

나노 측정기를 이용한 연잎효과 규명

이주희¹, 이동연^{1*}
¹영남대학교 기계공학부

Investigation of the lotus leaf effect using the scanning probe microscopes

Ju-Hee Lee¹, Dong-Yeon Lee^{1*}

¹Mechanical Engineering, Yeungnam University

요약 본 논문에서는 자연에서 영감을 얻은 생체 모방 공학 중의 하나인 연잎 효과에 초점을 맞추었다. 생체 모방 공학은 자연의 시스템을 관찰하여 동식물, 곤충 등의 구조와 기능을 모방하여 공학적으로 활용하는 것이다. 나노 기술의 발전은 생체 모방 공학의 발전도 함께 일으켜왔다. 본 과제에서는 연잎 표면의 소수성과 특징에 대해 살펴본 뒤 나노 측정 장비인 SEM (주사선전자 현미경)과 AFM (원자력간 현미경)을 이용하여 측정 후 비교, 분석하였다. 연잎의 표면에는 수많은 나노 돌기들이 존재하며, 그 작은 돌기들이 소수성을 갖게 하고 표면장력을 극대화 시키는 역할을 한다. 연잎의 표면에서는 물방울이 동그랗게 모여 있는 것을 볼 수 있는데 그것을 연잎 효과라고 하며, 나노 돌기로부터 생성된 효과이다. 이러한 연잎의 표면을 배울 별로 2D와 3D로 측정하여 분석하였다. 또한, 그 결과를 기존의 법칙들에 어떻게 적용되는지 살펴보았으며 나아가 소수성을 판별할 수 있는 새로운 방법에 대해 논의하여 보고자 하였다.

Abstract This paper has studied the lotus effect of the biomimetic engineering that is inspired from the nature. The biomimetic engineering has been improved with the nanotechnology. This paper has observed the hydrophobic property of the surface of the lotus leaf by using the scanning electron microscope (SEM) and atomic force microscope (AFM). The nano-scale of the hydrophobic lotus leaves are maximized the surface tension of water. The general grass leaf has been compared with the lotus leaf through the SEM and AFM - in the viewpoint of the 2D and 3D morphology. Also, The pre-existing of the hydrophobic theory was investigated and compared with the experimental observations for the lotus leaf.

Keywords : AFM, Hydrophobic, Lotus effect, Lotus leaf, SEM

1. 서론

21세기는 나노(Nano)와 융합(Fusion)기술이 대두되는 첨단과학의 시대이다[1]. 기존의 과학적, 공학적 한계를 뛰어넘고 새로운 첨단과학의 시대를 열기위해 과학자과 공학자의 시선은 자연스럽게 자연으로 향하고 있다. 자연현상을 규명함은 문제의 해결이나 새로운 제품의 개

발에 기초가 되는 부분이다.

자연의 시스템(System)을 관찰하며 생물을 이해하고 모방할 수 있는 새로운 공학적 영감을 얻어 실제 동식물, 곤충의 생체구조와 기능을 모방하여 공학적으로 활용하는 학문을 생체모방공학(Biomimetics Engineering)이라 한다[2].

현재 생체모방공학(Biomimetics)은 나노공학

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2013R1A1A4A01009657).

*Corresponding Author : Dong-Yeon Lee(Yeungnam University)

Tel: +82-10-5407-6765 email: dylee@ynu.ac.kr

Received June 9, 2015

Revised June 25, 2015

Accepted September 11, 2015

Published September 30, 2015

(Nanotechnology)의 발전에 따라 나노(Nano)수준에 도달하였으며, 신소재부터 로봇, 자동차, 항공기, 센서, 의료 등의 여러 분야에서 활발히 연구되어지고 있다. 즉, 나노 공학(Nanotechnology)이 발전함에 따라 생체모방공학(Biomimetics)의 연구도 활발해짐과 동시에 응용범위가 확대될 것이다[3-4].

또한, 생체모방공학에는 생물학과 공학, 인간과 자연의 공생과 확장을 위한 키워드가 숨어있다. 따라서 자연의 이점을 인간생활에 적용 가능한 형태로 만들어 내기 위한 공학적, 과학적 기술이 필요하며 확장해 나가려는 노력이 필요하다.

본 논문에서는 현재 자정 작용 페인트부터 습기가 끼지 않는 자동차 유리 등의 여러 활용방안에 적용되는 기술의 원리가 되는 연잎의 미세한 나노 돌기로부터 발생하는 연잎 효과에 주목하였다. 연잎효과인 연잎의 소수성은 표면에 있는 미세한 돌기들에 의해 나타난다[5-7]. 이 돌기는 물의 표면장력을 극대화시키고, 이로 인해 물방울이 표면에서 등글게 뭉쳐서 구를 수 있게 해주는 역할을 한다[8-9]. 표면의 젖음성과 자정 작용, 초발수성 등의 효과는 실생활부터 의료, 공학 등의 다양한 분야에서 충분한 활용 가치가 있다.

따라서 본 논문에서는 자연계의 시스템 중 연잎 효과(Lotus Effect)의 특징과 활용방안을 통해 연잎의 소수성이라는 나노(Nano) 현상을 SEM(주사선전자현미경:Scanning Electron Microscope), AFM(원자력간현미경:Atomic Force Microscope)과 같은 나노(Nano) 측정장비를 이용하여 측정한 후, 기존의 법칙들이 연잎의 나노 돌기에 적용되는 것을 측정 후 얻은 결과를 분석하였다[10-12]. SEM은 전자총을 쏘아 2차 전자를 검출하여 영상에 나타내는 것으로 뛰어난 분해능으로 주로 사용되는 장비이며, AFM은 샘플표면의 원하는 영역을 정해서 캔틸레버에 달려있는 뾰족한 팁으로 샘플 표면과 팁 사이의 반데르발스 힘을 이용하여 관찰하는 장비이다. 나노 측정 장비를 통해 연잎의 표면을 관찰, 분석 한 후 나아가 소수성을 판별할 수 있는 새로운 방법에 대해 논의하여 보고자 한다.

2. 본론

2.1 연잎효과개론

잎이 물방울에 젖지 않고 동그랗게 있는 현상을 연잎 효과(Lotus Effect)라 한다. 이 효과의 핵심요소는 연잎에 무수히 나있는 표면장력이 매우 큰 ‘나노 돌기’이다. 연잎의 표면은 큰 표면장력으로 인해 떨어진 물방울을 퍼뜨리지 않고 뾰뚱하게 한다. 또한, 바닥면 위에 물방울이 놓여 있을 때 물방울의 측면과 바닥면이 접촉하는 각도가 60도보다 크면 소수성, 30도 이하이면 친수성을 띤다고 한다. 하지만 연잎의 바닥면이 물방울과 접촉하는 각도는 150도 이상이다. 그냥 소수성이 아닌 ‘초소수성’ 성질을 갖는다. 그 이유는 연잎 표면에 존재하는 무수한 미세돌기 덕분이다. 바닥면의 미세돌기는 물방울이 연잎 표면과 접촉하는 각도를 커지게 만든다. 또한 바닥면에 형성돼 있는 봉오리들에도 무수한 돌기가 있어 비슷한 효과를 일으키게 된다. 이와 같은 이중적인 소수성 덕분에 연잎의 표면은 ‘초소수성’을 띠게 되는 것이다. 소수성 표면 위를 흐르는 물은 미끄러지지 않고(sliding), 굴러 떨어진다(rolling). 이 때, 입자의 흡수력이 입자와 표면사이의 정적마찰력보다 크면, 입자는 표면으로부터 떨어져 물과 함께 구르게 된다. 즉, 연잎효과는 연잎의 표면장력과 초소수성의 원리로 이루어진 나노 돌기로 설명된다.



Fig. 1. Lotus effect

2.2 초소수성 원리

2.2.1 표면장력

물의 표면장력은 연잎의 초소수성에 기인한다. 액체를 구성하는 분자는 서로 끌어당기는 인력이 있다. 만약 인력이 없다면 유한한 크기를 가질 수 없다. 반대로 분자사이의 거리가 특정거리보다 작아지면 분자사이에 반발력이 작용한다. 따라서 액체는 기체처럼 크게 압축할 수 없다.

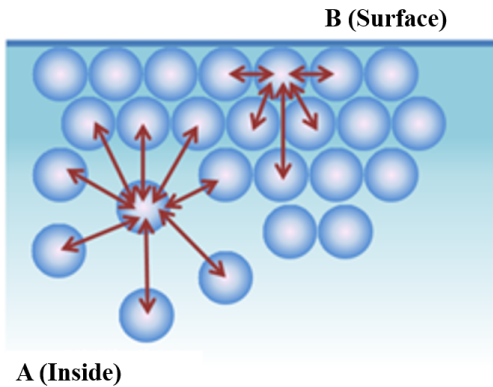


Fig. 2. Force of liquid inside

Fig. 2 에서 A지점의 유체 분자는 인력과 척력이 평형상태에 있기 때문에 작용하는 알짜 분자력이 0이다. 그러나 B지점, 즉 표면에 있는 유체 분자에는 유체 내부로 향하는 방향으로 인력이 작용하지만 표면에서 바깥 방향으로 균형을 이룰 인력이 없다. 따라서 유체 내부로 향하는 알짜 분자력이 존재한다. 이렇게 내부로 향하는 분자력은 액체 표면을 팽팽히 잡아당긴다. 예를 들어, 거미줄에 매달려 있는 물방울의 모습, 작은 동전이나 소금쟁이가 물 위에 떠다니는 모습, 풀잎 위의 빗방울이 퍼지지 않고 굴러가는 모습을 보면 액체의 표면은 팽팽히 잡아당겨진 막의 특성을 나타낸다.

액체의 분자 간 인력의 균형이 액면 부근에서 깨지기 때문에 액면 부근의 분자의 위치에너지는 액체 속의 분자보다 더 크다. 이로 인해 액체는 표면적에 비례하는 표면 에너지를 가지게 되는데, 이 에너지를 최소로 만들려는 작용이 표면장력으로 나타난다. 따라서 표면장력은 단순히 액체의 자유표면뿐만 아니라 섞이지 않는 액체의 경계면, 고체와 기체, 고체와 고체의 접촉면 등 표면의 변화에 대한 에너지가 존재할 때 보편적으로 생기는 현상이다. 이 때문에 계면장력이라고도 한다.

물질의 평형상태는 가장 낮은 에너지 상태에 해당하며, 따라서 표면장력은 단위면적당 표면에너지를 가장 낮게 하려는 작용에서 비롯된다고 할 수 있다.

2.2.2 접촉각

고체 표면의 소수성 성질은 표면 자유 에너지에 의해 지배적인 영향을 받는다. 평면에서의 표면 자유 에너지와 접촉각의 관계를 식(1)과 같이 Young에 의해 유도되었다.

$$\cos \theta_0 = \frac{\gamma_{SA} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LA}} \tag{1}$$

여기서 θ_0 는 평면에서의 접촉각을 나타내고 γ_{SA} , γ_{SL} , γ_{LA} , 는 각각 고체-기체, 고체-액체, 액체-기체간의 계면에너지를 나타낸다.

만약 고체표면이 평평하지 않고 요철이 있을 경우 접촉각은 더 이상 Young의 식을 따르지 않는다. 이 경우 접촉각은 Wenzel과 Cassie에 의해 제안된 두 가지 모델에 의해 결정된다. 이 때 고체표면의 거칠기는 액체방울의 크기보다 현저히 작다고 가정한다. Wenzel의 모델은 Fig.3(a)와 같이 요철이 있는 고체 표면에 액체방울을 떨어뜨렸을 때, 액체방울이 요철의 바닥까지 완전히 적시는 경우를 가정한 것이다. 이 때의 접촉각 θ_r^w 은 다음 식으로 표시된다.

$$\cos \theta_r^w = r \cos \theta_0 \tag{2}$$

$$r = \frac{A_{SL}}{A_F} \tag{3}$$

여기서 r은 액체방울이 고체 표면에 닿는 면적 A_{SL} 과 상부에서 투영된 면적 A_F 의 비를 나타내며, 거칠기율 (roughness factor)로 정의한다.

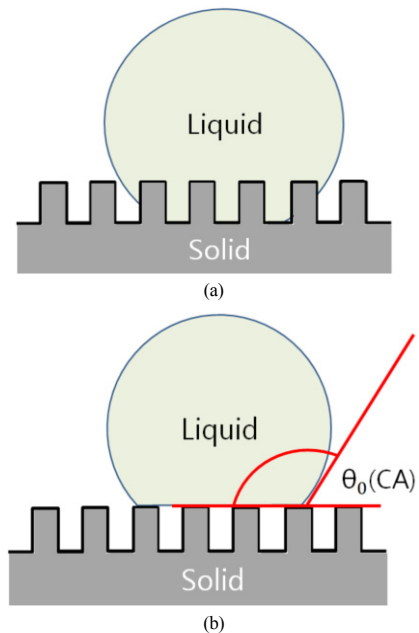


Fig. 3. Contact angle model for the heterogeneous surface. (a) Wenzel's model (b) Cassie's model

Cassie의 모델은 Fig. 3(b)에서와 같이 요철이 있는 고체 표면에 액체방울이 떨어졌을 때, 액체방울이 요철에 의해 떠받쳐서 요철위에 얹혀있는 경우를 가정한 것이다. 이때의 접촉각 θ_r^c 는 다음과 같이 계산된다.

$$\cos \theta_r^c = f_s (1 + \cos \theta_0) - 1 \quad (4)$$

$$f_s = \frac{A_{SL}}{A_c} \quad (5)$$

여기서 f_s 는 액체 방울이 실제로 고체 표면에 닿는 면적 A_s (돌출된 면적)과 상부에서 투영된 면적 A_c 의 비를 나타내며, Solid fraction으로 정의한다.

2.2.3 표준화한 연잎의 돌기형상에서의 접촉각

연잎의 돌기는 Fig. 4과 같이 마이크로 크기의 큰 돌기위에 나노 크기의 작은 돌기가 솟아있는 형태로 되어 있다.

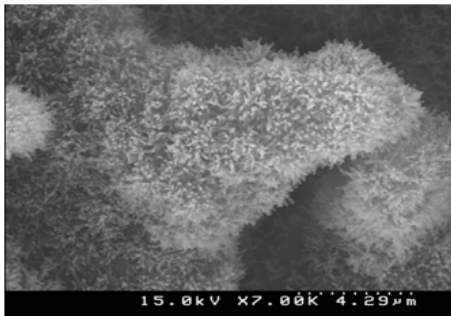


Fig. 4. Lotus structures image observed by the SEM

이러한 구조는 다음 Fig. 5와 같이 단순화 시켜 표현할 수 있다. Wenzel의 모델과 Cassie의 모델을 적용하면 3가지 형태의 젖음 mod가 나온다.

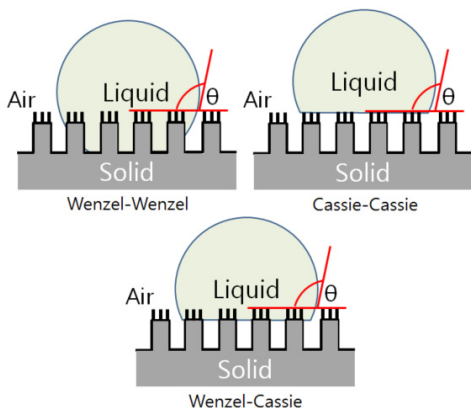
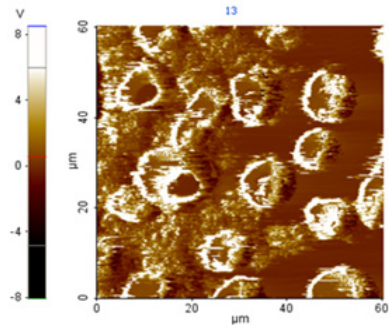


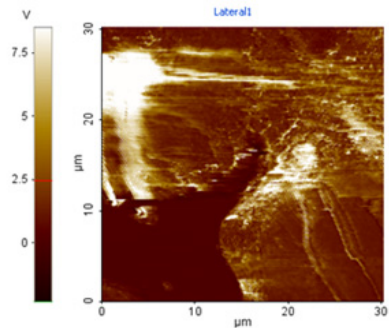
Fig. 5. Three types of wetting mode

Cassie-Cassie 모델을 제외하고는 Micro-Nano 복합 구조가 됐을 때, 마이크로 단순 구조보다 A_{SL} 이 증가하므로 접촉각이 더 크게 된다. 따라서 마이크로 크기의 큰 돌기뿐만 아니라 나노 크기의 작은 돌기 역시 연잎의 초소수성에 기인한다는 결론을 도출할 수 있다.

2.3 실험 결과



(a)



(b)

Fig. 6. LFM (a)Lateral force of lotus (b)Lateral force of general leaf

Fig. 6은 연잎과 일반잎의 LFM 비교사진으로 일반잎은 돌기가 없는 것을 볼 수 있고 이에 반해 연잎에는 돌기들이 형성되어있는 것을 볼 수 있어 돌기에 의해 연잎 효과가 일어나고 있음을 예측할 수 있다. Fig. 7은 광학 현미경으로 연잎의 표면을 각각 4배율, 10배율, 20배율로 측정하였다.

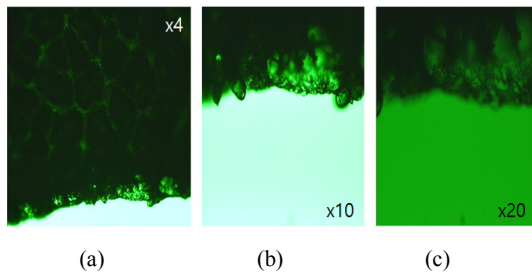


Fig. 7. Shape of the lotus leaf surface using an optical microscope (a) Magnification is 4 times (b) Magnification is 10 times (c) Magnification is 20 times

Fig. 8의 연잎 SEM 측정 결과를 보면 표면에 무수히 많은 돌기 들이 있었고 그 돌기에 또 다시 나노 크기의 미세돌기들이 있는 것을 볼 수 있다. 이 돌기와 미세돌기들의 영향으로 각 돌기마다의 표면 장력이 형성되어 연잎효과가 생성되었음을 알 수 있다.

이를 바탕으로 돌기의 크기와 돌기표면의 형상 및 표면 마찰을 알기 위해 AFM, LFM 측정을 하여 Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11로 나타내었다.

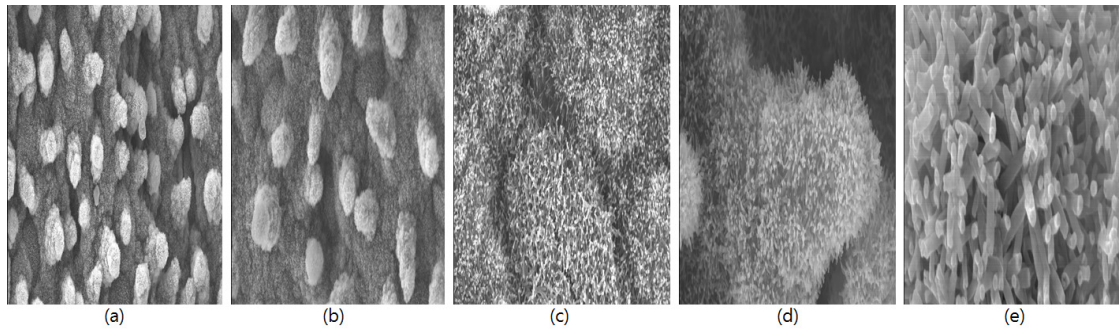


Fig. 8. Lotus leaf surface of measured the SEM (a) 30µm (b) 23.1µm (c) 6µm (d) 4.29µm (e) 1µm

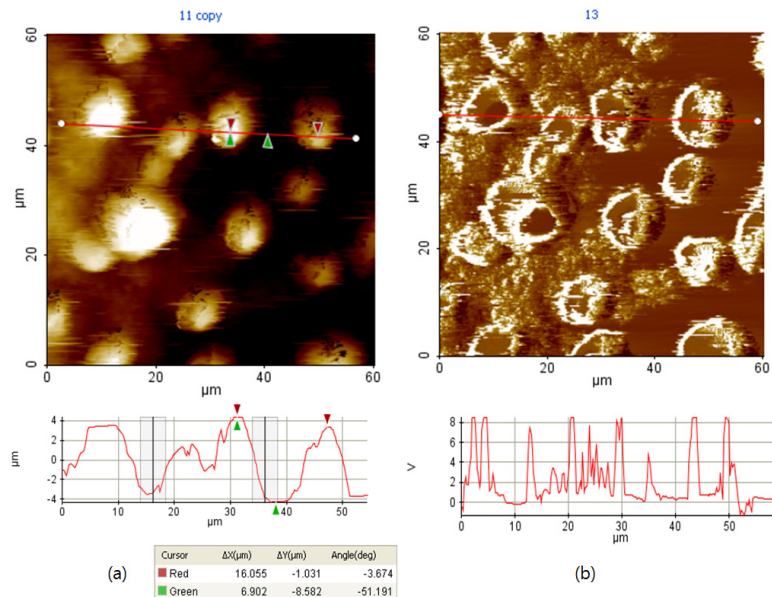


Fig. 9. 2D image of lotus leaf surface (a) AFM topograph image (b) LFM image

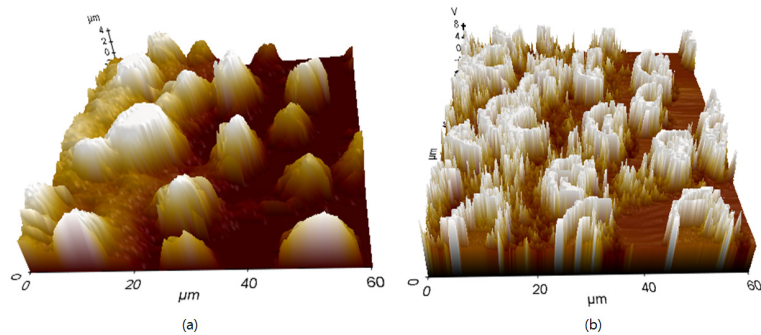


Fig. 10. 3D image of lotus leaf surface (a) AFM topograph image (b) LFM image

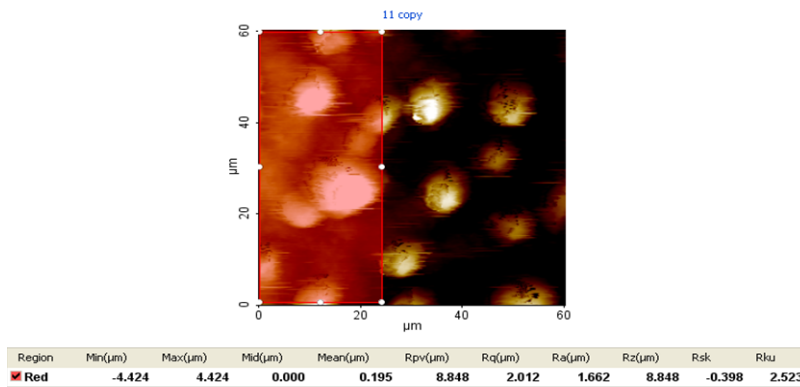


Fig. 11. Surface roughness of lotus leaf surface

Fig. 10을 통하여 표면의 돌기 분포 및 형상을 알 수 있으며 Fig. 9의 topograph와 LFM 이미지를 통해서 돌기의 크기가 직경 약 10μm이고 높이가 약 8μm로 이루어져 있으며 돌기의 정점과 바닥과의 각도가 약 50도로 돌기의 형상이 수직기둥모양이 아닌 경사로 이루어져 있음을 알 수 있다. 또한 LFM 이미지를 보면 돌기의 경사로 캔틸레버가 이동할 때 마찰이 증가하였다가 이후 정점에서 이동시에는 다시 초기의 마찰로 돌아가는 것을 볼 수 있다. 따라서 표면과 돌기 사이의 재질적 마찰의 차이는 없는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 11을 보면 20μm 영역에서의 표면의 거칠기가 약 1.6μm 정도로 매끄러운 표면을 가지고 있다.

3. 결론

연잎의 소수성은 표면에 있는 미세한 돌기들에 의해 나타난다. 이 돌기는 물의 표면장력을 극대화 시키고, 이

로 인해 물방울이 있는 표면에서 둥글게 뭉쳐서 구를 수 있게 해주는 역할을 한다.

Young의 법칙에 기초한 Wenzel의 법칙과 Cassie의 법칙은 보다 정확한 접촉각을 구할 수 있는 방법이며, SEM을 통해 살펴본 연잎의 돌기구조로부터 이 법칙들을 적용시켜 보았다. 연잎과 같이 돌기로 인한 굴곡이 심하여 경사각이 다양하게 분포하는 표면의 경우 AFM의 Lateral Force가 0V 주위로 불룩하게 분포하는데 비하여 일반잎과 같이 경사가 비교적 일정하고 넓게 분포된 표면의 경우 Lateral Force가 일정 값을 가지는 전압에서 불룩하게 분포하는 경향을 보였다. Micro-Nano 크기의 돌기가 소수성에 기인한다고 봤을 때, 소수성의 척도를 Lateral Force의 결과로 어느 정도 예측할 수 있다. 이는 연잎과 같이 불규칙적인 표면의 소수성을 판단할 때, Wenzel의 모델이나 Cassie의 모델을 적용시키기 위하여 규칙적인 표면구조로 단순화 시키는 과정이 필요 없이 바로 예측가능하다는 부분에서 큰 의미를 가진다.

Acknowledgments

영남대학교 기계공학부 공과학과제팀 졸업생인 하동수, 오정탁, 이종서, 김성한군에게 감사사를 표한다.

References

- [1] J. I. Lee, "The smartware using for the Solar Cell Energy", Journal of Korea Soc. of Mechanical Technology, Vol. 6(2), pp.31-37, 2004.
- [2] Y. C. Jung, B. B, "Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows", Journal of physics Condensed Matter 22, December, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/22/3/035104>
- [3] H. W. Kim, H. E. Kim, V. S, "Stimulation of osteoblast responses to biomimetic nanocomposites of gelatin-hydroxyapatite for tissue engineering scaffolds", Journal of Biomaterials 26, pp. 5221-5230, January, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.01.047>
- [4] Y. Zhang, J. R. Venugopal, A. E. Turki, S. Ramakrishna, B. Su, C. T. Lim, "Electrospun biomimetic nanocomposite nanofibers of hydroxyapatite/chitosan for bone tissue engineering", Journal of Biomaterials 29, pp. 4314-4322, July, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.07.038>
- [5] L. Jiang, Y. Zhao, J. Zhai, "A Lotus-Leaf-like Superhydrophobic Surface: A Porous Microsphere/Nanofiber Composite Film Prepared by Electrohydrodynamics", Journal of Angew. Chem., pp. 4438-4441, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ange.200460333>
- [6] B. Bhushan, Y. C. Jung, A. Niemiets, K. Koch, "Lotus-Like Biomimetic Hierarchical Structures Developed by the Self-Assembly of Tubular Plant Waxes", Journal of Langmuir, pp. 1659-1666, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/la802491k>
- [7] M. Nosonovsky, "Multiscale Roughness and Stability of Superhydrophobic Biomimetic Interfaces", Journal of Langmuir, pp. 3157-3161, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/la062301d>
- [8] M. Qu, G. Zhao, X. Cao, J. Zhang, "Biomimetic Fabrication of Lotus-Leaf-like Structure Polyaniline Film with Stable Superhydrophobic and Conductive Properties", Journal of Langmuir, pp. 4185-4189, January, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/la703284f>
- [9] D. M. Spori, T. Drobek, S. Zurcher, M/ Ochsner, C. Sprecher, A. Muhlebach, N. D. Spencer, "Beyond the Lotus Effect: Roughness Influences on Wetting over a Wide Surface-Energy Range", Journal of Langmuir, pp. 5411-5417, February, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/la800215r>
- [10] D. Y. Lee, J. S. Shim, "Evaluation of the permissible floor vibration level for the scanning probe microscopes and analysis of the floor vibration properties" Journal of Korea Soc. of Mechanical Technology, Vol. 11 (1), 5 page, 2009.
- [11] D. I. Kim, D. T. Vu, Q. Huang, D. Y. Lee, "Transition in micro/nano-scale mechanical properties of ZrO₂/multi-wall carbon nanotube composites", Journal of Ceramic Society of Japan vol. 122 (12), pp.1028-1031, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2109/jcersj2.122.1028>
- [12] D. Bachmann, C. Hierold, "Determination of full-off forces of textured silicon surfaces by AFM force curve analysis", Journal of Micromech. Microeng. vol. 17, pp. 1326-1333, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/17/7/015>

이 주 희(Ju-Hee Lee)

[준회원]



- 2014년 2월 : 영남대학교 기계시스템전공 (기계공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 일반대학원 기계공학과 석사

<관심분야>

나노 메카트로닉스, 전자기학

이 동 연(Dong-Yeon Lee)

[정회원]



- 1997년 2월 : 고려대학교 기계공학과 (공학사)
- 1999년 2월 : 한국과학기술원 기계공학 (공학석사)
- 2007년 2월 : 한국과학기술원 기계공학 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2008년 8월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

나노 메카트로닉스, 나노 설계, 원자 현미경