사와는 분무 형상이 달라지는 양상을 보이고 있으며, 분사된 연료가 유동 방향으로 편재됨과 동시에 빠른 유속에 의한 2차 미립화 효과가 존재함을 확인할 수 있었다.

(5) 벽류 저감을 위하여는 주위 공기 온도 상승에 따른 기화 촉진과 공기 가압에 의한 미립화, 그리고 흡기 포트 벽면에 충돌되지 않는 분무 형상과 분사 각도 선정이 유효함을 입증하였다.

후 기

본 논문은 한국 과학 재단의 특정 연구 과제(과제 번호 : 93-06-00-03) 연구비에 의해 이루어진 연구 결과의 일부로써, 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- [1] H. J. Beuber, et al., "New Variable Intake and Mixture Formation System for Multi-Valve S. I. Engines", SAE paper No.940449, 1994
- [2] Fu-Quan Zhao, et al., "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection-A Critical Review", SAE Paper No.950506
- [3] Lisa M. N., et al., "Fuel Droplet Entrainment Studies for Minimization of Cold-Start Wall-Wetting" SAE Paper No.950508
- [4] T. Johnen and M. Haug, "Spray Formation Observation and Fuel Film Development Measurements in the Intake of a Spark Ignition Engine", SAE Paper No.950511
- [5] G. Brenn, et al., "Unsteady Gasoline Injection Experiments : Comparison of Measurements in Quiescent Air and in a Model Intake Port" SAE Paper No.950512
- [6] 이 기형, 이 창식, "HC저감용 최적 연료 분사 시스템에 관한 연구", 한국 자동차 공학회 논문집, 제3권, 제2호, 1995