

## 論文

## 실험계획법을 이용한 복합재 경통 적층각의 최적 설계에 관한 연구

박병욱\*, 서유덕\*, 김현중\*, 윤성기\*\*, 이승훈\*\*\*, 이덕규\*\*\*, 이응식\*\*\*, 장수영\*\*\*

### A Study on the Optimization of Ply Angles for Composite Tube using Design of Experiments

Byong-Ug Park\*, Yu-Deok Seo\*, Hyun-Jung Kim\*, Sung-Kie Youn\*\*, Seung-Hoon Lee\*\*\*,  
Deog-Gyu Lee\*\*\*, Eung-Shik Lee\*\*\* and Su-Young Chang\*\*\*

#### ABSTRACT

Composite has become one of the most frequently used material for a tube of satellite camera due to its attractive characteristics. However, laminated composites can be weakened by delamination which comes from interlaminar stress. Such failure mode cause structural instability of the camera as well as degradation of optical quality. Therefore composite tube should be robust in delamination. Also, composite tube should have high stiffness, sufficient high natural frequency and small coefficient of thermal expansion.

The design procedures presented in this paper are based on design of experiments. The experiments for mechanical analysis are designed by the tables of orthogonal arrays. In order to manipulate the various mechanical properties systematically, multiple-attribute decision making(MADM) is employed. Through analysis of variance and F-test, the critical design variables which have dominant influences on mechanical performance are determined. Finally improved ply angles for composite tube are determined.

#### 초 록

복합재는 인공위성 카메라 경통의 재료로 많이 사용되는 재료이다. 하지만 적층된 복합재는 층간응력에 의한 층간분리 현상으로 약화된다 이러한 파괴모드는 경통의 구조적 불안정을 유발하며, 카메라의 광학적 성능도 저하시킨다. 따라서 경통은 층간분리에 대해서 강건해야하며, 또한 고강성, 충분히 높은 고유진동수 및 작은 열 팽창 계수 등을 가져야한다.

본 연구에서는 실험계획법을 바탕으로 설계를 진행하였다. 각 실험과정은 직교배열표를 기준으로 설계되었으며, 여러 속성을 고려하기 위해서 MADM 방법을 사용하였다. 그리고 분산분석과 F-검정을 통해서 영향력 인자를 결정하여 경통의 최종 적층각을 결정하였다.

**Key Words** : Composite tube(복합재 경통), Interlaminar stress(층간 응력), Tables of Orthogonal arrays(직교배열표), MADM(다속성 의사결정)

† 2009년 5월 4일 접수 ~ 2009년 6월 24일 심사완료

\* 정회원, KAIST 기계공학과 대학원

\*\* 정회원, KAIST 기계공학과

교신저자, E-mail : skyoun@kaist.ac.kr

대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

\*\*\* 정회원, 한국항공우주연구원 광학 탑재체 그룹

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구 목적 및 필요성

인공위성 탑재체 카메라는 고해상도의 위성

이미지를 얻기 위해서 우수한 광학적 성능이 요구된다. 인공위성 카메라 시스템은 주반사경과 부반사경을 포함한 각종 광학부품과 더불어 이들을 연결하고 지지하는 기계적인 구조물들로 구성된다. 그러므로 구조물의 변형이나 파괴로 인해서 카메라의 광학적 성능이 심각하게 저하되는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 고성능의 카메라 시스템의 설계 및 개발을 위해서는 반사경 시스템의 광학적 특성과 기계적인 특성을 동시에 체계적으로 고려하여야 한다. 복합재 경통은 주반사경과 부반사경의 정렬을 맞추는 역할을 하며, 복합재 경통의 과도한 변형과 파괴는 카메라 시스템의 광학성능 및 기계성능을 저하시키는 요인이 된다[1]. 그리고 경통의 변형과 파괴는 복합재 경통의 주요 파괴모드인 적층 분리현상(delamination)을 일으킨다. 따라서 우수한 광학성능을 얻기 위해서는 인공위성의 제작 및 운용 과정에서 발생하는 적층 분리의 가능성을 최소화할 수 있는 설계가 요구된다.

## II. 적층 분리와 층간 응력

적층 분리 현상의 주된 이유는 층간 응력(interlaminar stress)으로 알려져 있다[2]. 층간 응력이란 Fig. 1에서 나타나 있는 응력들 중에서 복합재의 두께방향(3-direction)의 성분을 포함하고 있는 응력( $\sigma_{33}$ ,  $\tau_{13}$ ,  $\tau_{23}$ )이며, 이 중에서  $\sigma_{33}$ 이 층간 수직응력이며,  $\tau_{13}$ 과  $\tau_{23}$ 은 층간 전단응력이다. 복합재는 구조적으로 서로 다른 적층각의 플라이(ply)들로 구성되기 때문에 재료의 불연속성에 의해서 층간 응력의 변화가 급격하게 나타난다. 또한 층간 응력들은 복합재의 자유경계단 부분에서 급격하게 증가하는 자유경계단 효과(free-edge effect)를 가지고 있다[3]. 자유경계단 효과로 인해서 층간응력은 Fig. 2와 같이 자유경계단 부분에서 적층 분리 현상을 발생시킨다. 따라서 적층 분리 가능성을 최소화하기 위해서는 층간 응력을 최소화하여야 한다. 그리하여 본 연구에서는 유한요소법을 사용한 복합재 경통의 층

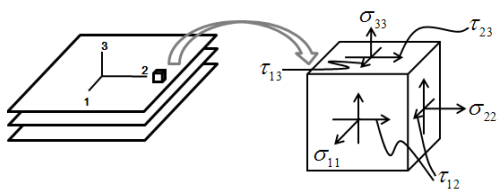


Fig. 1. Component of stress

Table 1. Material properties and ply thickness

Material	Material properties	Thickness
CFRP	$E_1 = 538 \text{ GPa}$ , $E_2 = 5.1 \text{ GPa}$ $G_{12} = 4.5 \text{ GPa}$ , $\nu_{12} = 0.3$ $\rho = 1796 \text{ kg/m}^3$ $\alpha_1 = -1.08 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ $\alpha_2 = 30.02 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$	0.2mm

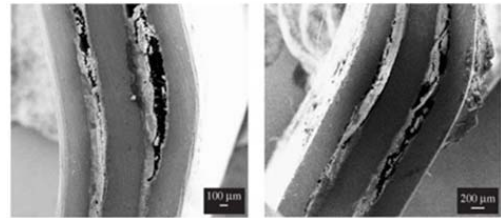


Fig. 2. Delamination at free-edge

간 응력 해석을 통하여 각 적층 설계안들이 적층 분리에 취약한 정도를 상대적으로 비교하였다.

## III. 기존 복합재 경통 성능 평가

### 3.1 성능 평가 기준 결정

복합재 경통에 부과되는 하중은 크게 경통의 제작과정에서 발생하는 열 하중과 우주환경에서 운용될 때 발생하는 열 하중으로 나눌 수 있다. 두 경우 모두 열 하중이 부과되는 경우이므로 복합재 경통은 열 하중 하에서의 층간 응력이 최소화 되어야 한다. 또한 광학 기구 시스템의 성능을 유지하기 위하여 경통의 구조적 안정성도 보장되어야 한다. 따라서 복합재 경통은 고유진동수 측면에서의 안정성과 열 하중에 대한 둔감성등을 필요로 하며, 이를 성능 평가 기준으로 설정하였다.

### 3.2 기존 복합재 경통 정보

복합재 경통은 내경이 925mm, 길이가 1334mm이고 11개의 플라이로 구성되어 있다. 기존의 복합재 경통은 CFRP로 구성되어 있으며, 적층 정보는 다음과 같으며, 편의상 본 논문에서는 L1으로 표기하겠다.

$$L1 : [0/0/0/45/-45/90/-45/45/0/0/0]$$

CFRP 각 플라이의 두께는 0.2mm이므로 L1의

총 두께는 2.2mm이다. CFRP의 재료상수는 Table 1에 나타냈다. 그리고 CFRP는 직교이방성(orthotropic)이고 특별히 2-3 평면에서 등방성(transversely isotropic on 2-3 plane)이므로 식 (1), (2)를 만족한다.

$$E_2 = E_3, G_{12} = G_{13}, \nu_{12} = \nu_{13} \quad (1)$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{32})} \quad (2)$$

### 3.3 복합재 경통의 해석 결과

#### 3.3.1 균일한 온도 변화에 대한 층간력 해석

복합재 경통은 필라멘트 와인딩(filament winding)방식으로 제작되어 진다. 필라멘트 와인딩 방식은 원기둥 형태의 맨드릴(mandrel)에 와이어 형태의 CFRP를 한 층씩 감아서 적층하는 방식으로 각 층을 쌓아 올릴 때마다 온도를 약 5°C 올렸다가 내리는 경화과정을 거친다. 그리고 모든 층이 적층되면 맨드릴을 제거하고 최종적으로 후경화 과정(post curing)을 통해서 경화를 시키게 되는데 이 과정에서 발생하는 온도차는 약 65°C로 제작과정에서 가장 큰 열 하중이 걸리게 된다. 또한 우주환경에서 운용될 때에는 최고 약 30°C의 온도차가 발생된다. 그러므로 제작 및 운용환경에서 적층 분리 현상이 일어나는 확률이 가장 높을 때는 제작과정의 후경화 과정이다. 본 연구에서도 후경화 과정의 온도차인 65°C를 열 하중으로 부여하여 복합재 경통에 발생하는 층간 응력을 계산하였다.

복합재 경통의 플라이들은 0°와 90°뿐만 아니라 45°, -45°를 갖기 때문에 복합재 경통은 구조적으로 대칭이 되지 않는다. 그리하여 본 연구에서는 복합재 경통 전체를 각 플라이마다 모델링 하였으며, ABAQUS[4]를 사용하여 해석을 수행하였다. 본 연구의 열 해석과정에서 사용한 복합재 경통의 경계조건은 강체변형거동(rigid body motion)이 생기지 않도록 다시 말해 특이성(singularity)이 발생되지 않도록 경통의 내부표면에서 축방향의 중심부에 위치하며 마주보고 있는 두 절점에 부여하였다. 두 절점 중 한 점은 x, z 방향을 고정시켰으며, 다른 한 점은 x, y, z 방향 모두를 고정시켰다.

위의 경계 조건과 하중 조건을 부과하여 경통에 대한 응력 해석을 수행하였다. 경통의 최대 본미제스 응력(von-mises), 최대 층간 수직응력(int.normal), 최대 층간 전단응력(int.shear)의 결과는 Table 2에 나타내었다. 층간 수직응력보다

Table 2. Max. stresses of L1 in thermal elastic analysis

	Von-mises (Pa)	Int.Normal (Pa)	Int.Sheer (Pa)
L1	4.643×10 <sup>7</sup>	1.919×10 <sup>4</sup>	8.459×10 <sup>5</sup>

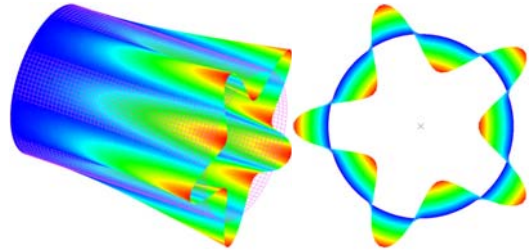


Fig. 3. Eigenmode of L1

층간 전단응력이 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 하지만 층간 수직응력은 두께방향의 수직응력이기 때문에 층간 전단응력보다 적층 분리현상에 보다 직접적인 영향을 준다. 그렇기 때문에 수치적으로는 층간 수직응력이 층간 전단응력보다 작더라도 중요하게 고려해야한다.

#### 3.3.2 경통의 고유진동수 해석

복합재 경통의 고유진동수 해석을 위한 경계 조건은 일반적인 고유진동수 해석과 같이 경통의 한 쪽 끝 면을 고정하였다. 경통은 균일 온도 변화 해석과 같이 3차원 고체요소를 사용하여 모델링하였다.

첫 번째 고유모드는 Fig. 3과 같고 L1의 1차 고유진동수 값은 88.373Hz였다.

## IV. 복합재 경통 적층각의 최적 설계

열 하중 하에서 층간 응력은 최소한으로 하면서, 고유진동수는 증가시키기 위해 실험계획법을 사용하여 경통 적층각의 최적 설계를 수행한다. 먼저 층간 수직 및 전단 응력과 고유진동수에 유의한 인자를 선정하는 과정이다. 이 과정에서는 직교배열표(Tables of orthogonal arrays)를 이용하여 실험을 계획하고 계획된 표에 따라 적층각 및 적층방법을 설정하여 해석을 수행한다. 해석 결과를 이용하여 각 설계속성 별로 분산분석표(analysis of variance)를 작성하고 F-검정(F-test)을 수행한 후 영향력 있는 인자를 선별한다. 다음 과정은 상충되는 인자들을 조율하기 위해서 MADM(multiple attribute decision making) 방

법을 사용하여 최종적으로 설계 변수를 결정 한다.

4.1 설계인자 설정

실험계획법에 사용한 각도의 종류는 실제 복합재 경통에 많이 사용되는 각도인 0°, ±45°, 90°이다. 총 11개 층으로 구성되어 있는 경통의 각 층의 각도를 하나의 인자로 설정하였으며, 적층 방식(대칭, 비대칭) 또한 인자로 설정하였다. Fig. 4와 같이 경통의 11층 중 가운데 층의 각도는 A 인자로 설정하였으며, 경통의 뒤틀림을 최소한으로 하기 위해서 0°와 90°로 설정하였다. B인자는 경통의 적층 방법으로 가운데 층에 대하여 대칭 및 비대칭 방법으로 설정하였다. 두 인자간의 교호작용에 관해서는 경통의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 A인자와 B인자 간의 교호작용만이 있다고 가정하고, 나머지 인자들 간의 교호작용은 무시하였다. A인자와 B인자 간의 교호작용은 A×B인자로 표현하였다. 이 인자들은 Table 3에 나타나 있듯이 2가지 경우가 존재하는 2수준의 설계인자이다.

나머지 5개 층의 각도에 대해서는 Fig. 4와 같이 경통의 안쪽에서부터 C, D, E, F, G 인자로 설정하였다. 이 인자들은 0°, ±45°, 90°를 가지는 4수준의 설계인자로 설정하였다.

4.2 직교배열표 작성

직교배열표는 직교화의 원리를 이용하여 변수들의 교호작용을 최소화하여 실험횟수를 획기적으로 줄일 수 있는 실험계획법이다[5][6]. 본 실험에서는 4수준 설계인자 5개, 2수준 설계인자 3

Table 3. Design variables

Parameter	Design variables
A	0°, 90°
B	Symmetry, Anti-Symmetry
A×B	Yes, No
C, ... ,G	0°, ±45°, 90°

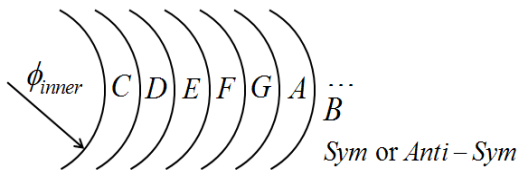


Fig. 4. An arrangement plan of parameter at composite tube

Table 4. Table of orthogonal arrays for experiment

(S : Symmetry, A : Anti-Symmetry)  
(Y : Yes , N : No)

Parameter	A	B	A×B	C	D	E	F	G
1	90	S	N	0	0	0	0	0
2	90	A	Y	0	90	0	90	90
3	0	S	Y	0	0	90	45	0
4	0	A	N	0	90	90	-45	90
5	0	A	N	90	90	45	0	0
6	0	S	Y	90	0	45	90	90
7	90	A	Y	90	90	-45	45	0
8	90	S	N	90	0	-45	-45	90
9	90	A	Y	90	45	90	90	45
10	90	S	N	90	-45	90	0	-45
11	0	A	N	90	45	0	-45	45
12	0	S	Y	90	-45	0	45	-45
13	0	S	Y	0	-45	-45	90	45
14	0	A	N	0	45	-45	0	-45
15	90	S	N	0	-45	45	-45	45
16	90	A	Y	0	45	45	45	-45
17	90	A	Y	45	0	0	0	45
18	90	S	N	45	90	0	90	-45
19	0	A	N	45	0	90	45	45
20	0	S	Y	45	90	90	-45	-45
21	0	S	Y	-45	90	45	0	45
22	0	A	N	-45	0	45	90	-45
23	90	S	N	-45	90	-45	45	45
24	90	A	Y	-45	0	-45	-45	-45
25	90	S	N	-45	45	90	90	0
26	90	A	Y	-45	-45	90	0	90
27	0	S	Y	-45	45	0	-45	0
28	0	A	N	-45	-45	0	45	90
29	0	A	N	45	-45	-45	90	0
30	0	S	Y	45	45	-45	0	90
31	90	A	Y	45	-45	45	-45	0
32	90	S	N	45	45	45	45	90

개가 사용되었고, 모든 설계인자를 동시에 표현하는 직교배열표의 최소 자유도는 18개 (1×3+3×5=18)이다. 그래서 L<sub>32</sub>(2<sup>31</sup>)형 직교배열표를 사용하였고, 인자에 대한 직교배열표만 표시하면 Table 4와 같다.

4.3 분산분석 및 F-검정

작성된 직교배열표를 따라서 실험을 수행한 후 각 인자가 설계속성에 미치는 영향을 정량적으로 비교하기 위해서 실험결과에 대해서 분산분석을 수행한 후 F-검정을 수행한다. Table 5는 F-검정 수행결과를 나타내며, F<sub>0</sub>값이 클수록 그 인

자가 영향력 있는 인자임을 나타낸다. 해석결과에서도 알 수 있듯이 층간 수직응력에 관해서는 A, C, D인자, 층간 전단응력에 대해서는 A, B, F 인자, 고유진동수에 대해서는 A, C, D인자가 영향력 있는 인자로 작용한다.

이와 같이 설계자가 어떠한 성능을 관심대상으로 하느냐에 따라 그 성능에 대한 주요인자가 다르게 된다. 만약 3 개의 설계변수를 모두 선택하라고 한다면 공통적으로 3 개의 인자가 세 반응치의 주요변수로 포함되어 있지 않기 때문에 주요설계 변수를 결정하는데 있어서 어려움이 존재한다. 이러한 어려움을 해결하기 위해서 MADM방법을 도입하여 3개의 반응치(층간 수직 및 전단응력, 고유진동수)를 중요도에 따라 하나의 반응치로 표현하여 주요 설계 변수를 결정하였다.

#### 4.4 MADM

MADM은 설계속성 간의 상대적 중요도(relative importance)를 설계자가 결정하고 다수속성에 대한 평가치를 하나의 상위평가기준(super criterion)으로 통합함으로써 설계문제를 단일 속성 의사결정문제로 변환하는 방법이다. 본 연구에서는 다수속성에 대한 평가치를 상위평가기준인 TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution)값으로 통합하여 단일 속성 설계문제로 변환한 다음 최적해를 구하였다. TOPSIS는 최적해는 이상해(ideal solution)로부터는 가장 가깝고 반이상해(negative ideal solution)로부터는 가장 멀어야 한다는 논리로부터 정의된 것이다. 이상해와 반이상해를 동시에 고려하여 상대적 근접도(relative closeness)를 산출하며, 그 값은 0에서 1 사이의 값을 가진다. 0에 가까울수록 반이상적인 경우에 가깝고, 1에 가까울수록 이상적인 경우에 가깝다. TOPSIS에 관한 보다 자세한 내용은 참고문헌[7]에 기술되어 있다.

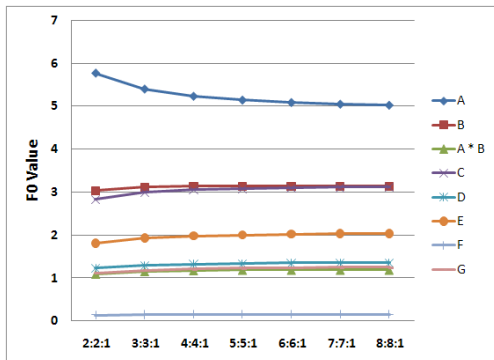


Fig. 5. Graph of  $F_0$  value for relative closeness

Table 5.  $F_0$  value of interlaminar stresses and eigenvalue

Parameter	Int.Normal	Int.Sheer	Eigenvalue
A	<b>5.456</b>	<b>2.917</b>	<b>14.946</b>
B	0.763	<b>4.260</b>	0.000
A×B	0.054	2.778	0.054
C	<b>4.333</b>	1.802	<b>4.932</b>
D	<b>1.804</b>	0.866	<b>2.687</b>
E	0.640	2.850	0.363
E	0.353	0.205	0.217
F	0.956	<b>3.071</b>	0.895

Table 6.  $F_0$  value for relative closeness

Ratio of relative important (Int.Normal : Int.Sheer : Eigen value)	
인 자	$F_0$
A	<b>5.094</b>
B	<b>3.141</b>
A×B	1.190
C	<b>3.105</b>
D	<b>1.343</b>
E	<b>2.022</b>
F	0.157
G	<b>1.238</b>

본 연구에서는 우선적으로 층간 수직응력과 층간 전단응력의 상대적 중요도를 1:1로 설정하였다. 그 이유는 알려진 바대로 두 응력 모두 적층 분리현상의 결정적인 원인으로 생각할 수 있기 때문이다. 그리고 고유진동수는 경통의 설계시에 약 100Hz 이상의 값을 가지면 경통의 구조적 안정성이 보장되기 때문에 층간 응력보단 중요도를 낮게 설정하였다. Fig. 5는 층간 응력의 중요도 비를 달리함에 따라 상대적 근접도에 대한 분산분석 및 F-검정을 수행한 결과이다. 층간 응력의 상대적 중요도가 증가될수록 각 인자의  $F_0$ 값이 일정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 따라서 상대적 근접도에 대해서 영향력 있는 인자를 선택할 때 수렴한  $F_0$ 를 기준으로 판별해야 한다. 상대적 중요도 비가 6:6:1일 때 충분히 수렴하였기 때문에 이를 기준으로 영향력 있는 인자를 결정하였다. Table 6은 상대적 중요도가 6:6:1일 때의 각 인자에 대한 F-검정 결과이다.

Table 7. Relative closeness with respect to parameter A

Level	90°		0°	
Relative Closeness	0.9246	0.6729	0.9162	0.6521
	0.4237	0.7930	0.7668	0.6403
	0.5842	0.7073	0.5554	0.7919
	0.4298	0.4957	0.8867	0.9222
	0.1324	0.8474	0.7931	0.8175
	0.5923	0.7176	0.7961	0.8062
	0.8772	0.9795	0.7908	0.8905
	0.7904	0.8236	0.8117	0.8439
Average	0.6745		<b>0.7926</b>	

Table 8. Relative closeness with respect to parameter B

Level	Symmetry		Anti-Symmetry	
Relative Closeness	0.9246	0.7930	0.4237	0.6729
	0.9162	0.6403	0.7668	0.6521
	0.8867	0.7919	0.5554	0.9222
	0.4298	0.7073	0.5842	0.4957
	0.5923	0.8474	0.1324	0.7176
	0.7961	0.8175	0.7931	0.8062
	0.7908	0.8439	0.8117	0.8905
	0.8772	0.8236	0.7904	0.9795
Average	<b>0.7799</b>		0.6872	

Table 9. Relative closeness with respect to parameter C

Level	0°	90°	45°	-45°
Relative Closeness	0.9246	0.5554	0.6729	0.7919
	0.4237	0.8867	0.7930	0.9222
	0.9162	0.5842	0.6521	0.7073
	0.7668	0.4298	0.6403	0.4957
	0.7908	0.1324	0.8905	0.8474
	0.8117	0.5923	0.8439	0.7176
	0.8772	0.7931	0.9795	0.8175
	0.7904	0.7961	0.8236	0.8062
Average	<b>0.7877</b>	0.5963	0.7870	0.7632

그 결과 A, B, C, D, E, G인자를 영향력 있는 인자로 결정하였고, 각 인자의 상대적 근접도에 관한 변동표를 살펴보고 최적 값을 결정하였다. 각 인자에 대한 변동표는 Table 7에서 Table 12까지 나타나있다. A인자가 0°일 때, B는 대칭 적층방법, C는 0°, D는 -45°, E는 45°, G는 0°일 때 값이 가장 좋게 나타났다.

결정된 인자를 제외한 나머지 인자의 각도를 결정하기 위하여 Table 13과 같이 F인자를 0°, ±45°, 90°로 변화 시키가면서 추가적인 해석을

Table 10. Relative closeness with respect to parameter D

Level	0°	90°	45°	-45°
Relative Closeness	0.9246	0.4237	0.1324	0.5923
	0.9162	0.7668	0.7931	0.7961
	0.8867	0.5554	0.8117	0.7908
	0.4298	0.5842	0.7904	0.8772
	0.6729	0.7930	0.8474	0.7176
	0.6521	0.6403	0.8175	0.8062
	0.9222	0.7919	0.8439	0.8905
	0.4957	0.7073	0.8236	0.9795
Average	0.7376	0.6578	0.7325	<b>0.8063</b>

Table 11. Relative closeness with respect to parameter E

Level	0°	90°	45°	-45°
Relative Closeness	0.9246	0.9162	0.5554	0.5842
	0.4237	0.7668	0.8867	0.4298
	0.7931	0.1324	0.8772	0.7908
	0.7961	0.5923	0.7904	0.8117
	0.6729	0.6521	0.7919	0.7073
	0.7930	0.6403	0.9222	0.4957
	0.8175	0.8474	0.9795	0.8905
	0.8062	0.7176	0.8236	0.8439
Average	0.7534	0.6581	<b>0.8284</b>	0.6942

Table 12. Relative closeness with respect to parameter G

Level	0°	90°	45°	-45°
Relative Closeness	0.9246	0.4237	0.1324	0.5923
	0.9162	0.7668	0.7931	0.7961
	0.5554	0.8867	0.7908	0.8117
	0.5842	0.4298	0.8772	0.7904
	0.8474	0.7176	0.6729	0.7930
	0.8175	0.8062	0.6521	0.6403
	0.8905	0.8439	0.7919	0.9222
	0.9795	0.8236	0.7073	0.4957
Average	<b>0.8144</b>	0.7123	0.6772	0.7302

Table 13. Table for extra experiment

	A	B	C	D	E	F	G
T1	0°	Sym	0°	-45°	45°	90°	0°
T2	0°	Sym	0°	-45°	45°	0°	0°
T3	0°	Sym	0°	-45°	45°	-45°	0°
T4	0°	Sym	0°	-45°	45°	45°	0°

Table 14. Results of extra experiment

	Int.Normal (Pa)	Int.Sheer (Pa)	Eigenvalue (Hz)
T1	$1.715 \times 10^4$	$7.341 \times 10^5$	115.990
T2	$2.759 \times 10^4$	$1.531 \times 10^6$	107.570
T3	$2.003 \times 10^4$	$1.606 \times 10^6$	105.600
T4	$2.234 \times 10^4$	$1.088 \times 10^6$	105.630
L1	$1.919 \times 10^4$	$8.459 \times 10^5$	88.373

수행하였고, 그 결과는 Table 14에 나타나있다. 결과를 보면 T1값이 층간응력 및 고유진동수 측면에서 모두 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다.

최종 도출된 설계안(T1)으로 해석을 수행한 결과 기존의 적층정보(L1)보다 층간 수직응력은 10.6%, 층간 전단응력은 13.2% 감소하였고, 고유진동수는 31.3% 증가하였다.

### V. 결 론

본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 인공위성 카메라 복합재 경통의 구조 안정성을 향상시키는 연구를 수행하였다. 적층 복합재의 주요 파괴 모드인 적층 분리의 원인이 되는 층간응력의 최소화, 높은 고유진동수에 대한 성능 평가 기준을 결정하였다. 그리고 새로운 최적설계안을 제시하고 기존 설계안의 개선 방안도 제시하였다. 제시한 설계안은 기존의 설계안에 비해서 최고 층간 수직응력은 10.6%, 층간 전단응력은 13.2% 감소하였고, 고유진동수는 31.3% 증가하였다.

본 연구에서는 열 하중상황에서의 적층분리 현상에 영향을 미치는 층간응력과 고유진동수를 설계 속성으로 설정하였지만 다양한 설계 속성에도 동일한 방법을 적용시킬 수 있다. 그렇기에 향후 개발될 복합재 경통의 설계에도 쉽게 적용할 수 있어 복합재 경통 설계 및 기술국산화에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 후 기

본 연구는 한국항공우주연구원(KARI)의 '다목적실용위성 3호 시스템종합개발사업'에 의하여 지원되었음.

### 참고문헌

- 1) 이덕규, 우선희, 이용식, "열흡습 영향을 고려한 복합재 우주 경통 설계", 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, Vol. 11, pp. 536 ~ 540, 2004.
- 2) P. W. Hsu and C. T. Herakovich, "Edge Effects in Angle-Ply Composite Laminates", Journal of Composite Materials, Vol. 11, No. 4, 422-428, 1977.
- 3) N. J. Pagano and R. B. Pipes, "Interlaminar Stress in Composite Laminates Under Uniform Axial Extension", Journal of Composite Material, Vol. 4, pp. 538-548, 1970.
- 4) Hibbitt, K. and Sorensen, Inc., "ABAQUS Theory Manual", Version 5.8, 1998.
- 5) 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 서울, 1995.
- 6) 김영상, 이나리, 조창열, 박찬우, "파라미터 모델링을 이용한 항공기 날개의 다분야 설계최적화", 한국항공우주학회지, Vol. 36, No. 3, pp. 229~237, 2008.
- 7) Park, J.C., Kim, K.B. and Kim, K.M., "Robust Design for Multiple Quality Attributes in Injection Molded Parts by the TOPSIS and Complex Method", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.18, No.12, pp. 116~123, 2001.