

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.8.531>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

방사광 X-선 영상법을 활용한 마이크로/나노 구조 표면에서의 액체 퍼짐 가시화 연구§

곽호재* · 유동인** · 도승우*** · 박현선*** · 김무환*†

* 포항공과대학교 기계공학과, **한국원자력연구원 해양원전개발센터,
*** 포항공과대학교 첨단원자력공학부

A Visualization Study of Liquid Spreading on Micro/nano Textured Surfaces with Synchrotron X-ray Imaging

Ho Jae Kwak*, Dong In Yu**, Seungwoo Doh***, Hyun Sun Park*** and Moo Hwan Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH,

** Maritime Reactor Development Center, Korea Atomic Energy Research Institute,

*** Division of Advanced Nuclear Engineering, POSTECH

(Received February 8, 2017 ; Revised May 21, 2017 ; Accepted June 1, 2017)

Key Words: Wettability(젖음성), Spreading(퍼짐), Droplet(액적), Microstructure(마이크로구조), Nanostructure(나노구조), Synchrotron X-ray(방사광 X-선)

초록: 최근들어 고체 표면의 젖음성을 향상시키기 위해 표면에 나노/마이크로 기술을 적용하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구를 통하여 나노 구조가 표면 젖음성을 향상시킬 수 있고, 액체 퍼짐은 실 모세관(Capillary wicking)에 의해 형성된다는 것을 확인하였다. 그러나 대부분의 연구는 나노 구조의 작은 스케일 때문에 분석하는데 어려움이 있어서 퍼짐현상을 정성적으로 분석하고 있다. 본 연구에서는 마이크로/나노/마이크로-나노 구조를 갖는 실리콘 표면에서의 액적 계면 거동을 정량적으로 분석하였으며, 계면의 거동은 방사광 X선 영상법으로 직접 측면가시화를 진행하였다. 그 결과 모든 구조 표면에서 퍼짐 현상이 발생하였고, 액체 계면의 거동이 서로 다르게 나타났다. 마이크로구조의 경우 일정한 액막 두께를 유지하며 퍼졌고, 나노구조는 완만한 경사를 갖는 것으로 나타났다. 마이크로-나노 구조의 경우 두 가지가 결합된 형태의 퍼짐 현상을 보였다. 또한, 액체의 퍼짐은 마이크로-나노 구조에서 가장 증진됨을 확인하였다.

Abstract: Nano/micro technology is currently applied to improve solid surface wettability, with recent research studies indicating that nanostructures can improve surface wettability in the hydrophilic direction, and liquid spreading (propagation) is generated by capillary wicking. The majority of the existing research involves qualitative analysis of the spreading phenomena, owing to the difficulty in conducting small-scale analysis (nanostructures). In this study, the droplet interfacial behavior on silicon surfaces with micro/nano/micro-nano structures is experimentally investigated. The interfacial behavior is directly visualized using synchrotron X-ray imaging (side view). The spreading phenomena occur on structured surfaces, and the liquid interface behaviors on the surfaces differ. The liquid film thickness is uniform during spreading on the microstructured surface, but not on the nano case which shows a gentle slope. These combined spreading shapes were observed on a micro-nano structured surface, and liquid propagation was enhanced when the micro- and nano-structures are combined.

- 기호설명 -

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016.12.14.-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, mhkim@postech.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

f : 거칠기 비

c : 실험계수 ($\pi/2$)

d : 구조의 직경

- h : 구조의 높이
 l : 구조 간격
 p : 구조 피치
 H : Helmholtz free energy
 σ : 표면장력
 A : 접촉면적
 w : 접촉에너지(work of adhesion)
 θ : 본질적 접촉각
 θ' : 겉보기 접촉각

하첨자

- m : 마이크로 구조
 n : 나노 구조
 mn : 마이크로-나노 구조
 lv : 액체-기체 계면
 sl : 고체-액체 계면
 sv : 고체-기체 계면

1. 서 론

표면 젖음성(surface wettability) 및 액적 거동은 표면 위 액적의 삼중선(triple-line)에서 나타나는 겉보기 접촉각(apparent contact angle)으로 그 특성이 나타난다. 겉보기 접촉각은 표면특성에 의해 영향을 받는다. 표면특성은 크게 표면의 화학적 특성과 지형적 특성에 의해 결정된다. 화학적 특성은 이상적인 평면에서의 접촉각을 뜻하는 본질적(intrinsic) 접촉각에 의해 정량화되고, 지형적 특성은 투시면적(projection area)에 대한 액체가 닿는 면적비(wetted area)로 정의되는 거칠기 비에 의해 정량화 된다.^(1~6)

액적의 젖음성 상태(state)는 거칠기(roughness)가 있는 표면의 친수성(hydrophilicity) 또는 소수성(hydrophobicity)에 따라 Wenzel 상태와 Cassie-Baxter 상태로 구분된다. Wenzel 상태의 액적은 거칠기를 만드는 구조 사이로 완전히 침투하는 친수성 표면에서 발생하고, Cassie-Baxter 상태의 액적은 거칠기가 있는 구조 사이에 침투하지 못하고 대신 액상-기상 계면을 형성하는 소수성 표면에서 발생한다. (Fig. 1)

최근까지 자기세정(self-cleaning), 방수(water proofing), 유체마찰저감(hydrodynamic friction reduction), 방오(anti-fouling), 열에너지 시스템(heat and energy system) 등 다양한 기술 및 연구분야에서 마이크로, 나노 구조를 활용한 물질 및 열전달

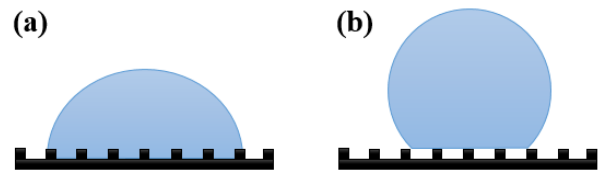


Fig. 1 Wetting state (a) Wenzel, (b) Cassie-Baxter

이 있는 다상 시스템의 성능을 향상시키기 위한 연구가 지속되고 있다.^(7~16) 특히, 마이크로구조와 나노구조가 복합적으로 존재하는 계층적(hierarchical)구조에서는 기존 마이크로, 나노 구조 표면에 비해 액적의 퍼짐현상이 증진되는 것을 확인하였으며, 이러한 구조에서의 퍼짐 증진현상을 액적 계면(interface)거동과 연관시켜 이해하고자 하는 연구가 진행 중이다.⁽¹⁷⁾

기존 구조 표면에서의 계면 가시화연구는 대부분 액적의 퍼짐을 위(top view)에서 촬영하여 그 현상을 분석하였다.^(14,17,18) 액적 계면이 precursor와 contact line으로 구분되어 퍼져가고, 구조의 크기 및 간격에 따라 액적 퍼짐 정도가 조절될 수 있는 것을 확인하였다. 하지만 기존 연구들은 구조의 작은 스케일로 인한 가시화 한계에 의해 구조와 구조 사이의 계면 즉, 측면(side view) 가시화를 통한 계면을 확인하지는 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 표면의 지형적 특성에 따른 액적 계면을 측면으로 가시화하는 실험을 진행하였다. 동일한 화학적 특성 조건하에(silicon wafer), 지형적 특성을 마이크로, 나노, 마이크로-나노로 나누어 가시화를 하였다. 나노 구조 스케일(60nm)에 의한 가시화 한계를 극복하기 위하여 포항가속기연구소(PAL) 7C 빔라인의 엑스선 나노영상(XNI, X-ray Nano Imaging)을 활용하였다.

2. 시편제작 및 실험 방법

2.1 시편제작

본 연구에서는 지형학적 형태에 따른 액적 계면 거동을 확인하기 위하여 마이크로, 나노, 마이크로-나노 구조를 갖는 표면을 제작하여 실험을 진행하였다. 표면의 거칠기 비나 고상분율을 용이하게 정의하기 위해 미세전자기계시스템(Micro-Electro-Mechanical-System) 기술을 이용하여 Fig. 2와 같은 마이크로 기둥 구조 및 나노 구조(black silicon)가 있는 표면을 제작하였다.

실리콘 웨이퍼 위에 포토리소그래피(photo

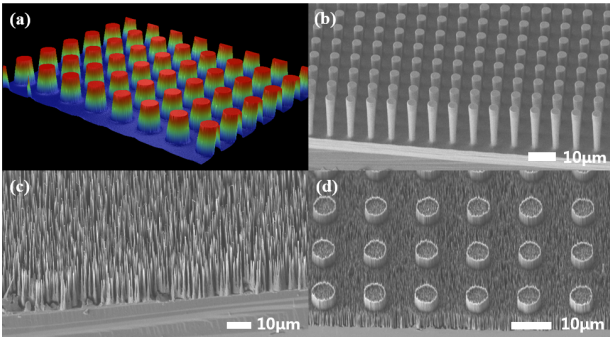


Fig. 2 3-D profiler & FE-SEM images of (a, b) micro, (c) nano (black silicon), (d) micro-nano structure

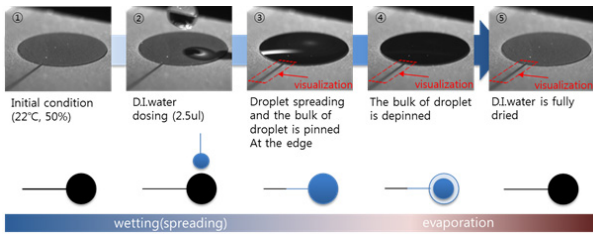


Fig. 3 Test section and experimental process

lithography)로 마이크로 구조를 패터닝(patterning)하고, 고종이온실리콘식각장치(Deep Reactive Ion Etcher, DRIE)로 건식 식각을 하여 마이크로 기둥 구조표면을 제작하였으며, DRIE의 black silicon 공정을 통해 랜덤하게 분포되어 있는 나노 구조를 제작하였다. 마이크로-나노 구조 표면의 경우 아래 기관 및 마이크로 기둥 위 모두에 나노구조가 존재하도록 제작하였다. 퍼짐현상의 측면가시화를 위하여 스푼모양(spoon shape)의 시편(Fig. 3)으로 제작하였으며, 방사광 X-선 투과 깊이(가시화 평면두께)를 30 µm로 제작하였다. 액적이 퍼지는 방향의 길이는 15mm로 제작 하였다.

2.2 실험준비 및 측정

실험에 들어가기 앞서, 표면의 화학적 특성에 의해 표면 젖음성이 민감하게 반응하기 때문에 표면 세척 및 준비과정을 수반하였다. 제작된 표면을 O₂ 플라즈마 처리를 수행하여 유기물질을 제거하는 세척 공정을 진행하였으며, 이후 진공 오븐(vacuum oven)에 시편을 하루 보관한 뒤, 실험을 진행하였다. 시편은 3차원 프로파일러(3-D profiler)와 전계 방사 주사 전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)을 이용하여 마이크로 기둥 구조의 지름, 간격, 높이

Table 1 Measurement value of the micro & nano structure by using 3-D profiler and FE-SEM

structure	d	i	p	h	f
Plain(flat)	-	-	-	-	1.00
Micro(µm)	2	14	16	20	2.54
Nano(nm)	65	300	365	6000	30.27
Micro-Nano(µm)	4	4	8	20	36.44

를 측정하였다. 나노 구조의 경우에는 방사광 X-선 3차원 단층촬영(tomography)으로 black silicon의 3차원 이미지를 얻고 이를 토대로 표면 특성을 확인하였다. (Table 1)

본 연구에서는 각 구조의 용이한 해석을 위해 거칠기 비를 단위 면적에서 정의하였고, 측정된 마이크로 및 나노 구조 정보를 토대로 거칠기 비 정의에 따라 아래 식 (1, 2)와 같이 도출하였다.

마이크로구조 / 나노구조

$$f_{m,n} = 1 + c \cdot \frac{\pi dh}{p^2} = 1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\pi dh}{p^2} \tag{1}$$

마이크로-나노구조

$$f_{mn} = f_n \cdot 1 + c \cdot \frac{\pi d_m h_m}{p_m^2} = f_n + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\pi d_m h_m}{p_m^2} \tag{2}$$

2.3 실험방법

참조 표면을 포함한 4개의 지형적 특성이 다른 표면을 제작하여 실험을 진행하였다. 각 표면에는 마이크로 주사기를 이용하여 2µl 부피의 3차 증류수 액적을 떨어뜨렸으며, 측면 가시화는 방사광 X-선 영상법을 활용하여 진행하였다. 포항 가속기연구소의 7C 빔라인 X-선 나노영상은 6.7 keV의 에너지를 갖는 X-선으로 가시화를 진행하며, 공간분해능은 20nm/pixel을 갖는다. 각 표면에서 퍼짐현상이 일어날 때, 액적계면 거동을 가시화하였으며, 그 차이를 비교하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험 결과

본 연구에서는 서로 다른 4개의 표면에 대하여 접촉각을 측정한 후, 퍼짐현상을 가시화 하였다. 참조 표면인 평면 표면에서는 접촉각이 25°로 기

존 실리콘 표면의 본질적 접촉각인 60°보다 작게 측정되었다. 참조 표면을 제외한 나머지 표면에서는 액적이 구조 사이로 흡수(imbibition) 되면서 퍼짐현상이 나타나 겉보기 접촉각이 모두 0°로 측정되었다. (Fig. 4, Table 2)

마이크로, 나노, 마이크로-나노 구조 표면에서의 액적 퍼짐 현상을 방사광 X-선 영상법으로 촬영하여 비교한 결과, 구조에 따라서 액적계면의 거동이 차이가 나는 것을 확인하였다.

참조 표면의 액적계면의 경우, Fig. 5(a)와 같이 액적이 퍼지지 못하고 pinning되어 있어 접촉각을 갖는 것을 직접 확인하였다. 마이크로 구조의 경우[Fig. 5(b)], 액적이 reservoir부분에 닿음과 동시에 퍼짐현상이 시작되어 구조의 높이만큼 액체가

확 찬 상태로 퍼짐이 진행되었다. 이러한 일정한 두께의 액막을 거의 마지막까지 유지하다가 급격한 경사를 이루면서 액막이 없어짐을 확인하였다. 나노구조의 경우[Fig. 5(c)], 처음에는 마이크로 구조와 비슷한 상태로 진행을 하다가 점차 경사(slope)를 만들면서 결국 끝부분에는 얇은 액막을 유지하였다. 액막은 증발(evaporation)이 진행함에 따라 수위(두께)는 지속적으로 변하였다. 마이크로-나노 구조 표면[Fig. 5(d)]에서는 마이크로 기둥구조 위에 존재하는 나노구조까지 모두 채워진 상태로 퍼짐현상이 진행되다가 이후 점차 마이크로구조 높이로 수위가 낮아지고, 마지막에는 나노 구조표면에서의 퍼짐과 비슷한 경사를 갖는 경향을 확인하였다.

Table 2 Measurement value of Contact Angle

Surface (O2 plasma cleaning)	Contact Angle
Silicon wafer	25°
Micro-pillar structure surface	~0°(spreading)
Nano-structure surface	~0°(spreading)
Micro-Nano-structure surface	~0°(spreading)

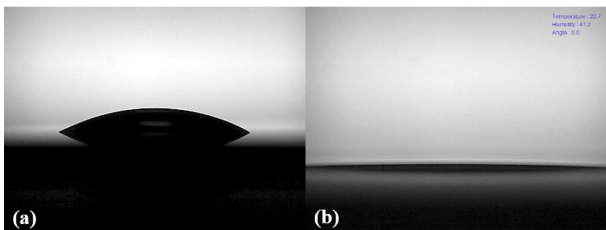


Fig. 4 Contact angle images on (a) silicon wafer and (b) nano structure surface

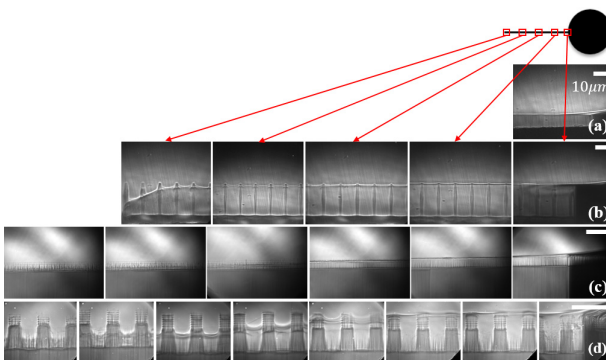


Fig. 5 Images of liquid interface by synchrotron X-ray imaging on (a) flat, (b) micro, (c) nano and (d) micro-nano surfaces (scale bar = 10 μm)

3.2 실험 분석

참조 표면에서의 접촉각이 25°로 측정된 것은 본 실험에서 사용된 실리콘 표면에 화학적 특성을 O₂ 플라즈마 공정으로 변화시켜 젖음성을 바꾸었기 때문이다. O₂ 플라즈마 공정을 거치면 친수성기인 하이드록시기(-OH)가 표면에 많이 접착되기 때문에 기존 실리콘 표면에 비해 낮은 접촉각을 갖는 것이다.

마이크로, 나노, 마이크로-나노 구조 표면에서 퍼짐현상이 나타나서 접촉각이 줄어든 것은 에너지 관점에서 이해할 수 있다. 기존 Wenzel 모델은 젖음 진행(wetting process)시 Helmholtz 자유에너지보존을 가정하여 유도된 모델이다. 이러한 에너지 보존에 추가적으로 부착에너지(work of adhesion, w)를 고려하여 구조에 의한 에너지 손실이 발생했다고 가정한 것이 Kang-Jacobi 모델이다.⁽¹⁹⁾ 아래 수식은 Helmholtz 자유에너지 보존으로부터 구한 겉보기 접촉각 예측 모델식이다.

Helmholtz free energy

$$H_{1 \rightarrow 2} = [\sigma_{lv}A_{lv} + \sigma_{sl}A_{sl} + \sigma_{sv}A_{sv} + wA_{lv}]_{1 \rightarrow 2} \quad (3)$$

Wenzel state일 때 겉보기 접촉각 예측 모델식

$$C(\theta') = f \cdot C(\theta) \quad (4)$$

$$C(x) = \frac{1 - \cos x - 2 \left[\frac{(2 + \cos x)(1 - \cos x)^2}{4} \right]^{2/3}}{\sin^2 x} \quad (5)$$

이러한 K-J모델은 기존 Wenzel & Cassie-Baxter 모델에 비해 접촉각을 더 잘 예측하는 것으로 제안되었다. 이 모델에 의하면, 본질적 접촉각이 43° 보다 클 경우에는 표면 거칠기 비가 증가함에 따라 겉보기 접촉각이 증가하는 경향을 보이고, 본질적 접촉각이 43° 보다 작을 경우 겉보기 접촉각은 표면 거칠기 비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 다른 선행연구를 통하여도 확인되었다.⁽²⁰⁾ 본 실험에 사용된 표면의 본질적 접촉각(θ)인 25° 와 각 표면의 거칠기(f) 값을 활용하여 겉보기 접촉각(θ')을 구해보면 마이크로, 나노, 마이크로-나노 구조 표면에서 모두 겉보기 접촉각이 0° 로 예측된다. 따라서, 본질적 접촉각이 25° 이고 표면의 거칠기 비가 1보다 큰 값을 갖는 마이크로, 나노, 마이크로-나노 구조 표면에서는 겉보기 접촉각이 감소하는 것을 이해할 수 있다.

방사광 X-선 가시화를 통해 나타난 액적계면은 앞서 언급한 것과 같이 표면에 따라 거동 차이가 존재한다. 주의 깊게 생각해 볼 것은, 구조의 스케일에 따른 퍼지는 방법의 차이이다. 먼저, 마이크로 구조의 경우 구조사이를 하나씩 채우면서 퍼짐현상이 일어난다. 반면, 나노 구조에서는 구조사이를 하나씩 채우면서 퍼짐이 일어나기 보다는 얇은 액막이 형성되고 이후에 액체가 공급되어 액막의 두께가 두꺼워지는 방향으로 퍼짐이 진행되는 것으로 관찰된다. 하지만, 진행 속도는 오히려 마이크로 구조에서의 퍼짐이 더 빠르게 진행된다.

이러한 거동 특성은 모세관력(capillary force)과 점성력(viscous force)과의 관계와 관련지어 생각할 수 있다. 먼저 모세관력의 경우 구조사이 간격에 반비례하므로, 나노구조($0.3\mu\text{m}$ 이하)와 마이크로구조($4\mu\text{m}$)의 모세관력은 나노구조가 약 13배 정도 크다. 점성력의 경우 액체의 접촉면적에 비례하므로 마이크로구조의 단위면적인 $16 \times 16 \mu\text{m}^2$ 을 기준으로 각 표면에서의 접촉면적을 계산하여 비교할 수 있다. 마이크로구조의 접촉면적은 $381.67\mu\text{m}^2$ 이고, 나노구조의 접촉면적은 $7984.80\mu\text{m}^2$ 로 나노구조의 점성력이 약 21배 정도 크다고 예측할 수 있다. 즉, 나노구조 표면에서 모세관력의 증가량에 비해 점성력의 증가량이 더 크기 때문에 모세관력을 점성력이 상쇄시켜 액적 퍼짐이 마이크로 구조 보다 더디게 되는 것

으로 이해 할 수 있다.

마이크로-나노 구조 표면에서는 퍼짐현상이 증진되는 것을 확인하였는데, 마이크로/나노 표면에서의 액적계면거동이 상호 보완하여 퍼짐의 극대화를 가져온 것으로 이해할 수 있다. 왜냐하면 퍼짐은 resorvior에서 충분한 공급이 유지되어야 그 현상이 증진될 수 있는데, 나노 구조 사이의 부피 보다 마이크로 구조 사이의 부피가 상대적으로 크기에 마이크로 구조 사이에 채워진 액체는 나노구조에게 resorvior의 역할을 할 수 있다. 즉, 나노구조 사이의 퍼짐을 마이크로 구조 사이의 액체가 도와주는 것이다. (resorvior가 점점 precursor쪽으로 이동하는 것과 같은 이치) 따라서, 마이크로-나노 구조 표면에서는 마이크로, 나노 구조 표면에서 보다 퍼짐현상이 증진된다.

4. 결론

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼를 기반으로 제작한 참조 표면(평면), 마이크로 구조, 나노 구조, 마이크로-나노 구조를 갖는 총 4가지 표면에 대하여 표면 젖음성과 퍼짐현상 시 나타나는 액적계면을 확인하는 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) O_2 플라즈마 공정을 통해 실리콘 표면의 화학적 특성을 변화시켰으며, 그 결과 본질적 접촉각이 25° 로 나타났다. 이렇게 낮은 본질적 접촉각에 의해 거칠기 비가 1 이상인 구조 표면에서는 접촉각이 줄어들고 퍼짐현상이 나타나는 것을 확인하였다. 이는 액적이 표면위에서 평형상태에 이르는 동안 발생하는 부착에너지(work of adhesion) 손실을 고려한 Kang-Jacobi 모델을 통하여 예측 및 확인하였다.

(2) 마이크로, 나노, 마이크로-나노 구조 표면에서의 액적계면거동은 조금씩 차이가 존재했다. 먼저, 마이크로 구조에서는 액적이 구조사이를 하나씩 채워가면서 계면이 형성되었으며, 나노 구조에서는 얇은 액막이 아래쪽에서 먼저 퍼져나가고 이후에 액체의 공급으로 액막의 두께가 두꺼워지는 것으로 나타났다. 마이크로-나노 구조 표면에서는 각각의 구조에서 나타난 특성이 서로 결합되어, 퍼짐성이 극대화됨을 확인할 수 있었다.

후에, 퍼짐현상을 더욱 자세히 연구하기 위해서는 가속기 실험 시스템에 높은 시간분해능이

요구된다. 현재는 100fps 정도의 시간분해능으로 제약이 존재하므로, 추후에 시스템을 개선하여 더욱 정량적인 분석과 현상이해에 대한 연구가 진행되어야 한다.

후 기

이 논문은 미래창조과학부(MSIP)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(NRF-2015M2A8A2074795) 본 연구는 포항가속기연구소(PAL, PLS-II 7C beam line(XNI)의 지원으로 진행됨. 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단-글로벌 박사 펠로우십사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (2015H1A2A1034590)

참고문헌 (References)

- (1) Young, T., 1805, "Analysis of Interfacial Forces, London.", *Philos Trans Roy Soc.*, 95, pp. 65~73.
- (2) Wenzel, R.N., 1936, "Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water," *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 28, No. 8, pp. 988~993.
- (3) Cassie, A. and Baxter, S., 1944, "Wettability of Porous Surfaces," *Transaction of the Faraday Society*, Vol. 30, pp. 546~551.
- (4) Dettre, R. and Johnson, R., 1963, "Study of an Idealized Heterogeneous Surface," *The Journal of Physical Chemistry*, 107, 43, pp. 1744~1750.
- (5) Kim, D.H., Kim, J.W. and Hwang, W.B., 2006, "Prediction of Contact Angle on a Microline Pattereded Surface," *Surface Science*, Vol. 600, No. 22, pp. 301~304.
- (6) Marmur, A., 2008, "From Hygrophilic to Superhydrophobic: Theoretical Conditions for Making High-contact-angle Surfaces from Low-contact-angle Materials," *Langmuir*, 24, 14, pp. 7573~7579.
- (7) Nakajima, A., Hashitomo, K., Watanabe, T., Taki, K., Yamaguchi, G. and Fujishima, A., 2000, "Transparent Superhydrophobic Thin Films with Self-Cleaning Properties," *Langmuir*, Vol. 16, No. 17, pp. 7044~7047.
- (8) Fürstner, R., Barthlott, W., Neinhuis, C. and Walzel, P., 2005, "Wetting and Self-Cleaning Properties of Artificial Superhydrophobic Surfaces," *Langmuir*, Vol. 21, No. 3, pp. 956~961.
- (9) Höcker, H., 2002, "Plasma Treatment of Textile Fibers," *Pure Appl. Chem.* Vol. 74, No. 3, pp. 423~427.
- (10) Choi, C.-H. and Kim, C.-J., 2006, "Large Slip of Aqueous Liquid Flow over a Nonoengineered Superhydrophobic Surface," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 96, No. 6, pp. 066001.1-4.
- (11) Marmur, A., 2005, "Underwater Superhydrophobicity," *Langmuir*, Vol. 22, No. 4, pp. 1400-.
- (12) Genzer, J. and Marmur, A., 2008, "Biological and Synthetic Self-cleaning Surfaces," *MRS Bull.* Vol. 33, No. 8, pp. 742~746.
- (13) Boreyko, J. B. and Chen, C.-H., 2009, "Self-Propelled Dropwise Condensate on Superhydrophobic Surfaces," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 103, No. 18, pp. 184501.1-4.
- (14) Ahn, H. S., Jo, H. J., Kang, S. H. and Kim, M. H., 2011, "Effect of Liquid Spreading due to Nano/micro Structures on the Critical Heat Flux during Pool Boiling," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 98, No. 7, pp. 071908.1-3.
- (15) Chu, K.-H., Enright, R. and Wang, E. N., 2012, "Structured Surfaces for Enhanced Pool Boiling Heat Transfer," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 100, No. 24, pp. 241603.1-4.
- (16) Chu, K.-H., Joung, Y. S., Enright, R., Buie, C. R. and Wang, E. N., 2013, "Hierarchically Structured Surfaces for Boiling Critical Heat Flux Enhancement," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 102, No. 15, pp. 151602.1-4.
- (17) Kwak, H.J., Yu, D.I., Kim, M.H., Park, H.S., Moriyama, K., Ahn, H.S. and Kim, D.E., 2015, "Interfacial Behavior of Water Droplet on Micro-Nano Structured Surfaces," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B.* Vol. 39, No. 5, pp. 449~453.
- (18) Ahn, H.S., Park, G., Kim, J. and Kim, M.H., 2011, "Wicking and Spreading of Water Droplets on Nanotubes," *Langmuir*, 28, 5, pp 2614~2619.
- (19) Kang, H.C. and Jacobi, A.M., 2011, "Equilibrium Contact Angles of Liquid Droplets on Ideal Rough Solids," *Langmuir*, Vol. 27, No. 24, pp. 14910~14918.
- (20) Yu, D.I., Kwak, H.J., Doh, S.W., Kang, H.C., Ahn, H.S., Kiyofumi, M., Park, H.S. and Kim, M.H., 2015, "Wetting and Evaporation Phenomena of Water Droplets on Textured Surfaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 90, pp. 191~200.