

# 날갯짓 비행체의 Folding 메커니즘 설계 및 분석

송우길\*, 장조원, 한중섭, 전창수(한국항공대학교)

## 1. 서 론

조류 및 곤충 들은 대기 중의 점성을 이용하여 그들만의 비행 메커니즘을 오랫동안 진화를 거쳐 오늘에 이르렀다. 이러한 비행 메커니즘은 많은 연구자들의 흥미를 유발시켜왔고 그 결과로 활발한 연구가 진행되고 있다.

Ellington<sup>1</sup>(1999)은 그의 논문에서 로봇 비행기를 위한 날갯짓 비행 메커니즘의 개발 목적 및 그 필요성에 대해 다음과 같이 서술하고 있다. Flapping wing vehicle은 작은 규모인 경우 적어도 전통적인 고정익 및 회전익 항공기에 비해 더 효율적이다. 그리고 flapping wing은 기존 비행체에 비해 좀 더 적은 무게로 좋은 내구력을 가질 수 있는 잠재력이 있으며, 전략적으로 스텔스(stealth) 기능을 적용할 수 있다. 또한 Rayner<sup>2</sup>(2001)는 조류의 날개를 갖는 날갯짓 비행체의 장점을 다음과 같이 설명 하고 있다. 새 들은 곤충에 비해 커다란 몸체를 가지고 있으며, 이것은 양력 생성을 위해 특별한 메커니즘의 원동력 없이도 준 정상상태(quasi steady state)에서 비행을 가능하게 한다. 또한 새들은 곤충의 날개보다 더 능동적으로 변화하는 날개와 근육 그리고 관절 구조로 날갯짓을 하며, 이들은 곤충들 보다 큰 몸집으로 인해 큰 동력을 요구 한다. 따라서 조류의 날갯짓 메커니즘은 항력 감소 및 공기역학적 성능을 향상시킬 수 있도록 구성되어 있다.

Fig. 1<sup>3</sup>은 곤충이나 새들의 몸체무게와 날개길이와의 관계를 조사한 것이다. 이를 통해 조류가 곤충과 대비되는 특징을 잘 이해 할 수 있다. 이들 중 조류의 대표적인 비행 메커니즘은 플래핑 운동(flapping motion), 비틀림 운동(twisting motion), upstroke중일 때 날개의 접기

운동(folding motion) 등 세 가지이다. 일반적으로 날갯짓 비행체 제작에 적용된 운동은 기본적인

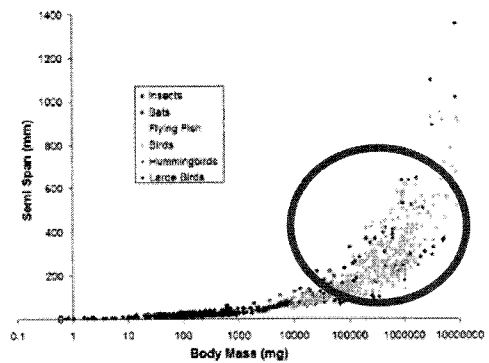


Fig. 1 Semi-wing span과 body weight(Ref .3), 새의 범위(원 표시영역)

플래핑 운동과 날개의 관성과 공기력을 이용한 얇은 날개구조에서의 비틀림 운동이 있다. 이러한 두 가지 운동은 간단한 4절 링크(4 bar linkage) 구조와 박쥐날개와 흡사한 피막구조(membrane)를 이용하여 쉽게 재현할 수 있다. 따라서 이를 이용하여 실험모델을 제작함으로써 날갯짓 비행체와 관련한 공력 데이터 추출 및 비행 효율 그리고 날개 주변의 유동 흐름 및 유동 구조 분석 등을 수행할 수 있다. 그러나 접기 운동은 구현하기 어려워 이를 이용한 실험 데이터 획득과 접기 운동이 주는 효과에 대한 실험적인 연구결과는 아직까지 제시된 바 없다.

이러한 플래핑과 비틀기 운동은 조류의 날갯짓을 완벽하게 모사하였다고는 볼 수 없다. 이것은 조류의 날개단면이 캠버선(camber line)을 갖는 에어포일 구조가 아니며, 또한 조류는 비틀림 운동을 날개근육을 사용한 피칭 운동을 통해 깃털과 함께 능동적으로 구현하는데 비하여

날갯짓 비행체의 비틀림 운동은 공기력에 의한 수동적인 구현하기 때문이다. 따라서 조류의 날갯짓 운동은 완벽하게 재현되기 상당히 어려운 실정이다. 이러한 이유로 기존의 날갯짓 비행체의 운동은 실제 조류의 운동과는 차이를 보인다<sup>4, 5, 6</sup>. 그러나 조류의 날갯짓 운동은 오랜 세월 흘러 검증된 비행 메커니즘이며 준정상 상태에서 뛰어난 움직임을 보인다. 2004년 Tianshu Liu<sup>7</sup>는 4종류의 조류 날개를 광학 카메라 장비를 이용 면밀히 분석하여 날개의 움직임을 수치적으로 재현하였으며(Fig. 2), 이외에도 많은 연구가 진행 중에 있다.

본 연구에서는 접기 운동의 효율과 실험적 검증을 위해 각종 조류의 접기 운동(folding motion)의 운동학적 분석을 수행하였으며, 날갯짓 비행체 설계에 비둘기 형상을 적용시켰다. 또한 이러한 날갯짓 비행체의 운동학적 움직임이 실제 조류와 기하학적 상사를 최대한 유지시키고자 노력하였다.

2. 본 론

새의 접기 운동(folding motion)은 새가 전진방향으로 비행을 하면서 upstroke중일 때 바깥날개(outer wing)를 동체 쪽으로 접는 운동으로 정의된다. 이러한 효과에 대해 Che-shu Lin<sup>8</sup>(2005)은 upstroke중일 때 날개가 동체 쪽으로 접힘으로, 날개에 걸리는 관성력(inertia force) 및 항력을 감소시킬 수 있다고 하였다. 새의 날갯짓은 플래핑 운동과 비틀림 운동 그리고 접기 운동이 함께 나타난다.

일반적인 단순 플래핑 운동(flapping motion) 중일 때 날개 끝 궤적은 단순히 포물선을 그리지만, 접기 운동이 함께 있는 경우에는 그림과 같은 날개 끝 궤적이 원형에 가까운 궤적을 그린다. 이렇게 날개 끝 궤적이 원형을 그리며 날갯짓을 접기 운동(folding mechanism)이라 한다. 이와 같이 두드러지는 운동학적 특징은 Fig. 3, 4, 5에 잘 나타나 있다.

따라서 본 논문에서 설계하고자 하는 날개의 구조도 날개 끝 궤적이 원형에 가까운 운동을 할 수 있도록 설계하였다. Fig. 2(갈매기 날개)와 같이 실제 조류의 날개의 움직임은 3차원이다. 그러나 본 논문에서는 실험 조건 및 설계 제약으로 인하여 2차원으로 실험모델을 설계하였다.

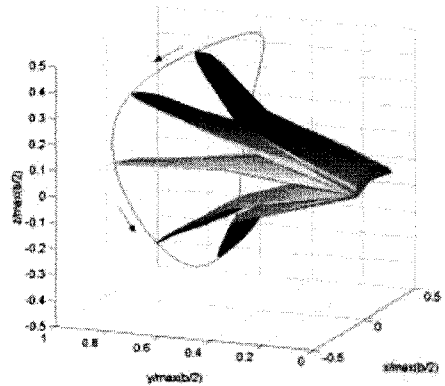


Fig. 2 갈매기 날갯짓 운동 수치모사(Ref. 7)

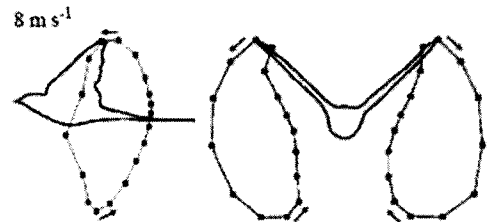


Fig. 3 까치의 날갯짓 운동(Ref. 8)

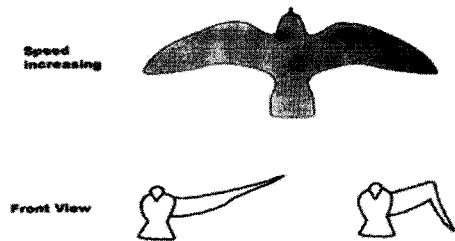


Fig. 4 새의 접기 운동(Ref. 9)

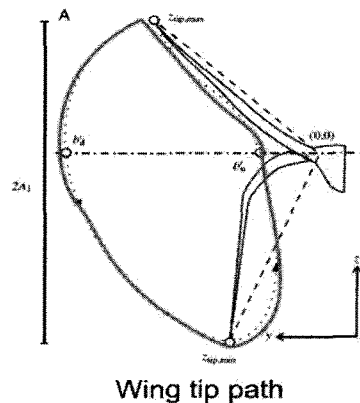


Fig. 5 비둘기의 날갯짓 날개 끝 궤적(Ref. 10)

2-1. 모델 해석

본 연구의 실험 모델은 Folding 운동을 하는 위치를 기준으로 안쪽 날개(inner wing)의 움직임과 바깥 날개(outer wing)의 움직임이 서로 상호 연결 되고 병진운동을 해야 한다. 그렇지 않으면 안쪽날개의 날갯짓 주파수(wingbeat frequency)와 바깥날개의 날갯짓 주파수를 따로 설정해주는 장치를 따로 설계 하여야 한다. 이러한 장치는 오차 발생의 원인이 되므로 이를 해결하기 위해 복합 4절 링크를 도입하여 설계에 적용하였다.

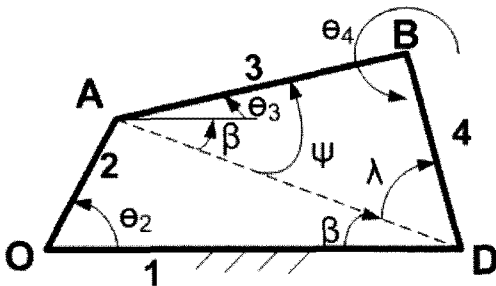


Fig. 7 4절 링크 해석 기본개념

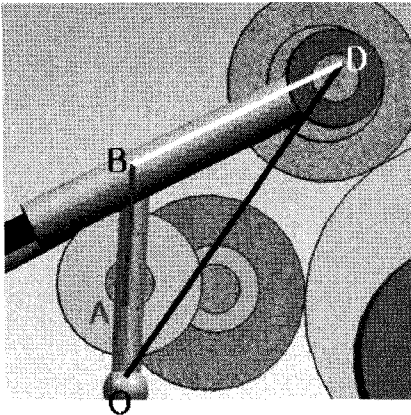


Fig. 8 4절 링크 안쪽날개 crank 설계모델

Fig. 7, 8은 안쪽 날개를 움직이는 4절 링크를 도시한 것이다. 여기서 선분 OA가 원운동을 하면 선분 BD는 약 1 rad의 크기를 가지고 플래핑 운동( $\theta_4$ )을 취하게 되며, 이와 병진해서 바깥날개의 crank load인 Fig. 9의 선분 OA가 원운동을 하며 링크 AD를 움직여줌으로써 링크 BD에 달린 바깥날개가 접기 운동을 취하게 된다. 각각

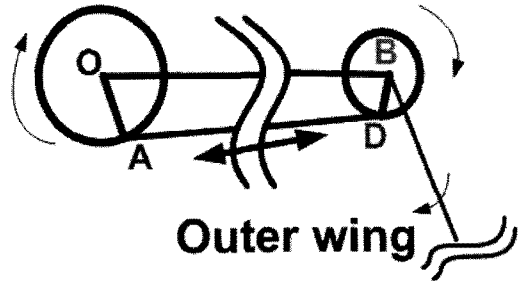


Fig. 9 4절 링크 바깥날개 crank 해석 모델

의 링크 길이들은 4절 링크 해석 식을 이용하여 적절한 설계변수를 찾아야 하며, 각각의 진달각들이 40 ~ 140° 범위로 제한되어 있다. 이러한 운동들은 다음의 벡터 식을 이용하여 해석을 적용하였다.

$$\vec{R}_1 = k_1 \times (\sin t + \alpha) \quad (1)$$

$$\vec{R}_2 = k_2 \times (\sin(t - \beta) - k_1) \quad (2)$$

Fig. 10은 복합 4절 링크가 도입하여 실험 모델을 해석하기 위한 것으로  $\vec{R}_1$ 은 안쪽날개의 벡터 식이며,  $\vec{R}_2$ 는 바깥날개의 벡터 식을 나타낸다. 여기서  $\alpha$ 는 link 1의 원운동이 중간지점에 위치하여 있을 때 안쪽날개가 수평축과 이루는 각을 의미한다. 또한  $k_i$ 에서  $i=1$ 인 경우는 안쪽날개의 flapping angle을 의미하며,  $i=2$ 인 경우는 바깥날개의 folding angle을 의미한다. 식  $\vec{R}_2$ 의  $\beta$ 는  $\vec{R}_1, \vec{R}_2$ 운동의 위상 차이를 의미하며, 실험모델의 설계변수로 결정될 수 있는  $\beta$ 의 범위는 약 60~90°정도 이다. 이러한 수치보다 큰 위상차를 가지게 되었을 경우 날갯짓 비행체는 접기 운동을 취할 수 없음을 또한 수치해석을 이용하여 알 수 있었다.

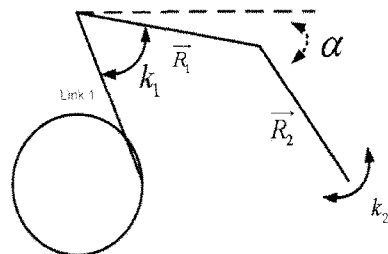


Fig. 10 복합 4절 링크가 도입된 모델해석

Fig. 11은 MATLAB과 프로그램 코드로 수치적으로 계산을 통하여 실험모델의 날개 끝 궤적을 나타낸 것이다. 실험모델의 안쪽날개와 바깥날개와의 각각의 위상차에 따라 궤적이 그리는 모양이 약간씩 차이가 있지만, 통상 70~90°의 위상차 사이에서 물방울 모양의 적절한 날개 끝 궤적을 얻을 수 있었으며, 실험모델의 날갯짓 운동이 정확하게 구현되는지 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 복합 4절 링크를 이용하여 접기 운동을 수행할 수 있는 날갯짓 비행체 모델의 설계도를 나타낸 것이다. 날갯짓은 안쪽 날개(inner wing)의 움직임과 연동하여 바깥 날개(outer wing)가 작동하도록 설계된 것을 볼 수 있다.

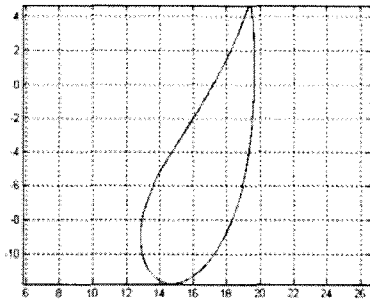


Fig. 11 MATLAB으로 해석한 날개 끝 궤적

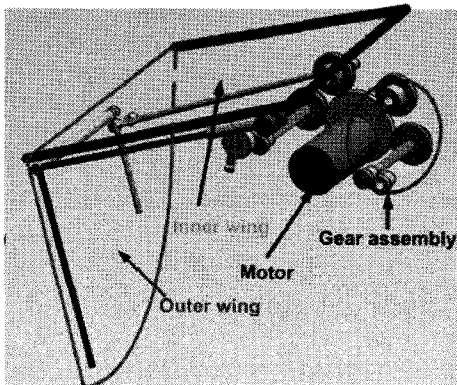


Fig. 12 Folding 메커니즘의 설계도

### 3. 결 론

본 연구에서는 접기 운동이 포함된 조류의 날갯짓 운동에 관해 문헌조사를 수행하고, 복합 4절 링크를 이용하여 접기 운동이 포함된 folding 메커니즘을 설계하였다. 또한 접기 운동을 수행할 수 있는 날갯짓 날개 모델이 갖는 운동학적

특성을 분석하였다. 본 실험모델의 날갯짓 운동은 2차원 평면에 국한되었지만 날갯짓 운동중일 때 접기 운동을 수행할 수 있는 folding 메커니즘을 구현할 수 있었다.

### 후 기

이 논문은 2006년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2006-D00353)

### 참 고 문 헌

- 1) Ellington, C. P., "The Novel Aerodynamics of Insect Flight: Applications th Micro-Air Vehicles", J. Exp. Biol., 202, pp. 3439-3448.
- 2) Rayner, "Thrust and drag in flying birds: applications to birdlike micro air vehicle" 2001.
- 3) Lionel D. Alford, Jr, "'A Definitive Macro-Aerodynamic Analysis Of Natural Flapping Flight'", Ph. D Dissertation, University of Dayton, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, 2005.
- 4) Vest, & Joseph Katz., "Aerodynamic Study of a Flapping-Wing Micro-UAV," 37th AIAA Aerospace science Meeting and Exhibit January 11-14, 1999/Reno, NV.
- 5) Che-Shu Lin, et al., "The thrust and lift of an ornithopter's membrane wings with simple flapping motion," Aerospace Science and Technology 10, 2006.
- 6) Gautam J., and Kevin M., " The Development of a Miniature Flexible Flapping Wing Mechanism for Use in a Robotic Air Vehicle," ,45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit January 2007, Reno, Nevada.
- 7) Tianshu Liu et al.,†"Avian Wings" 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference 28 June - 1 July 2004, Portland, Oregon.
- 8) Kirsty j. Park, "Flight Kinematics of The Barn Swallow(HIRUNDO RUSTICA) over a Wide Range of Speeds in a Wind Tunnel", The Journal of Experimental Biology 204, 2001, pp. 2741-2750
- 9) David, E. Alexander, "Nature's Flyers: Bird, Insects, and the Biomechanics of Flight," The Johns Hopkins University Press, 2002
- 10) M. Rosén, "The relationship between wingbeat kinematics and vortex wake of a thrush nightingale", The Journal of Experimental Biology 207, 4255-4268.