

리블렛 표면에서 유적의 젖음성에 대한 수치 해석

김태완*

부경대학교 기계공학과 교수

Wettability Simulation of Oil Droplet on Riblet Surface

TaeWan Kim*

Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received January 15, 2018; Revised January 25, 2018; Accepted January 30, 2018)

Abstract – The riblet structure like shark skin has been widely studied owing to its drag reduction and anti-fouling properties. In this study we simulated the wettability of an oil droplet on a riblet surface. We developed a numerical analysis method using the Wenzel equation and Cassie–Baxter equation that can estimate the contact angle with a penetrated depth of the droplet on rough surfaces. Riblet surfaces with nine scales composed of five hemi-elliptical ribs are generated numerically. The variation of contact angles with fractional depth of penetration for the generated riblet surfaces with and without coatings is demonstrated in the condition of solid-air-oil and solid-water-oil interfaces. The contact angle for the uncoated surface decreases with increasing fractional depth of penetration more drastically than that for the coated surface. For the effect of surface roughness on the contact angle of the droplet, the oleophilic surface gives lower contact angle when the surface is rougher, whereas the oleophobic surface gives higher contact angle with higher roughness. To verify the analysis results, the wetting angle was measured in the solid-air-oil interface and solid-water-oil interface for the shark-skin template and shark-skin replica. The effects of teflon coating were also evaluated. It is shown that the simulation results cover the experimental ones.

Keywords – oil droplet (유적), riblet (리블렛), wettability (젖음성), oleophobicity (소유성)

1. 서 론

상어 표면으로 대표되는 리블렛 표면 구조는 유체의 흐름 방향과 평행하게 정렬되어 항력을 줄이고 표면 오염 방지 및 자가 세정 특성(anti-fouling/ self cleaning)이 있는 것으로 알려져 있다. 그동안 상어 표면 및 리블렛 구조에 대한 많은 연구가 있어왔다[1-3]. Jung & Bhushan[4]은 flash cut CNC 밀링가공을 통해 리블렛 구조와 비슷한 형상의 틱을 제작하여 표면 형상 및 표면 처리에 따른 항력 감소의 효과를 밝혀냈다. Bechert

& Bruse[5]는 다양한 리블렛 구조를 제작하여 항력 감소 측면에서 가장 이상적인 구조를 보고하기도 하였다. Kim 등[6, 7]은 상어 표피를 마이크로 몰딩공정을 통해 리블렛 표면을 제작하여 젖음성을 평가한 바 있으며 최근에는 접촉각 시뮬레이션을 통해 리블렛구조에서 액적의 접촉각을 예측하는 모델을 개발하기도 하였다[8].

소수성(hydrophobic) 또는 친수성(hydrophilic)이라는 용어는 원래 물에 한정되어 정의된 것이나 최근에는 모든 액체에 대해 범용적으로 사용되어 왔으나 오일이나 유기 액체에 대해서는 소유성(oleophobic) 또는 친유성(oleophilic)이라는 용어를 사용하는 것이 적절할 것이다. 극성 분자에 의해 형성된 높은 에너지를 갖는 표면은 친유적인 경향이 있는 반면 비극성 분자에 의해 만들어진 낮은 에너지의 표면은 소유성 특성을 갖는 것으로 알려져 있다.

*Corresponding author: tw0826@pknu.ac.kr

Tel: +82-51-629-6142, Fax: +82-51-629-6126

<http://orcid.org/0000-0001-8171-0044>

© 2019, Korean Tribology Society

본 연구는 이전의 리블렛 구조에 대한 물방울(water droplet)의 젖음성(wettability)을 밝힌 연구[8]의 후속으로서 리블렛 구조의 표면에 대해 유적(oil droplet)의 젖음성을 평가하고자 하였다. 반타원형 리브(elliptical rib) 형상을 갖는 리블렛(riblet) 구조의 표면을 표면거칠기를 고려하여 수치적으로 생성하였고 Wenzel equation과 Cassie-Baxter equation을 이용하여 액적의 침투 깊이에 따른 유적의 접촉각을 시뮬레이션하였다. 또한 리블렛 구조를 갖는 상어 표피 및 flat epoxy 그리고 상어 표피를 복제한 epoxy 재질의 shark skin replica를 제작하여 유적에 대한 젖음각을 solid-air-oil interface 및 solid-water-oil interface 조건에서 측정하였고 teflon 코팅 유무에 따른 효과도 아울러 평가하였다. 이러한 실험결과를 해석결과와 비교하여 시뮬레이션에 대한 효용을 검증하고자 한다.

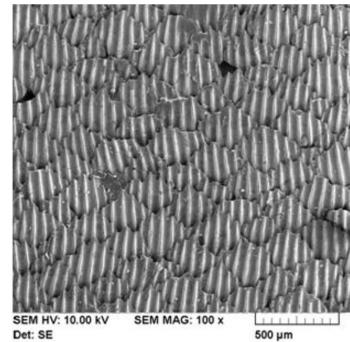
2. 리블렛 표면의 접촉각 수치 해석

이전 연구[8]에서 수행한 상어 비늘에 대한 형상 분석을 통해 얻은 데이터를 근거로 상어 표면을 수치적으로 생성하였다. 상어 비늘 위에 존재하는 하나의 리브를 반타원체로 가정하였으며 각각의 장반경, 단반경 및 높이를 측정된 값을 기준으로 생성하였다. Fig. 1(a)는 상어 표피의 형상을 도시한 것인데 상어 표피를 구성하는 300 μm 정도의 폭을 갖는 하나의 비늘은 5개의 리브를 갖는 리블렛 구조로 이루어져 있음을 알 수 있다. 각 리브의 길이는 약 200 μm에서 300 μm 정도이며 높이는 약 20 μm에서 30 μm 정도이다. 하나의 비늘 위에 측정된 표면 형상 데이터에서 거칠기 성분만을 추출하여 측정된 결과 약 Ra=0.1 μm에서 0.2 μm 정도의 범위의 미세돌기들이 존재하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 5개의 반타원체 리브를 갖는 한 쌍의 비늘 9개를 직교 배열한 리블렛 구조의 표면을 수치적으로 생성시켰다. 리브 위에 미세 돌기가 없는 경우와 Ra=0.2 μm 및 Ra=1 μm인 미세 돌기가 조합된 총 세 종류의 표면을 생성하였다.

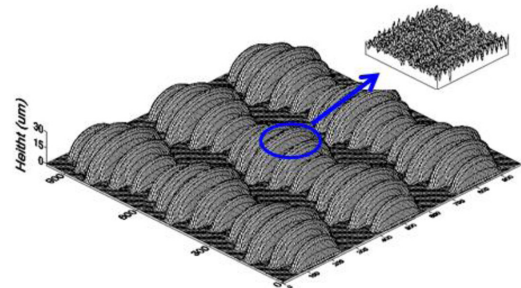
리블렛 구조의 젖음성을 평가를 위해 다음의 Wenzel equation과 Cassie-baxter equation을 이용하여 액체 방울의 접촉각 θ 를 계산할 수 있다.

$$\cos\theta = R_f \cos\theta_0 \tag{1}$$

$$\cos\theta = R_f f_{SL} \cos\theta_0 - 1 + f_{SL} \tag{2}$$



(a) SEM images of shark skin

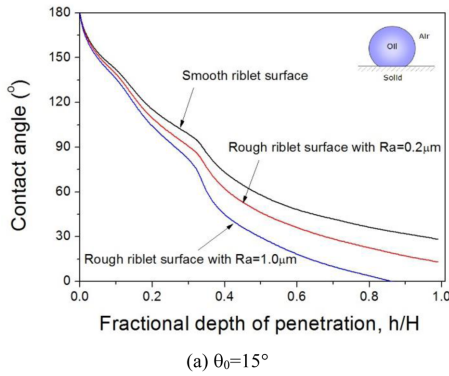


(b) Numerically generated riblet surface with Ra=0.2 μm

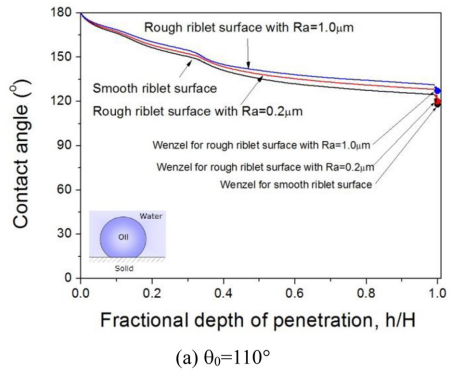
Fig. 1. Generation of riblet surface by simulating shark skin.

여기서, θ_0 는 평평한 표면에서의 접촉각이며 R_f 는 상부에서 투영된 면적에 대한 액체방울이 실제로 고체 표면에 닿는 면적의 비, f_{SL} 은 투영면적에 대해 액체와 고체가 접촉하는 분율을 각각 나타낸다. 수치해석과정은 Fig. 2(b)와 같이 이산화된 3차원 표면을 액체 방울의 위치(h)에 따라 액체가 고체와 접촉하는 면적을 수치적으로 계산하여 각각의 R_f 와 f_{SL} 를 구하여 접촉각을 도출할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

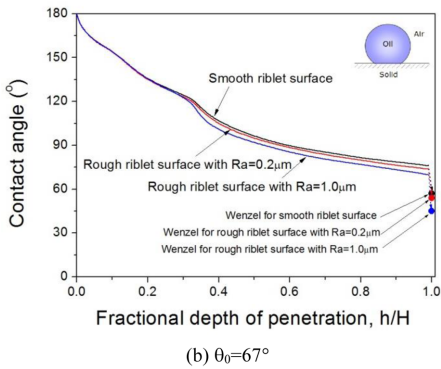
Fig. 2는 solid-air-oil interface 조건에서 리블렛 비늘 형상 위에 미세 돌기가 없는 경우와 Ra=0.2 μm 및 Ra=1 μm인 미세 돌기가 조합된 표면에 대해 액체의 침투 깊이에 따른 접촉각의 변화를 도시한 것이다. 여기서, θ_0 는 각 경계조건에서 flat epoxy resin면에서의 측정된 접촉각으로 Fig. 4(a)의 코팅을 하지 않은 경우의 접촉각 $\theta_0=15^\circ$ 와 코팅을 한 경우의 접촉각 $\theta_0=67^\circ$ 를 각각 적용하였다. 코팅을 하지 않은 표면의 접촉각(Fig. 2(a))이 코팅을 한 표면(Fig. 2(b))에 비해 오일 방울의 침투 깊이가 증가함에 따라 급격히 감소해감을 알 수 있다. 미세돌기가 접촉각에 미치는 영향에 대해서는 코팅을



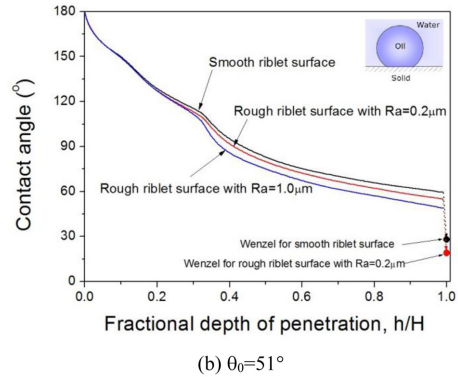
(a) $\theta_0=15^\circ$



(a) $\theta_0=110^\circ$



(b) $\theta_0=67^\circ$



(b) $\theta_0=51^\circ$

Fig. 2. Contact angles with fractional depth of oil penetration for riblet surfaces (a)without and (b)with coating in solid-air-oil interface.

Fig. 3. Contact angles with fractional depth of oil penetration for riblet surfaces (a)without and (b)with coating in solid-water-oil interface.

하지 않은 표면이 표면 거칠기가 거칠어질수록 접촉각의 감소가 큰 것으로 나타났다. Fig. 3은 solid-water-oil interface 조건에서 유적의 침투 깊이에 따른 접촉각의 변화를 도시한 것이다. 여기서 적용되는 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 코팅을 하지 않은 경우의 flat surface의 접촉각 $\theta=110^\circ$ (Fig. 3(a))와 코팅을 한 경우의 접촉각 $\theta=51^\circ$ (Fig. 3(b))를 각각 적용한 것이다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 소유성(oleophobicity) 특성을 갖는 표면에서는 표면이 거칠어질수록 높은 접촉각을 갖는 것을 알 수 있고 Fig. 3(b) 친유성(oleophilicity) 표면에서는 표면이 거칠어질수록 더 낮은 접촉각을 가짐을 알 수 있다.

3. 실험결과와 비교

이상의 리블렛 표면에 대한 유적의 접촉각 해석 결과를 상어표피에 대한 접촉각 실험결과와 비교하고자 하

였다. 이전의 연구에서 shark skin template 및 shark skin replica에 대한 소유성을 평가한 바 있다[6]. Shark skin template은 상어 표면을 샘플링한 후 세척 및 건조의 전처리과정을 통해 제작한 것이며 shark skin replica는 상어표피의 음각형상인 replication mold 및 양각형상의 shark skin replica 모두 micro molding 방법을 적용한 것으로 replication mold는 PDMS (Sylgard 184)를, shark skin replica의 재료는 액상 epoxy resin을 경화제와 혼합하여 제작한 것이다. 섞은 혼합물이다. 유적에 대한 상어표피의 젖음성 평가는 2가지 조건으로 측정하였는데 첫 번째는 solid-air-oil interface 조건이며 두 번째는 solid-water-oil interface 조건이며 시편의 코팅유무에 따라 실시하였다.

solid-water-oil interface 조건에 대한 실험의 경우 오일의 밀도가 물보다 낮기 때문에 시편을 뒤집어 침수시킨 후 U타입의 microsyringe를 이용하여 측정하였다. Shark skin template 및 shark skin replica들의 표면 코

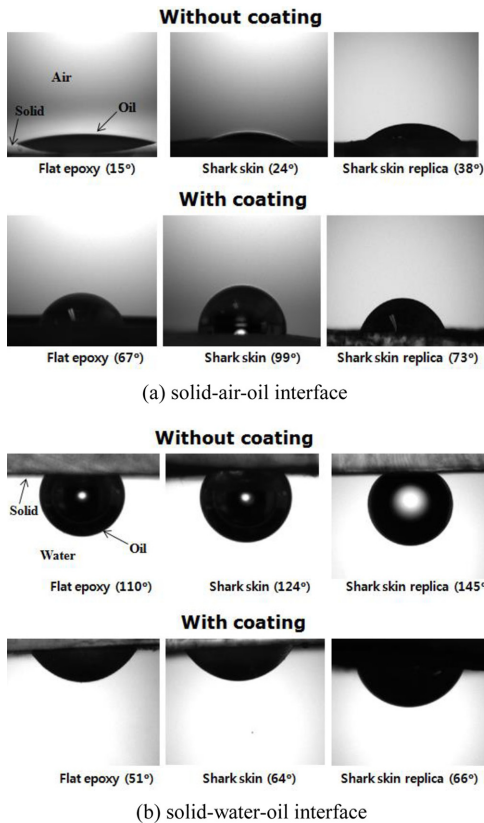


Fig. 4. Optical micrographs of oil droplets on shark skin, flat epoxy and shark skin replica surfaces without and with coating.

팅처리를 위해서 스핀 코팅법을 이용하여 Teflon 박막 코팅을 수행하였다. Teflon 박막은 0.2 wt% Teflon AF를 불화탄소 용매에 희석하여 제조하였다. 실험에 사용된 오일은 헥사데칸(hexadecane)이며 5 μ L 체적으로 약 1 mm의 직경의 액적으로 형성하여 젖음성을 평가하였다. Water-air 계면, oil-air 계면 및 oil-water 계면에 대한 표면장력은 73, 27.5, and 51.4 mN/m으로 측정되었다.

Fig. 4는 두가지 경계조건에서 코팅 유무에 따른 유적의 접촉각을 측정한 결과를 나타내었다. Fig. 4(a)의 solid-air-oil interface 조건에서는 코팅을 하지 않은 표면에 대한 유적은 모두 친유특성을 보이는데 이는 oil-air 계면의 표면장력이 매우 낮기 때문이며 코팅된 표면에 대한 유적의 접촉각은 전체적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 평평한 표면에 비해 리블렛 표면의 접촉각이 증가하였음을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 solid-water-oil interface 조건에서의 결과를 도시한 것으로 코팅을 하지 않

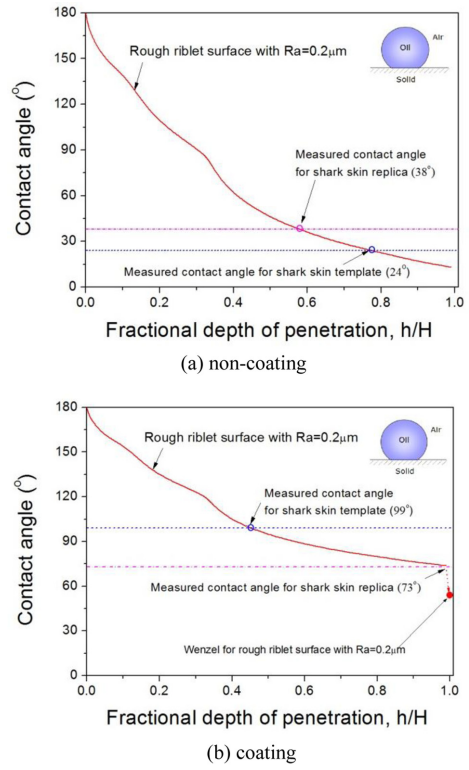


Fig. 5. Comparison between experimental and simulated results without and with coating in solid-air-oil interface.

은 표면에 대해서는 표면의 미세 돌기 및 리블렛 사이에 물이 게재되어 그 위에 oil droplet이 놓이게 되는 상황으로 소유평특성(oleophobicity)을 보인다. 그러나 코팅 표면에 대해서는 친유성(oleophilicity) 특성을 보이는데 이는 코팅 표면의 water droplet의 접촉각이 높은 상태에서 water-air 계면의 표면장력이 oil-air 계면의 표면장력보다 높기 때문인 것으로 사료된다.

이상의 실험 결과를 $Ra=0.2 \mu m$ 를 갖는 리블렛 표면에 대한 접촉각 해석결과와 비교해 보았다. Fig. 5는 solid-air-oil interface의 해석결과와 비교한 것으로 코팅을 하지 않은 shark skin template 및 shark skin replica 표면에 대한 유적의 침투 깊이는 각각 약 78%, 58% 정도임을 예측할 수 있고 코팅 표면에 대해서는 약 44%, 98% 정도의 유적의 침투가 예측되었다.

Fig. 6의 solid-water-oil interface에서의 비교 결과에서는 코팅을 하지 않은 shark skin template 및 shark skin replica 표면에 대한 유적의 침투 깊이가 각각

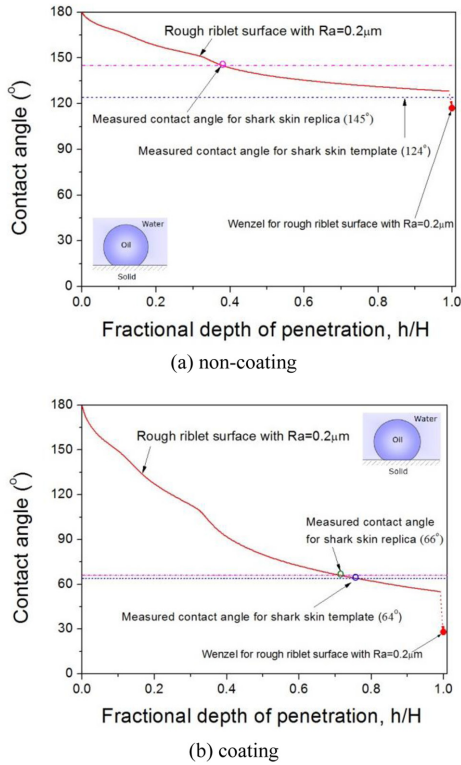


Fig. 6. Comparison between experimental and simulated results without and with coating in solid-water-oil interface.

100%, 37% 정도로 예측되었고 코팅 표면에 대해서는 약 76%, 71% 정도의 유적의 침투가 예측되어 모든 실험 결과가 시뮬레이션 범위 안에 드는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 상어 표피를 모사한 리블렛 구조의 표면에 대해 유적(oil droplet)의 젖음성을 평가하고자 하였다. 반타원형 리브(elliptical rib) 형상을 갖는 리블렛(riblet) 구조의 표면에 대해 액적의 침투 깊이에 따른 유적의 접촉각을 시뮬레이션하였다. Solid-air-oil interface 조건에서 코팅을 하지 않은 표면이 코팅을 한 표면에 비해 유적의 침투깊이가 증가함에 따라 접촉각이 급격히 감소해 감을 알 수 있었고 표면 거칠기가 거칠어질수록 접촉각의 감소가 큰 것으로 나타났다. Solid-water-oil interface 조건에서는 소유성 특성을 갖는 표면에서는 표면이 거칠어질수록 높은 접촉각을 가짐에 반

해 친유성 표면에서는 표면이 거칠어질수록 더 낮은 접촉각을 가짐을 알 수 있었다. 상어 표피 및 상어 표피를 복제한 epoxy 재질의 shark skin replica에 대한 유적에 대한 젖음각을 solid-air-oil interface 및 solid-water-oil interface 조건에서 측정하여 실험결과를 해석결과와 비교하였다. 모든 실험결과가 시뮬레이션 범위 안에 드는 것으로 확인되었다. 다만 시뮬레이션에 사용한 표면과 실험에 사용된 시편 표면의 차이가 있고 실험데이터의 수가 적어 직접적인 비교에는 한계가 있다. 향후 액적의 침투깊이에 대한 연구가 보완되고 실험 표면을 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 만족한 결과를 얻는다면 표면에 대한 액적의 접촉각을 예측할 수 있는 프로그램으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Sirovich, L., Karlsson, S., “Turbulent drag reduction by passive mechanisms,” *Nature*, Vol. 388, pp. 753-755, 1997.
- [2] Lee, S. J., Jang, Y. G., “Control of flow around a NACA 0012 air foil with a micro-riblet film,” *J. Fluids*, Vol. 20, pp. 659-672, 2005.
- [3] Rahmawan, Y., Moon, M.-W., Kim, K.-S., Lee, K.-R., Suh, K. Y., “Wrinkled, dual-scale structures of diamond-like carbon (DLC) for superhydrophobicity,” *Langmuir*, Vol. 26, pp. 484-491, 2010.
- [4] Jung, Y. C., Bhushan, B. “Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows,” *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 22, pp. 035104, 2010.
- [5] Bechert, D. W., Bruse, M., Hage, W., “Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin,” *Exper. Fluids*, Vol. 28, pp. 403-412, 2000.
- [6] Kim, T. W., “Assessment of hydro/oleophobicity for shark skin replica with riblets,” *J. Nanosci. Nanotechnol.*, Vol. 14 pp.7562-7568, 2014.
- [7] Kong, Y. S., Kim, T. W., “Wettability of biomimetic riblet surface like sharkskin,” *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 29, No. 5, pp. 304-309, 2013., pp. 304-309, 2013.
- [8] Kim, T. W., “Simulation for contact angle of droplet on riblet surface,” *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 33, No. 5, pp.202-206, 2017.