형상기억합금 선이 삽입된 가변 복합재 패널의 해석 및 실험

Numerical Simulation and Verification of Morphing Composite Structure with Embedded SMA Wire Actuators

공 정 표* • 정 범 석** • 리 녕 학*** • 안 성 훈**** • 조 맹 효*****

Kong, Jung-Pyo • Jung, Beom-Seok • Li, Ningxue • Ahn, Sung-Hoon • Cho, Maenghyo

요 약

형상기억합금이 삽입된 복합체는 힌지나 추가적 작동기 없이 그 자체로서 지능 구조의 역할을 할 수 있어 많은 분야에서 활발히 연구되고 있다. 본 논문에서는 형상기억합금(Shape Memory Alloy) 선이 삽입된 ∩자형 복합재를 제안하고, 형상기억합금과 모재가 정해진 경우의 곡률 변화에 영향을 주는 주요 설계 변수를 복합재의 너비, 두께, 형상기억합금의 편심률을 설계변수로 가정하고 유한요소 해석과 패널 제작 및 실험을 통해 검증한다. 먼저 라고다스(Lagoudas)모델을 형상기억합금의 구성방정식으로 이용한 유한요소해석모델을 구성하여 수치해석을 수행하고, 11 종류의 형상기억합금 선이 삽입된 유리섬유강화복합재(Glass Fiber Reinforced Plastic) 패널을 제작하여 열하중에 따른 곡률변화를 관찰한다. 해석결과와 실험결과의 비교를 통해 해석모델의 타당성을 검증하며, 해석을 통해 각 설계 변수들의 곡률변화에 대한 영향을 파악한다.

keywords : 형상기억합금, 복합재, 수치해석, 라고다스모델, 유리섬유강화복합재(Glass Fiber Reinforced Plastic)

1. 서 론

형상기억합금(Shape Memory Alloy)은 기계적, 열적 하중에 의한 상변형을 통해 초탄성효과(pseudo-elasticity)와 형상기억효과(Shape Memory Effect)를 보이는 지능 재료로서, 다른 금속에 비해 큰 회복력과 변형량을 보인다. 형상기억합금의 회복력은 단위 면적당 최고 700MPa 정도로 일반적인 유압 장치, 기계 제어장치, 압전기를 이용한 복합재 작동기보다 단위 부피당 20배 가까운 구동력을 가진다.. 또한 전기적 열하중으로 제어가 가능하기 때문에 기계적 하중으로 제어되던 구동체계를 단순화 시키는 것이 가능해 진다.

형상기억합금을 응용한 연구 중 하나로 형상기억합금 선이 삽입된 복합재가 주목받고 있다. 복합재는 그 자체로서 구조물의 역할을 수행할 수 있으며, 형상기억합금과 모재의 배치 변화에 따라 다양한 변형 양상을 보이기 때문이다. Turner등은 SMA 혼성 복합재를 연구하였고, Zhou등은 SMA 선이 삽입된 복합재 보를 제작하여 보의 굽힘거동을 연구하였다.

* 정회원 • 서울대학교 기계항공공학과 석사 maxiouse@snu.ac.kr
** 서울대학교 연구원 bjung84@gmail.com
*** LS전선 chrisyellow1@snu.ac.kr
**** 정회원 • 서울대학교 기계항공공학과 교수 ahnsh@snu.ac.kr
***** 정회원 • 서울대학교 기계항공공학과 교수 mhcho@snu.ac.kr

본 연구에서는 형상기억합금 선이 삽입된 ∩자형 복합재를 제안하고, 라고다스모델을 이용한 유한요소 해석모델을 구성하였다. 복합재의 너비, 두께, 편심률을 설계변수로 선정하여, 이들의 변화에 따른 복합재의 곡률변화 및 강성을 예측하였다. 또한, 해석모델의 검증을 위해 11개의 복합재 패널을 실제 제작하였으며, 패널들의 곡률 변화 측정 및 파단 여부를 확인하여 해석결과와 실험결과가 일치함을 보였다.

2. 수치 해석

2.1. 유한요소 해석 모델

본 논문에서는 그림 1과 같은 형상기억합금 선이 삽입된 ∩자형 복합재를 제안하였다. 복합재의 중립면에 위치하지 않은 형상기억합금 선이 열하중을 받아 수축하면, 복합재에 편심력을 유발하게 되며, 곡률의 변화가 생기게 된다. 이때, 너비와 두께, 형상기억합금 선에 의한 편심률 3개의 변수를 설계변수로 정하고, 두 변수를 고정시키고 나머지 하나의 변수를 바꾸어 가면서 수치해석을 수행하였다. 너비는 형상기억합금 선 하나에 대한 모재 복합재의 너비를 의미하고, 편심률은 형상기억합금 선이 삽입된 위치에서의 위층과 아래층의 두께차이를 전체 두께로 나눈 것으로 정의하였다.

복합재의 너비, 두께, 편심률에 의한 다양한 곡률변화를 표현하기위해서는 해석모델의 선정에 주의해야한다. 모재 복합재의 굽힘 변형과 형상기억합금 선의 상변이에 의한 변형을 모사하기 위해 각각 8절점 Brick 요소와 2절점 Truss 요소를 사용하여 해석모델을 설계하였다.

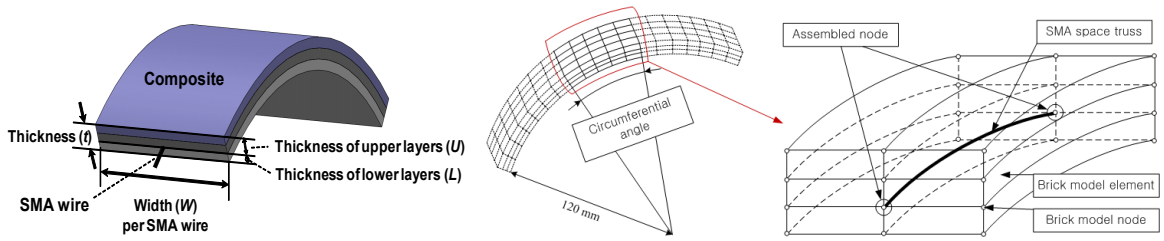

그림 1 유한요소해석모델 모식도

2.2. 형상기억합금 구성방정식(라고다스 모델)

열역학 법칙과 Gibbs 자유에너지에 대한 정의로부터 형상기억합금의 Gibbs 자유에너지식은 식 1과 같이 응력(σ), 온도(T), 마르텐사이트 부피비(ξ)로 나타낼 수 있다. 정의된 식 1과 열역학 제2법칙을 이용하면, 식 2의 Thermodynamic Force를 정의하는 것이 가능해지며, associative flow rule을 가정하여 Flow Rule을 정의하면, 식 3과 같은 응력과 마르텐사이트 부피비의 관계를 알 수 있다.

$$\hat{G} = -\frac{1}{\rho}\frac{1}{2}\sigma_{ij}\hat{S}_{ijkl}\sigma_{kl} - \frac{1}{\rho}\sigma_{ij}\left[\hat{\alpha}_{ij}(T-T_o)\right] + \hat{c}\left[(T-T_o) - T\ln\left(\frac{T}{T_o}\right)\right] - \hat{s}_o T + \hat{u}_o + f \tag{1}$$

$$\Pi \equiv \sigma_{ij}\frac{\partial \varepsilon_{ij}^t}{\partial \xi} - \rho\frac{\partial G}{\partial \xi} \tag{2}$$

$$d\sigma_{ij} = -C_{ijkl}\frac{\partial \Pi}{\partial \sigma_{kl}}d\xi \tag{3}$$

소성해석에서 쓰이는 Convex cutting plane return mapping 알고리즘을 적용하면 마르텐사이트 부피비의

미소 변화량는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\xi_{n+1}^{k} = \frac{\Pi_{n+1}^{k} \mp Y^{*}}{\frac{\partial \Pi_{n+1}^{k}}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijkl} \frac{\partial \Pi_{n+1}^{k}}{\partial \sigma_{kl}} - \frac{\partial \Pi_{n+1}^{k}}{\partial \xi}} \tag{4}$$

3. 실험 및 제작

검증을 위해 지름 356㎛의 니티놀선(Ni: 50.4wt%, Ti: 49.6wt%, Johnson Matthey Co. Ltd., USA)을 사용하여 유리섬유강화복합재(Glass Fiber Reinforced Plastic)에 편심이 생기게 삽입하였다. 본 연구에서의 형상기억합금 선의 초기 상변형 온도와 물성치는 표 1와 같고, 유리섬유강화복합재는 300 ㎛ 두께의 유리섬유(glass fiber)와 기저재료로 에폭시(epoxy) (YD-128, Kukdo Chemical Co., Ltd., Korea)를 사용하였다. 유리섬유강화복합재는 에폭시와 경화제를 각각 70: 30 의 비율로 혼합하여 유리섬유에 바르고 25℃, 1atm 에서 진공상태로 72 시간 경화하였다. 제작된 복합재에 대해 ASTM D 638 에 따라 인장실험을 수행하였으며, 탄성계수, 프아송비, 항복응력은 각각 6.14GPa, 0.098, 190MPa이다. 복합재 구조물의 제작과정은 그림 2와 같다.

M_f	M_s	A_s	A_f	ρ	E_A	E_M	α	ν
29.75 ℃	36.55 ℃	33.25 ℃	40.10 ℃	6450kg/m3	70 GPa	35 GPa	1.1×10-5 /℃	0.05

표 1. 형상기억합금의 상변형 온도와 물성치

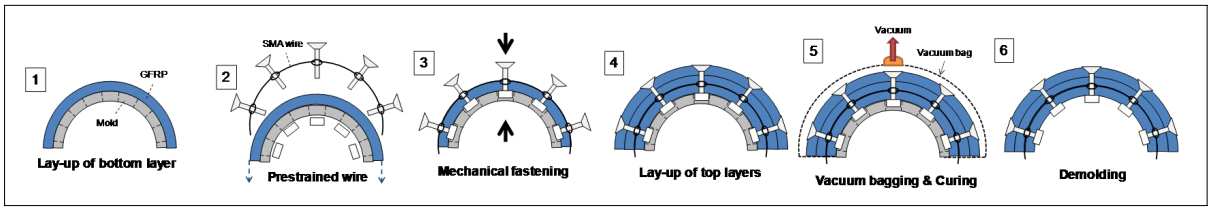

그림 2. 복합재 패널 제작 과정

4. 해석결과 검증

그림 3에서 복합재의 설계변수에 따른 곡률 변형률을 수치해석과 실험 결과로 비교하였다. 첫 번째 그래프는 너비와 편심률을 각각 30mm, 0.33으로 고정하고, 두께를 변화시켜 수치해석을 수행한 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 복합재의 곡률 변화양상이 거의 일치함을 확인할 수 있다. 두 번째 그래프는 두께(0.9mm)와 너비(30mm)를 고정한 복합재에 편심률을 변화시켜 해석한 결과이고, 세 번째 그래프는 두께(0.9mm)와 편심률(0.33)을 고정시키고, 너비를 변화시켜 수치해석을 수행한 결과이다. 형상기억합금의 편심률에 의한 결과는 다를 변수에 비해 복합재의 곡률 변화에 영향을 적게 미친다는 것을 알 수 있으며, 복합재의 너비변화에 따른 수치해석결과 역시 실험결과와 일치함을 확인할 수 있다.

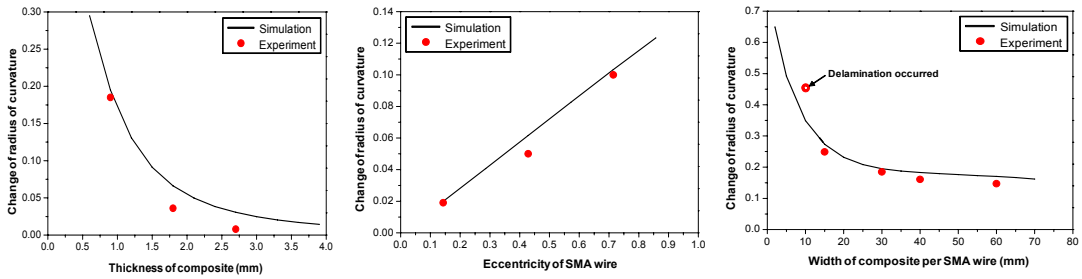

그림 3 설계변수에 따른 복합재 패널의 곡률 변형률

5. 결론

본 논문에서는 형상기억합금 선이 삽입된 ∩자형 유리섬유강화복합재(Glass Fiber Reinforced Plastic)에 대한 수치해석 및 실험을 수행하였다. 각각의 설계변수에 대한 곡률 변화를 라고다스(Lagodas)모델을 이용한 유한요소모델을 구성하여 수치해석을 수행하였으며 실험 결과와의 비교를 통해 해석모델의 타당성을 검증하였다. 해석결과, 형상기억합금의 편심은 복합재의 너비나 두께보다 곡률 변화에 영향이 적음을 보였고, 복합재의 너비와 두께에 따른 복합재의 곡률 변화를 예측할 수 있음을 보였다.

감사의 글

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2009-0097)

참고문헌

Brinson L (1993) One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable J. Intel. Mat. Syst. Struct. 4 229-42

Lagoudas, D.C., Bo, Z., Qidwai, M.A., (1996). A unified thermodynamic constitutive model for SMA and finite element analysis of active metal matrix composites. Mech. Compos. Mater. Struct. 3,153 - 179.

Simo J and Taylor R (2005) A return mapping algorithm for plane stress elastoplasticity Int. J. Num. Meth. Eng. 22 649-70

Cho M and Kim S (2005) Structural morphing using two-way shape memory effect of SMA Int.J.SolidStruct.42 1759-76

Kim S and Cho M (2007) Numerical simulation of a double SMA wire actuator using the two-way shape memory effect of SMA SmartMater.Struct. 16 372-8