

핀-핀 형 전극의 전기-수력학 프린팅에서 전극 직경이 미세 세라믹 패턴 형성에 미치는 영향

Effect of Electrode Diameter on Fine Ceramic Pattern Formed by Using Pin-To-Pin Type Electro-Hydrodynamic Printing

이대영[†], 유재훈^{**}, 류태우^{***}, 황정호^{*}, 김용준^{*}

Dae-Young Lee, Jae-Hun Yu, Tae-U Yu, Jungho Hwang, and Yong-Jun Kim

ABSTRACT

The generation of fine relics of suspensions is a significant interest as it holds the key to the fabrication of electronic devices. These processes offer opportunities for miniaturization of multilayer circuits, for production of functionally graded materials, ordered composites and for small complex-shaped components. Some novel printing methods of depositing ceramic and metal droplets were suggested in recent years. In an electro-hydrodynamic printing, the metallic capillary nozzle can be raised to several kilovolts with respect to the infinite ground plate or pin-type electrode positioned a few millimeters from the nozzle tip. Depending on the electrical and physical properties of the liquid, for a given geometry, it is possible to generate droplets in any one of three modes, dripping, cone-jet and multi-jet. In this experiment, an alumina suspension flowing through a nozzle was subjected to electro-hydrodynamic printing using pin-type electrodes in the cone-jet mode at different applied voltages. The pin-type electrodes of 1, 100, 1000 μm in diameter were used to form fine ceramic patterns onto the substrates. Various feature sizes with applied voltages and electrode diameters were measured. The feature sizes increased with the electrode diameter and applied voltages. The feature size was as fine as 30 μm .

Key Words : Electro-hydrodynamic printing, direct write technology, cone-jet mode, fine ceramic line

1. 서론

전기-수력학(electro-hydrodynamic)분무는 기존의 분무 방식에 비해 미세한 액적의 분무가 가능하고 단분산으로 이루어진 입자 분무가 가능하며 표면 부착성이 우수한 분무방식이다.[1]

전기-수력학 분무방식은 고전압을 전도성 모세관에 인가하여 대상 유체가 접지판으로 분무 되는 일련의 과정을 의미한다. Fig. 1 은 전위차 또는 전기장 하에서 유량의 변화에 의해 발생하는 여러 가지 모드를 보여준다.

전기장이 없는 경우(상태 ①) 노즐 출구의 궤면적(meniscus)에서는 정수력학적인 힘과 모세관 힘의 평형이 형성되지만 전기장이 있는 경우(상태 ②)는 궤면상의 표면 전하에 의한 정전기적 힘이 추가된다.

상태 ③은 상당히 안정된 상태로 원뿔형 액주모드 (cone-jet mode)라 불린다. 이 모드에서는 노즐 근처에서 유체가 원뿔모양을 형성하며 바로 밑으로는 intact jet이라 불리는 미세한 액주가 발생하게 된다. 이 모드는 다른 모드에 비해 액주에 의해 발생되는 액적의 크기 분포가 단분산(monodisperse)에 가까운 분무를 한다. 상태 ④는 불안정 원뿔형 액주모드로 외부 전기장 또는 공급 유량의 불안정성으로 발생하게 된다. 상태 ⑤는 매우 높은 전압 상태에서 발생하는 모드로 노즐 부근에서 원뿔형태가 없어지고 분무 물질이 여러 개의 액주로 나누어져 분무된다.[2]

[†] 연세대학교 대학원 기계공학과
E-mail : bigglory@yonsei.ac.kr

^{*} 연세대학교 기계공학부

^{**} 연세대학교 대학원 기계공학과

^{***} 한국생산기술연구원

(논문접수일 : 2005년 3월30일)

기존의 미세한 액적을 얻기 위한 노즐의 경우 수력학적인 힘만을 고려할 경우 노즐의 크기가 액적의 크기에 미치는 영향이 절대적이며 발생하는 액적의 크기는 노즐 크기의 약 2 배 정도로 형성 된다.[3] 따라서 미세한 액적을 분무하기 위해서는 노즐의 크기가 그 만큼 작아져야 한다. 하지만 너무 작은 크기를 가진 노즐을 이용할 경우 노즐 출구에서 노즐 막힘 현상이 발생할 수 있다. 하지만 전기-수력학 분무방식을 이용한 프린팅의 경우 전기적인 힘을 추가로 이용하기 때문에 상대적으로 큰 입径의 노즐을 이용해 미세한 액적을 얻을 수 있으며 균일한 크기의 액적을 얻을 수 있다.[4,5] 최근에 직접 쓰기 기술(direct write technology)에 대한 관심이 증가하고 있다. 직접 쓰기 기술은 기존의 PCB(printed circuit boards), LCD(liquid crystal display), PDP(plasma display panel)등의 제작에 쓰이는 공정기술을 대체 하자는 것으로 기존 기술에 비해 공정시간과 경비를 절감 할 수 있으며 친 환경적이다. 이를 충족시키기 위해서는 현재의 100 μm 정도의 선폭(feature size) 보다 작은 50 μm 이하 선폭을 구현하는 패턴기술이 필요하다.[6]

본 연구에서는 기존 전기-수력학(electrohydrodynamic)방식을 이용해 직접 쓰기 기술 적용을 시도하였다. 이와 관련된 연구로 Jayasinghe 등[4,5]은 점성이 높은 알루미늄 혼합물을 전기-수력학적인 방법으로 분무하였으며 원뿔형 액주모드를 구현하였다. 또한 물질의 점성이 분무되는 액적의 크기에 미치는 영향 등을 실험으로 보여주었다. Poon[7]은 전기-수력학분무를 이용해 미세한 패턴을 얻고자 물질의 점도를 변화시키며 실험을 실시하였으며 점도의 증가가 cone-jet

모드의 안정성에 기여 한다는 것을 보여주었다. Teng 등[8]은 지르코니아(ZrO_2) 입자들을 전기-수력학 분무를 이용해 분사하였으며 분사한 결과 3 μm 의 액적을 구현하였으며 표면에 부착시켜 얻은 잔재(relics) 지르코니아는 약 10 μm 크기였다.

Lee 등[9]은 전기-수력학적인 방식으로 원뿔형 액주모드를 발생시키고 세라믹 혼합물을 이용해 표면에 패턴링을 하였으며 표면에 수백 μm 의 선폭을 가지는 세라믹 라인을 구현하였다.

기존 연구는 전기-수력학 분무에서 원뿔형 액주모드를 구현하고 여기서 발생하는 잔재 물질 또는 액적의 크기를 측정하는 것이 대부분이었다. 또한 원뿔형 액주모드를 이용해 프린팅을 시도하였지만 수백 μm 의 선폭을 구현하는데 그쳤다.[4,9] 따라서 기존의 프린팅 방식을 대체하는 데는 한계가 있다. 또한 원뿔형 액주모드를 구현하는데 적게는 5 kV에서 최대 20 kV 정도의 전압을 공급해 얻을 수 있었으며 높은 고전압의 필요성은 전기-수력학 프린팅의 적용 가능성을 낮게 한다. 본 연구에서는 50 μm 이하의 선폭을 구현하고 낮은 전압에서 패턴을 구현하기 위해 핀대핀형의 전기-수력학 분무방식에서 1, 100, 1000 μm 직경의 집지전극을 이용해 패턴을 구현하였다.

2. 실험

본 연구에서는 전기-수력학 방식을 이용해 세라믹 물질을 패턴하기 위해 Fig.와 같이 실험 장치를 구성하였다. 본 실험의 모든 환경은 Class 100(0.5 μm 기준)의 청정공간(cleanbooth)에서 이루어 졌다. 장치는 크게 액체 공급 장치, CCD 카메라를 포함한 가시화 장치, 전기를 공급하는 전기 공급장치, 원하는 패턴대로 기관(acetate sheet)을 이송시키는 정밀이동장치로 구성된다.

전기-수력학 프린팅을 위한 노즐은 스테인레스 재질(내경: 0.92mm, 외경: 1.28mm)이고 집지전극은 텅스텐 재질로(직경: 1, 100, 1000 μm) 노즐로부터 2.7mm 아래에 고정시켰다. 노즐과 전극은 15kV 까지 공급할 수 있는 전기 공급 장치와 연결된다.

분무과정은 고배율렌즈(zoom 6000, Navitar)가

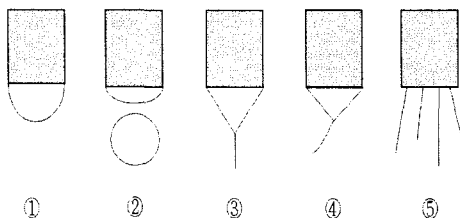


Fig. 1 ①No dripping, ②dripping, ③cone-jet, ④unstable cone-jet, ⑤multi jet (unstable)

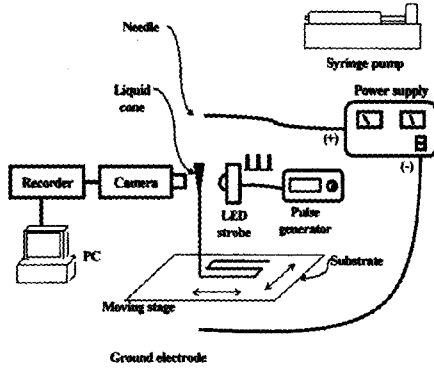


Fig. 2 Experimental set-up

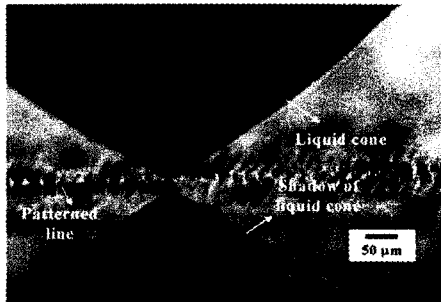


Fig. 3 Typical cone-jet mode of electro-hydrodynamic printing

장착된 CCD 카메라(marlin F-033B, Allied)와 펄스발생기(pulse generator 9600, Quantum)와 연결되어 있는 백색 LED를 이용해 모니터링하였다.

본 실험에서는 세라믹 물질을 분무하기 위해 알루미늄인크를 사용했다. 알루미늄인크는 알루미늄(20 wt%, ~ 50nm, Allied)와 물(78wt%) 그리고 분산제(2wt%)를 섞은 물질을 비드 밀 테이블(bead mill table)을 이용해 24 시간 동안 혼합하여 만들었다. 용기 내 물질들을 혼합하기 위해 비드(bead)가 사용되었으며 비드는 지르코니아 재질로 3 mm 크기다.

혼합된 알루미늄 인크의 물성치들은 Table 1에 나타나 있고, 이들은 다양한 측정 장비들을 이용해 측정하였다. [9]

최종적으로 완성된 알루미늄 인크는 실린지 펌프(kds-100, KD Scientific Inc.)를 이용해 일정한 유량으로 노즐에 공급하였다.

Table 1 Properties of the alumina ink

Density Kg/m ³	Viscosity mPa s	Surface tension mN/m	Electrical conductivity S/m	Relative Permittivity
640	123	0.049	1.85x10 ⁻³	54

원하는 패턴대로 기판(acetate sheet)을 이동시키는 정밀이동장치는 선형 모터와 x-y 두 축 그리고 이동 제어기(controller)로 구성되어 있다.

전기-수력학 프린팅 방식을 이용하여 표면에 미세 세라믹 패턴을 구현 하기 위해 실험은 다음과 같이 진행되었다.

먼저 알루미늄인크를 실린지 펌프를 이용해 일정하게 노즐로 공급한 후 노즐과 접지전극에 전압을 공급하여 노즐에 원뿔형 액주모드를 구현한다. 그리고 정밀 이동장치를 이용해 기판을 300mm/min의 속도로 이동시켜 Fig. 3 과 같이 1 차원 선을 구현한다.

선이 구현되면 멀티젯 모드가 발생할 때까지 0.5kV 씩 전압을 증가시켜 패턴을 계속한다. 그리고 전압 증가에 의한 선폭 변화를 측정한다. 이와 같은 실험을 접지전극 직경이 1, 100, 1000μm 일 때 각각 반복한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 원뿔형 액주모드의 액주지름

전기-수력학 분무에서 원뿔형 액주모드는 노즐과 노즐사이에 전압을 공급했을 때 노즐 부근에서 공급 되던 유체가 원뿔형의 모양을 형성하고 미세한 액주(intact jet)가 발생하는 것을 말한다. 전기-수력학 분무의 원뿔형 액주모드에서 액주지름은 공급 전압과 유량에 의해 영향을 받으며 Canan-Calvo 등 [10]은 공급전압보다 유량이 액주에 미치는 영향이 더 크다고 주장하였고 액주지름(dj)을 식(1)과 같은 식으로 예측할 수 있다고 하였다.

$$d_j = 2 \times 0.6\pi^{(-2/3)} \times Q^{(1/2)} \left[\frac{\rho \epsilon_0}{\gamma K} \right]^{1/6} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, ϵ_0 는 진공에서의 유전율.

γ 는 표면 장력, K 는 물질의 전기전도도, Q 는 물질의 공급 유량이다. 한편 Hartman 등 [11]은 이론적으로 액주지름을 예측할 수 있는 식을 제시하고 실험적으로 유량과 액적 크기 및 액주지름과의 관계를 조사하였는데, 그 크기식은 식(2)와 같다.

또한 de la Mora 와 Loscertales[12]은 분무하고자 하는 유체의 전기전도도가 높은 경우 ($K > 10^{-5}S/m$) 액주지름을 식 (3)과 같이 예측할 수 있다고 하였다.

여기서 ϵ 는 비유전율이다. 식(1,2,3)을 통해 계산된 액주지름을 Fig. 4 에 나타냈다. 예측된 값들을 보면 유량이 감소하면 발생하는 액주의 지름이 작아진다는 것과 각각 식에 의한 예측값이 2 배 정도 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 유량 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ 일 때 3.5 μm 미만의 액주를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

$$d_j \sim \frac{(\rho\epsilon_0 Q^3 / \gamma K)^{1/6}}{1.89} \quad (2)$$

$$d_j \sim \left(\frac{\epsilon\epsilon_0 Q}{K} \right)^{1/3} \quad (3)$$

발생되는 액주의 지름이 작아진다는 것과 각각 식에 의한 예측값이 2 배 정도 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 유량 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ 일 때 3.5 μm 미만의 액주를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.2 전기장 해석 및 결과

전기장의 해석은 접지전극의 직경 변화에 의한 전기장 변화를 예측하기 위해 행해졌다.

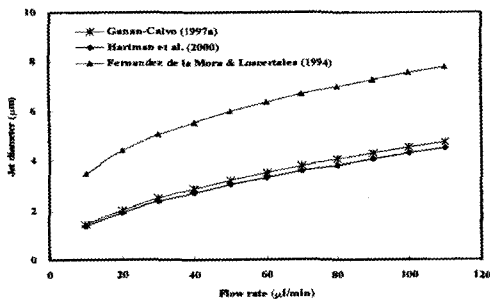


Fig. 4 Jet diameter calculated from material properties

이를 위해 포아송 공식 (Poisson's equation) (식(4))을 이용해 전기장을 계산하였다.

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla V) = -\rho \quad (4)$$

식(4)에서 ρ 는 체적 전하 밀도(volume charge density)이다. 본 계산에서는 기관 위에 위치한 노즐을 내경이 존재하지 않는 지름 0.92mm 의 막대로 가정하였고, 접지전극직경은 각각 1, 100, 1000 μm 로 계산하였으며 노즐과 전극의 길이를 모두 1 mm 로 하였고 실험과 같은 재질로 계산하였다. 노즐과 기관 그리고 기관과 접지전극의 간격은 실험 조건과 같다. 노즐과 접지전극 사이에 위치한 기관은 가로 x 세로 x 두께가 각각 60x80x0.1mm 이다. 계산은 유한 요소법(finite element method)을 기본으로 한 상용 Maxwell 프로그램(Ansoft Corporation)을 사용하였다. 전기장 계산을 위해 노즐과 접지전극 사이에 3kV 의 전압을 공급한 조건에서 계산을 하였다.

Fig. 5 는 접지전극 직경이 각각 1, 100, 1000 μm 일 때 기관 위 노즐의 끝(tip)에서 원주방향으로 전기장을 나타낸다.

결과를 보면 전체적으로 노즐로부터 거리가 멀어질수록 전기장의 강도가 낮아지는 것을 알 수 있다.

그리고 접지전극의 직경이 클 때 노즐 끝에 부과되는 전기장의 강도가 증가하며 이 경향은 노즐로부터 거리가 멀어져도 유지됨을 알 수 있다.

노즐 끝 전기장을 비교해 보면 접지전극이 1 μm 일 때 1.67x10⁶ V/m, 100 μm 일 때 2.45x10⁶ V/m, 1000 μm 일 때 2.91x10⁶ V/m 로 접지전극의 직경이 증가함 따라 노즐 끝 전기장 강도가 증가하며 증가율이 가장 낮은 1 μm 일 때를 시작으로 각각 46 %, 19 % 씩 증가했음을 알 수 있다.

Fig. 6 은 접지전극 직경이 각각 1, 100, 1000 μm 일때 접지전극의 끝(tip)에서 원주방향으로 전기장 강도를 나타낸다. 결과를 보면 약 0.5mm 까지는 노즐 부근의 결과처럼 접지전극의 지름이 크면 접지전극에 부과되는 전기장의 강도가 증가하는 경향을 나타낸다. 하지만 접지 전극 부근에서는 노즐의 경향과 달리 작은 직경의 접지전극에서 큰 전기장이 부과된다.

접지전극 끝에 부과되는 전기장 강도를 접지전극 지름에 따라 비교해보면 Fig. 5의 경향과 달리 전기장 강도가 1 μm 일 때 $9.52 \times 10^8 \text{ V/m}$, 100 μm 일 때 $3.23 \times 10^7 \text{ V/m}$, 1000 μm 일 때 $4.05 \times 10^6 \text{ V/m}$ 로 접지전극의 직경이 작아짐에 따라 매우 크게 증가한다는 것을 알 수 있으며 증가율이 가장 낮은 1000 μm 일 때를 시작으로 각각 697%, 2847% 씩 증가했다. 이는 노즐 부근의 전기장 강도 변화율에 비해 매우 큰 것이다. 결과를 종합해 보면 접지전극의 직경이 작으면 접지전극 끝에 부과되는 전기장의 강도를 크게 증가시킬 수 있고 원주방향 전기장 강도는 낮출 수 있다.

3.3 전기-수력학 프린팅을 이용한 패턴

전기-수력학 분무의 원뿔형 액주모드를 이용한 패턴을 하기 위해 물질의 공급 유량을 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ 로 고정하였다.

본 실험에서는 원뿔형 액주모드를 1, 100, 1000 μm 의 접지전극 하에서 구현하였고 발생하는 인젝션을 이용해 표면에 Fig. 7과 같은 1차원 패턴을 하였다.

일정한 전압에서 표면에 패턴이 구현되면 0.5Kv 씩 공급전압을 증가시키고 멀티젯 모드가 발생할 때까지 패턴을 실시하였다. 모든 실험은 3 번 실시하였으며 평균값들의 추세를 추세선으로 값들의 오차를 오차막대(error bar)로 나타냈다.

Fig. 8(a)는 1 μm 의 접지전극을 이용해 표면에 패턴한 선의 선폭을 분석한 것이다. 추세선을 기준으로 20 ~ 50 μm 대의 선폭이 구현됐음을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 100 μm 의 접지전극을 이용해 패턴한 결과로 40 ~ 80 μm 대의 선폭이 구현됐음을 알 수 있으며 Fig.8(c)는 1000 μm 접지전극을 이용해 패턴한 결과로 50 ~ 70 μm 대의 선폭이 구현됐음을 알 수 있다.

전체적으로 전압의 증가에 의해 선폭이 증가하는 경향을 보였으나 1000 μm 접지전극의 경우 선폭의 증가율이 다른 전극의 결과에 비해 낮았다. Fig. 9는 표면에 패턴이 발생하기 시작하는 시점의 전압(threshold voltage)을 접지전극의 크기별로 비교한 것으로 1 μm 접지전극을 사용했을 때 가장 낮은 전압(2Kv)에서 패턴이 발생했음을 알 수 있다. 그리고 패턴이 발생하는 전압은 접지전극의

지름이 클수록 높아졌다. 이는 접지전극이 작아지면 접지전극에 높은 전기장이 형성되는 것에 기인되는 것이라 생각된다.

Fig.10은 선폭의 표준편차를 접지전극의 크기 별로 나타낸 것으로 전극의 지름이 작을수록 낮은 표준편차를 보였으며 1 μm 일 때 가장 낮았다. 이는 접지전극의 지름이 1 μm 일 때 선폭이 가장 균일하게 패턴 되었음을 말한다.

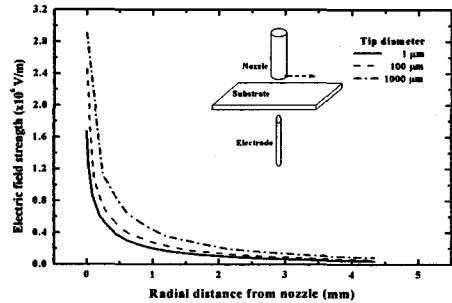


Fig. 5 Radial direction electric field from nozzle tip with applied voltage of 3 Kv

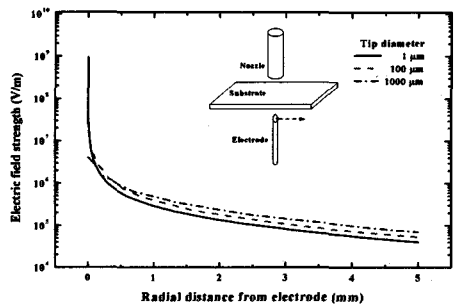


Fig. 6 Radial direction electric field from electrode tip with applied voltage of 3 Kv

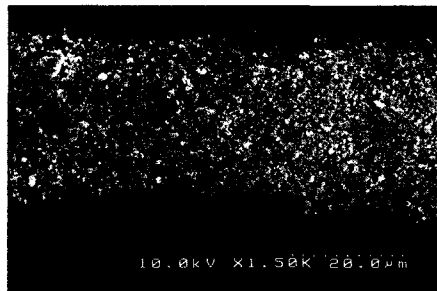
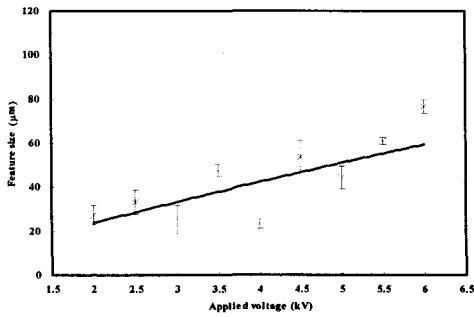
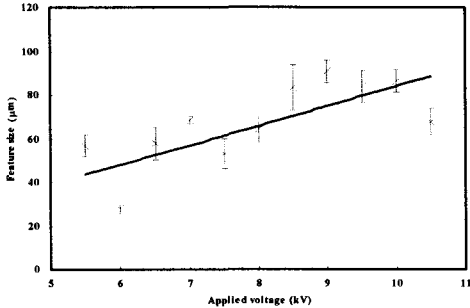


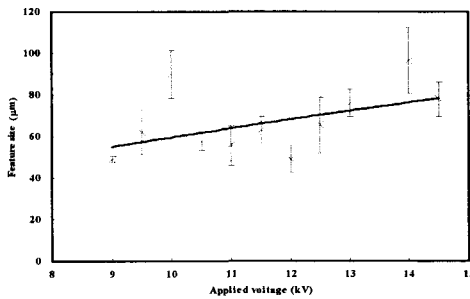
Fig. 7 Magnified image of ceramic line



(a) 1 μm electrode



(b) 100 μm electrode



(c) 1000 μm electrode

Fig. 8 Feature sizes with applied voltages at various electrode diameters

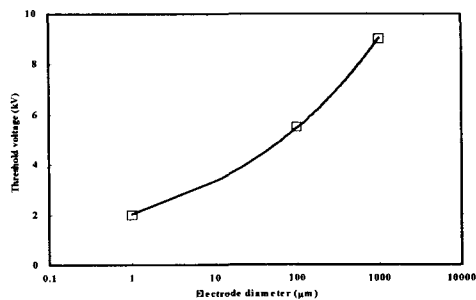


Fig. 9 Threshold voltages to form pattern with electrode diameters

전기-수력학 분무과정 중에 하나인 원뿔형 액주모드는 마이크로 크기의 매우 작은 액주를 발생시킨다. 따라서 미세한 액주를 이용해 50μm 미만의 선폭을 가지는 패턴을 표면에 구현 할 수 있다. 하지만 액주는 주변 전기장에 의해 큰 영향을 받으며 특히 원주 방향 전기장의 강도는 표면 부근에서 액주분열(break-up)을 발생시킨다. 따라서 수백 마이크로m의 선폭을 가진 패턴이 발생하게 된다.[4,9] 최적의 패턴을 구현하기 위해 액주분열현상을 저감 시켜야 한다.

식(5)은 표면에 부착된 패턴 크기를 이용해 액주지름을 예측할 수 있는 식이다.[13]

$$d_j = 0.48d_r \left(\frac{1}{4 \sin \theta} - \frac{1}{24 \sin^3 \theta} \right)^{1/3} \quad (5)$$

여기서 d_r 은 패턴된 날알(relic)의 크기 또는 패턴된 선폭, θ 는 표면에서의 접촉각(contact angle)이다. 본 실험에서 사용된 물질의 접촉각은 아세테이트 표면에서 약 35°이다. 본 식은 실험 결과인 패턴된 선폭을 이용해 액주지름을 유추하므로 식을 이용해 계산된 결과를 식(1,2,3)의 결과와 비교하면 실험을 통해 발생된 원뿔형 액주분열 정도를 판단할 수 있다.

본 실험에서 패턴된 선의 선폭 분석결과 (Fig. 8(a) 2 kV, 접지전극 1 μm의 경우)와 식(5)를 이용하여 유추한 액주지름(jet diameter)은 약 7 μm이다. 이는 Fig. 4에서 공급유량

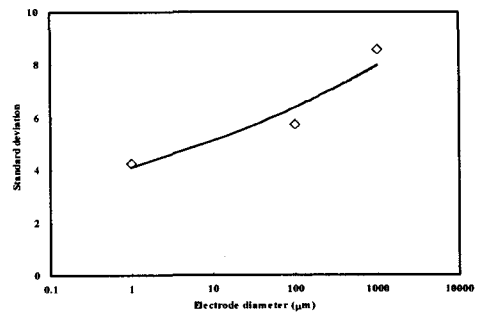


Fig. 10 Standard deviations of feature sizes with electrode diameters

10 μ m/mi 일 경우 이론적으로 예측된 3.5 μ m 미만에 2 배 정도 차이가 있는 값이다. 이 결과는 기존의 연구결과(약 7 배) [9]와 비교했을 때 3 배 이상 액주분열현상을 줄인 것이다.

4. 결론

본 실험에서는 세라믹 물질을 전기-수력학 분무방식을 이용하여 프린팅하였다. 이를 위해 핀대핀 방식의 전기-수력학 분무에서 1, 100, 1000 μ m 크기의 접지전극을 이용해 미세 패턴을 구현 하였다.

1. 전기 수력학 분무를 통해 30 μ m 선폭의 알루미늄 패턴을 아세테이트 표면에 구현하였다.

2. 접지전극 직경 변화에 의한 전기장 강도를 해석하였다. 노즐 부근의 경우 팁 부분과 원주방향 모두 접지전극 직경이 증가함에 따라 전기장 강도가 증가하였다. 하지만 접지전극의 경우 원주 방향에 비해 팁 부분의 전기장 강도 차이가 매우 컸으며 노즐 팁 부분과 달리 접지 전극 직경이 작을수록 전기장의 강도가 증가하였다.

3. 직경 1 μ m 의 접지전극을 사용하여 패턴을 한 경우 패턴의 표준편차가 가장 낮았으며 이는 가장 높았던 1000 μ m 보다 2 배 정도 낮았다. 그리고 패턴이 되기 시작하는 공급전압 또한 2 kV 로 1000 μ m 때 9kV 보다 4 배 이상 낮았다. 따라서 낮은 공급 전압에서 패턴의 균일도를 증가시키기 위해서는 접지전극의 직경을 줄이는 것이 효과적이다.

4. 물질의 조성만으로 예측한 액주지름은 3.5 μ m 미만이다. 본 실험에서 1 μ m 접지전극을 이용해 얻은 패턴으로 유추한 액주지름은 약 7 μ m 로 약 2 배 정도의 분열이 있었음을 알 수 있었으며 기존의 연구결과에 비해 3 배 정도 액주분열현상을 감소시킬 수 있었다. 따라서 접지전극의 직경을 줄이면 분열 현상을 감소시키는데 유리하다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 내부과제의 지원을 받아 진행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Ragucci, R., Fabiani, F., Cavaliere, A., Muscetta,

P., and Noviello, C., 2000, "Characterization of Stability Regimes of Electrohydrodynamically Enhanced Atomization," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 21, pp.156-161.

[2] Lee, J. B. and Hwang, J., 1999, "Electrohydrodynamic Characteristic of an Electro-Spray System," *Trans. of the KSME B*, Vol.23, No.8, pp.1031-1039.

[3] Lefebvre, A. H., 1989, "Atomization and Sprays," Hemisphere Publishing Corporation, Chap.2, pp.37-39.

[4] Jayasinghe, S. N., Edirisinghe, M. J., and Wilde, T. D., 2002, "A Novel Ceramic Printing Technique Based on Electrostatic Atomization of a Suspension," *Material Research Innovation*, Vol.6, pp.92-95.

[5] Jayasinghe, S. N. and Edirisinghe, M. J., 2002, "Effect of Viscosity on the Size of Relics Produced by Electrostatic Atomization," *J. Aerosol Science*, Vol.33, pp.1379-1388.

[6] Pique, A. and Chrisey, D. B., 2002, "Direct Write Technologies for Rapid Prototyping Applications," Academic press, San Diego.

[7] Poon, H. F., 2002, "Electrohydrodynamic Printing," Ph. D. Thesis, Dept. Chem. Eng., Princeton Univ.

[8] Teng, W. D., Huneiti, Z. A., Machowski, W., Evans, J. R. G., and Edirisinghe, M. J., 1997, "Towards Particle-by-Particle Deposition of Ceramics using Electrostatic Atomization," *J. Materials Science Letters*, Vol.16, pp.1017-1019.

[9] Lee, D. Y., Kim, S. Y., Yu, T. U., Hwang, J., and Kim, Y. J., 2005, "Study of Ceramic Sub-Micron Particle Patterning by Electro-Hydrodynamic Printing," *Trans. of the KSME B*, Vol.29, No.4, pp.504-511.

[10] Ganan-Calvo, A. M., 1997a, "Cone-Jet Analytical Extension of Taylor's Electrostatic Solution and the Aysmptotic Universal Scaling Laws in Electrospraying," *Phy. Rev. Lett.*, Vol.79, pp. 217-220.

[11] Hartman, R. P. A., Brunner, D. J., Camelot, D. M. A., Marjijnissen, J. C. M., and Scarlett, B., 2000, "Jet Break-Up in Electrohydrodynamic Atomization in the Cone-Jet Mode," *J. Aerosol Science*, Vol.31, pp.65-95.

[12] Fernandez De La Mora, J., and Loscertales, I. G., 1994, "The Current Emitted by Highly Conducting Taylor Cones," *J. Fluid Mechanics*, Vol.260, pp.155-184.

[13] Jayasinghe, S. N. and Edirisinghe, M. J., 2002, "Obtaining Fine Droplet Relics by Electrostatic Atomization of Viscous Liquids," *J. Materials Science Letters*, Vol.21, pp.371-373.