

정전분무의 유체 물성치와 정전 매개변수 따른 분무특성

김지엽* · 홍정구†

Spray Characteristics according to Fluid Properties and Electric Parameters of Electropray

JiYeop Kim and Jung Goo Hong

Key Words: Electropray(정전 분무), Cone-Jet(콘-제트), Spray pattern(분무패턴), SMD(평균 액적 크기)

Abstract

Electropray is used in various industries because it can produce continuous and uniform droplets. However, it is difficult to find optimal spraying condition due to lack of data in various conditions. In this study, various conditions were divided into electric parameters and fluid property. The electric parameters set Nozzle to Substrate(NTS), nozzle diameters and the fluid property set viscosity and conductivity as conditions. In this study, it observes spray patterns, Sauter Mean Diameter(SMD) according to conditions. As a result, fluid properties had a greater effect on the cone-Jet mode than on the nozzle diameter, NTS, and flowrate. All of solutions have Stable cone-jet mode at voltage of 8.5 kV, NTS of 20 mm and nozzle diameter of 0.2 mm. SMD has 27% different depending on viscosity and conductivity. The increased flowrate and viscosity are rising break-up length and thickening jet also jet is thinned by increased conductivity. Experiments have confirmed that the jet is thickened by increased flowrate and viscosity, and that the jet is thinned by conductivity.

1. 서 론

정전분무는 고전압을 인가시켜 유체를 미립화 하는 방법으로써, 다른 액체 미립화 기구에 비해 장치 구성이 간단하고 마이크로미터 수준의 액적을 쉽게 발생시키는 장점을 가지고 있다⁽¹⁾.

정전분무의 분무 메커니즘(Mechanism)은 Fig. 1(a)과 같다. 노즐(Nozzle)에 (-)극을 인가시키고 기판(Substrate)에 (+)극을 인가하면, 노즐과 기판 사이에 전기장이 형성된다. 이후 (-)극으로 대전된 유체는 노즐 팁(Tip)으로부터 콘(Cone)형상이 형성되고 이후 제트(Jet)로 변형되

어 액적으로 분열된다. 분열된 액적은 기판 위에 균일한 크기로 연속적으로 쌓이게 된다⁽²⁾. Fig. 1(b)은 콘의 형성 메커니즘을 나타낸 그림이다. 콘 형상은 유체 표면에 전하를 대전시키면 내부압력이 상승하고, 전기적 압력(전압)과 표면장력이 평행 조건일 때 형성된다^(3,4). 노즐에 (-)극의 고전압을 인가시킬 경우 전도성 액체 내부에 용해되어 있던 양이온들이 전하 분리 현상에 의해 유체 표면으로 이동하고 이에 양이온 간의 전기적 척력에 의해 유체는 분무 하단으로 갈수록 빠르게 가속화된다. 가속화된 유체는 콘 형상의 노즐 팁으로부터 표면 전단응력(Surface shear stress)에 의해 가는 액주 제트가 형성되고, 이후 유체에서 형성된 종 방향 혹은 횡 방향의 교란에 의해 액적으로 분열된다. 중력의 경우 분무 하류 방향으로 힘이 작용되며, 점도는 반대 방향으로 힘이 작용하게 된다. 이에 따라 유체의 속도 분포(Profile of velocities)는 제트의 바깥쪽에서 중심부로 향할수록 속도가 작아지는 경향을 보인다.^(5,6) 정전분무의 다양한 분무 모드 중 콘-

(Received: 27 Mar 2020, Received in revised form: 23 Apr 2020, Accepted: 24 Apr 2020)

*경북대학교 기계공학과

†책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학과

E-mail : jghong70@knu.ac.kr

TEL : (053)950-6570 FAX : (053)950-6550

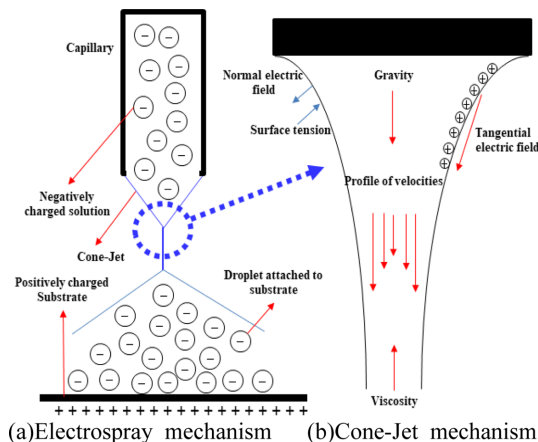


Fig. 1 Mechanism of electrospray and Cone-Jet

제트 모드(Cone-Jet mode)의 경우 분무 안정성과 연속성이 우수하고 균일한 액적 사이즈를 얻을 수 있는 장점을 가진다. 또한 나노 미터단위의 액적을 생성할 수 있으며, 시스템 응답성이 빠르고 재현성이 뛰어나다. 정전분무의 이러한 장점을 토대로 질량분석기, 이온 공급기, 미세입자 구조물 제조, 마이크로 패터닝(Micro patterning), 기능성 캡슐 제조, 의공학 물질 전달 등 산업 전반에 이용되고 있으며 그 적용 범위가 점차 확대되고 있다⁽⁷⁻⁹⁾.

선행 연구자들에 의해 연구된 정전분무 연구 중 콘-제트 모드의 형성에 영향을 주는 요소는 크게 유체의 전기전도도, 점도 등의 유체 물성치적인 요소와 노즐 직경, 노즐과 기관 간격(Nozzle To Substrate, NTS) 등과 같은 실험 변수 요소로 구분된다.

정전분무의 유체 물성치에 대한 평균 액적 크기에 대한 연구로 De la mora 등⁽¹⁰⁾은 전기전도도가 높은 용액($K > 1^{-5} \text{ S/m}$)에 대한 평균 액적 크기 식을 제시하였고, Hartman 등⁽¹¹⁾은 이론적인 평균 액적 크기 식을 유량과의 관계에 대해 주장하였다. 그러나 Ku 등⁽¹²⁾은 고점도 용액을 이용해 위의 액적 크기식과 실제 실험을 비교했으며, 이론식과 실험 결과에 대한 차이가 최대 약 6배임을 확인하였다. 이에 유체 물성치 변화에 따른 평균 액적 크기에 대한 실험적 연구가 필수적이다.

정전분무의 유체 물성치에 대한 실험적 연구로 Tang⁽¹³⁾은 최대 83.22 mS/cm까지의 유체 전기전도도 증가에 의한 액적 크기 감소 및 제트 반경 감소를 확인하였다. Ku 등⁽¹⁴⁾은 전기전도도의 증가에 따라 전기응력이 강해져 제트의 측면 방향을 불안정하게 만들어 기관에서의 액

적 분포가 넓어진다고 주장하였다. Rossel-Llompart 등⁽¹⁵⁾은 점도의 증가에 따라 약 35 cP ~ 70 cP 조건에서 제트 분열 길이와 액적 크기가 증가하고, 액적의 분포도가 넓어진다고 보고하였다.

한편, 정전분무의 유량 조건에 대한 실험으로 Hartman 등⁽¹¹⁾은 3.6 ml/h 이상의 유량 조건에서 실험하였고, Ku 등⁽¹⁶⁾의 경우 $6.48 \cdot 10^{-4} \text{ ml/h}$ 이하의 유량 증가 조건에서 실험을 진행하였다.

앞선 선행연구 결과들을 종합해보면, 정전분무는 특정한 유체 물성치와 유량 조건을 가진 실험들이 대부분이다. 이에 유체의 물성치 변화와 유량 조건에 따른 연구와 데이터 등이 부족하며, 최적화된 분무 조건을 찾기 어려운 실정이다.

정전분무의 실험 변수에 대한 연구로 Smith⁽¹⁷⁾는 NTS와 노즐 직경이 증가할수록 콘-제트 모드 인가전압이 지연됨을 확인하였고, Park⁽¹⁸⁾은 노즐 직경 차이에 의한 콘-제트 모드 인가 범위를 확인하였다. Park⁽¹⁸⁾의 경우 노즐 직경이 커질수록 콘-제트 모드 인가전압이 확연하게 지연되고 범위가 좁음을 보였다. 반면, Smith⁽¹⁷⁾의 경우 인가전압 범위는 직경에 따라 크게 차이가 나지 않다고 하였다. Tang⁽¹³⁾은 NTS에 따라 노즐 반경 방향의 액적 분포가 넓어짐에 대해 연구하였다. 따라서 유체의 물성치와 유량 조건뿐만 아니라 노즐 직경과 NTS 등의 실험 변수에 의해서도 정전분무의 분무특성에 영향을 받는다.

따라서, 본 연구에서는 정전분무의 분무특성을 파악하기 위한 연구로서, 실험 조건을 유체의 전기전도도와 점도인 유체 물성치 인자와 노즐 직경과 NTS를 실험 변수로 두고자 한다. 각 인자에 따른 평균 액적 크기와 분무 특성을 실험적으로 확인하여, 정전분무의 분무특성에 지배적인 영향을 미치는 인자에 대해 고찰하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Figure 2은 정전분무의 분무 특성을 확인하기 위한 실험실 규모의 분무 실험 장치이다. 그림 중심은 노즐, 기관, 유체 공급부로 이루어져 있으며, 좌측은 전압 공급부, 우측은 계측부로 이루어져 있다. 실험에 이용된 주요 장치의 경우 Table 1에 구체적으로 나타내었다. 중심부의 노즐은 방사형 노즐(Single Plastic Nozzle, NNC-PN-

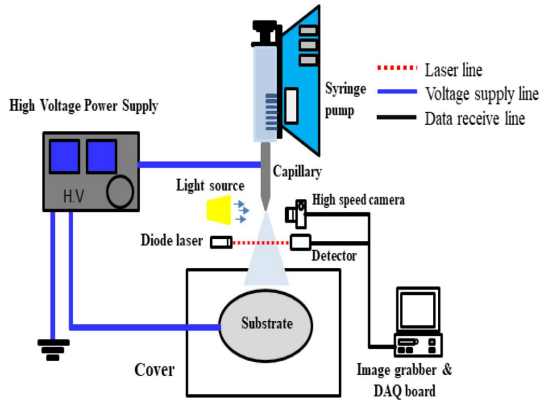
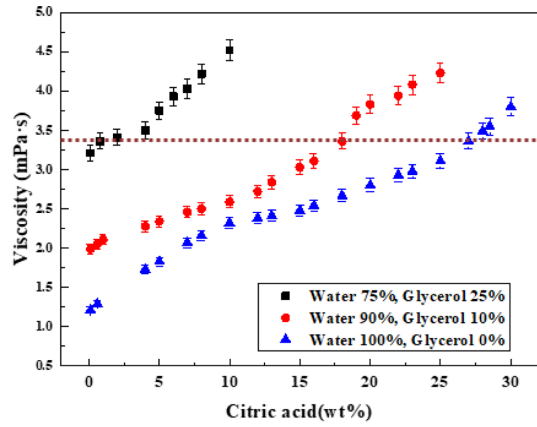


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

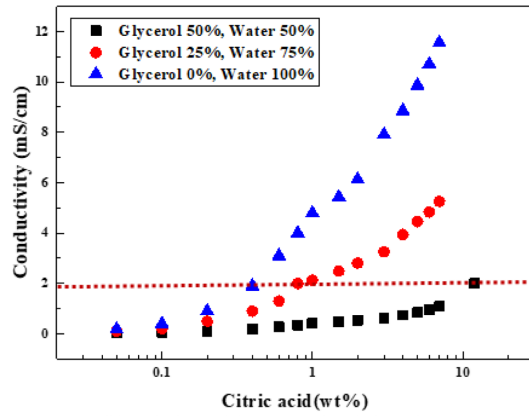
Table 1 Experimental specification

| Name | Specification |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Syringe pump | NE-1000 model |
| High voltage power supply | 한국스위칭, B150 (~30 kV, ~5 mA) |
| High speed camera | Phantom Miro ex4, Maximum resolution : 1280X1024, Sample rate : 900 f/s |
| Simple droplet sizing-system | Malvern type (MLXA-A12-635-5), Measurement range (8 ~ 450 μm) Operating distance (< 400 mm) Laser spot radius: 3.9[pixel] |

21GA~34GA)이다. 기판은 알루미늄 재질(D: 70 mm, H : 10 mm)로 표면을 평평하게 제작하였다. 외부 환경 요소에 의한 분무 패턴 변화를 방지하기 위해 커버(Cover) 내에서 실험을 진행하였다. 유체 공급부는 실린지 펌프를 이용해 유체를 공급하였으며, 실린지 용량은 1 cc (HSW Norm-Ject)를 이용하였다. 전압 공급부는 가변형 고전압 전원을 이용해 노즐에 (-)극 기판에 (+)극을 대전하였고, 내부 컨트롤러(Controller)를 통해 전압을 조절하여 공급하였다. 분무 유동 가시화를 위해 초고속 카메라와 스트로보스코프(Stroboscope)를 사용하여 분무 가시화 이미지를 촬영하였다. 한 실험 당 100개 이상의 이미지가 분석되었으며, 인가전압에 의해 분무가 정적인 상태에 도달한 이후, 가시화를 진행하였다. 노즐로부터 분사되는 평균 액적 크기(Sauter Mean Diameter, SMD)와 액적 분포도(Droplet Distribution)는 레이저 회절(Laser diffraction)원리를 이용한 Simple droplet siz-



(a) Citric acid - Viscosity data



(b) Citric acid - Conductivity data

Fig. 3 Fluid property data according to citric acid

ing-system 사용했다^(19,20).

2.2 실험 용액

Figure 3은 실험에 사용된 용액의 교반 데이터이다. 실험 용액의 물성치를 조절하기 위해 증류수(Distilled water), 글리세롤(Glycerol), 시트르산(Citric acid)를 이용해 혼합용액을 교반하였다. 혼합용액은 멀티 가열 자력 교반기(S07-72-050)를 이용하여 실험 용액을 제조하였다. 멀티 가열 자력 교반기를 이용한 과정에서 분위기 온도는 25°C로 고정하고, 40 rpm에서 12시간 교반을 진행하였다. 글리세롤과 시트르산의 경우, OH⁻ 친수기를 띄고 있어 물과 잘 섞인다는 장점을 가지고 있다. 증류수의 경우 다른 용매에 비해 전기전도도와 표면장력이 높은 특성이 있다.

Figure 3(a)의 경우 시트르산 무게 백분율(weight per-

Table 2 Test fluid conditions

| Fluid | Composition (Glycerol: Distilled water : Citric acid) | Density (kg/m ³) | Viscosity (mPa·s) | Conductivity (mS/cm) | Surface tension (mN/m) |
|-------|----------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|
| S | 24.8 : 74.4 : 0.8 | 1071.1 | 3.36 | 2.01 | 67.87 |
| V1 | 0 : 73 : 27 | 1055.8 | 3.36 | 17.07 | 68.09 |
| V2 | 8.2 : 73.8 : 18 | 1032.6 | 3.36 | 13.16 | 67.19 |
| C1 | 44 : 44 : 12 | 1110.6 | 12.4 | 2.01 | 65.56 |
| C2 | 0 : 99.75 : 0.25 | 1000.1 | 1.19 | 2.01 | 70.92 |

cent, wt%) 증가에 따라 점도 증가를 나타내는 그래프로써, 증류수와 글리세롤의 백분율(%)은 시트르산 무게 백분율을 제외한 비를 증류수와 글리세롤로 나타낸 것이다. 동일 시트르산 무게 백분율에서 글리세롤 백분율이 높은 용액이 점도가 높은 것을 확인할 수 있고, 이에 점도 3.36 mPa·s에서 동일 점도인 3가지 용액을 교반하였다.

Figure 3(b)의 경우 시트르산 무게 백분율 증가에 따른 전기전도도 증가를 나타내는 그래프로써, 증류수와 글리세롤의 무게 백분율은 (a)와 같이 시트르산 무게 백분율을 제외한 비를 증류수와 글리세롤의 백분율로 나타내었다. 시트르산 무게 백분율이 동일한 경우 증류수의 백분율이 높을수록 전기전도도가 높음을 확인하였고, 2.01 mS/cm에서 점도와 동일하게 3가지 용액을 교반하였다.

Table 2은 Fig. 3의 교반 결과를 바탕으로 본 실험에서 혼합 용액의 물성치를 나타내는 표이다. 실험에 사용된 용액은 총 5가지이며, 각 용액의 물성치중 밀도와 표면장력은 용액 5가지 모두 최대한 고정된 상태에서 교반을 진행하였다. 표면장력과 밀도의 경우 데이터 차이가 미미해 다른 유체 물성치에 비해 실험 변수에 영향을 주지 않는다.

S 용액은 대조군 용액이며, V1, V2 용액은 S 용액과 점도는 동일하나 전기전도도가 V1 용액의 경우 약 8.5배, V2 용액의 경우 약 6.55배 차이를 가진다. C1, C2 용액의 경우는 S 용액과 전기전도도가 동일하고 점도가 C1 용액은 약 3.7배 C2 용액은 0.35배 차이를 가진 용액이다.

2.3 실험 조건

Table 3는 실험 조건을 나타낸다. 모든 실험 조건은 정전분무에서 콘-젯트 모드 인가전압 및 범위에 미치는 영향을 관찰하기 위함이다. 모든 실험은 조건 당 20회

Table 3 Experimental conditions

| Condition | Value |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Nozzle inner diameter (mm) | 0.08, 0.1, 0.15, 0.2 |
| NTS (mm) | 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 |
| Flowrate (ml/h) | 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1 |
| Ambient temperature (°C) | 25 |

진행하였다. 노즐 내경은 0.08, 0.1, 0.15, 0.2, 0.5 mm (nozzle gage : 21, 27, 30, 32, 34)로 실험을 진행하였다. NTS는 거리에 따른 콘-젯트 모드 인가전압 범위와 전기력 세기 및 전기장 형성을 확인하기 위해 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 mm로 실험을 진행하였다.

유량의 경우 0.3~2.1 ml/h까지 0.3 ml/h씩 증가시켜 유량 변화에 따른 실험을 진행하였다. 분위기온도는 25°C 대기압 조건에서 고정하여 실험을 진행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분무이미지

Figure 4는 노즐 내경 0.2 mm, NTS 20 mm에서, S 용액의 인가전압 증가에 따른 분무 이미지로써 Cloupeau 등⁽²¹⁾에 의해 분무 형상에 따라 크게 3가지로 나누어진다. 또한, Lee 등⁽²²⁾은 콘-젯트 모드 내에서 분무 가시화를 보다 더 세분화 하였다. 본 실험을 통해 분무 패턴을 확인한 결과 6가지 형태의 분무 패턴을 확인하였다. (a) 드리핑(Dripping)의 경우 전기장의 영향은 거의 없고 중력에 대한 영향이 크게 작용한다. 또한, 노즐 외경의 크기로 액적이 일정한 빈도로 분무되는 것을 확인하였다. (b)마이크로 드리핑(Micro dripping)의 경우 노즐 직경보

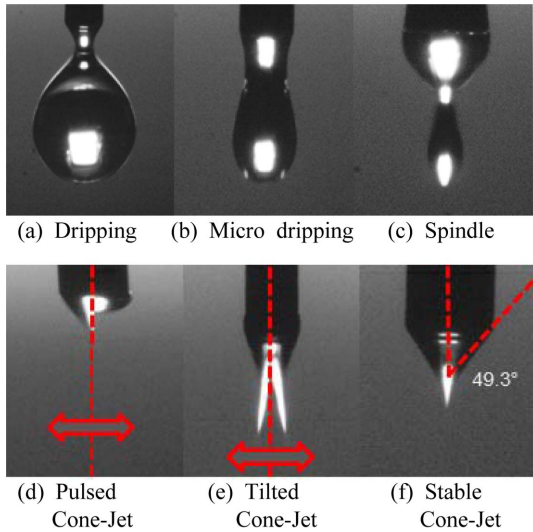


Fig. 4 Spray modes of electro spray

다 작은 크기의 액적이 형성되며, 인가전압을 증가시킬수록 드리핑 보다 빠른 주기로 분무하였다. (c)스핀들(Spindle)의 경우는 노즐 팁으로부터 큰 형상을 띄며 제트로 변형되지 않고 액적으로 분무되었다. (d)펄스 콘-제트 모드(Pulsed Cone-Jet mode)의 경우 큰 형상과 이후 제트로 변형되어 미세한 액적으로 분열되어 분무되었으나, 노즐 축 방향으로 위아래로 주기적으로 변하면서 불안정한 분무 패턴을 나타냈다. (e)기울어진 콘-제트 모드(Tilted Cone-Jet mode, TCJ)는 펄스 콘-제트 모드와 같이 콘과 제트가 형성되어 미세액적으로 분열되어 분무되었으나, 노즐 축 방향으로 좌우로 주기적으로 변하며 불안정한 분무 패턴을 나타냈다. (f)안정된 콘-제트 모드(Stable Cone-Jet mode, SCJ)의 경우 펄스, 기울어진 콘-제트 모드와는 다르게 분무가 안정적이게 나타났고 Taylor⁽⁴⁾의 주장과 일치하게 반각이 49.3°를 나타내었다. 분무 안정성이 우수 하고 연속적인 미세액적을 얻기 위해 안정된 콘-제트 모드에서 실험을 진행하였다.

3.2 실험 변수 및 유체 물성치에 따른 콘-제트 모드 인가전압

Figure 5는 NTS 증가에 따른 콘-제트 모드 인가전압을 나타낸 그래프이다. 실험은 S 용액 기준으로 유량 1.5 ml/h, 노즐 직경 0.2 mm 조건에서 실험을 진행하였다. 그래프의 점들은 각 모드가 끝나는 점이고, 각 점 사이의 거리는 모드의 범위를 나타낸다. NTS에 따라 전기

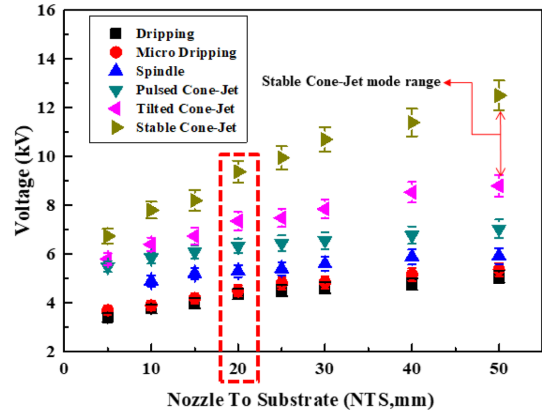


Fig. 5 Cone-Jet mode according to NTS

장 형성에 영향을 주며, 이에 따라 콘-제트 모드 인가전압이 결정된다. 전기장(E)의 공식은 아래 식 (1)과 같다.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, E = \frac{F}{q} \quad (1)$$

F 는 전기력, k 는 비례상수, q 는 전하량, r 는 거리이다. NTS가 작은 경우, 전기력이 강해져 강한 자기장이 형성된다. 이에 NTS가 20 mm미만인 경우 발생하는 전기력이 전기적 붕괴 한계점 보다 높아져 노즐 팁 부근에서 코로나 방전(Corona discharge)이 발생한다. NTS가 가까운 경우 콘-제트 모드 범위가 좁아 실험에 사용된 5가지 용액에 대해 동일한 전압 조건에서 콘-제트 모드를 확인하지 못했다. NTS가 먼 경우 전기력이 약해지고 전기장 세기가 약해져 높은 전압을 인가해야 콘-제트 모드가 형성되므로, 각 모드가 지연되어 형성된다. 또한,

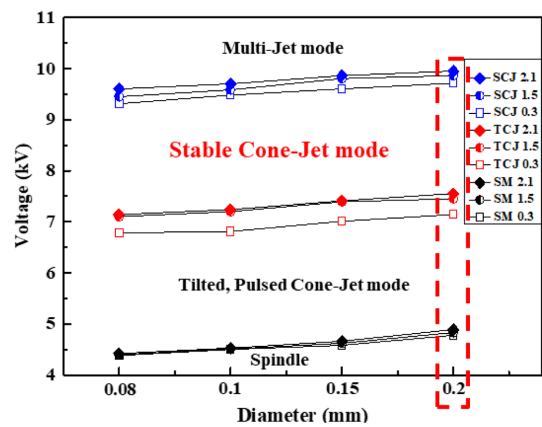


Fig. 6 Cone-Jet mode according to Nozzle Diameter

NTS가 증가할수록 분무 과정 중 비산되는 액적이 많고 기관 위에 넓은 범위로 증착되는 것을 확인했다. 이에 실험 용액이 모두 동일 전압에서 콘-제트 모드가 되고, 비산되는 양이 적은 20 mm에 고정된 후 실험을 진행하였다.

Figure 6은 노즐 직경 증가에 따른 콘-제트 모드 인가 전압이 지연됨을 나타낸 그래프이다. 실험은 S용액 NTS를 20 mm에 고정하고 실험 하였다. 안정된 콘-제트 모드(SCJ)의 범위는 7 kV ~ 9.5 kV인 것을 확인하였고, 기울어진 콘-제트 모드(TCJ)의 범위는 4.5 kV ~ 7 kV인 것을 확인하였다. 노즐 직경 증가에 따라 인가전압이 약 2% 가량 선형적으로 증가되며, 이는 본 실험 조건보다 큰 0.2 mm ~ 0.8 mm 직경에서도 유사함을 확인했다⁽¹⁷⁾. 이는 노즐의 단위 직경이 증가 할 시 콘이 유지되기 위해서는 표면장력에 의해 더 높은 인가전압이 필요하기 때문이다. 동일 노즐 직경에서 유량에 따른 콘-제트 모드 인가전압의 경우, 직경 0.2 mm에서 유량 0.3 ml/h에서 1.5 ml/h의 유량 변화에 따른 콘-제트 모드 인가전압을 확인하였으며, 실험 조건 하의 최대, 최소 유량 차는 약 6%인 것을 확인하였다. 동일 노즐 직경에서 유량이 증가할 시 유속이 증가하므로, 유체 표면에 대전되는 전하량이 적어지는 것으로 판단된다. 콘-제트 모드를 형성하기 위해서는 유량 증가에 따라 노즐에 인가되는 전압을 증가해야 한다.

Figure 7은 실험 용액에 따른 콘-제트 모드 인가범위를 나타낸 그래프이다. 실험 조건은 유량은 1.5 ml/h, 노즐 직경 0.2 mm, NTS는 20 mm이다. 실험에 사용된 용액 모두 8.5 kV에서 SCJ 범위 내에 있는 것을 확인하였

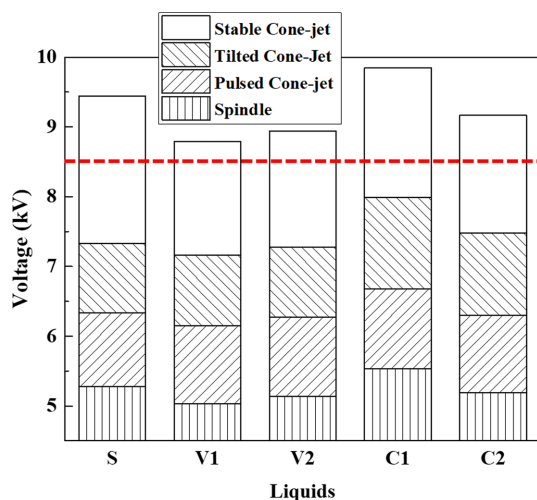


Fig. 7 Cone-Jet mode according to test fluid

다. 그 중 전기전도도가 높은 V1, V2 용액이 콘-제트 모드 인가전압 조건이 낮은 것을 확인하였다. 점도가 높은 C1 용액은 콘-제트 모드 범위도 높은 것을 확인하였다.

유체의 전기전도도가 높아지면 유체에 존재하는 전하량이 증가하고, 유체 표면에 법선 방향으로 작용하는 전기용력이 강해지므로, 보다 낮은 전압 조건에서도 콘이 형성된다. 반면 유체 점도가 높아지는 경우 유체 표면과 대기와의 표면 전단응력이 감소하므로, 콘-제트 모드 인가전압이 지연되고 또한, 콘-제트 모드 범위가 넓은 것이라 판단된다.

3.3 유체 물성치에 따른 평균 액적 크기

Figure 8은 S, V1, C1 용액의 유량 증가에 따른 전체 유량에 대한 평균 액적 크기 증가 그래프이다. 실험 조건은 NTS를 20 mm, 노즐 직경은 0.2 mm, 전압은 8.5 kV에서 실험을 진행하였다. S, V1, C1은 유량 증가에 따라 평균 액적 크기가 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 이에 따라, S 용액을 기준으로 V1, C1 용액의 전체 유량에 대한 평균 액적 크기 비를 다음과 같이 식 (2)으로 나타내었다.

$$\frac{SMD\ of\ V1, C1}{SMD\ of\ S} \times 100(\%) \quad (2)$$

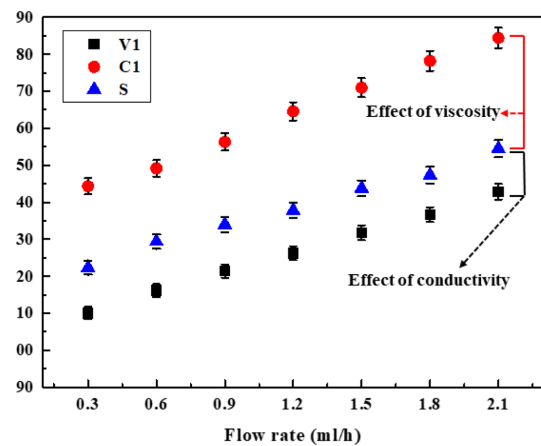


Fig. 8 SMD according to Flowrate

Table 4 Average SMD ratio

| Condition | Value |
|-----------|---------|
| V1 | 91.13% |
| C1 | 118.20% |

이에 따른 전체 유량에 대한 평균 액적 크기 비의 값은 Table 4에 나타났다. 분무 패턴은 유량 증가에 따라 제트의 두께가 증가하고 분열 길이가 증가에 의해 평균 액적 크기가 증가 된 것을 확인하였으며 선행연구와 유사함을 확인하였다⁽¹⁸⁾. 또한, S 용액의 기준으로 전기전도도가 높은 V1 용액은 평균 액적 크기가 감소함을 확인하였고, 제트의 두께가 얇아지고 분열 길이가 짧아지는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 정전분무 유체 물성치와 실험 변수에 따른 분무 및 미립화에 관한 실험을 진행하였다. 이에 따라 분무 패턴, 콘-제트 모드 인가 범위, 평균 액적 크기를 파악하였으며, 유체 물성치 및 실험 변수에 따라 정전분무 및 미립화 특성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

(1) 인가전압에 따른 정전분무의 6가지 형태의 분무 패턴을 확인하였으며, Taylor⁽⁴⁾가 주장한 반각 약 49.3°를 나타내는 안정된 콘-제트 모드를 확인하였다.

(2) 노즐 직경, NTS, 점도 증가에 따라 콘-제트 모드가 구현되는 인가전압이 지연되는 것을 확인 했으며, 유체 물성치와 실험 변수에 따라 안정된 콘-제트 모드 구현 조건이 달라질 수 있다.

(3) S, V1, C1 용액조건에서 유량 증가에 따라 평균 액적 크기가 선형적으로 증가함을 확인하였다. 또한, 유체 물성치에 따라 동일 유량 조건에서 S와 C1 용액에 따른 평균 액적 크기 차이(약 8.87%)는 유체 점도에 의한 영향 때문이며, S와 V1 용액에 따른 평균 액적 크기 차이(약 18.2%)는 유체 전기전도도에 의한 영향으로 판단된다.

참고문헌

- (1) F. Sultan, N. Ashgriz, D. R. Guildenbecher and P. E. Sojka, "Handbook of atomization and sprays: Electro-sprays", Springer, 2010.
- (2) I. Marginean, "From chaotic cone pulsation to ion evaporation in electro-sprays", The George Washington University, 2006.
- (3) 이상용, 액체의 미립화, 민음사, 1996.
- (4) G. Taylor, "Disintegration of water drops in an electric field", Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1964, pp. 383~397.
- (5) 김경태, 김우진, 김상수, "고유량 정전분무를 위한 다중 흡노즐 특성 연구", 대한기계학회 논문집 B권 제31권 10호, 2007, pp. 848~854.
- (6) R. P. A. Hartman, D. J. Brunner, D. M. A. Camelot, J. C. M. Marijnissen and B. Scarlett, "Electrohydrodynamic atomization in the cone-jet mode physical modeling of the liquid cone and jet", Journal of Aerosol Science, 1999, pp. 823~849.
- (7) M. Gamero-Castano and V. Hruby, "Electrospray as a source of nanoparticles for efficient colloid thrusters", 2001, Journal of Propulsion and Power, pp. 977~987.
- (8) Y. Wu, J. A. Mackay, J. R. McDaniel, A. Chilkoti and R. L. Clark, "Fabrication of elastin-like polypeptide nanoparticles for drug delivery by electro-spraying", Biomacromolecules, 2009, pp. 19~24.
- (9) A. Jaworek and A. T. Sobczyk, "Electrospraying route to nanotechnology: An overview", Journal of Electrostatics, 2007, pp. 197~219.
- (10) J. F. de la Mora and I. G. Loscertales, "The current emitted by highly conducting Taylor Cones", Journal of Fluid Mechanics, 1994, pp. 155~184.
- (11) R. P. A. Hartman, D. J. Brunner, D. M. A. Camelot, J. C. M. Mariginissen and B. Scarlet, "Jet break-up in electrohydrodynamic atomization in the cone-jet mode", Journal of Aerosol Science, 2000, pp. 65~95.
- (12) B. K. Ku and S. S. Kim, "Electrospray characteristics of highly viscous liquids", Journal of Aerosol Science, 2002, pp. 1361~1378.
- (13) K. Tang, "The electro-spray: Fundamentals and feasibility of its application to targeted drug delivery by inhalation", Yale University, 1994.
- (14) 구본기, 김상수, "정전분무에 의한 고점성 액체의 액적 생성 특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집 B권 제26권 4호, 2002, pp. 604~613.
- (15) J. Rosell-Llompart and J. F. de la Mora, "Generation of monodisperse droplets 0.3 to 4 um in diameter from electrified cone-jets of highly conducting and viscous liquids", Journal of Aerosol Science, 1994, pp. 1093~1119.
- (16) 구본기, 김상수, 김유동, 이상용, "냉각법 및 영상 처리기법을 이용한 서브마이크론 정전분무 액적의 크기 분포 측정", 대한기계학회논문집 B권 제25권 10호, 2001, pp. 1400~1407.
- (17) D. P. H. Smith, "The electrohydrodynamic atomiza-

- tion of liquids”, IEEE Transactions on Industry Applications, 1986, pp. 527~535.
- (18) 박인용, “물의 정전분무에 관한 실험적 연구: 분무 불안정과 액적 분열 특성”, 한국과학기술원, 2015.
- (19) 구건우, 홍정구, 박철우, 이충원, “원형 및 타원형 노즐 내부유동과 외부유동의 상관관계”, 대한기계학회 논문집 B권 제36권, 3호, 2012, pp. 325~333.
- (20) 윤현진, 홍정구, 구건우, 석지권, 정경열, “이유체 노즐 미립화 특성이 요소 열분해에 미치는 영향”, 한국액체미립화학회지 제20권 3호, 2015, pp. 162~167.
- (21) M. Cloupeau and B. Prunet-Foch, “Electrohydrodynamic spraying functioning modes: A critical review”, Journal of Aerosol Science, 1994, pp. 1021~1036.
- (22) A. Y. Lee, H. W. Jin, H. W. Dang, K. H. Choi and K. H. Ahn, “Optimization of experimental parameters to determine the jetting regimes in electrohydrodynamic printing”, Langmuir, 2013, pp. 13630~13639.