

# 입경측정을 위한 영상처리방법에서 입자 초점면 존재 판단 기준의 설정

고광웅\* · 김주연\* · 이상용\*  
(1998년 9월 10일 접수)

## Determination of In-focus Criteria in Image Processing Method for Particle Size Measurement

Kwang Uoong Koh, Joo Youn Kim and Sang Yong Lee

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

### Abstract

In the present image processing technique, the concept of the gradient indicator(*GI*) has been introduced to find out the depth-of-field in sizing large particles ranging from  $30\mu\text{m}$  to  $300\mu\text{m}$  where using of the concept of the normalized contrast value(*VC*) is not appropriate. The gradient indicator is defined as the ratio of the local value to the maximum possible value of the gray-level gradient in an image frame. The gradient indicator decreases with the increases of the particle size and the distance from the exact focal plane. A particle is considered to be in focus when the value of the gradient indicator at its image boundary stays above a critical value. This critical gradient indicator( $GI_{\text{critical}}$ ) is defined as the maximum gradient indicator( $GI_{\text{max}}$ ) subtracted by a constant ( $\Delta GI$ ) which is to account for the particle-size effect. In the present case, the value of  $\Delta GI$  was set to 0.28 to keep the standard deviation of the measured particles mostly within 0.1. It was also confirmed that, to find the depth-of-field for small particles( $\leq 30\mu\text{m}$ ) with the same measurement accuracy, the concept of the critical normalized contrast( $VC_{\text{critical}}$ ) is applicable with 85% of the maximum normalized contrast value( $VC_{\text{max}}$ ). Finally, the depth-of-field was checked for the size range between  $10\mu\text{m}$  and  $300\mu\text{m}$  when the both in-focus criteria ( $GI_{\text{critical}}$  and  $VC_{\text{critical}}$ ) were adopted. The change of the depth-of-field with the particle size shows good linearity in both the *VC*-applicable and the *GI*-applicable ranges with a reasonable accuracy.

<hr style="border: 0.5px solid black;"/> <p style="text-align: center;">기호설명</p> <p><i>a</i> : 명도 기울기가 존재하는 폭</p> <p><i>d</i> : 입경</p> <p><i>G</i> : 명도</p> <p><i>GI</i> : 기울기 지표</p> <p><i>LBG</i> : 국소 배경 명도</p> <p><i>LT</i> : 명암 판별 기준값</p> <p><i>N</i> : 측정된 입자의 수</p> <p><i>OMG</i> : 입자 최소 명도</p> <hr style="border: 0.5px solid black;"/>	<p><i>s</i> : 측정 입경의 표준편차</p> <p><i>SMD</i> : Sauter 평균 입경</p> <p><i>VC</i> : 기준 명도비</p> <p><i>x</i> : 화소의 수평 좌표</p> <p><i>y</i> : 화소의 수직 좌표</p> <p style="text-align: center;">하첨자</p> <p>critical : 임계값</p> <p>max : 최대값</p> <p>true : 실제 입경</p> <p>measure : 입경 측정값</p> <p>min : 최소값</p>
---	---

\* 한국과학기술원 기계공학과

## 1. 서론

입정은 주위 기체와 분사 액체사이의 열 및 물질전달 또는 화학반응 속도를 결정짓는 주요 분무 특성 중의 하나로 이에 관하여 많은 측정법들이 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 근래에는 측정 기구를 시험부 내로 삽입하지 않고 유동을 방해하지 않는 광학적인 측정 기법들, 즉 위상-도플러법(phase-Doppler method), 광산란법(light scattering method), 그리고 영상 처리 기법(image processing method) 등이 많이 사용되고 있다.

영상 처리 기법을 이용한 입정 측정 기법은 다른 광학적인 측정 기법들에 비하여 비교적 단순한 구조를 갖고 있으며, 광학 시스템의 배열도 위상-도플러 기법에 비해 비교적 쉽다는 장점이 있다. 또한 시스템을 구성하는 각 단위 기기의 가격이 다른 기법에서 사용되는 장치에 비해 저렴하다. 입자에 의한 산란광을 이용하는 측정 기법이 아니므로 다른 광학적인 측정 기법에 비해 입자 및 시험부의 광학적 특성이 측정된 입정에 주는 영향이 비교적 적다. 측정하는 액적을 직접 관찰할 수 있으므로 측정값의 신뢰성을 높일 수 있고 알고리즘을 개선할 경우 비구형의 입자를 감지, 분석할 수 있다. 그 이외에 이중 섬광 광원을 이용하면 입자의 속도를 측정할 수 있다. 이 측정 기법은 최근 컴퓨터등 각 구성 요소의 급격한 발전으로 그 성능이 계속 향상되어 오고 있다.

영상 처리 기법을 이용한 입정 측정에서는 시스템 구성 요소의 급격한 발전에도 불구하고 영상 기기(image device) 자체 및 영상 처리 기법에 따라 측정결과가 달라진다는 문제점이 있다. 영상 기기 측면에서는 기기의 기하학적 비선형성(geometric nonlinearity)과 광반응 비선형성(photo-metric nonlinearity)이 입정 측정 결과에 영향을 미친다. 기하학적 비선형성은 영상 기기의 화소(pixel)의 크기가 불균일하기 때문에 나타나고, 광반응 비선형성은 광량에 대한 영상 기기의 반응이 광량에 따라 선형적이지 않기 때문에 나타난다. 그러나 이들에 의한 오차는 영상 기기로 CCD 카메라(camera)를 선택하면 줄일 수 있다.

반면에 영상 처리 기법의 측면에서는 입자 영상 경계(particle image boundary)에서 회절

(diffraction)에 의하여 명도 기울기(gray level gradient)가 나타나기 때문에 알맞은 명암 판별 기준값(threshold gray level)을 결정해야 하는 문제가 있다. 그리고 영상 처리기법은 3차원 공간 상에 분포되어 있는 입자들의 영상으로부터 입정을 측정한다. 이 때문에 얻은 영상에는 초점면에서 벗어난 입자의 영상도 포함되며 초점면 상에 존재하지 않는 입자들은 측정 시 오차를 발생시키게 된다. 측정의 정확도를 높이기 위해서는 초점면을 벗어난 입자를 영상 처리과정에서 제거해야 하며 이를 위해 초점면 존재 판단 기준(in-focus criterion)의 확립이 필요하다. 입자가 초점면(focal plane) 위에 존재한다고 생각되는 광축상의 거리 범위 인 초점 심도(depth-of-field)는 입정 측정 시 측정부피(sampling volume)를 결정한다. 일반적으로 초점 심도는 입정에 따라 증가한다. 따라서 측정 부피가 다른 경우에 대하여 측정된 입정을 단위 측정 부피에 대한 값으로 환산하는 초점 심도 보정(depth-of-field correction)을 해야 한다. 이를 위한 입정에 따른 초점 심도의 파악이 필요하다.

영상 처리 기법에 관한 연구에서는 획득한 영상으로부터 입자를 구분하기 위한 영상 인식 알고리즘(pattern recognition algorithm)에 관한 연구뿐만 아니라 초점면 존재 판단 기준의 설정, 초점 심도의 보정과 관련된 영상 처리 시스템의 조정(tuning) 등이 진행되고 있다. 초점 심도 보정과 초점면 존재 판단 기준 등은 확대비, 광원, 사용된 렌즈 그리고 영상 기기 등 영상 처리 기기의 광학계에 의해서도 영향을 받는 등 그 인자가 많다. 따라서 이에 관한 연구들은 이론적인 방법보다는 주로 실험적인 접근을 통하여 이루어지고 있다.

영상 인식 알고리즘에 관한 연구들은 Ahlers와 Alexander<sup>(2)</sup>와 Kim과 Lee<sup>(3)</sup> 등에 의해 수행되었다. 이들은 PC를 이용해 측정된 영상을 저장한 후 line-by-line 기법과 런코딩(run coding) 기법 등의 영상 인식 알고리즘을 사용하여 입정을 계산하였다. 이외에 Ow와 Crane<sup>(4)</sup>이 영상 인식 알고리즘에 관하여 연구를 하였고, 최근에 김주연 등<sup>(5)</sup>이 증폭된 입자 및 비구형 입자의 처리를 위하여 영상 처리 알고리즘을 개선하였다.

Ahlers와 Alexander<sup>(2)</sup>는 또한 명암 판별 기준 값을 사용하여 측정된 영상의 입자 위치와 초점

면과의 거리에 따라 입경이 다르게 측정되는 것을 보정하려 하였다. 그리고 Lee 등<sup>(6)</sup>은 Rosin-Rammler 입경 분포 함수를 이용하여 다양한 크기의 입자를 포함하는 입자군의 분포를 가장 잘 표현할 수 있는 입경 분포 변수를 얻기 위해 최적의 명암 판별 기준값을 정하는 연구를 수행하였다. 이들은 액침법으로 채집한 액적들의 입경을 측정하는 것을 목표로 하였기 때문에 초점면 존재 판단 기준의 설정이 필요하지 않았다. Weiss 등<sup>(7)</sup>은 TV 카메라를 이용하여 입자가 포함된 영상을 주사(scanning)할 때 발생하는 전기적 신호의 변동폭과 기울기를 이용하여 입경을 측정하고 입자가 초점면에 존재하는지 여부를 판단하였다.

최근 들어 Kim과 Kim<sup>(8)</sup>은 자동차 엔진에 적용되는 연료 분사기에서 분사되는 주로  $30\mu\text{m}$  이내의 작은 액체 입자의 입경을 측정하기 위해 명암 판별 기준값과 초점면 존재 판단 기준 및 영상 처리 기법 전반에 대한 포괄적인 연구를 수행하였다. 이들은 입경에 따른 최대 명도비(contrast value)를 실험적으로 결정하고 이를 근거로 입자의 초점면 존재 여부를 판단하였다. 그리고 초점면 존재 판단 기준을 이용하여 각 입경에 대한 초점 심도의 영향을 보정하였다. 이들은 각각의 입자에 대하여 배경명도와 입자의 최소 명도와와의 차이의 50%를 명암 판별 기준값으로 설정하였고, 이렇게 측정된 입경이 실제 입경과 상당히 잘 일치함을 보여주었다. 특히 이들이 제시한 초점면 존재 판단 기준은 작은 입자의 영상을 처리하는 경우에는 매우 유용한 것으로 알려져 있다.

그러나 일반적인 산업용 분무기, 예를 들면 와류분무 노즐, 선형 분무 노즐 등에서 분사되는 액적의 입경 분포는 엔진용 연료 분사기에서 분사되는 액적에 비해 그 범위가 수  $\mu\text{m}$ 에서 수백  $\mu\text{m}$ 까지 넓고, 평균 입경도 크다. 따라서 작은 입자의 측정을 위한 기존의 초점면 존재 판단 기준을 입경이 수백  $\mu\text{m}$ 까지 이르는 분무 유동에 검증 없이 직접 적용하는 것은 무리가 있다.

본 연구에서는 Kim과 Kim<sup>(8)</sup>의 입경 측정 범위 ( $30\mu\text{m}$  이하)보다 넓은  $10\sim 300\mu\text{m}$  정도 되는 프로세스용 분무의 입경 측정에 영상 처리 기법을 적용할 수 있도록 영상 처리 기법을 개선하였다. 우선 Kim과 Kim<sup>(8)</sup>이 제시한 초점면 존재 판단 기준을 검증하고 적용 가능 구간을 파악하였다.

이와 아울러 기존의 초점면 존재 판단 기준을 적용할 수 없는 입경 구간에 대하여 적용할 수 있는 새로운 초점면 존재 판단 기준을 제시하였다. 그리고 초점면 존재 판단 기준과 이들의 입계값에 따른 초점 심도 변화를 살펴보았다.

## 2. 장치의 구성 및 실험 방법

영상 처리 기법을 이용한 입경 측정 장치의 구성은 Fig. 1에서와 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.

CCD 카메라(TM-7CN, Plunix)는 영상 셀(image cell)의 크기가  $8.4\mu\text{m} \times 9.8\mu\text{m}$ 이고 해상도는 768(수평)  $\times$  494(수직)이다. 초점 거리가 300mm인 수광 렌즈(receiving lens)를 CCD 카메라 앞에 설치하였다. 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  $8\sim 1000\mu\text{m}$ 이다.

실험에 필요한 입자군 모형은 Fig. 2와 같은 보정용 레티클을 이용하였다. 레티클은 입자를

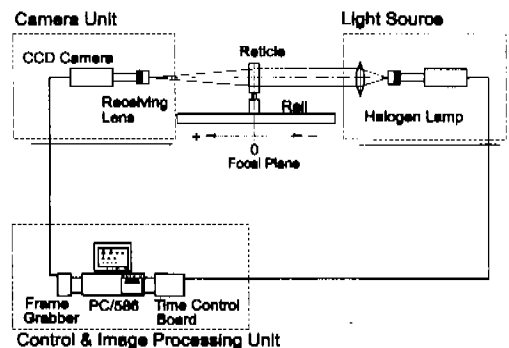


Fig. 1 Schematic diagram of drop/particle sizer using image processing method.

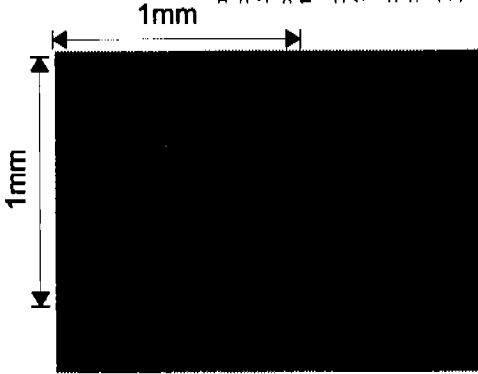


Fig. 2 Images of particles on a calibration reticle (2~100 $\mu$ m).

모사한 점(circular dots)을 투명 유리에 크롬(chrome)도금하여 제작한 것으로, 2 $\mu$ m에서 300 $\mu$ m까지 43종류 크기의 점들로 구성되어 있다. 입자들은 입경에 따라 2~100 $\mu$ m, 47~150 $\mu$ m, 그리고 200~300 $\mu$ m 등 3개의 군으로 나누어 제작하였다. 주로 작은 입자들로 이루어진 2~100 $\mu$ m와 47~150 $\mu$ m 등 두 개의 입자군에 대해서는 50 $\mu$ m간격으로, 그리고 200~300 $\mu$ m 입자군의 경우에는 100 $\mu$ m간격으로 광축을 따라 앞으로 레티클을 이동시키면서 입자들의 영상을 얻었다. 초점면을 중심으로 Fig. 1에서와 같이 광원 쪽 방향을 (-)로, 카메라 쪽 방향을 (+)로 설정하였다. 각 위치에서 3~5장의 영상을 얻었으며, 이를 총 4회 반복하였다.

### 3. 초점면 존재 판단 기준

#### 3.1 기준명도비(normalized contrast value, VC)

본 연구에서는 명암 판별 기준값을 식 (1)과 같이 정의하여 사용하였다.

$$LT = LBG - 0.5 \times (LBG - OMG) \quad (1)$$

이와 같이 정의된 명암 판별 기준값은 초점면에 존재하는 입자에 적용할 때 상당히 정확한 결과를 나타낸다고 알려져 있다(Fig. 3).<sup>(5, 8)</sup>

작은 입자의 초점면 존재 판단 기준은 다음과 같이 정의되는 기준 명도비(normalized contrast value, VC)를 이용할 수 있다(Fig. 3).<sup>(8)</sup>

$$VC = \frac{LBG - OMG}{LBG} \quad (2)$$

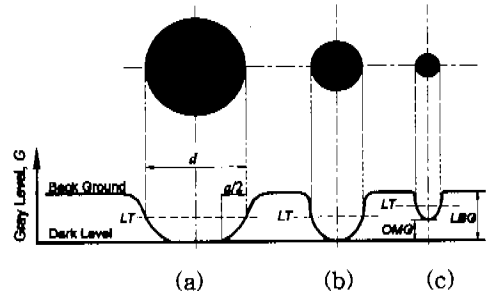


Fig. 3 Gray-level change with different particle size.

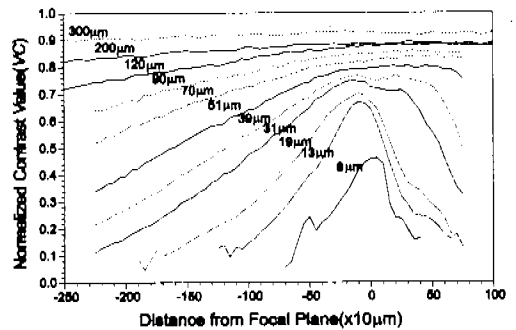


Fig. 4 Variation of normalized contrast value (VC) with distance from focal plane for each particle size.

큰 입자의 경우(Fig. 3(a)) 입자가 초점면에 위치하면 입자 경계 부근에서의 명도 기울기가 존재하는 폭(a)보다 입경(d)이 커서 입자 최소 명도값(OMG)은 흑색(dark level)과 같아진다. 이에 따라 기준 명도비는 1이 된다. 그러나 입경이 감소하게 되면 (Fig. 3(b)와 (c)) 입자가 초점면에 존재하더라도 입자 최소 명도값(OMG)은 흑색보다 큰 값을 갖게 되어 1보다 기준 명도비는 작아진다.

기준 명도비의 입경과 입자의 광축 상의 위치에 따른 변화는 Fig. 4와 같다. 기준 명도비(VC)는 입자의 위치가 초점면에서 멀어짐에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 보인다. 그러나 입경이 증가할수록 감소 기울기는 줄어들어 입경이 200 $\mu$ m 이상에서는 입자의 위치에 따른 기준 명도비의 변화는 거의 없다. 이는 큰 입자의 경우에 입자가 초점면에서 다소 벗어나더라도 경계부근에서의 명도 기울기가 존재하는 폭(a)보다 입경(d) 자체가 크므로 입자 최소 명도값(OMG)의

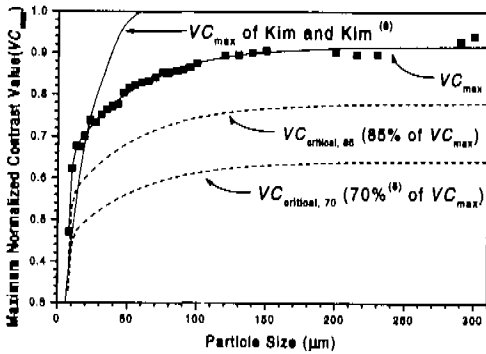


Fig. 5 Variation of the maximum VC ( $VC_{max}$ ) for each particle size.

변화가 적기 때문이다. 작은 입자의 기준 명도비가 초점면에서 멀리 떨어진 위치에서 부분적으로 증가하는 구간이 나타나기도 한다. 이는 해당 위치에서 기준 명도비의 절대값이 작고 영상에서 인식되는 입자의 수도 작아 측정 오차가 발생하기 때문이다. 그러나 이러한 경향은 초점면에서 상당히 떨어진 위치에서 나타나고, 각 입정의 기준 명도비의 최대치에 비해 상당히 작다. 그러므로 실제로는 입정 측정 결과에 영향을 미치지 않는다. 각 입정의 기준 명도비의 최대치는 일부 입정의 경우를 제외하고는 전반적으로 초점면에서 나타나지 않고 초점면을 중심으로 (+)방향 (CCD 카메라 방향으로)으로 약간 이동하는 경향을 보인다.

Fig. 5에는 각 입정에 따른 기준 명도비의 최대치 ( $VC_{max}$ )를 나타내었다. 입정에 따른 최대 기준 명도비는 작은 입정 영역에서는 급격히 증가한다. 그러나 점차로 그 증가의 폭이 줄어들어 150  $\mu\text{m}$  이상에서는 입정에 따라 큰 변화 없이 거의 일정한 값을 갖는다.

초점면으로부터의 거리에 따른 기준 명도비 및 입정에 따른 최대 기준 명도비 ( $VC_{max}$ )의 변화는 Fig. 5에서 보여주듯이 Kim과 Kim<sup>(6)</sup>이 제시한 경향과 일치한다. 그러나 배경 명도 등 측정 조건이 변화하고 확대비, 광원 등 광학 시스템이 달라 절대값 자체는 차이가 난다.

본 연구에서의 광학 시스템을 이용하여 Fig. 2의 레티클을 측정할 때 최대 기준 명도비에 대한 기준 명도비의 비율 ( $VC/VC_{max}$ )에 따른 입정의 측정 오차 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 기준 명

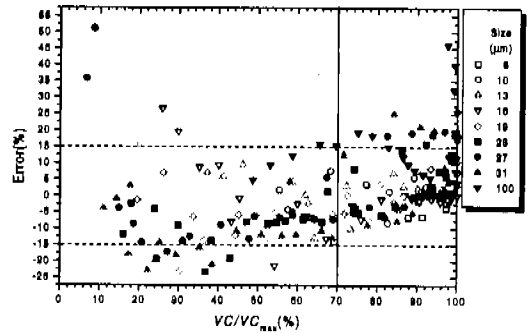


Fig. 6 Error (%) variation with  $VC/VC_{max}$  for each particle size.

도 비율이 70%<sup>(6)</sup> 이상에서도 입정이 23  $\mu\text{m}$  이상인 입자들 중에서는  $\pm 15\%$  이상의 오차를 가진 입자들이 나타난다. 입정이 커짐에 따라 큰 오차의 발생 빈도와 최대 오차는 증가한다. 특히 입정이 100  $\mu\text{m}$ 에서는  $VC/VC_{max}$  값이 1에 근접하더라도 측정 오차가 심지어 45% 이상이 되는 경우도 있다. 큰 입자는 Fig. 4에서 보였듯이 초점면에서 벗어나더라도 입자의 최소 명도비의 변화가 적기 때문에 기준 명도비의 변화는 미미하다. 반면에 Fig. 7에서 보인 것과 같이 큰 입자가 초점면에서 벗어나면 입자 영상의 경계가 불명확해지기 때문에 측정값은 오차를 갖는다.

그러므로 Kim과 Kim<sup>(6)</sup>이 제시한  $VC/VC_{max}$  만으로는 모든 크기 입자의 초점면 존재 여부를 판단할 수 없으며, 큰 입자를 위한 새로운 초점면 존재 판단 기준이 필요함을 알 수 있다.

### 3.2 기울기 지표 (gradient indicator, $G$ )

Fig. 7에서 보듯이 입자가 초점면에서 멀어질수록 입자 영상의 경계가 흐려진다. 이에 따라 입자의 경계부근에서 나타나는 최대 명도 기울기가 급격히 감소함을 알 수 있다. 본 연구에서는 입자 영상 경계에서의 최대 명도 기울기 (gradient)를 이용하여 새로운 초점면 존재 판단 기준을 추가로 정의하였다. 명도 기울기는

$$|\nabla G(x,y)| = \left[ \left( \frac{\partial G}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial G}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

으로 정의되며,  $G$ 는  $(x, y)$  위치에 있는 화소 (pixel)의 명도이다.

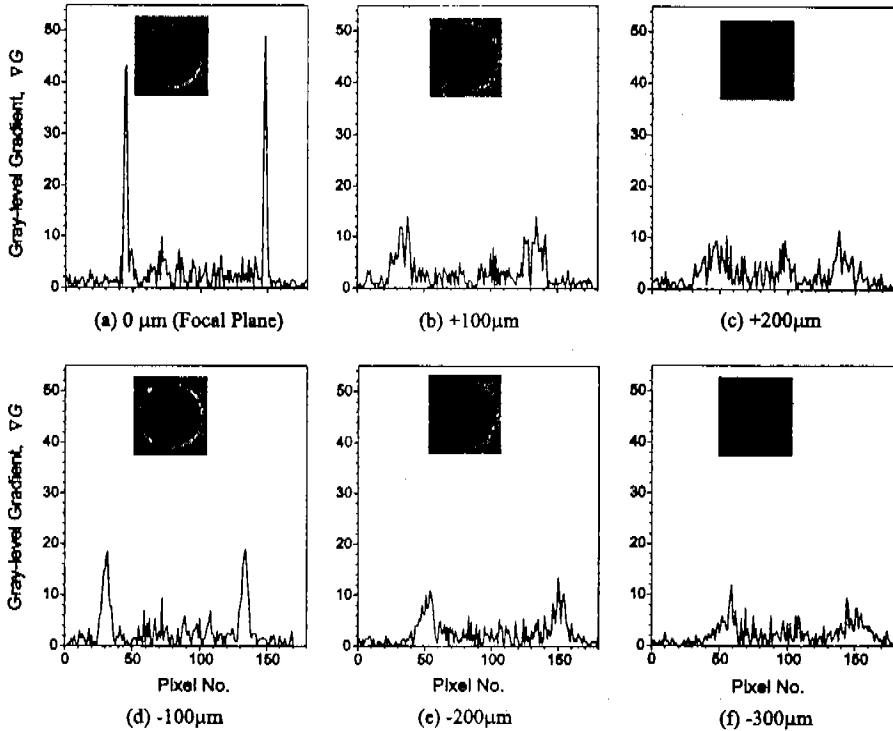


Fig. 7 Change of particle image and gray-level gradient with distance from the focal plane ( $d=300\mu\text{m}$ ).

$G_1$	$G_2$	$G_3$
$G_4$		$G_8$
$G_7$	$G_8$	$G_9$

Fig. 8 Gray-levels of each pixel for determination of gray-level gradient.

식 (3)과 같이 일반적으로 정의된 미분을 영상에 적용하기 위해 소벨 연산자(Sobel operator)<sup>(9)</sup>를 이용하였다. Fig. 8과 같은 경우에 소벨 연산자를 이용하면 5번 화소위치에서의 명도 기울기는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial G}{\partial x} = \frac{(G_3 + 2G_6 + G_9) - (G_1 + 2G_4 + G_7)}{8\Delta x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial G}{\partial y} = \frac{(G_7 + 2G_8 + G_9) - (G_1 + 2G_2 + G_3)}{8\Delta y}$$

각  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 의 크기는 일정하다고 가정하였고 소벨 연산자의 차원을 맞추기 위해  $8\Delta x$ 와  $8\Delta y$ 를 나누었다. 그러나 이런 미분값 ( $\nabla G$ ) 자체는 주위(배경) 명도나 입자의 명도 등에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 영상의 최대명도( $G_{max}$ )와 최소 명도( $G_{min}$ )의 차이로부터 계산된 최대 가능 명도 기울기에 대한  $\nabla G$ 의 비로 판단 기준을 정의하였다. 이와 같이 정의하면 명도의 절대값에 비교적 의존하지 않는 좀 더 나은 판단 기준이 된다. 기울기 지표(gradient indicator,  $GI$ )는 다음과 같이 표시된다.

$$GI = \frac{|\nabla G|}{\left[ \frac{G_{max} - G_{min}}{2\Delta x} \right]} \quad (5)$$

영상 내의 최대 가능 명도 기울기를 계산할 때 최대명도와 최소명도의 차를  $2\Delta x$ 로 나누는 이유는 소벨 연산자와 유사하게 화소 3개를 기준으로 대표 길이를 정하였기 때문이다.

기울기 지표의 입정과 입자의 광축 상의 위치

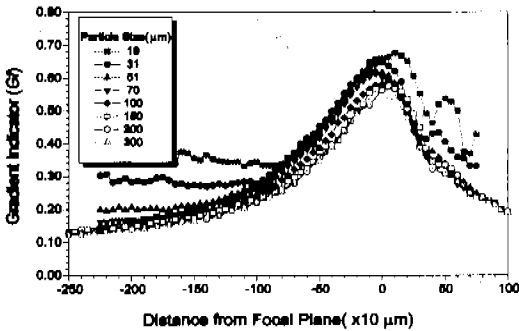


Fig. 9 Variation of gradient indicator(GI) with distance from focal plane for each particle size.

에 따른 변화는 Fig. 9와 같다. 기울기 지표는 거의 모든 입경에 대해서 입자의 위치가 초점면에서 멀어짐에 따라 감소하는 경향을 보인다. 그러나 작은 입경에서는 기울기 지표가 국소적으로 증가하는 구간이 나타나기도 한다. 이는 이 구간에서 기준 명도비의 경우(Fig. 4)와 유사하게 작은 입자의 영상이 불명확하고 영상에서 입자로 인식되는 수도 적어 측정 오차가 발생하기 때문이다. 그러나 그 위치가 초점면에서 상당히 떨어져 있고 입경도 작으므로 측정 결과에는 별다른 영향을 미치지 않는다. 감소 기울기는 초점면을 중심으로 (+) 방향(CCD 카메라 방향으로)쪽이 (-) 방향(광원 방향)보다 크게 나타난다. 또한 기울기 지표의 최대치는 기준 명도비의 변화 경향과 달리 초점면 상에 대부분 나타난다.

각 입경에 따른 최대 기울기 지표의 변화는 Fig. 10과 같다. 최대 기울기 지표( $GI_{max}$ )는 최고 기준 명도비( $VC_{max}$ )의 변화와는 반대로 작은 입경에서 큰 값을 갖고 입경이 커지면 감소한다. 그 감소율도 입경이 증가함에 따라 감소한다. 기울기 지표는 비분값으로 정의되어 있기 때문에 비교적 큰 편차가 존재한다.

### 3.3 초점면 존재 여부 판단

기준명도비는 초점면 주위에서 최고값을 갖고 초점면에서 멀어질수록 작아진다. 따라서 Kim과 Kim<sup>(6)</sup>은 각 입경에 대해서 임계 기준명도비( $VC_{critical}$ )를 설정하여 입자의 기준 명도비( $VC$ )가 임계값 이상이면 입자는 초점면 상에 존재한다고 간주하였다. 이때, 임계 기준 명도비는 Fig. 5의 점선들과 같이 각 입경의 최대 기준 명도비

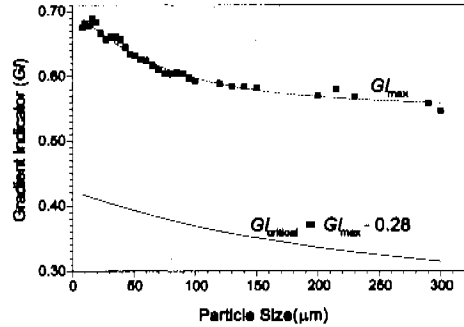


Fig. 10 Variation of maximum gradient indicator( $GI_{max}$ ) with particle size.

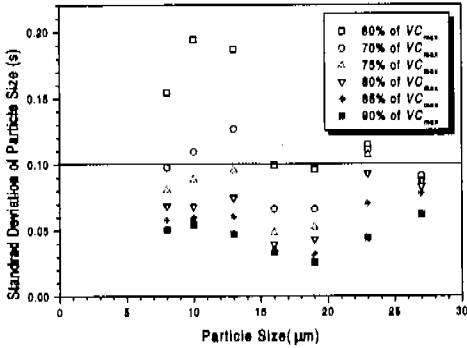
( $VC_{max}$ )의 일정 비율의 값으로 설정하였다. Fig. 11(a)에 임계 기준 명도비와 입경에 따른 측정 입경의 표준편차를 나타내었다. 다음과 같이 측정 입경의 표준편차를 정의한다.

$$s = \sqrt{\frac{\sum \left( \frac{d_{measure} - d_{true}}{d_{true}} \right)^2}{(N-1)}} \quad (6)$$

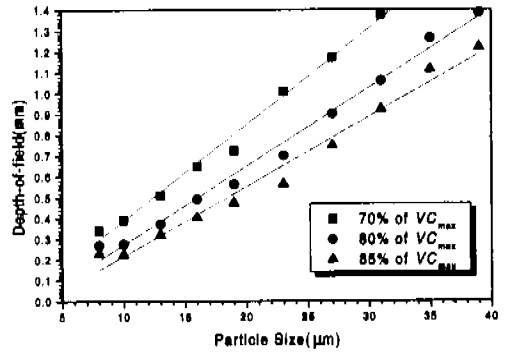
임계 기준 명도비( $VC_{critical}$ )를 낮게 설정하면 전 반적인 측정 입경의 표준편차는 증가한다.

기울기 지표의 경우에도 초점면에서 최대값을 갖고 초점면에서 멀어질수록 감소하므로 각 입경에 대해서 임계 기울기 지표( $GI_{critical}$ )를 설정하고 입자의 기울기 지표( $GI$ )가 임계값 이상이면 입자가 초점면에 존재한다고 판단한다. 이 때 임계 기울기 지표( $GI_{critical}$ )는 Fig. 10의 아래 선과 같이 각 입경의 최대 기울기 지표( $GI_{max}$ )에서 일정한 값( $\Delta GI$ )을 뺀 것으로 정의한다. 이와 같이 임계 기울기 지표를 정의하면 Fig. 11(b)에서와 같이 작은 입자에서 측정 입경의 표준편차는 큰 값을 보이나 입경이 증가할수록 측정 입경의 표준편차는 급격히 감소한다. 따라서 큰 입자가 섞여 있는 입자군에 대하여 측정의 정확성을 높일 수 있다. 즉, 큰 입자들이 평균 입경(특히  $SMD$ )에 큰 영향을 미치므로 작은 입자들의 측정 오차보다는 큰 입자들의 측정 오차가 입자군 전체의 측정값에 큰 영향을 미친다. 알맞은  $\Delta GI$ 값의 결정 방식에 대하여는 다음절에서 논의하였다.

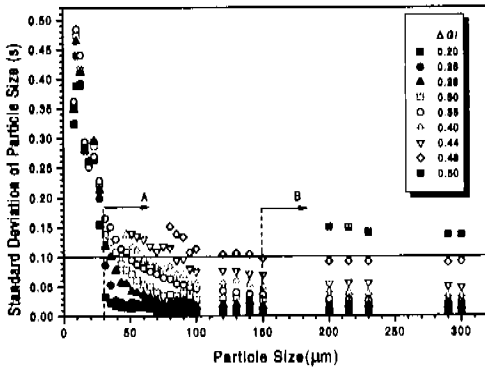
Fig. 11(b)에서와 같이 임계 기울기 지표가 작을수록(즉,  $\Delta GI$ 가 커질수록) 동일한 입경에 대해



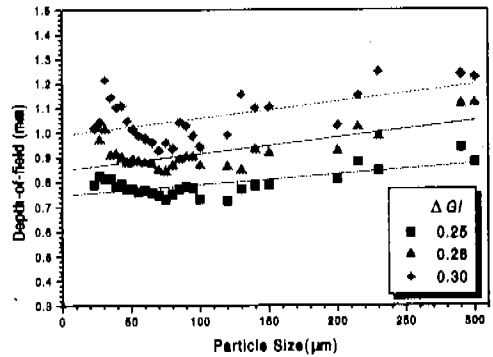
(a) Normalized contrast value (VC)



(a) Based on VC



(b) Gradient indicator (GI)



(b) Based on GI

Fig. 11 Standard deviations of particle sizes with critical gradient indicator ( $GI_{critical}$ ) and normalized critical contrast value ( $VC_{critical}$ ).

Fig. 12 Variation of depth-of-field with in-focus criteria for each particle size.

서 측정 입경의 표준편차는 증가한다. 기울기 지표를 초점면 존재판단 기준으로 사용할 경우, 일정한 표준편차 이내로 측정의 정확도를 유지하려면 적용 가능한 입경의 하한선이 존재하게 된다. 높은 정확도를 요구할수록 입경의 하한선은 큰 입경으로 이동하여 기울기 지표의 적용 구간이 감소한다. 예를 들면,  $\Delta GI$ 가 0.25일 경우에는 30  $\mu m$  이상(Fig. 11(b)의 영역A)에서 최대 측정 입경의 표준편차가 0.1이 된다. 그러나  $\Delta GI$ 를 0.48로 선택하면 150  $\mu m$  이상(Fig. 11(b)의 영역B)의 영역에서 측정 입경의 표준편차가 0.1 이내로 유지된다.

#### 4. 초점 심도(depth-of-field)와 입계값의 결정

초점 심도는 입자가 초점면에 존재한다고 인식되는 광축상의 허용범위를 말한다.

앞서의 두 가지 판단 기준에 대하여 입계값들에 따른 초점심도의 변화를 Fig. 12에 나타내었다. 기준 명도비를 기준으로 할 때 초점 심도는 Fig. 12(a)와 같이 입경에 따라 선형적으로 증가한다. 입계 기준 명도비( $VC_{critical}$ )를 높게 설정할수록 즉,  $VC_{max}$ 에 대한 비율을 높일수록 동일 입경에 대한 초점심도는 작아진다. 그리고 입경에 따른 증가 기울기도 작아진다. 기울기 지표를 기



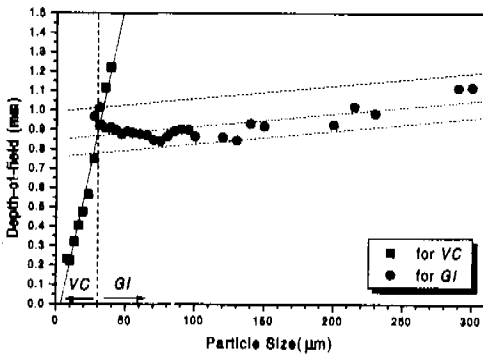


Fig.13 Depth-of-field with particle size ( $VC_{critical} = 85\%$  of  $VC_{max}$ ,  $GI_{critical} = GI_{max} - 0.28$ ).

준으로 할 때에도 임계값에 대한 초점심도의 변화는 Fig. 12(b)에서와 같이 비록 큰 편차를 보이지만 입경에 따라 선형적으로 증가한다. 그러나 증가 기울기는 기준 명도비를 기준으로 했을 경우에 비해 매우 작다.  $\Delta GI$ 를 높게 설정하면 임계 기울기 지표( $GI_{critical}$ )는 낮게 설정되므로 동일 입경에서 초점심도는 증가한다.

기준 명도비를 적용할 경우에 임계값에 따라 변화는 있지만 Fig. 6에서 보인 바와 같이  $VC_{max}$ 의 80%정도를 임계값으로 하면  $25\mu\text{m}$ 이상에서 오차가 크게 나타난다. 반면에 기울기 지표를 적용할 경우에  $\Delta GI$ 값이 0.25~0.30구간 내에 있으면 Fig. 11의 (b)와 같이  $40\mu\text{m}$ 이하에서 측정 입경의 표준편차가 크게 증가한다. 따라서 두 가지 초점면 존재 판단 기준의 적용가능 범위는 대체로  $30\sim 40\mu\text{m}$ 을 전후로 나뉘어짐을 알 수 있다. 그러므로 두 가지의 판단 기준을 입경 영역에 따라서 달리 적용한다면 비교적 정확한 입경을 측정할 수 있을 것이다.

초점면 존재 판단 기준의 임계값들과 적용구간의 결정은 측정 시 요구되는 정확도 즉 입경들의 허용 표준편차, 측정에 소비되는 시간 등을 고려해야 한다. 즉, 임계값을 지나치게 높게 설정하면 측정의 정확성을 높일 수 있다는 장점이 있다. 그러나 한 영상에서 제외시키는 입자들이 많아져서 여러 개의 영상을 처리해야 하므로 긴 측정 시간이 필요하다는 단점도 있다. 두 판단 기준 적용 경계에서의 초점 심도의 연속성도 고려되어야 한다.

본 연구에서는 이들을 고려하여 Fig. 13에 나타난 것과 같이 임계값들과 적용구간을 결정하였다. 기준 명도비( $VC$ )를 통한 판단 기준은  $30\mu\text{m}$ 이하의 입경에서 적용하였다. 이 때 임계 기준 명도비( $VC_{critical}$ )는 측정 입경의 표준편차율 0.1이하로 유지하기 위하여 Kim과 Kim<sup>(8)</sup>이 제시한 70%보다 높은 85%로 상향조정하였다(Fig. 5). 같은 정확도 범위를 유지하기 위하여 기울기 지표( $GI$ )를 적용할 경우( $30\mu\text{m}$ 이상 범위)  $\Delta GI$ 를 0.28로 하여 임계 기울기 지표( $GI_{critical}$ )를 설정하였다. 이와 같이 임계값들을 결정하면 Fig. 11에서 보듯이 비록 두 판단 기준의 경계인  $30\mu\text{m}$  부근에서 측정 입경의 표준 편차가 0.14정도까지 되지만 대부분의 영역에서는 0.1이하를 유지한다.

따라서 본 연구에서 사용된 시스템의 경우에  $30\mu\text{m}$ 를 경계로 두 지표를 복합하여 사용하면 넓은 입경 범위( $10\sim 300\mu\text{m}$ )에서 측정 입경의 표준편차를 대체적으로 0.1이내로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기준 명도비( $VC$ )와 기울기 지표( $GI$ )의 광축상 위치에 따른 변화를 살펴보고 입경에 따른 초점 심도의 변화를 파악하였다. 연구 결과, 기존에 제시된 기준 명도비를 통한 초점면 존재 판단 기준은 작은 입경 영역에서만 적용됨을 확인하였다. 이에 따라 큰 입경 영역에서 적용할 수 있는 초점면 존재 판단 기준으로서 기울기 지표를 추가로 제시하였다.

기준 명도비 및 기울기 지표의 초점면으로부터의 거리에 따른 변화를 살펴보면 두 경우 모두 초점면에서 멀어짐에 따라 감소하였다. 기울기 지표의 경우 초점면 상에서 각 입경의 최대값이 나타난다. 최대 기준 명도비( $VC_{max}$ )는 큰 입자일수록 큰 값을 갖게 되나 증가율은 입경 증가에 따라 감소한다. 반면에 최대 기울기 지표( $GI_{max}$ )는 입경이 증가할수록 감소하며 그 감소율도 작아진다.

초점심도는 입경에 따라 선형적으로 증가하나 기울기 지표를 기준으로 했을 때 기울기는 기준 명도비를 기준으로 했을 때에 비해 매우 작다. 동일 입경에서 임계값들을 큰 값으로 설정하면 초점 심도는 작아진다.

본 시스템에서 측정의 정확도, 측정 시간 그리고 초점 심도의 연속성을 고려한 결과, 기준 명도비의 적용구간과 기울기 지표의 적용구간의 경계는  $30\mu\text{m}$ 로 나타났다. 이 때의 임계 기준 명도비( $V_{\text{critical}}$ )는 기준 명도비의 85%, 임계 기울기 지표( $G_{\text{critical}}$ )는 최대 기울기 지표에서 0.28을 뺀 수가 각각 제안되었다. 이 때 측정 입경의 표준 편차는 두 판단 기준의 경계부근을 제외하면 0.1 이하를 유지하였다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정목적기초 연구사업(95-0200-05-01-3)과 한국과학기술원 기관교유사업 연구비 지원의 일환으로 수행되었으며, 아울러 (주) V-Tek의 일부 장비 지원에 의해 이루어졌다. 이와 함께 본 논문의 수정에 도움을 주신 다상유동연구실 김유동씨에게 감사의 뜻을 표한다.

### 참고문헌

(1) Chigier, N., 1983, "Drop Size and Velocity Instrumentation," Prog. Energy Combust. Sci, Vol. 9, pp. 155-177.  
 (2) 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.

(3) 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.  
 (4) 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.  
 (5) 김주연, 이상용, 추정호, 1998, "입경 측정을 위한 영상처리기법의 개선," 대한기계학회 논문집, Vol. 22, No. 8, pp. 1152-1164.  
 (6) 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.  
 (7) 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.  
 (8) 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.  
 (9) Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 1993, Digital Image Processing, Addison Wesley.