

# 필라멘트 와인딩 복합재료 연소관의 구조적 안정성 연구

이윤규\* · 권태훈\* · 이원복\*

## Analysis of Filament Wounded Composite Rocket Motor

Yoon-kyu Lee\* · Tae-hoon Kwon\* · Won-bok Lee\*

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to show a reliable analytical method to predict the deflections of F/W Composite Motor Case. Structural analysis and testing of a Carbon/Epoxy Composites Motor Case for Pressure Loadings were performed. This paper presents the development of 3-D layered axi-symmetric solid element for finite element analysis. Finite element analyses were performed considering fiber angle variation in longitudinal and thickness direction by ANSYS. The analytical results agree well with experimental results.

### 초 록

본 논문의 목적은 KSLV-1 KM 축소형 연소관의 변형을 예측할 수 있는 효과적인 해석방법을 제시하는 것을 목적으로 하며, 내압을 받는 F/W 복합재 연소관에 대한 구조해석과 실험을 수행하였다. 효과적인 연소관의 해석을 위해 돔 부위 기하학적 비선형성을 고려한 유한요소법의 3차원 적층 축대칭요소(layered axi-symmetric solid element)에 적용하였다. 유한요소 해석은 전처리 프로그램(HC2004)을 이용 연소관 돔 부위에서의 기하학적 비선형성을 고려하여 ANSYS로 해석을 수행 하였으며, 그 결과 전처리 시간 및 계산 소요시간이 짧았으며, 수압실험 결과값과 비교, 검토 하였다.

Key Words: F/W Composite Motor Case(필라멘트 와인딩 복합재 연소관), layered axi-symmetric solid element (3차원 적층 축대칭요소)

### 1. 서 론

필라멘트 와인딩(F/W) 제작법은 섬유에 수지를 함침시켜 인장력을 가하면서, 형(mandrel) 위에 감아 제품을 제작하는 것으로 주로 항공기나 Raket Motor Case, 산소통과 같이 무게의

경량화를 요구하는 곳에 이용된다. 이러한 압력 용기는 원통부(cylinder)와 곡면부(dome) 사이의 불연속 부위가 없이 일체 제작됨으로서 이 부분의 취약점을 감소시키게 된다. 이러한 F/W 공법은 일반 공법에 비해 비강도, 비강성이 뛰어나며 이 공법에 의해 제작된 압력용기는 일반적인 복합재료 제작 공법인 Prepreg도 적층하는 공법과는 다른 복잡한 여러 인자(factor)들로 인해 그 거동 예측 해석에 많은 난점을 가지고 있다. 특히, Motor Case와 같은 압력 용기인 경우

\* (주) 한화/화학 대전공장 개발부  
연락처, E-mail: seal1472@hanhwa.co.kr

주로 내압에 의해 변형을 하게 되는데 여기에 해석되는 방법은 Netting 해석, Shell Theory, FEM 등으로서, Shell Theory는 제한된 경계 조건과 원통부위 등 국부적으로 이용되고 있어 일반적으로 FEM이 많이 사용되고 있다. 이 때 이용되는 FEM은 Axi-symmetric Solid Element나 Axi-symmetric Shell Element를 이용하며 최근에는 3-D Layered Composite Shell Element가 주로 이용된다. 본 논문에서는 Isotensoid 이론에 근거한 곡면부(dome)형상을 설계하며 연소관 형상 및 두께 방향 와인딩 각도 및 형상의 비선형성을 계산하는 전처리 프로그램으로 HC2004를 MATLAB을 사용하여 프로그래밍하였다. 전처리 프로그램에 의해 3-D Layered Axi-symmetric Solid Element를 사용하는 Input File을 생성하여 ANSYS를 이용 내압에 대한 해석을 수행하였다. 해석 모델로는 KSLV-1 KM을 택하였으며, 수압시험결과와 비교 분석하였다.

## 2 본 론

### 2.1 배경 이론

연소관 설계에 적용된 이론은 등장력 설계(Isotensoid Design Theorem)[1]에 의한 곡면부(dome) 설계 이론으로 다음의 두 가지 조건을 갖는다.

- 연소관에 작용하는 내압에 의해 걸리는 모든 응력을 섬유만이 담당한다.

$$2 + \frac{rr''}{1+r'^2} = \tan^2 \alpha \quad (1)$$

- 섬유에 걸리는 응력은 섬유의 길이를 따라 일정하다.

$$r^2 \frac{\sqrt{1+r'^2}}{\cos \alpha} = \text{const} \quad (2)$$

$$\Theta = \sin^{-1} \frac{r}{R} \quad (3)$$

Where,

$\alpha$  = 곡면부(dome)의 자오선과 섬유가 이루는각

$\alpha_c$  = 실린더(cylinder)에서 자오선과 섬유가 이루는각

$y$  = 곡면부(dome)의 종축에서 요소 중심까지의 거리

$R$  = 실린더(cylinder)에서 요소 중심까지의 거리

식 (1)과 (2)를 정리하면 곡면부(dome)의 형상을 결정짓는 식(4)[1]을 얻을 수 있다.

$$z(r') \quad (4) \\ = -r_c \int_1^{\frac{r}{r_c}} \frac{\cos \alpha_c t^3}{\sqrt{(1-t^2)[\cos^2 \alpha_c t^2(1+t^2) - \sin^2 \alpha_c]}} dt$$

연소관은 식 (4)에 의해 설계된 곡면부(dome)형상과 연소관 설계 요구 조건에 의해 맨드렐이 설계되고 그 위에 내열재 층을 부착한 후 필라멘트 와인딩이 이루어진다. 필라멘트 와인딩 시 돔부위의 두께 방향을 따라 변하게 되는 와인딩 각도는 공정상의 미끄러짐 계수 ( $\lambda$ : Slippage Tendency)를 고려한 준측지선 궤적(Semi-geodesic Path)[2]에 의한 식(5)에 의해 구해진다.

$$\alpha' = \frac{\lambda(A^2 \sin^2 \alpha - rr' \cos^2 \alpha) - r'A^2 \sin \alpha}{rA^2 \cos \alpha} \quad (5)$$

Where,

$$\alpha' = \frac{d\alpha}{dx} \quad r' = \frac{dr}{dx} \quad A = \sqrt{1+r'^2}$$

식 (4)에 의한 돔형상과 (5)에 의한 곡면부(dome)의 와인딩 각도에 의해 곡면부(dome)에서의 각 층(Layer)별 두께를 계산 할 수 있다. 이 때 다음의 두 가지 가정이 적용되며 두께 계산식은 다음과 같다.

- 섬유의 함유율이 일정하다.
- 곡면부(dome)를 자오선의 수직 방향으로 잘랐을 때 그 단면을 통과하는 섬유의 수가 일정하다.

$$t = \frac{r_c \cos \alpha_c}{r \cos \alpha} * t_c \quad (6)$$

Where,

$t$ : 곡면부(dome) 헬리컬 층의 두께

$t_c$ : 원통(cylinder)부위 헬리컬 층의 두께

그러나 보스(boss)부위에서는 와인딩 각도가 90°가 되어 식(6)을 적용하게 되면 두께가 발산하므로 계산 시 와인딩 각도가 90°가 되는 부

분부터는 곡률을 보정을 해주었다.

### 2.2 수치 해석

본 해석은 2.1절의 이론을 바탕으로 전처리과정을 프로그래밍하여 Input File을 생성한 후 유한요소법 프로그램인 ANSYS를 사용하여 내압에 대해 해석하였다. 이 때 연소관의 제원과 적층 각도는 Table 1과 같다.

구분	제원
내경	500.6 mm
전장	532 mm
전방보스	100 mm
후방보스	170 mm
Helical ( $\pm 27^\circ$ ) (1차 와인딩)	6 layer
Helical ( $\pm 15^\circ$ ) (2차 와인딩)	2 layer
Wafer	6 ply
Hoop ( $90^\circ$ )	9 ply
U.D. ( $0^\circ$ )	2 ply

Table 1. KSLV-1 KM 제원 및 적층각도.

적용된 복합재 T-700 및 보스, EPDM 의 물성은 Table 2 와 같다.

	T-700	Al Boss	EPDM
$E_1$	135 GPa	7.2 GPa	70 MPa
$E_2, E_3$	8.5 GPa	7.2 GPa	70 MPa
$G_{12}, G_{13}$	5.331 GPa	-	-
$G_{23}$	2.744 GPa	-	-
$\nu_{12}, \nu_{13}$	0.33	0.32	0.5
$\nu_{23}$	0.43	0.32	0.5

Table 2. KSLV-1 KM 적용 재료 물성.

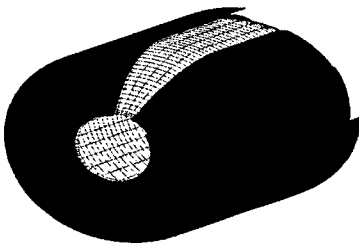


Fig. 1 연소관 형상 (HC2004 프로그램).

Fig. 1은 HC2004 프로그램에 의해 설계된 연소관의 형상을 보여준다. 순서대로 맨드렐, EPDM층, 복합재층의 형상 및 제원 정보를 담고 있다.

Fig. 2는 HC2004에 의해 생성된 Input File을 ANSYS로 실행하였을 때의 유한요소 해석 모델이다. Cyclic-symmetric 경계 조건을 부과하였고 내압은 Surface Pressure Load로 주었다.



Fig. 2 3-D Axisymmetric Solid Model with ANSYS.

Fig.3 은 전방 돔 10번째 복합재 요소의 적층 형태를 보여주며 그림에서  $0^\circ, 90^\circ$  층은 돔(dome)부위에는 실제 존재하지 않는 층으로 두께를 0으로 하여 해석하였다.

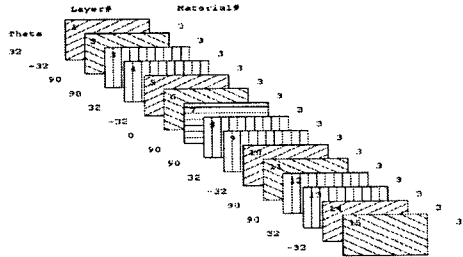


Fig. 3 전방 돔부위 층상에 위치한 요소의 적층 형상.

실제 연소관 Y-Joint의 Epoxy 보강은 고려하지 않았으며 Boss는 형태를 단순화시켜 유한요소 모델을 생성하였다.

### 3. 실험 및 결과 고찰

1000psi의 내압에 대한 해석과 실험을 수행하였으며, 수압시험은 KSLV-1 KM용으로 제작된 총 11호기 중 6,10,11호기에 대한 실험 결과를 검토하였다.

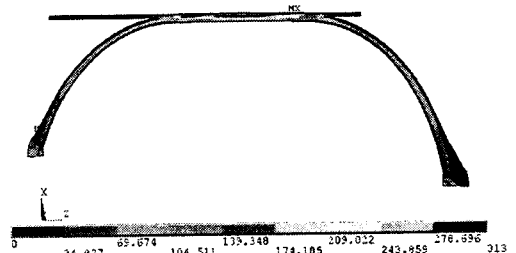


Fig. 4 응력 분포 (Stress Contour Plot).

Fig. 4 에서와 같이 주응력 분포는 복합재의 실린더 부위에 집중되어 있음을 알 수 있다. 이는 실제 내압이 주어졌을때 실린더 중앙 부위가 가장 취약함을 보여 준다. 또한 후방 보스의 응력이 증가함을 확인 할 수 있다.

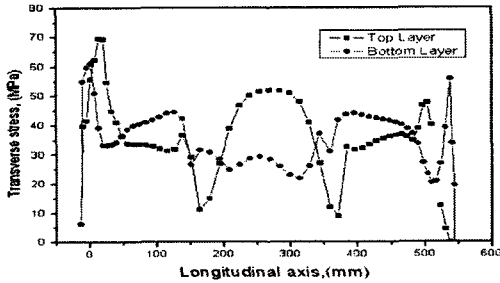


Fig.5 Transverse stress of Top & Bottom layer.

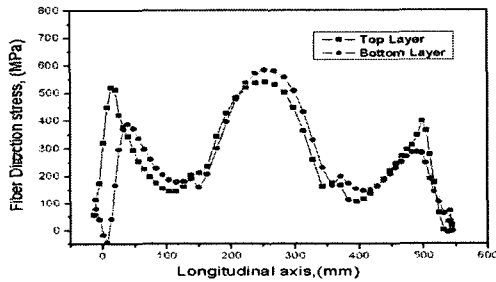


Fig.6 Fiber directional stress of Top & Bottom layer.

Fig. 5와 Fig. 6에서 응력은 실린더 중앙이 가장 높은 분포를 보이며, 보스 부위와 Y-joint부위에서 응력이 집중되는 것을 알 수 있다.

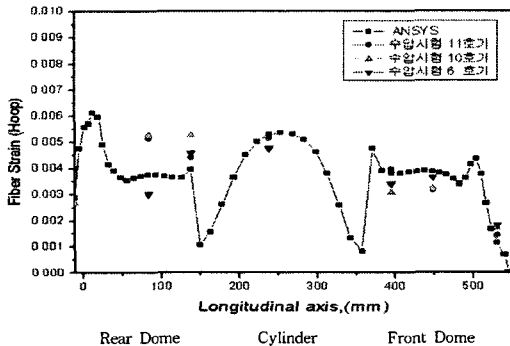


Fig. 7 Comparison of fiber strains between analysis and experiment.

Fig. 7 은 연소관 각 부위에서의 Hoop 방향의 변형과 수압시험 결과값과의 비교를 보여준다. 실린더 및 전·후방 돔(dome)부위에서 실험값과 잘 일치함을 보여준다.

#### 4. 결 론

1. 필라멘트 와인딩 복합재 연소관의 기하학적 비선형성을 고려하여 해석을 수행하였으며, 수압시험 결과와 잘 일치하는 결과를 얻어내었다.
2. 복잡하고 오랜 시간이 소요되는 전처리과정을 MATLAB으로 프로그래밍한 HC2004을 사용함에 의해 단축할 수 있었다.
3. 수압시험을 모사한 내압에 대한 해석 결과는 연소관내의 응력이 실린더 중앙 부위에 가장 큰 값을 가지고, 고정되어 있는 후방 보스부위에 응력이 집중되는 현상을 예측 할 수 있었다.
3. 본 연구는 재료에 대해서는 선형인 경우에 대하여 해석하였으나, 보다 정확한 해석을 위해 파손이론을 적용한 재료 비선형성에 대한 연구와 설계변수에 따른 복합재 연소관의 구조 안정성에 대한 연구를 수행할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

1. Evans, "Composite Motor Case Design," Design Methods in Solid Rocket Motors, Lecture Series, No. 150, 1988.
2. 홍창선 외, "필라멘트 와인딩된 복합재 압력 탱크의 설계 연구," 한국복합재료학회지, 제 15권, 1호, pp. 9-12,2002.
3. 도영대 외, "F/W-압력용기의 구조해석에 대한 연구," 한국복합재료학회지, 제2권, 2호, pp. 20-27, 1989.
4. David L. Gray, "Finite Element Analysis of a Composite Overwrapped Pressure Vessel,"AIAA Joint Propulsion Conference, 2004.
5. R.M. Jones, 'Mechanics of Composite Materials,' McGraw-Hill, New York,1975.