

## 화상처리 기술을 이용한 가솔린 인젝터의 분무 특성 측정

### Measurement of Spray Characteristics for Gasoline Injector Using the Image Processing Technology

이 기 형\*, 이 창 식\*, 이 창 회\*\*, 이 제 선\*\*\*  
K. H. Lee, C. S. Lee, C. H. Lee, J. S. Lee

#### ABSTRACT

A this experimental study is executed to analyze spray characteristics for air-shrouded injector and 4hole 2spray type injector used in a gasoline engine. Since spray parameters including spray penetration and angle, SMD, and atomization characteristics are very important to increase the engine performance, the image processing algorithm for measuring the non-spherical spray diameter is developed. Spray characteristics of the air-shrouded injector(2hole 2spray) and 4hole-2spray injector are analyzed respectively by this digital image processing method. Effective spray characteristics to injectors is derived from this experimentation and obtained the design guide for gasoline injector

주요기술용어 : Image processing technology(화상처리기술), Air-shrouded injector(공기 가압식 인젝터), SMD(자우터 평균 입경), Spray angle(분사 각도), Atomization(미립화), Penetration(분무도달거리)

#### 1. 서론

최근 가솔린 엔진의 연료 공급 시스템이 전자 제어식 연료 분사 시스템(EGI)으로 발전하면서 연소 특성을 향상시키기 위해서는 충분히 미립화한 연료 분무를 적절한 시기에 분사하여, 최적 혼합기 분포를 형성한 후 연소실로 수송하는 기술이야말로 엔진 성능 향상 및 배기 가스의 저감에 유효하다고 판단된다. 따라서 공기류 중에 분사된 분무의 거동 특성, 즉 연료 분무의 시간적, 공간적인 변화를 파악하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다<sup>(1)-(5)</sup>. 이와 같은 연료 분사식 가솔린 엔진의 연

소를 지배하는 혼합기 형성에 영향을 미치는 인젝터의 성능을 평가하는 파라미터 중 가장 중요한 것은 분무 위치에 따른 분무의 평균 입경과 입경의 분포이다.

이러한 분무의 거동 특성을 파악하기 위해서 지금까지 여러 가지 분무 입경 측정법(레이저 회절법, 위상도플러법등)이 개발되어 왔으나 본 연구에서는 화상처리법을 이용한 분무 입경 측정 알고리즘을 개발하여 인젝터의 분무측정을 시도하였다. 화상 처리법을 통한 입경 측정은 분무 영역에서 CCD 카메라에 순간적으로 포착된 액적들의 영상 신호를 디지털 영상으로 만든 후 화상 처리를 통해 분무 액적의 수와 입경을 측정하는 방법이다. 이와 같은 방법은 분무 지역에서 직접적으로 영상을 얻는 실시간 측정방법으로서, 편리하고 신속하며 입경측정은 물론 분무액적의 국소적인 수밀도까지 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 분무 액적

\* : 한양대학교 기계공학과  
\*\* : 한양대학교 대학원  
\*\*\* : 주식회사 브이·텍

화상을 직접 얻기 때문에 입경을 구하기 위해서는 초점에 맞추어진 액적들을 선별하는 과정이 필요하고, 초점에 맞추어진 액적수가 많지 않아서 통계적인 양을 얻기 위해서는 많은 영상을 처리해야하는 단점이 있다. 한편, 기존의 입경 측정 장치에 사용되어 온 알고리즘은 입의 형상을 가지는 액적에 대하여 최소한의 오차를 가지는 구형 액적으로 변환하여 처리하고 있지만, 실제 분무 유동장에서는 액적의 모양이 분무축을 따른 관성 및 연료의 점성 등으로 인하여 완전한 구형의 액적뿐만 아니라 다양한 형태의 액적으로 구성되어 있다. 따라서 완전한 구형의 입자들만을 대상으로 입경을 측정하여 분무 유동장을 대표하는 파라미터로 이용하는 것은 타당하지가 못하다.

본 연구에서는 비구형 액적에 대한 형상 인식 알고리즘과 분무해석에 적합한 데이터 통계 처리기술을 개발함으로써 입경 측정장치의 측정 정도를 향상시키고 동시에 이 기술을 실제 인젝터의 분무측정에 적용시킬 수 있는 기술을 확보하였다. 그리고 실제의 분무 측정 실험장치를 구성하여 여기서 얻은 영상 자료를 개발한 알고리즘에 적용시켜 분무 특성을 규명할 뿐만 아니라 측정된 분무에 대한 정보들을 정확하게 분석하여 가솔린 인젝터 개발에 필요한 설계 지표를 구하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 입경 측정용 광학 시스템

본 실험에서 사용한 실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 연료는 가솔린을 사용하였으며 분사압은 300kPa로 보조 공기압에 상관없이 일정하게 유지하였으며, 일반 대기 중에서 실험을 수행하였다.

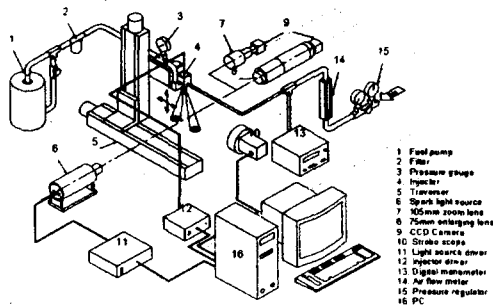


Fig. 1 The schematic diagram of spray visualization system

인젝터는 자체 제작한 인젝터 구동 드라이버에 의해

제어되며 경과시간은 분사 신호 입력시점을 기준으로 하였다. SMD 측정을 위한 광원으로는 광 지속시간이 짧은 스파크 광원을 이용하였으며, 거시 분무 거동 촬영은 스트로브 스크프(15W)를 광원으로 사용하였다. 또한 카운트 보드를 이용하여 인젝터와 광원부, CCD 카메라를 동기시켜 취득하였다.

### 2.2 실험 인젝터 및 측정 영역

본 실험에서는 가솔린 엔진에 널리 사용되는 4공 2분무형과 공기 가압식(2공 2분무형) 인젝터를 사용하였고, 아래 그림은 각각의 인젝터에 대한 형상을 나타낸 그림이다. Fig. 2는 주 분무각도(stream angle, B)가  $28^\circ \pm 4$ 이고 한 방향의 분무각도(spray angle, C)가  $10^\circ$ 인 4공 2분무 인젝터이며, Fig. 3은 공기 가압식 인젝터와 노즐 부위의 개략도이다. 공기 가압식 인젝터는 보조 공기 유입을 위하여 어댑터를 인젝터 팁에 일체형으로 부착하였다. 이 어댑터는 흡기관과 연결되어 흡기 포트와의 차압에 의해 보조 공기가 유입되며 유입된 보조 공기는 모든 방향에 대해서 분출되어 액체 연료와 혼합되게 되는 외부 혼합 방식을 택하고 있다<sup>(6)</sup>. 이러한 공기 가압식 인젝터는 흡기관 부압에 의해 공기가 유입되나 본 연구에서는 압축기를 이용한 가압 방식에 의하여 공기를 공급하고 디지털 압력계와 레귤레이터를 이용하여 정압 상태에서 실험을 수행하였다.

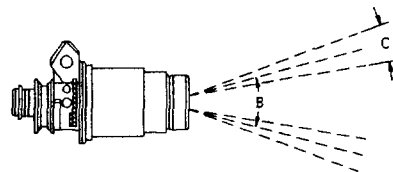
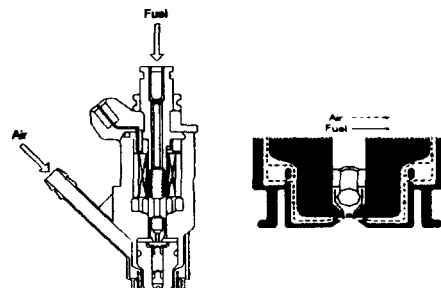


Fig. 2 Configuration of 4 hole 2 spray injector



(a) Air-shrouded injector (b) Adaptor shape for supplying air

Fig. 3 Detail configuration of air-shrouded injector

Fig. 4는 본 연구에서 분무 가시화한 영역을 도시한 그림이다. 인젝터 팁에서 분사 초기 분무 성장 과정을 측정하기 위하여 가로 12mm, 세로 8mm의 영역에 대하여 가시화 실험을 수행하였으며, 거시 분무 성장 과정을 측정하기 위해서는 가로 80mm, 세로 110mm 영역에 대하여 실험을 수행하였다. 그리고, SMD 측정을 위해서는 인젝터 팁으로부터 하류방향 80mm 지점에서 가로 1.2mm, 세로 0.9mm 영역을 가지는 측정 영역에 대하여 2.5mm 간격으로 13 또는 25개 측정점의 평균 입경을 측정하였다. 이때 화상 취득 시간은 분무가 완전히 발달되었다고 판단되는 분사 개시 후 30ms가 경과한 시점으로 정하였다.

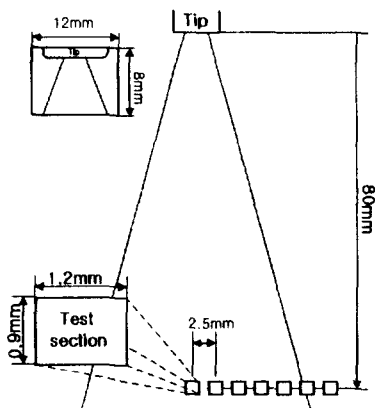


Fig. 4 Measuring area of SMD and spray pattern

2.3 화상처리 알고리즘

Fig.5는 본 연구에서 입경 측정을 위하여 개발한 알고리즘의 흐름도를 나타낸 그림이다. 분무 입경 측정원리는 CCD 카메라를 통하여 액적의 분무 화상(raw image)을 취득하게 되고, 이 영상신호를 디지털화한 후 촬영된 액적의 형상을 인식하여 액적의 수와 입경을 측정하게 된다. 취득된 8bit 디지털 화상은 화소(pixel)들로 구성되며, 이 화소들은 256단계(0~255)의 밝기(grey level)를 가진다.

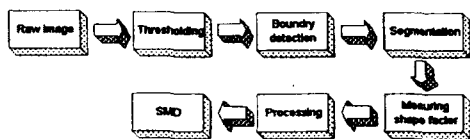


Fig. 5 Flow chart of image processing algorithm

또한 본 연구에서는 액적을 선별하기 위하여 이러한 화상을 적절한 명암 판단 기준치에 의해 2단계의 밝기를 가지는 이진 화상(threshold)으로 바꾸었다. 이러한 처리과정에서 명암 판별 기준치 선정 및 액적 크기에 대한 상대적인 화소 크기에 따라 영상 정보가 변형될 수도 있다.

명암 판별 기준치를 적용하여 변화시킨 이진화상에서 액적들을 인식하여 액적과 배경의 경계를 결정하고 Fig. 6과 같은 정의들을 이용하여 채택 가능한 각각의 입자들을 선별하였다.

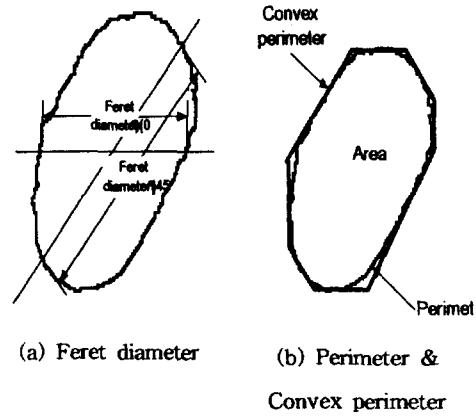
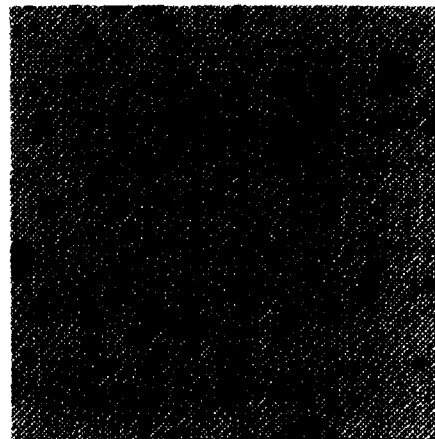
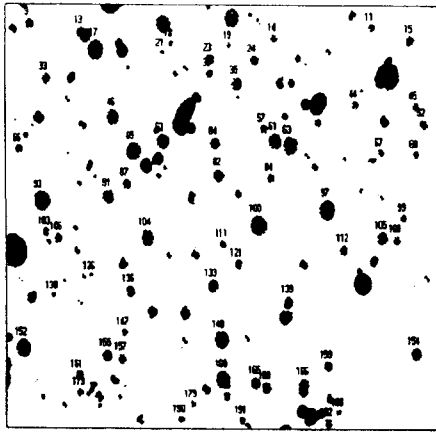


Fig. 6 Definition of shape factor

이러한 과정을 거친 결과를 Fig. 7에 나타내었다. (b)의 그림에서 선택된 입자들이 점유하고 있는 화소수와 실제 크기를 알고 있는 입자를 측정후 계산한 확대비의 상관 관계를 이용함으로써 SMD를 계산하였다.



(a) Raw image



(b) The result of segmentation

Fig. 7 The example of image processing

본 연구에서 개발한 입경 측정 알고리즘의 측정 신뢰도를 알아보기 위하여 이미 크기를 알고 있는 입자가 에칭(etching)되어 있는 레티클(reticle)을 측정하여 실제값과 측정값을 비교하였다. 본 입경 측정 시스템의 CCD의 단위 화소당 차지하는 실제 크기를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 입경이 클수록 실제 차지하고 있는 화소의 개수는 선형적으로 증가하고 있는 것을 알 수가 있으며, 입경이 작은 경우에는 다소 비선형적으로 변하고 있어 이 부분에서 측정치의 약간의 오차가 예상된다. 따라서 이러한 오차의 범위를 알아보기 위해서 두 결과의 오차를 계산하여 Fig. 9에 나타내었다.

이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 25 $\mu$ m 이상의 입경인 경우는 오차가 최대 5%이내에 존재하므로 본 연구에서 사용하고자 하는 비교적 큰 입경들이 분포하는 가솔린 인젝터의 실험에는 본 측정 시스템의 적용이 적합함을 알 수 있다.

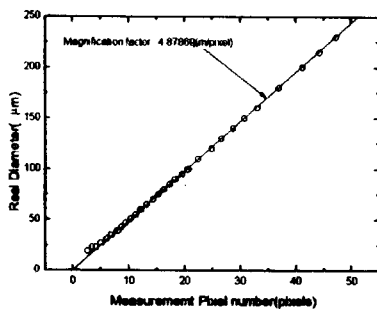


Fig. 8 The relation of pixel number and real diameter

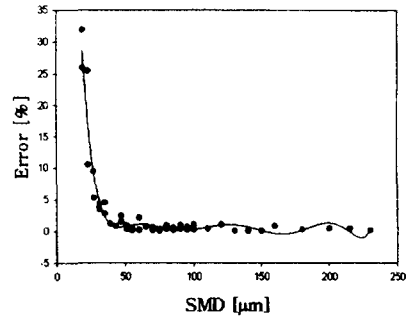


Fig. 9 The relation of error percentage and diameter

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 비구형 액적에 대한 형상 인식 알고리즘의 적용 결과

현재 PDPA나 Melvern 등 대부분의 입경 측정 장치는 액적이 완전 구형이라는 전제하에 분무 입경을 측정하고 있다. 하지만 본 연구에서 사용한 인젝터와 같이 저압 인젝터의 경우에는 액주에서 분리된 입의 형상의 큰 액적들에 의해 비구형 액적들이 존재하므로 정확한 입경 측정이 이루어지지 않는다. 실제로 분무 액적 화상을 취득한 결과 분열 과정에 있어서는 구형의 액적뿐만 아니라 액주 액사 및 다양한 기하학적 형상을 가지는 액적들이 존재함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 이런 입의 형태의 액적들의 데이터를 취득하기 위해서 다양한 형상의 액적에 대하여 평균 페렛 지름(mean Ferret diameter)을 유효 입경으로 정의하고 SMD를 측정하였다. 페렛 지름(feret diameter)은 다양한 형태를 지니는 입자에 대하여 지름을 특정 각의 축을 기준으로 축의 좌우 면적이 같을 때, 이 축과 입자의 외형선과 만나는 두 점 사이의 거리로 정의한 것이다. 본 알고리즘에서는 15° 단위로 12개의 축에 대하여 페렛 지름을 구하고 이를 평균한 값을 액적의 유효 입경으로 정의하였다. 1000개의 액적을 샘플링하여 구한 평균 페렛 지름과 등적 지름(equivalent diameter)에 대한 관계를 구하여 그결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 12개의 페렛 지름을 측정하여 구한 평균 페렛 지름과 등적 지름은 거의 일치함을 보여주고 있다.

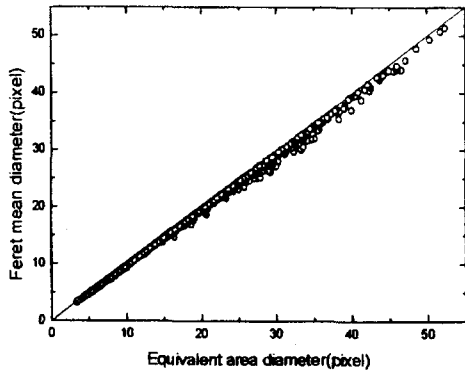


Fig. 10 Relationship between feret mean diameter and equivalent area diameter

이 결과로부터 여러 개의 페렛 지름과 평균 페렛 지름을 측정함으로써 형상의 중형비등 액적의 형상에 대한 정보를 파악할 수 있었다.

한편, 본 연구의 화상 처리 방법은 3차원적인 액적의 분포를 투영된 2차원의 정보로 취득하는 광학계의 특성상 액적 화상은 초점에서 벗어나 정확한 외형선의 추출이 불가능한 경우와 여러 개의 액적들이 서로 겹쳐 개개의 외형선 추출이 불가능한 경우가 존재한다. 이러한 형상을 가지는 개체들에 대한 정보를 배제시키기 위하여 Fig. 6과 같은 기하학적 형상 인자들 중 무차원인 Elongation, Compactness, Roughness 값을 액적의 유효성을 판별하는 기준으로 삼고, 다양한 액적 형상에 대하여 형상 인자를 측정하고 통계적으로 경계치를 선정하였다. 다음 Fig. 11은 여러 형상의 액적들 중에 경계치를 기준으로 위의 선정 인자들을 적용하여 유효 액적들을 나타낸 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 이러한 형상 인자를 통한 유효 액적 판단 과정은 분열 과정에 있거나 여러 개의 액적이 겹쳐 하나의 형상을 보이는 개체들을 배제시키는 데 만족스러운 결과를 나타내었다.

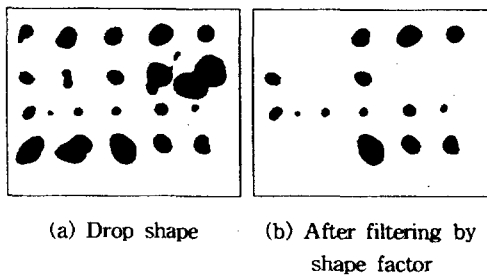


Fig. 11 Determination of effective drop shape by shape factor

### 3.2 4공 2분무 인젝터의 분무 특성

Fig. 12는 4공 2분무형 인젝터의 전체적인 분무 구조와 위치에 따른 분열 과정을 가시화한 화상이다. 취득 화상에서 알 수 있듯이 팁 선단부에서 액막이 형성된 후 하류 방향으로 갈수록 부채꼴 형태로 발달되면서 액막은 얇아지고 공기와의 저항과 액막 내부의 국소적인 교란에 의해 표면이 거칠어지면서 액적과 액주로 분열되는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 분무 중심축 영역에서는 팁 선단부 근처에서부터 작은 액적이 형성되며, 분무 주류(point 2)의 액막에서 분열된 액적들이 축 중심(point 1)과 분무 외곽(point 3)에서 관찰되어지는데 축 중심에서는 양쪽 액막에서 분열된 액적들이 모여 분무 외곽보다 많이 분포하고 있는 것을 관측할 수 있다.

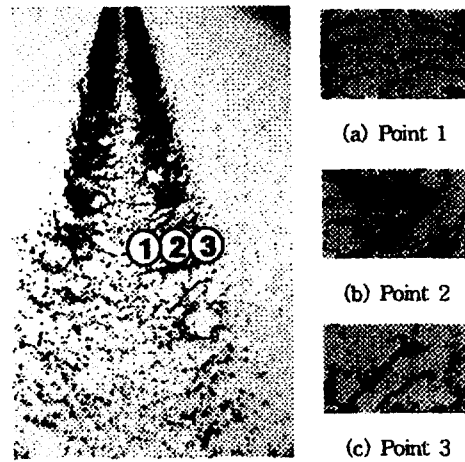


Fig. 12 Photograph of spray structure

Fig. 13의 그림은 거시적인 분무 과정을 시간 경과에 따라 가시화한 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 분무 각이 19° 인 축대칭의 분무를 형성하면서 시간이 경과됨에 따라 거의 선형적으로 분무 도달 거리가 증가함을 알 수 있다

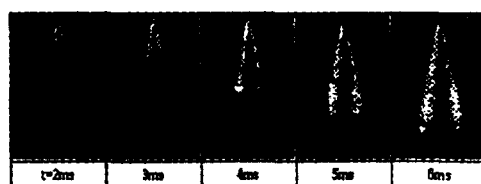
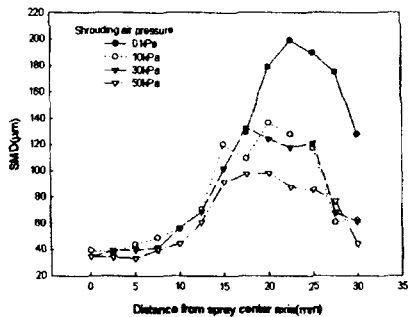


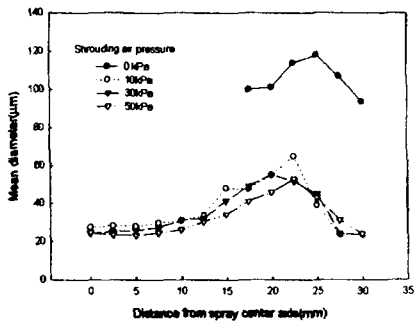
Fig. 13 Spray growth with elapsed time

3.3 공기 가압식 인젝터의 분무 특성

Fig. 14는 인젝터 팁 중심에서 하류방향 80mm인 지점에서 반경방향으로 0~30mm 지점까지 2.5mm 간격으로 13개의 측정점에 대하여 1.2mm(H)×0.9mm(V)의 영역내의 분무 액적 화상을 100장 취득하여 화상 처리를 통해 구한 SMD와 평균 입경을 나타낸 결과이다.



(a) Radial distribution of SMD



(b) Radial distribution of mean diameter

Fig. 14 Radial distribution of SMD and mean diameter at 80mm position from injection tip

보조 공기의 유입시에는 중심에서 SMD가 40 $\mu$ m이하로 미립화가 아주 잘 이루어지고 있으며 반경 방향으로 갈수록 SMD가 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 비교적 큰 액적들은 분무류의 바깥쪽에 존재하며 중심에서는 미세한 액적들과 기화된 연료가 섞여 있는 증기군(vapor cloud)형태의 분포를 관측할 수 있다. 이러한 분무 특성은 흡기관 분리벽(siamese)의 벽류 생성을 줄일 수 있다고 기대된다.

또한 보조 공기압 변화에 따른 경과 시간별 분무 도달 거리(spray penetration)를 정량적으로 측정된 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 보조 공기압이 증가할수록

분무 도달 거리는 경과 시간에 따라서 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 동일 시간대에서의 분무 도달 거리는 압력이 높을수록 도달거리가 길어짐을 알 수 있다

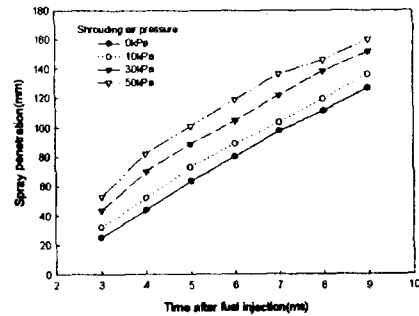


Fig. 15 Effect of shrouding air pressure on spray tip penetration

4. 결론

본 연구를 통하여 비구형 액적에 대하여 분무 입경을 측정할 수 있는 화상처리 알고리즘을 개발하였고, 이를 이용한 입경측정장치를 4공 2분무(4hole 2spray)형 인젝터와 공기 가압식 2공 2분무 인젝터에 적용시킴으로써 각각에 대하여 분무특성을 파악할 수 있었다.

1) 기존의 입경 측정 장치에서는 측정할 수 없었던 비구형 액적에 대하여 평균 페릿지름과 다양한 형상인자들을 적용한 본 연구에서 개발한 알고리즘을 사용함으로써 액적 개개의 정보를 측정할 수 있었다.

2) 4공 2분무형 인젝터의 분무 특성은 축 중심과 분무외각에서 분무 주류의 액막에서 분열된 액적들을 관측할 수 있었고, 분무각이 일정한 축대칭 구조이며 시간 경과와 더불어 선형적으로 분무 도달거리가 증가함을 알 수 있었다.

3) 보조 공기압이 증가할수록 분무 도달거리가 증가하고 분무각이 협소해짐을 알 수 있었다. 한편, 팁 중심에서 하류방향 80mm지점에서 SMD측정 결과 보조공기 유입시 분무 축 중심부근에서는 40 $\mu$ m이하의 작은 액적들과 기화된 연료가 섞여 있는 증기군이 형성되는 것이 관측되었으며, 반경

방향으로 갈수록 SMD가 증가하는 경향을 알 수 있었다.

4) 보조공기 압력의 증가에 따라 분무 도달거리가 선형적으로 증가하고 있으며, 그 증가율은 분사후 경과시간에 무관하게 일정함을 알 수 있었다.

### 후 기

본 논문은 7차년도 경기도 산·학·연 지역 컨소시엄 사업의 연구비에 의해 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참고 문헌

1. F. Q. Zhao, M.C. Lai, D.L. Harrington, "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injector for Four-Valve Engine", SAE Paper No.920705
2. T. Nogi, Y. Ohyama, T. Yamauchi, H. Kuroiwa, "Mixture Formation of Fuel Injection Systems in Gasoline Engines", SAE880558, 1988
3. M. N. Lisa, M. W. Robert and A. D. James, "Fuel Droplet Entrainment Studies for Minimization of Cold-Start Wall-Wetting", SAE No.950508
4. R. D. Reitz and R. Diwaker, "Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays", SAE paper 860469, pp. 3218~3227, 1986
5. Mugele R. A., and Evans, H. D., "Droplet Size Distributions in Spray", ind. Eng. Chem., Vol.43, No.6, pp. 1317-1324, 1951
6. 정재권, 이기상, 유준호, "α-II Engine의 Port Injection Sprays 특성 분석", 현대자동차 학술대회 논문집, pp. 1~18, 1996