

論文

LIPCA 작동기로 구동되는 날갯짓 기구의 설계 및 성능평가

이승식*, 모 시아푸딘**, 박훈철***, 윤광준***, 구남서***

Design and evaluation of LIPCA-actuated flapping device

Seungsik Lee*, Moh. Syaifuddin**, Hoon Cheol Park***, Kwang Joon Yoon*** and Nam Seo Goo***

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 4 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.

초 록

본 논문에서 LIPCA(Lightweight Piezoceramic Composite Actuator)를 이용한 날갯짓(flapping) 기구의 개발에 관한 최근의 연구진척 사항을 제시하였다. 날갯짓 기구는 여러 개의 연결막대를 이용하여 LIPCA의 제한된 작동변위를 커다란 날갯짓 각(flapping angle)이 발생하도록 증폭시켰으며, 페더링 메커니즘(feathering mechanism)을 적용하여 날갯짓과 동시에 날개에 비틀림이 발생하도록 설계되었다. 이 날갯짓 기구의 고유 날갯짓 주파수는 약 9Hz로, 이때 최대의 날갯짓 각이 발생하였다. 제작된 날갯짓 기구의 작동성능을 평가하기 위하여 날갯짓 주파수를 4Hz에서 15Hz까지 변화시키면서 발생하는 양력과 추력을 측정하였으며, 최대 양력과 최대 추력은 고유 날갯짓 주파수 부근에서 측정되었다.

Key Words : Flapping wing(날갯짓 날개), Flapping test(날갯짓 시험), Feathering mechanism(페더링 메커니즘), LIPCA(경량 압전 복합재 작동기)

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[1,2]. 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[3].

날갯짓 비행체를 개발하기 위해서는 몇 가지

† 2005년 8월 12일 접수 ~ 2005년 10월 10일 심사완료

* 건국대학교 인공근육연구센터

** 건국대학교 신기술융합학과 대학원

*** 정회원, 건국대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: hcpark@konkuk.ac.kr
서울특별시 광진구 화양동 1번지

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[2]. 둘째, 모터나 공압식(pneumatic)의 작동기들은 큰 무게와 장치의 복잡성 때문에 소형 또는 초소형 크기의 날갯짓 비행체의 구동 장치로는 부적절하므로 새로운 형태의 작동기를 개발해야 한다.

Fearing 등[4]은 압전형 작동기를 이용해 성공적인 날갯짓을 구현한 바 있다. 이들은 단순한 형태의 유니모프(unimorph) 압전세라믹 작동기와 네 개의 막대 구조를 활용한 변위증폭장치를 이용해 날개를 구동시켰으며 17Hz의 날갯짓에서 60°의 날갯짓 각이 발생함을 보고하였다. 임 등[5]은 유니모프 작동기인 LIPCA(Lightweight Piezoceramic Composite Actuator)[6]를 이용해 새의 날갯짓을 모방한 기구를 소개한 바 있으나, 이 기구의 날갯짓 각과 구동 주파수는 충분한 양력과 추력을 발생시키기에는 부족했다. Park 등[7]은 전기 작동 폴리머(electro-active polymer)인 IPMC(ionic polymer-metal composite)를 이용한 날갯짓 기구도 설계·제작하여 실험을 수행했으나 역시 비행에 필요한 충분한 양력을 얻지는 못하였다.

LIPCA나 IPMC같은 새로운 형태의 작동기들은 단순한 구조와 가벼운 무게의 측면에서는 새나 곤충을 모방한 기구의 작동기로 적합하기는 하나, 제한된 작동력과 작동변위 때문에 실제로 비행이 가능한 로봇을 만들기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 가볍고 효과적인 작동력과 작동변위 증폭장치의 설계는 새나 곤충 모방 기구 개발에 있어서 매우 중요한 부분이라 하겠다.

본 연구에서는 이전 연구[5]의 외팔보지지조건과는 달리 단순지지조건으로 LIPCA 작동기를 고정하였기 때문에 보다 큰 고유 날갯짓 주파수를 얻을 수 있었으며, 새로운 네 개의 막대 연결(linkage) 구조를 이용해 LIPCA의 제한된 작동변위를 증폭시켰다. 또한 이렇게 설계 및 제작된 날갯짓 기구에서 발생하는 양력과 추력을 실험을 통해 측정하였다.

II. 날갯짓 기구의 구조설계

2.1 개요

본 연구에서 설계한 날갯짓 기구는 작동기, 연결 시스템, 날개, 프레임(frame) 등 총 4개의 요

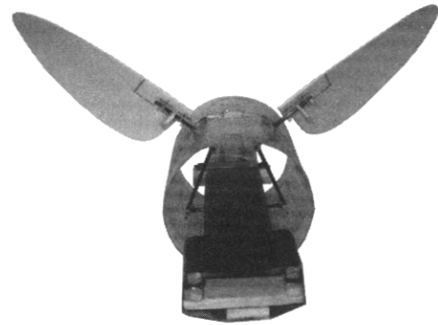


Fig. 1. Fully assembled flapping device

소로 구성된다. 모든 구성 요소는 수작업으로 제작되었으며, 시아노아크릴(cyanoacrilate) 접착제를 사용하여 각각의 구성요소를 접합하였다. 날갯짓 기구의 몸통으로는 직경 50mm의 플라스틱 원형관을 사용하였다. LIPCA 작동기는 프레임에 발사(balsa) 지지 부를 이용하여 고정하였으며 단순지지경계조건을 적용하였다.

본 날갯짓 기구의 총 중량은 20g이며, 날개의 경우 무게는 0.5g, 종횡비(aspect ratio)는 5.5, 면적은 58cm²이다. 제작된 기구는 약 9Hz의 고유 날갯짓 주파수에서 약 80°의 날갯짓 각을 발생시켰으며 페더링 메커니즘(feathering mechanism)의 적용으로 날갯짓을 하는 동안 날개에 약 55°의 비틀림 각이 발생되었다. 기구의 전체 크기는 길이 11.5cm, 폭 12cm, 높이 9.5cm이다(Fig. 1 참조).

2.2 작동기

본 연구에서 사용된 LIPCA 작동기는 유니모프 형태의 압전세라믹 작동기로 Fig. 2와 같이 압전세라믹, 유리섬유/에폭시, 그리고 탄소섬유/에폭시 층으로 구성된다. 제작된 LIPCA에 인가 전압을 가하게 되면 굽힘 변형을 통해 작동기 중앙에서 작동변위를 발생된다. LIPCA 작동기에 가하는 최대 인가전압은 대략 300V_{pp}(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(Fig. 3 참조), 이를 통해 작동기의 고유 주파수와 작동력을 증가시킬 수 있었다.

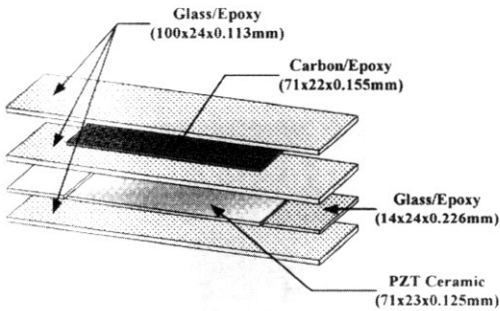


Fig. 2. Lay-up and dimension of LIPCA

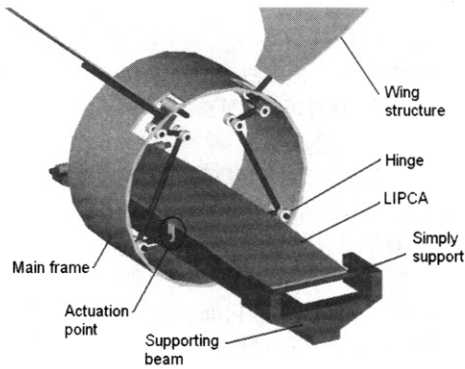


Fig. 3. CAD model of flapping device

2.3 연결 시스템

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.

모든 연결막대는 1.5mm 직경을 갖는 탄소 복합재 막대(rod)로 제작하였으며 막대의 비강도(specific strength)와 비강성(specific stiffness)이 크기 때문에 높은 주파수 구동에 유리한 이점이 있다. 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.

2.4 날개의 설계

날개는 얇은 폴리스티렌(polystyrene) 판으로 제작하였고, 초파리(Drosophila)의 날개형상을 모방하였다. 제작된 날개는 가운데가 볼록한 캠버(camber) 형태의 단면을 가지며 두께는 날개의

루트(root) 부분에서 1.5mm로 시작하여 날개의 끝 부분에서는 0.5mm로 감소한다. 본 날개는 제작이 쉽고 무게가 가벼우면서도 충분한 굽힘 강성을 갖고 있어 날갯짓 기구에 매우 적합하다.

III. 날갯짓 및 페더링 메커니즘

3.1 날갯짓 메커니즘

LIPCA 작동기의 중앙부에서는 위아래의 굽힘 거동이 발생하는데, 이러한 거동은 연결 시스템의 고정힌지 1과 2의 회전을 발생시킨다(Fig. 4 참조). 연결막대들의 서로 다른 길이 때문에 고정 힌지 1의 회전각은 고정 힌지 2의 회전각과는 차이가 나게 된다. 따라서 LIPCA 작동기의 최대 작동 변위에 기초하여 적절한 연결 시스템을 설계하면, 작동기에서 발생하는 제한된 작동변위는 연결 시스템을 거쳐 날개에서 최대 날갯짓 각이 발생하도록 증폭할 수 있다. 본 연구에서는 벡터 해석기법[8]을 적용하여 연결 시스템의 각도 증폭을 예측하였다.

Fig. 4의 벡터 표현을 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$r_d^2 = r_0^2 - 2r_0 r_1 \cos \theta_1 + r_1^2 \quad (1)$$

여기서 입력각(input angle) θ_1 은 \vec{r}_1 과 \vec{r}_0 의 사이 각이고, r_d 와 r_0 는 각각 \vec{r}_d 과 \vec{r}_0 의 크기이다. 대각(diagonal) 벡터 \vec{r}_d 의 방향은 \vec{r}_1 과 \vec{r}_0 의 x, y 성분에 의해 다음과 같이 주어진다.

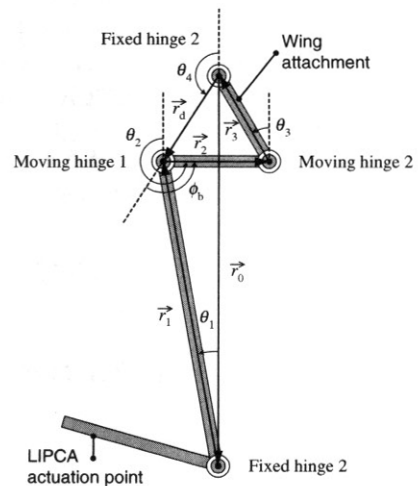


Fig. 4. Four-bar linkage system

$$\tan \theta_d = \frac{r_{0y} + r_{1y}}{r_{0x} + r_{1x}} \quad (2)$$

각도 θ_2 와 θ_d 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\theta_2 = \theta_d + \phi_b \quad (3)$$

또한, r_3 에 대해서는 다음과 같은 식을 얻을 수 있으며,

$$r_3^2 = r_d^2 + 2r_d r_2 \cos \phi_b + r_2^2 \quad (4)$$

0° 와 180° 사이에 존재하는 ϕ_b 에 대해서 $\cos \phi_b$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\cos \phi_b = \frac{r_3^2 - r_2^2 - r_d^2}{2r_d r_2} \quad (5)$$

\vec{r}_3 는 기하학적 조건으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{r}_3 = -(\vec{r}_0 + \vec{r}_1 + \vec{r}_2) \quad (6)$$

따라서 출력각(output angle) θ_3 는 식(7)으로부터 구할 수 있다.

$$\sin \theta_3 = \frac{r_{3y}}{r_3} = \frac{r_0 - r_1 \cos \theta_1 - r_2 \cos \theta_2}{r_3} \quad (7)$$

입력 각 θ_1 과 출력 각 θ_3 는 초기 값으로 각각 연직선에 대해 9° 와 23° 를 갖는다. 그러므로 각의 증폭은 다음과 같이 표현된다.

$$Amplification = \frac{\theta_3 - 23^\circ}{\theta_1 - 9^\circ} \quad (8)$$

본 시스템의 각 연결막대의 길이인 $r_1 = 3$ cm, $r_2 = 0.8$ cm, $r_3 = 0.75$ cm를 주어진 식들에 대입하면 식(8)로부터 4.25의 각 증폭비를 얻을 수 있다.

3.2 페더링 메커니즘

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 페더링 축에 부착된 멈춤 장치에 의해 조절될 수 있다. 설계된 페더링 각은 수평축에 대해 상향 날갯짓에서는 45° 의 상향 기

울기를 갖고, 하향 날갯짓에서는 10° 의 하향 기울기를 갖도록 하였다.

IV. 날갯짓 실험

4.1 실험방법

날갯짓 실험을 위한 장치는 전원 공급기, 로드 셀, 데이터 획득장치(data aquisition system) 등 크게 3부분으로 구성된다. 고압 전원과 교류 파형을 동시에 가할 수 있는 전원 공급기인 TD-2 (Face International, USA)를 이용하여 $300V_{pp}$ 의 인가전압을 LIPCA 작동기에 가하였다.

실험에 사용된 로드 셀은 작은 크기의 양력 및 추력을 측정하기 위하여, 탄소 복합재 막대의 중앙에 스트레인 게이지를 부착하여 굽힘 형으로 만들었다. 이 로드 셀의 고유진동수는 약 66Hz로 본 실험에서 적용한 가진 주파수 보다 상당히 높으므로, 동적인 간섭은 없는 것으로 판단된다.

연결 막대를 이용하여 날갯짓 기구와 로드 셀(load cell)을 연결하였는데, 연결 막대와 로드 셀은 힌지 조건으로 부착하여 무게중심과 공력중심이 완전히 일치하지 않아도 로드 셀에서 수직 하중 성분을 측정할 수 있게 하였다. 양력과 추력의 측정을 위해 연결 막대와 날갯짓 기구는 각각 수직과 수평으로 연결하여 실험을 수행하였다. 각 경우의 부착점은 날갯짓 기구의 무게중심에 가깝게 두었다.

4.2 데이터 획득장치

로드 셀에 부착된 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 참조).

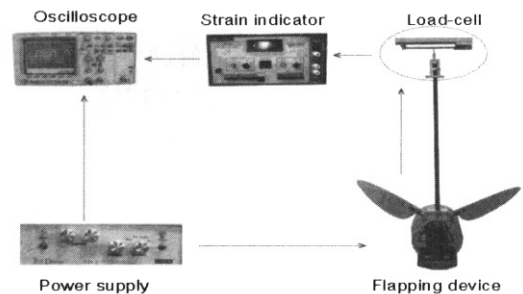


Fig. 5. Schematic of flapping test

4.3 로드 셀의 보정

로드 셀로부터 측정되는 전압을 양력과 추력으로 환산하기 위해 로드 셀의 보정(calibration) 작업을 수행하였다. 이를 위해 더미(dummy) 질량으로 하중을 가했고 각 질량 하중에 대한 로드 셀의 출력전압을 측정하였다. 이렇게 측정된 질량 하중과 로드 셀 출력전압의 관계가 선형적인 특성을 가짐을 확인하였다.

V. 결과분석

5.1 양력

이전의 실험 결과[9]에 의하면 최대 날갯짓 각은 날갯짓 기구가 고유 주파수로 구동될 때 발생한다. 날갯짓 기구의 고유 주파수는 날개의 질량, 크기, 중횡비의 영향을 받으며, 본 연구에서 제작한 날갯짓 기구의 경우 고유 주파수는 9Hz였다.

날갯짓 기구의 LIPCA에 300Vpp를 4Hz에서 15Hz까지 1Hz씩 증가시키면서 각각의 주파수에 대해 양력을 측정하였다(Fig. 6 참조). 고유 주파

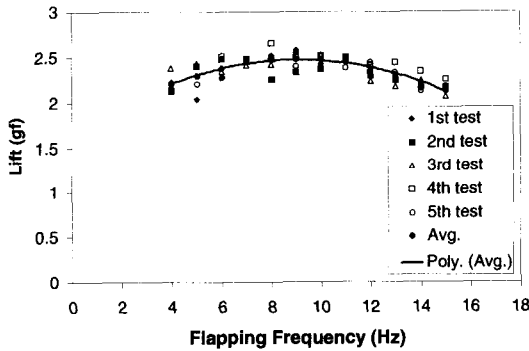


Fig. 6. Lift vs. flapping frequency

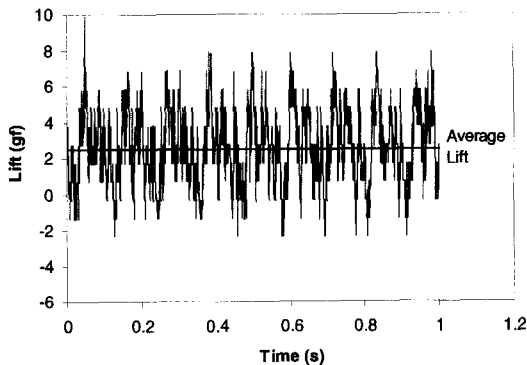


Fig. 7. Lift at 9 Hz flapping frequency

수인 9Hz이전 구간에서는 날갯짓 주파수가 증가함에 따라 양력이 증가하는 경향을 보였고, 고유 주파수를 넘어서면서부터는 날갯짓 주파수의 증가에 따라 양력이 감소하였다. 또한 페더링 장치는 큰 날갯짓 각도에서도 성공적으로 작동을 하였다. 이러한 날갯짓 기구의 특성은 최대 양력을 얻기 위해서는 고유 주파수로 날갯짓을 해야 할 필요가 있음을 의미한다. 편차는 주로 압전 작동기의 재료비선형성으로 인한 것으로 판단된다.

Fig. 7의 시간 영역에서 측정된 양력을 보면, 상향 날갯짓에서 음(negative)의 양력이 발생하지만 하향 날갯짓에서 발생하는 양(positive)의 양력에 비교하여 그 크기가 작기 때문에 결과적으로 날갯짓 기구는 날갯짓을 하는 동안에 평균적으로 양의 양력을 발생시키는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 고주파로 판단되는 피크들은 날갯짓 기구가 시험 중 다소 진동하면서 발생하는 잡음 신호로 판단된다.

5.2 추력

양력 측정결과와 같이 날갯짓 기구의 고유 주파수 부근에서 가장 큰 추력이 측정되었다(Fig. 8 참조). 측정된 추력은 양력에 비해서 날갯짓 주파수의 영향을 더 크게 받을 수 있는데, 이는 날갯짓 주파수에 따라서 페더링 장치가 9Hz 부근에서 최대한 작동하고, 이외의 주파수 영역에서 저하된 페더링이 양력보다는 추력에 큰 영향을 주기 때문으로 판단된다. 비록 측정된 추력의 크기가 작지만 날갯짓 기구의 개선을 통해 이를 증가시킬 수 있을 것으로 생각된다.

시간 영역에서 측정된 추력변화의 경우에도 양력의 경우와 마찬가지로 상향 날갯짓과 하향 날갯짓에서 각각 음과 양의 추력을 발생되었으나 두 값의 평균을 취하면 전체적으로 양의 추력을 발생시키는 것을 알 수 있다(Fig. 9 참조).

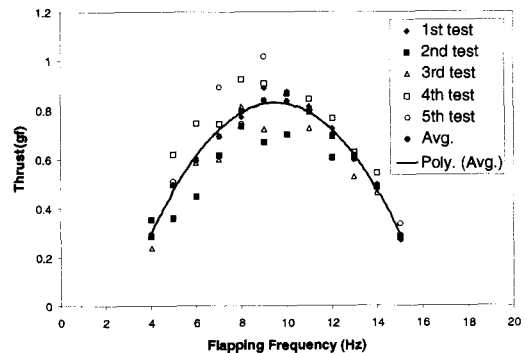


Fig. 8. Thrust vs. flapping frequency

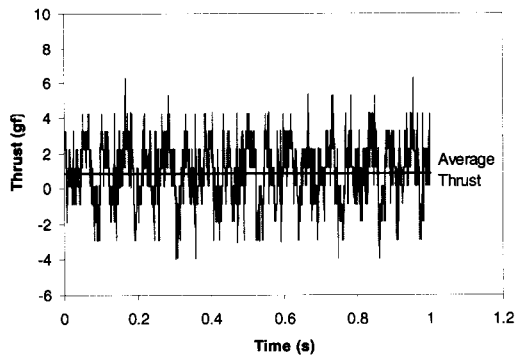


Fig. 9. Thrust at 9 Hz flapping frequency

VI. 결 론

본 논문에서는 LIPCA 작동기를 이용한 새로운 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 교류 전압을 가하여 4Hz와 15Hz 구간에서 양력과 추력을 측정하였고, 날갯짓 기구의 특성을 분석하였다. 양력과 추력 모두 고유 날갯짓 주파수 부근에서 최대의 값을 나타내었고, 최대 양력과 최대 추력은 각각 2.49gf와 0.83gf로 측정되었다.

비록 날갯짓 기구로부터 계측된 양력과 추력이 아직까지는 실제 비행에 필요한 양보다는 작은 값이지만, 지속적인 연구를 통해서 날갯짓 비행이 가능한 압전작동기 구동형 비행체를 개발할 수 있을 것으로 확신한다.

후 기

본 연구는 2005년도 건국대학교 학술진흥연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Alexander, D. E., *Nature's Flyers*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2002.
- 2) 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.
- 3) Bandyopadhyay, P. R., "Trends in Biorobotic Autonomous Undersea Vehicles", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 30, Issue 1, Jan. 2005, pp. 109-139.
- 4) Fearing, R. S., Avadhanula, S., Campolo, D., Sitti, M., Yan, J., and Wood, R., "A Micromechanical Flying Insect Thorax", *Neurotechnology for Biomimetic Robots*, The MIT Press, Cambridge, 2002.
- 5) 임상민, 이상기, 박훈철, 윤광준, 구남서, "압전 작동기 LIPCA를 이용한 형상가변의 설계 및 작동구현", *한국항공우주학회지*, 제 31권 제 10호, 2003, pp. 34-39.
- 6) 김균열, 박기훈, 윤광준, 박훈철, "압전 복합 재료 작동기 LIPCA에 대한 성능 비교실험 및 분석", *한국복합재료학회지*, 제 16권 제 2호, 2003, pp. 41-47.
- 7) Park, H. C., Kim, K. J., Lee, S. K., and Chah, Y. J., "Electromechanical Flapping Produced by Ionic Polymer-Metal Composites", *Proceedings of SPIE's 11th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, Vol. 5390-63, 2004, pp. 242-248.
- 8) Wilson, C. E., and Sadler, J. P., *Kinematics and Dynamics of Machinery*, Pearson Education, Inc., 2003.
- 9) 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).