



### 저작자표시-비영리 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사학위논문

고속 주행환경에서 슬라이더와 얼음  
표면의 접촉면적 성장에 관한 연구

Evolution of contact area between a high-speed  
slider and ice surface

2017년 8월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

윤 창 호

# 국 문 초 록

얼음은 독특한 마찰특성을 갖는데, 마찰될 때 얼음 표면이 마찰열에 의해 녹아 얇은 수막을 형성하고, 형성된 수막에 의해 자체적으로 윤활되어 낮은 마찰력을 갖는다. 이러한 독특한 얼음의 마찰 특성은 속도를 겨루는 동계스포츠나 타이어 산업, 쇄빙선 등에서 얼음 마찰력을 컨트롤하기 위해 여러 연구자들에게 연구되어왔다.

아무리 평평한 얼음이라도 그 표면에는 요철이 존재하고, 슬라이더와 부분적으로 접촉하여 다양한 크기와 형태의 실접촉면적을 형성한다. 접촉면에 형성된 수막의 넓이나 형태는 얼음 마찰력에 필연적으로 영향을 줄 것이기 때문에 실접촉면적은 얼음마찰에 중대한 영향을 주는 요소이다. 때문에 얼음 마찰면의 실접촉면적은 여러 연구자들에게 의해 관측되어왔으나 마찰 후 정지된 상태에서만 관찰되어왔고, 동적인 상황에서 관찰된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 얼음 마찰면에서 일어나는 전반사 특성을 이용한 실접촉면적을 실시간으로 가시화할 수 있는 방법을 제시하였다.

석영 프리즘을 얼음 위에서 마찰시키며, 마찰면을 프리즘을 통해 비스듬하게 바라보면 석영 프리즘과 얼음이 직접 맞닿지 않는 곳은 전반사가 일어나 밝게 보이지만, 석영 프리즘과 얼음이 맞닿는 곳은 빛이 투과하여 어둡게 보여, 얼음이 직접 맞닿는 실접촉면적을 가시화할 수 있었다. 이 방법으로 관찰된 얼음의 실접촉면적은 다수의 접촉점으로 이루어져 있으며, 이들 접촉점들은 얼음 표면의 돌기들이 프리즘과 닿아 형성된 것들이다. 이들 접촉점들은 프리즘과의 접

축 초기에는 몹시 작다가도 마찰이 일어나는 중에 그 크기가 빠르게 성장해 나가는 현상이 발견되었다. 이는 마찰열에 의해 얼음 돌기의 상단이 녹아나가 마찰면적이 점차 증가하는 것으로 보인다. 이는 기존의 얼음 마찰을 연구한 선행연구자들이 고려하지 못했던 현상이다.

앞서 관찰한 접촉점의 성장과정을 보다 통제된 환경에서 관찰하기 위해, 반구형으로 제작된 얼음 시편을 연마된 석영디스크에 올리고, 석영디스크를 회전시켜 고정된 반구형 얼음 시편과 마찰시켜 그 마찰력을 측정하였다. 동시에 초고속 카메라가 석영디스크 측면에 설치되어 얼음 시편과 석영디스크의 실제접촉면적을 디스크 옆면을 통해 촬영하였다. 그 결과 실접촉면적과 마찰력이 시간에 따라 점차 증가하는 현상을 통제된 환경에서 관찰할 수 있었다. 얼음의 반지름  $R$ , 속도  $U$ , 그리고 수직항력  $F_N$ 을 변화시켜 가며 실접촉면적과 마찰력을 측정하게 되면 넓게 산포된 데이터 라인들을 얻을 수 있다. 한편 구형으로 가정된 얼음 돌기가 마찰열에 의해 녹아가는 과정을 녹는점 근처에서 스케일링 분석하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.  $A \sim F_N^0 R^{\frac{5}{4}} U^{\frac{6}{5}} t^{\frac{4}{5}}$ ,  $F_f \sim F_N^0 R^{\frac{3}{5}} U^{\frac{7}{5}} t^{\frac{3}{5}}$ . 위의 관계식으로 얼음의 반지름  $R$ , 속도  $U$ , 그리고 수직항력  $F_N$ 을 도식하게 되면 넓게 산포되어있던 데이터 라인들이 하나의 마스터 커브 위에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한 제시된 모델과 실험결과 모두에서 실접촉면적과 마찰력이 수직항력에 무관하다는 결과를 얻을 수 있었다. 얼핏 보기에 Amonton's law of friction에 위배되어 보이는 이러한 현상은 슬라이더에 작용하는 수직력이 얼음과 슬라이더 사이에 형성된 물층의 유

동에 영향을 주지 못하여 나타나는 현상이다.

주요어: 마찰력, 빙면, 실접촉면적, 돌기, 얼음, 전반사, 가시화  
학 번: 2014-22494

# 목 차

국문초록 .....	i
목차 .....	iv
List of Figures .....	v
기호설명 .....	ix
1. 서론 .....	1
2. 실험장치 및 실험방법 .....	6
2.1 마찰측정장비 및 마찰측정방법 .....	6
2.2 얼음 마찰면 가시화 실험장치 및 실험방법 .....	12
2.3 단일 접촉점의 접촉면 성장 가시화 실험장치 및 실험방법 .....	14
3. 단일접촉점의 성장과정 이론적 모델링 .....	18
4. 실험결과 및 논의 .....	24
4.1 얼음 마찰면 가시화 실험 결과 .....	24
4.2 단일 접촉면의 성장 가시화 실험 .....	31
5. 결론 .....	40
참고문헌 .....	41
Abstract (영문초록) .....	45

## List of figures

- Fig. 1 Schematic figure of evolution of contact area. When an ice asperity contacts with slider, relatively small contact area is initially formed and the contact area should increase during sliding as the top of the asperity is melted by frictional heat ..... 4
- Fig. 2 Previous research which show that ice asperities are flattened by sliding. (a) Ice surface was observed with LT-SEM after being rubbed with steel(Ref. 24), (b) Flat Perspex surface coated by soot is rubbed with an ice rod and observed by microscope.(Ref. 4), (c) a layer of compacted snow is observed by MicroCT.(Ref. 8) ..... 5
- Fig. 3 Experimental setup for measuring friction of ice. .... 9
- Fig. 4 (a) A schematic figure of production of flat ice track. Aluminium track for ice is put on chiller upside down. Ice is frozen from surface for measurement so that the effect of volume expansion of ice during freezing and air bubble formation is minimized. (b) Device for producing ice track. .... 10
- Fig. 5 (a) A schematic figure of normal force generator. Buoy which has certain mass is hung from the specimen. Buoyancy force reduce the normal force applied on specimen. The normal force applied on specimen is controlled by changing the height of the glycerin container. (b) The normal force is stabilized by separating the whole system from specimen. Inertia of the

specimen is reduced so that the vibration effect on normal force can be minimized. .... 11

Fig. 6 (a) A schematic figure of the visualization setup. (b) When the angle of incidence satisfies the equation (1), light is totally reflected on the prism-air interface(non contact area). However, light penetrates the prism-ice interface(real contact area). .... 13

Fig. 7 (a) A schematic figure of the visualization setup for observing the evolution of the contact area of single ice asperity. (b) Same as Fig. 6(b), when the angle of incidence satisfies the equation (1), light is totally reflected on the prism-air interface(non contact area). However, light penetrates the prism-ice interface(real contact area). .... 16

Fig. 8 A process of preparation for an ice hemispherical specimen. (a) A PDMS mold is casted into a container with a steel ball located at the center. (b) An inner wall made of PTFE is set on the PDMS mold. (c) Water is frozen in the PDMS mold with a specimen holder placed on top of the water. (d) The ice specimen is pulled out. .... 17

Fig. 9 (a) Geometric parameters. (b) There are two types of outflow from the water film and single type of inflow into the water film. Water escapes from the film by being squeezed out or being sheared out. At the same time, Water is generated on the ice surface by being melted. .... 23

Fig. 10	Acquired image of real contact area between ice and quartz prism. $T = -0.5^{\circ}\text{C}$ , $U = 0.01 \text{ m/s}$ , $F_n = 2.7 \text{ N}$ . Area of contact spot increase during sliding. Water is dragged by surface tension and a puddle is formed at the end of the prism(left side). .....	27
Fig. 11	Acquired image of real contact area between ice and quartz prism. $T = -0.5^{\circ}\text{C}$ , $U = 10 \text{ m/s}$ , $F_n = 2.7 \text{ N}$ . The speed of front of contact is $10 \text{ m/s}$ which is same as the speed of the ice surface and the speed of tail of contact is $5 \text{ m/s}$ (half of $10 \text{ m/s}$ ). It indicates that flow in the water film is mainly shearing flow. ....	28
Fig. 12	Real contact area and friction force are plotted. $T = -0.5^{\circ}\text{C}$ , $U = 10 \text{ m/s}$ , $F_n = 1.2 \text{ N}$ . There is strong correlation between the real contact area and the friction force. ....	29
Fig. 13	Estimated thickness of the water film between prism and ice. $T = -0.5^{\circ}\text{C}$ , $F_n = 1.2 \text{ N}$ . ....	30
Fig. 14	Acquired images of contact area evolution between hemispherical ice and a quartz disk. $T = -0.3^{\circ}\text{C}$ , $U = 3.2 \text{ m/s}$ , $F_n=145 \text{ N}$ , $R = 3 \text{ mm}$ .....	32
Fig. 15	(a) Contact area between hemispherical ice and quartz disk versus time. (b) Frictional force versus time. (c) Contact area between hemispherical ice and quartz disk versus time plotted according to our scaling law. (b) Frictional force versus time plotted	

	according to our scaling law. ....	33
Fig. 16	Friction force versus normal force.(Ref. 7) .....	36
Fig. 17	Concept of surface roughness. N ice asperities, which have radius R, exist on unit area. ....	38
Fig. 18	Concept of bearing ratio suggested by Baurle(2007).(Ref. 7) Real contact area ratio(bearing ratio) is a function of height. ....	39

## 기 호 설 명

$F_f$	마찰력
$F_N$	수직력
$A$	실접촉면적
$T_{air}$	초기온도
$T_m$	얼음의 녹는점
$\Delta T$	$\Delta T = T_m - T_{air}$
$U$	속력
$R$	얼음돌기의 반지름
$h$	물층의 두께
$H$	얼음돌기가 녹아내린 총 높이(Fig. 9 참조)
$t$	시간
$\theta$	접촉면의 가장자리와 구의 중심을 이은 선분과 수직선 사이의 각도(Fig. 9 참조)
$q_f''$	물층 내부의 전단응력에 의해 발생한 열
$q_m''$	얼음의 표면융해에 필요한 열
$q_c''$	전도되는 열
$q_{c,ice}''$	얼음 내부로 전도되는 열
$q_{c,slider}''$	슬라이더 내부로 전도되는 열
$\eta$	물의 점도
$\rho_i$	얼음의 밀도
$\rho_w$	물의 밀도
$\rho_q$	석영의 밀도
$c_i$	얼음의 비열
$c_q$	석영의 비열
$k_q$	석영의 열전도도
$L$	얼음의 융해열

# 1. 서론

얼음은 낮은 마찰력을 갖는 독특한 물질이다. 얼음의 마찰특성은 동계스포츠나 타이어 산업에서 얼음의 마찰력을 컨트롤하기 위해 여러 연구자들에게 연구되어왔다.[1-15, 24] 얼음은 마찰될 때 표면이 마찰열에 의해 녹고, 표면에 얇은 water film을 형성하고, 형성된 water film이 윤활작용을 하여 얼음을 미끄럽게 한다.[3] 이러한 독특한 현상은 흔히 hydrodynamic regime이라 불리는 고온 고속 영역에서 지배적으로 일어난다.[16]

완벽하게 평평한 표면은 존재할 수 없기 때문에, 얼음 표면에는 다양한 형상의 돌기가 존재하고, 이들 돌기는 슬라이더와 부분적으로 접촉하여 얼음과 슬라이더 사이에 다양한 크기와 형태의 실접촉을 형성한다.[17] 얼음 마찰력은 접촉면에 형성된 water film의 넓이나 형태에 영향을 받을 것이기 때문에 실접촉면적은 얼음마찰에 중대한 영향을 주는 요소이다. 때문에 얼음 표면에 형성된 실접촉면적은 얼음 마찰을 연구하는 선행연구자들의 관심을 끌어왔다.

일부 선행연구자들은 일반적인 고체간의 접촉과 마찬가지로 응력에 의해 발생하는 얼음과 시편의 변형을 얼음과 시편의 Hardness로부터 추정하였는데,[6,13-15] 얼음은 마찰될 때 마찰열에 의해 표면이 빠르게 녹아 마모되기 때문에 일반적인 고체간의 접촉과는 접촉면적 형성 메커니즘이 다를 것이다. 다만, 얼음의 접촉면적 형성 메커니즘은 접촉면의 동적인 관측의 어려움으로 말미암아 아직 완벽히 이해되지 않았다.

얼음 표면이 마찰에 의해 변화되는 과정을 관찰한 이들은 공통적으로 마찰 후 얼음 표면이 많은 마모를 겪음을 보고하였다.[4, 8, 24] 이 중 시편으로 금속이나 폴리머와 같은 rigid한 재질을 사용한 경우, 마찰 후 얼음 표면의 돌기 상단이 용해되어 평탄화(flattened)되는 것을 보고하였

다.[4,5,8,9,15] 이는 얼음과 시편 사이에 형성된 실접촉면적이 일반적인 고체간의 접촉과는 다르게 응력변형에 의해 형성된 초기면적을 계속 유지하지 않고, 돌기 상단이 마모되어 깎여나가 평탄화된 면적만큼 형성됨을 의미한다. 이러한 마모과정은 마찰이 진행되는 과정중에 지속적으로 일어날 것이며, 얼음 돌기는 마모될수록 그 평탄화된 면적도 넓어지므로, 얼음 돌기와 시편 사이의 실접촉면적은 마찰이 일어나는 중에 지속적으로 성장할 것이다.(Fig. 1) 따라서 얼음 마찰을 고려함에 있어, 얼음 마찰면의 실접촉면적은 마찰되는 시간이나 마찰된 거리에 따라 동적으로 변할 것이며, 이러한 현상을 이해하려면 실접촉면적을 마찰이 일어나는 과정 중에 실시간으로 관측되어야 할 것이다.

선행연구자들은 주로 마찰이 끝난 후 정적인 상태에서 실접촉면적을 관찰하는 간접적인 방법으로 실접촉면적을 관측하였다. 초기 연구에서는 그을음이 도포된 Perspex rod에 평평한 얼음을 마찰시킨 후 그을음이 벗겨진 면적으로부터 실접촉면적을 유추하였다.[4] Roberts and Richardson(1981)은 투명한 반구형 elastomer를 이용하여 얼음과의 접촉면적을 직접 관찰하였으나,[5] 마찰을 시키지는 않고 정지 상태에서만 관찰하였다. 이후 연구자들은 시편과 마찰시킨 후의 얼음 혹은 눈의 표면을 Microscope[12], SEM[8,9], X-ray CT[8], White light interferometry[15]로 더욱 정밀하게 관찰하였으며, 얼음 혹은 눈의 표면이 마모되어 평탄화된 형상으로 실접촉면적을 추정하였다. 선행연구들의 정밀한 측정에도 불구하고, 이들은 얼음과 시편이 마찰되는 동안 실접촉면적을 실시간으로 관찰하지 못하였다는 한계가 존재한다. 비록 Fulop and Tuononen(2013)과 Tuononen et al.(2016)이 얼음 표면을 마찰 후 관측하는 과정을 여러 번 반복하여 quasi-real time으로 관측하였으나[12, 15], 여전히 실시간 측정과는 거리가 있다.

본 연구에서는 전반사 특성을 이용하여 실접촉면적을 실시간으로 가시화할 수 있는 방법을 제시한다. 또한 우리는 마찰면에서 발생한 마찰열이 전도로 빠져나가지 못하고 대부분 표면 용해에 사용되는 Hydrodynamic regime, 즉 고온( $T = -0.3^{\circ}\text{C}$ ) 고속( $U = 1$  to  $10$  m/s) 조건에서 얼음 돌기가 용해되어 실접촉면적이 성장하는 과정을 예측할 수 있는 스케일링 분석을 수행하였고, 이를 실시간으로 가시화된 접촉면적과 비교하였다.

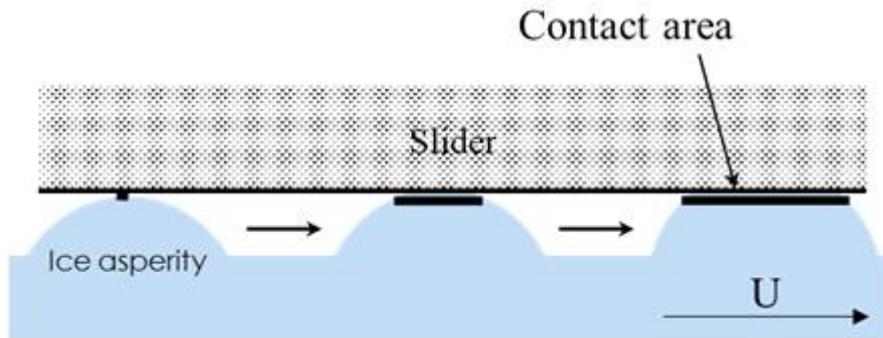


Fig. 1 Schematic figure of evolution of contact area. When an ice asperity contacts with slider, relatively small contact area is initially formed and the contact area should increase during sliding as the top of the asperity is melted by frictional heat

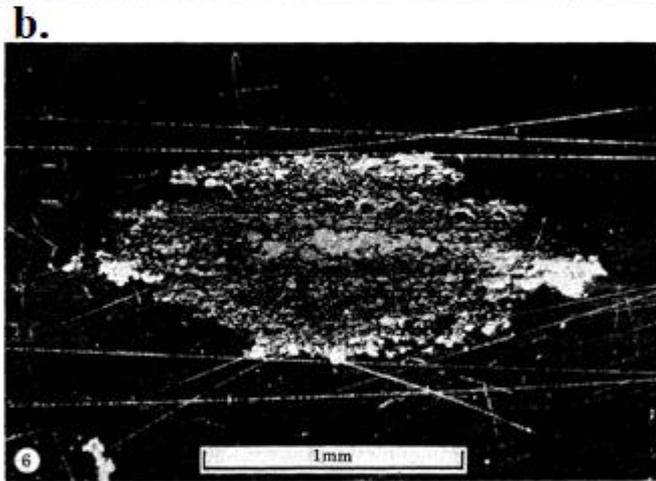
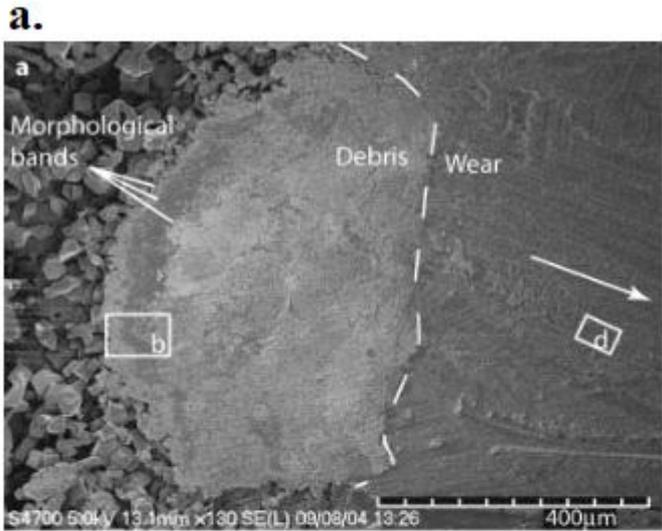


Fig. 2 Previous research which show that ice asperities are flattened by sliding. (a) Ice surface was observed with LT-SEM after being rubbed with steel(Ref. 24), (b) Flat Perspex surface coated by soot is rubbed with an ice rod and observed by microscope.(Ref. 4), (c) a layer of compacted snow is observed by MicroCT.(Ref. 8)

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 마찰측정장비 및 마찰측정방법

빙면의 마찰 메커니즘을 밝히기 위해서는 마찰계수를 정밀하게 측정할 수 있는 장비 및 방법이 필요하다. 하여, 본 연구에서는 Fig.3와 같은 회전형 고속 마찰 측정기를 구축하여 항온항습기 내에 설치하였다. 직경 330 mm의 환형 얼음 트랙을 회전시키고, 실험용 시편을 트랙 위에 올린다. 이때 시편이 회전하는 얼음트랙으로부터 받는 마찰력을 시편과 연결된 로드셀이 측정한다. 본 연구에서 구축한 회전형 마찰 측정기는 최외곽 선속도가 0.03 m/s에서 29 m/s까지 조절이 가능하며, 이는 스키점프 선수가 활강시 겪는 속도영역과 비슷하다. 마찰력을 측정하는 로드셀(PW4C3/300g, HBM)은 최대용량 3N 내에서 정확도 0.03%로 마찰력을 측정한다. 시편에 가해지는 수직력은 후술될 부력장치에 의해 2 N까지 조절가능하다. 마찰 측정기는 항온항습기 내부에 설치되어 온도를 영하 20도에서 영하 0.5도까지 제어할 수 있게 하였다.

고속에서 얼음이 진동 및 원심력에 의해 깨지거나, 회전체가 붕괴할 수도 있기 때문에, 회전 안정성이 확보되어야 하며, 고속회전시 발생하는 진동을 방지할 수 있는 수단이 있어야했다. 같은 최외곽 선속도를 갖는다면 지름에 반비례하여 구심가속도가 감소하기 때문에 본 연구에서는 얼음트랙을 330mm의 대직경으로 제작하여 회전의 안정을 꾀하였다. 회전진동의 효과를 억제하기 위해 회전축에 서스펜션이 연결되어있다. 또한 측정 정밀도를 향상시키고, 시편 자체의 진동 안정성을 위해 시편과 수직력을 인가하는 장치에도 서스펜션이 들어가있다.

마찰실험용 얼음은 고속으로 돌아가기 때문에 실험 정밀도 및 주행 안정

성을 위해 매우 매끈하게 제작되어야 한다. 다만, 얼음을 단순히 얼릴 경우 얼음 내부에 다량의 기포가 생성되며, 또한 물이 얼면서 발생하는 부피팽창 때문에 얼음의 형상이 일그러지고, 곳곳에 역고드름이 형성된다. 이렇게 표면 곳곳이 튀어나온 얼음은 고속으로 회전하면서 시편을 때리며, 얼음 내부에 형성된 기포는 얼음의 회전중심을 틀어지게하여 회전 안정성 및 마찰측정 정밀도를 크게 해한다. 얼음을 얇게 여러 번 적층하여 얼리더라도 이러한 현상은 여전히 일어난다. 또한 얼음은 취성이 강하여 기계가공도 쉽지 않다.

본 연구팀은 얼음의 기포 생성 및 역고드름 형성을 억제하기 위해 얼음을 바닥에서부터 거꾸로 얼리는 특수한 장비를 제작하였다.(Fig. 4) 바닥에 구멍이 뚫린 얼음트랙을 연마된 PTFE 플레이트 위에 뒤집어 올리고, 물을 주입한다. PTFE 하단에 설치된 펠티어 쿨러에 의해 PTFE 플레이트가 냉각되고, 얼음은 PTFE 플레이트와 제일 가까운 하단부터 얼기 시작하여 마지막에 상단이 얼게 된다. 얼음을 바닥에서부터 얼릴 경우, 얼음의 부피가 팽창하더라도 상단으로 물이 쉽게 이탈되어 얼음의 형상에 영향을 주지 않으며, 기포 또한 상단으로 빠져나가므로 매우 순수한 얼음 결정을 만들 수 있다. 또한, 얼린 후 얼음을 뒤집어 바닥면을 실험에 사용하는데, 바닥면은 연마된 PTFE 표면을 본떠서 얼기 때문에 얼음의 표면이 마치 막 연마된 표면과 같이 평평하게 언다.

시편에 무게를 가하는 방법으로는 가장 간단한 방법은 시편 위에 무게추를 올리는 방법이다. 다만, 마찰측정과정에서 불가피하게 시편에 진동이 인가되며, 이 때문에 시편과 무게추 전체가 불안정하게 흔들리기도 하며 이는 측정되는 마찰력에 직접적인 영향을 준다. 시편과 얼음 사이의 접촉이 제대로 이루어지지 않기 때문이다. 시편에 무게를 가하는 다음 방법으로는 외부의 고정된 프레임에서 유압 혹은 탄성력을 시편에 가하는 방법이 있

다. 이 방법은 시편부가 탄성체 등에 의해 분리되기 때문에 시편부 관성이 작아지고, 때문에 시편이 보다 안정적으로 얼음과 접촉하게 된다. 다만, 이 과정에서 시편이 조금이라도 어긋나게 정렬될 경우 가해진 수직력에 수평 성분의 힘이 섞이게 된다. 이 때 발생한 수평력은 마찰력과 섞여 오차를 야기한다. 만약에 시편이  $0.6^\circ$ 의 작은 각도만 어긋나게 정렬되더라도 측정되는 마찰계수는 0.01의 오차를 가지며, 일반적인 얼음 마찰계수가 0.05 금방임을 고려하면 이는 곧 20%의 오차율을 야기하는 꼴이 된다. 때문에 시편의 정렬이 어긋나더라도 이를 보정할 수 있는 수직력 인가 장치를 제작하였다.(Fig. 5) 전체적인 구조는 글리세린 수조에 떠있는 부양체가 시편에 매달리는 구조인데, 이런 구조에서는 시편이 정렬되지 않더라도 부양체가 복원력에 의해 정위치를 찾아가게 되며, 또한 충분히 시간이 지난 상태에서는 부양체에는 부력과 중력 외의 힘이 작용하지 않으므로, 시편에 수평력이 섞이지 않은 일정한 수직력을 가할 수 있다. 글리세린 수조의 높낮이를 리니어 스테이지를 통해 조절함으로써 부양체에 가해지는 부력을 조절할 수 있다. 때문에 부양체와 시편에 가해지는 중력과 부양체에 가해지는 부력의 차가 시편에 가해지게 된다. 이 때문에 시편에 가해지는 수직력을 원격으로 조정할 수 있으며, 시편을 공중에 띄워두었다가 원하는 시점에 내려둘 수도 있게 된다.

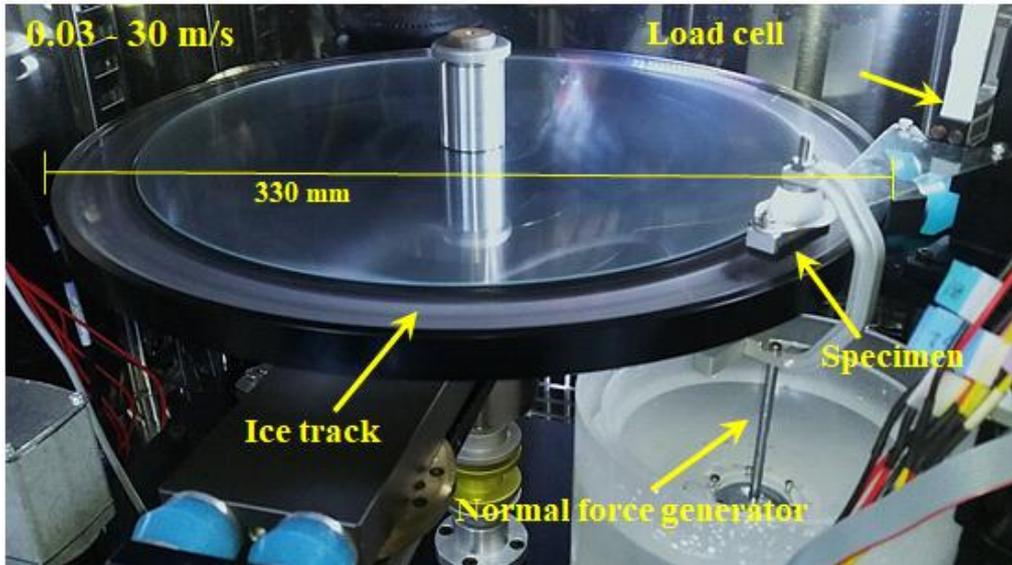


Fig 3. Experimental setup for measuring friction of ice.

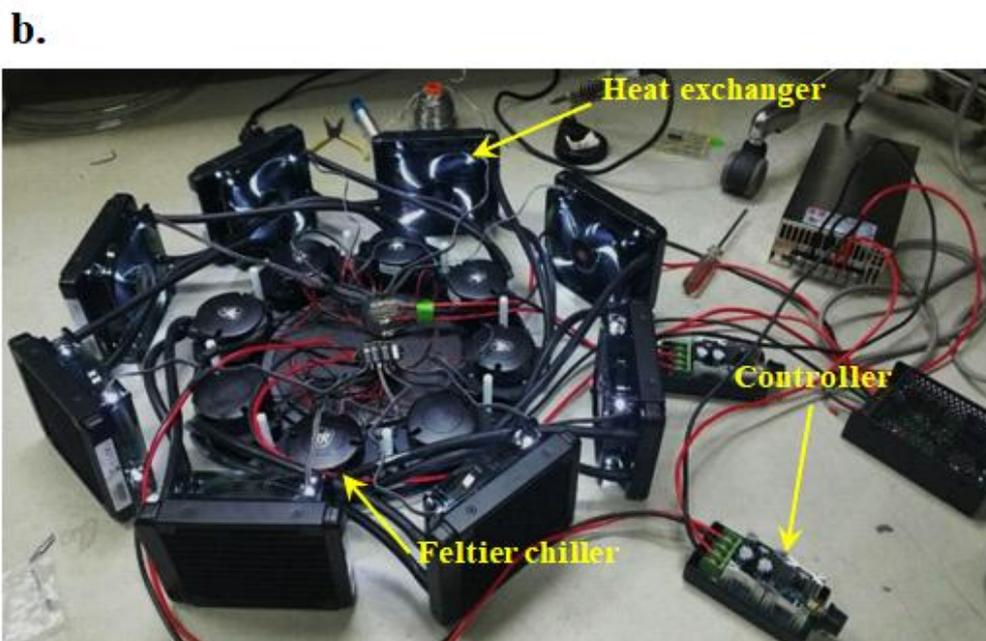
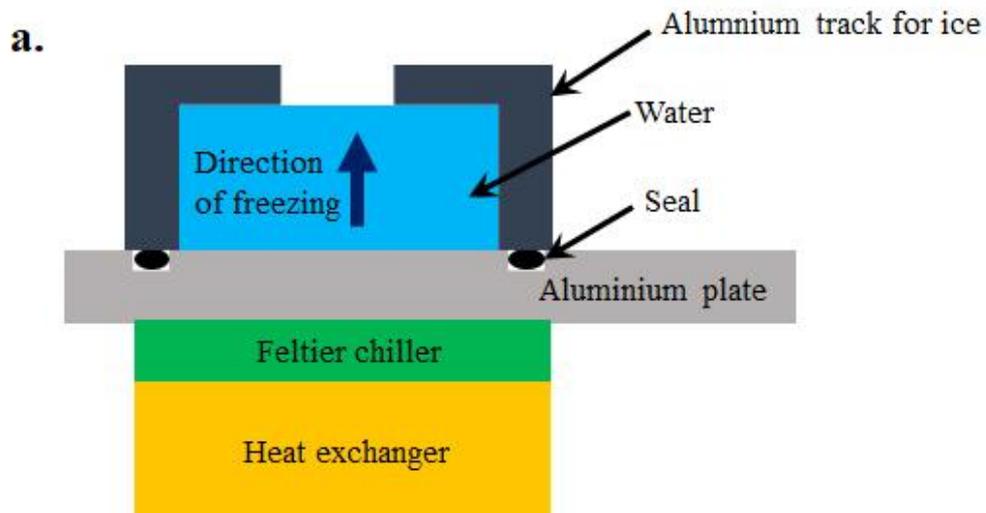


Fig. 4 (a) A schematic figure of production of flat ice track. Aluminium track for ice is put on chiller upside down. Ice is frozen from surface for measurement so that the effect of volume expansion of ice during freezing and air bubble formation is minimized. (b) Device for producing ice track.

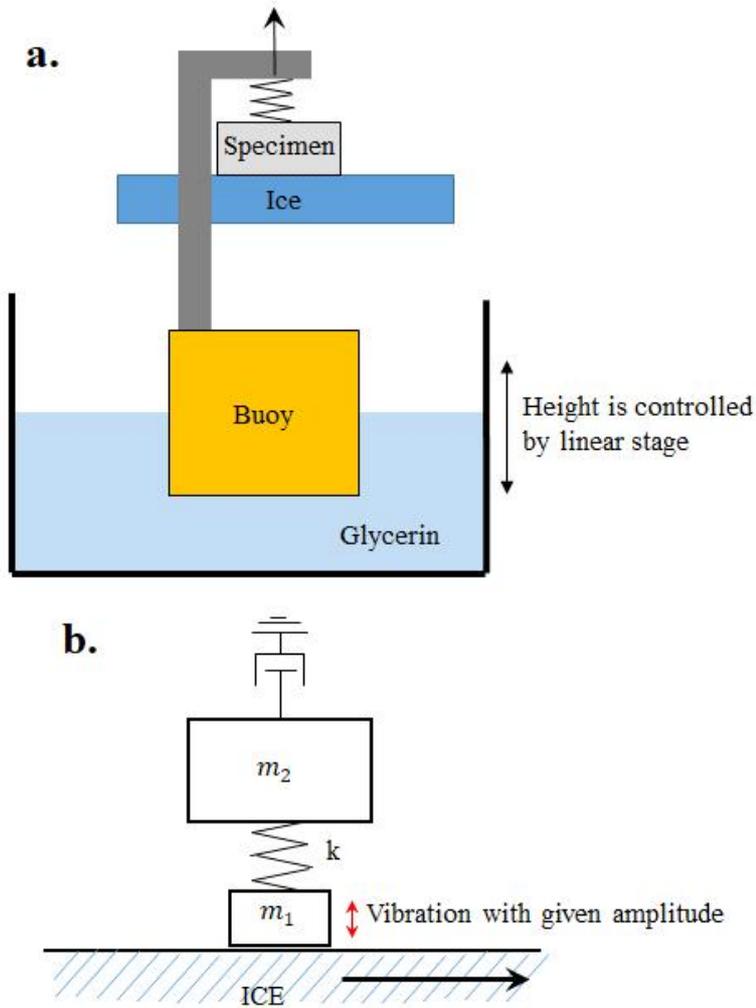


Fig. 5 (a) A schematic figure of normal force generator. Buoy which has certain mass is hung from the specimen. Buoyancy force reduce the normal force applied on specimen. The normal force applied on specimen is controlled by changing the height of the glycerin container. (b) The normal force is stabilized by separating the whole system from specimen. Inertia of the specimen is reduced so that the vibration effect on normal force can be minimized.

## 2.2 얼음 마찰면 가시화 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 얼음과 시편이 마찰되는 중에 실시간으로 실접촉면적을 가시화할 수 있는 실험을 수행하였다. 사용된 실험방법은 전반사를 이용한 실접촉면적 가시화 방법으로 이는 상업적으로 기기에서 지문을 인식할 때 자주 사용되는 방법이다.

2.1절에서 기술한 마찰측정장비의 시편으로 바닥면의 크기가 10 mm X 30 mm인 석영프리즘을 사용하고, 석영프리즘이 얼음트랙과 마찰될 때 옆에 설치된 초고속 카메라가 석영의 바닥면을 비스듬히 촬영하게 된다.(Fig.6) 이 때 프리즘의 바닥면은 부분적으로 얼음과 접촉하며, 프리즘이 얼음과 직접 닿는 부분을 접촉면, 닿지 않고 공기에 노출된 부분을 비접촉면이라 할 수 있다. 광원에서 출발한 빛이 석영 프리즘의 바닥면에 도달할 때, 빛의 입사각 $\theta$ 가 다음을 만족하면 빛은 공기-석영(프리즘)계면에서는 전반사되며, 얼음(혹은 물)-석영 계면에서는 대부분이 투과된다.  $n_{air}$ 는 공기의 굴절률,  $n_{quartz}$ 는 석영의 굴절률,  $n_{ice}$ 는 얼음의 굴절률이다.

$$\frac{n_{air}}{n_{quartz}} < \sin\theta < \frac{n_{air}}{n_{ice}} \quad (1)$$

광원에서 출발한 빛은 비접촉면에서 주로 반사되어 카메라에 도달하고, 접촉면은 주로 통과하여 카메라에 도달하지 못하기 때문에, 촬영된 영상에서 접촉면은 어둡게 비접촉면을 밝게 보이게 되어, 접촉면과 비접촉면 사이의 선명한 명암차이를 얻을 수 있다. 촬영된 이미지는 binary image로 변환되어 실접촉면적과 접촉점들의 둘레가 실시간으로 측정된다.

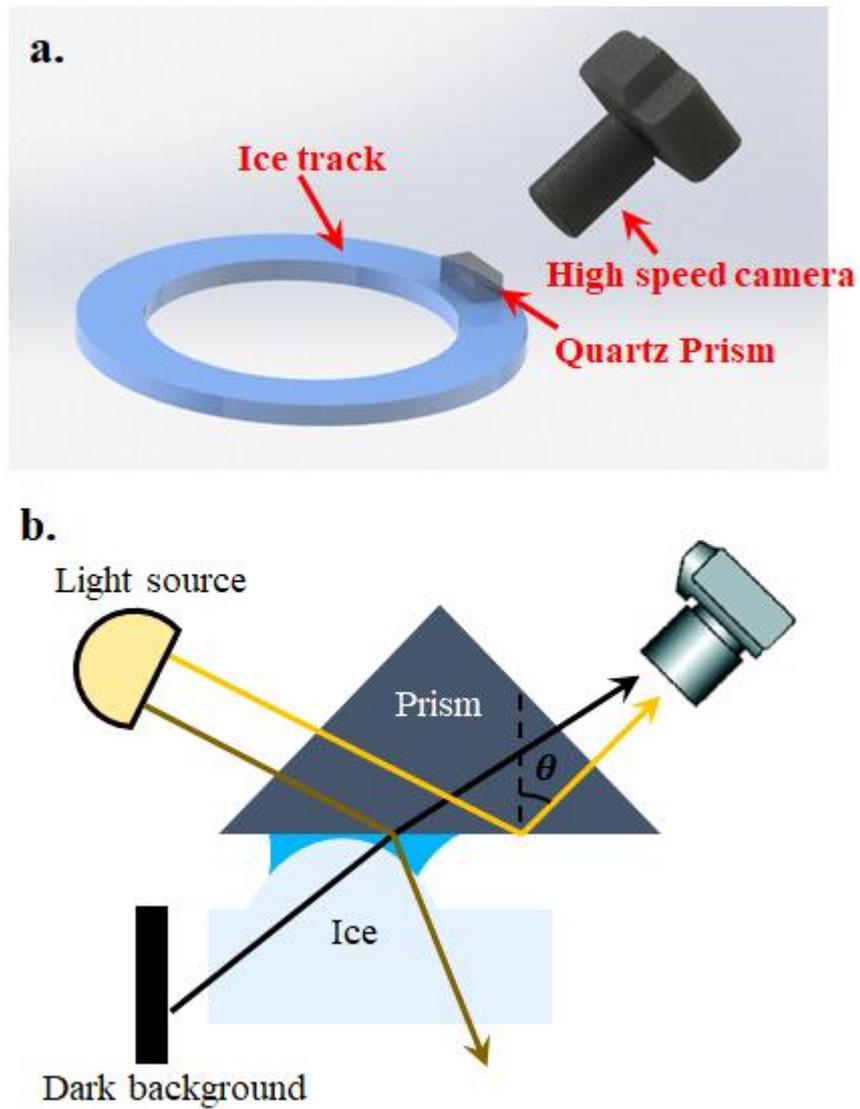


Fig. 6 (a) A schematic figure of the visualization setup. (b) When the angle of incidence satisfies the equation (1), light is totally reflected on the prism-air interface(non contact area). However, light penetrates the prism-ice interface(real contact area).

## 2.3 단일 접촉점의 접촉면 성장 가시화 실험장치 및 실험 방법

서론에서 서술한 것처럼 실접촉면은 다수의 돌기와의 접촉점으로 구성되어 있다. 이 접촉점들은 크기도 다양하고, 다른 돌기들이 마모되어 낮아지면 새로운 접촉점이 도중에 생기기도 할 것이다. 이러한 복잡한 조건에서 얼음의 마찰 모델을 설립하는 것은 문제가 너무 복잡하다. 하여, 본 연구에서는 여러 개의 돌기가 혼재하는 실제 상황을 보다 단순화하여 단일돌기가 형성하는 단일접촉점이 어떻게 성장하는지, 그리고 그 접촉점이 얼마나 마찰력을 발생시키는지 모델을 세워 예측하고 실험결과와 비교하였다. 모델에 대한 설명은 뒤에 서술될 것이다. 본 절에서는 단일접촉점이 녹는점 근처에서 마찰될 때 접촉면적의 성장을 관측하는 방법에 대해 다룰 것이다. 돌기들은 모두 특정한 곡률을 갖는 평면으로 가정할 수 있으므로 본 실험에서는 반구형 얼음으로 단일 돌기를 모사하였다. 반구 반지름의 역수가 모사한 돌기의 곡률이 된다.

표면이 평균 거칠기 10  $\mu\text{m}$  이하로 연마된 직경 300mm의 석영 디스크를 최외곽 선속력 0.1 m/s에서 10 m/s까지 회전 가능하게 설치하였다.(Fig. 7) 반구형으로 가공된 얼음시편이 석영 디스크위에 올려져 마찰된다. 얼음시편은 동시에 로드셀과 평행사변형 링키지로 연결되어 얼음 시편에 가해지는 마찰력이 측정된다. 얼음 시편 위에는 무게추가 올려져 얼음 시편에 가해지는 수직항력을 조절할 수 있도록 하였다. 얼음시편과 석영디스크 사이에 형성되는 실접촉면적은 석영디스크의 옆면을 통해 초고속카메라로 촬영된다. 2.2절에서 설명한 전반사의 영향이 여기서도 마찬가지로 작용하기 때문에 광원에서 출발한 빛은 오직 비접촉면에서만 반사되고, 카메라에는 접촉면은 어둡게, 비접촉면은 밝게 보이게 된다. 촬영된 영상은

key stone effect가 보정된다. 디스크의 회전속도가 가속되는 동안은 시편을 디스크에서 수 mm 들어올려 대기하고, 이후 시편을 회전하는 석영디스크 위에 내려놓고 관측을 시작한다.

반구형의 얼음 시편은 반구형 PDMS 몰드 안에 증류수를 얼려 얻었다. 속이 빈 실린더 형태의 알루미늄 컨테이너의 중심에 베어링용 스텐리스 구슬을 정렬시키고, 컨테이너에 PDMS를 부어 굳힘으로써 반구가 음각으로 새겨진 PDMS몰드를 얻을 수 있다. 추후 컨테이너와 몰드에서 얼음을 분리하기 쉽게 하기위해, PDMS 몰드 위에 PTFE 재질의 내벽을 설치한다. 이후 PDMS 몰드에 물을 붓고 얼음을 실험장치에 고정할 홀더를 상단에 정렬한다. 이후 컨테이너 하단에 설치된 펠티어 소자로 냉각하는데, 본 실험에서는 냉각소자의 온도를 영하 10도로 설정하였다. 냉각과정은 항온항습기 내부에서 시행되며, 외기온도는 영하 1도로 하였다. 이후 얼음 시편을 몰드에서 분리하여 실험에 사용한다. 반구형 얼음시편의 반지름은 3 mm부터 10 mm까지 조절되었다.

얼음시편을 상기 설명대로 제작할 시 다음의 이점이 생긴다. 얼음이 어는 과정에서 생기는 기포나, 부피팽창은 시편 형상을 변형시키며, 실험의 재현성을 저하시키기 때문에 되도록 배제되어야 한다. 이를 위해 끓인 증류수를 사용하거나, 적층하여 얼리는 방법을 사용하는 경우가 있으나, 완벽하지는 않다.[5, 7, 11] 우리는 PDMS 몰드의 하단을 냉각하여, 얼음을 아래서부터 얼렸다.(Fig. 8) 얼음이 성장하는 초기에는, 물에 용존된 기체가 포화되지 않아 기체가 용출되지 않는다. 때문에 초기에 형성된 얼음의 아랫부분(반구형 구조가 위치한 부분)은 기포가 없이 깨끗하게 언다. 또한, 얼음이 아래서부터 얼기 때문에, 아직 얼지 않은 물이 얼음에 의해 갇히지 않아, 부피팽창에 의한 얼음의 변형이 생기지 않고 몰드의 모양 그대로 얼음이 얼게 된다.

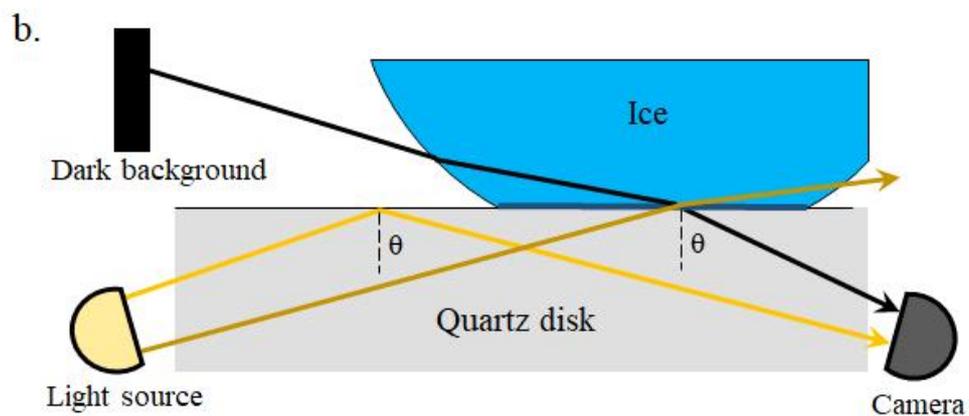
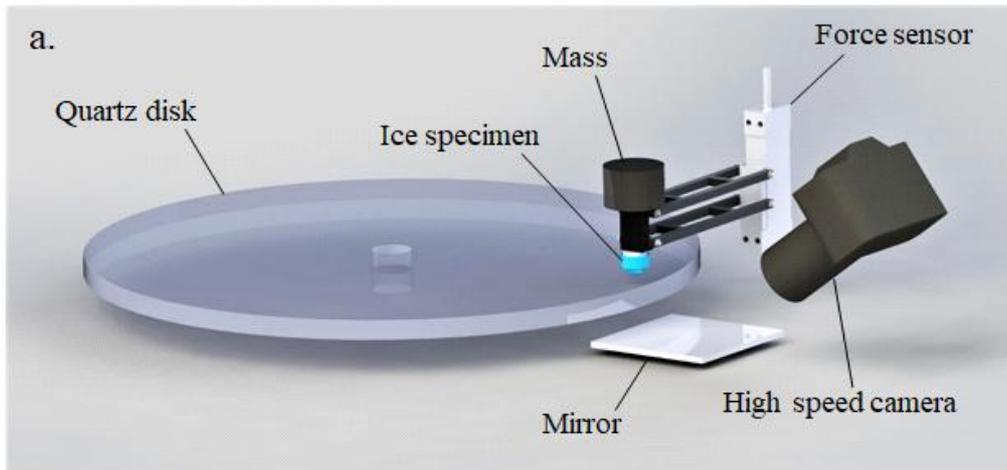


Fig. 7 (a) A schematic figure of the visualization setup for observing the evolution of the contact area of single ice asperity. (b) Same as Fig. 6(b), when the angle of incidence satisfies the equation (1), light is totally reflected on the prism-air interface(non contact area). However, light penetrates the prism-ice interface(real contact area).

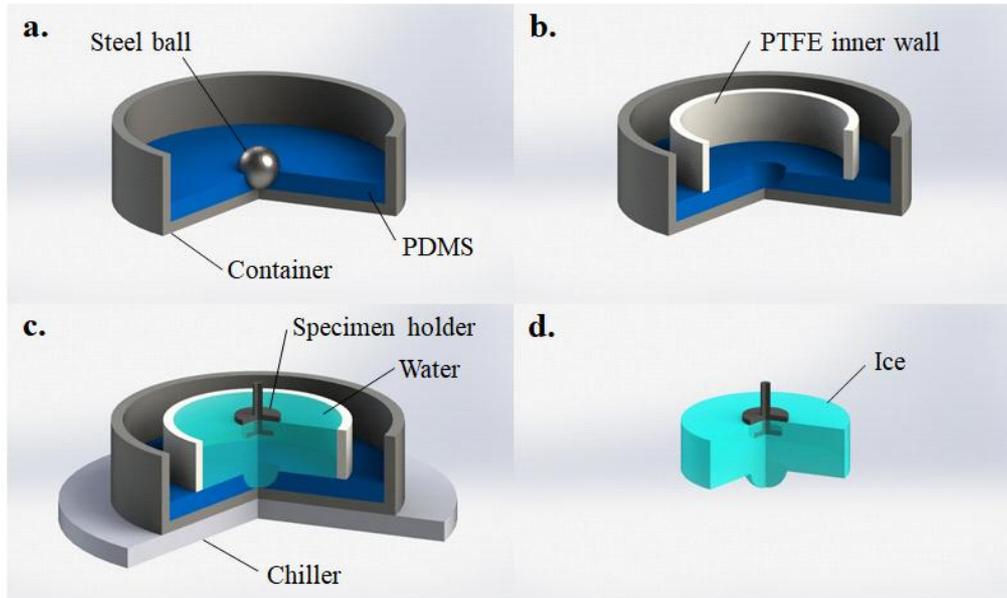


Fig. 8 A process of preparation for an ice hemispherical specimen. (a) A PDMS mold is casted into a container with a steel ball located at the center. (b) An inner wall made of PTFE is set on the PDMS mold. (c) Water is frozen in the PDMS mold with a specimen holder placed on top of the water. (d) The ice specimen is pulled out.

### 3. 단일접촉점의 성장과정 이론적 모델링

서론과 2.3절에서 서술한 바와 같이 얼음과 슬라이더 사이에는 얼음돌기와 슬라이더가 맞닿아 형성되는 다수의 접촉점들이 존재한다. 이들은 슬라이더와 닿아 마찰되면서 면적이 성장할 것이다. 본 절에서는 얼음 표면에 존재하는 하나의 접촉점이 슬라이더와 마찰되면서 녹아 마모되는 과정을 예측하는 모델을 제시할 것이다. 특정 곡률을 갖는 얼음돌기의 형상은 동일한 곡률의 반구형 얼음시편으로 모사하였으며, 문제의 단순화를 위해 표면용해효과가 극대화되는 Hydrodynamic 영역인 녹는점 근처(영하 0.3도 이상), 고속 환경에서(1 m/s 이상) 반구형 얼음이 평평한 슬라이더와 닿아 녹을 때 접촉면적과 마찰력을 예측하는 스케일링 분석을 제시하였다.

마찰하는 물질이 용해되면서 윤활이 이루어지는 상황에 대한 열유체적 모델은 몇몇 선구적 연구자들에 의해 설립이 되어있다.[18-20] 얼음에 한정해서도 다수의 모델이 제시되어있다.[6,8,13,14] 본 연구에서는 이들의 모델을 일부 변형하여 단일접촉점의 성장을 예측하는 모델을 설립하였다.

모델의 설명에 앞서 크게 세 가지 가정을 한다. 첫 째, 반구형 얼음의 상단이 속력  $U$ 로 움직이는 슬라이더와 닿아 마찰열에 의해 녹아내려 나가며, 얼음과 슬라이더 사이에는 얇은 물층을 가정한다. 물층의 두께는 대략 수십 나노미터에서 수 백 나노미터 사이로 형성된다고 알려져 있다. 둘째, 얼음과 슬라이더 사이의 얇은 물층의 두께가 모든 곳에서 일정하다고 가정한다. 실제 얼음은 유동에 의해 부분에 따라 두께가 다를 것이라 쉽게 상상할 수 있지만, 문제의 단순화를 위해 두께가 모든 곳에서 일정하다고 가정한다. 마지막으로 Hydrodynamic regime, 즉 녹는점 근처(영하 0.3도 이상), 고속 환경에서(1 m/s 이상)를 가정한다.

얼음과 슬라이더의 상대운동에 의해 물층에는 강한 전단응력이 발생할

것이고, 전단응력에 의해 마찰열이 발생할 것이다. 물층 내부의 전단응력에 의해 발생한 열  $q_f''$ 은 얼음의 표면을 녹이는데 사용될 것이며, 용해에 필요한 열  $q_m''$ 을 제외하고 남은 열은 얼음과 슬라이더 내부로 전도되어 사라질 것이다. 이 때 전도열을  $q_c''$ 라고 한다. 이 때 에너지 보존식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$q_f'' = q_m'' + q_c'' \quad (2)$$

전단응력에 의해 발생하는 마찰열은 내부 유동을 Couette flow로 단순가정했을 때 아래와 같다. 물의 점도를  $\eta$ , 물층의 두께를  $h$ 라 한다.

$$q_f'' = \frac{\eta U^2}{h} \quad (3)$$

얼음의 표면은 지속적으로 녹고있기 때문에 얼음의 표면은 지속적으로 용해에 필요한 에너지를 흡수한다. 얼음이 녹아내린 전체 높이를  $H$ 라 하면 얼음의 표면에서 흡수되는 용해열  $q_m''$ 는 Stefan condition에 의해 다음과 같이 나타내어진다.

$$q_m'' = \rho_i L \frac{dH}{dt} \quad (4)$$

얼음의 표면은 지속적으로 녹고있기 때문에 그 온도가 녹는점으로 고정될 것이다. 이 때 얼음 내부로 전도되는 열  $q_{ci}''$ 는 Stefan condition에 의해 다음과 같이 나타내어진다.

$$q_{c,ice}'' = \rho_i c_i \Delta T \frac{dH}{dt} \quad (5)$$

슬라이더 내부로 빠져나가는 열은 1D unsteady heat conduction을 가정하

였을 때 아래와 같이 쓰여진다.

$$q_{c,slider}'' = \sqrt[2]{\rho_q c_q k_q} \Delta T^2 \sqrt{\frac{2U}{\sqrt[2]{\pi A}}} \quad (6)$$

슬라이더의 재질을 석영으로 가정하고, 가정한 온도와 속도조건을 대입한 후, 뒤의 실험 결과에서 H의 값을 가져와 대입하면, 열전도에 의해 빠져나가는 열은 용해에 의해 빠져나가는 열에 비해 두 개의 오더정도 낮게 나와 무시가 가능해진다.

$$\frac{q_{c,ice}'' + q_{c,slider}''}{q''} = O(10^{-2}) \quad (7)$$

식(2)에서 열전도 항이 무시가 되고, 식(3)과 식(4)를 대입하면 이는 다음과 같이 정리된다.

$$\eta \frac{U^2}{h} = \rho_i L \frac{dH}{dt} \quad (8)$$

물층을 검사체적으로 설정한다면, 얼음 표면에서 녹아 발생한 물이 검사체적 내부로 유입될 것이고, 수직력에 의해 물층은 슬라이더와 얼음 사이에서 squeezing out되어 방출될 것이다. 동시에 슬라이더와 얼음의 상대운동에 의해 물층은 검사체적 뒤 쪽으로 빠져나갈(shearing out) 것이다. 이들 유입량과 방출량이 매 순간 평형을 이루어 물층은 특정한 두께를 유지할 것이고, 검사체적 내부의 부피보존식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\frac{1}{A} \frac{d(C.V.)}{dt} = \frac{\rho_i}{\rho_w} A \frac{dH}{dt} - \frac{2\pi F_N h^3}{3\eta A^2} - \frac{Uh}{\sqrt[2]{\pi A}} \quad (9)$$

좌항은 검사체적의 Volume change를 표현한 항이고, 우항의 첫 번째 항은 Surface melting, 두 번째 항은 Squeeze-out, 세 번째는 Shearing-out을 포

현한 항이다. 이들의 order of magnitude를 비교하면 Volume change항은 surface melting항에 비해 세 개의 오더가 작고, Squeeze-out 항은 Surface melting항에 비해 두 개의 오더가 작다. 따라서 식(9)는 다음과 같이 단순화될 수 있다.

$$\frac{\rho_i}{\rho_w} A \frac{dH}{dt} = \frac{Uh}{\sqrt[3]{\pi A}} \quad (10)$$

마지막으로 얼음의 형상이 반구라는 점에서 우리는 얼음돌기가 슬라이더와 만나 형성하는 접촉면적  $A$ 와 얼음돌기가 녹아내린 총 높이  $H$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.  $\theta$ 는 접촉면의 가장자리와 구의 중심을 이은 선분과 수직선 사이의 각도이다.

$$A = \pi R^2 \sin^2 \theta, \quad H = R(1 - \cos \theta) \quad (11)$$

$\theta$ 가 몹시 작을 경우 다음의 관계가 성립한다.

$$A = 2\pi R H \cos^2 \frac{\theta}{2} \approx 2\pi R H \quad (12)$$

식(8), 식(10), 식(12)를 연립하면 다음의 관계를 얻는다.

$$A^{\frac{1}{4}} \frac{dA}{dt} = 2\pi^{\frac{3}{4}} \eta^{\frac{1}{2}} \rho_w^{\frac{1}{2}} \rho_i^{-1} L^{-\frac{1}{2}} R U^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

이를 시간  $t$ 에 대해 적분하면 접촉면적을 나타내는 scaling law를 최종적으로 얻을 수 있다.

$$A \sim F_N^0 R^{\frac{5}{4}} U^{\frac{6}{5}} t^{\frac{4}{5}} \quad (14)$$

이 때 발생하는 마찰력은 다음과 같이 물층에 걸리는 전단응력으로부터 구

할 수 있다.

$$F_f \sim F_N^0 R^{\frac{3}{5}} U^{\frac{7}{5}} t^{\frac{3}{5}} \quad (15)$$

모델은 서론에서 예상했던 대로 접촉면적과 마찰력이 시간이 지남에 따라 성장할 것을 예측하고 있다. 이러한 성장속도는 돌기의 반지름이 커질수록 그리고 슬라이더의 속력이 커질수록 빨라진다. 한 가지 재미난 점은 접촉면적과 마찰력이 수직력에 무관하다고 나타내지는 것이다. 거의 대부분의 경우 마찰력은 수직력과 양의 상관관계를 갖지만, 본 모델에서는 마찰력과 수직력이 서로 무관하게 나타내어진다. 이러한 결과는 물층 내부의 물이 물층에서 빠져나갈 때 squeezing-out 되기보다 주로 shearing-out되기 때문에 발생한다. 수직력이 오직 squeezing-out되는 유량에만 관여를 하나, squeezing-out되는 유량이 shearing-out되는 유량에 비해 무시될 수 있을 만큼 작기 때문에 수직력과는 관계없이 물층은 특정한 두께를 유지하게 되고, 마찰력과 접촉면적이 수직력에 무관해진다.

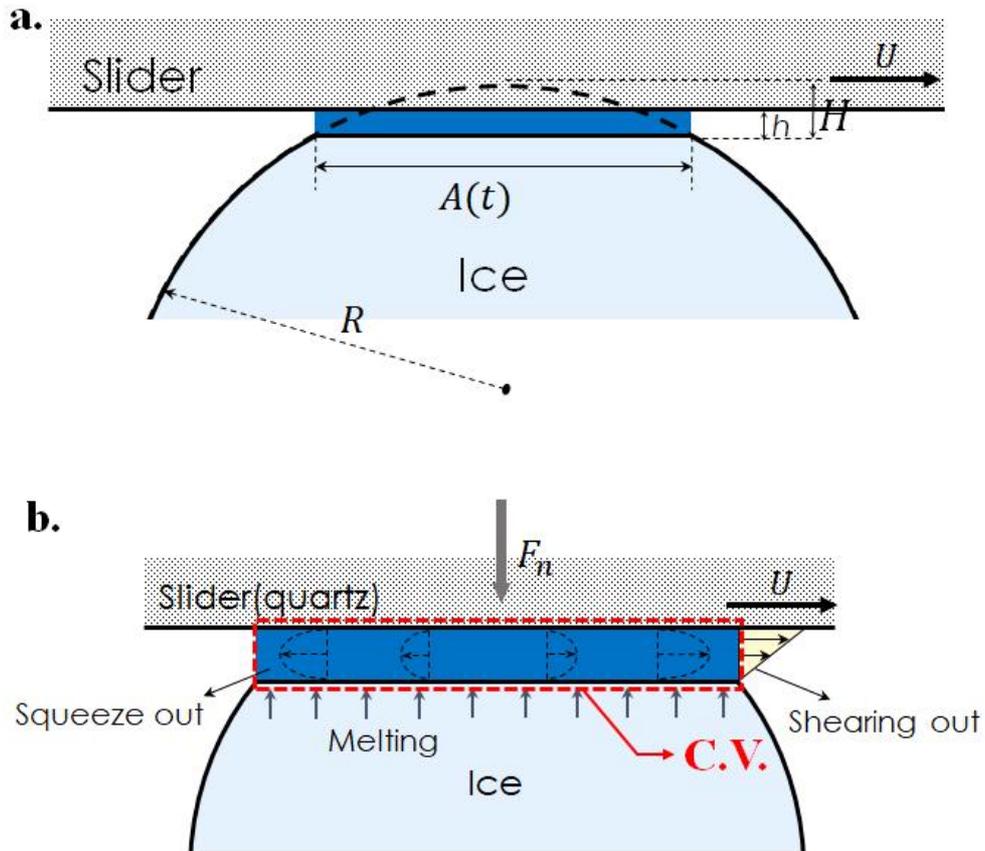


Fig. 9 (a) Geometric parameters. (b) There are two types of outflow from the water film and single type of inflow into the water film. Water escapes from the film by being squeezed out or being sheared out. At the same time, Water is generated on the ice surface by being melted.

## 4. 실험결과 및 논의

### 4.1 얼음 마찰면 가시화 실험 결과

2.2절에서 제시한 실험장치를 사용하여 석영 프리즘과 얼음 트랙 사이의 마찰면을 실시간으로 가시화하였고, 실접촉면적을 관찰할 수 있었다. 촬영된 영상은 Fig. 10, Fig. 11와 같으며, 영상은 프리즘의 바닥면을 프리즘을 통해 비스듬히 바라보는 것이다. 영상의 검은 부분은 얼음과 석영 프리즘이 실제로 맞는 실접촉면적이고, 그 외에 밝은 부분은 석영 프리즘이 얼음과 닿지 않는 비접촉면이다.

서론에서 서술했듯이 실제로 얼음표면과 시편이 맞는 실접촉면적은 다양한 형상과 다양한 모양의 점들로 이루어져 있었다.(Fig. 10, Fig. 11) 대다수의 접촉점들은 시편의 선두에서 닿기 시작하여 후미까지 이동하지만, 일부는 중간부터 닿기 시작하거나, 중간에 접촉점이 사라지는 경우도 일부 존재한다. 접촉점들은 시편과 닿기 시작한 초기의 면적이 계속 유지되지 않고, 시편의 뒤쪽으로 이동하면서 점차 넓어진다. 이는 서론에서 예측한 대로 접촉점이 시편과 맞닿아 마찰열에 의해 얼음 돌기의 상단이 녹고, 그 결과 접촉면적이 점차 증가하는 것이다. 여기서 관찰한 접촉점의 성장은 4.2절에서 더욱 자세히 다룰 것이다.

대부분의 접촉점들은 얼음 돌기가 이동하는데로 같이 시편의 뒤편으로 이동하나, 속도가 느릴 때( $U = 0.01 \text{ m/s}$ ), 시편 후미에 계속 남아있는 puddle이 존재한다. 이는 마찰면에서 발생한 물이 시편과의 surface tension에 의해 시편에 붙어있는 것이다. Puddle은 시편에 의해 끌려다니며 얼음 위를 진행하며, 이 과정에서 Colbeck이 얼음과 슬라이더 사이에 형성될 것이라 예측했던 capillary bridge가 형성될 것이다. 다만, 본 실험

조건에서는 puddle의 perimeter가 최대 수 십 밀리미터 스케일로 형성되는데, 이 정도 길이의 perimeter를 갖는 capillary bridge는 마찰력에 아주 미미한 영향밖에 줄 수 없다.

고속영역( $U = 10 \text{ m/s}$ )에서는 Puddle이 형성되지 않으며, 접촉점 뒤로 물이 빠져나와 길게 늘어지는 것이 보인다. 이 때 접촉점의 선두는 속력이 얼음 트랙의 속력인  $10 \text{ m/s}$ 이나, 접촉점의 후미는 그 절반인  $5 \text{ m/s}$ 로 이동한다. 접촉면적에 형성된 물의 거동이 Couette flow로 형성되어 평균유속이 얼음의 속력의 절반으로 형성되는 것으로 보인다. 이는 기존 학계에서 널리 받아들여진 Frictional melting 가설의 직접적인 근거가 될 것이다.

석영 프리즘과 얼음 사이의 접촉면적을 시간에 따라 도식하면 Fig. 12의 파란선과 같다. 동시에 마찰력을 측정하여 병기하면 빨간선과 같은데, 접촉면적과 마찰력이 서로 같은 추세를 따라가는 것을 볼 수 있다. 마찰력이 증가할 때 접촉면적이 같이 증가하며, 마찰력이 감소할 때 접촉면적이 같이 감소한다. 접촉면적에 형성된 물층의 전단응력이 마찰력을 발생시킨다고 생각한다면, 마찰력과 접촉면적이 양의 상관관계를 갖는 것은 몹시 자연스럽다.

마찰력이 물층에 형성된 전단응력에 의해 형성된다고 가정한다면 다음의 관계가 성립할 것이다.

$$F_f = \frac{\eta UA}{h}, h = \frac{\eta UA}{F_f} \quad (15)$$

따라서 마찰력과 접촉면적의 비율을 계산함으로써 얼음과 석영 프리즘 사이에 형성된 물층의 대략적인 두께를 추정할 수 있다. 실험으로 측정된 마찰력과 접촉면적의 비로 물층의 대략적인 두께를 Fig. 13에 도식하였다.  $10 \text{ m/s}$  근처에서 대략 수 백 나노미터 두께의 물층이 형성되는데 이는

Baurle(2007)의 예측과도 어느 정도 일치한다. 물층의 두께는 속력이 감소할 때 같이 감소하는데, 속력이 0.1 m/s로 줄어들 때 물층의 두께 또한 대략 수 나노미터 스케일까지 줄어들게 된다. 다만, 속력이 0.1 m/s이하로 줄어들 때는 물층의 두께가 크게 변하지 않는데, 이 영역에서는 고체와 고체가 직접 맞닿는 dry friction이 발생하는게 아닌가 추정된다. 물분자의 크기가 대략 수 옴스트롱인 것을 생각하면, 물층의 두께가 꽤 과소평가 되어있다고 볼 수 있다. 물층의 전단응력 뿐만 아니라 고체간 접촉에 의한 힘이 섞여 마찰력이 과대평가 되었을 가능성이 있다.

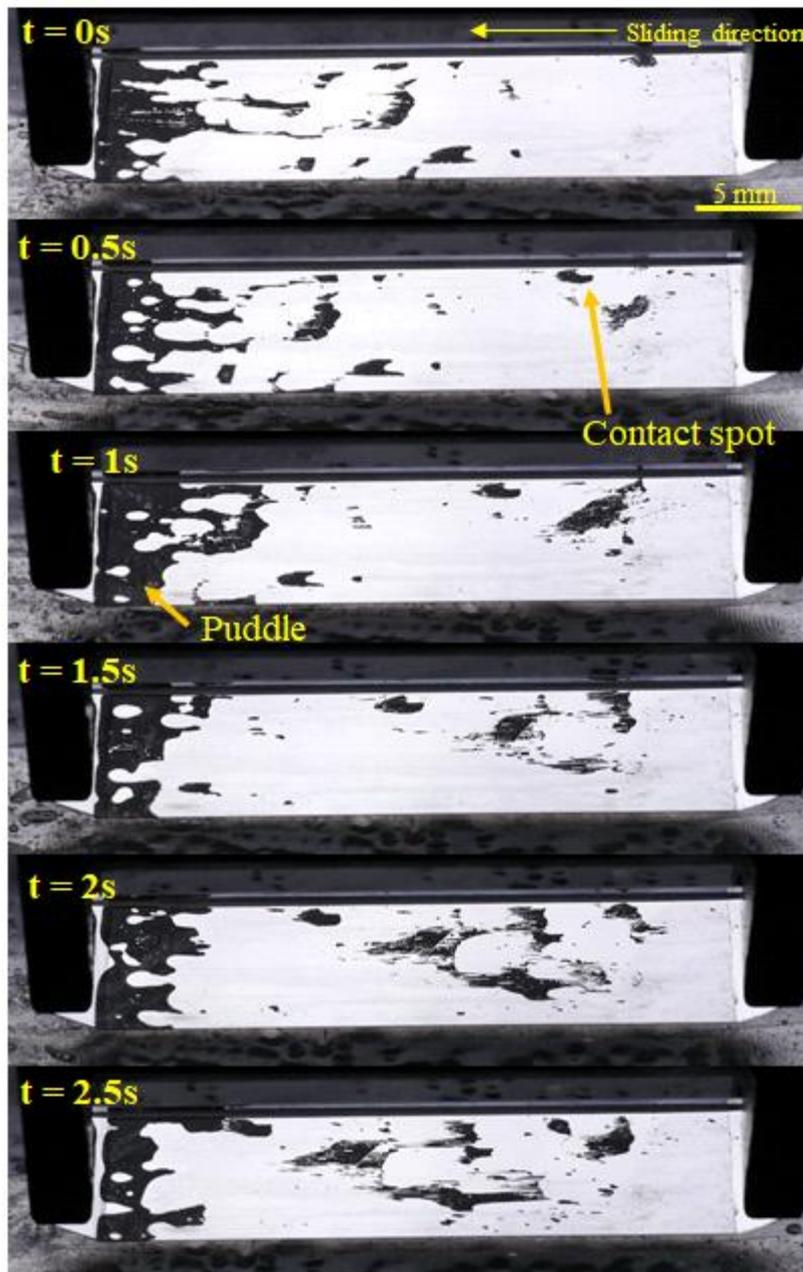


Fig. 10 Acquired image of real contact area between ice and quartz prism.  $T = -0.5^{\circ}\text{C}$ ,  $U = 0.01 \text{ m/s}$ ,  $F_n = 2.7 \text{ N}$ . Area of contact spot increase during sliding. Water is dragged by surface tension and a puddle is formed at the end of the prism(left side).

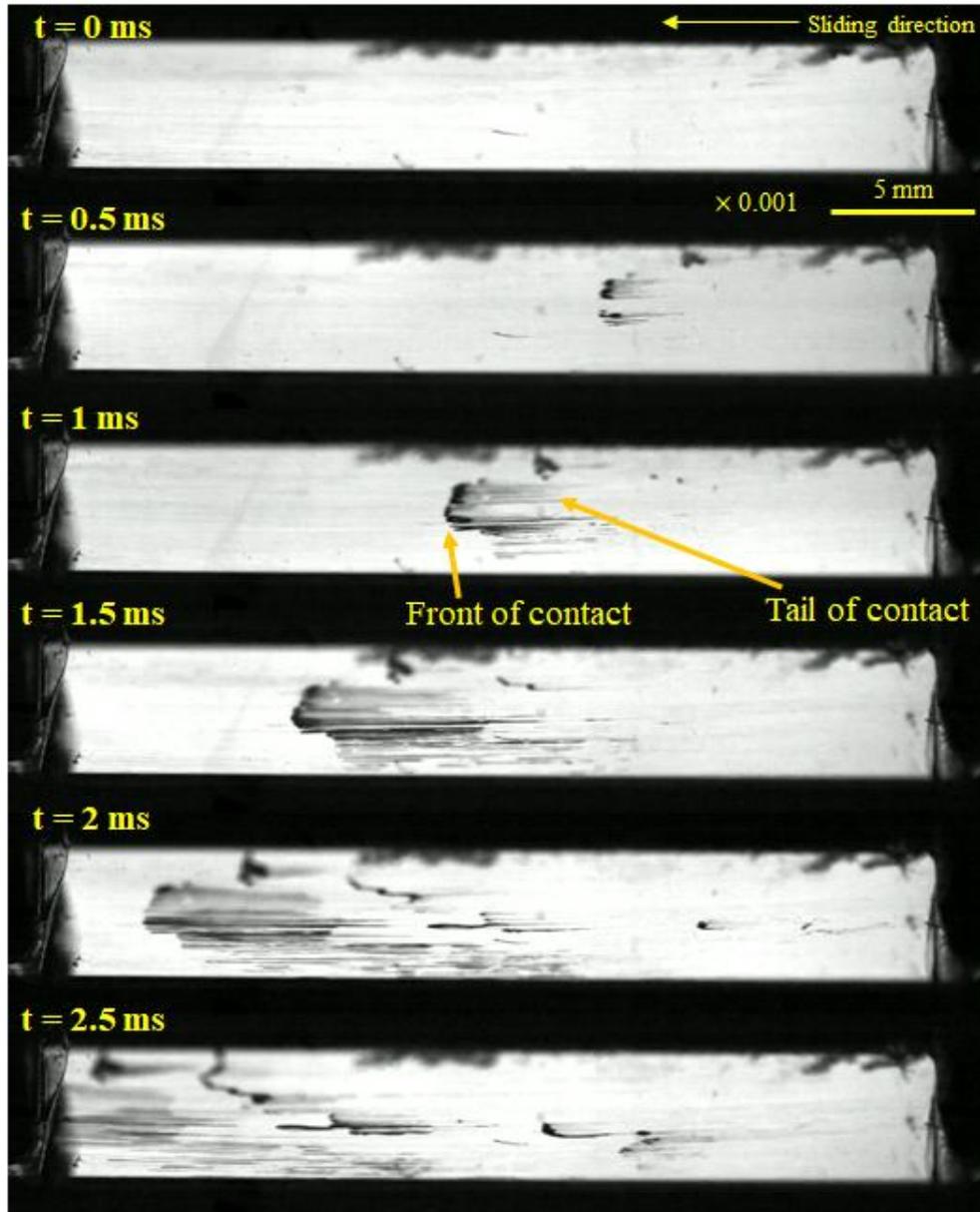


Fig. 11 Acquired image of real contact area between ice and quartz prism.  $T = -0.5^{\circ}\text{C}$ ,  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $F_n = 2.7 \text{ N}$ . The speed of front of contact is  $10 \text{ m/s}$  which is same as the speed of the ice surface and the speed of tail of contact is  $5 \text{ m/s}$  (half of  $10 \text{ m/s}$ ). It indicates that flow in the water film is mainly shearing flow.

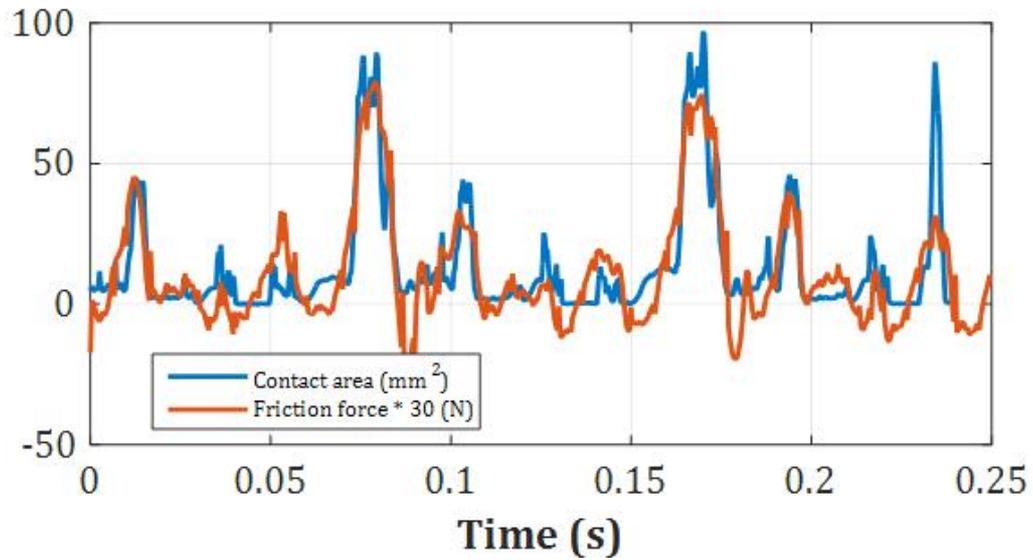


Fig. 12 Real contact area and friction force are plotted.  $T = -0.5^{\circ}\text{C}$ ,  $U = 10$  m/s,  $F_n = 1.2$  N. There is strong correlation between the real contact area and the friction force.

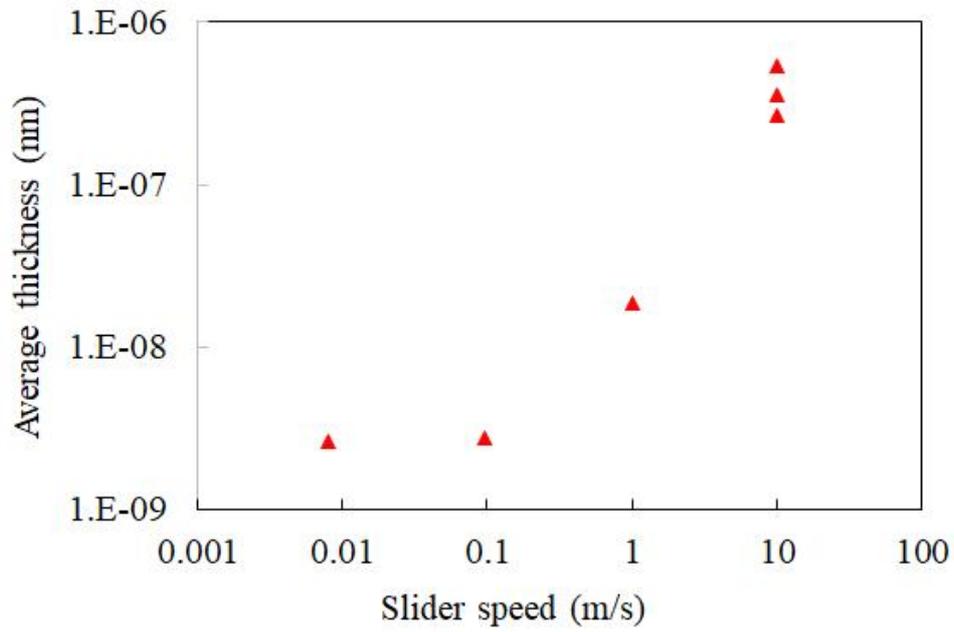


Fig. 13 Estimated thickness of the water film between prism and ice.  $T = -0.5^{\circ}\text{C}$ ,  $F_n = 1.2 \text{ N}$ .

## 4.2 단일 접촉면의 성장 가시화 실험

2.3절에서 제시한 실험장치를 사용하여 얼음 구의 접촉 면적을 Fig 14.와 같이 실시간으로 관측하였고, 그와 동시에 마찰력 또한 측정할 수 있었다.(Fig.15(a-b)) 촬영된 영상의 검은 부분은 얼음과 석영디스크가 실제로 맞닿는 실접촉면적이고, 밝은 부분은 닿지 않는 비접촉면이다. 관찰된 얼음 시편과 석영디스크 사이의 실접촉면적은 원형으로 형성되어 그 넓이가 시간이 지남에 따라 점차 넓어진다. 이러한 접촉점의 성장 현상은 서론에서 예측한바와 같이 얼음돌기의 상단이 녹아내려 점점 시편과 맞닿는 단면이 커지기 때문이다. 원형의 접촉면 좌측에 배경보다는 약간 어둡지만 접촉면보다는 훨씬 밝은 영역이 길게 나타난다. 이는 얼음 표면이 용해하여 생겨난 물이 Shearing-out되어 슬라이더와 함께 얼음 밖으로 빠져나온 것이 보이는 것이다. Fig. 14에서 0.4 초 이후에는 원형의 접촉면 우측이 돌출되는 것처럼 보이게 되는데, 얼음이 녹아 형성된 물이 얼음돌기에서 빠져나온 후, 원형의 석영디스크를 따라 한 바퀴를 돌아 다시 얼음시편의 앞부분으로 돌아와서 그대로 쌓인 것이다. 접촉면적을 추정할 때 원형에서 벗어난 부분은 제외하였다.

얼음돌기가 형성하는 접촉면적의 넓이를 시간에 따라 도식하면 Fig. 15(a-b)의 그래프와 같다. 얼음시편이 구형이기 때문에 시편이 점차 녹아감에 따라 석영 디스크와 맞닿는 단면적이 커지는 과정이 정량화 되었다. 반지름을 아는 반구로 얼음돌기를 제작하였기 때문에 접촉면의 넓이로부터 얼음돌기가 녹아내린 높이  $H$  또한 추정할 수 있다. 마찰력은 또한 실접촉면적과 마찬가지로 시간이 지남에 따라 증가하는 추세를 보인다. 3절의 모델에서 예측한 바와 같이 실접촉면적이 커지면서 점성에 의한 응력을 더 받기 때문일 것이다.

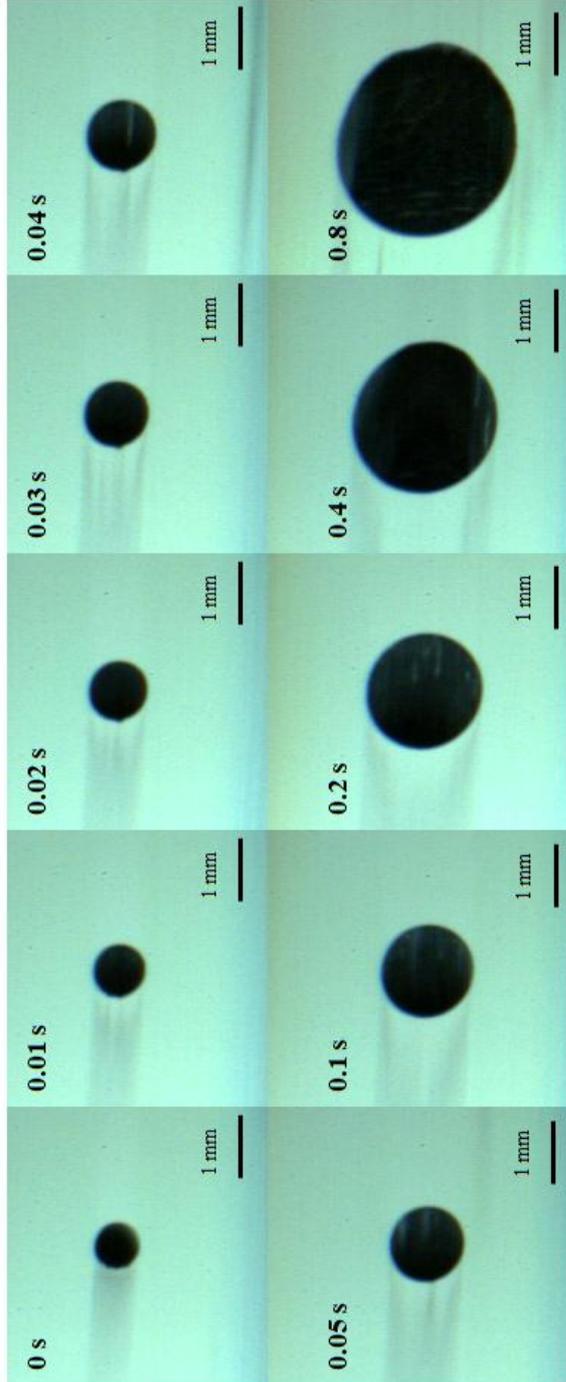


Fig. 14 Acquired images of contact area evolution between hemispherical ice and a quartz disk,  $T = -0.3^{\circ}\text{C}$ ,  $U = 3.2 \text{ m/s}$ ,  $F_n = 145$ ,  $N$ ,  $R = 3 \text{ mm}$

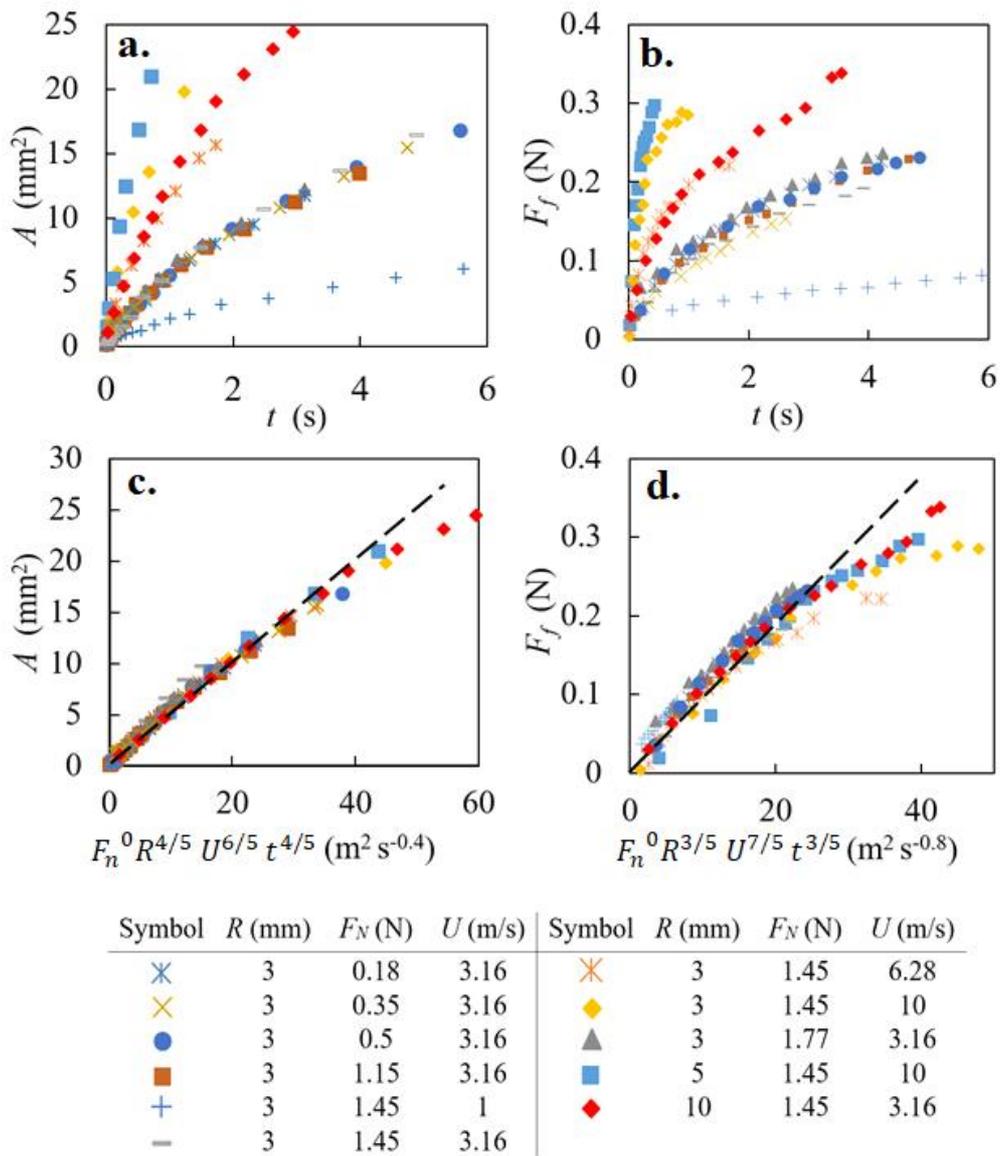


Fig. 15 (a) Contact area between hemispherical ice and quartz disk versus time. (b) Frictional force versus time. (c) Contact area between hemispherical ice and quartz disk versus time plotted according to our scaling law. (d) Frictional force versus time plotted according to our scaling law.

시간에 따른 실접촉면적과 마찰력 실험 데이터 양상이 앞서 유도한 Scaling law 식(14), 식(15)와 맞는지 확인하기 위해, 우리는 Fig. 15(c-d)와 같이 실접촉면적과 마찰력 실험 데이터를 각각  $F_N^0 R^{\frac{5}{4}} U^{\frac{6}{5}} t^{\frac{4}{5}}$  과  $F_N^0 R^{\frac{3}{5}} U^{\frac{7}{5}} t^{\frac{3}{5}}$ 에 따라 도식하였다. 반지름  $R$ , 속도  $U$ , 그리고 수직항력  $F_N$ 을 변화시켜 가면서 얻은 실험데이터들은 원래 Fig. 15(a-b)처럼 흩어져있으나, 데이터 라인들이 Fig. 15(c-d)에서 하나의 마스터 커브에 수렴한다. 이는 우리가 수행한 scaling analysis가 현상을 잘 반영함을 의미한다.

주목할 것은, 제시된 모델과 실험결과 모두에서 실접촉면적과 마찰력이 수직항력에 무관하다는 것이다. 얼음 시편 반지름 3 mm와 속도 3.16 m/s 조건에서 수직항력을 0.18 N에서 1.77 N까지 10배가량 바뀌가며 실험하였으나, 마찰면적은 약 20%, 마찰력은 약 30%밖에 증가하지 않았다. 얼핏 보기에 마찰력은 수직력에 비례하여 증가한다는 Amonton's first law of friction에 위배되어 보이는 이러한 현상은 몹시 흥미롭다. 우리가 관심을 가진 고속 고온 영역에서 슬라이더의 무게가 수력학적인 효과에 미치는 영향이 다른 얼음을 용해시키는 효과들보다 훨씬 작다는 것을 의미하기 때문이다. 모델에서 수직항력에 대한 의존성이 나타나는 것은 식(9)에서 물이 squeezing out되는 항뿐이다. Squeezing out에 의한 효과가 shearing에 의한 효과에 비해 무시할 수 있게 되면 수직항력에 대한 독립성이 나타나는 것이다.

이 흥미로운 경향은 수직항력에 따라 평면 얼음의 마찰력이 증가하는 것으로 보고된 기존의 연구[6,7,10,23]들을 전면으로 부정하지는 않는다. Baurle(2006)의 실험결과(Fig. 16)는 수직력이 없거나 혹은 매우 낮은 값을 갖더라도 일정량의 얼음 마찰력을 가짐을 시사한다. 즉, 마찰력이 일정한 절편을 갖기 때문에 낮은 수직력에서는 수직력이 변하더라도 마찰력은 크

게 변하지 않을 것을 의미한다. 그들이 가정한 것처럼 real contact area ratio를 4%로 두면, 이들의 실험조건에서 접촉점에 가해지는 압력은 1 - 2 MPa의 범위에 있다. 우리의 실험에서 접촉점 반경은 대략 1 mm가량 되는데, 이 때 접촉점에 가해지는 압력은 대략 0.06 - 0.6 MPa로 Baurle(2006)의 실험보다 꽤 작은 수직력을 받는 영역에서 실험하였다고 할 수 있다.(Fig. 16의 Load 0에서 30 N 사이의 범위이다.) 따라서 본 연구에서 보인 수직력과 마찰력의 무관성은 선행연구의 결과를 부정한다고는 볼 수 없다. 단지 본 실험의 영역이 수직력이 충분히 작아 얼음과 슬라이더 사이에 형성된 물층에서 물이 Squeezing out되는 효과가 무시되었을 뿐이다. 만약 우리의 실험을 더욱 높은 수직항력 조건에서 수행하여, Squeezing out에 의한 효과를 무시할 수 없게 되면 선행연구들과 마찬가지로 수직항력에 대한 의존성을 관찰할 수 있을 것이라 추정한다. 스키점프용 스키의 경우 선수의 몸무게를 60 kg, 스키의 길이를 2 m, 폭을 0.1 m, 실접촉비율을 1%로 가정할 경우 스키 바닥면에 작용하는 압력은 약 0.15 MPa로 본 연구에서 다룬 영역과 유사하다고 추정해볼 수 있다.

반구형 얼음시편의 반지름, 즉 얼음 돌기의 곡률에 마찰력이 영향을 받는다는 것 또한 주목할 만하다. 얼음 돌기의 곡률은 얼음과 슬라이더 사이의 실접촉면적에 영향을 주고, 결과적으로 마찰력을 변하게 한다. 곡률이 마찰력에 미치는 영향을 논의하기 위해 다음과 같은 얼음 표면을 가정해본다. Fig.와 같이 얼음의 표면에 얼음으로 된 구가 밀집해 있는 표면을 생각해보자. 단위 면적당 돌기의 개수  $N$ 은 돌기의 반지름  $R$ 과  $N \sim R^{-2}$ 의 관계를 가질 것이다. 식(15)에 따르면 마찰력  $F_f$ 는  $F_f \sim nR^{\frac{3}{5}}$ 일 것이므로 다시 정리하면 마찰력  $F_f$ 는 얼음의 반지름  $R$ 과  $F_f \sim R^{-\frac{7}{5}}$ 의 관계를 가질 것이다. 즉, 수 밀리미터 스케일의 얼음돌기의 반경이 커지면 마찰력이 줄어든다고

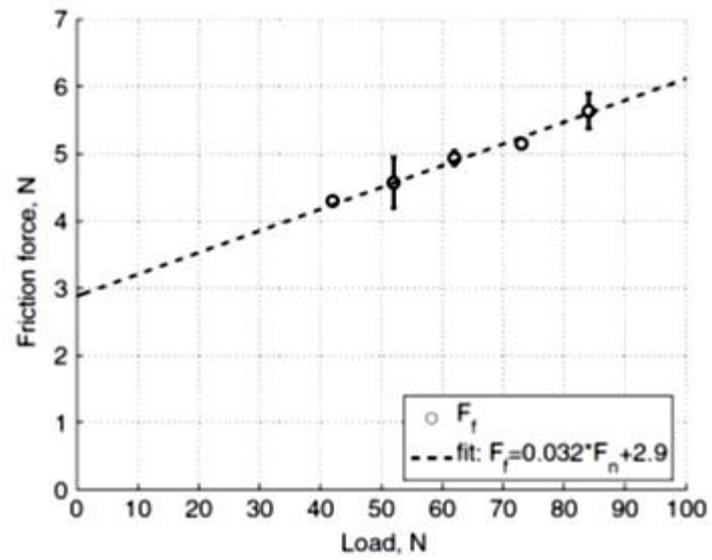


Fig. 16 Friction force versus normal force.(Ref. 7)

예측할 수 있다. 또 다른 얼음 표면을 가정해본다.

Baurle(2007)은 Bearing ratio라는 개념을 도입하여 표면을 정의하였다. 슬라이더에 의해 얼음의 상단이 녹아내리면 접촉면적이 상승할 것이고, 얼음의 상단이 깎여내려온 높이에 대한 실접촉비율을 Bearing ratio라고 정의하였다.(Fig. 18) 그는 Bearing ratio라는 개념을 도입함으로써 얼음표면을 정의하고 실접촉면적이 마찰력에 미치는 영향을 분석하였는데, 본 연구의 결과에 따르면 같은 Bearing ratio를 갖는 표면이라도 서로 다른 마찰력을 띄는 두 표면을 제시할 수 있다. 돌기의 형상을 반구로 가정했을 때 단일돌기의 Bearing ratio는 H에 대해 식(12)와 같이 나타내어진다. 표면에 N개의 얼음돌기를 갖는 얼음표면을 가정할 경우 N이 바뀌더라도 같은 Bearing ratio가 유지될 조건은  $N \sim R^{-1}$ 이다. 이 때 마찰력  $F_f$ 는 얼음의 반지름 R과  $F_f \sim R^{-\frac{2}{5}}$ 의 관계를 가질 것이다. Bearing ratio가 같은 표면이라도 개별의 얼음돌기의 반경이 커지면 마찰력이 줄어든다고 예측할 수 있다. Bearing ratio가 같다면 동일한 H에 대해 같은 실접촉면적이 나타날 것이나, 얼음돌기의 반경이 작아지고, 얼음돌기의 개수가 많아지면 전체 접촉면의 둘레가 커질 것이며, Shearing-out되는 유량이 증가할 것이고, 이는 곧 물층의 두께가 감소하여 마찰이 증가됨을 의미한다. 때문에 두 표면이 Bearing ratio가 같아 같은 접촉면적을 갖는다 하더라도, 얼음돌기의 반경이 작아지면 마찰이 증가할 것으로 추정해볼 수 있다.

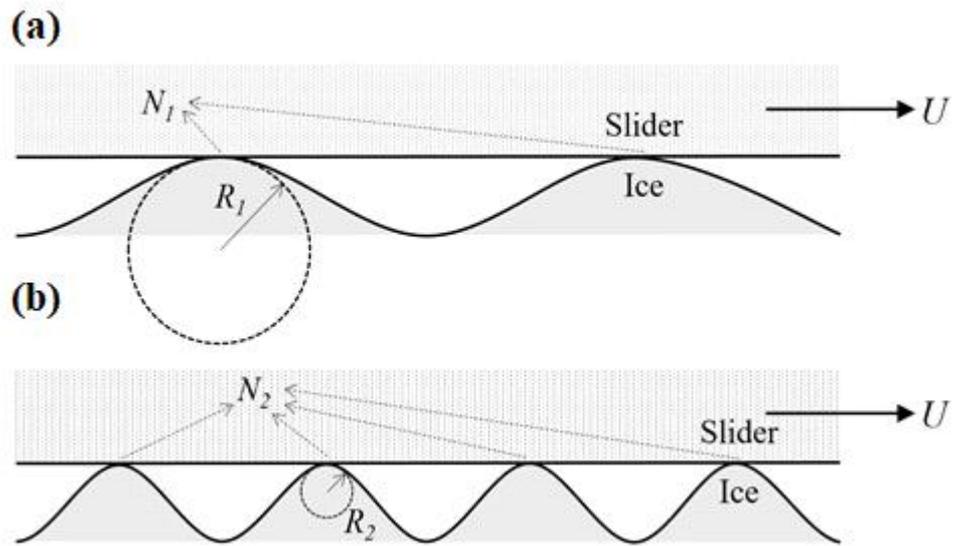


Fig. 17 Concept of surface roughness.  $N$  ice asperities, which have radius  $R$ , exist on unit area.

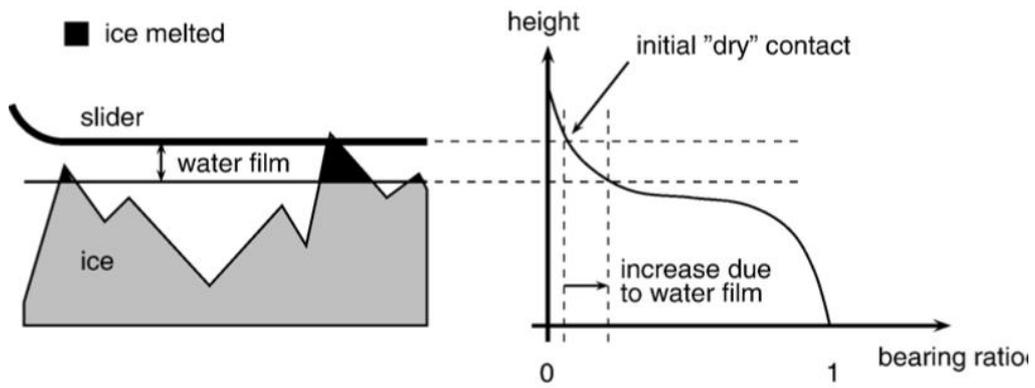


Fig. 18 Concept of bearing ratio suggested by Baurle(2007).(Ref. 7) Real contact area ratio(bearing ratio) is a function of height.

## 5. 결론

본 연구에서는 얼음의 마찰력을 0.01 m/s에서 10 m/s까지 측정할 수 있는 마찰측정기를 제작하고, 전반사 특성을 이용하여 얼음과 슬라이더 사이의 실접촉면적을 실시간으로 관측하였다. 이를 통해 접촉점들이 슬라이더 바닥면과 마찰되면서 그 면적이 증가해나가는 현상을 관찰하였다. 더 나아가 얼음표면의 단일돌기를 모사하여 반구형 얼음시편과 석영디스크를 마찰시키고, 이 때 형성되는 접촉면적과 마찰력의 성장과정을 관찰하였으며, 이를 이론적 모델과 비교하여 검증하였다.

본 연구에서는 얼음과 슬라이더 사이의 실접촉면적을 실시간으로 가시화할 수 있는 방법을 제시하였으나, 우선 간단한 현상을 먼저 연구하기 위해 온도를 녹는점 근처로 제한하여 실험을 수행하고 모델을 설립하였다. 그 외에도 수직력 범위가 다소 제한적이다. 온도가 녹는점보다 훨씬 낮은 경우, 또 수직력이 매우 큰 경우 등 본 연구에서 다루지 못한 영역에 대해 향후 추가적으로 연구되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. Faraday, M. Experimental researches in Chemistry and Physics... Reprinted from the Philosophical Transactions of 1821-1857; the Journal of the Royal Institution... and other publications. (1859).
2. Joly, J. in Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society. 453-454.
3. Bowden, F. P. Friction on Snow and Ice. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 217, 462-478, doi:10.1098/rspa.1953.0074 (1953).
4. Evans, D. C. B., Nye, J. F. & Cheeseman, K. J. KINETIC FRICTION OF ICE. Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences 347, 493-&, doi:10.1098/rspa.1976.0013 (1976).
5. Roberts, A. D. & Richardson, J. C. INTERFACE STUDY OF RUBBER-ICE FRICTION. Wear 67, 55-69, doi:10.1016/0043-1648(81)90075-2 (1981).
6. Oksanen, P. & Keinonen, J. THE MECHANISM OF FRICTION OF ICE. Wear 78, 315-324, doi:10.1016/0043-1648(82)90242-3 (1982).

7. Bäurle, L., Szabó, D., Fauve, M., Rhyner, H. & Spencer, N. D. Sliding friction of polyethylene on ice: tribometer measurements. *Tribology Letters* 24, 77–84, doi:10.1007/s11249-006-9147-z (2006).
8. Bäurle, L., Kaempfer, T. U., Szabó, D. & Spencer, N. D. Sliding friction of polyethylene on snow and ice: Contact area and modeling. *Cold Regions Science and Technology* 47, 276–289, doi:10.1016/j.coldregions.2006.10.005 (2007).
9. Higgins, D. D., Marmo, B. A., Jeffree, C. E., Koutsos, V. & Blackford, J. R. Morphology of ice wear from rubber-ice friction tests and its dependence on temperature and sliding velocity. *Wear* 265, 634–644, doi:10.1016/j.wear.2007.12.015 (2008).
10. Kietzig, A.-M., Hatzikiriakos, S. G. & Englezos, P. Physics of ice friction. *Journal of Applied Physics* 107, 081101, doi:10.1063/1.3340792 (2010).
11. Stamboulides, C., Englezos, P. & Hatzikiriakos, S. G. The ice friction of polymeric substrates. *Tribology International* 55, 59–67, doi:10.1016/j.triboint.2012.05.001 (2012).
12. Fulop, T. & Tuononen, A. J. Evolution of ice surface under a sliding rubber block. *Wear* 307, 52–59, doi:10.1016/j.wear.2013.08.017 (2013).

13. Makkonen, L. & Tikanmäki, M. Modeling the friction of ice. *Cold Regions Science and Technology* 102, 84-93, doi:10.1016/j.coldregions.2014.03.002 (2014).
14. Lahayne, O. et al. Rubber Friction on Ice: Experiments and Modeling. *Tribology Letters* 62, doi:10.1007/s11249-016-0665-z (2016).
15. Tuononen, A. J., Kriston, A. & Persson, B. Multiscale physics of rubber-ice friction. *Journal of Chemical Physics* 145, doi:10.1063/1.4962576 (2016).
16. Kozlov, I. & Shugai, A. Experimental study of high-speed friction on ice. *Fluid dynamics* 26, 145-147 (1991).
17. Bhushan, B. *Modern tribology handbook*, two volume set. 121 (CRC press, 2000).
18. Bejan, A. The Fundamentals of Sliding Contact Melting and Friction. *Journal of Heat Transfer* 111, 13, doi:10.1115/1.3250635 (1989).
19. Myers, T., Mitchell, S. & Muchatibaya, G. Unsteady contact melting of a rectangular cross-section material on a flat plate. *Physics of Fluids* 20, 103101 (2008).

20. Wei, Z. & Batra, R. Modeling and simulation of high speed sliding. *International Journal of Impact Engineering* 37, 1197–1206 (2010).
21. Persson, B. Ice friction: Role of non-uniform frictional heating and ice premelting. *The Journal of chemical physics* 143, 224701 (2015).
22. Carslaw, H. S. & Jaeger, J. C. *Conduction of heat in solids*. Oxford: Clarendon Press, 1959, 2nd ed. (1959).
23. Albracht, F., Reichel, S., Winkler, V. & Kern, H. On the influences of friction on ice. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 35, 620–625 (2004).
24. Marmo, B. A., Blackford, J. R. & Jeffree, C. E. Ice friction, wear features and their dependence on sliding velocity and temperature. *Journal of Glaciology* 51, 391–398, doi:10.3189/172756505781829304 (2005).

Abstract

**Evolution of contact area between  
a high-speed slider  
and ice surface**

Changho Yun

School of Mechanical and Aerospace Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Ice friction has attracted many researchers' interest with its importance in winter sports and tire design. However, friction of ice is still not fully understood as observing and predicting the real contact area between the ice and the slider is challenging. Here, we suggest a novel visualization method. Real time visualization of the real contact area between the ice and the slider was simultaneously performed with the measurement of frictional force. We observed the evolution of contact area which is unique phenomenon of ice friction. We also constructed a scaling model to predict the melting process on the ice surface in the hydrodynamic regime. To verify our model, we made a single contact spot with a single ice asperity of which the geometry is well controlled and simplified. Consequently, we successfully predicted

the frictional force and the contact area of the single contact spot by our scaling model.

Keywords: Friction, ice, real contact, contact area, asperity, total reflection, visualization

Student number: 2014-22494