

論文

KSR-III 탑재부 킥모터 개발 I. 축소형 연소관 구조 및 공정 설계

조인현*, 박재성***, 오승협***

Development of Payload Kick Motor for KSR-III I. Design of Downscaled Structure & Processing Method

In-Hyun Cho*, Jae-Sung Park***, Seung-Hyup Oh***

ABSTRACT

This paper summarizes the procedures to develop the downscaled payload kick motor for KSR-III by KARI. Filament winding - a well-known method of manufacturing composite motor case - is adopted to reduce structural weight. Netting and lamination theories are used to determine adequate winding thickness under required internal pressure. Dome shapes are designed considering feasible winding patterns and easiness of mandrel manufacturing. T-800 carbon fiber and Novolac type resin are selected for weight-reduction. The separate mandrels are disassembled and removed after filament winding. The manufacturing process of real payload kick motor is developed from the design experience of downscaled ones.

초 록

본 논문은 한국항공우주연구원에서 개발 중인 KSR-III 로켓의 탑재부 축소형 킥모터 구조 설계와 제작공정 개발 내용을 정리하였다. 경량화를 위해 복합재료를 적용하였으며, 복합재 연소관 제작에 널리 사용되는 필라멘트 와인딩 방법을 도입하였다. 복합재 구조설계에는 망목이론(netting theory)과 적층판 이론을 사용하여 요구되는 내압하중에 적합한 와인딩 두께를 결정하였고, 돔형상은 와인딩 및 맨드렐(mandrel) 제작의 편의성을 고려하여 결정하였다. 재료는 경량화를 목표로 T-800 탄소 섬유와 고온용 수지로 선정하였다. 또한 와인딩 후 맨드렐을 제거하기 위해 조립식 맨드렐을 개발하여 적용하였다.

Key Words: 연소관(motor case), 필라멘트 와인딩(filament winding), 맨드렐(mandrel), 복합재료(composite material)

1. 서 론

1960년대 우주발사체용으로 개발된 로켓 모터는 이후 2단 미사일의 상단이나 탑재부 킥모터용으로 활용되고 있다. 최근에는 우주왕복선과 같은 대형 발사체의 보조 추력기로부터 개인이 휴대하는 소형 전락 무기에 이르기까지

사용범위와 종류가 다양하다.

초기에는 S-901 유리섬유/에폭시로 제작되었으나 비강도, 비강성이 우수하고 열변형이 적은 탄소섬유로 대체되어 제작되고 있다[1]. 이러한 모터케이스는 고체추진 로켓의 추진제를 보호, 저장하고 고온, 고압의 연소실로 사용된다. 또한 노즐이나 점화기 등과 구조적으로 연결되어있고,

* 한국항공우주연구원 우주발사체 사업단 추진제어그룹

*** 한국항공우주연구원 우주발사체 사업단 구조그룹 교신전자(E-mail:cronus@kari.re.kr)

*** 한국항공우주연구원 우주발사체 사업단 추진기관그룹

추진제의 연소로 인한 추력을 로켓구조물에 전달하는 역할을 한다.

모터케이스의 개발은 형상설계, 재료선정, 공정설계로 나눌 수 있다. 형상의 설계는 주어진 임무조건과 필라멘트 와인딩 공정의 특징을 고려하여 구조적으로 안정하고 제작이 간편한 형상을 선택하게 된다. 재료의 선정에서는 임무에 적합한 성능을 만족하는 무게가 가볍고, 강도 및 강성이 우수한 재료를 선택하게 된다. 마지막으로 공정설계는 주어진 형상과 재료를 가지고, 원하는 제품을 얼마나 재현성 있게 생산할 수 있는지에 따라 결정된다.

일반적으로 모터케이스의 형상은 원형 실린더부와 양쪽에 개구부를 갖는 전·후방 돔부분으로 구성되며, 실린더부분을 확장한 스킵트, 후방돔에 장착되는 노즐과 전방돔의 점화기로 구성된다. 돔형상은 일반적으로 필라멘트 와인딩 공정의 안정성을 우선적으로 고려한다. 실린더 부분과 개구부의 반경이 주어지면 와인딩시 섬유가 미끄러지지 않는 측지선 궤적(*geodesic path*)이 유일하게 결정된다[2]. 그러나 양쪽 개구부 반경이 다를 때는 실린더 중앙부위에서 와인딩 각도를 점진적으로 변화시키는 공정을 거치기 전에는 양쪽 모두에서 측지선 궤적을 따라 와인딩 할 수 없다. 이 경우 일반적으로 측지선 궤적은 아니면서 안정되게 와인딩 할 수 있는 준측지선 궤적(*semi-geodesic path*)을 섬유의 미끄러짐을 고려하여 선택하게 된다[3]. 그러나 기존의 방법들은 섬유의 궤적과 돔형상이 동시에 결정되기 때문에 맨드렐의 제작성을 다시 고려해야만 한다. 최근에는 임의의 돔 형상에 대해 섬유의 미끄러짐을 고려한 와인딩 궤적을 계산하여 사용하는 연구가 수행되어 돔의 형상과 와인딩 궤적을 독립적으로 설계할 수 있다[4].

두 번째로 재료의 선정은 경제성과 성능을 모두 고려하여 선정하게 된다. 항공기나 우주발사체 구조물에는 성능이 우수한 탄소섬유가 사용되고, 적용 환경에 따라서 수지의 성분 배합이 결정된다.

마지막으로 공정의 설계는 필라멘트 와인딩 공법 중에 적합한 공법을 선택하고, 맨드렐의 재료 및 제작 방법과 와인딩이 원활하게 이루어질 수 있도록 와인딩 순서를 결정하는 것으로 구성된다. 와인딩 공법은 섬유를 수지에 함침시키는 시점에 따라 크게 4가지로 구분되며, 특히 젖(wet) 와인딩과 프리프레그(*preg*)를 이용한 드라이(*dry*) 와인딩이 주로 사용된다[5]. 젖 와인딩은 재료의 보관이 용이하고 비용이 적게 들지만 점성이 큰 수지의 사용이 제한되고 섬유함유율과 섬유의 폭을 고르게 유지하기가 어렵기 때문에 균일 품질의 대량 생산이 어렵다. 또한 섬유와 맨드렐 사이의 마찰계수가 작아 안정되게 와인딩되는 섬유각도가 제한된다. 프리프레그를 이용한 드라이 와인딩은 재료비는 비싸지만 섬유함유율을 높일 수 있고, 고른 섬유함유율을 가진 제품을 생산하기 쉽다. 또한 프리프레그와 맨드렐간의 마찰력이 커서 와인딩이 가능한 섬유각도 범위가

넓다. 맨드렐의 재료로는 금속재, 석고, 용해성 맨드렐까지 종류가 다양하다. 특히 금속재료 맨드렐의 경우 대량 생산과 공정이 간단하지만 제작 단가가 높고, 복합재료 성형시 열팽창 계수 차이에 의한 잔류응력이 발생하기 쉽다. 용해성 및 석고, 모래 등의 맨드렐 재료는 열팽창에 대한 잔류응력 생성이 작지만 환경 폐기물의 발생이나 재사용이 불가능한 단점이 있다.

본 연구에서 개발된 연소관의 돔설계는 와인딩의 편이성을 고려한 측지선 궤적을 고려하였으나 실 적용에는 좌표로 설계하였을 때 금형 제작 및 맨드렐 제작에 어려움이 있고, 필라멘트 와인딩에 앞서 맨드렐 표면을 내열 고무로 랩핑(*wrapping*)하고 난 후에 작업이 이루어지기 때문에 측지선 궤적을 최대한 유지하면서 좌표 값과 가장 근사한 반경을 찾아 전·후방에 유사하게 적용하고, 구조적 안정 및 제작 공정상의 편리를 도모하였다. 또한 개발된 연소관이 국내 최초의 액체로켓 발사체에 적용되며, 순수 국내 기술로 제작되기 때문에 사업 성공이 가장 중요한 목표이다. 따라서 재료의 선정에 있어서도 경제성보다는 성능과 안정성을 바탕으로 선정하였다. 현재 사용되고 있는 탄소 섬유 중에 강도가 가장 우수한 T-800 계열의 섬유를 사용하였으며, 수지는 프리프레그 와인딩에 적합하고 열에 강한 Novalac 타입의 재료를 선정하였다. 필라멘트 와인딩 공법으로는 프리프레그를 이용한 드라이 와인딩 공법을 사용하였는데, 섬유함유율을 크게 유지하여 성능을 높일 수 있고, 공정중에 국부적인 웨이퍼(*wafer*) 보강이 가능하다. 맨드렐의 재료로는 금속재료를 적용하고 와인딩 및 복합재료 성형 후 분해되어 제거되는 맨드렐을 설계하여 연소관을 제작하였다. 와인딩 순서는 연소관의 크기가 크지 않고 실린더부분의 길이가 짧아 헬리컬 와인딩과 후프와인딩을 교대로 진행하여 섬유의 압착(*compaction*)을 좋게 하였다. 실물형 모델 제작에서 발생할 수 있는 문제점들을 최소화하기 위하여 축소형 연소관을 우선 개발하였다.

2. 연소관 형상 설계

2.1 와인딩 두께 결정

당목이론에 의하면 복합재 압력용기의 내압은 헬리컬(*helical*)과 후프(*hoop*) 방향으로 와인딩된 섬유가 담당하게 된다. 와인딩 두께의 결정은 실린더부분에서 헬리컬과 후프층의 두께와 그 비율을 결정함으로써 이루어진다. 실린더부분에서는 원주방향의 응력이 축방향 응력의 두배가 된다.

$$\sigma_{Hoop} = 2\sigma_{Axial} = \frac{PD}{2t} \quad (1)$$

여기서 P는 내압, D는 실린더직경, t는 실린더 두께이다. 두 방향의 두께의 합은 식 (2)와 같고, 요구되는 내압, 실린더 직경과 섬유방향의 인장강도로부터 전체 실린더부 두께를 구할 수 있다.

$$t_{total} = t_{Hoop} + t_{Axial} = \frac{PD}{2\sigma_{Hoop}} + \frac{PD}{2\sigma_{Axial}} = \frac{3PD}{4\sigma_{Hoop}} \quad (2)$$

본 키모터의 MEOP(Maximum Expected Operating Pressure)가 13.79MPa (2000psi)를 넘지 않으므로 설계과열 압력을 20.69MPa (3000psi)로 설정하고, 축소형의 직경이 300mm, 안전계수를 2, 적용재료(T-800)의 인장강도가 5612 MPa이므로 필요한 전체두께는 1.66mm가 된다.

와인딩시에 축방향으로 배열되는 섬유는 없으므로 헬리컬층에 축방향과 원주방향 성분은 식 (3), (4)와 같이 표현된다.

$$\sigma_{Hoop} = \sigma_{fiber} \left(\frac{t_{Hoop}}{t_{total}} + \frac{t_{Helical}}{t_{total}} \sin^2 \alpha \right) \quad (3)$$

$$\sigma_{Axial} = \sigma_{fiber} \frac{t_{Helical}}{t_{total}} \cos^2 \alpha \quad (4)$$

여기서 α 는 와인딩 각도를 나타낸다.

1.2의 축방향:원주방향 응력비를 이용하여 섬유방향 응력을 소거하여 정리하면 식 (5), (6)과 같다.

$$t_{Hoop} = \frac{t_{total}}{\cos^2 \alpha} \left(\frac{2}{3} - \sin^2 \alpha \right) \quad (5)$$

$$t_{Helical} = \frac{t_{Hoop}}{1 - 3\cos^2 \alpha} \quad (6)$$

와인딩 각도를 22°로 가정하고 식 (5), (6)으로부터 각 층의 두께를 구하면 헬리컬층은 0.64mm, 후프층은 1.02mm가 된다.

위의 식으로부터 나온 두께들은 수지에 의한 효과를 무시한 것으로서 실제 프리프레크의 섬유함유율이 55% 정도 되므로 와인딩시 적용해야될 각 층 두께는 전체두께가 3.02mm, 헬리컬층은 1.17mm, 후프층은 1.85mm가 된다. 위에서 추정된 와인딩 각도는 돔형상과 와인딩 공정의 편이를 고려한 각도이다.

2.2 돔형상 결정

돔 부위는 필라멘트 와인딩으로 제작되는 복합재료 압력 용기 설계에서 가장 어려운 부분이다. 섬유를 일부 또는 전체에 걸쳐 감싸는 개구부로서 압력용기의 구조 강도 면에서 매우 중요한 역할을 하게되고 전, 후방 개구부의 크기 차이가 증가하게 됨에 따라 돔형상과 와인딩 패턴의

설계에 어려움이 가중된다.

일반적으로 필라멘트 와인딩되는 연소관의 돔 형상은 실린더 부분과 개구부의 반경비(ratio)에 따라 유일하게 결정된다. 그러나 양쪽 개구부의 반경이 다를 경우에는 동일한 와인딩 각도를 양쪽 돔부분에 적용할 수 없고, 섬유와 맨드릴간의 미끄러짐이 발생하지 않는 범위에서 축지선케적을 벗어나게 와인딩한다. 즉 제작상의 문제가 설계과정의 구속 조건으로 등장하게 되며, 그에 따라 맨드릴 제작의 편이성과 필라멘트 와인딩의 안정성을 고려하여 돔형상을 결정하게 된다. 본 연소관의 경우에는 축지선 케적에 따라 결정되는 돔형상과 가장 비슷한 형상을 가지도록 반구형상 두 개를 연결하여 돔형상을 설계하였다(Fig. 1).

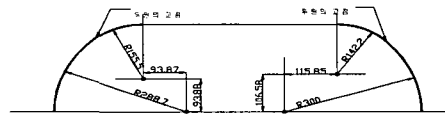


Fig. 1 돔형상 설계.

2.3 와인딩 패턴 설계

와인딩 프로그램을 가지고 주어진 돔형상에 따라 키모터 헬리컬 와인딩 패턴을 설계하여 보았다.

로빙(Roving)수 4개에서의 섬유폭은 9.0mm이므로 이때의 와인딩 각도 10°에서 30°까지를 계산해본 결과는 Table 1과 같다. 적층각 22°에서는 케리지가 왕복운동을 하는 서킷(circuit)수가 103회로 나타났으며 와인딩시 연소관을 분할하면서 와인딩되는 패턴(Pattern)수가 8로 8등분 되어 와인딩이 이루어진다. 돔에서의 미끄러짐 계수가 0.00049, 0.00033으로 나타나 미끄러질 염려가 거의 없었다. 일반적으로 0.01이하의 수치는 경험적으로 미끄러질 확률이 거의 없다. 또한 설계치와 실제 와인딩되는 편차도 0.042%로 설계값과 거의 일치하여 모든 면에서 와인딩 각도 22°가 가장 안정되게 나타나 헬리컬 와인딩 각도는 22°로 결정하였다.

Table 1 와인딩 패턴 계산 결과

와인딩 각도	Circuit		Slip factor		Deviation %
	Coverage	Pattern	Right dome	Left dome	
10	109	1	-0.00203	-0.00201	0.670
12	108	1	-0.00148	-0.00151	1.128
14	108	5	-0.00118	-0.00135	0.447
16	106	11	-0.00081	-0.00087	0.953
18	105	12	-0.00059	-0.00059	0.418
20	104	7	-0.00051	0.00040	0.901
22	103	8	0.00049	0.00033	0.042
24	103	13	0.00055	0.00050	0.385
26	101	6	0.00060	0.00067	0.659
28	101	7	0.00072	0.00092	0.454
30	100	11	0.00083	0.00103	0.332

3. 재료선정

3.1 탄소섬유 및 에폭시 수지

복합재료의 수지는 강화 섬유 사이의 응력을 전달하고 형상을 유지하는 역할을 담당하며 섬유는 주요 하중을 담당하게 된다. 복합재료 연소관의 보강재료로는 섬유 형태가 사용되며 현재 시판되는 섬유 중에서는 T-800 탄소 섬유가 가장 고강도이다. 키크모터에 적용될 T-800 탄소 섬유는 일본 toray사 제품으로 롤(Roll)당 2kg이며 섬유수 12,000가닥(12K)이다. T-800 탄소 섬유의 물성은 Table 2와 같다.

키크모터에 적용할 수지는 프리프레그용으로 적당하고 특히 열에 강한 Novolac 타입을 선정하였다. 이 조성은 프리프레그 전문 제작 업체인 신경화학과 공동 개발한 조성으로 한화에서 제작중인 많은 복합재 연소관 제품 및 신경의 민수용(테니스 라켓등)으로 다양하게 사용되어 성능이 입증된 열경화 Novolac 타입이다. 상온에서 경도 65~70 (Shore A-2) 이상의 고체상태이고, 50~60℃에서 약간의 흐름성을 가지는 정도의 형상을 지닌다. 수지가 작업 온도에 노출되어 경화가 진행됨으로서 수지끼리의 콘솔리데이션(Consolidation)이 불가능한 시간인 풋라이프(Pot life)는 50℃ 조건에서 79시간, 60℃ 조건에서는 57시간으로 와인딩 공정에 충분한 풋라이프를 가지고 있으며, 기타 프리프레그의 장기 저장에 따른 수지의 특성은 상온에서 3개월 가능하며 온도별 가능 기간은 Table 3과 같다.

수지의 경화 조건은 금속 맨드렐을 적용하는 키크모터의 경우 열팽창에 의한 잔류응력이 남기 때문에 수지의 물성 저하에 영향을 주지 않으면서 고온이 아닌 온도로 100℃를 선정하였다. 경화 시간별로 시편을 만들어 물성을 측정하고 결과 경화시간 10시간에서는 수지의 인장강도가 46.2MPa(6,700psi)로 측정되었고, 15시간 이상에서는 62.1MPa(9,000psi)이상으로 측정되었다. 연소관에 적용 가능한 수지의 인장 강도는 일반적으로 48.3MPa(7,000psi)이상이기 때문에 경화 조건은 최소 10시간 이상 주어야 될 것으로 판단했고, 실제 제작시에도 20시간을 경화 시간으로 선정했다.

3.2 기계적 특성 시험 평가

신경화학의 시설을 이용하여 프리프레그를 제작하였고, 제작된 프리프레그는 매 로트(lot)별로 단위 길이당 무게를 측정하여 섬유의 중량비를 측정하였고, 용제(solvent)에 수지를 녹여 남아있는 섬유 무게를 측정하여 섬유중량비를 측정하였다. 측정 결과 섬유중량비는 70±1% 이내로 측정되어 균일한 함량을 나타냈는데 이러한 결과는 키크모터 제작시에 균일한 제품을 제작하는 중요한 요소가 된다. 탄소섬유와 수지로 제작된 프리프레그는 각종 시편으로 제작하여 기계적 강도 및 열적 특성을 측정하였다.

Table 2 T-800 탄소섬유 물성치

Tensile strength	570kg/mm ²
Tensile Modulus	30,000kg/mm ²
Elongation	1.9%
Density	1.81g/cc
Mass per unit length(12K)	445g/1000m

Table 3 Shelf Life 특성

보관 조건	Ideal Shelf Life	Commercial Shelf Life
-20℃	12 개월	6개월
25℃	3 개월	1.5 개월
40℃	1 개월	0.5 개월

Table 4 인장시편 치수와 시험 결과(ASTM D3039 적용)

구 분	width	thickness	length	grip length
0°	12.50mm	0.55mm	148mm	19mm
90°	25mm	2.4mm	173mm	25.5mm

구 분	stiffness	strength	failure strain	poisson's ratio
0°	191 GPa	2442MPa	1.20%	0.33
90°	11 GPa	55MPa	0.53%	

Table 5 압축시편 치수 및 시험 결과(ASTM D3410 적용)

구 분	width	thickness	length	grip length	test result
0°	11.5mm	2.5mm	81mm	38mm	1168MPa
90°	11.5mm	2.5mm	81mm	38mm	251MPa

Table 6 굽힘시편 치수 및 시험결과(ASTM D790 적용)

width	thickness	length	span length	test result	failure mode
12.7mm	9.6mm	190mm	150mm	1090MPa	층간전단

Table 7 링시편 치수 및 시험 결과(NOL Ring Test)

width	thickness	width	Test Result
12.7mm	9.6mm	190mm	2690MPa

Table 8 Thermal & Physical Properties

Coeff. of Thermal Expansion(30~100℃)		Thermal Conductivity		Density
0°	90°	0°	90°	
-0.6×10 ⁻⁶ m/m	51.3×10 ⁻⁶ m/m	38~43 W/m℃	0.83 W/m℃	1.59 g/cc

Table 9 USN 175BX(일방향) Grade 특성

Fiber		Prepreg			
인장탄성율	인장강도	두께	FAW	RC	Total weight
24ton/mm ²	360kg/mm	0.175mm	175g/m ²	33%	261gr/m ²

3.3 기타재료 선정

키크모터 국부적인 보강에 사용한 T-700 일방향 프리프레이크는 선경에서 제작한 USN 175BX(일방향) 그라이드(grade)이며 특성 값은 Table 9에 나타내었고, 보스부와 복합재료의 접착 강도를 유지하기 위한 FM 73 필름접착제(Film Adhesive)의 특성 및 접착강도는 Table 10, Table 11과 같다.

Table 10 FM 73OST(one side tacky) Film Adhesive 특성

Nominal weight	Nominal thickness	color	Volatiles	Shop life	Shelf life	Storage
420gsm	0.38mm	Yellow	1.25Max	30days at 24℃	12달	-18℃ 이하

4. 제작 공정 설계

4.1 제작 공정 선택

복합재 연소관 제조 공정에는 유럽에서 많이 사용되는 젯 와인딩, 미국에서 주로 선호하는 프리프레그에 의한 드라이 와인딩으로 크게 구분 할 수 있다. 각 방식의 장, 단점은 Table 12와 같다.

와인딩 방법 선택은 공정에 따라 나뉘는 장·단점을 가지고 있어 제작하려는 제품의 형상이나 크기, 특성, 비용, 성능과 표면 상태 등에 의해 결정되게 된다. 일반적으로 복합재 연소관의 경우는 드라이 와인딩 방법이 성능이나 품질보증 측면에서 우수한 것으로 알려져 있으나 절대적인 비교치는 아니며, 발사관이나 파이프(pipe)등의 형태는 젯와인딩으로 제작하는 것이 일반적이다. 본 키크모터 개발에는 섬유함유율을 높혀 성능을 극대화 할 수 있고, 상대적으로 취약한 돔/실린더, 돔/보스 부분에 국부적으로 웨이퍼(wafer) 보강도 용이한 프리프레그를 이용한 드라이 와인딩 공법을 사용하였다.

Table 11 FM 73 Mechanical(Bonding) properties(Metal-to-metal)

Properties Temp.	Tensile shear psi(MPa)	Blister Detection psi(MPa)	Climbing Drum Peel In. lbs/in. (Nm/m)	Floating Roller Peel lbs/in. (kN/m)
-55℃	5890(40.6)	5290(36.5)	55(220)	56(9.8)
24℃	5770(39.8)	4860(33.5)	66(290)	64(11.2)
82℃	4050(27.9)	3650(25.2)	85(380)	55(9.6)
120℃	1650(11.4)	1590(11.0)	37(170)	31(5.4)

4.2 맨드릴 재료 선정 및 제작

Table 13에 맨드릴의 재료에 따른 특성을 비교하였다. 제품의 제작 빈도, 성능, 크기 등에 따라 적합한 재료를 사용하게 된다. 조립식 맨드릴을 제외하고는 환경 폐기물이 발생하고 대량 생산이 부적합하기 때문에 시험용 소형 생산에 주로 이용된다. 조립식 맨드릴은 재사용이 가능하여 대량 생산에 용이하며 취급하기가 편리하다는 장점에도 불구하고 복합재료와의 열팽창 계수 차이가 커서 고온 경화시 과도한 잔류응력이 발생하기도 하며 제작 단가가 비싼 것이 단점으로 남아있다. KSR-III용 축소형 키크모터에는 전방

Table 12 와인딩 공법 장·단점 비교

구 분	Prepreg winding	Wet winding
Quality assurance	BEST	WORST
Control of resin content	BEST	WORST
Stability on nongeodesic path	HIGHEST	LOWEST
Cleanliness	BEST	WORST
Cost	HIGHEST	LOWEST
Fiber availability	POOR	BEST
Ability to use complex resin systems	Yes (Hot melts available)	Very difficult
Winding speed	HIGHEST	LOWEST
Winding pattern design	HIGHEST	LOWEST
Fiber damage	LOWEST (twice handle)	HIGHEST

* Filament Winding Composite Structure Fabrication By S.T.Peters/W.D. Hamphrey/RF. Foral

Table 13 맨드렐 재료에 따른 장·단점 비교

맨드렐 종류	적당한 직경(m)	장 점	단 점
분리/조립식 맨드렐 (알미늄 또는 스틸)	0.3~1.5	대량 생산에 용이 공정 적용 간단 환경 폐기를 없음	제작 단가 고가 비중 높음 열팽창 문제 해결
모래 맨드렐 (모래 +PVA)	1.5	열팽창 문제 없음	환경 폐기물 발생 적용 공정이 까다로움 재사용 불가
석고형 맨드렐 (Hydrocal B-II)	대형연소관	열팽창 문제 없음	환경 폐기물 발생 재사용 불가
용해성 맨드렐 (KERR DMM)	0.3~0.6	열팽창 문제 없음	환경 폐기물 발생 적용 공정이 까다로움 재사용 불가
Soluable salt (Paraplast 8102)	대형연소관	열팽창 문제 없음	환경 폐기물 발생 적용 공정이 까다로움 재사용 불가

뒀과 후방뒀 부분이 16조각씩, 실린더 부분이 14조각으로 분해되는 맨드렐을 설계하였으며, 지지링을 사용하여 맨드렐이 고온, 고압 환경하에서도 이탈, 변형되는 것을 방지하였다. 주요 재질은 열팽창을 최대한 억제할 수 있는 스틸 SM 45C를 적용하였고, 맨드렐의 조립, 해체 및 복합재료와의 이형성을 좋게 하기 위하여 전 표면에 경질 크롬 도금을 수행하였다. Fig. 2와 3은 맨드렐의 조립된 모습과 분해되어 있는 모습이다.

4.2 제작 공정 설계

복합재 킷모터 제작 공정에서 성능에 직접적인 영향을 미치는 요소는 와인딩 장력(tension)의 크기이다. 장력이 불균일하게 와인딩되면 결함이 발생하고, 결함 주변 섬유들에 응력 집중이 발생하여 파열이 일어날 가능성이 크다. 작은 장력으로 와인딩할 경우 성능 저하나 뒀클(wrinkle) 결함이 나타나기 쉽고, 장력이 클 경우 수지 부족이나 성형시 과도한 내부 잔류응력을 유발할 수 있다. 일반적으로 췁방식에 비해 드라이 방식의 와인딩에서는 큰 장력을 사용하게 되는데 이는 프리프레그가 맨드렐 표면에 밀착되지 않고 떠있을 경우 그 부분에 결함이 발생하기 때문이다. 또한 헬리컬 와인딩보다 후프 와인딩에서 뒀클 효과가 크게 나타나므로 후프 와인딩시 더욱 높은 장력을 가하여야 한다. 와인딩 순서는 대형 연소관의 경우 헬리컬 와인딩을 모두 수행한 후 후프 와인딩을 수행하고, 소형 연소관의 경우에는 헬리컬과 후프를 교대로 수행하는 방법이 사용된다. 마지막으로 스커트 조립 후 Y-joint 부위에 강화 예폭

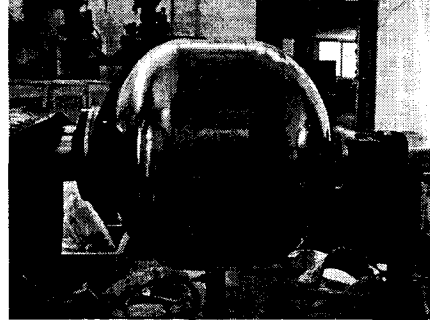


Fig. 2 맨드렐 조립 후 모습.

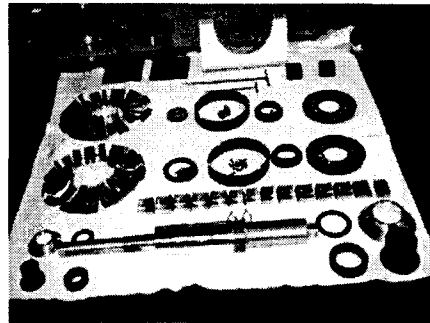


Fig. 3 맨드렐 해체 후 모습.

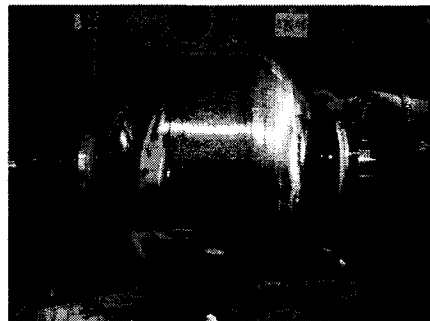


Fig. 4 맨드렐 조립 및 전처리.

시(toughened epoxy) 수지를 채워 넣어 스커트 부의 후프층이 뒀부분의 하중을 지탱할 수 있도록 설계하였다.

KSR-III용 축소형 킷모터의 최종 모델에 대한 작업 순서를 정리하면 다음과 같다.

- 맨드렐 조립 및 전처리 (Fig. 4)
 - o 전방부 맨드렐 조립(14 Segment)
 - o 실린더부 맨드렐 조립(12 Segment)
 - o 후방부 맨드렐 조립(14 Segment)
 - o Main Shaft 및 전, 후방 실린더 조립
 - o 맨드렐 표면처리



Fig. 5 내열재 적층 및 가황, 접착.

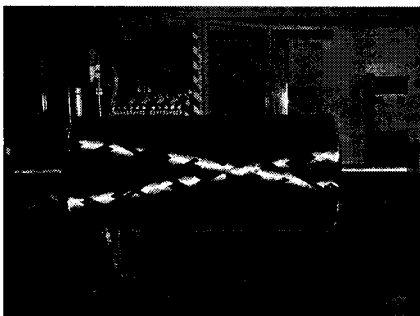


Fig. 6 1차 스킷트 와인딩 제작 그림.

- 내열재 적층 및 가황, 접착 (Fig. 5)

- o 보스 내열재 가황 제작
- o Boots 내열재 가황 제작
- o Dome 내열재 Preform
- o 실린더부 내열재 재단
- o 내열재 맨드렐에 적층
- o Vacuum Bagging
- o Autoclave 가황, 접착
- o 최종 내열재 치수 가공

- 연소관 와인딩 제작 (Fig. 6)

- o 1차 스킷트 Winding 및 가공
- o 연소관 헬리칼 와인딩 제작
- o 취약부 웨이퍼 보강
- o Hoop 와인딩 제작
- o Vacuum Bagging
- o 연소관 오븐 경화
- o 1차 스킷트 연소관에 조립
- o 2차 스킷트 헬리칼 와인딩 제작
- o 2차 스킷트 후프 와인딩 제작
- o Vacuum Bagging
- o Oven Cure
- o 맨드렐 탈형

- o 스킷트 도면 치수 절단
- o 연소관 최종 가공
- o Y-joint 제작

결 론

KSR-III의 축소형 킷모터에 대한 구조 설계 및 공정 설계를 수행하였다. 축소형의 경험을 바탕으로 실물형 연소관의 설계 조건을 결정하였다.(Table 14)

Table 14 실물형 연소관 설계 조건

구 분	연소관 제작	스킷트 조립후 제작	1차 스킷트 제작
	1, 2호기		
Helical winding			
- Winding angle	22°	15°	30°
- Circuits pattern	9	10	8
- Circuits per layer	62	63	61
- Bandwidth(mm)	18	18	18
- Rovings per band	8	8	8
- Number of layer	6	4	8
- Layer thickness(mm)	0.396	0.396	0.396
- Head Wafer 보강	3 plies	-	-
- Rear Wafer 보강	3 plies	-	-
Hoop Winding			
- Bandwidth(mm)	18.0	18.0	18.0
- Rovings per band	8	8	4
- Number of plies	4	10	4
- Ply thickness(mm)	0.192	0.192	0.192
Total thickness(mm)	3.144	3.504	3.954
- Helical	2.376	1.584	3.168
- Hoop	0.768	1.920	0.768
Tension			
- Helical	6.0 lb	6.0 lb	6.0 lb
- Hoop	6.0 lb	6.0 lb	6.0 lb
Cure Process	60℃ 5hrs, 100℃ 15hrs	60℃ 5hrs, 100℃ 15hrs	60℃ 5hrs, 100℃ 20hrs

실물형에 앞서 구조 안정성 및 재료에 대한 인장, 압축, 굽힘, 링시험 등을 수행하여 충분한 설계 자료를 확보하였다. 축소형 킷모터를 실제 제작하여 공정상의 결함 발생 여부를 확인하였고, 향후 추진체를 충전하여 연소시험을 수행함으로써 구동 중의 구조적, 열적 안정성 시험을 할 예정이다.

참고문헌

- 1) N. Christensen and E. Wolcott, "Development and Fabrication of a Graphite/Epoxy Motor Case for Air

-
- Launch Missile Applications," 29th *National SAMPE Symposium*, April 3-5, 1984, pp. 1335-1348.
- 2) 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.
 - 3) 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.
 - 4) J. S. Park, C. S. Hong, C. G. Kim and C. U. Kim, "Analysis of Filament Wound Composite Structures Considering the Change of Winding Angles Through the Thickness Direction," *Composite Structures*, Vol. 55, No. 1, 2002, pp. 63-71.
 - 5) M. Lossie, *Production Oriented Design of Filament Wound Composites*, K. U. Leuven, PhD Thesis, April, 1990.