

< 논문 >

전기-수력학 프린팅을 이용한 세라믹 미세입자 패턴에 관한 연구

이대영* · 김상윤* · 류태우** · 황정호† · 김용준***
(2004년 12월 3일 접수, 2005년 3월 11일 심사완료)

Study of Ceramic Sub-Micron Particle Patterning by Electro-Hydrodynamic Printing

Dae-Young Lee, Sang-Yoon Kim, Tae-U Yu, Jungho Hwang and Yong-Jun Kim

Key Words : Electro-Hydrodynamic Printing (전기-수력학 프린팅), Direct Write Technology (직접 쓰기 기술), Pattern (패턴), Ceramic Sub-Micron Particle (세라믹 서브 마이크론 입자)

Abstract

The generation of fine relics of inorganic and metallic materials from precursor suspensions is of significant current interest as it holds the key to the fabrication of display and printed circuit board. Some novel printing methods depositing ceramic particles have been suggested in recent years. When a conducting liquid is supplied to a capillary nozzle at a low flow rate and when the interface between air and the liquid is charged to a sufficiently high electrical potential, the liquid meniscus takes the form of a stable cone, whose apex emits a microscopic jet. This is called as a cone-jet mode. In our experiments, an alumina particles flowing through a nozzle were subjected to electro-hydrodynamic printing in the cone-jet mode. The pattern of 'YONSEI' characters was tested at 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ of alumina ink flow rate and different applied voltages. At an applied voltage of 6 kV, feature size was in the range of 250 μm .

1. 서론

더 작고, 얇고, 가벼우면서도 그 기능은 극대화할 수 있는 제품의 구현은 21세기 첨단 전자산업의 가장 중요한 과제라 할 수 있다. 예를 들어 전자제품의 메모리, CPU와 같은 소자들이 점점 소형화, 고집적화에 따라 이들 소자의 재료가 되는 각종 전자 칩 그리고 칩들을 실장하는 PCB(printed circuit board)가 최근에 작고 얇아 지고 있다. 따라서 미래의 다기능 고속 정보기기를 위한 PCB 및 전자칩들은 지금보다 훨씬 작은 최소 선폭을 요구한다. 데이터의 출력자체가 더욱 빠르고 많아

지는 현대의 기기들은 훨씬 높은 연결밀도(interconnection density)를 요구하게 되고, 이를 충족시키기 위해서는 현재의 100 μm 정도의 선폭(feature size) 보다 작은 50 μm 이하의 최소 선폭이 필요하게 된다.⁽¹⁾ 현재 PCB, LCD(liquid crystal display), PDP(plasma display panel) 등의 제작에 쓰이는 후막 공정(thick film process)은 최소선폭 구현, 정밀도, 생산을 측면에서 많은 한계가 존재해 이를 대체할 패턴 기술이 필요하게 되었다. 기존 반도체 공정에 쓰이는 박막공정(thin film process)이 가능하지만 이 기술은 마스크(mask)제작, 감광액(photo resist) 도포, 노광(exposure), 현상(development), 식각(etching) 등과 같은 여러 공정을 거치고 값비싼 장비를 사용해야 한다는 문제점을 안고 있으며 LCD, PDP 제작 공정에서 필요로 하게 되는 대면적화에는 기술적 어려움이 존재한다.⁽²⁾

* 연세대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

** 회원, 한국생산기술연구원

*** 회원, 연세대학교 기계공학부

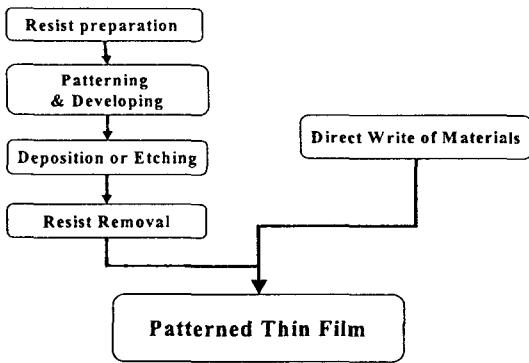


Fig. 1 Direct write and lithography technology

따라서 최소 선폭을 지금보다 훨씬 줄이면서도 대면적화가 가능한 패턴 기술이 반드시 개발되어야 한다.

최근에 이와 관련된 기술과 관련해 많은 제안이 있었으며 직접 쓰기 기술(direct write technology)에 대한 관심이 증가하고 있다. Fig. 1과 같이 리소그래피 기술(lithography technology)이 여러 공정을 거쳐 표면에 패턴을 구현하는 반면 직접 쓰기 기술은 노즐을 통해 분무된 입자들을 기판에 직접 부착시켜 표면에 패턴을 구현하는 기술이다. 따라서 기존의 기술에 비해 시간과 경비를 절약할 수 있으며 표면 처리를 위한 화학제를 사용하지 않으므로 친 환경적이라 할 수 있다. 또한 분무를 통해 패턴을 얻기 때문에 반도체 공정과 달리 3차원적인 구조를 가진 물질의 형상을 만드는 데 유리해 최근에는 입의 형상 제작시스템(solid freeform fabrication system)에 이 기술을 적용하려는 연구가 활발하다.^(2,3)

직접 쓰기 기술은 다양한 방법으로 적용이 시도되고 있으며 디스플레이, 바이오, PCB 등의 분야에 적용 가능성에 대한 연구가 진행중이다.⁽²⁾ 본 연구에서는 기존의 전기-수력학(electro-hydrodynamic) 방식을 이용해 패턴을 시도해 보았다. 전기-수력학 방식은 기존의 분무 방식에 비해 미세한 액적의 분무가 가능하고 단분산으로 이루어진 입자 분무가 가능하며 표면 부착성이 우수한 분무 방식이다.⁽⁴⁾ 전기-수력학 분무방식은 고전압을 전도성 모세관에 인가하여 대상 유체가 접지판으로 분무되는 일련의 과정을 의미한다. 즉 전기-수력학 분무란 액체의 전도성을 이용하여 단극성 대전 액체를 만들고 전위차에 의해 형성된 전기장에 의해 분무되는 원리이다. Fig. 2는 전위차 또는 전기장 하에서 유량의 변화에 의해 발생하는 여러 가지 모드를 보여준다. 전기장이 없는 경우(상태 ①) 노즐

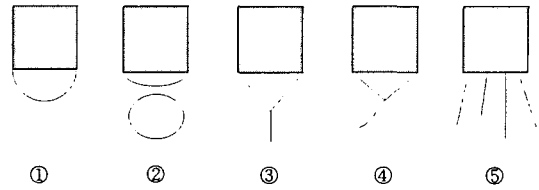


Fig. 2 ①No dripping, ②dripping, ③cone-jet, ④unstable cone-jet, ⑤multi jet (unstable)

출구의 케면적(meniscus)에서는 정수력학적인 힘과 모세관 힘의 평형이 형성되지만 전기장이 있는 경우(상태 ②)는 케면상의 표면 전하에 의한 정전기적 힘이 추가된다. 이러한 케면 상의 안정된 힘의 평형 상태를 지나 케면상의 전위가 임계전위 이상으로 커지게 되면 축 상에서 액주(jet)의 형태로 유체기둥이 분출되며 이 유체는 대전되어 있으므로 분출된 만큼에 해당하는 전하의 손실을 보상하기 위해서 전도 전류가 흐르게 된다.⁽⁵⁾ 이때 상태 ③은 상당히 안정된 상태로 원뿔형 액주(cone-jet) 모드라 불린다. 이 모드에서는 노즐 근처에서 유체가 원뿔모양을 형성하며 바로 밑으로는 intact jet이라 불리는 미세한 액주가 발생하게 된다. 이 모드는 다른 모드에 비해 액주에 의해 발생하는 액적의 크기 분포가 단분산(monodisperse)에 가까운 분무를 한다. 상태 ④는 불안정 원뿔형 액주 모드로 외부 전기장 또는 공급 유량의 불안정으로 발생하게 된다. 상태 ⑤는 매우 높은 전압 상태에서 발생하는 모드로 노즐 부근에서 원뿔 형태가 없어지고 분무 물질이 여러 개의 액주 상태로 나누어져 분무 된다.

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 형성된다.⁽⁶⁾ 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 있어 노즐 크기를 줄이는 것에 한계가 존재한다. 하지만 전기-수력학 분무방식을 이용한 프린팅의 경우 전기적인 힘을 추가로 이용하기 때문에 상대적으로 큰 입경의 노즐을 이용해 미세한 액적을 얻을 수 있으며 균일한 크기의 액적을 얻을 수 있다.^(7,8)

본 연구에서는 미세한 패턴을 얻기 위해 원뿔형 액주 모드를 이용하였다. 이와 관련된 연구로 Jayasinghe 등⁽⁷⁾은 점성이 높은 알루미늄 혼합물을 전기-수력학적인 방법으로 분무하였으며 원뿔형

액주 모드를 구현하였다. 또한 그들은 점성이 높은 글리세롤(glycerol) 액체를 이용해 고점성 액체를 전기-수력학적인 방법으로 분무하였고 물질의 점성이 분무되는 액적의 크기에 미치는 영향을 실험을 통해 보여주었다.⁽⁸⁾ Noymer 등⁽⁹⁾은 프로필렌 글리콜(propylene glycol)액체를 이용해 cone-jet 모드와 multi-jet 모드를 구현하고 cone-jet 모드로 발생한 액적이 약 60 μm 크기로 거의 단분산으로 이루어 졌음을 보여주었다. Poon⁽¹⁰⁾은 전기-수력학분무를 이용해 미세한 패턴을 얻고자 물질의 점도를 변화시키며 실험을 실시하였으며 점도의 증가가 cone-jet 모드의 안정성에 기여 한다는 것을 보여주었다. Teng 등⁽¹¹⁾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. 본 실험에서는 알루미늄 혼합물질의 공급 유량과 전압 변화에 따라 발생하는 원뿔형 액주모드의 발생 영역을 확인하였다. 그리고 공급유량을 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ 로 고정하고 공급전압에 따라 표면에 2차원 패턴인 'YONSEI' 글자들을 구현하여 전기-수력학 프린팅을 이용한 2차원 패턴 구현 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 실험

본 연구에서는 전기-수력학 방식을 이용해 세라믹 물질을 패턴하기 위해 다음과 같이 실험 장치를 구성하였다. 본 실험의 모든 환경은 Class 100 (0.5 μm 기준)의 청정공간(cleanbooth)에서 이루어 졌다.

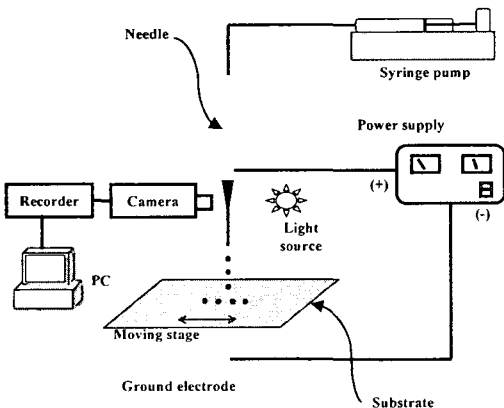


Fig. 3 Experimental set-up

전기-수력학 프린팅을 위한 실험 장치는 Fig. 3과 같다. 장치는 크게 액체 공급 장치, CCD 카메라를 포함한 가시화 장치, 전기를 공급하는 전기 공급장치, 원하는 패턴대로 기관(acetate sheet)을 이송 시키는 정밀이동장치로 구성된다. 전기-수력학 프린팅을 위한 노즐은 스테인레스 재질 (내경: 0.92 mm, 외경: 1.28mm)이고 접지는 같은 크기로 Fig. 4와 같이 5 mm 아래 노즐 고정 스테이지를 이용해 고정 시켰다. 두 전극의 노즐은 15 kV 까지 공급할 수 있는 전기 공급 장치와 연결된다. 분무 과정은 고배율렌즈(Hirox, 최대600배)가 장착된 CCD 카메라로 모니터링 하였고 각각의 분무 영상은 컴퓨터에 저장된다. 본 실험에서는 세라믹 물질을 분무하기 위해 알루미늄 잉크를 사용했다. 알루미늄 잉크는 알루미늄(46.5 wt%, ~ 0.3 μm , Showa Denko)와 에탄올(53 wt%) 그리고 분산제 (0.5 wt%)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 잉크의 물성치들은 Table 1에 나타나 있고, 이들은 다양한 측정 장비들을 이용해 측정하였다.

전도 전도계수는 전기 전도계(F-54, Horiba)를 이용해 측정하였으며 점도는 진동식 점도계(SV-10, AND)를 이용해 측정하였다. 그리고 알루미늄

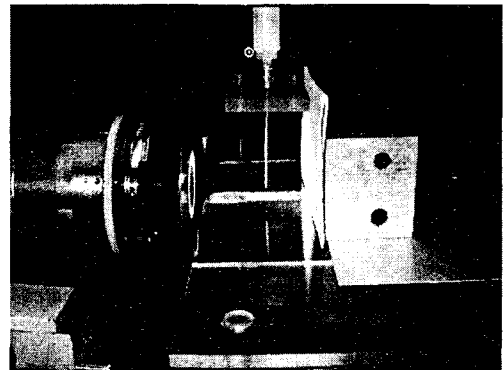


Fig. 4 Pin to pin electrode type

Table 1 Properties of the alumina ink

Density Kg/m ³	Viscosity mPa s	Surface tension mN/m	Electrical conductivity S/m	Relative Permittivity
1300	43.77	82	1.56×10 ⁻⁴	54

잉크의 밀도는 일정량의 질량과 부피를 측정하여 계산하였다. 표면 장력은 듀 누이 방법(Du Novy method)을 이용해 측정하였고 유전율은 두개의 실리콘 기판에 금속을 증착시키고 그 사이에 물질을 넣어 RLC 미터를 이용해 캐퍼시턴스(capacitance)를 측정한 후 환산하였다. 본 실험에서 측정된 알루미나 잉크의 물성치는 기존의 논문과 비교하여 신뢰성을 검증하였다.⁽⁷⁾ 최종적으로 완성된 알루미나 잉크는 실린지 펌프(kds-100, KD Scientific Inc.)를 이용해 일정한 유량으로 노즐에 공급하였다. 원하는 패턴대로 기판을 이송 시키는 정밀이동장치는 선형 모터와 x-y 두 축 그리고 이동 제어기(controller)로 구성되어 있다. 정밀이동장치는 최대 100 mm 로 기판을 이동시킬 수 있으며 이동 중에 발생하는 반복 이동 오차는 5 μm 이하다.

전기-수력학 프린팅 방식을 이용하여 표면에 패턴을 하기 위해 실험은 다음과 같이 진행되었다. 먼저 세라믹잉크를 실린지 펌프를 이용해 일정하게 노즐로 공급한 후 노즐에 전기를 가하여 원뿔형 액주 모드를 구현하였다. 이때 발생된 모드를 공급 전압과 유량에 대해 실험을 실시하여 안정적인 원뿔형 액주 모드가 구현되는 조건을 확인한다. 다음으로 원뿔형 모드를 이용해 표면에 2 차원 패턴인 'YONSEI' 글자들을 구현하고 공급전압을 변화시켜 선폭의 변화를 측정한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기-수력학 프린팅 안정화 특성

전기-수력학 분무를 이용해 분무를 하기 위해서는 원하고자 하는 패턴형상에 적합한 분무 모드를 구현해야 한다. 이를 위해서 전극에 가해지는 공급전압의 크기와 공급유량에 따라 발생하는 모드의 특성을 분석해 모드가 발생하는 조건을 찾는

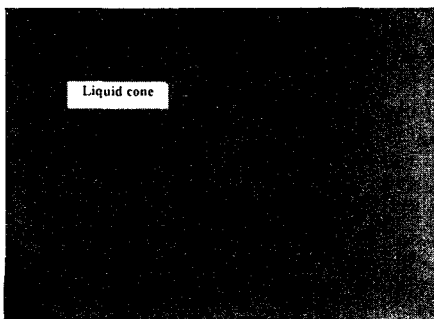


Fig. 5 Typical cone-jet mode of electro-hydrodynamic printing

것이 중요하다.

Fig. 5 는 가시화 장치로 촬영한 원뿔형 액주 모드 사진이다. 원뿔형 액주 모드의 경우 노즐 끝에 원뿔형의 패면(liquid cone)이 발생하며 패면 끝단에 미세한 액주가 발생하게 된다. 전기-수력학적 방식을 이용해 프린팅을 실시하기 위해서는 Fig. 5 와 같이 원뿔형 액주 모드를 얻어야 하며 이때 발생하는 액주를 이용해야 한다. 전기-수력학적 분무에서는 원뿔형 액주 모드의 발생에 기여 하는 두 가지 중요한 변수가 있는데 공급전압과 물질의 공급 유량이다. Fig. 6 은 주어진 유량에서 공급전압을 변화시켰을 때 원뿔형 액주 모드가 발생하는 영역을 보여주고 있다. 본 실험에서는 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ ~ 60 $\mu\text{l}/\text{min}$ 유량 범위에서 실험을 실시하였다. 이때 핀 대 핀 사이 간격은 5mm 로 고정하였다. 결과를 보면 유량을 증가시킬수록 원뿔형 액주 모드를 얻기 위해서 더 높은 공급전압이 필요함을 알 수 있다. 이는 주어진 시간에 더 많은 물질이 실린지 펌프를 통해 공급되므로 낮은 영역에서와 같은 하전량을 만들어주기 위해 더 큰 공급 전압이 필요로 하기 때문에 발생한 것으로 생각된다.

3.2 원뿔형 액주 모드의 액주 지름

전기-수력학 분무에서 원뿔형 액주 모드는 노즐과 노즐사이에 전압을 공급했을 때 노즐 부근에서 공급 되던 유체가 원뿔형의 모양을 형성하고 미세한 지름 (d_j)의 액주(intact jet)가 Fig. 7 처럼 발생하게 된다. 또한 액주의 길이가 증가하게 되면 교란이 발생하고 파동에 의한 영향으로 인해 액주가 끊어지게 되고, 그 끝 부분에서 액적이 형성된다. 이때 발생한 액적의 크기(D_D)는 액주의 약 1.89 배로 발생한다.⁽¹⁰⁾ 전기-수력학 프린팅은 원뿔형 액주 모드에서 발생하는 액주를 이용한 것이다. 전기-수력학적인 분무과정은 분무하고자 하는 물질의 물성치(점도, 전기전도도, 표면 장력, 밀도, 비

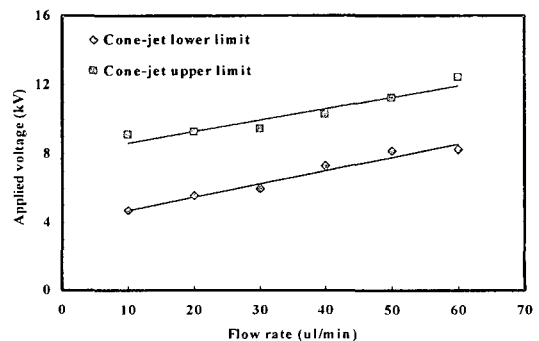


Fig. 6 Cone-jet and multi-jet operating regimes

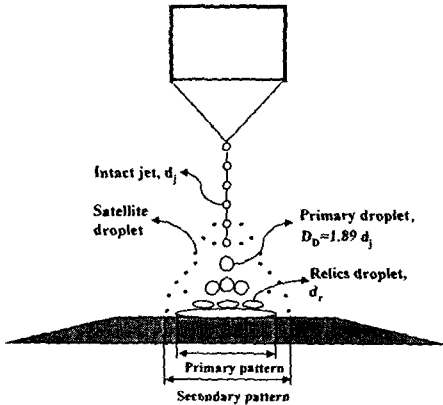


Fig. 7 Droplet and jet diameter of Electro-Hydrodynamic printing

유전율)와 분무 조건 (공급유량, 공급전압, 노즐 크기)의 영향을 받는다. 특히 전기-수력학 분무의 원뿔형 액주 모드에서 액주의 지름은 대상유체의 점도, 유전율, 공급유량과 전압, 노즐의 크기에 의해 영향을 받는다.^(7,10)

액주의 지름은 공급 전압과 유량에 의해 영향을 받으며 Canan-Calvo 등⁽¹²⁾은 공급전압보다 유량이 액주에 미치는 영향이 더 크다고 주장하였고 점도에 관한 무차원 항을 식 (1)과 같이 나타내었다. 그리고 식 (1)의 값이 1 이하인 경우 액주의 지름 (d_j)을 식 (2)와 같은 식으로 예측할 수 있다.⁽¹²⁾

$$\delta_m = \left(\frac{\rho \epsilon_0 \gamma^2}{K \mu^3} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$d_j \sim \left(\frac{(\epsilon - 1)^{1/2} Q \epsilon_0}{K} \right)^{1/3} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, ϵ_0 는 진공에서의 유전율, ϵ 는 비유전율, γ 는 표면 장력, K 는 물질의 전기전도도, Q 는 물질의 공급 유량 그리고 μ 는 점도이다. 또한 de la Mora 와 Loscertales⁽¹³⁾은 분무하고자 하는 유체의 전기전도도가 높은 경우 ($K > 10^{-5}$ S/m) 액주의 지름을 식 (3)와 같이 예측할 수 있다고 하였다.

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

Fig. 8 은 본 연구에서 사용한 세라믹 물질의 물

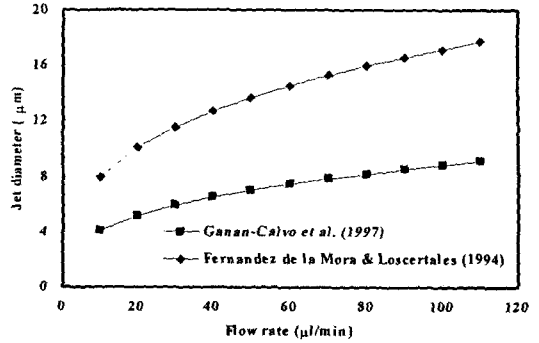


Fig. 8 Cone-jet and multi-jet operating regimes

성치(Table 1)를 이용해 유량에 따라 발생가능한액주의 지름을 식 (2)와 (3)을 이용해 계산한 것이다. Fig. 8 에서 보는 바와 같이 유량이 감소하면 발생하는 액주의 지름이 작아진다는 것을 알 수 있으며 유량 10 μl/min 에서 8 μm 미만의 액주를 구현할 수 있음을 예측할 수 있다. 그리고 각각 식에 의한 예측값이 2 배 정도 차이가 있다는 것을 알 수 있다.

3.3 전기-수력학 프린팅을 이용한 2 차원 패턴

전기-수력학 분무의 원뿔형 액주 모드를 이용한 2 차원 패턴을 하기 위해 물질의 공급 유량을 10 μl/min 으로 고정하였다. 그리고 공급 전압을 5.5 ~ 7.5 kV 까지 0.5 kV 씩 증가시켰다. 본 실험에서는 Fig. 9 와 같이 'YONSEI' 글자들을 원뿔형 액주 모드를 이용해 패턴 할 수 있었다.

Fig. 10 은 7.5 kV 의 공급전압으로 패턴한 글자 'E' 부분의 윗부분에 해당하는 부분을 확대한 것이다. 패턴된 선의 형태가 확연히 다른 부분이 있음을 알 수 있고, 패턴된 선을 부착된 입자들의 조밀함을 기준으로 주요(primary pattern), 부수적(secondary pattern)패턴 부분으로 구분할 수 있음을 알 수 있다. 주요 패턴부분은 전기-수력학 분무에서 원뿔형 모드(cone-jet mode)가 형성되어 발생하는 주 액적(primary droplet)으로 구성된 액주(intact jet)로 발생한 것이고, 부수적 패턴 부분은 Satellite 액적으로 생성된 부분이다. 'YONSEI' 패턴에서 글자마다 액주가 여러 번 통과한 곳이 존재한다. 따라서 'E', 'N' 글자에서 액주가 1 회 지나간 곳을 선정해 선폭을 분석하였다. 'YONSEI' 패턴에서 'E', 'N' 패턴 부분을 주요, 부수적 패턴 부분으로 구분하여 선폭 분석 결과를 Fig. 11 과 Fig. 12 에 각각 나타냈다. 분석 결과 주요 패턴의 경우 선폭의 변화가 6 kV 을 기점으로 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 5.5 kV 에서 증가한 선폭은

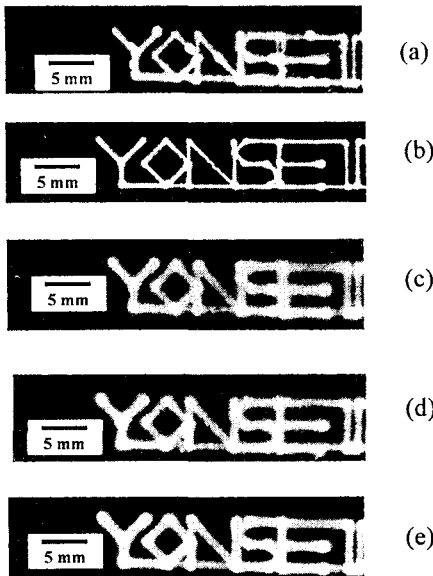


Fig. 9 'YONSEI' character obtained at applied voltages of (a) 5.5 kV, (b) 6.0 kV, (c) 6.5 kV and (d) 7.0 kV, (e) 7.5 kV

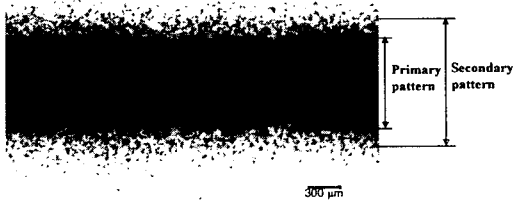


Fig. 10 Two regions of pattern

완전한 원뿔형 액주 모드가 형성되지 못해서 발생한 것으로 이 경우 Fig. 9 (a)와 같이 원뿔형 액주 모드와 적하(dripping)모드가 동시에 발생해 적하 모드에서 발생되는 큰 액적이 패턴 중간에 부착된 것을 확인 할 수 있다. 공급전압이 증가할수록 선폭이 증가한 것은 표면 근처에서 액주가 갑자기 흔들리는 현상(whipping)을 원인으로 생각할 수 있다. 일반적으로 원뿔형 액주 모드에서 공급전압을 더 높게 주면 노즐 부근에서 더 높은 전류가 원뿔 형태의 패면에 존재하게 되며 높은 전류는 액주가 표면 근처에서 흔들리는데 기여하게 된다.⁽¹⁴⁾ 또한 높은 공급전압은 많은 satellite 액적을 발생시킨다. 따라서 공급전압의 증가에 의한 선폭의 증가는 표면 근처에서 액주의 흔들림과 satellite 액적의 증가를 원인으로 생각할 수 있다. 주요 패턴부분에서는 공급 전압이 6 kV 일 때 선폭이 가장 작

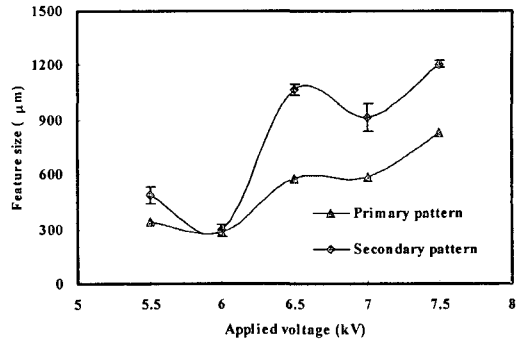


Fig. 11 Feature size of 'E' character part

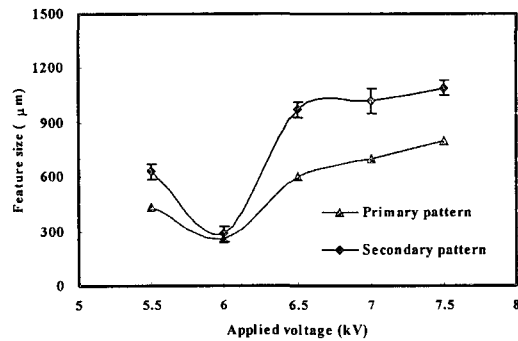


Fig. 12 Feature size of 'N' character part

았고, 선폭은 'E'와 'N' 패턴 부분의 경우 각각 281, 261 μm 였다.

부수적 패턴 선폭의 경우 주요 패턴 선폭을 합산하여 분석하였다. 부수적 패턴을 고려한 경우 선폭이 공급전압 6 kV 에서 가장 낮은 크기를 보였으며 주요 패턴과 선폭이 거의 같아 부수적 패턴부분이 거의 발생하지 않았음을 알 수 있었다. 그리고 주요 패턴만을 분석한 결과와 마찬가지로 공급전압 6 kV 이상에서 선폭이 증가하는 경향이 있었다. 하지만 주요 패턴만을 분석한 결과보다 패턴된 선의 선폭 변화가 커 측정된 선폭 분석 값의 변화를 오차 막대로 표시하였다. 분석 결과 공급전압 6 kV 이상에서는 선폭의 증가 경향이 둔화되거나 감소하는 경향이 있었고 특히 공급 전압 7 kV 의 경우 다른 선폭에 비해 선폭의 균일도가 낮다는 것을 알 수 있었다.

전기-수력학 분무시 발생하는 원뿔형 액주 모드는 Fig. 7 과 같이 미세한 액주를 발생시킨다. 액주의 길이가 증가하게 되면 교란이 발생하고 파동에 의한 영향으로 인해 액주가 끊어지게 되고, 그 끝 부분에서 액적이 형성되는데 이때 발생한 액적의 크기는 액주의 약 1.89 배로 발생한다.⁽¹⁰⁾

식 (4)는 액적의 크기를 예측할 수 있는 식으로 표면에 부착된 물질의 증발에 의한 효과를 무시하

$$D_D = 0.91d_r \left(\frac{1}{4 \sin \theta} - \frac{1}{24 \sin^3 \theta} \right)^{1/3} \quad (4)$$

였을 때 표면에 부착된 패턴 크기를 이용해 액적 크기를 예측할 수 있다.⁽¹⁵⁾ 따라서 원뿔형 액주 모드에서 발생된 액주의 지름 (d_j)은 액적의 지름 (D_D)과 관련($d_j=1/1.89D_D$) 있으므로 식 (4)를 이용해 액주의 지름을 유추할 수 있다. 식에서 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 40° 이다. 본 실험에서 패턴된 선의 크기 분석결과 (Fig. 11 과 12의 평균값)와 식 (4)를 이용하여 유추한 액주의 지름(jet diameter)을 Fig. 13에 나타냈다. 가장 작은 크기의 선폭을 보였던 6 kV의 경우 약 $50 \mu\text{m}$ 지름의 액주를 보였다. 이는 Fig. 8에서 공급유량 $10 \mu\text{m}/\text{min}$ 일 경우 이론적으로 예측된 $\sim 8 \mu\text{m}$ 미만 크기라는 값과 차이가 있는 값이다. 이는 액주가 표면 근처에서 스프레이로 전이되는 현상 때문으로 생각된다. 전기-수력학 분무의 원뿔형 액주 모드에서 발생하는 액주는 접지 전극 부근에 접근함에 따라 스프레이 형태로 전이된다.⁽¹⁶⁾ 따라서 표면 근처에서 선폭이 액적 하나에 의해 이루어지는 것이 아니라 여러 개의 날알로 나뉘어진 스프레이 형태로 패턴이 된다. 즉 선폭이 날알 크기와 같아지는 것이 아니라 커지게 되고 유추한 액주의 크기 또한 커지게 되는 것이다. 이때 공급전압, 유량, 전극의 형상 등이 전이 과정에 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 전극의 형상을 핀대핀으로 해서 일정한 형상의 패턴을 할 수 있었다. 전극의 형태를 핀대 핀으로 하는 경우 물질의 타깃패턴(targeting deposition)이 가능하게 된다.⁽⁷⁾ 만약 핀대 판의 형태로 원뿔형 액주 모드를 구현했을 경우 표면 근처에서 매우 넓은 면적으로 스프레이가 발생하여 패턴을 할 수

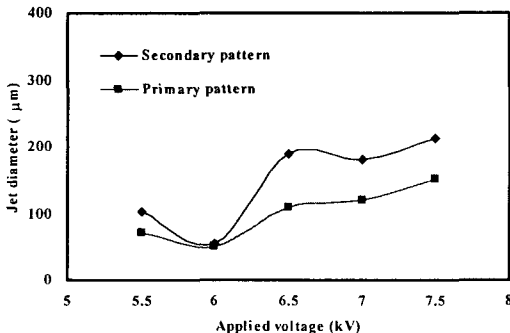


Fig. 13 Jet diameter with applied voltage

없었을 것이다. 선폭을 줄이기 위해 더욱더 미세한 크기의 전극을 사용하고 물질의 물성치 변화를 통해 패턴을 하는 연구를 진행할 예정이다.

4. 결론 및 향후 계획

본 실험에서는 세라믹 물질을 전기-수력학 분무 방식을 이용하여 프린팅하였다. 이를 위해 핀대핀 방식의 전기-수력학 분무에서 원뿔형 액주 모드가 발생하는 공급유량과 전압 조건을 확인하였다. 그리고 발생된 원뿔형 액주 모드를 이용하여 2 차원 패턴인 'YONSEI'글자를 표면에 구현하였다. 실험 결과 공급전압 6 kV 에서 최소선폭을 구현하였으며 선폭의 크기는 약 $250 \mu\text{m}$ 였다. 향후 미세 선폭을 구현하기 위해 미세 전극을 사용하고 물질의 물성치 변화를 이용한 연구를 할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 내부과제의 지원을 받아 진행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Pique, A. and Chrisey, D. B., 2002, "Direct Write Technologies for Rapid Prototyping Applications," *Academic press*, San Diego.
- (2) Church, K. H., Fore, C. and Feeley, T., 2000, "Commercial Applications and Review for Direct Write Technologies," *Material Reserach Society Symposium Proceeding*, Vol. 624, pp. 3~8.
- (3) Chrisey, D. B., 2000, "Materials Processing - The Power of Direct Writing," *Science*, Vol. 289, pp. 879~881.
- (4) Ragucci, R., Fabiani, F., Cavaliere, A., Muscetta, P. and Noviello, C., "Characterization of Stability Regimes of Electrohydrodynamically Enhanced Atomization," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 21, pp. 156~161.
- (5) 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.
- (6) Lefebvre, A. H., 1989, "Atomization and Sprays," *Hemisphere Publishing Coporation*, Chap. 2, pp. 37~39.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Noymer, P. D. and Garel, M., 2000, "Stability and Atomization Characteristics of Electrohydrodynamic Jets in the Cone-Jet and Multi-Jet Modes," *J. Aerosol Science*, Vol. 31, pp. 1165~1172.
- (10) Poon, H. F., 2002, "Electrohydrodynamic Printing," Ph. D. Thesis, Dept. Chem. Eng., *Princeton Univ.*
- (11) 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.
- (12) Ganan-Calvo, A. M., Davila, J. and Barrero, A., 1997, "Current and Droplet Size in the Electro spraying of Liquids," *J. Aerosol Science*, Vol. 28, pp. 249~275.
- (13) 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.
- (14) Hartman, R. P. A., Brunner, D. J., Camelot, D. M. A., Marijijnissen, 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.
- (15) 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.
- (16) Tang, K. and Gomez, A., 1996, "Monodisperse Electro sprays of Low Electric Conductivity Liquids in the Cone-Jet Mode," *J. Colloid and Interface Science*, Vol. 184, pp. 500~511.