

# 상어표피 모사 리블렛 구조의 탄성유체윤활 해석 Elasto-hydrodynamic Lubrication Analysis for Biomimetic Riblet Surface like Shark Skin

김 태 완\*†  
Tae-Wan Kim\*†

(접수일 : 2013년 10월 15일, 수정일 : 2013년 12월 04일, 채택확정 : 2013년 12월 11일)

**Abstract:** For the characteristic assessment of biomimetic shark skin structure pattern for engineering applications, we conducted the elastic hydrodynamic lubrication analysis for the shark skin surface pattern. The shark skin surfaces with roughness are generated numerically in the similar size with real shark skin scales. For the spherical contact on the generated shark skin surface with two different flow directions which are transversal and longitudinal, 3-dimensional elasto-hydrodynamic lubrication analysis are carried out. The result of the longitudinal flow which are similar with the flow of shark skin shows more beneficial effects with lower pressure and less sensitive effect with surface roughness.

**Key Words :** Shark Skin, Elasto-hydrodynamic Lubrication, Riblet

## 1. 서 론

상어는 리블렛(riblet) 형상의 비늘을 통해 바다 속에서 시속 80킬로미터의 속도까지 낼 수 있다. 이 미세한 비늘은 길이가 200 $\mu$ m 정도이며 치아와 같은 강한 범랑질로 만들어져 있다. 상어 표면의 리브는 물의 흐름 방향과 평행하게 정렬되어 있어 항력을 줄이고 표면 오염 방지 및 자가 세정 능력을 제공하게 된다. “Shark skin effect”라 명명된 이러한 상어 표피에 대한 연구는 많은 과학자들의 관심의 대상이 되고 있다.

상어비늘에 관한 연구는 Walsh 등<sup>1)</sup>의 연구가 시발점이 되어 최근 자연모사공학에 대한 관심이 증가하면서 주목받고 있다. 지금까지 진행되어 온 상어비늘에 관한 연구는 크게 상어비늘의 특성에

관한 연구와 이를 모사한 리블렛 구조와 항력 감소에 관련된 실험적 연구로 나눌 수 있다. Kesel과 Liedert<sup>2)</sup>는 상어비늘처럼 각진 돌기가 나 있는 선박용 코팅제를 개발하여 실험을 통해 선체에 달라붙는 해조류가 85%로 줄었다. Sirovich & Karlsson<sup>3)</sup>는 상어 피부의 돌기 형태와 유사한 리블렛을 제작하여 평판에 비해 최대 8%까지 마찰저항을 감소시킬 수 있음을 보였다. Jung & Bhushan<sup>4)</sup>은 molding 기법을 통해 리블렛 구조와 비슷한 형상의 틱을 제작하였고, 표면형상과 표면처리를 다르게 하여 실험을 통한 항력 감소의 차이를 알아냈다. 한편 국내에서는 상어 표피와 관련된 직접적인 연구를 수행한 경우는 없다. Choi 등<sup>5)</sup>이 풍동실험과 수치 해석을 이용하여 돛세치 표면에 존재하는 V자형 돌기가 마찰저항에 미치는 영향을 연구하였다.

\*† 김태완(교신저자) : 부경대학교 기계공학과  
E-mail : tw0826@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6142

\*† Tae-Wan Kim(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.  
E-mail : tw0826@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6142

Lee 등<sup>6)</sup>은 PDMS micro molding 기법으로 제작한 미세 리블렛 필름에 대한 풍동실험을 통해 항력감소 효과를 실험적으로 확인하였다. 그리고 생체 모방 초소수성 표면 제작과 관련해 Suh 등<sup>7)</sup>은 DLC를 이용한 hybrid 방식으로 나노 마이크로 계층구조를 제작해 대면적 초발수성 표면 제작에 관한 연구를 수행하였다. 이상과 같이 상어 표면 및 그의 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 기여를 하였다.

본 연구는 이러한 상어표면 형상의 성능이 접촉 기계요소에도 활용될 수 있을 것이라는 가정에서 출발하였다. 그동안 많은 연구가 있어왔던 항력 감소 특성 외에 리블렛 구조의 상어 표피 형상에 대한 윤활 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 우선 실제 상어 표피를 측정하여 해석에 필요한 상어 표피 형상을 반타원 구조로 단순화시키고 표면 거칠기를 고려하여 리블렛 구조의 표면을 수치적으로 생성시켰다. 생성된 표면에 대해 3차원 탄성유체윤활 해석을 수행하여 그 특성을 평가하고자 하였다.

## 2. 상어표피 형상 모델링

### 2.1 상어표피의 형상

상어 표피의 리블렛 구조를 수치적으로 형성시키기 위해 우선 SEM과 3D surface profiler를 이용해 표면 형상을 측정하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 상어 표피를 구성하는 하나의 비늘은 3개에서 5개 정도의 리브구조로 이루어져 있으며 각 리브의 길이는 약 200 $\mu$ m에서 300 $\mu$ m정도임을 알 수 있다. Fig. 2은 하나의 비늘에 대해 리브에 수직인 방향과 수평인 방향으로 표면 형상을 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 5개의 리브가 존재하며 비늘 하나의 전체 폭은 약 300 $\mu$ m정도이며 중앙에 존재하는 리브를 중심으로 대칭적인 형상임을 알 수 있다. 중앙에 있는 리브의 높이는 약

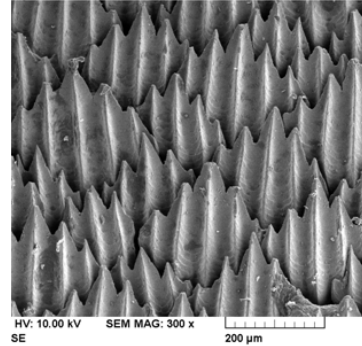


Fig. 1 SEM photograph of shark skin

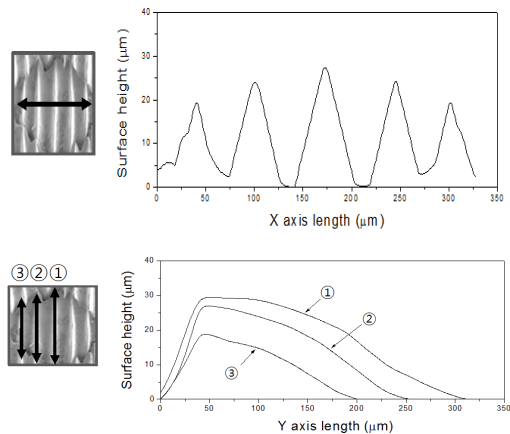


Fig. 2 2D surface profiles of transversal and longitudinal direction on a scale of shark skin

30 $\mu$ m, 중앙의 양측면에 있는 리브들의 높이는 약 27 $\mu$ m, 그리고 양 가장자리에 있는 리브는 약 20 $\mu$ m 정도로 측정되었다. 리브 하나의 폭은 약 60 $\mu$ m정도이며 리브간의 피치는 약 150 $\mu$ m정도임을 확인할 수 있다. 각 리브의 길이는 중앙, 중앙의 양측면 그리고 가장자리 리브의 길이가 각각 약 300 $\mu$ m, 250 $\mu$ m, 200 $\mu$ m 정도로 측정되었다. Fig. 3은 하나의 비늘위에 측정된 표면 형상 데이터에서 형상 및 파상도 성분을 제외하고 거칠기 성분만을 추출한 예를 도시한 것이다. 리브 위에 존재하는 미세 돌기의 거칠기는 약 Ra = 0.1 ~ 0.2 $\mu$ m정도의 범위에 있는 것을 확인되었다.

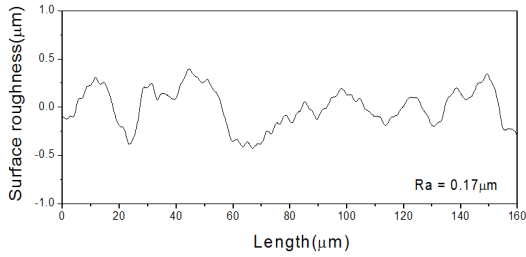
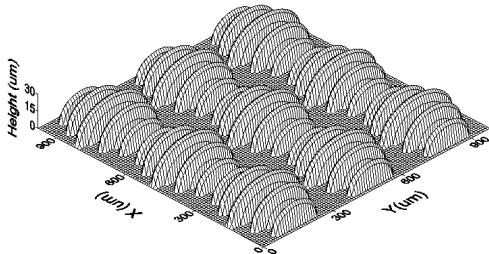
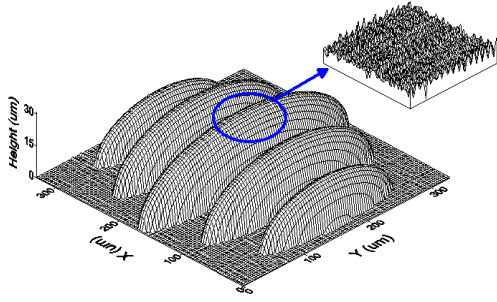


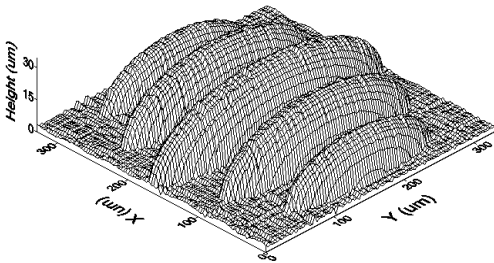
Fig. 3 Roughness on the rib of shark skin



(a) Smooth surface



(b) Ra=0.2 μm



(c) Ra=1 μm

Fig. 4 Numerically generated shark skin surface with roughness

## 2.2 상어표피의 수치적 생성

일반적으로 이상의 상어 비늘에 대한 형상 분석을 통해 얻은 데이터를 근거로 유허해석을 위한 상어 표면을 수치적으로 생성하였다. 상어 비늘 위에 존재하는 하나의 리블렛을 반타원체로 가정하였으며 각각의 장반경, 단반경 및 높이를 앞절에서 측정된 값을 기준으로 생성하였다. Fig. 4(a)는 리블렛위에 미세 돌기가 없는 경우의 상어 표피 형상을 도시한 것으로 5개의 리블렛으로 이루어진 한 쌍의 비늘을 총 9개로 배열시켜 생성된 결과를 보여준다. 상어 표면은 마이크로 스케일의 리블렛 구조 위에 미세 돌기들이 랜덤하게 분포된 bi-modal 형태의 표면 구조이다. 따라서 리블렛 구조위에 미세 돌기들을 중첩시켜 미세 돌기의 영향을 살펴볼 필요가 있다. 미세 돌기들의 수치적 표면 생성은 자기상관함수(autocorrelation function)과 확률밀도함수(probability density function)의 조합으로 3차원 거친 표면의 형태로 생성하였다.<sup>8)</sup>

Fig. 4(b)와 (c)는 반타원체 형태의 리블렛으로 생성된 상어 표피에 Ra=0.2 μm 및 Ra=1 μm인 미세 돌기를 조합하여 생성한 표면을 도시한 것이다.

## 3. 탄성유체유허 해석방법

상어 표피 형상의 접촉기계요소의 공학적 응용 가능성을 밝히기 위해 유허 해석을 수행하였다. 유허 해석을 위해 수치적으로 생성된 상어 표피 형상을 갖는 평판 위에 구가 접촉할 때 유허유가 유입되는 상황을 가정하여 수행하였다. 일반적으로 두 탄성체의 접촉을 상당표면과 강체의 접촉으로 등가시켰을 때 유막 두께식은 다음과 같다.

$$h(x, y) = -\delta + f(x, y) + r(x, y) + d(x, y) \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 주어진 하중에 대한 두 표면의 상대 접근거리,  $f$ 는 매끄러운 형상,  $d$ 는 유효 강체 변위,  $r$ 은 표면거칠기 성분이며,  $d$ 는 압력에 의한 표면의 탄성변위이다. 가해진 하중과 분포 압력은 아래의 관계식을 만족해야 한다.

$$W = \iint_{\Omega} P dx dy \quad (2)$$

여기서,  $P$ 는 전체 해석 영역( $\Omega$ )에 대한 압력이다.

이산화된 균일한 사각조각 표면에 작용하는 균일한 수직 분포하중에 의한 변위는 Love<sup>9)</sup>의 변위 해로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d(x, y) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F_{i,j,x,y} P_{x,y} \quad i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

여기서  $F$ 는 영향함수(influence function)를 나타낸다.  $X$ 방향으로 윤활유가 유입될 때 윤활면 내의 레이놀즈 지배방정식은 다음과 같으며 이로부터 유막 압력을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial P_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial P_f}{\partial y} \right) = K \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \quad (4)$$

경계 조건은 다음의 레이놀즈 경계조건을 적용하였다.

$$P_f(x, y) = 0 \quad \text{at } x_{in}$$

$$P_f(x, y) < 0 \text{ and } \frac{\partial P_f(x, y)}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x_{out} \quad (5)$$

윤활유의 점성과 밀도에 대해 Roelands<sup>10)</sup>의 점도-압력관계식, Dowson & Higginson<sup>11)</sup>의 밀도-압력 관계식을 각각 적용하였다. 이상의 Reynolds 방정식과 하중조건, 점도-압력의 관계 그리고 밀도-압력관계 등을 이용하여 구와 상어 표면과의 접촉시 윤활막의 압력 및 유막두께를 계산할 수 있다.

수치해석에 사용한 프로그램은 Compaq Fortran v6.5이다. 레이놀즈 방정식을 중앙 차분법으로 이산화했으며, 비선형 방정식의 수치 해석에 있어서 수렴성이 높은 뉴턴-랩슨법을 적용하였다. 생성된 Jacobian Matrix는 가우스 소거법을 이용하여 계산하였다. 접촉부 해석 및 탄성 변위의 계산은 탄성 변위식을 이용한 접촉 해석 기법으로 풀었고, 수

렴성이 높고 계산속도가 빠른 SOR법으로 수치 해석을 수행하였다.<sup>12)</sup>

## 4. 해석 결과

탄성유체윤활 알고리즘을 이용하여 구와 상어 표피 형상의 평판에 대한 해석을 수행하였다. 사용된 상어표면은 Fig. 4에 도시한 바와 같이 미세 돌기가 없는 매끄러운 상어 표피 형상과  $Ra=0.2\mu\text{m}$  및  $Ra=1.0\mu\text{m}$ 인 미세 돌기를 가진 상어 비늘 형상 표면에 대해 해석을 수행하였다. 또한 유체의 흐름방향이 리브와 평행한 종방향 유동(longitudinal flow)인 경우와 리브와 수직으로 유체가 흐르는 횡방향 유동(transversal flow)인 경우에 대해 해석을 수행하였다. 윤활유는 광유를 사용하였으며 관련 파라미터 및 작동조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Analysis conditions

Conditions	Value
Viscosity of lubricant	$44.30 \times 10^{-3}$ [Ns/m <sup>2</sup> ]
Density of lubricant	817.9 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Viscosity index	0.41
Pressure-viscosity factor	$22.0 \times 10^{-9}$ [m <sup>2</sup> /N]
Maximum Hertz pressure	0.325 [GPa]
Relative velocity	5 [m/s]

Fig. 5는 수치적으로 생성된 상어표피 형상들에 대해 종방향 및 횡방향의 윤활유 유동시 발생하는 압력분포를 3차원으로 도시한 것이다. X축 및 Y축 좌표는 평판 구접촉시 발생하는 Hertz 접촉 반폭  $a$ 로 무차원화하여 도시한 것이다. 윤활유의 유동방향이 종방향인 경우가 횡방향인 경우에 비해 유체 압력의 크기가 상당히 낮음을 알 수 있다. 매끄러운 상어 표피의 경우 종방향 유동시 최대 압력은 약 0.407GPa로 종방향 유동시 최대 압력인 약 0.579Pa보다 약 30%정도 낮은 유체압력이 생성되

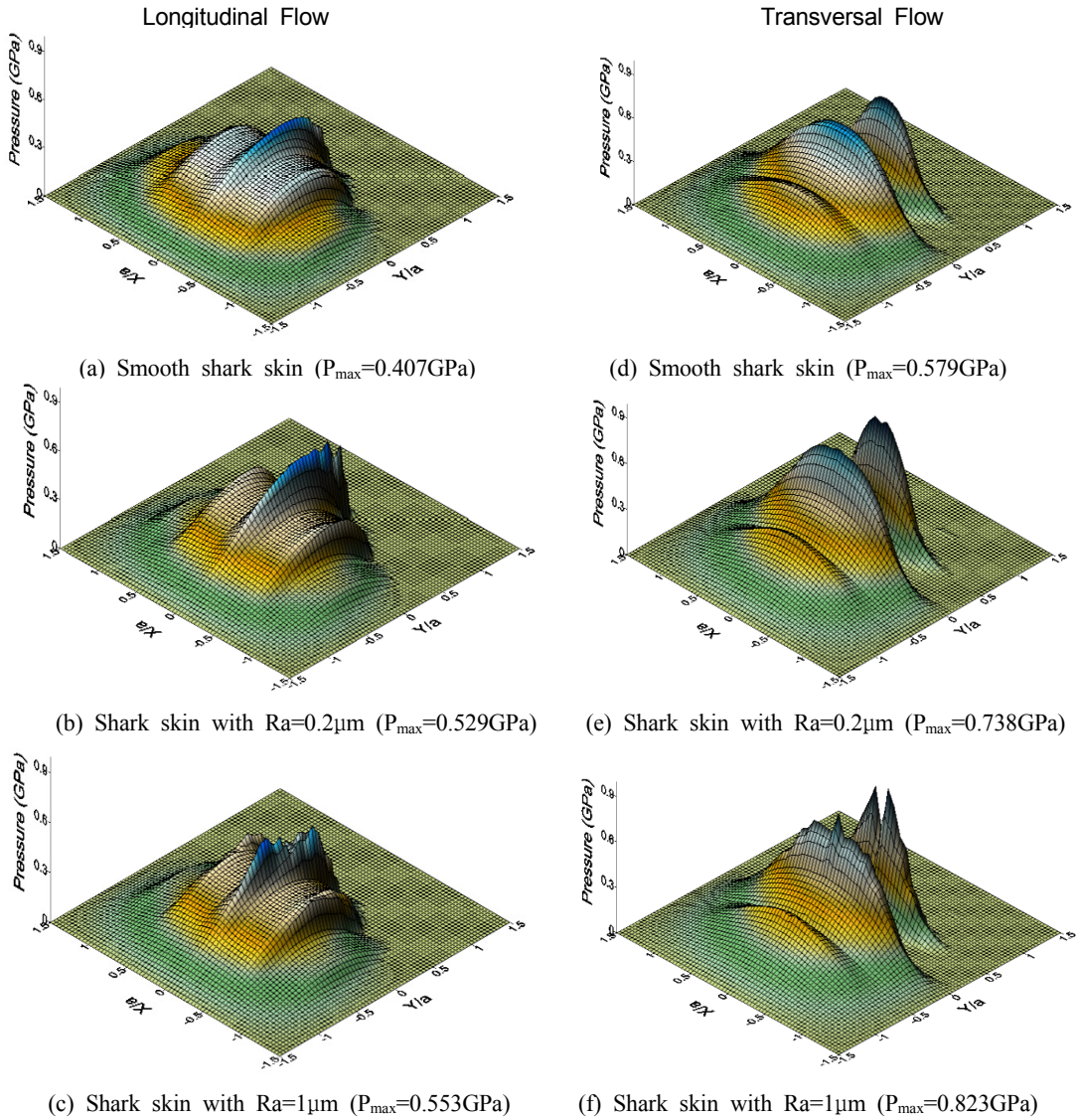


Fig. 5 3D pressure distributions for longitudinal(left) and transversal(right) flows of shark skin

있으며, 돌기가 있는 경우도 마찬가지로 종방향 유동의 압력이 횡방향에 비해 약 28%에서 33% 정도의 압력저하 효과가 발생됨을 알 수 있다. 또한 리블렛 위에 존재하는 미세돌기의 표면 거칠기가 거칠수록 높은 압력이 나타나며 압력 분포형상도 표면 돌기의 영향으로 거칠게 나타났다.

Fig. 6은 구 접촉시 중심축인  $Y/a=0$  (X축) 및  $X/a=0$  (Y축)에서 압력 프로파일을 비교한 것이다.

Fig. 6(a)에서 매끄러운 표면의 압력분포는 일반적으로 알려진 구 접촉 EHL 압력분포와 유사하나,  $Ra=0.2\mu\text{m}$  표면에서는 윤활유의 출구부위에 돌기의 영향이 더해져 압력 스파이크가 크게 발생하였고  $Ra=1\mu\text{m}$  표면에서는 돌기의 영향이 입구부위에서부터 나타나 출구로 갈수록 압력형상이 심하게 요동됨을 알 수 있다. Fig. 6(b)의 Y축 단면에서는 상어 표피의 리브 형상이 존재하는 부위에서 압력

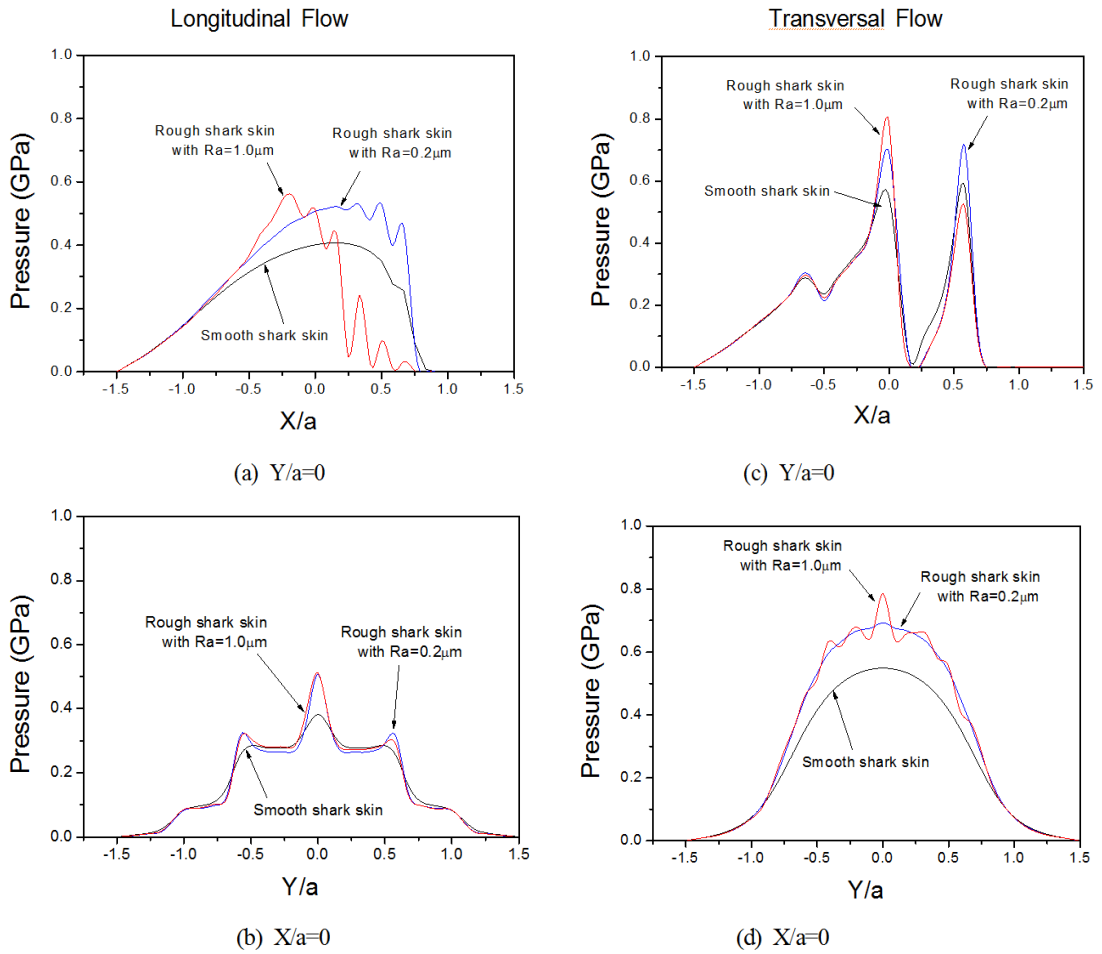


Fig. 6 2D pressure profiles at  $Y/a=0$ (top) and  $X/a=0$ (bottom) for longitudinal(left) and transversal(right) flows of shark skin

이 증가함을 알 수 있고 미세 돌기의 표면거칠기가 거칠수록 리브가 존재하는 부위의 압력이 크게 증가되는 것을 알 수 있다. Fig. 6(c) 및 (d)의 횡방향 유동시 압력 프로파일에서도 미세돌기에 의한 압력 상승 영향을 확실하게 알 수 있다. 따라서 리블렛 구조의 상어표피형상을 접촉기계요소의 표면에 적용할 경우 종방향 유동이 일어나도록 표면가공이 이루어져야 할 것으로 생각된다. 향후 이러한 종방향 유동시 운환성능을 향상시킬 수 있도록 리브 구조의 높이와 폭, 그리고 리브간의 공간적 분포에 대한 최적화와 관련된 연구가 필요할

것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 리블렛 구조의 상어 표피 형상에 대한 3차원 운환 해석을 수행하여 그 특성을 살펴 보았다. 이를 위해 실제 상어 표피형상을 측정하여 미세돌기의 표면 거칠기를 고려한 리블렛구조의 표면형상을 수치적으로 생성시켰다. 구 접촉문제로 가정한 운환 해석 결과, 실제 상어 표피의 유체 흐름과 유사한 종방향 유동의 경우가 횡방향

유동의 경우보다 유체압력의 발생이 상대적으로 낮음을 확인할 수 있었다. 또한 리블렛에 존재하는 미세돌기의 표면거칠기가 거칠수록 유체압력의 증가폭은 증가함을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음

## References

1. M. J. Walsh, 1982, "Turbulent boundary layer drag reduction using reblets," Aerospace Sciences Meeting 20th.
2. J. Genzer and A. Marmur, 2008, "Biological and Synthetic Self- Cleaning Surfaces," MRS Bulletin, Vol. 33, pp. 742-746.
3. L. Sirovich and S. Karlsson, 1997, "Turbulent drag reduction by passive mechanisms," Nature, Vol. 388, pp. 753-755.
4. Y. C. Jung and B. Bhushan, 2010, "Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows," J.Phys.:Condens. Matter., Vol. 22, pp. 035104.
5. W. Sagong, C. Kim, S. Choi, W. P. Jeon and H. Choi, 2008, "Does the sailfish reduce the skin friction like the the shark skin?," Phys. Fluids, Vol. 20, pp. 101510.
6. S. J. Lee and Y. G. Jang, 2005, "Control offlow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film," J. Fluids, Vol. 20, pp. 659-672.
7. Y. Rahmawan, M. W. Moon, K. S. Kim, K. R. Lee and K. Y. Suh, 2010, "Wrinkled, Dual-Scale Structures of Diamond-Like Carbon (DLC) for Superhydrophobicity," Langmuir, Vol. 26, pp. 484-491.
8. T. W. Kim and B. Bhushan, 2006, "Generation of Composite Surfaces with Bimodal Distribution and Contact Analysis for Optimum Tribological Performance," ASME Journal of Tribology, Vol. 128, pp. 851-864.
9. A. E. H. Love, 1929, "Stress Produced in a Semi-Infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary," Phil. Trans. Royal Society, Vol. A228, pp 377-420.
10. C. J. A. Roelands, 1966, "Correlational Aspects of the viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils," Druk, V.R.B., Groinen, Netherland.
11. D. Dowson, and G. R. Higginson, 1966, "Elastohydrodynamic Lubrication," Pergamon, Oxford.
12. Y. J. Cho, and T. W. Kim, 2011, "Development of algorithm for 3D mixed elastohydrodynamic lubrication analysis," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 12, pp 1065-1070.