

## 論文

## KSR-III 삼단 복합재 연소관의 구조 해석 및 변형률 측정

박재성\*, 김철웅\*, 조인현\*\*, 오승협\*\*, 홍창선+, 김천곤\*\*\*

## Structural Analysis and Strain Monitoring of the Filament Wound Composite Motor Case used in KSR-III Rocket

J. S. Park\*, C. U. Kim\*, I. H. Cho\*\*, S. H. Oh\*\*, C. S. Hong+, C. G. Kim\*\*\*

## ABSTRACT

Filament wound structures such as pressure tanks, pipes and motor cases of rockets are widely used in the aerospace application. The determination of a proper winding angle and thickness is very important to decrease manufacturing difficulties and to increase structural efficiency. In this study, possible winding angles considering the slippage between a fiber and a mandrel surface are calculated using the semi-geodesic path equation. In addition, finite element analysis using ABAQUS are performed to predict the behavior of filament wound structures considering continuous change of winding angle along the dome part. The water-pressuring tests of 3rd stage motor case are performed to verify the analysis procedure. The strain gages are attached on the surface in the fiber direction. Progressive failure analysis is performed to predict the burst pressure and the weakest region of the motor case. The effect of reinforcement is also studied to increase its performance.

## 초 록

필라멘트 와인딩 연소관의 제작에 있어서 라이너 표면의 형상과 와인딩되는 섬유각도는 제작 공정상의 편의와 제작 후 구조물의 성능에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 두 개의 반구를 합친 형상의 라이너 위에 와인딩된 로켓 연소관의 유한 요소 해석을 수행하였다. 32개의 스트레인 게이지를 표면에 부착한 후 수압실험을 실시하여 유한 요소 해석 과정을 검증하였고, 웨이퍼(wafer)를 통한 국부적 보강 방법에 대한 해석을 수행하였다. 파손에 따른 재료의 비선형 거동을 고려한 점진적 파손 해석을 통해 연소관의 파열 압력과 취약부위에 대한 연구를 수행하였다.

## 1. 서 론

2002년의 KSR-III 기본형 발사를 목표로 우주 발사체에 대한 기반 기술 연구가 활발히 수행되고 있다. 우주 발사체의 효율을 높이기 위해서 구조물 경량화가 필수적인데, 비강성(specific stiffness) 및 비강도(specific strength)가 우수한 고등 복합재료의 적용은 금속재료 구조물을 대체하는 가장 효과적인 방법 중에 하나이다. 특히 로켓이나 미사일

등에 사용되는 연소관이나 연료탱크, 가압탱크 등의 압력 탱크와 같은 축대칭(axisymmetry) 구조물은 필라멘트 와인딩을 통해서 복합재료로 제작이 용이하다. 이 방법은 원통형이나 곡률을 가진 구조물을 일체성형으로 쉽게 제작할 수 있고, 하중 전달 방향으로 섬유를 집중적으로 보강함으로써 복합재료가 가지고 있는 장점을 극대화할 수 있다. 또한 필라멘트 와인딩을 통한 구조물 제작은 국내 연구소 뿐만 아니라 산업체에서도 어느 정도 경험과 기술을 가지

\* 박사과정, 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

\*\* 연구원, 한국항공우주연구원

\*\*\* 교수, 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

+ 교수, 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

고 있는 상태이다. 그러나 지금까지의 필라멘트 와인딩 복합재 탱크 설계·제작은 초기 해석적인 방법을 통하기 보다 경험과 시행착오를 바탕으로 하고 있다. 따라서 유한 요소 해석을 통하여 제작에 필수적인 와인딩 각도, 두께 및 라이너 설계에 대한 선행연구가 필요하다.

필라멘트 와인딩 패턴에 대한 연구는 맨드릴 위에 섬유가 와인딩될 때 미끄러짐이 없는 geodesic path에서부터 미끄러짐을 고려한 와인딩의 안정성을 고려한 섬유 패턴 연구까지 다양하게 수행되었다. Scholliers[1] 등은 필라멘트 와인딩 공법을 축대칭이 아닌 구조물에도 적용하였다. T자형 구조물에 와인딩시 미끄러짐을 고려하여 와인딩 패턴을 계산하고 실제로 와인딩하여 축대칭이 아닌 구조물에도 필라멘트 와인딩 공법이 적용될 수 있음을 보였다. Jones[2] 등은 기존의 세가지 기본적인 설계 기법(등장력 돔, planar 돔, 와인딩의 안정성을 고려한 돔)에 섬유 다발의 폭을 고려하고 보스부분이 섬유 중첩으로 인하여 두께가 두꺼워지거나 void가 생성되는 것을 방지하는 기법을 고려한 와인딩 패턴 설계를 하였다. Carvalho[3] 등은 섬유와 맨드릴 사이의 미끄러짐과 표면이 오목(concave)하게 들어간 면에서 섬유가 맨드릴과 분리되는(fiber bridging)현상을 고려한 섬유패턴을 설계하였다. 또한 섬유각도에 따른 구조물의 강도변화를 계산하여 안정되게 와인딩되는 범위 내에서 섬유각도를 최적화하는 연구를 수행하였다.

필라멘트 와인딩 구조물에 대한 유한 요소 해석은 주로 축대칭 고체요소나 쉘요소를 사용하여 수행되었다[4-9]. 도영대[4] 등은 3차원 적층 쉘요소를 이용하고, 돔부분의 굽힘으로 인한 기하학적인 비선형과 파손으로 인한 재료 비선형을 고려한 유한 요소 해석을 수행하였다. 그러나 쉘요소를 사용할 경우 3차원 형상의 금속재료 보스 부분에 대한 모델링이 가능하지 않아 양쪽 개구부(opening)에 대한 해석 결과가 정확하지 않았다. 황태경[9] 등은 비선형 상용 유한 요소 해석 코드인 ABAQUS의 축대칭 고체 요소를 사용하여 금속재료 보스 부분의 상세 모델링을 수행하고, user subroutine을 통한 점진적 파손 해석을 수행하였다. 또한 많은 압력 탱크에 대한 수압실험 결과와 국부 보강재료에 대한 연구를 통해 압력탱크의 성능을 개선하는 연구를 수행하였다.

필라멘트 와인딩 구조물에 FBG 광섬유 센서를 적용한 연구로는 Richard[10] 등이 성형 과정의 온도와 점성을 모니터링하고, 제작 후에는 내압에 따른 변형률을 측정하는 연구가 있다. 표면에 부착한 스트레인 게이지와의 변형률 비교를 통해 광섬유 센서의 변형률을 검증하였다. 광섬유를 적용할 경우 제작 단계에서부터 사용단계까지 구조물의 건전성을 모니터링할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 KSR-III의 3단에 사용되는 연소관에 대하여 ABAQUS의 3차원 고체 요소를 사용하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 수압 실험을 통해 측정된 연소관 표면의 변형률을 해석과 비교함으로써 해석 절차에 대한 검증을 하였다. 또한 보스 부분에 대한 상세 모델링을 통해 구해진 응력값을 이용하여 점진적 파손 해석을 수행함으로써 제작된 연소관이 작동 압력에서 안전한지 여부와 최종 파열되는 압력을 예측하였다.

## 2. 와인딩된 연소관의 해석

### 2.1 와인딩 섬유 각도 계산

주어진 임의의 축대칭 평면의 축방향을  $x$ , 반경방향을  $\gamma$  이라고 하면, 각 평면위의 지점에서의 섬유각도,  $\alpha$  는 섬유의 미끄러짐을 고려한 유도식으로부터 다음과 같은 식으로 표현된다[11].

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{\lambda(A^2 \sin^2 \alpha - rr' \cos^2 \alpha) - r'A^2 \sin \alpha}{rA^2 \cos \alpha} \quad (1)$$

$$\text{where, } A = \sqrt{1+r'^2}$$

여기서  $\lambda$  는 섬유와 평면사이에 존재하는 slippage tendency 값으로 0.2(wet winding)부터 0.39(dry winding)의 값을 갖는다. 식(1)을 접속부와 보스끝부분에서 주어지는 경계값으로 적분하면 돔의 각 위치별로 섬유 각도를 구할 수 있다[5].

그리고 구해진 섬유각도 분포로부터 돔 부분의 각지점에 대한 두께 분포는 식 (2)를 통해 구할 수 있다.

$$t = \frac{r_c \cos \alpha_c}{r \cos \alpha} \times t_c \quad (2)$$

여기서  $r$ ,  $\alpha$ ,  $t$  는 실린더부분 두께, 반경, 섬유각도 또한 와인딩이 진행됨에 따라 각 층별로 식 (1)을 적용함으로써 각 층별 섬유각도 분포를 돔부분에서 구할 수 있고, 식 (2)로부터 계산된 두께를 고려하여 변화된 맨드릴 표면을 형성하여 다음 층의 와인딩 각도를 구하는데 사용한다.

2.2 유한요소 모델링

유한 요소 해석은 KSR-III의 3단 연소관에 대해서 수행하였다. 연소관의 주요 치수와 모양은 Fig. 1과 같다.

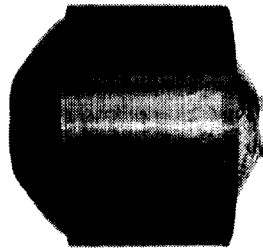
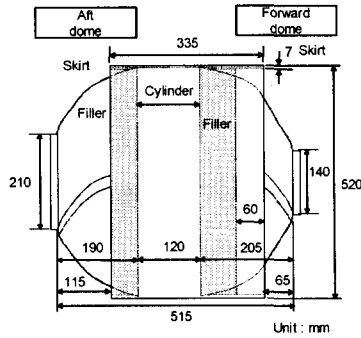


Fig. 1 연소관의 주요 치수와 형상.

탱크 구조물이 축대칭이므로 3차원 고체 요소로 일정각 (1.5°)에 해당하는 부분만을 모델링하고, 주기적 반복대칭 조건을 부여하여 계산하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 유한 요소 모델을 보여준다. 내압은 안쪽 층의 고체 요소 표면에 분포하중으로 6.895 MPa를 가하였고, 금속재료 보스부분과 복합재 사이에는 gasket element(GK3D18)를 사용하여 EPDM 층을 모델링하였다.

이 요소는 전단과 두께 방향의 물성을 독립적으로 모델링할 수 있어서, 복합재료와 금속재간에 존재하는 전단층의 모사가 용이하고 보스이탈 등의 거동을 모사할 수 있다.

초기 헬리컬 층의 와인딩 각도는 ±22°이고, 돔 부분의 층별 섬유각도 변화는 부프로그램, ORIENT를 이용하여 요소별로 적용하였다. ORIENT, 부프로그램은 사용자가 요소의 위치와 모양에 따라 이방성 재료의 방향성을 추가할 수 있도록 만들어진 것으로 본 연구에서는 돔부분에서 연속적으로 변화하는 와인딩된 섬유의 방향을 요소의 층별위치

및 돔부분에서의 축방향 위치 등을 고려하여 개별적으로 요소에 부가하는 기능을 담당하도록 프로그램하였다.[12] 해석에 사용된 재료의 기계적 물성은 다음과 같다.

$$E_1=142\text{GPa}, E_2=E_3=3.136\text{GPa}, G_{12}=G_1=4.69\text{GPa}, G_{23}=1.00\text{GPa},$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = 0.33, \nu_{23} = 0.45$$

$$X_T = 2687\text{MPa}, X_C = 1441\text{MPa}, Y_T = Z_T = 36.36\text{MPa},$$

$$Y_C = Z_C = 70\text{MPa}, R = S = T = 59.6\text{MPa}$$

돔부분의 경우 UDP(unidirectional prepreg)를 사용하여 돔 전체에 대한 보강을 한 경우와 하지 않은 경우에 대한 해석을 수행하였다. 필라멘트 와인딩 과정 중에 돔 부분에 삽입되는 UDP는 모두 3 장으로 해석에서는 균일한 UDP의 보강이 전체 돔형상의 변화에 크게 영향을 미치지 않는다고 가정하고, 헬리컬층이 모델링된 고체요소의 표면에 셀 요소로 처리하였다.

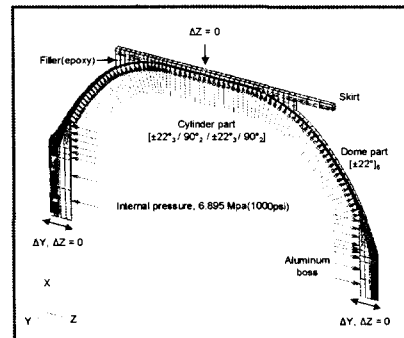


Fig. 2 유한요소격자 및 경계조건.

2.3 점진적 파손 해석

성능이 우수한 연소관의 설계를 위해서는 수압실험을 통한 최종 파열압력, 무게, 용량 등의 인자를 모두 고려해야 한다. 그러나 실제 연소관의 파열은 그 비용이 많이 소요되고, 위험성이 높아 비효율적이다. 따라서 파손이 많이 발생하지 않는 낮은 내압에서의 유한 요소 해석 결과와 비교함으로써 해석의 결과를 검증하고, 이에 파손에 의한 재료 비선형성을 함께 고려함으로써 최종 파손 압력과 위치를 예측할 수 있다.

본 연구에서 파손의 판정은 Tsai-Wu 판별식을 사용하였으며, 요소의 14개 적분점에서 계산된 응력을 평균하여 파손식에 적용하였다. 일반적으로 Tsai-Wu 파손 판별식은 파손 시점만을 예측하지만 최근에 파손 모드까지도 판별할

수 있도록 하는 연구가 수행되었다[13]. 3차원 응력 상태에서의 Tsai-Wu 판별식은 다음과 같다.

$$F_i\sigma_i + F_j\sigma_j \geq 1 \quad (3)$$

$$F_1 = \left( \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} \right), F_2 = \left( \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C} \right), F_3 = \left( \frac{1}{Z_T} - \frac{1}{Z_C} \right),$$

$$F_{11} = \left( \frac{1}{X_T X_C} \right), F_{22} = \left( \frac{1}{Y_T Y_C} \right), F_{33} = \left( \frac{1}{Z_T Z_C} \right),$$

$$F_{44} = \left( \frac{1}{R^2} \right), F_{55} = \left( \frac{1}{S^2} \right), F_{66} = \left( \frac{1}{T^2} \right),$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_T X_C Y_T Y_C} \right)^{\frac{1}{2}}, F_{13} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_T X_C Z_T Z_C} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$F_{23} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{Y_T Y_C Z_T Z_C} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$X, Y, Z$ 는 각 1,2,3 축 방향의 강도이며, 아래 첨자  $T$ 는 인장,  $C$ 는 압축을 나타낸다.  $R, S, T$ 는 23, 13, 12 평면의 전단 강도를 말한다. 위 식에서  $F_i$ 는 축 방향 하중으로 구성된 일차 항들이고,  $F_{ii}$ 는 이차 항들,  $F_{ij}$ 는 각 축 방향 하중간의 상호작용을 고려한 항들이 된다.

위에 제시한 파손식의 왼쪽 항들 합이 1보다 커지면 파손의 발생으로 판단하였으며, 파손 발생시 각 응력 성분에 따라서 항별로 크기를 비교하였다.  $\sigma_{11}, \sigma_{22}$ 와  $\sigma_{33}$ 에 의한 항이 가장 클 경우에는 섬유파손,  $\sigma_{22}, \sigma_{12}$ 와  $\sigma_{23}$ 에 의한 항이 가장 클 경우에는 횡방향 모재파손,  $\sigma_{33}, \sigma_{13}$  또는  $\sigma_{23}$ 에 의한 항이 가장 클 경우에는 두께 방향 파손으로 판정하였다.

$$I_1 = F_1\sigma_1 + F_{11}\sigma_1^2 + 2(F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{13}\sigma_1\sigma_3)$$

$$I_2 = F_2\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_{12}^2\sigma_2 + 2(F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{23}\sigma_2\sigma_3) \quad (5)$$

$$I_3 = F_3\sigma_3 + F_{33}\sigma_3^2 + 2(F_{13}\sigma_1\sigma_3 + F_{23}\sigma_2\sigma_3) + F_{44}\sigma_{23}^2 + F_{55}\sigma_{13}^2$$

IF  $F_i\sigma_i + F_j\sigma_j \geq 1$ , then failure mode =  $Max(I_1, I_2, I_3)$

사용한 파손 후 물성 저하 방법은 파손된 요소는 파손 시점의 응력을 유지한 상태로 더 이상의 하중을 지지하지 못하게 제한하는 elastic-plastic 강성 저하 방법이다. 이 방법은 파손이 발생하면 물성뿐만 아니라 응력을 저하시키는 방법이 가지는 해의 수렴성 문제를 줄일 수 있다. 해석에서는 파손이 발생한 요소의 기계적인 물성을 건전한 경우의 5%로 저하시킨 후 해석을 수행하였다.

### 3. 수압실험

#### 3.1 실험장치

내압에 따른 연소관의 거동을 알아보기 위해서 수압실험을 실시하였다. 수압실험의 개략도는 Fig. 3과 같다.

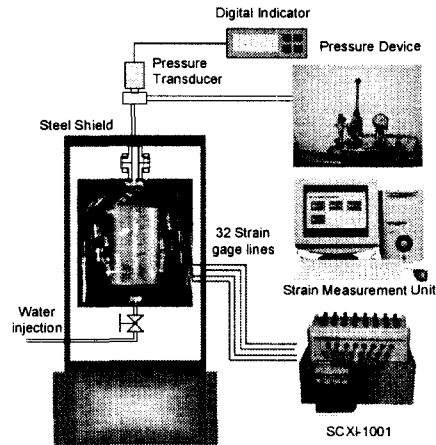


Fig. 3 실험장치 개략도.

압력 탱크 근처에 압력 측정 센서를 설치하고, 디지털 리더를 통해 압력을 기록하였다. 6.895 MPa(1000 psi)까지 가압을 반복하면서 부착된 32개의 스트레인 게이지와 20개의 광섬유 센서로부터 변형률을 측정하였다. 6.895 MPa까지는 심각한 파손이 발생하지 않았으며, 반복된 가압에 따른 변형률의 차이는 발생하지 않았다. 또한 연소관의 경우 재활용이 가능한 구조물이 아니므로, 반복 하중에 대한 요구 사항이 적은 구조물이다.

#### 3.2 스트레인 측정 위치

스트레인 게이지를 부착한 위치는 Fig. 4~6과 같다. 전

방돔에는 스트레인 게이지를 6개씩 두 채널을 부착하였다. 테입 와인딩된 동일 섬유 다발을 따라서 섬유방향으로 Fig. 4와 같이 부착하였다. 각 채널의 축방향 위치는 거의 동일하여 축대칭인 연소관의 경우 비슷한 변형률이 예상된다.

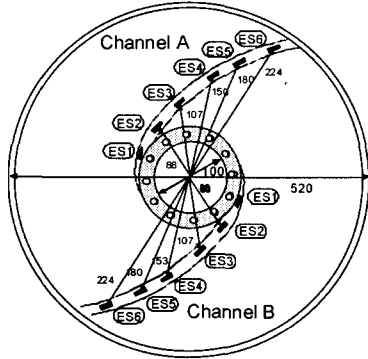


Fig. 4 전방돔의 스트레인 게이지 부착 위치.

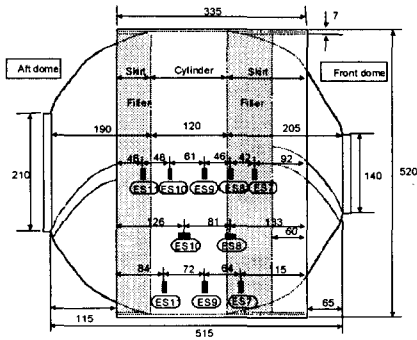


Fig. 5 실린더 부분의 스트레인 게이지 부착 위치.

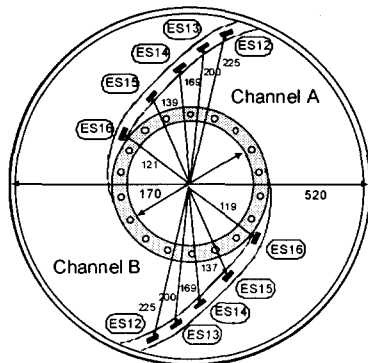


Fig. 6 후방돔의 스트레인 게이지 부착 위치.

실린더 부분은 우선 원주방향으로 5개, A채널과 축 방향 2개와 원주방향 3개인 B채널을 부착하였다. 후방돔의 경우는 보스반경이 크고, 돔의 자오선 방향으로 길이가 짧아서 5개씩 두 채널을 부착하였다(Fig. 6).

모두 한 채널당 16개씩 32개의 스트레인 게이지를 부착하였으며, 각각 1 mm의 gauge length를 갖는다. 또한 16개 채널에서 동시에 스트레인을 처리할 수 있도록 A/D converter(LabVIEW Instruments, PCI 6110E)를 사용하였고 두 번에 걸쳐 두 채널에 대한 변형률 값을 측정하였다. 압력은 50 psi 단위로 증가시켰으며 1000 psi(6.895 MPa)까지 단계적으로 증가시키면서 스트레인을 측정하였다.

### 4. 결 과

Fig. 7은 UDP 보강이 되지 않은 연소관의 유한 요소 해석에 따른 변형 형상을 10배 확대한 그림이다.

돔부분에 압력이 가해져서 부풀어 오름으로써 보스 끝부분이 전방돔의 경우에는 안쪽으로 들어오게 된다. 그에 따라 돔 부분에 굽힘에 의한 인장응력이 발생한다. 따라서 돔의 중심부분에서 가장 큰 변형률이 발생하고, 실린더 부분도 길이가 짧기 때문에 돔의 변형에 의한 영향을 받는다.

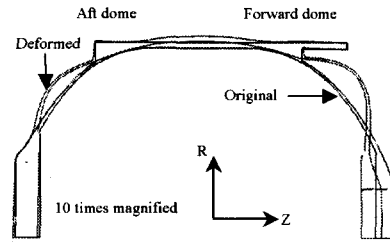


Fig. 7 연소관의 변형 형상(6.895 MPa).

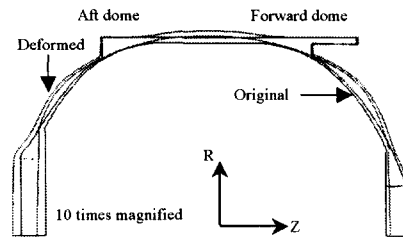


Fig. 8 UDP 보강 후 연소관의 변형 형상(6.895 MPa).

보스 반경이 큰 후방 돔의 경우는 금속재료 보스가 약간 바깥쪽으로 팽창하는 변형을 보여준다. 전체적으로 보면 스킨과 필러에 의해서 돔과 실린더의 접속부분의 변위는 크게 제한되어 이 부분에서는 변형률이 작게 분포되고, 돔의 중앙부분에서 가장 큰 변형률이 발생하여 가장 취약한 것을 알 수 있다.

따라서 UDP층의 삽입에 의한 돔부분 보강이 필수적이며, 보강후의 변형 형상과 응력 분포 비교는 Fig. 8, 9와 같다.

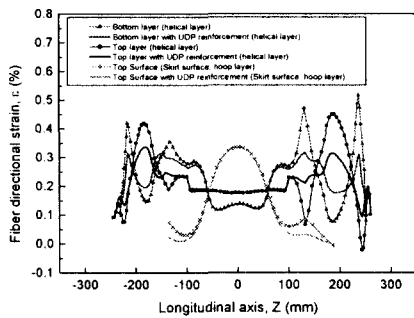


Fig. 9 UDP 보강에 따른 변형률 비교(6.895 MPa).

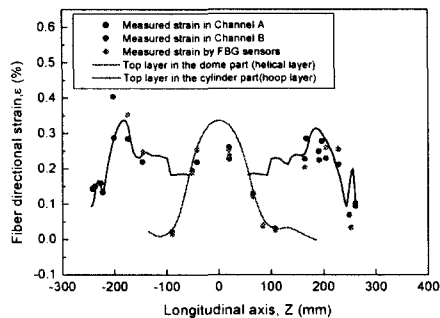


Fig. 10 유한 요소 해석과 실험의 변형률 비교(6.895 MPa).

Fig. 9에서 볼 수 있듯이 UDP 보강을 하지 않을 경우 돔부분의 첫번째 헬리컬층은 금속재료 보스가 끝나는 부분에서 응력 집중이 발생하고, 맨 바깥쪽 층은 돔의 중앙에서 최대 변형률이 발생하게 된다. 그러나 UDP 보강에 의해서 응력집중은 크게 줄어들는데 이것은 변형 형상에서도 알 수 있듯이 보강된 돔부분이 전체적으로 고르게 팽창하면서 급힘에 의한 응력 집중을 완화시킨 결과이다. 따라서 헬리컬층으로만 구성된 돔부분은 전체적으로 UDP 등을 이용하

여 보강해 주는 것이 전체 구조물의 성능 향상에 중요한 요소임을 알 수 있다.

Fig. 10은 유한 요소 해석에 의해 구해진 표면의 변형률과 수압실험에 의해 표면에서 측정된 변형률을 비교한 그림이다. 채널 A, B는 스트레인 게이지로부터 측정된 변형률이고, 광섬유 센서를 이용해 측정된 스트레인 값은 별도로 나타내었다. 전체적으로 모든 부분에서 실험과 해석이 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 유한 요소 해석 방법을 가지고 점진적 파손 해석을 수행함으로써 보다 높은 압력에서의 파손에 따른 연소관의 거동을 살펴볼 수 있다.

Fig. 11은 처음으로 모재 파손이 발생하는 보스끝부분 요소의 변형률을 내압에 따라 나타낸 그림이다. Tsai-Wu 파손 판별식에 의해 실제 모재의 인장 강도보다 낮은 응력에서 파손이 판정되며, 그 후 강성의 저하에 따라 응력의 증가율이 갑자기 줄어들지만 응력은 유지되는 것을 알 수 있다. 정(static)하중 해석에 있어서는 파손시 재료에 의해 흡수되거나 소리로 방출되는 에너지를 고려할 수 없으므로 강성 저하에 의한 급격한 절점들의 변위 증가에 의해 수렴성이 떨어지게 된다. 본 연구에서 사용한 점진적 해석 방법이 파손 후 재료의 강성을 낮추는 방식으로 파손에 의한 에너지 손실을 고려할 수 없는 해석이므로 국부적인 강성 저하에 따른 절점 변위의 발산을 막을 수 없다. 이것을 해결하기 위해서는 파손에 따른 급격한 변위 증가를 막아 수렴성을 개선하는 방식이 필요하고, ABAQUS/EXPLICIT를 이용한 동적 해석이나 변위 증가를 제어하는 관성력을 절점에 추가하는 방식의 접근이 필요하다.

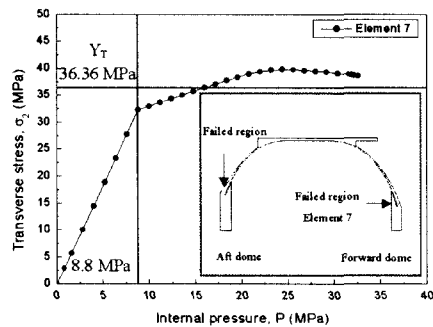


Fig. 11 내압에 따른 파손 요소의 횡방향 응력.

본 연구에서는 모재의 물성 저하가 전체 구조물의 수렴성에 크게 영향을 주지 않지만, 돔부분 전체로 모재 파손이 진전하거나 섬유 파손에 의한 강성 저하는 급격한 변위 증가를 통한 해의 발산으로 이어진다. 특히 필라멘트 와인딩

된 구조물의 경우 내압에 의한 하중을 대부분 섬유가 지지하므로, 섬유 파손은 곧 최종 파손으로 이어진다. Fig. 12는 각 파손 모드별 초기 파손 위치와 내압을 나타낸 것으로 낮은 내압에서 발생하는 모재 파손과 두께방향 파손은 전체 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치지 않는다. 이것은 필라멘트 와인딩 구조물 해석의 기본 가정인 내압에 의한 하중을 모두 섬유가 담당한다는 것과 일치하는 결과이다. 점진적 파손 해석을 통해 예측된 연소관의 최종 파열 압력은 31.6 MPa이며, 실제 파열 실험을 통해 측정된 압력은 20.69 MPa (3000 psi)에서 31.03 MPa (4500 psi) 사이로 나타났다.

수압 실험을 통한 파열 실험에서는 보강재료를 사용하지 않은 경우는 금속재료 보스의 끝단이나 돔의 중앙부분에서 파열이 발생하였고, UDP 보강 후에는 돔/실린더 접속 부분에서 파열이 발생하였다. 이곳은 해석에서 최초 섬유 파손이 발생하는 위치이며, 해석을 통해 파열 압력과 위치가 잘 예측되었음을 알 수 있다. 또한 해석은 결함없이 이상적으로 제작된 경우이므로 실험값 중에서 가장 큰 결과와 비교하면 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 실험에서 측정된 파열압력의 편차가 큰 것은 복합재 와인딩 과정에서 발생하는 결함의 영향이 크고, 와인딩된 구조물의 성능이 제작 환경 등의 변수에 크게 좌우되기 때문이다.

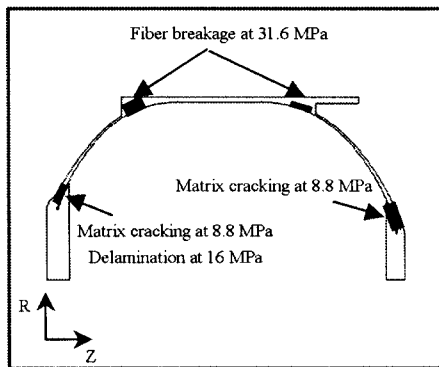


Fig. 12 각 파손 모드별 초기 파손 위치 및 내압.

## 5. 결 론

본 연구를 통해 KSR-III의 삼단 연소관으로 사용되는 필라멘트 와인딩 구조물에 대한 해석과 수압 실험을 수행하였다. 기존의 등장력 돔과 같은 형상이 아닌 반구형 돔 형상에 대한 필라멘트 와인딩 각도를 계산하였고, 고체 요소를

사용하여 개구부에 대한 세밀한 유한 요소 모델링을 수행하였다. 또한 파손에 의한 재료 비선형성을 고려한 해석을 통해 최종 파열 압력을 예측하였다. 수압 실험을 통한 변형률 분포와 최종 파열 압력은 실험결과와 잘 일치하였다. 실제로 본 연소관의 작동 압력이 6.895 MPa(1000 psi) 근처이므로 본 연구의 해석과 실험을 통해 충분히 안정되게 설계되었음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 항공우주연구원에서 추진되고 있는 3단형 과학 로켓(KSR-III) 개발사업의 일환으로서 수행되고 있으며, 본 연구에 도움을 주신 연구원 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- 1) J. Scholliers and H. Van Brussel, "Computer-integrated filament winding : computer-integrated design, robotic filament winding and robotic quality control," *Composites Manufacturing*, Vol. 5, No. 1, 1994, pp. 15-23.
- 2) D. T. Jones, I. A. Jones, V. Middleton, "Improving composite lay-up for non-spherical filament-wound pressure vessels," *Composites: Part A*, 1996, pp. 311-317.
- 3) J. De Carvalho, M. Lossie, D. Vandepitte and H. Van Brussel, "Optimization of filament-wound parts based on non-geodesic winding," *Composites manufacturing*, Vol. 6, No. 2, 1995, pp. 79-84.
- 4) Y. D. Doh, C. S. Hong, "Progressive Failure Analysis for Filament Wound Pressure Vessel," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 14, 1995, pp. 1278-1306.
- 5) J. P. Jeusette, G. Laschet, P. Chapietier and Ph. Delo, "Finite Element Analysis of Composite Revolution structures Wound by Wide plies," *Composite Structures*, Vol. 8, 1987, pp. 221-237.
- 6) D. E. James, A. Y. James, "Graphite epoxy pressure vessel dome reinforcement study," *32nd International SAMPE Symposium*, April, 1987.
- 7) X. K. Sun, S. Y. Du, G. D. Wang, "Bursting problem of filament wound composite pressure vessels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 76, 1999, pp. 55-59.
- 8) Mohammad Z. Kabir, "Finite element analysis of composite pressure vessels with a load sharing metallic

- liner," *Composite Structures*, Vol. 49, 2000, pp. 247-255.
- 9) T. K. Hwang, S. K. Jung, Y. D. Doh, W. M. Cho, B. Jung, "The Performance Improvement of Filament Wound Composite Pressure Vessels," *SAMPE 2000*, May, 21-25, 2000, pp. 1427-1438.
- 10) Richard C. Foedinger, David L. Rea, James S. Sirkis, Christopher S. Baldwin, John R. Troll, Robert Grande, Crig S. David, Terry L. VanDiver, "Embedded fiber optic sensor arrays for structural health monitoring of filament wound composite pressure vessels," *SPIE Conference on Sensory Phenomena and Measurement Instrument for Smart Structures and Materials*, Newport Beach, Vol. 3670, March, 1999, pp. 289-301.
- 11) 김철웅, 박재성, 홍창선, 김천곤, "두께 방향의 와인딩 각도 변화를 고려한 필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 해석," *한국복합재료학회지*, 제13권, 제2호, 2000, pp. 51-60.
- 12) HIBBITT, KARLSSON & SORENSEN, INC. *ABAQUS User's Manual Ver. 5.8*, 1998, Vol. III.
- 13) Y. S. N. Reddy, C. M. Dakshina Moorthy and J. N. Reddy, "Non-linear Progressive Failure Analysis of Laminated Composite Plates," *Int. J. Non-Linear Mechanics*, Vol. 30, No. 5, pp. 629-649, 1995.