

# 복합재료 곡면형 작동기의 최적설계를 위한 대규모 수치해석 연구

정순완\* · 황인성\*\* · 김승조\*\*\*

## Large-scale Simulation for Optimal Design of Composite Curved Piezoelectric Actuator

Soon Wan Chung, In Seong Hwang and Seung Jo Kim

**Key Words:** Curved actuator, Parallel computing, Micro-mechanical modeling, Laminated composite, Parametric study

### ABSTRACT

In this paper, the electromechanical displacements of curved piezoelectric actuators composed of PZT ceramic and laminated composite materials are calculated based on high performance computing technology and the optimal configuration of composite curved actuator is examined. To accurately predict the local pre-stress in the device due to the mismatch in coefficients of thermal expansion, carbon-epoxy and glass-epoxy as well as PZT ceramic are numerically modeled by using hexahedral solid elements. Because the modeling of these thin layers increases the number of degrees of freedom, large-scale structural analyses are performed through the PEGASUS supercomputer, which is installed in our laboratory. In the first stage, the curved shape of the actuator and the internal stress in each layer are obtained by the cured curvature analysis. Subsequently, the displacement due to the piezoelectric force (which is resulted from applied voltage) is also calculated. The performance of composite curved actuator is investigated by comparing the displacements obtained by the variation of thickness and elastic modulus of laminated composite layers. In order to consider the finite deformation in the first analysis stage and include the pre-stress due to curing process in the second stage, nonlinear finite element analyses are carried out.

### 1. 서론

최근 작동력을 크게 하기 위해 곡면형 작동기  
에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. 이러한  
곡면형 작동기의 예로는 하나의 압전 세라믹에 얇

은 금속판을 붙인 형태의 THUNDER(Thin layer  
UNimorph DrivER)[1,2,3], RAINBOW(Reduced And  
Internally Biased Oxide Wafer)[3,4,5] 등이 있으며, 금  
속 대신 복합재료를 사용한 LIPCA(Lightweight  
Piezo-composite Curved Actuator)[6,7]도 개발되었다.  
이러한 복합재료 곡면형 작동기는 금속재료 층 부  
분을 경량 섬유강화 복합재료 층으로 대체함으로  
써 무게를 감소시킬 수 있고, 접착제를 대신하여  
에폭시 프리프레그를 이용하기 때문에 제조공정을  
단순화시킬 수 있으며, 복합재료 층의 크기를 조  
절하여 설계의 유연성을 가질 수 있다.

본 연구에서는 곡면형 작동기의 성능 예측을

\* 서울대학교 기계항공공학부, 박사후 연구원  
(현재: State University of New York at Binghamton)

\*\* 서울대학교 기계항공공학부, 박사과정

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부, 교수  
비행체특화연구센터, 소장

위해 개발한 프로그램[8,9]을 활용하여 복합재료 곡면형 작동기를 8 절점 고체 요소로 모델링한 후, 1 백만 자유도 이상의 수치모델을 이용하여 정밀 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 고성능 컴퓨팅 자원으로는 본 연구실에서 구축한 PEGASUS 시스템을 사용하였다.

수치예제로는, 두 가지 적층 형상을 갖는 모델을 고려하였으며, 첫 번째 단계에서는 성형 곡률을 해석하여 휘어진 형상과 각 층의 내부 응력을 확인하였고, 두 번째 단계에서는 전압이 가해졌을 때의 작동 변위에 대한 해석을 수행하였다. 각 층의 두께와 복합재료 물성치를 변화시켰을 때의 성능 변화를 살펴보았으며, 정밀한 해석을 위해 비선형 해석을 수행하였다.

## 2. 유한요소 정식화

복합재료 곡면형 작동기의 성형 곡률과 잔류 응력, 작동력을 정확히 예측하기 위해서 비선형 유한요소 해석이 요구되며, 이에 본 연구에서는 전 라그랑지안 (Total Lagrangian) 정식화와 극 분해 이론 (polar decomposition theorem) 을 이용하였다. 평형 방정식은 식(1)로 정리되고, 첫 번째 Piola-Kirchhoff 응력  $T$  와 Cauchy 응력  $\sigma$  의 관계는 식(2)로 정리된다.

$$\nabla_x \cdot T = 0 \quad (1)$$

$$T = J \sigma (F^{-1})^T = J R S U^{-1} \quad (2)$$

위에서,  $F$ ,  $R$ ,  $U$  는 각각 변형구배텐서, 회전텐서, 변형텐서를 나타낸다. 식(3)은 열 및 압전 하중이 작용할 때,  $n$  번째 증분 단계내의  $i$  번째 반복 계산 시를 표현한 것이다.

$$\begin{aligned} & \int J [RC \Delta \varepsilon U^{-1}]_n^i : \nabla q dV \\ & = \int [R \Delta S U^{-1}]_n^{i-1} : \nabla q dV - \int [\Delta R S U^{-1}]_n^{i-1} : \nabla q dV \\ & - \int [R S \Delta U^{-1}]_n^{i-1} : \nabla q dV - \int T_n^{i-1} : \nabla q dV \end{aligned} \quad (3)$$

위에서,  $C$  는 응력-변형률 행렬이고,

$$\Delta S = C_n (\Delta \varepsilon_{th} + d \frac{\Delta V}{t}), \varepsilon_{th} = [\alpha \Delta T, \alpha \Delta T, \alpha \Delta T, 0, 0, 0]^T$$

이며, 압전 전하 상수 행렬  $d$  는 식(4)에 나타내었다. 2-3 평면을 transversely isotropic 으로 가정한 복합재료의 경우, 식(5)와 같이 5 개의 상수로 정리되고, 압전재료는 등방성 재료로 가정할 수 있으므로, 2 개의 상수( $C_{11}, C_{55}$ )로 요약할 수 있다.

미지수는 일반적인 유한요소 근사식에 의해 보간되며, 재료 상수  $C_n$  은 증분 단계에서 갱신된다.

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{22} - C_{23})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \varepsilon \quad (5)$$

## 3. 계산환경

본 연구에서는 얇은 층 각각을 고체 요소로 모델링했으므로 수치 모델의 자유도는 매우 커진다. 이의 유한요소 해석을 위해 고성능 계산자원으로 본 연구실에서 구축한 PEGASUS 시스템을 사용하였다. 이 시스템은 260 개의 노드 (각 노드당 2 개의 인텔 제온 CPU 장착)로 구성되어 있고, Gigabit Ethernet System 으로 연결되어 있으며, Linpack 성능 평가에서 1.3 Tflops 를 기록한 바 있다. 약 1 백만 자유도 문제를 16 노드, 32 CPU 에서 계산하였을 때 전체 약 1 시간이 소요되었으며, 본 연구에서는 주로 32 개의 CPU 를 활용하였다.

## 4. 수치해석

본 연구에서 사용한 수치 모델은 그림 1 에서 나타낸 바와 같다. 모든 층은 8 절점 고체 요소로 모델링되었으며, CCA-1 은 약 70 만 자유도 (683,451), CCA-2 는 약 33 만 자유도 (329,562)를 가지고 있다. 경계조건은 그림 2 에서와 같이 한쪽은 단순 지지이고 다른 쪽은 면내에서 자유롭게 움직이도록 하였다.

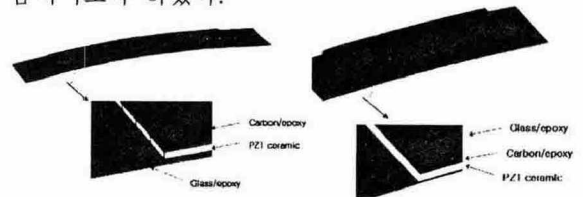


Fig. 1 Geometry of the numerical model



Fig. 2 Boundary condition for numerical analysis

Table 1 Material properties

	PZT ceramic	Carbon/epoxy	Glass/epoxy
$E_1$ (GPa)	59	231.2	25.0
$E_2$ (GPa)	59	7.2	25.0
$G_{12}$ (GPa)	21	4.3	10.0
Poisson's ratio, $\nu_{12}$	0.34	0.29	0.25
CTE, $\alpha_1$ ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	3.0	-1.58	14.2
CTE, $\alpha_2$ ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	3.0	32.2	14.2
Piezoelectric charge constants $d$ ( $10^{-12}$ m/V)	$d_{31}=d_{32}=-260$ , $d_{33}=540$	-	-

표 1 은 각 층의 물성치를 나타내고 있으며, 표 2 는 적층 복합재료의 두께 변화에 따른 작동기의 성능 변화를 알아보기 위하여 Glass/epoxy 와 Carbon/epoxy 층의 두께를 각각 변화시킨 총 9 가지 경우의 치수를 나타내었다.

Table 2 Thickness variation of CCA

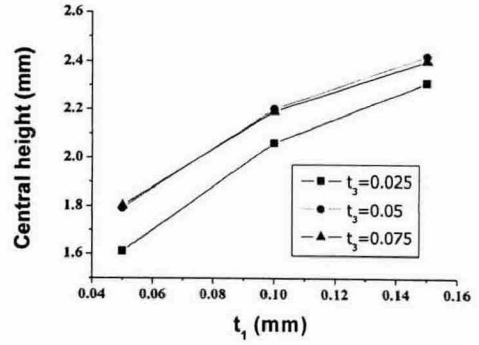
(a) CCA-1

	Dimension (mm)	Thickness (mm)
Carbon/epoxy	$71 \times 24 \times t_3$	$t_3 = 0.025, 0.05, 0.075$
PZT ceramic	$71 \times 24 \times t_2$	$t_2 = 0.25$
Glass/epoxy	$97.5 \times 24 \times t_1$	$t_1 = 0.05, 0.1, 0.15$

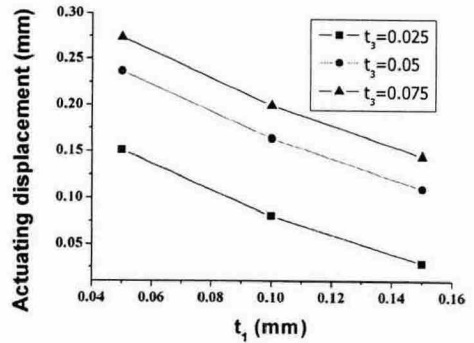
(b) CCA-2

	Dimension (mm)	Thickness (mm)
Glass/epoxy	$71 \times 24 \times t_5$	$t_5 = 0.09$
Carbon/epoxy	$71 \times 24 \times t_4$	$t_4 = 0.05, 0.1, 0.15$
Glass/epoxy	$71 \times 24 \times t_3$	$t_3 = 0.09$
PZT ceramic	$71 \times 24 \times t_2$	$t_2 = 0.25$
Glass/epoxy	$97.5 \times 24 \times t_1$	$t_1 = 0.05, 0.09, 0.15$

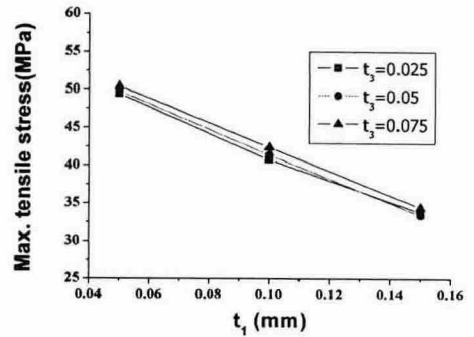
수치해석의 결과로서 성형 후 중심부의 높이, 작동 변위, 최대 인장 응력과 최대 압축 응력을 그림 3 에 나타내었다.



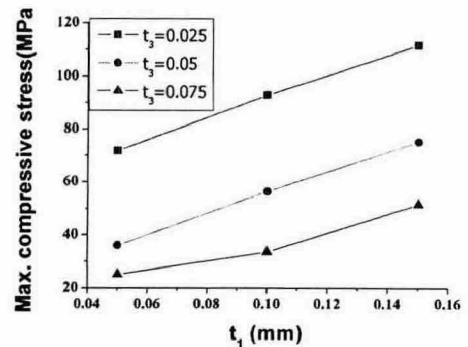
(a) Central height



(b) Actuating displacement



(c) Tensile stress



(d) Compressive stress

Fig. 3 Effects of thickness variation (CCA-1)

그림 4는  $t_1=0.15$ ,  $t_3=0.075$  인 경우의 성형 해석 결과 중, 가운데 단면에서의 응력( $\sigma_{xx}$ ) 분포를 나타내고 있다. 예상한 바와 같이 압전 재료 층은 압축력을 받고 있으며, 위와 아랫면의 복합재료 층은 모두 인장력을 받고 있음을 알 수 있다.

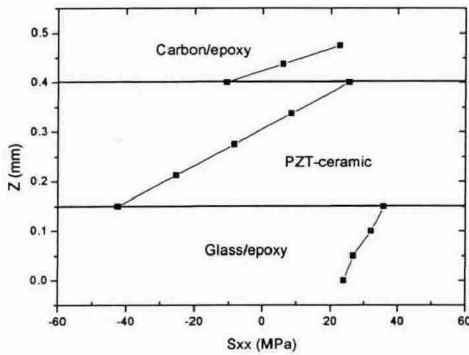
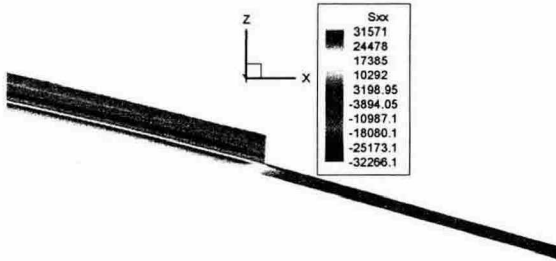


Fig. 4 Stress distribution ( $\sigma_{xx}$ ) of CCA-1

그림 5는 작동기에 사용된 복합재료의 물성치를 변화시켰을 때의 작동 변위를 나타내었다. Glass/epoxy의 E 값은 표 1에 제시된 것 외에 16.5 GPa 과 53.8 GPa 이 사용되었고, Carbon/epoxy는 149 GPa 과 331.2 GPa 의  $E_1$  값이 사용되었다.

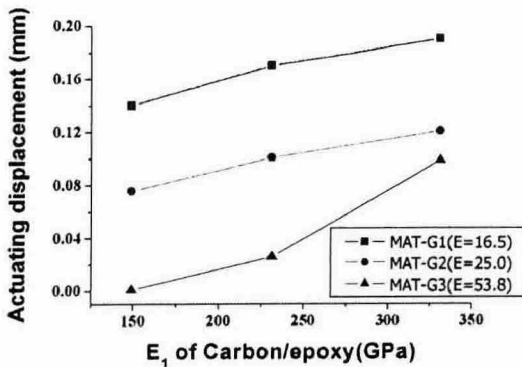


Fig. 5 Effects of Young's modulus variation

## 5. 결론

본 논문에서는, 복합재료를 사용한 곡면형 작동기의 성형곡률과 작동성능을 예측하기 위해, 대규모 병렬 구조해석을 수행하였다. 이를 위해 압전 재료와 복합재료를 고려한 해석 프로그램을 개발하였고, 본 연구실에서 구축한 PEGASUS 시스템을 활용하였다. 복합재료의 적층 두께와 재료 물성치를 변화시켜가면서 중앙부 높이와 작동 변위 등을 계산하였으며, 정밀한 수치모사를 위해 비선형 해석이 고려되었다. 작동기의 성능은 위 층이 두껍고 강성이 클수록, 아래 층이 얇고 강성이 작을수록 향상되었다.

## 후기

본 논문은 BK-21 사업에 의해 지원되었습니다.

## 참고문헌

- (1) THUNDER WHITE PAPER, FACE International Corporation, (2001).
- (2) Karla M. Mossi, Gregory V. Selby and Robert G. Bryant, "Thin-layer composite unimorph ferroelectric driver and sensor properties," Materials Letters, 35, (1998), 39-49.
- (3) Stephanie A. Wise, "Displacement properties of RAINBOW and THUNDER piezoelectric actuators," Sensors and Actuators A, 69 (1998), 33-38.
- (4) G.H. Haertling, "Rainbow ceramics - a new type of ultra-high-displacement actuator," Am. Ceram. Soc. Bulletin, 73, (1994), 93-96.
- (5) Guang Li and Gene H Haertling, "Stress-sensing characteristics of PLZT-based Rainbow ceramics," Smart Materials and Structures, 6, (1997), 425-431.
- (6) K.J.Yoon, K.H.Park, H.C.Park, D.Perreux, "Thermal deformation analysis of curved actuator LIPCA with a piezoelectric ceramic layer and fiber composite layers", Composites Science and Technology, 63, (2003), 501-506.
- (7) K Joon Yoon, Seokjun Shin, Hoon C Park, and Nam Seo Goo, "Design and manufacture of a lightweight piezo-composite curved actuator," Smart Materials and Structure, 11, 2002, 163-168.
- (8) Soon Wan Chung and Seung Jo Kim, "Investigation of actuating displacement performance of curved actuator by large-scale computation," Smart Materials and Structures, Accepted for publication.
- (9) 정순완, 황인성, 김승조, "적층 복합재료를 사용한 곡면형 작동기의 성능 예측을 위한 대규모 수치해석 연구", 한국복합재료학회 추계학술대회, 2003년 10월 17일, 한국과학기술원.