

키크모터 FM 규격 연소관에 대한 강성저하 평가 및 파열압력 측정

이무근*, 조인현**, 김중석***, 이원복****

Evaluation of Structural Stiffness Degradation and Burst Pressure Measurement of the FM Kick-Motor Combustion Case

Moo-Keun Yi*, In-Hyun Cho**, Joong-Suk Kim***, Won-Bok Lee****

Abstract

A hydraulic test on a filament wound case of Kick-Motor was conducted to evaluate the structural stiffness degradation and to confirm the burst performance. Failure criteria have been defined with bursting above 150% of MEOP(Maximum Expected Operation Pressure) and failure in the cylinder. The analysis result showed that filament fiber in the cylinder should be broken at about 2088psig. From a hydraulic test it has been verified that composite case meets the failure requirements, and that the stiffness does not decrease even after a year since the manufacturing.

초 록

필라멘트 와인딩으로 제작된 고체 모터 연소관의 구조강성저하 평가 및 파열특성을 확인하기 위한 수압시험을 수행하였다. 본 연소관의 파손 요구조건으로서 운용 중 최대 예상 압력(MEOP)의 1.5배 이상의 압력에서 실린더 파손이 일어나야함을 제시하였다. 해석 결과 연소관의 내부압력이 2088psig 일 때 실린더층의 섬유가 끊어지는 것으로 나타났으며 수압시험을 수행하여 2200psig 수준에서 실린더 부위가 파손됨을 검증하였다. 또한 제작 후 1년 정도 경과 후에도 강성저하가 없음을 알 수 있었다.

키워드 : 키크모터 (kick-motor), 연소관(combustion case), 파열압력(burst pressure), 준축치선 궤적 알고리즘(semi-geodesic path algorithm), 수압시험(hydraulic test), 구조강성 저하(structural stiffness degradation)

1. 서 론

키크모터는 KSLV-I의 2단 추진기관으로서 위성
을 궤도에 진입시키는 역할을 한다. 키크모터의 구

성품 중에서 연소관은 주 구조물로서 노즐, 점화
기, TVC(Thrust Vector Control)와 같은 부 시스
템과의 조립을 위한 인터페이스 및 추진제 저장
용기 역할을 한다.

접수일(2009년12월21일), 수정일(1차 : 2010년 5월 4일, 2차 : 2010년 6월 15일, 게재 확정일 : 2010년 7월 1일)

* 추진제어팀/mkyi@kari.re.kr

** 추진제어팀/ihcho@kari.re.kr

*** (주)한화 대전공장/sjskim74@hanwha.co.kr

**** (주)한화대전공장/wonbok12@hanwha.co.kr

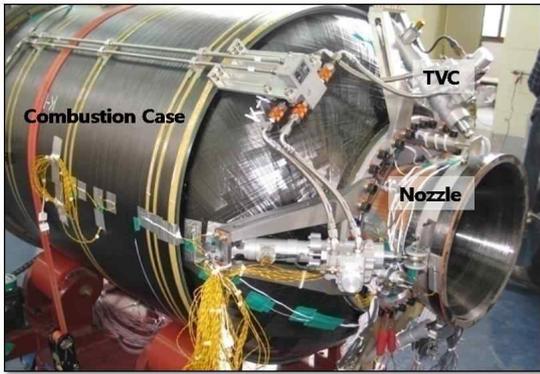


그림 1. 지상연소시험용 키크모터

노화에 따른 복합재 층의 강성 변화 여부도 파악하였다.

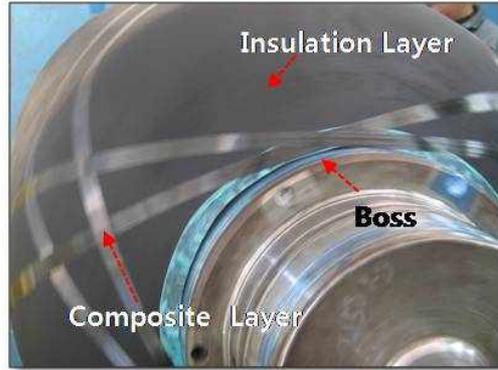


그림 3. 연소관의 구성

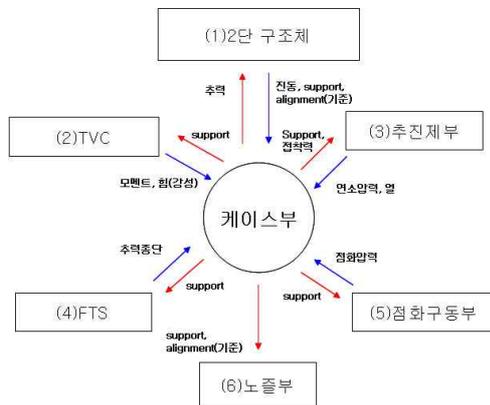


그림 2. 연소관의 역할

2. 해석을 통한 파열특성 예측

2.1 해석모델 구현

고체 추진제가 연소하면 고온 고압의 가스가 연소관 내부에 생성된다. 즉 연소관은 구조관점에서 압력용기로 간주할 수 있다.

필라멘트 와인딩으로 제작된 압력용기의 경우 그림4처럼 돔의 시작점에서 보스로 가면서 섬유 각도의 와인딩 각도가 연속적으로 변할 뿐 아니라 두께도 점차 증가하게 된다.

본 연소관은 하중을 지지하는 복합재 층과 고온의 연소가스로부터 복합재 층을 보호하기 위한 내열재 층 및 점화기와 노즐이 연결되는 보스로 구분할 수 있다. 복합재 층은 무게 감소를 위해 에폭시가 함침된 카본 섬유를 필라멘트 와인딩 공법을 적용하여 제작되었으며, 내열재 층은 EPDM을 기저로 한 내열재를 사용하였다.

제작이 완료된 연소관에 대해서는 성능을 검증하기 위한 시험을 수행한다. 본 논문에서는 연소관에 대해 수행되는 여러 시험 중에서 내압에 대한 파열특성을 파악하는 것을 목적으로 수행된 수압시험에 대해 다루고 있다. 또한 시험에 사용된 연소관은 제작 후 1년 이상 경과된 것이기 때문에 이번 시험에서 획득한 데이터를 활용하여



그림 4. 필라멘트 와인딩 공정의 특징

섬유의 와인딩 각도변화에 대한 계산은 준축지선 궤적 알고리즘(semi-geodesic path algorithm)

을 이용하여 계산할 수 있다[1]. 아래 식은 축 방향에 따른 섬유 와인딩 각도 변화율을 정리한 것이다.

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

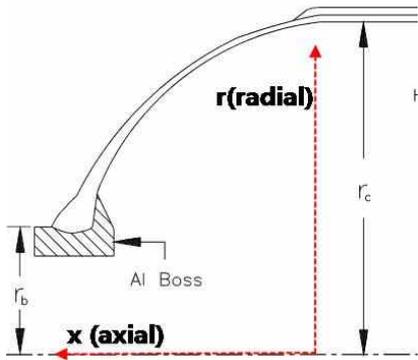


그림 5. 돔 영역의 형상

α 는 돔의 자오선에 대한 섬유의 와인딩 각도, r 은 돔의 반경, A 는 $\sqrt{1+r'^2}$ 을 의미한다. 또한 λ 는 미끄러짐 계수로서 0.2~0.34범위에 있다고 알려져 있다[1].

축방향에 대한 두께 변화 계산은 '돔 부분을 자오선의 수직방향으로 잘랐을 때 그 단면을 통과하는 섬유의 수가 일정하다'는 사실에 근거하여 아래 식처럼 계산할 수 있다.

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

여기서 r_c , α_c , t_c 는 각각 실린더 부분의 반경, 와인딩 각도와 헬리컬 층의 두께이다.

그림6은 위의 식을 바탕으로 생성된 해석 모델을 보여준다. 3차원 고체 적층요소 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 symmetric 조건을 부과하였다. 그 외에 복합재료의 점진 파손을 모사하기

위해 modified Tsai-Hill 파손 판별식을 적용하였다[2]. 해석은 ABAQUS6.6을 이용하였다[3].

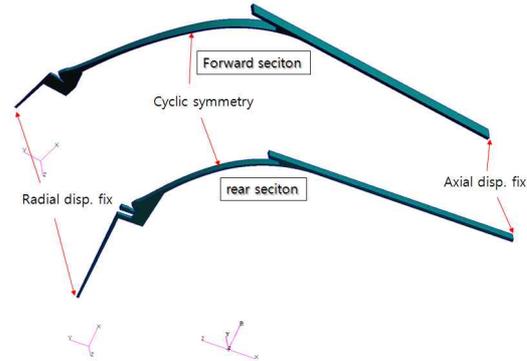


그림 6. 해석 모델

해석에 필요한 물성치 중에서 구조적 거동에 가장 큰 영향을 미치는 섬유방향 강성 및 강도는 시험을 통해 구하였다[4].

E_1	$E_2=E_3$	ν_{23}	ν_{13}	ν_{12}	G_{23}	G_{13}	G_{12}
110	8.5	0.45	0.34	0.34	2.7	5.3	5.3
X_t		Y_t		X_t : tension strength of fiber			
1.98		0.04		Y_t : tension strength of matrix			

그림 7. 해석에 사용된 물성치(단위:GPa)

2.2 해석결과

복합재료 구조물의 경우 섬유가 주 하중을 견디는 점을 감안하여 최초로 섬유파손이 발생하는 순간을 연소관의 파열압력으로 간주하였다. 그림 8은 파열 순간의 섬유방향 변형률을 도시한 것이다.

해석 결과 약 2088psig일 때 실린더의 최외각 휨(hoop)층에서 최초의 섬유파손이 발생하는 것으로 계산되었다. 이후 응력 재분배 과정을 거치면서 내부 층 거의 동시에 파손되는 거동을 보여주었다. 파열 순간 전방 돔과 후방 돔 최대 변형률은 각각 10700 μ m, 11500 μ m으로 계산되었다.

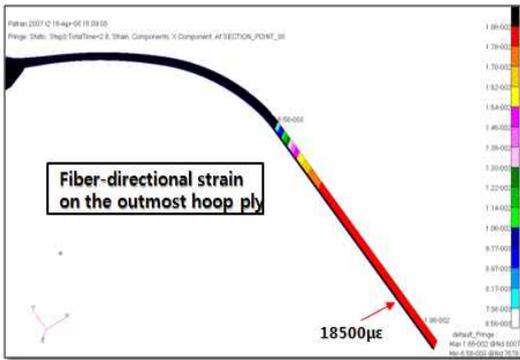


그림 8. 파열 순간의 실린더의 섬유방향 변형률 분포

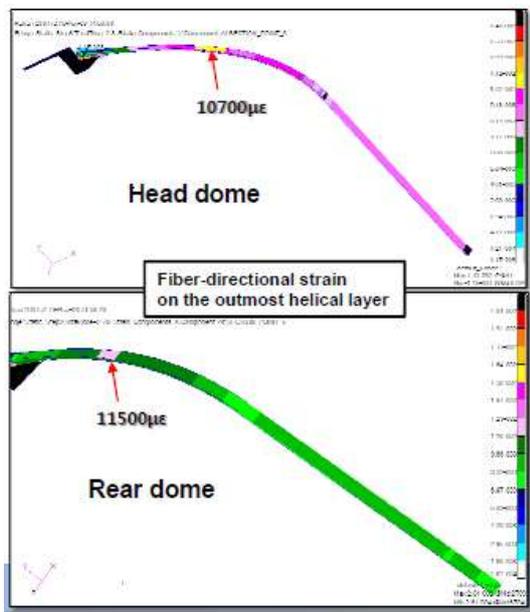


그림 9. 파열 순간의 돔 부분의 섬유방향 변형률

3. 파열수압시험

3.1 시험준비

파열수압시험을 통해 실제 연소관의 파열성능을 파악하였다. 시험에 사용된 연소관은 비행용 모델과 동일한 규격으로 제작되었으며, 복합재 와인딩 후 1년 이상 환경 제어가 없는 상태에서

창고에 보관된 것이다.

시험은 기밀시험과 파열시험으로 구성되었으며 아래와 같은 절차로 시험이 진행되었다.

- ① 300psig까지 가압하여 연소관의 기밀을 확인
- ② 점진적으로 가압하여 1114, 1125psig 에서 각각 30초씩 유지하여 변형을 저하 여부 확인
- ③ 1671psig(1.5*MEOP)에서 30초간 유지하여 변형을 저하를 확인
- ④ 파열까지 가압

연소관의 전/후방 돔, 실린더 각각의 최대 변형률 발생 지점에 변형률 센서를 부착하여 시험 동안의 변형률 변화를 관찰하였으며, 내부 압력을 측정을 위해 2개의 압력센서를 이용하였다. 변형률 게이지의 경우 구분을 위해 고유번호를 부과하였다.

표 3. 계측 센서 및 장비

센서/장비	목적	수량	센서 번호
변형률 센서	변형률 측정	전방 돔:2	ch7, ch8
		실린더:2	ch15, ch16
		후방 돔:3	ch21, ch22, ch23
압력센서	내부 압력 측정	2	PR1, PR2

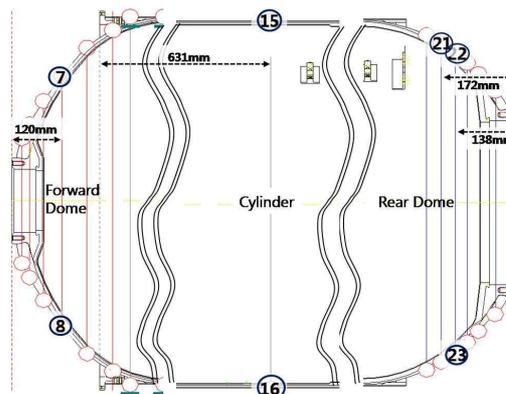


그림 10. 변형률 센서 장착 위치

3.2 시험결과

시험과정동안 측정된 위치 별 변형률 이력을 도시하였다. 모든 위치에서 압력과 동일한 형태로 나타난 것을 볼 수 있다. 기밀시험동안 압력 저하가 발생하지 않았으며, 1114, 1125 등의 압력 유지 구간에서 변형률 변화가 없는 것으로 보아 해당 내압 상태에서는 주요한 복합재 층 파손이 없는 것으로 판단하였다. 최대 변형률은 실린더 중앙(ch15, 16)에서 측정되었다.

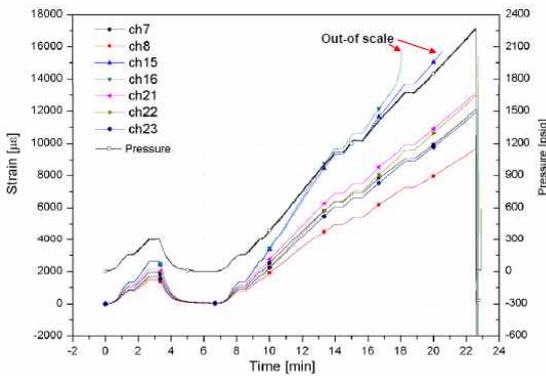


그림 11. 압력 및 변형률 이력

3.2.1 구조강성 저하 평가

복합재료는 외부환경에 노출될 경우 물성이 저하된다[5]. 비행용 연소관의 경우 제작 후 1년 정도의 보관기간이 예정되어있다. 이 때 외부환경 노출에 따른 복합재 층의 물성저하 여부 및 수준을 간접적으로 파악하기 위해 이번 파열수압 시험에서 얻은 변형률과 동일 연소관에 대해 1년 전에 수행된 수압시험 결과와 비교하였다. 각 시험의 압력과 변형률 기울기를 비교하여 강성저하 여부를 판단하였다.

아래의 그림에 전방 돔, 실린더, 후방 돔에서의 압력-변형률 기울기를 비교하였으며 두 시험의 결과 값이 차이가 없는 것을 확인할 수 있다 (hydraulic exp.:1년 전 수압시험, burst exp.:파열 수압시험). 이를 바탕으로 1년 정도의 외부환경 노출에 따른 연소관의 강성저하는 없는 것으로

판단하였다.

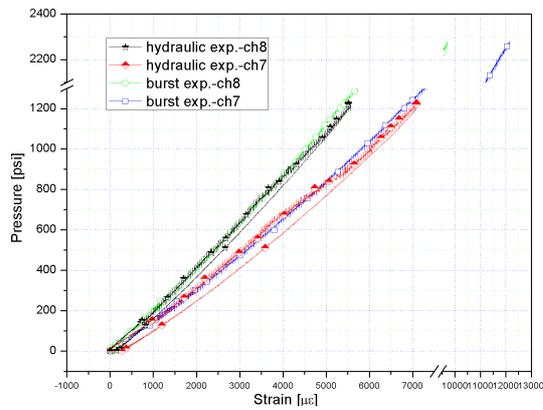


그림 12. 전방 돔 압력-변형률 비교

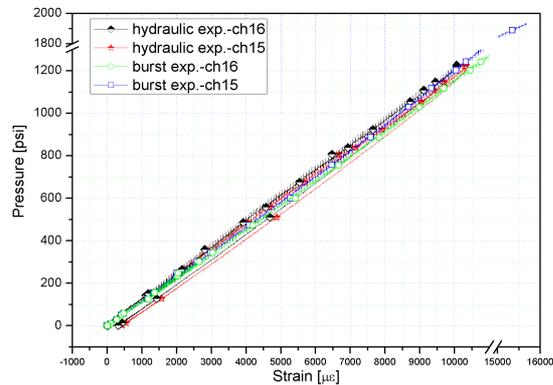


그림 13. 실린더 압력-변형률 비교

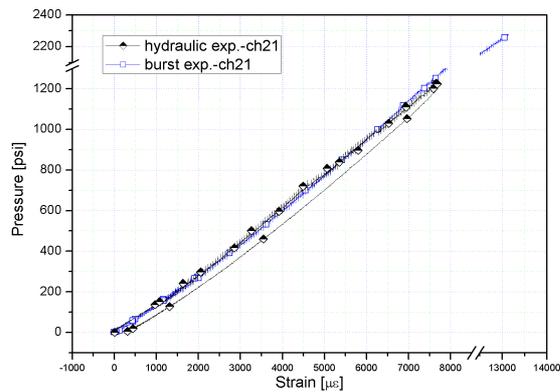


그림 14. 후방 돔(ch21) 압력-변형률 비교

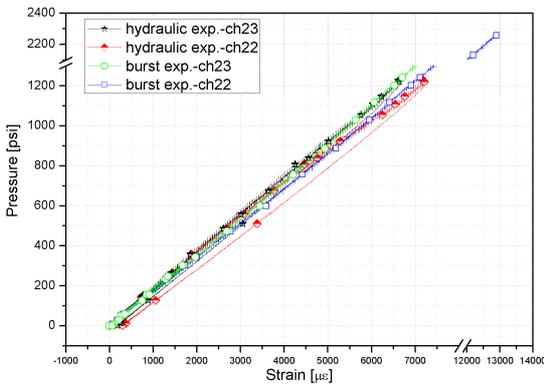


그림 15. 후방 돔(ch22, 23) 압력-변형률 비교

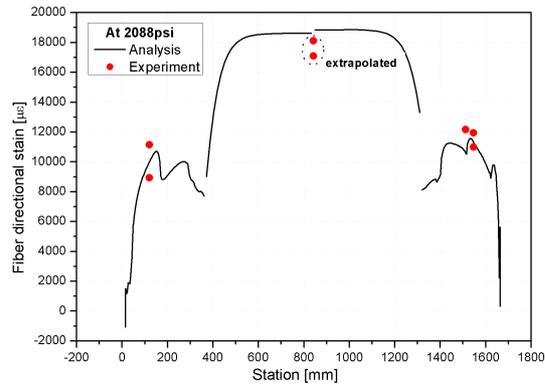


그림 17. 해석 파열 압력에서 변형률 비교

3.2.2 파열특성 평가

파열은 약 2257psig 순간에 실린더 부위에서 발생하였다. 이를 통해 연소관이 파열요구조건을 만족함을 확인하였다.



그림 16. 파열된 상태의 연소관

또한 해석 결과와 비교하여 약 120psi 정도 압력차이가 나타났으며 파손형태는 동일하였다. 그림17은 해석을 통해 구한 파열 시 변형률과 동일 압력일 때의 시험 값을 비교한 것이다. 두 값의 차이가 크지 않은 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

제작 후 1년 정도 경과된 FM 규격 케이스에 대하여 자연노화에 따른 강성 저하 및 파열 성능을 확인하였다.

- 준축지선 궤적 알고리즘을 이용하여 복합재 케이스 파열 특성을 예측하였으며 약 2088psig에서 실린더의 섬유가 끊어지는 결과를 보여주었다.
- 환경 제어가 없이 외기에 노출된 연소관의 구조 강성 저하 수준을 확인하기 위해 파열 수압 시험에서 얻은 압력-변형률 기울기를 1년 전 수행된 수압시험 결과와 비교하였다. 이를 통해 연소관의 강성저하가 없음을 확인하였다.
- 파열 수압시험 결과 약 2200psig에서 실린더 파손이 발생함을 확인하였으며 이는 케이스 파열 요구조건을 만족하는 것이다.

참 고 문 헌

1. 박재성, "필라멘트 와인딩된 압력 탱크의 점진적 파손 해석 및 설계", Ph.D. Thesis, KAIST, 2002.
2. 오세희, "효율적인 메타모델 기법을 적용한 복합재료 구조물의 최적설계", Ph.D. Thesis, KAIST, 2005.
3. "ABAQUS Analysis User's Manual, Ver6.6"
4. ASTM D3039.
5. 황태경, 박재범, 김형근, 도영대, "자연노화에 따른 카본 에폭시 압력용기의 섬유 인장강도 변화", 한국복합재료학회지, 제20권, 제2호, 2007.