생체모방 유동제어

DOI: 10.3938/PhiT.19.045

최해천·박형민·사공웅

Bio-Mimetic Flow Control

Haechon CHOI, Hyungmin PARK and Woong SAGONG

In this article, the achievements in the field of flow control from bio-mimetic approaches are reviewed. Based on the idea that the characteristics of living organism have been optimized for certain functionalities, bio-mimetic approaches have produced many useful devices for drag reduction and aerodynamic performance enhancement. Furthermore, there remain many biological features to be applied for engineering purposes.

서론

생체모방공학은 자연계에 존재하는 생명체의 외형, 구조, 구성 물질 및 작동 원리 등을 모방하여 공학적으로 응용하는 것을 말한다. 15세기 말 새의 날개를 모방한 레오나르도 다 빈치의 비행체 날개 스케치로부터 최근 벤츠에서 개발한 거북목의 외형을 본 뜬 bionic concept car에 이르기까지 인류는 오랫동안 생명체를 모방하여 새로운 기술을 개발하거나 기존 기술을 향상시키기 위한 노력을 기울여 왔다. 자연계에 존재하는 생명체를 모방한다는 생체모방공학의 기본 개념 자체는 오래전부터 있었지만, 최근에 이르러 많은 공학 분야에서 기존의 수학적 혹은 물리적 접근 방법을 통해 풀지 못했던 문제들을 생체모방적 접근 방법을 이용하여 해결하기 위한 시도가 급속도로 증가하고 있다.

저자약력

최해천 교수는 미국 Stanford University 박사(1992)로서, 미국 Center for Turbulence Research (NASA-Ames Research Center & Stanford Univ.) 연구원(1992-1993)을 거쳐, 1993년부터 현재까지 서울대학교 기계항공공학부 교수로 재직 중이다. (choi@snu.ac.kr)

박형민 박사는 서울대학교 박사(2010)로서, 현재 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소 연구원으로 재직 중이다. (neozaza0@snu.ac.kr)

사공웅 박사는 서울대학교 박사(2010)로서, 현재 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소 연구원으로 재직 중이다. (hope40@snu.ac.kr)

생체모방공학은 자연계에 존재하는 생명체들이 오랜 시간을 거치면서 진화를 해 왔다는 데 바탕을 두고 있다. 생명체들은 생존이나 번식을 위해 ‘자연 선택(natural selection)’의 과정을 통해 주어진 환경에 가장 적합하게 변화되어 왔다. 즉, 생명체가 가지고 있는 특징은 오랜 시간 동안 무수히 많은 시행착오를 통해 얻어진 것이기 때문에, 생명체를 모방한다는 것은 방대한 자연의 경험을 바탕으로 얻어진 가장 효율적인 방법을 공학적인 문제에 이용한다는 것을 의미한다.

생체모방적 접근 방법은 기계 공학, 재료 공학, 화학 공학 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 특히 대부분의 생명체는 공기나 물 속에서 존재하고 활동하기 때문에 유동제어 분야에서 생체모방을 이용한 연구는 무한한 가능성을 가지고 있다. 예를 들어 물 속에서 빠르게 움직일 수 있는 물고기들은 포식자들을 피하거나 먹이를 잡아먹기 위해 물 속에서 움직이는데 작용하는 강한 저항을 극복할 수 있도록 변화해왔을 것이며, 공중에서 자유롭게 날 수 있는 새나 곤충은 높은 에너지 효율을 가지고 날 수 있도록 날개의 형태나 움직임을 변화시켜 왔을 것이다. 따라서 물고기, 새 및 곤충 등 유체 내에서 뛰어난 움직임을 보이는 생명체들을 관찰하여 그들의 특징을 분석하는 것은 유동 저항 감소, 비행체의 공력 성능 향상과 같은 유동제어 문제에 훌륭한 아이디어를 제공해 줄 수 있다.

마찰저항 감소 기술

유동저항에는 유체의 점성에 의해 발생하는 마찰저항과 물체의 앞뒷면에 작용하는 압력 차이에 의해 발생하는 형상저항이 있다. 이 중 마찰저항을 줄이는 것은 고속철, 선박, 잠수함, 비행기 등 유선형 물체의 저항감소를 위해 매우 중요하다. 마찰저항은 경계층(boundary layer) 유동 형태에 따라 크게 변하게 되는데, 특히 난류(turbulent flow) 경계층에서의 마찰저항은 층류(laminar flow) 경계층에서의 그것보다 훨씬 더 높게 나타난다. 고속철, 선박 등 운송체가 움직이는 높은 Reynolds 수 영역($Re > 10^6$)에서는 난류 경계층이 발생하기 때문에, 유동제어 분야에서는 난류 경계층에서 마찰저항 감소를 위한 연구가 꾸준히 수행되어 왔다. 그러나 난류유동

Fig. 1. Riblets: (a) shark skin^[3]; (b) instantaneous flows over the riblet surface (contours of the wall-shear rate on the riblet surface (left) and contours of the streamwise vorticity in an (y, z) -plane).^[2]

의 복잡성과 비선형성으로 인해 성공적인 유동제어 방법을 개발하는 데 많은 어려움이 있었다. 현재까지는 벽면에서의 분사/흡입(blowing/suction), travelling wave, wall oscillation 등과 같은 능동제어방법(active control method)을 통해 난류 경계층에서 마찰저항을 줄일 수 있다는 것이 밝혀졌지만, 이를 실질적으로 구현하기 위해서는 많은 수의 액추에이터와 센서가 필요하다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 수동제어방법(passive control method)을 이용한 연구 역시 많이 수행되었으며, 그 중 리블렛(riblet)은 가장 성공적인 수동제어방법으로 평가받고 있다.

리블렛은 유동방향으로 길게 설치된 홈을 의미한다. 1970년대 후반 NASA에서는 유동방향으로 설치된 작은 크기의 일정한 구조물이 난류 경계층에서 벽 가까이의 유동 구조를 변화시키고 마찰저항을 줄인다는 연구결과를 처음으로 발표하였다. Walsh 박사는 실험을 통해 직사각형 홈, V자 홈, U자 홈 등 다양한 형태의 유동방향 홈이 난류경계층에 마찰저항에 미치는 영향을 측정하여 V자형 홈이 최대 8%까지 마찰저항을 감소시킴을 보였으며,^[1] Choi *et al.*^[2]은 직접수치모사(DNS: Direct Numerical Simulation)를 통해 리블렛을 적절

Fig. 2. Sailfish skin.^[4]

한 간격으로 배치할 경우 유동방향 보텍스(streamwise vortex)에 의해 벽면방향 유동에 노출되는 표면적을 작게 하여 마찰저항을 줄이게 되며, 리블렛의 간격과 유동방향 보텍스 지름의 상대적 크기에 의해 리블렛의 저항감소 성능이 결정된다는 것을 밝힌 바 있다. 여기서 흥미로운 점은 이러한 리블렛이 물 속에서 빠른 어류 중 하나인 상어의 피부에서 관찰된다는 것이다[그림 1(a)]. 즉, 빠른 속도로 움직이는 상어는 마찰저항을 줄이기 위해 매끈한 피부 대신 리블렛이 있는 피부를 가지도록 진화를 해 왔음을 의미한다 (하지만 속도가 느린 상어의 경우에는 리블렛 구조의 비늘이 관찰되지 않았다). 이는 자연계에 존재하는 생명체의 표면, 특히 저항이 큰 물 속에서 빠르게 움직이는 수중 동물들의 표면으로부터 마찰저항을 줄일 수 있는 아이디어를 얻을 가능성이 높음을 시사한다. 최근 너무 뛰어난 성능 때문에 사용이 금지되긴 하였지만 리블렛이 적용된 전신 수영복은 올림픽을 비롯한 각종 수영대회에서 기록을 단축시키는 데 큰 공헌을 하였으며, 성능향상을 위해 요트나 비행기에도 리블렛이 적용되기도 하였다.

리블렛이 성공적으로 난류 경계층에서 마찰저항을 감소시킨다는 사실은 유동제어 분야의 연구자들에게 빠른 해양생물의 표면구조에 대한 관심을 유발시켰다[그림 2]. 상어 (최대 속도: 50 km/h) 이외에도 물속에서 빠르게 움직이는 동물들이 많이 존재하고 있으며, 특히 돛새치는 최대 속도가 110 km/h에 이를 정도로 바다 속에서 가장 빠른 물고기로 알려져 있다. 돛새치의 피부에는 유동방향으로 뽀족한 다수의 V자형 돌기가 분포되어 있으며, 그 크기는 리블렛에 비해 훨씬 크다 [그림 2].^[4] 리블렛은 뛰어난 저항감소 성능을 보유하고 있지만 작은 크기로 인해 높은 제작비용을 유발하고 공기 중의 먼지 등에 의해 저항감소 성능이 줄어들 가능성이 높다.

REFERENCES

- [1] M. Walsh, AIAA Paper 82-0169 (1982).
- [2] H. Choi *et al.*, J. Fluid. Mech. **255**, 503 (1993).
- [3] W. -E. Rief, Cour. Forschungsinst. Senckenberg **78**, 1 (1985).
- [4] W. Sagong *et al.*, Phys. Fluids **20**, 101510 (2008).

Fig. 3. Dolphin skin.^[5]

그러나 돛새치 피부의 V자형 돌기가 리블렛처럼 성공적으로 마찰저항을 줄일 수 있다면 리블렛이 가지고 있는 단점을 극복할 수 있게 된다. 이러한 점들에 착안하여 Sagong *et al.*^[4]은 돛새치 표면구조를 모사한 V자형 돌기가 난류 경계층의 마찰저항에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 먼저 돛새치 피부의 V자형 돌기를 공학적으로 적절하게 모델링하는 작업이 수행되었다. 살아있는 돛새치 피부를 관찰하여 돌기의 크기와 돌기 사이의 간격 및 분포 패턴 등을 정확하게 측정하고, 돛새치가 실제 물속에서 수영하는 조건들 (평상시 수영 속도와 최대 순간속도)을 모두 고려하여 돌기의 크기를 경계층 두께(momentum thickness)나 벽 단위(wall unit) 등과 같은 유동과 관련된 변수들로 무차원화한 후, 실험과 수치해석을 수행하였다. 돌기의 높이, 넓이, 길이, 유동방향 및 폭 방향 간격, 분포 패턴 등의 매개변수를 변화시켜 가면서 각각의 매개변수들이 유동장에 미치는 영향과 그에 따른 마찰저항의 변화를 살펴본 결과, 특정한 매개변수 조합에서 각각의 돌기에 의해 생성된 보텍스들이 상호작용을 일으켜 최대 5%의 마찰저항이 감소하였지만 돌기 자체에 작용하는 형상저항 때문에 전체 저항은 줄어들지 않았다.

상어의 리블렛이나 돛새치의 V자형 돌기와 같은 표면의 형태적인 특징 이외에도 해양생물 피부의 유연한(compliant) 특성 역시 마찰저항 감소를 위한 효과적인 유동제어 방법으로 간주되고 있다. 독일의 Kramer 박사^[5]가 돌고래의 피부 [그림 3]를 모사하여 제작한 유연한 벽면(compliant wall)이 경계층 천이(transition)를 상당히 지연시키고 저항을 크게 줄인다는 결과를 발표한 이래로 유연한 벽면에 대한 많은 후속연구가 진행되어 왔다.^[6,7] 그러나 완전히 발달된 난류 경계층에서 유연한 벽면이 마찰저항을 감소시킨다는 사실에 대해서는 현재까지도 논쟁이 이뤄지고 있다. 최근 Kim & Choi^[8]는 돌고래의 피부를 스프링과 댐퍼가 부착된 등방성(isotropic) 탄성벽면으로 모델링하여 난류채널유동에 적용하였다. 벽면의 강성, 탄성, 감쇠 계수들을 바꿔가면서 약 300여 가지의 유연한 벽면에 대해 직접수치모사를 수행하였지만 항력이 감소되는 경우를 발견할 수 없었다. 벽면 물성치의 조합에 따라

벽면의 움직임에 차이가 나타나는데, 벽면의 움직임이 큰 경우에는 채널 내에서 난류가 증가하고 벽면에 의한 형상저항이 크게 발생하는 반면, 벽면의 움직임이 작은 경우에는 유연한 벽면이 유동장에 큰 영향을 미치지 못하였다. 그러나 여전히 이방성(anisotropic) 유연 벽면이 마찰저항을 줄일 수 있는 가능성이 존재하기 때문에 이에 대한 연구도 현재 진행 중에 있다.

형상저항 감소 기술

유체의 흐름이 뾰족한 물체를 만날 때 발생하는 유동현상인 Karman vortex shedding은 형상저항을 일으키는 주요 원인이다. 따라서 이 vortex shedding을 효과적으로 제어하는 것은 공학적으로 매우 중요하다. 자연계의 대부분의 생명체는 기본적으로 형상저항이 작은 유선형을 띠고 있기 때문에, 생명체 연구로부터 형상저항 감소 기술을 개발하는 것은 다른 분야에 비해 어렵다고 할 수 있다. 생체모방의 몇 가지 예를 들면 다음과 같다.

평균 15 m/s 이상 (Reynolds 수 $\geq 10^6$)의 강한 바람이 부는 사막지대에서도 바람에 꺾이지 않는 수 m~수십 m 높이의 Saguaro 선인장은 줄기 표면에 길이방향으로 홈(groove)을 가지고 있으며 [그림 4(a)], 이러한 형태적 특징과 저항감소 기능과의 관계에 대하여 연구^[9-11]가 수행되었다. 그 결과 Reynolds 수가 10^5 이하인 영역에서 매끄러운 표면을 가진 원형 실린더에 비해 길이방향 홈이 있는 실린더 (선인장 모형)의 저항이 약 10% 이상 감소하는 것이 밝혀졌다. 저항감소 메커니즘을 보면, 주 유동 박리(main flow separation)가 일어나기 전에 위치한 홈의 꼭지점에서 국부적인 유동 박리가 발생하고, 홈 안에 박리기포(separation bubble)가 생성된다. 박리기포 위에서 발생한 전단층(shear layer)의 불안정성으로 인해 경계층에서 난류로의 천이가 촉진되며 이는 실린더 벽면 근처의 운동량을 증가시킨다. 그 결과, 주 박리 지점이 지연되어 실린더의 저항감소가 발생하는 것이다.^[10] 따라서, 원형 실린더 주위를 지나는 유동의 경우 정체점(stagnation point)

REFERENCES

- [5] M. O. Kramer, J. Am. Soc. Nav. Engin. **72**, 25 (1960).
- [6] M. Gad-el-Hak, Exp. Therm. Fluid Sci. **16**, 141 (1998).
- [7] J. J. Riley *et al.*, Annu. Rev. Fluid Mech. **20**, 393 (1988).
- [8] E. Kim and H. Choi, 4th TU-SNU-UT Joint Symposium (2010).
- [9] S. Talley *et al.*, CTR Annu. Res. Briefs. 51 (2001).
- [10] H. Kim, MS Thesis, Seoul Nat. Univ. (2008).
- [11] P. Babu and K. Mahesh, Phys. Fluids **20**, 035112 (2008).

Fig. 4. (a) Longitudinal grooves on a Saguaro Cactus.^[9] (b) Array of small protrusions at the trailing edge of a dragonfly wing.^[12]

으로부터 80° 위치에서 유동박리(flow separation)가 발생하지만, 선인장 모형은 90° 의 위치까지 박리가 지연되고 저항감소 효과를 얻을 수 있음이 밝혀졌다. 하지만, 훨씬 더 높은 Reynolds 수 영역에서는 오히려 선인장 모형의 저항계수가 더 큰 것으로 측정되었다.^[10] 현재까지는 실제 선인장이 겪을 수 있는 극한의 조건에서 길이방향의 홈이 저항을 줄인다는 것은 밝혀지지 않았지만, 그보다 낮은 Reynolds 수 영역에서의 길이방향 홈의 저항감소 능력은 공학적으로 많은 분야에 응용이 가능하다.

한편, 독일의 Kesel 박사는 잠자리 날개의 뒷단(trailing edge)의 윗면과 아랫면에 아주 작은 돌기들이 있는 것을 관찰하였고[그림 4(b)], 돌기들이 잠자리 날개의 성능을 향상시킬 수 있을 거라는 가설을 제시한 바 있다. 이에, 독일 항공 우주연구소(DLR)의 Bechert *et al.*^[12]은 Gurney flap이 설치되어 있는 익형(airfoil)의 뒷단에 잠자리 날개의 돌기를 모사한 장치를 부착하여 양력의 크기를 그대로 유지하면서 날개가 받는 저항을 약 10% 줄일 수 있음을 보였다. 이들은 작은 돌기에 의해서 생성된 보텍스 구조에 의해서 날개 뒤 후류(wake)의 보텍스 웨딩이 억제되기 때문에 날개에 작용하는 형상저항이 감소한다고 주장하였다.

이외에도 Mercedes Benz사는 거북목(Boxfish)의 외형을 본떠서 낮은 형상저항을 가지는 bionic concept car를 개발하여 발표한 바 있다 [그림 5]. 기존의 승용차들이 0.25 ~ 0.3의 항력계수를 가지는 것과 비교해서, 새롭게 제시된 concept car는 자동차 외형의 최적화를 통해 0.19의 낮은

Fig. 5. Bionic concept car (Mercedes Benz) inspired from the streamlined shape of a boxfish.^[13]

형상계수를 가지고 에너지 효율을 20% 이상 증가시킬 수 있다고 보고된 바 있다.^[13] 또한 최근에는 바다표범의 콧수염의 물결모양의 타원형 단면구조가 보텍스 웨딩에 의해 수염에 발생하는 진동(vortex-induced vibration)을 줄여서 물 속에서 수영하는 동안에도 콧수염이 부러지지 않고 견딜 수 있다는 연구 결과가 발표된 바 있다.^[14]

공력성능 향상 기술

하늘을 날기 위해 새나 곤충을 모사하려는 인류의 노력은 그 역사가 매우 오래되었으며, 이를 위해 수많은 연구들이 현재도 활발하게 진행되고 있다. 새나 곤충 등의 연구로부터 얻은 원리나 기술은 스케일의 차이 때문에 대형 항공기에 적용하는 데는 매우 신중을 기해야 하지만, 최근 큰 각광을 받고 있는 초소형비행체(Micro Air Vehicle, MAV), 소형 풍력발전 블레이드, 소형 가스터빈 블레이드 및 회전익 등 다양한 분야에 적용이 가능하기 때문에 큰 주목을 받고 있다. 특히 낮은 속도 (낮은 Reynolds 수) 영역에서 동작하는 날개에 필연적으로 발생하는 공력성능 저하를 극복하기 위해 생명체가 사용해온 다양한 메커니즘 (날갯짓 궤적의 제어 및 날개 형상 변화)에 대한 연구가 주로 이루어지고 있다.

곤충의 날갯짓 비행(flapping flight)에 있어서, 양력 발생의 비정상 공기역학(unsteady aerodynamics)과 날갯짓 궤적의 변화가 공력에 미치는 영향은 날갯짓에 의해 발생하는 유동 구조와 날개와의 상호 작용으로 설명할 수 있다 [그림 6]. 우선, 곤충은 일반적으로 비행 시 높은 받음각(angle of attack)을 이용하기 때문에 날개 전단(leading edge)에서 전단 보텍스(leading-edge vortex)가 발생하게 된다. 고전적인 항공기 공기역학에서는 이러한 전단 보텍스는 박리된 후 날개 윗면

REFERENCES

- [12] D. W. Bechert *et al.*, AIAA-2000-2315 (2000).
- [13] http://www.greencarcongress.com/2005/06/daimlerchrysler_1.html.
- [14] W. Hanke *et al.*, J. Exp. Biol. **213**, 2665 (2010).

Fig. 6. Three-dimensional vortical structures and induced velocity fields around a modeled fruit fly wing (near the end of mid-stroke).^[17]

으로부터 떨어져 날개의 양력을 급격하게 감소시키는 실속(stall)을 일으킨다. 하지만, 곤충 비행의 경우 박리된 전단 보텍스는 날갯짓에 의해 날개 윗면에 머무르게 되어 실속을 지연시키게 된다. 이러한 지연실속(delayed stall) 메커니즘은 날갯짓 비행에서 높은 양력을 발생시키는 중요한 원리이다.^[15,16] 이외에도, 이전 날갯짓에서 발생한 보텍스 구조가 다음 날갯짓에서 날개의 움직임과 교차하면서 발생하는 wake capture mechanism, 날개의 회전운동에 의해 부가적으로 발생하는 rotational lift 등^[16] 다양한 양력발생 메커니즘이 연구되고 있다. 또한, 곤충날개는 유한한 크기를 가지는 3차원 형상이기 때문에 날개 끝(wing tip)에서 생성된 wing-tip vortex 역시 공력에 영향을 주는 것이 밝혀진 바 있다.^[17] 자연계의 다양한 비행 곤충 중 잠자리는 거의 수직에 가까운 날갯짓 면(stroke plane)을 사용하여 수평한 날갯짓 면을 이용하는 대부분의 다른 곤충과 다른 특성을 가지고 있다. 따라서 높은 공력을 발생시키는 원리와 날갯짓 궤적의 변화에 따른 공력의 변화가 서로 다르다는 사실이 제시되었다.^[18,19] 또한 잠자리는 2쌍의 날개를 각각 독립적으로 움직일 수 있는 능력을 가지고 있어 앞날개와 뒷날개의 상호 영향이 공력에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되고 있다.^[20]

자연계에 존재하는 다양한 종류의 곤충날개의 단면은 기본적으로 매우 얇지만, 매끄러운 평면이 아니라 요철(corrugation)^[21]을 가지고 있다 [그림 7]. 이러한 날개 구조는 굽힘 모멘트에 강한 특성을 가지기 때문에 날갯짓 시 날개가 받는 외력을 견딜 수 있도록 하는 구조적인 장점을 가진다. 하지만, 공기역학적 관점에서 이러한 요철구조가 날개의 공력 성능에 미치는 영향에 대해서도 많은 연구가 수행되었다. 그 결과, 비교적 낮은 받음각으로 고정되어 글라이딩하는 비행 조건에서 표면 요철이 있는 날개는 매끈한 표면을 가지거나 유선형의 날개보다 높은 공력 성능을 가지고 있음이 밝혀졌다. 특히,

Fig. 7. Photographs of cross sections of the fore- and hind-wings of a dragonfly taken at the positions shown in the upper diagrams.^[21]

요철 안쪽에 작은 재순환 유동구조(re-circulating flow structure)가 생성되고, 이로 인해 양력이 증가하거나 날개에 작용하는 저항이 감소한다고 주장하였다.^[22,23] 최근에는 실제 잠자리의 날갯짓 비행에서 날개의 요철이 가지는 공기역학적 기능에 대한 연구를 통해 매끈한 날개와 비교해 요철이 있는 날개가 수직방향의 힘을 12% 이상 증가시키며, 공력을 발생하기 위한 공기역학적 효율 역시 10% 가까이 향상시킴을 제시한 바 있다.^[19] 따라서, 이러한 날개의 형상 변화는 정지된 날개뿐 아니라 움직이는 날개를 장착한 초소형비행체의 공력 성능을 향상시키는데 효과적으로 응용될 수 있다.

날개 주위를 흐르는 유동을 제어하는데 효과적인 방법 중 하나는 날개 전단에 제어장치를 설치하는 것이며, 현재 항공

REFERENCES

- [15] C. P. Ellington *et al.*, Nature **384**, 626 (1996).
- [16] M. H. Dickinson *et al.*, Science **284**, 1954 (1999).
- [17] J. Kweon and H. Choi, Phys. Fluids **22**, 071703 (2010).
- [18] Z. J. Wang, Annu. Rev. Fluid Mech. **37**, 183 (2005).
- [19] H. Park, Ph.D Thesis, Seoul Nat. Univ. (2010).
- [20] F. -O. Lehmann, Exp. Fluids **46**, 765 (2009).
- [21] M. Okamoto *et al.*, J. Exp. Biol. **199**, 281 (1996).
- [22] A. B. Kesel, J. Exp. Biol. **203**, 3125 (2000).
- [23] A. Vargas *et al.*, Bioinsp. Biomim. 026004 (2008).

Fig. 8. (a) Wind turbine blade inspired by the leading-edge protrusions of the humpback whale flipper.^[24,25] (b) Reduction of aerodynamic noise of pantograph of high-speed train through the mechanism of silent flight of an owl.^[26,27]

기에 적용 중인 leading-edge slot은 대표적인 고 양력 발생 장치이다. 자연에서도 이렇게 전단에 위치하여 공력성능을 향상시키는 예를 찾아볼 수 있다. 혹등고래(humpback whale)는 앞 지느러미(flipper)를 움직여서 곡예적인 움직임을 할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 앞 지느러미의 전단에 있는 돌기들의 공기역학적 기능에 대하여 많은 연구가 수행되었다 [그림 8(a)]. 돌기가 있는 경우 지느러미의 실속을 지연시키며, 최대 양력 값이 더 증가한다고 보고되었다. 또한 지느러미가 받는 항력 역시 줄어드는 것을 확인하여 날개의 성능을 나타내는 지수인 양력 대 항력의 비가 돌기가 없는 경우보다 전반적으로 증가하는 것을 보였다.^[24] 날개 전단에 있는 돌기의 공력 향상 메커니즘을 구체적으로 밝히기 위하여 많은 후속 연구들이 현재 진행 중에 있으며, 캐나다의 한 회사(Wind Energy Institute of Canada)는 이를 응용하여 새로운 형상의 풍력발전기의 블레이드를 개발하였고 [그림 8(a)] 약 20%의 성능 향상을 얻을 수 있다고 보고한 흥미로운 예가 있

다.^[25]

한편, 거의 소리를 내지 않고 조용히 먹이를 향해 비행하는 올빼미의 비밀은 날개 깃털의 전단에 있는 미세한 빗살 구조에 있다는 사실은 매우 잘 알려져 있으며 [그림 8(b)],^[26] 그 메커니즘을 날개 주위 유동의 박리를 제어하는데 응용하기 위한 많은 후속 연구들이 진행되고 있다. 또한, 일본에서는 올빼미의 저 소음 비행원리를 응용하여 신칸센 고속열차의 팬터그래프에서 발생하는 소음을 크게 줄였다고 발표하기도 하였다 [그림 8(b)].^[27]

결 론

자연계에 존재하는 대부분의 생명체는 공기나 물에서 움직이기 때문에, 유체와 물체 사이의 상호 작용 속에서 발생하는 항력이나 양력을 제어해야 하는 유동제어(flow control) 분야에서 생체모방을 통해 현재까지 많은 발전을 이룰 수 있었으며, 앞으로도 남아있는 가능성은 무한하다고 할 수 있다. 물론 공학자의 입장에서 생명체를 바라보는 눈에는 한계가 있을 수 있기 때문에, 생체모방적 접근이 항상 물리적 또는 수학적 이론으로 접근한 방법보다 훌륭한 결과를 낸다고 할 수는 없다. 하지만, 보다 더 좋은 결과를 얻기 위해서는 생물학 등 다른 분야와의 유기적인 협동 연구를 수행해야 한다고 생각된다. 나아가 단순히 생명체의 기능을 모방하는데 그치지 않고 창의적인 사고로 더 뛰어난 시스템을 만드는 것은 생체모방공학을 한 단계 더 발전시킬 수 있는 원동력이 되며, 생체모방공학의 발전은 공학 전반에 걸쳐 새로운 대안으로 제시될 것이다. 잘 해결되지 않는 문제가 있다면 주변의 생명체에게 눈을 돌려보는 것도 좋은 돌파구가 될 것이다.

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 도약연구사업(R0A-2006-000-10180-0), 중점연구소지원사업(KRF-2007-412-J03001) 및 전략과제사업(2009-0082824)의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [24] D. S. Miklosivic, Phys. Fluids **16**, L39 (2004).
- [25] <http://www.whalepower.com/drupal/?q=node/9>.
- [26] R. R. Graham, Roy. Aero. Soc. J. **289**, 837 (1934).
- [27] http://www.japanfs.org/en/_newsletter/200503-2.html.