

폴딩 메카니즘이 적용된 날갯짓 비행체 모델 설계

Development of an ornithopter model with an applied folding mechanism

송우길*, 장조원, 전창수(한국항공대학교)

1. 서 론

새들의 날갯짓은 고정익 항공기로는 불가능한 역동적이며 능동적인 움직임을 가능케 한다. 이러한 움직임이 가능한 이유는 새들의 날개를 자유재로 변화시킬 수 있기 때문인데 이러한 특징은 새의 날갯짓과 곤충의 날갯짓 움직임을 구분하는 큰 축이 된다. Shyy¹⁾는 “변화 가능한 형상에 대한 즉각적인 반응을 활용한 날개 표면의 변화를 이용한, 3차원 유동mechanism 그리고 비정상 유동의 최적화를 통하여 이러한 비행 움직임이 가능하다”고 하였으며, 또한 Rayner²⁾는 “새들은 벌레들 보다 큰 몸집으로 인해 요구되는 동력이 크다. 따라서 비행 중 동체의 항력 감소 및 공기역학적인 움직임(performance)의 향상을 위한 비행체계(flight mechanism)에 의해 움직임이 지배 된다”고 하였다. 이러한 비행체계의 완벽한 모델링은 비정상 공기역학 유동의 예측이 필요할 뿐만 아니라 날개와 날개주위를 흐르는 유동장(flow field) 사이로 상호 작용하는 힘에 관한 정확한 이해가 필요하다. 하지만 이러한 공기역학적 구조를 완벽하게 모델링하기에는 현실적으로 불가능에 가깝다. 따라서 이러한 날갯짓에 대한 단순화된 모델링부터 시도 되어야 하며, 이러한 시도는 충분히 유익한 결과를 가져다주는 것을 이전부터의 다양한 연구를 통하여, 알 수 있다.^{3),4),5)} 초기 새의 날갯짓에 관한 연구들은 준 정상상태(quasi-steady-state) 선형공기역학이론(linear aerodynamic theories)들에서 단순 날갯짓(flapping flight)영역으로의 확장으로 시도 되었다. Greenwalt는 적절한 보정계수를 사용하여, 새 비행 모델에서의 elliptic 양력분포를 가정하였고,³⁾ 다양한 종의 새들이 가진 힘과 항력계수와와의 상관관계에 대한 추정을 시도했다. Pennicuick은 “steady actuator disc 가 생성하는 운동량 flux상수는 'flapping wing' 그리고 이것의 공기역학적 힘의 생성을 표현할 수 있다.”는 이론을 세웠다.⁴⁾ 또한 다른 연구자들도 날개에서 유도되는 후류의 유도 속도(induced velocity)

를 계산하기 위해 고전양력선이론(classical lifting line theory)의 준 정상상태 후류 모델(quasi-steady vortex wake model)을 채택했다.^{5),6)} 그러나 Ellington은 그의 독창적인 연구에서 이러한 준 정상상태 해석(quasi-steady analysis)은 정량적인 힘의 크기를 정확하게 측정하지 못함을 실험적으로 보여주었다(특히 측정된 양력계수 값에서 이 같은 현상이 두드러졌다).⁷⁾ 이는 다른 연구자들도 같은 결론에 도달함으로써, 증명되었다.⁸⁾ 정상상태 또는 준 정상상태 이론의 가장 큰 제한은 본질적으로 유동상태는 비정상 상태이며, 또한 날개에서 생성된 후류를 생성하는 날갯짓 자체가 비정상상태라는 점이다. 유동에서의 비정상성은 advance ratio J 로 표현할 수 있다. J 는 다음(1)와 같은 식으로 정의 한다.

$$J = \frac{V}{2\Phi fb} \quad (1)$$

긴 축 길이(span length)는 높은 날개 끝(wing tip) 속도 그리고 일반적으로 새의 날개에서 발생하는 unsteadiness와 잘 일치하기 때문에 advance ratio J 는 비교적 정확하게 유동의 3차원 특성을 구분 할 수 있다.⁹⁾ advance ratio J 는 1을 기준으로 $1 > J$ 인 unsteady영역과 $J > 1$ 인 quasi-steady영역으로 구분한다. 새의 비행 영역은 이 advance ratio J 가 1 또는 1 이상인 준 정상상태 영역이다..

vest & katz¹⁰⁾는 비둘기 모델 격자를 통해 3차원 potential flow pannel method를 이용하여 전산 해석을 수행 하였고 1999년에는 이를 실제 모델화 하여 같은 변수에서 실험을 수행 하였다. 위 실험을 통하여 무차원수 J 가 낮아질수록 추력효율이 더 좋아짐을 보였다. 본 논문에서는 이러한 단순 flapping 을 넘어 새의 날갯짓을 좀 더 가까이 묘사하고자 folding mechanism이 포함된 날갯짓 비행체를 설계 하였다. 본 논문에서의 folding mechanism은 새의 그것에 비하여 3차원이 아닌 2차원이라는 제약이 따르지만 기본적인 단순화 접근을 통하여 정성적인 결과를 얻고자 본 모델을 설계 하였고, 다음의 실험 모델을 개발 하였다.

2. 본 론

2.1 날 개 형 상

본 모델은 단순 *flapping motion*과 *folding motion*을 각각 묘사 할 수 있도록 설계 되었다. 따라서 날개는 *motion* 형식에 따라 각각 교체 할 수 있도록 설계 되었다. 다음 그림¹⁾은 새의 날개 형상을 나타낸 개략도이다.

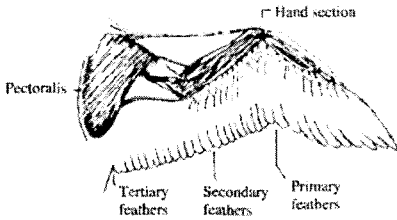


그림 1 날개 형상

그림 1과 같이 새의 날개는 크게 *primary*와 *secondary*로 나뉘는데 *primary*쪽 날개를 능동적으로 움직임으로서 *folding mechanism*이 가능하다. 이러한 *folding mechanism*의 구현을 위해 다음 그림 2와 같은 날개 내부의 *primary wing* 작동구조를 설계 하였다.

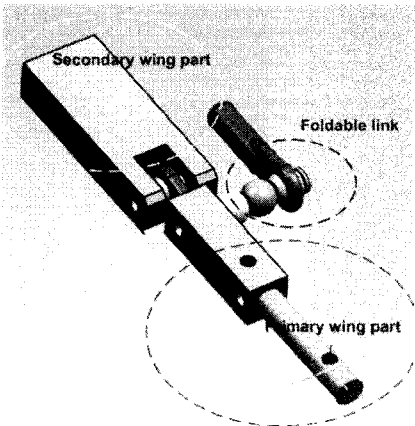


그림 2 Wing Joint

Foldable link 뒤로 축이 연결되어 그림 4의 동체에 부착된 4절 링크와 연결되며 이로 인해 *primary wing*이 *folding motion*을 취할 수 있다. 이러한 날개 관절부분은 다음 그림 3과 같이 날개 내부에 위치하게 된다.

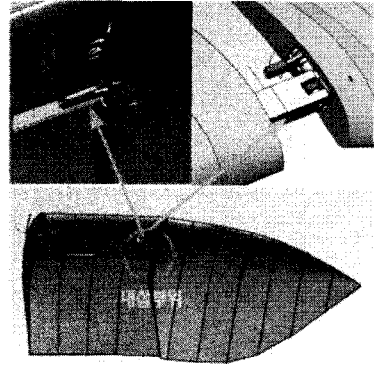


그림 3 내부 삽입 구조

날개의 형상은 *vest& katz*와의 실험 상사를 맞추기 위해 비둘기 날개가 갖고 있는 *airfoil* 구조¹⁰⁾를 각기 수치화 하여 설계 하였다.

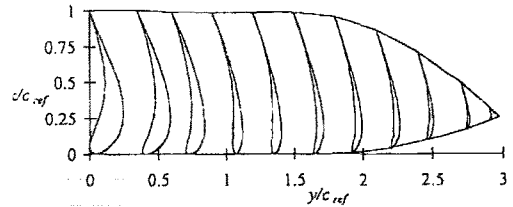


그림 4 비둘기 날개형상

이렇게 설계된 날개가 갖는 형상적 특징을 다음 표 1에 정리하였다.

분류	mean chord	wing span
한쪽 날개	≒ 10cm	30cm
전체	≒ 10cm	60cm

표 1 날개의 특징.

모델개발의 실험 환경은 그 크기를 제한시켜 *vest & katz*와 달리 각기 날개의 크기가 30cm로 제한되었다. 이는 실제 비둘기가 가진 날개의 크기와는 비슷한 크기로 제작이 되었지만 이는 *wing joint*를 내삽 하기엔 큰 제약으로 작용하였다. 이러한 제약은 제작하는데 관절의 강도에 영향을 주어 운동학적 제약으로 뒤따라와 실제 비둘기가 운동하는 범위(표3)보다 다소 제약된 운동학적 가동 범위를 지니게 되었다.

2.2 운동학적 특징

본 연구에서 설계한 날갯짓 모델은 표2 와 같은 운동학적 특징을 지닌다.

분류	
날갯짓 주기	최대 4hz
날갯짓 범위	상하 30° 총 60°
접기 크기	약 90°

표 2 운동학적 특징

본 모델의 운동학적 특성은 모델 동체 내부의 이중 4절 링크 구조로 인하여 구현된다. 이중 4절 링크 구조는 다음 그림5,6에 나타내었다.

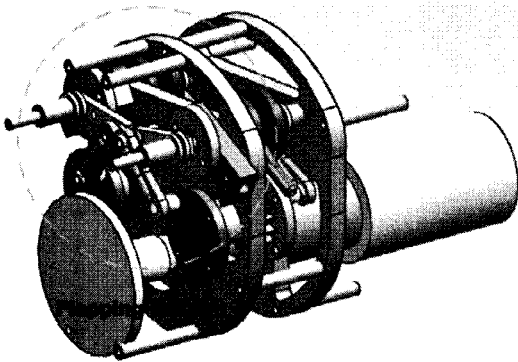


그림 5 Flapping linkage

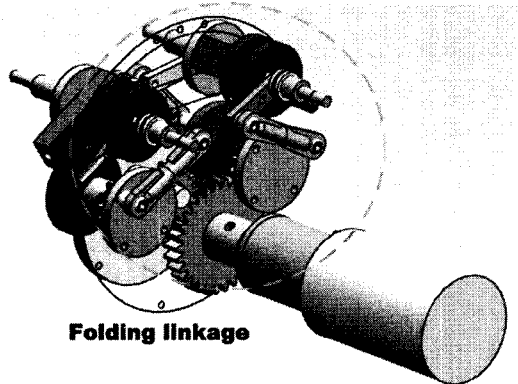


그림 6 Folding linkage

초기의 설계와는 달리 folding linkage는 flapping linkage 와 공유하는 linkage가 있다. 이러한 linkage의 존재는 두 쌍의 4절 링크 구조가 folding mechanism을 구현하는데 꼭 필요한 구조이지만 동시에 folding amplitude를 제한하는 요

인으로 작용한다. 실제 날개가 움직일 때 flapping linkage와 folding linkage 간의 위상차가 존재 하게 된다. folding motion은 이러한 위상차를 조절함으로써 구현 되는데 이때 같은 linkage를 공유함으로써 각 linkage 운동 간의 위상차의 효과가 제한됨으로서 실제 움직임이 제한 받게 된다. 실제 새와 유사한 운동학적 특징을 구현 하기위해 linkage 길이와 다양한 위상 차이를 가지고 수식적으로 움직임을 구현 하였다. 날개의 움직임은 각각의 linkage에 대한 벡터 해석을 통해 MATLAB을 이용하여 계산 하였다. 본 모델에서 구현된 folding mechanism은 2차원이다. 실제 새는 3차원적 움직임으로 motion을 취하는 반면 본 모델은 4절 링크의 구조적 한계로 인해 구현 할 수 있는 자유도의 범위가 제한되어 있어 folding의 가장 두드러지는 특징을 중심으로 설계 하였다. 그림 7,8은 각 링크 간의 상호 영향이 없을 때의 날개의 궤적과 그렇지 않은 경우의 궤적을 비교한 그림이다. 그림 9은 실제 t 새가 날갯짓을 할 때의 날개 끝 궤적을 나타냈다.

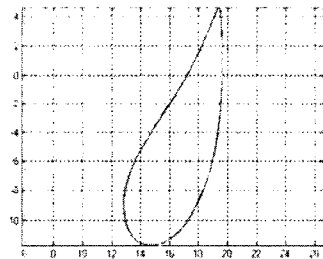


그림 7 영향이 없는 경우 날갯짓 궤적

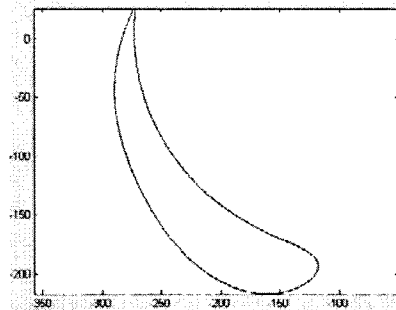


그림 8 영향이 있는 경우 날갯짓 궤적

각각의 그림들을 비교하였을 경우 상호 영향이 없는 경우가 좀 더 비슷한 궤적을 얻을 수 있는 것을 확인 하였으나 실제로 그와 같이 제작은 불가능하였다.

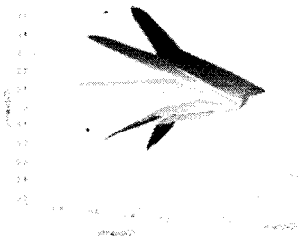


그림 9 갈매기 날개 짓 운동 수치모사¹²⁾

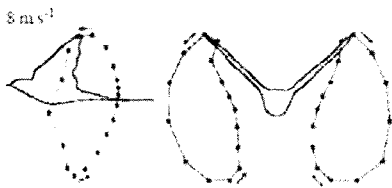


그림 10 제비의 날갯짓 날개 끝 궤적¹³⁾

3. 결 론

선행연구를 통한 *folding mechanism*을 정의 하였고 정의된 *mechanism*이 구현 가능한 모델을 설계 제작 하였다. 제작된 모델의 최종 형상은 다음 그림 11,12과 같다. 제작된 모델은 단순 날갯짓을 위한 *flapping wing*과 *folding mechanism*을 구현하기 위한 *folding wing* 두 종류의 날개를 교환하여 장착 가능하게 설계 하였다.

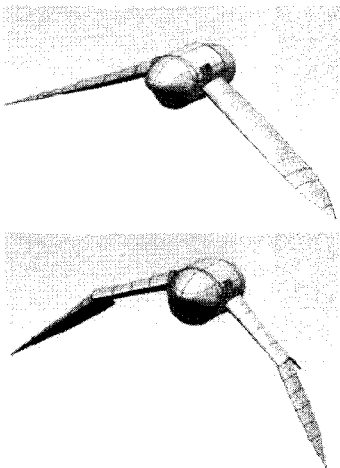


그림 11,12 *flapping wing* & *folding wing model*

후 기

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

참고문헌

- 1) Shyy W, Berg M, Ljungqvist D. *Flapping and flexiblewings for biological and micro air vehicles. Prog Aerosp Sci* 1999;35:455-506
- 2) Rayner, "Thrust and drag in flying birds: applications to birdlike micro air vehicle" 2001
- 3) Greenewalt CH. *The flight of birds. Trans Am Philos Soc* 1975;65:1-67.
- 4) Pennycuick CJ. *Bird flight performance: a practical calculation manual. New York: Oxford University Press; 1989*
- 5) Betteridge DS, Archer RD. *A study of mechanics of flapping flight. Aeronaut J* 1974;25:129.
- 6) Archer RD, Sapupo J, Betteridge DS. *Propulsion characteristics of flapping wings. Aeronaut J* 1979;83:355-71
- 7) Ellington CP. *The aerodynamics of hovering insect flight I. The quasi-steady analysis. Philos Trans R Soc London Ser B* 1984;305:1-15.
- 8) Sane SP, Dickinson MH. *The control of flight force by a flapping wing: lift and drag production. J Exp Biol* 2001;204:2607-26.
- 9) Steven Hoa, Chih-Ming Hoa., "Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers," *Progress in Aerospace Sciences* 39 (2003) 635-681
- 10) Michael S. Vest and Joseph Katz., "Unsteady Aerodynamic Model of Flapping Wings," *AIAA Journal* Vol. 34, No. 7, July 1996
- 11) Wei Shyy, M. Berg, D. Ljungqvist., "Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles," *Progress in Aerospace Sciences* 35 (1999) 455-505
- 12) Tianshu Liu et al., "Avian Wings" 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference 28 June - 1 July 2004, Portland, Oregon
- 13) 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, 2741-2750 (2001)