

전기수력학적 분무 방식을 통해 토출된 비뉴턴성 및 점성유체의 충돌 거동에 대한 실험적 연구

서경덕* · 홍지우†

Experimental investigation on impinging behaviors of non-Newtonian and viscous droplets through electrohydrodynamic atomization

Kyoung Duck Seo* and Jiwoo Hong†

Abstract The stable deposition of impinging droplets on non-wetting substrates is of great importance for numerous industrial and scientific applications such as coating techniques, inkjet printing, spray cooling of heated surfaces. In this work, we systematically investigate impinging behaviors of non-Newtonian and viscous droplets ejected by electrohydrodynamic atomization.

Key Words : Electrohydrodynamic atomization (전기수력학 분무), Ejection (토출), Impingement (충돌), Non-Newtonian fluid (비뉴턴성 유체)

기호설명

- ρ : 밀도 [g/cm^3]
- γ : 표면장력 [$dyne/cm$]
- R : 액적의 반경 [cm]
- n : 진동모드

1. 서론

전기수력학적 분무(electrohydrodynamic atomization) 법은 인가된 전기장에 의한 노즐 팁의 액적의 Rayleigh instability에 기인하여 나노 혹은 마이크로

액적들이 Taylor cone 형태로 분사됨으로써 최종 기질에 코팅되는 방식을 말한다⁽¹⁾. 이 기술은 나노 스프레이로의 적용 뿐만 아니라 입자의 초미립화를 통한 마이크로 및 나노 입자 제조, 극미세 나노 섬유 제조, 세라믹 입자 및 단백질 입자 등의 박막 코팅, 기능성 입자의 표면 코팅, 유무기 다공성 박막 코팅, 유무기 마이크로 캡슐 및 멤브레인 제조 등의 다양한 분야에 응용될 수 있는 매우 유용한 기술로 평가되고 있다. 그리고 분사되는 액적들은 하전된 상태이기 때문에 기질 표면과의 상호작용에 의해 우수한 점착력을 나타내며, 하전된 액적간의 정전기적 반발력에 의해 기존의 공압 또는 초음파를 이용한 액적 분무 방식에서 발생하는 액적간의 응집을 최소화할 수 있어 균일한 분산이 가능하기 때문에 고른 코팅 품질을 이룩할 수 있다. 그리고 분사된 액적의 크기는 전기장의 세기, 노즐 크기 및 유입 속도 등에 따라 수십 나노 에서 수십

† Department of Mechanical Engineering, POSTECH, Pohang, Korea
E-mail: hjw1425@postech.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University, Iksan, Korea

마이크로 크기까지 다양한 크기 조절이 가능하기 때문에 기존의 코팅 방법으로는 어려웠던 박막 코팅이 가능하다. 또한 다양한 점도의 유체를 초저유속($pL \sim \mu L/min$)으로 분사가 가능하며 조절이 용이하기 때문에 용매 사용량을 최소화할 수 있다.

본 연구는 전기수력학적 분무 방식의 코팅 기술을 개발하는데 필요한 선행연구 단계로서, 분무된 액적과 부착 대상물 간의 점착성 제어 기술 개발과 관련하여 분무된 액적의 종류에 따른 액적의 기관 충돌 후의 수력학적 거동을 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

전기수력학적 분무 방식으로 분사되는 액적의 토출 형태와 액적이 기관에 충돌 한 후 거동을 관찰하기 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 실험장치를 구성하였다. 장치는 크게 액적을 생성시키기 위한 분무 장치와 액적 생성 과정 및 기관에 충돌한 후의 액적 거동을 관찰하기 위한 가시화 장치로 이루어져 있다. 실린지 펌프(KD Scientific, KDS-310)를 이용하여 실험 유체를 일정한 유속($10 \mu L/min$)으로 공급하였고, 전기공급 장치(신호발생기: Agilent 3322A, 고전압 증폭기: Trek Model 610E)를 이용하여 스테인리스스틸 재질의 노즐과 링 형상의 전극 사이에 전압을 인가함으로써 전기적으로 대전된 액적을 생성하였다. 이 때 노즐과 링 형상의 전극 사이의 간격은 5 mm로 고정하였다. 액적의 크기는 공급되는 유체의 유량과 노즐 팁의 크기, 인가된 전압의 크기에 의해 결정된다. 노즐은 스테인리스 재질의 니들(내경: 0.31 mm, 외경: 0.57 mm)을 가공하여 사용하였다. 노즐 팁에서의 액적 토출 형태, 충돌 후 변형된 액적의 형상을 관찰하기 위해 초고속카메라(Photron SA3)를 사용하였다. 충돌 직전의 액적의 직경과 속도는 초고속카메라를 통해 촬영한 이미지를 이용하여 자체 개발한 Matlab기반의 이미지 처리 코드를 기반으로 측정되었다. 본 연구에서 사용한 초고속 카메라는 최대 초당 5000 프레임(프레임 간의 시간 간격이 0.2 msec에 해당)의 이미지 획득 속도와 밀리미터 당 100 픽셀(한 픽셀이 0.01 mm에 해당)의 이미지 해

상도를 가지고있어, 액적의 시간적/공간적 거동에 대한 신뢰도 있는 정보들을 획득할 수 있다.

실험 유체로는 비뉴튼성 유체 효과를 관찰하기 Polyacrylamide (PAM)용액(Sigma Aldrich, 평균 분자량: 10,000, 50 wt% in H_2O)을 DI water에 희석시켜 사용하였으며 점도 효과를 관찰하기 위해 Glycerol (Deajung co.)을 DI water에 희석시켜 사용하였다. 실험 유체의 물성치는 Table 1과 같다. 점도와 표면장력은 각각 회전형 점도계(Bookfield DV-II+ Pro)와 표면장력계(Lauda TD2)를 사용하여 측정하였다. 기관은 소수성 성질의 Teflon film(두께: 5 μm)을 붙인 유리판을 사용하였다. 노즐과 기관 간의 거리는 24 mm로 고정하였다. 액적의 충돌로 인해 기관 위에 형성되는 액막은 에어 블로워로 제거하여 기관은 항상 건조 상태를 유지하도록 하였다.

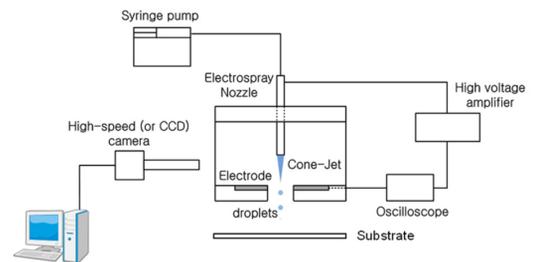


Fig. 1. Experimental setup of electrohydrodynamic atomization.

Table 1. Physical properties of working fluids.

Working fluids	Viscosity (cP)	Surface tension (dyne/cm)	Density (g/cm^3)
DI Water	1.1	72.43	0.99
Glycerol 20 wt%	2.1	70.07	0.94
Glycerol 50 wt%	6.5	68.68	1.01
Glycerol 70 wt%	30.5	66.79	1.05
PAM 5 wt%	2.2	64.63	0.92
PAM 10 wt%	4.1	68.81	0.92
PAM 25 wt%	20.9	66.67	0.93
PAM 40 wt%	171.0	69.11	1.03

3. 실험 결과

전기수력학적 분무 방식 중 dripping 모드로 토출된 액적이 소수성 기판과 충돌한 후의 거동을 정량적으로 분석하기 위하여 기판과 접하고 있는 액적의 바닥 반경의 시간적 변화를 측정하였다(Fig. 2). Fig. 2(a)에서 보듯이 DI water의 경우 기판과 충돌 후 저감쇠진동(underdamped oscillation)하고 있다. 액적의 진동은 여러 진동 모드 합으로 나타나는데 그 중 P2 형태 모드(액적의 퍼짐과 수축과정에 있어 2개의 노드(node)를 가지고 진동하는 모드)가 지배적이라는 가정하에 통상적인 자유진동모델^(2, 3)로부터 구한 진동 주기(식 1)를 계산하여 Table 2에 정리하였다. ρ , γ , R 은 각각 밀도, 표면장력, 반경을 나타내며 n 은 진동 모드를 나타낸다.

$$\tau_n = 2\pi \sqrt{\frac{\rho R^3}{n(n-1)(n+2)\gamma}} \quad (1)$$

하지만 실제 실험으로부터 구한 주기는 이보다 길게 나타난다. 그 이유는 액적이 자유진동을 하는 것이 아니라 기판에 구속된 진동을 하기 때문에 기판과의 마찰과 내부 유동의 점성에 의한 감쇠 때문이다. 또한 액적의 크기가 작아질수록 관성력의 영향이 줄어들어 평형상태에 빨리 도달하며 진동의 진폭 또한 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. PAM 고분자 수용액의 경우는 DI water 경우와 달리 최대로 퍼진 후 진동 없이 서서히 평형상태에 도달하는 것을 확인할 수 있었으며(Fig. 2(b), (c), (d)), Fig. 2(e)에서 보듯이 40 wt%의 PAM 고분자 수용액의 경우는 임계감쇠진동(critically damped oscillation)을 하고 있다. 이와 같은 이유는 두 가지로 생각해볼 수 있다. 첫 번째, 최대로 퍼진 후 액적이 수축할 때 표면에너지가 관성에너지와 위치에너지로 전환되는데 점성이 커질수록 소산되는 에너지가 증가하여 표면에너지에서 관성에너지로의 전환이 작아지기 때문이다. 두 번째로는 액적이 수축 시 접촉선(contact line) 근처의 전단응력(shear stress)에 의해 액적 내 엉킴상태(entanglement)의 고분자가 이완(relaxation)되어 수축하려고 하는 표면

Table 2. Natural oscillation period of droplets (P₂ mode)

Working fluids	Voltage			
	0 kV	3.2 kV	3.4 kV	3.6 kV
DI Water	13.6	5.9	4.6	2.8
Glycerol 20 wt%	12.9	5.9	4.6	2.3
Glycerol 50 wt%	12.8	5.6	4.2	-
Glycerol 70 wt%	12.7	5.3	3.5	-
PAM 5 wt%	13.7	6.4	5.3	3.7
PAM 10 wt%	13.1	6.2	5.1	3.6
PAM 25 wt%	13.5	7.1	6.0	4.7
PAM 40 wt%	14.3	8.2	6.8	6.0

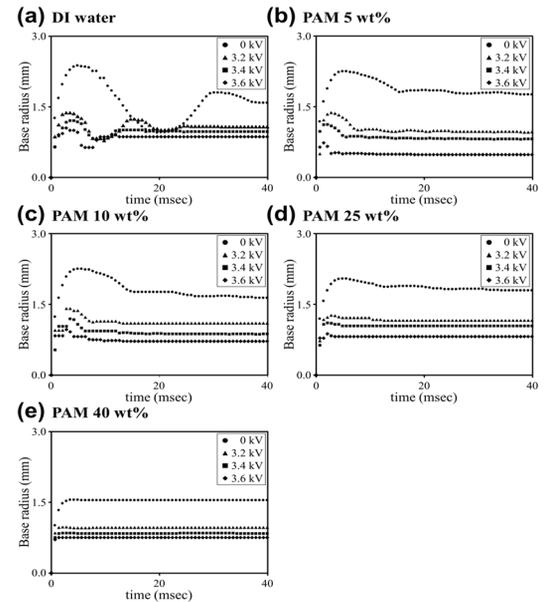


Fig. 2. Temporal variation of base radii of PAM droplets after impinging on hydrophobic surface (a) DI water, (b) PAM 5 wt%, (c) PAM 10 wt%, (d) PAM 25 wt%, (e) PAM 40 wt%

장력(surface tension)에 반하는 수직응력(normal stress)을 유발하기 때문이다^(4, 5).

충돌 이후 액적의 거동에 미치는 점도의 영향을 알아보기 위해 표면장력과 밀도는 거의 변화시키지 않은 채 실험 유체의 점도만을 변화시켜 실험을 수행하였다(Fig. 3). Fig. 3(b)를 보면 액적의 크

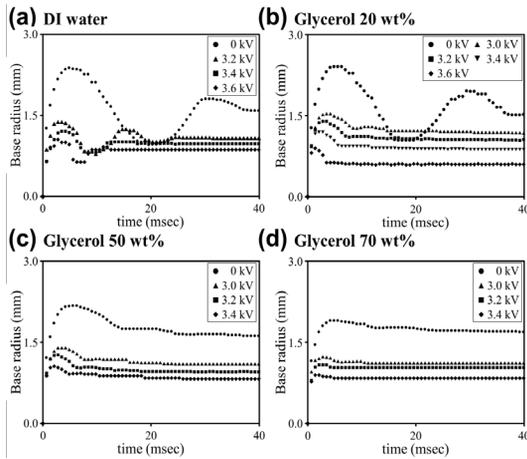


Fig. 3. Temporal variation of base radii of glycerol droplets after impinging on hydrophobic surface (a) DI water, (b) Glycerol 20 wt%, (c) Glycerol 50 wt%, (d) Glycerol 70 wt%

기가 가장 큰 경우(전압을 인가하지 않은 경우)에는 점도가 DI water의 약 2배여도 액적의 진동은 DI water의 경우(Fig. 3(a))와 유사하게 저감되진동을 하는 반면 액적의 크기가 작아 질수록 최대로 퍼진 후 진동이 거의 없이 평형 상태로 돌아오는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 액적의 크기가 큰 경우에는 관성력이 지배적인 반면에 액적의 크기가 작아질수록 점성이 미치는 영향이 커지기 때문이다.

Fig. 4에서 실험유체의 물성이 거의 비슷한 PAM 5 wt%와 Glycerol 20 wt% 수용액 액적의 바닥 반경 변화를 비교하였다. 점도와 크기가 거의 유사하지만 액적의 동적 거동은 확연히 다른 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 앞에서 언급 바와 같이 고분자의 이완에 의해 발생된 수직응력이 액적이 수축하는데 반하는 힘으로 작용하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 5는 뉴튼성 유체(DI water, glycerol 20 wt% 수용액)와 비뉴튼성 유체(PAM 5 wt%)간의 충돌 후 액적 거동의 차이를 보여주고 있다. 앞서 설명하였듯이 비뉴튼성 유체의 경우 액적이 최대로 퍼졌다가 오프라들 때 뉴튼성유체 보다 접촉선이 더 적게 돌아오는 것을 확인할 수 있다.

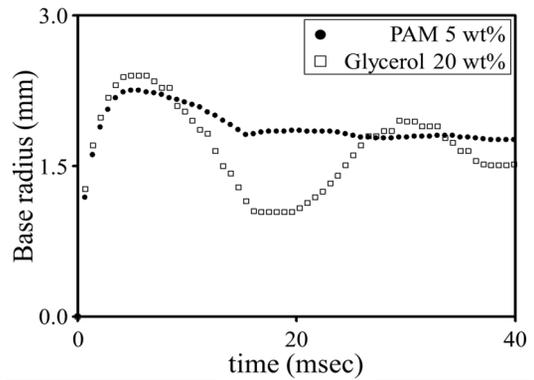


Fig. 4. Comparison of impacting behaviors between droplets of PAM 5 wt% and Glycerol 20 wt%

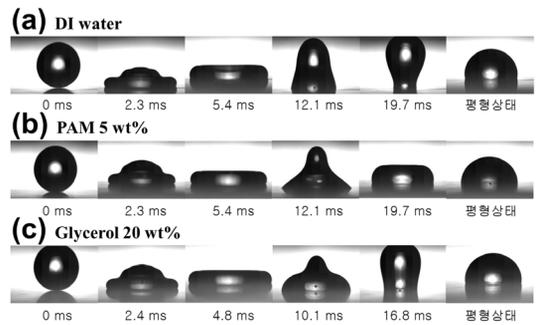


Fig. 5. Impinging behaviors of Newtonian and non-Newtonian droplets (a) DI water, (b) PAM 5 wt%, (c) Glycerol 20 wt%

4. 결론

분사된 액적의 젖음성 및 집착성 제어 기술과 관련하여 dripping 모드로 생성된 액적이 기관과 충돌 한 후 동적 거동을 살펴보았다. 액적의 종류 및 크기에 따른 기관과 충돌 후 액적의 동적 거동의 특징을 비교하기 위하여 액적의 바닥 반경의 시간적 변화를 촬영된 이미지로 추출하였다. 점성이 비슷한 뉴튼성 용액과 비뉴튼성 용액 액적이 소수성 기관 위에 충돌한 후 거동이 상이한 것을 확인하였다. 이를 통해서 기관과 충돌한 후 최대로 퍼졌던 비뉴튼성 용액 액적이 진동 없이 평형상태로 돌아오는 이유는 점성의 영향보다는 고분자의 이완에 의해 유발된 수직응력이 표면장력에 반하는 힘을 작용했기 때문이라고 생각할 수 있다.

본 연구에서는 정전기력을 이용하여 미세 액적

을 표면에 분사하는 기술의 선행 연구 단계로서, 액적 종류에 따른 소수성 기판에 액적이 충돌하였을 때의 수력학적 거동에 대해 고찰해보았다. 향후 연구에서는 본 연구에서 고려하지 않았던 전하량이 젖음성이나 부착성에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하고자 한다. 또한 균일한 나노 입자의 코팅을 위해 분사된 액적 내에서의 입자 성분들의 거동 및 분산매-입자와 표면-입자 간의 상호 관계를 규명함으로써 원하는 코팅 특성을 위한 성분 간의 최적 조성비 및 운전 조건을 도출할 계획이다.

후 기

이 논문은 2017학년도 원광대학교의 교비지원에 의해 수행됨.

REFERENCE

- 1) Cloupeau, M and Prunet-Foch, B, 1994, "Electrohydrodynamic spraying function modes: A critical review," *J. Aerosol Sci.* Vol. 25, pp.1021~1036.
- 2) Plesset, M. S., 1954, "On the stability of fluid flows with spherical symmetry," *J. Appl. Phys.* Vol. 25, pp.96-98.
- 3) Plesset, M. S. and Prosperetti, A., 1977, "Bubble dynamics and cavitation," *Ann. Rev. Fluid Mech.* Vol. 9, pp.145-185.
- 4) Son, Y., Kim, C., 2009, "Spreading of inkjet droplet of non-Newtonian fluid on solid surface with controlled contact angle at low Weber and Reynolds numbers," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* Vol. 162, pp.78-87.
- 5) Bartolo, D., Boudaoud, A., Narcy, G., and Bonn, D., 2007, "Dynamics of non-Newtonian droplets," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 99, 174502.