



박 훈 철 | 건국대학교 대학원 신기술융합학과 교수 | e-mail : hcpark@konkuk.ac.kr

이 글에서는 새와 곤충의 비행원리를 비교하고, 이들을 모방한 날갯짓 초소형 비행체의 등장 배경과 현재까지의 연구 동향을 살펴 보고, 향후 연구 방향에 대하여 소개한다.

## 날갯짓 초소형 비행체의 등장

새의 비행에 대한 연구가 초기 인력 글라이더는 물론이고, 항공기 개발에 지대한 영향을 끼쳤었다는 것은 주지의 사실이다. 실제로 라이트 형제(Wright brothers)가 1903년 최초의 동력비행에 성공한 플라이어(Flyer)의 개발 과정에서 새의 비행을 관찰하고, 날개의 단면을 모방하는 등은 생체모방 비행의 원조라고 할 수 있다. 새가 날개를 변형시켜서 조종력을 얻듯이, 라이트 형제는 플라이어 날개의 변형을 통하여 롤(roll) 조종력을 발생하도록 설계하였다. 이후 오빌 라이트(Orville Write)는 그의 한 친구에게 보낸 다음의 서신 내용에서, 그들이 얼마나 새의 비행에 대한 연구에 몰두했었는지 미루어 짐작할 수 있다.

“새로부터 비행의 비밀을 배우는 것은 마술사로부터 마술의 비밀을 배우는 것과 같다. 마술사로부터 배우고자 하는 것이 무엇인지를 정확히 알면, 그전에 뭘 배우고자 하는지를 몰랐을 때는 알 수 없었던 것들을 알아치게 된다.”

1941년 12월 27일 데이턴에서

하지만, 이러한 항공기 조종 방식은 이후 전혀 사용되지 않았다. 이는 비행 조종을 위하여 날개 전체를 변형하는 것이 공학적으로 효과적이지 못했기 때문이

다. 이후에는 날개의 일부를 잘라내어 보조익(aileron)을 만들고, 이것만을 변형시켜서 조종력을 얻는 방식으로 바뀌게 된다.

이외에도 철새들의 장거리 비행 방식을 모방하여 연료를 절감한 장거리 편대 비행이라든지, 새가 비행 속도에 따라서 날개의 모양을 바꾸는 것을 모방한 형상가변익(variable swept wing)을 채택한 미국의 그루만 F-14 전투기 등도 생체모방 비행의 한 사례라고 할 수 있다. 하지만, 대부분의 항공기가 유인 항공기(manned aircraft)인 점을 감안하면, 새와 같이 다양하게 날개 전체의 형상을 변형하는 것은 구조적 안전성을 확보하기에 무리가 있을 수 있다. 따라서, 대부분의 유인 항공기는 고정된 형상의 날개를 가지게 되었다.

최근에는 조종사가 직접 탑승하지 않아서, 다양한 위험한 임무를 수행할 수 있는 무인 항공기(UAV : Unmanned Air Vehicle)가 주목을 받으면서, 새나 곤충과 같은 자연에서 찾아 볼 수 있는 생물체의 비행을 모방하고자 하는 시도가 다시 시작되었다. 특히, 2000년 전후에 미국 고등 국방 연구 계획국(DARPA : Defense Advanced Research Project Agency)이 손바닥 크기의 초소형 비행체(MAV : Micro Air Vehicle,) 개념을 무기체계로 활용하고자 하면서, 새 또는 새보다도 더 작은 곤충의 비행을 모방한 비행체를 개발하고자 하는 시도를 촉발시켰다. 그림 1은 현재까지 참



고문헌으로 보고된 다양한 고정익, 회전익 및 날갯짓 초소형 비행체를 보여준다. 세 종류의 초소형 비행체 중에서, 날갯짓 초소형 비행체는 회전익 초소형 비행체와 같이 정지 비행이 가능하면서도, 회전익 초소형 비행체보다 비행 효율이 우수할 수 있다는 장점으로 인하여, 현재까지도 날갯짓 초소형 비행체에 대한 연구는 지속되고 있다. 즉, 그림 2에서, 날갯짓을 하는 자연 생물체는 회전익 초소형 비행체에 비해서 비행 효율이 우수하므로, 새 또는 곤충의 비행을 적절히 공학적으로 모방할 수 있다면, 다양한 비행을 하면서도 우수한 비행 효율을 갖는 날갯짓 초소형 비행체를 개발할 수 있다는 것이다.

### 새와 곤충의 비행원리

현재까지 새나 곤충의 비행원리에 대한 연구는 주로 생물학자들이 주도하여 왔고, 최근에는 곤충의 비행원리에 대한 연구가 매우 활발하였다. 이러한 연구 결과, 새와 곤충의 다양한 비행원리가 완전히 규명되었다고는 할 수 없으나, 주요 원리들은 어느 정도 규명이 되었다고 할 수 있다. 여기서는 새와 곤충의 비행원리 자세히 설명하는 것은 피하되, 이미 잘 알려진 새와 곤충의 비행원리의 차이점을 설명하고, 이를 뒤에서 새와 곤충의 비행원리 모방에 있어서 중요한 차이점을 설명하는 데 활용하고자 한다.

벌새 (hummingbird)를 제외한 모든 새들은 주로 하향 날갯짓(downstroke)에서 대부분의 유용한 추력과 양력을 발생한다. 따라서 상향 날갯짓(upstroke)은 가능한 빨리 끝내고 다시 하향 날갯짓을 준비한다. 이를 위하여, 새는 하향 날갯짓에서는 날개를 완전히 펼치지만, 상향 날갯짓에서는 날개 끝단을 몸체 쪽으로 당

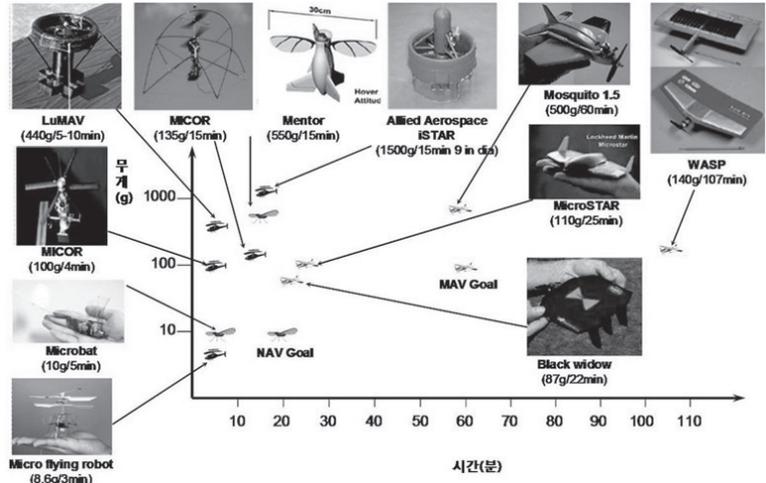


그림 1 다양한 초소형 비행체

겨서 날개의 면적을 줄임으로써 상향 날갯짓에서 발생하는 공기 저항을 줄인다. 양력은 날개 전체에서 얻지만, 추력은 바깥 날개의 앞전 부분을 회전시켜서 (nose-down rotation) 양력의 수평 성분을 발생함으로써 얻는다. 새의 경우에는 날개에서도 조종력을 얻지만, 꼬리 날개에서 조종력을 발생함으로써 다양한 비행이 가능하다. 새의 비행 영역은 레이놀즈 수 (Reynolds number)  $10^5 \sim 10^6$  정도이고, 날갯짓 속도에 비하여 비행속도가 빠르므로, 새의 추력과 양력은 정상 공기역학으로 산출이 가능하다.

이에 비하여 곤충의 비행원리를 사뭇 다르다. 엘링턴(Ellington)과 같은 생물학자는 곤충 비행원리 규명에 많은 기여를 하였고, 디킨슨(Dickinson) 등은 로봇 파리 날개를 이용하여 세 가지 중요한 곤충 비행 원리를 제시하였다. 즉, 곤충의 날갯짓에 의해 발생하는 압전 와류(LEV : Leading Edge Vortex)가 큰 받음각 (angle of attack)에서도 LEV가 날개의 앞전에서 부착되는 실속 지연(delayed stall), 이전 날갯짓에서 분리된 LEV가 다음 날갯짓에서도 영향을 주는 와류 포착 (wake capture), 이 세 가지가 일반적인 곤충 비행의 주요 원리이다. 이러한 원리를 발생하기 위하여, 곤충

은 상대적으로 큰 날갯짓 각도를 발생하고, 날개 축을 중심으로 날개를 회전하여 하향 날갯짓(downstroke)에서 날개 윗면이 상향 날갯짓(upstroke)에서는 아랫면이 되도록 한다. 일부 새도 처음 이륙할 때, 어느 정도 날개를 회전하는 경우가 있지만, 곤충처럼 비행 중 항상 날개를 회전하지는 않는다. 곤충의 비행영역은 레이놀즈 수  $10^3 \sim 10^4$  정도이고, 비행 속도에 비하여 날갯짓 속도가 빠르므로, 곤충의 공기력을 산출하기 위해서는 비정상 공기역학을 도입하여야 한다.

### 새 및 곤충 모방 날갯짓 비행체

이와 같이, 새 또는 곤충의 주요 비행원리는 지금까지의 연구를 통하여 어느 정도 밝혀져 왔다. 많은 연구자들은 이러한 원리를 모방하기 위한 다양한 연구를 하여왔고, 그 결과 날갯짓 장치의 많은 기초적 연구가 보고되어 있다. 이러한 기초적인 연구와 더불어 실제로 비행이 가능한 날갯짓 초소형 비행체에 대한 연구에서도 상당한 발전이 있었다. 지금까지 문헌에 성공적인 비행으로 기록된 날갯짓 초소형 비행체는 대부분 새의 비행을 모방하였다고 할 수 있다. 이는 이들 날갯짓 비행체들의 날갯짓 주파수가 20Hz 내외, 날갯짓 각도가 50도 내외로 한정되고, 상·하향 날갯짓 동안에 크게 날개 회전을 하지 않으며, 꼬리에 부착된 수평 및 수직 꼬리 날개를 이용하여 종 및 횡 비행 안정성을 도모하기 때문이다. 이들 비행체는 양력과 추력이 비행 가능할 만큼 발생하면, 비행 안정성은 꼬리 날개로 확보할 수 있기 때문에 비행 시험도 상대적으로 용이하다. 또한 여기에 탑재해야 하는 모터, 배터리, 무선장치 등이 지금은 시장에서 손쉽게 구입할 수 있으므로, 단기간에 비행이 가능한 새 모방 날갯짓 초소형 비행체 개발이 가능하다. 또한 앞서 설명한 새의 비행원리를 완전히 모방하지 않아도 일단 비행이 가능한 날갯짓 비행체를 개발할 수 있지만, 실제 새와 같

은 높은 비행 효율, 다양한 비행 모드, 한정된 지역에서의 이륙 및 착륙 등 아직도 연구 개발해야 할 분야가 많이 남아 있다.

곤충 비행 모방 날갯짓 비행체의 개발은 새 모방 날갯짓 비행체의 개발에 비하여 극복해야 할 어려움이 더 많다. 우선 날갯짓 각도가 90도 이상으로 크고, 날갯짓 주파수도 일반적으로 새의 날갯짓 주파수 보다 높아서, 기존의 날갯짓 메커니즘으로는 곤충의 날갯짓을 구현하기 어렵다. 또한, 상향과 하향 날갯짓에서 모두 공기력을 발생하고, 날개 회전에 의한 추가적인 공기력을 발생하기 위해서는 날개 축을 중심으로 날개를 큰 각도로 회전시켜야 한다. 이에 더하여, 곤충은 꼬리 날개가 없어서 2장 또는 4장의 날개로 비행에 필요한 공기력과 조종력을 모두 발생하여야 한다. 날개만으로 비행 안정성을 확보해야 하는 경우에는, 곤충 모방 날갯짓 비행체의 공기력 중심과 전체 무게 중심 사이의 거리를 정확히 파악하여 공기력에 의한 종방향 및 횡방향 모멘트를 산출할 수 있어야 한다. 그런데, 곤충의 날갯짓에 의한 공기력은 비정상 공기역학(unsteady aerodynamics)을 도입해야 산출할 수 있고, 공기력 중심을 예측할 수 있다. 또한 공기력 중심을 예측하였다고 하여도, 각 부품을 조립하여 무게 중심이 원하는 위치에 오게 해야 하는 어려움이 있다. 곤충은 소위 내재적 비행 안정성(inherent stability)을 가지고 있는 것으로 알려져 있고, 안정된 비행 중에 날개가 조종력을 발생하여 비행 안정성을 깨면서 기동 비행을 한다. 그러므로, 곤충 비행 모방 초소형 비행체는 우선 내재적 비행 안정성을 가지게 해야 하고, 또한 날개로부터 조종력을 얻을 수 있도록 설계, 제작해야 한다. 이를 위해서는, 일단 양쪽 날개의 날갯짓이 대칭적이어야 하는데, 날갯짓 비행체에서는 주로 모터의 회전으로 날갯짓을 발생하게 되므로, 이 조차 간단한 문제가 아니다.

한편, 약간의 비대칭적 날갯짓으로 발생하는 불안

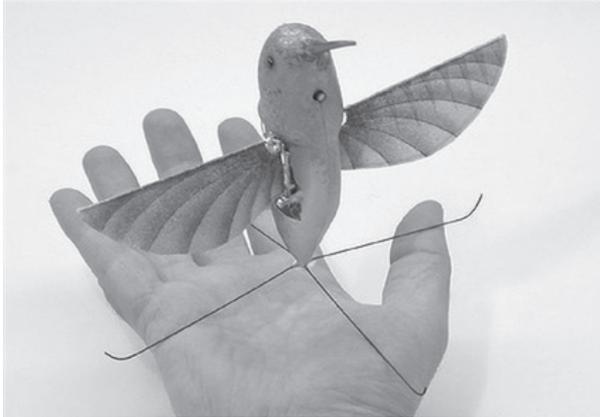


그림 2 벌새 모방 날갯짓 비행체

정성을 보완하거나, 비행 모드를 변환하기 위해서는 내재적 비행 안정성을 갖도록 설계된 날갯짓 장치에서 양쪽 날개의 날갯짓 각도 범위를 변경하여 피칭 모멘트를, 또는 한쪽 날개의 날갯짓 각도만을 변경하게 하여 롤링 모멘트를 발생하여야 한다. 하지만, 내재적 비행 안정성을 확보하기 위해 대칭적 공기력을 발생하도록 설계, 제작한 날갯짓 장치가 비대칭적 공기력이 발생할 수 있도록 변경할 수 있는 날갯짓 메커니즘을 고려해야 하므로, 날갯짓 기구의 설계가 더욱 어려워지게 된다. 복잡하거나 추가적인 메카니즘은 곧 무게 증가 및 주어진 모터 토크의 분산을 초래하므로, 곤충 모방 날갯짓 비행체의 설계는 새 모방 날갯짓 비행체의 설계에 비하여 더 창의적 아이디어를 필요로 한다. 또한 새 모방 날갯짓 비행체에 비해 그 크기가 더 작아지고, 무게가 가벼워야 하므로, 제작상 어려움뿐만 아니라, 필수적인 부품인 모터, 기어, 연결기구, 전자 탑재체 등의 선정에도 어려움이 발생한다. 더구나 내재적 비행 안정성이 확실히 보장되지 않으면 최종적으로 제작한 곤충 모방 날갯짓 비행체의 비행시험도 새 모방 날갯짓 비행체에 비하여 용이하지 못하게 된다. 이러한 어려움들로 인하여 실제로 특정 곤충을 모방하여 완벽한 자유 비행이 초소형 비행체는 아직 등장하지 않고 있다.



그림 3 하버드 대학의 곤충 모방 날갯짓 장치

2011년 초에 일반에 공개된, 미국 에어로바이런먼트(Aeronvironement)의 벌새 모방 날갯짓 초소형 비행체는 DARPA의 지원으로 개발되는데(그림 2), 학술적으로 발표된 내용이 없어서 구체적인 개발 과정을 알 수는 없으나, 관련 특허를 살펴 보면 날개가 모든 공기력과 조종력을 발생하는 것으로 알려져 있어서, 벌새보다는 벌새와 유사한 방식으로 비행하는 곤충의 비행을 모방하였다고 할 수 있다. 하지만, 이 비행체가 내재적 비행 안정성을 가지고 있는지는 알 수 없다. 하버드 대학의 우드(Wood) 교수 연구실에서는 압전 작동기로 구동하는 날개 길이 3센티미터의 곤충 모방 초소형 날갯짓 장치를 개발하고 있는데(그림 3), 두 가닥의 수직 가이드 와이어에 이 장치를 설치하고, 외부 전원 공급장치에서 전력을 인가하여 수직으로 상승하게 하는 데 성공하였다. 즉, 이 날갯짓 장치가 자체 무게를 극복할 수 있을 만큼 큰 추력을 발생할 수 있다는 것을 검증한 셈이다. 하지만, 압전 작동기를 구동하기 위해서는 추가적인 고전압 변압기를 탑재해야 하므로, 외부 전원장치 없이 단독적인 비행이 가능하기까지는 추가적인 연구가 필요하다.

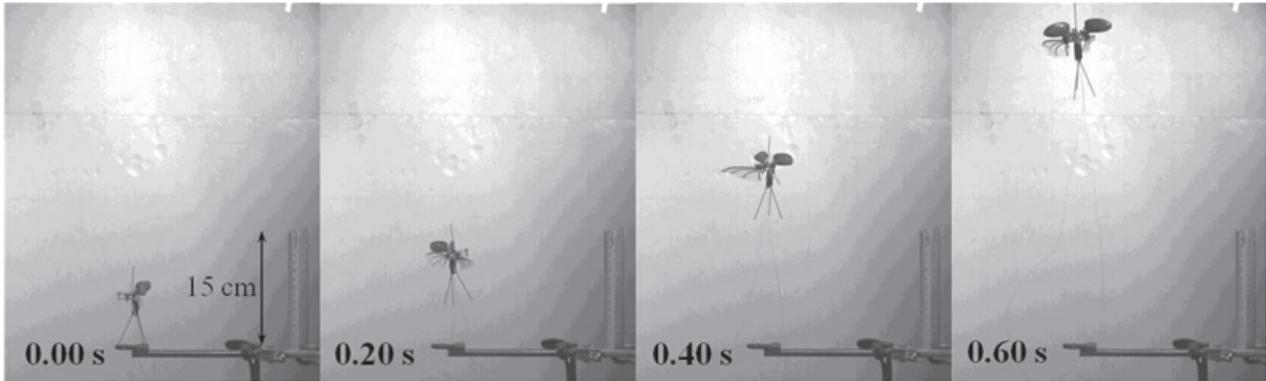


그림 4 장수풍뎅이 비행 모방 날갯짓 비행체의 수직 이륙

### 건국대학교의 곤충 모방 비행체 연구

건국대학교에서는 최근 5년 동안 장수풍뎅이의 비행을 모방한 날갯짓 비행체에 대한 연구를 수행하고 있다. 현재까지 날개 길이 약 12센티미터, 무게 6그램 이내(배터리 무게 제외)의 날갯짓 장치에 내재적 비행 안정성을 부여하여, 안정적인 수직 이륙과 전진 비행이 가능하도록 연구하고 있다. 그림 5는 이 장치에 외부에서 전원을 인가하여, 가이드 와이어 없이 안정적으로 수직 비행하는 모습을 초고속 카메라로 촬영한 연속 사진이다. 더 자세한 연구 내용은 참고문헌과 공식 홈페이지인 [bimil.konkuk.ac.kr](http://bimil.konkuk.ac.kr)을 참고하기 바란다.

### 맺음말

날갯짓 비행을 하는 새 또는 곤충이 회전의 최소화 비행체에 비하여 비행 효율이 우수하지만, 새 또는 곤충의 비행을 공학적으로 완벽히 모방하기는 사실상 불가능하므로, 새 또는 곤충을 모방한 날갯짓 비행체가 실제로 비행 효율이 70~80%에 달하기는 어렵다. 따라서, 새와 곤충에 필적한 날갯짓 초소형 비행체를 개발하기 위해서는 다양한 창의적 아이디어를 계속 발굴하여, 이를 생체모방 비행체의 설계에 반영하는 등의 추가적인 연구가 필요하다. 이러한 연구를 위해서는 향후 생체모방 비행체에 대한 지속적인 연구비 투자와 창의성을 가진 젊은 공학자들의 관심이 요청된다.



### 기계용어해설

**수직 밀링 장치(VERTICAL MILLING ATTACHMENT)**

만능 밀링 머신 또는 플레인 밀링 머신의 주축 머리 부분에 장착하며, 수직식 밀링 머신의 역할을 하는 것.

**진동절연(VIBRATION ISOLATION)**

진동원이 되는 물체를 방진고무 등을 사이에 넣고 바닥에 설치하여 바닥에 진동이 전달되지 않도록 절연하는 것.

**빈센트 프릭션 프레스(VINCENT FRICTION PRESS)**

전동용 마찰판이 원뿔형이고, 램이 밑에서 위로 향하여 움직이며, 프레임에 작업압력이 작용하지 않는 프레스.

**다인선반(多刃旋盤; MULTICUT LATHE)**

동시에 다양한 작업을 할 수 있도록, 베드의 전후에 독립한 2개의 왕복대와 여러 개의 바이트를 갖춘 특수 선반.