

이미지프로세싱 기법을 이용한 액적크기 측정

임병직[†] · 정기훈* · 길태욱* · 윤영빈*

Droplet size measurement using image processing method

Byoungjik Lim[†], Kihoon Jung*, Taeock Khil*, and Youngbin Yoon*

Abstract. Droplet size is one of the most important parameter which controls the performance of the combustion system using liquid fuel or oxidizer. Droplet formation and its size are mainly affected by the injection velocity and ambient gas density. Recently, droplet size measurement was conducted by PDPA or Malvern particle analyzer using laser light. But at this paper image processing method was developed to measure droplet size. And its validation was investigated with reticle.

Key Words : 이미지프로세싱 기법(image processing method), 액적크기(droplet size), 액적크기 분포(drop size distribution), Rosin-Rammler distribution, 분사기(injector), 사진(image), 미립화(atomization)

Nomenclature

d	droplet diameter	d_0	orifice diameter
D_{32}	sauter mean diameter		
P_c	ambient gas pressure	U_j	injection velocity

1. 서 론

액체 연료를 사용하는 연소시스템에서는 분사기를 통해 연료를 분사하게 되고, 분사된 연료는 상호충돌, 회전력, 자체의 표면장력, 주위 공기와의 마찰 등에 의해 분열된다. 이와 같은 분열에 의해 액적이 발생하고 발생된 액적의 크기는 연소시스템의 성능을 결정하는 중요한 변수로 작용한다. 하지만 액적크기와 그 액적 크기의 분포에 대해 이론적인 모델링이 확립이 되지 않은 상태이기 때문에 분무의 특성을 파악하는 것은 실험을 통해 대부분 이루어지고 있다.

최근의 액적크기 측정은 대부분 레이저를 이용한 기법(PDPA, Malvern etc.)에 의존하고 있다. 하지만, 레이저 기법 자체가 가지고 있는 몇 가지 제약 조건들로 인해 본 논문의 연구대상이 되는 분무장에서는 기법의 적용이 불가능하다. 예를 들어 위상 도플러 기

법을 이용하는 PDPA는 사용되는 수광렌즈의 특성에 따라 측정 가능한 액적크기가 결정되는데, 본 논문에 사용되는 분사기에서 발생하는 액적크기의 범위를 전체적으로 포함하지 못하고, 수광렌즈를 교체하여 범위를 넓히게 되면 측정되는 액적크기간의 해상도가 낮아진다. 또한 빛의 회절현상을 이용하는 Malvern은 수광부와 분무장이 존재하는 영역 사이가 일정거리 이하가 되어야 하는 제약 조건(vignetting⁽¹⁾)이 존재하는데, 본 실험에서는 주위 기체밀도의 영향을 파악하기 위해 고압챔버를 제작하여 이와 같은 조건을 만족 시킬수가 없었다.

이와 같은 제약조건들로 인해 신뢰도에서 인정을 받고 있고, 많은 결과를 짧은 시간에 얻을 수 있는 레이저기법을 적용하지 못하고 이전에 많이 이용된 이미지프로세싱 기법을 본 실험에 적용하였다. 이미지프로세싱 기법은 촬영된 사진의 후처리 과정을 통해 결과를 도출하는 방식으로 레이저를 이용한 기법에 비해 결과를 얻는데 소요되는 시간이 많고 얻을 수 있는 결과의 양이 적지만, 촬영된 사진을 통해 직접 확인이 가능하고, 비 구형입자와 중복된 입자들에 대해서도 처리가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

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

2. 이미지프로세싱 기법

2.1 이미지프로세싱 기법 소개

이미지프로세싱 기법은 앞서 언급한 바와 같이 촬영된 사진의 후처리 과정을 통해 결과를 얻는 방식이다. 따라서 원본 데이터에 해당하는 사진의 질에 따라 결과의 정확도와 정밀도가 결정된다.

정확한 값을 얻기 위해서는 촬영되는 사진이 원하는 영역에 초점이 정확히 맺혀야 하고, 사용되는 카메라의 화소(pixel)가 광학적, 물리적인 균일성을 지녀야 한다. 후자의 문제는 CCD카메라를 사용하면 해결되지만 전자의 경우는 후처리 과정에서 적절한 방법을 통해 초점 면에서 벗어난 액적으로 제외해 주어야 한다.

또한 정밀도를 높이기 위해 확대비를 높이는 것이 좋지만, 분무장에서 발생하는 액적의 크기를 모두 측정할 수 있는 적절한 확대비가 필요하다.

촬영된 사진을 이용한 이미지프로세싱 기법은 일반적으로 Fig. 1과 같은 과정을 거친다. 실험 장치에서 획득된 사진을 이용하여 전체의 threshold를 계산하고 threshold에 기준하여 사진을 이진(binary)화하여 액적화소와 배경화소를 구별한 후, 액적경계(edge)를 찾는다. 각 경계의 연결상태를 확인하여 분리된 각각의 액적을 인식시키고, 인식된 액적 중에서 형상과 초점면에 대한 제약조건을 만족시키는 액적에 대해서만 크기를 계산한다.

2.1.1 Threshold 결정

각 단계에서 사진을 처리하기 위한 개별적인 알고리즘이 적용되는데, 촬영된 사진을 이용하는 거의 모든 이미지처리과정에서 가장 먼저 결정되어야 하는

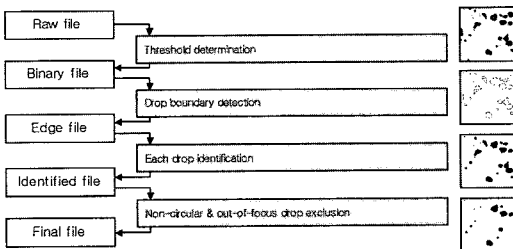


Fig. 1. Procedure of image processing method.

것은 threshold로서 threshold 결정으로 위해 제시된 방법으로는 전체 이미지의 gray level에서 가장 많은 빈도를 나타나는 값을 이용하는 방법(Kim⁽²⁾), gray level의 히스토그램에서 기울기를 이용하는 방법(Bertolini⁽³⁾), 전체 이미지의 가장 어두운 값과 가장 밝은 값의 평균을 이용하는 방법(Kim⁽⁴⁾) 등이 있다.

기울기를 이용하여 전체 이미지의 threshold를 정하여 액적크기의 근사적인 값을 구한 후 액적을 포함하는 작은 사각형 범위 내에서 배경명도값(LBG)과 액적 픽셀의 최저값(OMG)을 평균하여 threshold를 한번 더 구하는 방법도 이용되었는데(Kim⁽⁵⁾), 이것은 광원의 공간적인 밝기 차이를 보정해 주기 위한 것으로 본 연구에서는 측정영역이 5 × 5 mm의 작은 영역이고 실험에 이용된 광원과 카메라 시스템에서 광원에 따른 액적크기 변화의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다기 때문에 사진 화소의 명도를 이용하여 threshold를 한 단계만으로 계산하였다(Fig. 2, 80% of intersection Point⁽⁵⁾).

2.1.2 경계선(edge) 결정

Threshold에 의해 이진화된 사진에서 액적의 경계를 찾는데, 4-근접점(4-adjacent)을 이용하였다. 다음 Fig.3에서 (f)를 제외한 모든 대상화소(P5)는 액적의 외곽선에 해당된다. 이를 수식으로 표현하면 eq.1과 같다. Eq.1와 Fig.3을 통해 액적 화소에 해당하는 화소(P5)가 경계선을 나타내는 화소가 되기 위해서는 자신을 기준으로 상하좌우에 있는 화소중 적어도 하나는 배경(white)을 나타내는 화소이어야 한다는 것을 알 수 있다.

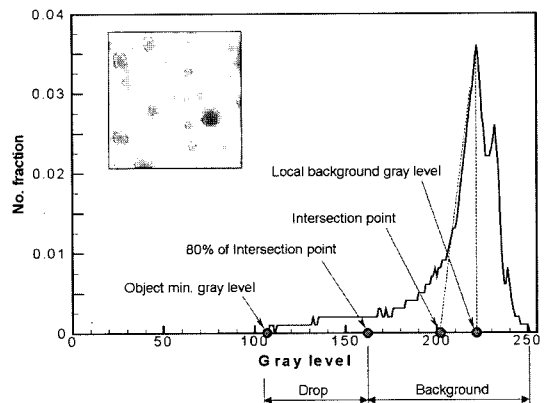


Fig. 2. Threshold determination.

$$edge(P5) = index(P5) \times [index(P2) \cdot index(P4) \cdot index(P4) \cdot index(P4)] \quad (eq.1)$$

Where,

If P is black, $index(P) = 1$

If P is white, $index(P) = 0$

If $edge(P) = 1$, P is edge pixel.

2.1.3 액적인식

경계로 결정된 화소는 아직 사진에서 하나의 화소 이상의 의미를 가지지 못한다. 따라서 화소의 연결상태를 확인하여 하나의 폐곡선으로 이루어진 액적으로 인식시켜야 한다. 즉, 하나의 폐곡선을 이루고 있는 액적에 대해 동일한 번호를 부여하는 과정이 필요하다.

Fig. 4에서 액적을 순차적으로 읽어가며 (a)에서 보듯이 P5화소에 대해 연결여부를 확인하게 된다. P5화소에 대한 확인을 위해 미리 확인된 네 개의 화소(P1,

P2, P3, P4)를 조사한다. 네 개의 점 중에서 하나라도 액적의 경계에 해당하는 화소이면 P5 역시 그 화소와 동일한 액적을 표현하는 화소가 되는 것이다. 이 과정에서 (b)는 P3와 P4가 (c)의 경우는 P1과 P3가 처음에는 서로 다른 액적을 표현하는 화소였다가 P5에서 연결된다. 이 경우 P5 이전 화소들 중에서 각각 P3, P4(또는 P1, P3)와 동일한 액적으로 인식되었던 화소를 하나의 화소로 인식시키는 과정 역시 필요하다. 화소들 중 R3C12, R8C4, R8C8, R9C2가 여기에 해당한다.

2.1.4 크기계산

폐곡선으로 이루어진 화소들을 개별적인 액적으로 인식시키는 과정이 지나면 각각의 액적크기를 계산할 수 있다. 하지만, 촬영된 사진에서 모든 폐곡선이 액적크기로 계산되지는 않는다. 사진촬영 과정에서 액적이 초점을 벗어나거나 중첩되는 경우, 또는 비구형으로 발생한 액적 등은 계산 과정에서 제외되어야 한다.

초점면에서 벗어난 액적은 외곽부분의 회절현상으로 인하여 경계가 모호해지고, 액적크기 과정에서 잘못된 결과로 나타난다. 초점면에서 벗어난 액적을 제거하기 위해서 Kim⁽⁴⁾은 VC를 도입하였고, Koh⁽⁶⁾는 GI를 이용하였다. VC는 작은 액적(<30 μm)에서, GI는 큰 액적(>30 μm)에서 그 결과가 잘 일치하였다. 본 실험 대상에서 발생하는 액적은 일반적으로 50 μm이상이기 때문에 를 이용하였다.

곡률과 접선의 기울기를 통해 중첩된 액적을 분리하는 방법도 고안이 되었으나, 실제 분무장에서 보다는 가상적으로 생성된 사진에 의해 그 결과가 검증되었기 때문에 실제 분무장을 측정하는 본 대상에서는 중첩된 액적을 계산에서 제외시키는 방법을 택하였다. 중첩된 액적을 찾아내는 방법으로는 Choo⁽⁷⁾가 언급한 바와 같이 중횡비, 밀집도 등을 이용하였다.

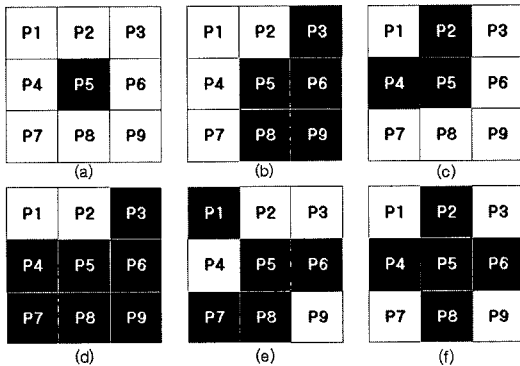


Fig. 3. Edge detection.

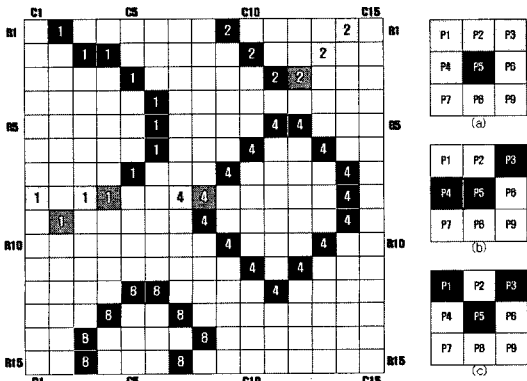


Fig. 4. Closed curve identification.

$$d = \sqrt{Area_{closed\ curve}/(\pi/4)} \quad (eq.2)$$

액적크기의 계산은 동일한 액적으로 표현하는 폐곡선으로 둘러싸인 면적을 계산하여 그 면적에 해당하는 구형입자의 지름을 구하는 방식을 택하였다(eq.2).

2.2 이미지프로세싱 기법 검증

액적크기를 측정하기 위해 고안된 기법을 검증하기 위해 Fig. 5와 같은 격자(reticle)를 이용하였다. 격자

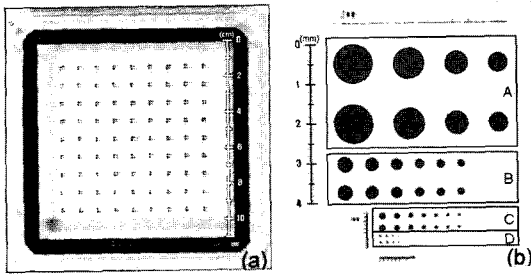


Fig. 5. Shape and drop distribution of reticle.

Table 1. 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

는 유리로 이루어졌고, 유리판에는 크기를 알고 있는 원들이 새겨져 있다(Table 1).

액적크기를 알고 있는 reticle을 실제 실험에 사용되는 광학시스템(Fig. 6)과 동일한 상태에서 촬영하여 실제 액적크기를 측정하는데 발생하는 오차를 확인하였고, 초점면을 벗어난 액적의 크기가 어떻게 변하는지 확인하였다(Fig. 7~8).

Fig. 7에서 보듯이 초점 위치에서 측정된 reticle에서는 실제 액적크기와 거의 동일한 결과를 나타내고 있다. 편차 역시 아주 작게 나타남으로써 Koh⁽⁸⁾가 제시한 광원에 따른 측정값의 변화가 본 실험에서 사용된 광학시스템에서는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 작은 액적(<40 μm)의 측정에서 큰 차이가 발생하지만, 앞서 언급한 바와 같이 본 실험에서 측정하는 액적크기가 50 μm이상이기 때문에 크게 문제가 되지 않는다. 여기서 작은 액적에서 발생하는 오차는 빛의 회절현상에 의한 것으로 대상의 크기가 작을 경우 회

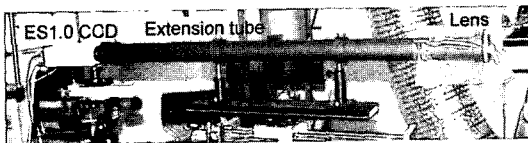


Fig. 6. Optical system for the assessment of image processing method.

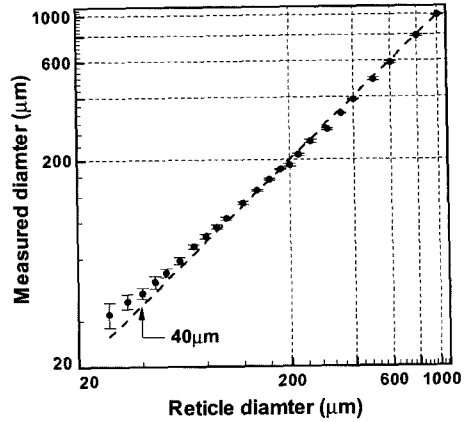


Fig. 7. Measured size vs reticle size at focal plane.

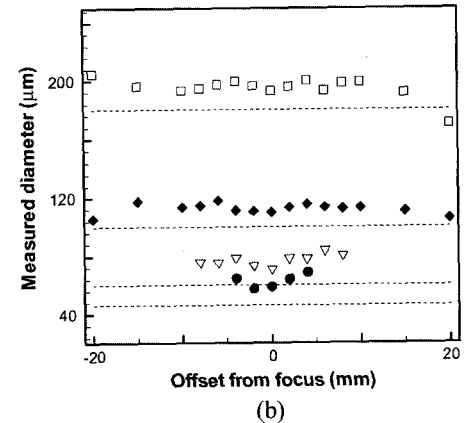
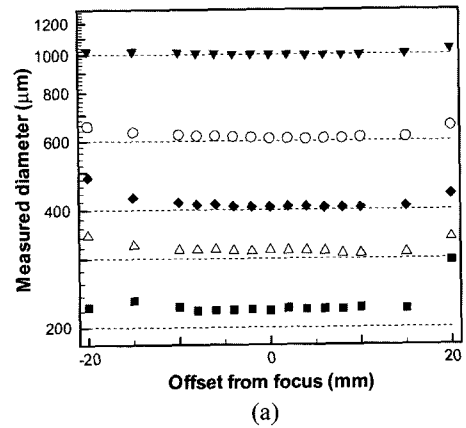


Fig. 8. Measured size according to offset from focus.

절이 크게 일어나기 때문에 액적과 배경의 화소를 구별하기 어렵게 상이 흐려진다.

초점을 벗어난 액적의 크기를 측정된 결과에서도 액적의 크기가 작은 경우에 차이가 크게 발생하는 것

을 알 수 있는데, G 를 이용하여 초점면을 벗어난 액적을 제거하였다.

3. 실험장치와 조건

3.1 실험장치

Fig. 6의 광학시스템을 이용하여 고압환경에서 충돌형 분사기에 의해 발생하는 액적크기를 측정하였다. 고압챔버는 50bar 까지 실험이 가능하도록 제작하였으며, 200liter의 용량을 가지고 있어 내부 기체유동의 영향을 받지 않고 장시간 실험 수행이 가능하다. 실험에 사용된 분사기와 전체적인 실험장치의 구성을 각각 Fig. 9, 10에 나타내었다.

분사기로는 로켓엔진에서 사용되는 like doublet을 사용하였고, 분사공 직경을 0.7 mm이다. Fig. 10에 나타난 실험 장치를 통해 확대비 1.8로 분무영역 5 mm×5 mm를 측정하였다. 측정 위치는 분사기에서 일정 거리를 두고 측정하지 않고, 별도의 실험을 통해 측정된 최종 액막분열 위치에서 2 cm 하류로 하였다.

3.2 실험조건

실험은 분사되는 제트 속도와 주위 기체압력을 변화시키면서 Table 2에 주어진 바와 같이 속도 조건

Table 2. Experiment conditions

Ambient pressure (MPa)	Injection velocity (m/s)
0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5	3, 5, 7, 10, 15,
0.8, 1.2, 2.0, 3.0, 4.0	20, 25, 30

10가지, 압력조건 8가지를 통해 80가지 분사조건에 대해 수행되었고, 각 조건에 대해 240장의 사진을 촬영하여 액적 크기를 계산하였다. 계산과정에서 분사 조건에 따라 최대 5000개, 최소 500개의 액적을 이용하여 SMD를 구하였다. 실험을 통해 분사하는 유체는 물을 사용하였고, 주위 압력을 높이기 위한 기체로는 질소를 사용하였다.

4. 실험결과

앞서 설명한 바와 같이 촬영된 사진을 통해 액적크기를 추출한다. Fig. 11은 대표적인 액적사진들을 표시한 것으로 분사속도의 증가와 주위 기체압력의 증가에 따라 액적크기가 감소한다.

이미지프로세싱을 통해 측정된 액적크기 역시 전체적으로 비슷한 경향을 나타내고 있다. 액적크기를 계산하는 과정에서 고속고압의 분사조건에서는 생성되는 분무장이 이심율이 작은 타원으로 성장하면서 카메라의 광축상에서 빛의 감쇠가 심하게 발생함으로 인해 배경명도가 너무 낮아 액적과 배경을 구별하는 것이 불가능하였다. 또한, 저속 저압의 경우는 액적이

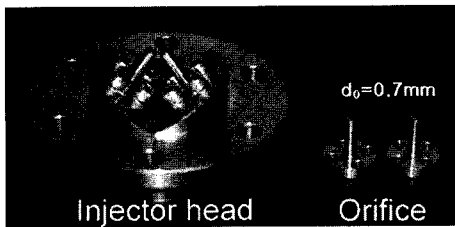


Fig. 9. Injector head and orifice

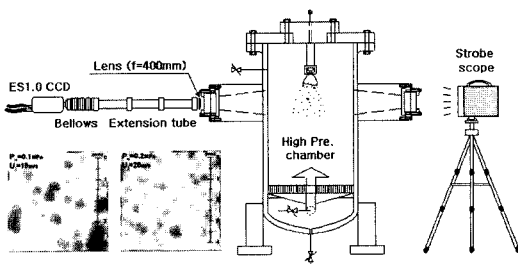


Fig. 10. Experimental schematic.

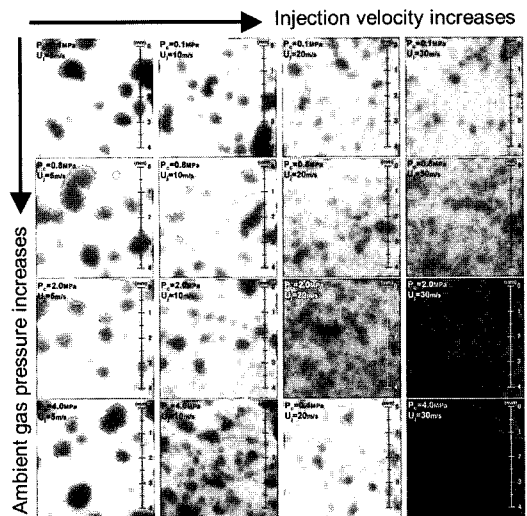


Fig. 11. Representative images.

아닌 질량당어리들이 다수 존재하여 의미있는 결과가 아니기 때문에 실제 비교 대상에서 제외하였다.

Fig. 12, 13은 이러한 대상들을 제외시킨 상태에서 각각 분사속도와 기체압력에 따른 액적크기의 변화를 나타내었다. 측정된 액적크기를 통해 SMD (D32)를 계산하여 선형불안정이론에서 예측한 액적크기를 비교하였다. Anderson⁽⁹⁾, Ryan⁽¹⁰⁾이 언급한 바와 같이 이론에서 예측된 액적크기와 실제측정 값이 비슷한 경향성을 보이고 있음을 알 수 있다.

고압조건에서 분사속도 증가에 따라 액적크기가 급격히 감소하는 구간(2MPa, 15 m/s & 4.0MPa, 10 m/s)이 존재하는데, 이 영역은 액적의 분열이 한번 더 이루어진 상태에서 측정되는 것으로 판단된다. 즉, 액막에서 분열된 액적이 하루로 가면서 고압환경의 기체에 의해 재분열이 이루어지는 것이다. 저압 조건(0.1~0.8MPa)에서 완만한 감소율을 보이는 것과 압력 상승에 따라 이와 같은 현상이 나타나는 속도가 줄

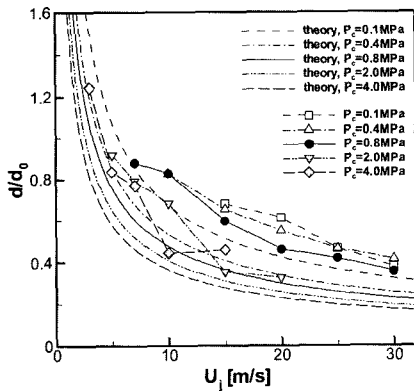


Fig. 12. Droplet size as a function of injection velocity.

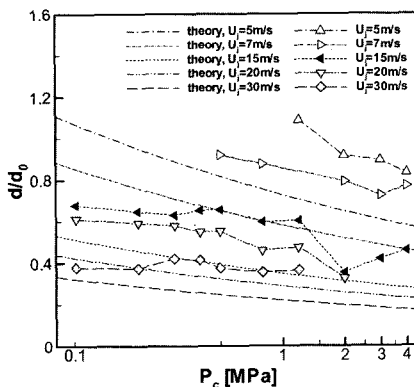


Fig. 13. Droplet size as a function of ambient gas pressure.

어드는 현상이 이러한 사실을 뒷받침해 준다.

또한, 압력변화에 따른 액적크기 변화에서 분사속도가 높은 조건(20 m/s, 30 m/s)에서는 액적크기가 압력증가에 따라 거의 일정한데, 이것은 고속제트의 높은 관성력에 의해 주위 기체가 제트에 영향을 주지 못하기 때문이다.

5. 결 론

최근에 많이 이용되고 있는 레이저 계측기법의 적용 한계로 인해 고전적으로 많이 사용된 이미지프로세싱 기법을 이용하여 충돌형 분사기의 액적크기를 측정하였다.

본 실험에 적용된 이미지프로세싱 기법을 검증하기 위해 크기를 알고 있는 액적이 새겨진 reticle 을 이용하여 측정의 정확도와 초점면에서 벗어난 액적에서 발생하는 현상을 확인하였다. 초점면에 존재하는 액적크기에 대해서는 상당히 잘 맞는 것을 알 수 있었고, 초점면을 벗어난 액적에서 발생하는 문제는 Koh⁽⁶⁾가 제시한 방법을 이용하여 해결하였다.

분사속도와 주위압력에 따라 충돌형 분사기에서 발생하는 액적크기를 측정하여 발생하는 액적의 경향성을 파악하였고, 이론에서 예측하는 값과 비교하였다.

후 기

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

참고문헌

- 1) Wild, P.N. and Swithenbank, J., Beam stop and vignetting effects in particle size measurements by laser diffraction, Applied optics, Vol.25, No. 19, pp. 3520-3526, 1986.
- 2) Kim, I.G., and Lee, S.Y., A simple technique for sizing and counting spray drops using digital image processing, Experimental thermal and fluid science, pp.214-221, 1990
- 3) Bertollini, 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.

- 4) Kim, K.S. and Kim, S.S, 1994, Drop sizing and depth-of-fieldcorection in TV imaging, Atomization and sprays, Vol.4, pp.65-78.
- 5) 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.
- 6) Kho, K.U., Kim, J.Y., and Lee, S.Y., 1999, Determination of In-focus Criteria in Image Processing Method for Particle Size Measurement, KSME, Vol.23, No.3, pp.398-407.
- 7) Choo,Y.J. and Kang, B.S., Measurement of sizes and velocities of spray droplets by image processing method, 액체미립화학회 학술강연 논문집, pp. 121-128, 2002
- 8) Kho, K.U., and Lee, S.Y., 2000, Determination of background gray-level for accurate measurement of particles in using image processing method, KSME, Vol.24, pp.599-607.
- 9) Anderson, W.E., Ryan, H.M., and Santoro, R.J., "A Model for impinging jet atomizer", 32nd JANNAF, 1995, pp.55-64.
- 10) Ryan, H.M., Anderson, W.E., Pal, S., and Santoro, R.J., "Atomization characteristics of impinging liquid jets", Journal of propulsion and power, Vol.11, 1995, pp.135-145.