

論文

곤충 비행원리를 모사한 압전 작동기 구동형 날갯짓 기구의 평가

박훈철*, 모하메드 샤이푸딘**, 변도영*** 구남서*

Evaluation of an insect-mimicking flapping device
actuated by a piezoceramic actuator

Hoon Cheol Park*, Mohamad Syaifuddin**, Doyoung Byun*** and Nam Seo Goo****

ABSTRACT

This paper presents experimental evaluation of an insect-mimicking flapping-wing device actuated by a unimorph piezoceramic actuator. Length of each rod and hinge point in the linkage/amplification system are carefully chosen such that the resulting wing motion can mimic clapping of wings in a real insect at the end of upstroke. In addition to this, a pair of corrugated wings are fabricated mimicking zig-zag cross section of a real insect wing. Thanks to the two additional implementation, the improved flapping wing device can generate a larger lift force than the previous model even though area of the new wing is about 50% less than that of the previous wing. In this work, effects of the wing clapping, the wing corrugation, and the input wave form on the lift force generation have been also experimentally investigated. Finally, the vortex generated by the flapping device has been captured by a high speed camera, showing that vortices are produced during up- and down-strokes.

초 록

본 논문에서는 단일층 압전 작동기로 구동되는 곤충 모방 날갯짓 기구의 실험적 평가의 결과를 제시하였다. 변위 증폭기구의 연결막대 길이와 힌지 위치를 조절하여, 말벌류 곤충의 상향 날갯짓 끝에 발생하는 날개 겹침(clap)을 모방할 수 있도록 하였다. 또한, 실제 곤충 날개의 단면이 지그-재그형인 것을 모방한 날개를 제작하여 부착하였다. 이 두 가지 추가적인 고안으로 인하여 본 날갯짓 기구는 이전 날개에 비하여 면적이 절반 밖에 되지 않음에도 불구하고 더 큰 양력을 발생시킬 수 있었다. 본 연구에서는 날개의 겹침, 지그-재그형 단면, 인가전압 파형이 양력 발생에 미치는 영향을 조사하였다. 최종적으로는 디지털 고속카메라를 이용하여, 개선된 날갯짓 기구가 상향 날갯짓과 하향 날갯짓에서 와류를 발생함을 확인하였다.

Key Words : Flapping wing(날갯짓 날개), Insect flight(곤충 비행), Feathering mechanism(페더링 메커니즘), LIPCA(경량 압전 복합재 작동기), clap(겹침)

1. 서 론

† 2006년 5월 15일 접수 ~ 2006년 6월 15일 심사완료

* 정희원, 건국대학교 신기술융합학과
연락처자, E-mail: hcpark@konkuk.ac.kr
서울시 광진구 화양동 1번지

** 건국대학교 대학원 신기술융합학과

*** 정희원, 건국대학교 기계항공공학부

오랜 진화를 거쳐 오늘에 이른 자연 생명체에서 발견되는 원리를 모방하여 이를 공학적으로 활용하고자 하는 연구 경향은 이제 생체모방공학(biomimetics)라는 이름을 가지고 한 연구영역으로 자리 매김하고 있다[1]. 특정 자연 생물체의

공학적 모사를 위해서는 그 자연 생명체의 원리에 대한 충분한 이해와 이를 공학적으로 구현하기 위한 창의적인 아이디어를 필요로 한다. 이러한 자연모사 연구 중에서, 곤충의 날갯짓을 모방하려는 시도에서도 연구 성과가 보고되고 있다.

Fearing 등은 철판에 압전 세라믹 박막을 입힌 단순한 형태의 단일층 압전 세라믹 작동기와 연결막대 구조를 적용하여 날개를 구동함으로써, 7Hz의 날갯짓에서 약 60°의 날갯짓 각이 발생함을 보고하였다[2]. 하지만, 개발된 날갯짓 기구로부터 발생된 양력을 정량적으로 보고한 논문은 매우 드물다. Syaifuddin 등[3]은 단일층 복합재 압전 작동기[4]를 이용하여, 날갯짓 기구를 개발하고, 날개의 형상, 무게, 가로세로비가 양력 발생에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 이들의 최근의 연구에서는, 압전 작동기의 제한된 변위를 증폭할 수 있는 기구를 적용한 날갯짓 기구에 곤충의 날개 회전[5]을 수동적으로 구현할 수 있는 방법을 도입하여, 약 58cm²의 면적을 갖는 두 개의 날개로부터 약 2.5 그람 중의 양력을 얻을 수 있었다[6].

본 연구에서는 이전의 날갯짓 기구[6]의 주요 구성품인 변위 증폭장치의 연결막대 길이와 힌지 위치를 조절하여 말벌의 날개 접침(wing clap) [7,8]을 모방할 수 있도록 하고, 곤충 날개의 지그-재그 단면 형상을 모방한 날개를 부착하였다. 이로써, 이전의 날개 면적의 절반 정도 면적을 갖는 날개라도 더 향상된 양력을 발생시킬 수 있었다. 또한, 인가전압 파형에 따른 양력 변화를 조사하였고, 최종적으로는 디지털 고속도 카메라를 이용하여, 본 날갯짓 기구가 상향 및 하향 날갯짓에서 와류를 발생함도 확인하였다.

본 연구에서 측정된 양력에는 날개가 발생하는 공기력과 관성력이 합해져 있으나, 이는 날갯짓 기구가 발생한 실제 힘이므로, 측정된 수직력을 여기서는 양력이라 칭하기로 한다.

II. 개선된 날갯짓 기구의 개요

본 연구에서 사용한 날갯짓 기구는 이전의 연구에서 사용한 날갯짓 기구와 기본적으로 동일하다. 즉, 날갯짓 기구는 압전 작동기 (LIPCA, Lightweight Piezo-Composite Actuator), 변위 증폭장치, 날개, 프레임(frame) 등 4개의 요소로 구성된다. 프레임은 이전 연구와는 달리 원통형 물체를 사용하지 않았는데, 이는 단면적을 줄이기 위함이다. 중복을 피하기 위하여, 각 구성 요소의 자세한 설명은 피하였으므로, 이에 대한 설명은

참고문헌[6]을 참고하기 바란다.

본 연구에서 개선된 날갯짓 기구는 곤충의 날개 운동 및 날개 구조를 모사하도록 설계, 제작되었는데, 다음의 세 가지 요소를 공학적으로 구현하도록 하였다: (1)곤충 날개의 회전, (2)곤충 날개의 접침(clap), (3)지그-재그 단면을 갖는 곤충 날개. 각각은 다음 절에서 자세히 설명하기로 한다.

Fig. 1은 제작한 개선된 날갯짓 기구를 보여주고 있다. 모든 구성 요소는 이전의 연구에서와 마찬가지로 수작업으로 제작되었으며, 시아노아크릴(cyanoacrylate) 접착제를 사용하여 각각의 구성요소를 접합하였다.

이전 연구에서는 탄소봉으로 연결막대를 제작하였으나, 이번 연구에서는 무게를 줄이기 위하여 연결막대를 단면이 가로 1mm, 세로 2mm인 발사 나무로 제작하였다. 또한 이전의 원통형 프레임 대신, Fig. 2와 같은 탄소섬유 강화 복합재료로 제작된 프레임과 전방의 직경 2mm의 탄소막대 2개로 지지대 구조를 제작하여, Fig. 1과 같이 작동기 설치대와 연결하였다.

Table 1은 이전의 연구에서 제작한 날갯짓 기구와 본 연구에서 제작한 날갯짓 기구의 제원과 무게를 비교한 도표이다. 새로 제작된 날갯짓 기

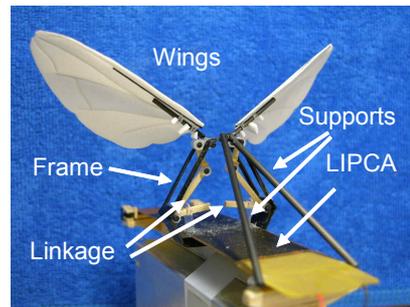


Fig. 1. Final assembly of the improved flapping wing system

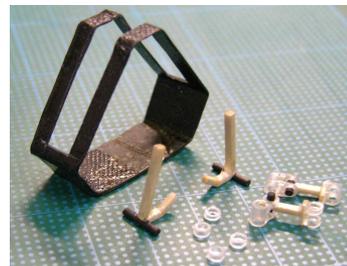


Fig. 2. Frame made of carbon/epoxy and hinge structures

구의 총 무게는 이전에 비해서 약 46% 감소되었고, 날개 면적과 무게는 각각 52%, 70% 감소하였음을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of the flapping devices

	항목	이전[6]	현재
제원	길이(cm)	11.5	12.2
	폭(cm)	12	12.5
	높이(cm)	9.5	8.5
	날개 면적 (cm ²)	57.5	27.5
무게(g)	LIPCA	6.1	6.1
	날개	1	0.3
	지지대 등 모든 구조물	12	3.88
	무게 합	19.1	10.28

III. 곤충 비행 모사 설계

3.1 날개의 회전

곤충의 날개는 상향 및 하향 날갯짓을 하는 동안 축 시맥 (radial vein)을 중심으로 능동적 회전한다[5]. 이전의 연구에서와 마찬가지로, 날개와 변위 증폭장치를 연결하는 부위에 페더링 힌지(feathering hinge)를 설치하였다. 이 장치는 날개의 회전을 곤충과 같이 능동적으로 구현하는 것이 아니라, 수동적으로 발생하도록 한다. 즉, Fig. 3에서와 같이, 날개의 페더링 축과 공력중심이 일치하지 않으면 날개는 날갯짓을 하는 동안 공기역학적 하중에 의해 회전을 하게 된다. 페더링 각은 페더링 축에 부착된 멈춤 장치에 의해 조절할 수 있다. 자세한 설명은 이전의 논문[6]을 참고하기 바란다.

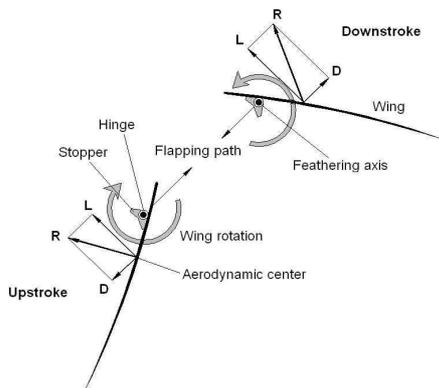


Fig. 3. Principle of the passive wing rotation

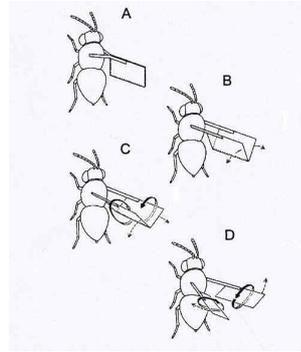


Fig. 4. Clap and fling of an insect wing

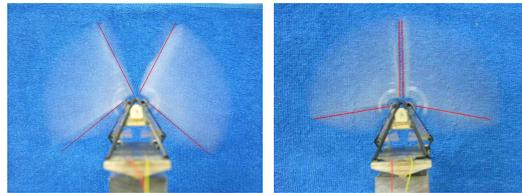


Fig. 5. Flapping angles of the flapping device

3.2 날개의 겹침

Fig. 4와 같이 말벌 종류의 곤충은 상향 날갯짓 끝에 날개 두개를 겹치고(A: clap), 하향 날갯짓 개시 직전에 붙은 날개를 펼친다(B-C-D: fling) [7,8]. 이 동작은 날개의 하향 날갯짓 때에 강한 공기외류를 생성하는데 기여한다. 이를 공학적으로 구현하기 위하여, 상향 날갯짓 끝에 두 날개가 가급적 맞닿도록 변위 증폭장치의 각 연결 막대와 힌지 위치를 조절하였다.

Fig. 5는 날개가 겹치지 않는 경우와 겹치는 경우의 구동하는 동영상을 정지하여 잡은 그림으로서, 두 날개의 상향 날갯짓 끝에서의 두 날개 사이 각도를 확인할 수 있다. 왼편은 날개가 겹쳐지지 않는 경우로서, 날갯짓 각도가 100도 정도가 됨을 알 수 있고, 오른편 그림은 날개가 겹쳐지는 경우로서, 날갯짓 각도는 여전히 약 100도 정도이면서 상향 날갯짓 끝에 두 날개가 거의 겹침을 알 수 있다.

3.3 곤충 모방 날개

곤충의 날개는 얇은 막(membrane)과 시맥(vein)으로 구성되어 있다. Fig. 6은 전형적인 Hoverfly의 날개 단면 형상을 부위 별로 도시한 그림이다[9]. Fig. 6의 위 그림은 날개를 평면적으로 도시한 그림으로서 날개 내부의 선은 시맥을 의미한다. 날개 단면을 도시한 Fig. 6의 아래

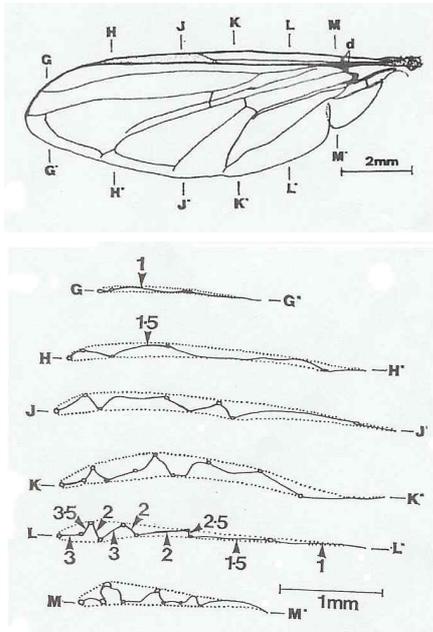


Fig. 6. Cross section of an insect wing

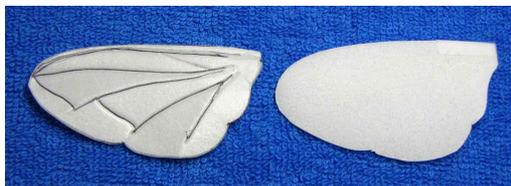


Fig. 7. Zig-zag (L) and smooth wings (R)

그림에서는 직선은 날개의 막을 의미한다. 이와 같이 날개 단면은 시맥에 의하여 지그-재그 형상을 띠는데, 이는 날개의 날갯짓 강성을 증가시키고, 곤충이 저 레이놀즈 수 비정상 유동장 속에서 비행하는데 유리하게 한다[10].

지그-재그 단면을 가진 곤충 날개를 공학적으로 간단하게 구현하기 위하여, 우선 이전의 연구에서와 마찬가지로 폴리에틸렌 판을 갈아서 0.5mm의 날개를 만들었다. 날개는 파리의 일종인 *Calliphora Erythrocephala*의 날개 모양을 따라 제작하였다.

폴리에틸렌으로 제작된 날개 표면에 시맥 형태의 본을 그려 넣은 후, 송곳으로 시맥 선을 눌러 영구 변형을 일으켰다. 그 다음 이 폴리에틸렌 날개를 뒤집고 다음 시맥 선을 같은 방법으로 눌러 영구 변형을 일으켰다. 즉, 매끈한 폴리에틸렌 날개를 번갈아 뒤집으면서 표시된 시맥 위치를 송곳으로 눌러 영구 변형을 일으키고, 최종적으로

드라이어로 뜨거운 공기를 가하여 Fig. 7의 왼편과 같이 지그-재그 단면 형상을 가진 날개를 제작하였다.

IV. 날갯짓 실험

4.1 실험 장치

날갯짓 실험을 위한 모든 장치는 이전 연구에서 사용한 것과 동일하며, 각 장치의 연결도가 Fig. 8에 제시되어 있다. 실험에 사용된 로드 셀은 작은 크기의 양력을 측정하기 위하여, 탄소 복합재 막대를 양쪽 단순지지 조건으로 설치하고, 중앙에 스트레인 게이지를 부착하여 굽힘 형으로 만들어 사용하였다. 이 로드 셀의 고유진동수는 약 66Hz로 본 실험에서 적용한 가진 주파수보다 상당히 높으므로, 동적인 간섭은 없는 것으로 판단된다.

로드 셀에 부착된 스트레인 게이지는 1/4 브리지(quarter bridge)로 연결하였고, 날갯짓 장치의 양력에 의해 발생하는 변형률은 변형률 지시기(Vishay Measurement Group 3800)를 사용하여 측정하였다. 변형률 지시기로부터 나오는 출력 전압은 오실로스코프(Agilent 54622A)를 이용하여 실시간으로 표시 및 기록을 하였다. 전원 공급기로는 함수 발생기를 내재한 TD-2 (Face International, USA)를 이용하여 300V_{pp}의 인가 전압을 LIPCA 작동기에 가하였다.

이전 연구에서와 같이, 날갯짓 기구와 로드 셀(load cell)은 연결 막대를 이용하여 연결하였는데, 연결 막대와 로드 셀 사이에 베어링을 부착하여, 로드 셀에 날갯짓 기구에서 발생하는 피칭 모멘트가 전달되지 않도록 하였고, 무게중심과 공력중심이 완전히 일치하지 않아도 수직 하중 성분을 측정할 수 있게 하였다. 날갯짓 기구의 부착점은 날갯짓 기구의 무게중심에 가깝게 두었다.

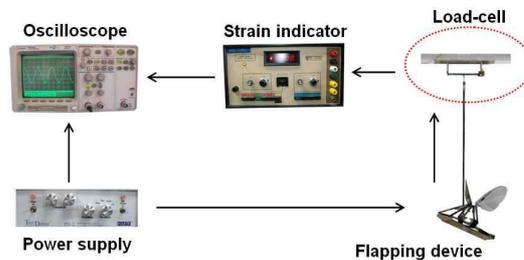


Fig. 8. Schematic of flapping test

4.2 실험 조건

본 연구에서는 날개의 지그-재그 단면, 날개 꺾임과 펼침, 인가 파형이 양력 발생에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. Table 2는 결과 분석을 위한 측정 실험 조합을 정리한 도표이다.

Table 2. Test sets for parametric study

No.	Wing Cross Section	Clap-Fling	Wave Form
1	smooth	no	sinusoidal
2	smooth	no	square
3	smooth	yes	sinusoidal
4	smooth	yes	square
5	zig-zag	no	sinusoidal
6	zig-zag	no	square
7	zig-zag	yes	sinusoidal
8	zig-zag	yes	square

V. 결과 및 분석

5.1 양력 측정

Table 2에서 6번 경우에서와 같이, 지그-재그 단면을 가진 날개가 완벽한 꺾임을 하지 않는 경우, 사각 파형의 주파수를 변화시키며 300V_{pp}의 전압을 작동기에 인가하였다. Fig. 9는 이 경우 얻은 주파수-양력 곡선으로서, 여러 번 반복한 실험에서 약 10Hz에서 최대의 양력이 발생함을 확인하였다. 다른 경우에도 최대 양력이 10Hz 부근에서 발생하였으므로, 모든 경우에 10Hz로 전압을 인가하면서 날갯짓 기구가 발생하는 평균 양력을 측정하여 비교하였다.

Fig. 10과 11은 각각 정현파와 사각파형으로 300V_{pp}을 인가하였을 때 얻은 시간-양력 곡선으로 Table 2의 8가지 경우에 대해 얻은 곡선을 모두 도시하였다.

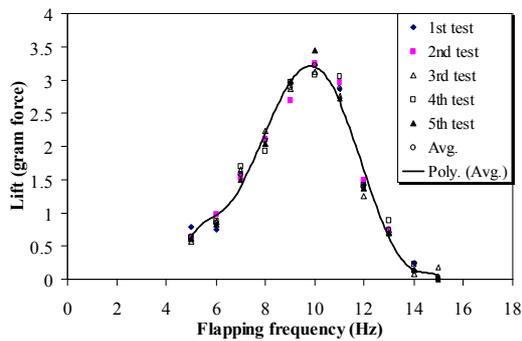
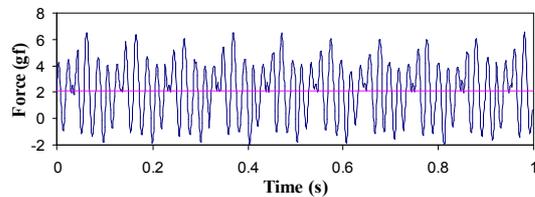


Fig. 9. Lift vs. flapping frequency

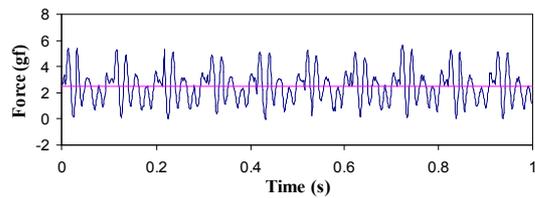
각 곡선에서, 최대 양력값은 하향 날갯짓에서 발생하였고, 상향 날갯짓에서도 대체로 양의 공기력이 발생함을 알 수 있으므로, 날개의 회전이 수동적이거나 작동함을 의미한다. 또한 주기적으로 대체로 일정한 형태의 파형이 측정되었으므로, 본 날갯짓 기구가 상당히 안정되게 양력을 발생하고 있음을 알 수 있다. 각 곡선에서의 국소 진동파형은 양쪽 날개의 날갯짓이 완전 대체되지 않아서 발생한 신호로 판단된다.

5.2 날개의 지그-재그 단면의 영향

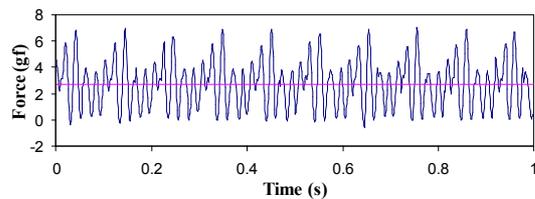
정현파형으로 300V_{pp}의 전압을 인가하고, 날개 꺾임 효과가 없는 경우인 Fig. 10의 (a)와 (c), 또는 사각파형으로 전압을 인가하고, 날개 꺾임 효과가 없는 경우인 Fig. 11의 (a)와 (c)를 비교하면, 지그-재그 날개 단면이 양력을 증가시키는데 기여함을 알 수 있다. 다만, 각 그림에서 날개 꺾임-펼침이 있는 경우인 (b)와 (d)의 비교에서는



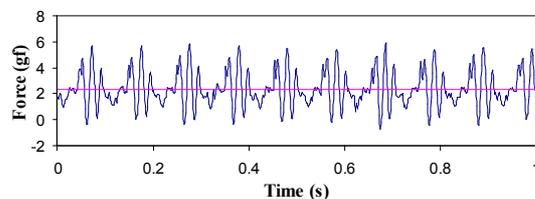
(a) Smooth wing, without clap



(b) Smooth wing, with clap



(c) Zig-zag wing, without clap



(d) Zig-zag wing, with clap

Fig. 10. Lift under sinusoidal wave input

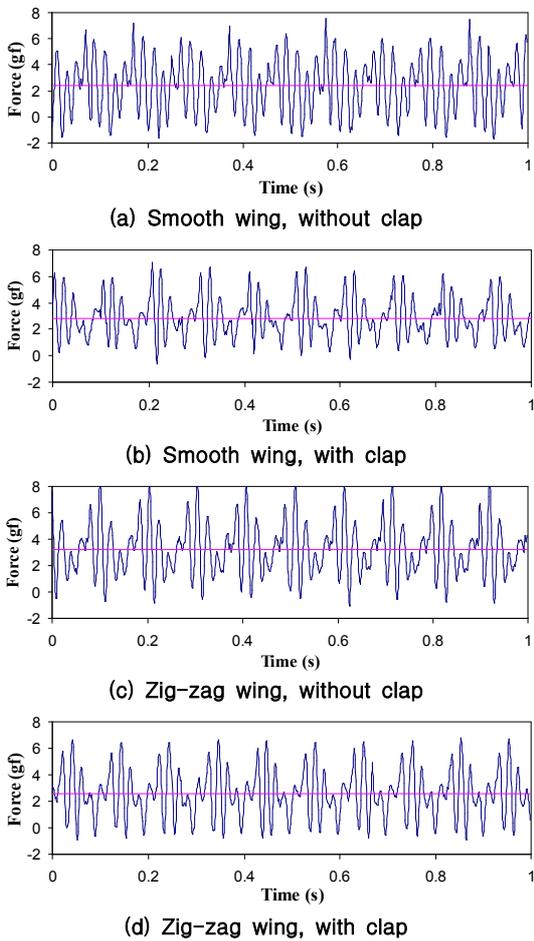


Fig. 11. Lift under square wave input

날개 단면의 영향을 파악하기 어려운데, 이는 매끈한 유연 날개에 지그-재그 형상을 구현하는 과정에서 날개의 강성이 증가되어 완벽한 날개 꺾임이 구현되지 못하였기 때문으로 판단된다.

5.3 날개 꺾임의 영향

날개 꺾임의 영향은 매끈한 단면의 날개에서만 확인할 수 있다. Fig. 10과 11에서 각각 (a)와 (b)를 비교하면, 날개의 꺾임이 양력 향상에 기여함을 알 수 있다.

5.4 인가 전압 파형의 영향

Fig. 10과 11에서 서로 (a), (b), (c), (d)를 비교하면, 모든 경우에서 작동기에 사각파형으로 전압을 인가할 때에 양력이 향상됨을 알 수 있다. 이는 동일한 $300V_{pp}$ 를 정현파형으로 전압을 인가하는 경우보다, 사각파형으로 전압을 인가하는 경우가 한 주기 당 인가 전기에너지가 더 큰 영

향도 있지만, 상향 날갯짓에서 하향 날갯짓으로 또는 하향 날갯짓에서 상향 날갯짓으로 전환하는 순간 날개가 빠르게 가속되어, 더 강한 와류를 생성하기 때문인 것으로 판단된다. 뒤에서 설명하는 각 경우의 공기흐름 가시화에서도 이를 확인할 수 있다.

5.5 평균 양력

Table 3은 앞서 얻은 각 시간-양력 곡선으로부터 얻은 평균 양력을 정리한 도표이다. 여기서, 각 인자가 양력 발생에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있다. 앞서 설명한 대로, 지그-재그 단면을 갖는 날개의 경우에는 날개에 지그-재그 단면을 만드는 과정에서 날개의 유연성이 손실됨으로써 완벽한 꺾임을 구현하지 못하여, 날개 꺾임이 양력을 향상하는 것을 확인하지 못하였다.

Table 3. Measured average lift (g)

Wing	Input wave form	
	Sinusoidal	Square
Smooth, without clap	2.2	2.3
Smooth, with clap	2.5	2.8
Zig-zag, without clap	2.7	3.3
Zig-zag, with clap	2.3	2.5

5.6 공기 흐름 가시화

본 연구에서 개발된 날갯짓 장치를 건국대학교 아음속 풍동의 시험부($1.0m \times 1.0m \times 3.5m$)에 설치하고, 약 $5m/sec$ 의 바람을 불면서 구동하는 날갯짓 장치 주변에서 발생하는 공기흐름을 가시화 하였다. 작동기에는 정현파형 또는 사각파형으로 $300V_{pp}$ 의 전압을 인가하고, 날갯짓을 하는 모습을 디지털 고속 카메라(Photron APX)를 이용하여 $2000 fps$ (frame/second)로 촬영하였다.

Fig. 12에는 지그-재그 단면 날개가 완전히 꺾이지 않으며 날갯짓하는 날개를 고속 카메라로 잡은 사진으로서, 하향 날갯짓이 시작할 때부터 상향 날갯짓이 끝나는 시점까지의 한 주기 동안 잡힌 사진 중 일부를 도시하였다.

Fig. 12(a)~(b)로부터, 전방에서 불어오는 바람으로 인하여 날개 앞전에서 발생한 와류가 상향 날갯짓 끝에 두 날개 사이로 밀려나오면서 하나의 와류가 형성되고, 하향 날갯짓이 시작되는 단계인 Fig. 12(c)에서 발생하기 시작한 앞전 와류가 성장하여 Fig. 12(d)에 이른다. 뒷전 와류는 Fig. 12(e)에서와 같이 미약하게 발생한다. 동영상

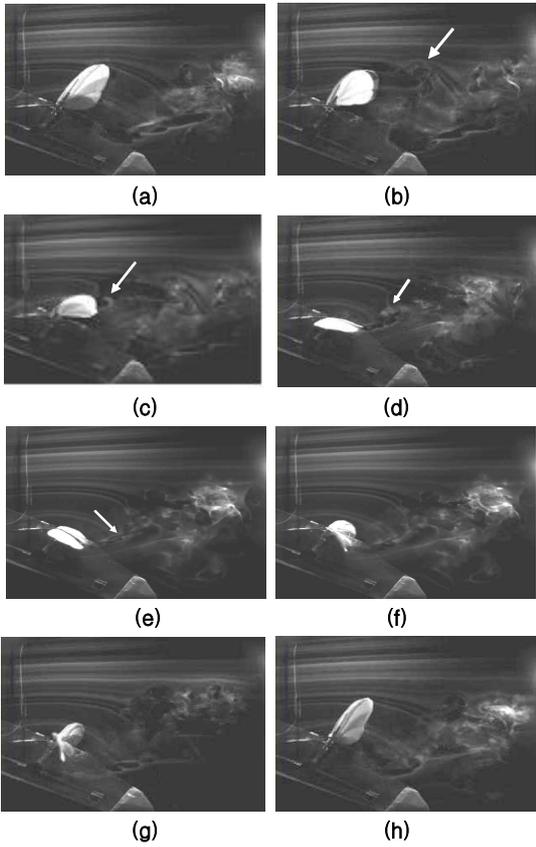


Fig. 12. Flow visualization for smooth wing, sinusoidal wave input, and no clap-fling

에서는 이 과정을 선명히 확인할 수 있으나[11], 일반 사진으로는 확인하기가 쉽지 않아, 와류의 위치를 화살표로 표시하였다.

Fig. 13은 동일한 날개에 작동기 300V_{pp}의 전압을 사각파형으로 인가하고 날갯짓 기구를 구동하여, 하향 날갯짓이 시작할 때부터 상향 날갯짓이 끝나는 시점까지의 한 주기를 촬영한 영상 중 일부이다.

Fig. 13(a)~(b)는 Fig. 12(a)~(b)에서와 마찬가지로, 전방에서 불어오는 바람으로 인하여 날개 앞전에서 발생한 와류가 상향 날갯짓 끝에 두 날개 사이로 밀려나오면서 하나의 와류가 형성되는 것을 포착한 그림이다. Fig. 13(c)에서는 작동기에 전압을 사각파형을 인가함으로써, 전압을 정현파로 인가한 경우보다 상대적으로 빠른 하향 날갯짓이 시작되면서, 상대적으로 강한 와류가 날개 앞전에서 형성되고, 이후 Fig. 13(d)~(e)를 거치면서 와류가 떨어져 나감을 알 수 있다. Fig. 13(e)에서는 끝단 와류 발생함을 확인할 수 있다.

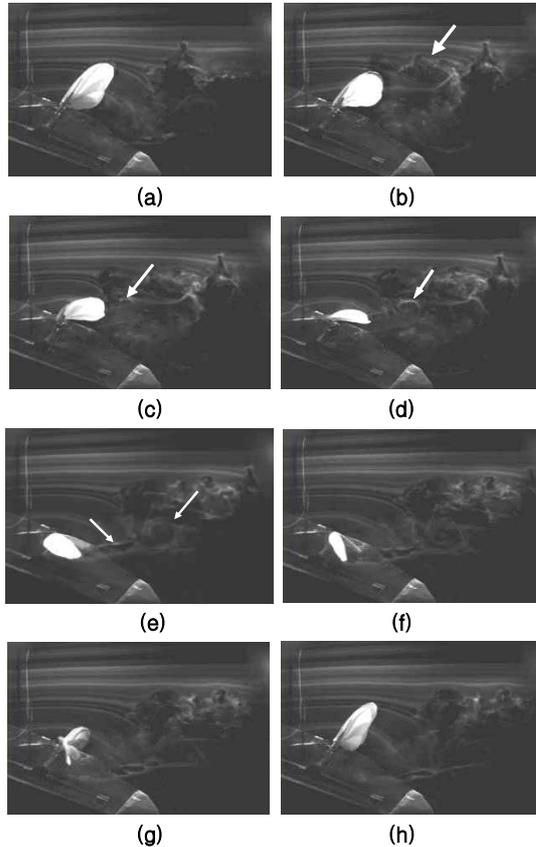


Fig. 13. Flow visualization for smooth wing, square wave input, and no clap-fling

Fig. 12와 13을 비교하면, 작동기에 전압을 사각파형으로 인가한 경우에 발생한 와류가 상대적으로 선명함을 알 수 있다. 따라서, 동일 조건에서 작동기에 전압을 사각파형으로 인가하여 날갯짓 기구를 구동하면, 발생하는 와류의 강도가 상대적으로 더 강하고, 이로 인하여 발생 양력도 증가한 것으로 판단된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 이전에 연구한 단일층 압전 작동기인 LIPCA로 구동하는 날갯짓 기구가 날개의 점침 운동을 할 수 있도록 하였고, 지그-제그형 단면 날개를 부착하여, 곤충의 비행 원리를 모사할 수 있도록 하였다. 또한 전압을 정현파형과 사각파형으로 인가하여 인가전압의 파형이 양력 발생에 미치는 영향도 조사하였다.

본 날갯짓 기구를 구동하면서 측정된 양력으로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 매끈한 날개를 부착한 경우, 날개의 겹침이 14%(정현파형 경우)~21%(사각파형 경우) 정도 양력을 증가시킨다.

(2) 강성이 높은 지그-재그 형 날개로는 날개의 겹침 효과로 양력 증가 효과를 보지 못한다.

(3) 날개의 겹침이 없는 경우의 실험에서는 인가전압의 형태와 관계없이, 지그-재그 단면 날개를 부착한 경우가 매끈한 날개를 부착한 경우보다 양력을 23%(정현파형 경우)~43% (사각파형 경우) 정도 많이 발생하였다.

(4) 모든 경우, 작동기에 전압 $300V_{pp}$ 를 사각파형으로 인가한 경우가 정현파형으로 인가한 경우에 비하여 증가된 양력을 발생하였으며, 증가량은 5%~22% 정도이다.

(5) 날개의 겹침 및 지그-재그 단면 날개와 같은 곤충의 비행 원리를 도입함으로써, 날개 면적을 50% 정도 줄이면서도, 다소 큰 양력을 발생시킬 수 있음을 확인하였다.

다만, 본 연구의 개선된 날갯짓 기구로도 비행에 충분한 양력을 발생하지는 못하였으나, 곤충의 날개 구조 및 운동을 공학적으로 구현할 수 있는 고안들을 제시하였고, 이를 실제로 구현하여 발생 양력이 향상됨을 확인하였다는 점에서 그 의미가 크다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 중점연구소지원사업(KRF-2004-005-D00045)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1) 김완두, "테마기획: 생체모방공학", 기계저널, 제 46권 제 4호, 2006, pp. 33-84.

2) Fearing, R. S., Avadhanula, S., Campolo, D., Sitti, M., Yan, J., and Wood, R., "A Micro-mechanical Flying Insect Thorax", *Neurotechnology for Biomimetic Robots*, The MIT Press, Cambridge, 2002.

3) Syaifuddin, M., Park, H. C., Yoon, K. J., and Goo, N. S., "Design and Test of Flapping Device mimicking Insect Flight", *Journal of Key Engineering Materials*. (in print).

4) 김균열, 박기훈, 윤광준, 박훈철, "압전 복합재료 작동기 LIPCA에 대한 성능 비교실험 및 분석", *한국복합재료학회지*, 제 16권 제 2호, 2003, pp. 41-47.

5) Dickinson, M. H., Lehmann, F. O., and Sane, S. P., "Wing Rotation and the Aerodynamics Basis of Insect Flight", *Science*, Vol. 284, 1999, pp. 1954-1960.

6) 이승식, 모 사이푸딘, 박훈철, 윤광준, LIPCA 작동기로 구동되는 날갯짓 기구의 설계 및 성능평가, *한국항공우주학회지*, 제 23권 12호, 2005, pp. 48-53.

7) 박훈철, 이순기, "새/곤충 모방 비행 로봇의 연구를 위한 새/곤충 날개의 작동원리", *한국항공우주학회지*, 제 23권 제6호, 2005, pp. 100-107.

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

9) Rees, C.J., "Form and function of corrugated insect wing", *Nature*, Vol 256, 1975, pp. 200-203

10) Alexander, D. E., *Nature's Flyers*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2002.

11) 박훈철, 모 사이푸딘, 윤광준, 구남서, 압전 작동기로 구동하는 곤충 날갯짓 모방 기구, *한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집*, 2005, pp. 557-560.