상어 표피 형상의 3차원 탄성접촉해석

김태완^{*}

부경대학교 기계공학과

3D Elastic Contact Analysis of Sharkskin Surface Pattern

Tae Wan Kim^{*}

Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received July 8, 2012; Revised September 12, 2012; Accepted September 15, 2012)

Abstract – We conducted 3D elastic contact analysis of a sharkskin surface pattern for the characteristic assessment of biomimetic shark skin structure pattern for engineering applications. Rough sharkskin surfaces of similar size with real shark skin scales are generated numerically. Under the assumption of the contact of a plate on the generated sharkskin surface, contact performances such as contact pressure, real contact area, and surface separation are evaluated.

Keywords – sharkskin(상어표피), riblet(리블렛), contact analysis(접촉해석)

1. 서 론

상어는 바다 속에서 시속 80킬로미터의 속도까지 낼 수 있다. 상어는 자신의 비늘을 세워 피부표면을 가로 지르는 아주 작은 우물들을 만들 수 있으며, 그것이 골 프공에 있는 덩폴처럼 저항을 줄인다. 이 미세한 비늘은 길이가 200 μm 정도이며 치아와 같은 강한 범랑질로 만들어져 있다. 상어 표면에 형성된 이(tooth) 형상의 비늘구조 및 비늘 내에 물의 흐름 방향과 평행하게 정렬된 리브구조는 항력을 줄이고 표면 오염 방지 및 자가 세정 능력(anti-fouling/self cleaning)을 제공하게 된다. “Sharkskin effect”라 명명된 이러한 상어 표피에 대한 연구는 많은 과학자들의 관심의 대상이 되고 있다.

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 모

사한 리블렛(riblet) 구조와 항력 감소효과에 대한 실험적 연구로 나눌 수 있다. Kesel과 Liedert[2]는 상어비늘처럼 각진 돌기가 형성되도록 하는 선박용 코팅제를 개발하여 선체에 달라붙는 해조류가 감소하였음을 실험적으로 밝혀내었고 Efimenko[3]등도 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 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 리

^{*}Corresponding Author: tw0826@pknu.ac.kr

© 이 논문은 한국윤활학회 2012년도 추계 학술대회 (2012.10.17~19. 제주) 발표논문임.

블렛 필름에 대한 풍동실험을 통해 항력감소 효과를 실험적으로 확인하였다. 그리고 Ko 등[9]은 네트워크 형 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. 이상과 같이 상어 표면 및 그의 산업적 응용에 대한 많은 연구가 있어왔고 이러한 연구들의 결과로 전신 수영복의 개발이라든지 리블렛 필름 제작을 통한 비행기 및 선박 등의 운송체에 미치는 항력을 감소시켜 실질적인 에너지 소비량을 줄이는 데 많은 기여가 있어 왔다.

본 연구는 이러한 상어표피 형상의 효과가 거시적인 접촉 기계요소에도 활용될 수 있을 것이라는 가정에서 출발하여 그동안 많은 연구가 있어왔던 항력 감소 특성 이외의 리블렛 구조의 상어 표피 형상에 대한 접촉 특성을 파악하고자 하였다. 즉, 상어 표피 형상의 접촉 특성 평가를 통한 접촉기계요소의 공학적 응용 가능성을 밝히기 위해 상어 표피 형상을 수치적으로 모델링하여 3D 표면 형상을 구현한 후 접촉 해석을 수행하였다. 상어 표피 형상의 리블렛 구조 및 돌기 분포에 따른 접촉압력, 실접촉면적, 표면 간극(surface separation) 등의 접촉 성능을 평가하였다.

2. 상어 표피 형상 모델링

2-1. 상어 표피의 형상

상어 표피의 리블렛 구조를 수치적으로 형성시키기 위해 우선 SEM과 3차원 surface profiler를 이용해 표면 형상을 측정하였다. Fig. 1과 2에서 보는 바와 같이 상어 표피를 구성하는 하나의 비늘은 3개에서 5

Fig. 1. SEM image of sharkskin.

개 정도의 리브구조로 이루어져 있으며 각 리브의 길이는 약 200 μm 에서 300 μm 정도임을 알 수 있다. Fig. 3은 3차원으로 측정된 표면 형상에서 하나의 비늘에 대해 리브에 수직인 방향과 수평인 방향으로 표

Fig. 2. 3D surface profile and contour of sharkskin.

Fig. 3. 2D surface profiles of transversal and longitudinal direction on a scale of sharkskin.

Fig. 4. Roughnesses on ribs of sharkskin.

(a) smooth surface

(b) $Ra=0.2\mu m$ (c) $Ra=1\mu m$ **Fig. 5. Numerically generated sharkskin surfaces.**

면 데이터를 추출하여 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 5개의 리브가 존재하는 하나의 비늘의 전체 폭은 약 $300\mu m$ 정도이며 중앙에 존재하는 리브를 중심으로 대칭적인 형상임을 알 수 있다. 중앙에 있는 리브의 높이는 약 $30\mu m$, 중앙의 양측면에 존재하는 두 번째 리브의 높이는 약 $27\mu m$, 그리고 양 가장자리에 존재하는 리브는 약 $20\mu m$ 정도로 측정되었다. 리브 하나의 폭은 약 $60\mu m$ 정도이며 리브간의 피치는 약 $150\mu m$ 정도임을 확인할 수 있다. 또한 각 리브의 길이는 중앙, 중앙의 양측면 그리고 가장자리 리브의 길이가 각각 약 $300\mu m$, $250\mu m$, $200\mu m$ 정도 되는 것으로 측정되었다. Fig. 4는 하나의 비늘위에 측정된 표면 형상 데이터에서 form 및 waviness 성분을 제외하고 roughness 성분만을 추출한 결과를 도시한 것이

Fig. 6. Rigid plate pressing down a generated sharkskin surface.

다. 리브 위에 존재하는 미세 돌기의 거칠기는 약 $Ra = 0.1\mu m$ 에서 $0.2\mu m$ 정도의 범위에 있는 것을 확인할 수 있었고 이 데이터를 근거로 상어표면의 수치적 생성 시 미세 돌기의 크기를 정하였다.

2-2. 상어 표피의 수치적 생성

이상의 상어 비늘에 대한 형상 분석을 통해 얻은 데이터를 근거로 접촉해석을 위한 상어 표면을 수치적으로 생성하였다. 상어 비늘 위에 존재하는 하나의 리브를 반타원체로 가정하였으며 각각의 장반경, 단반경 및 높이를 앞 절에서 측정된 값을 기준으로 생성하였다. Fig. 5(a)는 리브위에 미세 돌기가 없는 경우의 상어 표피 형상을 도시한 것으로 5개의 리브로 이루어진 하나의 비늘을 총 9개로 배열시켜 생성된 결과를 보여준다. 상어 표면은 마이크로 스케일의 리브 구조위에 미세 돌기들이 랜덤하게 분포된 bi-modal 형태의 표면 구조이다. 따라서 리브 구조위에 미세돌기들을 중첩시켜 미세 돌기의 영향을 살펴볼 필요가 있다. 미세돌기들의 수치적 표면 생성은 자기상관함수(autocorrelation function)과 확률밀도함수(probability density function)의 조합으로 3차원 거친 표면의 형태로 생성하였다 [13]. Fig. 5(b)와 (c)는 타원 형상의 리브로 생성된 상어 표피에 각각 $Ra=0.2\mu m$ 및 $Ra=1\mu m$ 인 미세 돌기를 조합하여 생성시킨 표면을 도시한 것이다.

3. 접촉해석방법

일반적으로 한 쌍의 거친 표면의 접촉은 Fig. 6과 같이 하나의 상당 표면(equivalent surface)과 강체면의 접촉으로 모델링할 수 있다. 본 연구에서는 기본적으로 영향함수(influence function)를 이용한 방법으로 3

차원 접촉해석을 수행하였다. 접촉문제를 풀기 위해서는 다음의 구속조건에 의한 반복 연산이 필요하다.

접촉영역에서는

$$p(x,y) > 0, \quad h(x,y) = 0 \quad (1)$$

접촉영역밖에서는

$$p(x,y) = 0, \quad h(x,y) > 0 \quad (2)$$

여기서, $p(x,y)$ 는 접촉압력이며 $h(x,y)$ 는 변형후의 강체면과 거친 표면간의 거리를 나타내며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$h(x,y) = e(x,y) + u(x,y) - d \quad (3)$$

여기서, $e(x,y)$ 는 변형 전의 표면형상의 높이 분포이고 d 는 유효 강체 변위(effective rigid body displacement)이며 $u(x,y)$ 는 탄성 변형량이다. 접촉 영역 내에서 Boussinesq의 식으로 나타내면 식 (3)은 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\frac{2}{\pi E'} \iint \frac{p(x',y')}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} dx' dy' = \delta - e(x,y) \quad (4)$$

수치적 계산을 위해 해석영역을 사각조각들로 이산화하고 사각조각면 내에서 균일 압력을 가진다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{j=1}^k F_{i,j} P_j = d - e_i \quad (5)$$

여기서, k 는 접촉영역 내에서 사각조각면의 수이고 $F_{i,j}$ 는 요소 j 에서의 수직분포하중에 의한 요소 i 에서의 영향을 나타내는 영향함수(influence function)이다[14].

4. 해석결과

상어 표피의 비늘은 치아와 같은 강한 범람질로서 탄성계수가 50~80GPa이고 프아송비가 0.3으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 수치적으로 생성된 상어 표피의 탄성계수를 65 GPa, 프아송비를 0.3으로 가정하고 해석하였으며, 부가 하중 P_0/E 는 10^{-7} 에서 3×10^{-3} 까지의 범위에서 접촉해석을 수행하였다.

Fig. 7은 매끄러운 상어 표피 형상과 $Ra=0.2 \mu m$ 및 $Ra=1 \mu m$ 인 미세 돌기를 가진 상어 비늘 형상에 대해 $P_0/E=2 \times 10^{-3}$ 의 하중조건에서 접촉해석을 수행하여 얻은 3차원 접촉압력분포를 도시한 결과이다. 여기서 P_0

(a) Smooth sharkskin

(b) Rough sharkskin with $Ra=0.2 \mu m$

(c) Rough sharkskin with $Ra=1.0 \mu m$

Fig. 7. 3D contact pressure distributions of smooth and rough sharkskin surfaces under $P_0/E=0.002$.

은 길보기 평균 압력을 의미한다. Fig. 7(a)는 9개의 비늘을 가진 형상에 대한 결과인데 각 비늘에서 3개의 리브에서 접촉이 발생하여 타원형태의 매끄러운 압력이 형성된 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)는 하나의 비늘에 대해 거칠기 성분을 조합한 표면을 해석한 것으로 매끄러운 비늘 형상에 비해 높은 접촉압력이 발생하고 Ra 값이 커질수록 압력 스파이크가 많이 발생한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 생성한 3가지 표면에 대해 하중 변화에 따른 최대접촉압력, 실접촉면적 및 평균 표면간극의 변화를 도시한 결과이다. 하중이 증가함에 따라 최대접촉압력은 초기에는 선형적으로 증가하다가 하중이 높

Fig. 8. Contact performance of sharkskin surface as an increase of nominal contact pressure.

을수록 그 증가율이 감소함을 확인할 수 있고 $Ra = 1 \mu\text{m}$ 인 표면의 최대접촉압력은 $Ra = 0.2 \mu\text{m}$ 인 표면에 비해 상당히 높음을 알 수 있다. 실접촉면적율은 겉보기 접촉면적에 대한 실제 접촉하는 면적의 비로 계산

되었으며 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 낮은 하중에서는 실접촉면적율의 변화가 적으나 높은 하중영역에서는 하중이 증가할수록 실접촉면적율이 급격히 증가함을 알 수 있고 표면이 거칠수록 실접촉면적율이 감소함을 확인할 수 있다. Fig. 8(c)는 상어 표면 형상과 평판간의 평균 간극을 나타낸 것으로 접촉전의 초기평균간극에 대한 접촉후의 평균간극의 비로 나타내었다. 하중이 작을 때는 하중 증가에 따른 평균간극이 서서히 감소하나 하중이 커질수록 두 평판간의 간극은 급격히 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. 거친 표면일수록 평균간극이 적으나 $P_n/E = 5 \times 10^{-4}$ 이상의 하중조건에서는 돌기의 영향이 줄어들음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 상어 표피 형상의 접촉기계요소의 공학적 응용 가능성을 평가하기 위해 실제 상어 표피를 측정하여 상어 표피 형상을 표면 거칠기를 고려하여 수치적으로 생성시켰으며 3차원 접촉 해석을 수행하여 그 특성을 살펴보았다. 상어 표피의 비늘을 구성하는 각 리브 위에 존재하는 미세 돌기의 거칠기는 약 $Ra = 0.1 \mu\text{m}$ 에서 $0.2 \mu\text{m}$ 정도의 범위에 있는 것을 확인할 수 있었는데, $Ra = 0.2 \mu\text{m}$ 의 거칠기를 가진 상어 표피 형상의 접촉 해석 결과, $P_n/E = 5 \times 10^{-4}$ 이하의 하중 조건에서는 매끄러운 경우와 접촉 성능의 차이가 크지 않음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Walsh, M. J., "Turbulent Boundary Layer Drag Reduction using Reblets," Aerospace Sciences Meeting 20th, 1982.
2. Genzer, J. and Marmur, A., "Biological and Synthetic Self- Cleaning Surfaces," *MRS Bulletin*, Vol. 33, pp. 742-746, 2008.
3. 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.
4. 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," *Experiments in 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 Nanoprotrusions Formed on Network-type Microstructures," *J. Micromech. Mocroeng.*, 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. and Bhushan, B., "Generation of Composite Surfaces with Bimodal Distribution and Contact Analysis for Optimum Tribological Performance," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 128, pp. 851-864, 2006.
 14. Love, A. E. H., "Stress Produced in a Semi-Infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary," *Phil. Trans. Royal Society*, Vol. A228, pp. 377-420, 1929.