

잉크젯 프린팅에서 발생하는 연속 미소 액적의 바운싱 현상

조아라* · 김형수†

Bouncing Phenomena of Micro-droplet Train in Inkjet Printing

Ara Jo* and Hyungsoo Kim†

Abstract Interaction of a droplet and substrate is important to determine the coating and final deposition pattern in inkjet printing system. In particular, an accurate deposition of the droplet should be guaranteed for high-resolution patterning. In this study, we performed high-speed shadowgraph experiments on droplet train impact in inkjet system. From the high-speed images, we observed an unexpected bouncing phenomenon. We have found two factors affecting bouncing regime; the Weber number and the curvature of deposited droplet. Experimental results indicate that there is a critical curvature diameter of deposited droplet, which splits into bouncing and merging regime. From this result, we obtained a power-law behavior between the Weber number and the curvature. The understanding of bouncing phenomena helps to improve the accuracy and productivity of inkjet printing.

Key Words : Inkjet Printing(잉크젯 프린팅), Droplet Impact(액적 충돌), Droplet Bouncing(액적 바운싱)

기호설명

ρ : 밀도 (kg/m^3), v_0 : 액적 충돌 속도 (m/s)
 D_0 : 충돌 직전 액적 직경 (m)
 σ : 표면 장력 (N/m)

1. 서론

잉크젯 프린팅의 정교한 패턴 구현을 위해 다양한 연구가 필요하다. 전압 그래프의 최적화

이외에도, 유체역학에 기반한 연구 수행을 통해 잉크 물성치 및 액적 증발의 제어가 이루어지고 있다^(1,2). 특히나 기관 위 프린팅 시 발생하는 액적 비산 및 리바운드(rebound) 문제는, 미세 패턴 구현을 위해 해결이 필요한 분야이다. 실제 잉크젯 시스템에서는 낮은 We 수($We = \rho v_0^2 D_0 / \sigma$)의 액적 토출을 통해 리바운드 문제를 억제시키고 있으며, 이를 해결하기 위해 액적 충돌에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.

그동안 수행된 액적 충돌에 대한 논문 연구들을 살펴보면, 실제 잉크젯 토출 액적의 직경보다 현저히 큰 액적을 사용해 왔다^(3,4). 따라서 이들의 We 수는 잉크젯 토출 액적의 We 수보다 현저히 크므로, 실제 시스템에 적용하기에는 한계가 있다. 또한, 대부분의 연구에서 고체 평면

† Mechanical Engineering, KAIST,
Associate Professor
E-mail: hshk@kaist.ac.kr

* Mechanical Engineering, KAIST, M.S. Student

위 하나의 액적 충돌 문제만을 살펴보았다. 반면 실제 잉크젯 프린팅에서는 대부분 이미 기관에 도포된 프라이머(primer) 필름 위에 액적이 충돌하거나, 같은 위치에 액적이 반복 충돌하여 구조물이 형성된다⁵⁾.

본 연구에서는, 실제 잉크젯 토출 시스템을 구현하여 마이크로 단위의 액적 충돌 문제를 살펴보고자 한다. 이는 실제 잉크젯 시스템 액적의 We 수 범위에서 수행되어, 프린팅 기술에 대한 적용이 가능하다. 또한, 기관 위에 도포된 유체 위 재충돌에서 발생하는 바운싱(bouncing) 문제를 소개하고자 한다. 실제 시스템과 유사한 조건의 실험을 수행함으로써, 프린팅 시 리바운드 문제를 개선하는 법을 제시하도록 한다. 발생 현상을 살펴보기 위해 초고속 촬영 기법을 이용하였다.

2. 실험 방법

본 실험은 피에조 전자 디스펜싱 시스템(Microfab jet controller & driver) 으로 수행되었으며, 실험 개략도는 Fig. 1과 같다. 사용 유체는 실리콘 오일(10cSt)이며, 점성과 표면장력은 각각 9.3 mPa·s, 21 mN/m이다. 표면장력은 펜던트 액적 방법(Pendant drop method)을 통해 측정되었다. 액적

의 물성치 및 속도 등 토출 조건은 실제 토출 가능범위를 고려해 설정하였다^{5,6)}. 액적의 속도는 입력 전압 그래프의 상승시간(rise time)을 통해 조절되었다. 각 실험에 대해 액적 속도 및 직경을 측정하였으며, 직경 범위 40 - 65 μm 내에서 액적이 생성되었다. 충돌 직전 측정된 액적의 속도는 0.1857 - 0.6614 m/s 범위 내로 측정되었다. 사용된 기관은 슬라이드 유리다.

모든 실험은 초고속 카메라(Photron SA-X)로, 1초당 20,000프레임(20,000 fps) 이상 촬영되었다. 정확한 분석을 위하여 충돌 현상의 측면 촬영과 함께, Fig. 1과 같이 45°의 각도에서도 살펴 보았다. 측면에서 촬영한 영상의 해상도는 1024 × 1024 [px²]이며, 45°의 각도에서 촬영한 영상의 해상도는 640 × 480 [px²]이다. 1픽셀 당 1.11 - 1.17 μm 의 길이를 나타낸다. 실제 프린팅 시 액적 충돌 문제와 유사하게 관찰하기 위하여, 액적은 같은 위치에 일정한 주기를 가지고 재충돌하는 환경에서 실험을 실시하였다.

3. 실험 결과

3.1 기관 위 액적 곡률 직경 변화와 바운싱 현상

일반적으로 관성을 가진 액적이 액체 필름 혹

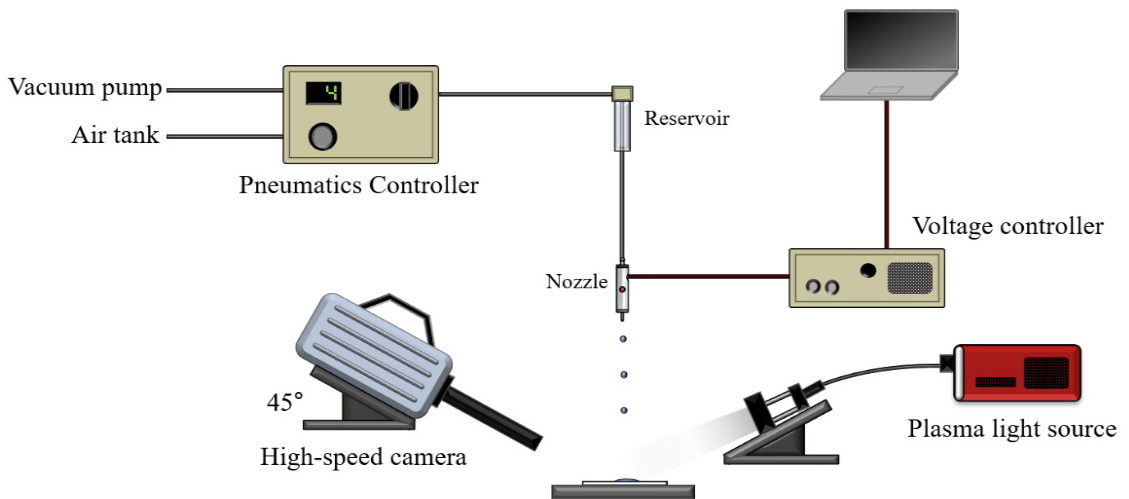


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

은 유체 풀(liquid pool)에 충돌 시, 액적과 필름 사이의 가스 층이 수백 나노미터 크기로 줄어들게 된다. 반데르 발스 힘으로 인해 가스 층이 깨지면 액적과 액체 필름의 재결합(merging) 현상이 일어난다^(7,8). 그러나 매우 낮은 We 수의 액적이 충돌 시 이러한 재결합 현상 대신 바운싱(bouncing)이 발생하는 것으로 알려져 있다^(9,10). 액적과 필름 사이 가스층을 깰 수 있는 관성력이 충분하지 않기 때문이다. 여러 연구에서 이러한 관성 한계(inertial limit)를 확인하였고, 특정 We 수 이하에서는 바운싱이 발생함을 필름 두께별로 관찰하였다⁽⁹⁾.

잉크젯 프린팅에서 발생하는 바운싱을 확인하기 위해 본 연구에서 또한 We 수에 따른 액적의 바운싱을 확인하였다. 프린팅 시 발생하는 액적의 반복 충돌은, 이상적인 액체 필름 위 액적의 충돌이 아닌 곡률이 있는 액적 위 충돌이다. 따라서 필름 두께 변화에 따라 액적의 바운싱 여부를 확인한 선행 연구들과 달리, 본 연구에서는 이미 쌓인 액적의 곡률 직경 변화에 대해 바운싱을 확인하였다.

동일 위치에 액적이 반복 충돌하는 경우 기관 위 쌓인 액적의 곡률 직경이 증가한다. Fig. 2에서 확인되는 바와 같이, 현저히 낮은 We 수 ($We \approx 0.78$)의 액적이 충돌했음에도 불구하고, 기관 위 액적의 곡률 직경이 작으면 바운싱 현

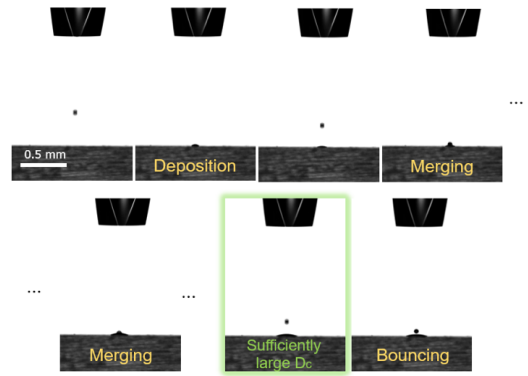


Fig. 2. Merging and bouncing events at $We \approx 0.78$ with different curvatures of deposited droplets.

상이 발생하지 않았다. 여러 번의 액적이 재결합되어 기관 위 액적 곡률 직경이 충분히 커지면, 이후 충돌하는 액적이 모두 바운싱됨을 확인하였다. 기관 위 액적 곡률 직경과 바운싱 현상의 관계를 확인하고자, 곡률 직경(mm)과 We 수에 따른 바운싱 여부를 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 매우 작은 We 수에서의 바운싱 현상

바운싱 여부를 결정하는 관성 한계를 관찰한 연구는 대부분 8 이상의 We 수에 대해 수행되었다. 본 연구에서는 선행 연구들과 달리 마이크로 단위의 액적으로 실험이 가능했기 때문에,

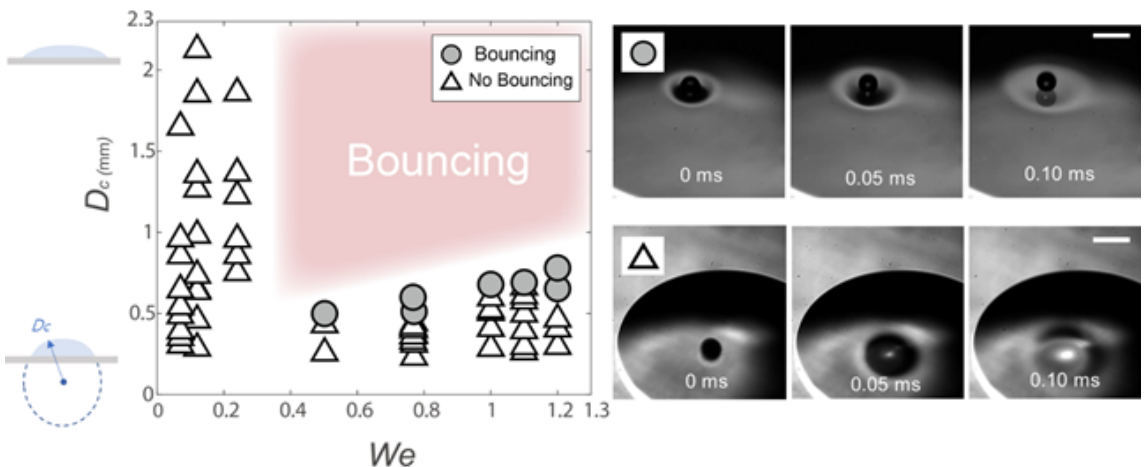


Fig. 3. Bouncing regime map with the Weber number and curvature diameter of the deposited droplets. Snapshots represent bouncing at $We \approx 0.77$ and no bouncing at $We \approx 0.12$. The scale bar denotes 0.1 mm.

매우 낮은 We 수에 대해 바운싱을 관찰할 수 있었다.

특정 We 한계 이하에서는 모두 바운싱이 일어난다고 예측한 그동안의 연구와 다른 결과가 확인되었다. Fig. 3에 따르면, 대략 0.4 이하의 We 수 액적이 충돌 시에는 기관 위 액적 곡률이 매우 크더라도 바운싱이 발생하지 않았다.

3.3 토이

액적이 충돌하는 기관 위 액적의 곡률 직경이 바운싱 여부를 결정함이 관찰되었다. 특정 곡률 직경 이상부터 액적의 바운싱이 발생하는 현상은, 곡률 직경이 커짐에 따라 충돌 액적과 기관 위 액적 사이의 가스층이 깨지기 어려움을 의미한다. 액체 필름 두께에 따라 액적 충돌 시 액적-필름 사이 가스층의 변형 정도가 다르다는 것이 이미 밝혀진 바 있다⁽¹¹⁾. 따라서 본 연구에서 확인된 곡률 직경과 바운싱의 상관관계 또한, 기관 위 액적의 곡률 직경이 가스층의 변형에 미친 영향의 결과임을 유추할 수 있다. 본 연구에서는 단순 액적-액체계면의 상호작용에 대해서만 살펴 보았으나, 정확한 원인 분석을 위해서는 선행 연구와 같이 간접계로 액적 바운싱 시 가스층의 프로파일(profile) 변화를 확인하는 것이 필요할 것이다.

대략 0.4 이하의 We 수에서 액적 바운싱이 발생하지 않는 것은, Fig. 4에 나타난 액적의 머징 현상을 0.05 ms 단위로 살펴봄으로써 설명될 수 있다. 액적 바운싱은 기관 위 액체 위 가스층에 충돌 이후, 액적이 가진 관성을 통해 바운싱이 발생한다. 그러나 We 수 0.4 이하처럼 현저히

낮은 We 수의 액적은, 그 관성이 충분하지 않기 때문에 리바운드하는 높이가 매우 짧다. 따라서 기관 위 변형된 액적 위에 다시 재충돌하게 되고 머징이 발생한다. 충분히 큰 We 수에서 발생하는 머징 현상과 본 연구에서 확인한 We 수 0.4 이하에서의 머징 현상은 이러한 점에서 차이가 있다. 다시 말해, 충분한 관성으로 첫 번째 접촉에서 즉각 머징되는 현상과 달리, 극히 낮은 We 수에서는 두 번째 접촉에서 머징이 발생한다(Fig. 4 참조).

결론적으로 바운싱의 유무를 결정하는 We 수와 기관 위 액적 곡률 직경을 찾을 수 있었다. 정교한 프린팅을 위해서는 토출된 초기의 액적이 반드시 퇴적되어야 한다. 따라서 본 연구에서 밝혀낸, 바운싱이 발생하지 않는 특정 We 수 구간과 기관 위 액적 곡률 직경은, 바운싱을 억제하기 위해 사용될 수 있을 것이다. 개선된 잉크젯 프린팅 기술을 위해, 토출 액적 속도나 부피에 대한 이상 지표로 활용될 수 있을 것이다.

4. 결론

잉크젯 반복 충돌에 있어 바운싱 여부를 결정하는 토출 액적의 We 수, 기관 위 액적의 곡률 직경 두 가지 요소에 대한 결과를 확인하였다. 선행연구들에서 제시한 관성 한계 이하에서 액적 바운싱이 발견되는 것을 관찰하였으며, 이는 기관 위 액적의 곡률의 영향을 받는다. 또한, 그동안의 연구보다 현저히 작은 We 수에 대해 액적 충돌을 수행함으로써, 기존에 알려진 머징 현상과 다른 머징 결과를 확인할 수 있었다. 이는 극히 작은 We 수의 액적이 충돌 시에도 머징

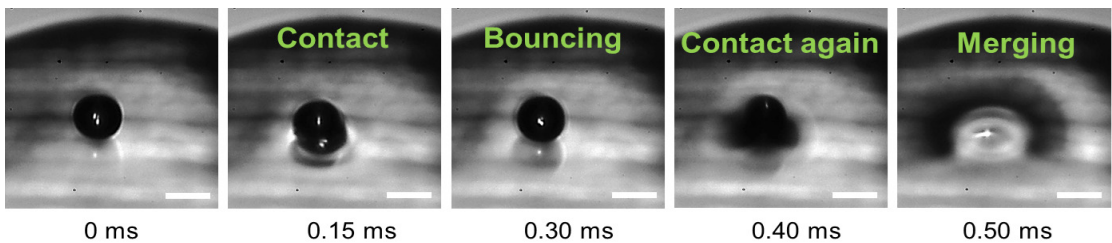


Fig. 4. Snapshots of merging events at $We \approx 0.05$. The scale bar denotes $80 \mu\text{m}$.

현상이 발생함을 시사한다.

본 연구에서는 잉크젯에서 지양되어야 하는 리바운드, 즉 바운싱 현상에 대해 살펴봄에 그 의의가 있다. 실제 잉크젯 토출에 사용되는 액체의 물성치와 속도, 액적 크기 등을 구현함으로써, 바운싱이 발생하지 않는 특정 조건을 제공한다. 현상에 대한 이론 모델 제시가 어렵다는 점에 한계가 있으나, 정교한 패턴 구현을 위한 프린팅 시스템의 지표로써 응용될 수 있을 것이다.

REFERENCE

- 1) Pyeon, J. et al., 2022, "Self-Induced Solutal Marangoni Flows Realize Coffee-Ring-Less Quantum Dot Microarrays with Extensive Geometric Tunability and Scalability," *Advanced Science*, Vol. 9(11), p.2104519.
- 2) Park, J. et al., 2020, "Control of Solutal Marangoni-driven Vortical Flows and Enhancement of Mixing Efficiency," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 561, pp.408-415.
- 3) Hoffman, H. et al., 2021, "Controlling Droplet Deposition with Surfactants," *Physical Review Fluids*, Vol. 6(3), p.033601.
- 4) Bartolo, D. et al., 2007, "Dynamics of Non-Newtonian Droplets," *Physical Review Letters*, Vol. 99(17), p.174502.
- 5) Lohse, D., 2021, "Fundamental Fluid Dynamics Challenges in Inkjet Printing," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 54, pp.349-382.
- 6) Liu, Y. et al., 2013, "Control of Droplet Formation by Operating Waveform for Inks with Various Viscosities in Piezoelectric Inkjet Printing," *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, Vol. 111(2), pp.509-516.
- 7) Gilet, T. and Bush, J., 2009, "The Fluid Trampoline: Droplets Bouncing on a Soap Film," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 625, pp.167-203.
- 8) Chrls G. E. and Mason, S. G., 1960, "The coalescence of liquid drops with flat liquid/liquid interfaces," *Journal of Colloid Interface Science*, Vol. 15(3), pp.236-267.
- 9) Tang, X. et al., 2018, "Bouncing-to-Merging Transition in Drop Impact on Liquid Film: Role of Liquid Viscosity," *Langmuir*, Vol. 34(8), pp.2654-2662.
- 10) Wu, Z. et al., 2020, "Small Droplet Bouncing on a Deep Pool," *Physics of Fluids*, Vol. 32, p.012107.
- 11) Tang, X. et al., 2019, "Bouncing Drop on Liquid Film : Dynamics of Interfacial Gas," *Physics of Fluids*, Vol. 31, p.013304.