

마이크로 표면주름 구조에 따른 물방울 동적거동에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Dynamic Behavior of a Water Droplet on Diverse Wrinkling Surfaces

백대현¹, Zhao Zhijun¹, 박상후^{2,✉}
Dae Hyeon Baek¹, Zhijun Zhao¹, and Sang-Hu Park^{2,✉}

¹ 부산대학교 기계공학부 대학원 (Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

² 부산대학교 기계공학부 / 정밀정형 및 금형가공연구소 (School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan National University)

✉ Corresponding author: sanghu@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-1011

Manuscript received: 2015.3.5. / Revised: 2015.5.18. / Accepted: 2015.5.19.

We fabricated multi-scale such as macro-, micro-, and multi-scale wrinkles by using repetitive volume dividing (RVD) method and thermal curing process. Also wrinkle surface was modified with coating of a self-assembled monolayer (SAM). We measured the contact angle of each wrinkled surface, and observed the behavior of droplets on sloping surface. Through experimental study, we found out that the contact angle was much higher in case of multi-scale and SAM coated wrinkles. And micro-scale wrinkle showed a high contact angle comparing with that of macro-scale wrinkle. Dynamic behaviors of a water droplet like sliding velocity on diverse wrinkled surfaces were dependent on their static contact angles. These results showed that hydro-dynamic characteristics were changed depending on the wrinkle structure and the material forming the wrinkle. These dynamic characteristics can be utilized in bio-chip, microfluidics, and many others in order to control easily chemical reactivity.

KEYWORDS: Micro-scale wrinkles (마이크로 주름), Hydro-dynamic characteristics (액적 동적거동 특성), Reactivity control (반응성 제어), Surface wrinkles (표면 주름)

기호설명

U = sliding velocity of a droplet (m/s)

ρ = density (kg/m^3)

g = gravitational acceleration (m/s^2)

V = volume of the droplet (m^3)

α = angle of inclined plane

w = width of contact surface of the droplet

θ_A = advancing contact angle ($^\circ$)

θ_R = receding contact angle ($^\circ$)

μ = coefficient of viscosity

L = circumference of contact surface of droplet (m)

A = distance to the boundary of Stokes' assumption (m)

λ = closest position from the contact line (m)

θ = contact angle ($^\circ$)

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

다양한 표면에 나타나는 주름 구조는 자연계에서 쉽게 관찰할 수 있다. 또한 인위적으로 생성된 구조물에서도 반복하중이나 좌굴 등으로 인하여 주름이 나타나기도 하며, 표면에 코팅을 하는 경우 물질이 경화될 때 발생하는 물질 간의 응력 불균형에 의해서 주름이 나타나기도 한다.

주름 구조로 인하여 표면적이 증가하기 때문에 다양한 응용분야에 적용될 수 있다. 예를 들면 주름 구조의 넓은 표면적을 이용하여 열전달이나 촉매의 반응 등을 촉진시키는 효과를 가진다. 또한 마이크로 주름구조로 인해 소수성 (hydrophobic) 특성을 나타내기도 한다. 이러한 특성을 이용해 방수처리, 유동제어, 오염방지 등에 활용할 수 있다.

현재까지 보고된 주름과 관련된 연구는 주름생성원리에 대한 이론연구와 제작기술에 관한 연구가 주를 이루었다. Huang 등은 표면에서 생성되는 주름 구조를 줄무늬 형 (stripes), 미로 형 (labyrinths), 오너무늬 형 (herringbones) 등으로 분류하여 해석하였고,¹ Yang 등은 주름의 최종 형상은 열역학적 에너지를 최소화하는 형태로 만들어 짐을 해석적으로 밝혔다.² 제작기술로는 주름을 생성하기 위해 PDMS (poly-dimethylsiloxane) 표면에 이온 빔을 조사하여 주름의 형상을 제어하는 방법,³ 미세 패턴을 이용하여 방향성을 가지는 주름을 생성하는 방법과⁴ 웨이퍼 상에 스핀 코팅한 광경화성 레진을 불완전 경화시킨 후 고온의 플레이트에서 급속 가열하여 표면 주름을 생성시키는 방법⁵ 등의 다양한 연구가 진행되었다. 최근에는 저비용으로 대면적 제작이 가능한 반복 접촉-분리 방식으로 주름 구조를 제작하는 방법과^{6,7} 약한 광중합과 열경화를 이용한 주름제작 방법이 제안되기도 하였다.⁸

본 연구에서는 다양한 방법으로 제작된 주름에 대하여 물방울의 동적 거동에 대하여 실험적으로 분석해 보았다. 이러한 연구를 통하여 주름구조를 가지는 마이크로 채널 내에서 유체거동의 특성을 예측할 수 있으며, 궁극적으로 표면구조를 이용하여 유동제어도 가능할 것으로 사료된다. 표면주름은 반복 접촉-분리 공정과^{6,7} 점진적 열경화를⁸ 통하여 다양한 형태와 크기를 가진 주름구조를 제작하였다.

2. 실험

2.1 재료

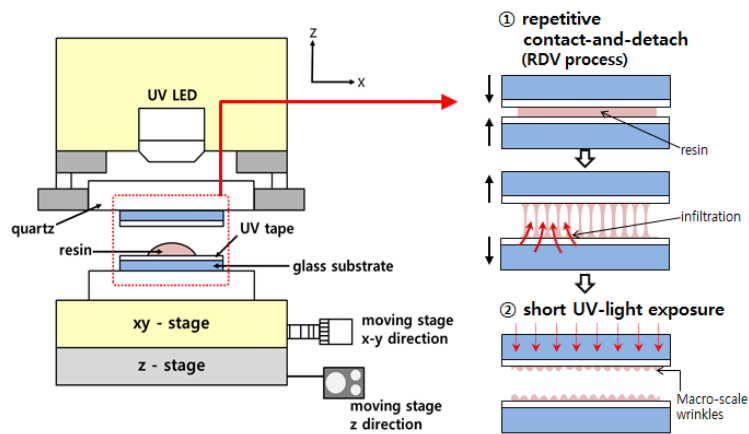
실험에 사용된 자외선 광경화 레진은 상용으로 구할 수 있는 NOA68T(Norland Co.)이다. 점성은 섭씨 25℃ 조건에서 약 20000~25000 cps이다. 자외선에 경화되는 조건은 약 4.5 J/cm²이고 자외선 흡수는 350~380nm 파장에서 잘 일어난다. 본 연구에 사용된 UV LED의 출력이 400 W/cm²이므로 이론적 계산에서 cm²의 면적 당 경화되는데 약 12 sec 소요된다. NOA68T 레진의 경우 광경화 접착제로도 많이 사용되며, 다른 물질과의 친화성이 높다.

2.2 주름 제작 장치 및 공정

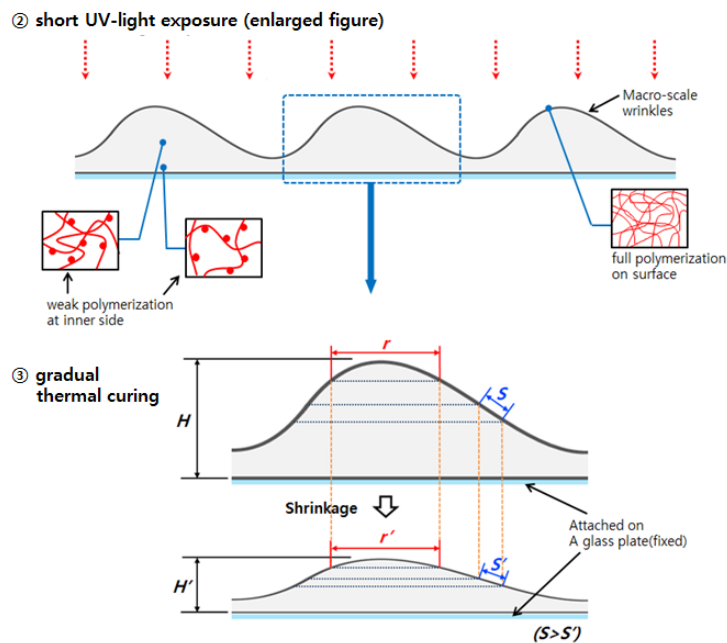
Fig. 1(a)에는 기존 연구에서 제시한 반복 접촉-분리 공정을 이용하여 매크로 스케일 주름 (macro-scale wrinkles)표면의 제작하는 방법과 반복 접촉-분리 공정이 가능한 리소그래피 장비 (TSF-400, Hutem, Korea)의 내부모듈을 나타내었다.^{6,7} 매크로 스케일 주름구조 표면은 NOA68T 자외선 광경화 레진 (UV photo-curable resin)이 도포된 아크릴 표면에 굴곡을 형성한 후 UV 광을 조사하여 제작한다.

Fig. 1(b)에서 나타난 것과 같이 UV를 매크로 스케일 주름 표면에 조사하면 레진의 수축이 발생한다. 매크로 스케일 주름이 수축하면서 주름의 높이가 감소하고 ($H \rightarrow H'$) 주름 굴곡의 길이도 감소한다. ($S \rightarrow S'$) 하지만 광경화 레진의 표면층은 표면 아래층에 비해 중합이 상대적으로 많이 일어나 고체화된 상태이며 따라서 전체 표면적을 그대로 유지하려고 한다. 이에 따라 매크로 스케일 주름이 수축하게 되면서 가장자리 부분에는 전체 표면적을 유지하기 위해 주름이 발생하며, 일정한 시간이 지난 후에는 매크로 스케일 주름과 그 가장자리를 둘러싼 형태로 점 형태(dot-shape)의 마이크로 스케일 주름이 공존하는 멀티 스케일 주름이 제작된다.

주름구조표면 상에 마이크로 스케일 주름구조만 형성되기 위한 과정은 Fig. 2에 나타나있으며, 멀티 스케일 주름 내에서의 마이크로 스케일 주름 형성 과정과 유사하다. 레진이 도포된 표면에 바로 UV를 조사하게 되면 레진의 표면과 표면 아래층의 두께차이가 있기 때문에 표면에서만 분자 구조의 분리 및 결합이 일어나게 되며 경화되지 않은 표면 아래층과는 물리적 성질의 차이가 생긴다. 표면 아래층은 UV를 조사하지 않고 천천히 자연 경화되며 액체인 레진이 고체화되고 수축함으로 인하여 표면 전체에 압축응력이 발생한다. 이 압축응력에 의해 표면 아래층과 물리적 성질이 다른



(a) The RDV process and weak UV-polymerization for macro-scale wrinkles



(b) The enlarged figure of weak UV-polymerization and the generation of multi-scale wrinkles by applying thermal curing process on macro-scale wrinkles which were generated by weakly polymerization

Fig. 1 Schematic diagram of the generation of macro-scale and multi-scale wrinkles

표면층이 변형하면서 마이크로 스케일 주름이 나타난다.⁸

생성된 주름은 400 배율까지 촬영 가능한 광학 현미경 (optical microscope, MIC-S39 model, MICRO Scopes INC, USA)을 이용하여 관찰하였다. 광학현미경을 통해 촬영된 주름의 형상은 스케일 별로 Fig. 3에 나타내었으며, 주름과 주름 사이 거리를 측정하고 주름구조 형상을 비교하였다.

매크로 스케일 주름구조의 경우 주름과 주름 사이 간격은 100~400 μm 로 측정되었으며 주름구조의 선폭은 200~300 μm 로 측정되었다. 또한 주름은 일정한 방향성이 없이 불규칙하게 나타났다. 반면 마이크로 스케일 주름의 경우 그 간격이 10~20 μm 로 측정되었으며 주름 선폭의 선형의 주름이 일정한 간격을 두고 정렬되어 있는 형상으로 나타났다. 하지만 표면 전체에 걸쳐 일정한 방향성을 가지지

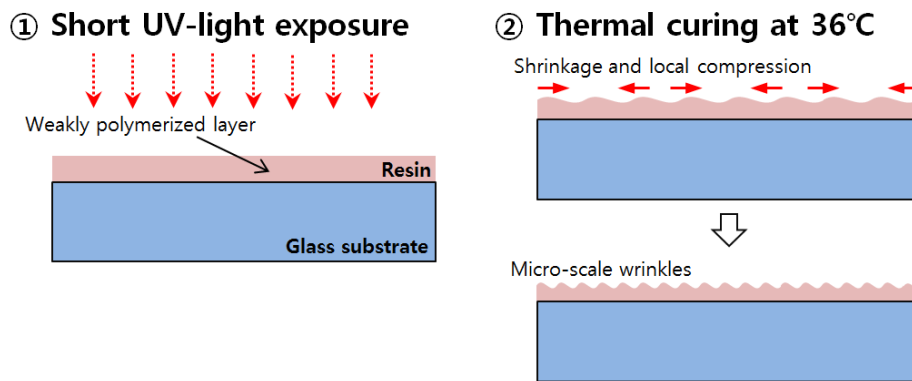


Fig. 2 A schematic of making micro-scale wrinkles

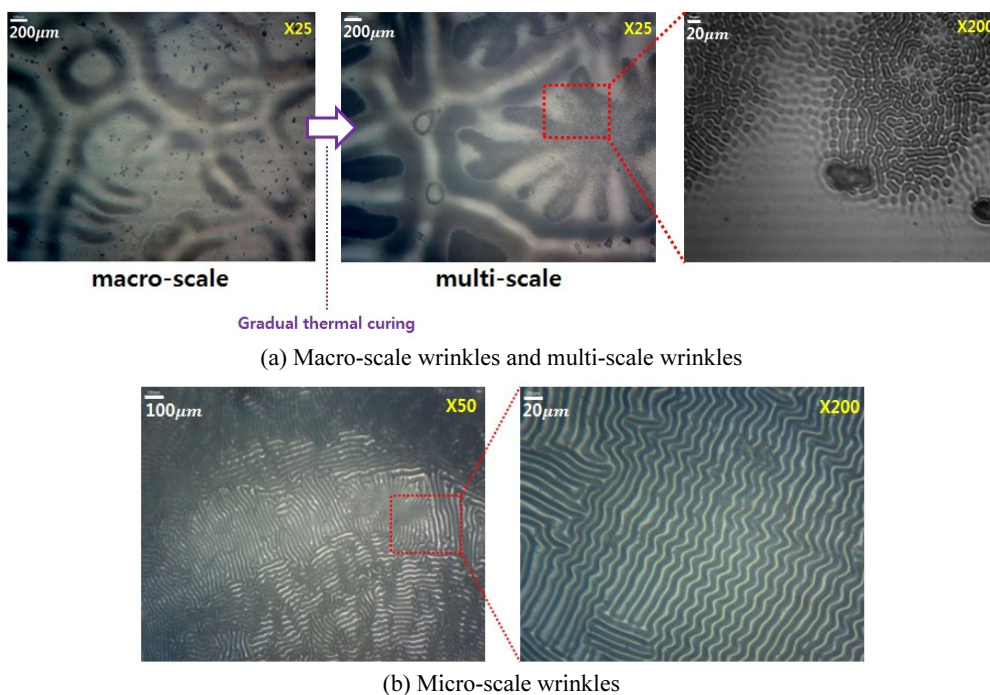


Fig. 3 Photographs of wrinkled structures captured by optical microscope

않고, 주름 표면 내에서 국부적인 방향성과 주름과 주름 사이 간격 등에서 차이를 보였다.

3. 주름표면의 물방울 거동 특성 분석

3.1 표면 거동 분석 방법

주름 구조에 따른 소수성 특성 분석을 위해 정적 표면 걸보기 접촉각 측정과 표면 경사각에 따른 물방울의 동적 거동에 대한 분석 실험을 진행

하였다. 걸보기 접촉각 측정은 표면 위에 물방울을 떨어뜨리고, 이때 형성되는 물방울과 주름 표면의 걸보기 접촉각을 접촉각 측정기 (contact angle analyzer, FireWire 400 Monochrome Industrial Camera, Imaginsource, Germany)를 이용하여 측정하도록 하였다. 접촉각 크기의 비교를 통하여 주름구조의 유무와 형상의 차이에 따라 달라지는 표면의 소수성 특성에 대하여 분석하도록 하였다.

표면 경사각에 따른 물방울의 동적 거동에 대

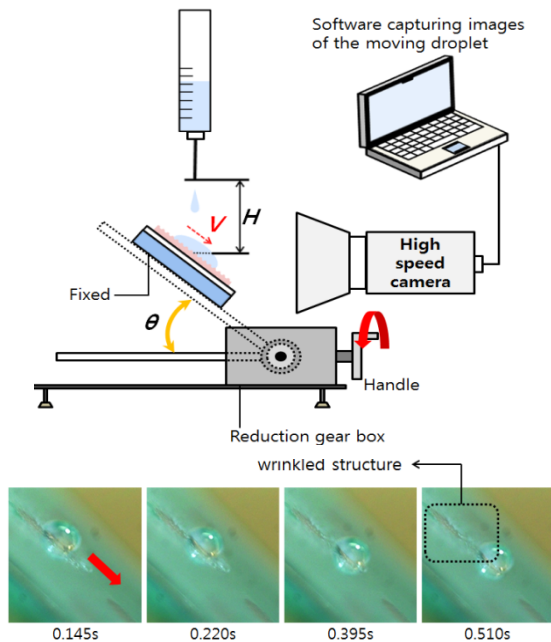


Fig. 4 Schematic diagram of measurement instrument for capturing the moving droplets, and time-lapse images captured by high speed camera

한 분석의 경우, 기존에 수행된 경사진 표면 상의 물방울의 유동에 관한 실험과 유사한 방식으로 실험장치를 구성하였다. 주름구조 표면과 바닥이 이루는 경사각을 달리하여 표면 위에서 거동하는 물방울의 유동을 비교, 분석하였다. 짧은 시간 동안의 물방울의 거동을 육안으로 분석하는 것에는 어려움이 따른다고 판단되어, Fig. 4에 나타난 것과 같이 접사렌즈를 이용, 초근접 접사하여 촬영하는 실험장치를 구성하였다.⁹ 표면은 알루미늄판에 고정되어 있으며 감속기(reduction gear box)에 연결되어 경사각을 설정할 수 있도록 하였다.

두 실험에서 떨어뜨리는 물방울의 양과 높이는 항상 일정하게 유지하였으며 표면 경사각에 따른 물방울 동적 거동 분석에 있어서 초고속 카메라의 촬영속도는 200프레임으로 고정시켰다. 촬영된 이미지는 초고속카메라와 연결된 PC에 설치된 전용 소프트웨어를 통해 저장되었다.

주름구조에 의해 나타나는 소수성 특성과 초소수성을 띠는 물질인 왁스(wax)로 코팅된 매끈한 표면이 가지는 소수성 특성의 차이를 알아보기 위하여 주름구조 표면과 동일한 실험을 통해 비교하였다. 또한 동일한 주름구조라 하더라도 주름구조

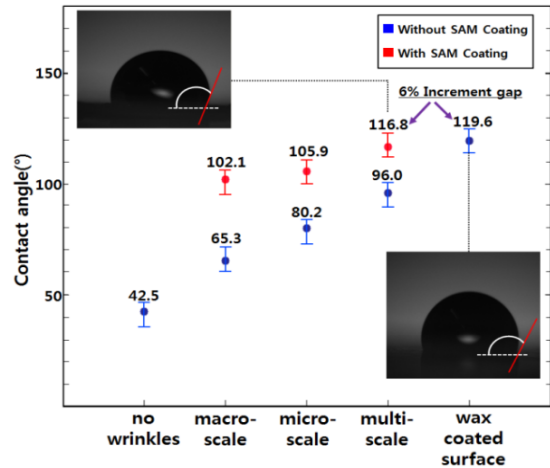


Fig. 5 The contact angle of each wrinkle structure with and without coating of SAM

표면을 구성하는 물질에 따라 다르게 나타나는 소수성 특성을 비교하기 위하여 NOA68T 자외선 광경화 레진에 비해 상대적으로 소수성 특성을 띠는 물질인 Dichlorodimethylsilane을 이용하여 기존에 제작하였던 주름 표면에 자기조립단분자막 (self-assembled monolayer, SAM)으로 코팅한 후 동일한 실험을 반복하였다.

3.2 정적 표면 겉보기 접촉각 측정

접촉각 측정은 주름구조가 없는 표면, 매크로, 멀티, 마이크로 스케일의 3가지 주름구조 표면, 주름구조 표면에 SAM 코팅한 주름구조 표면, 왁스로 코팅된 매끄러운 표면, 총 8개 표면에 대한 겉보기 접촉각을 측정하였다. 각 표면 별로 5회 측정하였으며 측정된 접촉각 크기의 평균을 결과값으로 명시하였다. Fig. 5에는 겉보기 접촉각 측정 실험에서 측정된 물방울의 형상과 겉보기 접촉각을 나타내었다. 주름구조를 가진 표면에서의 접촉각은 주름구조 형상에 따라 다르게 측정되었으며, 주름구조에 따라 각각 65.3°, 80.2°, 96°로 나타났으며, 이는 주름구조가 없는 표면에 비해 각각 53.6%, 88.7%, 126% 가량 증가한 것이다.

이러한 경향은 Fig. 6에 나타난 것과 같이 고체 표면 위 액체의 겉보기 접촉각에 관한 벤젤 모델(Wenzel's model)의 도식도를 통해 비교할 수 있다. 접촉각은 주름구조가 없는 표면의 접촉각 θ_{w1} 보다 주름구조 표면의 접촉각 θ_{w2} 가 더 높은 값을 가지는데, 표면의 굴곡진 주름 구조는 일반적인 매끄

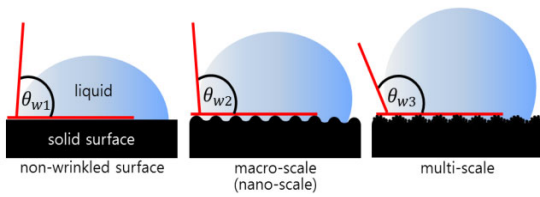


Fig. 6 Variation of contact angles of a droplet on a solid surface according to wrinkled structures

러운 표면과는 다르게 물방울과 표면 사이에 미세한 공기층을 만들며 이로 인한 물방울의 표면장력을 크게 하여 물방울의 표면과의 접촉각을 증가시킨다.¹⁰ 또한 같은 주름구조라 하더라도 매크로, 나노 스케일 주름구조 표면의 접촉각에 비해 이중구조를 가진 멀티 스케일 주름구조에서 더 큰 접촉각 (θ_{w3})이 나타나는데,¹¹ 이는 본 실험의 결과 매크로 스케일 비해 멀티 스케일에서 약 47% 증가하였으며 마이크로 스케일에 비해 약 19.7% 증분이 발생한 것으로 유사한 경향이 나타난 것을 알 수 있다.

SAM 코팅된 주름구조 표면의 경우는 코팅하지 않은 주름구조 표면에 비하여 접촉각 증분이 다르게 나타났다. 코팅된 주름구조 표면의 겉보기 접촉각은 코팅하지 않은 경우와 마찬가지로 주름구조 형상에 따라 다르게 나타났으며, 매크로, 마이크로, 멀티 스케일로 갈수록 증분이 증가하는 경향을 보였다. 또한 SAM 코팅된 주름구조 표면은 코팅되지 않은 주름구조에 비해 상대적으로 더 큰 접촉각 증분이 측정되었는데, 이는 주름구조 표면을 구성하는 레진에 비해 상대적으로 소수성을 띠는 물질로 SAM 코팅되었기 때문이라고 할 수 있다. 동일한 주름구조 표면이라고 하더라도 주름구조 표면을 구성하는 물질에 따라 다른 소수성 특성을 가지는 것이다.

왁스로 코팅된 매끈한 표면에서의 접촉각은 주름구조가 없는 표면에 비하여 약 181% 증가하였으며 본 실험에서 증분이 가장 높게 측정되었다. 또한 코팅되지 않은 주름구조 표면과 마찬가지로 멀티 스케일로 갈수록 증분이 증가하는 경향을 보였다. SAM 코팅된 멀티 스케일 주름구조 표면의 경우 증분의 차이는 약 6%로 나타났으며, 왁스로 코팅된 매끈한 표면과의 증분 차이가 최소로 나타났다.

3.3 표면 경사각에 따른 물방울의 동적 거동에 대한 분석

접촉각 측정 실험과 마찬가지로 8개 표면에 대

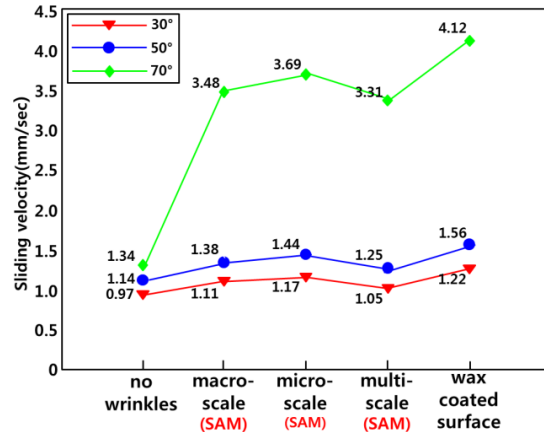


Fig. 7 A graph of sliding velocities at each wrinkled surface for three tilt angles

하여 실험하였다. 각 표면에 대해 경사각을 30°, 50°, 70°로 놓고 물방울의 유동 속도를 측정하였으며, 각 경사각에 대해 실험을 3회 반복하였다. 측정된 속도의 평균을 결과값으로 명시하였다.

SAM 코팅이 되어 있지 않은 주름구조 표면에서는 모든 실험 경사각에 대하여 물방울이 미끄러지지 않고 주름 표면에 고정되어 있어 속도 측정이 불가능하였다. 이는 NOA68T 레진의 높은 친수성과 주름구조의 굴곡에 의하여 물방울 유동에 저항이 생겨 나타난 것으로 판단되었다. 반면에 SAM 코팅된 주름 표면의 경우 레진 주름구조 표면에 비해 상대적으로 소수성을 띠며 경사면을 따라 물방울이 미끄러지는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 주름 구조에 따른 물방울 거동의 정확한 비교를 위하여 SAM으로 코팅된 주름구조 표면을 통해 평가하였다.

각 경사각 및 주름구조 표면에서 측정된 유동 속도의 평균은 Fig. 7에 나타내었다. 70°에서의 유동 속도를 기준으로 주름구조가 없는 표면과 주름구조를 가진 표면의 속도를 비교하였을 때, 매크로 스케일 주름구조에서 유동속도는 160% 증가하였으며 마이크로 스케일에서 175%, 멀티 스케일에서 147% 증가하였다.

접촉각 측정 실험에서 주름구조 형상에 따른 접촉각을 비교하였을 때 멀티 스케일 주름 구조에서 가장 큰 접촉각이 측정되었으며 따라서 멀티스케일 주름구조 표면에서 상대적으로 가장 큰 소수성을 가진다고 평가하였다. 이는 물방울과 맞닿는 표면의 이중 스케일 주름구조에 의하여 표면장력

이 상대적으로 가장 크게 나타나기 때문이라고 할 수 있다. 반면에 물방울의 동적 거동 분석 실험의 경우, 마이크로 스케일 주름구조 표면에서 유동 속도가 가장 빠르게 측정되었다. 마이크로 스케일 주름구조의 경우, 경사진 표면을 따라 흐르는 물방울의 유동에 장애가 되는 매크로 스케일의 굴곡이 없으며 마이크로 스케일 주름의 높이도 매크로 스케일 주름에 비해 상대적으로 낮다고 할 수 있다. 따라서 물방울 유동에 대한 저항이 멀티 스케일이나 매크로 스케일 주름구조 표면에 비해 상대적으로 낮으며, 경사면에서의 유동 속도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 반면에 멀티 스케일 주름구조 표면은 매크로 스케일 주름에 의한 저항과 마이크로 스케일 주름에 의한 저항이 합쳐진 형태이기 때문에 유동 저항이 상대적으로 높아 유동 속도가 낮게 나타난 것으로 여겨진다. 물방울의 표면 겹보기 접촉각 측정 실험과 표면 경사각에 따른 물방울의 동적 거동 분석 실험에서 나타난 차이점은 겹보기 접촉각의 크기와 유동 속도가 기존의 관계식을 따르지 않는다는 것이다.

세 가지 주름구조 표면 중에서 멀티 스케일에서 가장 높은 접촉각이 측정되었지만, 경사진 표면에서의 물방울의 유동 속도는 마이크로 스케일에서 가장 높게 측정되었다. 이러한 특성을 이용하여 표면과 이루는 겹보기 접촉각을 크게 하여 물질과 주름 표면이 맞는 표면적은 작게 유지시킴으로써 반응성을 낮게 하는 동시에 주름구조 표면 위에서의 물질의 유동성을 낮게 하여 물질의 이동을 제한시킬 수 있다. 이와는 반대로 접촉각을 작게 하여 반응성을 높인 채 큰 유동성을 가지도록 제어가 가능할 것으로 사료된다.

경사진 표면의 물방울의 정상 미끌림 속도는 이전의 경사진 고체 표면 위를 내려가는 액적의 미끌림 유동 연구에 의하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.¹²

$$U \sim \frac{\rho g V \sin \alpha - \sigma w (\cos \theta_R - \cos \theta_A)}{\mu L c(\theta) \ln(\Lambda / \lambda)} \quad (1)$$

$$c(\theta) = \sin^2 \theta / 2(\theta - \sin \theta \cos \theta) \quad (2)$$

U 는 물방울의 정상 미끌림 속도, ρ 는 물방울의 밀도, g 는 중력가속도, V 는 물방울의 부피, α 는 표면 경사각, σ 는 물방울의 표면장력, w 는 물방울과 표면이 맞는 접촉면적의 폭, θ_A 는 물방울의 전진 접촉각, θ_R 는 물방울의 후퇴 접촉각, μ 는 점성계수,

L 은 물방울 접촉면의 둘레, Λ 는 Stokes 가정이 적용되는 범위까지의 거리, λ 는 접촉선으로부터 가장 가까운 거리, θ 는 겹보기 접촉각이다.

이전의 경사진 고체 표면 위를 내려가는 액적의 미끌림 유동 연구에서 사용된 표면은 본 연구에서 사용된 표면과는 다르게 매끈한 표면이었으며, 또한 거친 표면에서의 물방울의 거동에 대한 연구가 진행되었으나 경사진 구조에 의한 특성 변화를 포함하지 않았다.¹³

본 실험에서 주름구조에 의해 굴곡지고 경사진 표면의 형상은 일정하지 않고 수시로 변하며, 또한 표면 경사에 관한 특성이 존재하기 때문에 이러한 점을 모두 고려할 필요가 있다. 따라서 식 (1)을 그대로 적용하기에는 무리가 있다고 판단하였으며, 주름구조 표면의 영향을 고려하여 식 (3)와 같이 나타내었다.

$$U \sim K \frac{\rho g V \sin \alpha - \sigma w (\cos \theta_R - \cos \theta_A)}{\mu L c(\theta) \ln(\Lambda / \lambda)} \quad (3)$$

주름구조의 물방울의 거동에 미치는 영향에 대한 주름구조 형상에 관한 상수 K 를 기존 연구에서 제시된 유동 속도 식 (3)에 추가하였다. 후속적인 연구를 통하여 형상에 관한 상수 K 를 정량적으로 나타낼 수 있을 것으로 사료되며, 이러한 연구 결과를 통해 물질의 표면에 다양한 주름 구조를 형성하여 주름 구조 및 주름을 구성하는 물질에 따라 표면 위 액적의 다양한 반응성 및 유동성을 정형적이고 정량적으로 이끌어낼 수 있으며 이러한 일련의 현상에 관해서도 매끄러운 경사진 표면에서의 액적의 해석적 연구¹⁴와 같이 주름구조 표면에서의 거동 역시 해석적인 분석이 가능할 것으로 예상된다.

4. 결론 및 고찰

접촉각 측정 실험의 경우 멀티 스케일 주름 표면에서 가장 큰 접촉각이 측정되었는데 이는 매크로와 마이크로 스케일의 이중 주름구조 형상에 의하여 표면장력이 상대적으로 더 크게 나타났기 때문이라고 사료된다. 또한 주름구조 표면을 구성하는 물질을 달리하여 실험함으로써 구성하는 물질에 따라서 동일한 주름구조라 하더라도 다른 소수성 특성이 나타나는 것을 알 수 있다.

물방울의 동적 거동 분석 실험에서는 마이크로 표면에서 물방울의 유동 속도가 가장 크게 나타났

으며 이는 물방울의 거동에 장애가 되는 매크로 스케일 주름이 매크로 스케일과 멀티 스케일 주름 구조 표면에 비해 거의 없기 때문이며, 멀티 스케일의 경우 주름구조가 이중으로 존재하는 형태이기 때문에 저항이 증가하여 속도가 가장 느리게 나타난 것으로 사료된다.

본 실험 이전에 다양한 주름구조 형상에 따른 표면 위 액적의 유동성에 관한 연구가 진행되었으나 일정한 패턴을 가진 표면 및 경사가 없는 표면에의 적용에 그쳤다. 또한 일정한 주름 패턴이 없는 주름표면에서의 액적에 관한 연구도 진행되었으나 액적의 동적 거동에 관한 부분까지는 미치지 못하였다.¹⁵

따라서 주름구조 및 경사의 특성을 모두 포함하는 본 실험 결과를 통해 기존 연구에서 제시된 유동속도의 식에 새로운 형상에 관한 상수를 추가하고 후속 연구를 통해 정형적이고 정량적인 식으로 나타내는 것이 가능하다면, 주름구조와 물질을 제어하여 원하는 반응성과, 경사지거나 특정한 형상을 지닌 표면에서의 유동을 의도대로 제어 가능한 주름표면의 제작이 가능하다고 여겨진다.

후 기

본 연구는 연구재단의 기초연구지원사업 과제 (No. 2014R1A1A2056852)와 GRDC지원사업 과제 (No.2009-00495)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

- Huang, Z., Hong, W., and Suo, Z., "Nonlinear Analyses of Wrinkles in a Film Bonded to a Compliant Substrate," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 53, No. 9, pp. 2101-2118, 2005.
- Yang, S., Khare, K., and Lin, P. C., "Harnessing Surface Wrinkle Patterns in Soft Matter," *Advanced Functional Materials*, Vol. 20, No. 16, pp. 2550-2564, 2010.
- Wu, D., Yin, Y., Xie, H., Shang, Y., Li, C., et al., "Controlling the Surface Buckling Wrinkles by Patterning the Material System of Hard-nano-film/soft-matter-substrate," *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, Vol. 57, No. 4, pp. 637-643, 2014.
- Yoon, J. S., Chang, S. H., Yoo, Y. E., and Choi, D. S., "An Experimental Study on Fabrication of Micro Patterns from Surface Wrinkling of Photoresist Layer," *Proc. of the KSME Spring Conference*, pp. 4294-4297, 2010.
- Basu, S. K., Scriven, L., Francis, L., and McCormick, A., "Mechanism of Wrinkle Formation in Curing Coatings," *Progress in Organic Coatings*, Vol. 53, No. 1, pp. 1-16, 2005.
- Kim, S.-J., Park, H.-J., Lee, J.-C., Park, S., Ireland, P., et al., "A Simple Method to Generate Hierarchical Nanoscale Structures on Microwrinkles for Hydrophobic Applications," *Materials Letters*, Vol. 105, pp. 50-53, 2013.
- Park, S.-H., Park, H.-J., Kim, S.-J., and Ireland, P., "Generation of Periodic Surface Wrinkles using a Single Layer Resin by a Repetitive Dividing Volume (RDV) Technique," *Microelectronic Engineering*, Vol. 106, pp. 13-20, 2013.
- Park, H.-J., Son, C., and Park, S.-H., "Fabrication of Micro-scale Wrinkles on a Curved Surface using Weak-polymerization and Surface Shrinkage," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 15, No. 11, pp. 2469-2471, 2014.
- Kang, B. and Lee, D., "On the Dynamic Behavior of a Liquid Droplet Impacting upon an Inclined Heated Surface," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, No. 4, pp. 380-387, 2000.
- Xia, D., Johnson, L. M., and López, G. P., "Anisotropic Wetting Surfaces with One-dimensional and Directional Structures: Fabrication Approaches, Wetting Properties and Potential Applications," *Advanced Materials*, Vol. 24, No. 10, pp. 1287-1302, 2012.
- Goel, P., Kumar, S., Sarkar, J., and Singh, J. P., "Mechanical Strain Induced Tunable Anisotropic Wetting on buckled PDMS Silver Nanorods Arrays," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 7, 2015.
- Kim, J. H., Kim, H. Y., Kang, B. H., and Lee, J. H., "A Study of Droplet Motion on an Inclined Surface," *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 13, No. 10, pp. 1025-1033, 2001.
- Miwa, M., Nakajima, A., Fujishima, A., Hashimoto, K., and Watanabe, T., "Effects of the Surface Roughness on Sliding Angles of Water Droplets on

- Superhydrophobic Surfaces,” *Langmuir*, Vol. 16, No. 13, pp. 5754-5760, 2000.
14. Šikalo, Š., Tropea, C., and Ganić, E., “Dynamic Wetting Angle of a Spreading Droplet,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 29, No. 7, pp. 795-802, 2005.
 15. Jansen, H. P., Sotthewes, K., Ganser, C., Teichert, C., Zandvliet, H. J., et al., “Tuning Kinetics to Control Droplet Shapes on Chemically Striped Patterned Surfaces,” *Langmuir*, Vol. 28, No. 37, pp. 13137-13142, 2012.