

# 필라멘트 와인딩으로 제작된 킥모터 연소관의 파열 성능 시험

이무근\* · 길경섭\* · 조인현\* · 박재성\*\* · 김중석\*\*\*

## Burst Performance Test of Filament Wound Kick Motor Case

Mookeum Yi\* · Gyoungsub Kil\* · Inhyun Cho\* · Jaesung Park\*\* · Joongsuk Kim\*\*\*

### ABSTRACT

Both structural analysis and hydraulic test have been conducted to confirm the burst characteristics of filament wound solid motor case. Failure criteria have been defined with bursting above 150% of MEOP and failure in the cylinder. The results of analysis showed that filament fiber in the cylinder should be broken at about 2088psig. From a hydraulic test the same failure mode and the level of 2200psig of burst pressure have been proved. With these results, it is verified that a filament wound case meets burst requirements.

### 초 록

필라멘트 와인딩으로 제작된 고체 모터 연소관의 파열특성을 확인하기 위한 해석 및 수압시험을 수행하였다. 본 연소관의 파손 요구조건으로서 운용 중 최대 예상압력(MEOP)의 1.5배 이상의 압력에서 실린더 파손이 일어나야함을 제시하였다. 해석 결과 연소관 내부의 압력이 2088psig 일 때 실린더 파손이 일어나는 것으로 나타났으며 수압시험을 수행하여 2200psig 수준에서 실린더가 파열됨을 검증하였다. 두 결과를 통하여 파열 요구조건을 만족하는 것을 알 수 있다.

Key Words: solid motor case(고체 모터 연소관), filament winding(필라멘트 와인딩), burst pressure(파열압력)

### 1. 서 론

복합재료는 이방성(anisotropy)의 기계적 거동

을 보이기 때문에 하중 조건에 따른 효율적인 설계가 가능하다. 또한 금속에 비해 비강성, 비강도가 좋아 경량화가 요구되는 구조물 제작에 많이 사용되고 있다. 발사체의 경우에도 필라멘트 와인딩으로 제작된 복합재 연소관을 많이 적용하고 있다. 필라멘트 와인딩 공정은 맨드릴 표면에 복합재 섬유를 연속적으로 감는 공정으로

\* 한국항공우주연구원 추진제어팀

\*\* 한국항공우주연구원 구조팀

\*\*\* (주)한화 개발부

연락처, E-mail: mkyi@kari.re.kr

서 돔 생성을 위한 헬리컬(helical)과 원주방향 보강을 위한 홑(hoop) 와인딩으로 이루어진다.

본 논문에서는 필라멘트 와인딩 방식으로 제작된 키크모터 연소관에 대해 수행된 파열수압시험 결과를 정리하였다. 본 연소관은 'MEOP (Maximum Expected Operation Pressure)의 1.5 배 이상의 압력'에서 '실린더 부위가 파손되어야 한다'는 요구조건을 만족하여야 한다. 해석 및 수압시험을 통해 주어진 요구조건을 만족하는지 여부를 확인하였다.

## 2. 해석을 통한 파열특성 예측

### 2.1 해석모델 생성

고체 추진제가 연소하면 고온 고압의 가스가 연소관 내부에 생성된다. 즉 연소관은 구조 관점에서 압력용기로 간주 할 수 있다.

필라멘트 와인딩으로 제작된 압력용기의 경우 Fig. 1처럼 돔의 시작점에서 보스로 가면서 섬유 와인딩 각도가 연속적으로 변할 뿐만 아니라 두께도 점차 증가하게 된다.

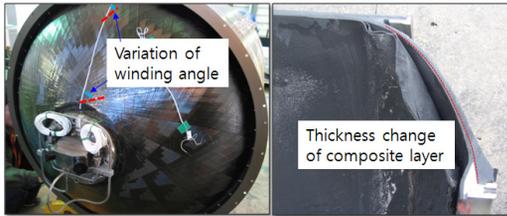


Fig. 1 characteristics of Filament winding Process

섬유의 와인딩 각도 계산은 준측지선 궤적 알고리즘(semi-geodesic path algorithm)을 이용하여 계산 할 수 있다[1,2]. Eq. 1은 축 방향의 섬유각도 변화율을 정리한 것이다.

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

$\alpha$ 는 와인딩 각도,  $r$ 은 돔의 반경을 가리키며

$A$ 는  $\sqrt{1+r'^2}$ 을 나타낸다.

두께 계산은 돔 부분을 자오선의 수직방향으로 잘랐을 때 그 단면을 통과하는 섬유의 수가 일정하다는 사실에 근거하여 Eq. 2처럼 계산할 수 있다.

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

여기서  $r_c$ ,  $\alpha_c$ ,  $t_c$ 는 각각 실린더 부분의 반경, 와인딩 각도와 헬리컬 층의 두께이다.

Figure 2는 해석 모델을 보여준다. 3차원 고체 적층 요소 및 적층 셀 요소로 구성되었으며 해석의 효율성을 높이기 위해 전방과 후방 쪽으로 나누어 계산을 수행하였다. 또한 원주 방향의 대칭성을 고려하여 3도 부분만 모델링 후 cyclic symmetry 조건을 부과하였다. 그 외에 복합재료의 점진 파손을 모사하기 위해 modified Tsai-Hill 파손 판별식을 적용하였다[3]. 해석은 ABAQUS 6.6을 이용하였다[4].

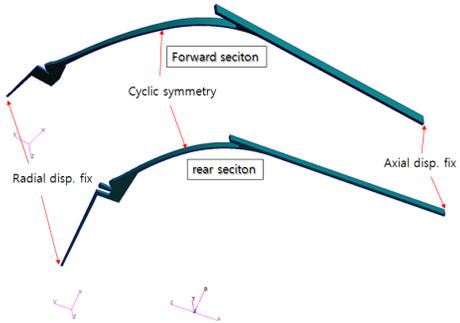


Fig. 2 Analysis models

### 2.2 해석 결과

최초로 섬유파손이 발생하는 순간을 연소관의 파열압력으로 간주하였다. 해석 결과 약 2088 psig일 때 실린더 원주방향으로 최초의 섬유파손이 발생하는 것으로 나타났다. 즉 최외각 홑 층의 섬유 파손이 일어남과 동시에 응력 재분배 과정을 거치면서 내부 층도 파손되는 거동을 보여주었다. 파열 순간 전방 돔과 후방 돔 최대 변

형률은 각각  $10700\mu\epsilon$ ,  $11500\mu\epsilon$ 으로 계산되었다.

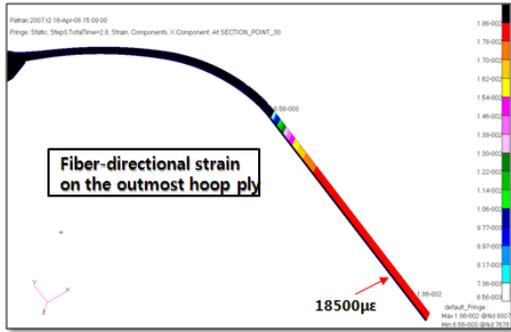


Fig. 3 Fiber-directional Strain on Cylinder At the Time of Burst

### 3. 파열 수압시험

#### 3.1 시험 준비

해석 자료의 검증 및 연소관의 실제 파열 특성을 확인하기 위해 수압을 이용한 파열시험을 수행하였다.

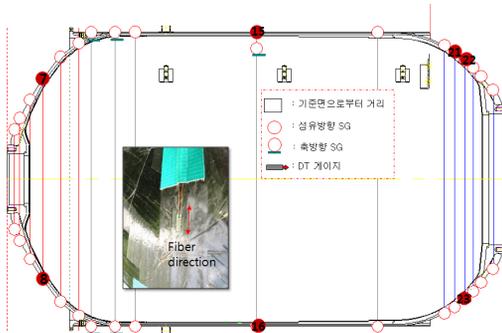


Fig. 4 Locations of Strain Gages

전방 돔, 실린더 및 후방 돔 최대 변형률이 발생하는 지점 7곳에서 변형률을 획득하였으며 2개의 압력센서를 설치하여 연소관 내부의 압력을 측정하였다. 모든 스트레인 게이지는 와인딩된 섬유방향으로 부착되었다.

시험은 기밀 확인 후 순차적으로 가압하는 순서로 수행하였다. 가압하는 동안 연소관 내부 압

력이 MEOP(1114 psia)를 기준으로 1.0, 1.2, 1.5배 일 때 약 30초 동안 유지하여 변형률 변화 발생 여부를 관찰하였다.

#### 3.2 시험 결과

시험을 통해 얻은 변형률과 압력은 Fig. 5와 같다.

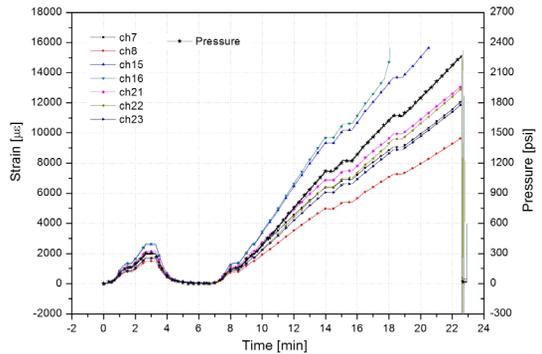


Fig. 5 Pressure and Strains History



Fig. 6 Failure Configuration

압력 유지 구간에서 변형률 변화가 나타나지 않은 것을 확인할 수 있으며, 실린더 중앙에서 가장 높은 변형률이 계측되었다. 최종적인 파손은 내압이 약 2200psig 일 때 실린더에서 발생하였다. 이는 앞서 언급한 파열요구조건을 만족하고 있음을 말해주고 있다.

해석 결과와 비교하여 약 120psi 정도의 파열

압력이 차이가 낮으며 파손형태는 동일함을 알 수 있다.

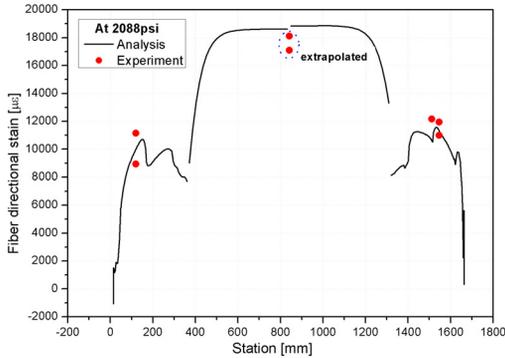


Fig. 7 Strain Comparison at Analytic Burst Pressure

#### 4. 결 론

키크모터의 연소관을 대상으로 파열 특성 파악을 위한 해석과 시험을 수행하였다.

- 준축지선 궤적 알고리즘을 바탕으로 해석모델을 구현하였으며 해석 결과 압력이 약 2088 psig 일 때 실린더 섬유가 끊어지는 것을 예측하였다.

- 파열 수압시험을 수행하여 연소관이 2200 psig 수준에서 실린더 파손이 발생함을 확인하였다.

해석과 수압시험을 통해 본 연소관의 설계 규격이 파열 요구조건을 만족하는 것을 알 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

1. 박재성, "필라멘트 와인딩된 압력 탱크의 점진적 파손 해석 및 설계," Ph. D. Thesis, KAIST, 2002
2. C. U. Kim, J. H. Kang, C. S. Hong and C. G. Kim, "Optimal Design of Filament Wound Structures under Internal Pressure Based on the Semi-geodesic Path Algorithm," Composite Structures, 2004.
3. 오세희, "효율적인 메타모델 기법을 적용한 복합재료 구조물의 최적설계," Ph. D. Thesis, KAIST, 2005
4. "ABAQUS Analysis User's Manual, Ver. 6.6"