

論文

압전 복합재료 작동기 LIPCA에 대한 성능 비교실험 및 분석

김균열*, 박기훈*, 윤광준*, 박훈철**

Experimental performance evaluation and comparison for lightweight piezo-composite actuator LIPCA

Kyun Youl Kim*, Ki Hoon Park*, Kwang Joon Yoon*, Hoon Cheol Park**

ABSTRACT

This paper is concerned with the performance evaluation and comparison analysis for several kinds of LIPCA (Lightweight Piezo-Composite Actuator) device system. LIPCA device system is composed of a piezoelectric ceramic layer and fiber reinforced light composite layers, typically a PZT ceramic layer was sandwiched by a top fiber layer with low CTE (coefficient of thermal expansion) and base layers with high CTE. To investigate the effect of lay-up structure of the LIPCA on the actuating performance, four kinds of actuator with different lay-up stacking sequence were designed, manufactured, and tested. The performance of each actuator was evaluated using an actuator test system consisted of an actuator supporting jig, a high voltage actuating power supplier, and a non-contact laser measuring system. From the comparison of the performance of the LIPCA prototypes, it was found that the actuator with higher coefficient of unimorph actuator can generate larger actuating displacement.

초 록

본 논문은 몇 가지 종류의 압전 복합재료 작동기 LIPCA의 성능 시험 및 비교에 관한 것이다. LIPCA는 압전 세라믹을 중심으로 상층부는 탄성계수가 크면서 열팽창계수가 낮은 섬유강화 복합재료 층이, 하층부는 탄성계수가 작으면서 열팽창계수가 큰 섬유강화 복합재료 층으로 구성되어 있다. 작동기의 성능 검증을 위해 작동 지그 및 전압 공급 장치 그리고 비접촉 레이저 센서로 이루어진 실험 시스템을 구성하였다. 성능 비교시험 결과 검증실험으로부터 압전 작동기의 작동성능은 전기 작동 재료층이 중립면으로부터 멀리 벗어나게 위치하면서, 동시에 적층판의 전체 굽힘 강성을 작게 하면 극대화할 수 있다는 사실을 입증하였다.

Key Words: 압전 세라믹(piezoelectric ceramic), 섬유강화 복합재료(fiber composite), 유니모프 작동기(unimorph actuator), 작동기 성능시험(actuator test)

1. 서 론

지능형 작동기는 항공기, 미사일 구조물의 조종면 작동

이나 유연 대형 우주 구조물의 진동제어를 위해 사용되는 것으로, 최근 항공기의 조종면 작동이나 해양구조물의 진동제어를 위하여 단일 압전 작동기(monolithic piezoelectric

* 건국대학교 항공우주공학과 대학원

** 건국대학교 기계항공우주공학부, 교신저자(E-mail:kjyoon@konkuk.ac.kr)

actuator)가 널리 연구되고 있다. 이와 같은 연구가 가시화되기 위해서는 보다 큰 작동력과 작동변위를 가지는 지능형 작동기 개발이 필요하다.

현재 가장 많이 사용되고 있는 작동기는 바이모프(Bimorphs) 압전 작동기 RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafer)[1,2]와 박판 형태의 유니모프(Unimorph) 압전 작동기 THUNDER(THin layer UNI-morph DRIVER)가 있다[3-7].

이중 THUNDER 작동기는 다른 작동기에 비하여 상대적으로 큰 작동변위를 발생시킬 수 있는 압전 세라믹 작동기이다. 적층 구조는 스테인리스 스틸 위에 고온 경화용 접착제(LaRC-SI)[8]를 바른 후 압전 세라믹을 놓고, 그 위에 알루미늄 박판을 덮어 325°C에서 압력을 가하여 경화시킨 후 상온으로 냉각시키면, 각 구성요소간의 열팽창 계수 차이로 인하여 곡률을 가지게 된다[9]. 이러한 기하학적인 형상 때문에 전기장이 압전 세라믹 층에 인가되면, 압전 세라믹 층의 변형은 작동기의 곡률 변화를 가져와 작동기 중앙부에서 수직방향 변위를 발생시킨다. 이와 같은 특성을 가진 THUNDER 작동기는 현재까지 개발된 유니모프 작동기중 가장 성능 좋은 작동기로 인정 받고 있다.

섬유강화 복합재료와 박판 형태의 압전 세라믹을 이용한 유니모프 작동기 LIPCA는 THUNDER보다 경량이면서 큰 작동력과 작동변위를 가지는 작동기이다[11-12].

본 논문에서는 보다 경량이면서 큰 작동력과 작동변위를 가지는 유니모프 작동기 LIPCA의 적층재료 및 적층순서를 설계하고, 열변형에 의한 잔류응력 분포를 예측하였으며, 다양한 종류의 LIPCA를 제작하여 작동성능을 비교 분석 하였다.

2. 압전 작동기 LIPCA의 설계

다양한 지능형 작동기들이 개발되었지만 작동변위 발생 정도를 수학적 모델로 설명한 논문은 없었다. 본 논문의 저자들은 간단한 작동 모델을 참고문헌[4,11]에 제시한 바 있으며, 일반적으로 작동변위는 전기장이 전기작동 재료층에 인가되었을 때 내부에서 형성되는 굽힘 모멘트에 의해 유발된다. Fig. 1과 같은 보(Beam) 구조물에 내부 굽힘 모멘트가 형성될 경우 작동기의 곡률 변화를 보의 변형이론식에 의해 식 (1)과 같이 표현될 수 있다[4].

$$\Delta\kappa = c_{ua} \cdot E_a \cdot d_{31} \cdot \Delta V \quad (1)$$

식 (1)에서 c_{ua} 는 유니모프 작동기 상수(coefficient of unimorph actuator)로 식 (2)와 같이 정의되었다.

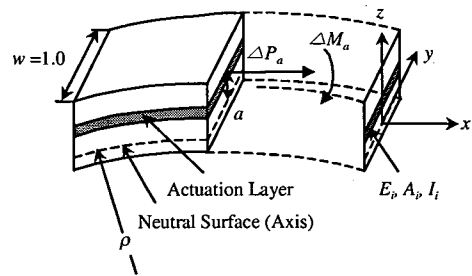


Fig. 1 Schematic for the curvature change of a laminated beam with electro active layer.

$$c_{ua} = \frac{a}{D} \quad (2)$$

여기서, a 는 작동 팔 길이(moment arm), D 는 적층판의 굽힘 강성도(bending stiffness)이고 E_a 는 작동층의 탄성계수, d_{31} 은 압전상수(Piezoelectric charge coefficient)이고, ΔV 는 전기작동층에 걸리는 전압이다.

식(1)의 물리적 의미는 동일한 전기작동 재료층을 사용할 경우, 작동층을 중립축(neutral axis)으로부터 멀리 떨어지게 위치 시키고, 작동기 단면의 전체 굽힘 강성을 작게 함으로써 c_{ua} 값을 크게 하여 작동기의 성능을 향상할 수 있는 것이다.

우수한 작동기를 제작하기 위해서는 무엇보다도 전기적으로 안정되어야 하며, 외부 충격에 대해서 전기 작동 재료층이 보호되어야 한다. 또한 작동기 성능의 극대화를 위해 식 (1)의 물리적 의미를 고려하여 단면 형상을 최적화시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 네 가지 종류의 LIPCA를 제작하여 각각의 성능을 비교하였다. LIPCA에 사용된 섬유강화 복합재료는 일방향 탄소/에폭시(UPN-116B, SK Chemicals, Korea), 일방향 케블라/에폭시(KU075NS Hankuk Fiber, Korea), 직조형 유리/에폭시(GEP-108 SK Chemicals, Korea)가 있으며, 전기작동 재료로는 박판형 압전 세라믹(3195HD, CTS Co, USA)을 사용하였다.

LIPCA의 초기 형태 LIPCA-C1은 Fig. 2와 같은 단면 형상을 가지고 있으며, 경량 섬유강화 복합재료 사용으로 인하여 THUNDER 보다 약 40% 경량화 되었다. 두 번째 형태인 LIPCA-K는 Fig. 3과 같은 단면 형상을 가지며, 일방향 탄소/에폭시 대신 일방향 케블라/에폭시를 사용하였다. 세 번째 형태인 LIPCA-CK는 Fig. 4와 같은 단면 형상을 가지며, 작동기 내부의 전기작동 재료층이 보다 많이 적층판의 중립면으로부터 멀리 위치하도록 설계 하였다. 마지막으로 제작된 LIPCA-C2는 Fig. 5와 같이 단순한 적층 구조를 가지며, 전기적으로도 안전한 단면 형상이다.

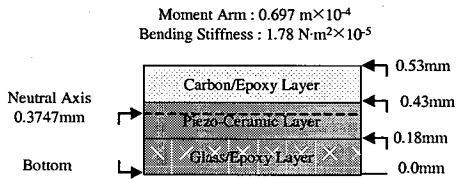
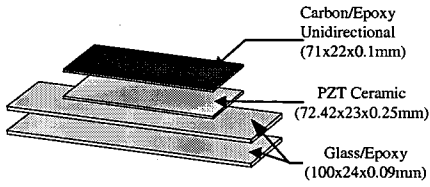


Fig. 2 Geometry and position of neutral axis of LIPAC-C1.

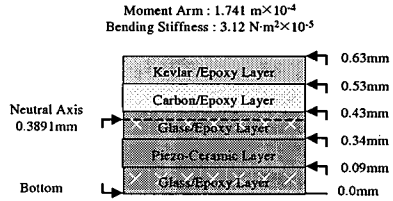
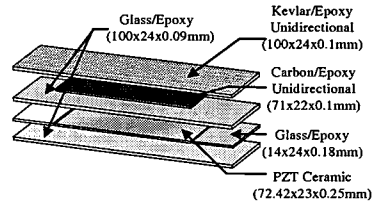


Fig. 4 Geometry and position of neutral axis of LIPAC-CK.

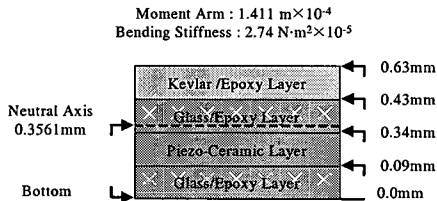
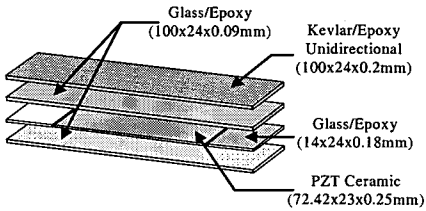


Fig. 3 Geometry and position of neutral axis of LIPAC-K.

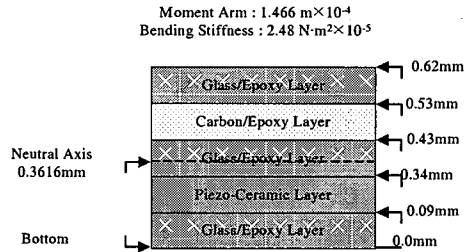
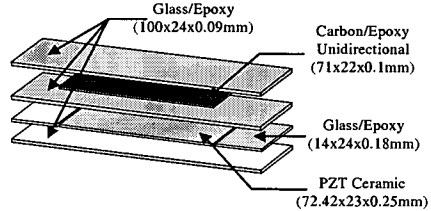


Fig. 5 Geometry and position of neutral axis of LIPAC-C2.

LIPCA-C1을 제외한 작동기는 기본적으로 전기작동 재료층을 유리/에폭시 층 사이로 삽입시켰다. 이와 같은 단면 형상 설계는 층간 분리 현상, 전기적인 합선, 외부의 충격 등에 대한 작동기의 손상을 방지하기 위한 것이다.

3. 압전 작동기 LIPCA 제작

LIPCA는 경량 섬유강화 복합재료를 사용함으로써 경량화는 물론 작동기의 방향성 및 크기를 임의로 변경할 수 있게 되어 설계의 유연성을 가지고 있다. 또한 접착제의 역할도 하는 에폭시 프리프레그를 이용하기 때문에 접착층이 따로 삽입되지 않아 제조 공정을 단순화 할 수 있다.

참고논문[12]에서와 같이 LIPCA를 평판 몰드위에 적층시킨 후 진공 오븐 성형법을 이용하여 경화시킨 후 상온으로 냉각시키면, 각 구성요소의 열팽창 계수 차이로 인하여 곡률을 가지게 된다. Fig. 6은 제작된 LIPCA-C1, LIPCA-C2, LIPCA-K, LIPCA-CK의 형상이다.

4. 잔류응력 해석

본 절에서는 압전 작동기의 수직 단면 층에서 발생하는 열변형과 잔류응력 분포를 고전 적층 이론을 이용하여 예측하였다.

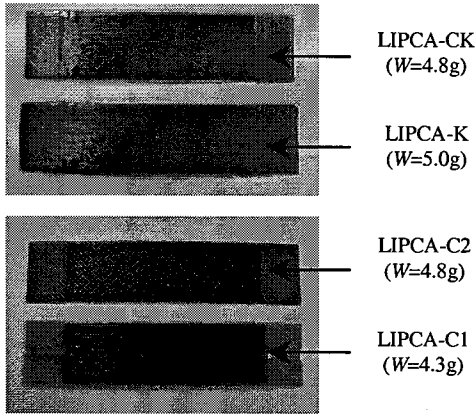


Fig. 6 Manufactured LIPCA-C1, C2, K, CK.

압전 작동기의 안정된 성능을 보장하기 위해서는 인장응력에 취약하고 압축응력에 강한 압전 세라믹의 특성을 고려해야 한다. 때문에 압전 작동기의 단면 설계시, 큰 작동력과 작동변위를 기대하기 위해서는 성형 후 압전 세라믹 재료층에는 압축응력이 존재하도록 설계할 필요가 있다.

고전 적층 이론을 이용하여 LIPCA의 수직 단면 층에서 발생하는 잔류응력 분포를 x,y축에 대하여 예측하였다 [13,14]. 다음 식은 x-y 평면에서 k번째 층의 잔류응력을 나타내는 식이다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \left[\begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \end{Bmatrix} z - \begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_{xy} \end{Bmatrix} E_k - \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{Bmatrix} \Delta T \right] \quad (3)$$

여기서, $\{\sigma\}$ 는 응력, $\{\epsilon\}$ 는 변형률, $\{K\}$ 는 곡률을 나타내고, $\{d\}$ 는 x-y 좌표 평면에서의 압전 상수, $\{\alpha\}$ 는 x-y 좌표 평면에서의 열팽창 계수를 나타낸다. $[\bar{Q}]$ 는 변환 강성도 행렬이고, z 는 중앙면으로부터의 거리이며, E_k 는 압전재료층 두께방향 공급 전기장의 크기이고, ΔT 는 외부 환경의 온도변화를 나타낸다.

Fig. 7에서 보여주는 바와 같이, LIPCA-C1의 경우 압전 세라믹 층의 아래 면에는 비교적 큰 압축응력이 작용되고 있지만 윗면으로 갈수록 인장응력이 작용되는 응력분포로 바뀌는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9에 제시된 LIPCA-K, LIPCA-CK의 압전 세라믹 재료층의 잔류응력 분포는 x축 방향에 대해서는 압축응력만이 작용되고 있는 반면, y축 방향에 대해서는 인장응력과 압축응력이 동시에 작용되고 있다. Fig. 10의 LIPCA-C2의 경우 응력분포는 압전 세라믹 재료층의 x,y축 모든 방향에 대해서 압축응력이 작용되고 있다.

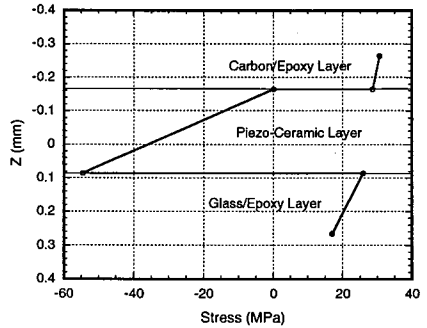
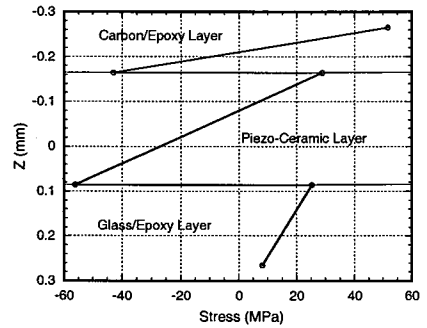


Fig. 7 Residual stress of LIPCA-C1 laminate section.

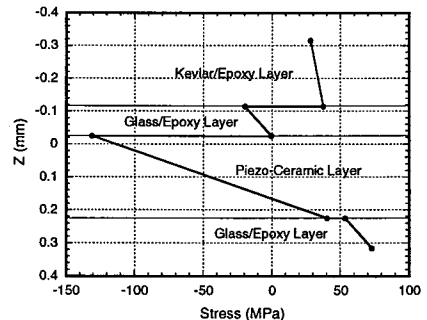
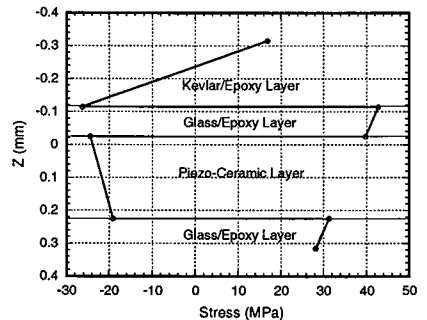


Fig. 8 Residual stress of LIPCA-K laminate section.

Fig. 7~10과 같이 작동기의 x,y축 방향에 대한 잔류응력 분포가 서로 다른 이유는 이방성이 강한 섬유강화 복합재료를 사용하였기 때문이다.

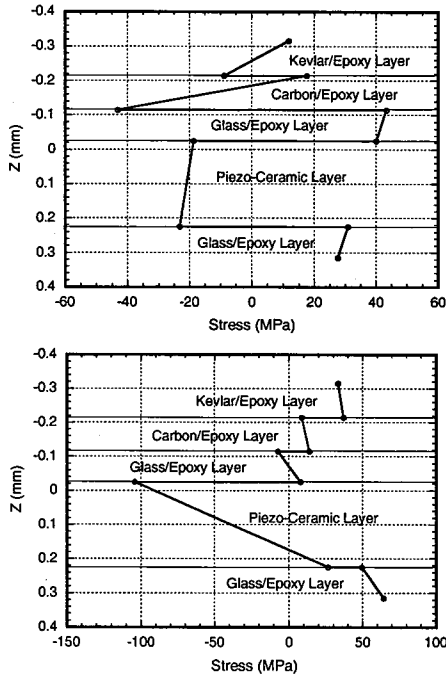


Fig. 9 Residual stress of LIPCA-CK laminate section.

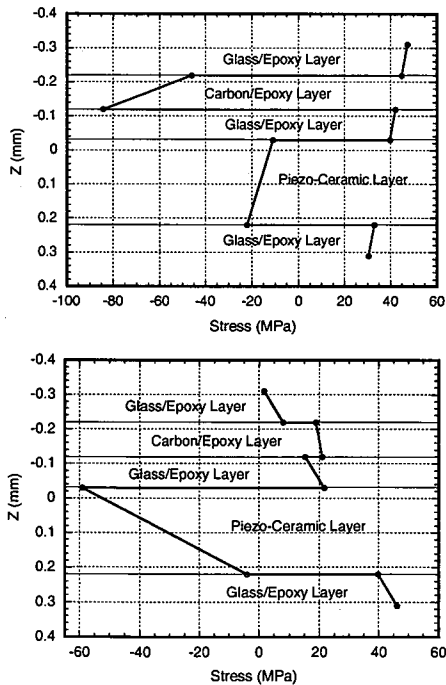


Fig. 10 Residual stress of LIPCA-C2 laminate section.

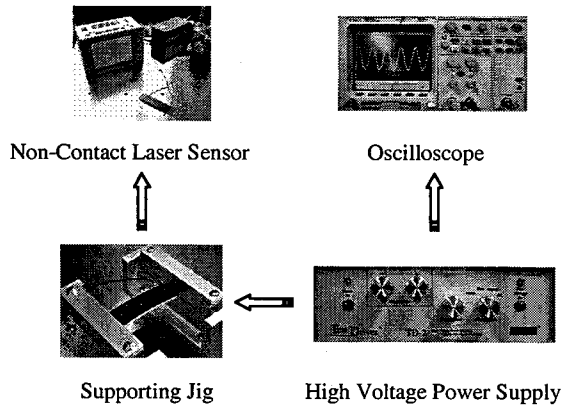


Fig. 11 Experimental setup for actuator test.

5. 시험장치 및 성능 시험

제작된 LIPCA의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 11과 같이 작동기 지지대, 고전압 공급기(TD-2 Power Supplier, Face International Co.), 비접촉 레이저 변위 측정기(Keyence LK-081, RJ-800), 오실로스코프(HP 54622A)로 이루어진 실험 시스템을 구성하였다.

Fig. 11과 같은 단순지지 상태의 작동 지그에 LIPCA를 92.0mm 지지 폭으로 단순지지 시킨 후 고전압 공급기를 통해 ± 50 , ± 100 , ± 150 , $\pm 200V$ (400V peak-to-peak)의 교류 전압을 1.0Hz로 압전 재료의 전극에 공급하면 작동기 중앙부에서 수직방향의 변위가 발생된다. 이와 같이 발생된 작동 변위는 비접촉 레이저 변위 측정기를 통하여 측정된다.

5.1 무게 비교

제작된 작동기들의 무게 및 전체 두께는 Table 1에서와 같이 비교 측정하였으며, 작동기 내부의 증립축 위치를 예측하였다.

제작된 LIPCA-C1, LIPCA-K, LIPCA-CK, LIPCA-C2의 무게는 Table 1에서와 같이 4.3g, 5.0g, 4.8g, 4.8g 이다. 참고 논문[12]을 보면 LIPCA는 동종의 THUNDER 보다 최고 41% 경량화 되었음을 확인할 수 있다. 본 논문에서 소개된 네 가지 종류의 작동기는 모두 5.0g 이하의 무게를 가지는데 이는 경량 섬유강화 복합재료를 작동기의 구조재료로 사용하였기 때문에 가능하였다.

각각의 작동기가 LIPCA-C1과 비교해 0.5g~0.7g의 무게 차이가 나는 이유는 층간 분리, 전기적 합선, 외부 충격에 대한 보호를 위해 Fig. 3~6과 같이 직조형 유리/에폭시를 작동기의 끝 부분까지 연장하였기 때문이다.

Table 1 Position of neutral axis and measured of thickness, weight

Specimens	Measured		Predicted
	Thickness	Weight	Neutral axis
	t (mm)	W (g)	\bar{Y} (mm)
LIPCA-C2	0.62	4.8	0.3616
LIPCA-CK	0.63	4.8	0.3891
LIPCA-K	0.63	5.0	0.3561
LIPCA-C1	0.53	4.3	0.3747

Table 2 Comparison of actuator performances and characteristics

Specimens	c_{ua}	Actuator Displacement at $\pm 200V$	
	α/D (1/N·m)	δ_{max} (mm)	
LIPCA-C2	5.91	1.1552	
LIPCA-CK	5.58	1.0266	
LIPCA-K	5.16	0.9340	
LIPCA-C1	3.92	0.4274	

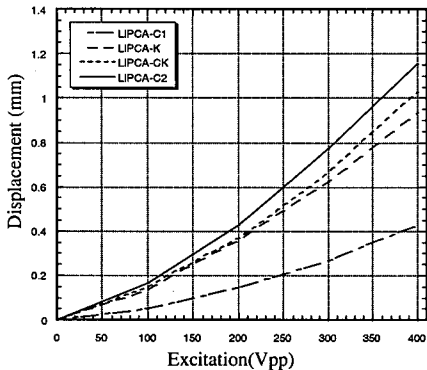


Fig. 12 Actuation displacement at simply supported condition.

5.2 작동 성능 비교

Fig. 12는 LIPCA에 $\pm 50, \pm 100, \pm 150, \pm 200V$ 의 교류전압을 1.0Hz로 공급할 경우 각 단계에서 발생하는 수직방향 변위를 측정된 것이다. 본 논문에서는 섬유강화 복합재료로 이루어진 LIPCA 작동기의 작동 변위만을 비교, 분석하였다. Fig. 12의 작동변위는 비접촉 레이저 변위 측정기를 이용하여 각 단계에서 발생하는 수직방향 변위를 5회 반복 측정된 것이며, 표준 편차를 포함하고 있다.

Table 2는 LIPCA에 $\pm 200V$ 의 동일한 교류 전압을 1.0Hz로 공급할 경우의 작동변위를 비교한 것이다. 여기서 LIPCA-C1을 비교 기준으로 할 경우 LIPCA-K, LIPCA-CK, LIPCA-C2의 작동변위는 각각 119%, 140%, 170% 증가되었다. 이와 같이 압전 작동기의 작동변위는 동일한 전기작동

재료층을 사용할 경우 Fig. 1과 같이 전기작동 재료층을 중립축으로부터 멀리 벗어나게 위치시키고, 단면의 전체 굽힘 강성을 작게 함으로써 증가시킬 수 있다.

LIPCA-C1의 경우를 보면 중립축이 전기작동 재료층 안쪽에 위치하는 것을 Fig. 2를 통하여 확인할 수 있다. 반면 LIPCA-K, LIPCA-CK, LIPCA-C2의 경우는 Fig. 3~5에서와 같이 중립축이 전기작동 재료층 바깥쪽에 위치하고 있어 큰 굽힘 모멘트를 유발할 수 있음을 식 (4)를 통하여 설명할 수 있다.

Table 2는 LIPCA의 단일 작동기 상수 값을 작동변위와 비교한 것이다. 여기서, LIPCA-C1을 비교 기준으로 할 경우 LIPCA-K, LIPCA-CK, LIPCA-C2의 c_{ua} 값은 각각 32%, 42%, 51% 증가되었다. 이러한 비교로부터 작동기의 작동 변위는 단일 작동기 상수 c_{ua} 값이 클수록 증가한다는 것을 입증할 수 있다.

6. 결 론

압전 작동기가 지능 항공우주구조물로 사용되기 위해서는 경량이면서 동시에 큰 작동력 및 변위를 가져야 하며 극한 환경에 적응할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 압전 복합재료 유니모프 작동기 적층 재료와 순서를 효율적으로 설계함으로써 작동기의 작동변위 성능을 크게 향상시킬 수 있었다. 또한 압전 복합재료 작동기 LIPCA는 압전 세라믹을 절연 특성이 우수한 유리섬유 층 사이로 삽입시킴으로써 기존의 단일 압전 작동기가 가지고 있는 층간 분리, 전기적 합선 등의 문제점을 대부분 해결 하였다. 또한 작동기의 방향성 및 크기를 조절할 수 있게 되어 설계의 유연성 가지며, 제조공정을 단순화 하였다. 이와 같은 노력으로 LIPCA-C2 작동기는 초기의 LIPCA-C1에 비해서 무게는 0.5g 증가되었지만, 작동변위는 170% 정도 향상되었다.

또한 수학적 예측 모델을 통한 예측치를 비교 분석할 수 있는 성능 시험 시스템체계를 구성하였다. 이와 같은 이론적 배경을 바탕으로 압전 작동기 내부에서 유발되는 굽힘 모멘트의 크기 및 잔류 응력분포, 중립축의 위치 등을 파악함으로써 압전 작동기의 성능향상에 기여할 수 있었다.

검증실험으로부터 압전 작동기의 작동성능은 전기 작동 재료층이 중립면으로부터 멀리 벗어나게 위치하면서, 동시에 적층판의 전체 굽힘 강성을 작게 하면 극대화할 수 있다는 사실을 입증하였다.

개발된 경량 압전 복합재료 작동기 LIPCA는 현재까지 개발된 단일 압전 작동기 중 그 성능이 최고 수준으로 우수하여 소형 무인 항공기나 미사일의 조종면 제어 작동기로 응용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 2000년도 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 수행된 것이며, 지원에 대해 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) G.H Haertling, "Rainbow Actuators and Sensors: A New Smart Technology," *Proc. of SPIE Conference*, San Diego, CA, 3-4 March, Vol. 3040, 1997, pp. 81-92.
- 2) S.A Wise, "Displacement properties of RANINBOW and THUNDER piezoelectric actuators," *Sensor and Actuators A* 69, 1998, pp. 33-38.
- 3) 박기훈, 윤광준, 박훈철, "압전재료가 적용된 지능복합재료 작동기 개발 현황," *복합재료 학회지*, 제15권, 제2호, 2002.
- 4) 박기훈, 박훈철, 윤광준, "곡면형 압전 복합재료 작동기 LIPCA 개발," *항공우주학회지*, 제30권 제5호, 2002.
- 5) 윤광준, 구남서, 박훈철, "지능구조물용 압전재료 작동기의 연구 및 개발 동향," *항공우주학회지*, 제29권, 제1호, 2001. pp. 134-141.
- 6) K.M Mossi and R.P Bishop, "Characterization of Different types of High Performance THUNDER Actuators," *Proc. of SPIE Conference*, Newport Beach, CA, 1-5 March, Vol. 3675-05, 1999.
- 7) Jennifer L Pinkerton, Robert W Moses, "A Feasibility Study to Control Airfoil Shape using THUNDER™," *NASA Technical Memorandum 4767*, 1997.
- 8) R.G Bryant, "LaRC-SI: A soluble aromatic polyimide," *High Performance Polymers* 8, 1996, pp. 607-615.
- 9) Hellbaum R., Bryant R.G, and Fox R, "Thin Layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor," *United States Patent No. 5, 632, 841*, 1997.
- 10) K. H. Park, Y. B. Kim, Y. S. Kim, H. C. Park, K. J. Yoon, "Experimental performance evaluation of lightweight piezo-composite curved actuators," *SPIEs 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Sandiego, California, USA, 17-21 March 2002.
- 11) 구남서, 신석준, 박훈철, 윤광준, "곡면형 비대칭 압전 복합재료 작동기 LIPCA의 설계해석/제작/성능평가," *대한기계학회지*, 제25권, 제10호, 2001, pp. 1514-1519.
- 12) K.J Yoon, S. Shin, H.C Park, "Design and Manufacturing of Lightweight Piezo-composite Curved Actuator," *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, 2002, pp. 163-168.
- 13) K.J. Yoon, J.H. Chung, N.S. Goo, and H.C. Park, "Thermal Deformation and Residual Stress Analysis of Lightweight Piezo-Composite Curved Actuator Device," *SPIEs 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, California, USA, 5-8, March, 2001.
- 14) K.J. Yoon, K.H. Park, H.C. Park, and N. S. Goo, "Thermal Deformation Analysis of Curved Actuator LIPCA with a Piezoelectric Ceramic Layer and Fiber Composite Layers," *ICMAT 2001 International Conference on Materials for Advanced Technologies*, Singapore, 1-6, July, 2001.