

MLRS 발사관 소재 및 구조특성 연구

채경민* · 손현일* · 서혁* · 허윤**

Research on the properties of MLRS launch tube material and structure

Kyungmin Chae* · Hyunil Son* · Hyuk Suh* · Yoon Huh**

ABSTRACT

MLRS is the weapon system which has been mass-produced since 2004. MLRS launch tube has developed and produced independently refer to the facilities and process condition of General Dynamics Co, USA. The purpose of this research is base establishment for the launch tube performance improvement and application of another weapon system. Research performed about material property, process condition, and structural property.

초 록

MLRS는 2004년부터 국내에서 양산화된 무기 체계로 그 부품인 복합재 발사관은 미국 GD社의 설비 및 공정조건을 참고하여 국내에서 독자적으로 개발/생산되고 있다. 본 연구는 지금까지 공정 분야에 치중되었던 제품 연구의 폭을 소재 및 구조특성 분야로 넓혀 발사관의 성능 개량 또는 이후에 개발되는 무기체계에 응용 가능한 기반을 수립하는데 목적이 있다. 연구 과정은 소재 특성, 공정 조건, 구조적 특성에 대한 연구 순서로 진행하였다.

Key Words: Composite Material(복합재료), Matrix resin(매트릭스 수지), Material property(소재 특성), Structural property(구조적 특성)

1. 서 론

MLRS 발사관은 로켓포드를 구성하는 핵심 부품 중 하나로 탄의 저장과 발사에 중요한 역할을 한다. MLRS에는 재사용은 가능하지만 탄 장입

등에 번거로움이 있는 금속재료 보다는 다양한 장점을 지닌 복합재료가 적합한 소재로 선정되었으며 그 중에서도 GFRP 소재가 사용되었다. 저장 면에서 복합재료의 장점은 염분, 수분에 대한 내부식성이 뛰어나고 진동 감쇠특성이 우수하다는 것이다. 또한 추진기관 발사시 발생하는 온도 및 압력에 견디기 위해서는 내마모성 등 우수한 기계적 특성이 요구된다.

본 논문에서는 이러한 요구조건을 만족하는 발

* (주)한화 대전공장 품질보증부

** 국방품질관리소

연락처, E-mail: bora94@hanwha.co.kr

사관 제작을 위해 필요한 소재 및 구조특성, 공정 조건 등에 대해 자세히 연구해 보고자 한다.

2. 소재 특성

복합재료의 구성성분은 강화재(reinforced material)와 모재(matrix resin)로 크게 나눌 수 있는데 발사관에는 강화재로 E-glass fiber를 모재로는 주재 Epoxy resin, 경화제 MTHPA, 경화촉매 Imidazole, 결합제 Silane, 안료가 사용되었다.

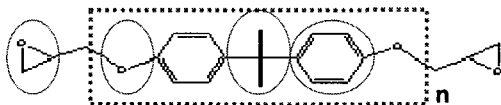
2.1 개별 원료별 특성

2.1.1 유리섬유 (E-glass fiber)

E-glass(Electric-glass)는 내풍화성 및 전기적 성질이 우수하여 탄 저장시 나뉘 등에 의한 제품 피해를 최소화할 수 있고 저가이면서도 물성이 우수하여 일회용으로 사용되는 발사관에 적합한 소재이다. 또한 유리섬유는 Griffith의 flaw이론[2]에 의거 단섬유(filament) 직경이 작을수록 인장강도가 커지는 특성을 지니고 있어 제품의 인장강도를 극대화하기 위해 단섬유의 집합체인 스트랜드 단위로 와인딩에 적용된다.

2.1.2 주재 (Epoxy resin - bisphenol A형)

주재인 Epoxy resin으로는 bisphenol A형을 사용하며 Fig. 1과 같은 구조로 되어있는데 경화 반응에 따른 부가 생성물이 없고 체적 수축률이 양호하며 고온 특성이 우수하다는 장점으로 인해 매트릭스 수지의 주재로 선정되었다.



반응성 내화확성 강성 내열성/강성

Diglycidyl ether of bisphenol A (DEBGA)

Fig. 1 bisphenol A형 Epoxy resin

2.1.3 경화제 (MTHPA)

경화제는 산무수물계인 MTHPA가 사용되었는

데 아민계 경화제에 비해 비교적 반응이 늦고, 경화에 고온/장시간을 요하지만 발열반응을 억제하면서 경화를 행하는 것이 가능하고, 경화물의 기계적 성질(특히 파단 연신)이 우수하기 때문에 매트릭스 수지의 경화제로 선정되었다.

2.1.4 경화촉매 (Imidazole)

경화촉매는 일반적으로 산무수물계 경화제를 사용하는 경우에는 3급 아민 또는 Imidazole 화합물이 촉매로 사용된다. 이 중 발사관에 사용된 Imidazole은 수분에 민감하지만, 수지의 열변형 온도를 상승시켜 제품의 열적 특성을 우수하게 하는 특성을 가지고 있다.

2.1.5 결합제 (Silane)

실란계 결합제는 와인딩 수지의 결합제로도 사용되지만 유리섬유 제조공정 중에 섬유 마찰 및 정전기 방지를 위한 표면처리제로도 사용된다. 매트릭스 수지 내에서 결합제의 역할은 섬유와 수지간 물리적, 화학적 연결을 통해서 계면 결합력을 향상시키는데 있다.

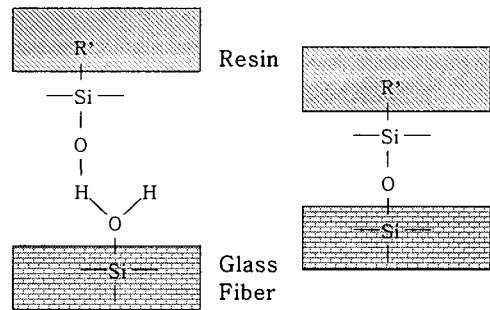
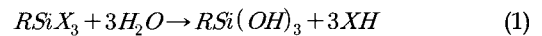


Fig. 2 결합제의 결합 반응

2.2 매트릭스 수지 특성

2.2.1 매트릭스 수지의 역할

매트릭스 수지는 유리섬유 사이에서 응력을 전달해주는 역할과 기계적인 마모로부터 섬유를 보호하는 역할을 하며 복합재 구조 내에서 전단특성 및 층간 전단특성을 강화하는 역할을 한다.

2.2.2 경화 특성

수지의 경화가 진행될 때 산무수물과 에폭시기의 반응비는 에폭시기:CO-O-CO=2:1의 mole비로 반응이 진행되며 이 때 경화촉매는 낮은 온도에서 산무수물의 고리를 열어 수지의 경화 온도를 저하시키는 역할을 한다.

수지의 경화 특성을 확인할 수 있는 시험으로 Gel time test가 있는데 150℃의 고온에서 경화될 때 수지의 급속 경화에 따른 물성 저하 또는 수지의 지연 경화를 미연에 방지하기 위한 시험으로 이를 근거로 촉매함량 및 경화시간에 대한 기준을 설정할 수 있었다.

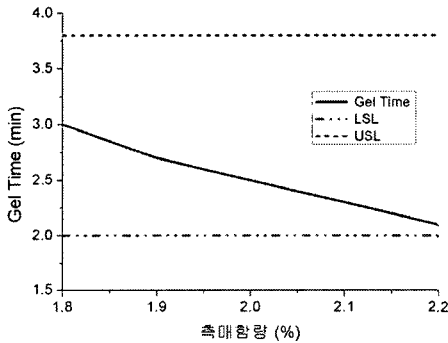


Fig. 3 촉매함량에 따른 Gel time 변화

Figure. 4는 촉매 함량에 따른 수지의 Tg(유리전이온도), Tc(결정화온도)의 변화를 나타내었다. 시험 결과 촉매함량에 따른 Tg의 변화는 없었으나 Tc는 촉매함량이 증가함에 따라서 감소하는 경향을 통해 촉매의 역할을 확인할 수 있었다.

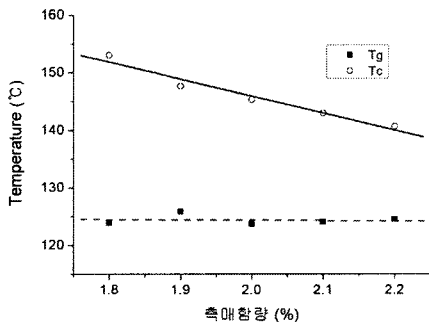


Fig. 4 촉매함량에 따른 Tg, Tc 변화

3. 공정 조건

3.1 와인딩 조건

복합재료의 와인딩 방식은 크게 후프 와인딩, 헬리컬 와인딩, 플라 와인딩으로 구분하며 발사관에는 후프와 헬리컬 와인딩이 적용되어 전체적으로 6 Layer가 와인딩되며 약 3mm의 두께를 형성하게 된다. 발사관과 같은 실린더형 복합재에서는 헬리컬 와인딩 각도를 결정할 때 아래와 같은 이론이 적용되는데 계산된 이론값에 섬유 밀립현상 등 공정에서 발생하는 변수를 감안하여 실재는 +2°가 더해진 56.5°로 와인딩 된다.

$$\text{이론 1. } Stress(Hoop) = Stress(Length) \times 2 \quad (2)$$

$$\frac{S_H}{S_L} = \frac{S_f \sin^2 \alpha}{S_f \cos^2 \alpha} = \tan^2 \alpha = 2, \quad \alpha = 54.75^\circ \quad (3)$$

3.2 경화 조건

MLRS 발사관의 경화는 크게 Precure와 Postcure로 구분되는데 Precure는 수지의 경화를 유발하기 위해 Tg 이상에서 Postcure는 제품 변형을 방지하기 위해 Tg 이하에서 경화를 진행한다.

Precure에서는 기공 감소를 위해 스팀을 이용한 내부 경화를 실시하고 표면 방울짐 현상 및 균일한 수지분포를 위해 회전 경화를 실시하고 있다.

Postcure에서는 좌우 뒤틀림 방지를 위해 수직 경화를 실시하며 이를 통해 응력완화 효과를 얻을 수 있게 된다.

4. 구조적 특성

MLRS 발사관의 구조 특성은 발사관 벽면에 작용하는 응력해석, 레일 응력해석, Joint 부 응력해석으로 구분할 수 있다.

4.1 벽면 응력 해석

벽면 응력 해석에는 고전 적층판 이론과 키르히호프-러브의 가설이 적용되었다. 이 이론을 토대로 발사관 벽면에 작용하는 최대 굽힘 모멘트 및 극한 굽힘 모멘트를 구할 수 있었으며 완성

제품에서의 굽힘 시험을 통해 제품 성능을 입증할 수 있었다.

<극한 굽힘 모멘트>

$$= 12,600 \times 1.5 (s.f) = 18,900 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4)$$

4.2 레일 응력 해석 (Shear stress)

링형과 실린더형일 때의 비틀림 각도 계산식과 전단 탄성율(G)과 관성 모멘트(J)의 미분방정식을 통해서 레일이 최종적으로 받는 전단 응력을 구할 수 있으며 실험적으로 구한 소재의 응력값과 비교했을 때 174% 정도의 안전율을 가짐을 확인할 수 있었다.

$$\varphi = 0.159 \frac{T_0 r}{EI} = 0.159 \frac{(dT/dx)r}{D} \quad (5)$$

$$GJ \frac{d^2 \varphi}{dx^2} - \frac{k_0 c^2}{12} \varphi = 0 \quad (6)$$

<레일의 최대 전단응력>

$$\tau = G \frac{d\varphi}{dx} \frac{c}{2} = 31.74 \times 10^6 (N/m^2) \quad (7)$$

4.3 Joint 응력 해석

레일과 벽면의 연결부는 3차원이고 전단응력이 발사관 벽면과 스퍼너그에 주어지는 압력과 측면 하중의 조합으로 이루어지므로 해석이 쉽지 않다. 따라서 실제 비행시험을 통해 얻어진 데이터와 비행시 레일 토크에 대한 모사시험 (Torque test) 결과를 기준으로 규격을 설정하였다.

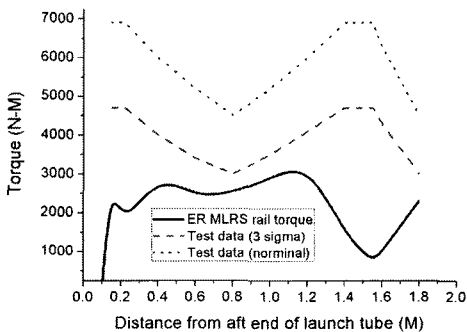


Fig. 5 발사관 레일 토크

5. 결론

그간 많은 시행착오가 있었으나 상기와 같이 최적화된 원료 및 공정 시스템을 구축하여 생산 및 품질 면에서 안정화된 양산 체제를 구축할 수 있었으며 이를 기반으로 향후 발사관에 대한 성능 개선 및 다른 무기 체계에의 적용도 가능하리라 판단된다.

추가적으로 수지의 경화과정에 대한 세부특성 및 복합재료 구조해석과 관련된 분야는 추후 연구를 거듭하여 부족한 점을 보완해 나가야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 신소재연구회, "복합재료 입문," 겸지사, 2002
2. 문창권 외, "고분자 복합재료", 시그마프레스 .2003
3. 전의준 외, "최신 복합재료", (주)교학사, 1995
4. 이대길 외, "복합재료 역학 및 제조기술", 시그마프레스, 1998
5. R. G. Weatherhead, "FRP Technology", 1982
6. 미상, "Quality handbook for composite material", CHAPMAN&HALL, 1994
7. D. V. Rosato 외, "Filament winding", John wiley & sons inc, 1964