형상기억합금 작동기를 이용한 복합재료 구조물의 형상 변형 해석

노진호* · 한재흥** · 이 인**

Numerical Analysis of Shape Modification for the Composite Structures using SMA Strip Actuator

Jin-Ho Roh, Jae-Hung Han and In Lee

Abstract

In this paper, the thermomechanical responses of shape memory alloy (SMA) actuators and their applications as the shape adaptive structures combining SMA actuators produced in the form of strip with composite structures are investigated. The numerical algorithm of the 3-D SMA thermomechanical constitutive equations based on Lagoudas model is implemented to analyze the unique characteristics of SMA strip. Also, the incremental SMA constitutive equations are implemented in the user subroutine UMAT by using ABAQUS finite element program. The shape change of structure is caused by initially strained SMA strip bonded on the surface of the composite structure when thermally activated. Numerical results show that SMA strip actuator can generate enough recovery force to deform the composite structure and sustain the deformed shape subjected to large external load, simultaneously.

Key Words: thermomechanical responses, shape memory alloy, adaptive structure, SMA strip

1. 서 론

최근 재료 공학의 발달과 더불어 구조물의 성능 향상을 위해, 외부 환경 변화를 감지 (sense) 그리고 능동적으로 적응하는 스마트 구조물 개발이 많이 연구되어지고 있다. 감지기 또는 작동기로서 스마트 구조물에 적용되는 재료들로는 광섬유 (optical fibers), 압전 (piezoelectric) 재료, 그리고 형상기억합금 (shape memory alloys: SMAs) 등이 있다.

이 중 형상기억합금 (SMAs)은 비교적 최근에 많은 연구가 수행되어지고 있는 재료로서, 기계적 그리고/또는 열 하중의 외부 환경 변화에 따라 물리적 특성이 바뀌는 재료로 정의할 수 있다. 큰 힘과 변형을 일으키고, 기하학적 형상의 변화, 그리고 외부 하중과 온도에 따라 재료의 강성이나 감쇠 (damping) 특성의 변화 때문에 스마트 구조물의 작동기로 응용하기 매우 좋은 장점을 가지고 있다. Roh와 Kim [1]은 형상기억합금 (SMA) 작동기와 압전재료 감지기 (sensor)를 이용하여 저속 충격에서의 복합재료 구조물의 적응성을 향상시키는 연구를 수행하였다. Lee, Roh, 그리고 Oh [2]는 형상기억합금을 복합재료 구조물에 삽입시킨 SMAHC (Shape Memory Alloy Hybrid Composite) 구조물의 열-기계적 특성을 유한요소법 (FEM)을 이용하여 연구하였다. 수치적인 결과를 통하여, 형상기억합금 작동기가 구조물의 강성을 향상시키고 열적 하중에 의한 구조물의 좌굴 변형을 감쇠시킴을 보여주었다. 또한, Marfia, Sacco, 그리고 Reddy [3]는 형상기억합금이 삽입된 복합재료 빔(beam)을 수치적으로 모델

* 한국과학기술원 항공우주전공 대학원

** 한국과학기술원 항공우주전공

링 하였고, 형상기억합금의 온도를 변화시켜 빔 구조물의 형상 변형을 효과적으로 제어하였다. 또한, 1995년에 수행된 Smart Wing Program에서는 양력과 회전 모멘트를 향상시키기 위해 날개 단면적의 형상변형을 목적으로 SMA torque tube를 응용 연구하였다. 그리고 Singh, Sirohi 그리고 Chopra [4]는 헬리콥터 로터 (rotor)의 진동을 감쇠시키기 위하여 형상기억합금 작동기를 이용한 실험적 연구를 수행하였다.

본 연구에서는, 형상기억합금 작동기의 열-기계적 특성과 SMA strip 작동기를 이용하여 복합재료 구조물의 형상변형 특성을 수치적으로 연구하였다. Lagoudas 모델을 이용하여 3-D 형상기억합금의 구성방정식을 전개하였고, ABAQUS의 subroutine UMAT을 이용하여 형상기억합금의 해석 알고리즘을 유한요소법에 적용하여 의탄성 (pseudoelasticity) 또는 형상기억효과 (shape memory effect)와 같은 형상기억합금의 독특한 특성을 연구하였다. 또한, SMA strip 작동기와 복합재료 구조물을 연계 해석하여 온도 변화에 따른 구조물의 형상변형 특성을 수치적으로 해석하였다.

2. SMA 구성 방정식의 수치적 알고리즘

형상기억합금의 열-기계적 특성의 수치적인 해석을 위하여 Lagoudas 모델 [5]을 바탕으로 3-D 형상기억합금 구성 방정식을 다음과 같이 전개하였다.

$$\dot{\epsilon_{ij}} = S_{ijkl}\dot{\sigma_{kl}} + \alpha_{ij}\dot{T} + Q_{ij}\dot{\xi} \qquad (1)$$

여기서, $\dot{\epsilon_{ij}}$, $\dot{\sigma_{ij}}$, $\dot{T}$, $\dot{\xi}$는 각각 변형률, 응력, 온도 그리고 마르텐사이트 량(fraction)의 증분 형태를 나타낸다. 마르텐사이트 량과 상(phase) 변화가 일어날 때의 변형률, $\dot{\epsilon_{ij}^{t}}$ 의 관계를 나타내는 상 변형 방정식을 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{\epsilon_{ij}^{t}} = \Lambda_{ij}\dot{\xi} \qquad (2)$$

또한, 형상기억합금의 상 변형을 결정하는 변형 함수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

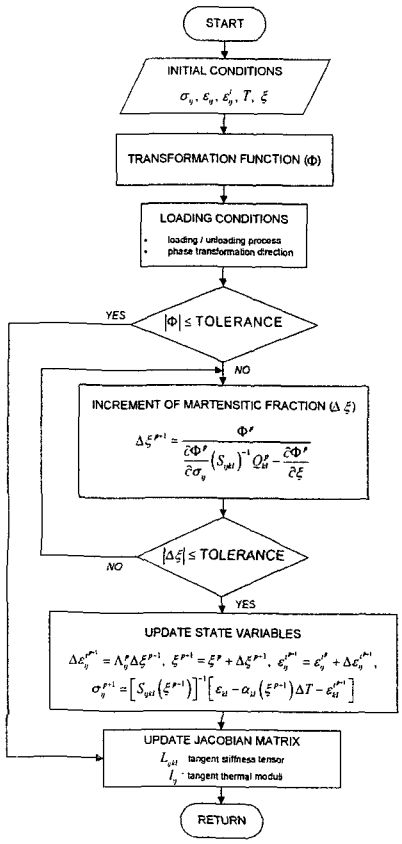


Fig. 1 Algorithm of the SMA constitutive equation for the ABAQUS user subroutine.

$$\begin{aligned} &\dot{\xi} \ge 0, \ \ \Phi(\sigma, T, \xi) \le 0, \Phi\dot{\xi} = 0 \\ &\dot{\xi} \le 0, \Phi(\sigma, T, \xi) \le 0, \Phi\dot{\xi} = 0 \end{aligned} \qquad (3)$$

여기서 $\Phi < 0$인 경우에, 식(3)의 구속조건에 의하여 $\dot{\xi} = 0$의 조건을 만족해야하며 형상기억합금은 상 변형이 없는 탄성 거동 특성을 나타낸다. 반면에 오스테나이트에서 마르텐사이트의 순방향의 상 변형인 경우, $\Phi = 0$과 $\dot{\xi} > 0$을 마르텐사이트에서 오스테나이트의 역방향 상 변형의 경우, $\Phi = 0$과 $\dot{\xi} < 0$을 만족하면서 상 변형이 일어나게 된다.

식(1), (2), 그리고 (3)을 이용하여 SMA의 열-기계적 구성방정식을 해석할 수 있게 된다. 식(1)은 일반적인 증분 형태의 Hooke's law를 나타내고, 식(2)는 형상기억합금 상 변형의 흐름 방향을

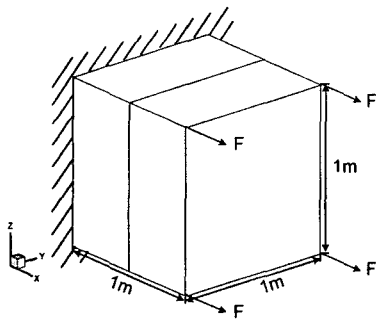


Fig. 2 The schematic of SMA model.

그리고 식(3)은 상 변형의 시작점과 종결점을 판별해주는 식이 된다. 따라서 식(1), (2) 그리고 (3)을 이용하여 형상기억합금의 변형률 그리고 온도 증분에 따른 응력 증분의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{\sigma}_{ij} = L_{ijkl}\dot{\epsilon}_{kl} + l_{ij}\dot{T} \tag{4}$$

식(1)-(4)에 필요한 자세한 변수들은 참고문헌 [5]에 상세히 설명되어 있다. SMA 구성방정식의 수치적인 해석 알고리즘을 Fig. 1에 나타내었고 이것을 바탕으로 ABAQUS의 subroutine UMAT을 이용하여 SMA의 열-기계적 특성을 수치적으로 해석하였다. 본 연구에서 개발한 SMA 해석 알고리즘을 검증하기 위하여 Fig. 2의 모델을 이용하여 Lagoudas [5]의 결과와 비교하였다 (Fig. 3).

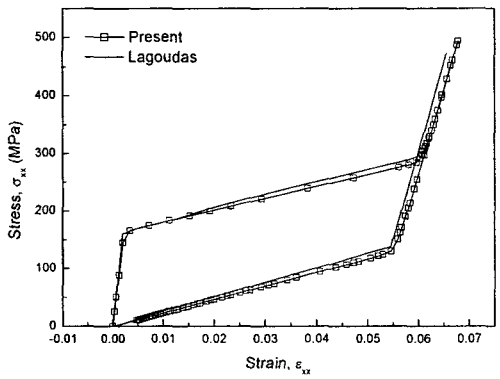


Fig. 3 Hysteresis of axis stress versus axial strain.

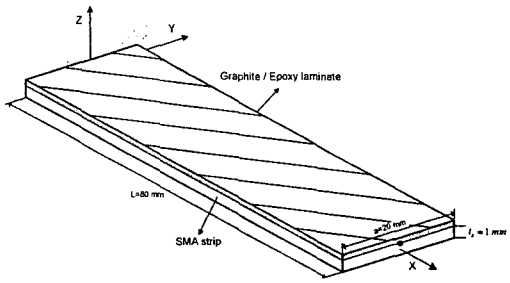


Fig. 4 FEM model of the composite structure with SMA strip.

3. SMA strip 작동기의 응용

SMA strip 작동기와 복합재료 구조물과의 상호 연계 해석을 위하여 Fig. 4의 모델을 이용하여 수치적인 해석을 수행하였다. 복합재료 구조물은 graphite/epoxy laminate를 이용하여 $[0_2^o/90_2^o]_s$와 같이 적층하였으며, 4-node quadrilateral element를 이용하여 10×4 mesh로 모델링 하였다. 또한, SMA strip 작동기는 9-node brick element를 이용하여 $10 \times 4 \times 1$ mesh로 모델링 하였으며 참고문헌 [5]의 SMA 물성치를 이용하였다. Fig. 5는 SMA strip의 x-방향의 초기 변형률에 의한, 온도 변화에 따른 구조물의 변형 특성을 보여주고 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 3% 초기 변형률에서는 SMA strip 작동기를 이용하여 복합재료 구조물의 큰 변형을

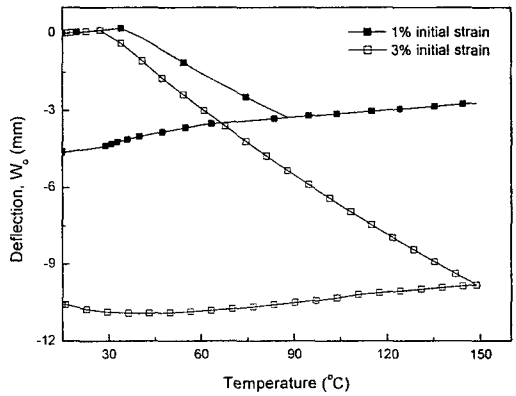
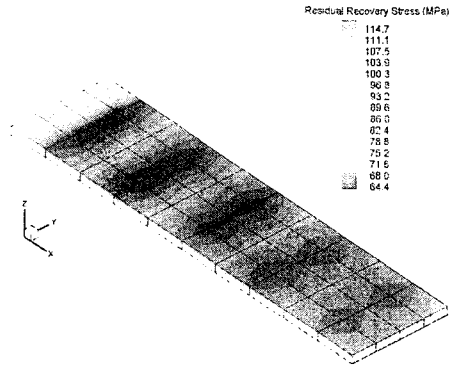
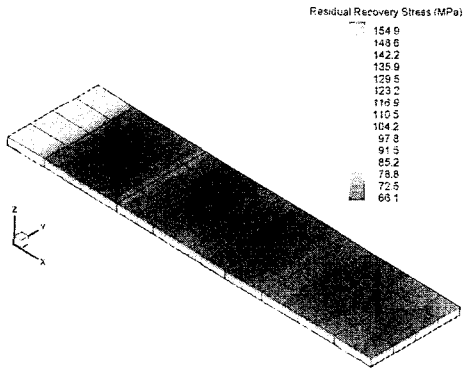


Fig. 5 Vertical deflection with temperature cycle on SMA strip.



(a) 1% initial strain



(b) 3% initial strain

Fig. 6 Distribution of residual recovery stress at the end of temperature cycle.

얻을 수 있다. 하지만, 온도가 회복된 후에도 복합재료 구조물의 변형이 초기 상태로 되돌아가지 못하고 변형후의 상태를 유지함을 알 수 있다. 이것은 SMA strip에 상당한 잔류 복원 응력이 존재하게 되고 복합재료 구조물의 탄성력으로 SMA 작동기를 초기 상태로 회복시킬 수 없기 때문이다. Fig. 6은 SMA strip 작동기의 초기 변형률에 따른 잔류 복원력을 나타내 주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는, Lagoudas 모델을 이용하여 3-D SMA 구성방정식의 해석 알고리즘을 개발하였으며, ABAQUS subroutine UMAT에 해석 알고리즘을 적용하여 SMA strip 작동기와 복합재료 구조물이 연계된 열-기계적 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. SMA strip 작동기는 복합재료 구조물의 형상을 제어할 만한 충분한 작동력을 발생하지만, OWSME (One-Way Shape Memory Effect) 특성을 가지는 SMA 작동기를 이용하여 복합재료 구조물의 반복적인 형상 제어 수행에는 어려움이 존재하였다. 따라서, 반복적인 적응 구조물의 개발을 위해서 TWSME (Two-Way Shape Memory Effect) 특성을 가지는 SMA 작동기의 개발과 주(host) 구조물과의 연계 해석이 필수적이라 할 수 있다.

후 기

이 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구사업(스마트무인기기술개발)과 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Roh, J. H. and Kim, J. H. "Adaptability of Hybrid Smart Composite Plate under Low Velocity Impact," *Composite Part B: engineering*, Vol. 34, 2003, pp. 117-125.

[2] Lee. I, Roh, J. H. and Oh, I. K. "Aerothermoelastic Phenomena of Aerospace and Composite Structures," *Journal of Thermal Stress*, Vol. 26, No. 6, 2003, pp. 525-546.

[3] Marfia, S., Sacco, E. and Reddy, J. N. "Superelastic and Shape Memory Effect in Laminated Shape-Memory-Alloy Beams," *AIAA Journal*, Vol. 41, No. 1, 2003, pp. 100-109.

[4] Singh, K., Sirohi, J. and Chopra, I. "An Improved Shape Memory Alloy Actuator for Rotor Blade Tracking," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, 2003, pp. 767-786.

[5] Qidwai, M. A. and Lagoudas, D. C. "Numerical Implementation of a Shape Memory Alloy Thermomechanical Constitutive Model using Return Mapping Algorithms," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 47, 2000, pp. 1123-1168.