

상어 표피 모사 리블렛 구조의 젖음성 평가

공유식 · 김태완*†

부경대학교 A⁺LINC 사업단, *부경대학교 기계공학과

Wettability of Biomimetic Riblet Surface like Sharkskin

Yu Sik Kong and Tae Wan Kim*†

A⁺LINC, Pukyong National University

*Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received May 17, 2013 ; Revised July 8, 2013 ; Accepted July 15, 2013)

Abstract – Shark skin has functionalities such as self-cleaning and antifouling; it also exhibits excellent drag reduction owing to a hierarchical structure of microgrooves and nanometer-long chain mucus drag reduction interfaces around the shark body. In this study, the wettability of a shark skin surface and its replicas are evaluated. First, a shark skin template is taken from a real shark. Then, shark skin replicas are produced directly from a shark skin template, using a micromolding technique. The quantitative replication precision of the shark skin replicas is evaluated by comparing the geometry of the shark skin template to the replica using 2D surface profiles. Contact angles at the solid-air-water interfaces are evaluated for the shark skin template and its replicas under two conditions: with and without hydrophobic coating. The results show that the microriblets on shark skin improve the hydrophobic feature and play a critical role in self-cleaning.

Keywords – shark skin(상어표피), riblet(리블렛), wettability(젖음성)

1. 서 론

상어 표면에 형성된 비늘구조는 물의 흐름 방향과 평행하게 정렬된 리블렛 형상으로 항력을 줄이고 표면 오염 방지 및 자가 세정 능력(anti-fouling/self cleaning)을 제공하는 것으로 알려져 있다. 그동안 상어 표면 및 그 산업적 응용에 대한 많은 연구가 있어왔고 이러한 연구들의 결과로 전신 수영복의 개발, 리블렛 필름 제작을 통한 비행기 및 선박 등의 운송체에 미치는 항력을 감소시켜 실질적인 에너지 소비량을 줄이는 데 많은 기여가 있어 왔다.

상어비늘에 관한 연구는 Walsh 등[1]의 연구가 시발점이 되어 최근 자연모사에 대한 관심이 증가하면서 주목받고 있다. 지금까지 진행되어 온 상어비늘에 관한

연구는 크게 상어비늘의 특성에 관한 연구와 이를 모사한 리블렛(riblet) 구조와 항력 감소효과에 대한 실험적 연구로 나눌 수 있다. Kesel & Liedert[2]는 상어 비늘처럼 각진 돌기가 형성되도록 하는 선박용 코팅제를 개발하여 선체에 달라붙는 해조류가 감소하였음을 실험적으로 밝혀내었고 Efimenko 등[3]도 상어 비늘 같은 미세한 주름을 이용하여 해조류가 달라붙지 않는 것을 실험적으로 규명하였다. Sirovich & Karlsson[4]는 상어 피부의 돌기 형태와 유사한 리블렛을 제작하여 평판에 비해 최대 8%까지 마찰저항을 감소시킬 수 있음을 보였다. Jung & Bhushan[5]은 molding 기법을 통해 리블렛 구조와 비슷한 형상의 팁을 제작하였고, 표면형상과 표면처리를 다르게 하여 실험을 통한 항력 감소의 차이를 알아냈다. Bechert & Bruse[6]는 다양한 3차원 리블렛 구조를 제작하여 여러 가지 형상 중 항력 감소 측면에서 가장 이상적인 구조를 알아내는데

†Corresponding author : tw0826@pknu.ac.kr

성공하였다. 한편 국내에서는 상어 표피와 관련된 직접적인 연구를 수행한 경우는 없으나 Choi 등[7]이 풍동실험과 수치해석을 이용하여 돛새치 표면에 존재하는 V자형 돌기가 마찰저항에 미치는 영향을 알아보고 Lee 등[8]은 PDMS micro molding 기법으로 제작한 미세 리블렛 필름에 대한 풍동실험을 통해 항력 감소 효과를 실험적으로 확인하였다. 그리고 Ko 등[9]은 네트워크형 마이크로 구조를 이용한 유체 표면마찰 감소에 관한 연구를 수행한 바 있으며 생체 모방 초소수성 표면 제작과 관련해 Suh 등[10-12]은 열성형 또는 UV성형 모세관 리소그래피 방식과 같은 bottom-up 방식 및 DLC를 이용한 hybrid 방식으로 나노 마이크로 계층구조를 제작해 대면적 초발수성 표면 제작에 관한 연구를 수행하고 있다. 또한 최근 Kim[13]은 상어 표피 형상의 접촉기계요소의 공학적 응용 가능성을 밝히기 위해 상어 표피 형상을 수치적으로 모델링하여 상어 표피 형상의 리블렛 구조 및 돌기 분포에 따른 접촉 성능을 평가하였다.

본 연구에서는 리블렛 구조의 상어표피형상에 대한 젖음각 특성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 상어 표피 및 flat epoxy 그리고 상어 표피를 두 가지 방법으로 복제한 epoxy 재질의 shark skin replica를 제작하여 젖음각을 측정하였다. Shark skin replica는 micro molding을 적용한 기법과 hot-embossing을 적용한 기법을 이용하여 epoxy 재질의 상어 표피 복제형상을 제작하였고 teflon 코팅 유무에 따른 효과도 아울러 평가하였다.

2. Shark Skin Replica 제작

상어표피 형상의 젖음성 평가를 위해 Fig. 1과 같이 shark skin template과 두 종류의 shark skin replica를 제작하였다. Shark skin template은 상어 표면을 샘플링한 후 세척 및 건조의 전처리과정을 통해 제작한 것이며 shark skin replica는 shark skin template를 이용하여 2가지 micro replication 방법을 수행하여 제작하였다. Shark skin의 전처리과정은 우선 상어 표피를 약 50 mm × 50 mm 크기로 채취하여 표피의 피하지방을 제거한 후 증류수로 세척하였다. 건조과정 시 표피의 변형을 방지하기 위해 고정 지그를 제작하여 시편을 고정시켜 동결건조기에서 -10°C에서 10 시간동안 건조시켜 비늘 형상이 그대로 유지된 shark skin template를 제작하였다.

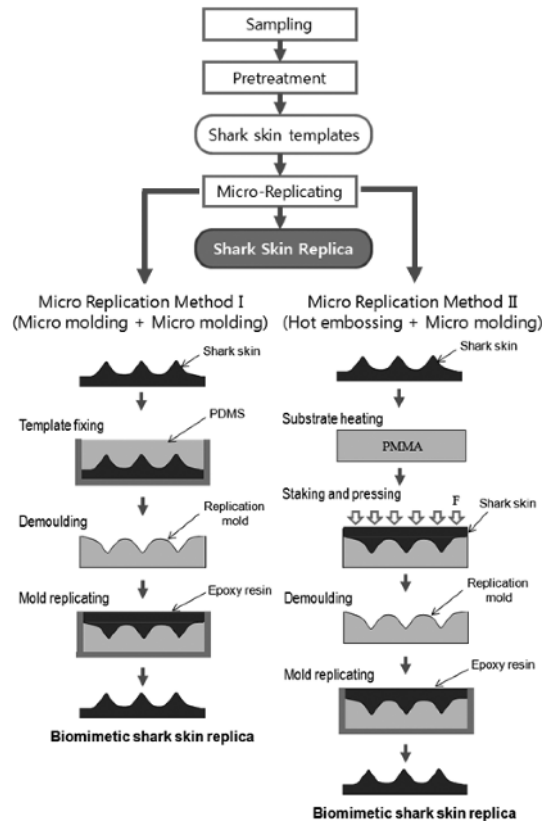


Fig. 1. Illustrations of micro replicating methods for shark skin replica.

Shark skin replica 제작을 위한 첫 번째 마이크로 복제 기법은 상어표피의 음각형상인 replication mold 및 양각 형상의 shark skin replica 모두 micro molding 방법을 적용한 것으로 그 과정은 다음과 같다. 우선 PDMS(Sylgard 184)를 경화제와 10:1의 비율로 섞어 진공챔버에서 약 10분간 공기를 제거하고 이 PDMS 혼합물을 고정된 shark skin template 위에 부은 후 진공챔버에서 수차례 기포를 제거한 후 24시간 정도 건조시켜 replication mold를 제작하였다. Shark skin replica의 재료는 액상 epoxy resin과 경화제를 100:12의 비율로 섞은 혼합물이며 molding 방법은 replication mold를 제작할 때와 동일하다.

두 번째로 적용된 마이크로 복제 방법은 상어표피의 replication mold 제작시에는 hot embossing 기법을 적용하고 양각의 shark skin replica는 micro-molding 기법을 적용한 것이다. Hot embossing시 substrate 재료는 PMMA이며 PMMA 판을 진공상태에서 105°C로

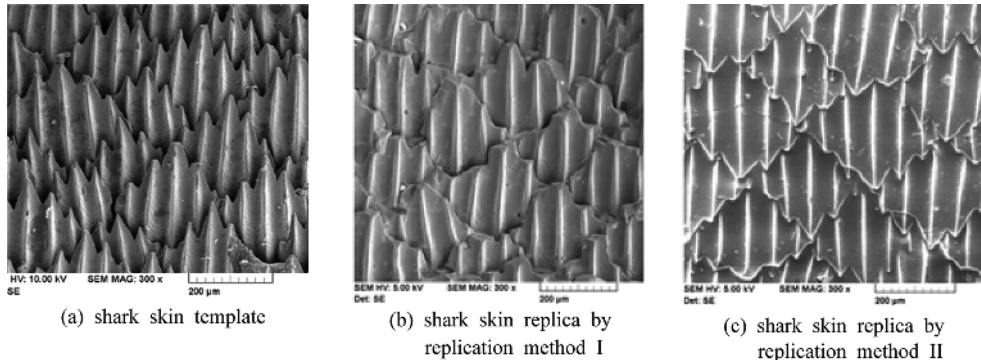


Fig. 2. SEM image of sharkskin and shark skin replicas.

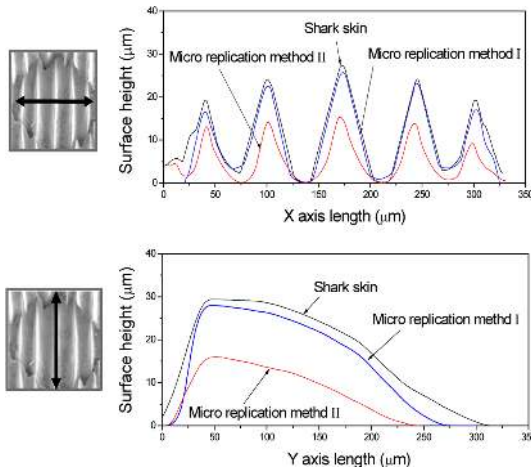


Fig. 3. Comparisons of 2D surface profiles between shark surface and shark surface replicas.

10분간 가열한 후 shark skin template 위에 75°C로 250초동안 1.2 MPa의 압력으로 일정하게 가압한 후 demoulding 공정을 거쳐 제작하였다. Fig. 2에 shark skin template 및 2가지 micro replication 접근 방법에 의해 제작된 shark skin replica들의 SEM 사진을 도시하였다.

Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 상어 표피를 구성하는 하나의 비늘은 3개에서 5개 정도의 리브구조로 이루어져 있으며 각 리브의 길이는 약 200 μm에서 300 μm 정도임을 알 수 있다. 5개의 리브가 존재하는 하나의 비늘의 전체 폭은 약 300 μm정도이며 중앙에 존재하는 리브를 중심으로 대칭적인 형상임을 알 수 있다. Fig. 3의 shark skin 프로파일을 살펴 보면 중앙에 있는 리브의 높이가 약 30 μm, 중앙의 양측면에 존재하는 두 번째 리브의 높이가 약 27 μm, 그리고 양 가장

자리에 존재하는 리브가 약 20 μm 정도임을 알 수 있다. 또한 리브 하나의 폭은 약 60 μm정도이며 리브간의 피치는 약 150 μm정도임을 확인할 수 있다.

제작한 shark skin replica들의 형상을 보다 정량적으로 평가하기 위해 surface profiler를 이용해 비늘부위의 2D profile을 비교하였다. Fig. 2의 원 상어표피의 형상과 비교해 볼 때, micro-molding mold에 의한 시편은 원 상어표피와 유사한 분포 및 등고 높이가 측정되었으나 hot embossing mold를 통해 제작된 시편은 전체적인 단면의 높이가 원 형상에 비해 등고 높이가 1/2정도 낮게 복제되었음을 알 수 있다. 따라서 Micro replication method I에 의해 제작된 시편의 프로파일이 micro replication method II로 제작된 시편의 프로파일보다 매우 우수한 것으로 나타났다. 리브와 수직인 방향의 단면을 비교한 그림에서 micro replication method I에 의해 제작된 시편의 가운데 존재하는 3개의 리브 최대높이가 원 상어표피 대비 최대 7%정도 높이가 감소되었음에 비해 micro replication method II로 제작된 시편의 경우 원 상어표피 대비 최대 44%정도 차이가 나타남을 확인할 수 있다. 또한 가운데 리브의 길이방향 단면 비교에서도 micro replication method I에 의해 제작된 시편이 micro replication method II에 의해 제작된 시편보다 프로파일 높이차가 훨씬 낮음을 확인할 수 있다. 이는 hot-embossing으로 제작된 음각물드는 micro-molding으로 제작된 것에 비해 상어 비늘의 끝단 형상은 비교적 잘 형성되지만 hot-embossing 시 부가된 압력으로 인해 상어표피가 눌러져 리블렛에 해당되는 골부위가 원래의 형상에 비해 좁게 형성된 것을 알 수 있다. 따라서 양각형상을 몰딩할 때에도 이러한 결과가 영향을 미쳐 micro replication method II로 제작된 shark skin

replica는 micro replication method I의 결과에 비해 복제 정밀도가 다소 낮은 것으로 생각된다. 본 연구에서 사용된 시편들은 한 개의 shark skin template당 한 개의 shark skin replica를 복제하여 적용한 것으로 몰드의 내구성에 대해서는 고려하지 않았으며 향후 산업적 응용 측면에서 몰드의 내구성에 관한 연구가 다루어져야 할 것으로 사료된다.

3. 젖음성 실험 결과

이상과 같이 형성된 shark skin template 및 shark skin replica들의 상어표피의 젖음성 평가는 2가지 방법으로 측정하였는데 첫 번째는 제작된 시편들을 그대로 측정하였고 두 번째는 제작된 시편들에 소수성 표면 처리를 한 후 측정하였다. Shark skin template 및 shark skin replica들의 소수성 표면 처리를 위해서 스핀 코팅법을 이용하여 Teflon 박막 코팅을 수행하였다. Teflon 박막은 6 wt% Teflon AF를 불화탄소 용매에 희석하여 제조하였으며 2000 rpm으로 스핀속도로 코팅 후 핫플레이트에서 200°C로 건조시켜 박막의 접착력을 강화시켰다. 효율적인 스핀 코팅조건을 도출하기 위해 농도가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 wt%인 Teflon 용액을 제조하여 평평한 epoxy resin 판에 각각 코팅한 후 박막 두께에 대한 그 접촉각의 변화를 살펴보았다. Fig. 4와 같이 0.2 wt%이상인 Teflon 용액에서 접촉각의 증가가 더 이상 나타나지 않아 0.2 wt%의 조건을 설정하여 상어 표피 샘플들의 소수성 코팅 제작에 적용하였다.

접촉각 측정은 제작된 3가지 상어표피 형상과 비교를 위해 flat epoxy 시편을 추가하여 4가지 표면에 대

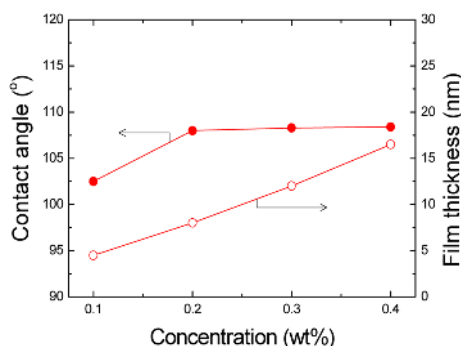


Fig. 4. Variations of contact angle and film thickness with teflon coating concentration.

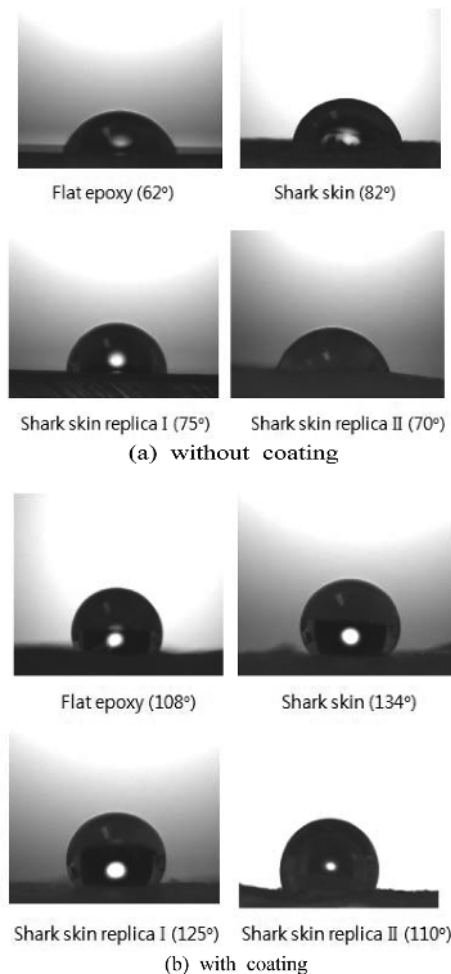


Fig. 5. Static contact angles of droplets in solid-air-water interface on four different surfaces.

해 solid-air-water interface 조건에서 수행하였으며 그 결과를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 flat epoxy 표면에 비해 상어표피를 모사한 리블렛 구조를 가진 shark skin replica 표면들이 높은 접촉각을 보임을 확인할 수 있으며 micro replication method I에 의해 제작된 표면이 micro replication method II에 의해 제작된 표면보다 높은 접촉각을 유지하면서 실제 상어표피에 대한 측정값에 근접함을 알 수 있다. 따라서 replication mold 제작시 micro molding을 적용한 기법이 상어표피 형상의 복제에 보다 유용함을 확인하였다.

Fig. 6은 60°의 경사각에서 접촉각의 이력을 측정했던 것인데 리블렛 구조를 가진 표면의 경우 표면 코팅을

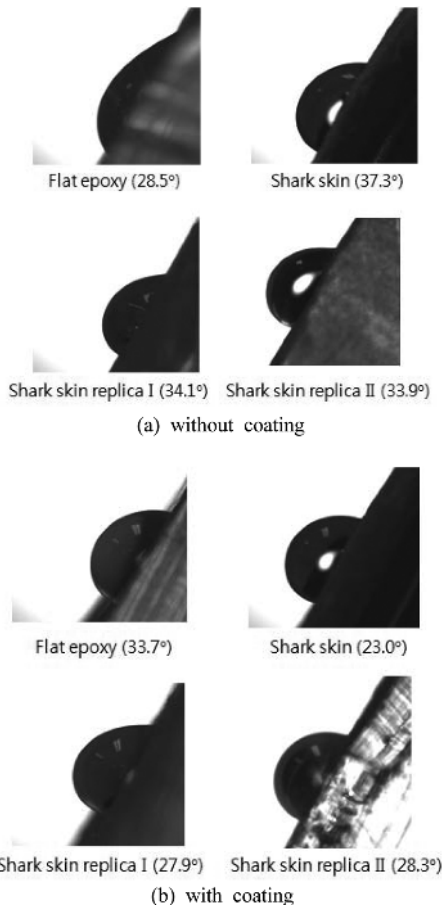


Fig. 6. Static contact angles of droplets in solid-air-water interface on four different surfaces.

한 표면이 접촉각 이력이 적음을 알 수 있다. 또한 60°의 경사각까지 모든 표면에서 물방울이 흘러 내리는 현상을 발견할 수 없었는데 이는 소수성 표면이라 하더라도 물방울과 표면간의 높은 응착력에 의해 물방울이 구르지 않는 petal effect 현상인 것으로 사료된다.

본 연구는 상어 표피를 복제한 시편에 대한 젖음성에 대한 평가를 수행한 것으로 향후 상어 표피의 리블렛 구조의 최적화를 위해 단일 리블렛 돌기의 형상 및 리블렛들의 공간적 분포에 대한 연구가 추가되어야 할 것으로 사료된다. 이를 통해 리블렛 구조의 마찰 저항 감소 능력 및 연료전지 분리판에 존재하는 마이크로/나노 유체 채널시스템의 개발과 같은 추가연구가 가능할 것이다. 현재 사용되고 있는 미소유체 기술은 채널 내부에서 벌크 유체가 흐르는 데 반해, 상어 표피 리블렛 구조의 소수성 패터닝에 의한 방울 기반 미소 유

체시스템을 제작함으로써 세척이 쉽고 모세관이 막힐 가능성을 원천적으로 제거할 수 있다는 점에서 향후 추가 연구가 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 리블렛 구조의 상어표피형상에 대한 젖음각 특성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 상어 표피의 건조와 세척과정만을 거친 shark skin template 외에 micro molding 기법 및 hot-embossing 기법을 적용하여 두 종류의 shark skin replica를 제작하였다. 제작된 복제 시편의 표면 프로파일을 측정된 결과, micro molding을 적용한 복제 시편이 hot-embossing 기법에 의한 시편 보다 상어표피 형상의 복제 정밀도가 우수함을 확인하였다. 또한 접촉각 측정된 결과에서는 평평한 표면에 비해 상어표피를 모사한 리블렛 구조를 가진 shark skin replica 표면들이 높은 접촉각을 보였고 teflon 코팅에 의해 그 효과가 더욱 증가함을 확인할 수 있었다. 이상의 상어표피형상의 젖음성 특성 평가를 통해 접촉기계요소 및 MEMS구조의 표면 오염 방지 및 자가세정 성능향상을 위한 적용가능성을 확인할 수 있으며, 향후 최적 패턴 설계 및 제작 기술을 통해 상어표피 모사기술을 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No2001-0009281).

References

- Walsh, M. J., "Turbulent boundary layer drag reduction using reblets," *Aerospace Sciences Meeting*, 20th, 1982.
- Genzer, J. and Marmur, A., "Biological and synthetic self cleaning surfaces," *MRS Bulletin*, Vol. 33, pp. 742-746, 2008.
- Genzer, J. and Efimenko, K., "Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review," *Biofouling*, Vol. 22, pp. 339-360, 2006.
- Sirovich, L. and Karlsson, S., "Turbulent drag reduction by passive mechanisms," *Nature*, Vol. 388, pp.

- 753-755, 1997.
5. Jung, Y. C. and Bhushan, B. "Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows," *J. Phys. Condens. Matter.*, Vol. 22, pp. 035104, 2010.
 6. Bechert, D. W., Bruse, M. and Hage, W., "Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin," *Exper. Fluids*, Vol. 28, pp. 403-412, 2000.
 7. Sagong, W., Kim, C., Choi, S., Jeon, W. -P., and Choi, H., "Does the sailfish reduce the skin friction like the the shark skin?," *Phys. Fluids*, Vol. 20, pp. 101510, 2008.
 8. Lee, S. J. and Jang, Y. G., "Control offlow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film," *J. Fluids*, Vol. 20, pp. 659-672, 2005.
 9. Lee, S. M., Jung, I. D., and Ko, J. S., "The effect of the surface wettability of nanoprotusions formed on network-type microstructures," *J. Micromech. Mocreng.*, Vol. 18, pp. 125007, 2008.
 10. Jeong, H. E., Lee, S. H., Kim, J. K., and Suh, K. Y., "Nanoengineered multiscale hierarchical structures with tailored wetting properties," *Langmuir*, Vol. 22, pp. 1640-1645, 2006.
 11. Park, C. I., Jeong, H. E., Lee, S. H., Cho, H. S., and Suh, K. Y., "Wetting transition and optimal design for microstructured surfaces with hydrophobic and hydrophilic materials," *J. Colloid. Interf. Sci.*, Vol. 336, pp. 298-303, 2009.
 12. Rahmawan, Y., Moon, M.-W., Kim, K.-S., Lee, K.-R., and Suh, K. Y., "Wrinkled, Dual-Scale Structures of Diamond-Like Carbon (DLC) for Superhydrophobicity," *Langmuir*, Vol. 26, pp. 484-491, 2010.
 13. Kim, T. W., "3D elastic contact analysis of shark skin surface pattern," *J. KSTLE*, Vol. 28, pp. 297-302, 2012.