

분무 유동의 입경 계측 기법에 관한 연구

양창조⁺·김정환⁺⁺·오종환⁺⁺⁺·김만응⁺⁺⁺⁺·이영호⁺⁺⁺⁺

Measurement Technique of Particle Sizing in Spay Flow

Chang-Jo Yang⁺, Jeong-Hwan Kim⁺⁺, Jong-Hwan Oh⁺⁺⁺, Mann-Eung Kim⁺⁺⁺⁺ and Young-Ho Lee⁺⁺⁺⁺

Abstract : Particle image analyzer for measuring droplet size has been developed. Image processing technique was used with relaxation method. The morphological method based on partial curvature information of pre-processed images was adopted for recognition and separation of overlapped particles. The measurement results show that the present method may be reliable for the analysis of the size and distribution of droplets produced by water mist spay flow.

Key words : Particle image analyzer(입자 영상 분석기), Water mist(미분무수), Relaxation Method(이완법), Curvature(곡률), Overlapped particle(중첩 입자)

1. 서론

지구 오존층 파괴물질에 관한 몬트리올 의정서(Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layers)에 의해 전 세계적으로 CFC를 사용하는 화학물질의 제조가 1994년부터 금지됨에 따라 Halon 1211, Halon 1301로 대표되던 할론계 소화제의 대체물질을 찾게 되었으며, 그 노력의 일환으로 미분무수(Water mist) 소화 장치에 대한 연구가 활기를 띠게 되었다. 미분무수에 대한 연구는 1955년 Braidech 등에 의하여 기본원리에 대한 연구를 시작으로, 1994년 FMRC(Factory Mutual Research Corporation)의 의하여 가연성 액체화재에 대한 적용시험을 최초로 수행하여 성공적인 결과를 발표하였다^[1]. 이후 상용화에 대한 연구가 본격적으로 진행되어 선진국의 다수 회사에서 이를 이용한 다양한 소화 장치를 출시하기에 이르렀다. 그러나 우리나라의 경

우 지금까지 미분무수 및 이를 이용한 소화 장치 등에 대한 연구는 미미하였고 이제 시작단계에 이르렀다고 해도 과언이 아닐 것이다.

이러한 미분무수 소화 장치의 분무의 특성을 평가하기 위해 사용하는 파라미터 중 가장 중요한 것은 위치에 따른 액적의 평균 입자경과 입경의 분포이다. 입경의 측정기법은 크게 나누어 기계적인 포집법(drop collecting techniques)과 광학적인 방식(optical techniques)으로 나뉘며 그 외에 전기적인 측정기법도 몇 가지 알려져 있다. 기계적인 방법과 전기적인 방법은 지난 40-50년간 많이 사용되어 오던 방법으로 개념적으로 간단하고 비교적 저렴하나 측정 과정에서 액체 분무 유동을 어느 정도 간섭할 수 밖에 없다는 단점을 지니고 있다. 반면에 광학적인 측정방법은 분무유동을 간섭하지 않는다는 장점을 가지고 있으나, 기술적으로 고도의 숙련이 필요하고 측정 장치가 고가라는 점이 아직도 단점으로 지적되고 있다. 광학적인 측정기법은 특히 레이저를 이용한 측정 기술의 발

+ 양창조(한국해양대학교 연구원), E-mail:cjyang70@pivlab.net, Tel: 051)410-4940

++ 김정환(한국조선기자재연구원), 부산광역시 영도구 동삼동 1125-22

+++ 오종환(씨플러스), 부산광역시 강서구 송정동 1575-3

++++ 김만응(한국선급), 대전광역시 유성구 장동 23-7, 신성로 54

+++++ 이영호(한국해양대학교 기계 정보공학부), 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

달과 함께 개발되어 왔으며, 최근에도 계속 연구가 진행되고 있는 측정기법이다.

광학적인 측정방법을 자세히 살펴보면, 먼저 레이저의 회절 원리를 이용하는 광산란법은 Malvern particle analyzer가 대표적이며, 이는 단시간 내에 분무특성을 파악할 수 있고 측정이 비교적 쉬운 장점을 가지고 있어 가장 널리 사용되고 있으나 국소적인 측정이 불가능하고 다중 산란 현상의 영향이 커서 분무의 입자 농도가 큰 경우에는 적합하지 않다.

두 번째로 위상 도플러 기법은 입경과 속도를 동시에 측정해 낼 수 있는 장점이 있어 최근 가장 선호하는 측정기법이나 측정 장비가 고가이고 검출기인 광전자 증배관으로의 가전압 값에 의해 측정값이 달라질 수 있는 점과 작은 입경의 입자들에 대해서는 측정값의 정도가 떨어지는 점 등의 문제가 있다. 특히 이러한 레이저를 이용한 측정기법은 구형입자에만 적용될 수 있으며 입자에 의한 광산란 신호를 적절한 신호처리 기법을 이용하여 계산하기 때문에 측정오차의 직접적인 해석이 어렵다^[2].

또한 최근 각광을 받고 있는 영상 처리를 이용한 측정 방법은 분무지역에서 카메라에 순간적으로 포착된 액적들(또는 액침법등에 의해 채집된 액적들)의 영상 신호를 적당한 영상 처리 기법과 영상 인식 알고리즘을 사용하여 분무 액적의 수와 입경을 자동으로 측정하는 방법으로 다양한 영상 처리 기법을 이용하면 육안으로 판별하기 어려운 영상에서도 입경 측정이 가능하다. 종전의 영상처리 방식의 분무 입경 측정방법은 주로 포집된 분무 입자를 현미경 등을 사용하여 촬영한 필름이나 인화된 사진을 다시 영상 처리하여 분무 입경을 측정하는 기법이었다. 그러나 이 방식은 영상처리에 많은 시간이 소요되는 단점 때문에 널리 보급되지는 못 하였다. 하지만, 최근 컴퓨터 관련 기술의 발전에 힘입어 고속 CPU가 등장함으로써 비산하는 입자군의 입경을 실시간으로 촬영하고 이것을 영상 처리하여 분무 특성을 측정할 수 있게 되었다. 이러한 영상처리를 이용하는 기법은 입경측정, 입자의 속도 측정뿐만 아니라 분무 액적의 국소 수밀도(number density)까지도 측정할 수 있고, 상대적으로 저가로 측정 시스템을 구성할 수 있다는 장점이 있으므로 몇 가지 기술적인 문제를 해결할 수 있다면 앞

으로 유용하게 사용할 수 있는 분무 입경 측정방법이 될 것이다.

한편, 이러한 영상 처리를 이용한 측정 기법에 관한 연구는 크게 두 분야로 나눌 수 있다. 첫 번째는 명암 판별기준과 초점면 존재 판단 기준에 따라 측정된 입경이 실제 입경과 차이를 보이는데 이의 보정에 관한 연구^[3]와 두 번째로 획득한 영상으로부터 효과적으로 입경을 계산해 낼 수 있는 영상 인식 알고리즘의 개발에 관한 연구^[4]이다. 영상처리 기법은 광학계의 확대비에 최적치가 존재하므로 카메라의 배율을 변화시킴으로써 모든 크기의 입경을 측정할 수 있으며 비구형 입자에 대한 측정이 가능한 장점을 가지고 있지만 이를 구현하기 위해서는 상기의 두 분야에 대한 보다 체계적인 연구가 요구된다. 또한 미분무소 소화 장치의 분무 유동과 같이 다수의 입자상태의 액적이 촬영되어 있는 영상은 상호 중첩되거나 접촉하고 있는 곳이 많아, 일반적인 영상처리만으로는 자동계측이나 해석이 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 영상 인식 알고리즘의 개발의 일환으로 이러한 입자가 중복된 영역에서 반복연산(이완법)에 의해 영상을 인식시켜가면서 각 윤곽점이 속할 것으로 예측되는 영상의 모델의 파라미터를 수렴시켜 윤곽점의 분할을 수행하고, 영상을 검출 분리하는 기법에 대하여 연구를 수행하였다.

2. 모의 영상과 중복 입자

그림1은 미분무소 소화 장치의 노즐 실험 예를 보여주고 있다. 실제 분무 유동에 대한 성능평가를 수행하기 위해서는 그림1에서와 같이 실제 실험에서 획득한 영상에 대해 입자들의 명암 판별이나 초점면 존재 판단 기준 등의 따른 영향을 고려하는 성능평가와 입자의 인식 알고리즘의 성능평가가 동시에 이루어져야 하겠지만, 본 연구에서는 그 선행과제로서 분무의 평균 입자경과 입경의 분포의 계측의 신뢰성을 확보하고자 모의 표준 영상을 제작하고, 입자의 인식 알고리즘의 성능평가만으로 국한하기로 한다.

한편, 개발된 영상 인식 알고리즘을 평가하기 위해서는 실제 분무의 입경 분포를 잘 대변하면서 정확한 평균입경도 미리 알고 있어야 한다. 따라서 실제 분무

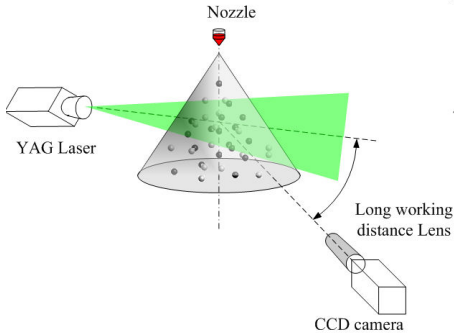


Fig. 1 미분부수 소화장치의 노즐 실험 예

현상을 모사하기 위해 입경은 기준값을 중심으로 가우스 분포($f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$)를 가지도록 하였으며 랜덤한 분포를 가지되 입경은 평균 입경을 중심으로 가우스 분포를 가질 수 있도록 하였으며, 모의 영상에서의 입경은 10pixel을 중심으로 500개의 입자가 가우스 분포를 가지도록 구성하였다. 그림2는 모의 실험에서 사용된 실험 데이터의 입경 분포를 나타내며, 그림3은 제작한 가로, 세로가 각각 640×480 픽셀 크기의 모의 영상을 나타내고 있다.

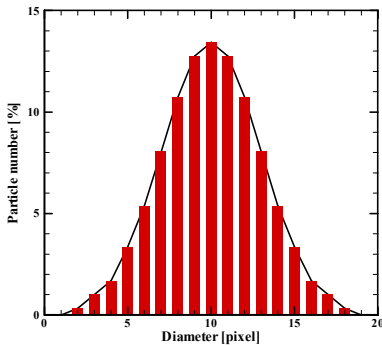


Fig. 2 모의 영상의 입자 크기의 분포

이러한 입자들이 중복되어 나타나는 경우 기존의 영상 처리기법에서는 중복된 입자의 중첩비를 계산하여 그 값이 0.8-1.2사이에 존재하지 않으면 그 값이 중복된 입자나 비구형 입자로 판별하여 제거하는 방법^[5]을 택하고 있다. 또한 김 등^[4]은 주어진 데이터의 최소 볼록다각형(Convex hull)을 구하고 두 개의 입자가 만나는 적당한 두 점을 판별하여 이들이 이루

는 직선을 중심으로 두 개의 개별적인 입자로 인식하고 각각에 대해 원 인식알고리즘을 적용하고 있다. 그러나 이 기법은 다중으로 입자가 중복된 경우에는 적용이 곤란하다.

이러한 연구는 분무 유동에서 중첩이 적은 경우에는 유용하지만, 중첩이 심한 미분부수 소화 장치에서의 분무의 평균 입자경과 입경의 분포의 측정에 적용하기는 적당하지 않다.

그러므로 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 입자 경계의 곡률변화를 이용하여 입자를 측정하는 알고리즘을 개발하고, 이를 모의 영상에 적용하여 개별 입자 측정과 함께 중첩된 입자의 영상으로부터 입자를 분리, 인식하는 작업을 수행하였다.

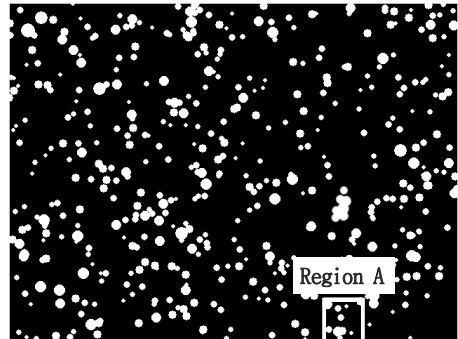


Fig. 3. 모의 영상 (640×480 pixel)

3. 이미지 처리 기법

3.1 영상 처리기법과 이완법에 의한 형상의 분리

본 장에서는 반복연산에 의해 형상을 인식시켜가면서 각 윤곽점이 속할 것으로 예측되는 형상의 모델의 파라메타를 수렴시켜 윤곽점의 분할을 수행하고, 형상을 검출 분리하는 기법에 대하여 기술한다. 알고리즘은 1) 초기치 계산, 2) 반복연산 프로세스 3) 중심 좌표가 수렴한 원의 분할의 3단계로 구성된다.

3.1.1 초기치 계산

원시영상에서 추출한 원형입자의 윤곽점에 몇 개의 파라메타, 즉 윤곽점의 좌표, 각 윤곽점이 속할 것으로 예측되는 원의 중심 및 그 확률을 구하고, 그 초

기치를 계산한다. 먼저, 원시영상으로부터 입자의 윤곽점이라고 생각되는 픽셀을 추출한다. 처리 순서는 다음과 같다.

(1) 일단 처리 영역을 입자들이 중첩된 곳으로 한정하고, 처리하고자 하는 영역에 마스크를 준비한다. 마스크는 원시영상을 2치화하고, 처리하고자 하는 영역 내에 있는 입자군(그림 3의 Region A)의 연결영역을 선택하여, 팽창처리를 2회 정도 실시한다.

(2) 마스크 영역 내에서 원시영상의 그래디언트(gradient)를 계산하고, 그래디언트의 절대치와 방향코드(8방향)를 구한다.

(3) 미분 연산자의 출력영상으로부터 기준점만을 추출한다(그림 4). 에지의 그래디언트의 정 및 부의 방향에 그래디언트의 절대치가 매우 큰 에지가 있을 경우는 기준점에서 제외한다.



Fig. 4 윤곽점의 추출

다음으로 추출된 n 개의 윤곽점에 다음의 a)~c)의 파라메타를 할당하고, 그 초기치를 계산한다. 이하 위 첨자(0)은 초기치를 표시하기로 한다. $(x_i^{(0)}, y_i^{(0)})$ 은 추출한 윤곽점의 좌표를 나타낸다.

- a) (x_i, y_i) : 점 i ($1 \leq i \leq n$)의 좌표
- b) (C_ξ, C_{y_i}) : 점 i 가 속할 것으로 예측되는 원의 중심좌표
- c) P_i : 점 i 가 (C_ξ, C_{y_i}) 을 중심으로 하는 원에 속

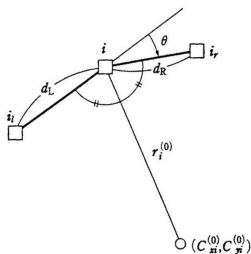


Fig. 5 중심좌표의 초기치 계산법

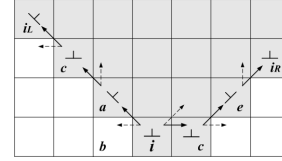


Fig. 6 에지점의 연결

할 것으로 예측되는 확률($0 \leq P_i \leq 1$)

$(C_\xi^{(0)}, C_{y_i}^{(0)})$ 은 그림 5와 같이 하여 계산된다. 점 i_L, i_R 은 주목하고 있는 i 을 시점으로 그래디언트 영상에서 근접 에지를 3픽셀분 연결하여 얻은 점이다. 그림 6은 그 순서를 나타내고 있다. 좌측에 연결되는 경우는 점 i 로부터 시작하여 먼저 2점 a, b 을 조사한다. a 는 i 점에서 보아 그래디언트의 직각방향의 점, b 는 a 보다 1픽셀 내측(입자의 내부 측)의 점이다. a, b 중, 그래디언트의 절대치가 i 에 값에 가까운 쪽을 선택한다. 그림 4의 경우는 a 이다. 또한 a 을 시점으로 같은 처리에 의해 c 에 연결되고 최종적으로 i_L 이 된다. 또한 같은 방법으로 우측에서는 $i \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow i_R$ 로 연결되며, 구하려는 두 점 i_L 과 i_R 을 얻는다. 점 i_L, i, i_R 은 근사적으로 이 순서로 동일 원주 상에 있다고 생각할 수 있으므로, 각 $i_L i i_R$ 의 2등분선의 방향에 중심이 있다고 볼 수 있다. 그림 5의 반경 $r_i^{(0)}$ 은 곡률 θ 를 사용하여 다음 식으로 구한다. 단, d_L, d_R 은 각각 점 i 와 점 i_L 및 점 i 와 점 i_R 의 거리이다.

$$r_i^{(0)} = \frac{d_L + d_R}{2} \times \frac{1}{2|\sin(\theta/2)|} \quad (1)$$

$$P_i^{(0)} = \begin{cases} \frac{Mag(i)}{\max[Mag(j)]}, & r_{\min} \leq r_i^{(0)} \leq r_{\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

P_i 은 초기치의 단계에서는 픽셀 i 에 있어서 그래디언트의 절대치 $Mag(i)$ 을 사용하여 다음 식으로 결정한다. 한편, 실험 예에서는 $r_{\min} = 1$ (픽셀), $r_{\max} = 15$ (픽셀)이다.

3.1.2 반복연산 프로세스

파라메타의 값을 갱신하는 처리를 수렴할 때까지 반복한다. 윤곽점 i 의 파라메타를 단지 i 의 근방 윤곽점의 정보만을 이용하여 갱신하는 것만으로는 전체적으로 보아 신뢰성을 확보하였다고 보기 어렵다. 그러므로 전 윤곽점에서 i 와 동일 원주 상에 있을 가능성이 큰 점 $j(1 \leq j \leq n)$ (즉 i 로 적합한 것)을 선별해 내고, 이것을 이용하여 i 의 파라메타를 갱신한다.

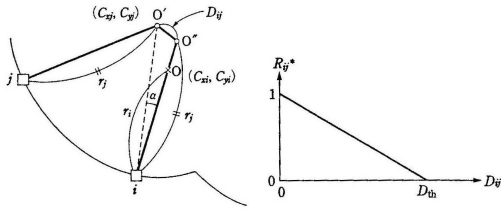


Fig. 7 계수 R_{ij}^*

먼저, 계수 R_{ij} 을 그림 7에 표시된 R_{ij}^* 을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$R_{ij} = \begin{cases} R_{ij}^* \cos \alpha, & \cos \alpha \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

그림 7의 O' 는 점 i 로부터 i 가 속할 것으로 예상되는 원의 중심 $O(C_\xi, C_{yi})$ 의 방향에, j 가 속할 것으로 예상되는 원의 반경 r_j 만큼 떨어진 점이다. 만약 i 와 j 가 정확히 같은 원주 상에 있다면, j 가 속하는 원의 중심 O 와 O' 는 같은 점이 되고, 이때 $R_{ij}^* = 1$ 이 된다. O 와 O' 의 거리 D_{ij} 가 커지면 R_{ij}^* 는 작아진다. 그림 6의 임계치 D_{ij} 는 평균적 입자의 반경의 크기로 사용하면 되고, 이하의 실험에서는 $D_{th} = 6$ (픽셀)로 하였다. $D_{ij} \geq D_{th}$ 가 되면 $R_{ij}^* = 0$ 이 되어 i 와 j 가 같은 원주 상에 있을 가능성은 없다고 판단하였다. 또한 i 로부터 보아 O 와 O' 의 방향의 차이(각도 α)를 고려하여 식 (3)의 R_{ij} 을 두 개의 점 i 와 j 간의 적합성을 평가하는 계수로 사용하였다. R_{ij} 는 i 와 같은 원주 상에 있다고 생각되는 점 j 를 선별하기 위한 중요한 척도가 된다.

한편, P_j 가 작은 윤곽선의 파라메타의 값을 신뢰하기 어렵다. 이를 위해 다음의 Q_{ij} 를 정의한다.

$$Q_{ij} = P_j R_{ij} \quad (4)$$

주목하고 있는 점 i 에 대해 Q_{ij} 가 어떤 임계치 Q_{th} 보다 큰 j 를 선별하여 그것들을 사용하여 i 의 파라메타를 갱신하면, 대국적으로 보다 높은 신뢰도를 확보할 수 있다고 볼 수 있다. 이러한 j 의 집합을 J 라고 하자($J = \{j | Q_{ij} > Q_{th}\}$).

이렇게 선별한 J 를 이용하여 (C_ξ, C_{yi}) 는 다음과 같이 계산된다.

$$\left. \begin{aligned} C_{xi}^{(k+1)} &= \frac{\sum_{j \in J} Q_{ij} C_{xi}^{(k)}}{\sum_{j \in J} Q_{ij}} \\ C_{yi}^{(k+1)} &= \frac{\sum_{j \in J} Q_{ij} C_{yi}^{(k)}}{\sum_{j \in J} Q_{ij}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$(k+1)$ 개의 r_i 와, 다음 식으로 계산한다. 다만, s_j 는 $(C_\xi^{(k+1)}, C_{yi}^{(k+1)})$ 와 $(x_j^{(k)}, C_j^{(k)})$ 의 거리이다.

$$r_i^{(k+1)} = \frac{\sum_{j \in J} Q_{ij} s_j}{\sum_{j \in J} Q_{ij}} \quad (6)$$

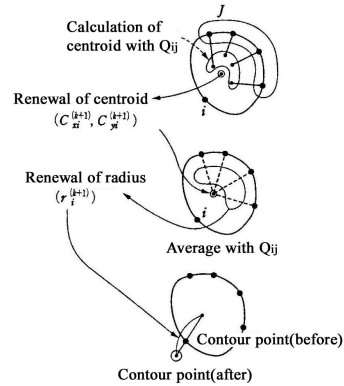


Fig. 8 파라메타의 갱신순서

이것을 이용하여, 그림 7에 나타낸 것과 같이, $(x_i^{(k+1)}, y_i^{(k+1)})$ 은 $(C_\xi^{(k+1)}, C_{yi}^{(k+1)})$ 으로부터 $(x_i^{(k)}, y_i^{(k)})$ 의 방향에 $r_i^{(k+1)}$ 만큼 떨어진 점으로 한 번에 결정할 수 있다.

또한, i 에 대하여 선별한 J 의 요소수 N_i 가 많으면

많을수록 i 의 파라메타의 갱신값은 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 따라서 P_i 는 다음의 식으로 갱신하였다.

$$P_i^{k+1} = \begin{cases} \min \left[1, \max \left[0, \frac{N_i - 1}{N_{th} - 1} \right] \right], & r_{\min} \leq r_i^{(k+1)} \leq r_{\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

N_i 가 일정한 임계치 N_{th} 이상이 되면 신뢰도가 높다고 생각할 수 있으며, $P_i^{(k+1)}=1$ 이 된다. 이하의 실험에서는 $N_{th}=10$ 이 설정하였다. $N_i \leq 1$ 이 되는 경우에 대해서는 특별히 0이 아닌 확률을 갖는 기준점 2개를 J 의 대응으로 갱신을 행하면, 식 (7)에 의해 $P_i^{(k+1)}=0$ 가 된다.

이상의 파라메타갱신 프로세스를 반복한다. 실험에서는 다음의 식으로 정의된 $ERR(i)$ 가 모든 i 점에 대해서 0.2픽셀 이하가 될 때 수렴으로 판정하였다.

$$ERR(i) = |C_{xi}^{(k+1)} - C_{xi}^{(k)}| + |C_{yi}^{(k+1)} - C_{yi}^{(k)}| \quad (8)$$

3.1.3 중심좌표가 수렴한 원의 구분

중심좌표가 수렴한 원은 간단한 방법(예를들면 중심간의 거리가 1픽셀 이내에 있는 것은 동일 성분이다)으로 구분하는 것이 가능하고, 형상을 분리하는 것이 가능하다. 그림 9은 분리결과이다. 경우에 따라서는 분리된 윤곽점을 이용하여, 다시 한 번 최적의 원을 구하는 것도 가능하다.

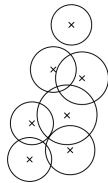


Fig. 9 분리결과

4. 결 론

본 연구에서는 미분무수 소화 장치의 분무 특성을 평가하기 위한 선행과제로서 형상 인식 알고리즘을 개발하고자 입자 경계의 곡률 변화를 이용한 영상의 분리, 인식을 하는 작업을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 영상처리에 의해 입경을 측정하는 경우 입자가

중복이 되어 개개의 입자의 구별이 곤란한 경우에도 적용이 가능한 중복된 입자의 처리기법을 개발하였다.

(2) 모의 영상을 이용하여 입자의 일부만이 인식되더라도 반복 연산에 의해 형상을 인식시켜 가면서 개별 및 중첩된 입자의 입경을 계산하는 알고리즘의 성능이 우수함을 보였다.

(3) 끝으로 본 연구에서 수행한 중복입자의 분리 기법은 구형의 입자에만 적용이 가능하며 타원체 등의 비구형 입자가 중복이 된 경우에는 적용이 곤란하다. 이는 비구형 입자의 일부 데이터만 존재하는 경우 형상의 인식이 어렵기 때문으로 이에 대해서는 향후 보다 체계적 연구가 요구된다.

참고문헌

- [1] Z. G. Liu and A. K. Kim, "A review of the research and application of water mist fire suppression system fundamental studies", Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 32-50.2000.
- [2] 정중수, 이교우, "PDPA와 화성처리법의 비교를 위한 분무 측정 실험", 한국역체미립 화학회 학술강연회 논문집, 제3권, 제1호, pp.1-9, 1998.
- [3] K. S. Kim and S. S. Kim, "Drop Sizing and Depth-of-Field Correction in TV Imaging", Atomization and Sprays, Vol. 4, pp. 65-78.1994.
- [4] 김주연, 추정호, 이상용, "입경 측정을 위한 영상 처리 기법의 개선", 대한기계학회 논문집 B권, 제 22권 제8호, pp.1152-1163.1998.
- [5] I. G. Kim and S. Y. Lee, "A Simple Technique for Sizing and Counting of Spray Drops Using Digital Image Processing", Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 3, pp.214-221, 1990.