한국정밀공학회지 제 37 권 제 12 호 pp. 917-928
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 37, No. 12, pp. 917-928
December 2020 / 917
http://doi.org/10.7736/JKSPE.020.086
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

Check for updates

전력설비 동결 방지를 위한 액적 반동 현상 기반 방빙 기술

Anti-Icing Technology based on Drop Bouncing Dynamics for the Prevention of Freezing of Electric Power Equipment

이상현[1,*], 김재일[1,*], 성민호[1], 장혜진[1], 최건준[1], 정훈의[1,#]
Sang-Hyeon Lee[1,*], Jaeil Kim[1,*], Minho Seong[1], Hyejin Jang[1], Geonjun Choi[1], and Hoon Eui Jeong[1,#]

1 UNIST 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: hoonejeong@unist.ac.kr, TEL: +82-52-217-2339
ORCID: 0000-0002-1413-3774
*Sang-Hyeon Lee and Jaeil Kim are share equally first authorship

KEYWORDS: Freeze protection (동결 방지), Electric power utilities (전력설비), Anti-icing (방빙), Drop bouncing (액적 반동 현상), Contact time (접촉 시간)

In winter, electric power facilities such as solar panels, substations, power towers, and power lines suffer from freezing or ice accumulation problems due to exposure to harsh external environments. These problems result in unstable power supply, high maintenance costs, and severe economic and social losses. To address these problems, diverse anti-icing or deicing techniques including physical, thermal, and chemical approaches have been developed. However, these conventional approaches have limitations such as requirements for additional external energy, environmental toxicity, and low applicability. Recently, novel anti-icing surfaces based on unique drop bouncing dynamics have been developed by mimicking nano/micro-structures of natural systems. These anti-icing surfaces have attracted attention due to their high energy efficiency and environmental friendliness. It has been found that the superhydrophobic surfaces with specific nano/micro-structures can effectively remove the water droplets before the formation of ice nucleation by minimizing contact area and contact time between the droplets and the surface, thereby demonstrating excellent anti-icing properties. This review introduces recently developed anti-icing techniques based on the drop bouncing dynamics, and briefly describes the future direction of the anti-icing technology for stable power supply.

Manuscript received: September 1, 2020 / Revised: September 16, 2020 / Accepted: September 17, 2020

1. 서론

산업화 및 고도화된 현대 사회에서 전력 수요는 날이 갈수록 증가하고 있으며, 특히 지난 10년간 매년 3.2%가 넘는 증가 추세를 보이던 국내 연평균 전력 소비량은 2019년 520,499 GWh에 육박하게 되었다.[1] 이러한 현대 사회의 높은 전력 수요를 충족하기 위해서는 지속적이고 안정적인 전력 공급이 필수적이다. 하지만 전력 발전 및 수송을 담당하는 태양광 패널 및 풍력 발전기, 변전소, 송전탑 및 송전선로 등의 대부분의 전력설비는 외부환경 조건에 지속적으로 노출되며 이로 인해 각종 기능상의 문제를 야기한다. 특히, 겨울철 착빙 및 폭설로 인한 빙설 축적은 전력설비의 기능 이상을 야기하기 때문에 사회 전반의 안정적인 전력 공급에 치명적일 뿐만 아니라, 기기 손상 및 설비 붕괴, 이로 인한 정전 사태 등의 심각한 사고로 이어질 수 있다. 보다 구체적으로 변전소 및 송전탑의 경우, 빙설의 하중 축적으로 인한 송전탑 붕괴 문제 및 전선이 아래로 드리워지는 슬리트 점프(Sleet Jump) 현상, 송전선에 빙설이 부착되어 전선의 진동이 조장되는 갤러핑(Galloping) 현상 및 그에 따른 선간 접촉/단선, 그리고 착빙으로 인한 절연체 애자의 섬락 현상(Flashover)으로 인한 단락 및 손상 등의 문제가 발생한다. 또한, 겨울철 결빙으로 인한 문제는 다양한 전력 발전 시스템에서도 발생한다. 태양광 발전 패널 표면의 동결은 빛의 전력 전환 효율을 크게 떨어뜨리고, 풍력 발전기의 블레이드에 발생하는 결빙은 양력 감소 및 항력 증가로 인한 발전 성능 저하나 과부하 및 과도

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.

진동으로 인한 시스템 정지 등의 문제를 야기한다.[2-5] 실제로 2008년 중국에서는 폭설에 의한 슬리트 점프 현상으로 15,300개의 고압 전선과 184,000개의 송전탑이 손상되는 피해를 입었으며, 같은 해 미국 동북부에서도 눈보라로 인해 전선 및 송전탑이 손상되어 10억 달러 이상의 경제적 손실이 발생하였다.[6-9] 국내에서도 빙설해에 의한 송전선로 갤러핑 현상이 2012년 191건 발생하였고, 그 이후로도 매년 20건 이상 발생하고 있으며, 착빙성 비에 의한 슬리트 점프 현상으로 송전선로가 손상되는 사건이 발생하는 등 다양한 피해 사례들이 존재한다.[10] 이러한 피해는 경제적 손실뿐만 아니라 전력 공급의 차질로 인한 사회적, 기술적 문제를 야기한다. 따라서, 이러한 문제를 막기 위해서는 효과적인 전력설비 동결 방지 기술의 개발 및 활용이 필수적이다.

전력설비의 동결 방지를 위해서 물리적 제빙 방식, 가열을 이용한 방식, 화학 소재 도포 방식 등의 다양한 방빙 및 제빙 기술이 활용되고 있지만, 이러한 방식들은 추가적인 인력 및 외부 에너지가 요구되고 유해성 물질을 포함하는 등 뚜렷한 한계점을 지니고 있다. 이에 따라 외부 에너지나 유해물질 없이도 지속적으로 전력설비의 동결을 방지할 수 있는 새로운 기술이 요구되고 있다. 최근 자연의 다양한 스케일 및 형상의 표면 구조를 모사한 액적 반동 현상 기반의 방빙 표면 기술이 개발되었으며, 기존 방빙 및 제빙 기술을 대체할 수 있는 친환경 기술로서 활발히 연구되고 있다.[11-14] 이러한 기술은 충돌 액적의 반동 현상만으로 액적과 표면 사이의 접촉 시간 및 면적의 감소에 따른 빙정핵 생성 방지를 통해 표면을 결빙으로부터 지속적으로 보호할 수 있는 특징을 지니고 있다. 최근에는 다양한 크기 및 형상의 표면 구조를 통해 액적 반동 현상 기반의 동결 방지 성능이 더욱 강화된 방빙 표면들이 개발되고 있다. Fig. 1에서는 이러한 미세구조 기반 액적 반동 현상 기반 방빙 표면 기술의 발전 과정을 보여준다. 본 논문의 첫 번째 항목에서는 전력설비의 동결 방지를 위해 사용되던 종래의 방빙 및 제빙 기술에 대하여 간략하게 소개할 것이다. 두 번째 항목에서는 액적 반동 현상 기반의 방빙 표면의 특성 및 결빙 방지 메커니즘에 대하여 설명하고, 이어 세 번째 항목에서는 다양한 표면 형상의 크기 및 구조를 기반으로 새로운 액적 반동 현상을 유도하여 결빙을 방지할 수 있는 기술에 대한 최근 연구들을 소개한다. 마지막으로는 전력설비 방빙 기술 개발의 미래 방향과 전망에 대하여 간략히 기술할 예정이다.

2. 기존 방빙 및 제빙 기술 현황

안정적인 전력 공급을 위해 전력설비의 동결 방지가 중요한 만큼 오래 전부터 동결 방지를 위한 다양한 기술들이 개발 및 활용되어왔다. 일반적으로 종래의 방빙 및 제빙 기술은 1) 물리적 제빙 방식, 2) 가열을 이용한 방빙 및 제빙 방식, 그리고 3) 화학 소재 도포 방식의 세 가지로 분류된다. 이 항목에서는 기존에 사용되고 있는 방빙 및 제빙 기술과 각 기술이 지닌 한계점에 대하여 기술하였다.

2.1 물리적 제빙 기술

추가적인 외부 힘을 이용하여 착빙설을 제거하는 물리적 제빙의 가장 기본적인 방식은 인력을 동원하여 전력설비에 쌓인 얼음 및 눈을 직접 제거하는 방식이다. 일반적으로는 쉽게 접근이 가능한 전력설비의 경우 직접 축적된 얼음을 긁어내어 제거하며, 접근이 어려운 경우에는 헬리콥터나 산탄총을 이용하여 얼음을 제거한다. 하지만 이러한 방식은 많은 인력을 소모하기 때문에 매우 비효율적이며 감전의 위험성이 따른다. 또한, 외부 압력에 의해 전력설비가 손상될 수 있다는 한계점을 지니고 있다. 이러한 한계점들을 해결하기 위해 전력설비에 진동기를

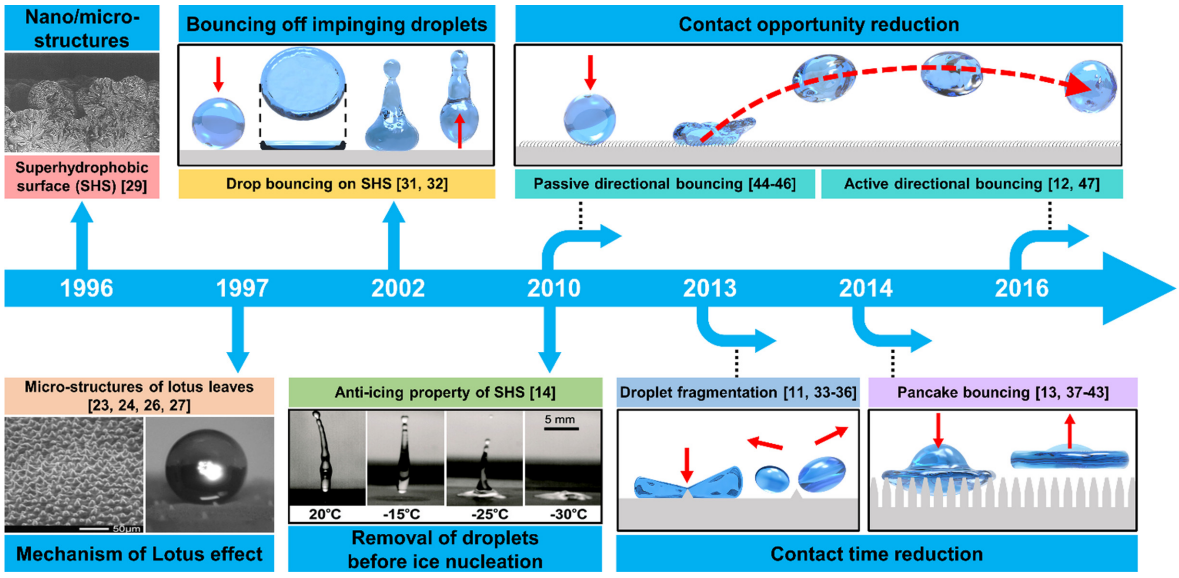

Fig. 1 Development timeline of anti-icing surfaces based on drop bouncing dynamics[14,24,29] (Adapted from Refs. 14, 24 and 29 with permission)

부착하여 형성된 얼음을 제거하는 진동 시스템이나 전력설비를 부풀려서 얼음을 제거하는 유압 시스템과 같이 다양한 방식의 물리적 제빙 기술이 개발이 진행되고 있다.[15] 국내에서도 송전선로에 모터를 설치함으로써 인위적으로 진동을 발생시켜 착빙설을 제거하는 진동 시스템에 대한 연구가 진행되었다.[16,17] 하지만 이러한 방식들은 추가적인 압력에 의해 전력설비가 손상될 수 있다는 문제를 해결하지 못하며, 모터를 회전시키기 위하여 추가적인 전력 소모가 크다는 단점을 지니고 있다.

2.2 가열을 이용한 방빙 및 제빙 기술

가열 시스템을 이용하여 전력설비 표면의 온도를 물의 빙점보다 높게 유지하는 것은 대표적인 제빙 기술 중 하나이다. 열을 이용한 제빙 기술은 다양한 방식으로 개발되어왔다. 그 중 전기를 이용하여 열을 발생시키는 제빙 방식은 얼음을 녹이는데 있어 가장 일반적인 방법이며, 특히 송전선로의 결빙 방지를 위해 전력설비에 폐회로를 구성하여 열을 발생시키는 줄(Joule) 발열 시스템이 대표적이다. 이외에도 전자기파 및 뜨거운 기체를 이용하여 열을 발생시키는 등 다양한 방법들로 개발되어 왔다.[15] Charles Sullivan 교수 연구진은 가변저항 케이블을 이용한 제빙 시스템을 개발하였고, 국내에서도 송전선로의 갤러핑 현상 방지를 위한 난착빙설 방지 장치를 개발하는 등 가열 방식을 이용한 제빙 시스템들이 연구되고 있다.[18,19] 하지만 이러한 시스템들은 열을 발생시키기 위해 상당한 에너지 소비가 필요하고 과열로 인한 전력설비의 손상이 발생할 수 있으며, 시스템 가동 이후에 녹았던 물이 다시 얼어붙는 재결빙(Refreezing)이 발생할 수 있다는 한계점을 가지고 있다.

2.3 화학 소재 도포를 통한 방빙 및 제빙 기술

화학 소재 도포 방식은 최근 가장 많이 사용되고 있는 방빙 방식이다. 일반적으로 유기 액체를 사용하여 물의 어는점을 낮춤으로써 착빙설의 형성을 방지하는 방식이 주로 이용되며, 상용화된 스프레이 타입의 제품들이 많기 때문에 접근성이 높고 적용이 쉽다는 장점을 가지고 있다. 하지만 짧은 지속 시간으로 인하여 방빙 효율이 떨어질 뿐 아니라, 화학 소재의 독성 성분에 의해 인근 농작물에 심각한 피해를 주거나 강 혹은 바다로 흘러가 해양 생물들에 피해를 주는 등 다양한 환경 문제들을 초래한다는 치명적인 단점을 가지고 있다.[8,20-22]

3. 액적 반동 현상 기반 방빙 표면의 동결 방지 메커니즘

기존의 방빙 및 제빙 기술의 한계를 극복하기 위해 빙점 이하 온도의 표면에 액적이 충돌하더라도 추가적인 외부 전원이나 인력 없이 착빙을 근본적으로 방지할 수 있는 지속 가능한 방빙 기술의 필요성이 대두되었다. 이에 액적 반동 현상을 기반으로 하는 새로운 방빙 표면 기술이 개발되었다. 이러한 기술은 연잎의 독특한 표면 미세구조를 모사하여 만들어진 나노 및 마이크로 스케일 미세구조 기반 표면의 우수한 초소수 특성을 이용하여 결빙을 방지한다.[14,23-27] 나노 및 마이크로 스케일 미세구조 기반의 표면은 미세구조에 갇힌 공기층의 영향으로 물과 접촉하더라도 젖지 않은 상태를 유지할 수 있으며, 150° 이상의 매우 높은 액적 접촉각과 5° 이하의 낮은 접촉각 이력을 가지는 초소수 특성을 나타내게 된다.[27-29] 이러한 미세구조 사이의 공기층으로 인하여 액적과 고체 표면 사이의 접촉 면적 및 상호 작용이 최소화됨으로써 물에 대한 반발력이 강해져, 액적은 표면에 부착되지 않고 쉽게 미끄러져 제거된다. 충돌하는 순간 액적이 부착되어 맺히게 되는 친수성 혹은 소수성 표면과는 달리, 초소수성 표면(Superhydrophobic Surface, SHS)에서는 이러한 액적에 대한 낮은 부착력 및 높은 이동성으로 인하여 액적이 충돌 이후 퍼짐, 수축 과정을 거쳐 튀어 오르기 때문에 액적과 표면 사이의 접촉 시간이 감소하게 된다(Fig. 2(a)).[30-32] 이에 따라 초소수성 표면은 얼음이 축적되기 전에 충돌 액적을 빠르게 튕겨내어 제거할 수 있다.

David Quéré 교수 연구진은 이러한 미세구조 기반 초소수성 표면상의 액적 반동 현상에 대한 기본적인 이론을 정립하였다. 해당 연구진은 다양한 낙하 속도 및 직경의 액적이 초소수성 표면에 충돌한 후 발생하는 반동 현상을 고속 촬영을 통해 관찰하고, 이를 토대로 초소수성 표면에서의 액적 반동 현상에 대한 기초 연구 결과를 발표하였다.[31] 초소수성 표면에 낙하하는 액적은 충돌 후 퍼짐, 수축 과정을 거쳐 튀어 오르며 마치 조화 진동자(Harmonic Spring)와 비슷한 거동을 보이는 것이 확인되었다. 이러한 초소수성 표면에 대한 낙하 액적의 충돌은 식(1)과 같이 정의되는 무차원수인 웨버 수(Weber Number, *We*)로 표현될 수 있다.

$$We = \frac{\rho V r_0}{\gamma} \tag{1}$$

ρ는 액적의 밀도, γ는 액적의 표면 장력, V는 액적의 충돌 속도, r_0는 충돌 전 액적의 초기 반경이다. *We*는 표면에 충돌하는 액적의 표면에너지에 대한 상대적 운동에너지를 나타내는 척도이다. *We*값이 클수록 액적은 운동에너지의 영향에 의하여 충돌 후 수평 방향으로 더욱 많이 퍼지고 수직 방향으로 더욱 길게 수축하는 진동 운동을 하는 경향을 보인다. 반면, *We*값이 작을수록 액적은 표면에너지의 영향으로 인하여 반동 현상 과정을 거치는 동안 구 형상을 유지하는 경향을 보인다. 이러한 액적의 진동 운동은 액적의 관성 및 모세관 성질의 영향에 의해 발생하는 현상으로, 액적의 질량(ρr_0^3)과 표면장력(γ)을 각각 물체의 질량과 탄성 계수로 가지는 스프링-질량 시스템으로 간주될 수 있다. 따라서 액적이 충돌 후 튀어 오르는데 걸리는 접촉 시간(t_c)은 액적의 진동 운동 반응 시간인 Inertial-Capillary Time Scale (τ)에 비례하며, 이는 다음의 식(2)과 같이 표현될 수 있다.

$$t_c \sim \tau = \left(\frac{\rho r_0^3}{\gamma}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

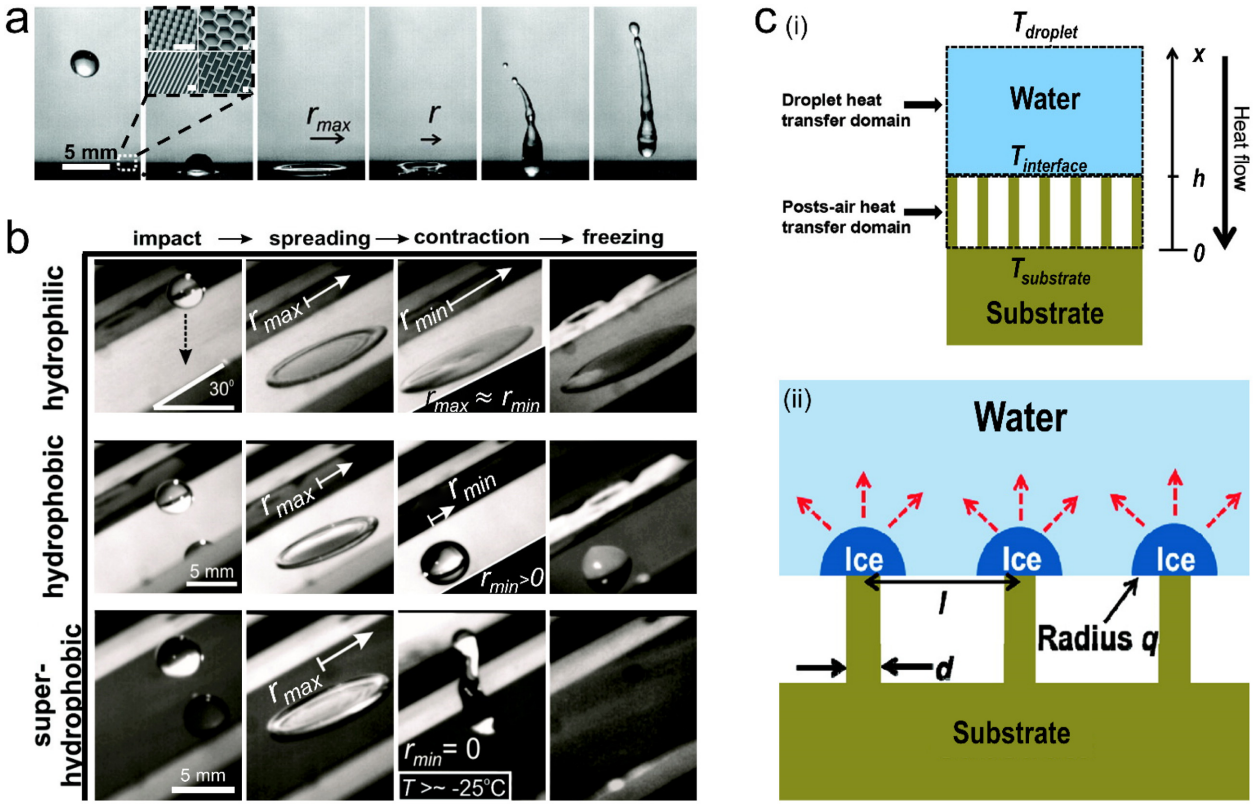

Fig. 2 Drop bouncing dynamics on microstructure based superhydrophobic surface and mechanism of freezing prevention (a) Drop bouncing dynamics on superhydrophobic surface based on microscale structures. Insets show micrographs of exemplary superhydrophobic surfaces: posts, bricks, blades, and honeycombs (Scale bar = 10 μm). (b) Drop (~15 μL volume) bouncing dynamics on 30° tilted surfaces at $T_{substrate}$ < 0°C. Images from top to bottom depict droplet impact, maximum spreading, maximum retraction, and freezing[14] (Adapted from Ref. 14 with permission) and (c) Analysis of drop bouncing dynamics and modeling of droplet freezing on superhydrophobic surfaces using classical heterogeneous nucleation theory. (i) A schematic showing heat transfer from the droplet to the microstructures of a superhydrophobic surface. (ii) A schematic showing propagation of nucleated hemispherical ice caps due to heat transfer between the microstructures and the droplet[30] (Adapted from Ref. 30 with permission)

초소수성 표면에 충돌하는 액적에 대한 접촉 시간 측정 실험을 통해 실험 결과가 식(2)와 일치하다는 것이 확인되었다. 식(2)에 기술된 바와 같이, 액적과 초소수성 표면 사이의 접촉 시간은 액적의 낙하 속도와는 무관하며 충돌 전 액적의 초기 반경 및 표면 장력과 관련이 있다는 것이 밝혀졌다.

Joanna Aizenberg 교수 연구진은 액적 반동 현상 기반의 방빙 표면이 실제 빙점 이하의 낮은 온도에서 보여주는 착빙 방지 특성에 대한 연구를 발표하였다. 해당 연구진은 +20 – -30°C 범위의 표면 온도를 가지는 기울어진 친수성, 소수성, 초소수성 기판에 +60 – -5°C의 15 μL 액적이 낙하하여 발생하는 충돌 거동에 대한 실험을 진행하였으며, Fig. 2(b)는 해당 실험에 대한 결과를 나타낸 것이다.[14] 빙점 이하의 친수성 표면에 충돌한 액적은 최대 반경으로 퍼진 상태에서 곧바로 얼어붙었고, 소수성 표면에 충돌한 액적 역시 퍼짐 과정을 지난 뒤 충분히 수축하지 못한 채 표면에 고정되어 동결되었다. 하지만 초소수성 표면의 경우에는 액적의 과냉각 수준에 관계없이 -25°C 이상의 표면 온도에서 액적이 동결되기 전에 완전히 수축되고 20 ms 이내로 반동하여 제거되는 것이 확인되었다.

또한, Tom Krupenkin 교수 연구진은 미세구조 기반의 초소수성 표면에 충돌하여 튀어 오르는 액적의 접촉 시간, 액적과 표면 사이의 열전달 및 불균일 빙정핵 형성 이론이 통합된 결빙 예측 모델에 대한 연구를 발표하였다.[30] Fig. 2(c)에 따르면 액적이 빙점 이하로 과냉각된 초소수성 표면에 충돌할 때 액적과 표면의 미세구조 사이에서 열전달이 발생하고, 이에 따라 미세구조의 팁에서 반구형의 불균일 빙정핵이 생성된다. 빙정핵이 성장함에 따라 표면의 친수성은 증가하고, 액적이 수축하고자 하는 힘이 감소하는 결과를 가져온다. 결국 수축력이 약해진 액적은 불완전한 수축으로 인하여 표면에 맺히게 되고, 점차 얼어붙게 된다. 하지만 액적이 표면에 맺히는데 걸리는 시간보다 접촉 시간이 짧은 경우에는 액적이 단시간 내에 튕겨져 제거될 수 있기 때문에 착빙을 방지할 수 있게 된다. 초소수성 표면에 충돌하는 액적의 동결에 대한 해당 모델은 이전의 실험 결과와 일치하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 연구들은 과냉각 표면에 충돌하는 액적의 반동 현상을 이용하여 접촉 시간을 더욱 단축함으로써 강력한 방빙 성능을 지니는 표면 기술이 개발될 수 있음을 입증한다.

Table 1 Summary of recent studies on anti-icing surfaces based on various drop bouncing dynamics.

Drop bouncing dynamics		Summary
Droplet fragmentation[11,33-36]		• Materials: Macrotextured superhydrophobic surfaces • Droplets are fragmented by macroscopic line patterns, which reduces contact time
Pancake bouncing[13,37-43]		• Materials: Superhydrophobic surfaces with submillimeter-scale tapered post arrays • Droplets are rebounded in the shape of a pancake before retraction by the stored capillary energy, reducing contact time
Directional bouncing	Passive[44-46]	• Materials: Microstructured superhydrophobic surfaces with roughness gradients • Droplets are rebounded into a specific direction by structural or chemical gradients, enabling drop shedding
	Active[12,47]	• Materials: Superhydrophobic surfaces with actively actuating microstructures • Droplet dynamics such as rebound direction, contact time, and bouncing height can be actively modulated, enabling advanced anti-icing or drop-shedding applications

4. 다양한 액적 반동 현상 기반 방빙 표면 기술

앞서 언급한 바와 같이, 표면에 충돌한 액적의 반동 현상 과정에서의 접촉 시간 및 접촉 면적은 표면과 액적 사이의 열전달과 직결되며, 이는 표면의 방빙 성능을 향상시킬 수 있는 주요 요인이다. 최근, 액적 반동 현상이 표면 미세구조의 크기 및 형상에 따라 조절이 가능하다는 사실이 밝혀짐에 따라, 다양한 액적 반동 현상을 유도함으로써 액적과 표면 사이의 접촉을 최소화하여 동결을 방지하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 액적 반동 현상 기반의 방빙 표면 기술들 중 대표적인 연구로는 1) 액적 분열 현상(Droplet Fragmentation) 기반 방빙 표면 기술, 2) 팬케이크 반동 현상(Pancake Bouncing) 기반 방빙 표면 기술 그리고 3) 방향성을 지니는 액적 반동 현상(Directional Bouncing) 기반 방빙 표면 기술이 있다. 이 항목에서는 이러한 새로운 액적 반동 현상에 대한 메커니즘 및 이에 따른 표면의 방빙 성능에 대해 분석한 연구들을 소개하고자 하며, Table 1에 해당 연구 내용들을 간략하게 정리하였다.

4.1 액적 분열 현상 기반 방빙 표면 기술

액적의 접촉 시간을 추가적으로 줄이기 위한 효과적인 방법 중 하나는 매크로 스케일(Macro-Scale)의 선형 패턴에 의한 액적 분열 현상을 이용하는 것이다. 매크로텍스처(Macrotexture) 표면에 충돌한 액적의 분열은 초소수성 표면의 이론적 한계를 뛰어넘는 접촉 시간 단축을 가능하게 해준다.[11] 이러한 접촉 시간의 단축은 충돌, 퍼짐, 수축, 반동 순서로 발생하는 액적 반동 과정 중 수축 시간을 단축함으로써 이루어진다. 일반적으로 초소수성 표면상에서의 액적 반동 현상은 축 대칭 방향으로 완전히 퍼진 후 수축한다. 반면 매크로 스케일 선형 구조 위에서 일어나는 액적 반동 현상의 경우에는 액적이 퍼진 후 선형 구조 위의 부분이 우선적으로 선형 구조를 따라 수축함으로써 액적이 두 갈래로 분열되고, 이렇게 분열된 액적은 양방향에서 동시에 수축하게 된다. 이는 곧 액적의 수축 시간을 줄임으로써 액적의 전체 접촉 시간의 단축을 가능하게 한다. 실제로 액적 분열의 개념을 처음으로 도입한 Kripa Varanasi 교수 연구진은 일반적인 초소수성 표면에서는 Inertial-Capillary Timescale (τ) 대비 액적의 접촉 시간(t_c)인 무차원 접촉 시간(= t_c/τ)이 2.2에 달하는 반면, 매크로 스케일 선형 구조에 의해 액적 분열이 일어난 경우에는 무차원 접촉 시간이 1.4까지 현저히 낮아지는 것을 확인하였다. 또한, 해당 연구진은 모포나비의 날개, 한련의 잎과 같은 자연계 생명체들 또한 이러한 매크로 스케일의 선형 패턴 기반 표면을 가지며, 이들 표면에서도 액적의 분열 현상 및 접촉 시간 단축이 발생한다는 것을 확인하였다.

David Quéré 교수 연구진은 액적의 낙하 속도가 증가함에 따라 매크로 스케일 선형 구조에 의해 분열되는 액적의 수가 증가하며, 분열된 액적의 갈래에 따라 접촉 시간이 불연속적으로 줄어든다는 사실을 입증하였다(Fig. 3).[33] 낙하 액적 실험에서 접촉 시간에 대한 식(2)는 다음의 식(3)과 같이 액적의 부피에 대한 식으로 표현될 수 있다.

$$t_c \sim (\rho r_0^3/\gamma)^{1/2} \sim (\rho\Omega/\rho)^{1/2} \quad (3)$$

t_c는 접촉 시간, ρ는 액적의 밀도, r_0은 충돌 전 액적의 초기 반경, γ는 액적의 표면장력, Ω는 액적의 초기 부피이다. 매크로 스케일의 선형 구조 위로 액적이 낙하하는 경우, 일정 낙하 속도 이상에서 두 갈래의 액적으로 분열되고 이보다 더 높은 낙하 속도에서는 네 갈래의 액적으로 분열된다. 이에 따라 분열된 액적의 부피가 Ω에서 각각 $\Omega/2$, $\Omega/4$로 줄어들게 되고, 식(3)에 따른 이론적 접촉 시간 역시 τ_0(평평한 초소수성 표면상에서의 접촉 시간)에서 각각 $\tau_0/\sqrt{2}$, $\tau_0/2$로 불연속적으로 줄어들게 된다. Fig. 3(a)는 액적의 낙하 속도가 각각 0.5, 1.0 m/s일 경우의 액적 반동 현상을 보여준다. 액적 낙하 속도가 1.0 m/s일 경우 액적이 네 갈래로 분열되어 7.6 ms의 접촉 시간을 보여주는 반면, 액적 낙하 속도가 0.5 m/s일 경우에는 액적이 두 갈래로 분열되어 상대적으로 높은 10.6 ms의 접촉 시간을 보여준다. Fig. 3(b)는 액적 분열 현상의 접촉 시간 측정 결과를 낙하 액적의 속도에 따라 정량적으로 보여주는 그래프이다. 액적이 0.3-0.7 m/s의 낮은 속도로 충돌하여 두 갈래로 분열되는 경우와 0.7 m/s 이상의 속도로 충돌하여 네 갈래의 액적으로 분열된 경우의 평균 접촉

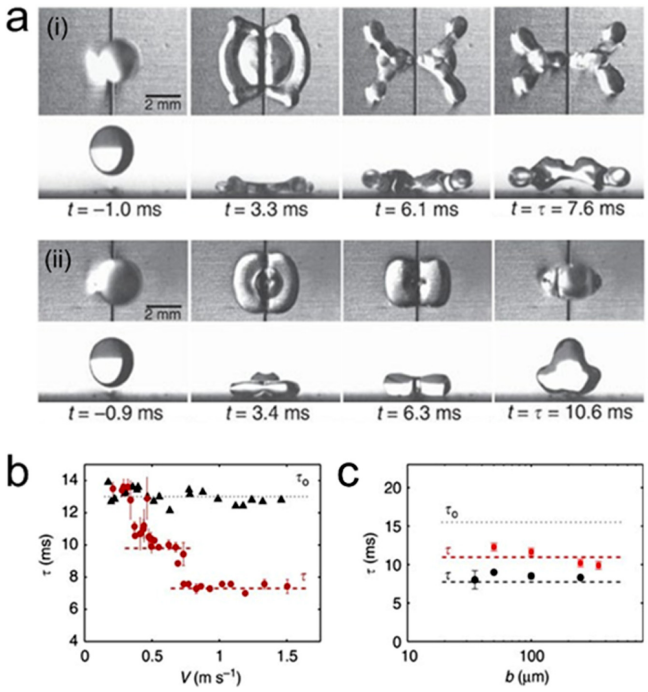

Fig. 3 Anti-icing surfaces based on droplet fragmentation (a) Top and side views of droplet impacting on a macroscale textured surface with different impact velocity. Impact velocities of droplets are (i) 1.0 and (ii) 0.5 m/s (b) Graph of the contact time according to the impact velocity in droplet fragmentation phenomenon. Black triangles indicate the contact time on a typical superhydrophobic surface (τ_0), and red circles indicate the contact time on a macroscale textured surface (τ) and (c) Graph of contact time according to sizes of macroscale linear structures in droplet fragmentation phenomenon. Red circles indicate a case in which the impact velocity is 0.5 m/s, and black squares indicate a case in which the impact velocity is 0.8 m/s[33] (Adapted from Ref. 33 on the basis of OA)

시간은 9.8과 7.3 ms로, 식(3)에 따른 이론적 계산값인 9.2 및 6.5 ms와 거의 일치하는 것을 확인하였다. 또한 매크로 선형 구조의 크기에 따른 액적 반동 현상 및 접촉 시간 측정 실험이 진행되었다. Fig. 3(c)에서 알 수 있듯 최대로 퍼진 상태인 액적의 두께가 선형 구조의 높이보다 두껍지 않은 이상, 선형 구조의 크기는 액적 분열 현상으로 인한 접촉 시간에 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

이 밖에도 액적 분열 현상을 이용한 접촉 시간 단축 및 이에 따른 방빙 성능에 대한 다양한 연구들이 최근까지 진행되고 있다. T. Wang 교수 연구진은 선형, 세 갈래 패턴 및 십자 패턴 등 다양한 패턴의 매크로 스케일 선형 구조를 통하여 분열되는 액적의 수를 조절하였고, 액적의 수에 따른 접촉 시간에 대하여 분석하였다.[34] 그 결과 매크로 스케일 패턴 형상에 따라 액적이 2, 3, 4 갈래로 분열되고 이에 따라 접촉 시간이 각각 7.6, 5.8, 5.6 ms로 감소하는 것을 확인하여, 분열되는 액적의 수가 많아질수록 더 낮은 접촉 시간을 갖는 것을 입증했다. Lei Jiang 교수 연구진은 끝이 뾰족한 형상을 지닌 평행한 선형 패턴의 초소수성 매크로텍스처 표면을 통해서 액적의 접촉 시간을 단축할 수 있음을 확인함으로써, 액적이 단일 선형 구조에 충돌하지 않는 경우에는 접촉 시간이 감소하지 않는다는 문제가 해결될 수 있음을 입증하였다.[35] 또한, Yahua Liu 교수 연구진은 평행사변형 단면 형상을 가지는 평행한 선형 패턴의 초소수성 매크로텍스처 표면에 대하여 패턴 간격을 조절함으로써 액적의 분열 현상을 제어할 수 있음을 밝혔다.[36] 선형 패턴의 간격이 상대적으로 좁거나 충돌 액적의 *We*값이 낮은 경우, 충돌 액적은 일반적인 초소수성 표면상에서의 액적 반동 현상과 같은 거동을 보였다. 하지만 간격이 넓어지고 *We*값이 증가함에 따라 충돌 후 패턴에 평행한 방향의 액적 확산 속도 및 수직 방향의 액적 수축 속도가 가속되어, 액적이 분열하게 되고 접촉 시간이 감소하는 것을 확인하였다.

4.2 팬케이크 반동 현상 기반 방빙 표면 기술

Zuankai Wang 교수 연구진은 Fig. 4(a)와 같은 서브 밀리미터 기둥 배열로 이루어진 초소수성 표면을 통해 새로운 형태의 액적 반동 거동인 팬케이크 반동 현상을 유도함으로써, 종래의 일반적인 초소수성 표면 대비 액적 접촉 시간을 최대 80%까지 단축하는데 성공했다.[13,37] 충돌 후 퍼짐, 수축 과정을 거쳐 반동하는 종래의 액적 반동 현상과는 달리, 팬케이크 반동 현상에서는 Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 충돌 액적이 퍼짐 과정 이후 완전히 수축하지 않은 상태에서 바로 튀어 오르기 때문에 수축 과정이 생략되어 접촉 시간이 크게 줄어든다. 이러한 팬케이크 반동 현상은 충돌한 액체에 저장된 모세관 에너지가 액적을 수직 방향으로 들어 올리기에 충분한 운동에너지로 전환되면서 발생하는 현상이다. 구체적으로 직경이 점점 가늘어지는 기둥에 액적이 충돌할 때 액적의 일부분은 아래로 향하는 운동량으로 인하여 기둥 끝부분에 의해 관통된다. 이 과정에서 아래로 향하던 액적은 위쪽 방향으로 작용하는 모세관력을 받아 운동을 멈추게 되고, 이에 따라 액적의 해당 부분에 대한 운동에너지는 표면에너지로 저장된다. 충돌 중 계속해서 가해지는 모세관력에 의하여, 액적은 위쪽 방향으로 가속되고 기둥에서 밀려 나오면서 저장되었던 표면에너지는 다시 운동에너지로 변환된다. 따라서 액적이 기둥의 끝에 밀려난 순간 액적은 튀어 오르기에 충분한 에너지를 얻은 상태이며, 아직 수축이 되지 않은 팬케이크 모양으로 반동하게 되어 접촉 시간이 획기적으로 줄어들게 된다. Fig. 4(b)에서 확인할 수 있듯이, 구조의 끝부분이 가늘수록 액적의 접촉 시간은 더 짧아지게 되며, 최대 3.4 ms까지 감소됨을 검증하였다. 팬케이크 반동 현상 기반의 방빙 표면에서는 액적이 기둥 구조에서 밀려나는 순간 반동하여 표면에서 분리되기 때문에 액적의 접촉 시간(t_c)은 액적이 기둥의 끝으로 밀려나기까지 걸리는 시간($t_\uparrow$)과 거의 일치한다. 액적이 기둥 끝까지 밀려나는데 걸리는 시간은 충돌 액적의 낙하 속도 및 가해지는 모세관력의 관계식에 의하여 식(4)와 같이 정의된다. 식(4)에서 w는 두 기둥 중심 간 거리, r_0는 충돌 전 액적의 초기 반경, ρ는 액적의

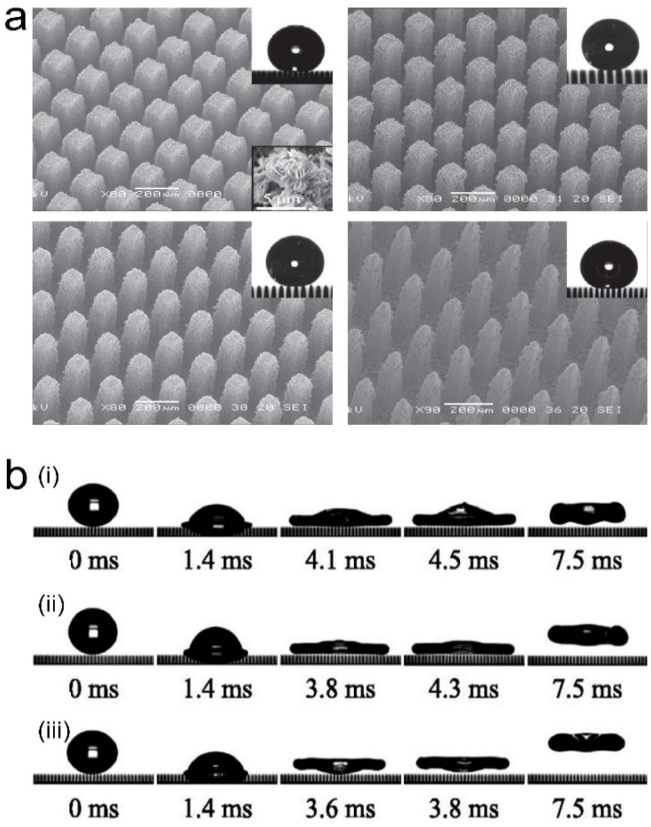

Fig. 4 Anti-icing surfaces based on pancake bouncing dynamics (a) Pancake bouncing based anti-icing surfaces consisting of arrays of various superhydrophobic submillimeter posts. It shows anti-icing surfaces consisting of arrays of straight-shaped posts and posts with an apex angle (α) of 1.0, 1.7, 3.6°. Insets show contact angle of water droplet on each surface and (b) Pancake bouncing dynamics according to apex angle of submillimeter column. Apex angles are (i) 1.0, (ii) 1.7 and (iii) 3.6°, and the value of We is 18.2[37] (Adapted from Ref. 37 with permission)

밀도, b는 기둥 구조의 직경 혹은 기둥 단면의 한 변의 길이, z는 기둥에 의한 액적의 관통 깊이이며, γ는 액적의 표면장력, θ_Y는 표면의 고유 접촉각이다.

$$t_{\uparrow} \sim \sqrt{\frac{w^2 r_0 \rho}{\left(-\frac{b}{z}\gamma\cos\theta_Y\right)}} \tag{4}$$

해당 연구진은 이러한 팬케이크 반동 현상을 충족하기 위한 두 가지 기준을 설정하였다. 첫째, 종래의 일반적인 액적 반동 현상과 팬케이크 반동 현상의 차이는 액적이 표면에서 튀어 오르는 순간의 직경(d_{jump})과 충돌 후 최대 확산 직경(d_{max})의 비로 정량화될 수 있으며, 이렇게 정의된 $Q(= d_{jump}/d_{max})$값이 0.8 이상인 경우를 팬케이크 반동 현상으로 정의한다. 둘째, 액적이 충돌하는 순간의 운동에너지는 액적을 밀어내어 들어 올리는데 필요한 에너지와 점성으로 인한 에너지 소실의 합을 극복할 만큼 충분히 커야 한다. 이에 따라 연구진은 팬케이크 반동 현상을 유도하기 위한 임계 We를 정량적으로 추정할 수 있는 관계식을 식(5)와 같이 도출해냈다.[37]

$$We = \frac{3}{2w^2}\left(-4z^2\tan^2\alpha\left(\frac{\cos\theta}{\sin\alpha}+1\right)+b^2\frac{\cos\theta}{\sin\alpha}+w^2+3\sqrt{We}-6\right) \tag{5}$$

z는 액적의 관통 길이, b는 기둥의 한 변의 길이, w는 기둥 사이의 간격이며, α는 기둥 끝부분의 각도, θ는 액적의 접촉각이다. 또한, 기둥 구조의 끝부분 각도(α)가 클수록 더욱 작은 임계 We값을 가지며 더욱 넓은 We 범위에서 팬케이크 반동 현상이 발생하여 액적의 접촉 시간이 단축될 수 있음을 확인하였다. 또한, 팬케이크 반동 현상 메커니즘의 정량적 입증을 위하여 팬케이크 반동 현상에 대한 시뮬레이션 기반 수치해석적 분석 연구도 진행되었다.[38,39]

이러한 흥미로운 발견에도 불구하고, 끝부분으로 갈수록 가늘어지는 기둥 형상 배열 기반 초소수성 표면의 제조는 복잡한 공정을 수반하기 때문에 광범위한 응용이 어렵다. 이에 따라 팬케이크 반동 현상을 유도할 수 있는 다양한 제조 공정 및 표면 형상 기반의 방빙 표면이 연구되었다. 예를 들어, 상용 다공성 구리폼을 이용하여 다층성 계층 구조 기반의 초소수성 표면을 제작함으로써, 팬케이크 반동 현상을 통한 액적 제거가 가능함이 확인되었다.[40] 이러한 현상은 계층 구조에서 비롯된 액적의 적절한 에너지 저장 및 효과적인 에너지 방출에 기인한 것으로 나타났다. Xin Liu 교수 연구진은 밀리미터 단위의 기둥 배열 형상을 기반으로 팬케이크 반동 현상 유도가 가능한 150 × 100 × 20 mm 크기의 대면적 방빙 표면을 몰딩 및 스프레이 방식의 간편한 공정을 통해 제작할 수 있음을 보였다.[41] 또한, Yuwen Sun 교수 연구진은 다양한 직경 및 높이의 초소수성 기둥 배열을 통해 팬케이크 반동 현상을 제어할 수 있으며, 접촉 시간의 57.8%를 단축할 수 있음을 입증했다. 또한, 레이저 드릴링 공정을 통하여 팬케이크 반동 현상 및 액적 접촉 시간을 조절할 수 있는 다양한 형상 각도의 원뿔형 초소수성 기둥 형상 배열 기반 방빙 표면을 제작하였다.[42] 연구 결과에 따르면, 원뿔형 기둥의 형상 각도가 증가함에 따라 팬케이크 반동 현상을 위한 임계 We값은 증가한 반면, 액적 접촉 시간은 점점 짧아져 최대 7.1 ms까지 단축되며 68.5%만큼 감소하는 것이 확인되었다. 또한, Dimos Poulikakos 교수 연구진은 3D 프린팅 및 소프트 리소그래피와 스프레이 공정이 통합된 공정을 개발하여, 0.1 mm 크기의 돌출된 초소수성 원뿔 형상 배열 기반 방빙 표면을 제작했다.[43] 개발된 매크로텍스처 초소수성 표면에서는 물방울뿐만 아니라 물 점도의 3.7배에 해당하는 점성을 가지는 액적의 충돌에도 팬케이크 반동 현상이 발생하였고, 이에 따라 접촉 시간을 3배 가까이 단축할 수 있음이 입증되었다.

4.3 방향성을 지니는 액적 반동 현상 기반 방빙 표면 기술

액적 반동 현상을 이용한 방빙 표면은 실질적인 활용을 위해 반드시 해결해야 할 공통적인 과제를 지니고 있다. 수평하게

위치한 기판 위로 액적이 낙하하는 경우, 액적 접촉 시간의 단축과는 상관없이 액적의 수평 이동이 없기 때문에 반동 후에도 잔여 액적이 표면 위에 그대로 남아 결국 착빙될 가능성이 있다는 점이다. 최근 이를 해결하기 위해 액적 반동 현상의 방향 및 궤도를 제어할 수 있는 방빙 표면에 대한 연구들이 발표되었다. 이러한 방향성을 지니는 액적 반동 현상은 액적의 접촉 시간을 단축할 뿐만 아니라, 액적을 단 수 번의 반동 현상만으로 표면에서 제거할 수 있기 때문에 액적과 표면의 접촉 횟수 자체를 줄임으로써 표면의 동결을 막을 수 있다.

4.3.1 수동적 방향성 액적 반동 현상 유도 방빙 표면 기술

외부의 에너지나 힘을 사용하지 않고 표면에 충돌하는 액적의 반동 방향을 제어하기 위해서는 액적과 표면 사이의 상호작용에 대한 정확한 이해를 바탕으로 액적의 수직 운동을 수평 방향으로 전환시킬 수 있도록 표면의 구조 형상을 설계해야 한다. 이러한 특성을 위해 대표적으로 사용되는 방식은 표면의 미세구조를 불규칙하게 제작함으로써 액적의 반동 현상의 비대칭성을 유도하는 것이다. Zuankai Wang 교수 연구진은 불균일 텍스처를 제작함으로써 표면의 미세구조 간격 구배로 인해 부여된 표면의 습윤 구배를 이용하여, 액적 반동 현상의 방향을 결정할 수 있다는 사실을 확인했다(Figs. 5(a)와 5(b)).[44] Fig. 5(a)에서의 불균일 텍스처 표면은 왼쪽 방향으로 갈수록 미세구조 간격이 넓어짐에 따라, 액적의 접촉각은 높아지고 소수성은 낮아지는 습윤 구배를 지닌다. 이러한 표면에 충돌한 액적은 수축 과정에서 액적의 왼쪽 부분은 소수성이 적은 영역으로 빠르게 수축하는 반면, 오른쪽 부분은 표면의 낮은 소수성으로 인하여 액적의 수축이 제대로 되지 않는다. 이러한 액적 수축 과정에서의 차이로 인하여 결과적으로 충돌 액적이 방향성을 지닌 상태로 반동하는 것이 관찰되었다(Fig. 5(b)).

Xianren Zhang 교수 연구진은 이러한 내용을 기반으로 표면 미세구조의 간격 구배에 의하여 액적의 반동 방향이 조절되는 새로운 방빙 표면을 설계하고, 해당 표면에서 발생하는 방향성을 지니는 액적 반동 현상을 시뮬레이션 연구를 통해 분석하였다.[45] 해당 연구가 앞선 연구와 다른 점은 단순히 액적이 습윤 구배 방향으로만 반동하는 것이 아니라, 미세구조의 간격 구배 및 액적의 충돌 조건에 따라 액적 반동 현상의 방향이 습윤 구배 방향 혹은 그 반대 방향으로도 조절이 된다는 사실이다. 액적이 낮은 속도로 표면에 충돌할 경우, 액적은 수축 속도의 차이로 인하여 Fig. 5의 상단과 같이 소수성이 낮은 방향인 오른쪽으로 튀어 오른다. 하지만 액적이 높은 속도로 표면에 충돌하는 경우, 왼쪽에서는 넓은 미세구조의 간격에서 비롯된 모세관 상승 현상의 약화로 인하여 액적이 반동하기까지 시간이 길어지게 된다. 이에 따라 액적의 왼쪽 부분에서는 수평 방향의 수축 운동이 느려지는 반면, 액적의 오른쪽 부분에서는 높은 모세관 힘으로 인하여 수축 운동이 빠르게 마무리되어 왼쪽으로 반동한다. 이외에도 Weicheng Jiao 교수 연구진은 그래핀을 이용하여 제작한 불규칙한 방향의 초소수성 주름을 기반으로 방향성을

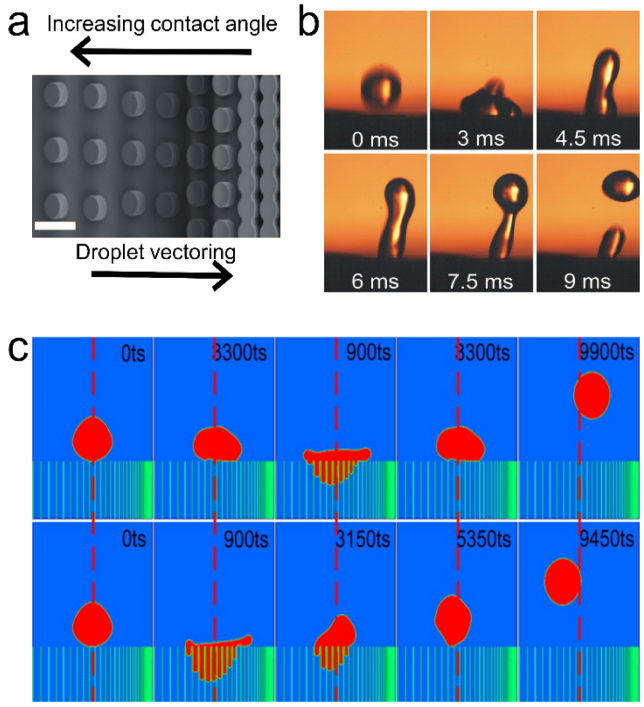

Fig. 5 Passive drop bouncing dynamics based anti-icing surfaces (a) Microstructured surface with wettability gradient by surface roughness gradient. Scale bar is 100 μm (b) Directional drop bouncing dynamics on microstructured surface applied with wettability gradient. Volume and impact velocity of the droplet are 2.5 μL and 1.6 m/s, respectively[44] (Adapted from Ref. 44 with permission) and (c) Simulation analysis on the anti-icing surface that can control the direction of drop bouncing dynamics by applying roughness gradient of microstructures. Impact velocities are 0.15, 0.24 m/s[45] (Adapted from Ref. 45 with permission)

지니는 액적 반동 현상의 유도가 가능한 방빙 표면을 개발하였다.[46] 해당 연구진은 개발된 방빙 표면에서 마이크로 스케일의 주름 구조에 의해 -10°C의 낮은 온도에서도 23 ms의 접촉 시간을 갖는 액적 반동이 가능할 뿐만 아니라, 주름의 방향에 따라 액적 반동 현상의 구름(Rolling) 및 회전(Rotation) 방향이 결정되기 때문에 방향성을 가지는 액적 반동이 가능하다는 것을 입증하였다.

4.3.2 능동적 방향성 액적 반동 현상 유도 방빙 표면 기술

액적의 반동 방향이 고정된 표면의 구조 형상에 따라 정해지는 것이 아니라, 표면 형상을 능동적으로 조절함으로써 액적의 반동 방향 역시 필요에 따라 자유롭게 제어할 수 있는 방빙 표면에 대한 연구가 발표되고 있다. Yongmei Zheng 교수 연구진은 표면의 미세 바늘 구조의 기울기를 조절함으로써 액적 반동 현상의 방향을 제어할 수 있는 방빙 표면을 개발하였다.[47] 자기장 반응성 소재로 제작된 표면의 미세 바늘 구조는 자기장의 세기와 방향에 따라 휘어지고, 충돌 액적에 가해지는 모세관력이 미세구조가 기울어진 방향으로 작용하면서 이러한 액적 반동

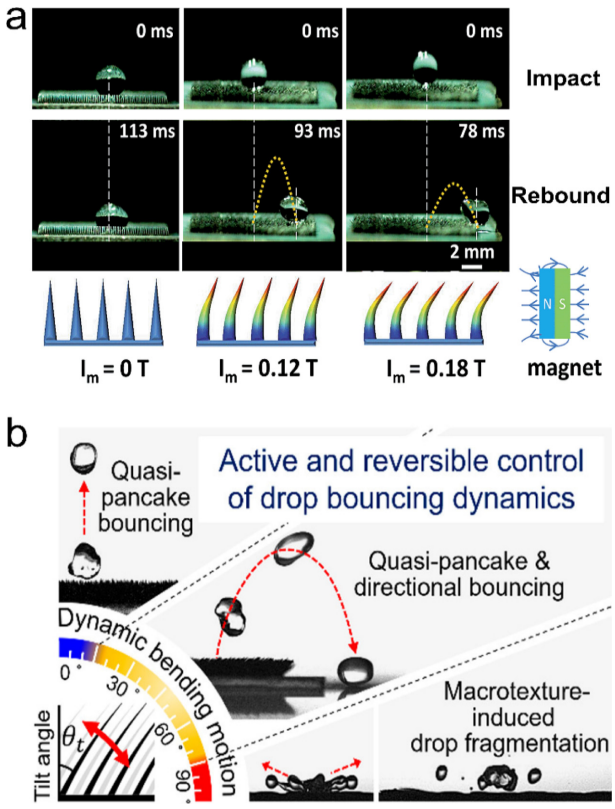

Fig. 6 Active drop bouncing dynamics based anti-icing surface (a) The change in the angle of the microneedle structure of the anti-icing surface under different magnetic fields and the corresponding change in the trajectory of the drop bouncing dynamics[47] (Adapted from Ref. 47 with permission) and (b) A schematic diagram of the anti-icing surface, which can actively control the drop bouncing dynamics in three modes according to the angle of the microstructure controlled by external magnetic field[12] (Adapted from Ref. 12 with permission)

현상의 방향 및 궤도 제어가 가능해진다. Fig. 6(a)는 미세 바늘 구조의 각도에 따른 액적 반동 현상의 궤도 변화를 나타내며, 각도가 증가함에 따라 액적의 수평 이동 거리가 증가함을 보여준다. 해당 연구진은 최적의 액적 반동 방향 및 궤도를 추정하기 위해 액적에 가해지는 힘을 분석하여, 미세 바늘 구조의 각도에 따른 충돌 액적의 수평 이동 거리(S) 및 반동 높이(H)에 대한 관계식을 식(6) 및 식(7)과 같이 도출하였다. V_0는 액적이 반동 되는 순간의 속도, θ는 미세 바늘 구조의 기울기, g는 중력 가속도이다.

$$H = V_0^2 \cos 2\theta / 2g \tag{6}$$

$$S = V_0^2 \sin 2\theta / g \tag{7}$$

최근에는 단순히 액적 반동 현상의 방향 및 궤도만을 제어하는 것을 뛰어넘어, Fig. 6(b)와 같이 외부 자기장을 통해 미세 섬모 배열의 기울기를 0부터 90°까지 조절함으로써 액적 반동 현상을 서로 다른 세 가지 방식(팬케이크 반동, 액적 분열, 방향성을 가지는 반동)으로 제어할 수 있는 방빙 표면을 개발하였다.[12] 이러한 액적 반동 현상의 제어는 접촉 시간의 단축은 물론 방향성 액적 반동을 통한 잔여 액적의 제거를 가능하게 한다. 0°의 기울기를 가지는 미세 섬모 배열의 경우 끝이 가늘어지는 기둥 구조 기반 방빙 표면과 마찬가지로 팬케이크 반동 현상이 발생하는 것이 관찰되었으며, 초소수성 표면상의 액적 접촉 시간(17 ms)보다 36% 감소된 10.8 ms의 접촉 시간을 갖는 것이 확인되었다. 15-60°의 각도를 가지는 미세 섬모 배열의 경우에는 팬케이크 반동 현상과 함께 방향성을 가지는 반동 현상이 동시에 일어나게 된다. 특히 45°로 기울어진 미세 섬모 배열에 대한 액적 반동의 경우에는 팬케이크 반동 현상에 의해 접촉 시간이 33% 감소되어 11.4 ms일 뿐만 아니라, 방향성 있는 반동 현상으로 인해 액적이 10.7 mm만큼 수평 방향으로 이동하게 되었다. 75° 이상으로 기울어진 미세 섬모 배열의 경우에는 눕혀진 미세 섬모가 이웃한 섬모와 이어지게 되면서 선형의 매크로텍스처 표면이 형성된다. 이에 따라 낮은 We값을 가지는 충돌 액적은 일반적인 액적 반동 현상을 거치지만, 15 이상의 We값을 가지는 충돌 액적은 액적 분열 현상으로 인하여 접촉 시간이 55.3% 감소되어 8.6 ms까지 단축되는 것이 관찰되었다. 해당 연구진은 -20°C의 표면에 충돌하는 과냉각된 액적에 대한 실험을 진행하여, 방빙 표면의 실제 동결 방지 성능을 평가하였다. 일반적인 초소수성 표면상의 액적 낙하 실험의 경우, 액적이 완전히 제거되지 않아 제한적인 방빙 성능을 보여주었다. 반면, 45° 기울기의 미세 섬모 배열 기반 방빙 표면에서는 팬케이크 반동 현상 및 방향성을 가지는 반동 현상으로 인하여 액적이 제거되어 표면의 동결이 방지되는 것이 입증되었다. 마찬가지로, 90°로 기울어진 미세 섬모 배열상의 액적 낙하 실험에서도 액적의 분열 현상에 의해 액적의 접촉 시간 및 접촉 면적이 줄어들어 빙정핵 형성을 효과적으로 방지하는 것이 실증되었다.

5. 결론

겨울철 저온 환경 노출에 의한 표면 동결 현상은 현대 사회 기반의 대부분을 차지하는 전력시설에 심각한 손상을 발생시켜 사회적, 경제적, 기술적 문제를 초래한다. 이러한 표면에 축적된 얼음의 제거 및 생성 방지를 위한 기술은 오랫동안 연구되어 왔지만, 기존의 방빙 및 제빙 기술들은 낮은 효율, 환경 오염 등 각각 명확한 단점을 지니고 있다. 최근 연잎에서 영감을 얻어 개발된 액적 반동 현상 기반의 방빙 표면은 다양한 표면 형상을 이용하여 충돌하는 얼음이 형성되기 전에 액적을 빠르게 제거하여 표면의 결빙을 효과적으로 막을 수 있다. 이러한 액적 반동 현상에 기인하여, 다양한 스케일 및 형상의 표면 구조를 이용하여 새로운 액적 반동 현상을 유도하고 액적의 접촉 시간을 더욱 획기적으로 단축할 수 있는 고성능의 방빙 표면이 활발히 연구되고 있다. 하지만 이러한 액적 반동 현상 기반의 방빙

표면의 상당한 발전에도 불구하고, 해결해야 할 몇 가지 과제가 여전히 남아있다.

첫째, 방빙 성능 및 내구성의 향상을 위해 다양한 소재 및 복합 구조에 대한 연구가 필요하다. 액적 반동 현상 기반의 방빙 표면을 극저온의 가혹한 조건 속의 실제 산업 환경에 적용하기에는 방빙 성능이나 내구성 측면에서 한계를 지닌다. 이러한 한계를 뛰어넘기 위해서는 단순히 단일 재료 및 표면 구조 형상을 이용하기보다, 최근 연구가 활발히 이루어지고 있는 자극 감응성 고분자나 자기 회복 물질과 같은 다양한 재료 및 다양한 스케일의 표면 구조가 합쳐진 복합 구조를 함께 적용함으로써 액적의 접촉 시간을 더욱 단축하여 방빙 성능을 높이고 방빙 표면의 내구성을 강화할 수 있는 기술이 개발되어야 한다.

둘째, 다양한 굴곡을 지니는 3차원 곡면에도 쉽게 적용할 수 있는 방빙 표면 기술을 개발해야 한다. 지금까지 개발된 액적 반동 현상 기반의 방빙 표면은 대부분 필름의 형태에 국한되어 있다. 필름 형태의 방빙 표면을 곡면에 빈틈 혹은 이음매 없이 완벽하게 적용하기에는 어려움이 따르며, 이러한 빈틈이나 이음매는 방빙 성능에 있어 결함을 야기할 수 있다. 따라서 송전선, 송전탑의 애자련, 그리고 풍력 발전기의 날개와 같이 굴곡을 지닌 다양한 전력시설의 결빙을 방지하기 위해서는 유연 기판이나 분사 공정을 이용하여 3차원의 곡면에 완전하게 적용될 수 있는 방빙 표면 기술의 개발을 필요로 한다.

마지막으로, 액적 반동 현상 기반 방빙 기술과 더불어 다양한 전략의 방빙 기술들이 합쳐진 통합형 방빙 표면이 개발되어야 한다. 다양한 외부 환경에 지속적으로 노출되는 조건에서 방빙 표면이 실질적으로 전력시설에 적용되기 위해서는 여러 가지 방빙 방식을 선택적으로 사용하여 각각의 외부 환경에 대응할 수 있어야 한다. 최근에는 액적 반동 현상 기반 방빙 기술 이외에도 다양한 전략의 방빙 기술들이 개발되고 있다. 예를 들어, 최근에는 응축에 의한 액적 도약 현상 혹은 윤활제가 주입된 다공성 표면을 사용하여 표면의 서리 형성을 방지하거나, 근적외선을 흡수함으로써 표면의 온도를 상승시킬 수 있는 광열 전환 효과 기반의 방빙 기술에 대한 연구 또한 이루어지고 있다.[48-50] 아직까지는 이러한 방빙 기술들이 개별적인 연구 단계에 머무르고 있기 때문에, 각 기술의 방빙 메커니즘을 정확하게 이해함으로써 여러가지 방빙 전략과 액적 반동 기반 방빙 표면이 통합된 방빙 기술에 대한 연구가 필요하다.

액적 반동 현상의 조절을 기반으로 하는 새로운 방식의 방빙 표면은 뛰어난 결빙 방지 특성으로 인하여 첨단의 전력설비가 가혹한 저온 환경 조건에서도 안정적으로 가동될 수 있도록 도와준다. 하지만 방빙 기술의 성능을 더욱 향상시키기 위해서는 뛰어넘어야할 과제들이 존재한다. 또한 현재까지는 대부분의 연구들이 아직 실험실 수준의 연구에 머물러 있는 실정이기 때문에 액적의 반동 현상을 이용하는 방빙 기술이 실제 산업 환경에 적용되기 위해서는 많은 노력을 필요로 한다. 하지만 앞서 언급한 과제들을 해결한다면, 겨울철 저온의 환경에 있는 전력설비를 동결로 인한 피해로부터 완전히 보호할 수 있을 것으로 판단된다. 뿐만 아니라, 이러한 액적 반동 현상 기반 기술은 표면과 액적 사이의 접촉을 최소화하고 액적을 빠르게 제거할 수 있다는 점에서 방빙 분야와 더불어 방수 및 방오 분야에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 따라 해당 기술이 성공적으로 개발되어 산업 분야 전반에 적용된다면, 혹한, 다습한 기후 혹은 수중과 같이 더욱 다양하고 혹독한 환경 속에서도 지속적이고 안정적인 전력설비의 운용을 가능하게 하는 초석이 될 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

저자1과 저자2는 본 논문 작성에 있어 동등하게 기여하였음. 본 연구는 한국전력공사의 2019년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(No. R19XO01-26). 또한, 본 연구는 한국연구재단에 의해 지원되었음(No. NRF-2019M3C1B7025092).

REFERENCES

1. Korea Electric Power Corporation, “Statistics of Electric Power in Korea,” 2020.
2. Carriveau, R., Edrisy, A., Cadieux, P., and Mailloux, R., “Ice Adhesion Issues in Renewable Energy Infrastructure,” Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 26, Nos. 4-5, pp. 447-461, 2012.
3. Fillion, R., Riahi, A., and Edrisy, A., “A Review of Icing Prevention in Photovoltaic Devices by Surface Engineering,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 32, pp. 797-809, 2014.
4. Jelle, B. P., “The Challenge of Removing Snow Downfall on Photovoltaic Solar Cell Roofs in Order to Maximize Solar Energy Efficiency-Research Opportunities for the Future,” Energy and Buildings, Vol. 67, pp. 334-351, 2013.
5. Syafiq, A., Pandey, A., Adzman, N., and Abd Rahim, N., “Advances in Approaches and Methods for Self-Cleaning of Solar Photovoltaic Panels,” Solar Energy, Vol. 162, pp. 597-619, 2018.
6. Li, T. and Li, J., “Analysis of Icing Accident in South China Power Grids in 2008 and It’s Countermeasures,” Proc. of the 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution-Part 1, pp. 8-11, 2009.
7. Lu, J., Jiang, Z., Lei, H., Zhang, H., Peng, J., et al., “Analysis of Hunan Power Grid Ice Disaster Accident in 2008,” Automation of Electric Power Systems, Vol. 11, No. 5, pp. 1-8, 2008.
8. Lv, J., Song, Y., Jiang, L., and Wang, J., “Bio-Inspired Strategies for Anti-Icing,” ACS Nano, Vol. 8, No. 4, pp. 3152-3169, 2014.
9. Kreder, M. J., Alvarenga, J., Kim, P., and Aizenberg, J., “Design of Anti-Icing Surfaces: Smooth, Textured or Slippery” Nature Reviews Materials, Vol. 1, No. 1, pp. 1-15, 2016.

10. Park, S. and Song, O., “Experimental Tests to Identify the Condition for Galloping of Ice Accreted Transmission Conductors with Attack Angle Variation,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 92-101, 2018.
11. Bird, J. C., Dhiman, R., Kwon, H. M., and Varanasi, K. K., “Reducing the Contact Time of a Bouncing Drop,” Nature, Vol. 503, No. 7476, pp. 385-388, 2013.
12. Lee, S. H., Seong, M., Kwak, M. K., Ko, H., Kang, M., et al., “Tunable Multimodal Drop Bouncing Dynamics and Anti-Icing Performance of a Magnetically Responsive Hair Array,” ACS Nano, Vol. 12, No. 11, pp. 10693-10702, 2018.
13. Liu, Y., Moevius, L., Xu, X., Qian, T., Yeomans, J. M., et al., “Pancake Bouncing on Superhydrophobic Surfaces,” Nature Physics, Vol. 10, No. 7, pp. 515-519, 2014.
14. Mishchenko, L., Hatton, B., Bahadur, V., Taylor, J. A., Krupenkin, T., et al., “Design of Ice-Free Nanostructured Surfaces based on Repulsion of Impacting Water Droplets,” ACS Nano, Vol. 4, No. 12, pp. 7699-7707, 2010.
15. Laforte, J., Allaire, M., and Laflamme, J., “State-of-the-Art on Power Line De-Icing,” Atmospheric Research, Vol. 46, Nos. 1-2, pp. 143-158, 1998.
16. Kim, Y. K., Lee, S. H., Choi, S. H., Kang, B. Y., and Jung, H. J., “Device for Removing Ice and Snow from Power Transmission Line,” US Patent, 9590407B2, 2017.
17. Park, H. Y., Kim, Y. K., Choi, S. H., Lee, S. H., and Kang, B. Y., “Development of Vibration System for Romoving Accrected Icing & Snow on Power Transmission Line,” Proc. of the Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp. 397-398, 2016.
18. Petrenko, V. F., Sullivan, C. R., and Kozlyuk, V., “Variable-Resistance Conductors (VRC) for Power-Line De-Icing,” Cold Regions Science and Technology, Vol. 65, No. 1, pp. 23-28, 2011.
19. Yoon, D. S., Park, J. H., Seo, S. Y., Kim, Y. K., and Ha, S. H., “Hard Stuck Ice and Snow-Preventing Device,” KR Patent, 10-2016-0120786, 2016.
20. Howard, K. W. and Haynes, J., “Groundwater Contamination due to Road De-Icing Chemicals-Salt Balance Implications,” Geoscience Canada, Vol. 20, No. 1, pp. 1-7, 1993.
21. Sanzo, D. and Hecnar, S. J., “Effects of Road De-Icing Salt (NaCl) on Larval Wood Frogs (Rana Sylvatica),” Environmental Pollution, Vol. 140, No. 2, pp. 247-256, 2006.
22. Williams, D. D., Williams, N. E., and Cao, Y., “Road Salt Contamination of Groundwater in a Major Metropolitan Area and Development of a Biological Index to Monitor Its Impact,” Water Research, Vol. 34, No. 1, pp. 127-138, 2000.
23. Neinhuis, C. and Barthlott, W., “Characterization and Distribution of Water-Repellent, Self-Cleaning Plant Surfaces,” Annals of Botany, Vol. 79, No. 6, pp. 667-677, 1997.
24. Sun, M., Luo, C., Xu, L., Ji, H., Ouyang, Q., et al., “Artificial Lotus Leaf by Nanocasting,” Langmuir, Vol. 21, No. 19, pp. 8978-8981, 2005.
25. Cao, L., Jones, A. K., Sikka, V. K., Wu, J., and Gao, D., “Anti-Icing Superhydrophobic Coatings,” Langmuir, Vol. 25, No. 21, pp. 12444-12448, 2009.
26. Patankar, N. A., “Mimicking the Lotus Effect: Influence of Double Roughness Structures and Slender Pillars,” Langmuir, Vol. 20, No. 19, pp. 8209-8213, 2004.
27. Barthlott, W. and Neinhuis, C., “Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces,” Planta, Vol. 202, No. 1, pp. 1-8, 1997.
28. He, B., Patankar, N. A., and Lee, J., “Multiple Equilibrium Droplet Shapes and Design Criterion for Rough Hydrophobic Surfaces,” Langmuir, Vol. 19, No. 12, pp. 4999-5003, 2003.
29. Onda, T., Shibuichi, S., Satoh, N., and Tsujii, K., “Super-Water-Repellent Fractal Surfaces,” Langmuir, Vol. 12, No. 9, pp. 2125-2127, 1996.
30. Bahadur, V., Mishchenko, L., Hatton, B., Taylor, J. A., Aizenberg, J., et al., “Predictive Model for Ice Formation on Superhydrophobic Surfaces,” Langmuir, Vol. 27, No. 23, pp. 14143-14150, 2011.
31. Richard, D., Clanet, C., and Quéré, D., “Contact Time of a Bouncing Drop,” Nature, Vol. 417, No. 6891, pp. 811-811, 2002.
32. Richard, D. and Quéré, D., “Bouncing Water Drops,” Europhysics Letters, Vol. 50, No. 6, pp. 769-775, 2000.
33. Gauthier, A., Symon, S., Clanet, C., and Quéré, D., “Water Impacting on Superhydrophobic Macrotextures,” Nature Communications, Vol. 6, No. 1, Paper No. 8001, 2015.
34. Shen, Y., Tao, J., Tao, H., Chen, S., Pan, L., et al., “Approaching the Theoretical Contact Time of a Bouncing Droplet on the Rational Macrostructured Superhydrophobic Surfaces,” Applied Physics Letters, Vol. 107, No. 11, Paper No. 111604, 2015.
35. Song, M., Liu, Z., Ma, Y., Dong, Z., Wang, Y., et al., “Reducing the Contact Time Using Macro Anisotropic Superhydrophobic Surfaces-Effect of Parallel Wire Spacing on the Drop Impact,” NPG Asia Materials, Vol. 9, No. 8, Paper No. e415, 2017.
36. Guo, C., Zhao, D., Sun, Y., Wang, M., and Liu, Y., “Droplet Impact on Anisotropic Superhydrophobic Surfaces,” Langmuir, Vol. 34, No. 11, pp. 3533-3540, 2018.
37. Liu, Y., Whyman, G., Bormashenko, E., Hao, C., and Wang, Z., “Controlling Drop Bouncing Using Surfaces with Gradient Features,” Applied Physics Letters, Vol. 107, No. 5, Paper No. 051604, 2015.
38. Moevius, L., Liu, Y., Wang, Z., and Yeomans, J. M., “Pancake Bouncing: Simulations and Theory and Experimental Verification,” Langmuir, Vol. 30, No. 43, pp. 13021-13032, 2014.
39. Moqaddam, A. M., Chikatamarla, S. S., and Karlin, I. V., “Drops Bouncing Off Macro-Textured Superhydrophobic Surfaces,” Journal of Fluid Mechanics, Vol. 824, pp. 866-885, 2017.
40. Liu, Y. and Wang, Z., “Superhydrophobic Porous Networks for Enhanced Droplet Shedding,” Scientific Reports, Vol. 6, Paper No. 33817, 2016.

41. Song, J., Gao, M., Zhao, C., Lu, Y., Huang, L., et al., “Large-Area Fabrication of Droplet Pancake Bouncing Surface and Control of Bouncing State,” ACS Nano, Vol. 11, No. 9, pp. 9259-9267, 2017.
42. Song, J., Huang, L., Zhao, C., Wu, S., Liu, H., et al., “Robust Superhydrophobic Conical Pillars from Syringe Needle Shape to Straight Conical Pillar Shape for Droplet Pancake Bouncing,” ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 11, No. 48, pp. 45345-45353, 2019.
43. Graeber, G., Martin Kieliger, O. B., Schutzius, T. M., and Poulikakos, D., “3D-Printed Surface Architecture Enhancing Superhydrophobicity and Viscous Droplet Repellency,” ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 10, No. 49, pp. 43275-43281, 2018.
44. Malouin Jr, B. A., Koratkar, N. A., Hirsa, A. H., and Wang, Z., “Directed Rebounding of Droplets by Microscale Surface Roughness Gradients,” Applied Physics Letters, Vol. 96, No. 23, Paper No. 234103, 2010.
45. Zhang, B., Lei, Q., Wang, Z., and Zhang, X., “Droplets Can Rebound toward Both Directions on Textured Surfaces with a Wettability Gradient,” Langmuir, Vol. 32, No. 1, pp. 346-351, 2016.
46. Chu, Z., Jiao, W., Huang, Y., Chen, L., Zheng, Y., et al., “Directional Rebound Control of Droplets on Low-Temperature Regular and Irregular Wrinkled Superhydrophobic Surfaces,” Applied Surface Science, Vol. 530, Paper No. 147099, 2020.
47. Wang, L., Gao, C., Hou, Y., Zheng, Y., and Jiang, L., “Magnetic Field-Guided Directional Rebound of a Droplet on a Superhydrophobic Flexible Needle Surface,” Journal of Materials Chemistry A, Vol. 4, No. 47, pp. 18289-18293, 2016.
48. Boreyko, J. B. and Collier, C. P., “Delayed Frost Growth on Jumping-Drop Superhydrophobic Surfaces,” ACS Nano, Vol. 7, No. 2, pp. 1618-1627, 2013.
49. Jiang, G., Chen, L., Zhang, S., and Huang, H., “Superhydrophobic SiC/CNTs Coatings with Photothermal Deicing and Passive Anti-Icing Properties,” ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 10, No. 42, pp. 36505-36511, 2018.
50. Kim, P., Wong, T. S., Alvarenga, J., Kreder, M. J., Adorno-Martinez, W. E., et al., “Liquid-Infused Nanostructured Surfaces with Extreme Anti-Ice and Anti-Frost Performance,” ACS Nano, Vol. 6, No. 8, pp. 6569-6577, 2012.

Sang-Hyeon Lee
He is a Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include bioinspired materials and anti-icing techniques.
E-mail: boomboo15@unist.ac.kr

Jaeil Kim
He is a M.Sc candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include bioinspired materials and droplet dynamics.
E-mail: kji3032@unist.ac.kr

Minho Seong
He is a Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include bioinspired materials and nano-micro surface interfaces.
E-mail: sung710uio@unist.ac.kr

Hyejin Jang
She is a Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. Her research interests include bioinspired materials and superhydrophobic surface.
E-mail: janghj0809@unist.ac.kr

Geonjun Choi
He is a Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include bioinspired materials and magnetically driven dynamic surface.
E-mail: gjchoi@unist.ac.kr

Hoon Eui Jeong
He obtained his Ph.D. degree from the School of Mechanical and Aerospace Engineering at Seoul National University in 2009 and moved to the University of California, Berkeley for postdoctoral research with Prof. Peidong Yang. He began his independent career in 2012 as assistant professor in the Department of Mechanical Engineering at Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST). His current research interests include bioinspired materials, stimuli-responsive materials, nano-biointerfaces, and unconventional nanofabrication techniques.
E-mail: hoonejeong@unist.ac.kr