

영상처리 기법을 이용한 입경 측정시 배경 명도가 측정 정밀도에 미치는 영향

고 광 응* · 이 상 용**
(1999년 9월 29일 접수)

Determination of Background Gray-level for Accurate Measurement of Particles in using Image Processing Method

Kwang Uoong Koh and Sang Yong Lee

Key Words: Image Processing(영상 처리), In-focus Criterion(초점면 존재 판단 기준), Particle Size Measurement(입경 측정), Gradient Indicator(GI)(기울기 지표), Normalized Value of Contrast (VC)(기준 명도비), Depth-of-field(초점 심도), Background Gray-level(배경 명도)

Abstract

In this study, experiments have been performed to examine the effects of background gray-level on the depth-of-field and on the in-focus criteria. The normalized value of contrast(VC) and the gradient indicator(GI) were used as the in-focus criteria for the small and the large size-ranges of particles, respectively. The slightly larger number of pixels were detected with the brighter background. The maximum of the normalized value of contrast(VCmax) is decreased with the brighter background and its deviation from that with the background gray-level of 160 turned out to be about $\pm 15\%$ when the background gray-level changes from 100 to 200. However, the maximum gradient indicator(GImax) changes with the background gray-level within only $\pm 5\%$. The depth-of-field for the VC-applicable particle-size range is largely dependent on the background gray-level. On the other hand, the depth-of-field for the GI-applicable particle-size range changes only slightly with the background gray-level. To keep the normalized standard deviation of the particle size within 0.1, the background gray-level should be set 160 ± 20 for both the VC-applicable and GI-applicable ranges which cover the particle size between $10\mu m$ and $300\mu m$.

기호설명

<i>C</i>	: 임계값 설정을 위한 계수
<i>d</i>	: 입경
<i>DP</i>	: 입경 화소수의 상대적 변화
<i>G</i>	: 명도
<i>GI</i>	: 기울기 지표
<i>L</i>	: 초점 심도
<i>N</i>	: 측정된 입자의 수

<i>P</i>	: 화소 수
<i>s</i>	: 입경의 표준편차
<i>VC</i>	: 기준 명도비
<i>x</i>	: 화소의 수평 좌표
<i>y</i>	: 화소의 수직 좌표
<i>z</i>	: 초점면으로부터의 거리

아래첨자

<i>b</i>	: 배경
critical	: 임계값
<i>g</i>	: 명도
LB	: 국소 배경 명도
LT	: 국소 명암 판별 기준값

* 한국과학기술원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : e_hyunny@cais.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3066 FAX : (042)869-8207

- OM : 입자 최소 명도
- max : 최대값
- measure : 입경 측정값
- min : 최소값
- true : 실제 입경

1. 서 론

영상 처리 기법을 이용한 입경 측정 기법은 기존에 알려져 있는 다른 광학적인 측정 기법들^(1,2)에 비하여 비교적 구조가 단순하며, 광학 시스템의 배열도 비교적 쉽다. 이 기법은 입자에 의한 산란광을 이용하는 측정기법이 아니므로 다른 광학적인 측정 기법에 비해 입자 및 시험부의 광학적 특성이 측정값에 주는 영향이 비교적 적다. 또한 측정하는 입자를 직접 관찰할 수 있으므로 측정값의 신뢰성을 높일 수 있다. 알고리즘을 개선할 경우 비구형의 입자를 감식, 분석할 수 있다. 그 이외에 이중 선편광 광원을 이용하면 입자의 속도를 측정할 수 있는 장점이 있고 시스템을 구성하는 각 단위 기기의 가격도 비교적 저렴하다. 최근 컴퓨터 등 각 구성 요소의 급격한 발전으로 이 측정 기법의 성능이 계속 향상되고 있다.

입자가 포함된 영상(Fig. 1(a))으로부터 입경을 측정하는 과정은 일반적으로 Fig. 1과 같은 순서를 따른다. 우선 입자를 배경으로부터 분리해 내는 명암 판별 과정을 수행한다. 입자의 경계부근 명도는 빛의 회절에 의해 기술기가 존재하기 때문에 실험적으로 선택된 알맞은 명암 판별 기준

값(threshold gray-level)을 기준으로 입자와 배경을 분리한다. 명암 판별 기준값보다 어두운 화소는 입자(0)로 밝은 화소는 배경(1)으로 영상을 2진화한 후 형상 인식 알고리즘(pattern recognition algorithm)을 통해 입자의 경계를 인식한다(Fig. 1(b)). 그러나 입자들이 3차원 공간상에 분포되어 있기 때문에 2진화 영상으로부터 인식된 입자들 중에는 초점면에서 벗어난 입자들도 포함된다(Fig. 1(c)). 인식된 입자들에 초점면 존재 판단 기준(in-focus criterion)을 적용하여 초점면에서 벗어난 입자를 제거하는 과정을 통하여 측정의 정확도를 높인다(Fig. 1(d)). 그러나 입자들은 입경에 따라 다른 초점 심도(depth-of-field)를 갖는다. 여기서 초점 심도는 입자가 초점면(focal plane) 위에 존재한다고 생각되는 광축상의 거리 범위로 입경 측정시 각 입자의 측정 부피(sampling volume)를 의미한다. 실제 분무를 측정할 때 측정 부피가 큰 입자는 측정 부피가 작은 입자에 비해 영상에 포함될 가능성이 높아 측정된 평균 입경에 상대적으로 영향을 크게 준다. 따라서 입경에 따라 측정 부피가 달라지기 때문에 생기는 측정 오차를 보정하기 위하여 측정된 입자의 개수를 단위 측정 부피에 대한 값으로 환산하는 초점 심도 보정(depth-of-field correction)과정을 최종적으로 수행한다(Fig. 1(e)).

따라서 영상 처리를 이용한 입경 측정 기법에 관한 연구에는 형상 인식 알고리즘 개발에 대한 연구들⁽³⁻⁷⁾뿐만 아니라 명암 판별 기준값의 결정, 초점면 존재 판단 기준의 확립 그리고 초점 심도

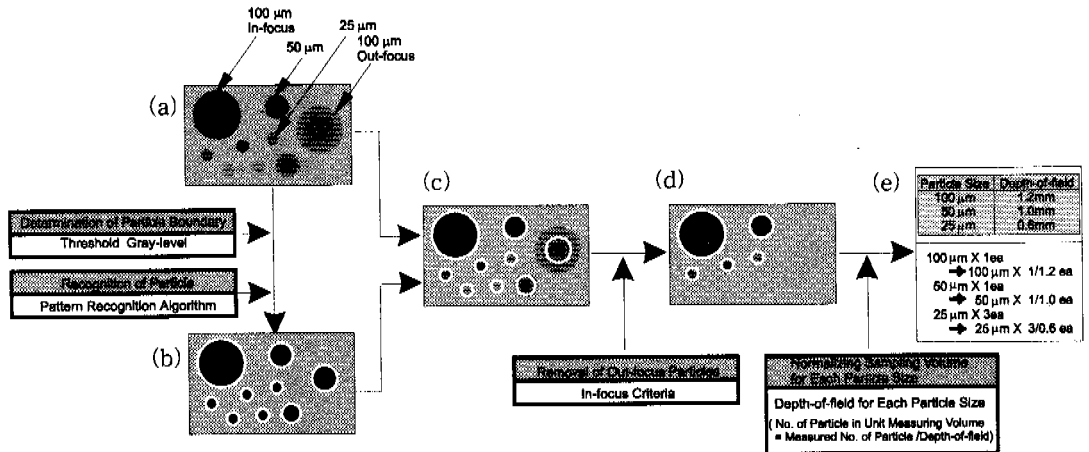


Fig. 1 Procedure of particle sizing using the image processing method

과약 등 영상 기기 보정에 관한 연구들⁽⁸⁻¹²⁾이 있다. 특히 영상 기기 보정과 관련된 연구들은 고려해야 하는 인자들이 많아 대부분 실험적으로 수행되고 있다.

그러나 보정된 영상 처리 기기라도 실제 분무에 이를 적용할 경우에는 보정할 때와 달리 입자의 수밀도와 가시창의 상태 변화 등에 따라 배경 명도가 수시로 변한다. 이에 따라 배경 명도가 고정되어 있을 경우의 각 판별 기준값들을 실제 분무 측정 과정에 적용하면 배경 명도의 변화에 따라 측정 오차가 발생하게 된다. 그러나 영상처리 기법에 관한 연구들이 폭 넓게 진행되고 있음에도 불구하고 배경 명도의 변화가 각 판별 기준값들에 미치는 영향은 비교적 알려져 있지 않다. 또한 영상 처리 과정에서도 이를 고려하지 않고 있다. 그리고 최대 명도 255의 약 60%이며, 화소가 입사 광량에 대해 안정적으로 변별력을 갖고 반응하는 명도 160이 측정자들의 경험에 의해 알맞은 배경 명도로 알려져 있을 뿐이다.

본 연구에서는 영상 기기 보정과 관련된 판별 기준값들, 즉 명암 판별 기준값, 초점면 존재 판단 기준과 초점 심도의 배경 명도에 따른 변화를 살펴본다. 그리고 배경 명도 160에서의 초점면 존재 판단기준의 임계값을 다른 배경 명도의 영상들에 적용하여 배경 명도의 변화에 따른 초점 심도와 허용 배경 명도 범위에 따른 입경 표준편차의 변화를 살펴본다. 이를 통하여 배경 명도의 변화가 측정 정도에 미치는 영향을 파악한다. 최종적으로는 이를 바탕으로 배경 명도로 160을 선택하였을 경우 측정 정도를 유지하기 위해 허용할 수 있는 배경 명도의 범위를 제시한다.

2. 장치의 구성 및 실험 방법

영상 처리 기법을 이용한 입경 측정 장치의 구성은 Fig. 2에서와 같이 광원(light source), CCD 카메라와 데이터 획득 장치인 PC/586 등 세 부분으로 구성되어 있다. 광학 장치의 배열은 광원을 레티클(reticle; 입자군 모형) 위치 뒤쪽에 설치하고, CCD 카메라를 레티클 정면에 설치하는 후방 조명 방식(back-illumination method)을 사용하였다. 초점면을 중심으로 CCD 카메라 방향을 양의 방향(+z)으로 설정하였다.

CCD 카메라(TM-7CN, Pulnix)의 영상 셀(image

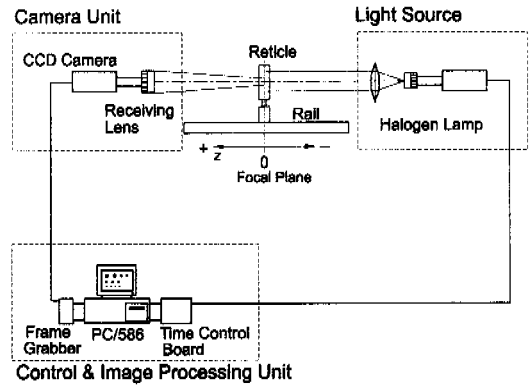


Fig. 2 Schematic diagram of the image processing system for the drop/particle measurement

cell) 크기는 $8.4\mu\text{m} \times 9.8\mu\text{m}$ 이고, 해상도는 768(수평) \times 494(수직)이다. 수광 렌즈(receiving lens)의 초점 거리는 300mm이다. 8bit의 분해능을 가진 프레임 그래버(frame grabber, DT3854, Data Translate)를 통해 CCD 카메라로부터 오는 영상신호를 처리하고 영상을 저장하였다. 프레임 그래버의 외부 트리거(external trigger) 기능을 이용하여 입자의 순간 영상을 획득하였다. 연속 광원인 할로겐 램프(halogen lamp)를 광원으로 사용하였다. 본 연구에서 구성한 광학 시스템의 확대비는 2.9이며, 입경 측정 가능 범위는 8~1000 μm 이다.

실험에 필요한 입자군 모형은 입자를 모사한 점(circular dot)을 투명 유리에 크롬 도금하여 제작한 것으로 고풍용 등⁽¹²⁾이 사용한 보정용 레티클과 동일하다. 입자들은 입경에 따라 2~100 μm , 75~230 μm 그리고 200~300 μm 의 3개의 입자군으로 나누어 실험하였다. 각 배경 명도에서 작은 입자로 이루어진 2~100 μm 와 75~230 μm 두 개의 입자군에 대해서는 50 μm 간격으로, 그리고 200~300 μm 입자군의 경우에는 100 μm 간격으로 마이크로미터를 이용하여 광축을 따라 레티클을 이동시키면서 입자들의 영상을 얻었다. 배경 명도별로 각 위치에서 각각의 입자군에 대해 3장의 영상을 얻었고 이를 총 4회 반복하였다.

본 연구에서는 효과적인 영상 처리를 위하여 영상 전체를 대상으로 하는 글로벌 프로세싱과 이로부터 인식된 입자를 중심으로 국부적으로 영상 처리를 하는 로컬 프로세싱 등 두 단계의 영상 처리 과정 거치는 김주연 등⁽⁷⁾의 영상 처리 알고리즘을 사용하였다. 이들은 영상의 명도 히스토그램의 단조 증가하는 영역에서 가장 기울기

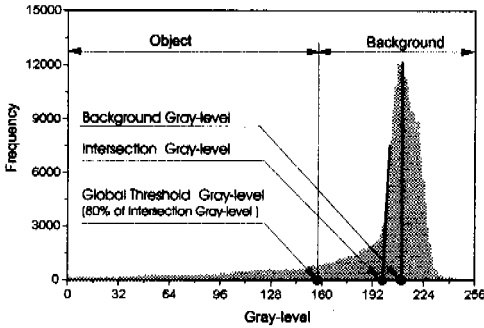


Fig. 3 Typical histogram of the gray-level of an image frame and the definition of the background gray-level

가 큰 접선을 구하고, 이 접선이 명도 축과 교차하는 점(intersection gray-level)을 중심으로 이 값의 80%에 해당하는 값을 글로벌 프로세싱에서의 명암 판별 기준값으로 삼아 배경을 입자와 구분한다. 본 연구에서는 Fig. 3에 예시한 것과 같이 글로벌 프로세싱에서 배경으로 인식된 화소들의 명도 중에서 빈도가 가장 높은 명도를 배경의 밝기 정도를 나타내는 대표값(배경 명도)으로 사용하였다.

배경 명도가 너무 어두우면 입자와 배경 사이의 명도 차이가 작기 때문에 배경으로부터 입자의 구별이 어려워 입자 인식시 오차가 발생한다. 반면에 배경 명도가 매우 밝으면 화소들의 명도가 포화(saturation)되고 광량에 변화에 대해 화소의 명암 분별력이 없어진다. 이에 따라 입자들의 영상이 왜곡된다. 따라서 본 연구에서는 입자 인식이 안정적인 배경 명도 $(100 \sim 200) \pm 2$ 의 범위에서 실험을 수행하였다. 그리고 초점면 존재 판별 기준값으로 실험의 중심값이자 경험적으로 적합한 배경 명도인 160에서의 초점면 존재 판단 기준값들을 선택하였다.

3. 국부 명암 판별 기준값

입경을 측정하기 위해 본 연구에서 사용한 국부 명암 판별 기준값(local threshold gray-level, G_{LT})은 다음과 같이 정의하였다(Fig. 4).

$$G_{LT} = G_{LB} - 0.5 \times (G_{LB} - G_{OM}) \quad (1)$$

이와 같이 정의된 명암 판별 기준값은 초점면에

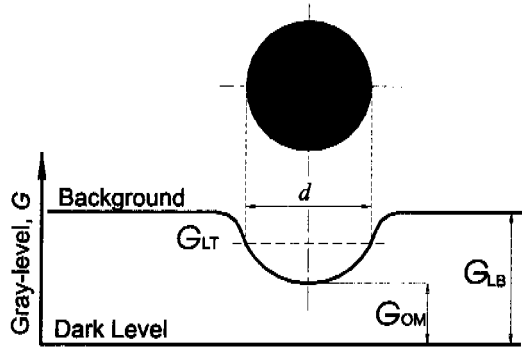


Fig. 4 Definition of G_{LT} and VC

존재하는 입자에 적용할 때 상당히 정확한 결과를 나타낸다고 알려져 있다.^(7, 9, 12)

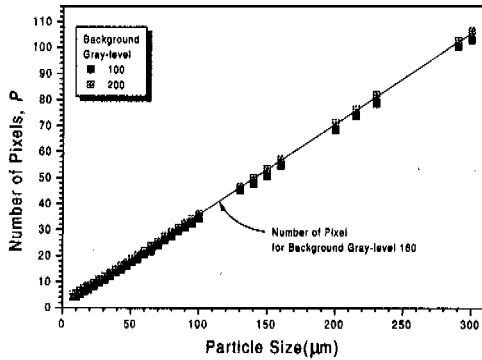
초점면에서 입자 크기에 따른 입경의 화소(pixel) 수를 Fig. 5(a)에 나타냈다. 입경이 증가함에 따라 입경의 화소 수는 증가하고, 배경이 밝아짐에 따라, 즉 배경 명도가 커짐에 따라 절대값의 변화는 작지만 동일 입자에 대한 화소 수는 증가한다.

배경 명도 160에서의 입경의 화소 수를 기준으로 하여 배경 명도 변화에 따른 상대적인 입경의 화소 수의 변화를 다음과 같이 정의하였다.

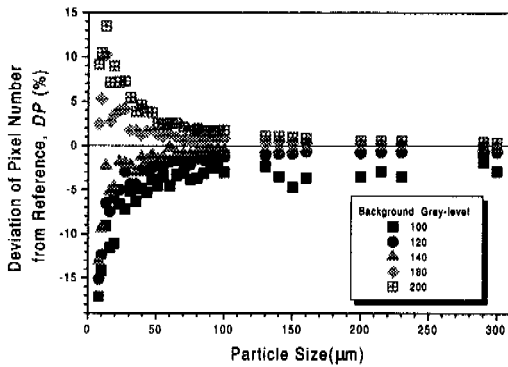
$$DP (\%) = \frac{P_{b=g} - P_{b=160}}{P_{b=160}} \times 100 \quad (2)$$

여기서 $P_{b=g}$ 는 배경 명도가 g 일 때의 입경의 화소 수이고 $P_{b=160}$ 은 배경 명도가 160일 때의 입경의 화소 수이다. 따라서 Fig. 5(b)에서와 같이 배경 명도가 160 이상에서는 DP 는 양의 값을 나타내는 반면 배경 명도가 160 이하에서는 DP 는 음의 값을 나타낸다. 입자가 작을수록 배경 명도에 따라 큰 영향을 받아 그 차이가 $\pm 15\%$ 정도까지 된다. 이는 입자가 작으면 화소의 절대수가 적은 관계로 작은 화소 수의 변화가 상대적으로 DP 에 큰 영향을 주기 때문이다. 따라서 작은 입자가 많이 포함된 입자군의 입경을 측정할 경우에는 배경 명도의 변화에 주의를 기울여야 한다.

배경 명도가 100인 경우에 큰 입자에서도 DP 의 절대값이 비교적 큰 것은 배경과 입자 명도의 절대값 차이가 작아서 배경으로부터 입자를 인식하는 과정에서 오차가 발생하기 때문이다. 따라서 배경 명도가 낮은 경우에는 입자 인식과정에서 주의가 필요하다.



(a) Variation of the pixel number with particle size



(b) Deviation of the pixel number from the reference case ($P_{b=160}$)

Fig. 5 Effect of the background gray-level on the pixel number

4. 기준 명도비와 기울기 지표

작은 입경 영역에서 초점면 존재 판단 기준으로 사용되는 기준 명도비(VC)^(9,12)는 Fig. 4에서 나타난 입자 최소 명도값(object minimum gray-level, G_{OM})과 국소 배경 명도(local background gray-level, G_{LB})를 이용하여 아래와 같이 정의된다.

$$VC = \frac{G_{LB} - G_{OM}}{G_{LB}} = 1 - \frac{G_{OM}}{G_{LB}} \quad (3)$$

기준 명도비의 입경과 광축상의 위치에 따른 변화는 Fig. 6에 도시한 것과 같다. 기준 명도비(VC)는 입자의 위치가 초점면에서 멀어짐에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 보인다. 여기서 Fig. 6(a)와 (b)를 비교해보면 배경 명도가 증가할 때 경향은 그대로이지만 각 입경의 기준 명도비 자체는 작아진다. 그러나 배경 명도가 바뀌더라도 초점면에서 멀어짐에 따라 기준 명도비는 감소하는 경향을 나타내므로 입자의 초점면 존재 여부 판단 시에 기준 명도비의 최대값을 이용할 수 있다.^(9,12)

각 입경의 배경 명도에 따른 최대 기준 명도비의 변화는 Fig. 7(a)와 같다. 배경이 밝아지면 입자에 의해 회절된 빛의 강도가 증가하여 입자의 최소 명도값(G_{OM})은 커진다. 그러나 최소 명도값의 증가가 국소 배경 명도(G_{LB})의 증가보다 크기 때문에 식 (3)에서 볼 수 있듯이 결과적으로 최대 기준 명도비는 배경 명도가 증가함에 따라 감소한다. 배경 명도가 100에서 200으로 변화할 때 최대 기준 명도비는 배경 명도 160일 때의 값($VC_{max, b=160}$)을 기준으로 하여 $\pm 15\%$ 정도의 차이를 보인다. 그러므로 기준 명도비를 초점면 존재 판단 기준으로 사용하는 작은 입경 영역에서는 입경 측정 시 배경 명도의 변화에 주의를 기울여야 한다.

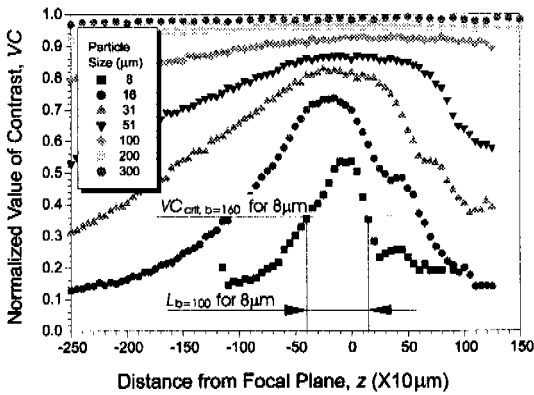
큰 입경 영역에서 초점면 존재 판단 기준으로 사용하는 기울기 지표⁽¹²⁾는 다음과 같이 정의된다.

$$GI = \frac{|\nabla G|}{\left[\frac{G_{max} - G_{min}}{2\Delta x} \right]} \quad (4)$$

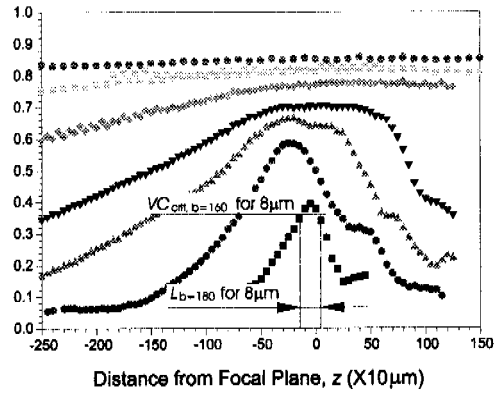
여기서 G_{max} 와 G_{min} 은 다수의 입자를 포함한 한 영상 전체에서 가장 높은 명도와 가장 낮은 명도를 의미한다. 그리고 $|\nabla G(x,y)|$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$|\nabla G(x,y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2} \quad (5)$$

G 는 (x, y) 위치에 있는 화소(pixel)의 명도이다. 기울기 지표도 기준 명도비와 유사하게 초점면 주위에서 최대값을 갖고 초점면에서 멀어짐에 따라

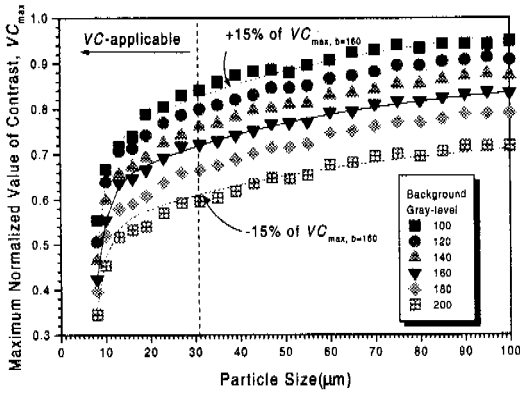


(a) Background gray-level : 100

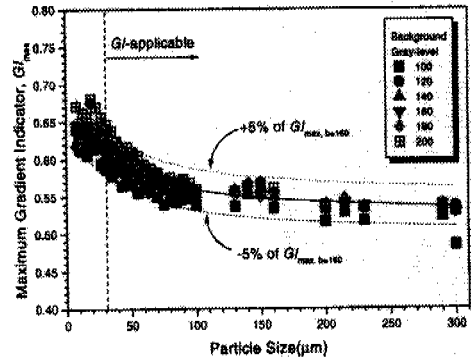


(b) Background gray-level : 180

Fig. 6 Variation of VC with distance from the focal plane for different particle sizes



(a) VC_max



(b) GI_max

Fig. 7 Variation of VC_max and GI_max with the particle size for different background gray-levels

점점 감소한다. 그러므로 입자의 초점면 존재 여부를 판단할 때 기울기 지표의 최대값을 사용한다.⁽¹²⁾

배경 명도에 따른 최대 기울기 지표(GI_max)의 변화는 Fig. 7(b)와 같다. 최대 기울기 지표는 배경 명도가 100과 200인 경우 일부 입경 구간을 제외하면 배경 명도 160일 때의 값(GI_max, b=160)을 기준으로 모두 ±5%이내의 편차를 보인다. 특히 기울기 지표 적용 구간인 큰 입경 영역⁽¹²⁾에서는 배경 명도 변화가 기울기 지표에 미치는 영향은 적다. 비록 기울기 지표는 미분값으로 정의되어 있어 그 편차가 비교적 크지만 기준 명도비에 비해 배경 명도 변화에 영향을 받지 않도록 정의되어 있음을 알 수 있다.

5. 초점 심도와 측정 정도

입자의 초점면 존재 판단 기준값(VC, GI)이 각 입경에서의 임계값보다 크면 초점면 위에 그 입자가 존재한다고 판단한다. 임계 기준 명도비(VC_critical)와 임계 기울기 지표(GI_critical)는 다음과 같은 정의를 사용하였다.

$$VC_{critical} = VC_{max} \times C \tag{6}$$

$$GI_{critical} = GI_{max} - \Delta GI \tag{7}$$

여기서 C와 ΔGI는 측정 시간, 허용하는 측정

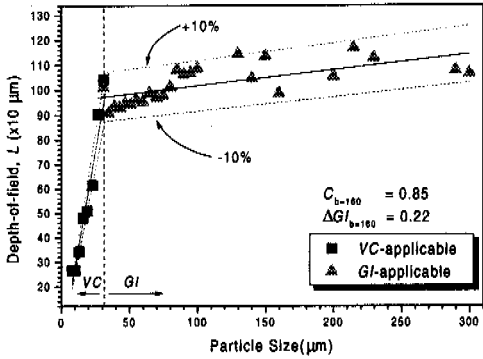


Fig. 8 Depth-of-field variation with the particle size for background gray-level 160

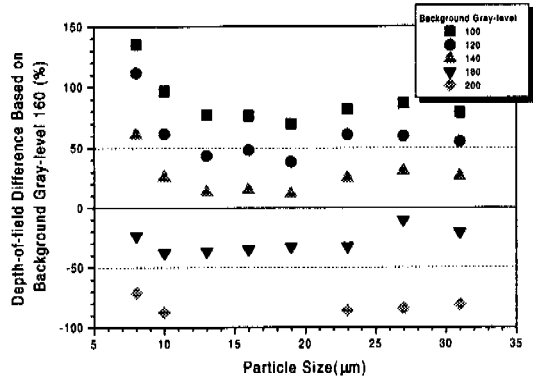
오차 그리고 초점 심도의 연속성 등을 고려해서 결정된다.⁽¹²⁾ 그리고 배경 명도나 확대비, 광학 배열 등 광학시스템의 영향을 받는다.

본 연구에서는 배경 명도 160일 때의 각 레티클 입자들에 대해서 초점면 존재 판단 기준의 임계값들과 초점 심도간의 관계를 우선 살펴보았다. 입자가 초점면에서 벗어날 때의 오차를 살펴보기 위하여 정규화된 입경 표준 편차(normalized

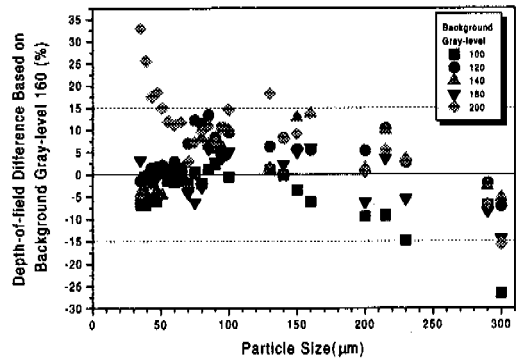
standard deviation)를 나타내면 다음과 같다.

$$s = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{d_{\text{measure}} - d_{\text{true}}}{d_{\text{true}}} \right)^2}{(N-1)}} \quad (8)$$

여기서 d_{measure} 는 측정된 입경이고, d_{true} 는 초점면에서의 실제 입경을 의미한다. N 은 측정된 입자의 수이다. 배경 명도 160일 경우 입경의 표준 편차를 0.1 이하로 유지하고, 초점 심도의 연속성을 고려하면 $C_{b=160} = 0.85$, $\Delta GI_{b=160} = 0.22$ 로 설정된다. 이전에 고풍용 등⁽¹²⁾은 ΔGI 을 0.28로 제시하여 본 연구와 다소 차이 나는 결과를 제시하였다. 이는 기울기 지표의 미분값으로 정의되어 있어 그 편차가 크고 특히 기울기 지표의 최대값은 광학 배열에 크게 영향을 받기 때문이다. (최대값을 제외하면 기울기 지표의 변화는 고풍용 등⁽¹²⁾의 결과와 큰 차이 없다.) Fig. 8에는 입경에 따른 초점 심도의 변화를 나타내었다. 이 그림에 도시된 바와 같이 기준 명도비와 기울기 지표의 적용 구간 경계는 $30\mu\text{m}$ 부근으로 이는 고



(a) VC-applicable range($d=0\sim 30\mu\text{m}$)



(b) GI-applicable range($d=30\sim 300\mu\text{m}$)

Fig. 9 Effect of the background gray-level on the depth-of-field

광용 등⁽¹²⁾의 결과와 일치한다. 기울기 지표 적용 구간에서의 초점 심도의 실험값이 평균값을 중심으로 $\pm 10\%$ 정도 분산되어 있는 이유는 기울기 지표가 미분으로 정의되어 있기 때문이다.⁽¹²⁾

배경 명도 160에서의 초점면 존재 판단 기준값들($VC_{\text{crit}, b=160}$ 과 $GI_{\text{crit}, b=160}$)을 배경 명도가 다른 영상에 적용하여 배경 명도에 따른 초점 심도의 변화를 살펴보았다. Fig. 9에 배경 명도 160에서의 초점 심도를 기준으로 하여 이로부터 배경 명도를 변화시켰을 때의 초점 심도 변화량을 나타내었다. 기준 명도비를 초점면 존재 판단 기준으로 적용할 경우, Fig. 9(a)에서 볼 수 있듯이 배경 명도가 증가할수록 초점 심도는 감소한다. 배경 명도가 100에서 200까지 변할 경우 초점심도의 변화량은 배경 명도 160을 기준으로 $\pm 100\%$ 정도까지 된다. 이는 배경이 밝아지면 각 입자가 갖

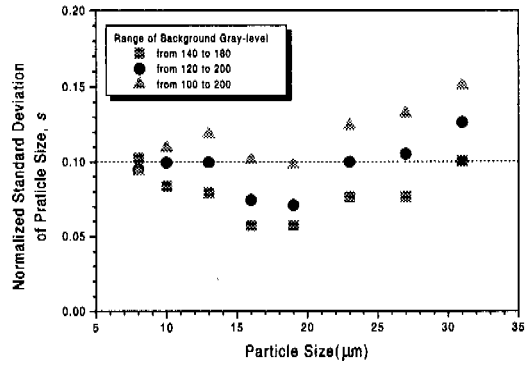
는 기준 명도비가 감소하여(Fig. 6(a)와 (b)) 기준 명도비가 임계값($VC_{critical}$)보다 큰 광축상의 구간 (L)이 짧아지기 때문이다. 예를 들면 Fig. 6에 도시한 것과 같이 입경 $8\mu m$ 의 초점 심도는 배경 명도가 100에서 180으로 변화하면 $L_{b=100}$ 에서 $L_{b=180}$ 으로 짧아진다.

기울기 지표를 초점면 존재 판단 기준으로 적용할 경우의 초점 심도 변화는 Fig. 9(b)에서 볼 수 있듯이 기울기 지표가 미분값으로 정의되어 있어 큰 편차가 존재한다. 그러나 배경 명도 100과 200의 경우의 일부를 제외하고는 배경 명도를 변화시켜도 초점 심도는 배경 명도 160을 기준으로 삼았을 때 $\pm 15\%$ 이내로 변화하며, 기준 명도비를 적용하는 구간보다 작게 나타난다.

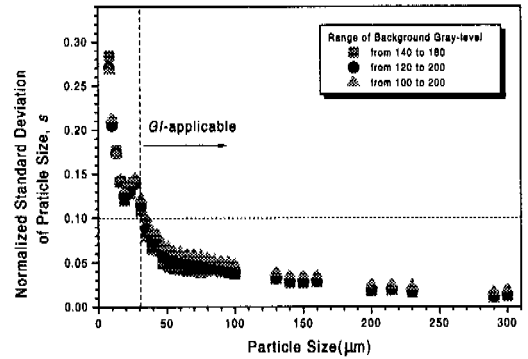
Fig. 10에는 배경 명도 160일 때의 초점면 존재 판단 기준들($VC_{crit, b=160}$ 과 $GI_{crit, b=160}$)을 바탕으로 허용하는 배경 명도에 따른 입경 표준 편차의 변화를 살펴보았다. 이미 Fig. 7(a)에서 언급하였듯이 기준 명도비가 배경 명도에 따라 큰 변화를 보이기 때문에, Fig. 10(a)에서와 같이 허용하는 배경 명도의 범위가 커질수록 입경의 표준 편차는 크게 증가한다. 기준 명도비를 적용하는 입경 구간에서 표준 편차를 0.1 이하로 유지하기 위해서는 배경 명도를 140에서 180까지 즉 160 ± 20 을 유지해야 한다. 그리고 입경이 커짐에 따라 기준 명도비의 초점면 존재 판단 기준으로써의 변별력을 상실하여 입경의 표준 편차는 입경이 커질수록 증가한다. 그러나 입자가 너무 작으면 앞서의 Fig. 5(b)에서도 볼 수 있듯이 입경의 화소 수가 적어 배경 명도에 의한 화소 수의 작은 변화가 상대적으로 큰 영향을 미치기 때문에 $15\mu m$ 이하의 입자들의 표준 편차는 입경이 감소할수록 증가하는 경향을 보인다.

기울기 지표를 초점면 존재 판단 기준으로 적용할 때 허용하는 배경 명도 범위에 따른 측정 입경 표준 편차는 Fig. 10(b)와 같다. 앞서서 Fig. 7(b)에서 알 수 있듯이 기울기 지표는 배경 명도에 비교적 둔감하다. 따라서 배경 명도의 변화 범위가 커짐에 따라 표준 편차는 증가하나 그 증가폭은 기준 명도비를 사용하는 구간에 비해 매우 작다.

종합적으로 살펴볼 때, 배경 명도 160에서의 초점면 존재 판단 기준을 적용하고 배경 명도의 변화 범위를 ± 20 이내로 유지하면 초점 심도는



(a) VC-applicable range



(b) GI-applicable range

Fig. 10 Effect of background gray-level on the particle-size standard deviation

기준 명도비를 적용하는 구간에서 $\pm 50\%$, 기울기 지표를 사용하는 구간에서는 $\pm 15\%$ 이내의 편차를 보인다. 그러나 앞서 언급하였듯이 입경의 표준 편차는 배경 명도가 160일 때와 동일하게 0.1 이내로 유지할 수 있다. 이는 기준 명도비를 적용하는 입경 구간에서 초점 심도의 절대값이 작은 반면 작은 입자에서 큰 입자까지 다양한 크기의 입자를 포함한 입자군에서 작은 입자들이 SMD 등 평균 입경에 미치는 영향이 작기 때문이다.

따라서 배경 명도를 160으로 선택하였을 때 허용 배경 명도 범위를 ± 20 로 설정하면 입경 표준 편차를 0.1이내로 유지하면서 $10\mu m$ 에서 $300\mu m$ 까지 다양한 크기의 입자를 포함한 입자군의 평균 입경을 측정할 수 있다.

6. 결론

배경 명도가 증가하면 입경의 화소 수는 절대값의 변화는 작지만 증가한다. 입자가 작을수록 입경의 화소 수가 적기 때문에 배경 명도 변화에 상대적으로 큰 영향을 받는다. 배경이 밝아짐에 따라 최대 기준 명도비(VC_{max})는 감소한다. 변화의 폭도 커서 배경 명도가 100에서 200으로 변화할 때 $VC_{max, b=160}$ 을 기준으로 $\pm 15\%$ 이상의 차이를 보인다. 그러나 최대 기울기 지표는 $GI_{max, b=160}$ 을 기준으로 5%이내의 편차를 보인다. 특히 기울기 지표 적용 구간인 큰 입경 영역에서는 배경 명도에 따라 기울기 지표는 크게 변하지 않는다.

기준 명도비 적용 구간에서 초점 심도는 배경 명도에 따라 그 변화 폭이 크다. 그러나 기울기 지표를 적용하는 구간에서는 배경 명도에 따른 그 변화의 폭은 작다.

기준 명도비를 적용하는 입경 구간에서 입경의 표준 편차는 배경 명도의 변화 범위에 크게 영향을 받는다. 따라서 입경 표준 편차를 0.1 이하로 유지하기 위해서는 배경 명도 160을 기준으로 설정했을 경우 배경 명도는 160 ± 20 을 유지해야 한다. 기울기 지표 적용 구간에서는 배경 명도의 변화 범위가 커짐에 따라 입경의 표준 편차는 증가하나, 그 증가폭은 매우 작다.

따라서 기준 배경 명도로 160을 선택하였을 때 허용 배경 명도범위를 ± 20 으로 설정하면 10~300 μm 범위의 다양한 크기의 입자를 포함한 입자군의 평균 입경을 표준 편차 0.1 이내로 유지하면서 측정할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구사업(98-0200-03-01-2)과 산학협력연구사업(98-2-09-04-01-2), 그리고 한국과학기술원 기관고유사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 특히, (주) V-Tek의 장비지원에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Chigier, N., 1983, "Drop Size and Velocity Instrumentation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.

9, pp. 155~177.

(2) 이상용, 1996, 액체의 미립화, 민음사.

(3) Ahlers, K. D. and Alexander, D. R., 1985, "Microcomputer Based Digital Image Processing System Developed to Count and Size Laser-Generated Small Particle Images," *Opt. Eng.*, Vol. 24, No. 6, pp. 1060~1065.

(4) Kim, I. G. and Lee, S. Y., 1990, "A Simple Technique for Sizing and Counting of Spray Drops Using Digital Image Processing," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 3, pp. 214~221.

(5) Ow, C. S. and Crane, R. I., 1981, "Pattern Recognition Procedures for a Television-Mini-computer Spray Droplet Sizing System," *J. Inst. Energy*, Vol. 54, No. 430, pp. 119~123.

(6) Weiss, B. A., Derov, P., DeBiase, D. and Simmons, H. C., 1984, "Fluid Particle Sizing Using a Fully Automated Optical Imaging System," *Opt. Eng.*, Vol. 23, No. 5, pp. 561~566.

(7) 김주연, 추정호, 이상용, 1998, "입경 측정을 위한 영상처리기법의 개선," 대한기계학회 논문집, Vol. 22, No. 8, pp. 1152~1164.

(8) Lee, S. Y., Park, B. S. and Kim, I. G., 1991, "Gray Level Factors Used in Image Processing of Two-Dimensional Drop Images," *Atomization and Sprays*, Vol. 1, No. 4, pp. 389~400.

(9) Kim, K. S. and Kim, S. S., 1994, "Drop Sizing and Depth-of-field Correction in TV Imaging," *Atomization and Sprays*, Vol. 4, No. 1, pp. 65~78.

(10) Talley, D. G. and Hassoni, M., 1992, "Accounting for Depth of Field in Sizing Spherical Particles by Imaging," *Atomization and Sprays*, Vol. 2, No. 1, pp. 385~409.

(11) Mohammadi, A., Miwa, K., Ishiyama, K. and Abe, M., 1998, "Measurement of Droplet Size, Shape and Velocity in Diesel Sprays using a Single and Double Nano-spark Photography Method," *JSME International Journal, series B*, Vol. 41, No. 1, pp. 7~12.

(12) 곽광웅, 김주연, 이상용, 1999, "입경측정을 위한 영상처리기법에서 입자 초점면 존재 판단 기준의 설정," 대한기계학회 논문집, Vol. 23, No. 3, pp. 398~407.