

## 돛새치 피부는 상어 피부처럼 마찰저항을 줄일 수 있을까?

사공웅\*·김철규\*·최상호\*·전우평\*\*·최해천\*\*

### Does the Sailfish Skin Reduce the Skin Friction Like the Shark Skin?

Woong Sagong\*, Chulkyu Kim\*, Sangho Choi\*, Woo-Pyung Jeon\*\*, Haecheon Choi\*\*

**Key Words :** Drag Reduction(항력감소), Boundary Layer Control(경계층제어), Turbulence Control(난류제어), Sailfish(돛새치), V-shaped Protrusion(V자형 돌기)

#### Abstract

The sailfish is the fastest sea animal, reaching its maximum speed of 110km/h. On its skin, a number of V-shaped protrusions pointing downstream exist. Thus, in the present study, the possibility of reducing the skin friction using its shape is investigated in a turbulent boundary layer. We perform a parametric study by varying the height and width of the protrusion, the spanwise and streamwise spacings between adjacent ones, and their overall distribution pattern, respectively. Each protrusion induces a pair of streamwise vortices, producing low and high shear stresses at its center and side locations, respectively. These vortices also interact with those induced from adjacent protrusions. As a result, the drag is either increased or unchanged for all the cases considered. In some cases, the skin friction itself is reduced but total drag including the form drag on the protrusions is larger than that of a smooth surface. Since the shape of present protrusions is similar to that used by Sirovich and Karlsson [Nature 388, 753 (1997)] where V-shaped protrusions pointing upstream were considered, we perform another set of experiments following their study. However, we do not obtain any drag reduction even with random distribution of those V-shaped protrusion.

#### 1. 서론

난류 경계층에서 마찰저항을 줄이는 것은 자동차, 비행기, 배, 연료 송수관 등과 같은 다양한 공학 분야에서 가장 중요하게 여겨지는 사항이다. 이를 위해 많은 제어방법 [1~4]들이 제시되었지만, 이들 대부분은 다량의 피드백 센서 및 액추에이터나 외부 에너지 공급이 필요한 능동제어방법이다. 상어 피부의 돌기 형태와 유사한 리블렛은 매끈한 평판에 비해 최대 8%까지 마찰저항을 줄일 수 있는 수동제어장치이며, 현재까지 개발된 많은 제어장치들 중에서 가장 성공적인 것이다. 그렇지만 리블렛의 크기가 매우 작기 때문에 이를 실제 문제에 적용하는 것은 쉬운 일이 아니다. 예를 들어, 일반 여객기에 리블렛을 적용하여 항력감소를 얻기 위해서는 리블렛의 산간 간격이  $O(10\ \mu\text{m})$ 가 되어야 한다. 그러나 공기 중의 먼지에 의해 리블렛의 골 부분이 쉽게 뒤덮이게 되고, 결국 항력 감소가 일어나지 않는다. 따라서 마찰저항을 효과적으로 줄이기 위해서는 보다 큰 크기의 수동제어장치를 개발하는 것이 반드시 필요하다. 그러나 현재까지는 Sirovich & Karlsson [5]의 연구를 제외하고 성공적으로 마찰저항을 감소시키는 수동제어장치가 개발되지 못했다.

상어의 최고 속도는 50km/h에 지나지 않지만, 돛새치는 최고 110km/h로 움직이는 바다에서 가장 빠른 동물이다. 많은 생물학자들은 빠른 속도와 특이한 형태 때문에 돛새치와 관련된 많은

연구를 수행하였고, 특히 돛새치의 피부가 항력을 줄이는 역할을 할 것이라고 추측하였지만 [6, 7], 실험적 근거를 제시하지 못하였다.

최근 우리는 South China Sea에서 직접 돛새치를 채집하여 살펴본 결과, 돛새치 피부에 리블렛보다 훨씬 큰 크기의 유동방향으로 뾰족한 V자형 돌기가 몸 전체에 많이 분포되어 있는 것을 알 수 있었다. 흥미롭게도 돛새치 피부에 존재하는 이러한 V자형 돌기는 Sirovich & Karlsson [5]의 연구에서 10%의 마찰저항 감소를 얻은 V자형 돌기와 뾰족한 방향은 반대지만 유사한 형태를 가진다. 그러나 현재까지 어느 누구도 이들의 연구결과를 재연하여 항력감소 결과를 보여주지 못했다.

따라서 본 연구에서는 난류 경계층에서 돛새치 피부에 존재하는 V자형 돌기를 이용하여 마찰저항을 줄일 수 있는가에 대해 풍동실험과 수치해석을 통해 살펴보고자 한다. 돌기의 높이와 넓이, 이웃하는 돌기 사이의 유동방향 및 폭방향 간격, 그리고 전체적인 분포패턴을 변화시켜가면서 매개변수 연구를 수행할 것이다. 그리고 Sirovich & Karlsson [5]의 연구에서 사용된 돌기에 대해서도 실험과 수치해석을 수행하여 항력감소 성능을 검증하고자 한다.

#### 2. 실험 장치 및 수치해석 방법

##### 2.1 실험 장치

그림 1에서 보는 것과 같이 돛새치 피부에는 유동방향으로 뾰족한 V자형 돌기가 몸 전체에 많이 분포되어 있다. 돌기의 특

\* 서울대학교 대학원, hope40@snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 기계항공공학부, choi@snu.ac.kr

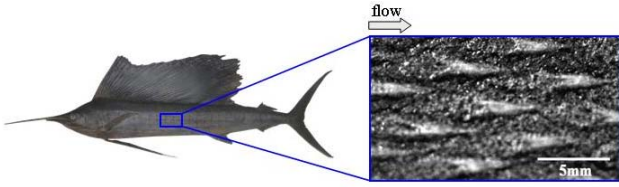


Fig. 1: Sailfish skin.

성 길이 (폭방향 넓이 ( $W$ ), 유동방향 길이 ( $L$ ), 수직방향 높이 ( $H$ ))를 직접 측정하였고, 각각의 평균값은  $W = 1.8\text{mm}$ ,  $L = 4.7\text{mm}$ ,  $H = 0.1\text{mm}$ 이다 (그림 2). 돌기의 분포 패턴은 모두 세 가지 (parallel, staggered, random)를 고려하였으며, 이 역시 그림 2에 나타내었다. 본 연구에서는 돌기의 크기 측정 결과를 토대로 넓이와 길이의 비 ( $W/L$ )와 각도 ( $\alpha$ )를 각각 0.383과  $53^\circ$ 로 유지하였다. 고려한 매개변수는 돌기의 높이 ( $H$ )와 넓이 ( $W$ ), 이웃하는 돌기 사이의 유동방향 및 폭방향 간격 ( $S_x$  &  $S_y$ ), 그리고 전체적인 분포 패턴 (parallel, staggered, random)이다. 여기서 random 분포는 parallel 분포에서 각 행을 무작위로 이동시킨 형태이며, 이는 Sirovich & Karlsson [5]이 제안한 방법과 동일하다. 모두 170여 개의 매개변수 조합에 대해 시험관에 걸리는 항력을 직접 측정하였고, 그 중 대표적인 것들만 3.에 나타내었다.

실험은 시험부의 길이가 2m ( $x$ ), 입구 단면적이 0.3m ( $y$ )  $\times$  0.4m ( $z$ )인 개방 흡입형 풍동에서 수행하였고, 시험부의 출구 단면적은 영압력구배를 맞추기 위해 약간 크게 하였다 (0.3m  $\times$  0.42m). 여기서  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 는 각각 유동방향, 수직방향 및 폭방향을 나타낸다. 평균 유동방향 속도의 균일도와 난류강도는 20m/s에서 모두 0.5% 이내이다. 실험에서 고려한 자유유동 속도 ( $u_\infty$ )는 15m/s에서 30m/s이고, 이에 해당하는 레이놀즈 수 ( $Re_\theta = u_\infty \theta / \nu$ ,  $\theta$ 는 입구에서의 운동량 두께,  $\nu$ 는 동점성계수)는 4400에서 8300이다. 시험관 위의 유동은 난류 경계층 특성을 나타낸다. 시험관에 작용하는 항력은 floating element 장치를 이용하여 직접 측정하였고, 오차는  $\pm 1.5\%$ 이다. 실험장치의 검증을 위해 평판과 리블렛의 마찰저항을 측정하여 기존의 연구결과 [4, 8~10]들과 비교해본 결과 잘 일치하는 것을 확인하였다.

## 2.2 수치해석 방법

V자형 돌기 주위의 유동에 대해 조사하기 위해 직접수치모사를 수행하였고, 돌기의 형상은 직교 좌표계에서 가상경계방법 [11]을 사용하여 구현하였다. 이를 적용한 비정상 비압축성 점성 유동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} u_i u_j = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j} u_i + f_i \quad (1)$$

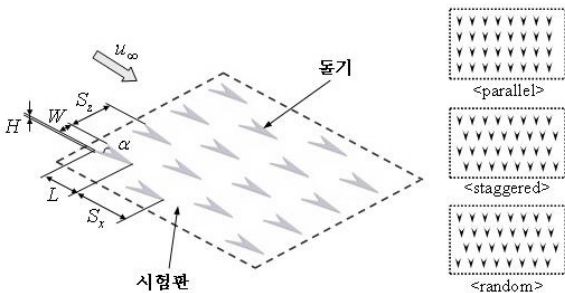


Fig. 2: Schematic diagram of the protrusions placed on a flat plate (parallel, staggered and random distributions).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - q = 0 \quad (2)$$

여기서  $x_i$ 는 직교 좌표계,  $u_i$ 는 그에 해당하는 속도성분,  $p$ 는 압력,  $f_i$ 는 운동량 부가,  $q$ 는 질량 부가를 의미한다. 시간전진기법으로 준내적 분할 단계 방법을 사용하였고, 공간차분기법으로는 중앙차분법을 사용하였다. 고려한 유동은 난류 채널유동이며, 채널의 윗벽은 매끈하게, 아랫벽은 돌기가 있는 형태로 구현하였다. 유동방향과 폭방향으로는 주기조건을 부가하였으며, 윗벽과 아랫벽에는 점착조건을 적용하였다. 채널의 절반 높이 ( $\delta$ )와 층류 중심 속도 ( $U_c$ )를 기준으로 한 레이놀즈 수 ( $Re = U_c \delta / \nu$ )는 4200이고, 체적 유량은 일정하게 유지하였다. 계산영역과 격자수는 돌기의 크기, 유동방향 및 폭방향 간격, 그리고 전체적인 분포패턴에 따라 다르게 설정하였다. 예를 들어,  $H^+ (= Hu_c / \nu, u_\tau$ 는 벽 전단속도) = 8,  $W^+ = 174$ ,  $S_y/W = 4$ ,  $S_x/L = 2$ , parallel 분포인 돌기들을 고려한 경우, 계산영역은  $5\delta(x) \times 2\delta(y) \times 3.9\delta(z)$ 이고, 격자수는  $160(x) \times 132(y) \times 128(z)$ 이다. 폭방향으로는 균일격자를, 유동방향과 수직방향으로는 비균일격자를 사용하였다.

## 3. 실험 및 수치해석 결과

그림 3(a)와 (b)는 각각 돌기의 높이와 넓이에 따른 항력변화를 나타낸다. 여기서 항력변화 ( $\Delta D$ )는  $(D - D_0)/D_0$ 로 정의되고,  $D$ 와  $D_0$ 는 각각 돌기가 붙어 있는 경우와 없는 경우의 항력이다. 실험에서 측정한 항력 ( $D$ )은 판의 마찰저항에 돌기 자체의 형상저항이 더해진 값이다. 다른 매개변수를 일정하게 유지할 때, 항력은 높이가 증가하거나 넓이가 감소할수록 커진다 (그림 3). 높

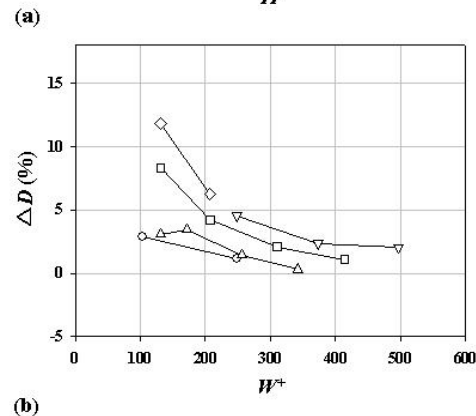
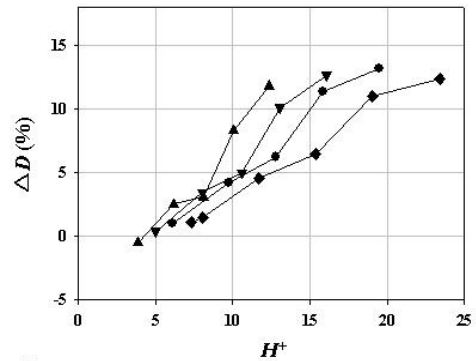


Fig. 3: Variations of drag ( $S_y/W = 2$ ,  $S_x/L = 2$ , and staggered): (a) height; (b) width. In (a), ▲,  $W^+ = 131$ ; ▼, 171; ●, 207; ◆, 250. In (b), ○,  $H^+ = 7.3$ ; △, 8.1; □, 9.8; ▽, 11.7; ◇, 12.5.

이를 작게 하거나 넓이를 크게 하는 경우 항력은 아무것도 부착하지 않은 매끈한 평판의 항력에 가까워진다. 실제 돛새치 피부에 존재하는 돌기의 무차원화된 높이와 폭을 계산하면, 돛새치가 최대 속도인 30m/s로 유행하는 경우  $H/\theta \approx 0.08$  ( $H^+ \approx 90$ ),  $W/\theta \approx 1.45$  ( $W^+ \approx 1650$ )이고, 평균 속도인 약 2m/s로 움직이는 경우  $H/\theta \approx 0.047$  ( $H^+ \approx 8$ ),  $W/\theta \approx 0.84$  ( $W^+ \approx 145$ )이다. 본 연구에서 고려한 높이와 넓이의 범위는 각각  $0.01 \leq H/\theta \leq 0.08$  ( $2 \leq H^+ \leq 25$ )과  $0.39 \leq W/\theta \leq 1.64$  ( $65 \leq W^+ \leq 500$ )이고, 이는  $H^+ \approx 90$ 과  $W^+ \approx 1650$ 인 경우를 제외하고, 실제 돛새치의 유행 조건으로부터 계산한 무차원화된 높이와 넓이의 값을 모두 포함한다. 그러나 고려한 범위에서 항력은 감소하지 않았고,  $H^+ \approx 90$ 과  $W^+ \approx 1650$ 인 경우는 항력이 크게 증가하리라는 것을 그림 3으로부터 쉽게 유추할 수 있다.

돌기에 의해 유동장이 어떻게 변화되는가를 살펴보기 위해 직접 수치모사를 수행하였다. 그림 4는  $H^+ = 4$ 와 8 ( $W^+ = 87$ ,  $S_z/W = 3$ ,  $S_y/L = 2$ , parallel 분포)인 경우 돌기의 가운데에서 평균 cross-flow 벡터 ( $v, w$ )와 벽면에서의 평균 전단응력의 변화를 보여준다. 여기서 전단응력의 변화는  $(du/dy)|_{\text{돌기}} - du/dy|_{\text{평판}} / du/dy|_{\text{평판}}$ 으로 정의된다. 하나의 V자형 돌기는 한 쌍의 유동방향 vortices를 만든다. 이러한 vortices에 의해 형성된 위와 아래로 향하는 유동 때문에 돌기 가운데와 옆 부분에서 각각 매끈한 평판에 비해 낮고 높은 전단응력이 나타난다 (그림 4).  $H^+ = 4$ 인 경우에는 vortices가 약하기 때문에 전단응력에 큰 변화가 없지만,  $H^+ = 8$ 인 경우에는 vortices가 크고 강해져서 전단응력의 변화가 뚜렷해진다. 전자의 경우 전체 마찰저항은 매끈한 평판에 비해 거의 변화가 없지만, 후자는 5% 증가한다. 돌기 자체에 작용하는 형상저항에 의해 발생하는 항력 증가량은  $H^+ = 4$ 와 8의 경우 각각 2%와 5%이다.

돌기의 넓이가  $W^+ = 87$ 과 174 ( $H^+ = 8$ ,  $S_z/W = 3$ ,  $S_y/L = 2$ , parallel 분포)인 경우에 대해서도 수치해석을 수행하였다. 넓이가 작아질수록 벽면에 작용하는 마찰저항과 돌기에 작용하는 형상저항 모두 증가하였다. 또한 돌기의 폭방향과 유동방향 간격에 의한 항력변화를 알아보기 위해 풍동실험과 수치해석을 수행하였다. 두 방향 모두에 대해서 간격이 좁아질수록 항력이 증가하는 것을 알 수 있었고, 직관적으로 유추할 수 있듯이 돌기 사이의 간격이 큰 경우에는 매끈한 평판의 항력과 크게 차이가 나지 않는 것을 확인하였다.

그림 5는 돌기의 전체적인 분포 패턴에 따른 항력변화를 보

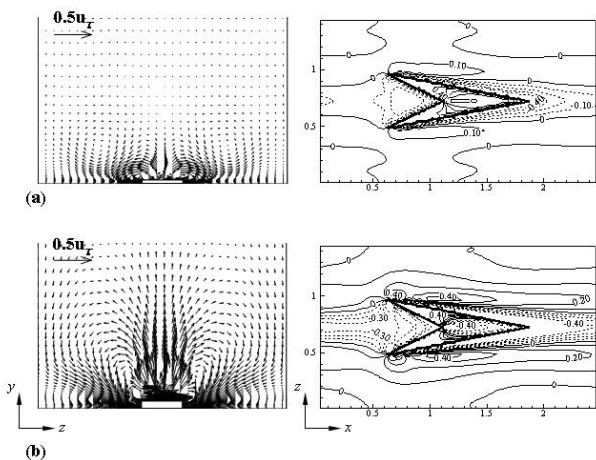


Fig. 4: Mean cross-flow vectors at the middle of protrusion (left) and contours of mean shear-stress variation on the wall (right) for the case of ( $W^+$ ,  $S_z/W$ ,  $S_y/L$ , pattern) = (87, 3, 2, parallel): (a)  $H^+ = 4$ ; (b) 8.

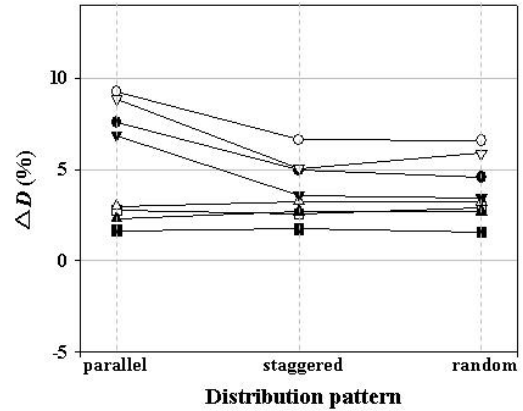


Fig. 5: Variation of drag with the distribution pattern of protrusions (parallel, staggered, and random): ● ( $H^+$ ,  $W^+$ ,  $S_z/W$ ,  $S_y/L$ ) = (6.3, 107, 2, 1); ○, (7.3, 124, 2, 1); ▼, (5.0, 85, 1.14, 1.5); ▽, (6.3, 107, 1.14, 1.5); ■, (4.6, 66, 2, 1.5); □, (6.0, 85, 2, 1.5); ▲, (6.0, 85, 3, 1.5); △, (7.3, 103, 3, 1.5).

여준다. 분포 패턴에 관계없이 모든 경우에 대해서 항력은 변화가 없거나 증가하였다. 이웃하는 돌기의 간격이 큰 경우에는 분포 패턴에 따라 항력변화가 나타나지 않았다.  $S_z/W = 1.14$ 나  $S_y/L = 1$ 인 경우에는 parallel 분포보다 staggered나 random 분포의 항력이 더 작게 나타났지만, 여전히 매끈한 평판의 값보다는 크게 나타났다. Parallel 분포의 경우에는 돌기에 의해 생성된 유동방향 vortices들이 하류로 흘러가면서 같은 방향의 vortices를 만나게 된다. 이로 인해 vortical motion이 강해지고, 그 결과 마찰저항이 크게 나타난다. 그러나 staggered 분포의 경우에는 돌기에 의해 형성된 유동방향 vortices가 하류로 이동하면서 반대방향의 vortices를 만나게 된다. 그래서 vortices들이 약하게 형성되어, 마찰저항이 parallel 분포에 비해 크게 줄어든다.  $S_z/W = 1.14$  ( $H^+ = 8$ ,  $W^+ = 87$ ,  $S_y/L = 2$ , staggered 분포)의 경우에는 매끈한 평판에 비해 마찰저항이 5% 감소했지만, 돌기 자체의 형상저항 때문에 전체저항은 오히려 11% 증가하였다.

본 연구에서 고려한 돌기의 형태는 Sirovich & Karlsson [5]의 연구에서 사용한 돌기와 방향은 반대이고 모양은 유사하다. 이들의 결과에 따르면, V자형 돌기의 분포 패턴이 random 분포일 때 항력이 10% 감소하고, parallel 분포일 때 항력이 증가하였다. 이를 검증하기 위해 이들 [5, 12]이 사용한 돌기와 형상 및 크기가 똑같은 돌기를 제작하여 마찰저항을 측정하였다 (그림 6a). 돌기의 두께 ( $t$ )에 대한 값이 주어지지 않았기 때문에  $t^+ = 20, 30$  및 40에 대해서 실험을 수행하였다. 그림 6(b)에서 보는 것과 같이 항력은 돌기의 두께와 상관없이 거의 같게 나타났다. Parallel 분포에 비해 staggered와 random 분포일 때 항력이 더 작게 나타나지만, 매끈한 평판에 비해 항력이 감소하지 않았다. 그리고 parallel과 staggered 분포인 경우에 대해 수치해석을 수행하여 분포 패턴에 따른 유동장의 변화를 살펴보았다. 본 연구에서 고려한 돌기와 마찬가지로 유동 반대방향으로 뾰족한 V자형 돌기에 의해 주유동 방향의 vortices가 생성되지만 회전 방향은 반대이다. 돌기 가운데와 옆 부분의 전단응력은 매끈한 평판에 비해 각각 높고 낮게 나타나고, staggered 분포의 경우에는 마찰저항이 3% 줄어든다. 그러나 역시 돌기의 형상저항 때문에 전체 저항은 오히려 증가한다. 풍동실험과 수치해석을 통해 Sirovich & Karlsson [5]과 Sirovich et al. [12]의 연구에 사용된 돌기의 항력 감소 효과를 살펴보았지만, 그들의 결과와 다르게 항력은 줄어들지 않았다.

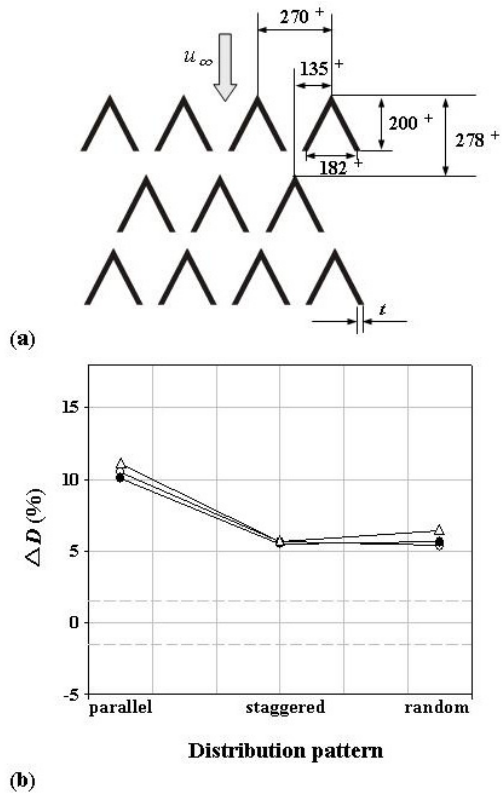


Fig. 6: Experiment using V-shaped protrusions suggested by Sirovich and Karlsson [5] and Sirovich et al. [12]: (a) schematic diagram and size of the protrusions; (b) variation of drag with the distribution pattern. In (b), ○,  $t^+=20$ ; ●, 30; △, 40.

#### 4. 결론

돛새치가 물 속에서 가장 빠른 생물이라는 점에 착안하여 돛새치의 피부가 상어 피부 (리블렛)처럼 마찰저항을 줄일 수 있을 것이라 생각하고 직접 돛새치의 피부를 관찰하였다. 돛새치의 표면에는 유동방향으로 뾰족한 V자형 돌기가 몸 전체에 많이 분포되어 있었다. 이를 이용하여 난류 경계층에서 마찰저항을 줄일 수 있는지 알아보기 위해 풍동실험과 수치해석을 수행하였다.

돌기의 높이와 넓이, 이웃하는 돌기와의 유동방향과 폭방향 간격 및 돌기의 전체적인 분포 패턴을 매개변수로 설정하고, 각각의 변화에 따른 항력변화를 살펴보았다. 170 여 가지의 매개변수 조합에 대해 직접 힘을 측정하였지만, 항력은 변화가 없거나 증가하였다. 돌기의 높이가 증가하거나 넓이가 감소할수록 항력은 증가하였다. 각각의 돌기는 한 쌍의 주유동 방향 vortices를 만들고, 이로 인해 돌기 가운데와 옆 부분에 각각 평판에 비해 상대적으로 낮고 높은 전단응력이 나타난다. 이웃하는 돌기와의 간격이 가까워질수록 서로 다른 돌기에 의해 생성된 vortices들이 서로 활발하게 상호작용을 하여 항력을 더욱 증가시켰다. Staggered (혹은 random) 분포일 때 마찰저항이 줄어드는 경우도 있었지만, 돌기의 형성저항 때문에 전체 저항은 증가하였다.

돛새치 피부에 존재하는 V자형 돌기는 마찰저항을 줄이는 장치로 제안된 Sirovich & Karlsson [5]의 돌기와 방향은 반대지만 매우 유사한 형태이다. 풍동실험과 수치해석을 수행하여 크기와 형상이 똑같은 돌기에 대해 항력감소 효과를 살펴보았다. 돛새치 피부에 있는 유동방향으로 뾰족한 돌기와 마찬가지로 유

동 반대방향으로 뾰족한 돌기 역시 주유동 방향의 vortices를 만들지만, 회전 방향은 반대이다. 그래서 돌기 가운데와 옆에서 각각 높고 낮은 전단응력이 나타난다. Staggered나 random 분포가 parallel 분포보다 항력이 작게 나타나지만, 그들의 결과와 다르게 평판에 비해 항력이 줄어들지 않았다.

이번 연구를 통해 살펴본 결과, 돛새치 피부의 V자형 돌기는 난류 경계층의 마찰저항을 줄이는 역할을 하지 않는 것으로 여겨진다. 그러나 V자형 돌기가 마찰저항을 줄이는 것이 아니라 형상저항을 감소시킴으로써 전체 저항을 줄일 수도 있다. 돛새치는 머리 앞쪽의 긴 부리 때문에 낮은 속도에서도 몸 주위에 난류 경계층이 형성된다. 따라서 V자형 돌기에 의해 형성된 주유동방향 vortices가 난류 박리점을 지연시켜서 항력을 감소시키는지를 살펴보는 것도 중요한 연구가 될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업과 교육인적 자원부의 BK21 program의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Choi, H., Moin, P. and Kim, J., Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows, *J. Fluid Mech.*, 262 (1994), pp.75-110.
- [2] Du, Y. and Karniadakis, G. E., Suppressing wall turbulence by means of a transverse traveling wave, *Science*, 288 (2000), pp.1230-1234.
- [3] Lee, C., Kim, J. and Choi, H., Suboptimal control of turbulent channel flow for drag reduction, *J. Fluid Mech.*, 358 (1998), pp.245-258.
- [4] Walsh, M. J., Turbulent boundary layer drag reduction using riblets, *AIAA paper 82-0169* (1982).
- [5] Sirovich, L. and Karlsson, S., Turbulent drag reduction by passive mechanism, *Nature*, 388 (1997), pp.753-755.
- [6] Walters, V., Body form and swimming performance in the scombroid fishes, *Am. Zool.*, 2 (1962), pp.143-149.
- [7] Webb, P. W., Hydrodynamics and energetics of fish propulsion, *Bull. Fish. Res. Board Can.*, 190 (1975), pp.1-159.
- [8] Österlund, J. M., Johansson, A. V., Nagib, H. M. and Hites, M. H., A note on the overlap region in the turbulent boundary layers, *Phys. Fluids*, 12 (2000), pp.1-4.
- [9] Purtell, L. P., Klebanoff, P. S. and Buckley, F. T., Turbulent boundary layer at low Reynolds number, *Phys. Fluid*, 24 (1981), pp.802-811.
- [10] Bechert, D. W., Bruse, M., Hage, W., van der Hoeven, J. C. T. and Hoppe, G., Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry, *J. Fluid Mech.*, 338 (1997), pp.59-87.
- [11] Kim, J., Kim, D. and Choi, H., An immersed-boundary finite-volume method for simulations of flow in complex geometries, *J. Comput. Phys.*, 171 (2001), pp.132-150.
- [12] Sirovich, L., Levich, E., Bronicki, L. Y. and Karlsson, S., Apparatus for controlling turbulence in boundary layer and other wall-bounded fluid flow fields, *US patent No. 5,833,389*, (1998).