

분무 공간의 공기온도와 보조공기의 공급압력이 연료입자의 미립화에 미치는 영향

The Effect of the Air Temperature and Air-assisted Pressure on the Fuel Droplet Atomization

김영석*, 이중순**, 윤수한*, 정성식***, 하종률***

Y. S. Kim, J. S. Lee, S. H. Yoon, S. S. Chung, J. Y. Ha

ABSTRACT

The fuel injection type, in the gasoline engines of atomization of fuel droplet and its distribution has influenced directly on the decision of engine performance and harmful emission. In this paper, atomization characteristics of fuel spray is investigated with microscopic visualization system. Particle motion analysis system is used to measure the SMD from fuel spray of air-assisted injector by initial factors such as temperature of ambient air and air-assisted pressure. As air-assist pressure and ambient air temperature increase, the SMD is decreased, and its variation is more stable.

주요기술용어 : Fuel Injection(연료분사), Atomization(미립화), Air-assisted(공기보조분사), Particle Motion Analysis System(입자운동해석장치), Sauter Mean Diameter(Sauter 평균입경), Image Processing(화상처리)

1. 서 론

자동차 산업의 급속한 발달과 더불어 자동차로부터 배출되는 유해 배기 물질에 대한 규제가 엄격해지고 있다. 이러한 요구에 대응하기 위한 수단으로 관련 산업체 및 연구기관에서 유해 배출가스 저감 및 연료소비 절감 등과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻²⁾

또한, 가솔린 분무 액적의 미립화를 촉진하기

위한 기술의 개발과 병행하여 예혼합기 형성과정의 연료·공기의 균질한 혼합기 형성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

연료분사장치를 사용한 실험적 연구로서는 Namiyama 등⁽³⁾의 초음파 무화방식, Harada 등⁽⁴⁾의 공기 보조식 2유체 무화방식, Noki 등⁽⁵⁾에 의한 충돌 무화방식 등이 연구 개발되어 연비 향상과 공해 물질 배출의 측면에서도 많은 개선 효과가 있음을 주장하고 있다.

저공해 및 저연비 기관의 개발을 위한 인젝터의 분무 특성 개선 기술과 동시에 벽류량을 최소화 할 수 있는 연료공급 기술 개발이 요구된다. 이와 같은 현상의 규명을 위하여 조 등⁽⁶⁾은 스토틀 밸브에 작은 구멍을 가공한 다공 스

* 동명대학

** 정회원, 동명대학

*** 정회원, 동아대학교

로틀 밸브를 개발하여 2차 미립화 효과에 대하여 연구한 결과, 작은 구멍들은 밸브 후류에 형성되는 경계층 영역을 작게 하여 벽면부착 유량이 감소함을 밝힌 바 있다.

또한, 오 등⁽⁷⁾은 분사된 연료의 증발을 촉진시키기 위한 수단으로 흡기다기관에 세라믹 히터를 설치하고 연소를 행한 결과, 연료 기화율의 증가에 따른 연소개선이 가능하여 연소효율이 향상됨을 밝히고 있다.

그러나, 아직도 인젝터의 설계인자에 따른 분무형상과 분무특성을 명백하게 파악한 연구는 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 입자운동해석장치(particle motion analysis system unit; PMAS)를 사용하여 밸브면에 분사되는 air-assisted injector의 미립화 특성에 대하여 연구하였다. 특히, 연료의 미립화에 영향을 미치는 여러 인자들 중에서 분무 공간의 공기온도와 보조공기의 공급압력에 따른 가솔린 연료의 기화특성 고찰을 위하여 화상처리(image processing)하여 분무 입자의 평균입경과 분무 거동에 관하여 밝혔다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타낸다. 실험장치는 용기, 연료 공급장치, 보조공기 공급장치, 온도조절장치, 가시화장치, 제어 및 계측장치로 구분된다.

연료탱크 내의 연료는 연료펌프에 의하여 압송된 후 여과기를 거쳐 설정된 연료압력(0.31MPa)으로 제어된 후 연압조정기가 부착된 딜리버리 파이프(delivery pipe)에 공급되어 인젝터 선단에서 일정압력을 유지한다.

인젝터에 공급되는 보조공기는 공기압축기를 통하여 가압된 후 에어유닛에 공급되며, 설정 조건의 압력으로 제어된 공기는 인젝터에 공급된다.

보조공기의 공급시기를 제어하기 위하여 공기 공급부의 입구에 솔레노이드 밸브를 설치하였다.

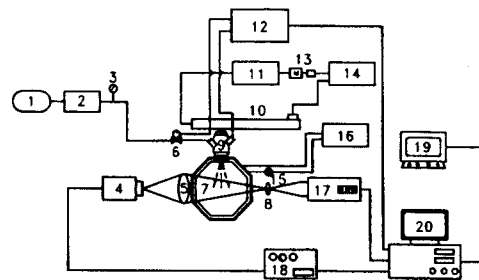
연료 분사시기와 보조공기 공급시기의 제어는 실험조건에 따라 동기화 또는 지연 및 진각이 가능하도록 하기 위하여 제어용 보드를 제작하여 사용하였다.

또, 각 부분의 제어는 4 Channel Delay Control Board로부터 출력되는 시그널을 기준 신호로 사용하였다.

본 연구에서는 보조공기의 공급이 가능한 상용의 2-hole 2-spray타입의 인젝터를 사용하였고, 연료의 분사시간은 실험조건에 따라 3~7.5ms 범위로 하였다. Fig.2는 본 연구에 사용한 입자운동해석장치(PMAS)의 개략도를 나타낸 것이다.

계측장치는 광원, 렌즈, 필터, CCD 카메라, 이미지 보드 및 제어보드가 내장된 컴퓨터 등으로 구성된다.

컴퓨터에 내장되어 있는 4채널 제어보드는 인젝터와 보조공기 공급용 솔레노이드 밸브의 제어를 위한 기준신호로 사용되며, 광원장치 및 화상취득장치를 실시간 동시 제어한다.



- | | | |
|----------------------|---------------------|-------------------|
| 1. Air compressor | 2. Air control unit | 3. Pressure gauge |
| 4. Light source | 5. Condenser lens | 6. Solenoid valve |
| 7. Chamber | 8. Microscopic lens | 9. Fuel injector |
| 10. Delivery pipe | 11. Fuel filter | 12. Controller |
| 13. Fuel pump | 14. Fuel tank | 15. Thermo couple |
| 16. Temp. controller | 17. CCD camera | 18. Trigger sync. |
| 19. Monitor | 20. Computer | |

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

또한, CCD에서 관측한 이미지상의 입자와 실제 입자의 크기를 동일하게 하기 위하여 사용한 렌즈와 초점거리에 대한 확대비를 계산하여 8~275 μ m 이내의 입경 측정이 가능하도록 하였다.

분무입자해석장치를 통하여 얻은 이미지 내에 존재하는 액적의 크기 보정은 2~300 μ m의 다양한 직경을 가진 보정용 레티클(reticle)을 기준으로 하여 계산하였다.

Fig.3은 밸브면에 분사되는 연료의 분무 거동 확인을 위하여 용기에 설치한 공기보조 인젝터와 밸브의 형상 및 분무영역을 나타낸 것이다.

Fig.4는 인젝터로부터 분사되는 연료의 입자 거동계측을 위하여 설정한 측정 점의 위치를 나타낸 것이다.

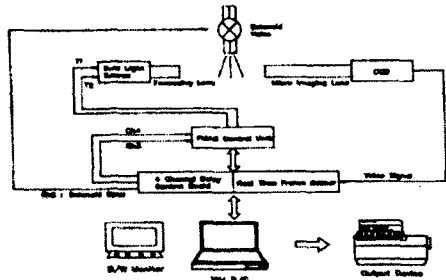


Fig.2 Schematic diagram of particle motion analysis system

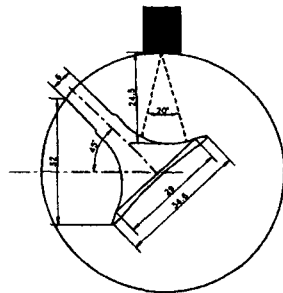


Fig.3 Shape of the valve and injection angle

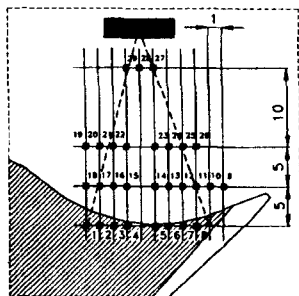


Fig.4 Schematic diagram of measuring location

3. 결과 및 고찰

3.1 거시적 측정결과

동일한 실험조건에 대한 분무형상 및 분무각 등의 거시적인 촬영을 위하여 초점거리가 105mm인 렌즈를 스틸카메라에 장착하고, 렌즈 전면에는 ND필터를 장착하여 광량을 조절하였다. 조리개가 개방된 상태에서 광원의 방전시기를 제어하여 출력하면 설정시간 동안 화상을 얻을 수 있다.

공기보조 인젝터의 분무특성 확인을 위하여 보조공기의 유무에 따른 각 시간 영역대에서 촬영한 사진을 Fig.5, Fig.6, Fig.7에 각각 나타낸다.

각 사진은 분사용기의 공기온도가 293K, 보조공기의 공급압력을 0kPa, 60kPa, 120kPa로 각각 변화시킨 경우이다.

사진에서 보는 바와 같이 모든 조건에서 연료의 분사는 분사개시를 위한 신호를 인가한 후 1.7ms 이후의 영역에서부터 분사가 가능함을 거시적 촬영 결과로부터 확인할 수 있었다.

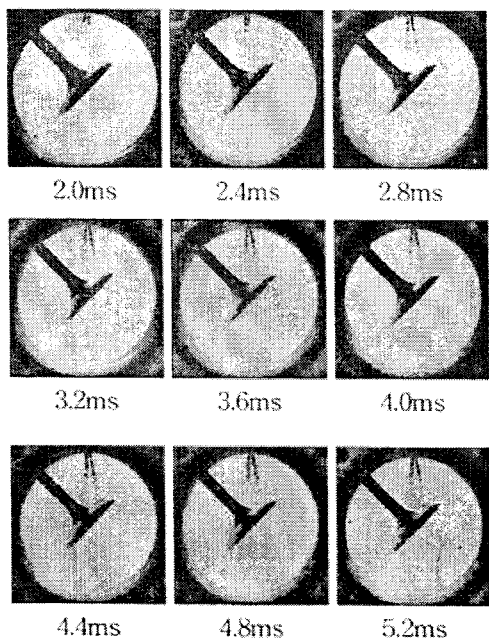
분무의 거시적 성장과정은 육안으로 확인할 가능한 시기인 분사개시 후 2.0ms 영역에서부터 0.4ms 간격으로 나타내었다. 분무입자의 크기는 보조공기의 공급이 없는 경우에 비하여 보조공기의 공급이 있는 경우가 초기부터 보조공기의 영향에 의해 액적군이 상당히 미세하게 무화됨을 볼 수 있다.

Fig.8은 분무속도에 있어서 보조공기의 영향을 확인하기 위하여 앞서 열거한 Fig.5, Fig.6, Fig.7에서 인젝터 선단으로부터 25mm 영역에 위치한 밸브면에 분무입자가 도달하여 충돌이 일어나는 시각을 나타낸 것이다. 주어진 조건에서 보조공기의 공급이 없는 0kPa에서는 분무입자가 밸브면에 도달하는데 소요되는 시간이 1.2ms인 반면 보조공기의 공급압력이 60kPa인 경우에는 0.75ms, 120kPa인 조건에서는 0.35ms가 소요되었다.

즉, 인젝터에 공급되는 보조공기의 공급압력이 증가함에 따라 분무속도는 본 실험의 영역에서는 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다.

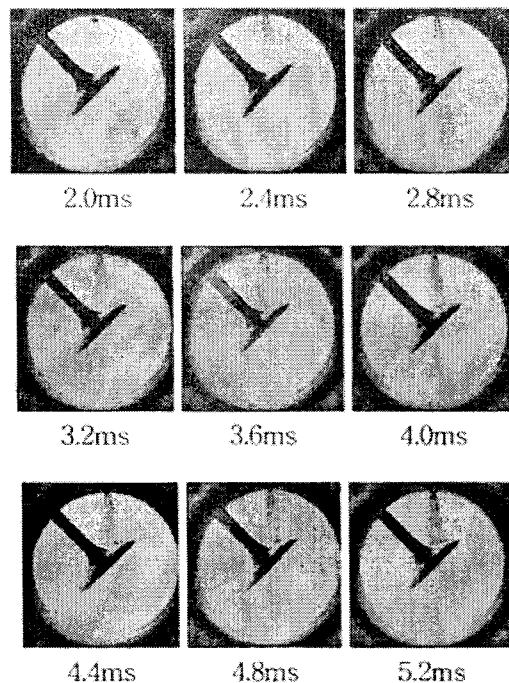
Fig.9는 일정조건에서 주위 분위기 온도가 분무입자의 형성에 미치는 영향을 구체적으로 확인하기 위하여 실험한 결과를 나타낸 것이다.

보조공기의 공급압력은 두 조건 모두 90kPa인 촉진되는 현상을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 분무공간의 공기온도 증가에 따라 상대적으로



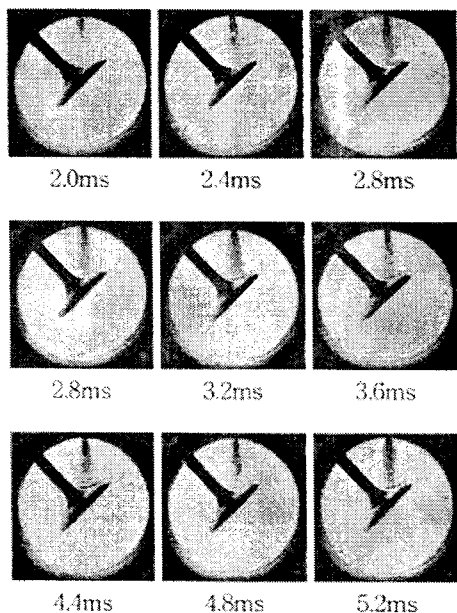
Chamber temp : 293K
Air-assisted pressure : 0kPa

Fig.5 Macroscopic visualizations of air-assisted injector with the lapse of injection time



Chamber temp : 293K
Air-assisted pressure : 60kPa

Fig.7 Macroscopic visualizations of air-assisted injector with the lapse of injection time



Chamber temp: 293K
Air-assisted pressure : 120kpa

Fig.6 Macroscopic visualizations of air-assisted injector with the lapse of injection time

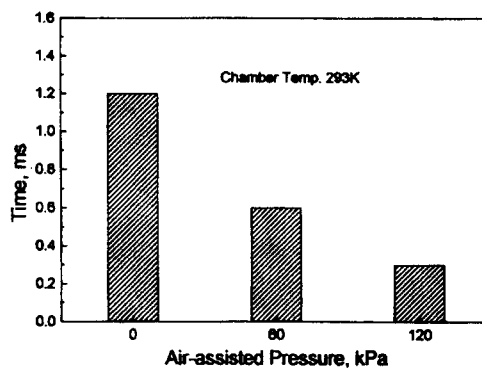
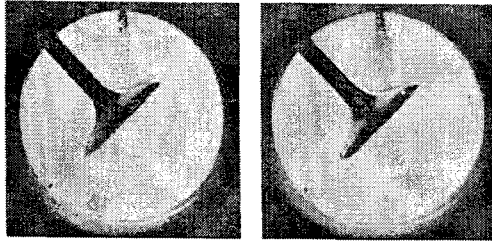


Fig.8 Relationship between collision time and air-assisted pressure

연료입자의 기화가 촉진되는 현상에 기인한 것으로 분무장의 분위기 온도를 증가시키면 양호한 분무특성을 얻을 수 있음을 보여주는 것이다.



(A) (B)

(A) Chamber temp.: 293K

(B) Chamber temp.: 373K

Air-assisted pressure: 90kPa

Fig.9 Macroscopic visualizations of air-assisted injector

3.2 PMAS에 의한 분무 입경 측정

거시적 촬영을 통해 주위 분위기온도 및 보조공기압력에 의한 분사가 분무의 미립화에 기여하는 효과를 확인할 수 있었으며, 실제 응용에 대해서는 분무각과 액적의 크기 및 분무도 달거리 등의 영향을 파악할 수 있었다. 이를 기초로 하여 미시적 분무의 거동 분석을 통하여 연료입자의 분열과정, 액적의 크기 및 액적수밀도 등을 계측하였다.

CCD카메라를 사용하여 동일위치, 동일조건에서 10회씩의 이미지를 취득하고 이미지 처리를 행한 결과 각각의 분무에 대한 평균 입경(SMD)을 계측하였다.

Fig.10은 분무의 주류, 액적의 크기와 액적의 분포도를 얻기 위하여 분사방향에 대한 수평면에 따라 CCD카메라로 취득한 화상을 모니터로부터 출력한 것으로 화상의 가시면적은 3.3mm×2.5mm의 원시화상을 나타낸 것이다.

본 조건은 인젝터 선단으로부터 20mm 떨어진 수직면에 중심으로부터 1mm 간격으로 촬영한 화상을 나열한 것이다. 인젝터로부터 분출된 액주류는 분열되어 작은 액적으로 발달되었음을 Fig.10, 11과 비교하면 명확히 확인할 수 있다.

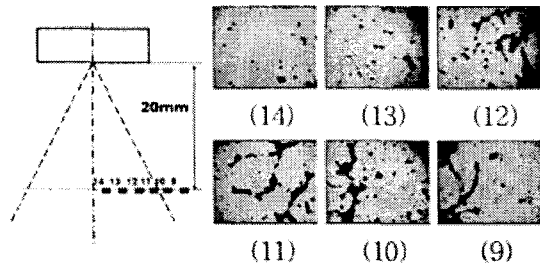
또한, 분무의 중심 축에서 3~4mm 떨어진 위치에 상대적으로 미립화가 덜 된 부피가 큰 액적

군을 확인할 수 있다. 이것은 측정 점 11, 12지점이 주류가 통과하는 경로로 판단된다.

Fig.11은 주류의 통과 경로라고 판단되는 측정 점 11에서 보조공기의 공급압력과 용기의 온도에 따른 연료입자의 분포를 나타낸 원시화상이다.

보조공기의 공급압력과 분위기 온도가 증가함에 따른 미립화가 촉진되어 입자들이 작아지면서 입자의 수밀도가 증가하는 것을 가시적으로 확인할 수 있다. 또한 분위기 온도에 비해 보조공기의 공급압력이 분무의 미립화에 상대적으로 크게 영향을 미치고 있음도 확인할 수 있다.

Fig.12와 Fig.13은 Fig.11에 나타낸 원시화상을 이미지 처리한 결과로부터 구한 각각의 분무에 대한 SMD의 분포를 나타낸 것이다.



Chamber temp.: 293K

Air-assisted pressure: 0kPa

Fig.10 Photography of the spray structure

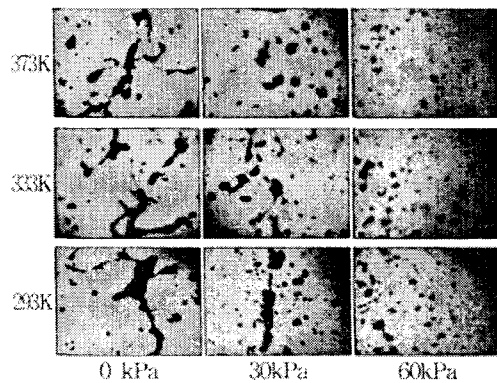


Fig.11 Monitor view of droplet distribution at No. 11 location

Fig.12는 용기의 온도가 293K인 조건에서 보조공기의 공급압력에 따른 SMD의 분포를 나타낸 것이다.

보조공기의 공급이 없는 경우에 SMD는 10~160 μ m 정도의 크기를 보이며, 액적수밀도는 SMD의 크기에 따라 차이는 있지만 대체적으로 2~10% 정도의 분포도를 보이며 그 영역이 넓게 분포함을 알 수 있다.

그러나, 동일조건에서 보조공기의 공급압력이 증가함에 따라 SMD의 크기와 액적수밀도는 현저하게 차이가 나는 현상을 볼 수 있다.

특히, 보조공기의 공급압력이 60kPa인 경우에 SMD는 10~130 μ m 정도의 크기를 보이며, 액적수밀도는 SMD의 크기에 따라 차이는 있지만 대체적으로 2~15% 정도의 분포도를 보이며 그 영역이 10~60 μ m 정도의 영역에 집중되어 분포함을 알 수 있다.

Fig.13은 용기의 온도가 373K인 조건에서 보조공기의 공급압력에 따른 SMD의 분포를 나타낸 것이다.

보조공기의 공급이 없는 경우에 SMD는 10~110 μ m 정도의 크기를 보이며, 액적수밀도는 SMD의 크기에 따라 차이는 있지만 대체적으로 3~12% 정도의 분포도를 보인다. 이러한 결과로 분무 주위의 분위기 온도가 높아지면 연료입자의 미립화가 가능해짐을 알 수 있다.

또, 동일조건에서 보조공기의 공급압력이 증가함에 따라 SMD의 크기와 액적 수밀도는 현저하게 차이가 나는 현상을 볼 수 있는데, 보조공기의 공급압력이 60kPa인 경우에 SMD는 10~80 μ m 정도의 크기를 보이며, 액적 수밀도는 SMD의 크기에 따라 차이는 있지만 대체적으로 2~20% 정도의 분포도를 보이며, 그 영역이 10~40 μ m 정도의 영역에 집중됨을 확인할 수 있다.

Fig.14는 Fig.12, Fig.13에 나타낸 SMD의 평균 분포 값을 나타낸 것이다. 앞서 정성적으로 살펴본 바와 같이 보조공기의 공급이 없는 경우에 비하여 보조 공기의 공급이 있는 경우에 SMD의 크기는 직선적으로 감소하는 현상과 함께 분무입자의 수가 증가함을 알 수 있다.

또한, 이러한 경향은 보조공기의 공급압력이 높아짐에 따라 더욱 커진다. 특히, 용기의 온도가

293K인 경우에 분무입자의 SMD는 보조공기의 공급압력에 따라 62~82 μ m에 비하여 373K인 경우에는 52~67 μ m 정도로 20% 정도 작아지는 현상을 보인다.

일반적으로 가솔린기관의 연료분사에 있어서 SMD가 60 μ m 정도이면 충분히 무화된 것으로 판단되는 점을 감안한다면 보조공기의 공급이 없어도 분무장의 온도를 373K 정도로 증가시키면 양호한 분무특성을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig.15는 분무의 성장이 활발히 이루어지고 있다고 판단되는 위치인 밸브면과 접하는 위치에서 측정한 결과이다. 본 조건은 분사방향에 대한 수평위치의 변화에 따른 분무 입경의 크기와 분포를 나타낸 것이다. 두 종류의 그림은 보조공기의 공급이 없는 경우와 보조공기의 공급압력이 90kPa인 경우를 각각 비교한 것이다.

보조공기의 공급압력이 90kPa인 경우가 보조공기의 공급이 없는 경우에 비하여 SMD의 크기는 작아지는 현상을 보인다. 보조공기의 공급압력이 90kPa인 경우의 SMD의 크기는 각 측정 점에 따라서 약간 다르지만 분위기 온도가 40K씩 증가함에 따라 5~7% 정도씩 작아지는 현상을 보인다.

또한, 각 측정 점에서의 SMD는 두 조건 모두 약간 다른 값을 보이지만, 본 연구에 사용한 인젝터가 2-hole 2-spray 형식인 점을 감안한다면 대체로 고르게 분포하는 것으로 판단 가능하다. 즉, 공기와 접하는 영역에서 분위기 공기의 유입에 의한 기화가 촉진되는 현상을 볼 수 있다.

Fig.16은 분무의 성장이 활발히 이루어지는 지점으로 판단되는 인젝터 선단으로부터 20mm 떨어진 영역에서의 분사방향에 대한 수평방향의 각 측정 점에서의 SMD를 측정한 결과이다.

두 종류의 그림은 보조공기를 공급하지 않는 경우와 공급압력이 90kPa인 경우이다. Fig.15에서 본 바와 같이 각 측정 점에서의 SMD는 두 조건 모두 약간 다른 값을 보이며 특히, 인젝터가 2-hole 2-spray 형식인 점을 고려할 때 각각의 분공을 통한 분무형태는 약간 차이가 날 수 있다. 물론, 이와 같은 분무형태의 차

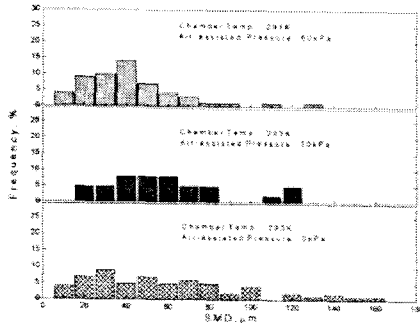


Fig.12 Relations between SMD and frequency at measuring location

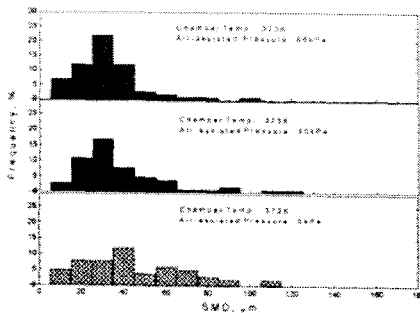
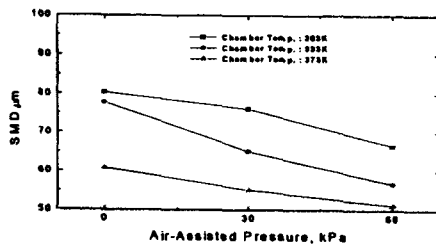
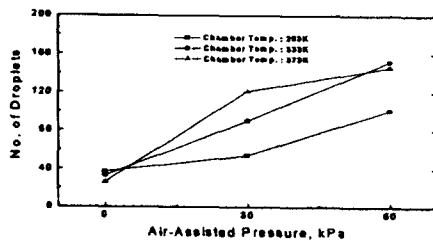


Fig.13 Relations between SMD and frequency at measuring location



(a) SMD



(b) No. of droplets

Fig.14 Effects of air-assisted pressure on the No. droplet

이는 한정된 수의 인젝터를 사용한 결과이며, 향후 계속된 연구를 통하여 검토가 된다면 벽류량 형성의 원인 규명에 도움이 되리라 생각된다.

전반적으로 용기의 온도와 보조공기의 공급압력이 증가함에 따라 입경 감소가 두드러지게 나타나며 특히, 보조공기의 공급이 있는 경우에 훨씬 미립화되고 분무 입경의 변동폭이 줄어드는 현상을 볼 수 있다.

그러나, Fig.16의 그림과 비교해 보면 SMD의 크기가 그다지 차이가 나지 않음을 알 수 있는데, 이는 이미 분무가 충분히 성장한 상태이기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.17은 인젝터 선단으로부터 20mm 떨어진 영역에서의 분사방향에 대한 수평방향의 각 측정 점에서의 연료 액적의 수밀도를 측정한 결과이다.

보조공기의 공급이 없는 경우에 비하여 보조공기의 공급압력이 90kPa인 경우의 액적 수밀도가 현저하게 증가하는 현상을 볼 수 있는데, 이러한 현상은 주위 유동장의 속도가 증가함에 따라 연료와 분위기 공기와의 충돌 등에 의한 미립화가 촉진된 결과로 보인다.

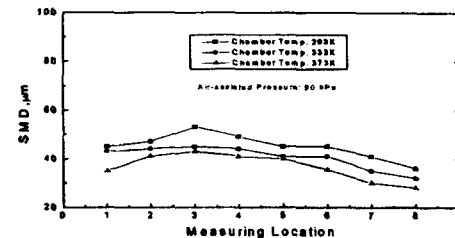
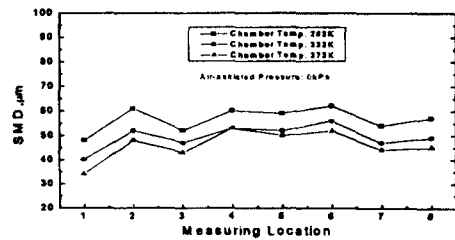


Fig.15 SMD variation vs. air temp. at the measuring points

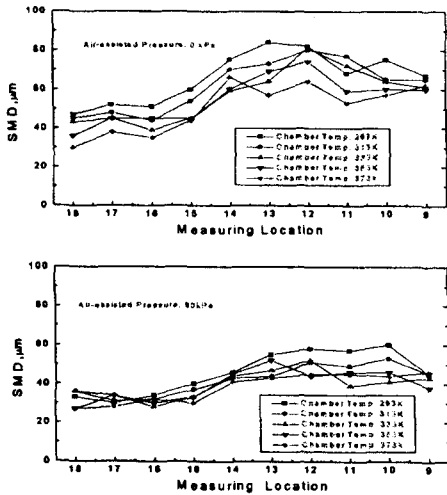


Fig.16 SMD variation vs. air temp. at the measuring points

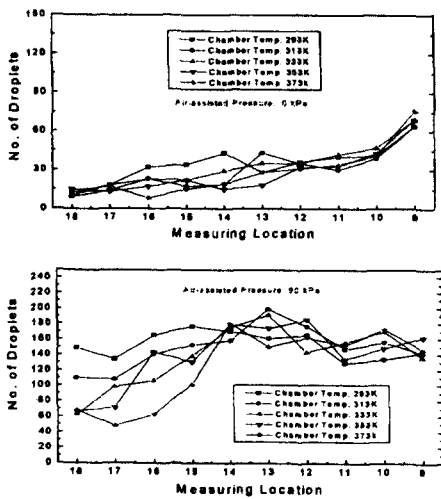


Fig.17 Relationship between air temp. and number of droplets at the measuring location

4. 결 론

기존의 MPI 가솔린 기관용 Air-assisted 인젝터에 보조공기 공급장치를 장착하고 입자 운동 해석장치를 사용하여 분무특성 및 보조공기의 영향에 대한 분무거동을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 보조공기의 공급은 분무입자의 미립화를 촉진시키며, 인젝터로부터 25mm지점의 도달 시간을 측정된 결과 보조공기 공급압력이 60kPa인 경우에 약 33.3m/s 정도의 분무속도를 보이며, 보조공기의 공급이 없는 경우에 비하여 1.5배정도 빠른 값을 보였다.
2. PMAS를 이용하여 분무거동을 해석한 결과 분무장의 온도가 높아짐에 따라 평균 입경이 작아지고 수밀도가 증가하는 현상을 보였다. 특히, 보조공기의 공급이 없이도 분무장의 온도를 373K 정도로 증가시키면 미립화가 촉진됨을 알 수 있었다.
3. 거시적 촬영과 PMAS에 의한 측정결과 전반적으로 용기의 온도와 보조공기의 공급압력이 증가함에 따라 입경 감소가 두드러지게 나타나며 특히, 보조공기의 공급이 있는 경우가 미립화 특성이 양호하며 분무 입경의 변동폭이 줄어드는 현상을 볼 수 있었다.

5. 참 고 문 헌

1. H. Manger, "LH-Jetronic : A New Gasoline Injection System with a Hot Wire Air Mass Meter and μ -processor Controlled ECU", IMechE C180/81, 1981, pp.137-141.
2. C. S. Weaver, "Natural Gas Vehicle - A Review of the State of the Art", 1989, SAE Paper No.892133.
3. N. Namiyama, H. Nakamura, K. Kokubo and D. Hosokai, "Development of Air-Assisted Injector System", 1992, SAE Paper 920294.
4. K. Harada, R. Shimizu, K. Kurita, M. Muramatsu, T. Makimura, M. Ohashi, "Development of Air-Assisted Injector System", 1992, SAE Paper 920294.
5. T. Noki, Y. Ohyama and M. Fujieda, "Study on the Intermittent Impinging Atomization of Fuel Injector for Gasoline Engine", Trans. JSME, Vol. 58, No. 552, 1992, pp. 2607~2611.

6. 조병옥, 조행목, 이창식, “다공스로틀밸브가 혼합기 유동과 연료분무의 2차 미립화에 미치는 영향”, 한국액체미립화학회지, 제1권, 제3호, 1996, pp.60~66.
7. 오영택, 문영호, 최승훈, 김정기, 김준수, “공회전시 가솔린 기관의 배기가스 저감과 시동성능 개선에 관한 연구”, 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, No. 97380268.