

# 압전작동기 LIPCA로 구동하는 곤충 모방 날갯짓 기구

## Insect-mimicking Flapping Device Actuated by a Piezoceramic Actuator LIPCA

박훈철† · 모 사이푸딘\* · 윤광준\*\* · 구남서\*\*

Hoon Cheol Park, Moh Syaifuddin, Kwang Joon Yoon and Nam Seo Goo

Key Words : Flapping(날갯짓), Piezoceramic Actuator(압전작동기), 양력(Lift), 추력(Thrust), 곤충 모방(Insect-mimicking)

### ABSTRACT

In this paper, we present our recent progress in the LIPCA (Lightweight Piezo-Composite Actuator) application for actuation of a flapping wing device. The flapping device uses linkage system that can amplify the actuation displacement of LIPCA. The feathering mechanism is also designed and implemented such that the wing can rotate during flapping. The natural flapping-frequency of the device was about 9 Hz, where the maximum flapping angle was achieved. The flapping test under 5 Hz to 15 Hz flapping frequency was performed to investigate the flapping performance by measuring the produced lift and thrust. Maximum lift and thrust were produced when the flapping device was actuated at about the natural flapping-frequency.

### 1. 서 론

날갯짓을 통하여 비행을 하는 곤충이나 새의 경우 낮은 레이놀즈 수의 영역에서도 큰 양력과 뛰어난 기동성을 발휘할 수 있다. 곤충의 이런 특이한 비행을 할 수 있게 하는 원리를 밝혀내기 위해서 많은 연구가 진행되고 있다<sup>(1)(2)</sup>. 기존의 자연관찰을 바탕으로 한 연구 성과들은 곤충이나 새의 비행원리를 공학적으로 구현하는데 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있으며, 곤충이나 새의 비행원리를 적용하여 우수한 성능을 갖는 날갯짓 형태의 소형 또는 초소형 비행체를 개발하기 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있다<sup>(3)</sup>.

날갯짓 비행체를 개발하기 위해서는 몇 가지 중요한 문제점을 해결해야 한다. 첫째, 상향 날갯짓(upstroke)과 하향 날갯짓(downstroke)을 하는 동안 자연의 비행체와 같이 큰 날갯짓 각을 갖는 동시에 회전운동을 할 수 있는 날갯짓 기구를 개발해야 한다<sup>(2)</sup>. 둘째, 모터나 공압식(pneumatic)의 작동기들은 큰 무게와 장치의 복잡성 때문에 소형 또는 초소형 크기의 날갯짓 비행체의 구동장치로는 부적절하므로 새로운 형태의 작동기를 개발해야 한다.

본 연구에서는 이전 연구<sup>(4)</sup>에서 개발한 날갯짓 기구의 전체 무게를 줄이기 위하여, 새로운 날갯짓 기구를 설계, 제작하였다. 이전 연구와 같이 본 연구에서도 경량 압전작동기인 LIPCA(Lightweight Piezoceramic Composite Actuator)<sup>(5)</sup>를 단순지지조건으로 고정하여, 외팔지지 때보다 큰 고유 날갯짓 주파수를 얻을 수 있었으며, clap-fling이 가능하도록 설계된 네 개의 연결 막대(linkage) 구조를 새로이 설치하여 LIPCA의 제한된 작동범위를 증폭시켰다. 또한 이렇게 설계 및 제작된 날갯짓 기구에서 발생하는 양력과 추력을 실험을 통해 측정하였다.

### 2. 날갯짓 기구의 설계

#### 2.1 전체 구조

본 연구에서 설계한 날갯짓 기구는 LIPCA 작동기, 연결 시스템, 날개, 지지대 등 총 4개의 요소로 구성된다. 각 구성 요소는 수작업으로 제작되었으며, 시아노아크릴(cyanoacrylate) 접착제를 사용하여 각각의 구성요소를 접합하였다. 이전의 연구<sup>(4)</sup>에서와는 달리, 동체를 사용하지 않고, Fig. 1의 우측과 같이 직경 2mm의 탄소봉과 탄소 복합재 프레임 을 이용하여 지지구조를 형성하였다. LIPCA 작동기는 프레임에 발사(balsa) 지지대를 이용하여 고정하였으며 단순지지 경계조건을 적용하였다.

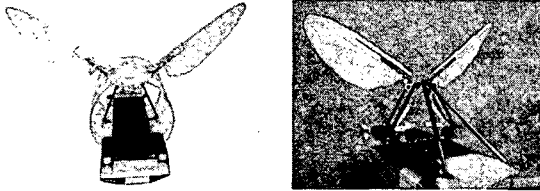
본 날갯짓 기구의 총 중량은 10.28g이며, 날개의 경우 무게는 0.3g, 최대 길이는 5.6cm, 최대 폭은 2.9cm, 면적은

† 책임저자, 서울시 광진구 화양동 1번지  
건국대학교 기계항공공학부  
E-mail : hcpark@konkuk.ac.kr  
Tel: (02) 450-3531, Fax: (02) 444-6570

\* 건국대학교 신기술융합과

\*\* 건국대학교 기계항공공학부

27.54cm<sup>2</sup>이다. 제작된 기구는 약 10Hz의 고유 날갯짓 주파수에서 약 90°-100°의 날갯짓 각을 발생시켰으며 페더링 메커니즘(feathering mechanism)의 적용으로 날갯짓을 하는 동안 날개에 약 80°의 회전각이 발생되었다.



(a) Previous model [4] (b) Current model  
Fig. 1. Fully assembled flapping devices

## 2.2 작동기

본 연구에서 사용된 LIPCA 작동기<sup>(5)</sup>는 유니모프 형태의 압전세라믹 작동기로 Fig. 2와 같이 압전세라믹, 유리섬유/에폭시, 그리고 탄소섬유/에폭시 층으로 구성된다. 제작된 LIPCA에 인가전압을 가하게 되면 굽힘 변형을 통해 작동기 중앙에서 작동변위를 발생된다. LIPCA 작동기에 가하는 최대 인가전압은 대략 300V<sub>pp</sub>(Volt peak-to-peak)이며, 작동기의 고유진동수에 해당하는 가진 주파수에서 최대 작동변위를 발생시킨다. LIPCA 작동기의 고유진동수는 작동기의 경계조건과 작동기에 부착하는 추가 질량에 따라 변하는데 최대 변위는 외팔보 경계조건에서 발생한다. 하지만 외팔보 경계조건에서는 날개 구조가 작동기에 부착되었을 때 작동기의 고유 주파수와 작동력이 현저히 감소하는 문제점이 있기 때문에 본 연구에서는 단순지지 경계조건을 이용하였고, 이를 통해 작동기의 고유주파수와 작동력을 증가시킬 수 있었다.

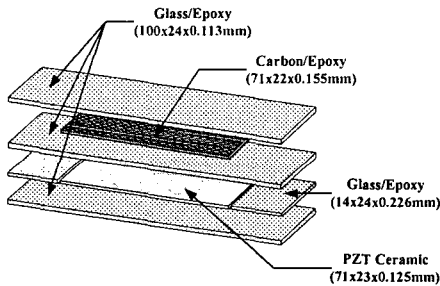


Fig. 2. Lay-up and dimension of LIPCA

## 2.3 연결기구 및 날개

LIPCA의 작동력을 날개 구조에 전달하기 위해 4개의 막대를 이용한 연결 시스템을 이용하였다. 연결 시스템은 작동력의 전달 뿐 아니라 LIPCA에서 발생하는 제한된 작동변위를 증폭시켜 큰 날갯짓 각을 발생시키는 기능을 한다.

변위 증폭을 위한 연결막대는 무게가 가벼운 폭 1mm의 나무 막대를 사용하였다. 각 연결막대는 Fig. 3에서와 같이 원통형의 작은 플라스틱 관을 이용하여 2개의 고정힌지와 2개의 이동힌지 형태로 연결하였고, LIPCA 작동기와 연결막대 사이에 연결부를 두어 작동기의 중앙에서 발생하는 밀고 당기는 작동력과 작동변위가 날개로 전달될 수 있도록 하였다. 또한, 연결막대의 길이를 조정함으로써, clap-fling(두 날개가 상향 날갯짓 끝에서 마주치는 현상)을 일으키게 할 수 있다.

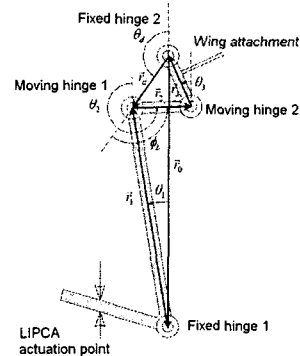


Fig. 3. Linkage system

날개는 얇은 폴리스티렌(polystyrene) 판으로 제작하였고, Calliphora의 날개형상을 모방하였다. 제작된 날개는 Fig. 4와 같이 두 가지 형태를 갖는데, 좌측은 실제 곤충의 단면이 지그-재그 형태인 것을 감안하여<sup>(6)</sup> 이를 모방한 날개이고, 우측은 단순 평판 형태의 날개이다. 두께는 날개의 고정 부분에서 1mm로 시작하여 날개의 끝 부분에서는 0.5mm로 감소한다. 본 날개는 제작이 쉽고 무게가 가벼우면서도 충분한 굽힘 강성을 가진다.

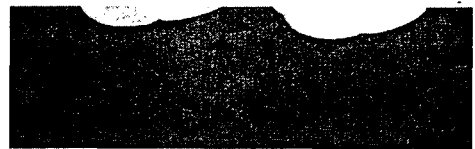


Fig. 4. Insect-mimicking wings

## 2.4 페더링 기구

날개의 연결부위는 페더링(feathering) 축에 대해 회전이 가능하도록 제작하였다. 페더링 축과 공력중심이 일치하지 않기 때문에 날갯짓에서 날개는 공기역학적 하중에 의해 회전을 하게 된다. 날개의 상향 날갯짓과 하향 날갯짓 시 발생하는 이러한 페더링 각은 직경 1.5mm의 탄소봉 축에 부착된 멈춤 장치에 의해 조절하게 하였다. 설계된 페더링 각은 수평축에 대해 상향 날갯짓에서는 약 50°, 하향 날갯짓에서는 약 30°의 회전각을 갖도록 하였다.

### 3. 날갯짓 실험

#### 3.1 실험 방법

Fig. 5와 같이, 날갯짓 실험을 위한 장치는 전원 공급기, 로드 셀, 데이터 획득장치(data acquisition system) 등 크게 세 부분으로 구성된다. 고압 전원과 교류 파형을 동시에 가할 수 있는 전원 공급기인 TD-2(Face International)를 이용하여 300V<sub>pp</sub>의 인가전압을 LIPCA 작동기에 가하였다.

양력과 추력의 측정에 사용된 로드 셀은 폭이 좁은 탄소 복합재 판(strip)에 스트레인 게이지를 부착하여 제작하였다. 스트레인 게이지는 1/4 브리지(quarter bridge)로 연결하였고, 양력과 추력에 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.

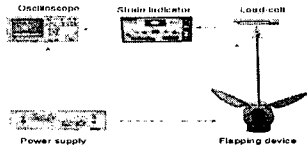


Fig. 5. Schematic of flapping test

날갯짓 진동수를 5Hz에서 15Hz까지 1Hz씩 증가시키며 공진 날갯짓 진동수 근처에서의 양력과 추력의 변화를 조사하였다. 바람이 없는 안정된 공기 중에서 날갯짓 실험을 수행하였고, 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 수차례 실험을 반복하였다.

실제 곤충의 날갯짓 평면은 수평선에서 30도에서 60도 기울어져 있으므로, 날갯짓 기구를 양력과 추력의 측정을 위해 로드 셀(load cell)에 부착할 때에는 각각 수평선에서 45도 및 -45도로 부착하여 실험을 수행하였다.

### 4. 결과 분석

#### 4.1 날갯짓 진동수 영향

이전의 실험 결과<sup>(4)</sup>에 의하면 최대 날갯짓 작은 날갯짓 기구가 고유진동수로 구동될 때 발생한다. 날갯짓 기구의 고유진동수는 날개의 질량, 크기, 중형비의 영향을 받으며, 본 연구에서 제작한 날갯짓 기구의 경우 고유진동수는 10Hz였다. 이미 앞서 설명한 바와 같이 날갯짓은 5Hz에서 15Hz까지 1Hz씩 증가시키면서 각각의 진동수에 대해 양력과 추력을 측정하였다.

Fig. 6, 7은 각각 지그-재그 단면을 갖는 날개가 상향

날갯짓에서 서로 마주치지 않도록 하고, 사각파형(square wave)의 전압을 인가한 경우에 얻은 양력 및 추력 그래프이다. 실험의 반복성을 확인하기 위하여, 5회 이상의 측정 시험을 하였으며, 대체로 약 10Hz로 LIPCA를 가진하였을 때에 본 날갯짓 기구가 최대의 양력과 추력을 발생함을 알 수 있다. 이는 약 10Hz에서 최대의 날갯짓 진폭이 발생하여, 날개 페더링 기구가 적절히 작동함으로써 하향 날갯짓에서도 양력을 발생할 수 있기 때문으로 판단된다. 이러한 사실은 다음 절의 실험 결과에서도 확인할 수 있다.

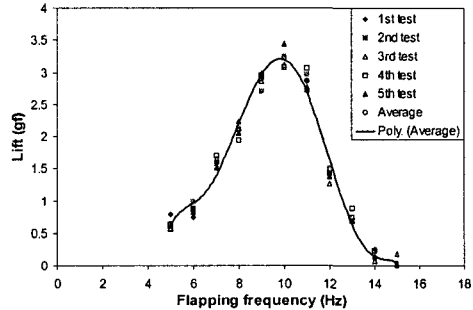


Fig. 6. Lift vs. flapping frequency

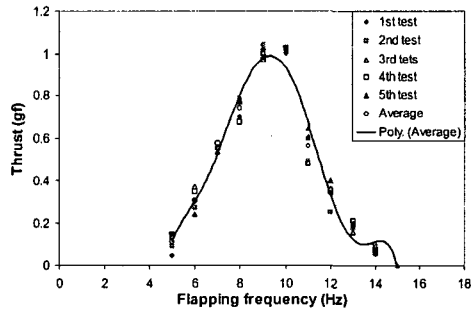


Fig. 7. Thrust vs. flapping frequency

#### 4.2 주요 인자의 영향

앞서의 측정 시험에서, 최대 양력이 약 10Hz에서 발생함을 확인하였으므로, 본 날갯짓 기구를 10Hz로 구동하면서, 지그-재그 형 날개, 날개의 clap-fling, 인가전압 형태가 최대 양력의 크기에 미치는 영향을 조사하였다.

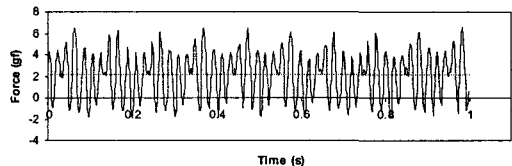


Fig. 8. Lift: no clap, flat wing for sinusoidal input

Fig. 8은 평판 날개(flat wing)가 상향 날갯짓 끝에서 마주치지 않는 경우(no clap)에 전압을 정현파(sine wave)로

인가하여 1초의 날갯짓 구간에서 얻은 양력 그래프이다. 하향 날갯짓의 대부분 구간에서 양의 양력을 발생하지만, 여전히 음의 양력이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 9는 단면이 지그-재그 형인 날개가 상향 날갯짓 끝에서 서로 부딪히지 않게 하고, 전압을 정현파(sine wave)로 인가하여 측정된 양력 곡선이다. 이때에는 평균 양력이 약 2.7gf로 약간 향상되었다.

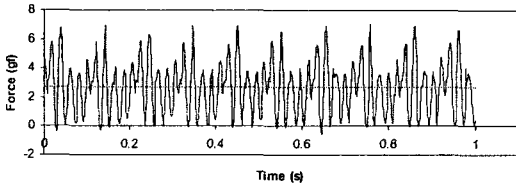


Fig. 9. Lift: no clap, zig-zag wing for sinusoidal input

Table 1은 정현파형 및 사각파형(square wave)으로 전압을 인가한 경우에 측정된 양력을 정리한 표이다. 두 경우 모두 지그-재그 단면을 가진 날개가 상향 끝에서 서로 부딪히지 않는 경우에 가장 큰 양력을 발생함을 확인할 수 있다. 하지만, 날개가 상향 끝에서 서로 부딪히는 경우에는 지그-재그 단면이 오히려 확실한 clap을 방해하여 결과적으로 양력의 감소를 초래함을 알 수 있다. 또한, 사각파형으로 전압을 인가할 때에 모든 경우에서 양력이 약 10% 이상 더 많이 발생함을 확인할 수 있다.

Table 1. Maximum lift at 10 Hz

Condition	Input Type	
	Sinusoidal	Square
Wing / Clap		
Flat / no clap	2.2	2.3
Flat / with clap	2.5	2.8
Zig-zag / no clap	2.7	3.3
Zig-zag / with clap	2.3	2.5

Table 2. Maximum thrust at 10 Hz

Condition	Input Type	
	Sinusoidal	Square
Wing / Clap		
Flat / no clap	0.4	0.7
Flat / with clap	0.4	0.4
Zig-zag / no clap	0.5	1.0
Zig-zag / with clap	0.8	0.7

Table 2는 정현파형 및 사각파형(square wave)으로 전압을 인가하여 측정된 추력을 정리한 표이다. 사각파형으로 전압을 인가한 경우에는 지그-재그 날개가 clap을 하는 경우에 가장 큰 추력을 발생하였고, 사각파형으로 전압을 인가하는 경우에는 지그-재그 날개가 clap하지 않는 경우에 가장 큰 추력을 발생하였다. 측정된 전체 추력 중, 후자의 경우에

가장 큰 추력을 발생하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 LIPCA 작동기를 이용한 개선된 형태의 날갯짓 기구의 설계와 제작과정, 양력 및 추력 측정 실험결과를 소개하였다. LIPCA 작동기에서 발생하는 제한된 변위를 충분한 크기의 날갯짓으로 증폭시키기 위해 연결 시스템을 고안하였고, 날갯짓을 통하여 발생하는 양력과 추력을 증가시키기 위해 페더링 장치를 추가하였다. 페더링 장치는 큰 날갯짓 각에서도 성공적으로 작동하였다.

제작된 날갯짓 기구에 정현파형 및 사각파형으로 교류 전압을 가하여 5Hz와 15Hz 구간에서 양력과 추력을 측정하였고, 날갯짓 기구의 특성을 분석하였다. 양력과 추력 모두 고유 날갯짓 진동수인 10Hz 부근에서 최대의 값을 나타내었다. 최대 양력 및 추력은 날개의 단면 형태 및 clap의 여부 및 인가전압의 형태에 따라 다소의 차이가 발생하였다.

지금까지 개발된 압전작동기 구동형 날갯짓 기구로부터 측정된 양력과 추력이 실제 비행에 필요한 양보다는 작은 값이지만, 지속적인 연구를 통해서 비행 가능한 압전작동기 구동형 날갯짓 비행체를 개발할 수 있을 것으로 확신한다.

#### 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 중점연구소 지원사업(2004)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Alexander, D. E., 2002, *Nature's Flyers*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore
- (2) Dickinson, M. H., Lehmann, F. O., and Sane, S. P., 1999, "Wing Rotation and the Aerodynamics Basis of Insect Flight," *Science*, Vol. 284, pp.1954-1960.
- (3) Bandyopadhyay, P. R., 2005, "Trends in Biorobotic Autonomous Undersea Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 30, Issue 1, pp.109-139.
- (4) Moh Syaifuddin, Hoon C. Park, Kwang J. Yoon, Nam S. Goo, 2005, "Design and evaluation of LIPCA-actuated flapping device," *SPIE's 12th Annual Int. Symposium on Smart Structures and Material*, San Diego, USA.
- (5) K.J. Yoon, K.H. Park, S.K. Lee, N.S. Goo, H.C. Park, 2004, "Analytical design Model for piezo-composite unimorph actuator and its verification using LIPCA's," *Smart Materials and Structures*, Vol.13, pp.1-9
- (6) Rees, C. J., 1975, "Form and function of corrugated insect wing," *Nature*, Vol 256, pp.200-203