

생체모방 응용 유동제어

이 글에서는 유동제어 분야에서 생체모방 공학을 응용하여 현재까지 얻은 성과와 앞으로의 전망에 대하여 소개하고자 한다.

적자생존의 원리가 지배하는 자연계의 생명체들은 오랜 시간 동안 스스로 학습을 통하거나 필요에 의해 가장 효율적으로 환경을 이겨낼 수 있는 생체구조를 가지도록 진화하였다. 따라서 인류가 끊임없는 노력을 통해 얻은 기술 중 많은 부분이 우리 주변 자연에선 아주 오래 전부터 적용되어온 개념이라는 사실은 놀라운 일이 아니다. 이와 함께 모든 생명체는 공기나 물 속에 존재하고 활동하기 때문에 유동저항 감소, 비행체의 공기역학적 성능 향상 등 유동제어연구의 중요한 문제들을 해결하는 데 있어 생체모방 공학적 접근은 우

리에게 무한한 가능성을 줄 것으로 기대된다. 최근 실험 및 수치 해석 기술의 빠른 발전으로 유동제어 분야에 생체모방 공학을 응용하려는 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중 상어 피부의 리블렛을 이용한 마찰저항 감소는 매우 잘 알려진 결과이다. 하지만 자연계의 예들이 모두 이론적으로 잘 정립되어 있는 것은 아니며, 실제 우리 생활에 바로 적용되는 것은 더욱 아니다. 따라서 창의적인 생각을 가지고 자연현상을 바라보고 그로부터 얻은 개념을 성공적으로 적용하는 것은 매우 도전적인 과제임에 틀림없다.

유동제어의 중요성

Richard Feynman이 얘기한 것처럼 난류는 고전 물리학이 남긴 문제들 중 가장 중요하지만 풀리지 않은 문제로, 이러한 난류를 제어함으로써 실제 공학에서 발생하는 다양한 문제를 해결할 수 있다. 많은 난류제어 연구들이 해결하고자 하는 문제는 크게 유동저항 감소, 비행체의 공기역학적 성능 향상, 혼합 증대, 열전달 향상, 소음 감소 등이다. 난류에 존재하는 조직적인 구조(coherent structure)가 난류의 역학 구조에 중요한 역할을 하고

최 해 천 | 서울대학교 기계항공공학부, 교수
박 형 민 | 서울대학교 대학원 기계항공공학부, 박사과정

_e-mail : choi@socrates.snu.ac.kr
_e-mail : neozaza0@snu.ac.kr

있음이 알려지면서 이를 이용한 다양한 제어가 시도되고 있지만 효율적인 제어 방법을 고안하는 건 매우 어려운 일이다. 한편, 난류제어 연구의 다른 접근 방법으로 자연계에서 아이디어를 얻고자 하는 연구들도 활발하게 이루어지고 있으며, 이 글에서는 유동저항 감소, 비행체의 공기역학적 성능 향상 및 기타 유체역학 분야에 있어서 이러한 생체모방 공학을 응용한 연구에 대하여 소개하고자 한다.

유동저항 감소

유동저항에는 유체의 점성에 의한 마찰저항과 물체에 작용하는 압력 차이에 의한 형상저항이 있다. 이 중 유선형 물체의 난류 경계층의 마찰저항과 뾰족한 물체의 형상저항을 효과적으로 줄이기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.

리블렛

리블렛(riblet)은 현재까지 점성에 의한 마찰저항을 줄이기 위한 제어 방법 중 가장 성공적인 방법이라고 할 수 있으며, 물속에서 빠른 어류 중 하나인 상어(Mako shark : 50km/h)는 이미 리블렛 구조의 비늘을 가지고 있음이 알려져 있다(하지만 속도가 느린 상어의 경우에는 리블렛 구조의 비늘이 관찰되지 않았다). 리블렛에 관한 연구는 1982년

유동제어에 있어서 생체모방 공학으로부터의 접근은 무한한 가능성을 주는 동시에, 매우 도전적인 과제이다.

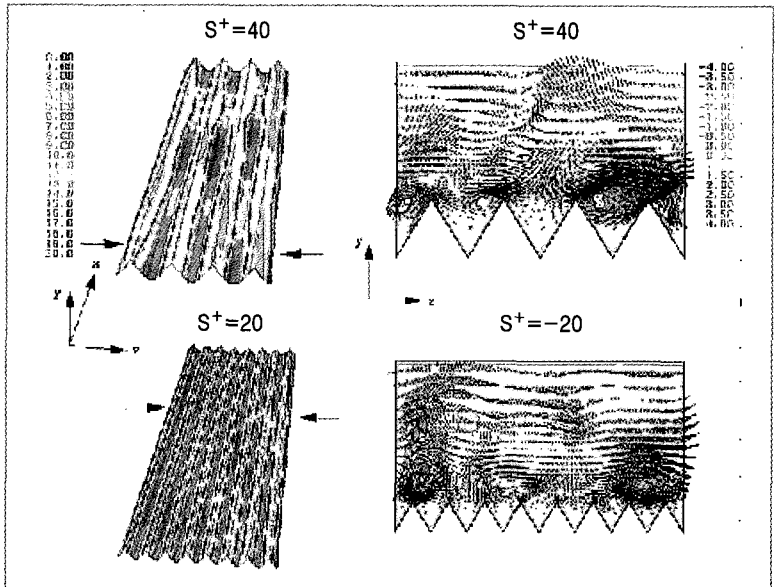


그림 1 리블렛 주위 유동의 직접수치모사 결과(Choi et al. 1993, J. Fluid Mech.). 리블렛 간격에 따른 유동 방향 보텍스와 리블렛과의 상호작용을 보여준다.

미국 NASA의 Walsh의 실험을 통해 시작되었으며, 최대 8%까지 마찰저항을 줄일 수 있음을 보였다(AIAA Paper 82-0169). Choi et al.(1993, J. Fluid Mech.)은 직접수치모사(DNS : Direct Numerical Simulation)를 통해 리블렛을 적절한 간격으로 배치할 경우 유선방향 보텍스 구조에 의해 생기는 벽면 방향의 유동에 노출되는 표면적을 작게 하여 마찰저항을 줄이게 되며, 이러한 리블렛의 간격과 유선방향 보텍스의 지름의 상대적인 크기

에 의해 리블렛의 항력 감소 성능이 결정된다는 것을 밝힌바 있다. 최근 올림픽 등에서 리블렛을 응용한 전신 수영복을 입은 선수들이 좋은 기록을 내는 것을 볼 수 있으며, 요트 선체나 항공기 날개 등에도 실제 사용되고 있다. 하지만 상어의 리블렛 구조는 크기가 매우 작아 먼지가 자주 끼는 등 유지보수에 비용이 많이 드는 단점이 있다.

돛새치의 피부

헤밍웨이의 소설 '노인과 바

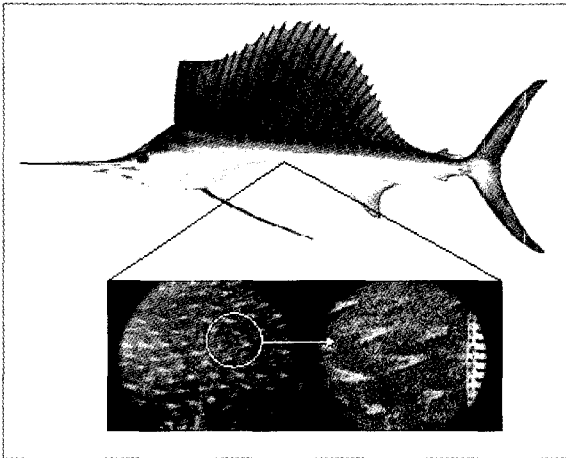


그림 2 돛새치 피부의 특수한 구조

다'에서 노인이 바다에 나가 잡은 뒤 상어에게 다 뜯겨버린 물고기로 더욱 더 잘 알려진 돛새치(sailfish)는 실제 바다에서 가장 빠르게(100km/h 이상) 움직이기 때문에 관심의 대상이 되고 있다. 본 연구진은 돛새치의 피부에 리블렛과는 다른 특수한 구조가 달려 있는 것을 관찰하여 현재 연구를 진행 중에 있다. 더구나 상어의 리블렛 구조와는 달리 돛새치 피부의 특수한 구조는 크기가 매우 크기 때문에 육안으로도 쉽게 확인할 수가 있다. 따라서 상어 비늘의 리블렛과 같이 실제 적용이 가능해진다면, 현재 리블렛이 가지는 단점을 최대한 극복할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

황제 펭귄

남극의 신사라고 알려져 있는 황제 펭귄은 물 속에서의 운동

능력에 있어서 탁월한 능력을 보여주며, 유체 역학적인 측면에서 두 가지 특징을 가지고 있다. 우선, 황제 펭귄의 외형을 보면 머리에서 어깨, 등으로 이어지는 곡면의 요철이 여러 번 반복되는 것을 알 수 있다. Bandyopadhyay(1989, AIAA J.)는 오목한 면과 볼록한 면을 번갈아서 설치하였을 경우, 평판보다 점성에 의한 마찰저항이 줄어드는 것을 보인 바 있다. 또한 1998년 Bannasch(1st International Symposium on Seawater Drag Reduction)는 실제로 남극의 황제 펭귄에 염료가 들어있는 통을 매달아 황제펭귄 주변 유동을 가시화하여 다중 곡률(multiple curvature)을 가진 펭귄의 외형적 특징으로 마찰저항이 줄어드는 것을 보인 바 있다. 두 번째 특징으로는 황제 펭귄이 물에서 나올 때나, 들어갈 때 몸 주위를 덮고 있는 얇은 공기방울 층이 있다. 이러한 얇은 공기방울 층은 몸체 표면의 마찰저항을 줄여주는 효과가 있다고 알려져 있으며, 실제로 마이크로

버블을 이용한 마찰저항 감소에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 만족할 만한 저항 감소효과를 얻기 위해서 상당한 양의 마이크로 버블이 요구되기 때문에 아직까지 그 실효성에 대해서는 많은 문제가 남아 있다.

돌고래 피부

1960년 Kramer(1960, J. Amer. Soc. Nav. Eng.)는 돌고래가 물 속에서 유연하게 움직일 수 있는 이유를 돌고래 피부의 compliance(유동의 국소압력에 의해 표면이 움직이게 되는 현상)에 의한 마찰저항 감소라고 처음 주장하였다. 그는 실제로 돌고래의 피부를 모사한 인공 피부를 만들어 실험을 통해 저항이 줄어들었다고 발표하였다. 그 후 Babenko et al.(1969, Bionica), Nagamine et al.(2004, J. Turbulence), Carpenter(2005, 2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction) 등이 실제로 compliant wall이 난류 경계층의 마찰저항을 줄일 수 있는지 그 메커니즘을 밝히기 위하여 많은 연구를 수행하였다. 이들은 compliant wall이 층류에서 난류로의 천이를 지연시키거나, 난류 경계층에서 널리 관찰되는 조직적인 구조인 줄무늬 구조(streaky structure)의 세기를 약하게 만들어 마찰저항을 줄일 수 있다고 주장하고 있다. 하지만

이러한 compliant wall의 마찰 저항 감소 능력 역시 현재까지 많은 논란의 대상이 되고 있으며, 완전한 검증은 이루어지지 않은 상태이다.

잠자리 날개

Bechert 등은 2000년 잠자리 날개 뒷전(trailing edge)에 마이크로 단위의 삼 모양의 돌기들이 있는 것을 관찰하였으며 (AIAA Paper 00-2315), 이로부터 날개가 받는 형상저항을 약 10% 정도 줄일 수 있다고 주장하였다. 날개나 뒤편한 물체가 받는 형상저항을 줄일 수 있는 하나의 방법은 Karman 보텍스 구조의 생성을 억제하여 후류를 안정화시키는 것으로, 본 연구실에서는 이러한 관점에서 최근 뒤편한 물체가 받는 형상저항을 효율적으로 줄일 수 있는 능동제어(active control) 및 수동제어(passive control) 방법을 제안한 바 있다.(Kim et al. 2004, J. Turbulence; Kim & Choi 2005, Phys. Fluids; Park et al. 2006, To appear in J. Fluid Mech.)

사막의 선인장

평균 15m/s의 강한 바람이 부는 사막지대에 바람에 꺾이지 않고 서있는 높은 선인장의 항력 감소 능력은 매우 뛰어나다고 볼 수 있다. 연구자들은 선인장의 길이 방향으로 나 있는 공동(cavity) 및 수많은 가시들과 항력감소와의 관계에 대하여 관심

시속 50km로 움직이는 상어 비늘에서 발견되는 리블렛은 마찰 저항을 최대 8% 줄인다. 시속 110km로 움직이는 돛새치의 피부에서 발견되는 돌기가 하는 역할은 무엇일까?

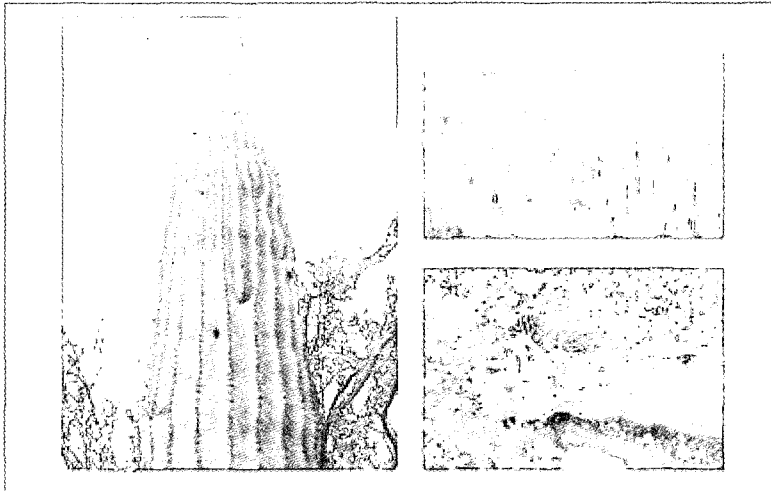


그림 3 Saguaro 선인장의 외형적 특징(Talley et al. 2001, Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs)

을 가지고 있다. 2001년 Talley 등은 실험을 통해 원형 실린더에 길이 방향의 공동을 설치하여 실린더가 받는 저항이 줄어들 수 있음을 보인 바 있다(Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs). 하지만 아직 선인장의 항력감소 메커니즘에 대한 정확한 해석은 이루어지지 않은 상태이다.

비행체의 공기역학적 성능 향상

하늘을 날기 위한 오랫동안의

인간의 노력은 현실이 되었으며, 이제는 조금 더 높은 효율을 가지고 비행을 하고, 특수한 목적을 수행하기 위한 비행체를 만들기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 자연계의 생명체들은 이미 오래 전부터 하늘을 날았기 때문에, 생명체의 관찰은 양력 증대, 비행 안정성 향상, 기동성 향상 등 많은 부분에서 도움이 될 것으로 기대되고 있다.

흑등고래

흑등고래(humpback whale)는 앞 지느러미(flipper)를 능동

적으로 움직여서 물 속에서 큰 몸집에 어울리지 않는 곡예적인 움직임을 할 수 있는 탁월한 능력을 가지고 있다. Fish(2004, Phys. Fluids)는 흑등고래의 앞지느러미의 앞전(leading edge)에 있는 돌기들이 흑등고래의 운동능력에 중요한 역할을 하고 있음을 보였다. 그는 흑등고래의 앞지느러미를 모사한 모형을 이용한 실험을 통해, 돌기가 있는 경우 지느러미의 스톨(stall)을 지연시키며 또한 높은 받음각에서 양력이 더 증가함을 보였다. 또한 지느러미가 받는 저항 역시 줄어드는 것을 확인하여, 일반적으로 날개의 성능을 나타내는 지수인 양력 대 항력의 비가 돌기가 없는 경우보다 전반적으로 증가하는 것을 보였다. 실제 항공기에는 흑등고래의 돌기와 유사한 기능을 수행하는 소용돌이 발생기(vortex generator)가 사용되고 있다. 소용돌이 발생기는 날개 표면에 설치되는 작은 사각 또는 삼각판 형상의 장치로, 이로부터 만들어지는 보텍스는 날개 위의 경계층을 난류로 빨리 천이(transition)가 되게 하여, 유동 박리(separation)를 지연시키는 효과를 가지게 된다.

잠자리의 비행

일찍이 곤충 비행(insect flight)에 관한 연구는 양력 발생 메커니즘을 정확히 밝혀내서 높은 양력을 가질 수 있는 비행체

의 디자인이나 장치 개발을 목적으로 많은 관심을 가지는 분야이다. 그 중 잠자리는 2쌍의 날개를 각각 독립적으로 움직일 수 있는 능력을 가지고 있어 탁월한 기동성을 가지고 있다. Wang(2000, Phys. rev. letter), Dickinson(1996, J. Exp. Biol.) 등은 수치해석 및 실험을 통해 잠자리 및 초파리의 공중 정지비행에 대하여 많은 연구를 수행하였다. 하지만 이들은 모두 한 쌍의 날개에 대하여 해석한 경우이며, 본 연구실에서는 현재 두 쌍의 날개 운동에 대하여 연구를 진행 중이며, 나아가 실제 날개가 가지는 유연성(flexibility)이 가지는 영향에 대해서도 알아볼 계획이다.

날치

동물의 비행은 비단 새나 곤충에만 국한된 운동은 아니며 하늘을 나는 물고기, 날치(flying fish)의 비행은 아주 오래 전부터 많은 사람들의 관심의 대상이었다. 1930년대에 날치는 공기 중에서 글라이딩을 하는 것으로 밝혀졌으며, 실제로 최대 400m까지 날아갈 수 있는 것으로 알려져 있다.

날치는 유난히 크게 성장한 가슴지느러미와 배지느러미를 가지고 있어 흡사 비행기와 유사한 신체구조를 가지고 있어 매우 흥미롭다. 본 연구실에서는 이러한 날치의 독특한 신체구조와 비행능력의 관계에 대하여 연구 중에 있으며, 높은 성능(양력 대 항력 비)을 가지는 날개의 디자인과 관

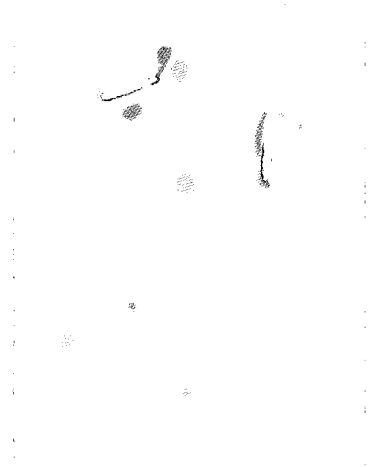


그림 4 잠자리 날개 주위의 보텍스 구조(Kim & Choi 2003, 2nd International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms)

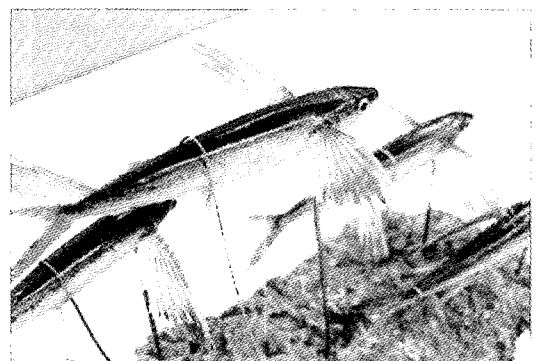


그림 5 날치 박제 사진

련한 아이디어를 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있다.

나비의 꼬리

우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 나비가 글라이딩을 한다는 사실은 일반인들에게 매우 생소하다. 보통의 나비는 전체 비행 중 약 30%를 글라이딩을 한다고 알려져 있다. 나비의 날개는 aspect ratio(날개의 길이와 폭의 비)가 매우 작은 편이라 공기역학적으로 불리한 구조를 가지고 있지만 그 비행 능력은 꽤 높은 편이다. Marin과 Carpenter(1977, Fortschr. Zool.)는 나비의 뒷날개에 있는 꼬리날개의 역할을 가시화를 통해 관찰하였으며, 이후 1994년 Brodsky(The evolution of insect flight, Oxford University Press)는 이를 근거로 꼬리날개가 받는 저항을 줄여 공기역학적 성능을 향상시킨다고 주장하였다. 본 연구실에서는 실제 나비 모델을 기준으로 실험 및 수치 해석을 통해 현재까지 알려진 꼬리의 역할에 대하여 검증해보고 다른 메커니즘을 밝힐 수 있는가에 대하여 연구 중이다.

착륙하는 새의 날개

착륙하는 새의 날개를 보면 날개 뒷전의 깃털들이 공기의 흐름

에 맞춰서 입체적으로 튀어 오르는 것을 볼 수 있다. 1979년 Liebe(1979, Aerokurier)는 이를 생체공학적인 고양력 장치라고 해석하였고, 이후 이를 실제 비행기의 날개에 적용하여 많은 풍동 실험과 실제 테스트가 이루어졌다.(Bechert et al. 2000, Naturwissenschaften)

마이크로/나노 스케일에서의 생체모방

자연계의 생명체는 아주 다양한 스케일을 가지고 있으며, 아주 작은 마이크로/나노 스케일의 자연계 역시 유체역학분야에 많은 아이디어를 줄 수 있다.

연꽃 효과

연못의 연꽃잎이 항상 물에 젖지 않은 상태로 깨끗이 떠 있는 연꽃 효과라고도 알려져 있는 현상에 대하여 일찍이 많은 관심을 가져왔었으며, 그 이유를 찾기 위한 많은 연구가 진행되었다. 1990년 Barthlott(Scanning electron microscopy in taxonomy and functional morphology, Systematics Association Special, Oxford Press)는 연꽃잎에는 마이크로 스케일의 돌기들이 조밀하게 분포되어 있는 것을 관찰하였으며,

이로부터 잎의 표면이 물에 젖지 않은 소수성(hydrophobicity)을 가지게 됨을 보였다. 이러한 연꽃 잎의 소수성에 의한 자기정화 능력은 실제 건물이나 자동차에 칠하는 페인트나 코팅제에 응용하여 사용되고 있기도 하다.

물 위를 걷는 소금쟁이

소금쟁이는 물 위에서 있거나 빠르게 걸을 수 있는 능력을 가지고 있어, 그 이유를 알아내기 위하여 많은 연구가 진행되었다. Gao와 Jiang(2004, Nature)은 소금쟁이의 다리를 덮고 있는 수많은 마이크로 스케일의 강모(micro setae)가 소금쟁이의 다리가 물에 젖지 않고 떠 있을 수 있게 해주는 소수성의 이유라고 설명하였다. 또한 물 속에서 물에 젖지 않고 움직일 수 있는 아주 작은 물체의 디자인에 효율적으로 응용될 수 있을 것이라고 전망하였다. 한편, Dickinson(2003, Nature)과 Hu et al.(2003, Nature) 등은 소금쟁이가 물 위에서 움직일 때 생기는 후류 구조를 가시화를 통해 관찰하여, 소금쟁이가 물 위를 걸을 수 있는 메커니즘은 하늘을 나는 새나 물 속을 수영하는 물고기의 운동 메커니즘과 유사한 보텍스 구조를 가지고 있음을 밝히기도 하였다.