

정상·과도 분사 조건에서의 에어슈라우드 인젝터 분무의 입경·분사량 분포에 관한 연구

A study on distribution of drop size and injection rate of air-shroud injector sprays under steady and transient injection condition

이 충 훈*
C.H. Lee

ABSTRACT

Spray characteristics of a twin-hole air shrouded nozzle designed for gasoline injectors was investigated by using laser diffraction particle analyzer (LDPA) and tomography reconstruction. A confined spray chamber which is optically accessible through a pair of glass windows was made to simulate the fuel injection condition in intake manifold of gasoline engine. The measurement was applied to the twin hole injector with and without an air shroud. It demonstrates that for the case with an air shroud, fine atomization is achieved and there exists a large number of fine droplets between the region of the main spray streams, which conforms with the spray visualization. The drop size distribution was investigated as a function of elapse time after fuel injection. The distribution was greatly affected by the measurement position from the injector exit. Also, the spatially resolved spray volume fraction and Sauter Mean Diameter (SMD) from line-of-sight data of the LDPA are tomographically reconstructed by Convolution Fourier transformation under the steady injection condition.

주요기술용어(Key Words): air-shroud injector (에어슈라우드인젝터), Sauter Mean Diameter(SMD), transient condition (과도조건), tomographic reconstruction (토모그래피 재구성), local volume fraction (국소체적비), local SMD (국소 평균입경)

1. 서론

최근 강화되고 있는 자동차 엔진의 배기 가스 규제에 대응하기 위하여 다각적인 연구가 진행되고 있다. 특히, 가솔린 엔진의 경우 탄화 수소의 저감은 중요한 문제로 그 생성 원인이 벽면에서의 소화, 실린더 헤드 가스켓 및 피스톤 링 등에 의해 형성되는 틈새채적에 의한 영향, 실

린더 벽면 오일에 용해되었다가 방출되는 영향 그리고 희박 연소에 의한 전체 실화, 저운 시동시의 실화 등이 그 주요 원인으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 이러한 탄화 수소 생성 기구는 액체연료의 증발 특성에 큰 영향을 미치는 분무의 입경 분포와 밀접한 관련이 있다.^(2,3) 가솔린 엔진에서의 연료 제트의 분사 위치는 흡기매니폴드 또는 흡기포트이다. 흡기포트 및 흡기매니폴드 내에서의 연료 거동은 배

* 서울산업대학교 자동차공학과

수 복잡하여, 분무된 연료의 일부는 연료 액적으로 쪼개 지고, 일부는 흡기매니폴드에 충돌하여 연료액적과 연료 필름을 형성한다. 또한 흡기매니폴드 내의 높은 온도로 인해 증발 과정을 거치게 된다.

전술한 바와 같이 액적의 미립화 특성은 탄화수소 생성과 밀접한 관련이 있는데, 탄화 수소 저감을 위해 분사된 연료의 에어슈라우드에 의해 생성된 공기 세트를 충돌시켜 연료를 미립화하는 메카니즘에 대한 연구⁽⁴⁻⁶⁾와 이를 이용해 탄화 수소를 저감시키는 연구, 저온 시동성을 향상시키는 연구⁽⁷⁻⁹⁾, 연비향상에 대한 연구⁽¹⁰⁾ 등이 진행되어 왔다. Machnes 등⁽¹¹⁾, Miyamoto⁽¹²⁾ 등은 에어슈라우드 인젝터의 미립화 모델과 시간변화에 따른 분무침투 특성의 연구를 수행한 바 있다. Zhao 등⁽¹³⁾은 흡기매니폴드에서의 가시화 방법을 사용하여 연료분사 후 시간 변화에 따른 미립화 과정을 가시화 방법을 사용하여 연구한 바 있다.

본 연구에서는 인젝터에서 연료분사 시작 후 시간 변화에 따른 연료의 입경분포를 측정하고 흡기매니폴드 내의 미립화 과정⁽¹⁴⁾을 효과적으로 파악하기 위하여 광학적 접근이 가능한 분무실(optically accessible spray chamber)을 만들어 실험하였다. 기존 인젝터와 에어 슈라우드 인젝터의 미립화 특성을 비교하여 평가하였다. 또한 연료 분사량의 국소적 공간 분포를 파악하기 위해 Lee 등⁽¹⁵⁾이 제시한 방법을 사용하여 토모그래피재구성을 하였다.

2. 실험 장치

2.1 광학적 접근이 가능한 분무실 실험

실험 장치 전체 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 실험 장치는 분무실, 이송 장치, LDPA 설치용 벤치, 연료 공급시스템, 분무실 내에 균일 유동장 형성을 위한 공기 공급시스템 등으로 구성하였다.

분무실은 두랄루민을 재질로 하여 외측 크기는 가로 178 mm, 세로 170 mm, 높이 178 mm 인 사각형으로 가공하였다. 분무실 내의 현상을 관측하기 위해 만든 관측창, 즉 레이저 빔이 지나가는 경로 상에 있는 두개의 유리 관측창이 서로 평행하도록 설치하기 위하여 분무실을 사각으로 가공하였다. 분무실 내경은 152.5mm 이며 관측창의 직경은 75mm 이다. 분무실 위쪽에는 직경152.5mm 강관과 직경 50.8mm 강관을 연결하여 노즐을 설치하였고 직경 50.8mm 강관 외부와 직경 152.5mm 강관 내부 사이의 공간으로 공기를 공급할 수 있도록 하였다. 공기가 흐르는 내부 공간에는 균일한 공기의 유동장이 형성될 수 있도록 하니컴(Honey comb)을 설치하였다. 분무실 내부로의 공기 공급은 분무실 윗쪽에 설치한 8개의 직경 6.35mm 호스를 통해서 외부로부터 공급되도록 하였다. 분무실 내부 공간에 균일한 유동장을 만들어 주는 것은 첫째 분무 입자가 관측창에 충돌하여 측정 데이터 에러 발생을 방지하기 위해서이고 둘째 분무된 입자가 분무실

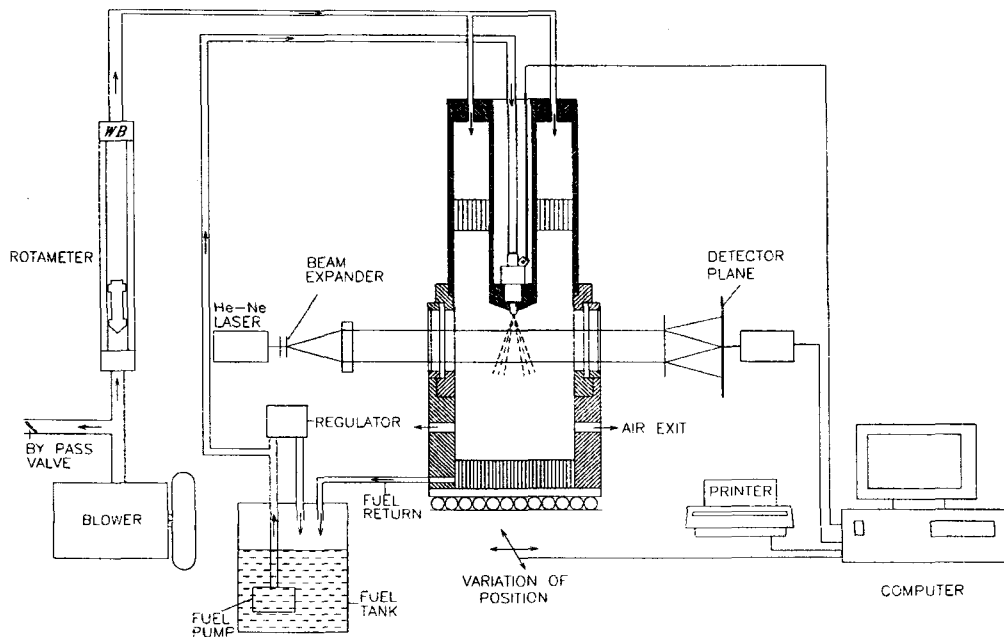


Fig. 1 Experimental setup for measuring drop size with LDPA

내에서 부유하기 때문에 발생하는 레이저광의 부파울 감소 및 입사광 산란에 의한 오차를 막기 위함이다. 실제 엔진에서는 유동장은 흡입부압을 형성시켜서 유동장을 만들기 때문에 본 실험 장치에서의 유동 조건과는 약간 다르지만 연료 제트에 전단력을 주는 것은 동일하다고 사료된다. 분무실 바닥에는 하니컴을 넣어서 연료 분무시 바닥에 충돌하여 튀어오르는 것을 방지하였다. 분무실 측면에는 원주를 따라서 직경 12 mm인 8개의 구멍을 가공하여 공급된 공기를 밖으로 배출할 수 있도록 하였다. 전체 분무실은 2차원 이송 장치 위에 설치하여 X-Y 방향의 이동이 가능하도록 하였다. 2인치 강관 외부의 일부분에 나사를 만들어서 인젝터 위치를 수직방향으로의 이동이 가능하도록 하였다. 관측용 창은 광학용 유리를 가공하여 제작하였으며 평탄도는 $1/4 \lambda$ 정도이다. 광학용 유리를 사용할 경우 LDPA 장치의 레이저광이 시창에 반사되어 얼라인이 어려움이 있는데 이를 회피하기 위해 분무실 시창면과 레이저광이 교차하는 각도를 직각으로 하지 않고 약 120° 정도 되도록 조절하였다.

LDPA 입경 측정장치는 분무실의 수직 방향 이송을 원활하게 하기 위해서 LDPA 입경측정 장치의 베드(Bed)를 90도 회전하여 높이 1.2 m의 벤치에 고정하였다.

연료 송출압을 3.0 kg/cm^2 를 유지하였다. 본 연구에서는 4공 2분무의 기존 인젝터와 2공 2분무의 에어슈라우드 인젝터를 사용하였다. 기존 인젝터의 경우 2분무 제트가 형성하는 스트림 앵글은 28° 이다. 에어슈라우드 인젝터는 2분무의 제트가 형성하는 스트림 앵글은 22° 이다. 에어슈라우드 인젝터에 압축 공기를 공급하여 에어가 연료와 충돌하도록 하였다. 압축공기압력은 정밀 레귤레이터로 제어하였으며 공기량은 로타미터로 측정하였다.

본 실험에서 사용한 3상 유도 전동기는 송풍량은 6500 l/min , 정격회전수는 3450 rpm 이며 이 때 분무실 내의 압력은 약 13 mm Aq 이다. 분무실 내에 공급되는 공기량은 약 450 l/min 정도로 공급하였다. 공급 공기량 측정은 로타미터를 사용하였으며 검정은 용적식 유량계를 사용하였다. 송풍기에서 공급되는 과잉 공기량은 바이패스 밸브를 통해서 대기 중으로 배출하도록 했다.

입경 측정 실험 방법은, 정상상태에서는 먼저 균일 유동장을 형성하기 위하여 송풍기를 가동시키고 일정시간이 흐른 후에 계속해서 연료 분사가 이루어지도록 하였다. 이 때 LDPA시스템으로 입경분포 측정 실험을 하였다. LDPA의 빔직경은 9mm 이고 푸리에 렌즈의 초점거리는 300mm 로 $5.5 \mu\text{m} - 564 \mu\text{m}$ 범위의 입경을 측정할 수 있

다. 동일한 위치에서 5 번 반복하여 측정하였으며 매회 측정된 SMD의 평균을 내었다. 입경 측정 실험이 끝나면 이송장치를 제어하여 2 mm 를 정밀하게 이동하였으며 앞의 동일한 방법으로 입경분포를 측정하였다. 한편, 과도 상태 입경 분포 측정 실험에서는 정상 상태를 측정할 때와 동일한 유동 조건으로 맞추고 연료 분무 지속 시간을 10 ms로 한 상태에서 측정 타이밍을 솔레노이드 작동 개시 시간에 동기 시킨 후 2 ms 씩 지연 시켜가면서 입경 분포를 측정하였으며, 여기서 과도 상태 조건에서는 인젝터에 단발 펄스를 입력하였고, 정상상태 조건에서는 전기 신호를 지속적으로 공급하여 계속 연료를 분사할 수 있도록 하였다.

2.2 국소점 토모그래피 재구성 실험

정상상태에서 국소점에서의 분사량 분포 및 입경분포를 구하기 위하여 인젝터 노즐팁 하방 9 cm 위치에서의 분무 토모그래피재구성을 위하여 Loc 등⁽¹⁵⁾이 사용한 방법을 사용하였다. 정상상태에서의 실험은 계속하여 분사를 하여야 하기 때문에 안전을 위하여 n-헵탄을 사용하지 않고 물을 일정 압력으로 공급한 조건에서 실험을 실시하였다. 단공분무와 같이 확대칭인 경우 측정 단면을 일회 주사하고 Abel 변환을 수행하면 국소점 정보를 얻을 수 있으나⁽¹⁶⁻¹⁹⁾, 본 실험에서 사용한 인젝터는 2공 노즐로 비대칭 분무이므로 다각 주사 측정이 가능하도록 인젝터의 고정대가 회전할 있도록 설계하였고, 고정대는 스텝 모터로 구동되는 수평 이송 장치 위에 설치하여 2 mm 간격으로 이동하면서 측정할 수 있도록 하였다. 수평 이송 장치의 펄스당 이송 거리는 0.05 mm 이며 PC 를 이용하여 제어하였다. 본 실험에서는 일반적으로 액체 분무에 널리 사용되고 있는 Rosin-Rammler 모델을 적용하여 SMD 및 체적 농도를 계산하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 광학적 접근이 가능한 분무실 실험 결과 및 검토

실험 조건을 바꾸어 가면서 각 인젝터에 따른 입경분포를 측정하였다. 기존 인젝터의 경우 SMD가 $130 \sim 150 \mu\text{m}$ 정도의 값을 나타냈다. 에어슈라우드 인젝터의 경우는 공급되는 공기압력에 따라 달라졌으나 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 정도로 미립화 효과가 뚜렷이 나타났다. Fig.2는 과도상태에서,

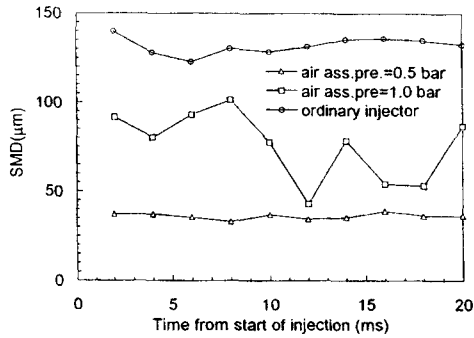


Fig. 2 Comparison of SMD between air shrouded injector and ordinary injector as a function of time from start of injection

연료분사 시작 후 시간에 따른 입경분포를 기존인젝터 및 에어슈라우드 인젝터의 공급 공기 압력을 0.5 bar, 1.0 bar로 변화시켰을 경우에 대해 비교한 것이다. 여기서, 레일압력은 3kg/cm^2 , 정상상태로 연료를 분사하는 조건, 에어슈라우드와 기존 인젝터의 분사량을 모두 210cc/min 로 유지하였다. 에어슈라우드 인젝터의 미립화 촉진 효과를 확실하게 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 공기 공급 압력에 따라셔도 에어슈라우드 인젝터의 입경 분포가 크게 달라짐을 알 수 있다. 본 실험에서는 공기 공급 압력이 0.5 기압으로 공급한 경우가 1.0 기압으로 공급했을 때보다 액적 미립화 측면에서 효과적인 것으로 나타났다. 이것은 효과적인 미립화 상태의 분무를 얻기 위한 적절한 조건의 공기공급 압력이 존재함을 의미하며 엔진 개발시 적절한 에어슈라우드 공기 공급압력을 최적으로 결정해야 할 것으로 사료된다.

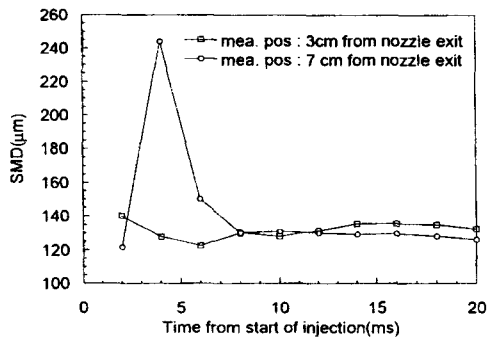


Fig. 3 Effect of measuring position from nozzle exit on SMD as function of time

Fig.3은 기존 인젝터의 팁(tip)으로부터 하류 방향 측정 위치를 3 cm 와 7 cm의 두 조건에서 각각 연료분사 시작 후 지난 시간 변화에 따른 즉, 과도상태에서의 입경분포를 나타내었다. LDPA의 외부트리거 단자에 신호를 입력하면, $10\mu\text{s}$ 동안 분무입자로부터의 레이저회절신호를 캡처하고 그 신호를 분석하여 과도입경분포를 구하게 된다. 분사 후 2~6 ms에는 7 cm에서의 입경 분포가 크게 나타났고 그 이후에는 대체로 비슷한 분포를 나타냈다. 분사 초기에 노즐 출구로부터 멀어짐에 따라 SMD가 증가한 것은 연료 액적들간의 충돌에 의한 결합 때문인 것으로 사료된다. 즉 작은 액적은 큰 액적보다 주위 유동장에 쉽게 영향을 받게 되고 속도가 느린 액적은 빠른 액적에 의해 추월당하면서 서로 뭉치게 된다. 이로부터 입경분포가 공간적으로 크게 달라짐을 알 수 있으며 엔진에 필요한 최적입경분포는 공간입경분포를 고려하여 결정하여야 한다.

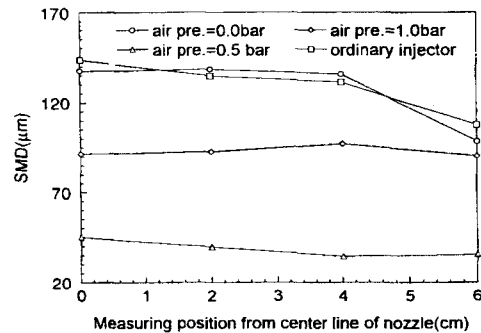


Fig. 4 Variation of SMD according to measurement position from center line of nozzle

Fig. 4 는 정상 상태에서 각 인젝터 실험 조건에 따른 입경 분포를 수평 방향 측정 위치 이동에 대해 나타낸 것이다. 측정위치는 노즐 팁(tip)으로부터 하류 방향으로 3 cm 이며 노즐 중심축으로부터 반경 방향으로 2 mm 씩 이동시키면서 측정 위치를 변화시켰다. 기존 인젝터와 에어슈라우드 인젝터의 압축공기 공급 압력을 0 으로 한 경우 각각의 SMD 분포를 보면 측정위치반경이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 측정 반경이 증가함에 따라 연료 제트와 공기와의 전단 마찰이 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 에어슈라우드 압력이 0.5 bar, 1.0 bar 인 경우 측정 반경의 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 이것은 에어슈라우드 공기가 같은 통로로 공급됨으로써 연료와 공기의 마찰이 모든 반경 방향에

대해서 비교적 정확하게 작용하기 때문에 사료된다.

Fig. 5, 6 은 과도 상태에서 측정하였을 때의 SMD분포에 따른 체적비를 나타낸 것으로 기준인젝터와 비교해 에어슈라우드인젝터의 경우가 작은 입경의 체적비 비중이 높게 나타남을 알 수 있다.

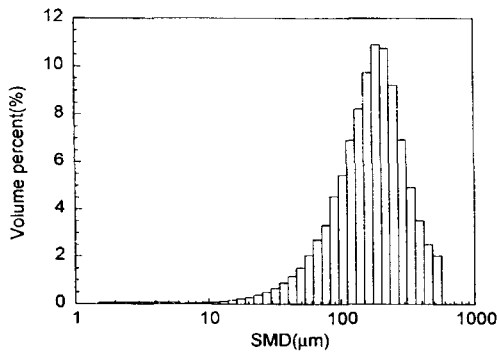


Figure 5 Volume % distribution as a function of drop size at 6 ms after start of injection (ordinary /mca. position: 3cm down from the nozzle exit)

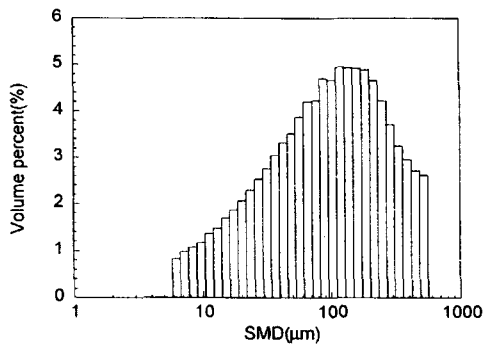


Figure 6 Volume % distribution as a function of drop size at 6 ms after start of injection (air assisted - 0.5bar/mca. position: 3cm down from the nozzle exit)

3.2 분무 체적비-입경분포 토모그래피재구성 검토

LDPA는 일정 직경의 평행광 안에 크기가 서로 다른 입자들이 존재할 때 이들 입자에 의해 산란된 빛을 푸리에 렌즈(Fourier Lens)를 통과시켜 31 개의 동심원으로 구성된 광감지기로 그 강도를 측정하여 입경 분포를 측정하는 장치이다. LDPA 측정데이터는 경로적분된 특징을 가지기 때문에 공간상의 임의의 위치, 즉 국소점에서의 데이터를 얻기 위해서는 경로적분데이터를 입력 데이터로 사용하여 토모그래피재구성 계산을 해야 한다. 토모그래피재구성에는 경로적분데이터 중 보존량을 입력데이터로 사용하여야 하는데 본 연구에서는 체적비와 액적표면적

밀도비를 사용하였다. 체적비는 일정체적의 공간에 액적이 차지하고 있는 체적의 비율이며 액적표면적밀도비는 '체적비/SMD'로 계산되는 보존량이다. 본 연구에서는 체적비와 액적표면적밀도를 보존량으로 이용하여 Lec 등⁽¹³⁾이 제시한 방법으로 토모그래피재구성 계산을 하였다.

비대칭 토모그래피재구성을 하기 위해서는 다각주사(multi-angular scanning)를 하여야 하며 본 연구에서는 하나의 주사각도에 대해서 50개의 위치에서 측정하고, 주사각도 수는 12개로 하였다. 토모그래피 재구성의 정확도를 높으려면 측정위치수와 주사각도의 수를 증대시켜야 한다. 그러나, 실험횟수를 증대시키는 것은 한계가 있으므로 주어진 실험데이터를 내삽함으로써 실질적으로 실험데이터를 증가시키는 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서 구한 '주사각도수 x 측정위치수' 실험데이터는 '12 x 50'으로 이것을 Lec 등⁽¹³⁾이 제시한 내삽 방법을 사용하여 '48 x 100'의 데이터로 증대하였다. 이러한 방법을 사용하여 토모그래피재구성한 결과를 Fig. 7~12에 나타내었다.

Fig. 7은 에어슈라우드를 하지 않은 조건에서 체적비를 나타낸 것이다. 2공 노즐에서 분사되는 주분사 제트를 중심으로 해서 두개의 피크값을 나타내고 있으며 분사제트 중심축으로부터 벗어나면 급격히 체적비가 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 에어슈라우드를 하지 않은 조건에서 액적표면적밀도를 나타낸 것으로 Fig. 7의 체적비와 유사하게 표면적 밀도도 뚜렷한 피크값을 나타내고 있다. Fig. 9는 SMD 분포를 나타낸 것으로 Fig.7의 국소점 체적비를 Fig. 8의 액적표면적밀도로 나누어 얻은 결과이다. Fig. 7, 8의 결과와 유사하게 제트 중심에서 벗어날수록 SMD가 작아지는 경향으로 보이고 있다.

0.03 MPa의 압력의 공기를 에어슈라우드에 공급하였을 경우에 대해서 체적비, 표면적 밀도, SMD의 토모그래피 계산 결과를 Fig. 10~12에 나타내었다. 2공 노즐로부터 나온 제트는 에어슈라우드에 공기 제트에 의해 생성된 선회 유동의 영향을 받아 시계 방향으로 약간 돌아가는 현상이 나타났다. Fig. 11의 액적표면적밀도를 주목할 필요가 있다. 즉 두개의 표면적밀도피크값 사이에 계란모양의 고원을 나타내고 있는데 이는 두개의 분사제트 연결선상에 작은 액적이 많이 존재하기 때문이며 이 영역에서의 SMD는 Fig.12에 나타낸 바와 같이 비교적 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 액적 표면적 밀도 및 SMD 분포의 최대 측정 반경 부근에 원형 밴드가 존재하는데, 이것은 공간적 제약으로 인해서 체적비가 영이 되는 곳까지 충분히 주사하지 못해서 나타난 것이다.

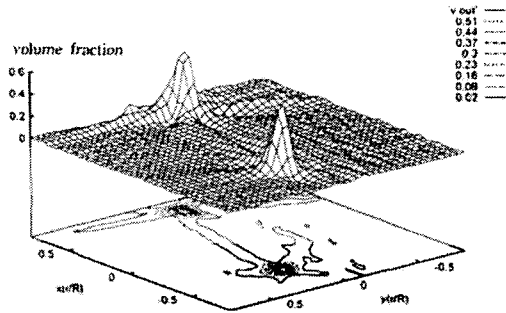


Fig.7 Profile of volume fraction without air shroud from effective 48 equiangular projections using interpolation

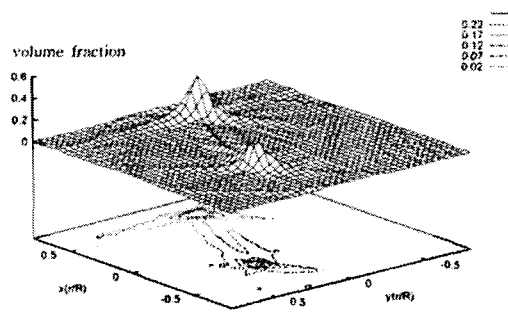


Fig.10 Profile of volume fraction with air shroud from effective 48 equiangular projections using interpolation

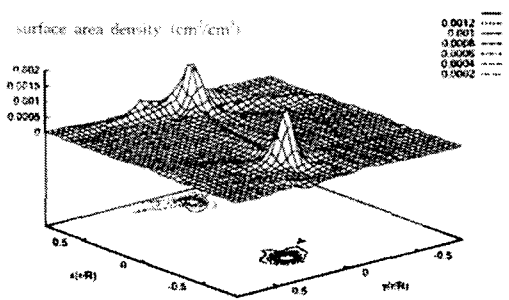


Fig. 8 Profile of surface area density without air shroud from effective 48 equiangular projections using data interpolation.

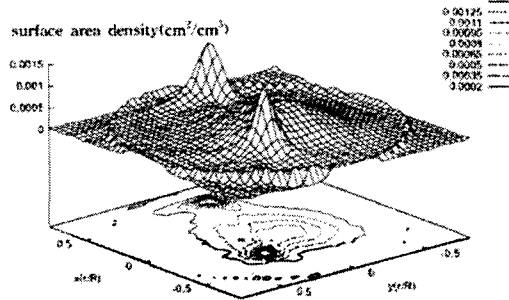


Fig.11 Profile of surface area density with air shroud from effective 48 equiangular projections using data interpolation.

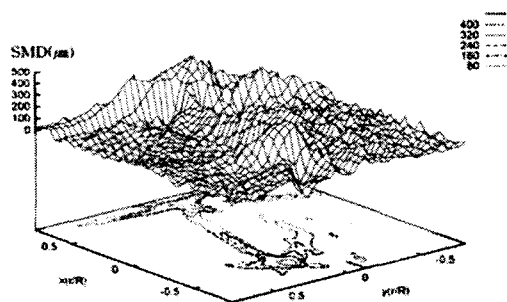


Fig. 9 Profile of SMD without air shroud from effective 48 equiangular projections using data interpolation.

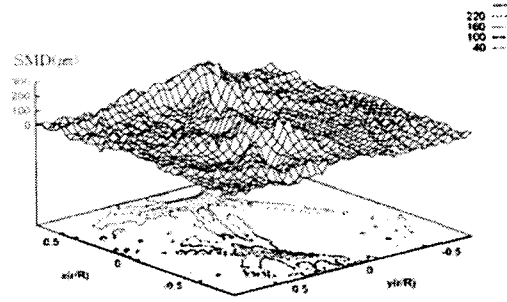


Fig. 12 Profile of SMD with air shroud from effective 48 equiangular projections using data interpolation.

5. 결론

기존인젝터와 에어슈라우드 인젝터 각각의 SMD는 130~150 μm , 30~50 μm 로 에어슈라우드인젝터의 미립화 촉진 효과를 정량적으로 확인할 수 있었으며, 이러한 결과는 인젝터 출구로부터의 한 단면의 국소점 정보를 토모그래피재구성을 통해 얻음으로써 공간적인 미립화 분포를 정밀하게 파악할 수 있었다. 인젝터의 에어슈라우드 유무에 따른 체적비, 액적표면적비, SMD 분포의 국소점 정보를 얻었으며, 에어슈라우드 조건에서 두개의 메인 제트 사이에 고원 형태로 분포하는 작은 액적들이 액적 미립화 효과를 보여주는 것으로 볼 수 있다.

참고문헌

- J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw Hill, 1989.
- A. H. Lefebre, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Cooperation, 1989.
- 지요한, "디젤 분무의 거동 및 분무 입경 분포에 관한 연구", 서울대학교 박사학위 논문, 1993.
- P. L. Kelly-Zion, C. A. DeYoung, J. E. Peters, and R. A. White, "In-Cylinder Fuel Drop Size and Wall Impingement Measurements", SAE paper 952480, 1995.
- C. Brehm, N. Carabateas, B. Cousyn, R. Mangano, F. Neveu, M. Posylkin, J. H. Whitelaw, "Evaluation of the Influence of Injector Type in a Four-Valve Engine", SAE paper 961988, 1988.
- G. Maier, S. Wittig, P.W. Manz, "Influence of Air Assisted Fuel Injection on the Mixing Preparation within the Intake Ports of SI-Engines", SAE paper 982523, 1998.
- S. K. Fulcher, B. F. Gajdeczko, P. G. Felton, and F. V. Bracco, "The Effects of Fuel Atomization, Vaporization, and Mixing on the Cold-Start UHC Emissions of a Contemporary S.I. Engine with Intake-Manifold Injection", SAE paper 952482, 1995.
- H. S. Hilbert, D. L. Boggs, and M. M. Schechter, "The Effects of Small Fuel Droplets on Cold Engine Emissions Using Ford's Air Forced Injection System", SAE paper 952479, 1995.
- H. C. Fischer and G. J. Breerton, "Fuel Injection Strategies to Minimize Cold-Start HC Emissions", SAE paper 970040, 1997.
- G. Saikalas, R. Byers, and T. Nogi, "Study on Air Assist Fuel Injector Atomization and Effects on Exhaust Emission Reduction", SAE paper 930023, 1993.
- J.M. MacInnes and F.V. Bracco, "Computation of the Spray from an Air-Assisted Fuel Injector", SAE paper 902079, 1990.
- T. Miyamoto, T. Kobayashi, and Y. Matsumoto, "Structure of Sprays from an Air-Assist Hollow-Cone Injector", SAE paper 960771, 1996.
- F. Q. Zhao, J. H. Yoo, M. C. Lai, "Spray Targeting Inside a Production-Type Intake Port of a 4-Valve Gasoline Engine", SAE paper 910115, 1991.
- J. Emerson, P.G. Felton and F.V. Bracco, "Structures of Sprays from Fuel Injectors", SAE paper 900478, 1990.
- C.H. Lee and S. H. Chung, "Tomographic Reconstruction of Asymmetric Sprays from a Twin-Hole Air Shroud Injector", *Atomization and Sprays*, Vol. 7, pp.183-197, 1997.
- A.J. Yule, S.C. Ah, P.G. Felton, A. Ungot and N.A. Chigier, "A Laser Tomographic Investigation of Liquid Fuel Sprays", *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1501-1510, 1981.
- H. M. Zhu, T.Y. Sun and N. A. Chigier, "Tomographic Transformation of Malvern Spray Measurements", *Atomization and Sprays*, Vol. 3, pp. 89-105, 1987.
- D.C. Hammond, "Deconvolution Technique for Line-of-Sight Optical Scattering Measurement in Axisymmetric Sprays", *Applied Optics*, Vol.20, No.3, pp. 493-499, 1981.
- B. J. Hughey and D. A. Santavica, "A Comparison of Techniques for Reconstructing Axisymmetric Reacting Flow Fields from Absorption Measurements", *Combustion Science and Technology*, Vol.29, pp. 167-190, 1982.