

레이저 선택적 증착을 통한 이방특성의 소수성 표면처리

김지훈*, 권예지*, 양훈석*, 김주한*,#

*서울과학기술대학교 기계공학과

Hydrophobic Surface Treatment with Anisotropic Characteristics Using Laser Selective Deposition

Ji-Hun Kim*, Ye-Ji Kwon*, Hoon-Seok Yang*, Joohan Kim*,#

*Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received 3 August 2020; received in revised form 25 August 2020; accepted 29 August 2020)

ABSTRACT

Surfaces with various roughnesses were produced through laser processing, and the anisotropy and hydrophobicity of the surfaces were examined in the context of the microstructures. The fine particles transferred to the glass surface exhibited different sizes, and the roughness increased. Due to the change in the roughness, the liquid could not penetrate the space between the fine particles, and it was thus exposed to the air. We analyzed this phenomenon using the combined Wenzel and Cassie–Baxter models. Excessive fine particle formation on the substrate tended to increase the roughness and surface energy. The silver–glass–air contact analysis could clarify the mechanism of the reduction of the contact angle and differences in the metastable and stable states when the particles did not completely cover the glass substrate. The formation of microstructures with fine particles through the laser selective deposition led to the generation of an anisotropic surface as the water droplets diffused toward the glass substrate with a relatively high surface energy level.

Key Words : Laser Induced Backward Transfer(레이저 유도 후전달), Fine Particles(미세 입자), Anisotropic Wettability(이방 젖음성), Hydrophobic/Hydrophilic(소수성/친수성)

1. 서 론

물질의 특성을 향상시키기 위해 표면처리 연구가 활발히 이루어지고 있다. 표면처리 방법 중 미세 구조를 형성하는 기술은 표면특성을 비약적으로 상승시킬 수 있어 목적에 따라 다양한 분야에

서 사용되고 있다^[1-3]. 이러한 경우, 미세 구조물은 표면적 증가와 함께 표면 에너지의 변화가 크게 나타나는 특징이 있다. 이러한 표면 에너지는 젖음성 시험을 통해 확인될 수 있다. 또한, 표면처리 공정의 신뢰성은 표면에너지를 포함하며, 접촉각 변화를 통해 평가 할 수 있다^[4].

미세 구조물을 형성방법으로 Laser Induced Forward/Backward Transfer(LIFT/LIBT) 물질전달 방법이 적용될 수 있다. LIFT/LIBT 방법은 가산적인

Corresponding Author : joohankim@seoultech.ac.kr

Tel: +82-2-970-6314, Fax: +82-2-970-6305

적층 공정으로 대기압 상태에서도 공여체에서 수용체로 물질을 전달한다^[5]. 공여체에 레이저 빔을 조사하면 공여체의 표면온도가 급격하게 상승하고 반발력에 의해 물질은 수용체에 전달된다. 레이저 빔의 집속크기와 에너지 밀도에 따라 액체 또는 고체 상태로 전달되며 물질의 입자 크기가 결정된다^[6]. 이 방법은 선택적인 물질전달을 할 수 있는 장점이 있으며 연속적인 공정을 통해 패턴을 형성할 수 있다. 또한, 재료에 상관없이 금속, 폴리머, 세라믹 등에도 적용할 수 있는 장점이 있다^[7]. LIFT는 투명한 모재 위의 공여체에 레이저 빔을 조사하여 조사 방향으로 물질을 전달하는 공정으로 공여체가 가지고 있던 구조를 그대로 전달할 수 있다^[8]. LIBT는 공여체에 레이저 빔을 조사하여 조사 반대방향으로 물질을 전달하는 방식이다^[9]. 두 공정의 모식도를 Fig.1에 나타냈다. 이 두 가지 방식은 수용체 위에 공여체 물질로 미세 구조물을 형성시켜 표면적이 크게 상승한다. 공여체 물질의 물성과 표면 구조의 형성으로 인해 수용체가 가지고 있던 표면 특성이 변하게 된다.

LIFT 공정은 투명한 모재에 공여체를 올리는 선행단계가 필요하다^[10]. 물질전달은 올려진 공여체의 두께 및 형상에 따라 양상이 크게 바뀐다^[11]. 반면에 LIBT 공정은 선행단계가 필요하지 않고 공여체의 두께가 충분히 크면 크기효과가 적어지기 때문에 레이저 변수만을 고려해 공정을 해석할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 LIBT 공정을 이용해 친수성 재료인 은을 미세입자 형태로 유리

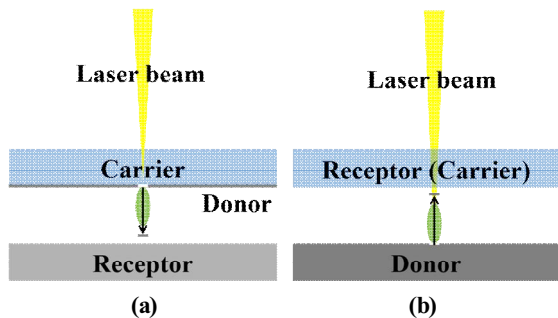


Fig. 1 Schematics of laser mass transfer process
(a) Laser Induced Forward Transfer (LIFT),
(b) Laser Induced Backward Transfer (LIBT)

표면에 전달시키고 유리표면 위에 물방울의 접촉각을 측정했다.

또한, LIBT 공정변수가 실제 유리 표면 구조에 어떤 변화를 일으켜 접촉각의 변화를 일으키는지 확인하기 위해 관련 이론을 통해 해석했으며 이를 위해 우선 각 재료의 기본 물성을 측정하고 공정 변수 중 주요 요인을 선정해 실험을 진행했다.

2. 배경 이론

접촉각은 크게 두 가지 이론에 의해 정의될 수 있다. Fig. 2(a)와 같이 액체가 표면을 완전히 적시는 경우 젖는 표면의 면적변화에 의한 접촉각의 변화를 설명하는 Wenzel model이 있으며, Fig. 2(b)와 같이 액체가 표면을 완전히 적시지 못하는 경우 접촉하는 면적의 비율로 접촉각의 변화를 설명하는 Cassie-Baxter model이 있다^[12-13]. 각 model에서 설명하는 접촉각은 아래 식(1)과 식(2)에 나타나 있다.

$$\cos\theta_W = r\cos\theta_s \quad (1)$$

$$\cos\theta_{CB} = f\cos\theta_s + (1-f)\cos\theta_{air} \quad (2)$$

식(1) Wenzel model에서 r 은 Roughness factor로 고체-액체 접촉면적을 투영면적으로 나눈 값이며 θ_s 는 평평하고 매끄러운 고체표면에서의 접촉각을 뜻한다. θ_s 의 값이 90° 이하인 친수성 물질인 경우 r 값이 증가하면 접촉각이 감소하게 되며, θ_s 의 값이 90° 이상인 소수성 물질인 경우 r 값이 증가하면 접촉각이 증가하게 된다. 식(2) Cassie-Baxter

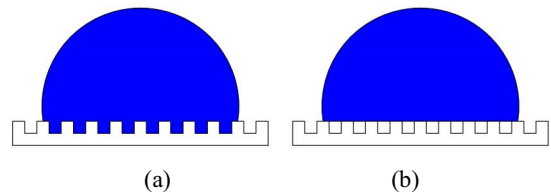


Fig. 2 Wettability model (a) Wenzel model and (b) Cassie-Baxter model

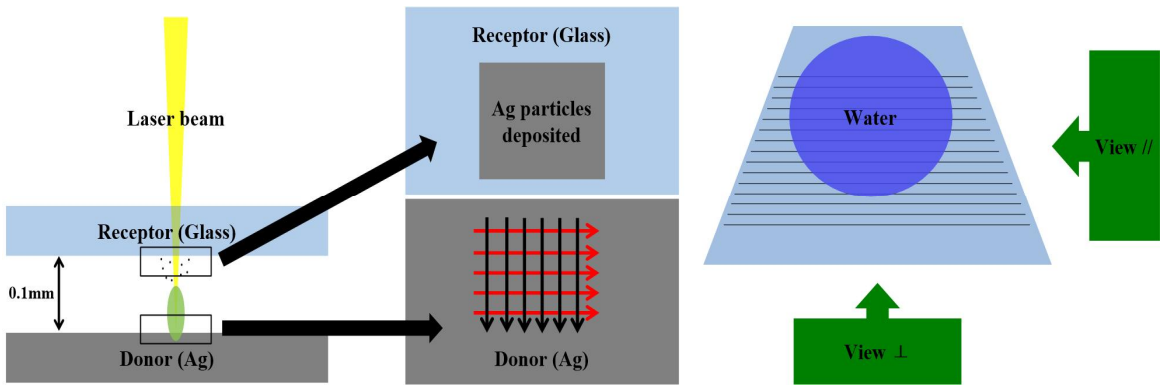


Fig. 3 Schematics of the LIBT process

model에서 f 는 전체면적 중에 접촉하는 면적의 비이다. 접촉면적비가 f 인 표면에 공기접촉이 일어나면 공기의 접촉면적비는 $1-f$ 로 정의된다. θ_{air} 는 공기 접촉각을 뜻하여 180° 의 값을 갖는다. 표면의 구조 및 접촉면적 변화와 더불어 액체가 표면을 완전히 적시지 못하는 경우 위 두 식을 결합한 형태로 아래 식(3)으로 해석할 수 있다^[14]. 공기접촉의 경우 Roughness factor를 1로 가정할 수 있다. 이 식을 따르면 친수성 재료 또한 90° 이상의 소수성 표면이 형성될 수 있다.

$$\cos\theta = r_s f_s \cos\theta_s - (1-f_s) \quad (3)$$

표면이 단일성분으로 이루어진 것이 아닌 경우 각 성분이 차지하는 면적비와 Roughness factor 그리고 공기접촉을 포함하여 계산할 수 있다. 면적비의 합은 1이므로 최종적으로 아래 식(4)와 같이 정리된다^[15,16].

$$\cos\theta = \sum_{k=1}^n r_k f_k \cos\theta_k \quad (4)$$

$$\left(\sum_{k=1}^n f_k = 1, r_{air} \approx 1, \theta_{air} = 180^\circ \right)$$

젖음성은 표면장력에 의해 정의된다. 이상적인 등방성 고체표면에서의 물방울의 단면은 원모양이나, 구조적으로나 화학적으로 이방성을 띠게 될 경우 물방울의 모양이 변한다. 단일방향의 구조를

가질 경우 액체가 구조를 따라 침투하는 모세관현상에 의해 직교이방성의 접촉각이 형성된다^[17].

3. 실험방법

LIBT 공정을 이용한 나노 입자 증착실험에서 사용된 공여체는 $\text{O}50 \times 5 \text{ mm}$ 크기의 은 99.99% 함유율의 스퍼터링 타겟이며 수용체는 $26 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ 크기의 슬라이드 글라스이다. 공여체와 수용체의 거리는 0.1 mm로 선정하여 에너지 중첩에 의한 수용체의 파손을 방지했다. 사용한 레이저는 1070 nm 파장의 네오디뮴이 도핑된 이트륨 가넷(Nd:YAG) 펄스 레이저이다. LIBT 공정은 Fig. 3과 같이 공여체 위에 수용체를 올려놓고 공여체에 초점을 맞춰 레이저 쏘아 시 발생하는 나노 입자가 글라스에 부착 되도록 했다. LIBT 패턴형태는 단일패턴과 직교패턴 두 가지를 이용했고 패턴의 면적은 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 이다. 레이저 변수는 출력, 펄스폭, 가공속도, 패턴간격으로 각 값을 Table 1에 정리했다.

은 미세 입자가 부착된 유리표면의 젖음성을 평가하는 방법으로 패턴방향과 패턴의 직각방향의 정적 접촉각을 측정했다. 사용한 장비는 Contact Anglemeter (CAM-200)이며 적용된 액체는 4 μL 량의 DI Water이다. 측정각도에 따른 물방울의 접촉각을 측정하기 위해 레이저 공정패턴에 수직인 $90^\circ (\perp)$ 방향과 평행인 $0^\circ (//)$ 방향에서 각각 측정했다. 글라스 위에 올라간 물방울의 이미지를

Table 1 Parameters of LIBT process

Laser power[W]	Pulse duration[ns]	Scanning speed [mm/s]	Pattern distance [mm]
			10
	4		20
8	8		...
	14		90
10	20	500	100
12	30	750	150
16	...	1000	200
20	90		300
	100		...
			2400
Repetition [Hz]	500		
Scanning Path	Unidirectional morphology	Orthogonal morphology	

저장하고 소프트웨어를 이용해 접촉각을 측정했다.

4. 결과 및 고찰

본 실험에 사용된 표면의 상태는 은, 유리, 공기 3가지 접촉을 하고 있으므로 식(4)에 각 재료별 물성값을 대입하여 정리 할 수 있다. 여기서 θ_s 는 평평한 은 표면의 접촉각이며 r_s 는 레이저 공정에 의해 형성되는 은 표면의 roughness factor이다. θ_g 는 평평한 유리 표면의 접촉각이며 사용된 유리는 매끈하고 평평한 상태로 유리 표면의 roughness factor $r_g \approx 1$ 로 가정할 수 있다. 공기의 경우 접촉각 $\theta_{air} = 180^\circ$ 이며 roughness factor $r_{air} = 1$ 이다. 매끄러운 상태의 은 표면과 유리 표면에서의 물방울 접촉각을 측정한 결과 $\theta_s = 79^\circ$, $\theta_g = 5^\circ$ 이다. 이를 식(4)에 대입하여 식(5)로 정리했다. 물방울의 접촉각은 은의 Roughness factor r_s , 각 재료의 접촉 표면 면적의비 f_s, f_g, f_{air} 로 정리되며 이는 모두 LIBT 공정 변수에 따라 정의되는 값으로 LIBT 공정 특성으로 확인했으며 밑의 식으로 전개될 수 있다.

$$\begin{aligned} \cos\theta &= r_s f_s \cos\theta_s + r_g f_g \cos\theta_g + r_{air} f_{air} \cos\theta_{air} \\ &= 0.19 r_s f_s + 0.99 f_g - f_{air} \end{aligned} \quad (5)$$

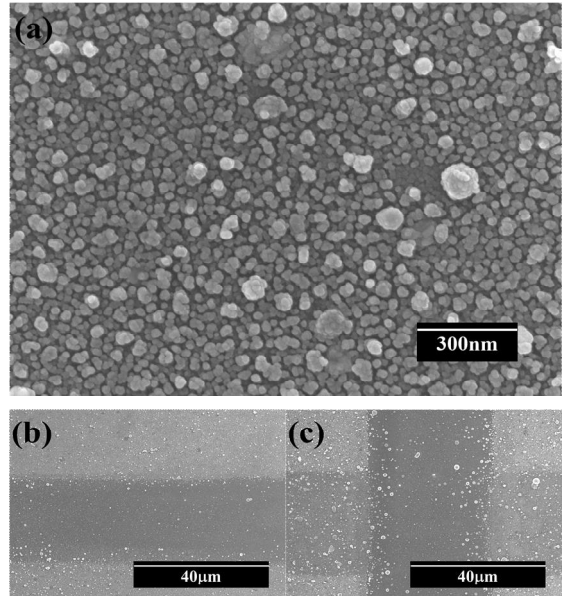


Fig. 4 SEM images of silver fine particles transferred onto the glass (b) linear and (c) cross scanning

실험을 통해 LIBT 공정 변수 중 레이저 펄스폭과 레이저 출력이 접촉각에 미치는 영향을 확인했다. 펄스폭과 레이저 출력 별 접촉각을 측정한 결과 대부분의 경우 4 ns의 펄스폭과 10 W의 레이저 출력의 경우에 가장 높은 접촉각이 형성되었다. 레이저 횡단속도에 의한 접촉각의 차이는 크게 발생하지 않아 패턴간격에 의한 접촉각의 변화는 횡단속도 750 mm/s의 조건에서 실험을 진행했다. LIBT 공정으로 형성된 은 미세입자는 Fig. 4(a)와 같이 수 nm에서 수 um크기로 유리 표면에 존재한다. 레이저가 투과한 부위에서는 Fig. 4(b), (c)같이 미세입자들이 관찰되지 않았다. 레이저가 수용체를 투과하면서 수용체로의 물질전달과 동시에 탈락이 일어나 스캔자국이 남는 것으로 판단된다. 직교패턴의 간격에 따른 접촉각은 Fig. 5에 나타났다. 그림의 일부 영역에서 79° 이상의 접촉이 확인되었다. 이는 공기접촉에 의해 발생되었다고 해석할 수 있다. 패턴의 간격에 따라 접촉각의 상승과 감소가 일어났다. 이를 접촉각 모델을 이용하여 상승구간과 감소구간의 영역을 해석했다.

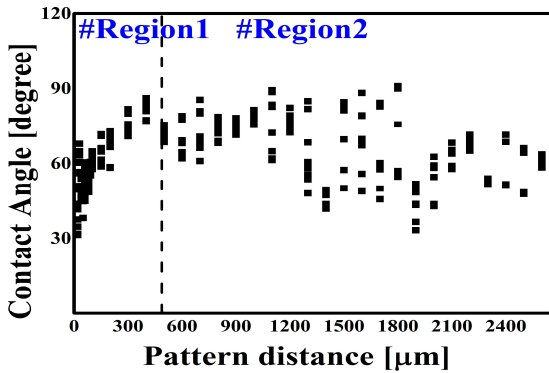


Fig. 5 Contact angles according to pattern distance of LIBT orthogonal pattern process

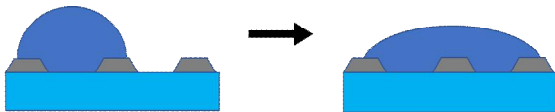


Fig. 6 Transition from metastable state to stable state

#Region1의 경우 패턴간격이 좁아질수록 접촉각이 감소했다. 패턴의 간격이 좁을 경우 은 공여체에서 더 많은 미세입자를 유리표면으로 전달하고 유리 표면을 모두 덮게 되어 Roughness factor r_s 가 접촉각에 지배적으로 작용한 것으로 해석할 수 있다. 이 구간은 r_s 상승에 의한 접촉각의 감소와 공기 접촉으로 인한 접촉각의 상승이 혼합되어 있어 #Region2와 구분될 수 있다. #Region1의 접촉각 방정식은 $\cos\theta = 0.19f_s r_s - (1 - f_s)$ 가 적용된다. #Region2는 패턴간격이 넓어질수록 접촉각이 감소했다. 이 구간은 은 미세입자가 유리 표면을 모두 덮지 못해 유리접촉이 발생하고 상대적으로 높은 표면에너지를 갖는 유리에 의해 접촉각이 감소하는 것으로 해석할 수 있다. 패턴간격이 넓어질수록 단위면적당 유리표면이 차지하는 면적이 증가하게 되어 접촉각은 감소한다. #Region2에서 90° 이상의 소수성 표면이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이 부분에서 접촉각의 편차가 매우 크게 나타났는데 이는 Fig. 6처럼 준안정상상태인 물방울의 접촉과 안정상태의 접촉의 차이를 보여준다.

이 차이는 물방울 확산에 의한 유리 면적비의

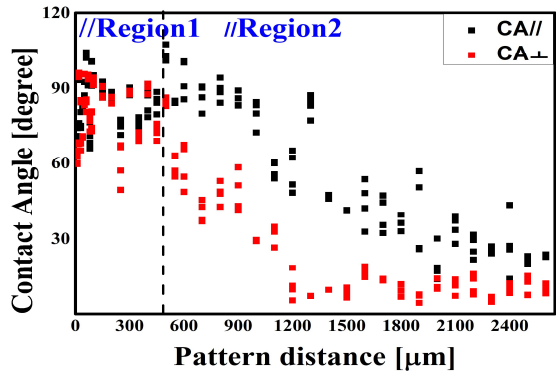


Fig. 7 Contact angles according to pattern distance and measuring angles of LIBT unidirectional pattern process

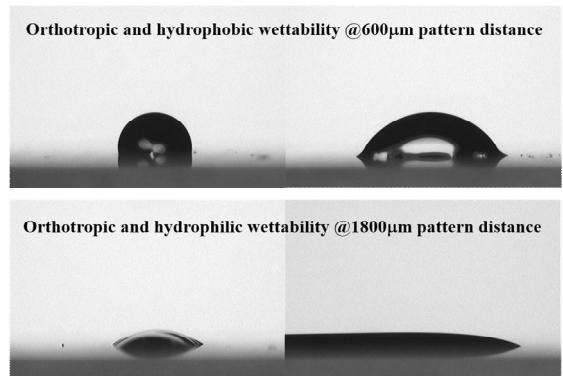


Fig. 8 Orthotropic hydrophobic and hydrophilic contact angle due to unidirectional pattern process and capillary effect

상승과 동시에 공기 접촉의 변화가 혼합되어 접촉각의 변화가 매우 크게 발생한다고 할 수 있다^[17].

#Region2의 접촉각 방정식은 식 (5)와 같이 $\cos\theta = 0.19r_s f_s + 0.99f_g - f_{air}$ 로 해석될 수 있다.

직교패턴의 경우 은 미세입자가 직교등방성의 구조를 가지고 있어 접촉각에서도 직교등방성을 갖는 것으로 보인다. 단일패턴 공정의 접촉각 측정 결과는 Fig. 7에 나타나 있다. //Region1에선 패턴간격이 좁아질수록 접촉각이 감소했다. 이 구간 또한 패턴 간격이 좁아질수록 은 공여체에서 더 많은 미세입자를 유리표면으로 전달하고 유리표면을 모두 덮게되어 Roughness factor r_s 가 증가한

까닭이다. 단일패턴의 경우 에너지 밀도가 직교패턴 대비 더 낮기 때문에 r_s 가 더 낮아 직교패턴 대비 더 높은 접촉각이 형성되었다고 이해할 수 있다. 또한 이 구간에서는 측정각도에 따른 접촉각의 차이가 크게 발생하지 않았다. 단일 패턴의 경우라도 유리 표면을 완전히 덮은 상태로 구조적으로 이방성을 띠지 않기 때문이다. 이 구간 또한 r_s 의 상승에 의한 접촉각의 감소와 공기접촉에 의한 접촉각의 상승이 혼합된 상태로 #Region1과 같이 //Region1의 접촉각은 $\cos\theta = 0.19f_s r_s - (1 - f_s)$ 의 방정식을 적용하여 해석할 수 있다. 단일패턴 공정의 특징은 //Region2에서 확인할 수 있었다. 패턴간격이 넓어질수록 은 미세입자가 유리표면을 모두 덮지 못해 접촉각이 감소하게 되고 이러한 접촉각의 감소는 유리의 접촉각 5° 수준까지 이어졌다. 이 구간에서는 은 미세입자와 유리표면에 의해 직교이방성의 구조를 가지게 된다. 표면 에너지가 높은 유리에 의해 모세관 현상이 일어나게 되어 접촉각에도 이방성이 크게 일어난다. 이 해석은 View \perp 에서 측정했을 경우가 View//에서 측정했을 경우보다 접촉각이 낮은 이유를 설명할 수 있다. 또한 이 구간에서 공기접촉에 의한 직교이방 소수성 표면과 모세관 현상에 의한 직교이방 친수성 표면이 형성되었다. 표면 물방울의 모습은 Fig. 8에 나타나 있다. //Region2의 View//에서의 접촉각은 유리, 은, 공기 접촉이 혼합된 형태로 해석할 수 있으나 //Region2의 View \perp 에서는 유리접촉 또는 은, 공기 접촉 등으로 이산적인 접촉형태로 이루어져 있어 그 값을 예상하기 어려움이 있다. 이 경우는 전산모사를 통한 해결방법이 적용될 수 있다¹⁹⁾.

결론적으로, 단일 패턴공정에서 패턴간격에 따라 접촉각에 이방 젖음성이 나타났다. 이러한 성질을 이용하면 특정한 방향으로의 접촉각을 조절할 수 있는 선택적 젖음성을 가진 임의의 표면에 얻을 수 있을 것으로 판단한다.

5. 결 론

LIBT 공정에 의한 물질전달 방식의 표면처리를 접촉각 측정을 통해 평가한 결과 물질전달에 의한

이종재료의 표면 구조 형성은 표면에너지를 비약적으로 변화시켰다. 유리표면으로 전달되는 미세입자는 다양한 크기로 형성되어 거칠기가 상승했다. 본 연구에서는 거칠기의 변화와 함께 액체가 미세입자 사이를 침투하지 못해 공기와 접촉하는 경우가 발생하여 Wenzel model과 Cassie-Baxter model을 혼합한 형태로 이를 해석했다. 과도한 입자형성은 거칠기를 증가시켜 표면 에너지를 더욱 높이는 요소로 작용했으나 일부 조건에서는 공기접촉이 이 효과보다 더 크게 작용하여 친수성 재료인 은과 유리 표면을 소수성 표면으로 개질시키는 것이 가능했다. 미세입자가 유리 표면을 완전히 덮지 못하는 경우 은/유리/공기 접촉을 모두 포함한 형태로 해석하여 급격한 접촉각의 감소와 준안정상태와 안정상태 접촉의 차이를 설명할 수 있었다. 본 연구에서는 물방울은 상대적으로 표면 에너지가 높은 유리쪽으로 확산되는 성질을 이용하여 미세입자에 의한 구조형성은 표면을 이방성을 갖게 만들 수 있었다. 이러한 선택적 이방성 소수성 표면 성질 컨트롤은 임의의 방향의 물방울 흐름 제어가 필요한 어플리케이션에서 적용될 수 있을 것으로 판단한다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Jang, M-Y., Young-Whan Park, Y-H., Kim, T-W., "Study on Wetting Characteristics of Laser Cladding Surfaces," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 11, pp.35-40, 2019.
2. Yin, H., Zhou, Z., Cheng, W., Jiang, D., Zhao, Z., & Zhan, Q., "Surface morphology and magnetic anisotropy of zigzag wrinkled NiFe films grown on polydimethylsiloxane," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 497, pp. 1-6, 2020.

3. Yan, M., Yang, C. C., Chen, Y. H., & Ding, S. J., "Oxygen Plasma Improved Shear Strength of Bonding between Zirconia and Composite Resin," *Coatings*, Vol. 10, No. 7, pp. 1-13, 2020.
4. Aksoy, G., Polat, H., Polat, M., & Coskun, G., "Effect of various treatment and glazing (coating) techniques on the roughness and wettability of ceramic dental restorative surfaces," *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, Vol. 53, No. 2, pp. 254-259, 2006.
5. Kuznetsov, A. I., Koch, J., & Chichkov, B. N., "Laser-induced backward transfer of gold nanodroplets," *Optics express*, Vol. 17, No. 21, pp. 18820-18825, 2009.
6. Sopenña, P., Fernández-Pradas, J. M., & Serra, P., "Laser-induced forward transfer of conductive screen-printing inks," *Applied Surface Science*, Vol. 507, pp. 1-9, 2020.
7. Surdo, S., Diaspro, A., & Duocastella, M., "Printability conditions for an all-solid-state laser transfer," *Applied Surface Science*, Vol. 506, pp. 1-25, 2020.
8. Nakata, Y., Hayashi, E., Tsubakimoto, K., Miyanaga, N., Narazaki, A., Shoji, T., & Tsuboi, Y., "Nanodot array deposition via single shot laser interference pattern using laser-induced forward transfer," *International Journal of Extreme Manufacturing*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-6, 2020.
9. Ding, C. F., Li, L., & Young, H. T., "Laser-induced backward transfer of conducting aluminum doped zinc oxide to glass for single-step rapid patterning," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 275, pp. 1-13, 2020.
10. Feinaeugle, M., Heath, D. J., Mills, B., Grant-Jacob, J. A., Mashanovich, G. Z., & Eason, R. W., "Laser-induced backward transfer of nanoimprinted polymer elements," *Applied Physics A*, Vol. 122, No. 4, pp. 1-5, 2016.
11. Sopenña, P., Serra, P., & Fernández-Pradas, J. M., "Transparent and conductive silver nanowires networks printed by laser-induced forward transfer," *Applied Surface Science*, Vol. 476, pp. 828-833, 2019.
12. Uelzen, T., & Müller, J., "Wettability enhancement by rough surfaces generated by thin film technology," *Thin Solid Films*, Vol. 434(1-2), pp. 311-315, 2003.
13. Ceyhan, U., Tiktaş, A., & Özdoğan, M., "Pinning and depinning of Wenzel-state droplets around inclined steps," *Colloid and Interface Science Communications*, Vol. 35, pp. 100238, 1-10, 2020.
14. Yen, T. H., & Soong, C. Y., "Hybrid Cassie-Wenzel model for droplets on surfaces with nanoscale roughness," *Physical Review E*, Vol. 93, No. 2, pp. 1-10, 2016.
15. Whyman, G., Bormashenko, E., & Stein, T., "The rigorous derivation of Young, Cassie-Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon," *Chemical Physics Letters*, Vol. 450, Issues. 4-6, pp. 355-359, 2008.
16. Bormashenko, E., "Young, Boruvka-Neumann, Wenzel and Cassie-Baxter equations as the transversality conditions for the variational problem of wetting," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 345, Issues. 1-3, pp. 163-165, 2009.
17. Yaghoubi, H., & Foroutan, M., "Wettability of striped patterned mono-and multilayer graphene supported on platinum," *Applied Surface Science*, Vol. 500, pp. 1-27, 2020.
18. Murakami, D., Jinnai, H., & Takahara, A., "Wetting transition from the Cassie-Baxter state to the Wenzel state on textured polymer surfaces," *Langmuir*, Vol. 30, No. 8, pp. 2061-2067, 2014.
19. He, L., Liang, W., Wang, Z., & Akbarzadeh, A., "A three-dimensional model for analyzing the anisotropic wetting behavior of striped surfaces", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 552, pp. 67-74, 2018.