

공기 압력과 전기장이 접목된 액적 분무에 관한 연구

황상연* · 성백훈* · 변도영†

Atomization of Liquid Via a Combined System of Air Pressure and Electric Field

Sangyeon Hwang, Baekhoon Seong and Doyoung Byun

Abstract. Conventional electrospray and air spray methods have the vulnerabilities of limited flow rate (throughput) and droplet size, respectively. Since high throughput with uniform size of droplet is required for various applications, an improved technique should be adopted. Here, we report a combined system of an air pressure and an electric field and evaluate the atomization performance of it. The air flow allowed applying high flow rate range and the electric field reinforced the atomization process to generate fine droplets. A correlation between two forces was investigated by comparing the droplet produced by each method. The atomized droplets were measured and visualized by image processing and a particle image velocimetry (PIV). The quantitative results were achieved from the parametric space and the effect of both forces was analyzed. The motion of charged droplets followed the outer electric field rather than the complex vortex in the shear layer so that the droplets accelerated directly toward the grounded collector.

Key Words: Flow Visualization(유동가시화), Electrospray(전기 분무), Air atomizing(공기 분무)

1. 서 론

기판의 표면에 양질의 얇은 막을 형성하는 기술은 코팅 산업에서 주된 목표이다. 다양한 응용분야에서 균일하게 도포된 박막의 수요가 늘고 있으며, 대면적 박막 기술이 활발히 연구되고 있다.

박막을 코팅하는 방법은 electron beam evaporation과 sputtering을 이용한 건식 코팅, dipping, rod coating 그리고 spray 방식으로 대표되는 습식 코팅으로 구분된다. 습식 코팅은 균일하게 제어된 액적을 이용해 박막 두께의 조절이 용이하다는 점에서 대면적 박막 코팅 분야에서 대두되고 있으며, 저온 대기압 환경에서 공정이 가능하다는 점에서 건식 코팅과 차별화된다.⁽¹⁾ 종래의 액적 분무 기술로는 공기에 의한 용액의 미립화가 주로 사용되었으나, 미세 액적을 얻기 위해서는 큰 공기 역학적 힘이 요구되었다.⁽²⁾ 공기 분무는 높은 액체 유량에 적합하지만 빠른 공기 유동에 의해 원료의 불필요한 낭비와 불균일한 박막 형상이 발생하는 문제점이 있다. 이에 대한 해결방안으로 공기 유동 대신 전기력을 이용하는 전기 분무 방식이 제

안되었으나, 대면적 기판의 코팅에 필요한 액체 공급유량 수준에 못 미치는 낮은 성능으로 인해 도포 능력의 한계 점이 부각되고 있다.⁽³⁾

따라서, 본 연구에서는 공기 분무와 전기 분무의 각각의 장점을 취할 수 있는 통합된 기술을 통해 문제를 해결하고자 한다. 관련된 선행연구로는 Wang 등이 대전된 액적의 기체 흐름 내에서의 거동에 대해 가시화 하였으나, 전단층에서 발생하는 변화에 대한 연구는 보고된 바가 없다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 액적의 속도, 궤적, 크기 분포 등이 분사 특성으로써 고찰되었고, 전기장의 존재 유무에 따라 비교되었다. 이를 위해 고속 카메라를 이용해 분무되는 액적을 관찰하였으며, 그 결과를 PIV를 통해 분석하였다. 분무된 액적의 균일성을 정량적으로 분석하기 위해 위치에 따른 액적의 분포를 조건에 따라 비교하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 공기 분무와 전기 분무가 통합된 시스템을 이용해 분무된 액적을 정량적으로 관찰하였다.

† Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 300, Cheonchoen-dong, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do, E-mail: dybyun@skku.edu

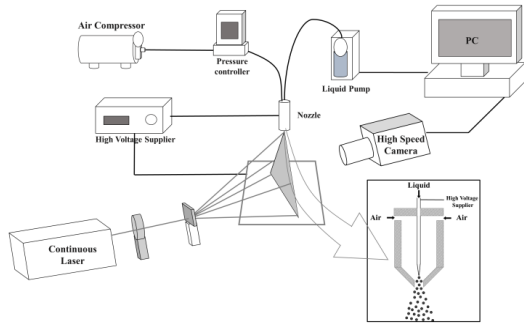


Fig. 1. Experimental setup for combined system of air pressure and electric field

실험 장치의 모습을 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 상온의 공기가 압축기와 압력 조절기 (Alicat Inc. PC-15PSIG-D)를 거쳐 노즐에 공급되었고, 압력은 0~20 kPa 범위에서 조절되었다. 액체 공급관은 내경 150 μm , 외경 200 μm 인 세라믹 팁에 액체를 공급하였고, 유량은 주사기 펌프 (Tricontinent Inc. C3000)에 의해 일정하게 유지되었다. 노즐과 바닥 판 사이에는 고전압 인가장치 (Ultra volt Inc. BT-GP)를 사용해 0~25 kV의 전위차를 발생시켰으며, 노즐에서 바닥 판을 향하는 방향의 전기장을 형성하였다. 액적이 분무되는 과정은 고속카메라 (Photron Inc. RS-APX)와 레이저를 이용해 관찰되었으며, 6000 fps로 녹화되었다. 녹화된 이미지를 PIV 기법으로 분석하기 위하여 Davis소프트웨어를 사용하였고, 결과로써 분무된 액적의 속도장을 얻었다. 액체의 물성에 따른 비교를 위해 에탄올과 물이 각각 공급 액체로 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기장이 액적 분무에 끼치는 영향

종래의 공기 분무에서는 낮은 공기 압력이 미세 액적을 발생시키기에 충분하지 않았다. 따라서, 공기 주입과 동시에 전기장을 발생함으로써 액적 미립화를 향상시킬 수 있음을 확인하고자 낮은 공기 압력에서 전기장 세기에 따른 변화를 관찰하였다. Fig. 2에 액체 유량 100 $\mu\text{l}/\text{min}$, 공기 압력 5 kPa에서 전기장의 세기에 따른 젯의 형태를 나타내었다. 공기 유동만을 가해 주었을 때, 공기에 의한 힘이 충분하지 않았기 때문에 액적은 미립화 되지 않고 노즐 직경과 비슷한 크기로 발생했다. 전위차를 점차 증가시키자 토출되는 액적의 크기는 감소하였으며 전기력에 의해 막대 모양으로 변형되었다. 5 kV의 전위차에도

달하였을 때 노즐로부터 액체의 단일 젯이 발생하였고, 7 kV의 전위차 이상에서는 두 갈래 이상의 다중 젯이 발생하였다. 공기의 주입 없이 전기장만을 가해 주었을 때 7 kV의 전위차에서 단일 젯이 발생한 점을 고려하면, 전기장과 공기 유동이 젯 발생에 상호보완적으로 작용하였음을 알 수 있다.

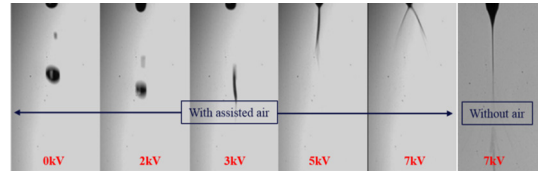


Fig. 2. Ejected droplet and jet under different electric fields with liquid flow rate of 100 $\mu\text{l}/\text{min}$ and applied air pressure of 5 kPa

전기 분무와 달리 공기 분무에서는 주위 공기 유동에 쉽게 액체가 밀려 나가기 때문에 큰 액체유량에서도 안정적인 상태를 유지할 수 있다. 이러한 공기 주입의 장점을 이용하면, 두 방식이 접목된 분무 방식을 통해 큰 액체유량에서도 전기력에 의해 액적이 미립화되는 효과를 얻을 수 있다. 또한, 이렇게 미립화된 액적들이 강한 전기력에 의해 전단층으로 소실되거나 직진성을 잃는 것을 방지할 수 있다. 이를 확인하기 위해 Fig. 3에 분무되는 액적의 고속카메라 이미지를 나타내었다. 비교적 낮은 전위차인 0~5 kV에서는 분무되는 영역 가장자리에서 전단층내에 부유하는 액적들을 확인할 수 있다. 10 kV 이상의 전위차에서는 강한 전기장에 의해 기판을 향하는 방향으로 액적이 힘을 받게 된다. 그 결과 부유하는 액적이 감소하고, 분무되는 각이 작아졌음을 알 수 있다.

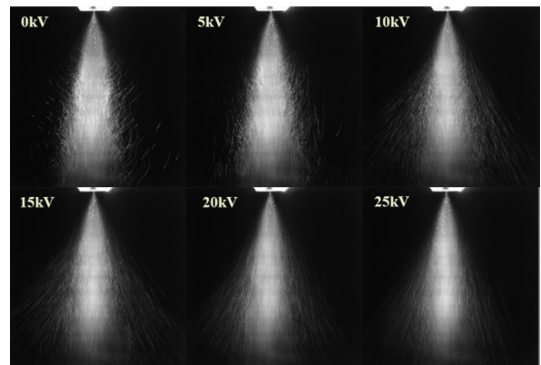


Fig. 3. Images of spray shape according to electric field from 3 ml/min of flow rate and 20 kPa of air pressure

3.2 전기장에 의한 액적 균일화 영향

Fig. 3에서 확인한 분무 형상을 바탕으로 전기장을 가해주었을 때의 액적 분포가 그렇지 않을 때에 비해 균일할 것으로 예상할 수 있다. 노즐에서 일정 거리 떨어진 지점의 수평선상에서 액적 개수의 분포를 살펴보면 분무의 균일성을 판단할 수 있다. Fig. 4에서 에탄올과 물의 분무에서 전기장이 액적 분포에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 노즐로부터 40 mm 아래의 수평선에서 그레이 스케일을 나타내면 Fig. 4(a)와 같다. 원본 이미지의 좌측 끝을 원점으로 정하고, 수평선상의 각 점의 그레이 스케일 값의 편차를 거리에 따라 나타냄으로써 분무의 균일성을 파악할 수 있다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)를 비교하면, 강한 공기 압력에서 가장자리에서 높은 편차를 보이며 불 균일한 분포를 보이지만 전기장의 세기를 증가시킬수록 중심과의 차이가 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(d)를 통해서도 전기장의 세기가 강할수록 중심과 가장자리의 차이가 감소함을 볼 수 있다. 이는 공기 전단층에서 부유하는 액적이 감소하였기 때문에 분무되는 영역에 걸쳐서 액적의 방향이 균일하게 조절되었음을 의미한다. 따라서, 전기장을 가해줌으로써 공기 유동에 의한 불 균일성을 극복할 수 있다.

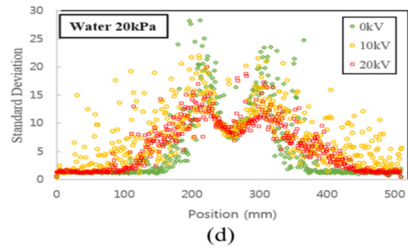
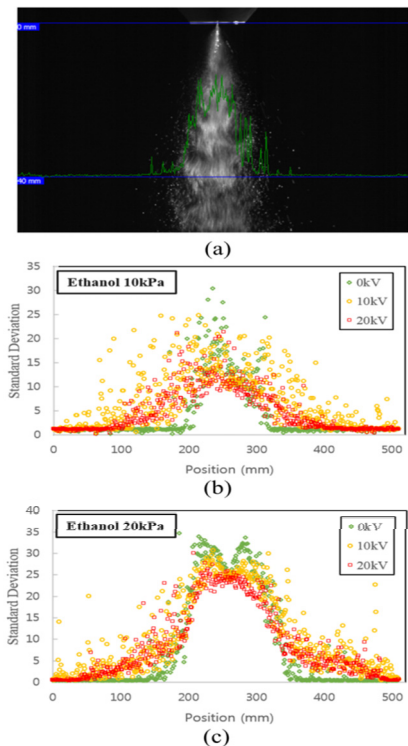


Fig. 4. Droplet distributions according to air pressure and applied voltage

3.2 전기장과 공기 압력이 액적 속도에 끼치는 영향

분무된 액적들의 속도 분포를 가시화 하기 위해서 PIV 기법을 사용하였다. 조사 영역은 노즐의 축을 기준으로 절반에 해당하는 영역이었으며, $15 \times 35 \text{ mm}^2$ 크기였다. Byun⁽⁵⁾ 등이 제안한 PIV-algorithm을 적용하여, Fig. 5에 공기 압력과 전기장 세기에 따른 결과를 나타내었다. 전기장을 가해주지 않았을 때는 공기 유동에 의해 액적이 운동하므로 높은 공기 압력에서 평균 변위가 더 크고, 중심에서 더 빠른 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(a)에서 전기장의 세기가 커질수록 평균 속도는 증가하였으며 중심과 가장자리의 차이가 줄어들었다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 더 높은 공기 압력에서(Fig. 5(b))는 같은 전기장 세기를 가해주더라도 중심과 가장자리의 차이가 여전히 남아있었다. 이를 통해 전기장이 액적의 속도 분포를 균일하게 만들어주지만, 높은 공기 압력에서는 전기장의 세기에 둔감하게 반응함을 알 수 있다.

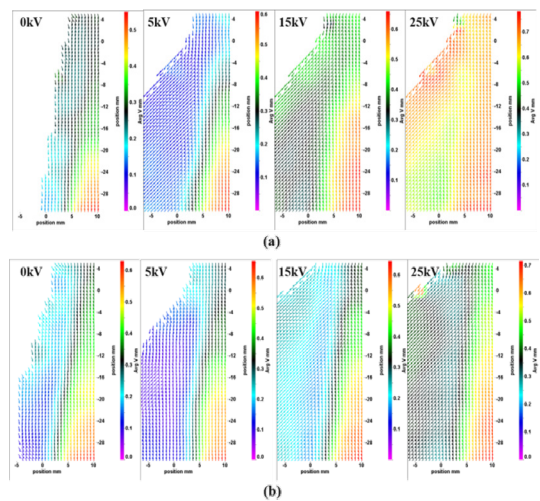


Fig. 5. PIV results of sprayed droplets according to applied voltage difference and air pressure of (a) 10 kPa and (b) 20 kPa

전기장과 공기 압력의 영향을 Fig. 6의 도표를 통해 확인히 확인할 수 있다. 10 kPa의 공기 압력에서는 전기장의 세기에 따라 민감하게 반응하여 평균 속도가 크게 증가하였다. 그에 반해 20 kPa에서는 공기 유동에 비해 전기력의 영향이 매우 작았으며, 무작위한 분포 또한 조절되지 않았다.

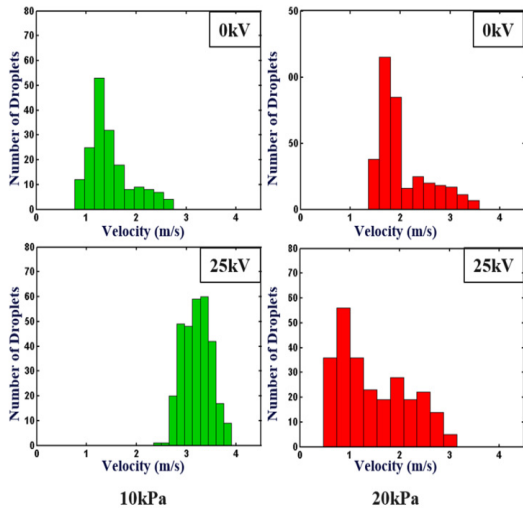


FIG. 6. Analysis of droplet velocity profile

4. 결론

본 연구에서는 공기 압력과 전기장이 접목된 액체 분무에 대한 실험을 실시하였다. 공기 유동이 전기장과 함께 액적에 가해졌을 때, 전기 분무에서보다 낮은 전위차에서 미립화가 가능했다. 분무 과정에서 변수들의 영향을 확인하기 위해서 image processing을 수행하였다. 전기력의 작용으로 공기의 흐름으로 부유하는 액적들의 속도가 조절되었고, 분무의 균일성을 향상시킬 수 있었다. 전기력

과 공기 유동의 결합을 통해 각자 가졌던 취약점들을 상호보완하고, 효과적인 대면적 박막 코팅이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단 연구과제 (2011-00151451)와 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원 연구과제 (No. 20113020010060)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Pham, V.H., Cuong, T.V., Hur, S.H., Shin, E.W., Kim, J.S., Chung, J.S., and Kim, E.J., 2010, "Fast and simple fabrication of a large transparent chemically- converted graphene film by spray-coating," *Carbon*, Vol.48, pp.1945-1951.
- (2) Lasheras, J., and Hopfinger, E., 2000, "Liquid jet instability and atomization in a coaxial gas stream," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.32, pp.275-308.
- (3) Cloupeau, M., and Prunet-Foch, B., 1989, "Electrostatic spraying of liquids in cone-jet mode," *J. Electrostat.*, Vol.22, pp.135-159.
- (4) Wang, J., Mao, H., and Hwang, W., 2009, "Experimental investigation of electrostatic spray of twin fluid atomization," *Chem. Eng. Commun.*, Vol.197, pp.213-222.
- (5) Byun, D., Kim, J., Ko, H.S., and Park, H.C., 2008, "Direct Measurement of slip flows in superhydrophobic microchannels with transverse grooves," *Physics of Fluids*, Vol.20, pp.113601.