

# 냉각법 및 영상 처리기법을 이용한 서브마이크론 정전분무 액적의 크기분포 측정

구 본 기\*, 김 상 수\*\*, 김 유 동\*\*\*

## Measurement of Size Distributions of Submicron Electrospays Using a Freezing Method and an Image Processing Technique

Bon Ki Ku, Sang Soo Kim and Yu Dong Kim

**Key Words :** Electrospay(정전분무), Freezing Method(냉각법), Image Processing Technique(영상 처리기법)

### Abstract

The size distributions of electrospay droplets from the Taylor cone in cone-jet mode are directly measured by using a freezing method and a transmission electron microscope (TEM) image processing technique. These results are compared with the data obtained by an aerodynamic size spectrometer (TSI Aerosizer DSP). The use of glycerol seeded with NaI and a freezing method make it possible to sample droplets with their original sizes preserved. Since pictures of droplets are taken with TEM with very low vapor pressure of the solution, evaporation is suppressed by freezing. For liquid flow rates below 1 nl/sec, the measured droplet diameters by the TEM image processing technique and the aerosizer are in the range of 0.25 to 0.32  $\mu\text{m}$  and 0.30 to 0.40  $\mu\text{m}$ , respectively. Comparing the TEM data with the aerosizer measurements, it has been revealed that the TEM image processing technique can afford more accurate values of droplet size distributions in the submicron range of 0.1 to 0.4  $\mu\text{m}$ .

### 기호설명

- K : 정전분무 액체의 전기 전도계수(S/m)  
 Q : 정전분무 액체의 유량 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $\epsilon$  : 정전분무 액체의 유전상수  
 $\epsilon_0$  : 진공에서의 유전율 ( $\text{C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$ )

### 1. 서 론

정전분무를 포함한 액체 미립화 특성연구에 있어서 액적 크기분포를 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다. 특히 정전분무에서는 발생하는 액적의 크기가 서브마이크론 영역을 포함하고 있기 때문에 액적 크기의 정확한 측정이 더욱 요구되고 있다. 지금까지 정전분무의 액적 크기는 레이저를

이용한 광산란 기법(light scattering method)<sup>(1)</sup>과 위상 도플러 기법(phase Doppler method)<sup>(2,3)</sup>을 이용한 측정이 주류를 이루고 있으며 에어로 사이저(aerosizer)를 이용한 방법<sup>(4)</sup>과 증발법<sup>(5)</sup>을 이용한 측정도 시도되어져 왔다. 레이저를 이용한 방법은 발생하는 스프레이(spray)의 액적 크기를 액적의 포집없이 여러 위치에서 측정할 수 있다는 장점이 있지만 측정할 액적의 크기가 서브마이크론까지 작아짐에 따라 레이저의 측정의 정확도는 감소하는 단점도 있다. 이 뿐만 아니라, 고체입자와 달리, 액적은 측정하는 과정에서 증발하기 때문에 실제 액적의 크기를 측정하기 어렵다는 문제점도 있다. 레이저로 측정할 수 있는 크기영역은 보통  $1\mu\text{m}$  이상이며 그 이하로 내려 갈수록 측정의 정확도는 현저하게 감소한다. 서브마이크론 액적을 측정할 때 또 다른 문제점 중의 하나는 액적을 샘플링하는 과정에서 액적의 증발 및 분열이 일어난다는 점이다. 정전분무에 의해 발생된 액적은 레일리

\* 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

(Rayleigh) 임계 전하량에 가깝고 매우 높게 대전되어 있어서 액적을 샘플링하여 크기를 측정하는 분석기로 측정할 경우 반드시 중화기(neutralizer)를 통해 액적을 중화시킨 후 측정기기로 샘플링을 해야 하는데, 이는 대전된 액적이 증발하는 과정에서 액적 표면에 존재하는 전하의 쿨롱 반발력에 의해 더 작은 액적으로 깨지기 때문이다<sup>(6)</sup>. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Chen 등<sup>(5)</sup>은 대전된 액적을 먼저 중화기로 중화시키고 액적을 완전히 증발시킨 후 남은 고체입자의 크기를 DMA (Differential Mobility Analyzer) 장치를 이용하여 측정하였다. 그런 다음, 초기 분무액체내의 고체물질의 농도와 잔류 고체입자의 크기로부터 액적의 크기를 유추하였다. 그러나 이 방법은 액적의 크기를 간접적으로 측정한 것이고 증기압이 매우 낮은 유기용매를 사용할 경우, 완전히 증발되지 않은 액적으로 인해 오차를 유발시킬 수 있다. 한편, Rosell-Lompart 와 Fernandez de la Mora<sup>(4)</sup>는 정전분무의 액적 크기 분포를 측정하기 위해 에어로 사이저를 사용하여 수 마이크로에 해당하는 액적 분포를 얻었지만, 액적 포집시 큰 액적들이 작은 액적들보다 훨씬 많이 샘플링관 벽에 부착되어 초기 발생한 액적 크기 분포를 정확하게 예측하지 못하였다. 이처럼 정전분무의 액적 크기 분포를 측정하는데 큰 걸림돌이 되고 있는 서브마이크론 영역(특히 가시광선 영역을 벗어난 0.1 $\mu\text{m}$ 에서 0.4 $\mu\text{m}$  영역)에서 레이저 측정의 정확도 감소, 액적의 증발, 샘플링 시 액적의 선택적 손실(preferential loss) 등의 문제점들을 해결하기 위해 새로운 측정방법이 요구된다.

본 연구에서는 냉각법을 이용하여 액적의 초기 크기를 유지하면서 샘플링을 하고 샘플링된 액적을 TEM 사진촬영과 TEM 이미지 처리기법을 사용하여 서브마이크론 영역의 정전분무 액적의 크기 분포를 좀더 정확하게 측정하고자 한다. 이를 위하여 냉각하기에 용이하고 증기압이 매우 낮은 글리세롤(glycerol) 용액을 사용하여 액체의 유량에 따라 발생하는 액적의 크기분포를 측정하고자 한다.

## 2. 액적의 냉각법

### 2.1 냉동 장치의 구조

Rao<sup>(7)</sup>와 Karasawa 등<sup>(8)</sup>은 분무 액적을 액체질소와 직접 접촉시켜 수십 마이크로에 해당되는 액적 크기를 측정하였으나 본 연구에서는 액적 포집을 위해 냉동장치를 새롭게 고안하였다. 액적의 냉각

을 위해 사용된 냉동장치는 크게 두 부분으로 구성되어 있다(Fig. 1): 액체질소를 저장하는 챔버와 챔버내를 관통하는 전도성 금속 막대이다. 액적을 포집하기 위한 샘플링 격자(grid)는 이 전도성 막대 끝면에 놓여 진다. 냉동챔버에 액체질소를 붓고 열전도에 의해 전도성 막대 끝면이 온도(본 실험에서는 273K 로 유지)가 낮아진 후, 이 막대는 액적을 포집하기 위해 정전분무 챔버안으로 삽입된다. 이 막대는 정전분무 시 샘플링 막대뿐만 아니라 접지극으로 사용되며 발생한 액적들은 차가운 격자에 포집되어 바로 냉각된다.

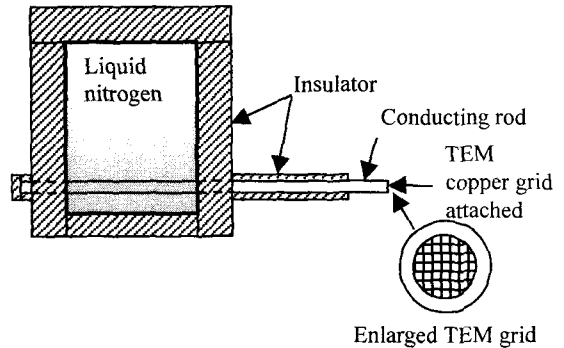


Fig. 1 Geometry of a freezing chamber and a sampling grid

### 2.2 TEM 영상 처리기법

격자 위에 냉동포집된 액적들은 액적들의 승화(sublimation)를 막기 위해 냉동고에 유지한 후 바로 TEM (Transmission Electron Microscope)을 이용하여 액적들의 사진을 찍었다. TEM 에 의해 얻어진 전형적인 영상은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 구형의 형태를 지니고 거의 겹쳐지지 않았으며 촛점 거리도 깊음을 알 수 있다. 그리고 겹쳐진 부분에서 명암(gray-level)이 다르게 나타남도 볼 수 있다.

이러한 TEM 영상의 특성을 고려하여 액적의 크기를 측정하기 위해 영상처리 알고리즘(algorithm)이 개발되었다. 본 알고리즘은 Kim 과 Lee<sup>(9)</sup>에 의해 개발된 알고리즘으로서 두 단계로 구성되어 있는데, 첫번째는 액적과 배경을 구분하는 단계이고 두번째는 구분된 액적의 경계정보(boundary information)로부터 구형의 액적을 알아내는 단계이다. 첫번째 단계에서는 주로 두가지 방법이 사용되는데 하나는 고정된 명암값을 이용하여 그 값보다 작으면 액적으로 간주하는 방법과 다른 하나는 명암의 기울기(gray-level gradient) 값을 사용하여 액적과 배경을 구분하는 방법인데, 본 연구에서는 후자의 방법 중 하나인 Sobel 연산

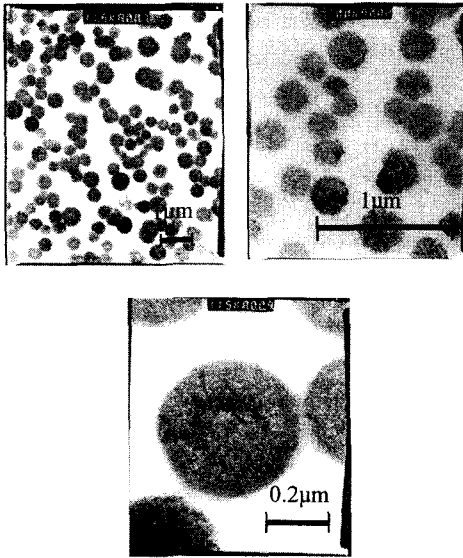


Fig. 2 TEM images of sampled droplets of 1.42M NaI glycerol.

자(operator)<sup>(10)</sup>를 이용하여 액적의 경계를 인식하였다. 이렇게 얻어진 액적의 경계는 두껍기 때문에 씨닝(thinning)이라는 과정을 한 번 더 거치게 된다. 이 과정에서 두껍게 인식된 액적 경계를 한 화소(pixel)의 두께를 갖는 경계로 인식하기 위하여, 두꺼운 액적 경계를 이루는 화소들 중 명암값의 기울기가 가장 큰 화소를 찾는 알고리즘을 이용하여 액적의 경계를 얇게 인식하였다. 두 번째 단계에서는 Hough 변환<sup>(10)</sup>을 이용하여 TEM 이미지로부터 원형의 액적을 찾는 데, Hough 변환을 통해 3 차원 매트릭스를 만들고 이 매트릭스를 이용하여 각 이미지의 원의 중심을 찾았다. 최종적으로 액적의 크기는 액적의 중심과 액적의 경계정보로부터 계산되었다. 대부분의 이미지가 픽셀관점에 볼 때 완전한 구형이 아니기 때문에 하나의 액적에 대해 여러 개의 액적의 중심이 존재할 수 있다. 이러 오류를 막기 위해 이 중심들이 고정된 거리 이내에 있을 때는 그들 중 하나만을 원의 중심으로 간주하였다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 실험 장치의 구성은 Fig. 3에 나타나 있다. 장치는 크게 정전분무 챔버, 액체 공급 장치, CCD 카메라를 포함한 가시화 장치, 스

프레이 전류 측정 장치로 구성된다. 스테인레스 스틸로 제작된 십자형 정전분무 챔버내에서 분무가 일어나도록 하였고 분무과정을 CCD 카메라(Toshiba)로 모니터링하기 위해 십자형 챔버 앞뒤로 창을 내었다. 분무될 액체는 용융 석영관(fused silica line)(100 μm ID, Polymicro Technologies Inc., Phoenix, Arizona)을 통하여 정전분무 챔버로 공급되고 관 끝은 액체에 의해 젖지 않도록 콘 모양으로 가공하였다. 또한 관 끝에 전기장을 가할 수 있도록 하기 위해 석영관을 금으로 코팅하였다. 분무액체는 액체가 담긴 유리챔버에 가압을 하여 압력차에 의해 공급되도록 하였으며 공급유량은 석영관에 기포를 넣어 기포가 일정거리를 움직이는 데 걸리는 시간을 측정하여 보정하였다. 액체의 유량은 석영관 양단의 압력차에 선형적으로 비례하여 증가하였다.

본 장치는 정전분무에 의해 발생된 액적들을 냉동장치뿐만 아니라 에어로 사이저로도 샘플링할 수 있도록 고안되었는데, 이는 TEM 영상처리 데이터와의 비교를 위한 검증자료로 사용되었다. 정전분무에 의해 발생된 액적들을 샘플링 관을 통과시켜 에어로 사이저(TSI 3220 Aerosizer DSP)로 샘플링하면서 실시간으로 크기분포를 구하였다.

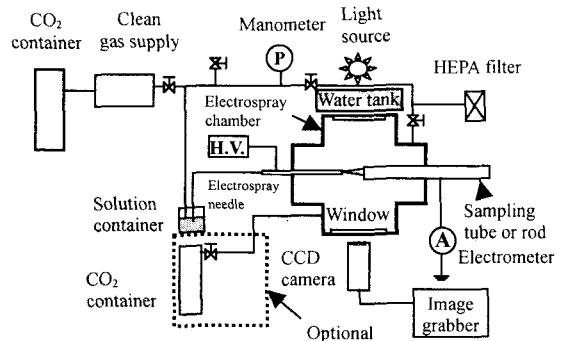


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

한편 작은 액적들은 매우 빨리 증발하기 때문에 분무액체로는 글리세롤 용매를 사용하였고 용매의 전도성을 높이기 위해 요오드화 나트륨(NaI)을 첨가하였다. 글리세롤 용매는 증기압이 매우 낮고 용질의 용해능력이 커서 콜로이드 추진기(colloid thruster)에 널리 이용되고 있다<sup>(11, 12)</sup>. 뿐만 아니라 어는점이 18°C 로서 보통 액체보다 높아 글리세롤 액적을 보다 빠르게 냉각시킬 수 있는 잇점도 있다. 본 실험에 사용된 용액의 전기 전도계수(K)는 실험실에서 제작한 전기 전도계수 측정

기로 측정하였고 유전상수와 증기압은 문헌에 나와 있는 대표값을 사용하였다<sup>(13)</sup>. 전기 전도계수는 0.0168 S/m 이고 유전상수( $\epsilon$ )와 증기압은 25°C 에서 각각 42.5 와 0.0231 Pa 이다.

### 3.2 액적의 샘플링과 TEM 영상 획득

전도성 막대에 부착된 샘플링 격자로 분무 액적들을 샘플링하기 전에, 분무모드가 콘젯모드(*cone-jet mode*)인가를 점검하기 위해 전류계(HP 3458A Multimeter)로 액적들의 충전량을 모니터링하였다. 이는 콘젯모드를 형성하게 되면 액적들의 충전량이 일정한 값으로 유지되어 안정된 콘젯의 형성을 쉽게 확인할 수 있기 때문이다. 일단 콘젯모드에 도달하면, 접지극은 냉동장치에 연결되어 있는 전도성 막대로 교환되어 정전분무 챔버에 삽입된다. 삽입되는 과정에서 콘젯이 형성되기 까지 몇 초의 시간이 걸리지만, 총 샘플링 시간이 수십 초에 해당되기 때문에 간헐모드(*pulsating mode*)에서 발생한 액적들은 무시할 수 있다. 액적을 샘플링하는 시간은 포집되는 액적들이 심하게 겹쳐지지 않고 영상처리하기에 충분한 액적들이 포집되기에 적절한 시간으로 결정하였다. 액적 샘플링 시 액적들은 차가운 샘플링 격자에 부착되기 이전에 격자 표면에 발달된 열 경계계층 내에서 냉각되기 시작하여 궁극적으로 격자 표면에서 완전히 생각된다. TEM 영상을 얻기 위하여, 샘플링 격자에 포집된 약 수천개의 액적들 중 균일하게 분포되어 있는 격자 중앙 부분의 한 영역을 선택하여 TEM 사진을 찍었다.

## 4. 실험 결과 및 토의

### 4.1 TEM 영상처리 결과

Fig. 4 는 TEM 원본영상 (*original image*) 과 이를 영상 처리기법으로 변환한 영상을 보여 준다. TEM 사진의 액적들은 거의 구형이며 놀랍게도 몇 개의 액적들을 제외한 대부분의 액적들이 심하게 겹쳐져 있지 않음을 볼 수 있다. 이는 정전분무되는 액체의 유량이 매우 낮고 액적의 크기도 매우 작기 때문으로 생각된다. TEM 사진에서 액적의 영상이 조금씩 명암의 차이를 보이는 이유는 TEM 사진촬영 시 전자빔의 산란량이 액적마다 다르기 때문이다. Fig. 4 (b) 는 영상 처리기법의 첫단계인 액적과 배경을 구분하는 쓰레쉬홀딩 (*thresholding*)과 씬닝(*thinning*) 과정을 거친 결과이다. 여기서 액적들은 배경과 구별되어 검은색

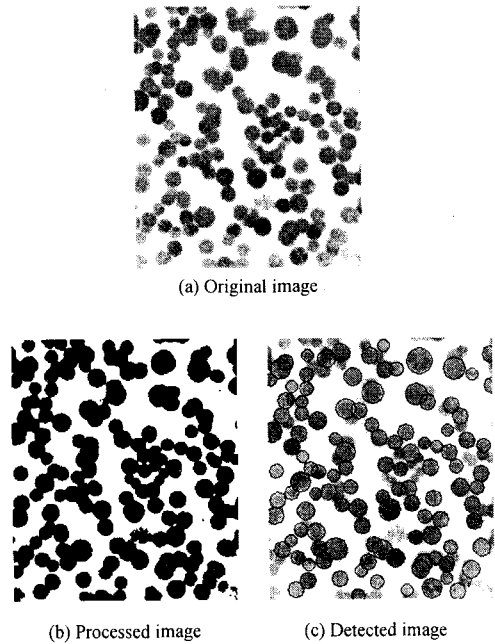


Fig. 4 The images processed by the image processing technique: (b) Processed image by thresholding and thinning (c) Finally detected image. The circles in the (c) are the recognized droplets.

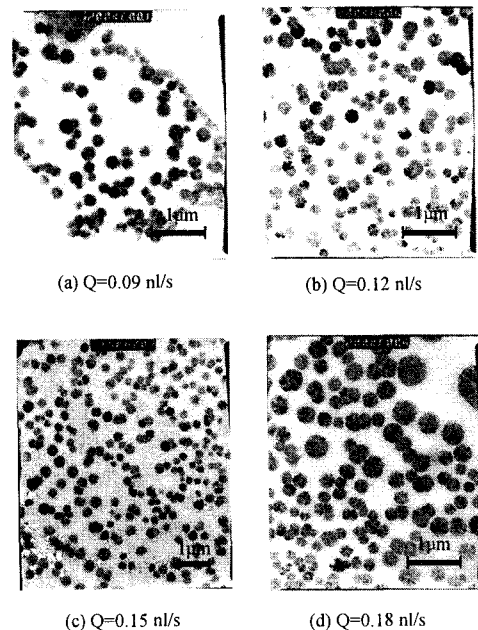


Fig. 5 TEM images of the sampled droplets of 1.42M NaI glycerol for various flow rates. Magnification of (a), (b) and (d): 20,000X, (c): 11,500X.

영상으로 표현되어 있고 겹쳐진 액적들의 경계는 서로 연결되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 4(c)는 두번째 단계의 결과인데, 이 과정에서 대부분의 액적들이 인식되어 각각의 액적은 원으로 표현되어 있다. 비록 심하게 겹쳐진 부분에서는 몇 개의 액적들이 인식되지 못함도 또한 볼 수 있다. 이 영상 처리기법의 오류라 할 수 있는 이런 액적들은 전체 액적 수의 약 10~15%에 해당된다<sup>(9)</sup>. 그러나 한편으로 부분적으로 겹쳐진 영상들은 본 알고리즘에 의해 각각의 액적으로 인식되어 있다.

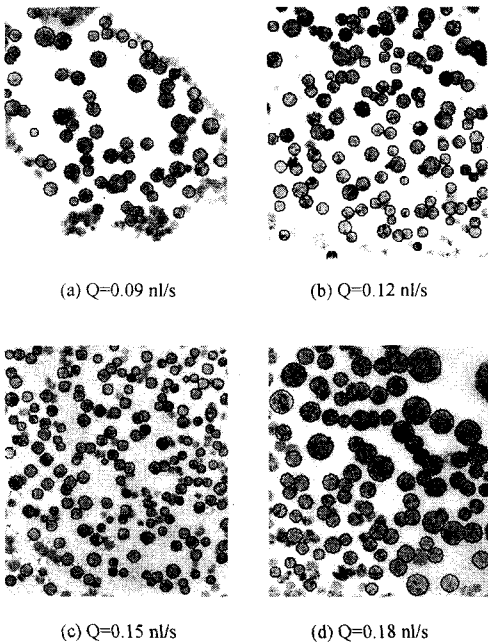


Fig. 6 The images detected by the image processing algorithm for various flow rates of 1.42M NaI glycerol. The circles in all images are the droplets recognized by the algorithm.

Fig. 5는 다양한 유량에서 샘플링된 액적들의 영상을 나타낸 것이다. 흥미롭게도, 콘젯모드에서 형성된 액체 콘은 매우 낮은 유량(본 실험에서는 0.09nl/s)에서도 안정적임을 확인할 수 있었다. 유량을 0.09nl/s에서 0.18nl/s까지 변화시키면서 액적을 샘플링한 결과, Fig. 5에서도 보듯이, 모든 유량에서 액적들이 서로 거의 겹치지 않고 샘플링되었음을 볼 수 있다. 그러나, 유량이 가장 작은 경우(Fig. 5(a)), 안정된 콘젯이 형성되는데 필요한 임계 유량에 가깝기 때문에 액적이 균일하게 분포되지 않은 부분도 존재한다.

Fig. 6은 Fig. 5에 나타난 TEM 영상을 영상 처

리기법을 이용하여 액적으로 인식한 결과를 보여준다. 여기서도 대부분의 영상은 각각의 액적들로 인식되어 있다. Fig. 6에서 유량이 증가함에 따라 액적들의 크기는 증가하고 액적의 단분산성(monodispersity)은 감소한다. Fig. 6의 데이터를 기초로 하여 얻어진 액적의 크기분포가 Fig. 7에

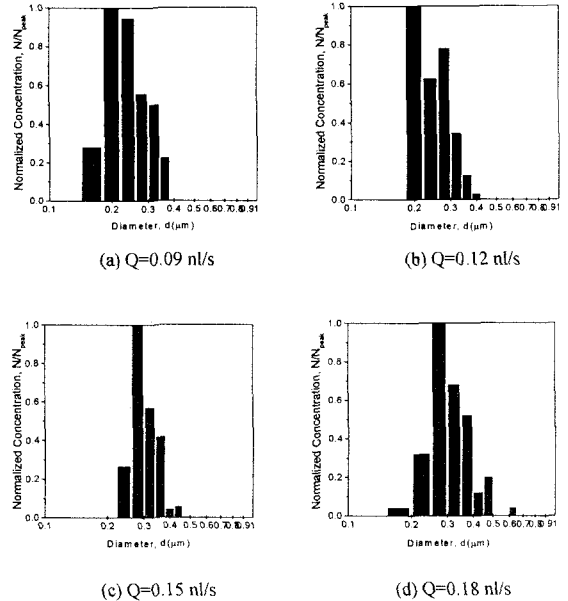


Fig. 7 Size distribution measured by the image processing for various flow rates of 1.42M NaI glycerol. Mean size : (a)  $d=0.25\mu\text{m}$  (b)  $0.26\mu\text{m}$  (c)  $0.30\mu\text{m}$  (d)  $0.32\mu\text{m}$ .

나타나 있다. 가장 낮은 유량에서는  $0.2\mu\text{m}$  부근에 많은 액적들이 분포되어 있고 가장 큰 유량에서는 액적들이  $0.18\mu\text{m}$ 에서  $0.63\mu\text{m}$ 까지 넓은 영역에 걸쳐 분포되어 있다. 게다가, 유량이 증가함에 따라, 액적의 단분산성은 상당히 감소한다(Fig. 7(d)). 그리고 조사된 유량범위에서 액적의 평균크기는  $0.25\mu\text{m}$ 에서  $0.32\mu\text{m}$  범위에 있다. 한편, Fig. 6(a) 경우에는 매우 작은 액적들이 심하게 겹쳐져 있어서 이들 대부분이 액적으로 인식되지 못하고 무시되었기 때문에 실제 크기 분포는 Fig. 7(a)보다  $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$  부근에 더 많은 액적들이 존재할 것으로 생각된다.

#### 4.2. 에어로 사이저의 실험결과

TEM 영상처리 결과의 신뢰성을 입증하기 위하여 TEM 결과를 에어로 사이저로 측정된 결과와 비교하였다. Fig. 8는 에어로 사이저로 정전분무

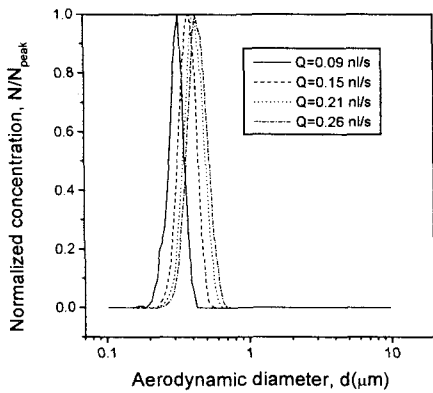


Fig. 8 Size distributions measured by the aerosizer for various flow rates of 1.42M NaI glycerol

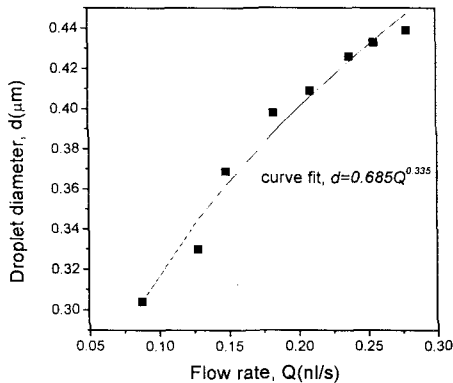


Fig. 9 Mean droplet diameter measured by the aerosizer for various flow rates of 1.42M NaI glycerol

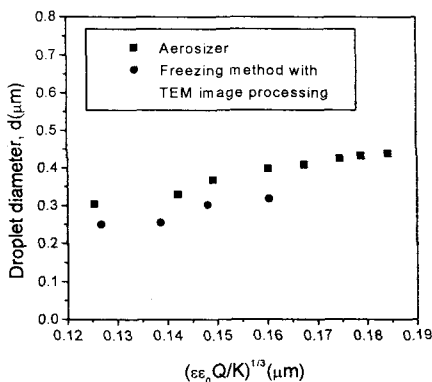


Fig. 10 Comparison of two droplet sizes measured by the aerosizer and TEM image processing.

액적의 수농도를 측정한 결과이다. 수농도는 최고치(peak value)로 표준화하였다. 액체의 유량이 증가함에 따라 농도분포의 최고치는 오른쪽으로 이동하고 액적의 직경은 증가한다. 따라서 액적의 평균 크기도 유량에 따라 증가하며 유량이 0.09nl/s 에서 0.26nl/s 로 변할 때 액적의 평균크기는 0.3 $\mu$ m 에서 0.44 $\mu$ m 로 증가한다(Fig. 9). 실험적으로 얻은, 유량(Q)에 따른 액적의 크기(d)관계가 기존의 콘젯모드에서 제시된 크기식<sup>(14)</sup>(scaling law)  $d \propto Q^{1/3}$  과 잘 일치함을 볼 수 있다. 다음으로 유량과 액적 크기의 표준편차를 살펴 보면 에어로 사이저로 측정된 액적의 기하학적 표준 편차는 유량이 증가함에 따라 증가함을 실험에서 확인하였고 이 결과는 TEM 영상 처리기법을 이용한 결과와 정성적으로 일치한다. 이것은 유량이 증가함에 따라 액체젯 표면의 전하가 증가하여 전하간의 반발력이 더욱 강해짐으로 인해 액체젯이 좌우로 흔들리면서 불안정해지기 때문이다. 이 과정에서 액체젯의 분열모드가 축방향 교란(axisymmetric instability) 에서 측면방향 교란(lateral instability)으로 천이(transition)가 일어나 액적의 크기분포의 편차가 더 커지게 된다<sup>(15, 16)</sup>. Fig. 10 은 TEM 영상처리 에 의한 액적 크기와 에어로 사이저로 측정된 액적 크기를 비교한 그래프이다. 두 데이터 모두 특성길이(characteristic length)<sup>(14)</sup>  $r^* = (\epsilon\epsilon_0 Q / K)^{1/3}$  에 선형적으로 비례함을 볼 수 있으며 냉각법과 TEM 영상처리 기법에 의해 측정된 액적의 크기가 에어로 사이저의 경우보다 조금 작게 나타나 있다. 냉각에 의해 액적의 증발이 거의 일어나지 않아 액적 크기의 감소를 무시할 수 있기 때문에, 위 두 결과의 차이는 에어로 사이저가 0.2~0.3 $\mu$ m 이하의 범위에서 측정의 정확도가 현저하게 감소하는 것에 기인한다. 즉, 0.2~0.3 $\mu$ m 이하의 액적들을 감지하지 못하여 에어로 사이저로 측정된 액적의 평균크기는 실제값보다 크게 나타나게 된다. 이런 점을 고려해 볼 때, 냉각법과 TEM 영상처리 기법은 0.1~0.3 $\mu$ m 영역에서 보다 정확한 액적 크기를 제공할 수 있다고 생각된다. 이 뿐만 아니라 냉각법에 의한 샘플링은 샘플링 시 관 벽으로의 액적 손실과 주위 기체로의 액적 증발과 같은 문제점들을 극복할 수 있다. 결론적으로 서브마이크론 액적의 크기를 측정할 때 광학장치나 레이저가 갖는 타고난 한계를 냉각법과 영상 처리기법이 상당히 극복할 수 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

지금까지 정전분무에 의해 생성된 액적의 크기 분포를 냉각법과 TEM 영상처리 기법을 이용하여 측정하고 이를 에어로 사이저(TSI Aerosizer DSP)로 측정된 데이터와 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 액적 냉각법과 TEM 영상 처리기법에 의해 요오드화 나트륨을 첨가한 글리세롤의 정전분무 액적은 초기 크기를 그대로 유지한 채 샘플링 및 크기 측정이 가능하다.

(2) TEM 영상 처리기법에 의해 측정된 액적의 크기는  $0.25\mu\text{m}$  에서  $0.32\mu\text{m}$  범위에 해당된 반면, 에어로 사이저로 측정된 액적의 크기는  $0.30\mu\text{m}$  에서  $0.40\mu\text{m}$  범위에 존재한다. 이 두 결과의 차이는 에어로 사이저가  $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$  영역에서 측정의 한계를 갖는 것에 기인한다.

(3) 서브마이크론 영역에서 특히,  $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$  에서, 영상 처리기법을 수반한 냉각법은 에어로 사이저보다 더 정확하게 액적의 크기를 측정할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

- (1) Cloupeau, M. and Prunet-Foch, B., 1989, "Electrostatic Spraying of Liquids in Cone-jet Mode," *J. Electrostatics*, Vol. 22, pp. 135-159.
- (2) Tang, K. and Gomez, A., 1994, "On the Structure of an Electrostatic Spray of Monodisperse Droplets," *Phys. Fluids*, Vol. 6, No. 7, pp. 2317-2332.
- (3) Naqwi, A., 1994, "In situ measurement of submicron droplets in electrosprays using a planar phase Doppler system," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, No. 6, pp. 1201-1211.
- (4) Rosell-Llompart, J. and Fernandez de la Mora, J., 1994, "Generation of Monodisperse Droplets 0.3 to  $4\mu\text{m}$  in Diameter from Electrified Cone-jets of Highly Conducting and Viscous Liquids," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, No. 6, pp. 1093-1119.
- (5) Chen, D. R., Pui, D. Y. H. and Kaufman, S. L., 1995, "Electrospraying of Conducting Liquids for Monodisperse Aerosol Generation in the 4 nm to  $1.8\mu\text{m}$  Diameter Range," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 26, No. 6, pp. 963-977.
- (6) Gomez, A. and Tang, K., 1994, "Charge and Fission of Droplets in Electrostatic Sprays," *Phys. Fluids*, Vol. 6, No. 1, pp. 404-414.
- (7) Rao, K. V. L., 1978, "Liquid Nitrogen Cooled Sampling Probe for the Measurement of Spray Drop Size Distribution in Moving Liquid-Air Sprays," *Proc. ICLASS-78*, Tokyo, pp. 293-300.
- (8) Karasawa, T., Shiga, S. and Kurabayashi, T., 1991, "Measurement of Droplet Sizes by Liquid Nitrogen Freezing Method," *Proc. ICLASS-91*, Gaithersburg, pp. 637-644.
- (9) Kim, Y. D. and Lee, S. Y., 2000, "Improvement of Image Processing Algorithm for Particle Size Measurement Using Hough Transformation," the fifth conference of ILASS-Asia, Tsukuba, pp. 99-104.
- (10) Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 1993, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, New York.
- (11) Kidd, P. W., 1968, "Parametric Studies with a Single-Needle Colloid Thruster," *J. Spacecraft and Rockets*, Vol. 5, No. 9, pp. 1034-1039.
- (12) Huberman, M. N., 1970, "Measurement of the Energy Dissipated in the Electrostatic Spraying Process," *J. Appl. Phys.*, Vol. 41, No. 2, pp. 578-584.
- (13) Riddick, J. A. and Bunger, W. B., 1970, *Organic Solvents: Physical Properties and Methods of Purification*, 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley and Sons, New York.
- (14) Fernandez de la Mora, J. and Loscertales, I. G., 1994, "The Current Emitted by Highly Conducting Taylor Cones," *J. Fluid Mech.*, Vol. 260, pp. 155-184.
- (15) Saville, D. A., 1971, "Stability of Electrically Charged Viscous Cylinders," *Phys. Fluids*, Vol. 14, No. 6, pp. 1095-1099.
- (16) Hartman, R. P. A., Brunner, D. J., Camelot, D. M. A., Marijnissen, J. C. M. and Scarlett, B., 2000, "Jet Break-up in Electrohydrodynamic Atomization in the Cone-jet Mode," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 31, No. 1, pp. 65-95.