적층 복합재료를 사용한 곡면형 작동기의 성능 예측을 위한 대규모 수치해석 연구

정순완* • 황인성** • 김승조***

Large Scale Numerical Analysis for the Performance Prediction of Multilayered Composite Curved Actuator

Soon Wan Chung, In Seong Hwang and Seung Jo Kim

Key Words : Composite curved actuator, Large scale numerical analysis, Parallel computing, Actuating displacement

ABSTRACT

In this paper, the electromechanical displacements of curved actuators using laminated composites are calculated by finite element method to design the optimal configuration of curved actuators. To predict the pre-stress in the device due to the mismatch in coefficients of thermal expansion, the carbon-epoxy and glass-epoxy as well as PZT ceramic is also numerically modeled by using hexahedral solid elements. Because the modeling of these thin layers causes the numbers of degree of freedom to increase, large-scale structural analyses are performed in a cluster system in this study. The curved shape and pre-stress in the actuator are obtained by the cured curvature analysis. The displacement under the piezoelectric force by an applied voltage is also calculated to compare the performance of curved actuator. The thickness of composite is chosen as design factor.

1. 서 론

최근 작동력을 크게 하기 위해 곡면형 작동기에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. 이러한 곡면형 작동기의 예로는 하나의 압전 세라믹에 얇은 금속판을 붙인 형태의 THUNDER(Thin layer UNimorph DrivER)[1,2,3], RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafer)[3,4,5] 등이 있으며, 금속 대신 복합재료를 사용한[6] LIPCA(Lightweight Piezo-composite Curved Actuator)[7,8]도 개발되었다. 이러한 복합재료 곡면형 작동기는 금속재료 층 부분을 경량 섬유강화 복합재료 층으로 대체함으로써 무게를 감소시킬 수 있고, 접착제를 대신하여 에폭시 프리프레그를 이용하기 때문에 제조공정을 단순화시킬 수 있으며, 복합재료 층의 크기를 조절하여 설계의 유연성을 가질 수 있다.

본 연구에서는 금속재료로 만들어진 곡면형 작동기의 성능을 예측을 위해 개발한 프로그램[9,10]을 활용하여 복합재료 곡면형 작동기를 8 절점 고체 요소로 모델링한 후, 1 백만 자유도 이상의 수치모델을 이용하여 정밀 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 고성능 컴퓨팅 자원은 본 연구실에서 구축한 PEGASUS 시스템에서 얻었다.

수치예제로는, LIPCA 의 실험치와 수치해석 결과를 비교하기 위해서 성형 곡률과 작동 성능에 대한 해석을 채택하였다. 또한 여러 형상의 작동기에 대한 수치해석을 위해서 각 층의 두께를 변

* 서울대학교 기계항공공학부, 박사후 연구원
** 서울대학교 기계항공공학부, 박사과정
*** 서울대학교 기계항공공학부, 교수

화시켜가며 성형 곡률과 작동 변위를 구하였다.

2. 유한요소 정식화

일반적인 선형 정적 해석의 유한요소 정식화는 가상일의 원리를 사용하여 식(1)로 정리되고, 선형 탄성 구성법칙은 식(2)와 같다. (2-3 평면을 transversely isotropic 으로 가정한 복합재료의 경우, 식(2)와 같이 5 개의 상수로 정리되고, 압전재료는 등방성 재료로 가정할 수 있으므로, 2 개의 상수 (C_{11},C_{55})로 요약할 수 있다.)

$$\left(\int \mathbf{B}^T\mathbf{C}\mathbf{B}\,dV\right)\mathbf{U} = \int \mathbf{N}^T\mathbf{p}\,dS + \int \mathbf{N}^T\mathbf{f}\,dV \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{22}-C_{23})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \boldsymbol{\epsilon} \qquad (2)$$

여기서, **B** 는 변형도-변위 행렬, **C** 는 응력-변형도 행렬, **U** 는 변위, **N** 은 보간 행렬, **p** 는 표면력, **f** 는 체적력, $\boldsymbol{\sigma}$ 와 $\boldsymbol{\epsilon}$ 은 각각 응력과 변형도를 나타낸다. 식(2)를 압전 효과를 고려하여 다시 쓰면 식(3)과 같고, 여기서 **d** 는 압전 전하상수, **E** 는 전기장, **V** 는 입력 볼트이다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(\boldsymbol{\epsilon} - \mathbf{d}\mathbf{E}) = \mathbf{C}(\boldsymbol{\epsilon} - \mathbf{d}\frac{\mathbf{V}}{t}) \qquad (3)$$

식(3)에 열 변형도를 포함하면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(\boldsymbol{\epsilon} - \mathbf{d}\frac{\mathbf{V}}{t} - \boldsymbol{\epsilon}_{th}) \qquad (4)$$

따라서, 체적력과 표면력을 무시하면, 선형 압전 열해석을 위한 유한요소 정식화는 다음으로 정리된다.

$$\left(\int \mathbf{B}^T\mathbf{C}\mathbf{B}\,dV\right)\mathbf{U} = \int \mathbf{B}^T\mathbf{C}\mathbf{d}\frac{\mathbf{V}}{t}\,dV + \int \mathbf{B}^T\mathbf{C}\boldsymbol{\epsilon}_{th}\,dV \qquad (5)$$

본 연구에서는 입력 볼트는 두께 방향으로 일정하고 **C,d** 와 같은 재료상수도 성형 과정 중에 일정하다고 가정한다.

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 200 개의 노드(각 노드당 2 개의 인텔 제온 CPU 장착)로 구성되어 있고, 각 노드는 3 기가 메모리와 80 기가 하드 디스크가 설치되어 있다. 네트워크 장비는 Gigabit Ethernet System (Nortel Networks)으로 이루어져 있다. 이 시스템은 지난 2003 년 6 월에 발표된 슈퍼컴퓨터 순위에서 56 위를 차지하였다. 본 연구에서는 주로 16 개 혹은 32 개 CPU 를 사용하여 계산을 수행하였다.

4. 수치해석

4.1 실험치와의 비교

수치해석 결과와 실험치와의 비교를 위해서 LIPCA-C1, LIPCA-C2 의 데이터를 사용했다.[7] 중앙부 높이는, 적층판 내부에 응력이 존재하지 않는 상태의 온도(167℃)와 상온(25℃)의 온도차 ΔT 를 하중조건으로 사용하여 구했는데, 압전 세라믹이 굽어진 높이만을 측정하였다. 이때 경계조건으로는 그림 1 과 같이 한쪽은 단순 지지이고 다른 쪽은 면내에서 자유롭게 움직이도록 하였다. 사용한 자유도는 LIPCA-C1 은 68 만(683,451), LIPCA-C2 는 33 만(329,562)이다. 또한 작동기의 작동 변위는 압전 재료의 전극에 100Vpp 의 전압을 가하였을 경우 작동기 중앙에서 발생하는 수직방향의 변위를 측정하였다. 표 1 에서 실험치와 수치해석 결과를 비교하였으며 단위는 모두 mm 이다.

Table 1 Comparison of central height & displacement between experimental and numerical results

	Central Height		Actuator Displacement	
	Experiment	Numerical Analysis	Experiment	Numerical Analysis
LIPCA-C1	1.94	2.35	0.05	0.039
LIPCA-C2	0.92	0.89	0.17	0.17

4.2 다양한 두께에서의 수치해석

적층 복합재료의 두께 변화에 따른 작동기의 성능 변화를 알아보았다. 이를 위하여 그림 2 에서와 같이 아랫면에 Glass/epoxy, 중간에 PZT Ceramic, 윗면에 Carbon/epoxy 를 각각 적층하였으며, 각 층의 두께는 표 3 에 나타내었다. 표 3 에서 보는 바와 같이 Glass/epoxy 와 Carbon/epoxy 층의 두께를 각각 변화시키면서 총 9 가지 경우에 대해서 해석을 하였다. 경계조건은 그림 1 에서와 같이 한쪽은 단순 지지이고 다른 쪽은 면내에서

자유롭게 움직이도록 하였다. 또한 성형 곡률 측정을 위한 중심부의 높이는 4.1 절에서와 같이 압전 세라믹의 굽어진 높이만을 사용하였다. 따라서 다음 식(6)에서 곡률 예측을 위한 작동기의 길이 l 은 아랫면의 길이 97.5mm 가 아닌 PZT ceramic 의 길이 71mm 가 사용되었다.

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

여기서, Δh : 작동기의 중심부 높이

ρ : 작동기의 곡률

l : 작동기의 길이

곡면형 작동기는 고온에서 냉각시켜 열팽창계수의 차를 이용하여 성형하므로 열팽창계수의 차가 큰 재료를 적층하는 것이 유리하다. 또한 일반적으로 압전 세라믹은 인장응력에 약하고 압축응력에 강하므로 두께 방향으로 세라믹 층에 압축응력만이 작용하도록 하는 것이 좋다. 따라서 압전 세라믹 층을 기준으로 아랫면은 압전 세라믹 층에 비해 열팽창계수가 크고 탄성계수가 작은 재료층이, 윗면은 열팽창계수가 매우 작고 탄성계수가 큰 재료층이 위치하는 것이 바람직하다. 이에 본 연구에서는 표 2 에서 보여지는 물성치의 재료를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

Table 2 Material properties

	PZT ceramic	Carbon/epoxy	Glass/epoxy
E1(GPa)	59	231.2	25.0
E2(GPa)	59	7.2	25.0
G12(GPa)	21	4.3	10.0
Poisson's ratio, ν_{12}	0.34	0.29	0.25
CTE, α_1 (10^{-6}/℃)	3.0	-1.58	14.2
CTE, α_2 (10^{-6}/℃)	3.0	32.2	14.2
Piezoelectric charge constants d (10-12 m/V)	-260	-	-

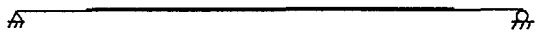

Fig. 1 Boundary condition for numerical analysis

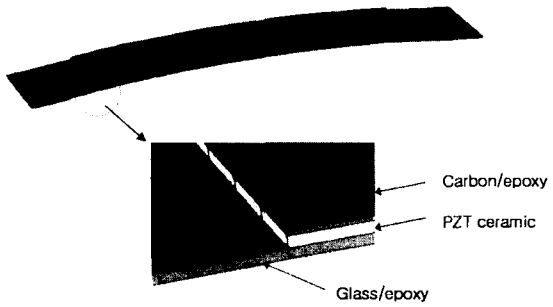

Fig. 2 Geometry of the numerical model

그림 3 은 t1=0.15, t3=0.075 인 경우의 성형 해석 결과 중, 가운데 단면에서의 응력(σ_{xx}) 분포를 나타내고 있다. 예상한 바와 같이 압전 재료 층은 압축력을 받고 있으며, 위와 아랫면의 복합재료 층은 모두 인장력을 받고 있음을 알 수 있다.

표 4 는 이러한 해석의 결과로서 각각의 적층 두께에 따른 성형 후 작동기 중앙부의 높이를 나타내고 있다. 대체적으로 아랫면에 위치한 Glass/epoxy 층의 두께가 증가할수록 성형 후의 높이가 증가함을 알 수 있다. 이는 열팽창계수에 의한 영향력이 Carbon/epoxy 보다 Glass/epoxy 가 더 크다는 것을 의미한다.

Table 3 Dimension of each layer

	Dimension (mm)	Thickness (mm)
Top layer (carbon/epoxy)	71 × 24 × t3	t3 = 0.025, 0.05, 0.075
Middle layer (PZT ceramic)	71 × 24 × t2	t2 = 0.25
Bottom layer (glass/epoxy)	97.5 × 24 × t1	t1 = 0.15, 0.1, 0.05

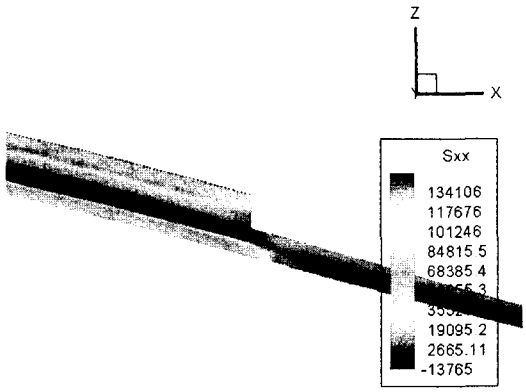

Fig. 3 Stress distribution (σ_{xx})

Table 4 Central height (mm)

t3 \ t1	0.15	0.1	0.05
0.025	2.38	2.09	1.59
0.05	2.45	2.20	1.77
0.075	2.41	2.18	1.80

표 5 에서는 입력 전압 100Vpp 에서 두께에 따른 작동 변위를 나타내었다. 작동변위는 아랫면이 얇을수록, 윗면이 두꺼울수록 증가하는데, 이는 중립축(Neutral Axis)과 압전 재료층과의 거리가 더 증가하기 때문이다.

Table 5 Actuating displacement (mm)

t3 \ t1	0.15	0.1	0.05
0.025	-3.29e-2	2.17e-2	1.12e-1
0.05	3.85e-2	1.01e-1	1.95e-1
0.075	8.40e-2	1.48e-1	2.37e-1

5. 결 론

본 논문에서는, 복합재료를 사용한 곡면형 작동기의 성형곡률과 작동성능을 예측하기 위해, 초대형 병렬 구조해석을 수행하였다. 이를 위해 압전재료와 복합재료를 고려한 해석 프로그램을 개발하였고, 본 연구실에서 구축한 PEGASUS 시스템을 활용하였다. 실험치와의 비교를 통해 타당한 결과를 얻음을 확인하였다. 복합재료의 적층 두께를 변화시켜가면서 중앙부 높이와 작동 변위를 계산하였는데, 동일한 전기작동 재료층일 경우, 전기작동 층을 중립축(Neutral Axis)으로부터 멀리 떨어지게 할수록 작동기의 작동 변위가 커짐을 알 수 있었다. 앞으로 보다 정확한 수치모사를 위해 비선형 해석을 진행할 계획이다. 이와 같은 결과를 바탕으로, 작동기 성능을 정밀하게 예측하고 설계/제작을 하는 데에 있어서 고성능 컴퓨팅 기술이 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

후 기

본 논문은 과학기술부의 국가지정연구실 사업에 의해 지원되었습니다.(과제번호 : 00-N-NL-01-C-026)

참고문헌

(1) THUNDER WHITE PAPER, FACE International Corporation, (2001).
(2) R.F. Hellbaum, R.G. Bryant and R.L. Fox, "Thin layer composite unimorph ferroelectric driver and sensor," US Patent Nos.5,632,841, (27 May 1997).
(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) 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.
(8) 구남서, 신석준, 박훈철, 윤광준, "곡면형 비대칭 압전재료 작동기 LIPCA 의 설계해석/제작/성능평가", 대한기계학회논문집 A 권, 25(10), pp.1514-1519, 2001.
(9) Soon Wan Chung and Seung Jo Kim, "Optimal design of curved actuator through high performance computing," SPIE Conference: Smart Structures/NDE, March 2-6, 2003, San Diego, California, USA.
(10) 정순완, 김승조, "고성능 병렬 컴퓨팅을 이용한 곡면 작동기의 최적 설계," 한국복합재료학회 춘계학술대회, 2003 년 4 월 18 일, 호서대.