

## 곡면형 비대칭 압전복합재료 작동기 LIPCA의 설계해석/제작/성능평가

구남서<sup>†</sup> · 신석준\* · 박훈철\*\* · 윤광준\*\*  
(2000년 10월 4일 접수, 2001년 7월 30일 심사완료)

### Design Analysis/Manufacturing/Performance Evaluation of Curved Unsymmetrical Piezoelectric Composite Actuator LIPCA

Nam Seo Goo, Seokjun Shin, Hoon Cheol Park and Kwang Joon Yoon

**Key Words :** LIPCA (Lightweight Piezo-composite Curved Actuator, 경량 압전복합재료 곡면형 작동기), Curved Unsymmetrical Laminate(곡면형 비대칭 적층판), Piezo-Electric Ceramic(압전 세라믹)

#### Abstract

This paper is concerned with design, manufacturing and performance test of LIPCA (Lightweight Piezo-composite Curved Actuator) using a top carbon fiber composite layer with near-zero CTE(coefficient of thermal expansion), a middle PZT ceramic wafer and a bottom glass/epoxy layer with high CTE. The main point of this design is to replace the heavy metal layers of THUNDER by light weight fiber reinforced plastic layers without losing capabilities to generate high force and large displacement. It is possible to save weight up to about 30% if we replace the metallic backing material by the light fiber composite layer. We can also have design flexibility by selecting the fiber direction and the size of prepreg layers. In addition to the lightweight advantage and design flexibility, the proposed device can be manufactured without adhesive layers when we use epoxy resin prepreg system. Glass/epoxy prepreps, a ceramic wafer with electrode surfaces, and a graphite/epoxy prepreg were simply stacked and cured at an elevated temperature (177 °C) after following an autoclave bagging process. It was found that the manufactured composite laminate device had a sufficient curvature after detached from a flat mold. The analysis method of the cure curvature of LIPCA using the classical lamination theory is presented. The predicted curvatures are fairly in agreement with the experimental ones. In order to investigate the merits of LIPCA, a performance test of both LIPCA and THUNDER<sup>TM</sup> were conducted under the same boundary conditions. From the experimental actuation tests, it was observed that the developed actuator could generate larger actuation displacement than THUNDER<sup>TM</sup>.

#### 1. 서론

최근 항공기나 해양 구조물의 능동진동 제어를 위하여 고성능 작동기로 큰 응력을 발생시키는 단일 압전 작동기(monolithic piezoelectric actuator)가 널리 연구되고 있다. 그러나, 이 단일 압전 작동기

는 변형률이 작기 때문에 큰 작동변위를 나타내지 못하여 변위 요구 조건을 만족시키기 어렵고, 작동기가 반복적으로 작동할 때의 피로문제를 해결해야 하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 노력으로 bimorphs, RAINBOW,<sup>(1)</sup> patches, THUNDER<sup>(2-6)</sup> 등이 제작되어 사용되고 있다. 특히 THUNDER<sup>TM</sup>는 낮은 입력 전압에 비해 큰 작동변위를 발생시킬 수 있는 압전 세라믹 작동기로 금속 재료와 압전 박판으로 적층되어 있다.

국내의 압전작동기 관련 최근 연구는 다음과 같다. 이동호, 최승복, 김재환<sup>(7)</sup>은 부품 급송 장치인 보울 파트피더의 전통적인 작동기인 전자석을

† 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부

E-mail : nsgoo@knu.ac.kr

TEL : (053)950-7314 FAX : (053)950-6550

\* 건국대학교 능동 구조/재료 (국가지정)연구실

현재 폴리메이트㈜ 근무

\*\* 건국대학교 능동 구조/재료 (국가지정)연구실

대체하고자 압전 작동기를 사용하였다. 주형달, 박현철, 황은봉<sup>(8)</sup>은 대형화 및 우주 구조물의 개념의 등장으로 낮은 고유진동수를 가지게 된 트러스 구조물의 진동 제어를 위하여 압전 작동기를 사용하였다. 이외에도 보의 진동제어 및 소음제어에 관한 연구도 수행되었다.<sup>(9,10)</sup>

본 연구에서는 금속재로 제작되는 THUNDER™의 설계 개념을 복합재료로 확장시켜 성능을 향상시킨 소형 경량 작동기인 LIPCA를 제시하였다. LIPCA는 THUNDER™와 유사하게 곡률 형상을 가지나 기존의 THUNDER™보다 가벼우며 쉽게 제작될 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 LIPCA 시스템은 소형 항공기, 소형 헬리콥터 블레이드, 해양구조물, 우주구조물 등과 같이 높은 작동력과 큰 작동변위를 필요로 하는 구조물에 경량 작동기로 사용될 수 있으며, 진동·음향·공력제어분야, 그리고 각종 스위치 및 동적제어장치에 적용될 수 있을 것이다. 또한, 복합재료 층의 방향성 및 크기를 조절 함으로써 설계의 유연성을 가질 수 있고, 적층방법에 따라 시위선을 따라 다른 곡률을 가지는 에어포일 형상을 쉽게 만들 수 있는 장점이 있다.

LIPCA의 거동을 예측하는 해석은 2 단계로 이루어진다. 첫번째는 제작에 관련된 사항으로 구성재료의 종류나 두께에 따른 성형곡률(cure curvature)을 예측하는 것이고 두 번째로는 제작된 LIPCA 작동기에 실제로 전압을 가하여 작동변위나 작동력을 예측하는 작동성능(actuating performance) 해석이다. 본 연구에서는 LIPCA의 설계 개념을 제시하는데 주요안점을 두었으며 고전 적층판 이론(classical lamination theory)에 기반을 두고 성형곡률을 예측하였다. 두 가지 크기의 LIPCA를 설계 제작하여, 성형곡률을 측정하여 및 해석치와 비교하였고 작동성능 실험을 통하여 THUNDER에 비하여 장점이 있어 실용화 가능성이 있음을 확인하였다.

## 2. LIPCA의 설계 및 해석

### 2.1 LIPCA 설계 제작

작동기가 큰 작동변위를 가지기 위해서는 큰 곡률을 형성하는 것이 매우 효과적이다. 본 연구에서는 높은 성형온도에서 성형되어 큰 곡률을 가지는 작동기를 설계하기 위해 각 층 사이의 열팽창계수(CTE)의 차가 큰 재료로 이루어진 비대칭 적층판을 Fig. 1과 같이 선택하였다.

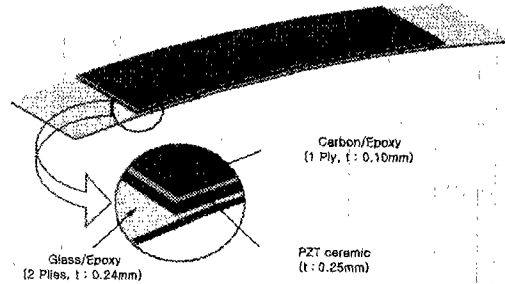


Fig. 1 Schematic Design of a Typical LIPCA

먼저 가장 위 층에 섬유방향으로 열팽창계수가 거의 없는 고탄성 탄소 섬유 복합재료를 놓고, PZT 세라믹 박판(CTE:  $\alpha = 2.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , 변형률 압전 상수:  $d_{31} = -176 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ )을 중간 층에, 그리고 맨 아래층에 높은 열팽창계수( $\alpha = 14.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )를 가진 유리/에폭시 층을 순서대로 적층하였다. 각 층의 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. 즉, 압전재료의 양면에 각각 탄소/에폭시와 유리/에폭시 섬유 복합재료를 적층하여 에폭시의 접착력을 이용하였다. 그리고, 세라믹 박판에 전압을 가할 수 있도록 세라믹 층과 연결된 리드선을 유리/에폭시 층 위로 설치하여 오토클레이브에서  $177^{\circ}\text{C}$ 로 경화하였다. 이렇게 제작된 시편은 Fig. 2와 같으며 Table 2에 자세한 제원을 나타내었다.

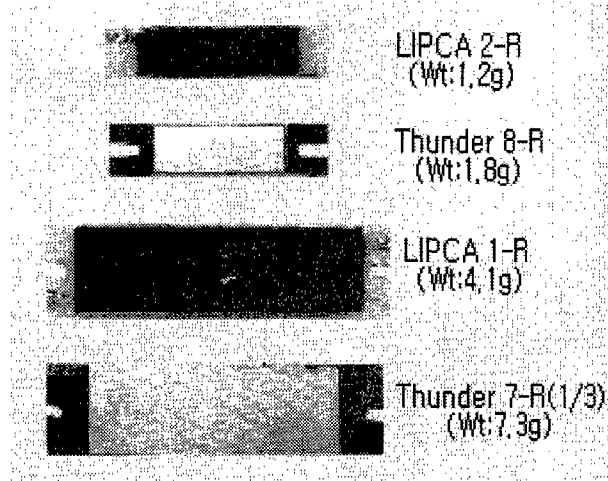
### 2.2 성형곡률 해석

탄소/에폭시, PZT(piezoelectric ceramic), 유리/에폭시 등을 동시성형(co-cure) 형태로 제작하여 작동기로 사용하는 LIPCA는 각 층의 열팽창 계수의 차이로 말미암아 곡률을 가지게 된다. 본 논문에서는 고전 적층판 이론을 사용하여 성형곡률 해석을 수행하였다.

LIPCA의 성형 후 곡률은 세 재료가 성형 온도까지 상승한 후 상온까지 식으면서 발생한 열변형을 고려하여 예측할 수 있다. 압전 재료는 일방향

**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
	$\nu_{12}$	0.3	0.29	0.13
CTE	$\alpha_1$ ( $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{K}$ )	2.0	-1.58	14.2
	$\alpha_2$ ( $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{K}$ )	2.0	32.2	14.2

**Fig. 2** LIPCA and THUNDER**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 h (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

복합재료 적층판과 같이 직교이방성 재료로 가정할 수 있다.  $X_3$  축을 폴링 방향(poling direction)으로 가정하였다. 압전재료와 복합재료에 대한 전체 변형률은 식 (1)과 같이 기계적 변형률과 열 변형률의 합으로 표시할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta T \quad (1)$$

식 (1)을 적층판의 면내 방향 성분만을 고려하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x - \alpha_x \Delta T \\ \varepsilon_y - \alpha_y \Delta T \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_k \quad (2)$$

또한 다음과 같은 열팽창에 의한 합력(resultant force,  $N^T$ )과 합모멘트(resultant moment,  $M^T$ )를 도입한다.

$$\begin{Bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{Bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \bar{Q} \end{bmatrix}_k \{a\}_k \Delta T dz \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{Bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \bar{Q} \end{bmatrix}_k \{a\}_k \Delta T z dz$$

LIPCA에 작용하는 전체 합력과 합모멘트는 열팽창계수 차에 의한 힘과 모멘트, 그리고 외력(N)과 모멘트(M)의 합으로 표현되며, 이 합력과 합모멘트는 적층판의 변형률과 곡률의 변화를 야기시키게 되고 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} N^T \\ M^T \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서, **A**, **B**, **D**는 각각 인장(extensional) 강성행렬, 연성(coupling) 강성행렬, 굽힘(bending) 강성행렬이며,  $\varepsilon^0$ ,  $\kappa^0$ 는 각각 중립면에서의 변형률 및 곡률이다.

외력이 없는 경우, 작동기 중앙면의 곡률과 변형률은 식 (5)를 이용하여 같이 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N^T \\ M^T \end{Bmatrix} \quad (5)$$

실험에서는 LIPCA의 중앙부 높이를 계속하던 곡률을 쉽게 계산할 수 있으며 식 (5)에서 구한 곡률로부터 곡면형 LIPCA 중앙부의 예측 높이는 식 (6)과 같다.

$$\Delta h = \rho \left(1 - \cos\left(\frac{l}{2\rho}\right)\right) \quad (6)$$

여기에서  $\rho = \frac{1}{\kappa}$ 는 작동기의 반지름이고,  $l$ 은 LIPCA의 길이이다.

식 (1)에서 식 (6)까지의 식을 MATLAB으로 프로그래밍하여 계산을 수행하였다. 본 연구의 해석법은 에폭시의 온도에 따른 물성치 변화와 경화반응(cure kinematics)을 고려하지 않고 상온 열팽창계수만을 고려하였기 때문에 결과에서도 논의하듯이 오차가 있으나 구성재료와 크기에 따른 LIPCA 작동기의 성형 곡률의 경향 및 크기를 예측하는 데는 충분하다.

### 2.3 작동성능 실험

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

먼저 작동기를 양단 고정 조건을 만족시키기 위하여, 작동기의 양끝을 기존의 THUNDER의 작동 성능 측정용 지그(TA mounting plate, Face International) 위에 놓고 작은 볼트로 고정시킨 후 입력전압을 1 Hz 사이클로 100 Vpp(peak-to-peak)부터 400 Vpp까지 가하였다. 그리고 작동기에서 최대 작동변위를 나타내는 중앙점의 수직 작동변위를 비접촉 변위 측정기를 이용하여 측정하였다.

기존의 THUNDER와 이의 개량형인 LIPCA의 작동성능을 비교하기 위하여 두 작동기의 실험조건 및 작동기 치수를 같은 조건으로 하였다. 실험에 사용된 THUNDER와 LIPCA의 치수는 Table 2에 나타내었다.

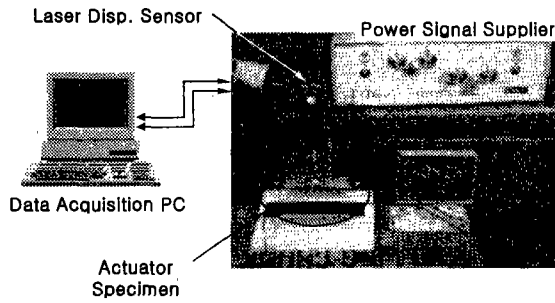


Fig. 3 Experimental setup for actuation test

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 성형곡률 결과

Table 3에는 본 연구에서 제작된 LIPCA의 중앙부 높이 및 곡률을 나타내었다. 해석치와 실험치를 비교하여 보면, 스테인레스 강, PZT, 알루미늄으로 이루어져 있어 경화 반응이 일어나지 않고 온도에 따른 물성의 변화가 크지 않은 THUNDER의 경우는 상대오차가 5% 내로 정확히 해석되었다. 그러나 온도에 따른 물성 변화와 경화 반응이 일어나는 LIPCA의 경우 크기가 큰 것인 LIPCA 1-R은 약 40%, 작은 것인 LIPCA 2-R은 90% 내외의 오차가 있다.

이러한 차이의 주원인으로는 유리/에폭시와 탄소/에폭시 복합재료가 온도에 따라 물성이 변한다는 것과 경화 반응과 관련된 현상을 고려하지 않고 단지 상온에서의 물성만으로 해석을 수행하였기 때문이다. 이중 온도에 따른 물성 변화가 더 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

상온에서의 물성치만으로 해석을 수행한 현재의 해석 기법도 LIPCA의 개념 설계 자료로 충분히 사용 가능하나, 향후 온도에 따른 물성치 변화를 고려할 수 있는 예측 기법을 개발할 예정이다. 이와 관련된 선행 연구로 탄소/에폭시 복합재료의 온도에 따른 열팽창 계수를 측정하여 발표한 바 있다.<sup>(11)</sup>

#### 3.2 작동성능 실험 결과

외부 하중이 작용하지 않는 조건에서 LIPCA와 THUNDER의 작동변위와 각각의 무게를 Fig. 4에 나타내었다. LIPCA 1-R의 경우 같은 치수의 THUNDER 7-R(1/3)과 비교하여 무게는 약 44% 경량화와, 60% 정도 큰 작동변위를 나타냈다. 그리고, LIPCA 2-R은 같은 치수의 THUNDER 8-R과 비교하여 무게는 약 33% 정도 경량화 되었으며,

Table 3 Comparison of experimental and predicted curvature and central height

	Central Height		Radius of Curvature	
	Exp. (mm)	Pred. (mm)	Exp. (mm)	Pred. (mm)
LIPCA 1-R	2.03	2.76 (36%)	308.8	228.2
LIPCA 2-R	0.41	0.79 (92%)	312.5	228.2
THUNDER 7-R (1/3)	3.02	2.91 (4%)	192.1	222.0
THUNDER 8-R	0.79	0.81 (3%)	176.1	222.0

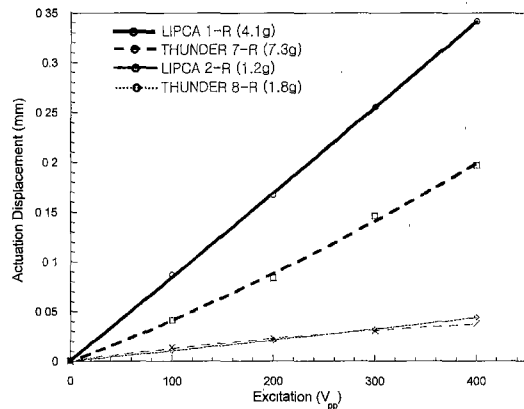


Fig. 4 Comparison of displacement between LIPCA and THUNDER

작동변위는 10% 정도 크게 계측되었다.

이러한 결과로부터 금속을 이용하여 제작된 THUNDER의 개념을 복합재료로까지 확장함으로써 무게의 경량화와 작동변위의 향상을 확인할 수 있었다. 이러한 확장은 복합재료가 가지는 특징인 테일러링(tailoring), 즉 적층각과 두께를 바꾸어 설계 목적에 맞는 작동기를 제작할 수 있다는 가능성을 열어 놓았다는데 의의가 있다.

Fig. 5는 초기하중(pre-load)이 가해진 상태에서 가진 전압이 100Vpp와 200Vpp일 경우의 작동변위를 나타내고 있다. 선하중을 0N에서 1.96N까지 0.49N 간격으로 작동기의 중앙에 가한 결과, LIPCA는 THUNDER보다 30% 이상의 작동변위를 나타내었다. 실험에서 중심선에 1.96N의 하중을 가하였을 때 LIPCA1-R의 굽은 형상은 거의 평평하게 되었으며, 1.96N 이상에서는 snap through 현상이 발생하였다. 그러나, THUNDER 7-R(1/3)의 경우 9.8N의 하중이 가해졌을 때 굽은 형상이 평평하게 되었다. 이러한 현상은 LIPCA보다 THUNDER가 강

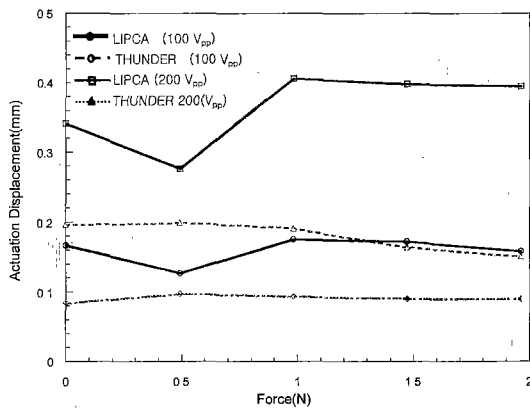


Fig. 5 Comparison of displacement between LIPCA 1-R and THUNDER 7-R with the center loading and the fixed end supporting condition

성(stiffness)이 커 더 큰 하중을 지지할 수 있음을 뜻한다.

실험에서 나타난 뚜렷한 현상으로 중심선에 다른 크기의 초기하중을 가하여도 작동 성능에 큰 차이가 없다는 점이다. 다만 0.5 N을 가한 경우 다른 초기 하중에 비해 작은 작동 변위가 계측되었다. 이 현상은 처음에 추가 올려질 때 초기 곡률이 변하기 때문에 일어 난다고 생각된다. 본 실험에서 사용한 것과 다른 형태의 THUNDER에서도 비슷한 거동이 나타남이 보고되었다.<sup>(6)</sup>

#### 4. 결론

본 연구에서는, 금속층으로 제작되는 THUNDER의 설계 개념을 상대적으로 가벼운 섬유 복합재료로 확장한 소형 경량 작동기인 LIPCA를 제시하였다. LIPCA 곡면형 작동기의 성형곡률 해석 기법을 정식화하여 THUNDER와 LIPCA의 곡률을 계산하였다. 작동 성능 실험으로 같은 치수를 가진 THUNDER와 동일 실험 조건에서 성능을 비교하였다. 성능 실험 결과, 개량형 LIPCA는 기존의 THUNDER보다 30~40% 정도의 경량화와 작동변위 향상을 나타내었다.

LIPCA는 복합재료를 적용함으로써 THUNDER보다 다양한 설계가 가능하며 설계 목적에 따라 필요한 작동변위나 작동력을 가지는 압전 작동기를 설계할 수 있을 것이다. 해석적, 실험적으로 검증된 압전 작동기는 소형 항공기의 제어판 구조물이나 헬리콥터 블레이드 등과 같이 높은 작동력, 큰 작동변위를 필요로 하는 구조물에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 2000년 과학기술부 지정, 능동 구조/재료 국가지정 연구실 연구인 “항공우주용 고성능 능동복합재료 작동기 개발” 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Haertling, G. H., 1997, “Rainbow Actuators and Sensors: A New Smart Technology,” *Proc. of SPIE Conference*, San Diego, CA, 3-4 March, Vol. 3040, pp. 81~92.
- (2) Mossi, K. M. and Bishop, R. P., 1999, “Characterization of Different types of High Performance THUNDER,” *Proc. of SPIE Conference*, Newport Beach, CA, 1-5 March, Vol. 3675-05.
- (3) Hellbaum, R., Bryant, R. G., and Fox, R. L., 1997, “Thin Layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor,” United States Patent No. 5,632,841.
- (4) Hyer, M. W. and Jilani, A., 1998, “Predicting the Deformation Characteristics of Rectangular Unsymmetrically Laminated Piezoelectric Materials,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, pp. 784~791.
- (5) Barrett, R. M. and Gross, R. S., 1998, “Recent advances in adaptive aerostructures: Designing for flight control,” *Proc. of 4th ESSM and 2nd MIMR Conference*, Harrogate, 6-8 July, pp. 17~24.
- (6) Shakeri, C., Bordonaro, C. M., Noori, M. N. and Champagne, R., 1999, “Experimental Study of THUNDER: A New Generation of Piezoelectric Actuators,” *Proc. of SPIE Conference*, Newport Beach, CA, 1-5 March, Vol. 3675-07.
- (7) 이동호, 최승복, 김재환, 2000, “압전작동기로 구동되는 보울 파트 피더의 모드해석과 이송 속도 제어,” *대한기계학회논문집 A*, 제 24권 4호, pp. 839~847.
- (8) 주형달, 황운봉, 박현철, 2000, “압전작동기를 이용한 트러스 구조물의 다중 모드 진동제어,” *대한기계학회논문집 A*, 제 24권 10호, pp. 2502~2512.
- (9) Shin, S., Oh, J. E., Hong, J. S. and Park, S. H., 1998, “Active Vibration Control of Flexible Cantilever Beam Using Piezo Actuator and Filtered-X LMS Algorithm,” *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 4, pp. 665~671.
- (10) Kim, J. H., Lee, J. K. and Cheong, C. C., 1999, “Piezoelectric Smart Structures for Noise Reduction in a Cabin,” *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 6, pp. 451~458.
- (11) 구남서, 권영두, 김주식, 윤광준, 2001, “온도변화 시 변형을 계측 기법 및 복합재료의 열팽창 계수 측정에의 적용,” *한국항공우주학회지*, 제 29권 2호, pp. 43~51.