

거친 발수 표면에 충돌하는 유체 방울의 팽창 및 수축 역학: 미세 유체 방울의 형성

김의진* · 김정현[†]

Spreading and retraction dynamics of a liquid droplet impacting rough hydrophobic surfaces: Formation of micrometer-sized drops

Uijin Kim* and Jeong-Hyun Kim[†]

Abstract In this study, we investigated the dynamics of a droplet impacting rough hydrophobic surfaces through high-speed imaging. Micrometer-sized structures with grooves and pillars were fabricated on smooth Polydimethylsiloxane (PDMS) surfaces by laser ablation. We used Newtonian and non-Newtonian liquid droplets to study the drop impact dynamics. De-ionized water and aqueous glycerin solutions were used for the Newtonian liquid droplet. The solutions of xanthan gum in water were prepared to provide elastic property to the Newtonian droplet. We found that the orientation of the surface structures affected the maximal spreading diameter of the droplet due to the degree of slippage. During the droplet retraction, the dynamic receding contact angles were measured to be around 90° or less. It resulted in the formation of the micro-capillary bridges between the receding droplet and the surface structures. Then, the rupture of the capillary bridge led to the formation of micrometer-sized droplets on top of the surface structures. The size of the microdroplets was found to increase with increasing the impacting velocity and viscosity of the Newtonian liquid droplets. However, the size of the isolated microdroplets decreased with enhancing the elasticity of the droplets, and the size of the non-Newtonian microdroplets was not affected by the impacting velocity.

Key Words : Droplet impact(액적 충돌), Surface pattern(표면 형태), Capillary bridge(캐필라리 브리지), Micrometer-sized droplet(마이크론 크기 유체 방울), High-speed imaging(초고속 이미지)

[†] Department of Mechanical System Design Engineering,
Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 01811, Korea, Assistant Professor
E-mail: kimjh@seoultech.ac.kr

* Department of Mechanical System Design Engineering,
Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 01811, Korea, Undergraduate Student

1. 서론

초발수 표면은 물을 싫어하는 화학적 조성을 가진 고체 표면에 마이크론 혹은 나노미터 크기의 미세 구조가 형성된 표면이다.⁽¹⁾ 물방울이 초발수 표면에 접촉하면 미세 구조 간 공기층이 형성되어 물과 표면 간의 접촉 면적이 감소하고 상호작용이 줄어들게 된다. 그 결과, 표면과 물방울 간의 정적

접촉각이 150° 이상이며 접촉각 이력이 10° 이하인 높은 액체 반발성을 보이게 되며, 자가세정, 방빙, 방오, 유체마찰 저항 저감 등의 효과를 가져오게 된다.⁽¹⁻³⁾ 초발수 표면은 주로 홈(groove)과 기둥(pillar) 형태의 미세구조를 일정한 간격으로 배열하여 제작하거나 계층적인 구조를 불균일하게 배치하여 완성한다.⁽⁴⁻⁸⁾ 이러한 미세구조들 중 기둥 형태의 구조는 액체 방울과 고체 표면 간의 접촉면적을 최소화하여 발수성을 향상시킬 수 있기 때문에 활발하게 연구가 진행되었다. 또한, 기둥 형태의 미세구조 발수성을 극대화하기 위하여 구조의 상부 너비가 하부보다 넓은 re-entrant 구조가 적용되기도 하였다.⁽⁹⁾

기둥 구조를 가진 초발수 표면과 유체와의 상호작용을 연구하기 위하여 크게 두 가지 방법이 사용되었다. 수조 속 유체에 초발수 표면을 담갔다 빼는 과정을 통해 고체 표면과 액체와의 상호작용을 확인하였으며,^(10,11) 또한, 액체 방울을 초발수 표면에 굴리거나 충돌시켜 액적의 동적 거동을 정량적으로 평가해왔다.⁽¹²⁻¹⁴⁾ 일반적으로 액체 방울이 초발수 표면 위에서 거동할 때 방울의 선두부는 높은 동전진 접촉각을 형성하며 미세 구조를 단계적으로 접촉하며 이동한다.⁽¹⁴⁾ 반면 액체 방울의 후방 끝단은 표면 미세 구조에 부착(pinning)되어 물방울과 미세 구조 간에 얇은 끈 형태의 capillary bridge를 형성하게 된다. 이러한 얇은 유체 끈은 물방울이 다음 미세 구조로 이동하려는 관성과 물방울과 미세 구조 간의 접촉력으로 인해 파단되며, 그 결과 표면 구조 상단에 미세 유체방울을 적층시키는 것으로 밝혀졌다.⁽¹⁵⁾ 이러한 미세 방울 크기는 표면의 발수성에 따라 마이크로에서 나노미터 단위로 다양하게 형성될 수 있으며, 광학 장비의 제한적인 공간분해능으로 인해 미세 방울 적층을 실시간으로 가시화하는 것은 매우 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Krumpfer et al.은 염화나트륨 용액을 사용하여 딥 코팅 이후 초발수 표면 구조 상단에 남은 염화나트륨을 가시화하여 미세 방울 적층에 관한 가설을 증명하였다.⁽¹⁰⁾ Dufour et al.은 광경화성 액체를 버섯 형태의 reentrant 구조를 가진 발수 표면에 굴려서 미세 방울 적층을 가시화하였다.⁽¹⁵⁾ 그 후, Yeong et al.은

향상된 공간분해능을 가진 초고속 이미지를 통해 마이크로 크기의 기둥 구조를 가진 발수 표면에서 미세 방울이 적층되는 것을 실시간으로 가시화하였다.⁽¹⁶⁾

기둥 구조를 함유한 발수 및 초발수 표면에 관한 연구는 방대하게 진행되어 왔으나 홈 구조를 가지는 표면에 적층되는 미세유체방울 관련 연구는 상대적으로 미비하다. 홈 구조를 가진 발수 표면은 나비 날개, 식물의 잎 등 자연계에서 흔히 관측되는 미세 구조이며, 유체 방울의 방향성을 제어할 수 있기에 공학적으로 활용가치가 높다.^(17,18) 본 연구에서는 홈 구조를 가진 발수 표면에 충돌하는 유체 방울의 거동을 확인하고 유체 방울의 초기 직경, 점도, 탄성의 정도를 변화시켜 표면 구조에 적층되는 미세 유체 방울 크기 변화를 관측하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험 표면은 매끈한 PDMS 표면에 홈 및 기둥 형태의 미세 구조를 펨토초 간격의 레이저 펄스를 사용하여 새겨 넣어 완성하였다. 공초점 레이저 현미경(LSM 800 MAT, Carl Zeiss)으로 표면 구조를

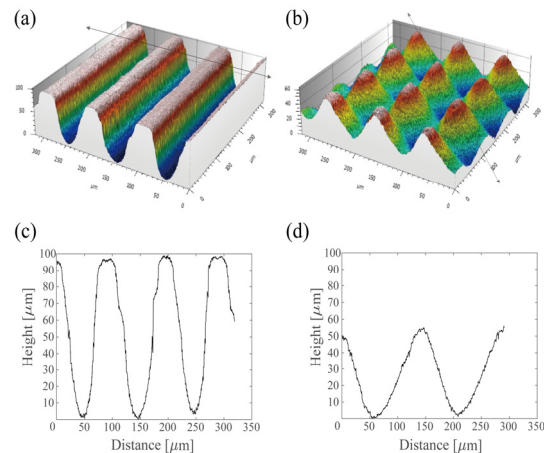


Fig. 1. 3D confocal images of the hydrophobic surface containing micrometer-sized (a) groove and (b) pillar structures. 2D surface profiles for (c) grooved and (d) pillar structures. The measurement lines of the surface profiles are included in 3D confocal images. The period of the structures is the same as $100 \mu\text{m}$.

Table 1. Static advancing and receding contact angles of water on the hydrophobic surfaces containing groove and pillar structures. Groove(p) indicates the direction of the water droplet is parallel to the grooved structures, while groove(t) indicates the direction of the water droplet is transverse to the grooved structures.

	Advancing contact angle	Receding contact angle
Groove(p)	161.5° ± 1.4°	121.4° ± 2.6°
Groove(t)	160.9° ± 0.7°	106.2° ± 1.3°
Pillar	162.5° ± 0.5°	129.4° ± 2.5°

확인한 결과 Fig. 1에 보이는 것처럼 수십 마이크론 크기의 concave 형태 미세 구조가 PDMS 표면 위에 형성된 것을 확인할 수 있다. 또한, 마이크론 크기의 구조들 위에 수백 나노미터 크기의 미세구조가 추가로 형성되어 멀티스케일 구조가 완성된 것이 확인되었다.

표면의 젖음성 정도를 확인하기 위하여 초순수 물을 사용하여 전진 및 후진 접촉각을 측정하였고 그 결과를 Table. 1에 제시하였다. 3D 프린터와 CO₂ 레이저 커터를 사용하여 낙하 높이 조절이 정밀하게 가능한 액적 발생 장치를 제작하였으며, 낙하할 때 액적의 상하좌우 진동을 줄이기 위해 끝단이 날카로운 주사 바늘이 사용되었다. 주사 바늘은 20G, 18G, 15G 가 사용되었으며 각각의 바늘은 약 2.79 ± 0.02 mm, 3.14 ± 0.06 mm, 3.52 ± 0.07 mm 직경의 유체 방울을 형성시킨다. 낙하 높이는 표면부터 주사 바늘까지 거리를 최소 20 cm에서 최대 80 cm까지 10 cm간격으로 변화시켜 $We(= \rho U_0 D_0 / \sigma)$ 수를 약 12에서 77까지 증가시켰다. 여기서 ρ , U_0 , D_0 , σ 는 유체 방울의 밀도, 충돌 속도, 초기 직경, 표면장력이다. 미세 구조를 가진 발수성 표면 위에 충돌하는 유체 방울의 거동을 분석하기 위해 초고속 카메라와 슈퍼마이크로 렌즈를 사용하였다. 1 픽셀당 약 4µm의 공간분해능과 약 0.09ms의 시간 분해능으로 영상이 촬영되었다. 실시간으로 촬영된 영상은 ImageJ를 통해 액적의 최대 퍼짐 직경(D_{max}),

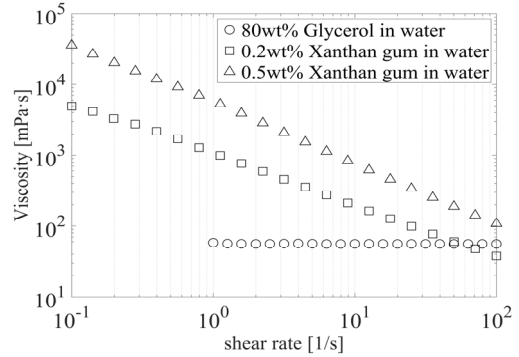


Fig. 2. Steady shear viscosity measurements of the test liquids as a function of shear rate.

미세 유체 방울 형성 과정 및 크기(D_{micro}) 등이 정량적으로 평가되었다.

미세구조의 형태 및 방향에 따른 액적 충돌 거동 분석을 위해 홈구조가 유체 방울의 팽창 방향과 평행한 경우 (groove(p)), 홈구조가 유체방울의 팽창 방향과 수직인 경우 (groove(t)), 그리고 pillar 구조 세가지 경우에서 낙하실험을 진행하였다. 유체 방울의 표면 충돌 이후 팽창 및 수축에 관련된 거동은 주로 초순수 물을 사용하여 분석되었다. 유체 방울의 수축 과정에서 표면 구조에 적응되는 미세 유체 방울을 연구하기 위하여 유체 방울의 점도와 탄성의 정도를 변화시켜 실험을 추가적으로 진행하였다. 초순수 물에 80wt%의 글리세린을 혼합하여 물의 점도보다 약 56배 큰 뉴턴 유체를 제작하여 사용하였다. 또한, 초순수 물에 잔탄검을 0.2wt%와 0.5wt%의 비율로 혼합하여 전단 담화 (shear thinning) 유체를 제작하였고, 유체의 탄성 효과에 의한 미세 방울의 크기 변화를 관측하였다. 사용된 용액의 점도 정보는 Fig. 2에 제시되었다. 표면 구조에 적응되는 미세 유체 방울은 구조의 방향과 카메라 렌즈의 방향이 평행하게 정렬된 groove(t)의 경우에서 가시화되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유체 방울의 팽창과 수축 역학

홈과 기둥 구조를 가지는 발수 표면에 충돌하는 유체 방울의 거동을 정성적으로 설명하기 위하여

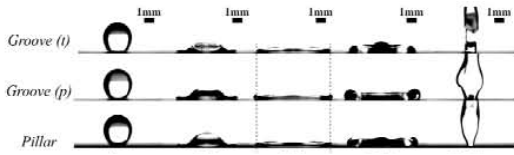


Fig. 3. Time evolution of a de-ionized water droplet ($D_0=3.1\text{mm}$) impacting the rough hydrophobic surfaces at $We = 55$.

We 수가 55에서 측정된 결과를 선정하여 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3에 보이는 것처럼 유체 방울은 충돌, 팽창, 수축, 되튐 현상을 보이며, 이러한 일련의 현상은 미세 구조의 형상과 미세 구조의 정렬 방향에 관계없이 공통적으로 관측되었다. 하지만, 유체 방울의 최대 팽창 크기와 수축 시기는 미세 구조의 형태와 정렬 방향에 따라 차이를 보였다. 유체 방울의 팽창 방향이 홈 구조의 방향과 평행하게 정렬되어 있는 groove(p)의 경우 groove(t)의 경우보다 유체 방울이 더 확장되는 것으로 관측되었다. 이는 문헌에 보고된 것과 같이 멀티스케일 미세구조의 존재로 인해 유체 방울의 미끄러짐(slippage)이 향상된 것에 기인한 것으로 보인다.⁽¹⁹⁾ 또한, We 수가 30보다 클 경우 유체 방울 충돌 압력이 미세 구조 사이의 공기층을 유지 시켜줄 수 있는 모세관 압력보다 커지게 되어 유체 방울이 표면 충돌 지점의 미세 구조로 침투하는 젖음 전이(wetting transition) 현상이 발생한다.⁽²⁰⁾ 이 경우, 유체 방울의 팽창 과정에서 groove(t) 방향으로 추가적인 저항이 발생하여 유체의 팽창 정도가 둔화되고, groove(p) 방향으로 유체방울의 팽창 정도가 증가하는 것으로 보인다. groove(p)의 경우 groove(t)의 경우보다 유체 방울 팽창 정도가 커짐에 따라 수축되는 시기가 지연되었고, 유체 방울의 되튐 현상이 보다 늦은 시점에 발생하는 것으로 관측되었다.

Fig. 3에 보여진 유체 방울의 형태적 거동을 정량적으로 평가하기 위하여 유체 방울의 너비(D)를 0.31ms 간격으로 측정하여 초기 직경(D_0)으로 무차원화 하였고, 그 결과를 Fig. 4에 제시하였다. 유체 방울의 팽창율과 수축율은 Fig. 4에서 제시된 시간과 무차원화 된 유체 방울 간의 기울기로 평가할 수 있는데, 팽창율은 약 0.57 ms^{-1} , 수축율은

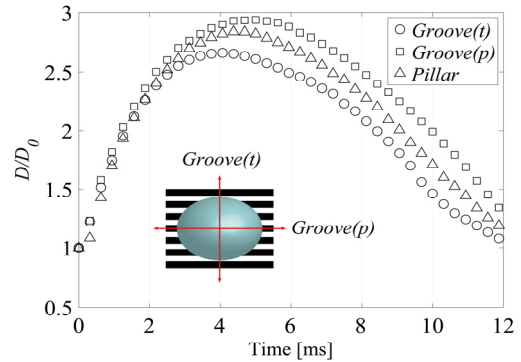


Fig. 4. Normalized droplet diameter of a de-ionized water droplet ($D_0=3.1\text{mm}$) as a function of time.

약 0.29 ms^{-1} 로 측정되었다. 초발수 표면에서 팽창율과 수축율이 거의 비슷한 수준으로 계산되는 것을 감안했을 때,⁽²¹⁾ 본 실험에 사용된 표면의 경우 유체 방울이 수축하는 과정에서 표면 미세 구조와의 상호 작용이 증가하여 수축율이 팽창율보다 상대적으로 낮게 관측된 것으로 보인다. 또한, 유체 방울의 팽창율과 수축율은 표면의 구조 형상과 정렬 방향에 큰 영향을 받지 않는 것으로 측정되었다. 하지만, 유체 방울이 최대 크기(D_{max})에 도달하는 시점은 groove(t)의 경우가 약 4ms 정도로 가장 빨랐으며, groove(p)의 경우 유체 방울의 미끄러짐 효과로 인해 5ms 정도로 가장 늦었다. 이와 같이 유체 방울이 최대 크기에 도달하는 시점이 지연됨에 따라 수축이 시작되는 시기도 늦춰져서 Fig. 3에 보이는 것과 같이 유체 방울의 후퇴되는 과정에서 형태학적 차이를 보인다.

세 가지 다른 표면 조건에서 We 수와 유체 방울의 최대 직경 비 (D_{max}/D_0) 간의 관계가 Fig. 5에 제시되었다. 대체적으로 We 수 증가에 따라 최대 직경 비가 증가하는 추세를 보였으나 높은 We 수에서 최대 직경 비 증가 양상은 표면 조건에 따라 다르게 관측되었다. We 수가 30보다 클 경우 유체 방울의 표면에서의 미끄러짐(slippage) 효과 향상과 충돌 중심부 젖음 전이(wetting transition) 현상으로 인해 groove(p), pillar, groove(t) 순서로 최대 직경비가 큰 것으로 관측되었다. 이는 홈 구조를 가진 발수성 표면에서 We 수가 30이상으로 증가함에 따라 비대칭적 유체 방울 팽창과 수축이 발생함을 암시한다.

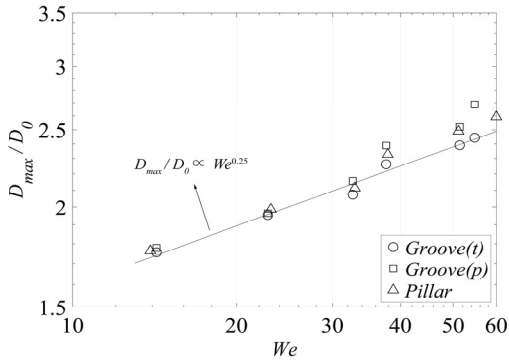


Fig. 5. Normalized maximal spreading diameter (D_{max} / D_0) of a droplet as a function of Weber number.

Pillar와 groove(t)의 경우 최대 직경비가 We 수의 약 1/4승에 비례하여 증가하며 초발수 표면의 scaling 결과($D_{max} / D_0 \propto We^{0.25}$)와 크게 다르지 않았다.⁽¹²⁾ groove(p)의 경우 slippage와 wetting transition 효과로 유체 방울이 구조 방향을 따라 더 팽창하여 기울기 값이 1/4보다 조금 더 큰 추세를 보였다.

3.2 미세 유체 방울 형성 및 크기 변화

Fig. 3에 보이는 것처럼 유체 방울은 표면 충돌 이후 관성에 의해 최대 크기로 팽창되고, 그 후 표면 장력에 의해 충돌 지점으로 수축하는 과정을 겪게 된다. 유체 방울의 수축 과정 (Fig. 3의 3ms 이후)에서 미세 유체 방울이 표면 구조 상단에 형성되는데, 시간 흐름에 따른 미세 유체 방울 형성 과정이 Fig. 6에 제시되었다. Fig. 6a에 보이는 것처럼 유체 방울이 수축할 때 미세 홈 구조의 불연속성으로 인해 유체 방울의 후방 끝단이 홈 구조에 부착(pinning)이 되고, 동 후진 접촉각이 90도 이하까지 감소하게 된다.⁽²⁰⁾ 그 결과, 유체 방울 후미와 미세 구조 간에 micro-capillary bridge가 형성된다 (Fig. 6b). 유체 방울이 충돌 지점으로 수축하려는 성질과 홈 구조에 부착된 유체 방울의 점착력이 경쟁하면서 캐필라리 브릿지는 연신 과정을 거치게 되고 (Fig. 6c), 결국 파단 되어 수십 마이크로 크기의 미세 유체 방울을 표면 구조위에 형성하게 된다. (Fig. 6d) 본 연구에 사용된 표면 중 미세

유체 방울은 홈 구조에서만 관측이 되었는데, 이는 기둥 구조에 형성된 미세 방울이 광학 장비의 공간분해능(4 μ m/pixel) 보다 더 작은 크기여서 명확하게 관측이 되지 않은 것으로 판단된다.

초순수 물방울을 사용하여 홈 구조에 형성된 미세 방울의 크기를 We 수의 변화에 따라 측정하였으며 산술평균 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 미세 유체 방울의 크기는 We 수 증가에 따라 약 10 μ m에서 17 μ m까지 증가하였으며, We 수가 30인 지점을 기준으로 크기 변화가 컸다. 하지만, concave 형태의 홈 구조 상단에서 형성될 수 있는 미세 방울의 크기가 제한적이어서 미세 방울의 크기는 가파르게 증가하지 않았다. 또한, 크기의 차이가 미미하나 동일한 We 수에서 액적의 초기 직경(D_0)이 클수록 미세 유체 방울의 크기가 상대적으로 크게 관측되었다.

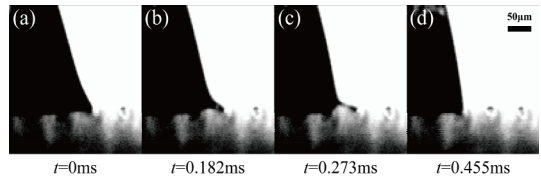


Fig. 6. Sequential images of an aqueous glycerin droplet ($D_0=3.1$ mm) receding on the rough hydrophobic surface containing grooved structures.

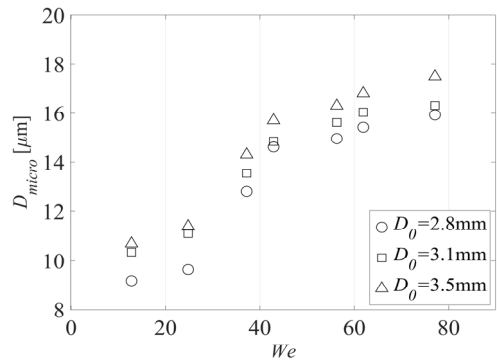


Fig. 7. Size of water droplets isolated on grooved structures of a rough hydrophobic surface as a function of Weber number. The data include results for an initial droplet size (D_0) of 2.8, 3.1, and 3.5mm.

Table 2. Size of liquid droplets isolated on grooved structures of a rough hydrophobic surface. The initial droplet size was 3.5mm. The unit of a droplet falling height is mm, while the unit of the isolated droplet is μm .

Height	Water	80wt% glycerin in water	0.2wt% xanthan in water	0.5wt% xanthan in water
20	11 \pm 2	21 \pm 3	6 \pm 2	5 \pm 1
80	18 \pm 3	26 \pm 4	7 \pm 2	6 \pm 1

유체의 점도와 탄성이 미세 방울 크기 형성에 미치는 영향을 대략적으로 확인하기 위하여 물보다 점도가 약 56배 높은 글리세린 수용액과 잔탄 겔을 초순수 물과 혼합한 전단 담화 유체를 각각 제작하여 높이가 20mm와 80mm인 두 경우에서 낙하 실험을 진행하였다. 유체 방울의 크기는 3.5mm로 유지하여 실험을 진행하였다. Table. 2에 제시된 것처럼, 동일한 We 수에서 유체 방울의 점도가 56배 높아질 경우 미세 방울의 크기가 약 50%가량 증가하는 결과를 보였다. 반면에, 유체에 탄성 효과가 부가될 경우 미세 구조 상단에 형성된 미세 방울의 크기는 동일한 We 수 기준으로 약 50~60% 정도 감소하는 경향을 보였다. 이는 유체 방울의 팽창 과정 중 늘어난 잔탄 사슬이 유체 방울이 수축되는 과정에서 복원력을 발생시켜 미세 구조 표면에 미세 방울을 덜 남기려는 경향을 보인 것으로 판단된다.

뉴턴 유체에서 관측된 것처럼 보통 We 수가 증가하면 충돌 지점으로 수축하려는 유체의 후퇴 속도도 증가하여 표면 구조에 큰 미세 방울을 형성하게 된다. 하지만, Table. 2에 제시된 것처럼 잔탄 혼합 용액은 We 수 증가에 따라 미세 유체 방울 크기 증가가 미약한 것으로 관측되었다. 그 이유를 알아보기 위하여 0.2wt%의 잔탄 혼합 유체 방울의 후퇴 속도를 측정하였다. 그 결과, We 수가 20인 경우 약 200mm/s, We 수가 80인 경우 약 334mm/s로 예상대로 We 수 증가에 따라 후퇴 속도가 증가하는 양상을 보였다. 하지만, 전단 담화 용액은 전단 속도 혹은 전단율이 증가할수록 유체의 점도가 낮아지는 경향이 있는데, 이는 유체 방울의 후퇴 속도가 증가할 경우 유체의 전단 점도가 낮아져 표

면 구조에 작은 미세 방울을 형성할 수 있음을 의미한다. 따라서, We 수 증가에 의한 미세 방울 크기 증가 효과는 전단 점도 감소로 인해 미미하게 관측된 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 홈 및 기둥 구조를 가지는 발수 표면에 충돌하는 유체 방울의 동적 변화를 연구하고 유체 방울의 수축 과정에서 표면 구조에 형성되는 미세 유체 방울의 생성 과정 및 크기 변화를 관측하였다. 유체 방울이 미세 구조를 가진 발수 표면에 충돌할 때 최대 직경비는 We 수의 증가에 따라 커졌으며, 동일한 We 수에서는 유체 방울의 미끄러짐 정도에 따라 groove(p), pillar, groove(t) 순서로 최대 직경비가 커지는 것으로 관측되었다. 유체 방울이 홈 구조를 가지는 발수 표면에서 수축할 때 유체 방울 끝단과 미세 구조 사이에 캐필러리 브리지가 생성되었으며, 파단 후 홈 구조 위에 미세 유체 방울을 형성하였다. 형성된 미세 유체 방울의 크기는 유체의 점도, 탄성, 낙하 높이에 따라 변하였다. 뉴턴 유체의 경우 We 수와 액적의 초기 직경 증가에 따라 미세 유체 방울의 크기가 증가했으며, 점도가 클수록 더 큰 미세 방울이 형성되었다. 유체에 탄성 효과가 부가될 경우 미세 유체 방울의 크기는 전반적으로 뉴턴 유체에 비해 작아지는 것으로 관측되었으며, 뉴턴 유체와는 달리 We 수 증가에 따른 미세 방울 크기 증가 양상은 상당히 둔화되었다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCE

- 1) Rothstein JP., 2010, "Slip on superhydrophobic surfaces," Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42, pp.89~109.
- 2) Cao L, Jones AK, Sikka VK, Wu J, Gao D., 2009,

- "Anti-icing superhydrophobic coatings," *Langmuir*, Vol. 25(21), pp.12444~12448.
- 3) Genzer J, Efimenko K., 2006, "Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review," *Biofouling*, Vol. 22(5), pp.339~360.
 - 4) Ou J, Perot B, Rothstein JP., 2004, "Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces," *Physics of Fluids*, Vol. 16(12), pp.4635~4643.
 - 5) Ou J, Rothstein JP., 2005, "Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces," *Physics of Fluids*, Vol. 17(10), pp.103606.
 - 6) Öner D, McCarthy TJ., 2000, "Ultrahydrophobic Surfaces. Effects of Topography Length Scales on Wettability," *Langmuir*, Vol. 16(20), pp.7777~7782.
 - 7) Nilsson MA, Daniello RJ, Rothstein JP., 2010, "A novel and inexpensive technique for creating superhydrophobic surfaces using Teflon and sandpaper," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 43(4), pp.045301.
 - 8) Kim J-H, Puranik R, Shang J, Harris D., 2020, "Robust Transferrable Superhydrophobic Surfaces," *Surface Engineering*, Vol. 36(6), pp.614~620.
 - 9) Liu T, Kim C-J., 2014, "Turning a surface superrepellent even to completely wetting liquids," *Science*, Vol. 346, pp.1096~1100.
 - 10) Krumpfer JW, McCarthy TJ., 2011, "Dip-Coating Crystallization on a Superhydrophobic Surface: A Million Mounted Crystals in a 1 cm² Array," *Journal of The American Chemical Society*, Vol. 133, pp.5764~5766.
 - 11) Kim J-H, Kavehpour PH, Rothstein JP., 2015, "Dynamic contact angle measurements on superhydrophobic surfaces," *Physics of Fluids*, Vol. 27, pp.032107.
 - 12) Clanet C, Béguin C, Richard D, Quéré D., 2004, "Maximal deformation of an impacting drop," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 517, pp.199~208.
 - 13) Yarin AL., 2006, "Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing....," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 38, pp.159~192.
 - 14) Schellenberger F, Encinas N, Vollmer D, Butt* H-J., 2016, "How Water Advances on Superhydrophobic Surfaces," *Physical Review Letters*, Vol. 116, pp.096101.
 - 15) Dufour R, Brunet P, Harnois M, Boukherroub R, Thomy V, Senez V., 2012, "Zipping Effect on Omniphobic Surfaces for Controlled Deposition of Minute Amounts of Fluid or Colloids," *Small*, Vol. 8(8), pp.1229~1236.
 - 16) Yeong YH, Milionis A, Loth E, Bayer IS., 2015, "Microscopic Receding Contact Line Dynamics on Pillar and Irregular Superhydrophobic Surfaces," *Scientific Reports*, Vol. 5, pp.8384.
 - 17) Feng L, Li S, Li Y, Li H, Zhang L, Zhai J, et al, 2002, "Super-Hydrophobic Surfaces: From Natural to Artificial," *Advanced Materials*, Vol. 14(24), pp.1857~1860.
 - 18) Bixler GD, Bhushan B., "Rice- and butterfly-wing effect inspired self-cleaning and low drag micro/nanopatterned surfaces in water, oil, and air flow," *Nanoscale*, Vol. 6, pp.76~96.
 - 19) Han J, Ryu S, Kim H, Sen P, Choi D, Nam Y, et al, 2018, "Anisotropic drop spreading on superhydrophobic grates during drop impact," *Soft Matter*, Vol. 14, pp.3760~3767.
 - 20) Kwon D, Lee S, Yeom E, 2019, "Experimental investigation on water repellency and anisotropic wettability of microgrooved polymer surfaces," *Experiments in Fluids*, Vol. 60, pp.169
 - 21) Kim J-H, Rothstein JP., 2016, "Droplet Impact Dynamics on Lubricant-Infused Superhydrophobic Surfaces: The Role of Viscosity Ratio," *Langmuir*, Vol. 32(40), pp.10166~10176.