

다종(多種) 재료층으로 구성된 적층판의 열변형 거동 연구

정재한* · 구남서** · 박훈철* · 윤광준*

A Study on thermal deformation behavior of laminates composed of different material layers.

J. H. Chung* · N. S. Goo** · H. C. Park* · K. J. Yoon*

KEY WORDS : Thermal deformation, unsymmetric laminate, thermal expansion coefficient, piezoelectric materials

ABSTRACT

Thermal deformation behavior has been investigated for unsymmetric laminates composed of various kinds of material layers, such as stainless steel, aluminum, carbon/epoxy or glass/epoxy. The thermal deformations of unsymmetric laminates were predicted using the classical lamination theory and compared with those obtained from experimental measurement. In the case of unsymmetric laminate composed of stainless steel and aluminum layer, the experimental results were agreed well with the values predicted. But in the case of unsymmetric laminate composed of fiber composite layers, there was a considerable difference of thermal deformation between the prediction and experimental measurement, which may be from the change of material properties of fiber composite layers for temperature variation.

기호설명

- σ : 응력 벡터 (N/mm²)
 σ_R : 잔류 응력 벡터 (N/mm²)
 α : 열팽창계수 벡터 (1/°C)
 ΔT : 온도변화 (°C)
 ϵ^0 : 중립면의 변화율
 ϵ' : 열에 의한 변형을
 κ : 곡률
 N^T : 온도변화에 의한 결과 힘 (N/m)
 M^T : 온도변화에 의한 결과 모멘트(N·m/m)

1. 서론

최근 들어 섬유 강화 복합재료 뿐만 아니라 철, 비철 금속을 포함한 각종 재료층이 서로 복합적으로 결합, 다기능을 발휘하도록 하는 복합 구조물이 응용 되어지고 있다. 그 예로써 90년대 초 NASA Langley에서 개발된 곡면형 작동기인 THUNDER 및 본 연구실에서 연구되는 있는 LIPCA와 Load-bearing antenna 구조의 smart structure skin 등을 들 수 있다. 이러한 구조물은 다기능 구조물로 현재 많은 연구가 진행되고 있으며, 성능 향상을 위하여 열변형과 잔류응력 문제를 고려한 설계 및 제작의 필요성이 요구되고 있다. 이러한 문제들은 서로 상이한 열팽창 계수(Thermal Expansion Coefficient)로 인한

* 건국대학교 항공우주공학과

** 경북대학교 기계공학부

성형상, 혹은 성형 후 잔류 응력 생성과 그에 따른 변형 등을 들 수 있다. 그러나 위와 같은 곡면형 작동기 등은 도리어 이러한 열변형을 이용함으로써 그 성형이 가능하다.

그림1은 각종 적층판의 성형 후 모습을 나타내고 있다.

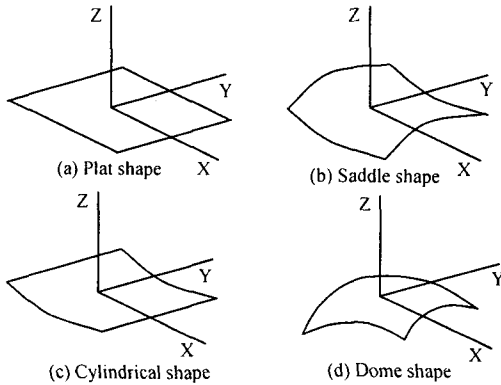


Figure 1. Laminate shape

그러므로 일련의 열변형 문제로 인한 각종 재료의 성형 후 그 형상과 특성을 정확히 파악함과 동시에 그 열적 변형률을 규명함으로써 해당 구조물의 효율적 설계와 생산 활동을 가능하게 한다.

이에 열변형의 기하학적 특성을 고찰하기 위한 각종 시편을 제작하고 이를 고전 적층판 이론(Classical Lamination Theory)에 적용, 그 곡률과 변형 높이를 예측, 실제 측정치와 비교해 보고 그에 따르는 잔류 응력 또한 규명해 보고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 고전 적층판 이론

(Classical Lamination Theory)

성형 후 열변형과 잔류 응력으로 인한 형상을 예측하기 위한 초기 곡률(κ)과 중간면의 변형률(ϵ^0) 및 각 층의 잔류응력을 산출 하기 위해 고전 적층판 이론을 적용

한다.

적층판에 대하여 힘과 모멘트를 중간면의 변형률과 곡률 관계로 표현하면[1],

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $A_{ij} = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}_{ij}]_k \int_{z_{i-1}}^{z_i} dz$, $B_{ij} = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}_{ij}]_k \int_{z_{i-1}}^{z_i} z dz$

$D_{ij} = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}_{ij}]_k \int_{z_{i-1}}^{z_i} z^2 dz$ 로 정의 된다.

본 논문에서는 기계적 힘과 모멘트에 열적 힘과 모멘트만을 고려하므로 식 (1), (2)을 재정리하여 초기 곡률과 중립면 변화율에 대하여 나타내면,

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

최종 식(3)에서 thermal force와 thermal moment는 다음과 같은 식으로 표현되어 진다.

$$\{N^T\} = \int [\bar{Q}]_k \{\alpha \Delta T\}_k dz \quad (4)$$

$$\{M^T\} = \int [\bar{Q}]_k \{\alpha \Delta T\}_k z dz \quad (5)$$

2.2 곡률을 이용한 시편의 변형 높이 예측

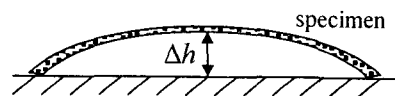


Figure 2. The Height of thermal deformation specimen

위 식(3)으로부터 구한 곡률 κ 로 부터 그림 2의 형상에서 열변형 시편의 높이를 구할 수 있다.

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

여기서 $\rho = \frac{1}{\kappa}$: 반지름
 l : 시편의 길이

3. 열변형 시편의 제작

3.1 다중 재료 적층판 제작

여러 가지 열변형 형상을 관찰하기 위하여 Stainless steel(STS 304, 삼미), Aluminum(Al 1050, 대한알루미늄) 및 Fabric Carbon/Epoxy (CF3327, 한국화이바), Fabric Glass/Epoxy (GEP218, SK Chemical) 등의 다중 재료 적층판을 제작하였다.

각각의 제조 형상은 변형 관찰이 용이한 strip 형상으로 하였으며 Autoclave 성형(6기압, 76mmHg 진공, 125 °C or 175 °C)하였다. 단 Stainless steel과 Aluminum 사이의 접착은 고온용 epoxy를 사용하여 접착하였다.

3.2 압전 복합재료 작동기(LIPCA) 제작

LIPCA는 본 연구실이 개발한 압전 세라믹을 이용한 곡면형 작동기로 PZT ceramic과 Carbon/Epoxy, Glass/Epoxy, Kevlar, Kapton film로 적층한 후, Autoclave 성형하였다

시편	크기(mm)	적층순서
St-Al	110 x 40 x 1	Stainless steel Aluminum
Al-Ca	110 x 40 x 1.4	Aluminum Carbon/Epoxy
Ca-Gl	110 x 40 x 1.6	Carbon/Epoxy Glass/Epoxy
LIPCA-CI	71 x 23 x 0.25	Carbon/Epoxy PZT ceramic Glass/Epoxy
LIPCA-KI ⁽¹⁾	71 x 23 x 0.28	Kapton film Kevlar PZT ceramic Glass/Epoxy Kapton film

Table 1. The geometry of specimen

⁽¹⁾ LIPCA II는 초기 곡률을 증가시킨 LIPCA I의 개량형 모델임

4. 실험 결과 및 분석

4.1 성형 후 적층판의 열변형 높이 측정

다중 재료로 성형된 시편들을 다이얼 게이지를 이용, 각 strip 장축(長軸)의 기하학적 중심점에서 최대 높이를 측정함으로써 그 이론치와 비교해 보았다.

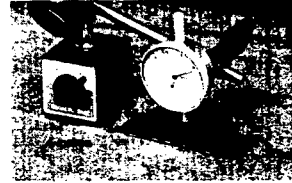


Figure 3. Height measuring system using dial gage

고전 적층판 이론으로 산출된 곡률 κ 를 이용, 그 변형높이를 비교 하였으며 이론치와의 오차는 다음과 같다.

시편	이론치 Δh_x (mm)	측정치 Δh_x (mm)	오차율(%)
St-Al	1.34	1.08	19.40
Al-CF	3.39	2.65	21.73
CF-GF	1.49	0.91	38.93
LIPCA-CI	2.80	2.03	27.5
LIPCA-KI	3.90	2.74	29.74

Table 2. Comparison of Central height⁽²⁾

4.2 LIPCA 적층판의 잔류 응력 계산

실제 시편의 각 층에 걸려있는 잔류 응력과 변형률을 고전 적층판 이론을 이용하여 계산해 보았다. 이러한 예측으로 각 층에서 받는 인장 혹은 압축 응력을 예측할 수 있다.

아래 그림과 그래프는 LIPCA-CI의 성형 후 형상과 그 잔류 응력을 나타낸 것이다.

⁽²⁾ 관찰이 용이한 strip의 장축 만의 수치임



Figure 4. LIPCA-C1

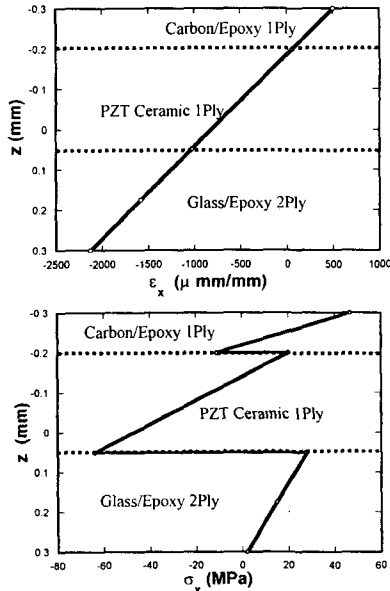


Figure 5. Residual stress & strain in LIPCA layers

5. 결론

각 층의 상이한 열팽창 계수로 인한 잔류 응력 발생과 그에 따른 형상 변화를 예측하고자 고전 적층판 이론을 사용, 열변형 후의 곡률과 그 변형 높이를 예상하고 실제 성형 시편과 비교 하였다.

각기 다른 재료로 적층된 시편마다 조금씩 차이가 발생하였지만 대부분 고전 적층판 이론과 근소한 수치를 얻을 수 있었다.

그 중 Stainless steel과 Aluminum의 적층판은 모두 등방성 물질로써 접착 성형 온도 범위에서 물성 변화가 없어 x, y 방향으로 같은 곡률, 같은 변형 높이가 예측되었으며 실제 성형 후 외형도 dome 형상이 나왔다. 또한 이론치와 실제 측정치와도 제일 근소하게 접근하였다. 그러나 섬유 강화 복합

재료의 경우 100 °C 가 넘는 성형 온도에도 불구하고 열팽창 계수를 전체적 평균값만을 적용하였으므로 실제 측정치와 오차가 다소 많이 발생하였으며, 또한 수지의 화학적 수축(chemical shrinkage)과 점탄성 변형 문제를 고려치 않아 St-Al 적층판에 비해 그 오차가 많이 발생함을 알 수 있었다. 금속 적층판과 섬유 강화 복합재료 적층판의 경우 비선형 열변형 문제를 고려하면 열변형 높이를 더욱 정확하게 예측 될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학 기술부 주관, " 국가 지정 연구소" 사업의 일환으로 진행되었으며, 이에 도움을 주신 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Michael W. Hyer "Stress analysis of fiber-reinforced composite materials", McGRAW-HILL, 1998, pp 212-275, 420-501
- (2) Michael W. Hyer, "Some observations on the cured shape of thin unsymmetric laminates, *J. Composite materials, Vol. 15*, March 1981, pp 175-187
- (3) 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱, "최신 복합 재료", (주)교학사, 1995, pp 35-124
- (4) 김주식, "탄소/에폭시 보강재의 성형과장에서 발생하는 축각 열변형 특성 규명", 건국대학교 대학원 석사학위논문, 1998
- (5) 신석준, "복합재료와 압전 세라믹을 이용한 곡면형 작동기(LIPCA)에 관한 연구", 건국대학교 대학원 석사학위 논문, 2000