



의류학석사 학위논문

# 이방성 구조를 가진 초소수성 직물 표면의 젖음성

2022년 8월

서울대학교 대학원

의류학과

한 선 영

# 이방성 구조를 가진 초소수성 직물 표면의 젖음성

# 지도 교수 박 정 희

# 이 논문을 의류학석사 학위논문으로 제출함 2022년 5월

# 서울대학교 대학원 의류학과 한 선 영

# 한선영의 석사 학위논문을 인준함 2022년 7월

위 钅	원장	김 주 연	(인)
부위	원장	이 수 현	(인)
위	원	박 정 희	(인)

## 초 록

본 논문에서는 기하학적으로 이방성을 가지는 초소수성 직물의 표면 구조가 액체의 젖음성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 이를 위해 폴리에스터 두둑직을 사용하여 초소수성을 구현하고 점도가 다른 액적의 낙하 방향에 따른 정적 및 동적 접촉각을 측정하여 접촉각의 이방성을 도출하였다. 또한 시료에 충돌하는 액적의 동적 거동과 접촉 시간을 낙하 높이를 달리하여 측정하고 비교 분석하였다.

정적 접촉각은 모든 시료에서 표면 구조의 방향과 관계없이 180°에 가까운 값을 보였다. Shedding angle은 두둑과 수직인 방향이 평행한 방향보다 작게 나타났으며, sliding angle은 두둑 간격이 액적의 밑면적의 지름보다 작을 때는 수직 방향에서 작게, 밑면적의 지름보다 클 때는 평행 방향에서 작게 나타났다.

액적을 낙하시켰을 때 간격 750, m를 제외한 모든 시료에서 두둑 간의 간격이 넓을수록 rebound되는 경우가 많았다. 접촉 시간은 두둑 간격이 750, m인 시료를 제외한 모든 시료에서 두둑 간의 간격이 넓을수록 짧아지는 경향을 보였다. 특히, 두둑 간의 간격이 750, m로 가장 작았던 시료에서 shedding angle, sliding angle이 가장 작고 rebound가 유리하며 접촉 시간이 가장 짧았다. 이는 두둑의 삼차원적 다층 구조가 액적과의 접촉 면적을 최대한 줄여 anti-wetting에 유리한 구조를 형성했기 때문으로 사료된다.

점도의 영향을 보면, 정적 접촉각은 액적의 점도에 상관없이 180°에 가까운 값을 보였고 shedding angle과 sliding angle은 액적의 점도가 높을수록 증가하였다. 수평면에서의 동적 거동의 경우, 액적의 점도가 높을수록 rebound하기 어려워지며 접촉 시간이 늘어났다.

i

본 연구에서는 이방성 구조를 가진 두둑 직물은 anti-wetting에 유리하고 두둑 간격이 넓어지면 방향에 따라 젖음성 차이가 커짐을 확인하였다.

주요어 : 초소수성 직물, 표면 구조, 이방성, 동적 접촉각, 동적 거동, 접촉 시간

학 번:2020-25473

목	차
목	차

1	제 1 절 연구의 필요성 및 목적
4	제 2 절 이론적 배경
4	1. 표면 젖음성 이론
11	2. 자가세정성
14	3. Rice leaf effect
17	4. 동적 거동과 접촉 시간

	₽	5 2		NI.
25	시료 및 시약	1 절	제	
29	초소수성 가공	2 절	제	
29	산소 플라즈마 에칭	1. 신		
29	소수화 가공	2. 소		
Դ30	시료의 특성 분석 및	3 절	제	
	표면 구조 및 성분	1. 포		
	정적 및 동적 접촉각	2. 중		
	동적 거동과 접촉 시경	3. 동		

제 3 장 결과 및 고찰	
제 1 절 가공에 의한 시료의 특성 벽	변화
1. 산소 플라즈마 에칭에 따른 .	표면 형태 변화
2. 소수화 가공에 따른 표면 성	분 변화40
제 2 절 표면 젖음성	42
1. 정적 접촉각	
2. 동적 접촉각	
제 3 절 측정 조건에 따른 동적 거등	동과 접촉 시간57

1.	두둑 간 간격에 따른 동적 거동과 접촉 시간	57
2.	액적의 점도에 따른 동적 거동과 접촉 시간	66

제	4	장	요약	및	결론	7	1

참고문헌	74

# 표 목차

[Table 1] Specimen codes and characteristics	.26
[Table 2] Density, surface tension, and dynamic viscosity	y for
glycerol aqueous solutions [44, 45]	. 28
[Table 3] Static contact angles for glycerol aqueous solut	tions
of 0% and 60%	.43
[Table 4] Dynamic contact angles for water 100%	.46
[Table 5] Dynamic contact angles on specimens for glye	cerol
aqueous solution of 60%	. 48

# 그림 목차

[Figure 1] Schematic of wetting state based on Young' s model [Figure 2] Schematic of wetting state based on Wenzel model [Figure 3] Schematic of wetting state based on Cassie-Baxter model [21]......7 [Figure 4] Schematic of Cassie-Wenzel wetting transition..8 [Figure 5] Schematic illustrations of wetting scenarios for dual-scale roughness [29]......10 [Figure 6] Wetting scenarios of (a) Cassie-impregnating regime (with high adhesion) (b) Cassie-Baxter regime (with [Figure 7] Schematic of the self-cleaning mechanism; (a) droplet sliding down on a normal flat surface (b) droplet rolling [Figure 8] Self-cleaning Lotus leaf: (a-c) self-cleaning phenomenon (d-e) cell papilla (f) wax tubules [33].....12 [Figure 9] Applications of superhydrophobicity: (a) lotus leaves (b) wind shields (c) anti-wetting equipment (d) antiglaze coated surfaces (e) anti-corrosion substrates (f) anticontamination protective shoes [34]......13 [Figure 10] SEM images of shark skin with arrows indicating direction of anisotropic water flow [35]......15 [Figure 11] SEM images of rice leaf with arrows indicating

**[Figure 12]** 3D digital microscopic image of rice leaf [15]. 15 [Figure 13] Anisotropic wettability of rice leaf [15]............16 **[Figure 14]** (a) rice leaf surface with anisotropic wettability (b) SEM image of rice leaf surface. [14]......16 [Figure 15] Schematics of droplet impact behavior [38]....18 [Figure 16] (a, b) Cassie–Wenzel–Cassie wetting state transition and (c, d) resulting improvement in self-cleaning of micro-nanostructured superhydrophobic surface [55]. ...... 20 [Figure 17] Strategies for contact time reduction [10]. ..... 22 [Figure 18] Reducing contact time of a bouncing drop on riceleaf like surface [58]......23 [Figure 19] Comparison of droplets bouncing on the surfaces with and without macrotexture for glycerol aqueous solutions (0, 40, 60, and 70% by weight) [18]......24 [Figure 20] Surface images and optical microscopic images of specimens......27 [Figure 22] Conceptual images of dynamic contact angle [Figure 23] Schematic illustration of a liquid droplet with [Figure 24] Schematic illustration of contact time [50]......37 [Figure 25] Scanning electron microscope images of (a) [Figure 26] EDS patterns of (a) pristine specimen (b) plasma etched specimen (c)FAS-17 CVD specimen after plasma

etching
[Figure 27] Dynamic contact angles on specimens for water
100%
[Figure 28] Dynamic contact angles on specimens for glycerol
aqueous solution of 60%48
[Figure 29] Anisotropy of dynamic contact angles on specimens
for water 100%51
[Figure 30] Schematic image of contact line (a) continues and
(b) discontinues formed on the surface of R-R 100052
[Figure 31] Schematic image of contact line for the surface of
R-R 175054
[Figure 32] Anisotropy of dynamic contact angles on specimens
for glycerol aqueous solution of 60%56
[Figure 33] Droplet impact behavior by height on specimens for
100% water59
[Figure 34] Droplet dynamic behavior on specimens of 1cm
height60
[Figure 35] Droplet dynamic behavior on specimens of 6cm
height61
[Figure 36] Droplet contact time of 1cm and 6cm height for 100%
water
[Figure 37] Retraction mechanism of impinging droplets [58].
[Figure 38] Droplet impact behavior on specimens for 100%
water
[Figure 39] Droplet impact behavior on specimens for glycerol
aqueous solution of 60%68

[Figure 40] Droplet contact time of 1cm height for 100% water and glycerol aqueous solution of 60%......70

### 제1장서 론

#### 제 1 절 연구의 필요성 및 목적

일반적으로 물에 대하여 150° 이상의 정적 접촉각과 10° 미만의 동적 접촉각을 보이는 초소수성 표면은 다양한 액적과 오구에 대해 자가 세정(self-cleaning) 성능을 지니며[1], 연잎(lotus leaf)을 비롯한 자연의 많은 동식물에서 이러한 초소수성 표면을 쉽게 찾아볼 수 있다. 자연에 존재하는 초소수성 표면은 주로 마이크로-나노의 이중 거칠기 구조를 가지고 있으며 표면에너지가 낮은 소수성 물질이 얇은 막으로 도포되어 있다[2].

자가세정현상은 초소수성 표면 위에서 액적이 굴러 떨어지는 거동을 통해 이루어지며 자가세정성에 영향을 미치는 액적의 대표적 거동으로는 기울어진 표면에서의 동적 접촉각과. 수평면에 떨어지는 액적의 동적 거동 및 접촉 시간을 들 수 있다[11,12,16]. 같은 표면에너지의 초소수성 표면이라도 그 표면의 기하학적 구조에 따라 이러한 액적의 거동이 달라지기 때문에 표면 구조는 자가 세정 능력에 중요한 역할을 한다[3-5]. 이런 이유로, 최근 연잎 뿐만 아니라 다양한 표면 구조를 갖는 초소수성 식물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[6-10].

표면의 동적 접촉각이 작을수록 낮은 각도에서도 액적이 쉽게 구를 수 있기 때문에 자가 세정성에 유리하며 최근 이러한 이유로 rice leaf effect가 주목을 받고 있다[7, 13-15]. Rice leaf의 경우, 낮은 표면에너지와 함께 이방적 표면 구조를 가지고 있어서 그 표면 위에서

1

액적의 이방적 흐름 현상이 생기며[7] 액적이 두둑과 수직한 방향에서보다 평행한 방향에서 구를 때 더 낮은 sliding angle을 보이고[15] 높은 자가 세정 성능을 보인다는 연구 결과가 있다[7].

또한, 액적이 낙하하여 수평면의 초소수성 표면과 충돌할 때에는 rebound, partial rebound, deposition 등의 다양한 동적 거동을 보이며, 그 중 액적이 rebound 하면서도[11] 표면과의 접촉 시간이 짧을수록 자가세정성에 유리한 것으로 알려져 있다[17]. 이러한 이유로 rebound 시 접촉 시간을 줄이기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있는데 Bird 등[59]은 초소수성 표면에 밀리미터 이하 스케일의 두둑을 적용하여 접촉 시간을 줄이는 방법을 제시하였고, Song 등[58]은 두둑이 규칙적으로 반복해서 존재하는 rice leaf 구조의 도입을 통해서도 액적의 접촉 시간을 감소시키는 것이 가능하다는 것을 밝혀냈다.

이렇게 선행 연구들을 바탕으로, rice leaf 구조의 두둑이 있는 이방성 표면은 경사면에서의 sliding angle 측면에서 뿐만 아니라 수평면에서의 동적 거동과 접촉 시간 측면에서도 자가세정성에 유리하다는 것을 알 수 있는데, 액적의 동적 거동은 표면의 구조 뿐만 아니라 액적의 특성에 의해서도 영향을 받는다. Raiyan 등[18]은 두둑이 있는 초소수성 표면에서 점도가 다른 다양한 액적의 동적 거동을 분석하였고 액적의 점도가 작을수록 접촉 시간을 줄이는 데 유리하다고 하였다.

직물은 초소수성을 구현할 수 있는 다른 기질과 비교해 보았을 때, weaving이나, knitting, stitching 등의 다양한 방법을 통하여 이방적 구조로의 설계가 유리하다. 직물의 경우, 기공이 존재하는 등, 그 표면 구조가 다른 초소수성 기질과는 차이가 있어서 이방적 표면 구조에서의

2

액적 거동 양상이 다른 기질과 다르거나 다소 복잡할 것으로 예상된다. 그런데 현재까지는 이방적 구조의 초소수성 직물에 대한 연구가 매우 미흡한 실정으로, 초소수성 직물의 이방성 표면 구조가 액적의 거동에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 이방성 표면에서의 액적 거동 양상 분석을 통하여 보다 효과적인 초소수성 직물 제직 방안을 도출하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 한다. 이를 위하여 폴리에스터 두둑직에 초소수성을 구현한 후, 액적의 점도와 낙하 방향에 따른 정적 접촉각과 동적 접촉각을 측정하여 접촉각의 이방성을 도출하고자 하였다. 또한 액체의 점도와 낙하높이를 달리하여 표면에 충돌하는 액적의 동적 거동과 접촉 시간을 측정하여 직물 표면 이방성이 점도가 다른 액체의 동적 거동에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

### 제 2 절 이론적 배경

#### 1. 표면 젖음성 이론

초소수성(superhydrophobicity)이란 물과 친하지 않은 성질로, 일반적으로 초소수성을 판별하기 위한 기준으로 표면 젖음성을 많이 사용하며, 학계에서는 보통 물에 대하여 150°이상의 정적 접촉각과 10°미만의 동적 접촉각을 가지는 표면을 초소수성 표면이라고 간주한다[19].

표면 젖음성은 고체 표면의 화학적 성분과 물리적 형태에 의해 달라지며, 고체의 표면 에너지와 표면 거칠기가 주된 결정 요인이다. 그 중 표면 거칠기에 따라 표면 젖음성을 설명하는 이론은 크게 4가지 모델로, Young's model과, Wenzel model, Cassie-Baxter model, 그리고 Cassie-Baxter model과 Wenzel model의 중간 상태인 wetting transition이다.

#### 1.1. Young's model

Young's model이란 표면 거칠기 없이 이상적으로 평평한 표면에서 의 젖음성을 나타내는 모델로 Young's equation을 통해 표면 젖음성을 설명할 수 있다. 이때 액체가 고체 표면에서 형성하는 접촉각(θ<sub>γ</sub>)은 고 체, 액체, 기체가 접하는 각 계면의 에너지가 열역학적 평형상태에 도달 할 때 형성되며 식 (1)과 같이 정의된다[20].

 $\gamma_{SA} = \gamma_{SL} + \gamma_{LA} \cdot \cos\theta_Y \tag{1}$ 



Figure 1. Schematic of wetting state based on Young's model [21].

Young's equation에 따르면, 고체의 표면에너지가 낮을수록 물방울 이 고체 표면에서 형성하는 접촉각은 증가한다. 그러나 실험적으로 평평 한 표면에 거칠기 없이 소수화 가공만 하였을 때 도달할 수 있는 최대 접촉각은 약 120° 정도로 초소수성을 구현하기에는 한계가 존재한다. [22, 23]

#### 1.2. Wenzel model

Wenzel model이란 고체가 표면에 거칠기를 가질 때 물이 거칠기 사이의 공기층에 스며들어 완전히 접촉하고 있는 경우를 가정한 것이다. 이때의 접촉각( $\theta_W$ )은 식 (2)에서와 같이 표면의 거칠기(roughness)와 Young의 접촉각( $\theta_Y$ )에 따라 달라진다[24].



Figure 2. Schematic of wetting state based on Wenzel model [21].

(2)의 식에서 r은 표면 거칠기 상수(roughness factor)로, 실제 고체 표면과 물방울과의 접촉 면적을 평평한 표면에 투영된 면적(projected area)으로 나눈 비다. 거칠기가 없이 평평한 표면에서는 r=1이 되며, 거칠기가 존재하는 경우 r>1이 된다. Wenzel 식에 따르면, θ<sub>Y</sub> 이 90° 이상인 소수성 표면에서는 거칠기가 커질수록 접촉각(θ<sub>W</sub>)이 증가하고, θ<sub>Y</sub>이 90° 보다 작은 소수성 표면에서는 거칠기가 커질수록 접촉각(θ<sub>W</sub>)이 감소한다.

#### 1.3. Cassie-Baxter model

Cassie-Baxter model이란 거칠기를 가지는 고체 표면에서 물이 거칠기 사이로 침투되지 않아 물과 고체 사이에 공기층이 존재하여 고체-액체-기체의 계면이 모두 존재하는 상태를 가정한 것이다[25].

$$\cos\theta_{CB} = f_1 \cdot (\cos\theta_Y + 1) - 1 \tag{3}$$



Figure 3. Schematic of wetting state based on Cassie-Baxter model [21].

식(3)에서  $f_1$  (solid fraction)은 투영된 면적에 대해 액적이 고체 표면에 접촉한 면적의 비를 나타낸다. 따라서  $f_1$ 의 최대 값은 1이 되며, 이이 될수록 고체와 액체 사이의 접촉 면적이 감소하여 접촉각이 180°에 근접하게 된다. Cassie-Baxter model을 통하여 고체 표면의 거칠기의 존재가 초소수성의 구현에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

### 1.4. Cassie-Wenzel wetting transition

Wetting transition(전이 상태)란 Cassie-Baxter model과 Wenzel model의 중간 상태의 젖음성을 뜻한다. 처음에는 Cassie-Baxter model이었다가, 액적에 가해지는 온도나 압력, 시간 등의 외부적 요인[26,27]에 의해 안정화된 Cassie-Baxter model을 나타내지 못 하여 intermediate state를 나타낼 수 있는데 그 예로 Figure 4 에서와 같은 partial wetting state가 있다[28].



Figure 4. Schematic of Cassie-Wenzel wetting transition.

## 1.5 이중 거칠기 표면에서의 젖음성

앞서 설명한 이론들은 단일 거칠기를 가진 고체 표면에서의 젖음성을 설명한 것으로, 마이크로-나노의 이중 거칠기를 가진 표면의 경우 더욱 다양한 상태의 젖음성을 나타낸다. Figure 5 에서는 단일 거칠기에서 설명되는 Cassie-Baxter model 과 Wenzel model 을 마이크로 스케일에서는 Cm, Wm 으로, 나노 스케일에서는 Cn 과 Wn으로 표현하여 이중 거칠기 구조에서의 표면 젖음성을 나타냈다[29]. 이는 연잎과 같은 Cm-Cn 상태나, 장미꽃잎과 같은 Wm-Cn 뿐만 아니라 Cm-Wn, Wm-Wn 등, 다양한 상태의 젖음성을 보여준다. Ebert 등[30]은 마이크로 구조의 높이와 나노 구조의 밀도가 이중 거칠기 구조에서의 표면 젖음성 상태를 결정하는 중요한 요인이라고 하였다.



Figure 5. Schematic illustrations of wetting scenarios for dual-scale roughness [29].



Figure 6. Wetting scenarios of (a) Cassie-impregnating regime (with high adhesion) (b) Cassie-Baxter regime (with low adhesion) [30].

#### 2. 자가 세정성

자가 세정성(self-cleaning)이란 초소수성 표면에서 물방울이 굴러 떨어질 때 오구가 물방울에 흡착되어 제거되는 현상으로 그 메커니즘은 Figure 7의 (b)와 같으며[31], 자연의 연잎 표면에서 관찰되기 때문에 lotus effect라고도 한다[32]. 자가 세정 표면은 연꽃잎을 모방하여 (Figure 8)[33], micro-nano meter의 이중 거칠기 구조를 형성하고 낮은 표면에너지를 적용하여 구현할 수 있다.

Self-cleaning 가공을 하면 Figure 9에서 볼 수 있듯이 부식, 결빙, 김 서림 등이 방지되고, 외부 오염물질이 잘 부착되지 않으며 부착되더라도 자가 세정이 되기 때문에 방오성이 구현된다[34]. 따라서 초소수성 가공은 자동차, 전자기기, 건물 외벽 등 다양한 분야에 활용되고 있는데, 의류 소재의 경우 초소수성 가공을 함으로써 외관을 청결하고 위생적으로 유지하여 세탁의 횟수를 감소시킬 수 있다.



Figure 7. Schematic of the self-cleaning mechanism: (a) droplet sliding down on a normal flat surface (b) droplet rolling down on a superhydrophobic surface [31].



Figure 8. Self-cleaning lotus leaf: (a-c) self-cleaning phenomenon (d-e) cell papilla (f) wax tubules [33].







Figure 9. Applications of superhydrophobicity: (a) lotus leaves (b) wind shields (c) anti-wetting equipment (d) anti-glaze coated surfaces (e) anti-corrosion substrates (f) anti-contamination protective shoes [34].

#### 3. Rice leaf effect

자가 세정 현상은 초소수성 표면에서 물방울이 굴러 떨어지는 거동을 통해 이루어지는 것으로, 같은 표면에너지의 초소수성 표면이라도 동적 접촉각이 작은 표면일수록 더 낮은 각도에서 물방울이 쉽게 구를 수 있기 때문에 유리하며 최근 이러한 이유로 lotus effect에 shark skin effect가 합쳐진 rice leaf effect가 주목 받고 있다.

상어의 경우, 친수성의 riblet을(figure 10) 가지고 있음에도 표면의 이방적 구조로 인해 물에 대한 항력이 작아 헤엄 속도가 빠르며 표면에 자가세정 기능을 가지고 있다고 알려져 있는데[35], rice leaf의 경우 옆잎의 낮은 표면에너지와 micro-nano의 이중구조 뿐만 아니라 상어의 이방적 표면 구조(Figure 11, 12)를 함께 가지고 있다[6, 13, 15, 35].



Figure 10. SEM images of shark skin with arrows indicating direction of anisotropic water flow [35].



Figure 11. SEM images of rice leaf with arrows indicating direction of anisotropic water flow [35].



Figure 12. 3D digital microscopic image of rice leaf [15].

이러한 rice leaf에서는 이방적 표면 구조로 인해 물방울의 이방적 흐름 현상이 생기며 두둑과 수직인 방향에서보다 평행한 방향에서 물방울이 구를 때 drag force가 작아 더 낮은 sliding angle을 보인다고 알려져 있으며(Figure 13, 14)[14-15], 두둑과 평행한 방향에서 높은 자가 세정 성능을 보인다는 연구 결과가 있다[7].



Figure 13. Anisotropic wettability of rice leaf [15].



Figure 14. (a) rice leaf surface with anisotropic wettability (b) SEM image of rice leaf surface. [14].

#### 4. 동적 거동과 접촉 시간

자가 세정 성능에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나로 수평면에 떨어지는 물방울의 동적 거동을 들 수 있다. 초소수성 표면에 떨어지는 액적은 다양한 양상의 거동을 보이며, 그 중 액적이 rebound하면서도 표면과의 접촉 시간(contact time)이 짧을수록 자가세정성에 유리한 것으로 알려져 있다[58-59].

#### 4.1. 동적 거동

액적이 고체 표면에 충돌하는 것은 옷, 우산 등에 빗방울이 떨어지는 것과 같이 평상시 생활에서 자주 접할 수 있는 현상으로, 정적 접촉각이나 동적 접촉각 뿐만 아니라 낙하하는 액적의 충돌 실험도 고체의 젖음성을 측정하는 방법의 한가지가 될 수 있다[36-37]. Wang 등[38]은 초소수성 표면으로 낙하하는 액적의 동적 거동 양상을 Figure 15와 같이 deposition과 rebound, partial rebound, sticky state의 4 가지로 분류하였다.

액적이 수평면의 초소수성 표면과 출동할 때 거동에 영향을 주는 변수들로는 액적의 반지름, 점도, 충돌 시 속도, 표면의 구조 등이 있으며[39-40] 효과적인 초발수성이나 자가세정성을 발현하기 위해서는 액적이 표면에서 튕겨나가는 rebound 거동이 중요하다.

17



Figure 15. Schematics of droplet impact behavior [38].

#### 4.2. 접촉 시간

자가 세정은 초소수성의 표면에서 액적이 rebound할 때 그 접촉 시간이 짧을수록 유리한 것으로 알려져 있다. 그 이유로 Shi 등[55]은 액적이 rebound 할 때, Cassie-Wenzel-Cassie wetting state의 전환이 일어나야만 마이크로 구조 사이의 오구가 제거되며 이 wetting state의 전환은 표면과 액적의 접촉 시간이 짧을수록 잘 일어난다고 설명하였다. 접촉 시간이 길어질 경우, 물방울이 완전히 rebound 되지 못하는 partial rebound가 일어날 가능성이 많아져 물방울이 표면에 집적되어 오구를 제거하지 못하거나 물방울이 완전히 rebound 되더라도 Cassie state만 일어나 마이크로 구조 사이의 오구를 제거하지 못하기 때문이다(Figure 16).



Figure 16. (a, b) Cassie-Wenzel-Cassie wetting state transition and (c,d) resulting improvement in self-cleaning of micro-nanostructured superhydrophobic surface [55].

최근 이러한 접촉 시간을 줄이고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 그 방법적인 초점은 대부분 초소수성 표면의 기하학적 구조에 맞추어져 있다[10]. Bird 등[59]은 초소수성 표면에 millimeter 이하 스케일의 두둑을 적용하여 접촉 시간을 줄이는 방법을 제시하였다. 이 경우, 두둑이 존재하지 않는 연잎의 경우에서 보다 약 37% 정도의 접촉 시간 감소가 가능하다고 알려져 있다(Figure 17, b). 또한 Gauthier 등[41]은 Y-패턴의 두둑이 있는 초소수성 표면을 형성하여 접촉 시간을 감소시키는 방법을 제안하였고(Figure 17, c), Liu 등[42]은 표면 곡률이 있는 초소수성 표면에서 액적 운동량의 방향성 변화를 통해 접촉 시간의 감소를(Figure 17, d), Liu 등[43]은 pancake bouncing 거동의 구현을 통해 접촉 시간의 감소를 이루었다(Figure 17, e)[10].



Figure 17. Strategies for contact time reduction [10].

이러한 연구들을 바탕으로, Song 등[58]은 두둑이 반복해서 존재하는 rice leaf 구조 표면에서 액적의 동적 거동을 관찰하였고 두둑 간격의 조정을 통하면 rice leaf 구조에서도 충돌하는 액적 덩어리의 거동을 변화시켜 접촉 시간을 감소시키는 것이 가능하다는 것을 밝혀내었다(Figure 18).



Figure 18. Reducing contact time of a bouncing drop on rice-leaf like surface [58].

### 4.3. 액적의 점도에 따른 동적 거동

액적의 접촉 시간은 표면의 구조 뿐만 아니라 액적의 특성에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Raiyan 등[18]은 두둑이 있는 초소수성 표면에서 액적의 점도와 낙하 속도에 따른 동적 거동의 차이를 분석하였고, 같은 표면 조건에서 점도가 작을수록 접촉 시간을 줄이는 것이 더욱 유리하다고 하였다.



Figure 19. Comparison of droplets bouncing on the surfaces with and without macrotexture for glycerol aqueous solutions (0, 40, 60, and 70% by weight) [18].
# 제 2 장실 험

### 제 1 절 시료 및 시약

본 연구에서는 직물의 기하학적인 이방성을 표현하기 위하여 100% polyester 필라멘트사로 이루어진 두둑직을 사용하였고 두둑 간의 간격은 립의 간격으로 차별화하였다. 경사 75데니어(denier), 위사 150데니어, 두둑사에는 600데니어를 사용하여 제직(C.K TEXTILE, 한국) 하였고 제직 조건은 Table 1에 나타난 바와 같다. 두둑사 간의 간격은 두둑의 가장 높은 곳 즉, 두둑의 중앙 간의 간격을 광학현미경(MODEL BX53F2, OLYMPUS, Japan)으로 측정하였으며(Figure 20) 시료의 이름 또한 이 간격을 기준으로 명명하였다. Control 시료는 립이 없이 제직된 균형평직 시료로, 두둑직에 대한 대조군으로 사용하였다.

시료의 정련액은 음이온 계면활성제(60%-Sodium dodecyl benzenesulfonate, 대정화금㈜, 한국) 5g/L와 sodium carbonate anhydrous anhydrous(>99%)(대정화금㈜, 한국) 5g/L이 용해된 용액을 액량비(weight %) 1:30으로 준비하였고, 시료를 침지하여 50-55℃에서 45분간 처리하였다. 그 후, 흐르는 증류수에 10회 이상 충분히 수세하고 상온에서 24시간 자연 건조하여 사용하였다.

Sample Code	Weave type	Weave density	Yarn diameter		Weave Repeat	Distance between					
	••	(threads /inch)	Warp	Weft	Rib Yarn	(Weft Direction)	center of Rib yarns				
Control	Plain weave	129 x 70	75d	150d	_	-	_				
R-R 750		129 x 65				150d X1 +600d	750 <i>µ</i> m				
R-R 1000		129 x 70				150d X2 +600d	1000 <i>µ</i> m				
R-R 1250	Rib weave	129 x 75	75d	150d	600d	150d X3 +600d	1250 <i>µ</i> m				
R-R 1750		129 x 80								150d X5 +600d	1750 μm
R-R 2250		129 x 85				150d X7 +600d	2250 <i>µ</i> m				

Table 1. Specimen codes and characteristics

Sample Code	Surface image	Optical microscope image
Control	2 mm	500 µm
R-R 750		
R-R 1000		1000 µm
R–R 1250		1250 uni
R–R 1750		
R-R 2250		2250 µm

Figure 20. Surface images and optical microscopic images of specimens.

점도가 다른 액적은 물과 글리세롤 (Glycerin, >99%)(대정화금㈜, 한국) 혼합용액의 글리세롤의 질량비로 점도를 조절하여 준비하였다[44-45]. 본 연구에서는 물 100%와 글리세롤60:물40 weight% 혼합용액을 사용하였으며, 글리세롤의 질량비에 따른 액체의 밀도 및 점도와 표면 장력은 Table 2와 같다.

Table 2. Density, surface tension, and dynamic viscosity for glycerol aqueous solutions [44, 45]

Glycerol weight (%)	Density ρ (g/cm3)	Surface tension $\sigma$ (mN/m)	Dynamic viscosity µ (mPa.s)
0	1.00	72.0	1.0
60	1.15	64.6	10.8

### 제 2 절 초소수성 가공

## 1. 산소 플라즈마 에칭

고유의 마이크로 거칠기를 지닌 폴리에스터 직물에 나노 거칠기를 도입하기 위하여 산소 플라즈마 에칭을 진행하였다[46]. 장비는 RIE 방식의 ICP Etcher 80plus (Oxford instrument, UK)를 사용하였다. 공정 시 시료를 실리콘 웨이퍼 위에 올려 놓고 kaptone tape로 사면을 부착하여 고정한 후, 전력 180 W를 인가하여 챔버 내 압력이 40 mTorr에 도달하였을 때 주입 속도 20 sccm의 산소 플라즈마로 8분간 에칭을 진행하였다.

# 2. 소수화 가공

플라즈마 에칭한 직물의 표면을 소수화하기 위하여 낮은 표면에너지 를 지닌 FAS-17(1H, 1H, 2H, 2H-Perfluorodecyltrichlorosilane 96%, C<sub>10</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>17</sub>Si, Alfa Aesar, UK)을 사용하여 기상 증착(Chemical vapor deposition, CVD)하였다.

기상 증착은 진공 오븐(Vacuum Oven C-DVD1, CHANGSHIN SCIENCE, 한국)에 세리믹 용기에 담은 FAS-17 200µl와 시료를 함께 넣고 80°C에서 2 시간 진행하였으며, 75°C 대류식 오븐(Thermo Stable n-32, DAIHAN Scientific Co, 한국)에서 24시간 건조 후 사용 하였다[61].

### 제 3 절 시료의 특성 분석 및 평가

### 1. 표면 구조 및 성분

플라즈마 에칭에 따른 시료 표면 형태 변화를 확인하기 위하여 전자 주사 현미경(Field-Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM, SIGMA, Carl Zeiss, Germany)을 사용하였다. 부도체인 폴리에스 터 시료에 전도성을 부여하기 위하여 백금코팅기(Ion Sputter Coater, G20, GSEM, Korea)를 사용하여 120초 동안 30 mA에서 약 10nm 두 께로 표면을 코팅하였으며 이후 0°로 SEM stage를 설정하여 시료를 관찰하였다.

또한 FAS-17 기상 증착에 의한 표면 화학적 조성 변화를 확인하기 위하여 에너지 분산 X선 분광법(Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS, Bruker, X Flash Detector 4010, Germany)을 이용하였다. 미처리 시료와 산소 플라즈마 처리 시료, 산소 플라즈마 후 기상 증착한 시료의 표면에서 탄소, 산소, 불소의 조성을 분석하였다.

# 2. 정적 및 동적 접촉각

### 2.1. 정적 접촉각

시료의 젖음성을 평가하기 위하여 접촉각 측정기(Attension<sup>®</sup> Theta Lite Optical Tensiometer, KSV Instruments, Finland)를 이용하여 정적 접촉각(Static Contact Angle, CA)을 측정하였다. 시료를 슬라이드 글라스 위에 테이프로 고정시키고 3.5 ± 0.2µℓ의 액적을 적하하여 1초 간격으로 10초 동안 측정한 후 평균하였는데 측정 액적의 점도를 달리하고(물 100%와 글리세롤60:물40 weight% 혼합용액) 시료의 두둑과 수직한 방향과 평행한 방향에서 모두 측정하였다. 측정 위치를 다르게 하여 시료별로 10회 반복하여 평균한 값을 하나의 시료를 대표하는 접촉각으로 간주하였다.



Figure 21. An image of contact angle analyzer.

### 2.2. 동적 접촉각

동적 접촉각의 경우, 접촉각 측정기(Attension<sup>®</sup> Theta Lite Optical Tensiometer, KSV Instruments, Finland)를 이용하여 sliding angle(SA)과 shedding angle(ShA)을 모두 측정하였다.

이방성 구조를 가진 초소수성 표면의 젖음성을 고찰한 선행 논문들에서는 주로 sliding angle만을 동적 접촉각으로 측정하였으나 직물의 경우 기공이 존재하는 등 일반적인 초소수성 기질과 비교하였을 때 시료의 구조가 다소 복잡하여, Zimmerman 등[47]이 초소수성 직물에 적합한 동적 접촉각 측정으로 제시한 shedding angle의 측정 또한 함께 진행하였다.

Sliding angle은 Figure 22와 같이 시료 표면에 액적을 적하시킨 후 시료를 0°에서 90°까지 기울일 때 액적이 굴러 떨어지기 시작하는 각도를 말하며[48], shedding angle은 시료로부터 1cm 떨어진 높이에서 액적을 떨어뜨렸을 때 2cm 이상 굴러가는 각도를 말한다[47]. 측정 액적의 부피는 12.5 ± 0.3µl로 점도를 달리하고(물 100%와 글리세롤60:물40 weight% 혼합용액) 측정 방향은 시료의 두둑과 수직한 방향과 평행한 방향에서 각각 5회씩 측정 후 평균하였다.

Measurement direction	Sliding Angle	Shedding Angle
Parallel (//)		1 cm
Perpendicular (⊥)		

Figure 22. Conceptual images of dynamic contact angle measurements on specimens.

# 2.3. 접촉각의 이방성

표면 구조의 이방성에 따른 젖음성의 이방성을 알아보기 위하여 두둑과 수직(1)한 방향과 평행(//)한 방향에서의 정적 접촉각(CA)과 동적 접촉각(ShA, SA)의 차이로 식 (4),(5),(6)과 같이 접촉각의 이방성을 도출하였다[49].

- Anisotropy of Contact Angle,  $\Delta \theta = CA \perp CA //$  (4)
- Anisotropy of Shedding Angle,  $\Delta \theta = \text{ShA} \perp \text{ShA} //$  (5)
- Anisotropy of Sliding Angle,  $\Delta \theta = SA \perp SA //$  (6)

### 3. 동적 거동과 접촉 시간

### 3.1. 동적 거동

기울기 0°의 수평면의 시료에 낙하하는 액적의 거동을 초고속 카메라(NX3-S301-0117-1555, IDT Vision, USA)를 이용하여 4,000 frames per second(FPS)로 촬영했으며, Motion studio 32(IDT)를 사용하여 편집, 분석하였다.

거동 분석의 기준은 낙하한 액적이 고체 표면으로부터 분리되는지 여부로, 액적이 표면에서 한 번 이상 튕겨지며 완전히 이동하는 경우를 rebound로, 일부를 표면에 남겨둔 채 나머지만 튕겨져서 이동하는 경우를 partial rebound로, 액적 전체가 표면과 분리되지 못하고 표면 위에 그대로 남아있는 경우를 deposition으로 분류하였다.

측정 시 액적의 점도를 달리하였으며(물 100%와 글리세롤60:물40 weight% 혼합용액) 낙하 높이는 1cm에서부터 10cm까지 1cm 간격으로 조정하였다. 낙하하는 액적의 지름은 낙하 지점에 상관없이 액적이 항상 두둑과 만날 수 있도록 가장 넒은 두둑 간격인 2250µm와 같게 설정하였다(Figure 23)[58].



Figure 23. Schematic illustration of a liquid droplet with diameter of 2250 µm [58].

# 3.2. 접촉 시간

접촉 시간은 동적 거동과 동일한 방법과 조건으로 측정하였다. 접촉 시간은 액적이 rebound할 때, 액적이 시료와 닿는 순간부터 시료를 떠나는 순간까지(Figure 24)의 시간으로 계산하였으며[50] 접촉 위치에 관계없이 한 조건 당 최소 5회 반복하고 평균하였다.



Figure 24. Schematic illustration of contact time [50].

# 제 3 장 결과 및 고찰

## 제 1 절 가공에 따른 시료의 특성 변화

산소 플라즈마 에칭 및 FAS-17 CVD 처리에 따른 시료의 표면 특성 변화를 알아보기 위해 표면 형태 및 성분 분석을 진행하였으며 그 결과는 아래와 같다.

### 1. 산소 플라즈마 에칭에 따른 표면 형태

시료 표면의 구조는 Scanning Electron Microscope(SEM)를 사용하여 관찰하였으며 그 결과는 Figure 25와 같다. 미처리 시료는 매끈한 표면을 나타내고 있으며, 플라즈마 에칭 및 FAS-17 CVD를 진행한 시료의 경우에는 플라즈마 에칭에 의하여 나노 스케일의 거칠기가 생성된 것을 알 수 있다. (a)

	X 10,000	X 50,000
Untreated		500nm

(b)



Figure 25. Scanning electron microscope images of (a) pristine surfaces (b) plasma etched surfaces.

# 2. 소수화 가공에 따른 표면 성분

FAS-17 CVD(Chemical Vapor Deposition, 화학적 기상 중착법)에 따른 표면 화학적 조성 변화를 확인하기 위하여 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 분석을 진행하였으며 결과는 Figure 26에 나타냈다. EDS 분석은 백금 코팅(Pt sputtered coating) 후 진행되므로 모든 시료에서 Pt peak이 나타났다. FAS-17은 탄소(C) 수소(H), 염소(Cl), 불소(F), 규소(Si)로 이루어져 있기 때문에 그 유무는 F peak을 통해 알 수 있다. CVD 후 시료의 표면 atomic concentration은 탄소 84.93 %, 산소 13.01 %, 불소 2.05 %로 F peak이 나타남에 따라 FAS-17 CVD가 성공적으로 이루어졌음을 확인하였다.



Figure 26. EDS patterns of (a) pristine specimen (b) plasma etched specimen (c)FAS-17 CVD specimen after plasma etching.

### 제 2 절 표면 젖음성

표면 구조와 액적의 특성에 따른 시료 표면의 젖음성을 비교하기 위하여 정적 접촉각과 동적 접촉각인 shedding angle과 sliding angle을 측정하였다. 표면 구조에 따른 젖음성의 이방성을 알아보기 위하여 두둑과 수직한 방향과 평행한 방향에서 모두 측정하였고 그 값의 차이로 이방성을 도출하였다.

#### 1. 정적 접촉각

정적 접촉각 측정 시 액적의 부피는 3.5µℓ(±0.2)를 사용하였으며 액적의 점도와 표면 구조의 방향에 따른 측정 결과는 Table 3과 같다. 모든 시료에서 액적의 점도와 표면 구조의 방향과 관계없이 액적이 표면에 접촉하자 마자 튕기는 현상을 보이면서 180°에 가까운 값을 나타냈는데, 이는 본래 마이크로 구조를 지닌 초소수성 직물에 나노 구조가 성공적으로 도입되면서 Cassie-Baxter 모델에 따른 이중 구조가 형성되어 액적과 시료 표면의 접촉 면적이 감소되었기 때문으로 판단된다. 이에 따라 표면 구조의 방향에 따른 정적 접촉각의 이방성은 0으로 도출되었다. Table 3. Static contact angles for glycerol aqueous solutions of 0% and  $% \left( {{{\rm{S}}_{\rm{s}}}} \right)$ 

604	Ъ
-----	---

Glycerol	Direction to	Static contact angle (°)					
weight (%)	Groove	Control	R-R 750	R-R 1000	R-R 1250	R-R 1750	R-R 2250
	Parallel	÷	÷	÷	÷	÷	÷
0	(//)	180	180	180	180	180	180
0	Perpendicular	÷	÷	÷	÷	÷	÷
	(⊥)	180	180	180	180	180	180
	Parallel	÷	÷	÷	÷	÷	÷
60	(//)	180	180	180	180	180	180
	Perpendicular	÷	÷	÷	÷	÷	÷
	(⊥)	180	180	180	180	180	180

### 2. 동적 접촉각

동적 접촉각 측정 시 액적의 부피는 12.5µℓ(±0.3)를 사용하였으며 액적의 점도와 표면 구조의 방향에 따른 shedding angle과 sliding angle 측정 결과는 Table 4와 Figure 27 및 Table 5과 Figure 28에 나타내었다.

# 2.1. 두둑 간 간격에 따른 동적 접촉각

물에 대한 동적 접촉각(Table 4, Figure 27)은 모든 시료에서 shedding angle 값이 sliding angle 값보다 작았다. 이는 shedding angle은 측정 시 표면을 기울인 상태로 물방울을 떨어뜨려 측정하기 때문에 액적과 시료가 접촉하는 시간이 매우 짧은 반면, sliding angle의 경우 수평의 시료 위에 물방울을 적하시킨 후 점진적으로 기울기를 증가시키며 측정하기 때문에 표면에 부착된 물방울이 분리되어 구르기 시작하게 하는데 보다 큰 힘이 필요하기 때문이다.

두둑 간격이 1250, 1750, 2250µm인 경우, 물방울이 낙하하는 수직, 평행 방향에 관계없이 그 간격이 넓어질수록 shedding angle 값은 높아지고 sliding angle 값은 낮아지는 반대의 경향을 보였으며, 750µm인 경우, shedding angle과 sliding angle 모두 그 값이 0으로 가장 작았다. 이는 R-R 750의 두둑이 기존의 마이크로-나노 구조에 더해져 삼차원적 다층 구조를 형성하여 물과의 접촉 면적을 최대한 줄여 antiwetting에 유리한 조건을 형성했기 때문으로 사료된다. 초소수성

표면에서의 동적 젖음성을 표면 구조와의 관계를 통해 고찰한 Sakai 등[51]은 아래 식(7)과 같이 sliding angle을 나타내었다.

$$ma = mg \sin \alpha - R \tag{7}$$

이 식(7)에서 m은 액적의 질량(mass), a는 가속도(acceleration), g는 중력 가속도(gravitational acceleration), *a*는 sliding angle, R은 액적이 굴러가는 방향과 반대 방향으로 작용하는 힘인 항력(resistance force)을 의미하며, 이 때 sliding angle에 작용하는 변수인 항력은 물방 울과 고체 표면이 접하는 면적에 비례한다[51].

Specimen code	Direction to Groove	ShA(°)	SA(°)
Control	parallel	$1.6(\pm 0.1)$	$7.2(\pm 0.8)$
Control	perpendicular	$0.7(\pm 0.2)$	$6.1(\pm 0.5)$
P_P 750	parallel	$0.0(\pm 0.0)$	$0.0(\pm 0.0)$
K-K 750	perpendicular	$0.0(\pm 0.0)$	$0.0(\pm 0.0)$
D D 1000	parallel	$1.9(\pm 0.1)$	$11.0(\pm 1.9)$
K-K 1000	perpendicular	$1.6(\pm 0.2)$	6.6(±1.3)
D D 1050	parallel	$1.5(\pm 0.1)$	$10.6(\pm 1.5)$
K-K 1250	perpendicular	$1.5(\pm 0.7)$	$14.7(\pm 1.6)$
D_D 1750	parallel	$2.9(\pm 0.4)$	$8.6(\pm 0.8)$
K-K 1750	perpendicular	$2.3(\pm 0.2)$	$12.2(\pm 2.4)$
D_D 2250	parallel	$3.7(\pm 0.3)$	$4.0(\pm 0.4)$
R-R 2200	perpendicular	$3.6(\pm 0.3)$	$8.7(\pm 1.7)$

Table 4. Dynamic contact angles for water 100%



Figure 27. Dynamic contact angles on specimens for water 100%.

### 2.2. 액적의 점도에 따른 동적 접촉각

점도가 물보다 높은 글리세롤 수용액의 경우(Table 5, Figure 28), shedding angle과 sliding angle 모두 물에서 보다 높은 값을 보였다. 액적이 기울어진 표면에서 구를 때에는 액적과 표면이 만나는 접촉면에 구르는 것을 돕는 힘과 방해하는 힘이 동시에 작용하며 두 힘의 상호 작용에 따라 액적의 거동이 결정된다. Yilbas 등[52]은 기울어진 표면에서 액적이 구르는 것을 방해하는 힘인 항력(resistance force)을 부착력( $F_{ad}$ , adhesion force,)과 전단력( $F_{\tau}$ , shear stress)의 합으로 설명하였으며, 식 (8)과 (9)에서  $\gamma_{LV}$ 는 액적의 표면 장력, D는 액적의 지름,  $\theta_A$  는 전진 접촉각(advancing contact angle),  $\theta_R$  는 후진 접촉각(receding contact angle)  $A_W$ 는 액적과 고체의 접촉 면적,  $\mu$ 는 액적의 점도,  $\frac{dV}{dy}$ 는 유체 변형율(V는 유속, y는 액적과 접촉면의 수직 거리)을 의미한다. 이때 전단력( $F_{\tau}$ , shear stress)은 액적의 점도와 비례하여, 액적의 점도가 높아지면 액적이 굴러 떨어지는 것을 방해하는 힘인 전단력이 커져 동적 접촉각이 증가하게 된다.

$$F_{ad} = \frac{24}{\pi^3} \gamma_{LV} D(\cos \theta_R - \theta_A) \tag{8}$$

$$F_{\tau} = A_W(\mu \frac{dV}{dy}) \tag{9}$$

Specimen code	Direction to Groove	ShA(°)	SA(°)	
Control	parallel	$5.7(\pm 0.2)$	$16.5(\pm 1.2)$	
Control	perpendicular	$2.1(\pm 0.4)$	$9.0(\pm 0.7)$	
D_D 750	parallel	$0.0(\pm 0.0)$	$0.0(\pm 0.0)$	
K-K 750	perpendicular	$0.0(\pm 0.0)$	$0.0(\pm 0.0)$	
R-R 1000	parallel	$9.8(\pm 0.1)$	$15.1(\pm 1.3)$	
	perpendicular	$2.1(\pm 0.7)$	$7.5(\pm 1.7)$	
D_D 1950	parallel	$5.8(\pm 0.3)$	$12.7(\pm 2.4)$	
K-K 1250	perpendicular	$2.8(\pm 0.4)$	$15.4(\pm 2.2)$	
D D 1750	parallel	$10.2(\pm 0.3)$	$10.1(\pm 1.5)$	
K-K 1750	perpendicular	$4.2(\pm 0.9)$	$16.2(\pm 4.7)$	
D_D 9950	parallel	$10.3(\pm 0.9)$	$12.0(\pm 0.4)$	
K-K 2200	perpendicular	$4.6(\pm 0.4)$	$16.3(\pm 6.6)$	

Table 5. Dynamic contact angles on specimens for glycerol aqueous solution of 60%



Figure 28. Dynamic contact angles on specimens for glycerol aqueous solution of 60%.

### 2.3. 동적 접촉각의 이방성

표면 구조의 이방성에 따른 젖음성의 이방성을 알아보기 위하여 두둑과 수직(⊥)한 방향과 평행(//)한 방향에서의 동적 접촉각의 차이로 식 (5), (6)와 같이 이방성을 도출하였으며, 측정 액적이 물일 때의 결과는 Figure 29와 같다.

$$\Delta \theta = \text{ShA} \perp - \text{ShA} // \tag{5}$$

$$\Delta \theta = SA \perp - SA //$$
(6)

두둑과 수직, 평행한 방향에서 동적 접촉각이 0이었던 R-R 750 시료를 제외한 모든 시료에서 두 액체에 대하여 모두 shedding angle의 이방성은 음수로 도출되었으며 R-R 1000 시료에서는 sliding angle의 이방성 결과 또한 음수로 나타났다. 이때, 이방성이 음수라는 것은 두둑과 수직한 방향이 평행한 방향보다 물방울이 구르기에 유리하다는 것을 의미한다.

액적이 마이크로 또는 나노 거칠기가 있는 초소수성의 고체 표면과 만나면 그 접촉면에는 고체-액적-공기 3 상의 계면(three phase contact line)이 형성된다. 이때 3 상이 만나는 접촉면이 불연속 적일수록 젖음성에 유리한데 이는 이때 3 상의 계면에서 air pocket이 증가하고, 증가한 air pocket이 표면과 액적 사이의 접촉 면적을 감소시켜 표면과 액적 사이의 부착력이 감소하기 때문이다[53].

본 연구에서는 Figure 30에서와 같이 액적이 두둑과 수직한

방향에서 구를 때에 평행한 방향에서 구를 때보다 불연속적인 접촉면이 형성되어 shedding angle과 R-R 1000의 sliding angle 값에 유리했던 것으로 보았다.



Figure 29. Anisotropy of dynamic contact angles on specimens for water 100%.



Figure 30. Schematic image of contact line (a) continues and (b) discontinues formed on the surface of R-R 1000.

반면, 두둑 간격이 1250, 1750, 2250µm인 경우, shedding angle 이방성은 음수, sliding angle 이방성은 양수로 도출되었는데 이 경우, 액적과 시료의 접촉 면적의 지름이 두둑 간격보다 작았다.

Shedding angle의 경우, 물방울이 1cm 높이에서 떨어지며 시료 표면과 만나는 즉시 rebound한 후 구르면서 측정이 되는 항목이기 때문에 접촉 면적이 작은, 계면이 불연속적인 방향에서 유리했지만, sliding angle의 경우, Figure 31의 (b)에서와 같이 액적이 두둑 사이에 갇혀 정지해 있는 상태에서 측정이 시작됐기 때문에 두둑이 물방울이 구르는 데 극복해야 할 장애물로 작용하기 때문으로 보인다. Yunusa 등[54]에 따르면 이러한 경우, 물방울이 두둑과 평행한 방향으로 구를 때, 두둑이 물방울이 두둑과 두둑 사이에서 구를 수 있도록 돕는 가이드라인 작용을 할 수도 있다.



Figure 31. Schematic image of contact line for the surface of R-R 1750.

글리세롤 수용액의 동적 접촉각의 이방성은 Figure 32와 같으며 그 값이 음수일 때에는 물의 경우보다 높은 절대값을 보였으며, 이방성이 양수일 때에는 물의 값과 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 액적과 시료의 접촉 면적의 지름이 두둑 간격보다 작을 경우, 장애물인 두둑을 극복해야 하는 힘이 점도에 의해 증가된 전단력보다 크기 때문으로 판단된다.



Figure 32. Anisotropy of dynamic contact angles on specimens for glycerol aqueous solution of 60%.

### 제 3 절 측정 조건에 따른 동적 거동과 접촉 시간

앞서 살펴본 정적 접촉각과 동적 접촉각 외에도 표면 구조와 액적의 특성에 따른 시료의 표면 젖음성을 비교하기 위하여 수평면에서의 액적의 동적 거동을 촬영하고 접촉 시간을 측정하였다. 초소수성 표면이 효과적인 초발수성이나 자가세정성을 발현하기 위하여는 액적 충돌 시 액적이 표면에 침투되지 않고 튕겨 나가는 rebound 거동이 중요하며 rebound 시 액적과 표면과의 접촉 시간이 짧을수록 자가세정에 유리하다[55].

## 1. 두둑 간 간격에 따른 동적 거동과 접촉 시간

### 1.1. 동적 거동

수평면의 표면에서 물방울의 낙하 높이와 두둑 간 간격에 따른 동적 거동은 Figure 33과 같다. 두둑 간격이 750 μm를 제외한 두둑이 있는 모든 시료에서 두둑 간의 간격이 넓을수록 보다 높은 높이에서 rebound가 가능하였다. 또한 Figure 34에서와 같이 낙하 높이 1cm에서는 두둑의 유무 혹은 두둑 간격과 상관없이 모든 시료에서 물방울이 traditional rebound의 거동을 보인 반면, 낙하 높이 6cm 에서는(Figure 35) 두둑의 유무와 간격에 따라 각기 다른 거동 양상과 모양을 나타내는 것을 발견하였다. 액적이 높은 높이에서 낙하하여 시료와 높은 속도로 충돌 시, 낮은 속도로 충돌할 때 보다 maximum spreading diameter가 커지며 더 얇게 spread 되는데[56] 이때 액적의 두께 h와 두둑의 높이의 차가 줄어들면서 낮은 속도로 충돌할 때보다 두둑의 영향을 더욱 받게 되어 두둑의 간격에 따라 거동의 양상과 모양에 차이를 보인 것으로 생각된다.



Figure 33. Droplet impact behavior by height on specimens for 100% water.



Figure 34. Droplet dynamic behavior on specimens of 1cm height.


Figure 35. Droplet dynamic behavior on specimens of 6cm height.

#### 1.2. 접촉 시간

액적 낙하 시의 접촉 시간 차이를 두둑의 간격에 따라 알아보기 위하여 동일한 액적(=물)에서 각 시료와의 접촉 시간을 높이를 달리 하여 측정하였으며 그 결과값을 Figure 36에 나타냈다.

낙하 높이가 1cm로 낮은 경우, 두둑의 간격에 따른 접촉 시간의 차이에서 뚜렷한 경향성을 발견할 수 없었다. 반면, 낙하 높이가 6cm인 경우, 모든 시료에서 1cm인 경우보다 접촉 시간이 길어졌으며. 두둑 간격이 750 μm인 시료를 제외한 시료들에서 두둑의 간격이 넓을수록 접촉 시간을 줄이는데 유리했다.

액적이 표면에 충돌할 때는 anti-wetting pressure 로 작용하는 모세관 압력(capillary pressure)과 wetting pressure 로 작용하는 해머 압력(hammer pressure) 및 동적 압력(dynamic pressure)의 상호 작용이 액적의 거동을 결정한다. 이 중 동적 압력은 액적의 운동에너지에 의하여 발생하며 액적의 종류가 동일한 경우 식(10)에서와 같이 충돌 속도가 동적 압력에 중요한 영향을 미치는 변수로 작용한다. 이 때 PD 는 액적의 동적 압력, ρ 은 밀도, V 는 충돌 속도를 나타낸다[57].

$$P_D = 0.5\rho V^2 \tag{10}$$

낙하 높이가 6cm 일 경우, 1cm 보다 액적의 충돌 속도가 높기 때문에 wetting pressure 인 동적 압력이 커져 rebound 시의 접촉 시간이 늘어난 것으로 사료된다.



Figure 36. Droplet contact time of 1cm and 6cm height for 100% water.

6cm 높이에서 두둑의 간격이 넓어질수록 rebound 확률이 높아지고 접촉 시간의 감소가 일어나는 현상은 액적의 운동량의 이방성에 기인한 것으로 보인다[58].

이방성 없이 표면 구조가 균등한 초소수성 기질에 충돌하는 액적이 maximum diameter까지 spread했다가 recoil할 때의 동적 거동은 사방대칭적이다. 그렇게 사방대칭적인 모양으로 rebound 하는 경우, Figure 37의 그림 a에서와 같이 액적의 가장자리 부분은 안쪽 방향으로 recoil하고, 가운데 부분은 가장자리가 모두 recoil할 때까지 정지된 채로 있게 된다. 그런데 그림 b에서와 같이 액적이 두둑과 만나게 될 경우, 액적의 중심 부분이 정지해 있는 것이 아니라 액적이 recoil하는 것을 도와주게 된다[59]. 또한 액적이 어떠한 이유에서든 그림 c에서처럼 비대칭적인 모양으로 recoil하게 되는 경우, 그 거리가 짧은 쪽으로 recoil한 후 rebound 하기 때문에 a의 경우보다 접촉 시간이 단축되는 것으로 알려져 있다[56].

이러한 이유로, 기질에 특정한 두둑을 만들어 액적을 충돌시킬 시, 두둑이 없이 최적의 조건으로 만들어진 초소수성 표면에서 보다 접촉 시간이 더욱 더 감소될 것이라는 것을 알 수 있으며 골의 간격의 조정을 통하여 접촉 시간의 감소를 이룰 수 있는 것을 실험 결과를 통해 확인하였다. 두둑의 간격이 넓어질수록 접촉 시간이 짧아지는 이유로는, 두둑의 간격이 넓을수록 충돌하는 동안 하나의 골 안에 갇히게 되는 액적의 부피가 많아져 확산 액적을 비대칭적으로 분배하는 경향이 더 강했기 때문으로 사료된다[58].



Figure 37. Retraction mechanism of impinging droplets [56].

#### 2. 액적의 점도에 따른 동적 거동과 접촉 시간

#### 2.1 동적 거동

액적의 점도에 따른 동적 거동은 Figure 38, 39와 같으며, 두 그래프의 비교를 통하여 점도가 높을수록 같은 표면에서 rebound하기가 어려워진다는 것을 알 수 있었다.

충돌하는 액적에서 점도의 효과는 액적의 에너지 변환에 의해 이해될 수 있다. Raiyan 등[18]에 따르면 표면에 충돌하기 전의 액적의 에너지는 운동에너지와 표면에너지로 구성되어 있으며 액적이 표면에 충돌할 때 운동에너지(관성력)는 액적이 spread하게 한다. 액적이 spread하는 동안 운동에너지가 소비되면서 계면에너지 및 소산 에너지로 변환되는데 초소수성 표면의 표면에너지는 매우 낮기 때문에 마찰로 인한 에너지 소산(energy dissipation)은 고려하지 않아도 될 만큼 작다. 그러나 액적이 spread했다가 recoil할 때의 점성 에너지 소산(*E*<sub>diss</sub>)은 액적의 에너지 변환 과정에서 충분히 고려되어야 한다. 충격 액적은 점도와 표면 장력이 관성력을 극복할 때까지 고체 표면에서 spread되며 점성 에너지 소산은 액체 내부의 점성 마찰을 통해 도출 가능한데 Chandra와 Avedisian[60]는 소산 함수(*Φ*)와 소산 에너지(*E*<sub>diss</sub>)를 다음과 같은 관계식으로 나타냈다.

$$\Phi \approx \mu \left(\frac{v}{h}\right)^2 \tag{11}$$

$$E_{diss} = \int_0^{t_s} \int_0 \Phi \, d\Omega dt_s = \Phi \Omega t_s \approx \mu \left(\frac{\nu}{h}\right)^2 \Omega t_s \tag{12}$$

식에서  $\Omega$ 는 액적의 부피,  $\mu$ 는 점도,  $t_s$ 는 액적이 spread 되는 시간, h는 spread 되어있는 액적의 두께, v는 충격 속도를 의미하며, 가장 많이 spread 되었을 때의 액적을 원기둥 모양(i.e.  $\Omega \approx \pi R_{max}^2 h$ ,  $R_{max} =$  maximum spreading radius)으로 가정하면 아래와 같이 변환된 식이 도출된다.

$$E_{diss} = \frac{\pi \mu v^2 R_{max}^2 t_s}{h} \tag{13}$$

이 식의 에너지 소산 관계는 rebound하는 액적에서 점도와 속도에 대한 효과를 설명한다. 액적이 spread 및 recoil 중에 에너지 손실 후 표면에서 떨어질 만큼의 충분한 에너지가 남아있으면 rebound되어 표면을 떠나게 되는데, 액적의 점도가 증가함에 따라 소산 에너지가 증가함으로 액적의 점도가 클수록 rebound가 어려워지는 것이다.



Figure 38. Droplet impact behavior on specimens for 100% water.



Figure 39. Droplet impact behavior on specimens for glycerol aqueous solution of 60%.

### 2.2 접촉 시간

액적 낙하 시의 접촉 시간 차이를 액적의 점도에 따라 알아보기 위하여 동일한 낙하 높이(1cm)에서 점도를 달리하여 접촉 시간을 측정한 결과값은 Figure 40과 같으며, 점도가 높을수록 접촉 시간이 길어진다는 것을 확인할 수 있었다.

액적이 수평면의 고체와 충돌한 후 최대로 spread했을 때 운동에너지는 0이 되고 그 후 계면에너지로 인해 recoil하기 시작하는데, 앞서 설명했던 식 (13)을 통해 액적의 점도가 높을 수록 액적의 점성 소산이 증가하여 남은 에너지가 감소하고, recoil하는 단계에서 반동 속도는 낮아지고 반동 시간이 증가하여 접촉 시간이 늘어남을 설명할 수 있다[60].



Figure 40. Droplet contact time of 1cm height for 100% water and glycerol aqueous solution of 60%.

## 제 4 장 요약 및 결론

본 연구에서는 초소수성 직물의 기하학적 이방성이 점도가 다른 액체에 대한 젖음성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 이를 위해 폴리에스터 두둑직에 초소수성을 구현하고 액적의 낙하 방향과 점도에 따른 정적 접촉각과 동적 접촉각을 측정하여 방향에 따른 차이를 분석하였다. 또한 시료에 낙하하는 액적의 동적 거동과 접촉 시간을 점도와 낙하 높이를 달리하여 측정하였다.

- 정적 접촉각의 경우, 모든 시료에서 표면 구조의 방향과 관계없이 180°에 가까운 값을 보였다.
- 2. Shedding angle은 그 값이 0인 R-R 750 시료를 제외한 모든 시료에서 두둑과 수직인 방향이 평행한 방향보다 작게 나타났다. 이는 액적이 두둑과 수직한 방향에서 구를 때에 평행한 방향에서 구를 때보다 고체-액적-공기 3 상의 계면이 불연속적으로 형성되어 표면과 액적 사이의 접촉 면적이 작아졌기 때문으로 사료된다.
- 3. Sliding angle은 두둑 간격이 액적과 시료의 접촉 면적 지름보다 작을 때는 수직 방향에서 작게, 접촉 면적 지름보다 클 때는 평행 방향에서 작게 나타났다. 액적이 두둑 위에 올려져 있는 경우, 계면이 불연속적인 수직 방향에서 구르기에 더 유리하지만, 액적이 두둑 사이에 갇혀 있는 경우, 두둑이 액적이 구르는 데

극복해야 할 장애물로 작용했기 때문으로 판단된다.

- 4. 동적 거동의 경우, R-R 750 시료를 제외한 두둑이 있는 모든 시료에서 두둑 간격이 넓을수록 rebound에 유리했다. 낙하 높이 1cm에서는 두둑의 유무 혹은 두둑의 간격과 상관없이 모든 시료에서 물방울이 traditional rebound의 거동을 보인 반면, 낙하 높이 6cm 에서는 두둑의 간격에 따라 다른 거동의 양상을 보여 간격이 넓은 시료에서 rebound가 더 잘 되었다.
- 5. 접촉 시간은 R-R 750 시료를 제외한 모든 시료에서 두둑 간격이 넓을수록 접촉 시간이 짧아지는 경향을 보였다. 두둑이 있는 표면에 액적이 충돌하여 spread할 때, 두둑 간의 간격이 넓을수록 하나의 골 안에 갇히게 되는 액적의 부피가 많아져 확산 액적을 비대칭적으로 분배하는 경향이 더 커지기 때문에 접촉 시간이 더욱 줄어드는 것으로 사료된다.
- 6. 두둑 간격이 가장 작았던 R-R 750 시료가 shedding angle, sliding angle이 작고 rebound가 잘 일어나고 접촉 시간이 가장 짧은 것으로 나타났다. 이는 두둑이 기존의 마이크로-나노 구조에 더해져 삼차원적 다층 구조를 형성하여 액적과의 접촉 면적을 최대한 줄여 anti-wetting에 유리한 조건을 형성했기 때문으로 사료된다.
- 7. 액적의 점도가 높을수록 shedding angle과 sliding angle이 증가하였다. 이는 액적의 점도가 증가하면, 기울어진 표면에서

액적이 구르는 것을 방해하는 전단력이 함께 커지기 때문이다.

8. 액적의 점도가 높을수록 수평면으로 낙하할 때 rebound하기가 어려워지고 접촉 시간이 늘어났다. 이는 점도가 높아지면 충돌하는 액적의 점성 에너지 소실이 커지고 액적에 남은 에너지가 감소하여, recoil하는 단계에서 반동 속도가 낮아져 반동 시간이 증가하기 때문이다.

이와 같이 본 연구는 기하학적 이방성을 가진 초소수성 직물에서의 액적 거동 양상에 대해 밝혀냈다. 이는 그동안 직물에서는 거의 이루어 지지 않았던 이방성의 초소수성 표면에 대한 논의를 진행했다는 점에서 의의를 가진다.

본 연구에서는 이방성 구조를 가진 두둑직은 anti-wetting에 유리하고 두둑 간격이 넓어지면 방향에 따른 젖음성 차이가 커짐을 확인하였다. 이러한 이방성 구조의 도입과 고찰은 보다 효과적인 초소수성 직물을 개발할 때 새로운 통찰력을 제공하고, 사용 환경과 적용 용도에 맞는 최적의 초소수성 직물의 제직 방안을 고안할 때 유용한 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

# 참고 문헌

[1] Minglin Ma, Randal M.Hill., Superhydrophobic surface, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2006, 11(4), 193-202.

[2] Xuefeng Gao, Lei Jiang., Water-repellent legs of water striders, *Nature*, 2004, 432, 36.

[3] T.L. Sun, L. Feng, X.F. Gao and L. Jiang., Bioinspired surfaces with special wettability, *Acc. Chem. Res.*, 2005, 38, 644–652.

[4] Z.G. Guo and W.M. Liu, Progress in biomimicing of superhydrophobic surface, *Prog. Chem.*, 2006, 18, 721–726.

[5] Z.G. Guo, F. Zhou, J.C. Hao, Y.M. Liang, W.M. Liu and W.T.S. Huck, Stick and slide ferrofluidic droplets on superhydrophobic surfaces, *Applied. Phys. Lett.*, 2006, 89, 081911–81913.

[6] Zhiguang Guo and Weimin Liu, Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: Binary structure and unitary structure., *Plant Science*, 2007, 172, 1103–11121104.

[7] Gregory D. Bixler & Bharat Bhushan, Rice and Butterfly Wing

Effect Inspired Low Drag and Antifouling Surfaces: A Review, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2015, 40, 1–37.

[8] Meirong Song., et al., Enhancing Droplet Deposition on Wired and
Curved Superhydrophobic Leaves, ACS Nano, 2019, 13 (7), 7966–
7974

[9] Bharat Bhushan and Yong Chae Jung, Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction, *Progress in Materials Science*, 2011, 56(1), 1-108.

[10] Chonglei Hao, Yahua Liu, Xuemei Chen, Jing Li, Mei Zhang, Yanhua Zhao, and Zuankai Wang, Bioinspired Interfacial Materials with Enhanced Drop Mobility: From Fundamentals to Multifunctional Applications, *small*, 2016, 12(14), 1825–1839.

[11] Longquan Chen., et al., A comparative study of droplet impact dynamics on a dual-scaled superhydrophobic surface and lotus leaf, *Applied Surface Science*, 2011, 257(21), 8857–8863.

[12] Hyungmo Kim and Seol Ha Kim, Nonwettable Hierarchical Structure Effect on Droplet Impact and Spreading Dynamics, *Langmuir*, 2018, 34, 5480-5486.

[13] Gregory D. Bixler and Bharat Bhushan, Rice- and butterflywing effect inspired self-cleaning and low drag micro/nanopatterned surfaces in water, oil, and air flow, *Nanoscale*, 2014, 6, 76–96.

[14] Yang Lu, C., et al., Biomimetic surfaces with anisotropic sliding wetting by energy-modulation femtosecond laser irradiation for enhanced water collection, *RSC Adv.*, 2017, 7, 11170–11179.

[15] L. Yang., et al., Fabrication of biomimetic anisotropic superhydrophobic surface with rice leaf-like structures by femtosecond laser, *Optical Materials*, 2021, 112, 110740.

[16] Denis Richard, Christophe Clanet & David Quéré, Contact time of a bouncing drop, *Nature*, 2002, 417, 811.

[17] Yahua Liu, Matthew Andrew, Jing Li, Julia M. Yeomans & Zuankai Wang, Symmetry breaking in drop bouncing on curved Surfaces, *NATURE COMMUNICATIONS*, 2015, 6, 10034.

[18] Asif Raiyan, Tabor Scott Mclaughlin, Rama Kishore Annavarapu & Hossein Sojoudi, Effect of superamphiphobic macrotextures on dynamics of viscous liquid droplets, *Scientific reports*, 2018, 8, 15344. [19] Rui Pan, Mingyong Cai, Weijian Liu, Xiao Luo, Changhao Chen, Hongjun Zhanga and Minlin Zhong, Extremely high Cassie-Baxter state stability of superhydrophobic surfaces via precisely tunable dual-scale and triple-scale micro-nano structures, *J. Mater. Chem. A*, 2019, 7, 18050–18062.

[20] Young, T., III. An essay on the cohesion of fluids, *Philosophical transactions of the royal society of London*, 1805(95), 65–87.

[21] Ran, M., W. Zheng, and H. Wang, Fabrication of superhydrophobic surfaces for corro sion protection: a review, *Materials Science and Technology*, 2019. 35(3), 313-326.

[22] Nishino, T., M. Meguro, K. Na kamae, M. Matsushita, and Y. Ueda, The lowest surface free energy based on CF3 alignment, *Langmuir*, 1999, 15(13), 4321-4323.

[23] Zisman, W.A., Influence of constitution on adhesion, *Industrial & Engineering Chemistry*, 1963, 55(10), 18–38.

[24] Wenzel, R.N., Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, 28(8), 988–994.

[25] Cassie, A. and S. Baxter, Wettability of porous surfaces,

Transactions of the Faraday society, 1944, 40, 546-551.

[26] Xue-Mei Li, David Reinhoudt, Mercedes Crego-Calama, What do we need for a superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces, *The Royal Society of Chemistry*, 2007, 36, 1350–1368.

[27] Tai-min Cai, Zhi-hai Jial, Hui-nan Yang, Gang Wang, Investigation of Cassie-Wenzel Wetting transitions on microstructured surfaces, *Colloid and Polymer Science*, 2016, 294, 833-840.

[28] Edward Bormashenko, Wetting transitions on biomimetic surfaces, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2010, 368(1929), 4695–4711.

[29] BHARAT BHUSHAN, and MICHAEL NOSONOVSKY, The rose petal effect and the modes of superhydrophobicity, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2010, 368, 4713–4728.

[30] Daniel Ebert, and Bharat Bhushan, Wear-resistant rose petaleffect surfaces with superhydrophobicity and high droplet adhesion using hydrophobic and hydrophilic nanoparticles, *Colloid and Interface Science*, 2012. 384(1), 182–188.

[31] Yong, J., Chen, F., Yang, Q., Huo, J., & Hou, X., Superoleophobic surfaces, *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(14), 4168-4217.

[32] Bhushan, B. and Y.C. Jung, Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction, *Progress in Materials Science*, 2011, 56(1), 1–108.

[33] Koch, K., B. Bhushan, and W. Barthlott, Multifunctional surface structures of plants: an inspiration for biomimetics, *Progress in Materials science*, 2009, 54(2),137–178.

[34] Khojasteh, D., M. Kazerooni, S. Salarian, and R. Kamali, Droplet impact on superhydrophobic surfaces: A review of recent developments, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 42, 1–14.

[35] Gregory D. Bixler and Bharat Bhushan, Fluid drag reduction and efficient self-cleaning with rice leaf and butterfly wing bioinspired surfaces, *Nanoscale*, 2013, 5, 7685-7710.

[36] Damon G. K. Aboud and Anne-Marie Kietzig, On the Oblique Impact Dynamics of Drops on Superhydrophobic Surfaces. Part I: Sliding Length and Maximum Spreading Diameter, *Langmuir*, 2018, 34(34), 9879-9888. [37] Zhiguang Li, Que Kong, Xiaoyan Ma, Duyang Zang, Xinghua Guanb and Xuehong Rena, Dynamic effects and adhesion of water droplet impact on hydrophobic surfaces: bouncing or sticking, *Nanoscale*, 2017, 9(24), 8249-8255.

[38] Long-Zan Wang, An Zhou, Jin-Zhi Zhou, Longquan Chen, and Ying-Song Yu, Droplet impact on pillar-arrayed non-wetting surfaces, *Soft Matter*, 2021, 17, 5932-5940.

[39] Karthik Murugadoss, Purbarun Dhar, Sarit K. Das, Role and significance of wetting pressures during droplet impact on structured superhydrophobic surfaces, *THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL E*, 2017, 40(1), 1–10.

[40] Patil, Nagesh D, Bhardwaj, Rajneesh, Sharma, Atul, Droplet impact dynamics on micropillared hydrophobic surfaces, *Experimental thermal and fluid science*, 2016, 74, 195–206.

[41] Anai's Gauthier, Sean Symon, Christophe Clanet & David Que're', Water impacting on superhydrophobic macrotextures, *Nature Communications*, 2015, 6, 8001.

[42] Yahua Liu, Matthew Andrew, Jing Li, Julia M. Yeomans & Zuankai Wang, Symmetry breaking in drop bouncing on curved

surfaces, Nature Communications, 2015, 6, 10034.

[43] Yahua Liu, Lisa Moevius, Xinpeng Xu, Tiezheng Qian, Julia M. Yeomans & Zuankai Wang, Pancake bouncing on superhydrophobic surfaces, *Nature Physics*, 2014, 10, 515–519.

[44] J. B. Segur and Helen E. Oberstar, Viscosity of Glycerol and Its
Aqueous Solutions, *Industrial & Engineering Chemistry*, 1951, 43 (9),
2117-2120.

[45] Koichiro. Nakanishi, Tadao. Matsumoto, and Mitsuyoshi.
Hayatsu, Surface tension of aqueous solutions of some glycols, *J. Chem. Eng. Data*, 1971, 16, 1, 44–45.

[46] J Kim, H Kim and CH Park, Contribution of surface energy and roughness to the wettability of polyamide 6 and polypropylene film in the plasma-induced process, *Textile Research Journal*, 2016, 86(5), 461-471.

[47] Jan Zimmermann, Stefan Seeger, Felix A. Reifler, Water Shedding Angle: A New Technique to Evaluate the Water-Repellent Properties of Superhydrophobic Surfaces, *Textile Research Journal*, 2009, 79(17), 1565-1570. [48] Zonglin Chu and Stefan Seeger, Superamphiphobic surfaces, *Royal Society of Chemistry*, 2014, 43(8), 2784–2798.

[49] M. Yunusa, F. E. Ozturk, A. Yildirim, U. Tuvshindorj, M. Kanik and M. Bayindir, Bio-inspired hierarchically structured polymer fibers for anisotropic non-wetting surfaces, *RSC Adv.*, 2017, 7, 15553.

[50] Danial Khojasteh, Moradi Kazerooni, Sahba Salarian, and Reza Kamali, Droplet impact on superhydrophobic surfaces: A review of recent developments, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 42, 1–14.

[51] Munetoshi Sakai., et al., Sliding of Water Droplets on the Superhydrophobic Surface with ZnO Nanorods, *Langmuir*, 2009, 25(24), 14182–14186.

[52] Bekir Sami Yilbas, Abudllah Al-Sharafi, Haider Ali and Nasser Al-Aqeeli, Dynamics of a water droplet on a hydrophobic inclined surface: influence of droplet size and surface inclination angle on droplet rolling, *RSC Advances*, 2017, 7, 48806-48818.

[53] Hyae Rim Hong and Chung Hee Park, The influence of nanostructure on the wetting transition of polyvinylidene fluoride

nanoweb: from the petal effect to the lotus effect, *Textile Research Journal*, 2021, 91(7–8), 752–765.

[54] M. Yunusa., et al., Bio-inspired hierarchically structured polymer fibers for anisotropic non-wetting surfaces, *RSC Adv.*, 2017, 7, 15553.

[55] Songlin Shi, Cunjing Lv, and Quanshui Zheng, Drop Impact on Two-Tier Monostable Superrepellent Surfaces, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11, 43698-43707.

[56] Yahua Liu, Xiantong Yan, and Zuankai Wang, Droplet dynamics
on slippery surfaces: small droplet, big impact, *Biosurf. Biotribol.*,
2019, 5(2), 35-45.

[57] Longquan Chen., et al., A comparative study of droplet impact dynamics on a dual-scaled superhydrophobic surface and lotus leaf. *Applied Surface Science*, 2011, 257(21), 8857–8863.

[58] Meirong Song., et al., Reducing the contact time using macro anisotropic superhydrophobic surfaces — effect of parallel wire spacing on the drop impact, *NPG Asia Materials*, 2017, 9, e415.

[59] James C. Bird, Rajeev Dhiman, Hyuk-Min Kwon & Kripa K.

Varanasi, Reducing the contact time of a bouncing drop, *Nature*, 2013, 503, 385–388.

[60] S. Chandra and C. T. Avedisian, On the collision of a droplet with a solid surface, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1991, 432, 13–41.

[61] Yoonkyung Cho, Sungmin Kim, and Chung Hee Park, Surface Wettability Prediction Using Image Analysis and an Artificial, *Langmuir*, 2022, 38(23),7208-7217 Abstract

# Wettability of superhydrophobic fabric with anisotropic surface structure

Sun Young Han Department of Textiles, Merchandising and Fashion Design The Graduate School Seoul National University

In this paper, the effect of the anisotropic surface structure of superhydrophobic textiles on the wettability and dynamic behavior of droplets was investigated. To this end, superhydrophobicity was implemented in polyester fabric with anisotropic surface structures, and the anisotropies of the contact angles were derived from measuring the static and dynamic contact angles according to the viscosity and falling direction of the droplets. Droplet dynamic behavior and contact time were measured by varying the viscosity and drop height, and comparative analysis was performed.

The static contact angle showed a value close to 180° in all

samples regardless of the direction of the surface structure. The shedding angle was found to be smaller in the direction perpendicular to the groove than in the parallel direction, and the sliding angle was smaller in the perpendicular direction when the groove (rib) spacing was smaller than the diameter of the base area of the droplet, and also smaller in the parallel direction when the groove spacing was larger than the diameter of the base area.

In the case of dynamic behavior, in all samples except for the groove spacing of  $750\mu$ m, it demonstrated that the larger the spacing, the more favorable the rebound. As for the contact time, in all samples except for the sample having the groove spacing of  $750\mu$ m, it tended to be shorter as the spacing between the grooves increased.

Static contact angle was close to 180° regardless of the viscosity of the droplet, and dynamic contact angle, both shedding and sliding angle, increased as the viscosity increased. In the case of dynamic behavior on the horizontal plane, the higher the viscosity of the droplet, the more difficult it is to rebound and the longer the contact time.

The R-R 750 sample, which had the smallest spacing between the grooves, showed the best results in shedding angle, sliding angle, dynamic behavior and contact time. This is understood because the three-dimensional multi-layer structure made by grooves minimized the contact area with the droplet to form a structure advantageous for anti-wetting.

In this study, it was confirmed that rice-leaf like rib weave textiles with anisotropic structures are advantageous for antiwetting, and the difference in wetting properties increases depending on the direction when the groove spacing is widened.

Keywords : superhydrophobic fabric, surface structure, anisotropy, dynamic contact angle, dynamic behavior, contact time

Student Number : 2020-25473