KSLV-I KM 연소관 제작 공정 개발

김중석* · 이원복* · 조인현** · 길경섭**

Development of the KSLV-I KM Case Manufacturing Process

Joong-Suk Kim* · Wonbok Lee** · In-Hyun Cho*** · Gyoung-Sub Kil****

ABSTRACT

The motor case for the KSLV-I KM is the first satellite launch vehicle ever to be developed by Korea to deliver the 100 kg class satellite into Earth's low orbit. This SLV is made of two stages, and the 2nd stage is made of solid rocket motor. The motor case of the KM is made of all composite materials except for the interface structures. Manufacturing process for the motor case such as insulation, filament winding for the motor case, fabrications for the interface structures will be discussed in this paper.

초 록

KSLV-I은 100 kg급의 인공위성체를 지구 저궤도에 진입시키는 국내 최초의 우주발사체이다. 이 우주발사체는 2단으로 구성되어 있으며, 고체 추진기관인 2단은 순수 국내 기술로 설계, 제작 및 인증시험을 통하여 임무를 수행하게 된다. KM의 연소관은 중량의 감소와 성능의 증대를 위하여 체결을 위한 구조체를 제외하고 복합재료를 사용하여 제작하였다. 연소관의 제작 공정인 내열재, 필라멘트 와인딩, 각종 인터페이스 체결을 위한 구조물의 조립 공정 등에 대하여 논하고자 한다.

Key Words: KSLV-I(한국형 소형위성발사체), Kick Motor(킥 모터), Composite Motor Case(복합재 연소관), Solid Rocket Motor(고체 추진기관), Insulation(내열재), SLV(위성발사체)

1. 서 론

복합재 연소관은 낮은 구조비가 요구되는 고성능 고체 추진기관에 적용된다. 금속 연소관에 비하여 단가가 상승하고 제작 공정도 복잡하여 품질 관리에도 어려움이 있지만 추진기관의 경량화가 필요한 시스템에서는 복합재의 적용이 필수적이다[1]. 복합재 연소관의 제작 방식은 크게 dry type의 prepreg를 사용한 와인딩과 wet type의 와인딩이 있다. 비용의 측면에서는 wet type이 유리하나 공정성의 측면에서는 dry type이 유리하다. 구조 성능의 측면에서는 비슷한 수

* (주)한화 대전공장 개발부
** 한국항공우주연구원 추진제어팀
연락저자, E-mail: sjskim74@hanwha.co.kr

준으로 나타난다. KSLV-I KM 연소관의 개발을 위하여 내탄도 해석 결과를 통한 연소관 형상 설계, 내열재의 삭마와 열전달을 고려한 내열재의 설계, 분할형 맨드렐의 설계, 내열재 제작 공정 설계, 와인딩 패턴 설계, 인터페이스 구조물에 대한 설계 등이 이루어졌다. 이러한 설계를 바탕으로 각종 제작 공정에 대한 타당성 검증과 공정 파라미터에 대한 분석을 수행하였다.

2. 본 론

KSLV-I KM에 적용된 연소관의 제작 공정은 맨드렐의 조립부터 내열재의 적층 및 성형, 와인딩, 각종 브래킷 및 구조물의 접착 등으로 구성되어있다. 연소관 제작 공정은 다음과 같이 진행된다.

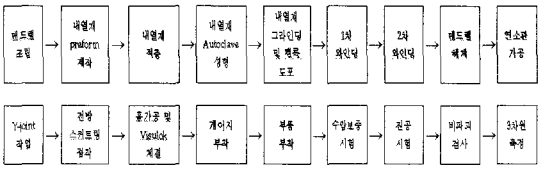

Fig. 1 KSLV-I KM 연소관 제작공정 흐름도

2.1 맨드렐 설계 및 제작

맨드렐의 설계에는 맨드렐의 열팽창으로 인한 연소관의 응력 집중과 해소, 공정성, 안전성 등이 고려되어야 한다. 연소관의 전후방 opening 사이즈를 고려하여 맨드렐 segment의 사이즈를 결정하여야 한다. 맨드렐은 전방, 후방, 실린더 맨드렐 부분 조립체로 구성되어 있으며, 각각의 부분 조립체는 한 개의 조립체로 조립이 가능하게 설계되었다. 각 segment의 최대 사이즈는 후방 보스의 opening으로 빼어낼 수 있도록 설계하였다.

맨드렐 segment는 총 46개로 이루어져 있으며 지지링, 지지판 등을 사용하여 외압 및 하중에 견딜 수 있도록 설계하였다. 또한, 맨드렐 해체 시 무너짐, 작업성을 고려하여 설계되었다. 맨드렐 축의 조립성, 와인딩의 편의성 및 하중에 의한 처짐, 변형을 고려하여 맨드렐 축을 설계하였다.

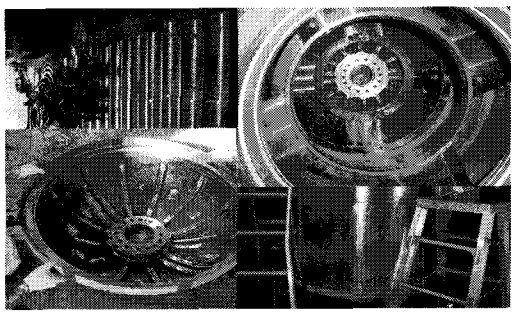

Fig. 2 KSLV-I KM 분할형 맨드렐

2.2 내열재 설계 및 제작

KM의 내열재는 내열재의 삭마 특성 및 기계적 물성, 공정성 등을 고려하여 선정하였으며, 연소가스에 노출되는 시간, 흐름, 열전달 등을 고려하여 두께를 설정하였다[2].

내열재는 EPDM/Kevlar/CR base의 내열재를 적용하였으며, 내열재의 물성은 다음의 표와 같다.

Table 1. 내열재의 기계적 물성(at 20℃)

구분	인장강도	파괴신율	경도	밀도
단위	bar	%	Shore A	g/cm^3
결과	90.83	514.0	64	1.081

내열재는 추진제의응력 집중을 해소시킬 수 있도록 그레인 형상에 따라 전방에만 부츠를 설계하였으며, 전후방 돔 내열재, 전후방 보스 내열재, 실린더 내열재로 구분이 된다.

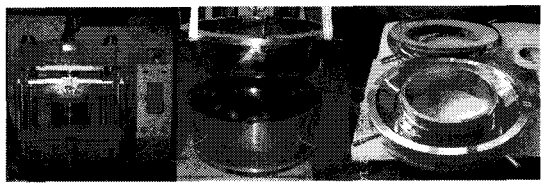

Fig. 3 KSLV-I 내열재 제작 금형

내열재는 단일형 금형 내에 적층하여 프레스로 가압 성형하여 preform을 제작한 후 맨드렐

위에 적층하여 Autoclave 성형하는 방식으로 제작하였다. 내열재의 접착에는 켐록 205와 6108을 적용하였다.

내열재 preform이 제작되면 금형에서 탈형한 후 트리밍 및 세척 과정을 거친다. 이미 조립된 맨드렐에 내열재를 적층한 후 Autoclave에서 진공성형을 수행한다.

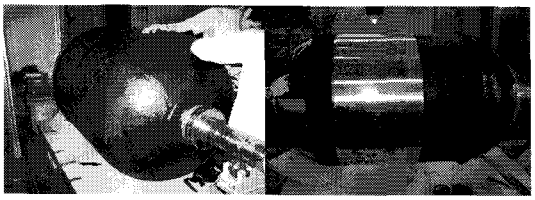

Fig. 4 KSLV-I KM 연소관 내열재 적층

실린더 내열재의 적층은 두께 2 mm 미가류 내열재 sheet를 사용하여 설계 두께에 맞추어 말아서 적층한다. 성형이 끝난 내열재는 polishing grinder를 사용하여 contour를 맞추어준 후 켐록을 도포하여 와인딩 준비를 하게된다.

2.3 와인딩 패턴 설계 및 제작

연소관의 전후방 돔은 R_1/R_2가 0.52인 표준 등장력 돔을 적용하였으며, 외경, 압력, 추력 등의 설계 요구조건에 따라 실린더 부위의 길이가 결정되었으며, 점화기와 노즐의 설계에 따라서 전후방 보스의 opening 사이즈가 결정되었다. 이러한 형상에 따라 구조해석을 수행하여 와인딩 패턴의 설계를 수행하였다[3].

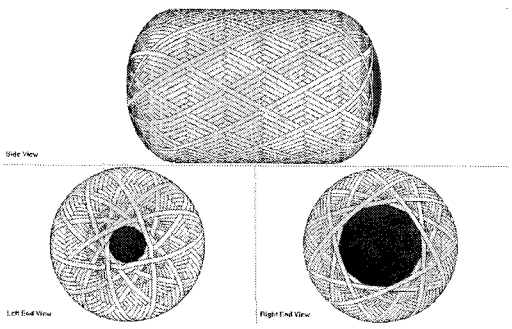

Fig. 5 와인딩 패턴의 설계

연소관의 필라멘트 와인딩은 T-700 급의 carbon/epoxy prepreg를 사용하여 제작하였다. 와인딩 각도는 전방 돔의 최적 각도인 15°와 후방 돔의 최적 각도인 34° 사이의 각도를 선정했다. 와인딩 각도를 전방 쪽에 맞추게 되면 돔의 너클 부위가 취약해지는 결과를 보이므로 후방 돔의 최적 각도에 가까운 29°를 기준으로 와인딩 각도를 선정하였다.

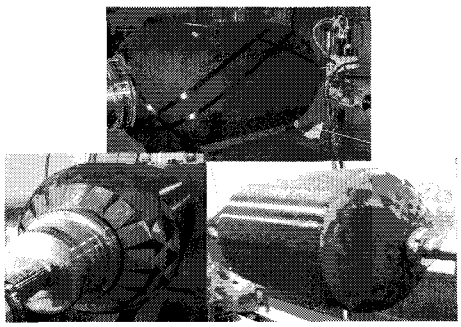

Fig. 6 KSLV-I KM 연소관 와인딩

와인딩 sequence는 전후방 돔 부위의 내압에 대한 구조적 역할을 하는 Helical winding과 실린더 부위의 구조적 역할을 하는 Hoop winding으로 구성되며 전방 돔의 변위량을 제어하기 위하여 적용된 전방 UD wafer와 후방 보스 주변 부위의 국부적인 보강을 위하여 적용된 Spiral wafer로 구성되어있다. 와인딩 sequence는 다음의 표와 같다.

Table 2. KSLV-I KM winding Sequence

1차 와인딩		2차 와인딩	
Process	Angle	Process	Angle
Helical 1	$(\pm 29°)_1$	1st skirt	-
Hoop 1	$(90°)_1$	Leveling	$(90°)_1$
전후방 wafer	-	Hoop 1	$(90°)_1$
Helical 2	$(\pm 29°)_1$	Helical 1	$(\pm 29°)_2$
Hoop 2	$(90°)_1$	Hoop 2	$(90°)_5$
전후방 wafer			
Helical 3	$(\pm 29°)_2$		
Hoop 3	$(90°)_1$		
전방 wafer			
Helical 4	$(\pm 29°)_2$		
Hoop 4	$(90°)_1$		

2.4 인터페이스 구조물 설계 및 제작

KSLV-I KM 연소관의 인터페이스 구조물로는 점화기와 노즐과의 체결을 위한 전후방 보스, 상단부 payload 구조물(KMS)과의 연결을 위한 전방 스커트 링, TVC 유압 배관라인과 manifold의 고정을 위한 브래킷이 있다. 인터페이스 구조물은 구조비의 감소를 위하여 A7075 T6 계열의 소재를 사용하였으며, MEOP(1,114 psia)의 150% 이상의 압력에서도 구조적인 건전성을 가질 수 있도록 ANSYS를 사용한 구조해석을 수행하여 설계 및 제작하였다.

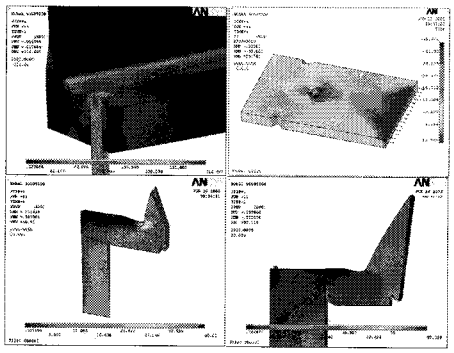

Fig. 7 KSLV-I KM 연소관 인터페이스 구조물의 구조해석

3. 결 론

KSLV-I KM에 적용된 연소관의 제작 공정 개발에 대하여 논하였다. 연소관 형상의 설계부터 복합재와 금속 구조물에 대한 설계 요구조건에 맞추어 구조해석을 수행하여 연소관의 성능을 예측하였으며, 이를 바탕으로 연소관의 제작 공정을 설계하였다.

연소관의 수압보증 시험 및 수압 파열 시험 결과 연소관의 전방 부 스트레인은 보증 압력인 1,225 psia에서 약 5,500 $\mu\epsilon$, 후방 돔 부위에서 약 7,700 $\mu\epsilon$, 실린더 중앙 부위에서 약 10,300 $\mu\epsilon$ 정도의 스트레인 값을 보이며, 연소관의 파열 압력은 약 2,200 psia 정도로 MEOP의 약 2배 정도의 파괴 안전율을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 각종 구조시험 및 지상연소 시험을 통하여 연소관과 인터페이스 구조물의 건의 건전성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. S.T. Peters, W.D. Humphrey, and R. F. Foral, "Filament Winding Composite Structure Fabrication", SAMPE, 1991
2. NASA, "Solid Rocket Motor Internal Insulation", SP-8093
3. 박재성, "필라멘트 와인딩된 압력 탱크의 점진적 파손 해석 및 설계", 한국과학기술원, 2001