노즐 형상에 따른 전기수력학 프린팅의 실험적 연구

김지영* · 부닷귀엔* · 변도영*

The Experimental Study of EHD Printing for Different Nozzle Shapes

Ji Young Kim, Vu Dat Nguyen and Do Young Byun

Abstract. The shape of nozzle cross-section plays an important role in stabilizing electrospray jet. The angle of contact line is governed based on the famous Young-Laplace equation. Compared to a round nozzle that has a constant curvature along the orifice, the square nozzle has four square corner edges and four straight edges that hold the meniscus in a different manner and is of interest in this study. By utilizing both square and round capillary nozzle, we examine the effect of nozzle shape in electrohydrodynamic jetting. The ejections were recorded with a high speed camera and analyzed to examine the jetting repeatability based on dynamic movement of meniscus. The result suggests that if the corner edges are not sharp, then its effect on repeatability is also limited.

Key Words: Electrohydrodynamic(전기수력학), Nozzle shape(노즐 형상)

1. 서 론

최근 들어, 잉크젯 프린팅을 이용하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 고전적으로 잉크를 분사하는 방법에 따라 크게 압전소자 방식(Piezoelectric)과 버블젯 방식(Bubble jet)으로 나뉜다. 압전소자 방식은 전류세기에 따라 압전소자의 변위가 변하여, 마이크로 챔버 내의 압력을 조절함으로써 액적을 정밀하게 토출 할 수 있다. 반대로 버블젯인 경우 열에 의해 기포가 생성, 토출하는 방식으로 노즐의 막힘이 적다. 그러나 상기 두 방법은 (1) 열에 의한 잉크의 변형, (2) 잉크 점도의 한계, (3) 액적 토출 크기 조절에 따른 어려움 등이 있어 수 마이크로 이하의 공정에서는 적합하지 않다.

특히 MEMS (micro electro mechanical system) 혹은 NEMS (nano electro mechanical system) 공정에서 요구되는 다양한 약품의 도포 및 증착 과정과 식각 공정을 프린팅 기술로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 마이크로, 나노 단위의 높은 해

상도와 전도성 물질¹⁾의 패턴이 요구되는 실정이다.

한편, 최근에 등장한 전기수력학(electrohydro dynamic) 프린팅은 전기장을 이용하여 미세 액적을 토출하는 방식이다. 노즐과 기관 사이에 균일한 전기장을 생성되면, 대전된 잉크가 정전기력에 의해 노즐 끝단에서 기관으로 이동하게 된다. 이 때 노즐 끝단에서는 메니스커스가 원뿔모양의 Taylor Cone 형상으로 유지되며, 인가된 정전기력 크기에 따라 다양한 형태의 토출이 이루어지게 된다¹⁾. 기존의 잉크젯 프린팅 방법과 다르게 전기수력학 프린팅의 액적은 Taylor cone 끝 단에서 나노, 마이크로 크기로 형성이 가능하다. 이를 이용하여 나노 크기의 고해상도 패턴 구현이 가능하지만²⁾, 다른 한편으로는 패턴이 균일하지 못한 한계를 지닌다. 전기수력학 프린팅이 갖는 이러한 한계를 개선시키기 위해 HIP(Hybrid inkjet printing) 방식이 제안되었다. 노즐 내 압전소자의 제어로 메니스커스가 소량의 정밀한 부피를 갖도록 한 뒤, 전기수력학 프린팅 방식으로 미세 액적의 토출을 유도하여 패턴의 균일도를 향상시켰다³⁾.

또한 직류 대신 교류를 적용하는 SP-EHD(Single Potential EHD)가 연구 되었다. 이는 하나의 전극만을 사용하여 노즐의 구조를 단순하게 하고, 노즐과 기관 사이(working distance)가 짧은 경우 발생하는 electrical

[†]건국대학교 항공우주정보시스템공학과
E-mail : dybyun@konkuk.ac.kr

*건국대학교 항공우주정보시스템공학과

break down을 해결하였다⁽⁴⁾.

전기수력학 프린팅 방식으로 토출된 액적과 주변의 순전하 밀도(net charge density) 그리고 생성된 전기장의 종류에 따라 다양한 비행 경로가 연구되었다⁽⁵⁾.

뿐만 아니라 메니스커스를 안정시키기 위해 노즐 표면이나 기판 표면을 화학적, 물리적 개질하여 그 영향을 연구한 연구도 있었다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 노즐의 형상에 따른 전기수력학 프린팅의 성능을 실험적으로 평가하였다. 특히 노즐 형상에 따라 액체의 메니스커스는 다르게 형성이 되며, 이는 액적 토출에 직접적으로 작용한다. 이를 비교하기 위하여 사각형과 원형의 노즐을 가지고 형상이 전기수력학 프린팅에 미치는 영향을 정량적으로 측정하였다.

2. 실험 구성 및 방법

Fig. 1은 실험 장치의 개괄도 이다. 기판은 Si wafer (100)을 사용하였고, 전기장을 형성하기 위해 고전압을 인가할 stainless steel tube를 모세관 (glass capillary)에 연결하여 노즐을 제작하였다. Teflon tube를 이용하여 노즐에 잉크 공급이 원활히 하였다. 또한 정수압으로 액체의 일정한 메니스커스를 유지하도록 설계하였다. Fig. 2는 정수압력 차이에 따른 메니스커스 크기 변화를 나타낸다.

작동유체로 Ethylene glycol을 사용하였으며, 리니어 스테이지(DCT LPP-LM) 위에 기판을 이동시켜 패턴을 만들었다. 함수 발생기(Agilent 33250 A)로 인가할 신호를 형성한 뒤 고전압 증폭기(Trek 10/40 A)를 통해 Si wafer로 구성된 평판 전극과 stainless steel

Fig. 1. Experimental arrangement.

Fig. 2. Meniscus change.

Table 1. Square and round nozzle

	Square			Round		
Case. 1		ID	80		ID	90
		OD	170		OD	160
Case. 2		ID	100		ID	150
		OD	200		OD	250

tube 사이에 전압을 공급하였다. 대전된 액체가 노즐 끝에서 기판으로 이끌리면서 Taylor Cone 형상이 된다. 정수압과 전기장의 합이 표면장력을 넘어서게 되면, Taylor Cone 형상의 끝에서 미세 액적이 분리되어 기판으로 토출된다. 마이크로 렌즈와 LED조명을 통해 가시화된 일련의 jetting 영상은 고속카메라(Photron Fastcam Ultima APX)에 의해 획득되었다.

노즐 형상에 따른 jetting을 비교하기 위해, 사각형과 원형의 모세관을 비교 노즐로 선택하였다. 두 노즐의 단면적 차이가 결과에 끼치는 영향을 감안하여 두 경우로 실험을 하였고, Table 1에 있는 네 개의 노즐이 사용되었다. 첫 번째 실험(Case. 1)에 쓰인 노즐들은 사각 노즐의 단면적이 더 큰 경우이고, 두 번째 실험(Case. 2)에 사용된 노즐은 원형 노즐의 단면적이 더 큰 경우이다. 외경과 내경의 단위는 μm 이다.

3. 실험 결과

일반적으로 working distance를 노즐의 크기의 1.5 배에서 3배 사이에서 유지하면 micro dripping mode를 사용할 수 있다. 이 때 거리가 멀어지면 전극과 노즐 사이에 생성되는 정전기력이 약해 Taylor cone을 형성하는데 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 액적 토출이 잘 이뤄지지 않는다. 또한 제팅 형성을 위해 길게 늘어졌던 메니스커스는 많은 양의 부피가 노즐 밖으로 노출되어, 토출 직후 한꺼번에 노즐 내부로 되돌아가

지 못하고 노즐을 타고 흘러 내리는 overflow를 발생시킨다. 이런 문제점들은 지속적인 jetting을 방해하는 주요한 요인이다.

본 실험에서는 노즐 크기에 약 1.5배, 3배 되는 200 μm , 500 μm 의 거리를 갖도록 working distance를 설정하였다. working distance가 늘어나면 개시 전압도 증가하므로 200 μm 의 working distance를 갖는 경우엔 0.8 kV, 1.0 kV, 1.2 kV, 1.4 kV의 직류 전압을 인가하고 500 μm 의 working distance의 경우 1.2 kV, 1.4 kV, 1.6 kV, 1.8 kV의 직류 전압을 인가하였다. Fig. 3는 그 중 working distance 500 μm 에서 1.2 kV의 직류전압을 인가한 경우이다. 사각 노즐과 원형 노즐을 가지고 정수 압력을 조절하여 초기 메니스커스의 높이가 다른 각각의 네 가지 경우를 관찰하였다.

Fig. 3의 x축은 시간을 나타내며, 시간0에서 전기장

Fig. 3. Dynamic movement of Meniscus : (a) square nozzle, (b) round nozzle.

이 형성됨에 따라 메니스커스가 Taylor cone으로 발전하기 시작한다. y축은 메니스커스의 높이를 나타낸다. Meniscus #1은 초기 메니스커스 높이가 가장 낮은 경우를 말하며 #2, #3, #4 순서대로 초기 메니스커스의 높이가 증가한다. Fig. 3의 a는 한 변이 170 μm 인 사각노즐, b는 외경이 160 μm 인 원형 노즐의 경우이며, 각각의 메니스커스의 변화는 250 fps, shutter speed 1/50,000에서 녹화되었다. 두 노즐 모두 정수압이 가장 큰 Meniscus #4인 경우 첫 jetting까지 걸리는 시간이 짧았다. 반면 쉽게 overflow되어 Meniscus의 안정성에 문제를 보인다. Meniscus #4에서 #1로 정수압이 작아질수록 overflow현상은 감소하지만, jetting을 위한 Taylor cone 형성이 느리게 진행되었다. 이는 전기수력학 프린팅에서, 높은 높이를 갖는 초기 메니스커스가 overflow를 발생시켜 해상도에 악영향을 끼치고, 초기 높이가 낮은 메니스커스는 느린 응답속도로 인해 속도를 감소시키는 것을 말한다. 따라서 적절한 높이의 메니스커스를 설정하는 것은 안정적이고 지속적인 jetting을 위해 중요하다.

사각 노즐과 원형노즐에서 같은 초기 메니스커스를 갖는 네 가지 경우 모두 사각 노즐의 Taylor cone 형성이 빨랐다. 가장 높은 초기 메니스커스 높이를 갖는 사각 노즐의 Meniscus #4는 첫 jetting까지 516 ms 걸린다. 원형 노즐의 Meniscus #4보다 108 ms 빠르며 초기 메니스커스 높이가 낮을수록 그 차이는 늘어난다. 이는 사각 노즐이 원형 노즐과 비교했을 때, 같은 초기 메니스커스 높이에서 더 높은 정수압을 갖는 효과를 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 첫 제팅까지 걸리는 시간은 상대적으로 줄어들게 된다. 원형노즐이 첫 제팅까지 걸리는 시간을 사각 노즐과 비슷하게 하려면 정수압을 증가시켜 메니스커스 높이를 더 높여야 한다. 이는 메니스커스를 불안정하게 만들어 오버플로우를 발생시킬 수 있다.

Fig. 4는 전압을 다양하게 변화한 뒤, 얻은 dot 형태의 패턴 크기를 나타낸다 패턴의 크기를 측정하여 사각 노즐과 원형 노즐의 차이를 비교해 보았다. working distance 300 μm 에서, 사각 펄스 신호를 인가하였으며, 전압은 교류 2.8 kVpp, 3.2 kVpp 이다. 주기(Period)는 10 ms로 고정되어 주파수(frequency)는 일정하다. 이 신호를 연속으로 5, 10, 15, 20회(cycle) 증가시켜 패턴의 크기를 증가시켰다. Ethylene glycol은 jetting 뒤 바로 증발하기 시작 한다. 따라서 jetting된 바로 직후에

Fig. 4. Pattern size for different signal : (a) square nozzle, (b) round nozzle.

고속카메라로 촬영하여 패턴이 온전한 상태의 이미지를 얻었다. 전압과 cycle이 동일한 조건에서 노즐 형상에 따른 패턴 균일도는 차이가 없다. 오히려 기관의 평평한 정도가 패턴 균일도에 더욱 영향을 끼친다. 그런데 같은 조건에서 얻은 패턴의 크기는 사각 노즐의 경우에 더 작은 경향을 보인다. 또한 여러 조건에서 사각 노즐이 보여주는 패턴의 크기는 100~350 μm 로 원형 노즐보다 다양하다.

노즐 형상에 따라 패턴의 균일한 정도 차이가 있는지 좀 더 자세히 알아보기 위해, 사각 노즐과 원형 노즐 모두 동일한 크기의 패턴을 갖도록 서로 다른 신호를 인가한 뒤 패턴의 균일한 정도를 확인해 보았다. ethylene glycol으로 얻은 각각의 100개 패턴 크기를 분석해보니 초기에 생성된 작은 패턴은 jetting을 반복할수록 점점 커졌다. 따라서 편차가 큰 초기 패턴 10개와 마지막 10개의 패턴을 제외하였다. Fig. 5는 남은 80개 패턴의 크기를 보여주는 그래프이다. x축은 패턴의 갯수 뿐만 아니라 패턴 된 순서를 의미하며, 원형 노즐은 jetting이 진행될수록 큰 패턴을 갖는다. 사각 노즐은 패턴 순서와 상관없이 불규칙한 패턴 크기를 갖는다. 사각 노즐과 원형 노즐 모두 패턴이 균일하지

Fig. 5. Uniformity of pattern.

Fig. 6. Microscopic image of silver ink pattern : (a) silver pattern of round nozzle, (b) silver pattern of square nozzle.

않다.

Fig. 6은 Silver 잉크로 만든 패턴들이다. Fig. 5와 마찬가지로 사각 노즐과 원형 노즐이 비슷한 크기의 패턴을 갖도록 서로 다른 신호를 인가하였다.

a가 원형 노즐로 만든 패턴이고 b가 사각 노즐의 결과이다.

사각 노즐과 원형 노즐의 패턴이 비슷한 크기를 갖도록 신호를 조절했지만, 대체적으로 원형 노즐의 패턴이 조금 더 작다. silver ink 패턴 또한 노즐 형상에 따라 뚜렷한 차이를 나타나지 않는다.

Fig. 7은 사용된 사각 노즐의 한 변이 200 μm , 원형 노즐의 한 변이 250 μm 으로, 원형 노즐이 더 큰 단면적을 갖는 경우의 메니스커스의 움직임을 나타내는 그래프이다. 여기서 사각 노즐은 외부 경계뿐만 아니라 내부 경계에서도 메니스커스 형성이 가능하다. Fig. 7은 노즐 외부 경계에서 메니스커스를 형성한 원형 노즐(Full-Meniscus)과 사각 노즐(Full-Meniscus) 그리고 내부에서 메니스커스를 형성한 사각 노즐(Partial-Meniscus)에 전압을 인가한 뒤, 시간에 따른 메니스커스 높이의 변화를 보여준다.

초기 메니스커스 높이가 더 높은 원형 노즐의 jetting

Fig. 7. Dynamic movement of Meniscus.

Fig. 8. Pattern image of Inktec ink : (a) pattern of round nozzle, (b) pattern of square nozzle.

이 가장 빠를 것으로 예상되었지만, 사각 노즐이 더 빠른 jetting을 보였다. 또한 메니스커스가 내부 경계에서 형성된 사각 노즐의 경우 가장 낮은 초기 메니스커스 높이를 갖지만 가장 빠른 jetting을 갖는다.

이어서 원형 노즐의 단면적이 큰 경우의 패턴 결과를 비교하였다. Fig. 8은 교류의 사각 펄스 신호를 두 노즐에 동일하게 인가하여 얻은 패턴 결과이다. 인가 전압은 2.4 Kvpp, 주파수는 100 Hz이다. 사용된 잉크는 잉크텍 잉크(Inktec Inc., TECLJ-020)로 기관의 이동속도를 조절하여 점과 선의 패턴을 얻었다. b는 기관을 600 mm/min로 이동시켜 얻은 패턴이고 c의 경우 기관 속도를 120 mm/min로 줄여 연속적인 선을 만들었다.

Fig. 8은 사각 노즐이 균일하고 조금 더 큰 패턴 크기를 갖는다. 사각 노즐의 단면적이 큰 경우의 패턴을 비교했던 Fig. 5에서는 동일한 신호에서 사각 노즐의 패턴이 원형노즐보다 작았던 것과는 반대되는 결과이다.

4. 분석 및 토의

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

위 식은 Young-Laplace 방정식으로 메니스커스 형상

Fig. 9. Sequence of EHD jetting.

과 작용하는 압력간의 관계를 정의할 수 있다. 메니스커스의 내부와 외부의 압력 차가 있는 곳에서 R_1 과 R_2 는 각각의 반경의 곡률을 나타낸다. 여기서 γ 는 액체의 표면장력이다. 구의 경우 R_1 과 R_2 는 반지름과 같은 값을 갖게 되며, 완벽한 사각형의 경우 R_2 값은 0이 된다. 이는 사각형의 각진 모서리가 큰 압력 차를 지탱할 수 있음을 의미하며, 모서리 주변의 메니스커스는 그 형태가 쉽게 변형되지 않도록 한다. 따라서 형태학적 측면에서 이는 메니스커스의 안정화에 기여, jetting 시 큰 압력 차를 유지할 수 있는 가능성을 가정하였다.

Fig. 9는 노즐 형상에 따른 일련의 jetting 과정이다. 노즐 끝 단에서 메니스커스가 성장하여 바깥 경계에 도달하면 가장 큰 메니스커스를 형성한다. c는 사각 노즐의 경우, 메니스커스의 성장이 노즐 내부의 경계에 의해 잠시 제한되는 것을 보여준다(partial-meniscus). 메니스커스의 압력을 증가시키면, 내부 경계를 넘어서 노즐 외부의 경계에 도달하여 큰 메니스커스(full-meniscus)를 형성한다. 사각 노즐의 내부 모서리는 큰 압력을 지탱할 수 있게 하며, 이는 overflow를 방지하여 메니스커스가 안정적인 상태가 되게 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 노즐 형상이 전기수력학 jetting에 미치는 영향을 연구하였다. 사각 노즐과 원형 노즐의 단면적 차이를 고려하여, 사각 노즐의 단면적이 큰 경우와 원형 노즐의 단면적이 큰 경우, 두 번에 걸쳐 실험하였다. 두 경우 모두 사각 노즐이 빠른 응답 속도를 보인다. 또한, 사각 노즐의 경우에는 내부 경계에서도 메니스커스를 유지 하여 제팅을 갖는다. 사각 노즐이 내부 경계에서 메니스커스를 형성한 경우, 제팅 응답

속도는 가장 빠르다. 이는 Young-Laplace 방정식에서, 사각 노즐의 모서리가 원형 노즐에 비해 큰 압력 차를 지탱해 주어 메니스커스의 변형을 막고, 이로 인해 메니스커스를 안정적으로 형성하게 한 영향으로 예상된다. 그러나 메니스커스의 형태학적인 표면 구조에 따른 안정성과 응답 속도의 관계는 추가 연구가 요구된다. 또한 메니스커스에 작용하는 압력이 커질수록 노즐 밖으로 노출되는 액체의 부피는 증가하게 되며, 증가된 부피를 갖는 액체의 메니스커스는 상대적으로 큰 패턴을 형성한다. 따라서 정수압 편차에 의해 패턴의 크기는 다양하게 형성된다. 균일한 패턴의 형성 관점에서, 정수압 차이에 따른 균일도에 관한 추가 연구가 요구된다. 사각 노즐이 큰 경우와 원형 노즐이 큰 경우 모두 노즐 형상에 따른 패턴의 크기 변화나 균일도에 대한 뚜렷한 경향은 없었다. 그러나 사각 노즐의 형상이 유체의 안정화 측면과 응답 속도 관점에서는 나은 성능을 보이므로 이를 이용하여 보다 안정적인 jetting 조건을 찾는데 기여할 수 있을 것이라 사료된다. 안정적이고 연속 가능한 jetting을 위해서는 노즐의 질이 가장 중요하다. 본 실험에 사용된 노즐들은 표면 상태가 좋지 못하여 실험에 좋지 못한 영향을 끼쳤다. 또한 사각 노즐의 경우 각진 모서리 대신 둥근 모서리를 가지고 있어, 실험 결과에 사각형 모서리가 주는 영향을 충분히 반영하지 못하였다. 다음 연구에서는 보다 뚜렷한 형상에 의한 차이를 보기 위해, 모서리가 각지고 매끄럽게 표면처리된 노즐로 형상에 따른 차이를 연구를 진행할 예정이다.

후 기

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research

Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2010-0015174) and the Direct Nano Patterning Project supported by the Ministry of Knowledge Economy under the National Strategic Technology Program.

참고문헌

- 1) Jaworek, A., and A. Krupa., 1999, "Classification of the modes of EHD spraying", *Journal of aerosol science* 30, no. 7: 975~975.
- 2) Park, J. U, M. Hardy, S. J Kang, K. Barton, K. Adair, D. kishore Mukhopadhyay, C. Y Lee, et al., 2007, "High-resolution electrohydrodynamic jet printing.", *Nature* 6, no. 10: 782~789.
- 3) Byun, D.Y., V. D Nguyen, P. Dutta, and H. C Park., 2010, "A Hybrid Inkjet Printer Utilizing Electrohydrodynamic Jetting and Piezoelectric Actuation", *Japanese Journal of Applied Physics* 49: 060216.
- 4) Nguyen, V. D, and D. Byun. 2009. "Mechanism of electrohydrodynamic printing based on ac voltage without a nozzle electrode", *Applied Physics Letters* 94, no. 17: 173509~173509.
- 5) Yudistira, H. T, V. D Nguyen, P. Dutta, and D. Byun. 2010. Flight behavior of charged droplets in electrohydrodynamic inkjet printing. *Applied Physics Letters* 96: 023503.
- 6) Byun, D.Y., Lee, Y.J., 2006, "The droplet movement on the super-hydrophobic surface by the electro-wetting on dielectric and the effect of particles", *National Congress on Fluids Engineering Vol.1*, pp. 297~300.