

## 건국대학교 능동 구조/재료 연구실의 인공 근육형 작동기 개발 및 응용 현황



임 상 민\*



이 상 기\*



박 훈 철\*



윤 광 준\*

### 1. 서 론

현재까지 항공우주 비행체 및 일반 로봇의 작동 제어를 위하여 개발된 대표적인 작동기는 유압 작동기와 회전 모터이다. 그러나 이들 작동기는 중량이 무겁고 작동기 구조물이 복잡한 단점으로 인하여, 소형 지능형 운행체 구조물을 구동하기 위한 작동기로는 적합하지 않다. 최근 이러한 기계식 작동기를 대신하여 사용할 수 있는 비기계식 작동기인, 압전 작동기, 폴리머 작동기, 형상 기억 합금 작동기 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 비기계식 작동기를 여기서는 통칭 “인공 근육형 작동기”라고 부르기로 한다. 이와 관련한 연구 현황은 몇몇 특집 논문으로 정리되어 발표된 바가 있다.<sup>1),2)</sup>

본 특집 논문에서는 건국대학교, 항공우주공학 전공의 국가지정 연구실인 “능동 구조/재료 연구실”에서 현재 수행 중인 연구 성과를 소개함으로써, 독자들로 하여금 압전 재료를 이용한 인공 근육형 작동기의 연구 동향을 파악할 수 있게 하고자 한다.

### 2. 압전 재료를 이용한 인공 근육 형 작동기 개발 및 응용

#### 2.1 유니모프 작동기, LIPCA(Lightweight Piezo-ceramic Composite Actuator)

LIPCA 작동기에 대해서는 다른 학술지<sup>3),4)</sup> 및 특집 기

사<sup>1)</sup>에서 이미 소개된 바가 있으나, 본 논문에서는 주로 LIPCA의 응용에 대해서 다룰 것이므로, LIPCA의 기본 구조 등에 대해서 간략히 정리하고, NASA Langley에서 개발한 THUNDER<sup>5)</sup>와 성능 비교에 대한 연구 결과를 소개하고자 한다.

LIPCA는 그림 1과 같이, 하나의 피에조 세라믹 층을 작동재료로 하는 전형적인 유니모프 작동기이다. 유니모프 작동기는 작동재료 층 위아래에 서로 다른 재

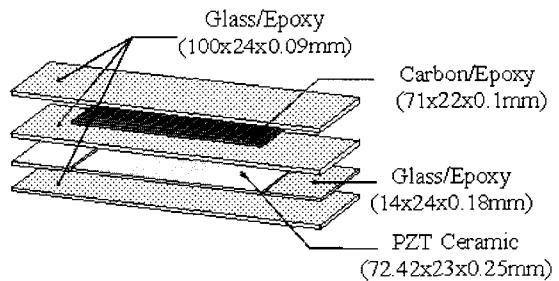


그림 1 LIPCA 작동기

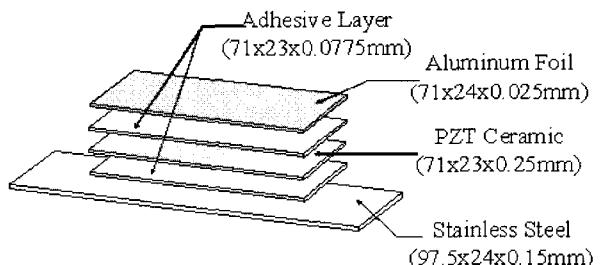


그림 2 THUNDER 작동기

\* 건국대학교 항공우주공학과 능동 구조/재료 연구실

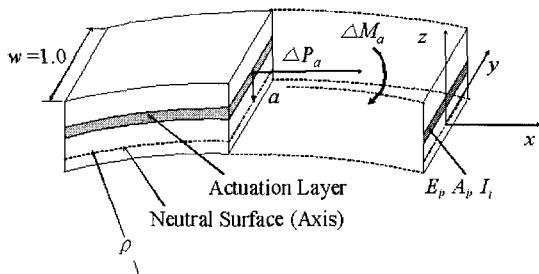


그림 3 유니모프 작동기의 작동 원리

료 층을 부착하여, 작동재료 층이 전체 적층 구조의 중립축 바깥에 놓이게 함으로써, 굽힘 모멘트를 발생할 수 있게 하는 것이 작동 원리이다. LIPCA는 금속 층을 가지는 그림 2의 THUNDER와는 달리, 피에조 세라믹 층 위아래로 복합재료 층을 두어서 작동 모멘트를 최대화 하고 있다.

그림 3에서와 같이, 모멘트 암이 중립축에서 길면 길수록 작동 모멘트는 커지나, 압전 세라믹 재료의 강성으로 인하여, 굽힘 강성(bending stiffness)도 동시에 커지므로, 굽힘 강성과 모멘트 암의 비를 최적화 할 필요가 있다. 따라서, 본 연구실에서는 식(1)의 유니모프 작동기 계수를 세계 최초로 고안하여 LIPCA의 설계에 적용하였다. 이 계수의 유도 과정은 참고문헌 [6]을 참고하기 바란다.

$$c_{ua} = \frac{a}{D} \quad (1)$$

THUNDER와 비교하여, LIPCA의 또 다른 장점은 접착층이 필요 없다는 것과, 적층각을 달리하면 굽힘과 비틀림을 동시에 할 수 있는 작동기나 설계 요구에 맞게 작동 특성이 다른 작동기를 손쉽게 제작할 수 있다는 점이다.

본 연구실에서는 LIPCA 작동기의 우수한 작동 특성을 국제학술회의와 국제학술지<sup>[3,4]</sup>에 발표한 바가 있는데, 최근 한 국제학회에서 THUNDER의 개발팀의 일원이 LIPCA와 THUNDER의 작동특성을 비교하여 LIPCA의 우수성을 국제적으로 공인 받기도 하였다.<sup>[7]</sup> 그림 4는 단순지지된 THUNDER에 다양한 주파수의 입력을 인가하였을 때 발생한 변위를 측정하여 도시한 그래프이고, 그림 5는 LIPCA에 같은 조건으로 전압을 인가하여 얻은 전압-변위 곡선이다. LIPCA의 변위가 THUNDER에 비하여 동일한 주파수의 전압에 대해서 각각 약 5 배 정도 큼을 알 수 있다. 참고문헌 [7]에는 변위 뿐만

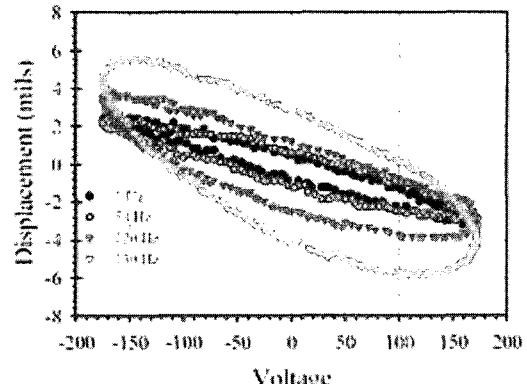


그림 4 THUNDER의 작동 변위

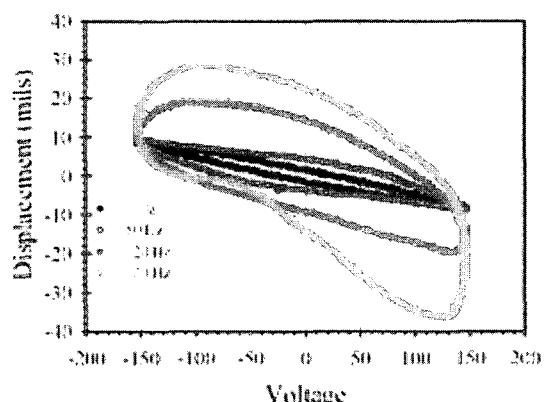


그림 5 LIPCA의 작동 변위

아니라, LIPCA와 THUNDER의 임피던스 등 다양한 특성을 비교하였는데, LIPCA가 모든 면에서 THUNDER에 비해 우수한 특성을 보이고 있음을 실험적으로 입증하였다.

## 2.2 바이오미메틱 날개(Biomimetic Wing)

본 연구실에서는 위에서 설명한 LIPCA 작동기를 플랩의 작동기로 채용한 바이오미메틱 날개(biomimetic wing)을 설계, 제작하여 풍동 실험을 수행 중이다. 이의 선행 연구로서 그림 6과 같이 전체 날개가 아닌 부분 날개(wing section)를 설계하고 제작하고, 작동변위의 예측 및 측정을 통하여 LIPCA 작동기를 이용한 바이오미메틱 날개의 구현 가능성을 확인하였다.<sup>[8]</sup> 이 부분 날개는 날개의 끝단의 윗면 외피 구조를 LIPCA를 직렬로 두 개 연결한 작동기로 설계 제작하였다. 해석에는 등가 열변형 해석(thermal analogy)<sup>[9]</sup>을 이용한 NASTRAN을 사용하였다. 그림 7은 해석 결과를 도시한 것으로 그림 8에 측정 변위와 해석 결과를 비교하였다.

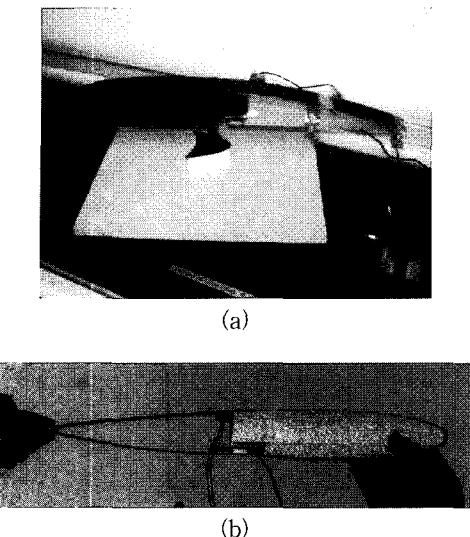


그림 6 바이오미메틱 부분 날개

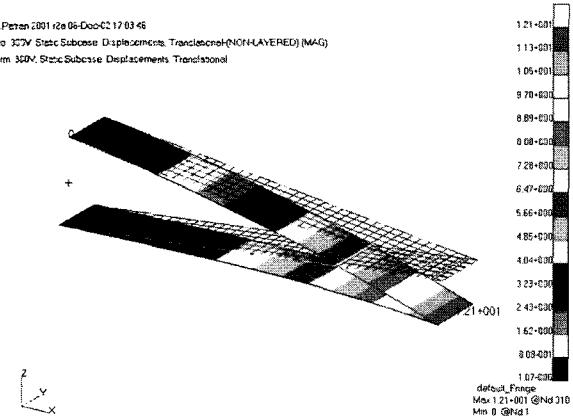


그림 7 부분 날개의 작동 변위(해석)

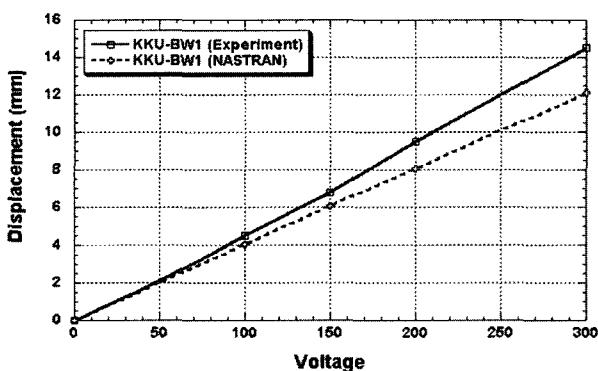


그림 8 부분 날개의 작동 변위(실험)

그림 8에서 알 수 있듯이, 부분 날개의 작동 변위는 약 150V까지는 등가 열변형을 이용한 해석 결과와 측정치가 매우 잘 일치하고 있으나, 그 이후부터는 측정 변위가 해석 변위보다 커진다. 이는 압전 재료가 고전 압에서 재료 비선형 거동을 하기 때문이다. 이 부분 날

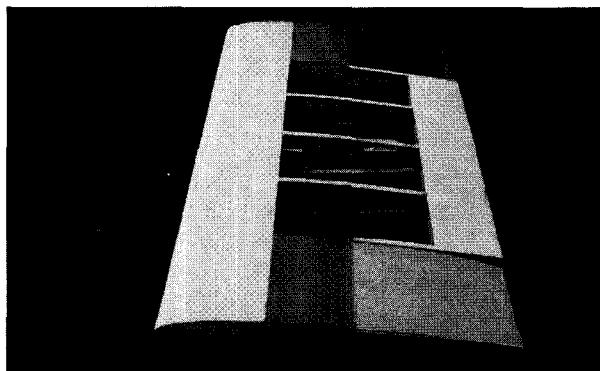


그림 9 바이오미메틱 날개

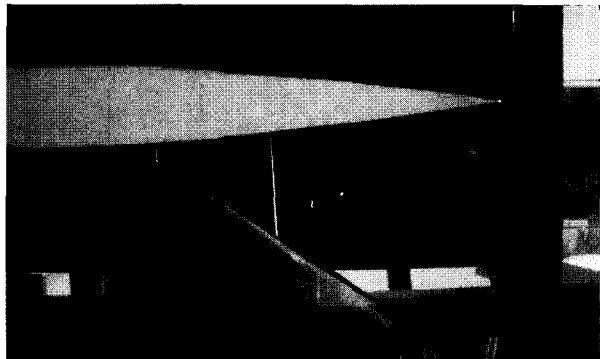


그림 10 플랩 변형 형상 (풍속=0m/s, 받음각 0도)

개는 300V 인가 전압에서 약 5도에 해당하는 끝단 변위를 발생하였다.

이러한 선형 연구를 바탕으로 두개의 LIPCA 작동기를 병렬로 연결하여 작동하는 플랩을 가진 바이오미메틱 날개를 설계하여, 그림 9와 같이 제작하였다. 이 날개가 상대 바람이 있는 경우에 어느 정도의 작동 변위를 발생할 수 있는지를 확인하기 위하여, 바이오미메틱 날개를 받음각 0도 및 8도로 경국대학교 풍동 시험부에 설치하고, 풍속 0m/s, 5m/s, 및 10m/s에서 작동 변위를 측정하였다. 그림 10은 받음각 0도인 날개를 풍속이 없는 상태에서 작동한 모습이다. 이 바이오미메틱 날개의 작동기에 400V를 인가하고, 각 받음각 및 풍속에서의 작동 각도를 측정하여 표 1에 정리하였다. 풍속

표 1 바이오미메틱 날개의 작동 특성

| 받음각 | 풍속(m/s) | 작동 각도 |
|-----|---------|-------|
| 0°  | 0       | 11°   |
|     | 5       | 10.5° |
|     | 10      | 9°    |
| 8°  | 0       | 11°   |
|     | 5       | 10°   |
|     | 10      | 7°    |

이 증가함에 따라, 작동 각도가 다소 줄었지만, 인가 전압을 약간 증가시킴으로써 풍속 0m/s때의 작동 변형 각도를 유지할 수 있었다.

### 2.3 공기 펌프

압전 작동기의 유망한 응용 분야는 각종 펌프이다. 압전 작동기를 이용한 수압 펌프의 연구가 진행되어 오고 있으나, 성공적인 사례는 아직 보고된 바가 없다. 현재 현장에서 사용 중인 공기 펌프는 무거운 전자석 방식이다. 작동력이 커서 공기의 송출 능력이 우수하나, 소음이 크다는 단점이 있다. LIPCA의 설계 개념을 공기 펌프의 공기 송출기 부분에 적용하여, 그림 11과 같이 고무 맴브레인에 압전 작동기를 부착하여 구동부를 만들고, 그림 12와 같이 공기 개폐부와 작동부를 링크로 연결한 공기 펌프를 설계 제작하였다.

연구 초기에는, 가정용 전기 주파수인 60Hz에서 이 공기 펌프의 송출력을 최대로 하기 위하여, 구동부의 공진 주파수가 60Hz가 되도록 유한요소해석을 통하여 구동부를 설계하여 제작하였으나, 작동 주파수가 높은 관계로 작동 변위가 작아서, 공기 송출량이 미미하였

다. 따라서, 작동기의 공진 주파수를 낮추도록 재설계하고, 가정용 전원의 주파수를 낮추는 회로를 갖추도록 설계 변경하였다. 현재, 이 공기 펌프의 정량적인 성능 시험을 하고 있으며, 추후에 그 결과를 발표할 예정이다.

### 2.4 기타 응용 연구

본 연구실에서는 LIPCA 작동기를 응용한 다양한 연구를 수행 중이다. 그림 13(a)는 플래핑 기구로서, 곤충의 플래핑 운동은 모사하기 위하여 날개가 굽힘과 비틀림 운동을 동시에 할 수 있도록 연구 중이다. 그림 13(b)는 소형 로터 블레이드로서, 비틀림 운동을 할 수 있도록 설계된 LIPCA를 블레이드의 피치 조종을 위한 작동기로 응용하고자 하는 연구이다. 그림 13(c)는 LIPCA를 초소형 비행체의 조종면에 적용하고자 하는 연구로서, 뱃데리에서 공급되는 저압이 초소형 승압 장치를 거치면서 발생되는 100V대로의 전압으로 구동되는 작동기에 대한 연구는 완성 단계에 들어서고 있다. 이상의 각 연구 결과는 학술회의와 학술지를 통하여 발표할 예정이다.

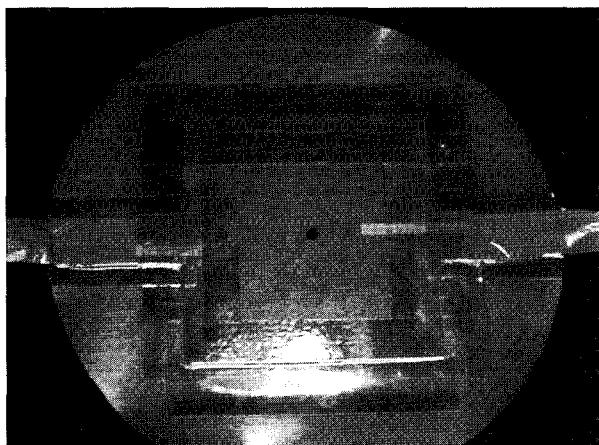


그림 11 압전 작동기로 구성된 구동부

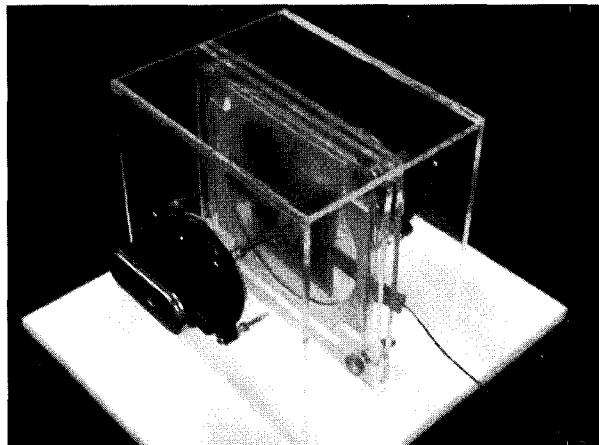
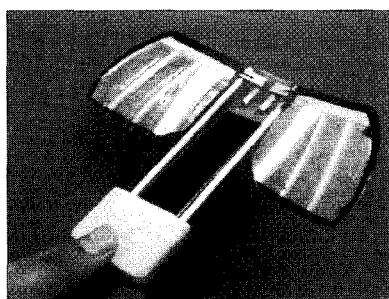


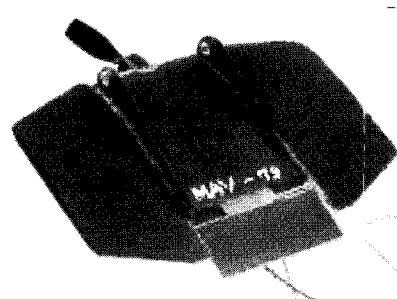
그림 12 공기 펌프 시제품



(a) 플래핑 기구



(b) 소형 로터 블레이드



(c) 초소형 비행체의 조종면

그림 13 LIPCA를 적용한 응용 연구

### 3. 결 론

본 논문에서는 건국대학교 능동 구조/재료 국가지정 연구실에서 수행 중인 압전 재료를 이용한 인공 근육형 작동기 LIPCA와 이의 응용에 관한 연구 내용들을 비교적 구체적으로 소개하였다. 이러한 연구 결과들은 비기계식 작동기를 이용한 소형 무인기 및 소형 로봇의 구동부 설계 및 제작에 새로운 방법론을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. 박기훈, 윤광준, 박훈철, “압전재료가 적용된 지능복합재료 작동기 개발 현황,” 한국복합재료학회, Vol. 15, No. 2, 2002, pp.55~63
2. 김재환, “Electroactive Polymers(EAP)의 연구동향 및 응용분야,” 한국항공우주학회, Vol. 29, No. 1, 2001, pp.142~149
3. Yoon, K. J., et al., “Lightweight Curved actuator with Piezoelectric Ceramic Layer and Fiber Composite Layers,” *Proceedings of the 2nd Asian-Australasian Conference on Composite Materials*, 2000
4. Yoon, K. J., Shin, S., Park H. C. and Goo, N. S., “Design and manufacture of a lightweight piezo-composite curved actuator,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, 2002, pp.1~6
5. Hellbaum, R, Bryant, RG, and Fox, R.L. “Thin Layer Composite Unimorph Ferro-electric Driver and Sensor,” United States Patent No. 1997, pp. 632~841
6. Analytical Design Model for Piezo-Composite Unimorph Actuator and Its Verification Using LIPCA, submitted to *Smart Materials and Structures*, 2002
7. Mossi KM, et al., “Characterization of loaded prestressed piezoelectric laminates,” *Proc. of SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA 2~6, 2003
8. Design and Demonstration\_of a Biomimetics\_Wing\_Section Using\_a Lightweight\_Piezo-Composite Actuator\_(LIPCA), submitted to *Smart Materials and Structures*, 2003
9. Taleghani B. K. and Campbell J. F., Non-linear Finite Element Modeling of THUNDER Piezoelectric Actuators, *NASA/TM-1999-209322*, 1999 