Proceedings of
The Fourth National Congress on Fluids Engineering
August 23-25, 2006, Kyungju, Korea

날개의 종횡비가 날개 짓 운동의 공기역학적 특성에 미치는 영향

오현택* · 최항철** · 김광호*** · 정진택****

The Effect of Aspect Ratio on Aerodynamic Characteristics of Flapping Motion

Hyun-Taek Oh*, Hang-Cheol Choi**, Kwang-Ho Kim*** and Jin Taek Chung****

Keywords : Flapping Motion(날개 짓 운동), Aerodynamic Characteristics(공기역학적 특성), Aspect Ratio(종횡비) Lift to Drag Ratio(양항비)

Abstract

The lift and drag forces produced by a wing of a given cross-sectional profile are dependent on the wing planform and the angle of attack. Aspect ratio is the ratio of the wing span to the average chord. For conventional fixed wing aircrafts, high aspect ratio wings produce a higher lift to drag ratio than low ones for flight at subsonic speeds. Therefore, high aspect ratio wings are used on aircraft intended for long endurance.

However, birds and insects flap their wings to fly in the air and they can change their wing motions. Their wing motions are made up of translation and rotation. Therefore, we tested flapping motions with parameters which affect rotational motion such as the angle of attack and the wing beat frequency. The half elliptic shaped wings were designed with the variation of aspect ratio from 4 to 11. The flapping device was operated in the water to reduce the wing beat frequency according to Reynolds similarity. In this study, the aerodynamic forces, the time-averaged force coefficients and the lift to drag ratio were measured at Reynolds number 15,000 to explore the aerodynamic characteristics with the variation of aspect ratio.

The maximum lift coefficient was turned up at AR=8. The mean drag coefficients were almost same values at angle of attack from 10° to 40° regardless of aspect ratio, and the mean drag coefficients above angle of attack 50° were decreased according to the increase of aspect ratio. For flapping motion the maximum mean lift to drag ratio appeared at AR=8.

1. 서 론

특정한 형상의 단면을 갖는 날개에서 발생하는 공기역학적 특성은 날개의 형상과 받음각에 의해 좌우된다. 종횡비는 날개의 전체 길이와 날개 평균 시위 길이의 비를 뜻한다. 비행에 관한 초창기 연구에서, 연구진들은 새의 날개에서 언제나 날개 길이가 시위 길이보다 훨씬 크다는 것을 알게 되었고, 고정익 항공기의 경우 아음속 비행시 큰 종횡비 날개가 작은 종횡비 날개보다 좋은 양항비를 나타낸다는 것을 밝혀냈다.

새나 곤충은 그 크기가 상대적으로 작고, 날개를 펄럭이는 독특한 방식으로 비행을 한다. Michelson 등[1]에 따르면 새나 곤충의 비행방식은 정지비행이 가능하고, 날개의 운동을 조절할 수 있기 때문에 저속비행이 가능하다. 또한 저 레이놀즈수 영역에서 급기동 성능이 우수하고, 소형화에 유리하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점 때문에 새나 곤충의 비행방식을 초소형 비행체에 적용하려는 많은 연구가 진행되고 있다.

* 고려대학교 기계공학과 대학원, nomo_af29@hotmail.com
** 한국과학기술연구원, choice@kist.re.kr
*** 한국과학기술연구원, khkim@kist.re.kr
**** 고려대학교 기계공학과, jchung@korea.ac.kr

1990년 Ennos[2]는 새나 곤충의 날개에 의하여 발생되는 비정상 유동과 와류는 고정익 항공기에서 사용되는 항공역학적 이론을 적용할 수 없다고 하였다. 하지만 최근 기술의 발달에 따라 날개 짓 운동을 하는 날개에서 발생되는 공기역학적 힘의 측정이 가능해졌고, 날개 주변의 유동을 영상으로 획득하고 분석하는 것이 가능해졌다.

Ellington 등[3]은 박각시나방의 비행에 관한 연구를 통하여 날개 윗면에 앞전와류가 발생하고, 그 앞전와류에 의하여 양력이 증가한다고 하였다. 또한 곤충 날개 형상의 종횡비가 다른 날개를 이용하여 프로펠러로 제작하고, 그때 발생하는 공기역학적 힘을 측정하였다[4]. 그 결과 양력계수는 종횡비에 관계없이 비슷하였고, 종횡비가 증가할수록 항력계수는 감소하여, 결국 양항비는 증가하였다.

Dickinson 등[5]은 초파리 날개의 움직임을 모사한 실험 장치를 이용하여 시간에 따라 발생하는 공기역학적 힘을 측정하였고, 그 결과로부터 지연성 실속(delayed stall), 회전에 의한 순환(rotational circulation), 그리고 후류 포획(wake capture) 등과 같은 곤충 비행의 독특한 공기역학적 특성을 발견하였다.

김 등[6]은 벌새의 정지비행에 관한 연구에서 정지비행시 발생하는 공기역학적 힘을 측정하고, 날개 주변의 유동을 가시화하였다.

본 연구의 목적은 날개 짓 운동시 큰 종횡비 날개가 작은 종횡비 날개보다 좋은 양항비를 갖는지 알아보는 것이다. 만약 그

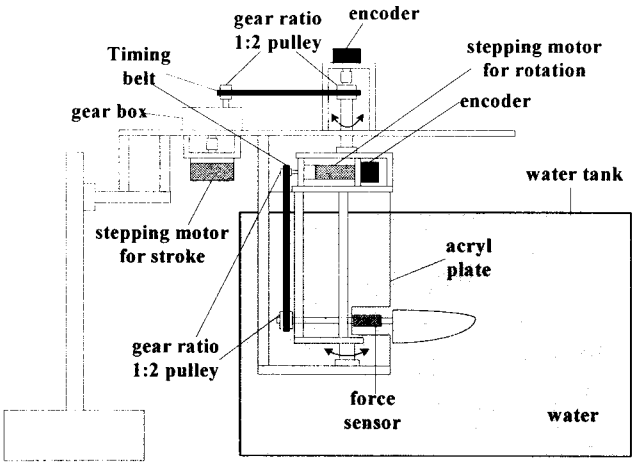


Fig. 1 Schematic diagram of flapping device.

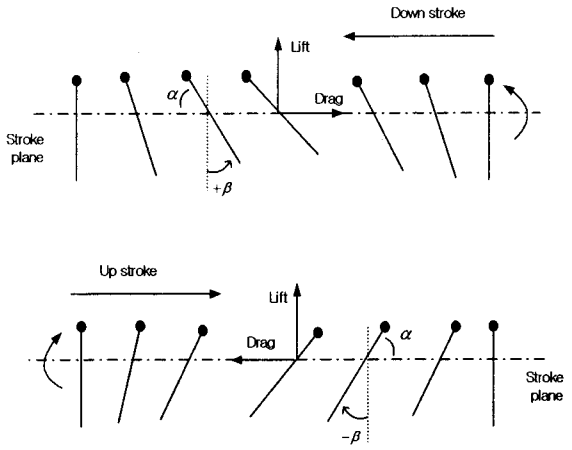


Fig. 3 Motion of the airfoil chord during a cycle.

렇지 않다면 가장 날개 짓 운동에 적합한 최적의 양항비를 찾아보고, 날개의 종횡비가 날개 짓 운동의 공기역학적 특성에 미치는 영향에 대하여 알아본다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 날개 짓 운동 장치

Fig. 1은 날개 짓 운동을 구현하고, 그때 발생되는 힘을 측정하기위한 실험장치의 개략도이다. 2개의 스테핑 모터를 이용하여 왕복운동과 회전운동이 가능하도록 하였고, 각각의 스테핑 모터 앞부분에는 감속기어를 설치하여 회전수를 줄이고 토크를 크게 하였다. 각각의 회전축에 엔코더를 장착하여 회전의 정도를 알 수 있도록 하였다. 실험은 2 m × 2 m × 1 m의 수조에서 진행하였다. 작동유체로 물을 사용함으로써 레이놀즈 상사에 따라 날개 짓 진동수를 줄일 수 있기 때문에 실험장치를 저속으로 구동할 수 있도록 하였다. 힘 측정을 위한 센서는 8개의 스트레인 게이지를 이용하여 외팔보 형태로 제작하였다.

2.2 실험에 사용한 날개

실험에 사용한 날개는 검은 턱 벌새(*Archilochus alexandri*)의 날개의 형상을 모방하여 종횡비가 다른 반 타원형 날개를 사용하였다. 날개의 종횡비(AR)는 날개 길이(R)와 평균 시위 길이($\bar{c}$)를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$AR = \frac{2R}{\bar{c}} \tag{1}$$

Fig. 2는 실험에 사용한 반 타원형 날개의 일반적인 형상을 보여주고 있다. 실험에는 종횡비가 4부터 11까지 8개 날개를 제작하여 사용하였다. 실제 검은 턱 벌새의 날개 형상을 5배 확대하여 날개의 길이를 235 ㎜가 되도록 하고 평균 시위 길이를 조절하여 종횡비의 변화를 주었다. Table 1은 실험에 사용한 날개의 제원을 나타내었다. 날개는 두께 3.0 ㎜의 투명한 폴리카보네이트 판을 사용하여 제작하였다.

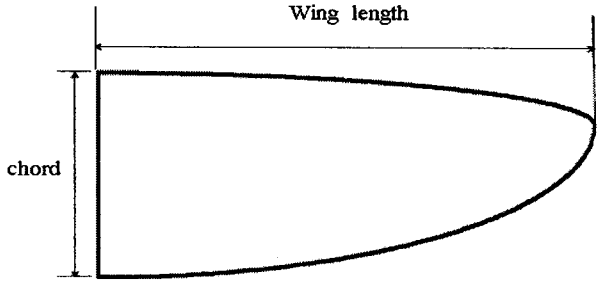


Fig. 2 Model wing.

2.3 날개의 운동

날개의 운동은 벌새의 정지비행을 모사하여 왕복운동과 회전운동으로 구성하였다. Fig. 3은 날개 짓 한 주기 동안 날개 시위의 움직임을 보여주고 있다. 날개가 움직이면서 휩쓸고 간 면과 날개의 시위가 이루는 각을 받음각(α), 실제로 날개가 회전한 정도를 알아보기 위하여 날개가 회전한 각을 피칭각(β)으로 정의하였다. 받음각과 피칭각과의 관계는 $\alpha = 90^\circ - \beta$이다. 날개의 왕복운동은 대칭을 이루도록 하였고, 날개가 움직이는 동안 발생하는 순간적인 힘을 측정하여 양력과 항력으로 나누었다. 양력은 날개가 휩쓸고 간 면에 수직한 방향의 힘으로, 항력은 날개가 휩쓸고 간 면에 수평한 방향의 힘으로 정의하였다.

2.4 실험 조건

본 실험에서 평균 레이놀즈수는 15,000으로 하였다. 평균 레이놀즈수($\overline{Re}$)의 정의는 다음과 같다.

$$\overline{Re} = \frac{\bar{c}\,\overline{U_t}}{\nu} = \frac{2\phi R' n \bar{c}}{\nu} \tag{2}$$

여기서 $\overline{U_t}$는 평균 날개 끝 속도, ϕ는 날개가 휩쓸고 간 각, R'은 회전축에서 날개 끝까지 길이, n은 날개 짓 진동수이다.

Table 1 Morphological variables of model wing

Variable	Property
Wing length (㎜)	235.0
Aspect ratio	4.0 ~ 11.0
Mean chord length (㎜)	42.7 ~ 117.5
Wing surface area (㎠)	100.4 ~ 276.1
Wing beat frequency (Hz)	0.083 ~ 0.230
Wing thickness (㎜)	3.0
Wing material	Polycarbonate

실험에 사용된 물의 온도는 23 ℃이고, 이때 물의 동점성 계수(ν)는 9.345×10^{-7} m^2/s이다. 종횡비가 커질수록 평균 시위 길이는 작아지기 때문에 평균 날개 끝 속도가 증가하게 된다. 평균 날개 끝 속도의 차이로 인하여 날개 짓 진동수도 차이가 발생하게 된다.

날개 짓 운동은 받음각을 변수로 10° ~ 80°까지 10°간격으로 변화를 주었다. 회전기간은 한 주기의 15 %로 하였다. 회전 시기는 날개가 앞으로 움직이는 동안 회전의 반을, 날개가 뒤로 움직이는 동안 나머지 반을 회전하는 대칭 회전으로 하였다. 날개가 휩쓸고 간 각은 126°로 설정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 평균 공력

Fig. 4는 평균 레이놀즈수 15,000에서 종횡비가 서로 다른 날개에서 발생된 평균 양력과 평균 항력을 나타내었다. Fig. 4 (a)에서 평균 양력은 날개의 종횡비가 클수록 큰 값을 나타내었다. 또한 평균 양력은 받음각이 50°까지는 증가하고, 그 이상의 받음각에서는 점차 감소하였다. Fig. 4 (b)에서 평균 항력은 날개의 종횡비가 클수록 큰 값을 나타내었고, 평균 양력과는 다르게 받음각이 증가할수록 그 값도 증가하였다.

측정된 공기역학적 힘은 큰 종횡비 날개에서 가장 크게 나타났다. 하지만 날개의 종횡비 변화에 의하여 날개의 평균 시위길이, 날개 면적, 그리고 날개 짓 진동수가 변하게 된다. 따라서 측정된 공기역학적 힘으로 날개 종횡비가 날개 짓 운동의 공기역학적 특성에 미치는 영향을 알아보는 것은 어려운 일이다.

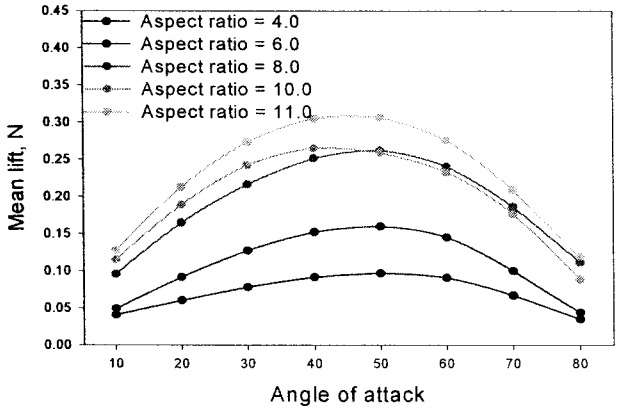
3.2 평균 공력 계수

날개의 종횡비 변화로 인하여 날개 면적과 날개 짓 진동수가 변하기 때문에 측정된 공기역학적 힘을 직접 비교할 수 없다. 따라서 식 (3)과 (4)를 이용하여 측정된 양력과 항력을 날개 끝 속도, 작동유체의 밀도(ρ) 그리고 날개의 면적(S)으로 나누어 시간에 대해 평균한 양력 계수($\overline{C_L}$)와 항력 계수($\overline{C_D}$)를 구하고, 이것을 이용하여 종횡비가 다른 날개의 공기역학적 특성을 비교하였다.

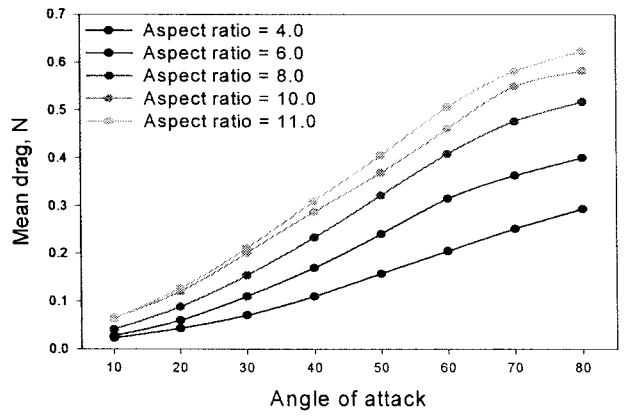
$$\overline{C_L} = \frac{2\overline{L}}{\rho \overline{U_t^2} S} = \frac{\overline{L}}{2\rho\phi^2 R'^2 n^2 S} \tag{3}$$

$$\overline{C_D} = \frac{2\overline{D}}{\rho \overline{U_t^2} S} = \frac{\overline{D}}{2\rho\phi^2 R'^2 n^2 S} \tag{4}$$

여기서 $\overline{L}$과 $\overline{D}$는 평균 양력과 평균 항력이다. Fig. 5 (a)는 종횡비가 다른 날개에서 발생된 받음각에 따른 평균 양력 계수, Fig. 5 (b)는 평균 항력 계수를 각각 나타내었다. 평균 양력 계수는 받음각 50°까지 증가하였고, 받음각 50°이상에서는 감소하였다. 또한 종횡비 8까지 평균 양력 계수는 증가하였고, 그 이상의 종횡비에서는 감소하였다. 평균 양력 계수는 종횡비 8의 날개가 받음각에 관계없이 가장 크게 나타났고, 그 최대값은 받음각 50°에서 약 0.65이다. 한편 평균 항력 계수는 40°이하의 낮은 받음각에서는 종횡비에 관계없이 받음각에 따라 증가하지만 그 값은 비슷하였고, 받음각 40°이상에서는 종횡비가 클수록 감소하였다.

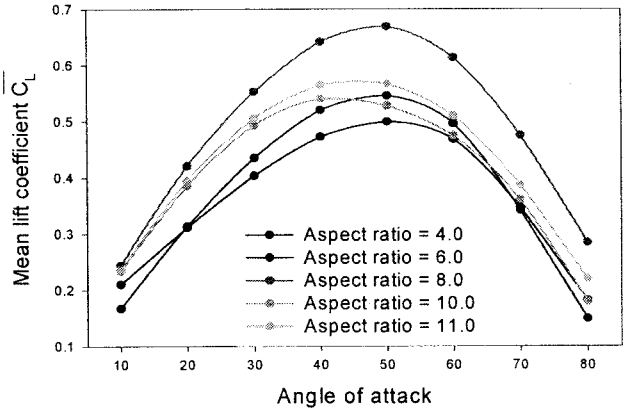


(a) Mean lift

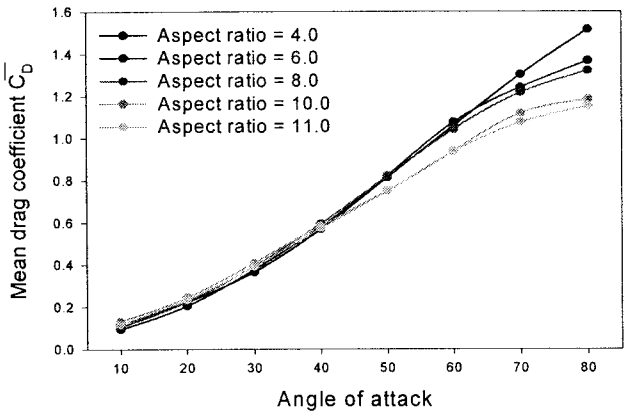


(b) Mean drag

Fig. 4 Mean lift and drag relative to aspect ratio and angle of attack. ($\overline{Re}$=15,000)

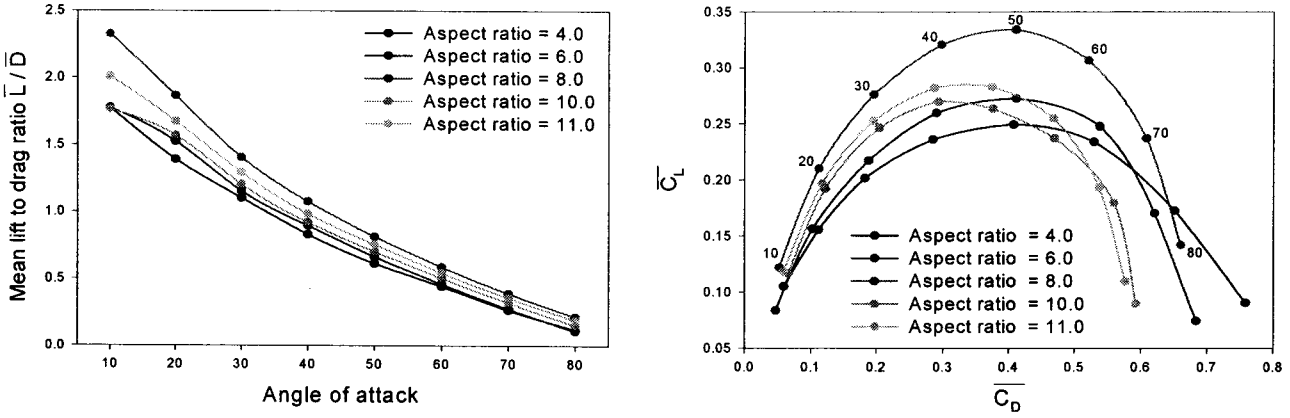


(a) Mean lift coefficient



(b) Mean drag coefficient

Fig. 5 Mean lift and drag coefficient relative to aspect ratio and angle of attack. ($\overline{Re}$=15,000)



(a) Mean lift to drag ratio

(b) Polar plots of lift coefficient vs. drag coefficient

Fig. 6 Mean lift to drag ratio relative to aspect ratio and angle of attack. ($\overline{Re}$=15,000)

평균 공력 계수가 측정된 평균 공력과 다른 경향을 보이는 것은 날개 면적과 날개 짓 진동수의 변화와 밀접한 관계가 있다. 날개의 종횡비가 증가할수록 날개의 면적은 감소하고, 날개 짓 진동수는 증가한다. 하지만 평균 공력 계수는 날개 짓 진동수(n)의 제곱과 날개 면적(S)에 반비례한다. 날개의 종횡비가 증가할수록 n^2S역시 증가한다. 따라서 평균 공력 계수는 측정된 공력과 다른 경향을 보이게 된다.

실제 새나 곤충이 비행하는 받음각을 고려한다면 평균 항력 계수는 종횡비 변화에 따라 거의 차이가 없다고 볼 수 있다. 따라서 평균 양력 계수의 차이가 날개의 종횡비 변화에 따른 공기역학적 특성을 결정한다고 할 수 있다.

3.3 양항비

날개 종횡비가 날개 짓 운동의 성능에 미치는 영향을 판단하기 위하여 평균 양력 계수를 평균 항력 계수로 나눈 평균 양항비를 구하였다. Fig. 6 (a)는 평균 양항비를 날개의 종횡비와 받음각에 따라 나타내었다. 평균 양항비는 받음각에 관계없이 종횡비 8인 날개에서 가장 크게 나타났다. 그 원인은 종횡비 8인 날개에서 나타난 평균 양력 계수가 다른 종횡비를 갖는 날개의 평균 양력 계수보다 받음각에 관계없이 크고, 평균 항력 계수는 종횡비에 관계없이 비슷한 값을 갖기 때문이다. 평균 항력 계수는 받음각 50°이상에서 종횡비가 증가할수록 조금씩 작아진다. 따라서 받음각 50°이하에서 평균 양항비는 평균 양력 계수에 의하여 결정된다. Fig. 6 (b)를 살펴보면 날개 종횡비에 관계없이 받음각이 20°이하일 때는 양력 계수가 항력 계수보다 크다. 종횡비가 8보다 큰 날개는 받음각 30°까지 양력 계수가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있고, 종횡비 8인 날개가 평균 양항비와 평균 양력 계수에서 살펴보았듯이 발생되는 항력에 비하여 가장 큰 양력을 발생시키는 것을 알 수 있다. 고정익 항공기와는 다르게 날개 짓 운동을 하는 날개는 종횡비가 클수록 양항비가 좋은 것이 아니라 적당한 종횡비를 갖는 것이 더 좋은 양항비를 발생시킬 수 있다.

4. 결 론

날개 종횡비 변화가 날개 짓 운동의 공기역학적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 종횡비 4에서 11까지 반 타원형 날개를 제작하였다. 제작한 8개의 날개를 이용하여 벌새의 정지비행을 모사한 날개 짓 운동을 구현하고 그때 발생되는 공기역학적 힘을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

일반적으로 고정익 항공기에서는 큰 종횡비 날개가 작은 종횡비 날개보다 좋은 양항비를 나타낸다. 하지만 날개 짓 운동에서는 큰 종횡비 날개가 가장 큰 양항비를 나타내지 않고, 종횡비 8의 날개에서 가장 큰 양항비를 나타내었다. 따라서 날개 짓 운동에 적합한 날개의 종횡비는 클수록 좋은 것이 아니다. 날개의 운동 방식에 따라 그 운동에 맞는 최적의 날개 종횡비가 결정될 것이다.

날개 종횡비가 증가할수록 평균 양력과 평균 항력은 증가하였다. 하지만 평균 양력 계수는 종횡비 8의 날개에서 가장 크게 나타났고, 평균 항력 계수는 종횡비에 관계없이 받음각 40°까지는 거의 비슷하였고, 받음각 50°부터 종횡비가 증가할수록 작아졌다. 평균 항력 계수는 날개의 종횡비 변화에 관계없이 거의 일정하기 때문에 실제 새나 곤충이 비행하는 받음각을 고려한다면 평균 양력 계수에 의하여 종횡비 변화에 따른 공기역학적 특성이 결정된다고 할 수 있다.

참고문헌

[1] Michelson, R. C. and Reecem S., 1998, "Ongoing Work to Develop a Flapping Wing, Crawling Entomopter", 13th Bristol International RPV Conference

[2] Ennos R., 1990, "Unconventional Aerodynamics", Nature, Vol. 344, pp. 491.

[3] Ellington, C. P., van den Berg, C., Willmott, A. P. and Thomas, A. L. R., 1996, "Leading-edge Vortices in Insect Flight", Nature, Vol. 384, pp. 626~630.

[4] Usherwood J. R. and Ellington, C. P., 2002, "The Aerodynamics of Revolving Wings. II. Propeller Force Coefficients from Mayfly to Quail", Journal of Experimental Biology, Vol 205, pp. 1565~1576.

[5] Dickinson, M. H., Lehmann, F. O. and Sane, S. P., 1999, "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight", Science, Vol. 284, pp. 1954~1960.

[6] 김윤주, 오현택, 정진택, 최항철, 김광호, 2005, "플래핑 운동의 공기역학적 특성에 관한 연구", 한국가시화정보학회지, 제3권, 제2호, pp. 63~70.