

새/곤충 모방 비행 로봇의 연구를 위한 새/곤충 날개의 작동원리

박훈진, 이순기

건국대학교 항공우주공학과, 신기술 융합학과

Key working principles of birds/insects wings for study of birds/insects-mimicking flight robots

Hoon Cheol Park and Soon Gie Lee

1. 서 론

새와 같이 자유롭게 하늘을 나는 것은 오래 전부터 인류의 꿈이었다. 하늘을 향한 수많은 비행 시도를 거쳐, 100여 년 전인 1903년 라이트 형제가 첫 동력비행을 성공하였고, 이후 약 70여년 만에 달 탐험에 성공하였으며, 현재에는 수백 명씩을 태운 대형 여객기가 대륙을 횡단하며 승객을 수송하고 있는 등 실로 항공우주공학 분야는 눈부신 발전을 거듭해왔다. 이러한 성공적인 유인 비행체의 개발과 더불어, 최근에는 유인 비행이 부적절 할 수 있는 위험지역이나 접근이 용이하지 못한 분쟁 및 환경오염 지역의 정찰 또는 관찰에 무인기를 효과적으로 활용할 수 있다는 점이 인식되면서, 무인 비행체에 대한 관심이 점차 고조되고 있다.

무인 비행체로는 일반적인 UAV (unmanned aerial vehicle)와 이보다 크기가 매우 작은 MAV (micro aerial vehicle)로 크게 구분할 수 있다. UAV의 일종인 미국의 프레테터는 최근의 국지전인 아프카니스탄 및 이라크 전쟁에 투입되어 그 활용성이 입증되었으며, Aerozonde[1]는 극지방의 환경 조사에 활용되고 있다. 이밖에도 각종 UAV가 국내외에서 민간 또는 군사용으로 개발되어 활발히 사용되고 있다. 이에 비해서 MAV는 미국 Airovirement사에서 블랙위도우를 개발한 사례를 제외하고는 실용화를 목적으로 하는 MAV의 개발은 보고 되지 않고 있고, 상대적으로 대학 수준에서의 연구는 활발히 진행되고 있다[2].

MAV는 UAV나 유인 항공기에 비해서 상대적으로 더 낮은 레이놀즈 수의 영역에서

비행하므로, 비행 안정성을 확보하기가 용이하지 않은 문제점이 있다. 이에 따라서, 최근에는 저 레이놀즈 영역의 비행에 관한 연구가 활발해지고 있다[3-4]. 이와 함께 대두되고 있는 하나의 최신 경향은 물고기의 해업 원리 또는 새나 곤충의 비행 원리를 이해하고 이를 바탕으로 한 무인 운행체를 개발하고자 하는 것이다[5].

새와 곤충을 모방한 플레핑 비행체를 구현하기 위해서는 무엇보다도 그들이 필요로 하는 비행법칙과 날개, 몸체의 구조를 이해하는 것이 선행되어야 한다. 새와 곤충의 비행에 대한 연구는 지난 수십, 또는 수백 년 간 지속되어온 연구주제로서, 최근 10여 년 동안의 연구 성과는 실로 괄목할 만하다. 새와 곤충의 비행원리에 대한 연구 성과는 최근 발간된 참고 문헌 [6-8]에 매우 잘 정리되어 있다. 특히, 최근 곤충의 날개짓에 대한 발견[9]은 실험 생물학(experimental biology) 분야에서 최고의 발견으로 인정받고 있다.

그러나, 새와 곤충의 비행 원리를 규명하였다 하여도, 이를 공학적으로 구현하기는 현실적으로 어려움이 많다. 이는 자연 근육 시스템에 상당하는 재료 또는 물질 없이는 자연 생물체들의 비행을 그대로 재현하기가 실제로는 거의 불가능하기 때문이다. 다만, 이러한 생물학적인 관찰을 통하여 새나 곤충의 비행을 모방할 수 있는 비행체를 설계하기 위한 공학적인 영감을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 이러한 연구배경을 가지고, 여러 참고 문헌을 바탕으로 새와 곤충의 비행을 모방하기 위해 필수적으로 알아야 할 새와 곤충의 날개 구조와 핵심적인 날개 작동 원리들을 요약하였고, 새와 곤충 비행 원리의 차이

를 서로 비교하였다. 수많은 여러 유형의 새와 곤충이 있지만 여기서는 새와 곤충 사이의 전형적인 차이를 중심으로 정리하였다.

II. 새와 곤충의 날개

새와 곤충 사이의 여러 가지 차이점들 중에서 명백히 두드러지는 차이점으로 우선 새는 척추동물이며 곤충은 무척추 동물이라는 것이다. 진화 측면에서 보면, 새의 날개는 앞다리로 부터 진화가 되었고, 곤충의 날개는 여러 개의 다리 중 일부로부터 진화되었다.

새 날개의 구조는 Fig. 1-(a)에 도시한 것과 같이, 기본적으로 골격, 근육 및 깃털로 구성되어 있다. Fig. 1-(a)에 도시한 대표적인 근육들 중에서, *supracoracoideus*의 수축은 상향 날개짓을 수반하고 *pectoralis*의 수축은 하향 날개짓을 발생한다. 이들 근육은 몸체의 아래 방향으로 발달하여 무게 중심을 낮춤으로써, 롤링 안정성에도 기여한다. 이 같은 원리는 최근의 초소형 비행체 개발에도 적용되고 있다[10]. Fig. 1-(b)에서 도시한 바와 같이, 새의 몸체에 직접 연결된 골격과 근육구조로 이루어진 내부

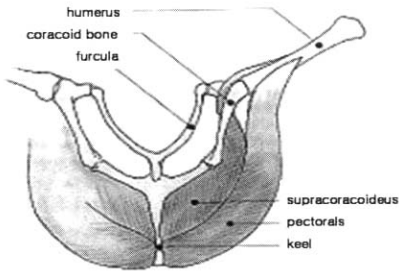


Fig. 1-(a). Wing structure of a bird[8]

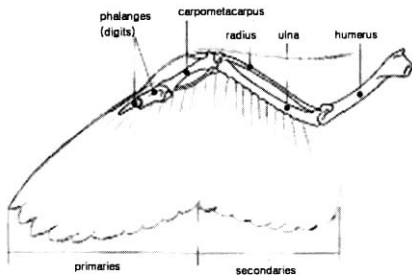


Fig. 1-(b). Wing structure of a bird[8]

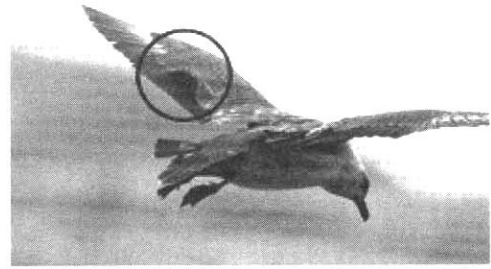


Fig. 2. Slow flight of brown skua

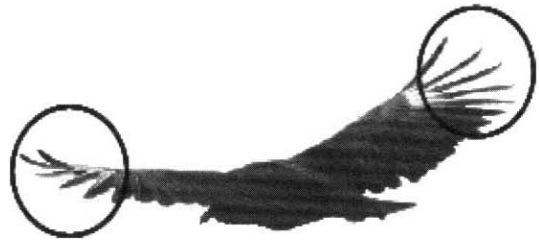


Fig. 3. Wing tip of black vulture during fast flight

날개는 전체 날개 길이의 약 1/2정도이고, 외부 날개는 대부분 깃털로 구성되어 바깥 날개는 매우 유연한 구조로 되어 있다.

깃털은 날개 형상을 완성하며 비행을 위한 하중을 발생하는 동시에 비행 과정에서 날개에 발생하는 하중을 골격 및 근육 구조를 통하여 몸체로 전달하는 역할을 한다. 일부 깃털은 또한 Fig. 2 에서와 같이 공기의 역류를 방지하는 역할을 하기도 한다. 특히 비행 속도가 빠른 새들은 Fig. 3 에서 도시한 것과 같이 끝이 길라진 날개를 가진 경우들이 있는데, 이는 강한 날개짓으로 인해 형성되는 강한 끝단 와류를 여러 개의 작은 와류로 분산시키는 역할을 수행한다 [11].

새의 날개와는 달리, 곤충의 날개는 Fig. 4에서 도시한 것처럼, 생명이 없는 얇은 막과 가지처럼 생긴 시맥들이 날개를 형성한다. 키틴질로 구성된 곤충의 날개에는 깃털이 없고, 시맥은 Fig. 5와 같이 *axillary sclerites*를 통하여 곤충의 흉부 혹은 몸체에 부착되어 있다. 새는 날개를 펴고 접음으로써 형태를 변형시킬 수 있으며 바깥 날개를 굽힐 수가 있다. 그러나 대부분의 곤충 날개들은 굽히거나 접을 수 없다. 그 대신에 곤충은 날개를 비틀 수 있으며 *axillary sclerites*의 위치를 조정함으로써 날개를 전후 방향으로 굽힐 수 있다.

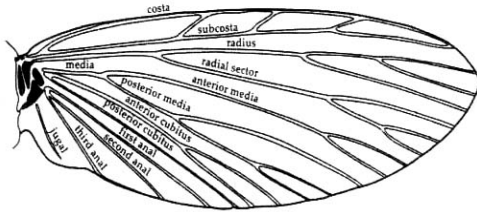


Fig. 4. Wing of an insect[7]

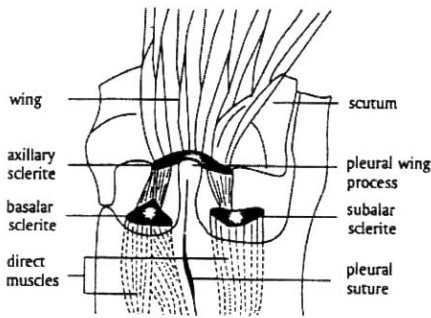


Fig. 5. Wing attachment in an insect[12]

Fig. 5에서와 같이, 곤충의 날개와 몸체를 연결하는 구조는 매우 복잡한 형태를 띠고 있다. 곤충의 흉부(thorax) 구조는 비행을 가능하게 하는 여러 층의 근육들로 구성되어 있다. 이러한 구조로 인하여, 몸체가 유연하고, 몸체 축에 대하여 여러 방향으로 작동할 수 있다[12]. 날개는 pleural wing process를 중심으로 위 아래로 움직일 수 있는데, 날개는 위와 아래 위치에 있을 때만 안정된 위치에 놓이게 된다. 최소한 10쌍의 근육이 곤충이 비행하고, 날개의 자리를 잡으며, 비행 방향을 결정하는데 작용한다[13].

대부분의 텃새나 곤충의 날개는 낮은 종횡비를 가지고 있다. 이것은 숲 속에서 나무가 무성한 서식지를 재빠르게 비행하기 위한 것이다. Fig. 6에서 보인 알바트로스 같은 이주하는 철새들의 날개는 비교적 큰 종횡비를 갖는데, 이는 효율적인 장거리 비행을 위한 것이다. 종횡비가 큰 날개를 가진 항공기가 장기 체공에 유리함은 이미 잘 알려진 사실이다.

곤충 중에서는 잠자리가 비교적 큰 종횡비를 가지고 있다. 대개 곤충들은 날개짓을 통하여 이주하는 경우가 매우 드물다. 이는 곤충은 날개의 종횡비가 낮아서 장거리 비행에는 적합하지 못하다는 것을 의미한다.

곤충의 날개는 몸체에 비해서 날개 크기가 작기 때문에 날개의 양항비가 우수하여야 한다. 타원형 날개가 타원형 양력을 발생하여 최소한의 유도 항력을 발생시킴은 공기역학의 이론으로 잘 밝혀져 있다. 이로 인하여, 대부분의 곤충들은 오랜 진화 과정을 통하여 타원형 모양의 날개를 가지고 있다.

이와는 달리, 새의 날개 끝은 뾰족한 형태를 취하고 있다. 최근의 연구에 의해, 후퇴각이 있고, 끝이 뾰족한 날개가 빠르고 짧은 범위의 비행에 있어서는 매우 효과적인 형태임이 밝혀졌다[14]. 이와 같이 새와 곤충의 날개는 자신의 비행 영역 및 목적에 적합하도록 최적화되어 오늘날의 날개를 가지게 된 것이다.

Fig. 8은 새 날개의 골격, 근육 및 깃털이 새 날개의 익형을 형성하는 것을 보여주는데, 이



Fig. 6. Albatross



Fig. 7. Pointed wing tip

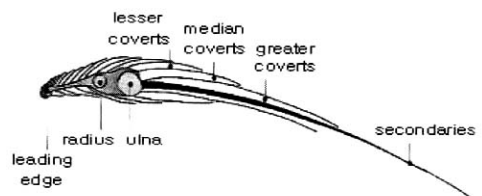


Fig. 8. Wing cross section of a bird[8]

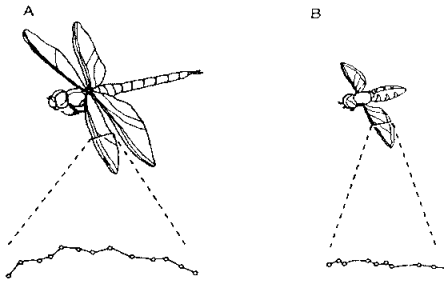


Fig. 9. Wing cross section of insects[6]

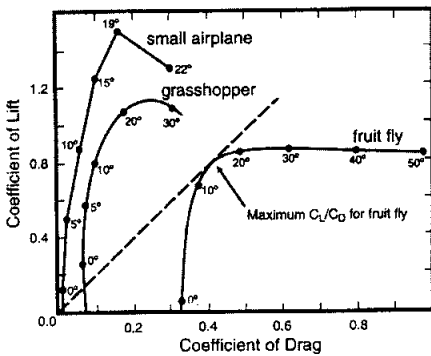


Fig. 10. Drag coefficients vs lift coefficients[6]

것은 항공기의 익형과 매우 유사하다. 이와 대조적으로 곤충 날개의 단면은 시맥들로 인하여 Fig. 9와 같이 지그재그 형태를 갖고 있다.

새와 곤충의 에어포일의 차이점은 각각 비행할 때 레이놀즈 수치 (Reynolds number)와 연관성을 가지는 것으로 보여진다. 새가 비행하는 경우의 레이놀즈 수치는 10^4 에서 10^5 정도이다. 이는 저속으로 비행하는 항공기의 레이놀즈 수치가 10^6 정도인 것을 감안해 본다면, 새와 저속 항공기가 비행하는 경우의 레이놀즈 수치는 서로 매우 근접한 수치이다. 이와 비교해서 곤충이 비행하는 경우의 레이놀즈 수치는 10^1 에서 10^4 정도이다. 즉 곤충이 비행할 때는 새나 항공기에 비해서 공기의 점성이 상대적으로 큰 상황에서 비행하게 되므로, 새나 항공기의 날개 단면과는 매우 다른 형태를 취해야 함을 예상할 수 있다.

Fig. 10은 소형 항공기와 곤충의 양력과 항력 계수의 비를 나타낸 그래프이다. 여기서 주목해야 할 점은 새나 소형 항공기 날개의 경우 양항비(양력과 항력의 계수의 비)가 10보다 큰 것과 비해서, 곤충 날개의 양항비는 이보다 매우

작다는 점이다. 이 때문에 곤충의 비행이 가능하려면, 곤충의 전체 크기가 제한될 수밖에 없으며, 대부분의 비행 곤충의 크기가 작은 것이 때문이다. 또한, 낮은 양항비로 인하여 곤충의 날개짓은 새의 날개짓과는 매우 다른 양상을 띠게 된다.

III. 새와 곤충의 날개 짓

고정의 항공기의 경우에는 추력은 엔진으로부터 얻게 되고, 추력에 의해 발생된 상대바람을 이용하여 날개에서 양력을 발생한다. 새는 활공 때를 제외하면 날개짓으로 추력과 양력을 모두 얻어야하므로, 새의 날개는 헬리콥터의 로터와 같은 역할을 한다고 할 수 있다.

Fig. 11은 새의 상향 날개짓(up-stroke) 및 하향 날개짓(down-stroke)을 도시한 그림이다. Fig. 11과 같이, 좌측의 하향 날개짓에서는 새의 날개는 비행경로(굵은 직선)를 따라서 적정 받음각을 유지하면서 비행에 필요한 추력과 양력을 얻어 상향, 전방 방향의 공기력(R)을 발생한다. 그런데, 우측의 상향 날개짓(up-stroke)에서도 하향 날개짓과 동일한 날개 자세를 유지하여 비행경로에 대해 큰 받음각을 가지고 비행하면, 공기력(R)은 후방의 성분이 매우 크게 되므로, 하향 날개짓에서 발생한 추력을 상쇄하는 결과를 초래하여, 전진비행이 불가능하게 된다. 따라서 우측 그림과 같이 상향 날개짓에서는 날개를 비틀어 비행경로에 대해 받음각을 최소화하여 후방으로 향하는 공기력의 크기를 최대한 줄인다[6].

그러므로, 새는 상향 날개짓에서는 날개를 비틀어 비행경로에 대해 받음각을 줄이고, 하향 날개짓에서는 날개를 반대로 비틀어 적정 받음각을 유지하는 운동을 반복적으로

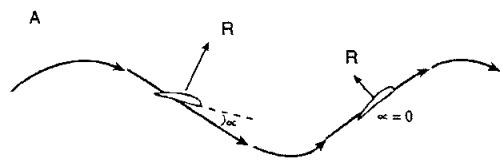


Fig. 11. Flight path and posture of a bird wing[6]

실행한다. 이와 더불어, 상향 날개짓에서는 날개 끝의 유연성을 이용하여 날개 끝을 꺾음으로써, 상향의 공기저항을 최대한 줄여서 빠른 시간 안에 상향 날개짓을 마친다.

이와 같은 사실은 Table 1에서 분석한 새와 곤충의 상향 및 하향 날개짓 회수의 비율을 보면 분명해 진다[6-7]. 대부분의 새와 곤충의 상향 날개짓 회수는 하향 날개짓 회수 보다 많은 데, 이를 달리 표현하면 상향 날개짓의 속도가 하향 날개짓의 속도보다 빠르다는 것을 의미한다. 이는 앞에서 설명한 날개의 비틀림 운동과 상향 날개짓에서 날개 끝을 꺾어 올리는 운동으로 인한 것으로 알려져 있다[6-7]. 따라서 원활한 전진 비행을 할 수 있는 비행 로봇을 개발하기 위해서는 새와 곤충의 날개처럼 상하운동과 비틀림 운동을 동시에 할 수 있는 기구 개발이 필수적임을 알 수 있다.

Table 1. 하향 날개짓과 상향 날개짓의 회수 비율 (상향날개짓 / 하향날개짓)

Species	Ratio
Albatross	1.06
Vulture	1.40
Bat (fast)	1.31
Dragonfly	1.37
Honeybee	1.30
Locust	1.90

새의 날개짓은 앞서 기술한 바와 같이, 몸체와 날개의 골격구조를 직접 연결하는 spuracoracodues와 pectoralis의 수축으로 발생한다. 이에 비하여, 곤충의 날개짓은 매우 다르다. 곤충의 날개짓을 관장하는 근육은 Fig. 12와 같이 크게 몸체의 수직 방향으로 발달한 dorsoventral muscle과 몸체와 나란한 방향으로 형성된 dorsal longitudinal muscle로 구분된다. 두 근육 중에서 dorsoventral muscles은 곤충 날개의 위 방향 운동(upstroke)을 일으킨다. 이 근육이 수축되면, 몸체에 피봇되어 붙어 있는 날개가 위로 움직이게 된다. 그 다음에는 dorsal longitudinal muscles이 수축하면 몸체를 수축시키면서 피봇된 날개를 아래로 움직이게한다(Fig. 13). 이와 같은 운동을 반복적으로 함으로써 날개가 양력을 일으킬 수 있게 된다.

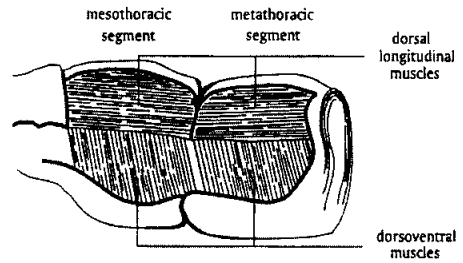


Fig. 12. Muscles of an insect[12]

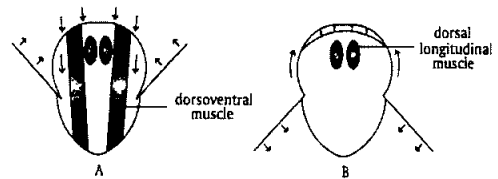


Fig. 13. Muscle movement for flapping of an insect[12]

곤충의 날개와 근육을 연결하는 방식은 크게 둘로 나뉜다. 첫째는 날개를 움직이는 근육이 직접 날개 몸체에 붙어 있는 경우인데, 잠자리, 메뚜기, 여치, 나비 등이 여기에 해당된다. 둘째는 흉부외골격에 근육이 붙어 있고, 날개는 외골격에 끼어서 지레의 원리로 움직여지는 것으로서, 꿀벌, 파리 등이 여기에 해당된다. 날개가 흉부에 직접 부착되는 형식인 잠자리는 20~30 Hz, 나비의 경우는 8~12 Hz의 날개짓을 하는 데 비해서, 날개가 간접적으로 몸체에 부착되는 형식인 꿀벌은 매초 180~250 Hz, 파리는 100~300 Hz의 날개짓을 하는 것으로 알려져 있다.

현재까지 밝혀진 곤충 날개의 양력 발생 원리는 다음과 같다. 날개가 아래로 운동하는 동안에는 공기흐름이 날개의 아래 부분을 치게 되고, 이때 주로 양력이 발생한다. 이후에 날개가 위로 움직일 때 공기 흐름은 날개의 윗부분을 치게 되고 추가적인 양력을 발생시킨다[15].

Dickinson 등[9]은 곤충 날개가 양력을 발생하는 과정을 다음의 세 단계로 구분하였다. 즉, (1) 큰 받음각으로의 상하 날개 운동(스톨 지연), (2) 날개 위의 회전 외류(rotational

circulation), (3) 후류 포착(wake capture)의 세 가지로 구분하였는데, 이 세 가지 현상은 Fig. 14에 도시되어 있다.

Fig. 15는 곤충의 날개가 상향 날개짓에서도 추가적인 양력을 발생시키는 원리를 도식적으로 설명하고 있다. 실선은 날개의 끝단 움직임을 표시하는데, 하향 날개짓에서는 날개 앞전을 앞으로 숙여서 날개의 궤적에 대해서 적절한 받음각을 유지하여 양력과 추력을 발생하고, 날개짓의 하점에서 날개를 회전 또는 비틀어서 역시 상향 날개짓에서도 전방으로의 추력과 상향으로의 양력을 발생하게 된다. 이와 같이 곤충의 날개짓에서는 상향 날개짓에서도 양력과 추력을 발생함으로써 몸체에 비해서 작은 날개를 가진 곤충도 원활한 비행이 가능하다[16].

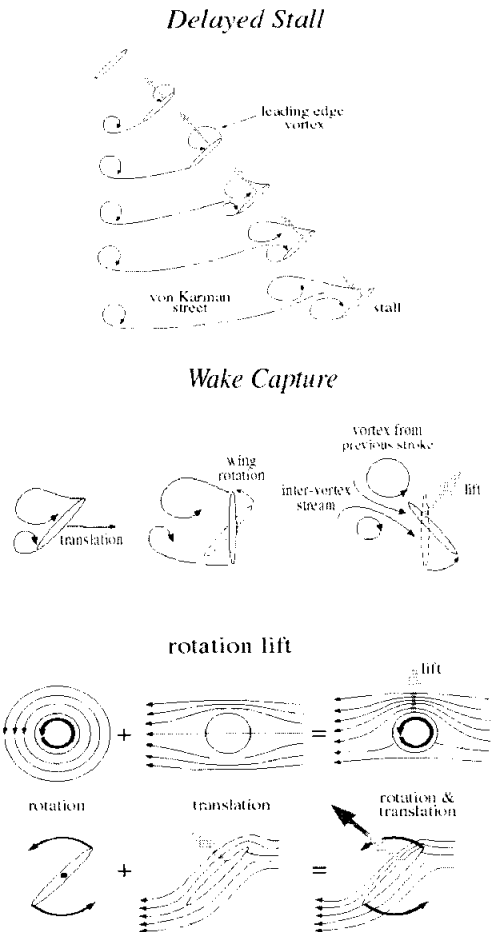


Fig. 14. Principle of lift generation in insect flight

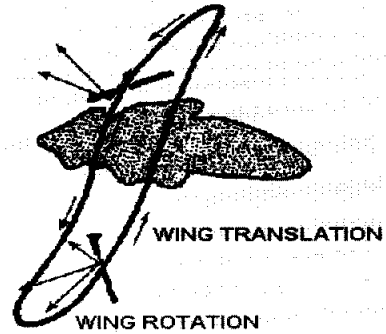


Fig. 15. Flapping of an insect wing[16]

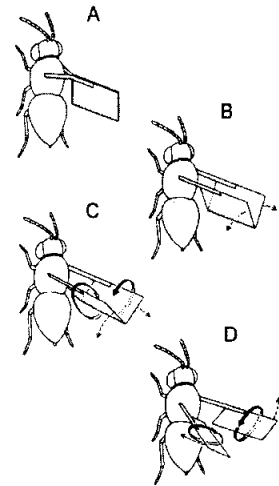


Fig. 16. Clap and fling of an insect wing[17]

Weis-Fogh는 작은 장수말벌이 하향 날개짓에서도 충분한 양력을 얻는 원리를 Fig. 16에 도시한 날개의 겹치기와 펼치기 (clap and fling) 원리로 설명하였다[16]. 즉, 상향 날개짓이 끝나는 시점에서 두 날개를 겹치고(A), 하향 날개짓(D에서 파선 화살표 방향)을 시작하기 이전에 두 날개를 파선 화살표와 같이 급격히 펼친다(B, C). 이때 날개 주위에는 와류(bound vortex)가 발생하여 하향 날개짓에서도 일반적으로 예측하는 것보다 많은 양력을 발생하게 된다. 이러한 빠른 날개의 펼침 운동으로 저 레이놀즈 수에서 두꺼워지는 점성 경계층을 얇게 하고 국부적으로 레이놀즈 수를 증가시키는 효과를 가진다. 또한, 날개 펼치기를 위한 날개 회전 운동으로 와류를 형성하여 추가적인 양력을 발생시킬 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 새 또는 곤충을 모방하여 비행할 수 있는 로봇 비행체를 연구하는 데 필요한 새 및 곤충 날개의 구조와 비행 원리를 최근 생물학자들의 발견을 보고한 참고문헌으로부터 찾아 정리하였다. 새의 경우에는 날개의 대부분이 생명이 있는 것으로서 날개와 몸체를 연결하는 근육에 의해서 날개의 굽힘 및 비틀림 운동을 동시에 행하는 날개짓을 한다. 이때, 새의 종류에 따라서는 상향 날개짓을 할 때에 날개 끝단을 꺾거나 날개를 안쪽으로 수축하여 상향의 공기저항을 최소화함으로써 상향 날개짓을 하향 때보다 빨리 할 수 있도록 한다. 곤충의 날개는 생명이 없고, 날개-몸체 부착부위(흉부)의 근육 움직임에 의해서 날개짓을 일으킨다. 날개짓 주파수는 날개가 몸체에 붙어있는 형식에 따라서 차이가 나는데, 날개가 몸체에 간접적으로 부착된 경우가 날개짓 주파수가 높다. 곤충의 날개는 새의 날개보다 양항비가 낮으며, 그럼에도 불구하고 곤충의 날개가 충분한 양력을 일으킬 수 있는 것은 상향 날개짓에서도 양력과 추력을 낼 수 있기 때문이다. 새 또는 곤충의 비행을 모방하기 위해서는 이러한 기본적인 날개 작동 원리를 파악하고 이를 구현할 수 있는 공학적 설계 및 기구 제작이 필수적이다. 본 논문에서 파악한 여러 원리들은 새 / 곤충 모방 로봇 비행체의 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 중점연구 소지원사업과 한국과학기술평가원의 국제공동연구지원사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Curry, J., et al. "Aerosonde Operations in the Arctic", 1st AIAA Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicles, Systems, Technologies, and Operations, May 20-22, 2002, Portsmouth, VA, USA.
- 2) Design Report for 4th International

Micro Air Vehicle, University of Arizona, 2004.

- 3) Torres, G. E. and Mueller, T. J., "Aerodynamic Characteristics of Low Aspect Ratio Wings at Low Reynolds Numbers", in Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications (edited by Muller, T. J.), American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001, pp. 115-139.

- 4) Laitone, E.V., "Wind Tunnel Tests of Wings and Rings at Low Reynolds Numbers", in Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications (edited by Muller, T. J.), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 195, 2001, pp. 83-86,

- 5) Bandyopadhyay, P.R., "Trends in Biorobotic Autonomous Undersea Vehicles", IEEE Journal of Oceanic Engineering, October Vol 20, 2004, (in press).

- 6) Alexander, D.E., Nature's Flyers, The Johns Hopkins University Press, 2002.

- 7) Dudley, R., The Biomechanics of Insect Flight, Princeton University Press, 2000.

- 8) Sibley, D.A., The Sibley Guide to Bird Life & Behavior, Chanticleer Press, 2001.

- 9) Dickinson M.H., et al., "Wing rotation and the aerodynamics basis of insect flight", Science 284, 1999, pp. 1954-1960.

- 10) 정대근, 황희철, 김종현, 박훈철, "고정익 초소형 비행체 "BATWING" 시스템 개발", 한국항공우주학회지, 제32권 2호, 2004년 4월, pp.82-87.

- 11) <http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/xstart.htm>.

- 12) Nation, J.L., Insect Physiology and Biochemistry, CRC Press, 2002.

- 13) Pringle, J.W.S., "The muscles and sense organs involved in insect flight", Insect Flight (edited by Rainley), Royal Entomological Society and Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1976, pp. 3-15.

- 14) Burkett, C.W., "Reduction in induced drag by use of aft swept tips", Aeronautical Journal, Vol 93, 1989, pp. 400-405.

- 15) Nachtigall W. "Mechanics and

aerodynamics of flight", pp. 1-29, Insect Flight (edited by Goldsworthy, G. and Wheeler, C.), CRC Press, 1989.

16) Ellingron, C.P., "The novel aerodynamics of insect flight: Application to

micro-air vehicles", The Journal of Experimental Biology, Vol. 202, 1999, pp. 3439-3448.

17) Weis-Fogh, T. "Unusual mechanisms for the generation of lift in flying animals", Scientific America, Vol. 233, 1975, pp. 80-87.