

기관으로부터의 영향을 제거한 전기수력학 젯 프린팅 및 그 특성 조절

이준성[†] · 김영재 · 강병근 · 김상윤 · 박재홍 · 황정호 · 김용준^{*}

Electrohydrodynamic Jet Printing Capable of Removing Substrate Effects and Modulating Printing Characteristics

Jun-Sung Lee[†], Young-Jae Kim, Byeong-Geun Kang, Sang-Yoon Kim, Jae-Hong Park, Jungho Hwang, and Yong-Jun Kim^{*}

Key Words : Electrohydrodynamic(전기수력학), Multi-nozzle(멀티노즐), EHDP

Abstract

Electrohydrodynamic jet printing (EHDP) technique is widely used for the direct writing. However, in the existing EHDP method, the printing characteristics are affected by the printing substrate used, and the line width of the printed is determined by the geometry of the nozzle. We propose an EHDP method which is capable of (1) removing the effect from the substrate, and (2) controlling the line width through the ON/OFF control of the each nozzle in the nozzle array. Printing characteristics of our EHDP system were examined and successful ON/OFF control of the nozzle array were demonstrated. By using the proposed EHDP, it is expected that stable meniscus regardless of the substrate and different line widths even using the same nozzle can be achieved.

1. 서 론

최근에 수 마이크로에서 나노크기의 미세패턴을 형성하기 위한 방법으로 직접쓰기 기술이 많이 연구되고 있다[1]. 직접쓰기 기술은 마스크나 애칭공정 없이 잉크의 증착을 통하여 구조물이나 패턴을 얻을 수 있다. 따라서 생산가격의 절감, 빠른 생산 속도 그리고 친환경적인 공정이 가능하다[2]. 직접 쓰기 기술의 하나로써 잉크젯 프린팅 기술은 폭넓게 사용되어 왔다. 이런 잉크젯 프린팅 기술의 장점은 50pL 보다 작은 액적(1-20pL)을 원바이원(one-by-one)의 형성방법으로 생성하는데 있다[3]. 그러나 이러한 잉크젯 프린팅은 토출되는 액적의 크기가 노즐 크기의 1.89 배이기 때문에 만약 10um 의 선 폭을 재작해야 할 경우 5.3um 미만의 노즐이 필요하게 된다[4]. 그러나 이럴 경우 크게 두 가지 문제가 발생하게 된다. 첫 번째로, 좁은

폭을 갖는 노즐의 경우 기능성 나노파티클 파우더, 액체, 분산제등으로 구성되어있는 기능성 나노콜로이드(nanocolloid) 용액을 쓸 경우 노즐의 막힘현상이 잘 일어나게 된다. 둘째로, 노즐의 폭이 좁을 수록 노즐의 생산성이 떨어지게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 최근 100um 이상의 지름을 갖는 노즐로 10um 이하의 선 폭 구현이 가능한 전기수력학프린팅(electrohydrodynamic printing)에 관한 연구가 폭넓게 진행 중이다[5,6].

전기수력학 프린팅은 크게 연속적인 젯(jet)을 이용한 프린팅 방법, 메니스커스(meniscus)의 높이변화 조절을 이용하여 액적을 토출시켜 프린팅하는 방법[7]의 두 가지 형태로 나뉜다. 지속적인 젯을 이용하여 기능성 라인을 프린팅하는 방법의 대부분은 핀 형태의 단일노즐이 이용되었고, 콘 젯(cone-jet)의 안정성 및 토출된 젯의 위치오차(positioning error)를 줄이기 위한 방법에 초점이 맞춰져 있다. 콘 젯의 안정성을 확보하기 위해서는 전기장의 안정성 확보가 필요하다. 이를 위한 방법으로 핀 형태의 접지전극을 기관 하부에 위치시키거나 링 형태의 추가적인 전극을 노즐과 기관 사이에 배치시키는 등의 형태로 프린팅이 시도되었다. 이와는 구별되는 방법인 DOP(drop on place)

[†] 회원, 논문발표자의 소속
E-mail : lsh7329@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2844 FAX : (02)312-2159

* 연세대학교

** 연세대학교

는 펄스전압(pulse voltage)을 이용해 메니스커스의 높이를 조절 함으로써 액적을 토출시키기 때문에 원하는 위치에 프린팅할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 두 가지 방법은 몇 가지 한계를 지닌다. 첫째로, 기존 연구는 단일노즐만을 사용하여 진행되었기 때문에 시간당 프린팅 가능한 패턴이 제한적일 뿐만 아니라 다양한 두께의 선 폭을 한번에 제작할 수 없다. 둘째로, 핀 형태의 노즐 특성상 노즐 메니스커스의 안정한 상태를 방해하는 측면방향으로의 젖음현상(wetting phenomenon)이 쉽게 일어나기 때문에 핀 형태의 노즐은 기본적으로 큰 젖을 안정화시키기 힘들다. 셋째로, 메니스커스를 안정화시키기 위해 핀 형태의 접지전극이나 링 형태의 전극이 필요로 하다는 점이다. 특히 접지전극이 기관 하부에 위치할 경우 기관의 특성에 따라 전기장의 형태가 변하기 때문에 안정적인 프린팅이 힘들다. 다섯째로, DOP 방법은 액적을 토출시키기 위해 노즐에 일정한 펄스전압을 인가되어야 하지만 핀 형태의 노즐을 일렬로 배열하여 멀티노즐의 형태를 만들었을 경우 전기장의 왜곡현상 및 간섭현상으로 인해 노즐간 거리에 따라 토출을 위한 전압이 변하게 된다.

이에 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 몇 가지 방법을 제안하였다. 첫째로, 시간당 프린팅 가능한 패턴의 양의 증가 및 한 번의 프린팅으로 다양한 두께의 선 폭 구현이 가능하도록 하도록 노즐을 어레이(array)하였다. 둘째로, 전기장의 왜곡현상 및 간섭현상을 줄이기 위해 평판형태의 PCB(printed circuit board)를 이용하여 세 개의 노즐을 구성하였다. 평판형태의 PCB 를 이용할 경우 전위선의 형태가 노즐과 수평으로 생기게 되기 때문에 전기장에 의한 엔드이펙트(end effect)가 생기지 않아 큰 젖의 안정성을 동시에 확보할 수 있는 장점이 있다[8]. 둘째로, 기관의 특성에 따른 전기장의 변화를 막기 위해 기관 하부에 접지전극을 없애고 노즐과 기관 사이에 접지전극의 역할을 대신할 수 있는 링 형태의 전극을 설치하였다. 셋째로, 각각의 링 형태의 전극에 인가되는 전압을 온오프(ON-OFF) 형태로 제어함으로써 젖의 토출을 제어하였다.

2. 본 론

2.1 전기수력학(EHD)의 원리

적절한 전기 전도성을 가지는 용액이 전기가 흐를 수 있는 모세관(노즐)내를 통과할 때 관에 양고전압(positive high voltage)을 인가하게 되면 모세관이 양극으로 작용하게 되어 액체 속에 용해되어

있던 음이온들은 모세관으로 인력을 받아 이동하게 되고, 이와는 반대로 양이온들은 반발력을 받아 노즐 틈에 맺혀있는 메니스커스로 이동하게 된다. 이러한 현상을 전하분리현상이라고 하며 이러한 현상이 일어나는 과정을 전기적 영동기구(electrophoretic mechanism)이라고 한다. 모세관에 인가되는 전압이 작을 경우 액체곡면에 작용하는 전기력과 양이온들의 반발력이 액체의 표면장력보다 작아 젖이 토출되지 않지만 전압을 증가시키게 되면 액체곡면에 작용하는 전기력과 양이온들의 반발력이 액체의 표면장력보다 커지게 되어 젖이 토출된다[9]. 이때 액체의 모양이 콘(cone) 형태를 갖게 되는데 이를 테일러 콘(Taylor cone)이라 한다[10]. 전압의 증가에 따른 메니스커스의 형상 변화는 Figure 1 과 같다.

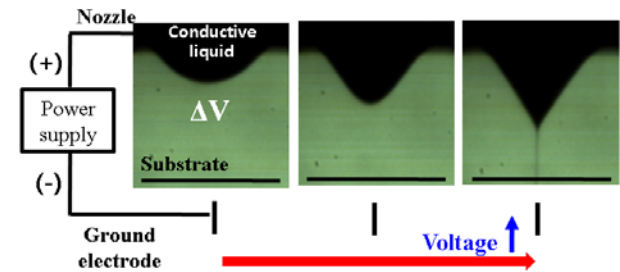


Figure 1 Meniscus shape changing according to applied voltage

2.2 EHDP 시스템의 개념도

PCB 기반의 노즐은 크게 두 가지 부분으로 이루어진다. 노즐의 역할을 하는 상판(upper plate)과 각각의 노즐에 전위차를 형성시키기 위한 추출장치(extractor)가 포함되어있는 하판(bottom plate)으로 구성되어있다. 추출장치의 역할은 전위차를 형성하는 것이다. 이 장치는 노즐과 기관 사이에 위치하기 때문에 기관의 특성에 따른 영향을 받지 않게 될 뿐만 아니라 각각의 추출장치에 전압을 가변적으로 인가하는 것이 가능하기 때문에 전압을 이용한 각각의 노즐의 온오프 제어가 가능하다. 전체적인 개념도는 Figure 2 와 같다.

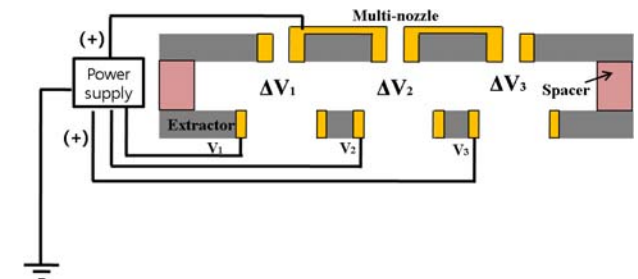


Figure 2 Scheme of addressable multi-nozzle

2.3 PCB 기반의 미세노즐 제작

노즐부분과 추출장치 부분의 제작에는 상용 PCB 기술이 이용되었다. 이 후 노즐의 역할을 하는 상판에 잉크보관장치(reservoir)를 구성하기 위

해 PDMS(polydimethylsiloxane)을 이용한 몰딩(molding) 공정이 이용되었다. 잉크보관장치 구성을 위한 공정은 다음과 같은 순서로 진행되었다. 첫째, 벌크 웨이퍼(bulk wafer)에 SU-8 을 코팅한 후 포토리소그래피(photolithography) 공정을 이용하여 패터닝을 한다. 둘째, PDMS 를 패터닝된 SU-8 위에 부은 후 100°C에서 1 시간 동안 경화시킨다. 셋째, 노즐이 포함되어있는 PCB 상판에 스펀코터(spin coater)를 이용해 PDMS 를 2um 의 두께로 코팅한다. 넷째, SU-8 에서 떼어낸 PDMS 와 PCB 상판을 RIE 를 이용하여 산소: 30sccm, 압력: 250torr, RF power: 25W 에서 25 초 동안 처리를 한 후 현미경을 이용하여 두 개를 접합시킨다. 다섯째, 150°C 의 핫플레이트(hot plate)에서 15 분 동안 경화시킨다. 잉크저장장치의 간단한 제작공정 및 제작된 노즐은 Figure 3 과 같다.

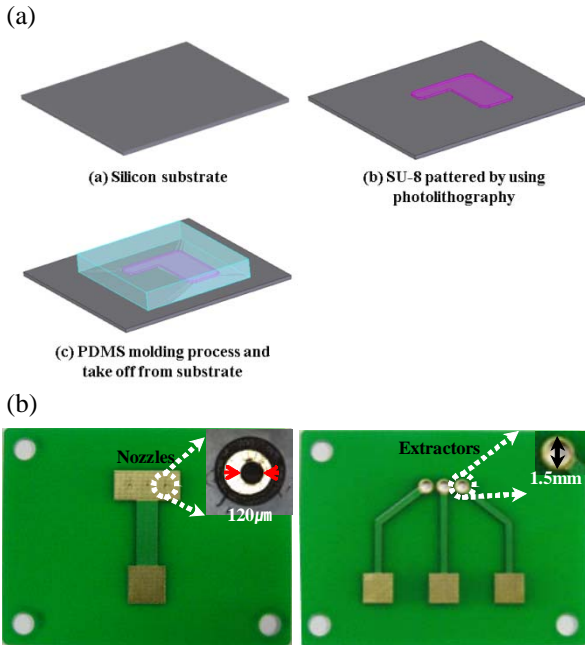


Figure 3 (a) Simplified fabrication processes of the reservoir plate. (b) Fabricated nozzle based on PCB

2.4 노즐 패키징(packaging)

제작된 잉크저장기와 노즐 그리고 추출장치는 Figure 4(a)와 같은 순서로 조합되었으며, Figure 4(b)는 패키징 된 멀티노즐의 사진이다.

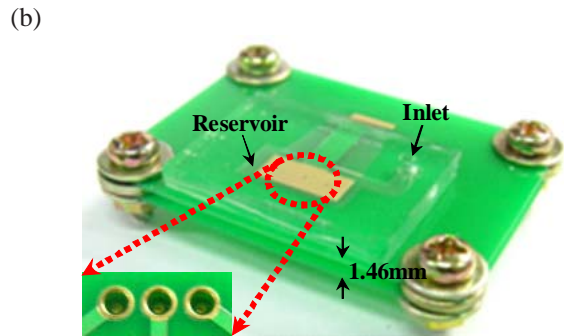
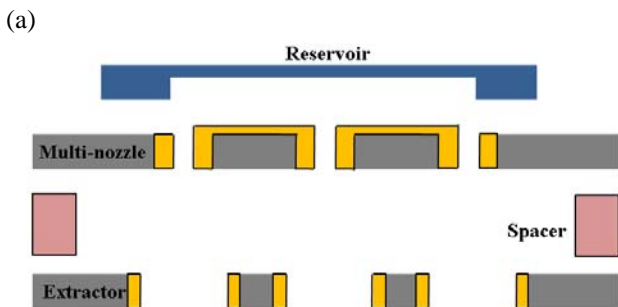


Figure 4: (a) Packaging scheme (b) The result of the packaged addressable multi-nozzle

2.5 미세 젯(fine jet) 토출을 위한 실험장치

장치는 크게 액체공급 장치, 가시화 장치, 전기공급 장치, 기관을 이동시키는 정밀이동 장치로 구성된다. 노즐과 추출장치는 전기공급 장치(HV-Rack, Ultravolt Inc.)와 연결된다. 토출과정은 초고속 카메라(Motion Pro HS-4, Redlake Inc.)를 이용하여 모니터링 하였으며 젯을 토출하기 위하여 캐봇(CABOT社, AG-IJ-G-100-S1)잉크를 사용하였다. 캐봇 잉크는 은 (크기 20nm 이하)과 에틸렌글리콜(Ethylene glycol) 그리고 분산제로 구성되어 있다. 잉크는 시린지 펌프(kds-100, KD Scientific Inc.)를 이용해 일정한 유량을 노즐에 공급하였다. 기관을 이동시키기 위한 정밀 이동장치는 선형모터와 x-y 축의 이동을 제어하는 이동제어기로 구성된다. 실험장치의 구성도는 Figure 5 와 같다.

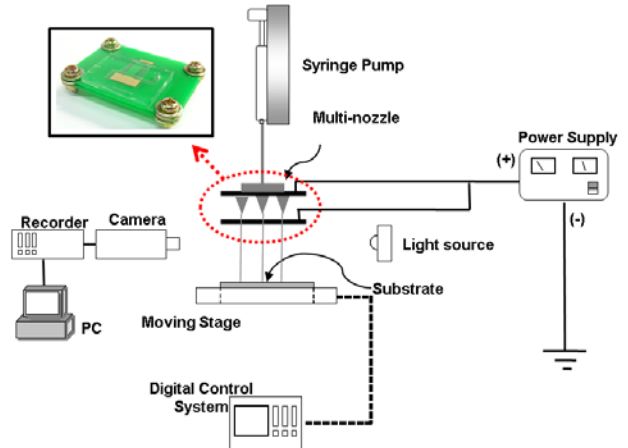


Figure 5: Schematic drawing of the experimental setup

2.6 미세 젯(fine jet) 토출을 위한 실험방법

미세 젯을 토출하기 위한 실험은 다음과 같이 진행되었다. 먼저 캐봇잉크를 시린지 펌프를 이용하여 메니스커스의 크기가 일정크기가 될 때까지 노즐로 공급한 후 잉크공급을 중단시킨다. 이후에 노즐과 추출장치에 전압을 공급하여 젯을 토출시

키기 위해 필요한 포텐셜을 계산한다. 이 후 시린지 펌프로 캐봇잉크를 일정한 양으로 잉크저장장치에 공급한 후 각각의 추출장치에 전압공급을 가변적으로 바꿔 포텐셜의 차이를 조절함으로써 원하는 노즐에서만 젯을 토출시킨다.

3. 결론

Figure 6(a)은 초고속 카메라를 이용하여 안정적인 콘 젯의 형태를 확인한 사진이다. 초기 메니스커스가 형성된 상태에서 유량의 공급을 중단한 후 No.1, No.2 그리고 No.3 노즐에 유량(3 ul/min) 공급을 한 후 각각의 전위차를 조절하여 노즐을 임의로 제어하였다. Figure 6(b)[11]는 기존 핀 형태의 노즐을 일렬로 배열하여 콘 젯을 형성시킨 사진이다. 기존 핀 형태의 노즐의 콘 모양은 전기장에서의 앤드이팩트(end effect)에 의해 비대칭 형태를 띠는 것을 알 수 있다. 하지만 PCB 기반의 멀티노즐에서는 각각의 콘이 대칭 형태를 띠고 있다. 이는 예상된 바와 같이 PCB 기반의 노즐에서는 앤드이팩트가 발생되지 않았음을 입증하는 결과라 할 수 있다. 또한 기존 논문에서 보고된 것과는 다르게 작동되는 노즐의 거리가 가변적으로 변해도 젯을 토출시키는데 필요한 전위차(2.0kV)는 변하지 않았다.

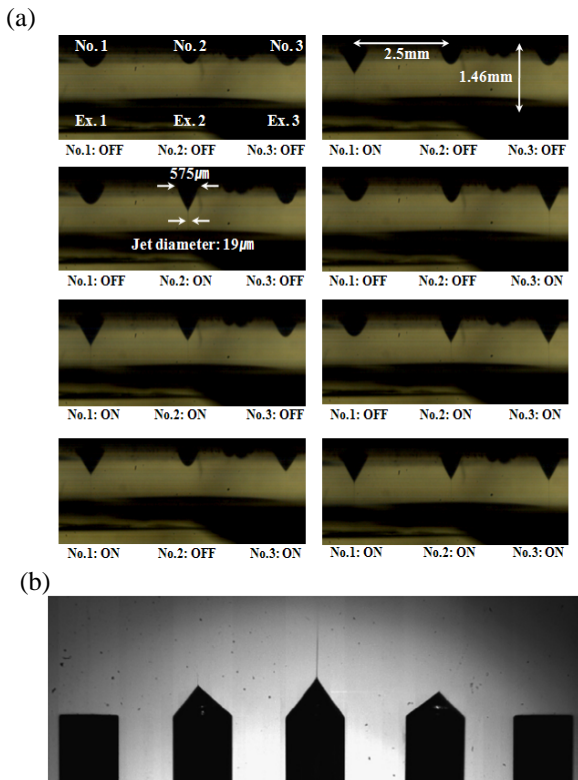


Figure 6: (a) Results of addressable jetting by using an electric potential, (b) Pin shaped nozzle array

Figure 7은 안정된 콘 젯이 형성되는 영역(1.2-2.0kV)에서의 전기장의 세기를 변경했을 때 기관 하부에 핀 형태의 접지전극이 있을 때와 없을 때의 선 폭의 두께를 비교한 사진이다. DI Eo 노즐과 기관 사이의 거리는 1mm로 고정되었다. 그래프에서 볼 수 있듯 보편적으로 기관 하부에 핀 형태의 접지전극이 존재할 경우에 비해 존재하지 않을 경우 선 폭이 두꺼운 것으로 나타났지만 일정 구간에서는 접지전극이 없을 경우가 있을 경우에 비해 좀 더 미세한 선 폭의 구현이 가능한 것으로 나타났다. 이는 잉크 내 이온들의 반발력에 의해 형성되는 퍼짐모드(spraying mode)가 나타나기 전 최적화된 조건에서 프린팅이 가능했기 때문인 것으로 보인다. 하지만 보편적으로 전기장의 세기가 커질 수록 접지전극이 없는 경우가 선 폭이 두껍게 프린팅 되었는데 이는 전기장의 세기 증가에 따라 이온의 반발력 또한 증가하지만 추출장치 이후 전기장이 수렴되는 현상을 보이지 않기 때문에 추출장치를 통과한 잉크 내부의 이온들의 반발력에 의해 잉크의 퍼짐모드가 더 빨리 형성되었기 때문이라 생각된다. 그럼에도 불구하고 프린팅된 선 폭은 기관 하부에 핀 형태의 접지전극이 있는 경우보다 균일한 것으로 나타났는데 이는 기존 핀 형태의 접지전극이 있는 경우 강한 전기장이 기관 하부에 위치한 접지전극 끝으로 수렴함으로 인해 함께 가속된 잉크가 기관에 강하게 부딪혀 프린팅된 패턴의 불균일성을 유발하는 것으로 보인다.

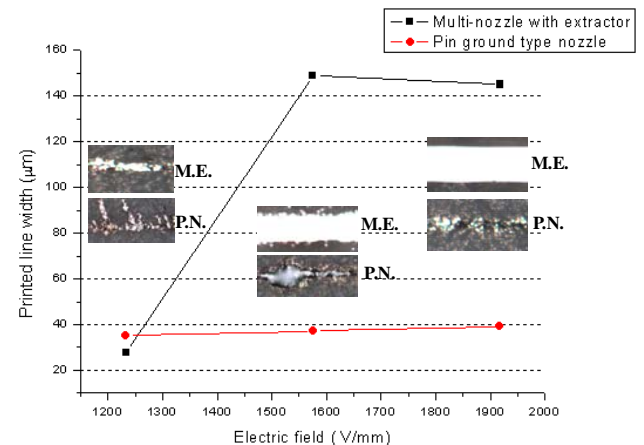


Figure 6: Printed line width according to applied electric potential. (M.E.: multi-nozzle with extractor, P.N.: pin ground type nozzle)

후 기

This work was supported in part by the Information Technology Research Center support program (IITA-2005-C1090-0592-0012) and in part by the Seoul Research and Business Development Program (10816)

참고문헌

- (1) A. Pique and D. B. Chrisey, 2002, "Direct Write Technologies for Rapid Prototyping Applications" (Academic, San Diego), preface.
- (2) Douglas B. Chrisey, 2000, "MATERIAL PROCESSING: The Power of Direc Writing", Science, Vol. 289, pp. 879 ~881.
- (3) O. Yogi, T. Kawakami, M. yamauchi, J. Y. Ye, and M. Ishikawa, 2001, "On-Demand Droplet Spotter for Preparing Pico-to Femtoliter Droplets on Surfaces", Anal. Chem., Vol. 73, pp. 1896~1902.
- (4) H. F. Poon, 2002, "Electrohydrodynamic Printing" Ph.D. thesis, Princeton University.
- (5) D. Y. Lee, Y. S. Shin, S. E. Park, T. U. Yu, and J. Hwang, 2007, "Electrohydrodynamic printing of silver nanoparticles by using a focused nanocolloid jet", J. Appl. Phys., Vol. 90, 081905.
- (6) J. H. YU, S. Y. Kim, and J. Hwang, 2007, "Effect of viscosity of silver nanoparticle suspension on conductive line patterned by electrohydrodynamic jet printing" Appl. Physics. A: Mater. Sci. Process., Vol.89, pp. 157~ 159.
- (7) J.L. Li, 2007, "EHD sprayings induced by the pulsed voltage superimposed to a bias voltage", J. Elec., Vol. 65, pp. 750~757.
- (8) H. Park, K. Kim, and S. Kim, 2004, "Effect of a guard plate on the characteristics of an electro spray in the cone-jet mode", J. Aerosol Sci., Vol. 35, pp. 1295~1312.
- (9) 김경태, Marie-Helene Duby, Weiwei Deng, Tommaso Gomez, 2007, "흠노즐을 이용한 고유량 정전분무 특성 연구", 대한기계학회논문집 B, Vol. 31(10), pp. 848-854.
- (10) Taylor, G. I., 1964, "Disintegration of water drops in an electric field", Proc. R. Soc., Vol. A280, pp. 383-397.
- (11) Bui Quang Tran Si, Doyoung Byun, and Sukhan Lee, 2007, "Experimental and theoretical study of a cone-jet for an electro spray microthruster considering the interference effect in an array of nozzles", J. Aerosol Sci. 38, pp. 924-934.