

복합재료와 압전재료로 구성된 곡면형 작동기의 열변형 및 잔류응력 해석

정재한* · 박기훈** · 박훈철** · 윤광준**

Thermal Deformation and Residual Stress Analysis of Lightweight Piezo-composite Curved Actuator

J. H. CHUNG* · K. H. Park** · H. C. Park** · K. J. Yoon**

KEY WORDS: lightweight piezo-composite curved actuator, thermal deformation, residual stress.

ABSTRACT

LIPCA (Lightweight Piezo-composite Curved Actuator) is an actuator device which is lighter than other conventional piezoelectric ceramic type actuator. LIPCA is composed of a piezoelectric ceramic layer and fiber reinforced light composite layers, typically a PZT ceramic layer is sandwiched by a top fiber layer with low CTE (coefficient of thermal expansion) and base layers with high CTE. LIPCA has curved shape like a typical THUNDER (thin-layer composite unimorph ferroelectric driver and sensor), but it is lighter than THUNDER. Since the curved shape of LIPCA is from the thermal deformation during the manufacturing process of unsymmetrically laminated lay-up structure, an analysis for the thermal deformation and residual stresses induced during the manufacturing process is very important for an optimal design to increase the performance of LIPCA. To investigate the thermal deformation behavior and the induced residual stresses of LIPCA at room temperature, the curvatures of LIPCA were measured and compared with those predicted from the analysis using the classical lamination theory. A methodology is being studied to find an optimal stacking sequence and geometry of LIPCA to have larger specific actuating displacement and higher force. The residual stresses induced during the cooling process of the piezo-composite actuators have been calculated. A lay-up geometry for the PZT ceramic layer to have compression stress in the geometrical principal direction has been designed.

기호설명

σ	: 응력 벡터 (N/mm ²)
α	: 열팽창계수 벡터 (1/°C)
ΔT	: 온도변화 (°C)
ε^0	: 중립면의 변화율
ε^f	: 열에 의한 변형율
κ	: 곡률
N^T	: 온도 변화에 의한 결과 힘 (N/m)
M^T	: 온도 변화에 의한 결과 모멘트(N·m/m)

1. 서론

현재 항공, 우주 분야 및 수중 구조물의 주조종면이나 진동 제어에 적당한 고성능 작동기에 관심이 모아지고 있다. 이러한 고성능 작동기 중 압전재료(PZT ceramic) 작동기들은 입력되는 전압에 따라 상당한 작동 변위 및 힘을 생성시킨다.

THUNDERTM[1][2]로 대표되는 곡면형 작동기는 특히 적층되는 재료의 물성과 적층방법에 따라 다른 곡률을 생성시킬 수 있어 다양한 형상으로 성형이 가능하다. 특히 건국대학교에서 개발한 곡면형 복합재료 작동기인 LIPCA는 기존의 작동기 및 THUNDERTM보다 더욱 경량이며 더 큰 작동 변위를 내고 있다.[3] 이러한 LIPCA는 열팽창 계수(CTE)가 큰 복합재료들을 여러 방법을 통해 적

* 한국기계연구원

** 건국대학교 항공우주공학과

층하여 큰 곡률과 작동변위를 발생시킨다. 이러한 LIPCA 성형에 있어 성형 시간과 좀더 수월한 제작을 위해 LIPCA의 열변형과 잔류응력에 대한 정확한 예측과 해석 기법을 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 LIPCA의 제작과 이론적 해석을 통해 LIPCA 열변형 해석에 있어 가장 적절하고 정확한 기법을 제시하고 있다.

2. LIPCA의 설계 및 제작

2.1 LIPCA의 설계

적층 후 성형 경화 과정에서 상온으로 온도가 냉각될 때 각 재료들이 상이한 열팽창 계수들로 인하여 발생하는 잔류응력이 LIPCA의 곡률을 생성시킨다. 따라서 복합재료들의 적층 조합과 적층 각을 달리하여 최고의 곡률을 가지도록 유도한다. 첫번째 모델인 LIPCA-C는 열팽창 계수가 거의 제로에 가까운 탄소 섬유 복합재료를 섬유 방향으로 제일 위층에 적층하고, 중간층으로는 압전 세라믹, 그리고 제일 밑층에는 열팽창 계수가 큰 유리/에폭시를 적층시킨 구조이다. 또한 두번째 모델인 LIPCA-K는 그림 1에서 보는 바와 같이 제일 위층에 열팽창 계수가 제로에 가까운 케블라/에폭시를, 중간층에 압전 세라믹, 밑층에 열팽창 계수가 큰 유리/에폭시를 적층하였다. 고전압으로부터의 절연과 주위 습도로부터의 보호를 위해 제일 바깥쪽 위, 아래 면에 얇은 폴리이미드 필름으로 기본 적층 구조를 포장한 형상이다.

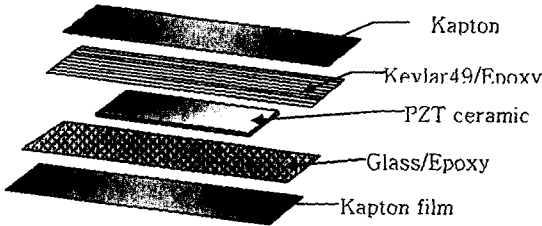


그림 1. LIPCA-K의 적층구조

2.2 LIPCA의 제작

LIPCA는 그림 1과 같은 적층 구조로 오토클레이브(6 기압, 76mmHg 진공, 125°C or 175°C) 내에서 co-cure를 실시한다. 성형 후 평판 상태에서 LIPCA를 분리시키면 상당한 곡률을 가지는 LIPCA를 얻을 수 있다.

3. 이론 해석

평면 x-y 좌표상에서 적층판의 k번째 층에 대하여 stress-strain 관계를 표현하면,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x - \alpha_x \Delta T \\ \varepsilon_y - \alpha_y \Delta T \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_k \quad (1)$$

여기서, \bar{Q}_{ij} 는 변환된 강성도 행렬(transformed stiffnesses)이다.

$$\begin{Bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{Bmatrix} = \int [\bar{Q}]_k \{ \alpha \}_k \Delta T dz \quad (2)$$

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

온도변화에 의하여 발생된 힘 $\{N^T\}$ 과 모멘트 $\{M^T\}$ 는 각 층의 두께에 따라 적분함으로써 식 (2)로 표현될 수 있다. LIPCA 전체의 힘과 모멘트는 열로 인해 유도된 힘과 모멘트, 그리고 외부에서 가해진 힘과 모멘트의 합으로 구할 수 있다. 이러한 전체 힘과 모멘트로 in-plane 적층판 스트레인 $\{\varepsilon^0\}$ 과 곡률 $\{\kappa\}$ 을 유도할 수 있다. $[A], [B], [D]$ 는 각각, 인장 강성도 행렬(extensional stiffness matrix), 연계 강성도 행렬(coupling stiffness matrix), 굴곡 강성도 행렬(bending stiffness matrix)이다. 외부에서 가해지는 힘과 모멘트가 없을 때, 적층판 스트레인과 곡률을 식(3)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N^T \\ M^T \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서 LIPCA의 곡률은 식(3)로 산출할 수 있다. 실험에서 LIPCA 중앙 높이는 쉽게 측정할 수 있으며, 다음 식으로 이론식에서 얻은 곡률로부터 LIPCA의 중앙 변형 높이를 예측해 낼 수 있다[3].

$$\Delta h = \rho \left(1 - \cos\left(\frac{l}{2\rho}\right) \right) \quad (4)$$

여기서, $\rho = \frac{1}{\kappa}$: 곡률의 반지름, l : LIPCA의 길이

또한 LIPCA 적층판에서 제작 공정상 발생하는 각 층에서의 잔류응력도 고전 적층판 이론으로 예측할 수 있다[4]. 식(1)의 stress-strain 관계와 thermal strain 관계를 정리하여 나타내면 다음과

같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 + (z_{k+1} - z_k) \kappa_x^0 - (\alpha_x)_k \Delta T \\ \epsilon_y^0 + (z_{k+1} - z_k) \kappa_y^0 - (\alpha_y)_k \Delta T \\ \gamma_{xy}^0 + (z_{k+1} - z_k) \kappa_{xy}^0 - (\alpha_{xy})_k \Delta T \end{Bmatrix} \quad (5)$$

4. STRESS FREE TEMPERATURE 측정

일반적으로 잔류응력이나 열변형 계산에 적용된 온도차는 성형중 최고 경화 온도와 상온과의 차를 이용하였다. 그러나 실제 잔류응력이 발생하는 온도는 최고 경화온도 이하일 것[5]이며 실제로 NASA Langley research laboratory의 THUNDER에 대한 해석 보고서[6]를 보더라도 그 이하 온도를 잔류응력 시발 온도라 가정하여 해석한 사례가 있다. 따라서 본 LIPCA 해석에 있어서도 이러한 실제 잔류응력 시발 온도를 실험을 통해 측정하여 사용하였다. 측정방법은 성형된 LIPCA를 다시 오븐에 넣고 최고 경화 온도까지 연속적으로 온도를 올려가며, LIPCA가 상온에서 높이의 5% 이하로 회복될 때의 온도를 측정한다. 그리고 이를 잔류응력 시발 온도라 정의하였다.

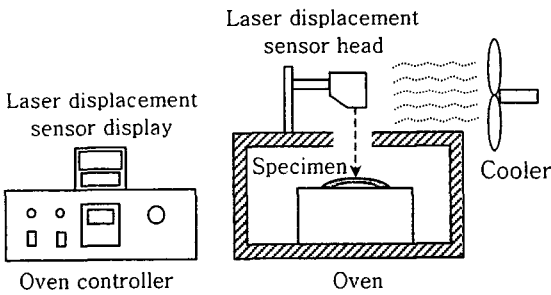


그림 2. 잔류응력 시발 온도 측정 실험

4. 결과 및 토의

이론식을 이용하여 LIPCA에 대한 초기곡률과 변형높이 및 잔류응력 예측을 하였으며, 이를 유한요소 해석을 통해 검증하였다. 제작된 LIPCA는 비접촉 레이저 변위 측정기로 측정하여 이론치와 비교, 분석하였다.

먼저 LIPCA-C와 LIPCA-K의 중앙 높이를 측정하여 비교해본 결과, LIPCA-K가 LIPCA-C보다 그 높이가 18% 높음을 알 수 있었다. 이는 LIPCA-K가 열팽창계수와 탄성계수로 말미암아 LIPCA-C보다 열변형이 더 많이 발생했다는 것이다. 이에 대한 주원인은 섬유 방향에 있어 케블라49/에폭시가 탄소/에폭시보다 열팽창계수가 낮아 더 큰 열변형 발생했다고 할

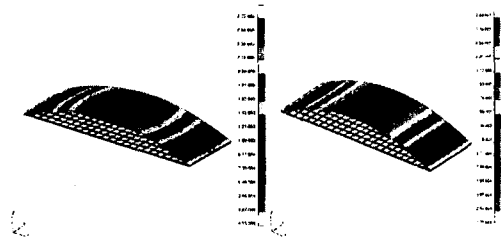
수 있다.

열변형 예측치는 대개 성형상 경화 최고온도와 냉각과정에서 적층판의 잔류응력이 유도되어지는 시작하는 stress free 온도의 차에 의해 좌우된다.

본 연구에서는 곡면인 LIPCA를 실험적으로 stress free 온도를 결정하였으며, LIPCA-C는 167°C, LIPCA-K는 162°C로 측정되었다. 이는 경화 최고 온도에 비해 10~15°C 낮은 온도였다. 따라서 이러한 실제 잔류응력 시발 온도를 적용하여 해석한 결과, 기하학적 비선형 유한요소 해석으로 변형 높이를 예측했을 때가 선형해석에 비해서 더욱 측정치에 가까웠다. 이는 변형 높이가 LIPCA 두께의 세배 이상 되었으므로, 비교적 큰 변형이 발생되어 선형해석 가정을 벗어났다고 할 수 있다. 그러므로 LIPCA의 경우 좀더 정확한 예측치 산출을 위해서는 기하학적 비선형 해석이 필요하다.

표1. LIPCA의 측정치와 예측치 비교

측정 높이 (mm)	예측높이 (mm)		
	CLT (상대오차%)	FEM-선형 (상대오차%)	FEM-비선형 (상대오차%)
LIPCA-C	2.03	2.57 (26.6)	2.58 (27.09)
LIPCA-K	2.36	2.88 (22.03)	2.89 (22.46)



LIPCA-C LIPCA-K
그림3. LIPCA의 열변형으로 인한 높이 변화(FEA)

세라믹 층이 삽입되어 적층된 복합재료 적층판의 경우, 압전 세라믹은 적층되어진 다른 재료에 비해 인장과피 strain은 작지만 압축과피 strain은 크다. 따라서 변위와 힘을 증가시키려면 세라믹 층이 압축력을 받도록 설계되어야 한다[7]. LIPCA의 적층 구조는 압전 세라믹이 압축력을 받도록 설계되었으며, 상온에서 상당한 곡률을 가진다. 그림 4과 그림 5은 LIPCA의 주축의 수직평면에 대한 잔류응력과 스트레인의 분포를 도시하고 있다. 이를 보면 PZT 층의 잔류응력이 밀면에서 상대적으로 큰 압축력을 받고, 윗면

에서는 작은 인장력을 받는다는 것을 알 수 있다.

단, PZT 세라믹 윗면의 인장력이 받는 구역은 상온에서 충분한 곡률을 가지기 위해서는 필연적으로 보인다. 따라서 이러한 잔류응력 예측을 통한 LIPCA 분석은 고효율의 작동력과 변위를 생성시키는 작동기 설계를 가능하게 한다.

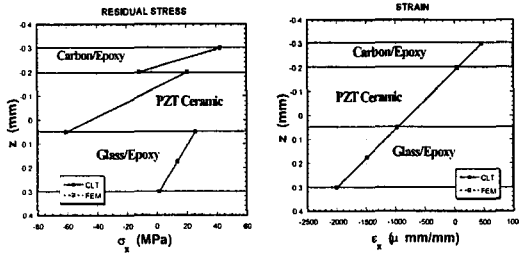


그림 4. LIPCA-C 단면의 잔류응력과 strain 분포

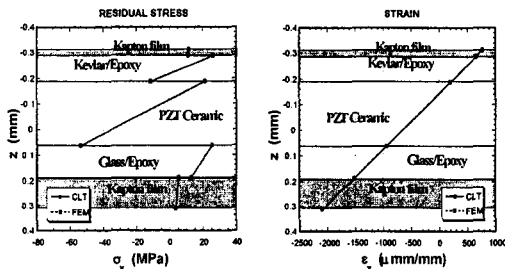


그림 5. LIPCA-K 단면의 잔류응력과 strain 분포

결론

압전 세라믹 층과 섬유 강화 복합재료 층을 사용한 경량의 곡면형 작동기를 설계하고, 제작하여 평가 하였다. LIPCA의 중앙 높이는 비접촉 레이저 변위 측정기로 측정하였으며, 또한 고전 적층판 이론, 기하학적 선형, 비선형 유한요소 해석을 통하여 곡률 및 변형 높이를 예측하였다. 따라서 LIPCA-K는 LIPCA-C에 비하여 더 큰 곡률이 생성되도록 설계되고 제작되었다. 특히 LIPCA-K에서 탄소/에폭시를 대신하여 사용된 케블라49/에폭시는 경량이며 절연체이므로 LIPCA-K가 LIPCA-C에 비해 가볍고 전기적으로 안전하다는 점이 고려되었으며, 그에 따라 설계, 성형 후 실제 두 모델을 비교한 결과, 예측대로 LIPCA-K가 LIPCA-C보다 탁월한 성능을 나타냄을 알 수 있었다.

해석에 있어서 LIPCA는 상당한 열변형이 발생되므로 좀 더 정확한 예측을 위하여 기하학적 비선형 해석을 하였고 실제 측정치와 가장 근접한 결과를 낳았다. 향후 개량된 LIPCA는 소형 항공기의 조정면과 헬리콥터 블레이드 등과 같이

큰 힘과 넓은 작동변위를 필요로 하는 고성능 구조물을 위한 경량 작동기로서 탁월한 성능을 발휘할 것이다.

후기

본 연구는 2000년 과학 기술부 지정, 능동 구조/재료 국가 지정 연구실인 “항공우주용 고성능 능동 복합재료 작동기 개발” 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. 신석준, "복합재료와 압전 세라믹을 이용한 곡면형 작동기 (LIPCA)에 관한 연구", 건국대학교 대학원 석사학위논문, 2000
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. H. Thomas Hahn, "Residual stresses in polymer matrix composite laminates", *Journal of composite materials*, Vol.10-October, 1976
6. Barmac K. Taleghani and Joel F. Campbell, "Non-linear finite element modeling of THUNDER piezoelectric actuators", NASA/TM-1999-209322, May, 1999
7. R. M. Barrett and R.S. Gross, "Recent advances in adaptive aerostructures: Designing for flight control", *Proc. of 4th ESSM and 2nd MIMR Conference*, Harrogate, 6-8 July, pp. 17-24, 1998.