

Pterosarus 날개 형상 및 공력특성

조 응 재 · 한 철 희*

한국교통대학교 항공기계설계학전공

Shapes and Aerodynamics of Pterosarus' Wing

Woungjae Cho · Cheolheui Han*

Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation,
Deahak-Ro 50, Chungju-Si, Chungbuk-Do, 27469, Korea

(Received 2017.04.26 / Accepted 2017.05.19)

Abstract : A pterosarus is an ancient flying reptile and the first vertebrate with powered flight. The shapes of the pretosarus' airfoil in the published literature are reconstructed. The aerodynamics of the Pterosarus is obtained using a free software XFOIL. The steady aerodynamics of the Pterosarus' airfoil are investigated focusing on the gliding performance. The numerical results are validated by comparing the computed aerodynamic coefficients with the measured data. The secretes of the Pterosarus' highly camberred airfoil are elucidated by comparing the aerodynamics with that of the birds'.

Key words : Pterosarus, Soaring, Aerodynamic Analysis, Biomimetics, Unmanned Aerial Vehicle

1. 서 론

인간은 과거 선사시대 이전부터 새의 비행을 동경하여 왔으며, 초기 항공학자들은 새의 비행으로부터 영감을 얻었을 뿐만 아니라 새의 날개의 구조와 형상 그리고 비행원리에 관한 심도있는 연구를 통하여 비행체 개발에 필요한 기초 지식을 습득하였다[1]. 라이트 형제가 동력비행을 성공한 이후 저속에서 비행하는 새의 날개와 달리 고속 항공비행과 관련한 고 레이놀즈 수 영역에서 높은 양항비를 가지는 새로운 날개 설계 연구가 활발히 이루어 졌다. 따라서, 1900년대 초반 이후 새의 날개에 관한 연구는 몇몇 생물학자들의 관심사가 되었으며 항공학자들의 관심에서 멀어졌었다.

최근 새나 곤충의 날개를 모방한 초소형 비행체(Micro Air Vehicle: MAV)나 무인 항공기(Unmanned Air Vehicle: UAV) 등의 개발연구가 활발히 진행됨에 따라, 곤충이나 새의 형상 및 운동과 공기역학 사이의

관계를 규명하고자 하는 연구가 크게 증가하였다 [2,3,4].

현재 Titan Aerospace, Ascenta 등 세계 각 국의 무인 항공기 개발업체에서 태양광 고고도 장기체공 무인항공기를 개발 경쟁 중에 있으며[5], 국내의 경우 한국항공우주연구소에서 장기체공 무인항공기인 EAV-3를 개발 했다[6]. EAV-3는 고도 14.12km의 상공에서 약 25시간동안 실시간 정밀지상관측, 통신 중계, 기상 관측 등 인공위성을 보완하는 등의 임무를 보다 저렴하고 친환경적으로 수행할 수 있다[6]. 이와 같이 장기체공 무인항공기의 개발 및 연구가 항공산업의 큰 관심사 중 하나가 되고 있다. 따라서 고고도 장기체공 무인기의 효율적 비행이 가능한 날개를 설계하기 위해서는 활공과 소어링(Soaring)을 이용하는 날개 크기가 큰 비행동물의 공력특성을 연구할 필요가 있다. 그러나 지금까지의 생체모사공학 관련 연구는 새나 곤충에 집중되어 있으며 날개 크기가 큰 고대 생물에 관한 연구는 아직 미비한 상태이다.

*Corresponding author, E-mail: chhan@ut.ac.kr

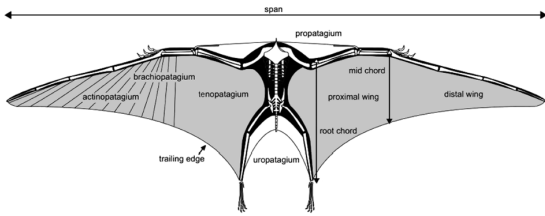


Fig. 1 Schematic Sketch of Pterpdactylus [copied from Ref.7]

본 연구의 프테로사우르스(Pterosarus)는 Pterosauria 분지군(clade) 혹은 목(order)에 해당하는 하늘을 나는 고대파충류(archosaurian reptiles)이다[8]. 2억 2천만년전 트라이아스(Trassic)기 후기 말의 화석이 처음 발견되었으며, 6천5백만년 전인 백악기 (Cretaceous) 기 말까지 약 1억 6천만년을 생존했으나 그 이후에 후속 생물이 없이 멸종한 것으로 알려져 있다[8]. 프테로사우르스는 지금까지 알려진 가장 큰 날개(약 10미터)를 가진 Quetzalcoatlus northropi를 포함하여 다양한 크기로 빠르게 진화하였다.

프테로사우르스는 물고기를 주식으로 해안가나 절벽에서 서식하였으며, 현재의 알바트로스와 비슷한 서식환경이므로 알바트로스와 같이 바닷바람의 상승기류를 타고 장시간 소어링 비행이 가능했을 것으로 추정된다[8]. 따라서, 프테로사우르스의 날개 형상과 공력특성 사이의 관계를 파악할 경우 장기체공 무인 비행체의 개발에 필요한 날개형상선정과 비행기술 확보에 필요한 기초 지식을 얻을 수 있다.

일반적인 프테로사우르스의 총 날개(span)길이는 약 5~6m, 몸체 길이는 약 1.5m이며, 몸무게는 18.6kg 정도로 추정되고 있다[9]. 머리위의 큰 벼이 방향조정의 역할을 했던 것으로 보아 벼의 기울기를 통해 무게 중심을 이동시켜 비행했던 것으로 추정된다[10]. 또한 날개는 0.5mm두께의 얇은 피막으로 형성되어 있고 뼈 속은 현재의 새와 비슷하게 속이 빈 구조로 되어 있다[11].

1975년 Stein[10]이 비행원리에 대해 연구하였으며, 1981년 Brower과 Veinus[12], 1993년 Padian과 Rayner [13], 2009년 Strang et al. [14]은 날개 형상에 대하여 논의 하였으며, 2010년 Henderson[15]은 3차원 형상을 구현하여 프테로 사우르스의 질량 및 크기를 측정하였다. 2011년 Palmer[16], 2012년 Krüger와 Klaus[17], 2014년 Elgin[18]은 날개의 에어포일 및 공력특성에

관한 연구를 수행하였다. 2015년 Hajj 와 Taha[7]은 프테로 사우르스의 플랩핑 날갯짓(Flapping)에 관하여 연구하였으며, 2015년 Hone 등[20]은 날개 끝의 형상에 따른 공력특성에 대해서 연구한 사례가 있다.

그러나, 지금까지의 프테로 사우르스의 비행에 관한 연구는 발굴된 화석 자료의 부족으로 인하여 프테로사우르스 날개의 형상과 운동 자체에 대하여 생물학자들 사이에서도 논란의 여지가 많은 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 날개 길이(wingspan)가 큰 프테로 사우르스의 비행원리를 파악하여 프테로 사우르스의 날갯짓 비행에 관한 과학적 호기심을 충족시키고, 동시에 프테로 사우르스를 모방한 대형 플랩핑 날갯짓 비행체를 개발하고자 한다. 이를 위하여 먼저 기존 문헌에 알려진 프테로사우르스 날개 및 에어포일 형상을 분석하고, 에어포일의 2차원 공력특성을 연구하여 새의 공기역학적 특징과 비교 분석하고자 한다.

2. 프테로 사우르스 날개

2.1 날개 특징 및 구성요소

프테로 사우르스는 해부학적으로 볼 때 조상인 파충류에 비해 골격은 새의 뼈와 마찬가지로 속이 비어 공기로 차있으며, 가슴뼈에는 비행을 위한 근육이 부착가능하도록 용골돌기가 발달되어 있다[11].

프테로 사우르스의 날개는 피부,근육, 그리고 기타 조직이 얇은 막(비막)으로 이루어져 있으며, 이들 막은 1)앞발과 뒷발 사이에 돛과 같이 펼쳐져 있는 팔비막(brachiopatagium, cheiropatagium), 2) 다리 안쪽 모서리에 초생달 모양의 다리비막(uropatagium), 3) 앞발 앞부분에 위치한 전비막(propatagium)으로 구성되어 있다[7].

Cheiropatagium의 몸통쪽에서 가장 먼 위치에 있는 부분은 보통 4번째 손가락으로 불리는 매우 길게 늘어진 단 한 개의 손가락으로 지지되며, 처음 3개의 손가락들은 매우 짧고 발톱을 가지고 있다. 전비막은 익룡에만 존재하며 손목에 연결되어 있는 보통 길이가 길고 두께가 얇은 익형골(pteroid) 뼈로 지지된다. 익룡에 대한 고생물학(palaeobiology)적 측면에서 익형골의 위치와 기능에 대한 논쟁이 가장 많이 있으며, 몸통을 향하여 뾰족하게 나와 있는 뼈가 전비막 앞전(leading edge)에서 가장 먼 쪽을 형성한다고 알려져 있다[11].

1981년 Frey와 Riess[20]은 공기역학적 측면과 새 및

박쥐등에 대한 지식으로부터 만일 익형골이 몸통 쪽을 향한다면 전비막은 매우 작고 비행을 효과적으로 하는데 있어서 역할이 제한적이라고 주장하였다. Cambridge Greensand(Lower Cretaceous)에 보존되어 있는 손목뼈들로부터 3차원적인 분석연구를 통하여 익형골은 비행 때는 앞쪽 아래방향으로 향하며, 수직방향으로는 상당히 큰 범위로 이동이 가능했을 것이라고 주장하였다. 또한 Frey와 Riesss[20]는 기존에 알려져 왔던 전비막보다 더 넓으며 전비막의 몸통 근처에서의 변형이 날개에서 몸통쪽 부분의 캠버를 크게 만들어 전비막이 앞전플랩(leading edge flap)과 같이 작동하도록 하는 역할이 가능하다고 가정하였다.

프테로사우르스의 날개 형상은 1812년의 Sommering [21]에 의하여 널리 알려지게 되었다. 당시 Sommering [21]은 프테로사우르스가 멸종한 박쥐의 일종이라고 생각하였다. 그 후 날개를 구성하는 얇은 막에 대하여 학자들간에 Bird-like Model과 Bat-like Model로 나뉘어 논의가 이루어지고 있다[18]. 본 연구에서는 Bird-like Model을 사용하여 프테로사우르스날개의 비정상 공력 특성을 분석한 Strang[14]의 날개 형상을 선택하였다.

2.2 에어포일 형상

프테로 사우르스의 에어포일 형상은 아래 그림에 나타낸 바와 같이 날개의 스팬길이 방향으로 크게 변한다. 이 그림에 사용된 날개는 길이가 5.5미터이다.

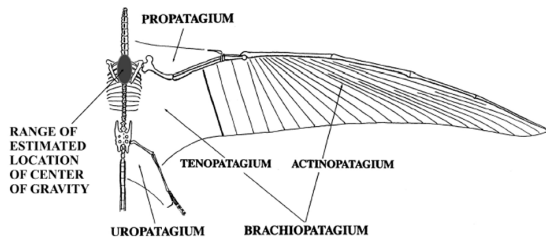


Fig. 2 Structure of Pterosaur's wing[Copied from Ref.14]

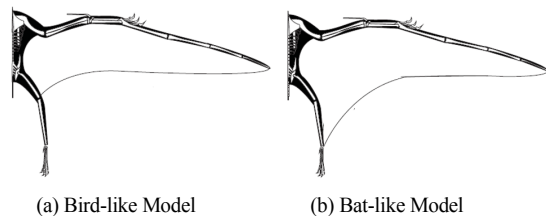
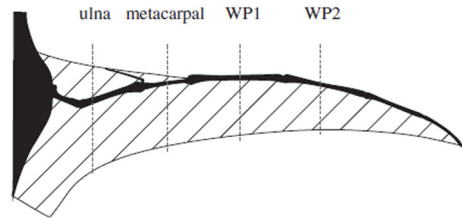
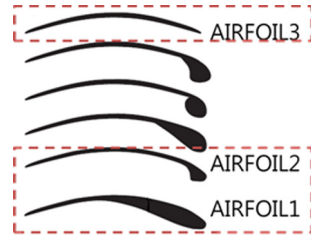


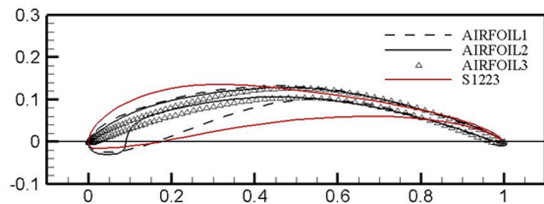
Fig. 3 Pterosaur's wing models[Copied from Ref.18]



(a) sections along the spanwise directions



(b) airfoil shapes



(c) selected airfoil shapes

Fig. 4 Pterosaur's airfoil shapes[Copied from Ref. 16]

프테로 사우르스의 날개는 크게 전비막이 존재하는 기역과 전비막이 존재하지 않는 이외의 지역으로 나누어 생각할 수 있다. 실제 프테로 사우르스의 에어포일 형상은 알려진바가 없으며 본 연구에서는 Palmer [16]가 가정한 에어포일 형상들중 XFOIL 해석을 수행하는데 사용한 작은 캠버 단면을 사용하였다. 아래 그림에 나타낸 바와 같이 먼저 Palmer[16]의 논문에서 에어포일 형상 자료를 추출하였으며 이 형상자료를 내삽기법을 사용하여 매끈하게 다시 정리하였다. 그림에 본 연구에서 획득한 형상과 새 날개 단면중 하나인 S1223과 비교하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 프테로사우르스의 에어포일은 새 날개의 에어포일과 유사한 캠버를 가지며 날개 두께는 훨씬 더 얇은 것을 알 수 있다.

2.3 프테로 사우르스의 비행기법

프테로 사우르스의 비행 기법은 아직 학자들간 많

은 논란이 있는 부분이다. 프테로 사우르스의 비행에 관한 첫 연구는 일본인 과학자인 사토 가쓰후미가 현생 조류의 물성치를 사용하여 프테로 사우르스의 비행가능성을 계산하였으며, 프테로사우르스가 공중에 떠 있는 것은 불가능하다고 결론내렸다. 프테로 사우르스가 생존할 당시인 백악기 후기의 지구 대기는 산소농도가 더 높고 공기의 밀도도 더 높았기 때문에 비행이 가능하였다는 의견도 제시되었다. 이들은 프테로사우르스가 바다새와 유사하며 크기 제한은 육상생활을 하는 익룡에는 적용되지 않았으며 현재와 중생대의 대기 조성 차이가 프테로사우르스의 크기와 상관성을 가지지 않는다고 결론 내렸다.[36]

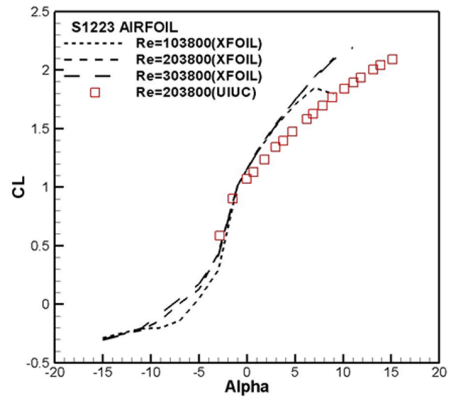
프테로 사우르스의 이륙에 대하여 초기이론은 프테로 사우르스가 냉혈성으로 연소를 통하여 열을 얻는 대신 지금의 파충류와 같이 주위환경으로부터 열을 흡수하여 활공을 하였다고 보았다. 최근에는 프테로사우르스가 온혈성이었으며 도약하는 방식으로 날아올랐으며 날개가 있는 앞다리 근육힘이 매우 강력해서 용이한 이륙이 가능했다. 프테로 사우르스는 최고 시속 120 킬로미터에 달하는 속도로 수천 킬로미터씩 이동가능 했던 것으로 추정된다.

3. 공력해석 기법

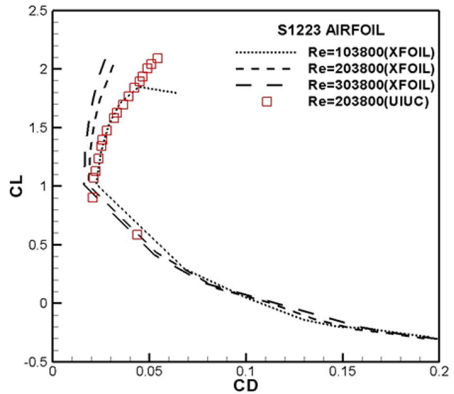
본 연구에서는 2차원 에어포일의 점성-비점상 상호작용 해석을 기반으로한 MIT의 Mark Drela가 만든 XFOIL을 사용하여 2차원 에어포일의 공력해석 연구를 수행하였다. XFOIL은 레이놀즈 수가 20만에서 100만 까지의 범위내에서 비행하는 저속 에어포일 공력해석에 매우 유용한 소프트웨어로 에어포일 표면에는 점성효과를 고려한 경계층 해석기법을 사용하여 계산하며, 점성의 영향이 미미한 영역은 퍼텐셜해석기법을 사용하여 계산한다. 두 해석기법의 영역이 겹치는 부분은 두 해석기법의 해를 점근적으로 같게 만들어 해를 도출한다.

4. 결과 및 분석

Figure 5에 새의 날개 단면형상과 유사한 S1223 에어포일의 받음각 변화에 따른 양력계수 변화와 양항비 특성을 나타내었다. 먼저 XFOIL을 사용하여 레이놀즈 수를 103,800에서 303,800까지 10만 단위로 증가



(a) lift coefficient



(b) lift-to-drag ratio

Fig. 5 Aerodynamic coefficient of a S1223 airfoil

시켜 계산하였으며, 이를 UIUC의 실험자료와 비교하여 나타내었다. 받음각 및 레이놀즈수를 변화시켜 계산 결과를 살펴보면, Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 받음각 변화에 따른 양력계수값의 변화가 레이놀즈수 변화에 크게 영향을 받지 않았다. 그러나 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 양항비의 경우 일정 받음각 이상이 되면 레이놀즈수의 영향이 크게 나타나기 시작하였다. 이는 점성의 영향이 상대적으로 증가하기 때문인 것으로 판단된다. Fig.5(a)와 Fig.5(b)의 계산결과와 UIUC 실험 결과를 비교해 보면 받음각이 작은 경우 양항비는 실험결과와 대체적으로 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 레이놀즈수가 10만 정도에서 실험결과(레이놀즈수 20만)와 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 본 연구에서 사용한 S1223이 캠버가 매우 큰 에어포일이어서 XFOIL의 해석기법의 한계에 기인한 것

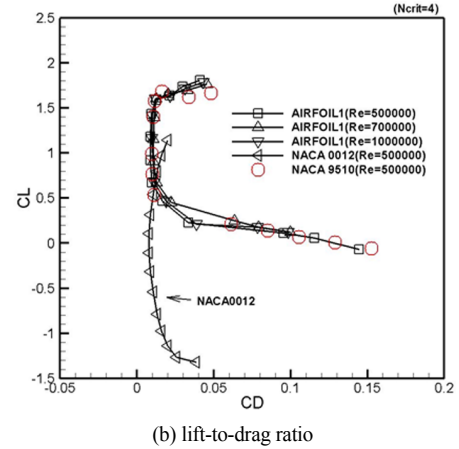
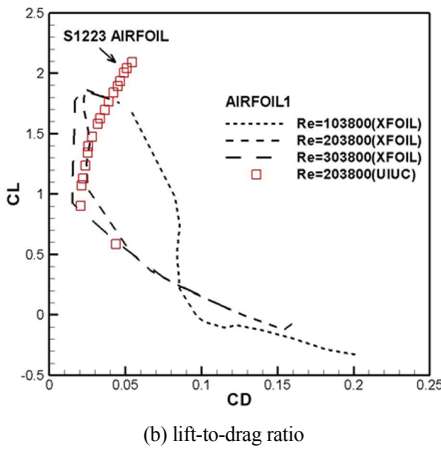
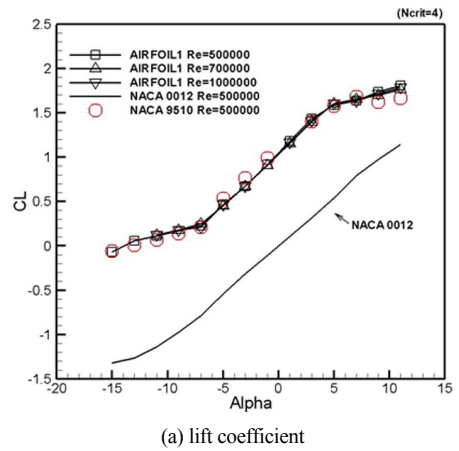
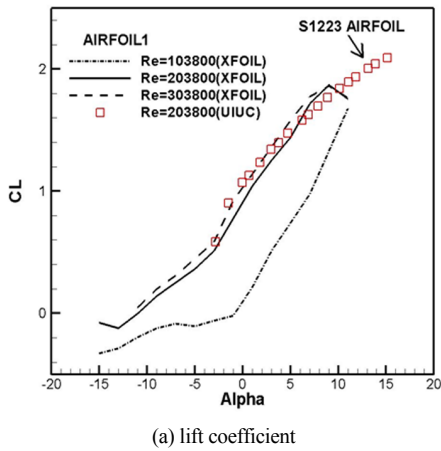


Fig. 6 Aerodynamic coefficient of a AIRFOIL1 airfoil

Fig. 7 Aerodynamic coefficient of a AIRFOIL2 airfoil

이라고 판단된다.

Figure 6에 S1223과 비슷한 캠버를 가지나 두께 분포가 다른 AIRFOIL1 에어포일의 받음각 변화에 따른 양력계수 변화와 양항비 특성을 나타내었다. 레이놀즈 수를 103,800에서 303,800까지 10만 단위로 증가시켜 계산하였으며, 이를 UIUC의 실험자료와 비교하여 나타내었다. 받음각 변화에 따른 양력특성 계산결과는 S1223에어포일 실험결과와 같은 경향을 나타내고 있다. 또한 양항비도 낮은 받음각에서는 실험결과와 비교적 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 받음각이 10도 이상인 경우 AIRFOIL1이 S1223보다 빠르게 실속으로 진입하고 있으며, 이는 AIRFOIL1이 S1223보다 앞전부분이 더욱 날카롭게 생겼기 때문인 것으로 판단된다.

Figure 7에 AIRFOIL 1과 앞전 두께가 비슷한 NACA 0012에어포일과 캠버가 비슷한 NACA 9510에어포일의 양력 및 양항비 특성을 비교하여 나타내었다. 앞전 부분의 두께가 유사하나 캠버가 다른 NACA 0012의 경우 양력 및 양항비 특성이 AIRFOIL 1과 전혀 다르게 나타난 반면 캠버가 유사한 NACA 9510의 경우 받음각 변화에 따른 양력 및 양항비 특성이 동일하게 나타났다. 따라서, AIRFOIL 1의 날개형상이 NACA 9510과 유사한 형상으로 새의 날개보다 두께가 얇고 캠버는 동일하다는 사실을 알 수 있다. 받음각 변화에 따른 양력 특성의 변화를 살펴보면 -5도에서 5도까지의 받음각 변화에 대하여 양력변화가 선형적으로 나타났을 뿐만 아니라 5도보다 큰 받음각에 대하여 기울기가 작긴 하지만 지속적으로 양력이 증가하고 있음을 알 수 있다.

따라서 최대 양력계수값이 상대적으로 큰 값을 가지므로 낮은 비행속도로 비행이 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 참고문헌에 나타난 프테로사우르스의 날개 형태를 분석하였다. 이를 바탕으로 프테로사우르스의 에어포일 형상을 구현하고, XFOIL을 사용하여 공력해석 연구를 수행하였다. 이로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 프테라사우르스의 익형이 캠버가 매우 크며 앞 전 부분의 두께가 매우 두꺼운 특징을 가지고 있었다.
- 2) 새의 날개단면 형상인 S1223과 비교하였을 때 낮은 받음각에서 S1223과 유사한 공력특성을 보이고 있으나 받음각이 큰 경우에 다소 차이가 발생하였다.
- 3) NACA 9510 에어포일과 비교하였을 때 가장 유사한 공력특성을 보이고 있다. 따라서 프테로 사우르스의 날개 단면형상중 일부분인 AIRFOIL1은 NACA 9510형상을 하고 있다고 판단할 수 있다.

Acknowledgement

본 결과물은 산업통산자원부의 지원으로 수행한 공학교육혁신사업의 수행결과입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. (This work is financially supported by the Ministry of Trade, Industry&Energy (MOTIE) through the fostering project of the Innovation for Engineering Education)

References

- 1) W. Shyy et al. *Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers*, Cambridge University Press, 2008.
- 2) W. Shyy, M. Berg, and D. Ljungqvist, "Flapping and Flexible Wings for Biological and Micro Air Vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, 35(5), July 1999, pp.455-505.
- 3) Y. Lian, W. Shyy, D. Viieru, and B. Zhang, "Membrane Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, 39(6-7), August-October 2003, pp.425-465.
- 4) X. Yang, T. Wang, J. Liang, G. Yao, and M. Liu, "Survey on the Novel Hybrid Aquatic-Aerial Amphibious Aircraft: Aquatic Unmanned Aerial Vehicle (AquaUAV)," *Progress in Aerospace Sciences*, 74, April 2015,

pp.131-151.

- 5) X. Zhu, Z. Guo, and Z. Hou, "Solar-Powered Airplanes: A Historical Perspective and Future Challenges," *Progress in Aerospace Sciences*, 71, November 2014, pp. 36-53.
- 6) 박부민, 이보화, 김근배, "고고도 태양광 무인기 전기추진 시스템 환경시험", 한국추진공학회 2015년도 제45회 추계학술대회 논문집, 2015.11, pp. 344-347.
- 7) M.Y. Zakaria, H.E. Taha, and M.R.Hajj, "Design Optimization of Flapping Ornithopters: The Pterosarus Replica in Forward Flight," *Journal of Aircraft*, 53(1), 2016, pp.48-59.
- 8) <https://ko.wikipedia.org/wiki/익룡>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Pterosaur>
- 9) M.P.Witton and M. B. Habib, "On the Size and Flight Diversity of Giant Pterosaurs, the Use of Birds as Pterosaur Analogues and Comments on Pterosaur Flightlessness", <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013982>, Nov. 2010.
- 10) R. S. Stein, "Dynamic Analysis of Pteranodon Ingens: A Reptilian Adaptation to Flight," *Journal of Paleontology*, 49(3), May 1975, pp. 534-548.
- 11) M.T. Wilkinson, D. M. Unwin, and C. P. Ellington, "High Lift Function of the Pteroid Bone and Forewing of Pterosaurs," *Proceedings of the Royal Society, Part B*. 273, 2006, pp.119-126.
- 12) J. C. Brower and J. Veinus, "Allometry in Pterosarus," *The University of Kansas Paleontological Contributions Paper 105* September 11, 1981.
- 13) K. Padian and J. M. V. Rayner, "The Wings of Pterosaurs," *American Journal of Science*, 293-A, 1993, pp.91-166.
- 14) K. A. Strang, I. Kroo, M. Gerritsen, and S. Delp, "Efficient Flight of Pterosaurs-An Unsteady Aerodynamic Approach," *AIAA Paper 2009-1301*, Orlando, FL, 2009, pp. 5-8.
- 15) D. M. Henderson, "Pterosarus Body Mass Estimates from Three-dimensional Mathematical Slicing," *Journal of Vertebrate Paleontology*, 30(3), May 2010, pp.768-785.
- 16) C. Palmer, "Flight in Slow Motion: Aerodynamics of the Pterosaur Wing," *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278, 2011, pp.1881-1885.
- 17) W. R. Kruger and M. Klaus, "Multi-Body Simulation of a Flying Pterosaur," *SIMPACT News*, December 2012, pp.18-23.
- 18) R. A. Elgin, *Palaeobiology, Morphology, and Flight Characteristics of Pterodactyloid Pterosaurs*, Ph.D. Thesis, Dept. of Chemistry and Geological Sciences, University of Heidelberg, May 2014.

- 19) D. W. E. Hone, M. K. Van Rooijen, and M. B. Habib, "The Wingtips of the Pterosaurs: Anatomy, Aeronautical Function and Ecological Implications," *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 440, 2015, pp.431-439.
- 20) E. Frey and J. Riess, "A New Reconstruction of the Pterosaur Wing," *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 161, 1981, pp.1-27.
- 21) S. T. von Sömmerring, "Über einen Ornithocephalus oder über das unbekanntes Thier der Vorwelt, dessen Fossiles Gerippe Collini im 5. Bande der Actuum Academiae Theodoro-Palatinae nebst einer Abbildung in natürlicher Grösse im Jahre 1784 beschrieb, und welches Gerippe sich gegenwärtig in der Naturalien-Sammlung der königlichen Akademie der Wissenschaften zu München befindet," *Denkschriften der königlichen bayerischen Akademie der Wissenschaften, München: mathematisch-physikalische Classe 3*, 1812, pp.89-158.