

성층권 비행선용 막 재료의 인장 물성 측정 및 비선형 거동에 관한 연구

이한걸*·노진호*·이인*·강왕구**·염찬흥**

A Study on Tensile Properties and Non-linear Behavior Analysis of Membrane for Stratospheric Airship Envelop

Han-Geol Lee, Jin-Ho Roh, In Lee, Wang-Gu Kang, Chan-Hong Yeom

Abstract

The material properties of membrane for stratospheric airship is experimentally investigated. Mechanical tensile properties of the membrane material at room, high and low temperature are measured using instron with thermal chamber. Experimentally, material non-linearity is observed at room and high temperature. In order to simulate material non-linearity caused by the uniaxial extension curve of a woven fabric, the nonlinear hyperelastic problem is considered with finite element program of ABAQS. Numerical results are compared with experimental results.

Key Words: Membrane, material non-linearity, hyperelasticity

1. 서론

직물복합재료(woven fabric composite)는 섬유 또는 섬유 다발의 꼬임에 의해 강화된 구조용 재료이다. 직물 복합재료는 다양한 형태의 제작이 가능하고, 우수한 중량비/강성비와 국부적인 손상의 진전을 방지하는 구조적 강성의 장점 등을 가지고 있어서 직물 복합재료에 대한 관심이 고조되고 있다. 직물복합재료의 사용이 증가함에 따라 그 기계적 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 직물복합재료는 경사와 위사로 이루어진 섬유다발과 수지로 구성되어 있어서 미세구조가 매우 복잡하며 따라서 열-기계적인 거동을 예측하고 그 물성치를 산출 하는데 큰 어려움을 주고 있다. 최근 한국항공우주연구원에서 개발한 성층권 비행선의 기낭 막 재료 역시 직물복합재료를 기반으로 하여 제작되었다. 성층권 비행선의 임무를 수행하기 위해서는 20km 상공의 환경에서 내압과 공기력 등에 의한 구조하중을 임무기간 동안 견디어 낼 수 있는 구조재의 개발이 필수적

이다. Boisse와 Borr[1]는 경사와 위사의 상호 접촉에 의한 영향과 굴곡진 섬유다발의 변화에 의해 초래되는 직물의 거동에 미치는 영향을 2축 인장 실험을 통해 조사하였다. 이를 통해 변형이 생기는 동안 굴곡진 섬유 다발의 변화에 의해 응력-변형률 관계에서 초기에 비선형성이 존재함을 보였다. 성층권 고도 20km 상공은 강력한 자외선(ultra-violet)과 저온(-75℃) 상태이며 또한 주야 온도차에 의한 밤과 낮의 내부 헬륨의 온도차는 최대 40℃ 내지 50℃ 정도로 예측되고 있다. 따라서 고온에서 저온 영역까지 온도가 변화함에 따라 막 재료는 기계적 열적 물성의 변화를 겪게 된다. 김용협등[2]은 평직 주자직물 복합재료로 제작되는 항공우주 비행체의 신뢰성 있는 설계를 위하여 직물복합재료의 열-기계적 물성치 특성화 기법을 정립하였으며 이를 통해 온도 변화에 따른 직물복합재료의 물성 변화를 관찰하였다. 개발된 막 재료의 비선형 탄성 재료에 대한 응력 해석을 하기 위해서는 재료의 비선형성 및 대변형을 고려해야한다. Milani와 Nemes[3]는 초탄성(hyperelastic) 모델을 이용하여 직물복합재료

*한국과학기술원 항공우주공학과

**한국항공우주연구원 비행선 그룹

비선형 거동을 해석하였다.

본 연구에서는 고고도 비행선용으로 개발한 기낭 막의 대한 신뢰성 있는 설계를 위하여 막 재료의 열-기계적 물성치를 측정하였으며, 온도에 따른 기계적 특성변화를 비교하였다. 또한 상용 내연적 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 막 재료의 재료 비선형성을 초탄성으로 모델링하여 인장 시험결과와 비교하였다.

2. 기계적 물리적 특성시험

2.1 인장시험

직물 복합재료의 인장강도와 인장강성 등을 구하기 위하여 두께가 0.25mm인 직물 복합재료 시편을 ASTM D751-00을 참고 하여 폭이 25mm(1in)이고 길이가 150mm(6in)인 시편을 5개씩 제작하여 상온, 고온, 저온에서 각각 인장 시험을 수행하였다. 본 연구에서는 사용되는 시편의 경우 섬유방향과 섬유 수직방향의 물성이 같으므로 한 방향에 대한 실험만으로 충분하다. 변형률을 측정하기 위하여 extensometer를 사용하였다.

1) 상온 인장 실험

상온 인장 수행 결과 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 응력 변형률 관계에서 초기에 비선형 거동을 보였다. 이처럼 비선형 거동을 보이는 이유는 Fig. 2의 SEM 단면 촬영을 통해 간접적으로 추측할 수 있다.

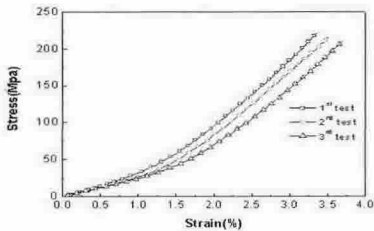


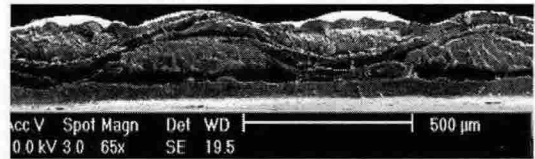
Fig. 1 Stress-strain curve at room temperature

일반적으로 비선형 구간은 섬유 다발을 이루는 경사와 위사의 굴곡도가 제거 되는 영역으로 "decrimping region"으로 알려져 있다. 즉 경사와 위사 섬유 다발이 서로 꼬여져 교차되어 있어 경사 방향의 인장 하중을 받으면 교차된 섬유 다발의 굴곡도 즉 섬유 다발의 곡률 변화가 플랫폼닝

(flattening) 현상에 의해 서서히 발생하여 원래보다 굴곡도가 감소하게 된다. 이것은 Fig.2의 파단 단면인(a)와 (b)를 통해 확인 할 수 있다. 파손 단면의 경사와 위사 방향의 섬유다발이 파손되지 않았을 때 보다 굴곡도가 현저히 감소되어 있는 것을 볼 수 있다.



(a) failure cross-section



(b) No failure cross-section

Fig. 2 SEM image

따라서 굴곡도가 제거된 후의 선형 영역에서는 섬유다발이 충분히 펼쳐져 있기 때문에 섬유 다발은 보다 신장 변형에 대하여 저항 하게 되어 강성의 증가뿐만 아니라 비선형 거동 영역에서 보다 큰 응력 집중이 발생하여 응력 증가가 큰 것으로 사료된다.

2) 고온/저온 인장 실험

본 연구에서는 Fig. 3의 열 챔버(thermal chamber)를 사용하여 저온, 고온에서 각각 실험을 수행하였다.

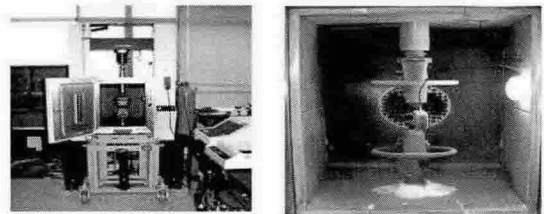


Fig. 3 thermal chamber

제작된 시편을 열 챔버에 넣어 가열한 후 재료 시험기(INSTRON 3119-407)를 사용하여 고온 인장 실험을 수행하였으며, 저온 실험은 동일한 저온도달시간을 갖게 하기 위해 공압 질소를 대체

로 사용하는 가압장치를 연결한 후 용기내의 압력을 1.5기압(22psi)으로 유지시켰다. 그림 4와 5를 비교 해 보면 고온에서 나타나던 비선형 현상이 저온에서는 나타나지 않은 것을 볼 수 있다. 이는 vectron에 있는 polymer matrix가 저온에서 강도가 증가 하는데 비해 오히려 연성이 상당히 작아졌기 때문에 비롯되었다고 사료된다.

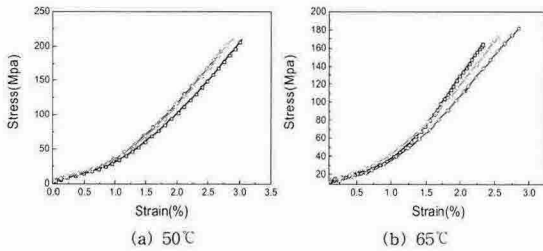


Fig. 4 Stress-strain curve at high temperature

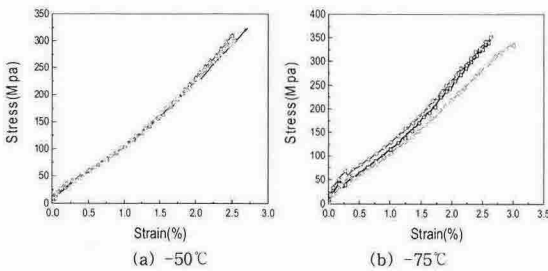


Fig. 5 Stress-strain curve at low temperature

Fig. 4 에서 알 수 있듯이 65°C에서 강도 값이 50도에서의 강도 값과 차이를 보였다. 그 이유는 65°C에서 인장 하중을 받는 시편이 섬유 다발의 손상에 의한 파괴가 아니라, 벡트란과 테들라 필름층이 각각 분리 되었기 때문에 비롯 되었다. 벡트란과 테들라고 분리된 이유는 기지로 사용된 폴리우레탄이 유리전이온도 (약58°C)에서 기지의 물성 변화가 발생했기 때문이다. 일반적으로 폴리우레탄은 유리전이온도 이후에 굉장히 유연해지는 성질을 가지는데 이로 인해 벡트란과 테들라 필름 층의 분리를 가져왔다고 사료된다.

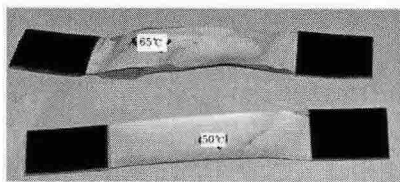


Fig. 6 Failure specimen at high temperature

따라서 65°C 에서 재료의 강도와 강성의 저하가 나타났다고 사료된다. Fig.6은 50°C와 65°C에서 파괴된 시편 형상이다. Fig.7(a)에서 저온에서의 강성 값은 조금씩 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 섬유다발의 취성 증가 특성으로 인해 막 재료의 강성 저하율이 저하되었기 때문이라 생각된다. Fig.7(b) 에서 강도는 저온으로 갈수록 급격히 증가하는 경향을 보인다. 그 원인은 직물복합재료가 상대적으로 높은 온도에서 제조되기 때문에 구성성분들의 열 팽창 계수의 차이 발생으로 인한 잔류 응력 때문이라 사료 된다.

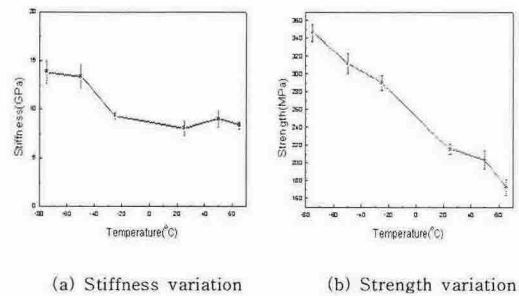


Fig. 7 Tensile property variation

3. 재료 비선형 거동해석

그림 1에서처럼 상온 실험에서 재료 비선형이 나타났다. 이러한 재료 비선형성은 변형률에너지 함수 형태인 Cauchy 모델과 Green hyperelastic 모델을 이용하여 해석할 수 있다. 변형률에너지 함수 형태는 크게 그 함수를 주 불변항으로 표시하는 것과 주 연신율형태로 표시하는 두 가지로 나눌 수 있다. 이중 유한요소해석에 있어서는 그 적용의 편의성으로 인해 주 불변항으로 표시되는 함수의 형태가 선호되고 있으며 특히 Mooney-Rivlin모델에서 두 개의 계수를 가진 단순 Mooney-Rivlin모델이 수학적 단순성과 그 계수값의 물리적 의미로 인해 가장 많이 사용 되고 있다. 본 논문에서는 고차전개를 가지는 일반화된 Mooney-Rivlin모델을 이용하였으며 Mooney-Rivlin모델에 의한 변형률에너지 함수는 다음과 같이 변형률 불변항(strain invariant)의 함수로 표현할 수 있다.[4]

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (1)$$

대변형 해석의 경우 N=2의 식을 많이 사용한다.

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (2)$$

여기서 U 는 변형률에너지 함수, C_{ij} 는 재료상수들이고, I_1, I_2, I_3 는 Cauchy-Green 변형텐서의 주 불변량이다. 변형률 불변계수는 주 신장률(principal stretch) λ 로 다음과 같이 표현된다.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_1^2\lambda_3^2 \quad (3)$$

$$I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2$$

재료가 비압축성이면 $I_3 = 1$ 이다. 1축 인장 시험에서 주 신장률은 다음의 관계를 가진다.

$$\lambda_1 = \lambda_u, \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_u}} \quad (4)$$

여기서 λ_u 는 하중 방향의 신장률이며, 공칭변형률(nominal strain)과 다음의 관계를 가진다.

$$\epsilon_u = \lambda_u - 1 \quad (5)$$

일반적으로 유한 변형을 탄성적으로 해석하기 위하여 단위 체적당 변형률 에너지(Strain Energy)의 변화율이 응력에 의한 일률과 같다는 개념을 이용하여 다음과 같이 응력 변형률 관계를 기술할 수 있다.

$$\delta U = T_u \delta \lambda_u \quad (6)$$

$$T_u = \frac{\partial U}{\partial \lambda_u} = 2(1 - \lambda_u^{-3}) \left(\lambda_u \frac{\partial U}{\partial I_1} + \frac{\partial U}{\partial I_2} \right) \quad (7)$$

여기서 T_u 는 공칭응력(nominal stress)이다.

3.1 해석결과

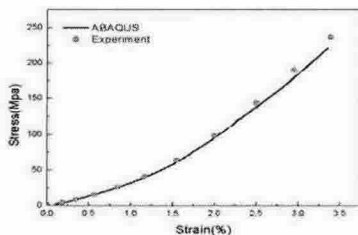


Fig. 8 Comparison of ABAQUS vs Uniaxial tension test

ABAQUS를 이용하여 구하여진 계수는 $C_{10} = 1.26E9, C_{01} = -8.52E8, C_{20} = 4.70E13, C_{11} = -1.01E14, C_{02} = -5.43E13$ 이며 해석결과가 시험결과를 잘 예측함을 Fig. 8을 통해 알 수 있다.

4. 결론

항공우주연구원에서 개발한 막 재료의 열-기계적 물성치를 측정하여 재료의 물성 특성을 규명하였다.

- 상온에서는 섬유다발의 굴곡 현상 등에 의해 응력-변형률 곡선 초기에 비선형 거동이 발생하였다.

- 고온에서는 기지로 사용된 폴리 우레탄의 유리전이온도 (약 58°C)에 의한 기지의 물성 변화로 인해 백트란과 테플라 필름 층의 분리를 가져왔다고 사료된다. 그로 인해 65°C 에서 재료의 강도와 강성의 저하가 나타났다.

- 저온으로 갈수록 취성 증가에 의한 강성의 증가가 나타났다.

- 재료 비선형성을 초탄성체로 고려하여 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 막재료의 비선형 특성을 예측하였다.

참고문헌

- (1) P. Boisse, M. Borr, K. Buet, "Finite element simulations of textile composite forming including the biaxial fabric behaviour," *Composite part B*, Vol. 28, pp.453-464, 1997
- (2) 김용협, 윤광준, 우경식, 구남서 "복합재료의 물성치 특성화 기법에 관한 연구 보고서," 국방과학연구소, 2001
- (3) A.S. Milani, J.A. Nemes "AN intelligent inverse method for characterization of textile reinforced thermoplastic composites using a hyperelastic constitutive model," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp1565-1576
- (4) 박현철 "비선형 탄성 재료의 변형에너지 함수를 통한 재료 특성화 방법에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1992