



Micromolding in Capillaries와 Microtransfer Molding법을 이용한 역테이퍼 구조물을 가지는 이방성 소유성 표면 제작

Fabrication of Anisotropically Oleophobic Surface with Inverse-Tapered Structure Using Micromolding in Capillaries and Microtransfer Molding

홍기연¹, 이동기², 김성동¹, 조영학^{1, #}

Ki Yeon Hong¹, Dong-Ki Lee², Sungdong Kim¹, and Young Hak Cho^{1, #}

¹ 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology)

² 서울과학기술대학교 나노IT디자인 융합대학원 (Graduate School of Nano IT Design Fusion, Seoul National University of Science & Technology)

Corresponding Author / E-mail: yhcho@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6361

ORCID: 0000-0002-7603-2063

KEYWORDS: Oleophobic surface (소유성 표면), Inverse-tapered structure (역테이퍼 구조물), Micromolding in capillaries (모세관내 미세몰딩), Microtransfer molding (미세전사몰딩)

Fabrication of inverse-tapered structure remains as a problem in the fabrication of oleophobic surface mostly due to the complications and the high cost of processes. In this paper, we propose a simple and low-cost fabrication method of inverse-tapered structured oleophobic surface using micromolding in capillaries (MIMIC) and microtransfer molding followed by MEMS processes. Silicon wafer molds for the formation of inverse-tapered structure were made using MEMS processes such as photolithography and anisotropic KOH etching of silicon wafer. The geometry of structure could be changed by controlling the etching depth of the silicon wafer mold. After covering the surface of the mold using flat UV tape, the formed space between mold and UV tape was filled with pre-cured PDMS by capillary force and then cured in oven. The tapered structure on UV tape was transferred and bonded to glass wafer by O₂ plasma treatment. The fabricated inverse-tapered structure was coated with a fluoroalkylsilane monolayer to reduce its surface energy. The wetting behaviors were investigated by the contact angle (CA) measurement of hexadecane droplets. This study demonstrates that an inverse-tapered structure can be fabricated on a substrate using micromolding in capillaries and microtransfer molding, whose surface shows the superoleophobicity.

Manuscript received: September 27, 2018 / Accepted: November 13, 2018.

1. 서론

최근 고체 표면의 구조물과 화학적 성질에 따라 액체가 반발하는 성질을 이용한 다양한 연구가 진행되고 있다.¹ 초소수성(Superhydrophobicity) 및 초소유성(Superoleophobicity) 표면의 제작은 자기정화 효과, 지문방지 효과, 고품질 인쇄 엔진 등에 응용이 가능하기에 많은 연구가 진행되고 있다. 많은 그룹들은 표면의 기하학적 구조물의 형성 및 화학적 성질의 변화를 복합적으로 이용하여 접촉각을 150°이상으로 구현하는 연구들을 진행하였다.¹⁻⁴ 특히 고체 표면 위에서 유기용액의 반발정도를 조

절하기 위해 표면에 마이크로 구조물 제작 및 화학적 특성 변화를 적용하는 다양한 연구결과들이 발표되었다.⁵⁻¹² 소수성을 가지는 표면과 달리, 소유성을 가지는 표면은 마이크로 구조물의 형상이 역테이퍼 구조(Inverse-Tapered) 또는 버섯 구조(Mushroom-Like) 형상을 가질 경우에 한해 그 성질이 나타나는 것으로 알려져 있다.⁴ 이는 유기성 용매의 낮은 표면장력과 액체-고체 간의 강한 상호 작용력에 따른 강한 흡착력에 기인한다. 즉, 단순한 기둥 형상을 가지는 초소수성 표면의 제작 방법과 달리, 앞에서 언급한 역테이퍼 구조 또는 버섯 구조와 같은 형상이 초소유성 표면 제작에 요구된다. 이와 같은 마이크로/나노 구조물을

제작하기 위해 나노임프린트(Nanoimprint) 공정, 포토리소그래피(Photolithography) 공정 혹은 DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 공정을 이용한 방법 등 다양한 제작 방법들이 제안되었으나, 제작 공정이 복잡할 뿐 아니라 많은 시간과 비용이 소요되며, 형상 제어에 한계가 있었다.⁵⁻¹⁰ 따라서 소유성 표면의 제작에 있어서 보다 저렴하고 간단한 제작 방법에 대한 연구의 필요성이 여전히 존재한다.

나비의 날개, 벼의 잎, 거위의 깃털 등과 같이 구조물의 방향에 따라 액체의 젖음 특성이 변화되는 현상을 이방성 젖음(Anisotropic Wetting)이라 하며, 그루브 표면에서 나타나는 이방성 젖음 특성에 대한 연구 중 소유성 표면에 대한 연구는 제한적이다. Zhao et al.¹⁰은 DRIE를 이용하여 실리콘 표면에 소유성 표면을 구현하고자 하였으며, Lee et al.¹¹은 실리콘의 이방성 에칭을 이용하여 버섯 구조를 가지는 초소유성 표면을 구현하여 유기성 용매의 접촉각 변화와 이방성 젖음에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 이방성 젖음을 가지는 초소유성 표면을 제작하기 위한 새로운 방법을 제안한다. 이전 연구¹¹에서 제안하였던 그루브 형상 위에 버섯구조 형상의 상단층을 가지는 표면 대신, 역테이퍼 구조를 가지는 소유성 표면을 구현하고자 하였다. 이를 위해 포토리소그래피, 이방성 실리콘 에칭 등 일반적인 MEMS 공정과 모세관내 미세몰딩(MIMC, Micromolding in Capillaries) 및 미세전사몰딩(Microtransfer Molding)법을 이용하여 역테이퍼 폴리머(PDMS) 구조물을 제작하였다. KOH (Potassium Hydroxide) 용액을 이용한 단결정 실리콘 웨이퍼의 이방성 에칭 특성에 의하여 항상 일정한 각도(54.7°)의 역테이퍼 구조물 제작이 가능하였다. 이와 같이 제작된 구조물에 대해, 구조물의 간격 및 구조물의 폭이 미치는 영향을 파악하기 위해 이를 변수로 구조물의 길이방향과 평행 및 수직인 방향에서 접촉각을 측정하였다.

2. 본론

2.1 역테이퍼 구조물의 기하학적 변수

소유성 표면을 구현하기 위한 역테이퍼 구조물의 기하학적 변수를 Fig. 1에 나타내었으며 그 기하학적 변수에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$W_b = W_t - \frac{2h}{\tan\theta} \quad (1)$$

$$\tan\theta = 1.412 \quad (\theta = 54.7^\circ) \quad (2)$$

여기서 W 와 W_b 는 각각 역테이퍼 구조물의 상단면과 하단면 폭, θ 는 구조물과 유리기판 사이의 각도, h 는 역테이퍼 구조물의 높이를 나타낸다. 이 때, 역테이퍼 구조물의 하단면 폭은 실리콘 웨이퍼의 이방성 에칭에 의해 식(1)과 같이 설계된 마스크의 패턴 간

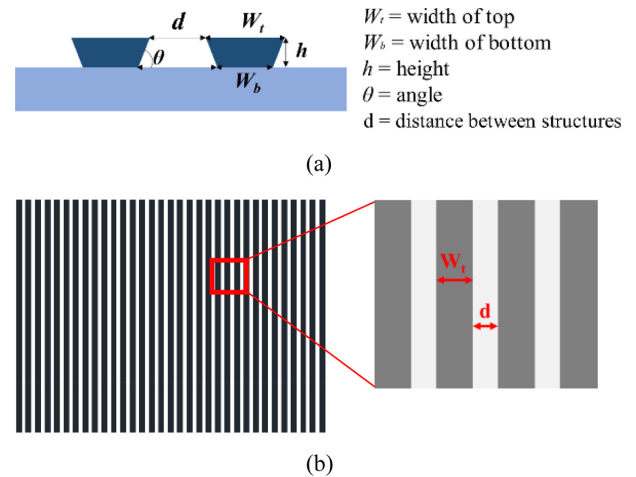


Fig. 1 (a) Schematic view of inverse-tapered structure with various geometrical parameters, (b) Design of photomask

Table 1 Geometric parameters on inverse-tapered structures

Structure type	Geometrical parameters				
	Width of top (W_t) [μm]	Width of bottom (W_b) [μm]	Height (h) [μm]	Distance between structures (d) [μm]	Angle θ [deg.]
Type 1	100	58	30	25, 50, 100, 200	54.7
Type 2	150	108	30		
Type 3	200	158	30		

격(구조물의 상단면 폭, W_t)과 식각 깊이(구조물의 높이, h)에 의해 결정된다. 즉, W_b 는 W_t 가 증가할수록 함께 증가하며 W_b 는 마스크 설계 시 패턴 간격에 의해 결정된다(Fig. 1(b)). 또한 이방성 실리콘 에칭을 진행함에 따라 구조물의 높이 h 가 증가하며, h 가 증가할수록 W_b 는 일정한 비율의 폭으로 감소한다. θ 는 실리콘 웨이퍼의 이방성 에칭 시 나타나는 (100) 면과 (111) 면이 이루는 각도인 54.7°이다.

구조물의 기하학적 변수의 변화가 접촉각에 미치는 영향을 확인하기 위하여 다양한 치수를 가지는 3가지 Type의 시편들을 제작하였다. Table 1에 각각의 Type의 시편이 가지는 값들을 나타내었다.

2.2 역테이퍼 형상의 구조물 제작

Fig. 2는 MEMS 공정을 이용한 역테이퍼 형상의 구조물을 가지는 소유성 표면 제작공정을 나타낸다. 먼저 500 nm 두께의 산화막(SiO_2)이 성장된(100) 4인치 단결정 실리콘 웨이퍼(Si Wafer)를 준비한다. 포토리소그래피 공정 후 BOE (Buffered Oxide Etch) 에칭 공정을 통해 산화막층을 패터닝(Patterning)하였다(Fig. 2(a)). 패터닝 후 산화막층을 에칭 마스크로 KOH 용액을 이용하여 이방성 실리콘 에칭을 진행하여 사다리꼴 형상의 실리콘 몰드를 제작하였다(Fig. 2(b)). KOH 용액의 농도는 30%, 온도는 75°C로 진행하였을 때 에칭 속도는 약 0.7 $\mu\text{m}/\text{min}$ 로 확

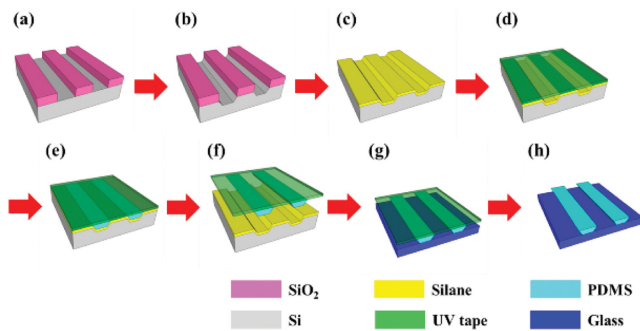


Fig. 2 Schematic view of fabrication process of inverse-tapered structure. (a) SiO_2 patterning, (b) Anisotropic Si wet etching, (c) SiO_2 removal & silane coating, (d) UV tape covering, (e) Filling PDMS using capillary force, (f) Transferring PDMS structure to UV tape, (g) O_2 plasma bonding, (h) Transferring PDMS structure to glass substrate

인되었다. 에칭 마스크로 이용되었던 산화막층은 BOE 용액을 이용하여 제거한 후, 실리콘 몰드에 실란(Silane) 코팅을 하였다(Fig. 2(c)). 다음으로 UV 테이프를 실리콘 몰드에 부착한 후 액상 PDMS를 UV 테이프가 부착된 실리콘 몰드의 끝부분을 통해 주입하였다(Figs. 2(d), 2(e)). 이때 액상 PDMS는 모세관력에 의하여 실리콘 몰드 내부로 흘러 들어가게 된다. PDMS가 채워진 실리콘 몰드를 오븐에서 85°C 의 온도로 20분 동안 유지시켜 PDMS를 응고시킨 후, UV 테이프 커버를 실리콘 몰드로부터 분리시켰다(Fig. 2(f)). 이 때 응고된 사다리꼴 형상의 PDMS는 실리콘 몰드로부터 UV 테이프 커버 쪽으로 전사되어 분리된다. UV 테이프 커버에 전사되어 있는 사다리꼴 구조물을 유리기판 표면으로 다시 전사하기 위해 PDMS와 유리기판에 O_2 플라즈마 처리하였다. PDMS 구조물과 유리기판과의 본딩을 진행한 후 UV광원에 약 10초간 노출하여 UV 테이프 커버를 PDMS 구조물로부터 분리하였다(Figs. 2(g), 2(h)). 이로부터 최종적으로 역테이퍼 구조물을 가지는 표면을 얻을 수 있었으며, 완성된 구조물의 표면이 화학적으로 소수성 및 소유성을 가지도록 실란(Silane) 코팅을 하였다.

2.3 접촉각 측정

제작된 역테이퍼 형상을 가지는 구조물의 접촉각 측정은 측각기(KSV CAM-200)를 사용하였고, 측정에 사용된 유기성 용매는 Hexadecane을 사용하였다. 마이크로 피펫을 이용하여 Hexadecane 액적 용량을 $2\mu\text{l}$ 로 고정하여 시편 위에 떨어뜨린 후 측면에서 측정한 광학현미경 사진을 프로그램을 이용하여 표면 위에서의 Hexadecane 액적의 접촉각을 얻었다. 본 연구에서 Hexadecane 액적은 역테이퍼 구조물의 길이 방향에 따라 이방성 젖음 특성을 보이기 때문에 구조물의 길이 방향과 평행 및 수직인 방향에 대해 각각 접촉각을 측정하였다. 또한 액적 형상의 이방성 젖음을 확인하기 위하여 Hexadecane 액적의 위쪽에서 측정한 광학현미경 사진을 통해 각 Type의 시편들의 액적 형

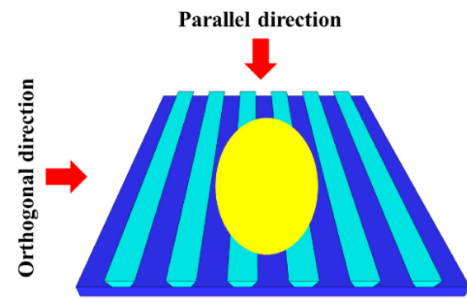


Fig. 3 Schematic view of the measurement method for contact angle of droplet

상을 비교하였다. Fig. 3은 접촉각 측정 방향에 대한 도식적인 그림이다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 Type 2 시편에 대한 실리콘 몰드, UV 테이프 커버로 전사된 사다리꼴 PDMS 구조물, 그리고 플라즈마 본딩을 이용하여 유리기판으로 전사된 역테이퍼 PDMS 구조물의 주사전 자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope) 사진을 나타낸다. Figs. 4(a)에서 4(d)는 이방성 실리콘 에칭 후 제작된 실리콘 몰드의 SEM 사진으로, 깊이는 $30\mu\text{m}$, 상단 폭은 각각 $25\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ 로, 이 상단폭은 최종적으로 전사된 후 PDMS 구조물의 상단층 간격(d)이 된다. 또한, Figs. 4(e)부터 4(h)에서 경화된 PDMS 구조물이 UV 테이프 커버로 전사된 것을 확인할 수 있으며, 이후 O_2 플라즈마 본딩 공정에 의해 PDMS 구조물이 다시 한번 유리기판으로 전사된 것을 Figs. 4(i)부터 4(l)에서 확인할 수 있다.

본 논문에서 역테이퍼 구조물의 기하학적 형상 변수인 상단층의 간격(d)과 구조물의 상단폭(W)이 유기성 용매인 Hexadecane 액적의 접촉각에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Table 1에서 언급한 세 가지 Type의 시편들의 접촉각 결과를 비교 분석하였다. 각 접촉각의 결과는 동일조건의 시편 위에서 임의의 3지점에 대하여 측정한 접촉각의 평균값을 계산하여 분석하였다.

구조물의 상단폭(W)이 각각 $100\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ 인 Type 1, Type 2, Type 3 시편에 대해 상단층의 간격(d)이 $25\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ 으로 증가하였을 때 구조물의 길이 방향과 평행한 방향 및 수직인 방향에서 Hexadecane 액적의 접촉각을 측정한 결과를 Fig. 5에서 보여준다. 구조물의 상단폭이 $100\mu\text{m}$ 에서 $200\mu\text{m}$ 로 증가함에 따라 평행한 방향 및 수직인 방향에서 측정한 접촉각 모두 상단층의 간격과 상관없이 감소하였다. 이는 구조물의 상단폭이 증가할 경우 Hexadecane 액적과 구조물 표면이 접촉하는 면적이 증가하게 되고, 액적이 고체 표면으로 보다 젖기 쉽기 때문에 접촉각이 감소한 것으로 판단된다. 또한 상단층의 간격이 증가하였을 때 Hexadecane 액적의 접촉각이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이 역시 같은 부

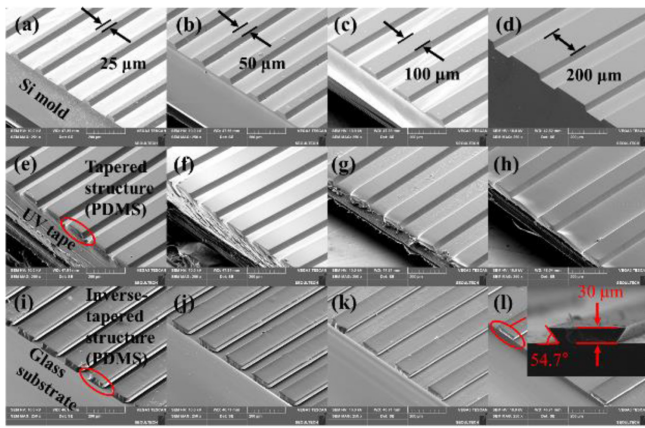


Fig. 4 SEM images of type 2 specimens. (a)-(d) Si molds, (e)-(h) PDMS tapered structures on UV tapes, (i)-(l) PDMS inverse-tapered structures on glass substrates (inset image is cross sectional view of inverse-tapered structure)

피의 Hexadecane 액적이 역테이퍼 구조물이 존재하는 고체 표면 위에 떨어질 때 구조물이 가지는 상단층의 간격이 증가함에 따라 액체와 고체간의 접촉 면적이 줄어들기 때문이다. 상단층의 간격이 증가하게 되면 고체 표면에서 공기가 차지하는 비율이 증가하게 되어 고체가 가지는 단위면적당 표면에너지가 감소하게 되고, 이는 액체가 고체 표면에 떨어드는 힘을 감소시켜 접촉각을 상승시키는 역할을 하였다.¹³ 실제로 Type 1 시편에서 상단층의 간격이 가장 넓은 때 고체와 액체가 접촉하는 면적이 가장 작게 되어 Hexadecane 액적의 접촉각은 가장 컸으며 156°로 초소유성을 보였다.

Figs. 5(a)와 5(b)의 접촉각 측정 결과에서 볼 수 있듯이 구조물의 길이 방향과 평행한 방향에서 측정한 Hexadecane 액적의 접촉각들은 수직한 방향에서 측정한 접촉각들보다 높게 나타났다. 이는 역테이퍼 구조물의 기하학적 형상 특성으로 인하여 Hexadecane 액적이 이방성 젖음 특성을 보이기 때문이다. 구조물의 길이 방향으로 고체면을 따라서 Hexadecane 액적이 젖어가는 것이 더욱 쉽기 때문에 구조물의 길이 방향과 수직한 방향에서 측정한 Hexadecane 액적의 접촉각은 낮게 나타났다.

Fig. 6에서 각 Type 시편들의 상단층 간격이 25 μm에서 200 μm 까지 증가하였을 때, 구조물의 길이 방향과 평행한 방향에서 측정한 Hexadecane 액적의 접촉각 사진을 보여준다. 상단폭이 좁은 Type 1 시편들에서의 Hexadecane 액적 사진들이 상단폭이 넓은 Type 3 시편들에서의 Hexadecane 액적 사진들보다 원형을 나타내었다. 또한 상단층 간격이 넓어질수록 Hexadecane 액적은 원형에 가까웠다. 앞에서 설명한 바와 같이 상단폭이 좁고, 상단층의 간격이 넓을수록 접촉각이 상승하였다는 것을 Hexadecane 액적의 형상으로도 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제작한 역테이퍼 구조물이 가지는 이방성 젖음 특성을 평가하기 위하여 Hexadecane 액적의 형상을 위에서 측정한 현미경 사진을 Fig. 7에 보였다. 모든 Type의 시편들에서 상단층의 간격이 25 μm일 때가 200 μm일 때에 비해 Hexadecane

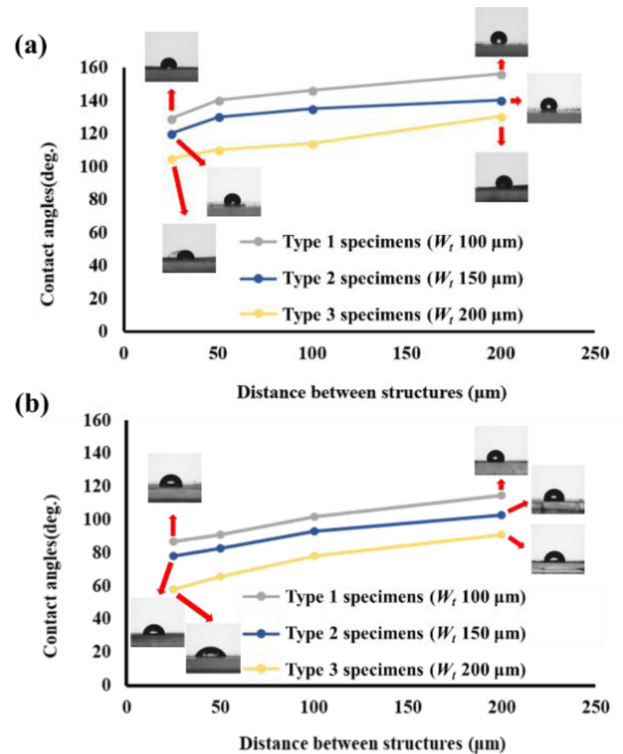


Fig. 5 Contact angles of hexadecane droplets on specimens (type 1, 2, 3) as function of distance between structures. (a) measurements in parallel (b) measurements in orthogonal

액적의 형상이 타원형으로 나타나며 이방성 젖음 특성이 강해졌다. 이는 상단층의 간격이 좁을 때에는 Hexadecane 액적이 고체 표면에 닿는 면적이 많아져 구조물의 길이 방향으로 Hexadecane 액적이 젖어가는 힘이 강해지기 때문으로 판단된다. 또한 상단폭이 가장 넓은 Type 3 시편(Fig. 7(c))의 경우 Type 1 시편(Fig. 7(a))에 비하여 액체와 고체가 접촉하는 면적이 넓기 때문에 상단층의 간격이 200 μm까지 증가하더라도 Hexadecane 액적은 이방성 젖음 특성을 나타내었다. Fig. 7에서 모든 Hexadecane 액적은 구조물 위에 떠 있는 Cassie 상태로 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이는 낮은 표면장력을 가지는 Hexadecane 유기 용매임에도 불구하고 역테이퍼 구조물이 가지는 54.7°의 각도는 소유성을 유지하기에 충분한 기하학적 형상이라는 것을 의미한다.

본 연구에서 제안한 이방성 실리콘 에칭 공정과 모세관내 미세물딩 및 미세전사물딩을 이용하는 방법은 기존의 소유성 표면 구현을 위한 다른 방법보다 간단하며, 제작비용이 저렴한 장점이 있다. 또한, 이전 연구결과들에 따르면 역테이퍼 구조물이 이루는 각도(θ)가 작아질수록 소유성 성질이 향상되는 것으로 알려져 있다.⁴ Im et al.⁵이 제안한 제작 방법인 RIE (Reactive Ion Etching)을 이용한 방법은 구조물의 역테이퍼 각도를 60° 이하로 제작하는 것이 어려울 뿐 아니라, 일정한 각도로 재현성이 있게 구현하는데 어려움이 있다. 반면, 본 연구에서 제안한 방법은 실리콘 웨이퍼의 결정방향에 따른 이방성 에칭으로 인해 60°

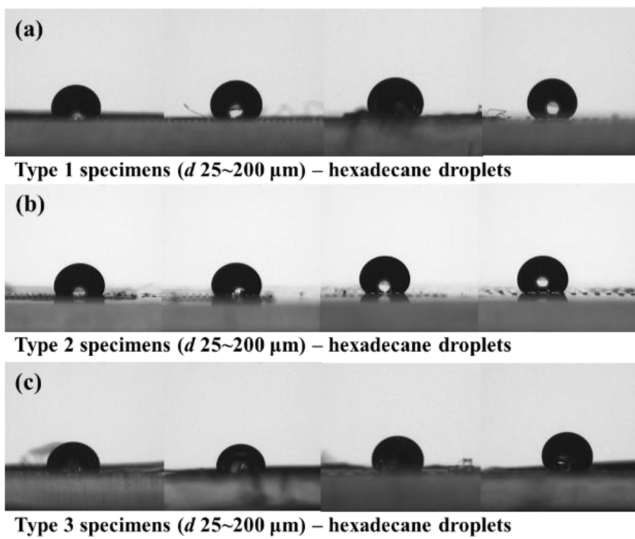


Fig. 6 hexadecane droplet images on 3 types of specimens in parallel direction

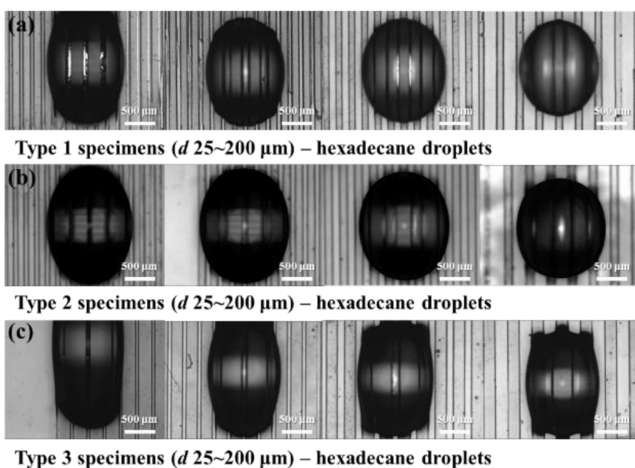


Fig. 7 Microscopic images (top view) of droplets with anisotropic wettability for 3 types of specimens

보다 낮은, 54.7°의 일정한 각도로 구조물을 제작할 수 있을 뿐 아니라, 구조물 제작의 재현성이 매우 높아서 보다 향상된 소유성 표면의 제작이 가능하였다.

4. 결론

본 논문에서는 기존 소유성 표면 제작 공정과는 달리 포토리소그라피와 이방성 에칭에 기반한 간단한 MEMS 공정과 모세관 미세물딩 및 미세전사물딩 방법을 이용하여 역테이퍼 구조물을 가지는 소유성 표면 제작 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제작된 역테이퍼 구조물은 실리콘 웨이퍼의 이방성 에칭 특성을 이용하여 일정한 역테이퍼 각도(54.7°)로 제작하는 것이 가능할 뿐 아니라, 구조물 폭의 변경 및 에칭 시간 조절을 통하여

다양한 기하학적 변수를 가지는 표면을 제작하는 것이 가능하며 이후 다양한 표면 연구 등에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Dufour, R., Perry, G., Harnois, M., Coffinier, Y., Thomy, V., et al., "From Micro to Nano Reentrant Structures: Hysteresis on Superomniphobic Surfaces," Colloid Polymer Science, Vol. 291, No. 2, pp. 409-415, 2013.
2. Dufour, R., Harnois, M., Coffinier, Y., Thomy, V., Boukherroub, R., et al., "Engineering Sticky Superomniphobic Surfaces on Transparent and Flexible PDMS Substrate," Langmuir, Vol. 26, No. 22, pp. 17242-17247, 2010.
3. Kim, J., Lin, P. Y., and Kim, W. S., "Mechanically Robust Super-Oleophobic Stamp for Direct Stamping of Silver Nanoparticle Ink," Thin Solid Films, Vol. 520, No. 13, pp. 4339-4343, 2012.
4. Tuteja, A., Choi, W., Ma, M., Marby, J. M., Mazzella, S. A., et al., "Designing Superoleophobic Surfaces," Science, Vol. 318, No. 5856, pp. 1618-1622, 2007.
5. Im, M., Im, H., Lee, J. H., Yoon, J. B., and Choi, Y. K., "A Robust Superhydrophobic and Superoleophobic Surface with Inverse-Trapezoidal Microstructures on a Large Transparent Flexible Substrate," Soft Matter, Vol. 6, No. 7, pp. 1401-1404, 2010.
6. Choi, H. J., Choo, S., Shin, J. H., Kim, K. I., and Lee, H., "Fabrication of Superhydrophobic and Oleophobic Surfaces with Overhang Structure by Reverse Nanoimprint Lithography," Journal of Physical Chemistry C, Vol. 117, No. 46, pp. 24354-24359, 2013.
7. Kang, S. M., Kim, S. M., Kim, H. N., Kwak, M. K., Tahk, D. H., et al., "Robust Superomniphobic Surfaces with Mushroom-Like Micropillar Arrays," Soft Matter, Vol. 8, No. 33, pp. 8563-8568, 2012.
8. Song, J., Huang, S., Hu, K., Lu, Y., Liu, X., et al., "Fabrication of Superoleophobic Surfaces on Al Substrates," Journal of Materials Chemistry A, Vol. 1, No. 46, pp. 14783-14789, 2013.
9. Zeniou, A., Ellinas, K., Olziersky, A., and Gogolides, E., "Ultra-High Aspect Ratio Si Nanowires Fabricated with Plasma Etching: Plasma Processing, Mechanical Stability Analysis Against Adhesion and Capillary Forces and Oleophobicity," Nanotechnology, Vol. 25, No. 3, Paper No. 035302, 2014.

10. Zhao, H. and Law, K. Y., "Directional Self-Cleaning Superoleophobic Surface," *Langmuir*, Vol. 28, No. 32, pp. 11812-11818, 2012.
11. Lee, D.-K., Lee, E. H., and Cho, Y. H., "Fabrication of Superoleophobic Surface with Anisotropic Wettability Using Silicon Wafer," *Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 23, No. 6, pp. 533-538, 2014.
12. Bormashenko, E., Grynyov, R., Chaniel, G., Taitelbaum, H., and Bormashenko, Y., "Robust Technique Allowing Manufacturing Superoleophobic Surfaces," *Applied Surface Science*, Vol. 270, pp. 98-103, 2013.
13. Lee, D.-K. and Cho, Y. H., "Effects of Grooved Surface with Nano-Ridges on Silicon Substrate on Anisotropic Wettability," *Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 22, No. 3, pp. 540-550, 2013.

**Ki Yeon Hong**

B.Sc. in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology. His research interest are Micro Surface and MEMS.

E-mail: chien7s@seoultech.ac.kr

**Dong-Ki Lee**

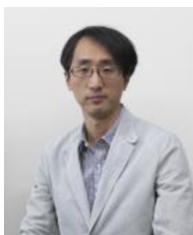
Post Doctor in the Institute of Precision Machinery Technology, Seoul National University of Science & Technology. His research interest are Micro/nano Surface and Photonic device.

E-mail: dkleee1124@seoultech.ac.kr

**Sungdong Kim**

Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology. His research interest is electronic packaging.

E-mail: sdkim@seoultech.ac.kr

**Young Hak Cho**

Associate Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology. His research interest are Bio-MEMS and Nanofabrication.

E-mail: yhcho@seoultech.ac.kr