

## 論文

## 형상기억합금 스트립 작동기를 이용한 구조물의 형상 변형 해석

노진호\*, 한재홍\*, 이 인\*

## Deformation Analysis of the Structures with SMA Strip Actuator

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

## ABSTRACT

In this research, the thermomechanical responses of shape memory alloy(SMA) actuators and their applications in the structures combining strip SMA actuators are investigated. The numerical algorithm of the 3-D SMA thermomechanical constitutive equations based on Lagoudas model is developed using user material(UMAT) subroutine written by FORTRAN. For the numerical results, the ABAQUS finite element program has been utilized with UMAT subroutine of the numerical algorithm of SMAs. The interactions between the host structure and SMA strip actuator are numerically investigated.

## 초 록

본 연구에서는 형상기억합금 작동기의 열-기계적 특성과 구조물의 응용을 살펴보았다. Lagoudas 모델을 기본으로 3-D 형상기억합금의 구성방정식을 FORTRAN으로 해석 알고리즘을 만들어 user material(UMAT) subroutine을 개발하였다. 개발된 형상기억합금 해석 UMAT subroutine을 상용 프로그램 ABAQUS와 연계 해석하여 형상기억합금 작동기와 주 구조물간의 상호 특성을 수치적으로 살펴보았다.

**Key Words** : Thermomechanical Responses(열-기계적 특성), Shape Memory Alloy(형상기억합금), Lagoudas model, User Material(UMAT) Subroutine, ABAQUS

## 1. 서 론

최근 재료 공학의 발달과 더불어 구조물의 성능 향상을 위해, 외부 환경 변화를 감지(sense)하고 능동적으로 적응하는 스마트 구조물 개발이 많이 연구되어지고 있다. 감지기 또는 작동기로써 스마트 구조물에 적용되는 재료들로는 광섬유(optical fibers), 압전(piezoelectirc) 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 점성(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 et al.[2] 그리고 Roh et al.[3]는 형상기억합금을 복합재료 구조물에 삽입시킨 SMAHC(Shape Memory Alloy Hybrid Composite) 구조물의 열-기계적

† 2005년 7월 29일 접수 ~ 2005년 9월 20일 심사완료

\* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과  
연락처, E-mail : inlee@kaist.ac.kr  
대전광역시 유성구 구성동 373-1

특성을 유한요소법(FEM)을 이용하여 연구하였다. 수치적인 결과를 통하여, 형상기억합금 작동기가 구조물의 강성을 향상시키고 열적 하중에 의한 구조물의 좌굴 변형을 감소시킴을 보여주었다. 또한, Marfia, Sacco, 그리고 Reddy[4]는 형상기억합금이 삽입된 복합재료 빔(beam)을 수치적으로 모델링 하였고, 형상기억합금의 온도를 변화시켜 빔 구조물의 형상 변형을 효과적으로 제어하였다. 1995년에 수행된 Smart Wing Program에서는 양력과 회전 모멘트를 향상시키기 위해 날개 단면적의 형상변형을 목적으로 SMA torque tube를 응용 연구하였다[5]. 그리고 Singh, Sirohi 그리고 Chopra[6]는 헬리콥터 로터 (rotor)의 진동을 감소시키기 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 기본으로 3-D 형상기억합금의 구성방정식을 FORTRAN으로 해석 알고리즘을 만들어 user material(UMAT) subroutine을 개발하였다. 개발된 형상기억합금 해석 UMAT subroutine을 상용 프로그램 ABAQUS와 연계 해석하여 의탄성(pseudoelastic) 또는 형상기억효과(shape memory effect)와 같은 형상기억합금의 독특한 특성을 연구하였다. 또한, SMA strip 작동기와 주 구조물을 연계 해석하여 온도 변화에 따른 구조물의 형상변형 특성을 수치적으로 해석하였다.

## II. 본 론

### 2. SMA 수치 해석 알고리즘

형상기억합금의 열-기계적 특성의 수치적인 해석을 위하여 Lagoudas 모델[7]을 바탕으로 3-D 형상기억합금 구성 방정식을 다음과 같이 전개하였다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = S_{ijkl} \dot{\sigma}_{kl} + \alpha_{ij} \dot{T} + Q_{ij} \dot{\xi} \quad (1)$$

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,  $\dot{\epsilon}_{ij}^i$ 의 관계를 나타내는 상 변형 방정식을 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = A_{ij} \dot{\xi} \quad (2)$$

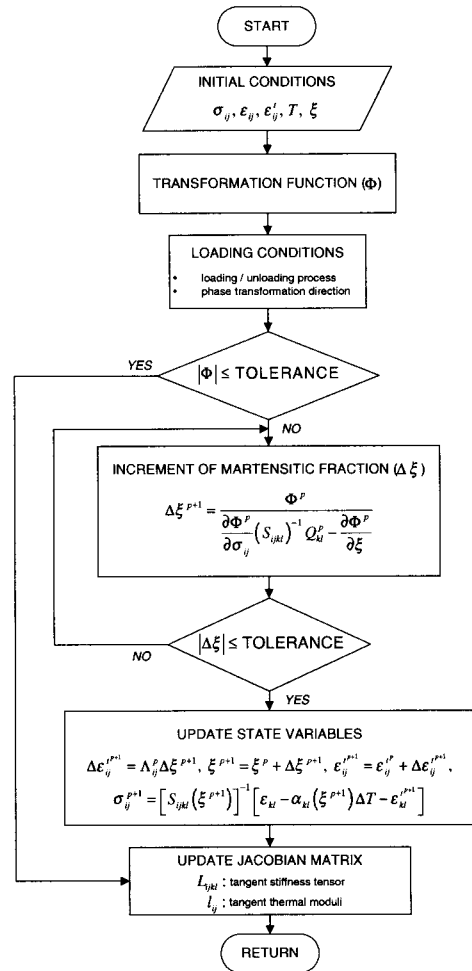
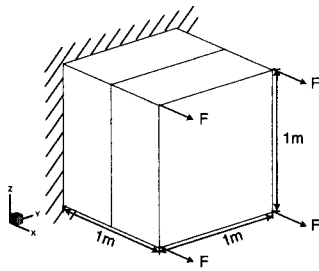


Fig. 1. Algorithm of the SMA constitutive equation for the ABAQUS user subroutine

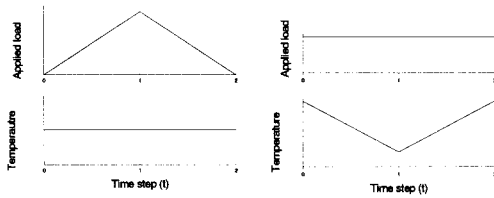
또한, 형상기억합금의 상 변형을 결정하는 변형 함수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &\geq 0, \Phi(\sigma, T, \xi) \leq 0, \Phi \dot{\xi} = 0 \\ \dot{\xi} &\leq 0, \Phi(\sigma, T, \xi) \leq 0, \Phi \dot{\xi} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\Phi$ 는 상 변형을 결정해 주는 판별식으로서,  $\Phi < 0$ 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 일어난다.



(a) FEM model of SMA



(b) Loading history A      Loading history B

Fig. 2. FEM model and loading histories

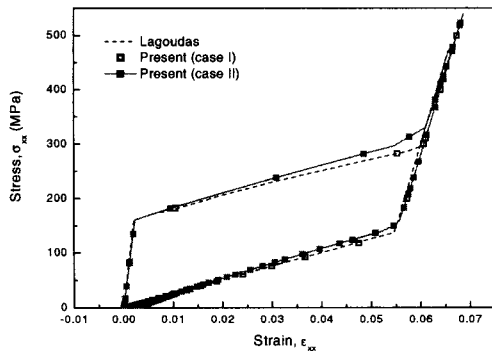


Fig. 3. Hysteresis of stress and strain

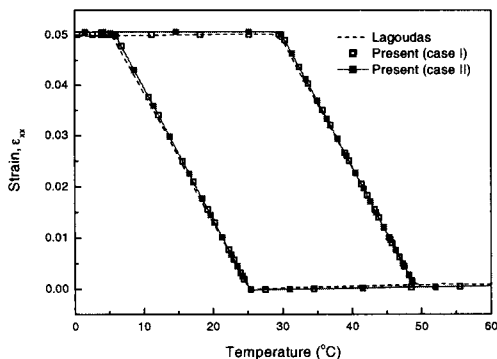


Fig. 4. Hysteresis of axial strain with temperature cycle

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 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.

$$\dot{\sigma} = L_{ijkl}\dot{\epsilon} + l_{ij}\dot{T} \quad (4)$$

식(1)-(4)에 필요한 자세한 변수들은 참고문헌 [7]에 상세히 설명되어 있다. SMA 구성방정식의 수치적인 해석 알고리즘을 Fig. 1에 나타내었고 이것을 바탕으로 FORTRAN으로 해석 알고리즘을 만들어 user material(UMAT) subroutine을 개발하였다. 개발된 형상기억합금 해석 UMAT subroutine을 상용 프로그램 ABAQUS와 연계 해석하여 SMA의 열-기계적 특성을 수치적으로 해석하였다. 본 연구에서 개발한 SMA 해석 알고리즘을 검증하기 위하여 Fig. 2의 모델을 이용하여 Lagoudas[7]의 결과와 비교하였다 (Fig. 3 and 4). SMA의 물성치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E^A &= 70 \text{ GPa}, E^M = 30 \text{ GPa}, \nu^A = \nu^M = 0.3, \\ \alpha^A &= 22 \mu\text{/K}, \alpha^M = 10 \mu\text{/K}, H = 0.05, \\ A^f &= 315 \text{ K}, A^s = 295 \text{ K}, \\ M^s &= 291 \text{ K}, M^f = 271 \text{ K} \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 2(a)에서 해석모델은 2개의 incompatible 8-node brick 요소를 사용하였다. Fig. 2(b)에서의 Loading history A와 B에 대한 결과를 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 본 해석에서는 각각 다른 경계조건 case I과 II를 적용하여 Lagoudas 결과와 비교하였다. 경계조건 case I은 응력  $\sigma_{xx}$ 을 제외한 나머지 응력이 모두 0이 되도록 만드는 조건이고 이것은 Lagoudas가 제안한 경계조건과 일치한다. 하지만 이것은 3-D SMA 모델을 1-D 모델로 축소시키는 결과이므로 경계조건에 의한 SMA의 3-D 효과를 정확히 관찰할 수 없다. 따라서 cantilevered 경계 조건( $u = v = w = 0, \text{ at } X = 0$ ), case II를 적용하여 비교 하였다. Fig. 3 그리고 4에서 볼 수 있듯이 본연구에서 개발된 SMA 해석 알고리즘 결과와 Lagoudas 결과가 잘 일치함을 알 수 있으며, 경계조건이 case II인 경우에는 약간의 차이가 있음을 관찰 할 수 있다.

### 3. SMA strip 작동기의 응용

SMA strip 작동기와 구조물과의 상호 연계 해석을 위하여 Fig. 5의 모델을 이용하여 수치적인 해석을 수행하였다. SMA 작동기는 주 구조물에 부착이 되어 형상을 변화시키는데 필요한 굽힘을 발생시키는데 사용된다. 주 구조물은 다음과 같은 알루미늄으로 만들어져 있다.

$$E = 69 \text{ GPa}, \nu = 0.3, \alpha = 23.6 \mu / \text{K} \quad (6)$$

수치적인 해석을 위하여 다음과 같은 가정을 사용하였다. i) SMA strip 작동기는 주 구조물인 알루미늄에 완전히 부착되어져 있다. ii) SMA strip 작동기는 전기 저항 열에 의해 작동되어진다. iii) 알루미늄 주 구조물은 SMA strip으로부터 열적으로 절연되어져 있다. 알루미늄 빔과 SMA strip은 각각  $10 \times 2 \times 1$  incompatible 8-node brick 요소로 모델링 되었다. 오스테나이트 시작 온도( $A^*$ ) 이상으로 온도가 올라감에 따라 X축 방향으로 초기 변형률을 가진 SMA strip 작동기는 복원력에 의한 굽힘 때문에 구조물 형상이 변화하게 된다. Fig. 6은 각각 다른 초기 변형률에 따라 온도 변화에 의한 구조물의 끝단 처짐을 보여주고 있다. SMA의 초기 변형률이 커짐에 따라 더 큰 변형을 일으킴을 알 수 있다. 잔류 변형률이 5%인 경우에 상대적으로 다른 초기 변형률에 비하여 낮은 온도에서 구조물의 변형이 일어나게 되는데 이것은 SMA의 잔류 변형률이 커질수록 낮은 온도 영역에서 복원력을 발생하기 때문이다. 초기 변형률이 1%인 경우, 온도가  $130^\circ\text{C}$  이상에서 구조물의 변형이 일정해 짐을 알 수 있는데 이것은 이 온도 이상에 SMA의 상이 오스테나이트 상태로 완전히 변화되었기 때문이다.

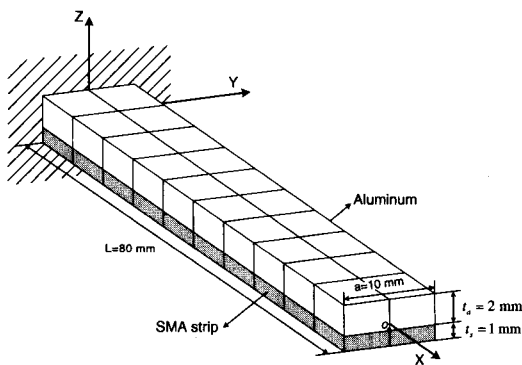


Fig. 5. FEM model of the beam structure with SMA strip

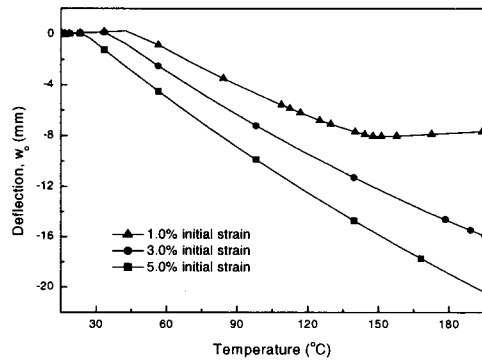


Fig. 6. Vertical tip deflection versus temperature variation

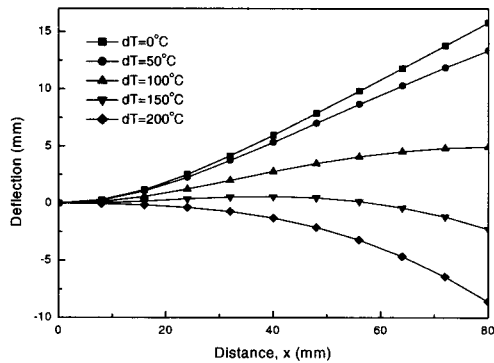


Fig. 7. The deflection under uniform load and different temperature increment

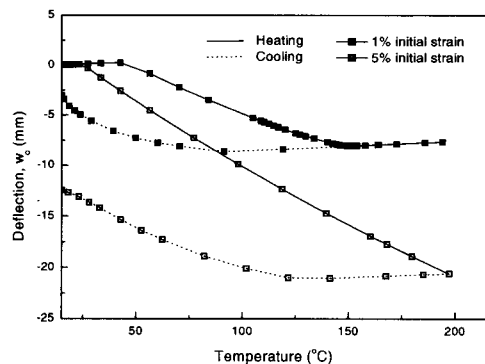


Fig. 8. Vertical deflection with temperature cycle on SMA strip

SMA strip 작동기가 얼마나 큰 복원력을 가지고 외부 하중에 저항하는지 살펴보기 위하여 Z축 방향의 균일한 외부 분포 하중,  $P = 300,000 \text{ N/m}^2$  이 가해진 상태에서 SMA strip의 작동 특성을

살펴보았다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 매우 큰 외부 하중이 가해지는 조건에서도 온도를 증가시키기에 따라 비교적 큰 변형을 유발시키기를 알 수 있었다. SMA 작동기를 이용하여 반복적인 형상적응구조물(shape adaptive structures)을 개발하기 위해서는 온도 작동 사이클(cycle)에 따른 SMA strip 작동기와 주 구조물의 상호영향을 살펴보아야 한다. Fig. 8은 SMA strip이 각각 1% 그리고 5%의 초기 변형률을 가진 상태에서 온도 사이클에 따른 구조물 변형의 이력(hysteresis) 특성을 살펴보았다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 온도가 증가함에 따라 매우 큰 변형을 유발시키지만, 다시 온도가 초기의 상태로 내려감에 따라 구조물이 초기 상태로 되돌아가지 못하고 잔류 변형이 생김을 알 수 있다. 온도 사이클이 끝난 후 SMA strip의 내부 상태를 살펴보기 위하여 잔류 복원 응력과 마르텐사이트 량 분포(distribution)를 각각 Fig. 9와 10에서 살펴보았다. SMA strip이 탄성 구조물과 연계(coupled) 되어져 있어도 SMA

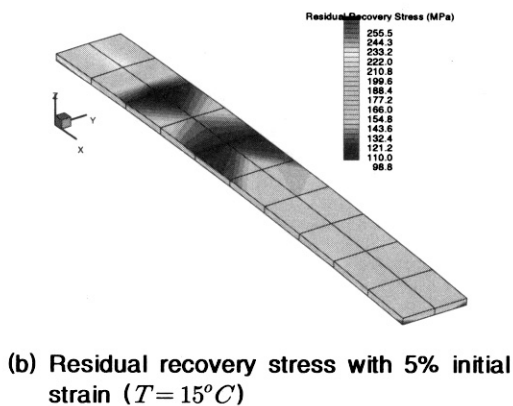
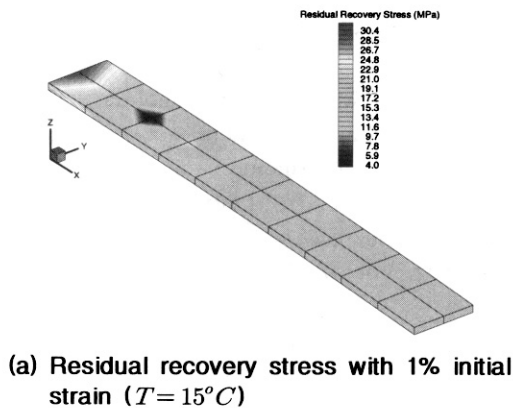


Fig. 9. Distribution of residual recovery stress at the end of temperature cycle

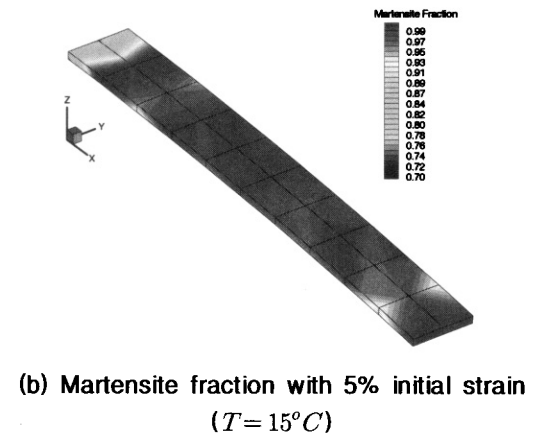
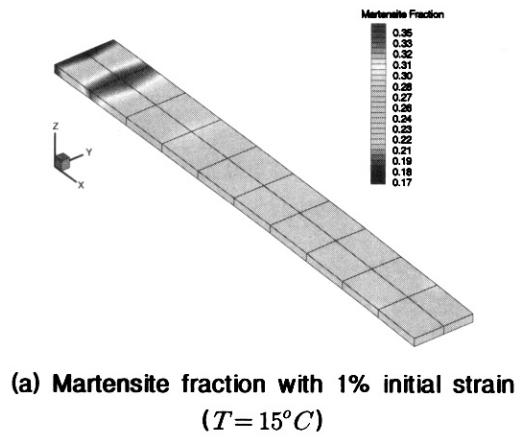


Fig. 10. Distribution of martensite fraction of SMA strip at the end of temperature cycle

strip 작동기에 잔류 복원응력이 생기는 것을 알 수 있다(Fig. 9). 또한, Fig. 10에서 초기 변형률이 1%인 경우 온도 사이클이 끝난 후 일부 영역에서 마르텐사이트 량이 초기 값 0.2를 초과하는 값을 보여주고 있다. 따라서 이런 SMA strip 작동기의 잔류 복원응력 및 마르텐사이트 량의 변화 등은 OWSME (One-Way Shape Memory Effect) 특성을 가지는 SMA 작동기를 반복적인 형상적응구조물에 적용하는데 매우 큰 단점으로 작용 하며 좀더 정확한 변형 형상을 가지는 구조적 작동기를 개발하기 위해서는 주 구조물과 SMA 작동기의 연계 그리고 상호영향 해석은 매우 필수적이라 할 수 있다.

### III. 결 론

본 연구에서는, Lagoudas 모델을 기본으로 3-D

형상기억합금의 구성방정식을 FORTRAN으로 해석 알고리즘을 만들어 user material(UMAT) subroutine을 개발하였다. 개발된 형상기억합금 해석 UMAT subroutine을 상용프로그램 ABAQUS와 연계 해석하여 SMA strip 작동기와 탄성 구조물이 연계된 열-기계적 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. SMA strip 작동기는 구조물의 형상을 제어할 만한 충분한 작동력을 발생하지만, OWSME(One-Way Shape Memory Effect) 특성을 가지는 SMA 작동기를 이용하여 탄성 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 구조물과의 연계 그리고 상호영향 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) Roh, J. H., Oh, I. K., Yang, S. M., Han, J. H., and Lee, I., "Thermal Post-buckling Analysis of Shape Memory Alloy Hybrid Composite Shell Panels", *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, 2004, pp. 1337-1344.
- 4) 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.
- 5) Kudva, J. N., "Overview of the DARPA Smart Wing Project", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15, 2004, pp. 261-267.
- 6) 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.
- 7) 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.