

## 우주급 경통 열-흡습 설계

이덕규\*

## Design of Composite Space Tube Considering HygroThermal Effect

Deog-Gyu Lee\*

### Abstract

Structural and hygrothermal analysis for a composite tube is carried out in this study, that provides critical parameters for the design of a highly dimensionally stable space telescope. Carpet plots for laminate effective engineering constants are generated and used for the best tube lay-ups with high elastic modulus and highly insensitive to thermal and moisture expansion, which is essential for maintaining optical alignment of opto-mechanical system under random force applied during a launch campaign and orbital thermal load. Despace in the longitudinal direction under hygrothermal load of the tubes constructed with the selected lay-ups is calculated for the validation of lay-up designs on the dimensional stability. Dynamic analysis is also carried out to feature the resonant behaviour. A zig-zag triangular element accurately representing through thickness stress variations for laminated structures is developed in this study and incorporated into the structural and hygrothermal analysis.

### 초 록

본 연구에서는 고해상도 우주용 카메라의 경통부의 복합재 적층설계를 열환경 및 흡습에 의한 영향을 고려하여 수행하고 다층 지그재그이론에 기초하여 개발된 삼각형 유한요소를 이용 열흡습 해석을 수행하여 용단도표를 통하여 도출된 최적 적층설계가 광학성능 허용범위를 만족하는지 검증하였다.

키워드 : 열흡습(hygrothermal), 지그재그이론(zig-zag Theory), 용단도표(carpet plot)

### 1. 서 론

본 연구에서는 열흡습 영향을 받는 우주급 망원경 구조물(그림 1)의 경통의 복합재 적층설계를 수행하였다.

우주급 망원경은 영상검출장치와 결합되어 태양동기궤도상에서 영상을 생산하며 태양으로부터 유입되는 복사열 및 이클립스 상태에 반복적으로 노출시 광학정렬을 보정하며 이는 고품질의 영상을 획득하는데 필수적인 요건이다.

이러한 치수 안정성을 위하여 질량비 강성이

\* 광학탑재체그룹/dglee@kari.re.kr

우수하고 열팽창특성 및 흡습특성이 뛰어난 복합재료가 우주구조물의 제작에 널리 사용되고 있으며 복합재료는 섬유 및 기질의 종류의 선택 및 함유량 조절의 임의성, 적층시 섬유각도의 최적화를 통하여 기계적 특성을 임의로 조절 가능하며 이를 통하여 구조물의 치수 안정성을 최대한 만족 시킬수 있다.

우주 열환경 및 기질의 흡습특성을 고려한 최적의 적층설계는 강성계수, 열팽창계수 및 파괴강도에 대한 용단도표를 작성하고 치수안정에 요구되는 물성치를 용단도표상에 대입하여 적층설계 내의 각 섬유각도의 함유량을 결정한다.

용단도표를 통하여 설계된 경통은 열흡습 해석을 통하여 광축간 변위, 횡방향변위 및 비틀림을 계산하고 광학성능 허용범위내에 있는지 검증한다.

복합재 적층 구조물의 해석은 기존의 근사단층이론의 경우 층간 응력분포를 정확하게 예측하지 못하나 다층지그재그이론의 경우 층간 경계면에서 응력연속조건을 만족 시킴으로서 3차원 정해와 가장 근사한 응력분포를 예측 함으로서 열흡습 해석의 정확도를 높일수 있다[1,2,3].

본 논문에서는 고해상도 우주용 카메라의 경통부의 복합재 적층설계를 열환경 및 흡습에 의한 영향을 고려하여 수행하고 다층 지그재그이론에 기초하여 개발된 삼각형 유한요소를 이용 열흡습 해석을 수행하여 용단도표를 통하여 도출된 최적 적층설계가 광학성능 허용범위를 만족 하는지 검증 하였다.

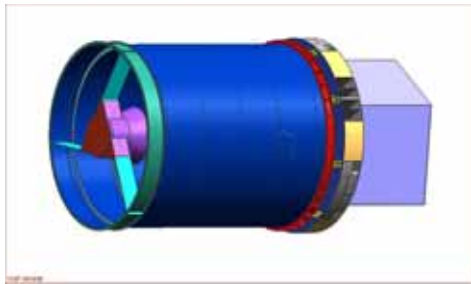


그림 1. 고해상도 우주용 카메라

## 2. 이론 전개

$N$ 개의 층으로 구성된 복합재 적층구조물의  $k$  번째층의 변위장은 다음과 같다(참고문헌[1]).

$$\begin{aligned} u^{(k)} &= u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + h_{11}^{(k)} \phi_x + h_{12}^{(k)} \phi_y, \\ v^{(k)} &= v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y} + h_{21}^{(k)} \phi_x + h_{22}^{(k)} \phi_y, \\ w^{(k)} &= w_0 \end{aligned} \quad (1)$$

위식 (1)에서  $u_0, v_0$  는 평면변위이고,  $w_0$  는 횡변위이며,  $\phi_x, \phi_y$ 는 고차 전단변위이다.  $h_{11}^{(k)}, h_{12}^{(k)}, h_{21}^{(k)}, h_{22}^{(k)}$ 는  $k$ 번째 층의 재료의 특성을 나타내는 함수로 참고문헌 [1]에 자세히 정리되어 있다.

$k$ 번째 층의 선형변형율은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)} = [Z] \{ \epsilon \} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix}^{(k\gamma)} = \begin{Bmatrix} h_{21,z}^{(k)} & h_{22,z}^{(k)} \\ h_{11,z}^{(k)} & h_{12,z}^{(k)} \end{Bmatrix} \{ \gamma \} \quad (3)$$

위식에서,

$$[Z] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -z & 0 & 0 & h_{11}^{(k)} & h_{12}^{(k)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -z & 0 & 0 & 0 & h_{21}^{(k)} & h_{22}^{(k)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -z & h_{21}^{(k)} & h_{22}^{(k)} & h_{11}^{(k)} & h_{12}^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$\{ \epsilon \} = \left\{ \frac{\partial u_0}{\partial x}, \frac{\partial v_0}{\partial y}, \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}, \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}, \right.$$

$$\left. 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}, \frac{\partial \phi_x}{\partial x}, \frac{\partial \phi_y}{\partial x}, \frac{\partial \phi_x}{\partial y}, \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \right\}^T$$

$$\{ \gamma \} = \{ \phi_x, \phi_y \}^T$$

평면응력 상태( $\sigma_z = 0$ )하의 열흡습 효과를 고려한 이방성 구성방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\{ \sigma \}^{(k)} = [C]^{(k)} \{ \epsilon \}^{(k)} \quad (4)$$

여기서,

$$\{\sigma\}^{(k)} = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}\}^{(k)}$$

$$\{e\}^{(k)} = \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)} = \Delta T \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ 0 \\ 0 \\ 2\alpha_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)} - \Delta C \begin{Bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ 0 \\ 0 \\ 2\beta_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)}$$

위식에서  $\Delta T$ 는 온도의 변화량을,  $\Delta C$ 는 흡수량의 변화량을 나타내며 열팽창계수( $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_{xy}$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_x^{(k)} = \cos^2 \theta_k \alpha_1^{(k)} + \sin^2 \theta_k \alpha_2^{(k)},$$

$$\alpha_y^{(k)} = \sin^2 \theta_k \alpha_1^{(k)} + \cos^2 \theta_k \alpha_2^{(k)},$$

$$\alpha_{xy}^{(k)} = \sin \theta_k \cos \theta_k (\alpha_1^{(k)} - \alpha_2^{(k)})$$

위식에서  $\alpha_1, \alpha_2$ 는 섬유방향 좌표축에 대한 열팽창계수를 나타내며 흡수계수( $\beta_x, \beta_y, \beta_{xy}$ )는 열팽창계수와 같은 방법으로 유도된다.

3절점 지그재그 유한요소(그림 2)를 식 (1)의 지그재그 변위장을 이용하여 개발 하였는데 이 요소는 비적합이지만 패치테스트를 통과하며 각절점당 자유도의 개수는 9개 이다.

$$\{d\}_i = \{u_0^i, v_0^i, w_0^i, \theta_x^i, \theta_y^i, \theta_z^i, \phi_x^i, \phi_y^i, \phi_z^i\}, i = 1, 2, 3$$

여기서,  $\theta_x = \frac{\partial w_0}{\partial y}, \theta_y = -\frac{\partial w_0}{\partial x}$ .

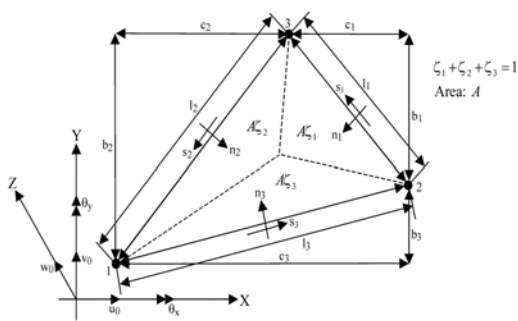


그림 2. 3절점 지그재그 삼각형요소

### 3. 수치해석 및 결과

복합재 우주경통(그림 3)의 최적 적층설계를 위하여 강성계수, 열팽창계수 및 흡수계수에 대한 응단도표를 작성하고 이 도표를 이용하여 궤도상에서 열흡수 하중이 가해질때 광구조계의 치수안정성을 보전할수 있는 최적의 적층설계를 도출하고 열흡수 해석을 통하여 광축간 변위(Despace)를 계산한다.

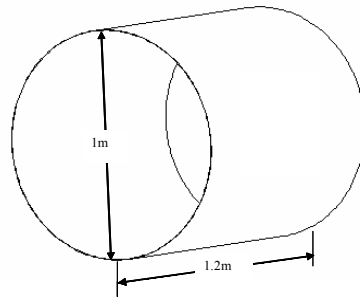


그림 3. 고해상도 우주용 카메라 경통부

#### 3.1 응단도표작성

복합재 우주 경통의 적층은  $0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ$ 층의 조합으로 이루어 지며 그 함유량에 따라 적층의 기계적 특성이 변화된다. 본 연구에 사용된 프리프레그의 물성치, 온도범위 및 기계적 요구조건은 표 1에 정리되어 있다.

광축방향의 강성계수( $E_x$ )는 그림 4에 도시되어 있고, 평면 전단 강성계수( $G_{xy}$ )는 그림 5에 도시되어 있고, 프와송계수는 그림 6에 도시되어 있으며, 광축방향 열팽창계수( $\alpha_x$ )는 그림 7에 도시되어 있고, 광축방향 흡수계수( $\beta_x$ )는 그림 8에 도시되어 있다.  $0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ$ 층의 함유량은 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{2m}{N}, \beta = \frac{2n}{N}, \gamma = \frac{4p}{N}, \alpha + \beta + \gamma = 1,$$

$$\text{Total Number of plies, } N = 2(m + n + 2p)$$

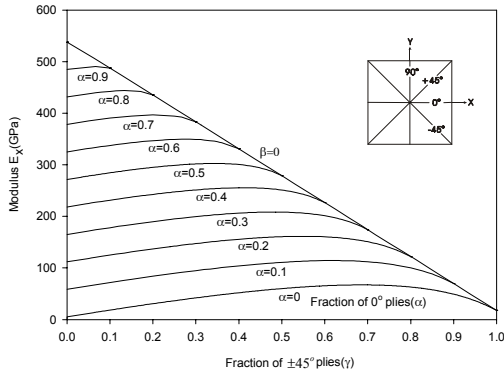
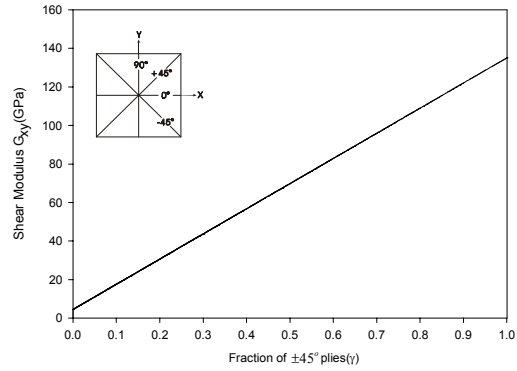
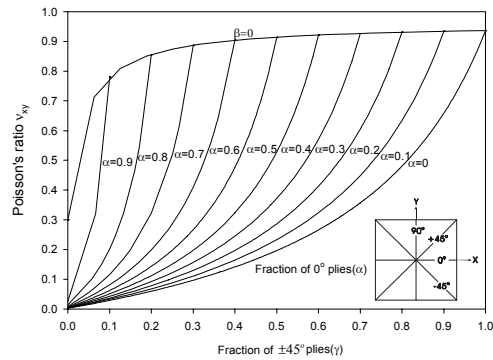
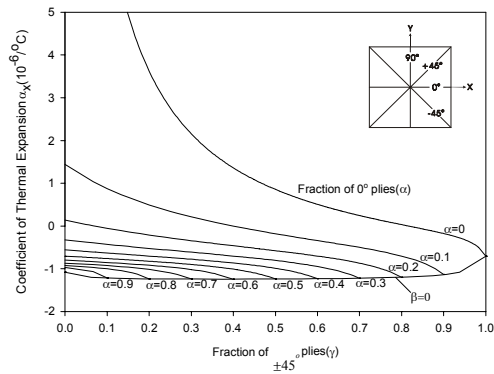

 그림 4. 광축방향 강성계수:  $[0_m/90_n/(\pm 45)_p]_s$ 

 그림 5. 평면 전단강성계수:  $[0_m/90_n/(\pm 45)_p]_s$ 

표 1. 복합재 우주경통의 물성치 및 환경조건

UD: Mechanical properties	$E_1 = 538 \text{ GPa},$ $E_2 = 5.1 \text{ GPa},$ $G_{12} = 4.5 \text{ GPa},$ $\nu_{12} = 0.3,$ $\alpha_1 = -1.08 \text{ ppm}/^\circ\text{C},$ $\alpha_2 = 30.02 \text{ ppm}/^\circ\text{C},$ $\bar{\epsilon}_1 = 10 \text{ ppm}/\%,$ $\bar{\epsilon}_2 = 1500 \text{ ppm}/\%,$ $F_{1t} = 1841 \text{ MPa},$ $F_{1c} = 366 \text{ MPa},$ $F_{2t} = 20 \text{ MPa},$ $F_{2c} = 120 \text{ MPa},$ $F_{16} = 47 \text{ MPa},$ $\rho = 1796 \text{ kg}/\text{m}^3$
Temperature change	$-20^\circ\text{C} < \Delta T < 55^\circ\text{C}$
Requirements for mechanical properties	$E_x \geq 290 \text{ GPa},$ $\alpha_x \leq 1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$


 그림 6. 프와송계수:  $[0_m/90_n/(\pm 45)_p]_s$ 

 그림 7. 광축방향 열팽창계수:  $[0_m/90_n/(\pm 45)_p]_s$

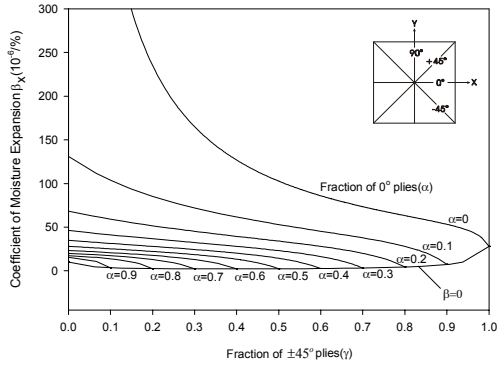


그림 8. 광축방향 흡습계수:  $[0_m/90_n/(\pm 45)_p]_s$

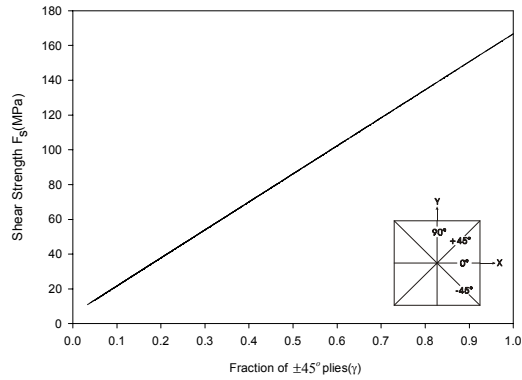


그림 10. 평면 전단파괴계수:  $[0_m/90_n/(\pm 45)_p]_s$

적층의 파괴강도는 Tsai-Wu가 제안한 최초층 파괴이론에 의하여 계산 하였고 광축방향 파괴강도( $F_{xt}$ )는 그림 9에 도시되어 있고, 평면 전단 파괴강도( $F_s$ )는 그림 10에 도시되어 있다.

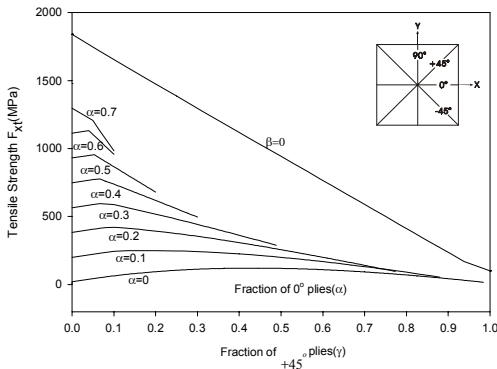


그림 9. 광축방향 파괴계수:  $[0_m/90_n/(\pm 45)_p]_s$

### 3.2 열흡습해석

표 2는 용단도표를 사용하여 도출된 적층설계 값으로 광기계 구조가 열흡습 환경하에서 치수안정성을 보전하며 최고의 성능을 생산하도록 한다.

표 3은 용단도표를 사용하여 도출된 최적 적층설계에 대한 열흡습 해석을 3절점 지그재그 요소를 사용하여 수행하여 계산한 광축간 변위(Despace)를 보여준다.

표 2. 치수안정 조건을 만족시키는 적층설계

$[0_m/90_n/(\pm 45)_p]_s$	$E_x$	$G_{xy}$	$\nu_{xy}$	$\alpha_x$	$\beta_x$
m=3,n=1,p=1	302.6	48.0	0.3	-0.93	17.2
m=5,n=1,p=1	361.4	37.2	0.3	-0.99	14.4
m=4,n=2,p=1	299.0	37.2	0.2	-0.86	20.6
m=5,n=2,p=1	325.6	33.5	0.2	-0.89	18.9
m=5,n=3,p=1	295.0	30.6	0.1	-0.82	22.3
m=6,n=2,p=1	346.8	30.6	0.2	-0.92	17.7
m=6,n=3,p=1	317.1	28.3	0.1	-0.86	20.7

Unit:  $E_x = GPa$ ,  $G_{xy} = GPa$ ,  $\alpha_x = ppm/^\circ C$ ,

$\beta_x = ppm/\%$ .

이 계산 과정에서 흡습에 의한 영향은 고려하지 않았다. 유니테입의 제작에 사용된 사이나이트(Cyanate)기질은 매우 적은 흡습 및 방습특성을 갖고 있어 열흡습 안정성이 요구되는 우주구조물에 적합한 물질이다. 또한 복합재 경통은 고온의 경화과정 및 아웃갯싱과정을 거치며 또한 발사후 초기 궤도상에서 베이킹아웃을 통하여 흡습에 의한 치수변화를 최소화 한다.

또한 해석 결과로부터 카메라의 운용 온도범위를 작게하는 것이 경통의 치수변화를 최소화할 수 있는 방법임을 알수 있다. 그림 10은 적층:  $[0_3/90_1/(\pm 45)_1]_s$  에 대한 온도 및 흡습량에 따른 광축간변위(Despace)를 보여준다.

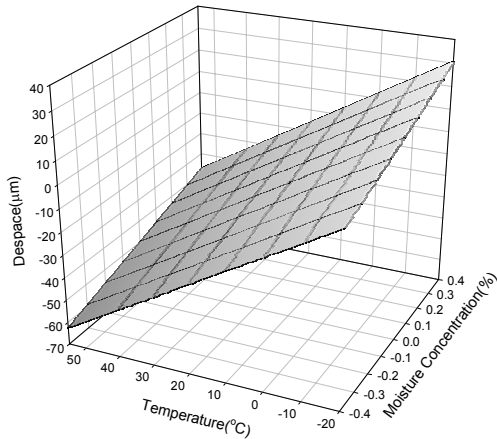


그림 11. 적층:  $[0_3/90_1/(\pm 45)_1]_s$  에 대한 온도 및 흡습량에 따른 광축간변위 (Despace)

표 3. 온도변화( $\Delta T$ )에 따른 적층설계:  $[0_m/90_n/(\pm 45)_p]_s$  에 대한 광축간 변위(Despace):  $\Delta C = 0, p = 1$ . Unit:  $\mu m$ .

	-20°C	-10°C	0°C	10°C	20°C	40°C	55°C
m=3, n=1	18.1	9.05	0	-9.05	-18.1	-36.2	-49.8
m=5, n=1	17.4	8.7	0	-8.7	-17.4	-34.8	-47.8
m=4, n=2	18.2	9.12	0	-9.12	-18.2	-36.5	-50.2
m=5, n=2	18.3	9.14	0	-9.14	-18.3	-36.6	-50.3
m=5, n=3	18.2	9.08	0	-9.08	-18.2	-36.3	-50.0
m=6, n=2	18.2	9.1	0	-9.1	-18.2	-36.4	-50.0
m=6, n=3	18.3	9.17	0	-9.17	-18.3	-36.7	-50.4

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고해상도 우주용 카메라의 경통부의 복합재 적층설계를 열환경 및 흡습에 의

한 영향을 고려하여 용단도표를 사용하여 도출하고 다층 지그재그이론에 기초하여 개발된 삼각형 유한요소를 이용하여 열흡습 해석을 수행하여 최적 적층설계에 대한 광축간 변위를 계산하였다.

용단도표로부터 0°방향 섬유와 90°방향 섬유의 함유량 및 45°방향 섬유의 함유량을 조절하여 강성계수, 열팽창계수 및 흡습계수를 변화할 수 있으며 치수안정성 및 구조안정성을 고려하여 용단도표를 반복적으로 사용하여 적층설계를 최적화 할 수 있다.

또한 해석 결과로부터 카메라의 운용 온도범위를 작게 하는 것이 경통의 치수변화를 최소화할 수 있는 방법임을 알았다.

#### 참 고 문 헌

1. D. G. Lee and J. B. Kosmatka, Damping Analysis of Composite Plates with Zig-Zag Triangular Element, *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 7, July 2002.
2. 이 덕규, 조 맹효, 지그재그 삼각형 유한요소를 이용한 점탄성물질이 섞여진 비틀린 복합재료 판의 진동해석, 한국항공우주학회지 제31권 1호, 2003년 2월.
3. D. G. Lee, HygroThermal Design of Composite Space Tube, *The 3rd Int'l Conf. on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Seoul, Korea, September 2-4, 2004.