

압전 세라믹과 섬유복합재료 층으로 구성된 곡면형 경량 작동기 LIPCA의 설계/제작 및 성능시험

신석준*, 김주식*, 구남서**, 박훈철*, 곽문규***, 윤광준*

Design/Manufacturing/Test of Curved Actuator LIPCA Composed of Piezoelectric Ceramic and Fiber Composite Layers

ABSTRACT

본 논문에서는 카본/에폭시, PZT 세라믹 박판, 글래스/에폭시 층으로 이루어진 곡면형 복합재료 작동기(LIPCA)의 설계, 제작 및 성능시험에 대한 연구 성과를 제시하고 있다. LIPCA의 큰 요점은 기존 THUNDER의 성능을 유지하면서 이를 경량화 하기 위하여 THUNDER의 금속 층을 상대적으로 가벼운 섬유 강화 복합재료로 대체하는 것이다. 이러한 경량화 작업으로 LIPCA는 기존 THUNDER 보다 약 30~40% 정도의 무게를 감소시킬 수 있으며, 복합재료의 특성에 따라 설계의 유연성을 가질 수 있는 장점이 있다. 또한, 에폭시 수지를 사용함으로써 접착제 없이 평판 몰드에서 오토클레이브에서 177°C로 경화되어, 탈형된 후 충분한 곡률을 형성하였다. 작동 성능 시험에서, LIPCA는 기존 THUNDER보다 작동변위가 향상됨을 보였다

기호설명

- $\{\sigma\}$: 응력 벡터 (N/mm²)
- $\{\epsilon\}$: 변형률 벡터
- $\{E\}$: 적용 필드 벡터 (V/mm)
- $\{d\}$: 압전 변형률계수 (mm/V)
- $\{S\}$: 순응도계수 벡터 (mm²/N)
- $\{\alpha\}$: 열팽창계수 벡터 (1/°K)
- ΔT : 온도변화 (°K)
- $\{N^T\}$: 온도변화에 의한 결과 힘 (N/m)
- $\{M^T\}$: 온도변화에 의한 결과 모멘트 (N·m/m)
- $\{N^A\}$: 전압변화에 의한 결과 힘 (N/m)
- $\{M^A\}$: 전압변화에 의한 결과 모멘트 (N·m/m)

작기 때문에 큰 작동변위를 나타내지 못하여 작동기의 조건을 만족시키지 못하고, 작동기 가 반복적으로 작동할 때의 피로문제를 해결해야 하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 많은 노력이 이루어지고 있으며, 이러한 노력으로 bimorphs, RAINBOW¹, patches, THUNDER^{2,3} 등이 제작되어 사용되고 있다. 특히 THUNDERTM는 낮은 입력 전압에 비해 큰 작동변위를 발생시킬 수 있는 압전 세라믹 작동기로 금속재료와 압전 박판으로 적층되어 있다.

본 연구에서는 THUNDERTM의 성능을 향상시킨 소형 경량 작동기인 LIPCA를 제시하였다. LIPCA는 THUNDERTM와 유사한 곡률 형상을 가지나 기존의 THUNDERTM보다 가벼우며 쉽게 제작될 수 장점을 가지고 있고, 압전 세라믹이 절연된 카본/에폭시와 글래스/에폭시 사이에 들어 있어 전기적으로 안전하다. 이러한 LIPCA 시스템은 소형 항공기, 소형 헬리콥터 블레이드, 해양구조물, 우주구조물 등과 같이 높은 작동력과 작동변위를 필요로 하는 구조물에 경량 작동기로 사용될 수

1. 서론

최근 항공기나 해양 구조물의 능동진동 제어를 위하여 고성능 작동기로 큰 응력을 발생시키는 단일 압전 작동기가 널리 연구되고 있다. 그러나, 이 단일 압전 작동기는 변형률이

* 건국대학교 기계항공공학부, ** 경북대학교 기계공학부, *** 동국대학교 기계공학부

있으며, 진동·음향·공력제어분야, 그리고 각종 스위치 및 동적제어장치에 적용될 수 있을 것이다. 또한 복합재료층의 방향성 및 크기를 조절함으로써 설계의 유연성을 가질 수 있고, 적층방법에 따라 시위선을 따라 다른 곡률을 가지는 에어포일 형상을 쉽게 만들 수 있는 장점이 있다.

2. LIPCA의 설계 및 구성

2.1. LIPCA 설계 제작 및 성능 실험

작동기가 큰 작동변위를 가지기 위해서는 큰 곡률을 형성하는 것이 매우 효과적이다. 본 연구에서는 높은 성형온도에서 성형된 후 큰 곡률을 얻는 작동기를 설계하기 위해 각 층사이의 열팽창계수(CTE)의 차가 큰 재료로 이루어진 비대칭 적층판을 Figure 1과 같이 선택하였다

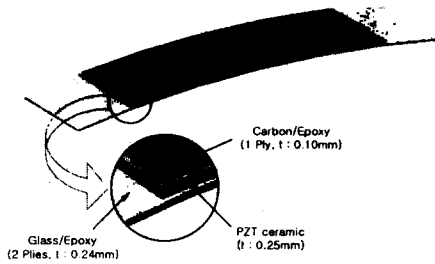


Figure 1. Schematic Design of a Typical LIPCA

먼저 가장 윗 층에 섬유방향으로 열팽창계수가 거의 없는 고탄성 탄소 섬유 복합재료, PZT 세라믹 박판 (CTE : $\alpha = 2.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, Piezoelectric strain coefficients : $d_{31} = -176 \times 10^{-12} \text{ m/V}$), 그리고 맨 아래층에 높은 열팽창계수($\alpha = 14.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)를 가진 글래스/에폭시 층을 순서대로 적층하였다. 각층의 물성치는 Table 1과 같다.

이러한 LIPCA 설계의 가장 큰 요점은 기존의 THUNDER의 큰 작동력과 작동변위 성능을 유지하면서 이를 경량화 하기 위하여 THUNDER의 금속 층을 상대적으로 가벼운 섬유 강화 복합재료로 대체하는 것으로, 이 결과 30~40%의 경량화를 이룰 수 있었다.

또한, LIPCA는 에폭시 수지 프리프레그를 사용하여 접착제 없이 제작할 수 있는 장점이 있다. 압전재료의 양면에 각각 탄소/에폭시와 글래스/에폭시 섬유 복합재료를 적층하여 에폭시의 접착력을 이용하였다. 그리고, 세라믹 박판에 전압을 가할 수 있도록 세라믹 층과 연결된 리드선을 글래스/에폭시 층위로 설치하여 오토클레이브에서 177°C 로 경화하였으며, 이렇게 제작된 시편은 Figure 2와 같다.

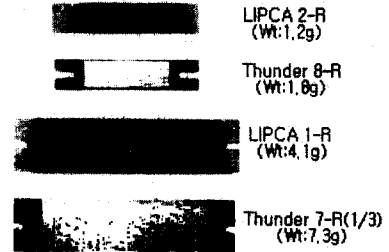


Figure 2. LIPCA and THUNDER

Figure 3은 LIPCA의 작동 성능 실험 장치로, 작동기를 지지하는 지그, 입력 전압을 공급하는 고전압 발생기(Face International TD-2 Power Supplier)와 작동변위 측정을 위한 비 접촉 레이저 변위 측정기(Keyence LB-081, 1001), 그리고 컴퓨터를 통해 작동변위를 저장하는 PC로 구성하였다.

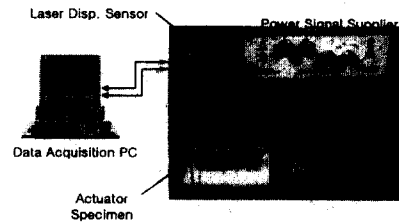


Figure 3. Experimental Setup for Actuation Test

먼저 작동기를 양단 고정 조건을 만족 시키기 위하여, 작동기의 양끝을 기존의 THUNDER(TA mounting plate, Face International)의 작동 성능 측정용 지그 위에 놓고 작은 볼트로 고정시킨 후 입력전압을 1Hz 사이클 100Vpp(peak-to-peak) 부터 400Vpp까지 가하였다. 그리고 작동기에서 최대

작동변위를 나타내는 중앙점의 작동변위를 비접촉 변위 측정기를 이용하여 측정하였다. 기존 THUNDER와 이의 개량형인 LIPCA의 작동성능을 비교하기 위하여 두 작동기의 실험조건 및 작동기 치수를 같은 조건으로 하였다.

2.2. 수학적 해석

탄소/에폭시, PZT(Piezoelectric ceramic), 유리/에폭시 등을 동시성형(co-cure) 형태로 제작하여 작동기로 사용하는 LIPCA를 해석하기 위해서는 초기 곡률해석과 압전재료의 작동 거동에 대한 두 단계의 과정이 이루어져야 한다. 그러므로 본 논문에서는 Classical Lamination Theory에 의한 초기 곡률해석을 수행하였다.

압전 재료가 탄성한도 내에서 거동할 때의 압전 변형률은 열 변형률과 유사하게 모델링 할 수 있다. 압전 재료는 일방향 복합재료 적층판과 같이 직교이방성 재료로 가정될 수 있으며, 이에 따라 작동기의 전체 변형률을 식(1)과 같이 기계적 변형률, 열 변형률, 그리고 압전 변형률의 합으로 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{11} \\ 0 & 0 & d_{11} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{51} & 0 \\ d_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_3 \end{Bmatrix} \Delta T \quad (1)$$

또한 LIPCA에 작용하는 전체 결과 힘과 모멘트는 전압 변화에 의한 작동기 힘과 모멘트, 열팽창계수 차에 의한 힘과 모멘트, 그리고 외력과 모멘트의 합으로 표현되며, 이 결과 힘과 모멘트는 적층판의 변형률과 곡률의 변화를 야기시키게 된다. 외력이 없는 경우 작동기의 곡률과 작동변위는 식(2)를 이용하여 같이 구할 수 있다. 그러나 이 논문에서는 압전거동에 의한 변형은 생각하지 않고 초기 곡률해석만 수행하므로 압전거동에 의한 힘과 모멘트, N^A , M^A 는 0으로 생각할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N^T + N^A \\ M^T + M^A \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서

$$\{N^T\} = \begin{Bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{Bmatrix} = \int [\bar{Q}]_k \{\alpha\}_k \Delta T dz, \quad (3)$$

$$\{M^T\} = \begin{Bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{Bmatrix} = \int [\bar{Q}]_k \{\alpha\}_k \Delta T z dz \quad (4)$$

여기에서 구한 곡률로부터 곡면형 LIPCA 중앙부의 예측 높이는 식 (5)와 같다.

$$\Delta h = \rho \left(1 - \cos\left(\frac{l}{2\rho}\right)\right) \quad (5)$$

여기에서

$$\rho = \frac{1}{x} \quad \text{: 반지름}$$

$$l \quad \text{: LIPCA의 길이}$$

3. 실험 결과 및 토의

외부 하중이 작용하지 않는 조건에서 LIPCA와 THUNDER의 작동변위와 무게는 Figure 4와 같다. LIPCA 1-R의 경우 같은 치수의 THUNDER 7-R (1/3)과 비교하여 무게는 약 44%의 경량화와, 60% 정도의 큰 작동변위를 나타냈다. 그리고 LIPCA 2-R은 같은 치수의 THUNDER 8-R과 비교하여 무게는 약 33% 정도 경량화 되었으며, 작동변위는 10% 정도 크게 나왔다. 위의 결과를 토대로 THUNDER의 금속층을 가벼운 섬유 복합재료 층으로 대체함으로써 무게의 경량화와 작동변위의 향상을 확인할 수 있다.

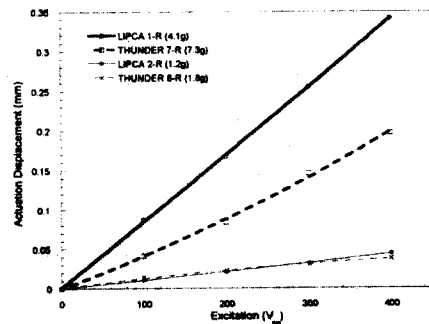


Figure 4. Comparison of Displacement between LIPCA and THUNDER

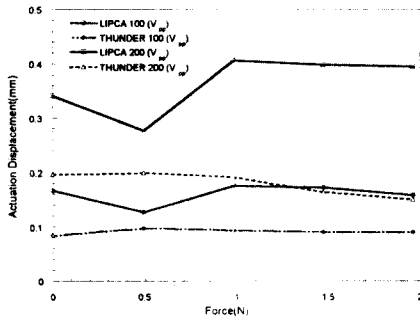


Figure 5. Comparison of Displacement between LIPCA 1-R and THUNDER 7-R with the center loading and the fixed end supporting condition

Figure 5는 선하중(pre-load)이 가해진 상태에서 가진 전압 100Vpp와 200Vpp까지 작동변위를 나타내고 있다. 선하중을 0N에서 1.96N까지 0.49N간격으로 작동기의 증상에 가한 결과, LIPCA는 THUNDER보다 30% 이상의 작동변위를 나타내었다. 실험을 통하여 중심선에 1.96N의 하중을 가했을 때 LIPCA의 굽은 형상은 거의 평평하게 되었으며, 1.96N이상에서는 snap through 현상이 발생하였다. 그러나 THUNDER 7-R(1/3)의 경우 9.8N의 하중이 가해졌을 때 굽은 형상이 평평하게 되었다. 이러한 현상으로 LIPCA보다 THUNDER가 외부 하중에 대한 지지력이 더욱 크다는 알 수 있다.

실험에서 나타난 뚜렷한 현상으로 중심선에 가한 하중이 증가하면서 작동변위가 일정한 증감을 보이지 않고 오르내리는 현상을 나타내었다. 그리고, LIPCA 1-R의 경우, 선 하중이 200Vpp에서 1.96N까지 증가할 때 작동변위가 증가하고, 이러한 현상은 작동기에 하중이 가해질 때 초기 곡률의 변화를 유발할 수 있으며, 이는 임의의 선하중 범위 안에서 선하중이 증가할 때, 압전 세라믹의 작동 성능이 감소하지 않을 가능성을 제시하는 것이다.

4. 결론

본 연구에서는, THUNDER의 금속층을 상대적 으로 가벼운 섬유 복합재료로 대체한 새로운 형태의 소형 경량 작동기인 개량형 LIPCA를 제시하였고, 성능 실험을 하였으며, 이를 같은 치수를 가진 THUNDER와 동일 실험 조건에서

성능을 비교하였다. 성능 실험 결과, 개량형 LIPCA는 기존의 THUNDER보다 30~40% 정도의 경량화와 작동변위 향상을 나타내었다. 이러한 결과에 따라, LIPCA를 더욱 개량하면 소형 항공기의 제어판 구조물이나 헬리콥터 블레이드 등과 같이 높은 작동력, 작동변위를 필요로 하는 구조물에 고성능 경량 작동기로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. G. H. Haertling, "Rainbow Actuators and Sensors: A New Smart Technology," *Proc. of SPIE Conference*, San Diego, CA, 3-4 March, Vol 3040, pp.81-92, 1997.
2. K. M. Mossi and R. P. Bishop, "Characterization of Different types of High Performance THUNDER
3. Hellbaum, R., Bryant, R. G., and Fox, R. L. "Thin Layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor." United States Patent No. 5,632,841, 1997.
4. M. W. Hyer and A. Jilani, "Predicting the Deformation Characteristics of Rectangular Unsymmetrically Laminated Piezoelectric Materials," *Smart Materials and Structures* 7, pp.784-791, 1998
5. R. M. Barrett and R.S. Gross, "Recent advances in adaptive aerostructures: Designing for flight control", *roc. of 4th ESSM and 2nd MIMR Conference*, Harrogate, 6-8 July, pp. 17-24, 1998.
6. C. Shakeri, C. M. Bordonaro, M. N. Noori and R. Champagne, "Experimental Study of THUNDER: A New Generation of Piezoelectric Actuators", *Proc. of SPIE Conference*, Newport Beach, CA, 1-5 March, Vol 3675-07, 1999.

Table 1. Basic Properties of the LIPCA Element Layers

Properties		Piezo-electric ceramic	Carbon/Epoxy	Glass/Epoxy
Modulus	E_1 (GPa)	59.9	231.2	21.7
	E_2 (GPa)	59.9	7.2	21.7
	G_{12} (GPa)	23.0	4.3	3.7
	ν_{12}	0.3	0.29	0.13
CTE	α_1 ($1 \times 10^{-6}/^\circ\text{K}$)	2.0	-1.58	14.2
	α_2 ($1 \times 10^{-6}/^\circ\text{K}$)	2.0	32.2	14.2

Table 2. Dimensions and weight of the manufactured LIPCA

	Mid size		Small size	
	LIPCA 1-R	THUNDER 7-R (1/3)	LIPCA 2-R	THUNDER 8-R
Weight (g)	4.1	7.3	1.2	1.8
Radius after cure (mm)	308.8	192.1	312.5	176.1
Central Height Δh (mm)	2.03	3.02	0.41	0.79
Size of piezo-ceramic L×W×t (mm)	71×23×0.25	71×24×0.25	38×12.7×0.25	38×12.7×0.20
Size of bottom layer L × W×t (mm) -	100×24×0.24 (Glass/Epoxy)	97.5×24×0.15 (Stainless Steel)	64×14×0.24 (Glass/Epoxy)	64×14×0.15 (Stainless Steel)
Size top layer L×W×t (mm)	70×23×0.1 (Carbon/Epoxy)	71×24×0.025 (Aluminum)	37×13×0.1 (Carbon/Epoxy)	38×12.7×0.025 (Aluminum)
Total thickness (mm)	0.59	0.58	0.59	0.48

Table 3. Comparison of Experimental and Predicted Curvature and Central height

	Radius of Curvature		Central Height	
	Experimental (mm)	Predicted (mm)	Experimental (mm)	Predicted (mm)
LIPCA 1-R	308.8	227.9	2.03	2.8
LIPCA 2-R	312.5	227.9	0.41	0.79
THUNDER 7-R (1/3)	192.1	238.9	3.02	2.6
THUNDER 8-R	176.1	238.9	0.79	0.75