

화상처리법을 이용한 분무 계측

Measurement of Spray by Using an Image Processing Method

조 병 옥
B. O. Cho



조 병 옥
• 1958년 11월생
• 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정
• 액체연료미립화, 연소공학 정회원

1. 서 론

액체 연료를 사용하는 대부분의 연소장치는 연료의 무화를 이용하며, 이 경우 연료 액적의 크기와 분포, 그리고 액적 운동속도 등에 대한 정확한 이해는 노즐과 같은 분사장치 및 연소실의 설계에 있어 매우 중요한 요소가 된다. 특히 기관에서의 이러한 정보는 혼합기 형성과 연소 후의 열 발생률, 그리고 연소 생성물의 배출에 직접적인 영향을 주므로 보다 정확하고 객관성이 있는 계측 방법에 대한 연구가 요구되고 있다. 액체 미립화는 기관 외에 농업, 식품 제조, 의료, 도장 등의 산업 분야에서도 폭넓게 이용되며 액적의 크기와 분포도 그리고 운동속도에 대한 정확한 정보를 필요로 한다. 이러한 목적으로 종래부터 많은 연구¹⁻³⁾가 이루어 졌으나, 계측 과정과 방법상 실제의 상황과 비교하여 다소간의 오차를 필연적으로 수반하거나, 또는 실 시간(real time)에 대한 정보라고 판단하기가 어려운 문제점이 있었다.

최근 컴퓨터 기술과 광학적 계측 장비의 발달과 함께 화상(image)이 갖는 휘도(intensity)와 농염 정도(density)를 디지털량으로 양자화하여 정량적으로 처리하는 화상처리법(image processing method)이 분무 계측에 활발히 이용되고 있다.⁴⁻⁶⁾ 화상처리법은 어떤 관심있는 현상이나 사물의 화상(image)으로부터 보다 객관적이고 정량적인 정보를 얻기 위한 기법으로 분무 계측, 유동장에서의 물질 이동 현상, 충돌 시험, 그리고 의료용 등의 광범위한 적용성을 갖는다.^{7,8)} 또한, 이 방법은 Laser를 이용한 속도 측정 방법(LDV/LPTV)보다 저렴한 비용으로 정밀도 높은 화상 정보를 대량으로 신속히 처리할 수 있으며, 처리용 프로그램에 따라 표시, 검색, 변환, 계측, 인식 등의 기능을 다양하게 확장할 수 있는 잇점이 있다. 여기서는 화상처리 방법에서 화상 획득 장치와 처리 장치를 간단히 소개하고, 연료 분무의 액적 운동속도의 계측 방법에 대하여 논의하기로 한다.

2. 화상 처리 방법

현상을 화상으로 나타내는 화상 획득 장치와 그 화상으로부터 원하는 정보를 알아내는 처리 장치가 필요하다. 물론 질이 좋은 화상 처리 결과를 얻기 위해서는 위의 두 장치의 기능이 잘 조화를 이룰 때 가능하다.

2.1 화상 획득 장치

화상 획득 장치는 크게 광원(light source)과 촬영용 카메라, 그리고 카메라가 촬영한 화상을 컴퓨터에 저장하는 grabbing 장치 등으로 구성이 되며, 분무 계측을 위한 장치 구성도는 Fig.1과 같다.

광원은 충분한 광량을 가져야 하고, 운동하는 입자(particle)의 형상 왜곡을 최소로 줄이고 입자 추적이 신속하도록 짧은 광 지속 기간과 빠른 반복율이 요구된다. 대개는 이러한 요구 조건에 맞추어 방전식 광원 장치가 이용되며, 최근 50 ns의 광 지속 기간을 갖는 광원장치가 개발되었다.⁹⁾ 또한, 광원의 설치 위치에 따라 전방 광원법과 후방 광원법이 있는데 일반적으로 분무 계측에서는 shadow graphy를 얻는 후방 광원법이 많이 채택되고 있다.

광원의 작동과 동시에 입자는 실 시간(real time)의 정보로서 카메라에 촬영되고, 이로써 하나의 화상이 만들어진다. 분무 계측에서는 분무각, 분무도달거리, 그리고 액막 분열 및 분무 형성과정을 관찰하기 위한 거시적 촬영과 액적의 크기와 분포, 액적 운동 속도를 측정하기 위한 미시적 촬영이 있으며, 이들의 경우에는 기계식 스틸 카메라와 CCD 카메라가 각각 이용된다.

피사체의 형상과 관찰 영역의 크기에 따라 적절한 배율을 갖는 렌즈(focusing lens)를 사용한다.

카메라로 얻은 화상은 frame grabber(DT2853)를 통해 컴퓨터에 저장하는데, 하나의 화상 file이 갖는 기억용량은 frame grabber의 크기에 따라 결정되며 DT 2853의 경우, 262656byte의 용량을 갖는다. 이 밖에 명암대비(contrast)를 향상시키기 위한 filter system, 광원과 촬영 시기 등을 임의로 선택하거나 동기가 가능하도록 설계 제작된 control board, 그리고 광원과 카메라를 동축상에 유지하고 측정 위치를 선택하는 3축 이동장치가 필요하다.

2.2 화상 처리 방법

화상을 처리하기 위한 프로그램은 정보의 신빙성과 객관성을 위해 매우 중요하다. 화상처리 영역은 크게 화상의 계조값에 따른 normalization,

형상 인식을 위한 분할처리와 쪼점 내의 액적 추출, 그리고 크기 계산과정과 보정 등의 절차로 구성되며, 일반적인 처리 과정은 Fig.2와 같다. 여기서는 화상의 경계 추출과 화상 인식과정에서 필요한 계조값(gray level) 분포와 이진화 처리(binartization)에 관하여 그 기법을 중심으로 논의코자 한다.

2.2.1 히스토그램(histogram)

원시 화상이 갖는 정보를 판독, 인식하기 위한 기본 단계로서 화상의 대부분의 정보가 화소수(pixel number)의 함수로서 계조값(gray level)으로 나타내는 방법이다. 히스토그램은 화상 내의 점(point)에 대한 정보는 물론, 임의의 선분(line) 또는 면적(area)에 대한 정보를 판독하거나 비교가 가능하도록 할 수 있으며, 화상으로부터 대략적으로 입자와 바탕(배경)을 구별한다.

Fig.3은 임의의 원시화상을 나타내고, Fig.4는 이 화상의 선분 히스토그램으로 300pixel의 선분 상에서 노말라이징된 입자(shadowed particle)가 계조값의 차이를 보이고 있다.

2.2.2 이진화 처리(Binarization)

히스토그램에서 노말라이징한 데이터를 2진화로 분할 처리하는 절차로서 입자(object)와 배경

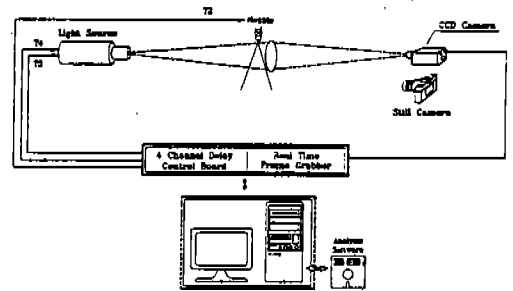


Fig.1 Schematic of experimental setup for spray measurement.

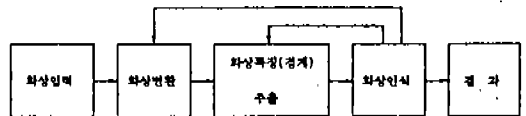


Fig.2 Diagram of image processing system.

(background)의 계조값을 두개의 계조값으로 구분한다. 예를 들면 화상내에 존재하는 입자의 계조값을 밝은 영역의 계조값으로 설정하고 동시에 바탕을 어두운 계조값으로 설정하고자 하는 것이다.

입력 화상과 출력 화상을 각각 $\{F=f_{ij}\}$ 와 $\{G=g_{ij}\}$ 라고 하고, 매개 변수 T를 사용하면 다음과 같이 변환이 된다.

$$g_{ij} = \begin{cases} 1 & (f_{ij} \geq T) \\ 0 & (f_{ij} < T) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 매개 변수 T는 농도치 레벨로서 피사체(입자)의 g값을 0(gray level=0)으로, 그리고 배경의 g값을 1(gray level=255)로 구분하는 판단 기준이 되며, 역치(域值, thresholding value)라고도 한다. 이 값은 입자의 존재여부를 판단하는 중요한 기준이 되며, 다양한 선택 기준들이 연 구되고 있다.

Fig.5는 원시 화상으로 부터 검색된 히스토그램이고, Fig.6은 농도치 레벨 T값에 의해 이진화 처리가 된 후의 히스토그램이다. 여기서 입자가 흑지(gray level=0)로, 그리고 배경이 백지(gray level=255)로 분할되어 액적의 윤곽이 바탕 배경과 구별(edge detection)되었음을 알 수 있다.

Thresholding에는 원시화상 전체에 대한 global thresholding과 크고 작은 각각의 크기를 갖는 입자들을 빠짐없이 인식하기 위한 dynamic thresholding이 있다.

Dynamic thresholding은 2단계로 나누어서 수행한다. 첫 단계는 화상을 적절한 graylevel로 thresholding하여 입자 인식을 위한 기준 계조값(reference graylevel)을 설정한다. 여기서 기준 계조값은 히스토그램상의 단조증가 영역에서 가장 기울기가 큰 점과 이 점을 지나면서 같은 기울기를 갖는 직선과 graylevel축과의 교점으로 정의한다. 두번째 단계의 thresholding은 local thresholding을 취하기 위해 image area를 32×32 pixel의 window로 나누어, 각 window내의 pixel중 graylevel이 첫 단계에서 구한 기준 계조값보다 큰 값들만을 평균을 취하여 구한 값을 역치로

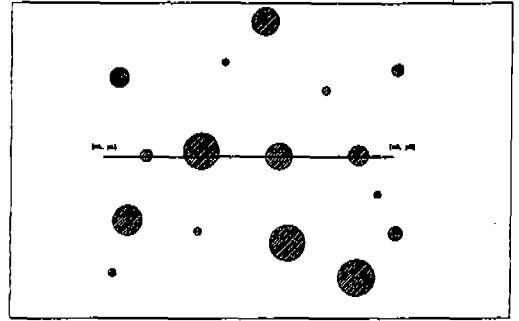


Fig.3 An example of line cut on the raw image.

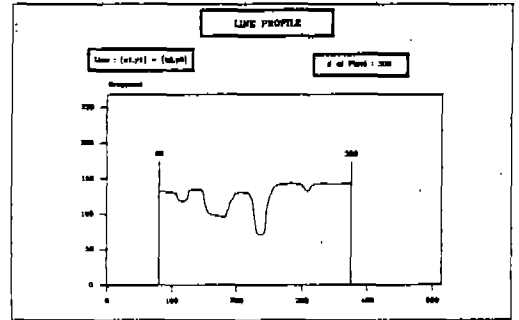


Fig.4 Line profile of selected line on fig.3.

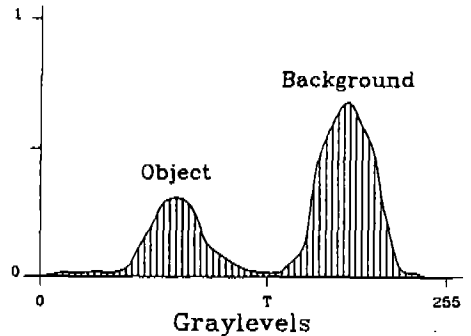


Fig.5 Original histogram of an raw image.

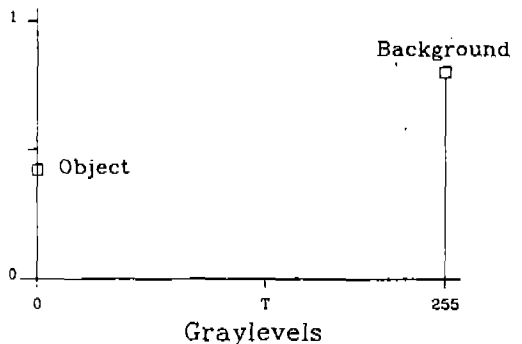


Fig.6 Thresholding histogram of an raw image.

하는 이진화 처리 기법이다.

이 밖에 분무 액적의 화상처리에서는 캘리브레이션(calibration) 절차가 매우 중요한데, 이것은 화상중에 존재하는 입자의 in-focus여부 및 입자 크기에 따른 depth of field의 선정 기준을 판단하는 자료가 된다. 일반적으로 액적의 크기를 모사하여 수 μm 부터 수십 μm 사이의 크기를 갖는 원형 판을 투명 유리판 위에 크롬 도금한 calibration reticle을 사용한다. calibration reticle상의 각각의 원형판에 대하여 초점으로 부터 좌우로 수 μm (예를 들면 30 μm)씩 이동하며 얻은 화상의 제조값의 변화로써 판단 기준을 얻는다.

3. 액적크기와 운동속도

3.1 액적크기

단일 광원(single exposure lighting)에 의해 얻은 화상을 화상처리한 후 크기 급간별로 입자 구분을 하고 히스토그램으로 나타낼 수 있다. Fig. 7은 액적 급간을 10 μm 로 하고 액적 분포도와 평균입경(SMD)을 계산하여 출력한 예이다.

평균 직경은 다음과 같이 여러가지 방법으로 구하는데, 연료유 무화에는 일반적으로 Sauter Mean Diameter(SMD, D32)를 이용한다.

a) Arithmetic Mean Diameter(D10)

$$\sum_{i=1}^N n_i d_i / \sum_{i=1}^N n_i \quad (2)$$

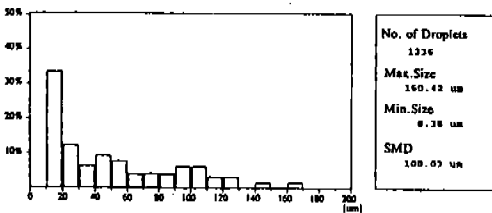


Fig.7 Histogram of droplet size distribution and mean diameter.

b) Area Mean Diameter(D20)

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^N n_i}} \quad (3)$$

c) Volume Mean Diameter(D30)

$$3\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^N n_i}} \quad (4)$$

d) Sauter Mean Diameter(D32)

$$\frac{\sum_{i=1}^N n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^N n_i^2} \quad (5)$$

여기서, n_i 는 액적의 수, d_i 는 액경을 나타낸다.

3.2 운동속도

짧은 시간 차 ΔT 를 두고 광원이 노출되면 CCD Cell에는 두개의 정보가 기록된다. 1차 발광시 맺힌 입자와 이로 부터 ΔT 만큼 시간 경과 후의 2차 발광시 맺힌 입자가 하나의 화상 속에 존재한다. 따라서 시간 차 ΔT 를 알면 입자의 x 성분 속도와 y 성분 속도를 구할 수 있다.

$$V_x = \frac{\Delta S_x}{\Delta T},$$

$$V_y = \frac{\Delta S_y}{\Delta T} \quad (6)$$

여기서 S_x 와 S_y 는 각각 입자가 x 방향과 y 방향으로 이동한 변위이다.

액적의 균을 이루는 경우(dense spray)에 액적 쌍(droplet pair)을 찾는 방법으로 다음과 같이 가정을 한다.¹¹⁾

첫째, 한 화상에 존재하는 입자는 sample volume이 1mm³정도로 작기 때문에 비슷한 크기를 갖는 경우 비슷한 속도를 갖는 것으로 본다.

둘째, vector contour를 구하기 위하여 액적 쌍의 형성된 순서를 유동의 방향성으로 결정한다.

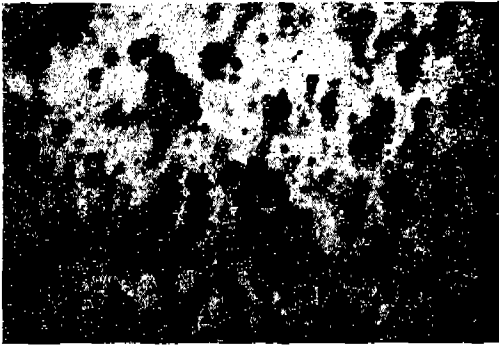


Fig.8 Example of an raw image for droplet velocity.

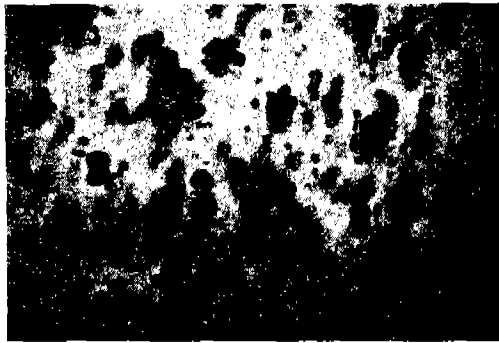


Fig.9 Tracking image for seeking the conjugate droplet pair.

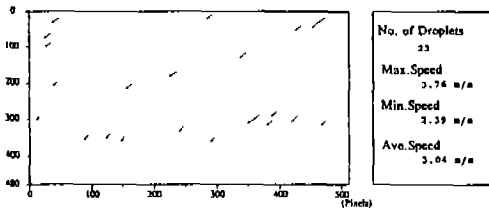


Fig.10 An example of velocity vector and averaged speed.

셋째, 주위기와와의 상대 속도는 유동 저항이 매우 작은 입자(예를들면 10 μ m이하의 입자)의 속도를 평균하여 주위기 속도로 가정한다.

옥탄과 드라이 솔벤트(2호)유를 작동유체로 하는 가솔린 기관용 인젝터의 자유 분무 실험에서 5 μ s내지 20 μ s의 시간차를 두고 속도를 측정한다.

결과, 솔벤트의 경우 대략 4.2 내지 11.3m/s의 분포를 보였다.¹²⁾

Fig.8은 이중광원으로 얻은 원시화상이고 Fig.9는 화상 인식을 통해 대응 액적 쌍을 찾은 화상이다. Fig.10은 이러한 과정과 알고리즘을 통해 구한 속도 벡터와 계산된 속도값을 출력한 예이다.

4. 결 언

이상과 같이 화상처리법을 이용하는 분무의 계측법과 원리를 살펴 보았다. 화상 처리법은 비교적 저렴한 비용으로 정밀도 높은 정보를 프로그램에 따라 다양하게 출력하는 등의 잇점이 있다. 분무 각과 분무 관통길어도 화상 획득 장치만 기계식 스틸 카메라를 이용한 것뿐이지, 그 처리 방법은 앞서 논의한 방법과 유사하다.

보다 완벽한 적용성을 갖기 위하여 관찰영역의 크기를 확대하는 광학계의 연구와 복잡한 형상을 왜곡 없이 인식하기 위한 프로그램의 개발, 그리고 계측 값의 신빙성 제고를 위한 적절한 캘리브레이션 기법에 관한 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

화상처리에 대한 구체적인 내용은 참고문헌과 관련된 연구 보고를 참조하기 바란다.

참 고 문 헌

1. 棚澤 泰, 箱守京次郎, 江村 超, 横澤彰夫, “沈降塔による液體噴霧の粒度分布測定法”, 日本機械學會論文集, 37卷, 278號, pp.1165-1177, 1971.
2. S.M. DeCorso, “Effect of Ambient and Fuel Pressure on Spray Drop Size”, Trans. of the ASME, pp.10-18. Jan., 1960.
3. 神本武征, 松岡 信, 志賀 聰, “デイ-ゼ機關の燃料噴霧の噴射初期における到達距離”, 日本機械學會論文集, 41卷, 342號, pp.672-680, 1975.
4. G.P. Bertollini, L.M. Oberdier, Y.H. Lee, “Image Processing System to Analyze Droplet Distri-

- butions", Optical Engineering, Vol.24, No.3, pp. 464-469, 1985.
5. K.D. Ahlers, D.R. Alexander, "Microcomputer Based Digital Image Processing System Developed to Count and Size Laser-generated Small Particle Images", Optical Engineering, Vol.24, No.6, pp.1060-1065, 1985.
 6. M.A. Northrup, T.J. Kulp, S.M. Angel, "Fluorescent Particle Image Velocimetry : Application to Flow Measurement in Refractive Index-matched Porous Media", Applied Optics, Vol.30, No.21, pp.3034-3040, 1991.
 7. K.R. Castleman, Digital Image Processing, Prentice-Hall, Inc., 1979.
 8. 長谷川純一 外, 畫像處理の基本技法, 技術評論社(日本), 1986.
 9. B.O. Cho et al., "Development of Measurement Technique of Velocity and Distribution Using PMAS", Abstract on the 21st International Congress on High Speed Photography & Photonics, p.189, 1994.
 10. V-TEK Co.Ltd., PMAS(MX-II) User's Reference Manual, 1994.
 11. 김기성, "2유체 분사장치의 분무 및 연소 특성에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1994.
 12. 조병욱, 이창식, 임경수, "가솔린 기관용 인젝터의 분무 구조에 관한 실험적 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, p.79, 1994.