

# 영상 처리 기법에서 곡률을 이용한 입경 측정 알고리즘의 개발

김유동\* · 이상용† · 김상수\*\*

(2002년 4월 9일 접수, 2002년 7월 25일 심사완료)

## Development of Image Processing Algorithm Using Boundary Curvature Information in Particle Size Measurement

Yu Dong Kim, Sang Yong Lee and Sang Soo Kim

**Key Words :** Image Processing(영상 처리), Particle Size Measurement(입경 측정), Curvature(곡률), Pattern Recognition Algorithm(형상 인식 알고리즘), Spray(분무)

### Abstract

In the present study, a new pattern recognition algorithm was proposed to size spray particles using the boundary curvature information. Conceptually, this algorithm has an advantage over the others because it can identify the particle size and shape simultaneously, and also can separate the overlapped particles more effectively. Curvature of a boundary was obtained from the change of the slopes of two neighboring segments at the corresponding part. The algorithm developed in this study was tested by using an artificially prepared image of a group of spherical particles which were either isolated or overlapped. Particle sizes obtained from the measured curvatures agreed well with the true values. By detecting abrupt changes of the curvature along the image boundary, the element particles could be separated out from their overlapped images successfully.

### 기호설명

- $C$  : 곡률 [1/pixel]
- $D$  : 지름 [pixel]
- $i$  : 선분(segment)의 인덱스
- $l$  : 입자의 경계를 따른 좌표 [pixel]
- $n$  : 선분의 개수
- $R$  : 반지름 [pixel]

### 그리스문자

- $\theta$  : angle [radian]

### 1. 서론

영상 처리를 이용한 입경 측정 기법은 장비가 비교적 단순하고 저가이며 측정 진행 사항을 육안으로 판단할 수 있기 때문에 측정 오차에 대한 해

석이 가능한 장점을 가지고 있어 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 이 기법에서는 직접적인 가시화를 통하여 타원형이나 중첩된 형태의 입자와 같은 비구형 입의 형상의 입자 처리가 가능하다. 그러나 입경 측정을 위해서는 완벽하게 해결되지 않은 과제들이 존재한다. 예를 들면 기하학적 비선형성(geometric nonlinearities), 심도 보정(depth of field correction), 회절 효과에 의한 경계 영역의 기울기 존재(boundary diffraction gray level gradient), 명암 판별 기준값(threshold level), 초점면 존재 판단 기준(infocus criterion), 형상 인식 알고리즘(pattern recognition algorithm) 등이 있다.<sup>(1-6)</sup> 본 연구에서는 이러한 영상 처리 기법의 몇 가지 과제 중에서 특히 형상 인식 알고리즘에 중점을 두고 이를 개선하기 위한 연구를 수행하였다.

이러한 형상 인식 알고리즘의 예로 최근에 Kim 등<sup>(2)</sup>은 일부만 영상에 감지된 입자, 중첩된 입자, 그리고 타원형 입자 등의 처리에 초점을 두고 형상 인식 알고리즘을 개선하였다. 기존의 알고리즘은 입자의 크기를 계산하기 위하여 주로 질량 중심(mass center)<sup>(2)</sup>을 이용하였으나, Kim 등<sup>(2)</sup>은 외심

\* 한국과학기술원 기계공학과  
 † 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
 E-mail : e\_hyunny@cais.kaist.ac.kr  
 TEL : (042)869-3026 FAX : (042)869-8207  
 \*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

(circumcenter)을 이용한 방법을 제안하였다. 외심을 이용한 방법은 특히 입자의 일부만 영상에 감지된 경우에 유용하다. 또한, 그들은 중첩된 입자들의 분리를 위해 최소 볼록 다각형(convex hull)의 개념을 도입하였으며, 타원형의 입자를 인식하기 위하여 입자의 장축과 단축을 비교하는 방법을 이용하였다. 그러나 이러한 선행 연구들은 주로 희박한 분무의 영상에서 관찰될 수 있는 단일 입자나 약하게 중첩된(weakly overlapped) 입자의 처리에 중점을 둔 것들이다. 따라서 크게 중첩된(heavily overlapped) 입자를 가지는 농후한 분무 영상의 처리에는 한계가 있다.

Kruis 등<sup>(7)</sup>은 "sparse Hough transform"이라는 형상 인식 알고리즘을 개발하고 이를 응집체(aggregated or agglomerated particle) 내의 구형 입자 인식에 적용하여 중첩된 입자의 처리에 이용하였다. 여기서 Hough 변환<sup>(8)</sup>은 몇 개의 매개 변수로 표현이 가능한 곡선(parametric curve)을 인식하는 알고리즘을 의미한다. Kruis 등<sup>(7)</sup>의 방법은 크게 중첩된 분무 입자에 적용이 가능하나, 그들의 연구에서 이용된 영상은 배경 명도의 불균일성과 입자의 불규칙성(입자 경계의 거칠기 등) 등이 크지 않은 고품질(high quality)인 것이었다. 실제 분무 영상은 그들의 영상보다 질(quality)이 낮다. 따라서 그들의 방법을 직접 실제 분무 영상에 적용할 경우에 큰 오차를 유발할 수 있다. 이를 보완하기 위해 Kim 과 Lee<sup>(9)</sup>는 Kruis 등<sup>(7)</sup>의 알고리즘을 개선하였다. 그들은 중첩된 입자의 유형을 3 가지 기본 형태로 나누고 각각의 형태에서 잘못 인식된 입자를 제거하여 실제 입자만을 선별하여 인식할 수 있도록 하였다. 그러나 Kruis 등<sup>(7)</sup>과 Kim 과 Lee<sup>(9)</sup>의 방법은 처리 시간이 길고 원형의 대상에만 적용이 가능하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 단점들을 보완하기 위하여 입자 경계의 곡률 변화를 이용하여 입자를 측정하는 알고리즘을 개발하고, 이를 영상에 적용하여 개별 입자 측정과 함께 중첩된 입자의 영상으로부터 액적을 분리, 인식하는 작업을 수행하였다.

## 2. 영상 처리 알고리즘

본 연구에서 이용된 영상 처리 알고리즘의 전체 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 영상 처리 알고리즘은 크게 두 과정으로 구성된다. 첫번째 과정으로 전체 이미지에 대한 형상 인식 알고리즘을 적용하여 각각의 입자에 대한 위치 및 크기 정보를 개략적으로 구하는 글로벌 프로세스(global process, Fig. 1의 step 1, 2)를 수행한다. 즉, Step 1에

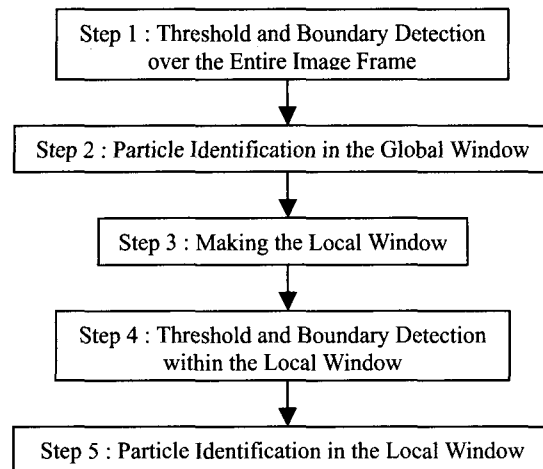


Fig. 1 Flow chart of the image processing algorithm

서 전체 영상에 대하여 명암 판별 기준값을 결정하고 입자의 경계를 인식한다. Step 2에서는 질량 중심<sup>(2)</sup>을 이용하여 입자의 크기와 위치를 계산한다. 그 다음 과정에서는 앞서 구해진 개개 입자의 위치를 중심으로 하는 입경보다 약간 큰 사각형의 윈도우(local window)를 설정하고(step 3) 이 윈도우를 하나의 영상으로 인식하여 형상 인식 알고리즘을 재적용(step 4, 5)하는 로컬 프로세스(local process)를 수행한다. 이렇게 로컬 윈도우를 설정하는 것은 전체 영상에 걸친 광원의 비균일성으로 인해 일률적인 입자의 초점면 존재 판단 및 명암 판별 기준값의 설정이 적절하지 않기 때문이다.<sup>(1)</sup> Step 5에서 적용할 수 있는 알고리즘으로는 질량 중심 기법,<sup>(2)</sup> 최소 볼록 다각형 기법,<sup>(2)</sup> Hough 변환 기법<sup>(7,9)</sup> 등과 본 연구에서 제안한 곡률을 이용한 기법이 있다.

## 3. 곡률을 이용한 형상 인식 알고리즘

### 3.1 기본 개념

Fig. 2는 곡률을 이용한 형상 인식 알고리즘의 기본 개념을 나타낸 것이다. 곡률은 경계의 길이 변화( $\Delta l$ )분의 각 변화( $\Delta\theta$ )로 정의( $\Delta\theta/\Delta l$ )되며, 반지름이  $R$ 인 원의 경우에는  $1/R$ 의 값을 가진다. 즉 원의 경우에는 Fig. 2(a)의 오른쪽 그래프에서와 같이 입자의 경계를 따라서 하나의 고정된 곡률 값( $1/R$ )을 가지게 된다. 타원의 경우에는 Fig. 2(b)에서와 같이 경계를 따라 곡률이 sine 함수와 유사한 형태로 변화한다. Fig. 2(c)는 두 개의 입자가 중첩된 경우를 나타낸다. 이 때 곡률의 변화는 Fig. 2(c)의 오른쪽 그래프와 같으며, 그 중에서 큰 입

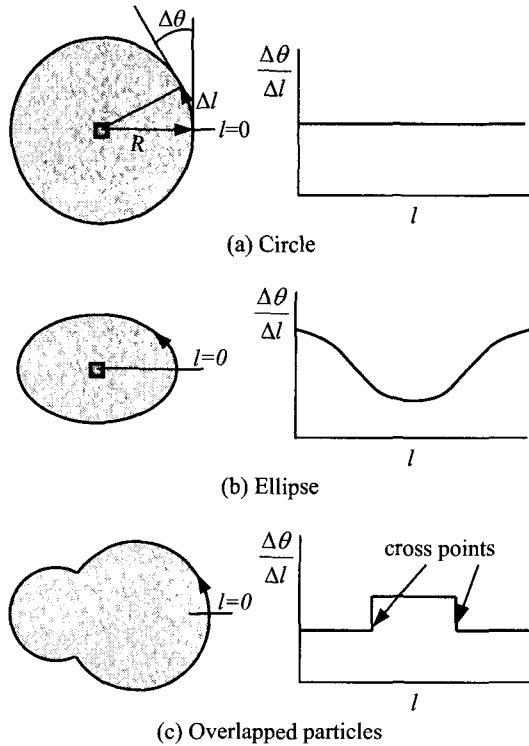


Fig. 2 Illustration of the algorithm using boundary curvature

자가 더 작은 곡률 값을 가진다. 따라서 중첩 지점에서 곡률은 하나의 값에서 다른 값으로 급격히 변화하여 곡률의 불연속이 나타난다. 따라서 정확한 곡률 값을 구할 수 있다면 Fig. 2(a)의 경우에는 이 값으로부터 입자의 크기 예측이 가능하며, Fig. 2(b)의 경우에서처럼 곡률의 변화 형태로부터 입자의 형상을 유추할 수 있다. 또한 Fig. 2(c)에서 곡률의 불연속 지점을 영상으로부터 찾아내면 그 지점에서 중첩 입자의 분리가 가능하다. 타원형의 입자가 중첩된 경우에도 원형의 입자와 동일하게 중첩된 지점에서 곡률의 불연속 지점이 생기며 그 외의 지점에서는 연속적인 곡률의 변화를 관찰할 수 있다. 따라서 중첩 입자의 분리는 개념적으로 타원형에도 적용이 가능하다. 즉, 정확한 곡률 정보를 구할 수 있다면 그것으로부터 입자의 형상과 크기의 동시 인식이 가능하다. 기존의 알고리즘들은 형상과 크기의 계측이 분리되어 수행되었음에 비하여 곡률 측정 방식은 일관된 알고리즘의 적용으로 이 두 작업이 동시에 가능하다는 장점이 있다.

### 3.2 곡률 계산 알고리즘

이상적인 경우 입자의 경계는 Fig. 2 에서와 같

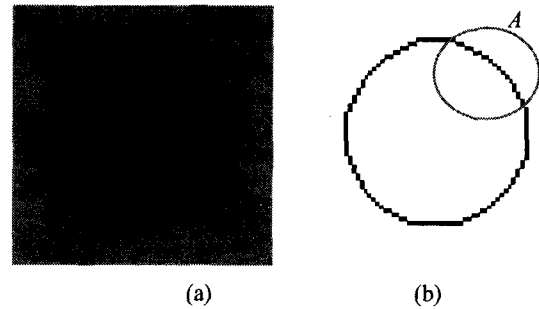


Fig. 3 Result of the boundary detection process

이 연속적이며 부드러운 곡선으로 구성된다. 그러나 실제 영상에서는 입자가 유한한 크기의 픽셀로 구성되며 이러한 픽셀들로부터 구한 입자의 경계는 부드럽지도 연속적이지도 않다. Fig. 3은 경계 인식의 결과를 보이는 그림인데, 여기서 Fig. 3(a)가 입자의 영상이며 Fig. 3(b)가 그것에 대한 경계 인식의 결과이다. 이러한 불연속적인 경계 픽셀들로부터 곡률을 구해야 한다.

입자 경계에서의 국부 곡률(local curvature)을 구하는 기법을 논의하기 위해 Fig. 3(b)의 영역 A를 예로 들겠다. 영역 A에 있는 경계 픽셀들을 확대하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)를 보면 점선으로 표시된 곡선이 경계 픽셀들을 잘 근사하고 있다. 즉, Fig. 4(a)의 점선에 가장 근접하는 국부 곡률을 구하는 것이 알고리즘의 목표가 된다. 여기서 만약 국부 곡률을 바로 이웃 한 두 경계 픽셀 사이의 각도 변화로부터 구하면 그 결과는 Fig. 4(b)의 화살표들과 같이 될 것이며, 그 결과는 점선을 근사하지 못하고 있음을 알 수 있다. 여기서 각도 변화는 오직 3가지의 경우(0°, +45°, -45°)만이 나타날 수 있으며 이것은 실제적이지 않다. 본 연구에서는 국부 곡률을 구하기 위하여 연속하는 몇 개의 경계점들을 하나의 선분으로 묶는 분할(segmentation) 기법을 도입하였다. Fig. 4(c)는 이 기법의 개념을 나타낸 그림이다. 여기서 경계 픽셀들은 a, b, c, d, e의 5개의 선분으로 나뉘었다. 그리고 각 선분의 중심을 화살표로 연결하였으며 그 결과 Fig. 4(c)의 화살표들이 Fig. 4(b)의 경우보다 점선을 더 잘 근사하고 있음을 확인할 수 있다.

분할 기법을 이용한 국부 곡률 계산 알고리즘은 다음과 같다. 첫번째로 동일한 직선 위에 존재하는 연속된 경계점들은 하나의 선분으로 묶는다(Fig. 4(c)의 선분 a, b, c, d, e). 두번째로 동일한 길이와 방향을 가지는 인접 선분들은 함께 묶어서 하나의 선분으로 간주한다. 선분 b와 c가 이러한 조건을 만족하므로 하나의 선분으로 통합되어 Fig.

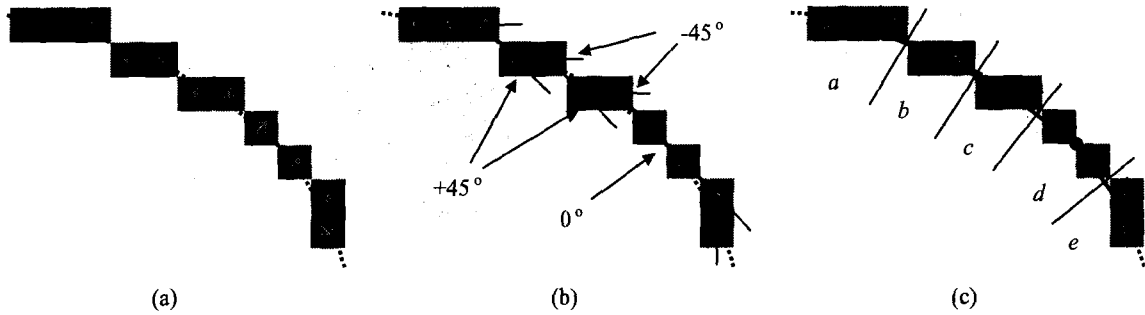


Fig. 4 Concept of boundary segmentation

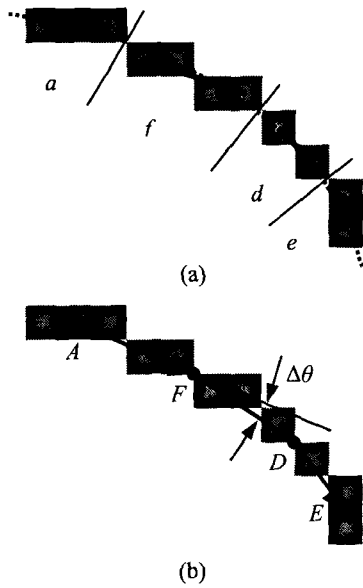


Fig. 5 Boundary segmentation and local curvature

5(a)에서 선분  $f$ 로 표시되었다. 마지막으로 이렇게 나뉜 선분들로부터 국부 곡률을 계산한다. 국부 곡률의 계산 방법은 다음과 같다.

Fig. 5(b)에서 점  $A, F, D, E$ 가 각각 Fig. 5(a)의 선분  $a, f, d, e$ 의 중심점이라면 점  $F$ 에서의 각 변화는 선분  $\overline{AF}$ 와  $\overline{FD}$  사이의 각 변화( $\Delta\theta$ )로 정의된다. 또한 여기서 곡률의 계산에 이용되는 길이 변화량( $\Delta l$ )은  $(\overline{AF} + \overline{FD})/2$ 로 정의할 수 있다. 그러면 점  $F$ 에서의 곡률은 식 (1)와 같이 표현된다.

$$C = \frac{d\theta}{dl} \approx \frac{2\Delta\theta}{\overline{AF} + \overline{FD}} \quad (1)$$

곡률에 대한 식 (1)의 정의를 바탕으로 특별히 제작한 몇 개의 영상에 대하여 곡률 변화를 구하였으며 그 결과는 다음 장에서 논의하겠다.

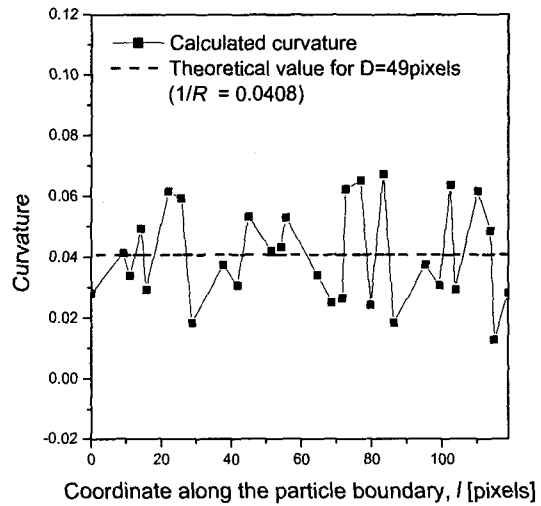


Fig. 6 Boundary curvature variation of a single particle ( $D = 49$  pixels)

#### 4. 알고리즘 처리 결과

##### 4.1 단일 입자의 크기 측정

Fig. 6은 단일 입자에 대한 곡률의 변화를 나타낸 결과이다. 직경이 51 픽셀인 원형 입자를 가지는 Fig. 3(a)와 같은 영상을 처리한 결과이다. Fig. 6에서 가로축은 경계를 따라 정의된 좌표( $l$ )를 의미하며, 세로축은 식 (1)과 같이 정의된 곡률이다. 앞서 언급한 바와 같이 원의 경우 이론상으로는 경계점을 따라서 곡률이 일정한 값( $1/R$ )을 가지며, 이를 Fig. 6에서 점선으로 표시하였다. Fig. 6을 보면 계산된 곡률의 평균값은 이론치( $1/R$ )와 비슷한 결과를 보이지만 곡률의 변화가 부드럽지 못하고 변동(scattering)이 있음을 알 수 있다. 이러한 변동이 존재하는 것은 영상에서 입자의 경계가 유한한 크기를 가진 픽셀의 단위로 결정되기 때문이며,

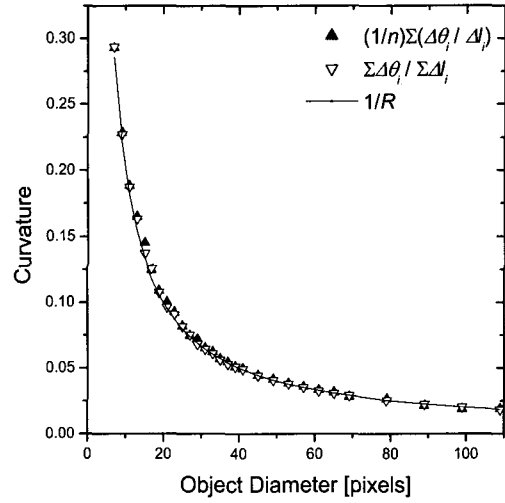
본 연구에서 제시한 곡률 계산 기법이 아직 완전하지는 못함을 의미한다. 그러나 분할 기법을 통하면 곡률의 평균치는 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

곡률의 평균치로부터 입경을 계측하는 기법의 유효성을 확인하기 위하여 7 ~ 109 픽셀의 직경을 가지는 원형 입자의 영상을 처리하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)의 측정치(▲, ▽)는 각 입자의 평균 곡률을 나타낸 것이고, Fig. 7(b)는 계측된 평균 곡률로부터 구한 입경(Curvature = 1/R 이용)을 실제 입경과 비교한 것이다. Fig. 7(a), (b)에서 x 축은 실제 입경(픽셀의 수)을 의미한다. 평균 곡률은 식 (2), (3)과 같이 2 가지로 정의할 수 있다.

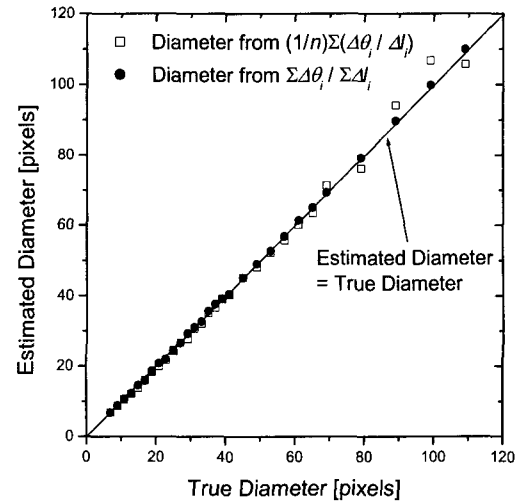
$$\bar{C}_1 = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{\Delta\theta_i}{\Delta l_i} \quad (2)$$

$$\bar{C}_2 = \frac{\sum_1^n \Delta\theta_i}{\sum_1^n \Delta l_i} \quad (3)$$

Fig. 7(a)를 보면 이러한 두 종류의 평균 곡률 모두가 이론치(1/R)와 잘 일치하고 있다. 또한 평균 곡률로부터 계산한 입경도 실제와 잘 일치함을 알 수 있다(Fig. 7(b)). 특히 Fig. 7(b)에서 입경이 클 경우 식 (2)로 정의된  $\bar{C}_1$  보다는 식 (3)으로 정의된  $\bar{C}_2$ 로부터 구한 결과가 작은 오차를 나타낸다. 따라서  $\bar{C}_2$ 를 이용하여 입경을 계산하는 것이 더 유용하다. 입자가 작은 경우에는 상대적으로 큰 곡률값을 가지므로 오차가 곡률값에 포함되어 있어도 그 영향이 상대적으로 미미하여 비교적 크기를 잘 예측할 수 있다. 그러나 입자가 커지게 되면 곡률의 절대값이 감소하여 오차의 영향이 상대적으로 커진다.  $\bar{C}_1$ 은 각 선분(segment)에서의 곡률값을 단순히 평균한 것으로 각 지점에서의 오차가 그대로 누적된다. 따라서 입자가 커질수록  $\bar{C}_1$ 으로부터 구한 입경은 상대적으로 큰 오차를 보인다. 그러나  $\bar{C}_2$ 는 각 선분에서의 길이 변화( $\Delta l$ )와 각 변화( $\Delta\theta$ )를 모두 더하여 평균 곡률을 구한 것으로, 식 (3)에서 각 변화의 합인 분자는 단일 입자의 경우  $2\pi$ 가 되며 분모는 각 선분의 길이의 합이 된다. 즉 원의 경우 식 (3)의 분모는 변의 개수가 n 개(=segment의 개수)인 원의 내접다각형에서 각 변의 길이 합이 되며 n이 클수록 원주에 접근하여 오차가 적은 결과를 보이게 된다.



(a) Boundary curvatures of isolated particles



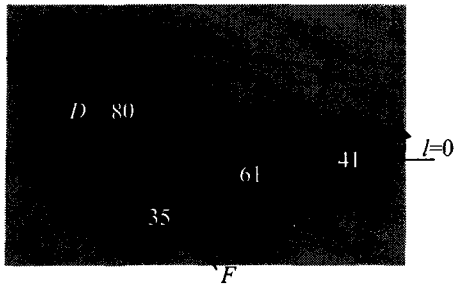
(b) Diameters estimated from boundary curvatures

Fig. 7 Boundary curvatures and sizes of isolated particles

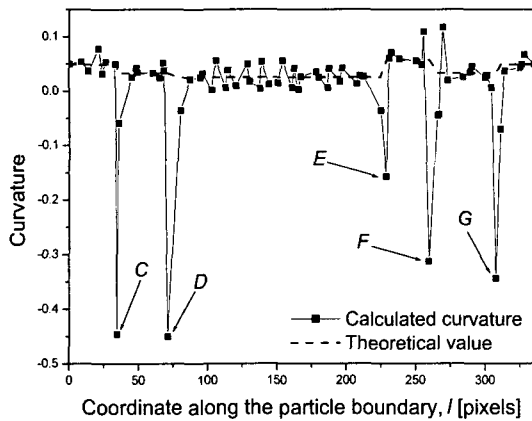
본 논문의 알고리즘을 따르면 입자의 크기가 클수록 선분의 개수(n)가 많아지며 따라서 오차가 작은 곡률값을 구할 수 있어 입자가 큰 경우에도 크기를 비교적 정확하게 예측하고 있다.

#### 4.2 중첩 입자의 분리

본 연구에서 개발한 알고리즘을 중첩입자의 인식에 이용하기 위하여 Fig. 8(a)와 같은 영상을 만들어 처리하였고 그 결과를 Fig. 8(b)에 나타내었다. 여기서 점선은 이론값을 의미한다. Fig. 2(c)에서 도시한 바와 같이 중첩 입자를 처리하기 위해서는 곡률이 하나의 값에서 다른 값으로 변하는 중첩



(a) Image frame of overlapped particles



(b) Boundary curvature variation

**Fig. 8** Separation of overlapped particles

지점을 찾는 것이 중요하다. Fig. 8(b)를 보면 중첩 지점을 제외한 나머지 부분에서는 Fig. 6의 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 중첩 지점에서는 큰 크기의 음(negative)의 곡률 값을 보인다. 따라서 이러한 지점을 곡률의 변화 경향으로부터 찾아내어 중첩 지점으로 간주하면 입자를 분리할 수 있다. 곡률의 변화 경향(Fig. 8(b))을 보면 상대적으로 큰 음의 곡률 값들(C, D, E, F, G)이 경계를 따라 순차적으로 나타남을 알 수 있으며 이는 Fig. 8(a)에 있는 중첩 지점과 정확히 일치한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 분무 입자의 형상과 크기를 동시에 인식할 수 있는 알고리즘의 개발에 초점을 맞추어 곡률을 이용한 형상 인식 알고리즘을 제안하였다.

정확한 곡률 값을 계산할 수 있다면 입자의 형상과 크기를 동시에 측정할 수 있고 중첩 입자의 분리도 가능하다. 곡률 값을 계산하기 위하여 본 연구에서는 경계 분할(boundary segmentation)

기법을 도입하였으며, 이웃 한 두 선분 사이의 각 변화로부터 곡률을 계산하였다.

알고리즘 검증에 위하여 입자의 영상을 만들어 처리하였다. 단일 입자의 처리 결과로부터 곡률을 이용한 알고리즘이 입자의 크기 측정에 이용될 수 있음을 확인하였다. 또한 중첩 입자의 처리 결과로부터 본 연구에서 제안된 알고리즘을 중첩 입자의 분리에 적용할 수 있음을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 과학재단 지정 우수공학연구센터인 연소기술연구센터(CERC) 사업, 국가지정 연구실 사업(MI-9911-00-0009, KISTEP)과 두뇌한국(BK) 21 사업의 지원을 받아 수행되었다.

## 참고문헌

- (1) Kim, K. S. and Kim, S. S., 1994, "Drop Sizing and Depth-of-Field Correction in TV Imaging," *Atomization and Sprays*, Vol. 1, No. 4, pp. 389~400.
- (2) 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.
- (3) Koh, K. U., Kim, J. Y. and Lee, S. Y., 2001, "Determination of In-focus Criteria and Depth of Field in Image Processing of Spray Particles," *Atomization and Sprays*, Vol. 11, pp. 317~333.
- (4) Koh, K. U., Kim, J. Y. and Lee, S. Y., "Determination of In-focus Criteria in Image Processing Method for Particle Size Measurement," *Trans. of the Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol. 23, No. 3, pp. 398~407.
- (5) Ahlers, K. D. and Alexander, D. R., 1985, "Microcomputer Based Digital Image Processing System Developed to Count and Size Laser-Generated Small Particle Images," *Optical Eng.*, Vol. 24, No. 6, pp. 1060~1065.
- (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) Kruis, F. E., Denderen, J. V., Burman, H. and Scarlett, B., 1994, "Characterization of Agglomerated and Aggregated Aerosol Particles Using Image Analysis," *Part. Part. Syst. Charact.*, Vol. 11, pp. 426~435.
- (8) Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 1993, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley.
- (9) Kim, Y. D. and Lee, S. Y., 2000, "Improvement of Image Processing Algorithm for Particle Size Measurement Using Hough Transform," *Proc. of ILASS-Asia 2000*, pp. 99~104.