

고압환경에서 이미지 프로세싱 기법을 이용한 액적크기 측정

임병직[†] · 길태옥* · 정기훈* · 윤영빈**

Drop Size Measurement using Image Processing Method under High Ambient Pressure Condition

Byoungjik Lim, Taeock Khil, Kihoon Jung and Youngbin Yoon

Abstract

Drop size is one of the most important parameters which are control the performance of the engine using liquid fuel/oxidizer and drop formation is mainly controlled by aerodynamic force caused by ambient gas. Because of this, empirical data and correlation acquired under standard ambient condition are not valid. So experiments under high ambient pressure condition to measure the drop size using image processing method And find the empirical correlation between SMD and chamber pressure(density), injection velocity.

Key Words : Image Processing method(이미지 프로세싱 기법), Reticle (격자), SMD

1. 서론

분무 특성을 파악하기 위해 측정되는 값들 중에서 가장 많이 이용되고 있는 대표적인 것이 액적의 크기로서 액체 연료를 사용하는 연소기의 경우 액적의 크기와 그 분포는 연소 성능에 결정적인 영향을 미쳐 전체적인 연소기의 효율과 출력을 결정하는 중요한 인자가 된다.

특히 액체 연료 사용의 대표적인 예가 되는 액체 로켓이나 자동차 엔진의 경우 작동 영역이 일반 상압 조건이 아닌 고압의 환경이기 때문에 상압에서의 분사 실험만으로는 타당한 분무 액적의 크기를 예측하는 것이 불가능하고 이로 인해 모델링을 통한 수치 계산 역시 불가능하기 때문에 고압에서 압력에 따른 주위 공기의 밀도의 영향에 대한 실험이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 액체 로켓에 흔히 사용되는 충돌형 분사기(like-doublet injector)에 의해 생성되는 분무의 특성을 파악하는 것이 주된 연구 목표이며, 그 중에서 액적의 크기 측정 방법에 대해 주로 다루게 된다.

일반적으로 액적의 크기를 측정하기 위해서 많이 이용되는 것은 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer)와 Malvern 등과 같이 레이저를 이용한 방법으로서 짧은 시간에 많은 양의 자료를 처리할 수 있고, 정확도 역시 널리 인정을 받고 있다. 하지만 본 연구에서는 몇 가지 제약 조건으로 인해 레이저 계측 방법의 적용이 불가능하여 고전적으로 많이 이용된 이미지 프로세싱 기법을 이용하여 액적의 크기를 측정하였다.

2. 실험

2.1 실험 조건

<Table.1> Experimental condition

주위압력	1, 2, 3, 4, 5, 8, 12, 20, 30, 40 bar
분사속도	3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30 m/s

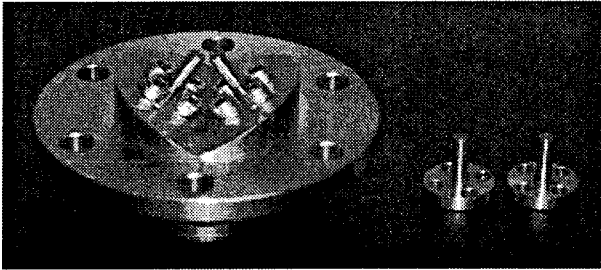
[†] 서울대학교 기계항공공학부 로켓추진연구실
E-mail : tachyon0@snu.ac.kr

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

Table.1 에서와 같이 10 가지 압력의 조건과 8. 가지 분사속도 조건을 통해 주위 기체의 밀도와 분사속도에 따른 액적크기 변화를 측정하였다.

2.2 실험 장치



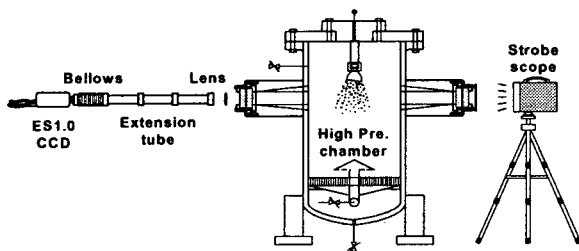
<Fig.1> Injector

실험에 사용된 인젝터는 총돌각 $2\alpha=60^\circ$, 지름 $D=0.7\text{mm}$ 이고, 오리피스 내부는 sharp edge 로 되어 있어서 분사되는 제트는 난류의 특성을 가지게 된다.

고압 환경을 만들기 위해 고압챔버를 제작하여 압력을 상승시키면서 분사속도에 따른 실험을 수행하였다. 제작된 고압챔버(Fig.2)는 최대 50bar 까지 실험이 가능하고 200L 의 내부 용량을 가지고 있다. 또한 슬레노이드 밸브를 이용하여 챔버의 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 하였으며, 액체 연료의 분사시에 발생할 수 있는 서리를 방지하기 위해 가시화창에 기체 막을 형성할 수 있도록 하였다.

사용된 카메라는 해상도 1008x1018 의 ES1.0 (KODAK)를 이용하였고, 순간 영상을 획득하기 위해 4 μsec 의 지속 시간을 가지는 strobe scope 를 광원으로 이용하였다.

또한 적절한 배율을 가진 이미지의 획득을 위해 $f=400\text{mm}$ 를 가지는 볼록렌즈를 이용하고 경통을 제작하여 CCD 카메라에 상이 맺히도록 하여 1:1 정도의 배율을 얻을 수 있었고, 이때 화소 하나가 9.9984 μm 의 물리적인 길이를 가진다.



<Fig.2> Experimental schematic for measuring drop size

2.3 실험 방법

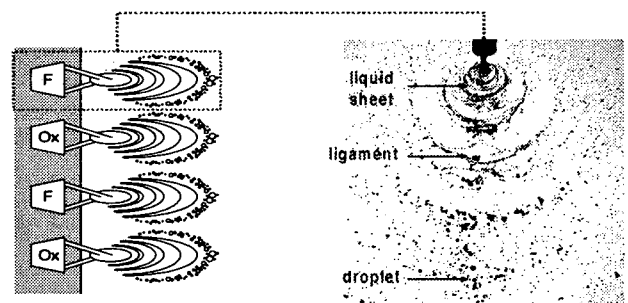
본 연구에서 액적 크기 측정에 널리 이용되고

있는 PDPA 또는 Malvern 을 사용하지 않은 것은 PDPA 는 특정 범위의 액적 크기를 측정하도록 되어 있기 때문에 실험 대상인 총돌형(like-doublet) 인젝터의 경우와 같이 수십 μm 에서 수백 μm 의 넓은 영역의 액적이 분포하는 경우에는 그 측정 영역을 벗어나기 때문에 정확한 액적 크기 측정이 불가능하기 때문이다..

또한 Malvern 은 측정하는 영역과 회절 신호를 받아들이는 detector 사이의 거리 제한이 있어 그 이상의 거리에 detector 가 있게 되면 vignetting 현상에 의해 측정 오차가 발생하고, 고압의 환경에서 분무장 주위에서 발생하는 압력의 변화로 인해 밀도차이가 발생하면 이것이 다시 회절에 영향을 주기 때문에 정확한 측정에 어려움이 따른다 [1][2].

따라서 본 연구에서는 간접 사진(shadow image)을 촬영하고 이미지 프로세싱 과정을 거쳐 액적의 크기를 측정하였다.

총돌형 인젝터의 분무는 Fig.3 에서와 같이 제트의 총돌에 의해 액막(liquid sheet)이 형성되고 액막은 주위 공기와의 상호 작용에 의해 액주(ligament), 액적(droplet)으로 분열된다. 이때 액적의 크기를 측정함에 있어 분사조건에 관계없이 동일한 위치에서 측정을 하는 것은 물리적으로 의미가 없다. 따라서 액막과 액주가 모두 분열되어 액적이 되는 위치를 미리 측정하여 그 위치에서부터 2cm 하방에서 액적의 크기를 측정하였다.



<Fig.3> General characteristics of breakup of impinging jet injector

3. 이미지 프로세싱 기법

3.1 측정과정

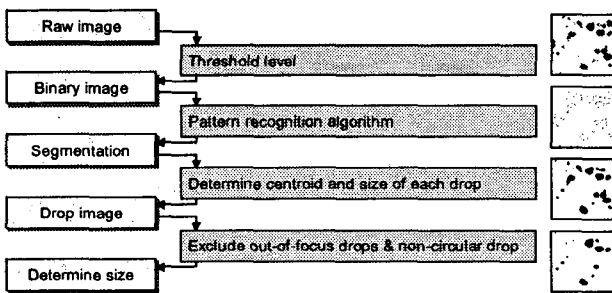
이미지 프로세싱 기법에 의한 액적크기 측정은 촬영된 이미지를 통해 threshold level 을 정하고 이 값을 이용하여 이미지를 이진(binary)화 시키게 된다. Threshold level 을 결정하는 방법에 대해서는 그동안 많은 연구가 진행되었다. Ahlers⁽³⁾와 Bertolini⁽⁴⁾ 등은 배경명도와 액적명도의 중간값을

취하는 방식을 사용하였고, Kim⁽⁵⁾과 Kim⁽⁶⁾ 등은 전체 이미지에 대한 threshold 값을 이용하여 근사적인 액적 크기를 구하고 액적 각각에 대해서 다시 한번 threshold level 을 정하는 방식을 이용하였다. 이러한 두 단계의 방식을 택한 것은 광원이 비취지는 영역에 따라 배경 명도의 밝기 차이를 보정해주기 위한 것이다.

Threshold level 이 결정되면 생성되는 이진 파일을 이용하여 액적의 외곽선에 해당하는 부분을 찾아내는데, 4-adjacent 에 근거하여 대상 화소(pixel)의 상하좌우 네 방향에 모두 유효화소(액적에 해당하는 화소)가 존재하면 액적 내부화소로 인정하고 네 방향중 어느 한 곳도 유효 화소가 없다면 외곽선에 해당하는 화소로 인정하게 된다 [7].

외곽선에 해당하는 화소가 결정되면 그 이후에 각 폐곡선으로 연결된 화소들에 액적 번호에 해당하는 이름을 부여하여 폐곡선 하나가 액적 하나를 표현할 수 있도록 분리되게 된다. 이렇게 하여 각 액적들이 액적 고유 번호로 분리가 되면 하나씩 계산하는 과정을 거쳐 액적의 크기를 얻어낸다.

이러한 일련의 과정을 Fig.4 에 도식화하였다.



<Fig.4> Image processing Procedure

3.2 신뢰성 검증

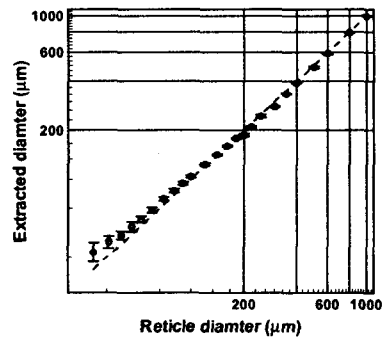
<Table.2> Droplet size at reticle(μm)

A	1000, 800, 600, 500
B	400, 350, 300, 250, 220, 200
C	180, 160, 140, 120, 100, 90, 80
D	70, 60, 52, 46, 40, 34, 28

앞서의 절차에 따라 획득하게 되는 액적의 크기가 과연 실제 크기와 일치하는지 과정이 필요하다. 즉, 개발한 기법의 신뢰성을 확보하여야 하는데, 이를 위해 크기를 알고있는 격자(reticle)를 이용하여 초점이 맞은 상태에서 기법을 적용하여 실제 액적 크기와 측정값과의 차이를 확인하였고, 카메라 또는 격자가 초점 위치에서 벗어나게 되었을 때의 측정 오차를 확인하였다.

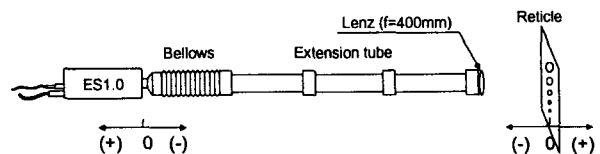
실험에 사용된 reticle 은 네개의 군으로 나뉘어져 있는데 각각의 군에는 액적이 크기가 순서대로 나열되어 있다. Table.2 에 reticle 에 존재하는 액적의 크기를 표시하였고, Fig.5 는 실제 액적의 크기와 측정된 값을 비교한 그래프이다.

그래프에서 확인할 수 있듯이 일정 액적크기 이상의 경우에는 측정 결과와 실제 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다. 하지만 작은 액적(40μm 이하)에서는 측정 값과 reticle 의 차이가 크게 나타나는데, 이것은 이미지 프로세싱 기법 자체의 문제이기 보다는 작은 액적으로 갈수록 회절이 증가하여 발생한 광학적인 한계라고 생각된다. 따라서 현재의 시스템에서 40μm 이하의 액적을 10% 미만의 오차로 측정하는 것은 불가능하지만 현재 실험 대상이 되는 인젝터에서 발생하는 액적의 평균 크기가 수백μm 단위이기 때문에 40μm 이하의 액적은 큰 영향을 주지는 못한다.



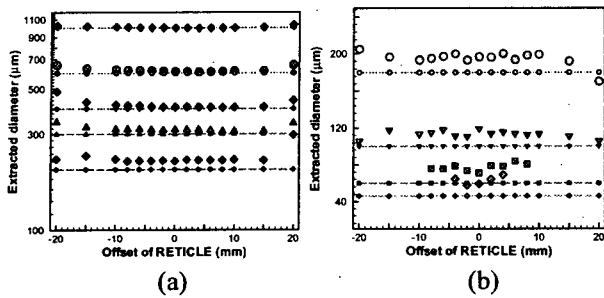
<Fig.5> Comparison of diameter between reticle and extracted diameter at focal plane

한편, 총돌형 분사 인젝터의 특성상 대부분 질량이 일정 액막의 두께 안에 존재하지만 액적으로 분리되면서 공간적으로 분포하게 되고, 이로 인해 측정되는 액적이 초점면에서 벗어나는 문제가 발생하게 되는데, Fig.6 은 초점에서 벗어난 액적의 영향을 살펴보기 위한 실험방법이고 Fig.7 은 측정 결과를 나타내고 있다.



<Fig.6> Schematic for investigation of the effect of out-of-focus on drop size measurement

초점에서 벗어난 액적을 측정하게 되면 가장자리가 흐려지면서 액적의 경계가 실제 액적과 다르게 증가하거나 감소하게 된다. 이것은 Fig.7 에서 확인이 가능한데, 액적의 크기가 큰 (a)의 경우는 큰 변화없이 비슷한 값을 가지지만, 액적 크기가



<Fig.7> Effect of out-of-focus on drop size (reticle movement, the signs \pm follow the definition of Fig.6)

작은 (b)의 경우는 초점에서 벗어나면서 그 차이가 실제 크기의 30% 이상이 되는 경우도 발생하고 심지어는 측정조차 되지 않는 경우도 있다. 초점면에서 벗어난 액적을 판단하는 기준으로 많이 이용되는 것이 Weiss⁽⁸⁾가 사용한 방법으로 액적 gray level의 기울기를 이용하는 것이다. 액적에서 초점이 잘 맞은 경우는 contrast가 높아서 배경화소에서 액적화소로 바뀌는 과정에 급격한 기울기의 변화가 발생하는 것을 이용하는 것이다. 하지만 단순한 기울기로는 액적의 크기에 따른 기울기 차이를 고려하지 못하기 때문에 Kho⁽⁹⁾는 기울기를 액적에서의 최대 기울기로 정규화한 gradient indicator(GI)를 제시하여 액적의 크기에 따른 차이를 보정하였다. 본 연구에서도 GI를 이용하여 초점면에서 벗어난 액적을 계산에서 제거하는 방법을 이용하였다.

4. 실험결과

Fig.8, Fig.9 에 이미지 프로세싱 기법을 통해 획득한 액적의 크기를 압력과 속도의 변화에 따라 SMD (sauter mean diameter)로 표시하였다.

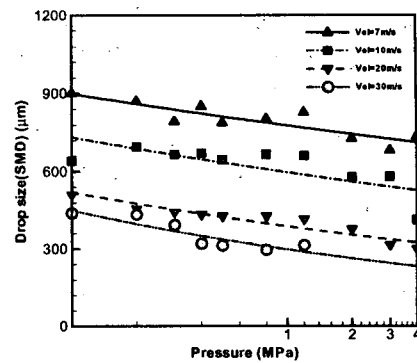
실험 결과를 통해 액적의 크기는 주위 기체의 밀도가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있었고, 이것은 공기와 분사액체의 마찰 증가에 따른 예상 가능한 결론이며, 그 감소율은 기존의 연구자들이 실험과 이론적인 계산에 비해 작게 나타났다.

5. 결 론

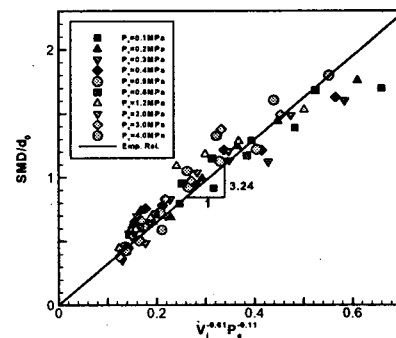
신뢰도 검증을 마친 이미지 프로세싱 기법을 이용하여 고압환경에서 압력과 속도의 변화에 따른 액적 크기를 측정하고 실험식을 구하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(M1-0104-00-0058)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.



<Fig.8> Drop size with increasing chamber pressure



<Fig.9> Empirical: correlation between SMD and velocity, chamber pressure

참 고 문 헌

- 1) Dodge, L.G., 1984, Calibration of Malvern particle sizer, applied optics, Vol.23, pp.2415~2419
- 2) Wild, P.N., and Swithenbank, 1986, Beam stop and vignetting effects in particle size measurement by laser diffraction, applied optics, Vol.25, pp.3520~3526.
- 3) Ahlers, K.D., and Alexander, D.R., 1985, Microcomputer based digital image processing system developed to count and size laser-generated small particle image, Optical engineering, Vol.24, pp.1060~1065.
- 4) Bertolini, G.P., Oberdier, L.M., and Lee, Y.H., 1985, Image processing systems to analyze droplet distributions in sprays, Optical engineering, Vol.24, pp.464~469
- 5) Kim, K.S. and Kim, S.S., 1994, Drop sizing and depth-of-field correction in TV imaging, Atomization and sprays, Vol.4, pp.65~78.
- 6) Kim, J.Y, Chu, J.H., and Lee, S.Y., 1999, Improvement of pattern recognition algorithm for drop size measurement, Atomization and sprays, Vol. 9, pp.313~329.
- 7) Jahne, B., 1995, Digital image processing, Springer-Verlag, Berlin,
- 8) Weiss., B.A., Derov, D.D., and Simmons, H.C., 1984, Fluid particle sizing using a fully automated optical imaging system, Vol.23, pp.561~566.
- 9) Kho, K.U., and Lee, S.Y., 2000, Determination of background gray-level for accurate measurement of particles in using image processing method, J. of KSME, Vol.24, pp.599~607.