

## 식물잎의 표면형상 및 마이크로-스케일에서의 마찰 특성

김홍준 · 아르빈드 싱 · 김진석 · 윤의성<sup>†</sup>

한국과학기술연구원 마이크로시스템연구센터

### Surface Characteristics and Micro-Scale Friction Property of Natural Surface

Hongjoon Kim, R. Arvind Singh, Jinseok Kim and Eui-Sung Yoon<sup>†</sup>

Microsystem Research Center, KIST

**Abstract** – Surfaces found in nature, including biological surfaces have been providing inspiration to modify/fabricate artificial surfaces as solutions for tribological applications. As an example, the concept of ‘lotus-effect’ has motivated tribologists world wide to modify/fabricate surfaces for enhanced tribological performance. These were done by creating nano/micro-scale asperities on various surfaces using ion beam milling and ion-beam assisted roughening. In order to understand the attributes of natural surfaces, which are inspirational to tribologists, we characterized the surface of two natural surfaces-Nelumbo nucifera (lotus) and Colocasia esculenta leaves. Further, we evaluated their micro-scale friction property, both in their fresh and dried conditions. The characterization of surfaces was conducted using a confocal microscope and SEM, which involved the evaluation of size and distribution of protuberances. The micro-scale friction property was evaluated using a ball-on-flat type micro-tribo tester, under reciprocating motion. A soda lime glass ball (2 mm diameter) was used in these tests. Tests were conducted at the applied normal load of 3000  $\mu$ N, at a sliding speed of 1 mm/sec for a scan length of 3 mm. All experiments were conducted at ambient temperature ( $24 \pm 1^\circ\text{C}$ ) and relative humidity ( $45 \pm 5\%$ ). It was observed that the friction behaviour of the natural surfaces was influenced by their surface characteristics (morphology and distribution of protuberances) and also by the condition (fresh or dried) in which they were tested.

**Key words** – surface characteristics, friction, lotus, colocasia, micro.

### 1. 서 론

MEMS(Micro Electro Mechanical System)/NEMS (Nano Electro Mechanical System)등의, 제작-가공기술의 발전으로 인해 미소 기계요소들의 응용이 증가하고 있다. 그러나, 이들 미소기계요소들에서는 기존의 일반적인 기계에서 사용되는 윤활제의 사용이 불가능 하여, 미세부품들 사이에서 발생하는 마찰력은 각종 작동불능, 신뢰성 저하, 파손 등의 문제를 야기시키고 있다 [1]. 이러한 미소기계요소에서의 마찰에 의한 손실을 방지하기 위한 연구가 진행되고 있다.

이 분야의 연구방향 중 하나는 화학적으로 표면의 성질을 변화시켜 표면에너지를 감소시키고 소수성화 시킴으로써 마찰력을 감소시키는 것이다. 이러한 표면의 화학적 변화방법으로는 DLC(Diamond Like Carbon) [2], 불화탄소(Fluorocarbene) 등의 박막코팅이나 LB (Langmuir-Blodgett)박막[3], 자기조립단분자막(Self-assembled monolayer)[4] 등의 코팅이 연구되고 있다.

다른 하나는 물리적으로 표면 형상을 변화시켜 실접촉 면적을 감소시킴으로써 표면에서의 응착력과 마찰력을 감소시키는 방법이다. 이처럼 물리적으로 표면형상을 변화시키는 방법으로는 roughening, texturing[5,6] 등이 있으며, 최근에는 연꽃, 토란과 같은 식물들의 잎에서 나타나는 초소수성의 특징에 주목하여 이를 모방

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : esyoon@kist.re.kr

함으로써 마찰력을 줄이고자 하는 연구가 진행되고 있다[7].

이들 잎에서의 초소수성은 표면의 불규칙한 돌기들과 표면을 덮고 있는 왁스성분에 의한 것으로 알려져 있다. 표면돌기들은 접촉하는 물체와의 실접촉면적을 줄여들게 하며 이로 인해 표면에서의 응착력이 감소하게 된다. 응착력이 마찰력과 밀접하게 관련이 있음을 보여주는 여러 연구결과들로부터 연꽃 잎과 같이 작은 응착력을 갖는 표면에서는 마찰력 또한 매우 작을 것이다. 따라서 연꽃 잎의 표면을 모방함으로써 표면에서의 마찰력을 감소시킬 수 있을 것으로 기대되어지고 있다.

본 연구에서는 이러한 표면형상을 모방하기위해 실제 잎들의 표면 형상을 SEM(Scanning Electric Microscope) 및 공초점현미경(Confocal Microscope)을 이용하여 정밀하게 관찰하고, 수분접촉각 측정을 통해 초소수성 정도를 확인하고 마찰측정 실험을 통하여 실제 잎들의 표면마찰 특성들을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

자연으로부터 얻은 식물 잎 실험 시편으로는 소수성이 우수하다고 알려져 있는 연꽃(*Nelumbo nucifera*)과 토란(*Colocasia esculenta*)잎을 사용하였다. 표면의 소수성을 측정하기 위해서 contact anglemeter(SEO, Phoenix 300series)를 사용하여 수분접촉각을 측정하였다. 수분접촉각은 시편의 친수성 혹은 소수성 여부를 판단하는 기준이 되며, Fig. 1에 보여주는 바와 같다.

표면형상은 SEM과 공초점현미경식 표면거칠기 측정장치(Surface profilometer)를 사용하여 측정하였다. 마이크로 스케일에서의 마찰력 측정은 Fig. 2에서 보

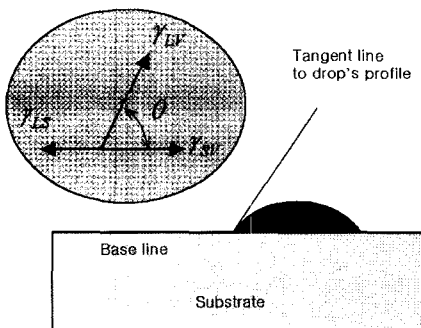


Fig. 1. Definition of water contact angle.

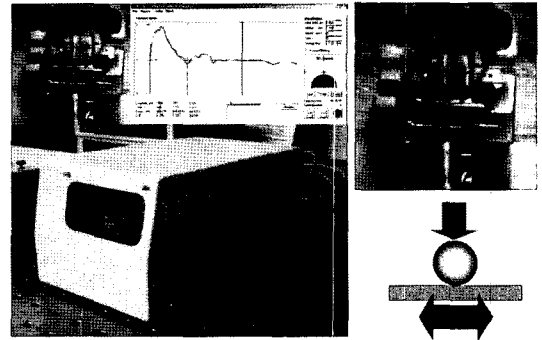


Fig. 2. A view of reciprocating micro-tribotester.

는 바이 갈은 왕복동 마찰시험장치를 사용하였다. 본 실험에서는 지름이 2 mm인 soda lime glass ball을 사용하였으며, 최대 왕복 stroke는 3 mm, 수직하중은 3000  $\mu$ N, 이송속도는 1 mm/s였다. 측정 시에는 온도  $24 \pm 1^\circ\text{C}$ , 습도  $45 \pm 5\%$ 를 유지하도록 하였다.

실험은 약 1시간 동안 왕복운동시의 마찰력을 측정하였으며, 마찰력이 안정적인 값을 나타내는 구간에서 마찰력의 평균값으로부터 마찰계수를 구하였다. 각각의 시편에 대해 3회 이상의 측정결과를 평균하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. SEM 이미지

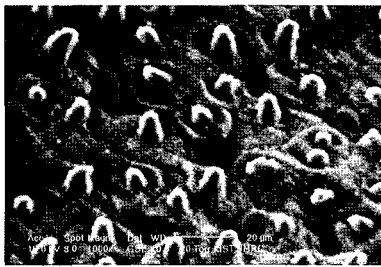
Fig. 3에서는 연꽃 잎과 토란 잎의 SEM이미지를 보여주고 있다. 연꽃 잎의 경우 마르기 전후의 SEM이미지에 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 반면 토란 잎의 경우 두툼하게 부풀어 오른 형태가 마른 후에 체적이 급격히 줄어들면서 분화구 형태로 함몰하면서 중심부에 가시형태의 돌기를 형성하는 것으로 나타났다.

### 3-2. 공초점 현미경 이미지

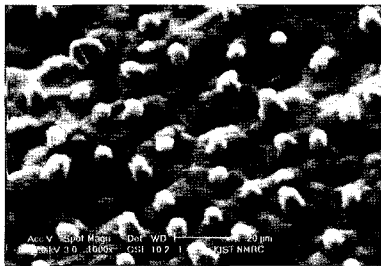
Fig. 4는 공초점현미경에 의해 측정한 연꽃 잎과 토란 잎의 3차원 이미지이다. 연꽃 잎의 표면형상은 SEM에서의 이미지와는 다르게 대체적으로 마르기 전의 형상이 마른 후에 비해 약간 두툼하게 나타나고 있다.

토란 잎의 경우에는 SEM에서 확인한 바와 같이 신선한 잎과 마른 잎의 이미지가 확연히 달랐으며, 신선한 잎이 마른 잎에 비해 큰 곡률반경을 갖게 되어 접촉시 실접촉면적이 커지게 됨을 알 수 있다.

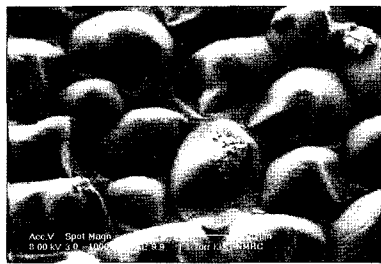
Fig. 5에서는 하나의 돌기에 대한 공초점 현미경 profile을 보여주고 있다. 이러한 개별 돌기에 대한



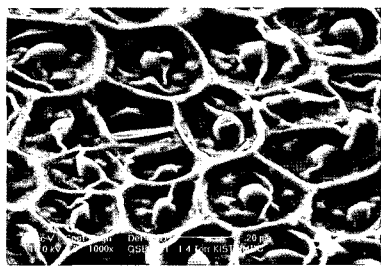
(a)



(b)



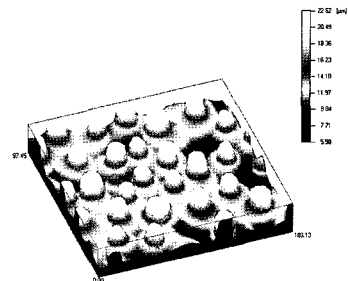
(c)



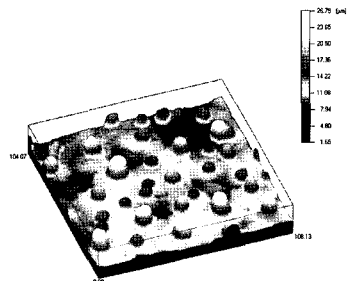
(d)

Fig. 3. SEM images of lotus leaf both (a) fresh and (b) dried and colocasia leaf both (c) fresh and (d) dried.

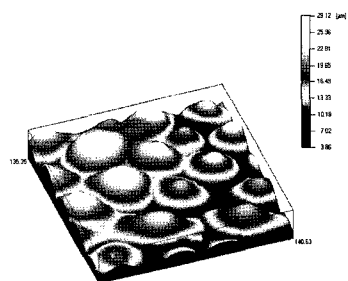
profile에서 연꽃 잎에서는 신선한 잎과 마른 잎의 돌기 높이와 폭이 각각 14  $\mu\text{m}$ , 13.5  $\mu\text{m}$  정도로 큰 차이가 없었으나, 토란 잎에서는 신선한 잎에서의 돌기의 높이가 13.5  $\mu\text{m}$ 에서 마른 후에는 6.5  $\mu\text{m}$ 로, 폭은 40  $\mu\text{m}$ 에서 12  $\mu\text{m}$ 로 돌기의 형상 및 크기가 많이 변화하였음을 보여주고 있다.



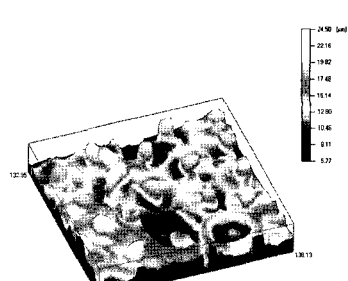
(a)



(b)



(c)

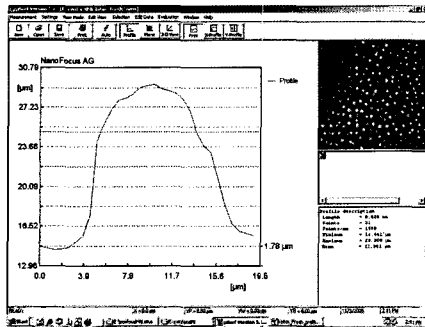


(d)

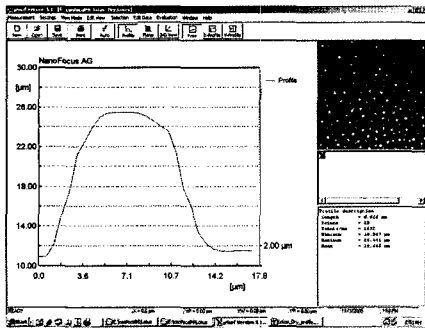
Fig. 4. 3D images by confocal microscope of lotus leaf both (a) fresh and (b) dry and colocasia leaf both (c) fresh and (d) dry.

### 3-3. 수분접촉각

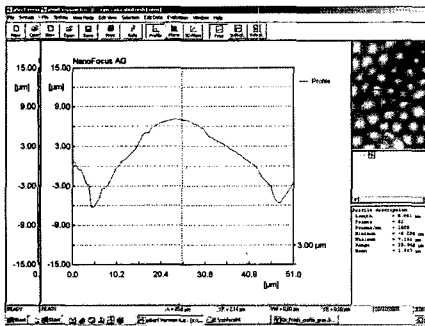
Table 1은 연꽃 잎과 토란 잎이 신선한 경우와 마른 후의 수분접촉각 측정 결과를 나타내고 있다. 연꽃 잎에서는 표면이 극소수성이라 물방울이 표면에 붙지 않



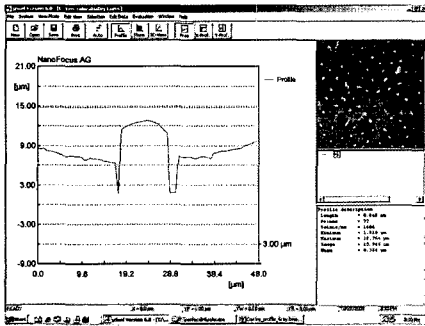
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. Line profiles of confocal microscope images of lotus leaf both (a) fresh and (b) dry and colocasia leaf both (c) fresh and (d) dry.

Table 1. Water contact angles

Material	Water contact angle
Lotus (Fresh)	162
Lotus (Dry)	160
Colocasia (Fresh)	164
Colocasia (Dry)	160

이서 수분접촉각의 측정이 불가능 하여 기존에 측정된 값을 인용하였다[8].

연꽃 잎에서의 경우 신선한 잎에서나 마른 잎에서 모두 표면에서의 인력이 거의 작용하지 않는 극소수성을 나타내었다.

토란 잎의 수분접촉각 역시 마른 후에도 매우 큰 값을 나타내었다. 이는 SEM과 공초점현미경 등을 통해 확인한 표면형상의 변화에 크게 영향을 받지 않고, 잎 표면 자체의 자유표면에너지가 매우 작음을 알 수 있다.

3-4. 마이크로 마찰실험

신선한 잎과 마른 후의 연꽃과 토란 잎에 대한 마이크로-스케일에서의 마찰 시험을 수행하였으며, 자세한 사항은 2장에서 언급한 바와 같다.

Fig. 6(a), (b)는 각각 신선한 잎과 마른잎의 마찰계수 값을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 연꽃 잎과 토란 잎에서는 신선한 잎의 마찰계수가 마른 후에 비해 매우 낮음을 알 수 있었다. 특히 신선한 연꽃 잎과 토란 잎의 마찰계수는 0.005 이하의 매우 낮은 값을 나타내고 있었다.

이와 같이 마찰계수가 수분의 건조에 따라 증가한 것은 시료가 생체재료라는 점에 주목할 필요가 있다. 즉, 신선한 잎에서는 수분으로 인해 발휘되던 생체조직으로서의 기능이 수분의 증발과 함께 저하되어, 정상적인 생체 표면에서 나타나던 저마찰현상이 사라졌음을 알 수 있다. 이전의 연구 결과에 의하면, 연꽃 혹은 토란과 같이 초소수성을 나타내는 식물 잎의 표면에는 왁스성분이 존재하며, 이러한 왁스성분은 또한 내부에 함유된 수분과 기능적으로 연관되어 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 표면에 존재하던 왁스성분을 제거 하더라도 일정시간이 지나면 왁스성분이 재생되는 현상이 나타나는데, 이는 왁스성분이 수분과 함께 식물 잎 내부에서 표면으로 이동하기 때문에 나타나는 것으로 추정되고 있다[9]. 이러한 잎 표면에 존재하는 왁스 성분은 저마찰 현상을 야기시킴을 알 수 있었다.

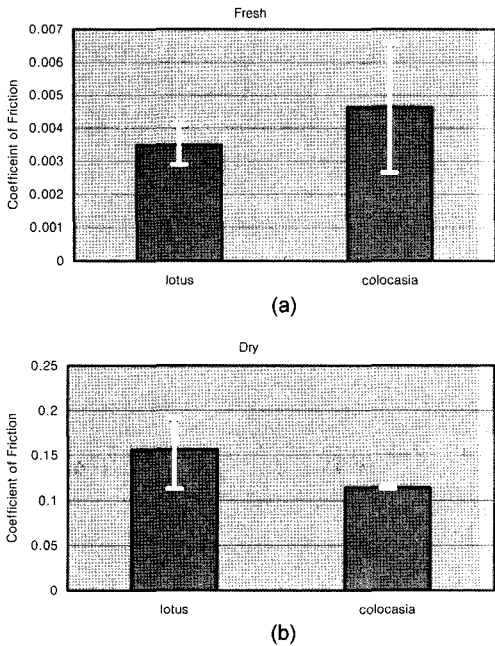


Fig. 6. Coefficient of friction at micro-scale of Lotus and colocasia in (a) fresh condition (b) dry condition.

이러한 추정은 본 마찰 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 우선, 신선한 잎에서는 표면에서 존재하는 왁스성분에 의해 낮은 마찰력과 높은 수분접촉각을 나타내게 되는데, 건조되어 수분이 제거되면 이러한 기능이 작용하지 않아 신선한 잎에 비해 높은 마찰력을 나타내게 된다.

한편, 신선한 잎에서는 연꽃 잎에서의 마찰계수가 토란 잎에 비해 낮은 것으로 나타났다(Fig. 6(a)). 이는 시편 불과 잎 표면이 상대 접촉시 연꽃 잎의 경우 표면 돌기들에 의해 평평한 토란 잎에서 보다 접촉 면적이 작아짐으로 나타난 결과로 사료된다. 이처럼 실접촉면적이 작아질 경우 마찰력은 실접촉면적에 비례한다는 마찰력의 기본법칙에 따라 마찰력이 감소하게 됨을 알 수 있다[10].

Fig. 6(b)에서 마른 후 토란 잎의 마찰계수가 신선한 잎의 경우와는 다르게 연꽃 잎에 비해 작아지는 것을 알 수 있는데, 이는 신선한 토란 잎과 마른 후의 토란 잎 표면의 형상변화로 인한 것으로 사료된다. 앞에서 설명하였듯이 연꽃 잎의 경우 건조 전후의 표면형상에는 큰 차이가 없었는데, 토란 잎의 경우 건조 전후의 표면형상에 많은 변화가 있었다. 마른 후 오히려 토란 잎의 형상은 시편 불과의 접촉면적을 줄어뜨리게 하

여 마찰력이 감소되었음을 알 수 있었다[10].

최근에는, 생체조직의 표면특성을 실생활에서 응용하고자 하는 많은 연구들이 이루어지고 있다. 그 예로서, 연꽃잎 표면의 초소수성을 자기세정창문(Self-cleaning window)이나 녹 방지도료 등을 만드는데 응용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[11]. 또한, 게코도마뱀의 강모를 모방한 폴리머 재료를 이용한 인공접착물이 제작되고 있다[12]. 이러한 생체조직 응용연구에 있어서 어떻게 조직의 표면으로부터 인공적인 표면형상을 제작하고 개선하는가에 대한 해답을 구하기 위해, 생체조직의 표면을 연구하고 특성을 분석하는 일들이 더욱더 중요해지고 있다.

#### 4. 결 론

신선한 잎과 마른 후의 연꽃 잎과 토란 잎의 표면을 관찰하고 마이크로-스케일에서의 마찰특성을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연꽃 잎의 경우에는 신선한 잎과 마른 잎의 표면형상의 변화가 크지 않았으나, 토란 잎의 경우에는 표면 현상의 변화가 크게 나타났다.
2. 연꽃 잎과 토란 잎 모두 표면의 왁스 성분으로 인해 초소수성을 나타내었다.
3. 마찰력은 신선한 잎이 마른 잎에서 보다 아주 작게 나타났으며, 이는 표면의 왁스 성분이 수분 건조 후에는 그 기능을 못하였기 때문인 것으로 사료된다.
4. 신선한 연꽃 잎에서의 마찰계수는 토란 잎의 마찰계수보다 낮게 나타났는데, 이는 표면 돌기들에 의해 접촉면적이 감소되었기 때문인 것으로 사료된다.
5. 잎이 마른 후에는 토란 잎의 마찰계수가 연꽃 잎보다 낮아졌는데, 이는 토란 잎 표면형상의 변화에 기인하는 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

1. Deng, K., Collins, R. J., Mehregany, M. and Sukenik, C.N., "Performance Impact of Monolayer Coatings of Polysilicon Micromotors," Proc. MEMS95, Amsterdam, Netherlands, Jan-Feb, 1995.
2. Houston, M.R., Howe, R.T., Komvopoulos, K. and Maboudian, M., "Diamond-like Carbon Films for Silicon Passivation in Microelectromechanical Drives," Mater. Res. Soc. Symp. Proc. pp. 383-391, 1995.
3. Ulman, A., "An Introduction to Ultrathin Organic Films from Langmuir-Blodgett to Self-Assembly,"

- Academic Press, Inc, 1991.
4. Carroro, C., Yauw, O.W., Sung, M.M. and Maboudian, R., "Observation of Three Growth Mechanism in Self Assembled Monolayers," *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 102, No. 23, pp. 4441-4445, 1998.
  5. Ando, Y. and Ino, J., "Friction and Pull-off Forces on Silicon Surface Modified by FIB," *Sensors and Actuators A*, Vol. 57, pp. 83-89, 1996.
  6. Ando, Y. and Ino, J., "Friction and Pull-off Forces on Submicron-size Asperities," *Wear*, Vol. 216, pp. 115-122, 1998.
  7. Sun, M., Luo, C., Ji, H., Ouyang, Q. Yu, D. and Chen, Y., "Artificial Lotus Leaf by Nanocasting," *Langmuir*, Vol. 21, No. 19, pp. 8978-8981, 2005.
  8. Neinhuis, C. and Barthlott, W., "Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces," *Annals of Botany*, Vol. 79, No. 6, pp. 667-677, 1997.
  9. Neinhuis, C., Koch, K. and Barthlott, W., "Movement and Regeneration of Epicuticular Waxes Through Plant Cuticles," *Planta*, Vol. 213, pp. 427-434, 2001.
  10. Bowden, F. P. and Tabor, D., "The Friction and Lubrication of Solids," Clarendon Press, Oxford, p-300, 1950.
  11. Gould, Paula, "Smart, Clean Surface," *Materials Today*, November, pp. 44-48, 2003.
  12. Autumn, K., Sitti M., Liang, Y.A., Peattie, A.M., Hansen, W.R., Sponberg, S., Kenny, W.T., Fearing, R., Israelachvili, J.N. and Full, R.J., "Evidence for van der Waals Adhesion in Gecko Setae," in *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 99, 2252, 2002.