

소수성 표면의 형상 변화를 통한 액적의 방빙 가시화 연구

최진욱^{1,*} · Wang Tao^{2,**} · 김설하^{1,3,***,†}

Droplet anti icing visualization research through hydrophobic variation of surface structure

Jinwook Choi^{1,*}, Wang Tao^{2,**} and Seolha Kim^{1,3,***,†}

Abstract In this study, we investigated the freezing delay time on surfaces with different patterns under -30° conditions through visualization experiments. Among various pattern structures, we fabricated the shape and surface of liquid from the spacing using circular filaments and hole structures. Additionally, using a high-speed camera, we visualized the freezing scenes, enabling us to obtain freezing images and measure the freezing time of the liquid. For each structure, the contact angle and solid fraction of the surface varied. We observed that the freezing delay time was longest when the contact angle was largest and the solid fraction was smallest within the experimental results. We analyzed the variation in anti-icing time using the heat exchange equation between the patterned surface and the liquid.

Key Words : Anti-icing(방빙), Visualization(시각화), Superhydrophobic(초소수성), Surface pattern(표면패턴), Solid fraction(고체 분율)

[†] Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Republic of Korea.

E-mail: shkim0731@knu.ac.kr

¹ Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Sangju.

² College of Mechanical & Electric Engineering, Beijing Chemical Engineering University, Beijing, China.

³ Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University, Sangju.

* Master's degree candidate

** Professor

*** Assistant professor

기호설명

γ [-]	거칠기
d [m]	필러 혹은 구멍의 지름
h [m]	필러 길이 혹은 구멍의 깊이
g [m]	필러 혹은 구멍 사이의 간격
ϕ_p [-]	필러 구조의 고체분율
ϕ_h [-]	구멍 구조의 고체분율
\bar{Q}_{dv} [W]	액적과 기체 사이의 열전달
\bar{Q}_{sd} [W]	액적과 고체 표면 사이의 열전달
h_{dv} [W/m ² -K]	액적과 기체 사이의 열전달 계수
h_{sd} [W/m ² -K]	액적과 표면 사이의 열전달 계수
A_{dv} [m ²]	액적과 기체가 맞닿는 단면적
A_{sd} [m ²]	액적과 표면이 맞닿는 단면적

ΔT_{dv} [K]	액적과 기체의 온도 차이
ΔT_{sd} [K]	액적과 표면의 온도 차이
E_{tot} [J]	액적의 총 에너지
E_k [J]	액적의 운동에너지
E_s [J]	충돌 직후 액적의 표면에너지
E_{loss} [J]	액적의 손실 에너지

1. 서론

결빙(Icing)이란 액체 상태의 물질이 어는 점의 온도에 도달하여 고체 상태로 변화되는 것을 의미하며, 지구 상에서 가장 많이 일어나는 결빙 과정은 액체 상태의 물이 동절기 또는 주변 냉기로 인한 고체 상태의 얼음이 되는 과정이다. 예를 들어, 겨울 철에 도로에 눈이 녹은 물이나 높은 습도로 인해 아스팔트 표면의 틈 사이로 얼어붙어 예기치 않은 사고의 시발점으로 작용하기도 한다. 눈에 보이는 액체 상태의 물이 아닌 상대 습도로 알아볼 수 있는 공기 중의 물 분자에 의해서도 결빙이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 육안으로 확인할 수 없는 물 분자들이 표면 위에 핵을 생성하게 되고 생성된 핵이 주변의 물 분자들과 연계되어 표면 위에 얼음 생성하게 된다. 이런 상황은 도로 상황에만 국한되지 않고, 다양한 교통 수단과 전력 전송, 통신 네트워크와 같이 다양한 분야에서 영향을 미치고 있다^[1-3]. 전력 전달의 효율이 좋아지지 않고, 통신 네트워크의 장애를 일으키는 에너지 측면에서의 악영향을 미치고 있다. 또한, 앞서 소개된 교통 수단에서는 도로 위의 블랙아이스 현상, 비행기 외부의 프레임의 결빙으로 인한 비행 운전 불안정성으로 사람의 안전으로부터 위협을 초래하고 있다. 따라서 사람의 안전과 에너지의 효율적인 변환을 위해서 결빙을 해결할 수 있는 방법을 연구해보려고 한다. 결빙의 문제들로부터 벗어날 수 있는 방안으로 얼음이 형성되는 것을 방지하는 방빙(Anti-Icing) 방법과 제빙(De-Icing) 방법이 있다. 이번 논문에서는 표면 위에 얼음이 형성되는 것을 방지하거나 얼음으로 형성되는 시간을 지연시킬 수 있도록 하는 방빙 방법의 이전 기술들과 현재 연구 방

향에 대해 소개하고자 한다.

이전 연구 및 논문에서의 방빙 방법은 다양한 해결방안을 제안하며 해결해오고 있다. 먼저, 기본적으로 능동적인 방법에는 제빙 화학물질 도포 및 기계 진동 등 다양한 방빙 전략이 영화 환경에서 비행기 날개 등과 같은 기기의 표면에 축적된 얼음을 방지하기 위해 적용되었다^[4-5]. 그러나 많은 에너지의 소모와 가열 시스템의 설계 복잡도, 가격 등으로 인해서 결빙을 방지할 수 있는 근본적인 해결방안으로 자리 잡지 못하고 있다. 따라서 현재 가장 많은 연구 방법으로는 피동적으로 (Passive) 물이 표면에 부착하지 못하도록 표면의 형상의 변화를 만들거나 화학적 표면 처리를 하거나 소수성 특징을 가진 물질을 제작하거나 코팅하는 것이다^[6-14]. 표면에 패턴을 형성한 방법은 액적이 캐시-벡스터(Cassie-Baxter) 상태로 만들어 접촉각이 커지게 되어 액적이 쉽게 떨어져 나갈 수 있다. 또한, 패턴에 의해 형성된 면적이 패턴화하지 않은 일반적인 표면적에 비해 물에 닿는 면적이 적기 때문에 열전달을 어렵게 하면서 결빙을 방해한다^[8-10]. 플루오린과 같은 소수성 특징을 가진 물질을 가지고 화학적 합성 혹은 표면에 코팅을 하여 접촉각을 크게 키운다^[11-14]. 접촉각을 크게 형성할 수 있는 소수성 특징을 표면을 가지면서 능동적으로 물을 제거할 수 있다. 또한, 능동적인 방법으로 액적의 방빙 방법 중 액적과 표면 사이의 낮은 응착력(adhesion force)을 가지게 하는 방법도 연구 진행 중이다^[15-18]. 물방울과 낮은 응착력을 발생시키는 윤활제를 표면에 코팅하여 적은 힘으로 결빙된 액적을 방지 혹은 제거하기 쉽게 한다.

이번 연구에서는 표면에 소수성 용액을 통한 코팅과 더불어 마이크로 구조 크기의 패턴화를 가진 표면을 설계하였다. 표면은 일정한 간격으로 동일한 직경을 가진 마이크로 크기의 높이를 가진 필러 (Pillar)와 구멍 (Hole)으로 패턴을 구성하고 있다. 표면에 이루어진 패턴의 여러 매개변수 중에서 패턴의 간격의 크기를 조절했다. 패턴화한 표면 위에 액적의 결빙 현상을 초고속 카메라를 이용해 시각화하고 시각화한 데이터를 기반으로 결빙의 지연 시간을 파악함으로써

결빙의 지연 시간이 제일 긴 최적의 패턴을 찾아보고자 한다. 또한, 액적의 움직임은 가시화로 추적한 결과를 바탕으로 패턴의 간격의 차이로 발생하는 액적과의 표면적의 접촉 변화를 젖음성과 열전달을 이용해 분석하고 물리학적 현상을 규명하고자 한다.

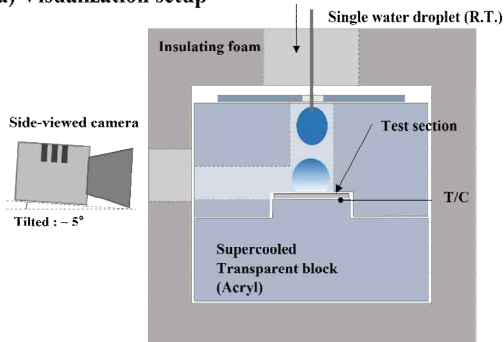
2. 실험 장치 및 방법

2.1 방빙 가시화 실험 장치

방빙 가시화 실험 장치는 액적이 얼 수 있는 환경을 제작하기 위해 Fig. 1 a) 와 같이 실험 장치를 구성했다. 외부에 대기 온도와 열을 교환하지 못하도록 최소한의 크기를 가진 2개의 구멍으로 제작된 단열 박스가 있고, 단열 박스 안

에는 액적을 냉각시키기 위해 과냉각될 아크릴 박스로 구성되어 있다. 아크릴 박스를 과냉각하기 위해 영하 35도의 냉동고 안에 3시간 동안 넣어두었다. 또한, 2개의 구멍 중 1개의 구멍은 초고속 카메라로 액적을 촬영할 수 있도록 되어 있고, 다른 1개의 구멍은 액적을 떨어뜨릴 수 있는 실린더가 충분히 삽입될 수 있도록 제작되었다. 제작된 시편의 표면 위에서 일어나는 액적의 결빙 과정을 가시화할 수 있는 초고속카메라를 준비한 후 과냉각된 아크릴 판 위에 패턴화된 표면을 설치하였다. 그리고 패턴화된 표면과 아크릴 사이에 열전대를 설치하였으며, 액적의 결빙 조건을 확인하기 위하여 열전대를 설치하였다. Fig. 1 b) 는 설치한 열전대를 이용해 측정 한 온도를 그래프로 확인할 수 있다. Fig. 1 b) 에서 붉은 색으로 표시한 곳이 냉동고에서 꺼낸 후 실험이 완료될 때까지 측정된 부분으로 총 1-2여분 정도 걸렸으며, 단열 박스 내부에 아크릴 박스의 온도는 영하 30 °C로 극저온 환경에서 실험을 수행중임을 나타내고 있다.

a) Visualization setup



b) Icing test condition

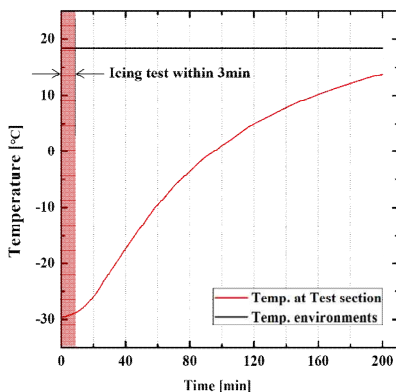


Fig. 1. Experimental Setup and Test condition measured by thermocouple. a) Visualization setup, b) Icing test condition.

2.2 시편 제작

방빙 가시화 실험 시편은 본 논문의 저자인 Kim^[19]의 연구에서 사용한 마이크로 필터 구조 제작 방법과 같은 방법을 이용해서 제작했다. 시편은 실리콘 웨이퍼를 미세전자기계시스템 (MEMS) 공정을 이용하여 매끄러운 표면과 여섯 가지 종류의 패턴화된 표면을 준비했다. 마이크로 크기의 필터 혹은 구멍으로 구성된 패턴화된 표면과 소수성 특징을 얻기 위해 테프론 (Teflon)을 이용하여 스핀 코팅(500 rpm)하였고, 매끄러운 표면은 패턴화된 포토레지스트로 기판을 코팅하고, 리액션 이온 에칭(DRIE: Deep Reaction Ion Etching)을 적용하여 제작했다. Fig. 2 는 제작된 시편의 SEM 이미지와 도식화로 보여준다. 표면에 제작된 모든 필터와 구멍의 패턴은 Fig. 2와 같이 필터의 높이 혹은 구멍의 깊이는 20 μ m로 직경은 10 μ m로 제작이 되었다. 표본의 마이크로 패턴 사이의 간격은 10, 20 그리고 30 μ m로, 이 연구의 주요 제어 요인이다.

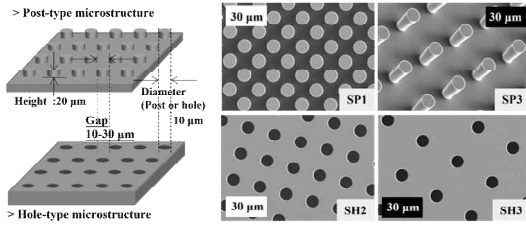


Fig. 2. Microstructures fabrication Schematic & SEM images. (Surface pattern structure: Diameter 10μm, height & Depth 20μm, Gap 10-30μm)

Table 1. Properties of Pattered surface.

Notation	Fabrication	Characterization			
		Contact angle [°] (R.T.)	Geometric factor [μm] (Height, Diameter, Gap)	Roughness (γ)	Solid fraction (φ)
SO	"No treatment"	60	-	-	-
ST	Teflon coated	120	-	-	-
SR	Repellent layer	165	-	-	-
SP1	Microstructure "Post-type"	130	(20, 10, 10)	2.571	0.196
SP2	"Post-type" +	135	(20, 10, 20)	1.698	0.087
SP3	Teflon coated	150	(20, 10, 30)	1.393	0.049
SH1	Microstructure "Hole-type"	105	(20, 10, 10)	2.571	0.804
SH2	"Hole-type" +	110	(20, 10, 20)	1.698	0.913
SH3	Teflon coated	115	(20, 10, 30)	1.393	0.951

각각 패턴과 코팅 및 제조 방법에 의해 명칭이 달라지는데 Table 1을 통해 알아볼 수 있다. 예를 들어, SO는 아무것도 처리하지 않은 실리콘 표면으로 접촉각 60°의 물성치를 확인할 수 있다. 또한, SP3는 필터 형태를 가지면서 소수성 용액인 테프론이 표면에 코팅된 시편은 캐시-백스터 상태로 존재하면서 접촉각이 150°이고, 거칠기율(Roughness)는 1.393, 고체 분율(Solid fraction)은 0.049이다. 여기서 거칠기율은 매끈한 표면과 패턴화된 표면의 표면적 비로 실제 면적과 액적과 패턴화된 표면을 투영한 면적을 나눠서 식 1과 같이 구할 수 있고 값은 항상 1보다 크다. 그리고 고체분율은 액적과 패턴화된 표면 사이에 실제 만나는 면적과 패턴화된 표면을 투영한 면적비를 의미한다. 값은 수식 2와 3과 같이 구할 수 있다.

$$\gamma = 1 + \frac{\pi dh}{(d+g)^2} \quad (1)$$

$$\phi_p = \frac{\pi \cdot (d/2)}{(d+g)^2} \quad (2)$$

$$\phi_h = \frac{(d+g)^2 - \pi \cdot (d/2)^2}{(d+g)^2} \quad (3)$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 결빙 지연

영하 30 °C의 방빙 가시화 실험 장치를 이용해 획득한 액적의 이미지는 초고속카메라로 100fps로 촬영했다 Fig. 3에는 여러 패턴화 된 표면의 액적 이미지를 보여주는데 각 시편 별로 거동을 점선 박스로 구별했다. 액적 첫 이미지는 액적이 표면에 닿은 처음 이미지와 시간을 보여주고, 마지막 이미지는 액적이 완전히 결빙된 이미지와 마지막 시간을 보여주고 있다. 결빙시간이 가장 짧은 시편은 SO로 8.37초의 시간이 걸렸다. 반면에 가장 느린 빙결 시편은 SP3으로 18.61초가 걸렸다. 각 표면의 소수성 처리 및 표면의 패턴화를 통해 결빙 지연 시간과 그 형상도 다르게 관찰되었다.

시편의 코팅 및 표면의 구조 변화로 인한 결빙 지연 시간의 차이 메커니즘을 Fig. 4로 도식화해 아래와 같이 분석하였다. 열전달 관점으로

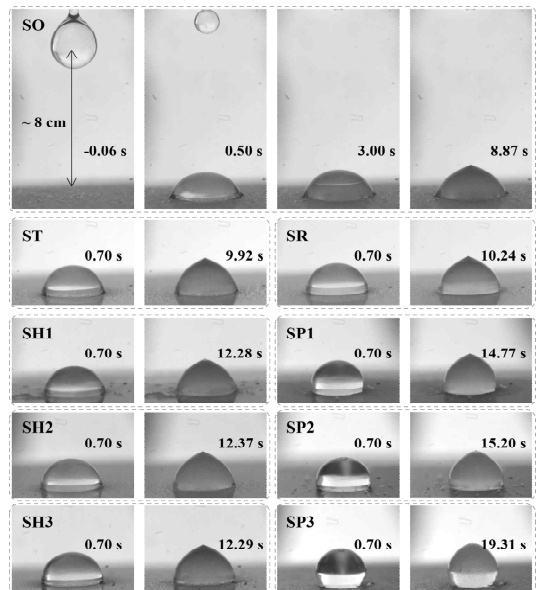


Fig. 3. Droplet image through freezing visualization experiment using high-speed camera.

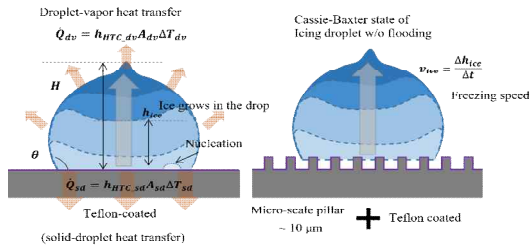


Fig. 4. Schematic of freezing delay mechanism

메커니즘을 분석해보면 액적과 공기사이의 대류로 생기는 열교환과 고체 표면과 액적 사이에서 일어나는 대류 열전달로 교환하는 열에너지 크기의 차이가 있다. 대류 열전달로 표현한 식 4과 5번을 이용해 에너지의 크기를 비교해보면 표면과 액적 사이에서의 교환하는 열에너지 크기가 외부의 저온 기체 온도와 액적 사이에 교환하는 열에너지 크기에 비해 크다. 따라서 결빙을 하기 위한 에너지 교환은 열에너지는 기체와 액적이 만나서 일어나는 열교환에 비해 액적과 표면이 만나는 곳이 더 지배적이다. 지배적으로 열에너지 교환이 일어나는 표면에서 표면의 구조 변화로 인해 액적과 접촉하는 단면적 변화로 인해 대류 열전달의 에너지 차이가 발생하게 된다. 에너지의 전달이 대류 열전달을 통해 이루어지고 있는데 에너지 교환이 원활하지 못하게 함으로써 액적이 어는데 있어서 속도의 차이를 발생시키고 있다.

$$\dot{Q} = h_{dv} A_{dv} \Delta T_{dv} \quad (4)$$

$$\dot{Q} = h_{sd} A_{sd} \Delta T_{sd} \quad (5)$$

Fig. 5는 소수성 특징을 가진 용액으로 표면을 코팅한 시편들과 패턴화 된 소수성 표면을 가진 시편들로 정리하여 측정한 결빙 시간을 그래프로 보여주고 있다. Fig. 5의 그래프에서 소수성 코팅은 접촉각이 넓어질수록 결빙 시간이 늘어나는 경향을 확인할 수 있었다. 반면에 구멍의 패턴을 가지고 있는 소수성 표면은 구멍 사이의 거리가 넓어질수록 결빙 시간이 줄어드는

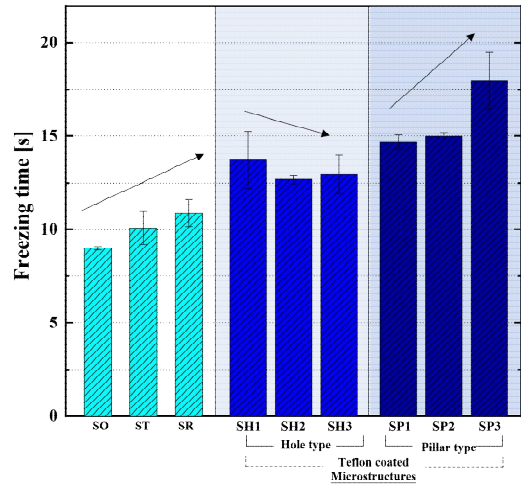


Fig. 5. Relationship between freezing time and surface.

경향을 나타낸다. 마지막으로 필러 구조를 가지고 있는 소수성 표면은 필러 사이의 거리가 넓어질수록 결빙 시간이 늘어나는 추세를 확인할 수 있다. 추세를 비교해보면 표면의 패턴화 구조의 변화에 따른 추세 변화가 다를 수 있다. 추세의 변화 요인으로서는 구멍 구조와 필러 구조의 거칠기율은 같지만 두 패턴화 구조의 고체분율은 다르다. 고체분율은 패턴화된 표면에 액적이 직접 닿는 비율로 식 2와 3을 통해서 두 구조의 고체분율이 다를 수 있다. 따라서 표면의 패턴화 구조에 의해 다른 추세를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 또한 패턴화 된 표면 위에 카시-백스터 상태로 액적이 접촉하는 표면을 수치화로 보여주는 고체분율과 결빙 시간을 Fig. 6에서 그래프로 보여준다. 그래프를 확인해보면 고체분율이 작아질수록 결빙 시간이 늘어나는 추세를 확인할 수 있다. 필러 형태의 패턴에서는 사이 간격이 넓어질수록 액적이 표면과 닿는 면적이 작아져 고체분율이 0.049인 SP3에서 18.61초의 결빙 시간으로 실험 시편들 중에서 가장 길고, 반면 구멍 형태의 패턴에서는 사이 간격이 넓어질수록 액적이 표면에 닿는 면적이 많아져 소수성 특징을 가지고 있어도 결빙 시간이 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 따라서 표면의 접촉하는 액적의 표면적의 변화가 결빙 지연 시간과 관련이 있다고 볼 수 있다.

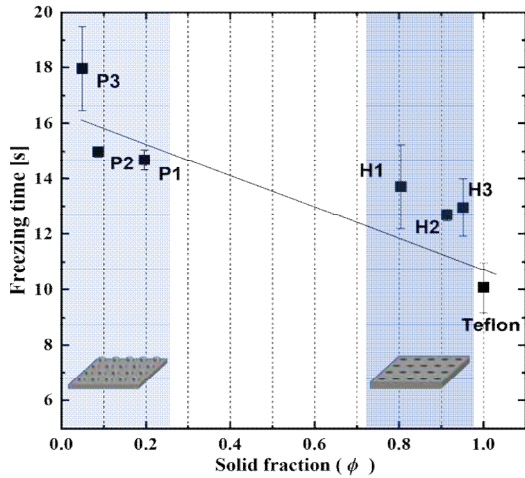


Fig. 6. Comparison with Solid fraction effect on freezing time.

3.2 되튐(Rebound)

방빙 가지화 실험 장치를 이용해 결빙 지연 시간을 반복 실험을 진행했다. 반복 실험을 진행하면서 이미지를 획득했던 결과 중 특정 시편(SP)에서 액적의 되튐 현상을 Fig. 7과 같이 관찰 및 가지화하였다. 다른 패턴화된 표면에서는 액적 충돌 이후 표면에서 되튐하지 못하고 국부

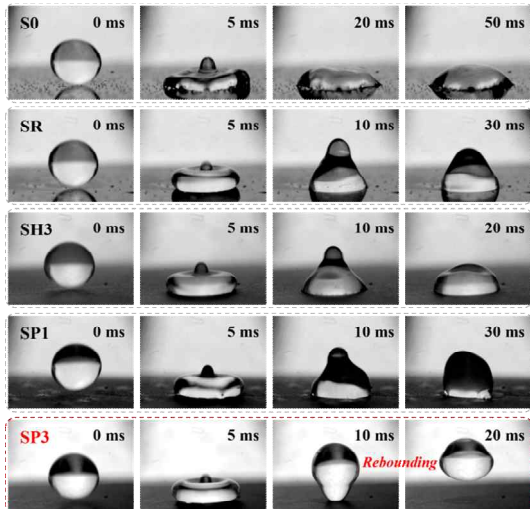


Fig. 7. Image of the rebounding droplet through freezing visualization experiment using high-speed camera.

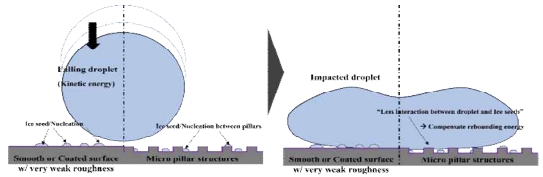


Fig. 8. Schematic of Rebounding droplet mechanism.

적으로 응축/응결된 미세입자로 인하여 붙어있지만 반면에 SP3에서 액적이 되튐하는 이미지를 보여준다.

Zhang^[20]의 연구에서는 다양한 실험 온도 조건과 표면의 거칠기의 변화를 이용해 액적의 결빙과 거동에 대한 연구가 있다. 반면, 이번 실험은 동일한 실험 온도 조건에서 여러 패턴화 된 표면과는 다르게 SP3 표면에서 액적이 되튐하는 현상을 Fig. 8과 같이 분석해 보았다. 표면에 핵 생성이 이루어지려면 다양한 변수들이 있지만 현재 실험에서 가장 영향이 큰 변수는 습도와 표면과 액적과의 충돌이 있을 것이다. 이번 분석에서는 동일한 영하 온도와 습도 조건 조건을 가진 액적 충돌 실험으로부터 액적의 되튐 현상을 분석했다. 먼저, 매끈하거나 고체 분율이 큰 면을 가지고 있는 시편에서는 액적과 표면이 충돌하고 난 직후 표면 위에 얼음의 핵 생성이 이루어져 액적이 표면 위에 생성된 핵들과 반응을 하면서 액적이 튀어오르지 못하고 바닥에 고정될 수 있다. 반면에 마이크로 필러 구조인 SP3에서는 액적과 표면이 충돌하는 면적이 작아지다보니 액적과 표면이 충돌하면서 생기는 얼음의 핵 생성이 다른 표면보다 더 적게 생성된다. 또한 습도에 의해 생성된 핵이 여러 시편들과 다르게 필러와 필러 사이의 바닥면에 핵이 제일 많이 존재하므로 액적이 표면과 충돌할 때 핵과 많이 접촉하지 못하게 되면서 액적이 표면에 부착되지 않는다. 따라서 액적이 표면으로부터 떨어지는 운동에너지를 다 손실하지 못하면서 남은 에너지가 액적이 되튐하는 운동에너지로 변환시켜 Fig. 7 에서와 같이 다시 튀어오르는 현상이 일어날 수 있다고 고려된다.

$$E_{tot} = E_k + E_s + \Delta E_{bss} \quad (6)$$

4. 결론

본 연구는 표면 패턴화 설계 인자 중 패턴 사이의 간격을 조절한 시편을 제작하고 방빙 가시화 실험의 가시화를 통해 결빙 지연시간을 분석하였다. 실험 결과 패턴의 구조와 패턴 사이의 간격에 의해 결빙 지연 시간이 다른 것을 확인하였다. 필러 구조는 간격이 커지면서 고체 분율이 작아지면서 결빙 시간을 지연시켰고, 반면 구멍 구조는 구멍 사이의 거리가 멀어질수록 고체 분율이 커지면서 결빙 시간이 단축되었다. 고체 분율이 커지면 직접 접촉하는 면적이 넓어져 바닥과의 에너지 교환이 더 쉽게 이루어져 액적이 어는 시간이 더 빨라지는 것을 직접 확인할 수 있었다. 또한, 가시화 실험 도중에 관측되었던 SP3시편에서의 되튐 현상을 분석해봤다. 패턴의 구조 및 설계 인자 변화로 인한 결빙 지연 시간 향상에 대한 연구에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 향후 계획으로는 SP3시편에서 액적 되튐 현상에 대해 정량화 및 되튐 현상이 일어나는 고체 분율의 범위를 알아내기 위해 추후 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2021년 한국연구재단 (과학기술정보통신부 (과제번호 : 2020R1C1C1011232)의 지원에 의하여 수행되었음.

REFERENCE

- 1) Gent, R.W., Dart, N.P. and Cansdale, J.T., 2000, "Aircraft icing", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, Vol. 358(1776), pp. 2873-2911.2) Jakob, M., "Heat Transfer," Vol. I, Chap 29, Wiley, 1949.
- 2) Frohboese, P. and Anders, A. 2007, "Effects of Icing on Wind Turbine Fatigue Loads", *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 75, 012061.
- 3) Andersson, L. O., Golander, C. G. and Persson, S., 1994, "Ice adhesion to rubber materials", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 8 (2), pp. 117-132.
- 4) Dalili, N., Edrisy, A. and Carriveau, R., 2009, "A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13 (2), pp. 428-438.
- 5) Fillion, R.M., Riahi, A.R. and Edrisy, A., 2014, "A review of icing prevention in photovoltaic devices by surface engineering", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, pp. 797-809.
- 6) Li, W., Zhan, Y. and Yu, S., 2021, "Applications of superhydrophobic coatings in anti-icing: Theory, mechanisms, impact factors, challenges and perspectives", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 152, 106117.
- 7) M.J. Kreder et al., 2016, "Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery?", *Nat Rev Mater* Vol. 1 (1), 15003.
- 8) Wang, L., Gong, Q., Zhan, S., Jiang, L. and Zheng, Y., "Robust Anti-Icing Performance of a Flexible Superhydrophobic Surface", *Advanced Materials*, Vol. 28, pp. 7729-7735.
- 9) R. Zhang et al., 2018, "Supercooled water droplet impact on superhydrophobic surfaces with various roughness and temperature", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 122, pp. 395-402.
- 10) H. Wang et al., 2019, "One-Step Fabrication of Robust Superhydrophobic Steel Surfaces with Mechanical Durability, Thermal Stability, and Anti-icing Function", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 11 (28), pp. 25586-25594.
- 11) X. Zhan et al., 2014, "A novel superhydrophobic hybrid nanocomposite material prepared by surface-initiated AGET ATRP and its anti-icing properties", *J. Mater. Chem. A*, Vol. 2 (24), pp. 9390-9399.
- 12) B. Wu et al., 2021, "A superhydrophobic coating

- harvesting mechanical robustness, passive anti-icing and active de-icing performances”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 590, pp. 301-310.
- 13) L. Cao et al., 2009, “Anti-Icing Superhydrophobic Coatings”, *Langmuir* Vol. 25 (21), pp. 12444-12448.
- 14) D. Ge et al., 2014, “Spray coating of superhydrophobic and angle-independent coloured films”, *Chem. Commun*, Vol. 50 (19), 2469.
- 15) S. Kim et al., 2020, “Droplet impacting dynamics on wettable, rough and slippery oil-infuse surfaces”, *J Mech Sci Technol*, Vol. 34 (1), pp. 219-228.
- 16) Ozbay, S., Yuceel, C. and Erbil, H.Y., 2015, “Improved Icephobic Properties on Surfaces with a Hydrophilic Lubricating Liquid”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 7 (39), pp. 22067-22077.
- 17) Work, A. and Lian, Y., 2018, “A critical review of the measurement of ice adhesion to solid substrates”, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 98, pp. 1-26.
- 18) A.J. Meuler et al., 2010, “Relationships between Water Wettability and Ice Adhesion”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 2 (11), pp.3100-3110.
- 19) S.H. Kim et al., 2019, “Leidenfrost point and droplet dynamics on heated micropillar array surface”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 139, pp. 1-9.
- 20) R. Zhang et al., 2018, “Supercooled water droplet impact on superhydrophobic surfaces with various roughness and temperature”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 122, pp. 395-402