

노즐의 소수성 코팅에 의한 EHD 제트의 액적 토출 현상 비교 연구

Comparative Study on Ejection Phenomena of Droplets from EHD Jet by Hydrophobic Coating of Nozzle

Yong-Jae Kim[†], Jae Yong Choi^{*}, Sang Uk Son^{*}, Ki Cheol Ahn^{*}, Hyun Joon Keum^{**},
Suk Han Lee^{*}, Do Young Byun^{***} and Han Seo Ko^{**}

Key Words : EHD jet(electrohydrodynamic, EHD 제트), electrostatic(정전장), droplet(액적), hydrophilic(친수성), hydrophobic(소수성)

Abstract

An EHD (Electro-Hydro-Dynamic) jet for electrostatic inkjet head shows advantages to print micro-size patterns using various inks because it can generate sub-micron droplets and can use highly viscous inks. Thus, many researchers in industrial fields are concerned about the EHD jet in these days. Since the basic principle of the EHD jet is to form a droplet from an apex of meniscus at the end of the nozzle, the ejection mechanism can be changed by the shape of the meniscus. The stable ejection of the droplet is greatly affected by the shape of the meniscus which is also influenced by surface characteristics of the nozzle, electric potential and ink properties. Experiments have been performed using the nozzles with hydrophilic and hydrophobic coatings in this study. The hydrophobic nozzle forms the stable droplets in wider range of the electric potential than the hydrophilic nozzle does.

1. 서 론

마이크로 및 나노 기기에서 유체의 유동을 제어하여 원하는 위치에 원하는 속도로 전달하거나, 유체로부터 액적을 생성하여 이동 또는 분사시킬 수 있는 기술은 현재 유체와 관련된 마이크로/나노 기기에 있어 가장 주요한 연구 대상이다. 특히 이러한 마이크로/나노 유체 시스템이 MEMS/NEMS 기술과 결합하여, 많은 응용 제품과 매우 큰 신 시장을 창출할 수 있을 것이라는 기대감으로 인해 이 분야를 산업적으로 응용시키고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다⁽¹⁾.

그 중 비 접촉식 방식으로 원하는 영역에 선택적으로 패터닝을 할 수 있는 잉크젯 프린팅 기술

[†] 성균관대 대학원 기계공학과
E-mail : warriorkim@skku.edu
TEL : (031)290-7475 FAX : (031)290-5849

^{*} 성균관대 정보통신공학부

^{**} 성균관대 기계공학부

^{***} 건국대 항공우주공학과

은 생성된 마이크로/나노 크기의 액적을 이용하여, 복잡한 프로세스를 요구하는 종래의 광학 리소그래피 기반 패터닝 방식과 달리 단순한 프로세스를 요구하는 비 접촉식 3D 프린팅 기반 패터닝 방식으로 대면적 패터닝을 가능하게 하는 저가의 기술이다. 또한 현 공정 상에서 발생하는 많은 유해 물질과 복잡한 공정 과정을 줄일 수 있어, LCD, OLED, PDP 등 디스플레이, PCB, RFID, micro 적층 안테나, 마이크로 렌즈 등 전자재료 프린팅 분야와 각종 마이크로/나노 센서, 바이오 칩, 생물 세포 배양 등 산업적 중요성과 응용 범위가 점차 확대되고 있다⁽²⁾.

잉크젯 프린팅 기술은 마이크로 액적의 토출 및 그 현상에 관한 많은 연구를 바탕으로 발전되어 왔다. 최근에는 액면(meniscus)에 인가된 전기적, 물리적 힘에 의해 액면을 잡아당겨 액적을 형성시키는 물리적 공정인 전기수력학(electrohydrodynamics, EHD) 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾. 이러한 EHD 기술을 응용한 잉크젯 헤드를 EHD jet 으로 부르곤 한다.

EHD jet 의 경우 노즐 크기보다 작은 액적을 형성할 수 있으며 고점도의 액체도 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있어 다양한 액체로 미세한 패터닝이 가능하다⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾. 따라서 최근 산업용 잉크젯 헤드 분야에서 EHD jet 이 많은 관심을 받고 있다. EHD jet 은 노즐 끝 액면에서 액적을 형성하는 것을 기본 원리로 하고 있다. 따라서 액면의 모양에 따라 액적 토출 바뀌게 된다. 액면의 모양에 영향을 주는 인자는 다양하지만 특히 노즐의 표면 특성은 안정적인 토출에 큰 영향을 준다⁽¹⁰⁾. 따라서 본 연구에서는 노즐의 표면 특성에 따른 액적 토출 현상에 대해서 규명하고자 친수성 노즐과 테플론 코팅을 통해 제작된 소수성 노즐을 이용해 액적 토출 현상을 비교 관찰하였다.

2. 실험 장치

액적 토출 현상을 관찰하기 위하여 Fig. 1 과 같이 실험 장치를 구성하였다. 노즐 끝에 형성된 액면의 관찰이 중요하므로 마이크로 줌 렌즈를 장착하고 256x512 해상도에서 초당 10000 장의 사진을 촬영할 수 있는 고속 카메라를 이용하였다. 고전압 증폭장치를 사용하여 노즐에 2.2kV 에서 3.2kV 에 이르는 전압을 공급하였다. 안정적인 유량 공급 및 조절을 위하여 정압 챔버를 이용해 액체를 공급하였다.

노즐의 오염을 최대한 줄이고자 액체로는 탈이온수(deionized water)를 사용하였다. 친수성 노즐의 재질은 초경합금으로서 외경이 100 μm 이다. 동일한 노즐에 테플론을 코팅하여 소수성 노즐을 제작하였다.

전극은 두께 0.5mm 의 금속재질로 제작되었고 직경은 15mm 이며 5mm 크기의 구멍이 뚫려있다. 구멍은 노즐에서 토출된 액적이 통과하도록 되어 있으며 실험 중 전극에 액적이 축적되어 발생할 수 있는 전기장 변화를 방지한다. 노즐로부터 전극까지의 거리는 $2\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 로 유지하였다.

3. 결과

3.1 토출 직전 액면 비교

토출 직전의 액면의 모양은 전기장 형성에 있어서 매우 중요한 인자이다. 동일한 실험 조건에서 액면의 모양 특히 끝부분의 곡률반경에 따라 액면에 작용하는 전기장 세기는 크게 달라진다. 액적 토출 직전의 액면 모양을 관찰함으로써 노즐의 친수/소수성 특성이 액적 토출에 미치는 영향을 비교하였다.

Fig. 2 를 보면 소수성 노즐의 경우 액면의 곡률반경이 평균 63 μm 인데 비해 친수성 노즐의 경우 평균 90 μm 로 1.5 배 정도 크게 측정되었다. 이는 동일한 크기의 노즐을 사용하더라도 표면 특성에 따라 형성되는 액적의 크기가 달라질 수 있음을 나타내며 소수성 노즐의 경우 동일한 전압을 인가하고도 보다 작은 액적을 토출할 수 있음을 보여준다. 2.2kV 에서 압력이 1kPa 씩 증가할 때 소수성 노즐의 경우 곡률반경이 4%씩 일정하게 증가하는데 비해 친수성 노즐의 경우 경향이 일정하지 않았다.

2.4kV 부터 3.2kV 사이에서 액면의 형태를 관찰해보면 소수성 노즐의 경우 밀면보다 높이가 상대적으로 작은 납작한 삼각형이 주류를 이루고 있고 친수성 노즐의 경우 전극방향으로 길쭉한 반원이 많음을 알 수 있다. 이를 통해 소수성 노즐이 상대적으로 작은 액면을 유지함을 알 수 있다. 작은 액면은 동일한 전압 하에서 보다 큰 전기장의 세기를 얻을 수 있기 때문에 소수성 노즐이 높은 전기장을 얻는데 유리하다고 할 수 있다.

3.2 토출 순간 액면 비교

Fig. 3 는 토출 순간 늘어나 있는 액면의 모습을 보여주고 있다. 토출 순간 액면의 모양은 안정적인 액적 형성에 직접적으로 관여하는 인자이다. 소수성 노즐의 경우 토출이 지속되더라도 일정한 형태의 액면을 유지하는데 비해 친수성 노즐의 경우 중간 부분에 불룩 튀어나온 부분이 관찰되었으며 토출 형태가 계속해서 변화하는 등 현상이 불안정하였다.

3.3 토출 직후 비교

Fig. 4 는 길게 늘어났던 액면이 노즐로부터 분리된 직후의 모습을 보여주고 있다. 분리된 액면 또는 제트는 빠른 속도로 응집되면서 액적을 형성하게 된다. 제트의 모양을 통해 안정적으로 액적을 형성할 수 있는지 어느 정도 가늠할 수 있다. 또한 노즐에 남아 있는 액면의 모양을 통해 노즐의 젖음 현상이 일어나는 것을 관찰할 수 있다.

분리된 제트의 모양을 관찰해보면 소수성 노즐의 경우 2.6kV 부터 3.2kV 이르는 범위에서 유사한 모습을 보여주고 있다. 그러나 친수성 노즐의 경우 그 모양이 일정하지 않은 것을 알 수 있다. 또한 고속카메라 연속 영상에서도 친수성 노즐의 제트 모양이 자주 변화되는 것이 관찰되었다. 따라서 소수성 노즐에서의 토출 현상이 보다 안정적으로 이루어지는 것이 확인되었다.

2.4kV 부터 3.2kV 범위에서 제트의 폭을 측정해본 결과 소수성 노즐의 경우 5~20 μm 였으며 친수성 노즐의 경우 10~80 μm 였다. 평균적인 폭은

소수성 노즐이 10 μm , 친수성 노즐이 35 μm 로 3 배 이상 넓은 것으로 측정되었다. 이는 형성되는 액적의 크기 또한 3 배 가까이 차이 나는 것으로 동일한 조건에서 소수성 노즐이 훨씬 작은 액적을 토출하는 것을 확인하였다.

노즐에 남아있는 액면을 관찰해 보면 소수성 노즐의 경우 노즐 크기에 제한되어 있는 반면 친수성 노즐의 경우 노즐 크기보다 큰 것을 볼 수 있다. 또한 액체가 노즐의 옆 벽면을 적시고 있는 것이 관찰되었다. 이는 안정적인 토출에 부정적인 영향을 미치는 요인이 되는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 노즐의 표면 특성에 따른 액적의 토출 현상을 비교 분석하였으며 토출 현상을 액적 토출 직전, 그 순간, 직후로 나누어 비교하였다. 소수성 노즐의 경우 액면이 노즐 크기 안에 제한되어 있어 반복되는 토출에서 일정한 모습을 유지하면서 노즐 크기의 1/10 정도의 제트를 형성하는 것을 관찰하였다. 반면 친수성 노즐의 경우 액면이 노즐의 옆 벽면을 적신 상태에서 제트를 형성하게 되면서 그 모양에 변화가 관찰되었으며 전체적으로 불안정한 토출로 이어졌다. 제트의 폭이 노즐 크기의 1/3 정도로 소수성 노즐보다 훨씬 큰 것을 확인하였다. 따라서 EHD jet 을 설계할 때 노즐의 표면 특성을 소수성으로 만든다면 보다 작은 전압으로 보다 작은 액적을 토출할 수 있을 것이라고 생각된다.

후 기

본 연구는 산업기술연구회 전문화연구사업(COE)의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

- (1) Chih-Ming Ho, 2001, "Fluidics - the Link between Micro and Nano Sciences and Technologies", Proc. IEEE Int. Conf. MEMS, pp. 375-384.
- (2) Jin-Won Song, Joondong Kim, Yeo-Hwan Yoon, Byung-Sam Choi, Jae-Ho Kim and Chang-Soo Han, 2008, "Inkjet printing of single-walled carbon nanotubes and electrical characterization of the line pattern", Nanotechnology, Vol. 19, 095702.
- (3) Yong-jae Kim, Han Seo Ko, Sukhan LEE, Sang Uk Son, Daewon Jung and Doyoung Byun, 2007, "Numerical and Experimental Analysis of electrostatic Ejection of Liquid Droplets", J. Korean Phys. Soc., Vol. 51, pp. 42-46.
- (4) Jang-Ung Park, Matt Hardy, Seong Jun Kang, Kira Barton, Kurt Adair, Deep kishore Mukhopadhyay, Chang Young Lee, Michael S. Strano, Andrew G. Alleyne, John G. Georgiadis, Placid M. Ferreira and John A. Rogers, 2007, "High-resolution electrohydrodynamic jet printing", Nature Materials, Vol. 6, pp. 782 - 789.
- (5) Robert T. Collins, Jeremy J. Jones, Michael T. Harris and Osman A. Basaran, 2008, "Electrohydrodynamic tip streaming and emission of charged drops from liquid cones", Nature Physics, Vol. 4, pp. 149 - 154.
- (6) Sukhan Lee, Doyoung Byun, Daewon Jung, Jaeyong Choi, Yongjae Kim, Ji Hye Yang, Sang Uk Son, Si Bui Quang Tran and Han Seo Ko, 2008, " Pole-type ground electrode in nozzle for electrostatic field induced drop-on-demand inkjet head", Sensors and Actuators A, Vol. 141, pp. 506-514.
- (7) D. P. H. Smith, 1986, "The electrohydrodynamic atomization of liquids," IEEE Trans. Ind. Appl. IA-22, pp. 527-534.
- (8) A. Jaworek and A. Krupa, 1998, "Classification of the modes of EHD spraying", J. Aerosol Sci., Vol. 30, pp. 873-893.
- (9) A. Speranza, M. Ghadiri, 2003, "Effect of electrostatic field on dripping of highly conductive and viscous liquids," Powder Technology, Vol. 135-136, pp. 361-366.
- (10) Sang Uk Son, Jeong Taek Oh, Sukhan Lee, Han Seo Ko, Yongjae Kim, Doyoung Byun, Jihye Yang and Hyeon Cheol Kim, 2005, "Fabrication and Performance Analysis of Electrostatic Microdroplet Ejector", IEEE ICM/HIMA-2005, Taipei, pp. 266-269.

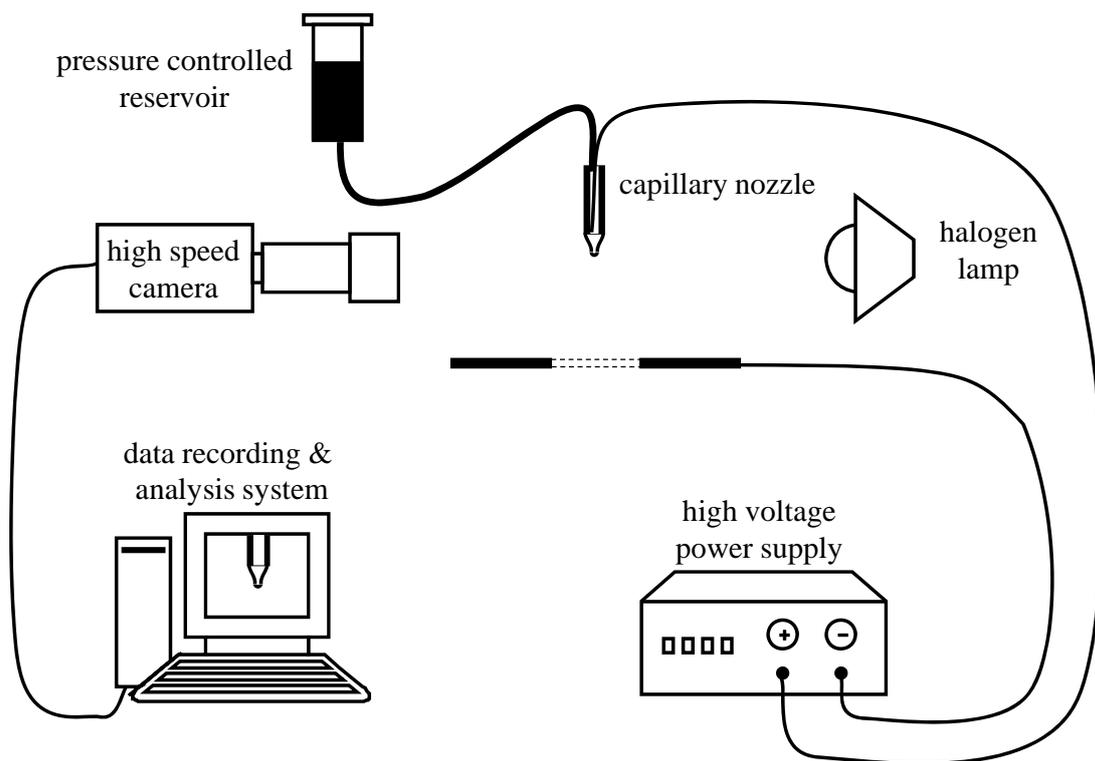


Fig. 1 Experimental setup

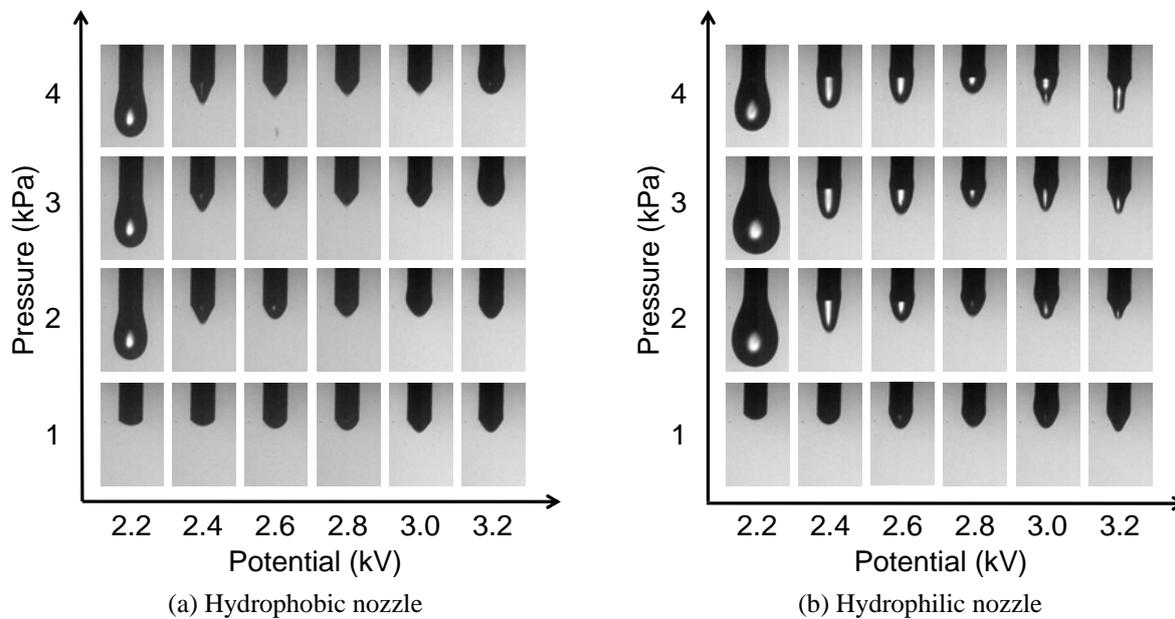


Fig. 2 Meniscus shape before ejection

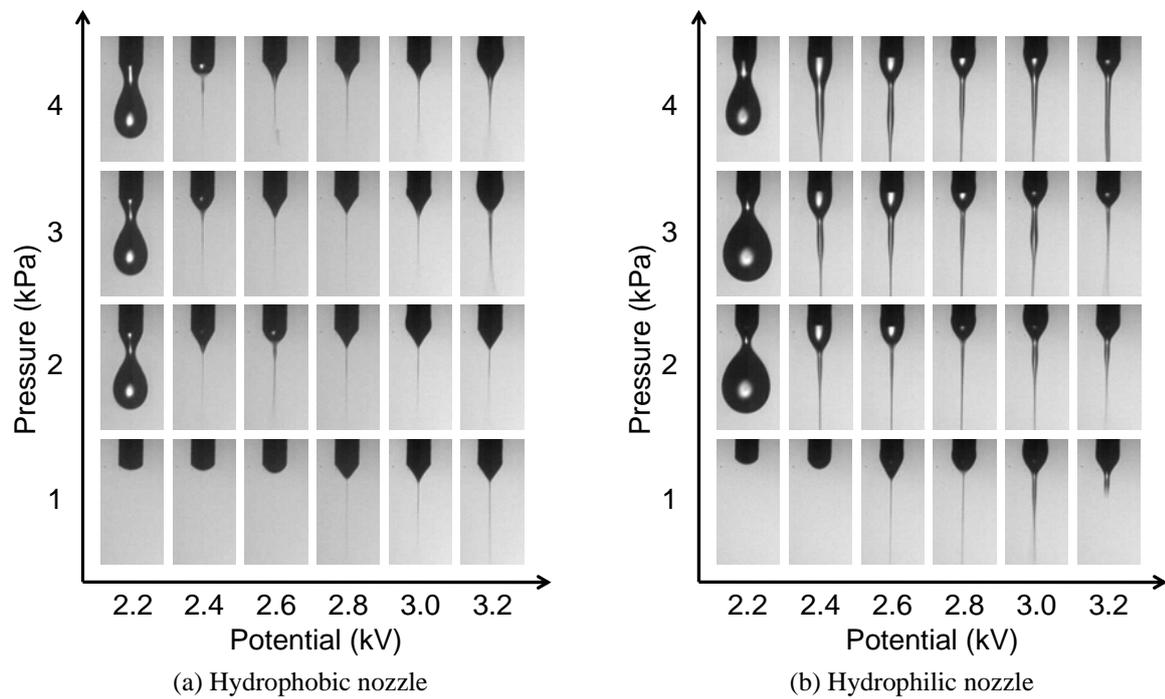


Fig. 3 Meniscus shape at the moment of ejection

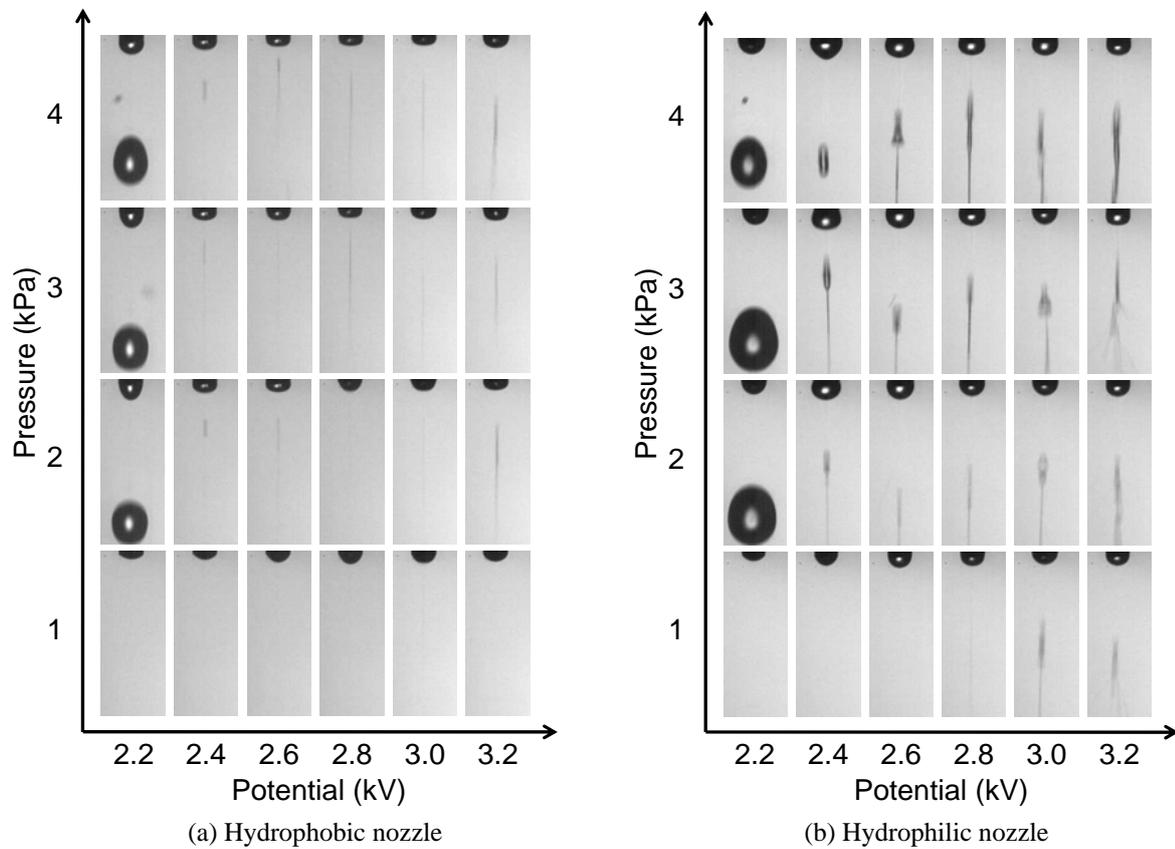


Fig. 4 Meniscus shape after ejection