

## 論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.39.1.9

## 변형률 속도에 따른 형상기억합금 초탄성 거동의 실험 및 해석 연구

노진호\*, 박정인\*, 이수용\*

## Experimental and Numerical Analysis for Superelastic Behaviors of SMAs with Strain-rate Dependence

Jin-Ho Roh\*, Jeong-In Park\* and Soo-Yong Lee\*

## ABSTRACT

The influence of the strain-rate on the superelastic behaviors of shape memory alloys (SMAs) wires is experimentally and numerically investigated. The one-dimensional SMA constitutive equations considering strain-rate effect is developed. The evolution of stress-strain curves of SMA wires is examined with various strain-rates. Results show that the superelastic behaviors of SMAs may significantly be changed depending on the variation of strain-rate.

## 초 록

변형률-속도에 따른 형상기억합금의 초탄성 거동 특성 변화를 실험적 그리고 수치적으로 살펴보았다. 변형률-속도를 고려한 형상기억합금의 수학 모델을 유도하였고, 형상기억합금의 실험결과를 바탕으로 변형률 속도에 따른 형상기억합금의 열-기계적 특성변화를 관찰하였다. 변형률-속도의 변화에 따라 형상기억합금 시편의 급격한 온도변화가 일어남을 확인하였고 이런 현상이 초탄성 거동 특성 변화에 큰 영향을 미침을 예측할 수 있었다.

**Key Words** : Superelastic Behaviors(초탄성 거동), Shape Memory Alloys(형상기억합금), Strain-rate(변형률-속도)

## 1. 서 론

형상기억합금(SMAs)은 비교적 최근에 많은 응용 연구가 수행되어지고 있는 스마트 재료로서, 하중 및 온도 변화에 따라 기계적 성질이 변하는 재료로 정의될 수 있다. 형상기억효과(shape memory effect)와 초탄성(superelasticity) 거동 특성을 가지는 형상기억합금은 큰 힘과 변형을 일으키고 외부 하중과 온도에 따라, 기하학적 형상, 재료의 강성 및 감쇠(damping) 특성의 변화

때문에 구조물의 형상[1] 및 진동[2, 3] 제어를 위한 많은 응용 연구가 수행되고 있다.

형상기억합금의 초탄성 이력(hysteresis) 선도는 매우 큰 손실(dissipation) 에너지 특성을 가지고 있어, 기계구조 시스템의 불필요한 진동을 감쇠시키는데 유용하게 적용될 수 있다[4]. 진동 에너지를 소산시킬 수 있는 형상기억합금의 열-기계적 특성은 매우 흥미롭지만, 복잡한 현상을 보여주고 있어 정확한 열-기계적 특성을 예측할 수 있는 형상기억합금의 수학적 모델의 개발이 필요하다. 이미 많은 연구자들에 의해 형상기억합금의 여러 해석모델이 제시되었다. 하지만, 대부분의 모델이 준정적(quasi-static) 하중이 가해질 때의 열-기계적 특성을 고려할 뿐, 형상기억합금의 변형 및 외부 하중에 따라 발생하는 열을

† 2010년 7월 23일 접수 ~ 2010년 11월 25일 심사완료

\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
교신저자, E-mail : jinhoroh@kau.ac.kr  
경기도 고양시 화전동 항공대길 100

무시하고 있다. 외부에서 가해지는 변형률-속도 (strain-rate)에 따라 형상기억합금의 온도 변화가 발생되고, 이는 형상기억합금의 열-기계적 특성에 큰 영향을 미치게 된다. Mukherjee et al. [5]은 변형률-속도에 따른 형상기억합금의 온도변화 관계를 실험적으로 관찰하였고, Entemeyer et al. [6]은 변형률-속도에 따라 온도변화 방정식과 형상기억합금 상변화 방정식과의 연계과정을 통하여 새로운 수학적모형을 제시었고, 실험을 통한 변형률-속도에 따른 형상기억합금의 초탄성 거동 특성 변화를 살펴보았다. Tobushi et al. [7]은 형상기억합금의 피로파괴 현상이 변형률-속도와 주위 온도에 따라 크게 변함을 관찰하였다. 형상기억합금의 열-기계적 특성은 온도 변화에 매우 크게 의존하기 때문에, 변형률-속도에 따른 온도 변화 효과를 고려할 수 있는 형상기억합금의 해석모형 개발은 구조물의 진동제어를 위한 작동기 및 감쇠기의 응용 연구를 위해서 매우 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는, 변형률-속도에 따른 형상기억합금의 열-기계적 특성 변화를 실험적 그리고 수치적으로 살펴보았다. 마르텐사이트 변화량과 온도 변화사이의 연성된 열역학적 방정식을 이용, 변형률-속도에 따른 형상기억합금의 구성방정식을 유도하여 수학적 모델을 제시하였다. 실험 연구를 통하여 변형률-속도에 따른 형상기억합금의 열-기계적 특성 변화를 살펴보았다. 실험 결과분석을 통하여 개발된 형상기억합금의 해석 모델에 적용하였고 변형률 속도에 따른 형상기억합금의 초탄성 거동 및 온도 변화 이력특성을 살펴보았다.

## II. 본 론

### 2.1 SMA 수치 해석 알고리즘

형상기억합금 구성방정식에 변형률-속도 (strain-rate)에 따른 온도변화 효과를 고려하기 위하여 열역학 에너지식을 분석하고, 변형률과 온도변화 관계식을 유도 하였다. 형상기억합금의 상변화 관계식이 비교적 간단한 모델을 이용하여 변형률-속도를 고려한 기존의 연구결과가 있지만 [8, 9], 형상기억합금의 상변형 조건을 보다 자세히 살펴보기 위하여 Brinson 모델[10]에서 유도된 형상기억합금 선(wire)의 기본 모델을 바탕으로 변형률-속도를 고려한 i) 구성방정식 (Eq. 1), ii) 온도 변화방정식 (Eq. 2), 그리고 iii) 형상기억합금의 내부 상변화 방정식(Eq. 3)을 유도 하였다.

$$\dot{\sigma} = E(\xi)\dot{\epsilon} + \Omega(\epsilon, \xi)\dot{\xi} + \theta \dot{T} \quad (1)$$

$$\dot{T} = \frac{1}{\rho_o c_p} \left[ \sigma \dot{\epsilon}_i + \frac{E_a - E_m}{2} \dot{\epsilon}_{ci} + \rho_o L \right] \dot{\xi} - \frac{\kappa}{\rho_o c_p V} (T - T_o) \quad (2)$$

오스테나이트(austenite)에서 마르텐사이트(martensite)로의 상변화,

for  $T > M_s$  and

$$\sigma_s^{cr} + C_M(T - M_s) < \sigma < \sigma_f^{cr} + C_M(T - M_s)$$

$$\dot{\xi} = -\frac{1 - \xi_o}{2} \sin \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_s)] \right\} \dots \quad (3a)$$

$$\cdot \left( \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \dot{\sigma} - \frac{\pi C_M}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \dot{T} \right)$$

마르텐사이트에서 오스테나이트로의 상변화,

for  $T > A_s$  and  $C_A(T - A_f) < \sigma < C_A(T - A_s)$

$$\dot{\xi} = -\frac{\xi_o}{2} \sin \left[ a_A \left( T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] \cdot \left( a_A \dot{T} - \frac{a_A}{C_A} \dot{\sigma} \right) \quad (3b)$$

여기서,  $E$ : 형상기억합금의 탄성계수,  $\Omega$ : 최대 잔류 변형률,  $\theta$ : 열팽창에 따른 응력 계수,  $\rho_o$ : 밀도,  $C_p$ : 비열,  $L$ : 상변화가 일어날 때의 잠열,  $\kappa$ : 열전달 계수,  $V$ : 형상기억합금 시편의 부피를 나타낸다.  $M_s, M_f, A_s$  그리고  $A_f$ 는 각각의 상변화 온도를,  $\sigma_s^{cr}$ 와  $\sigma_f^{cr}$ 는 상변화가 일어나는 임계 응력, 그리고  $C_M$ 와  $C_A$ 는 상변화가 일어날 때의 온도와 임계응력과의 기울기를 나타낸다.  $\xi$ 는 형상기억합금의 상변화를 나타내는 물리량으로서 그 값은  $0 \leq \xi \leq 1$ 을 가진다. 자세한 형상기억합금의 열-기계적 상수에 대한 설명은 참고문헌[10]에 자세히 기술되어 있다. Eqs. (1)-(3)을 연립하면, 시간에 따른 응력, 온도, 그리고 형상기억합금의 내부 상변화 방정식을 정리 할 수 있다. 오스테나이트에서 마르텐사이트로의 상변형이 일어날 경우,

$$\dot{\sigma} = \frac{C_1 - C_1 C_4 C_7}{1 - C_2 C_6 - C_3 C_4 C_6 - C_4 C_7} \dot{\epsilon} \dots \quad (4)$$

$$+ \frac{C_3 C_5 + C_2 C_5 C_7}{1 - C_2 C_6 - C_3 C_4 C_6 - C_4 C_7}$$

$$\dot{T} = \frac{C_1 C_4 C_6}{1 - C_2 C_6 - C_3 C_4 C_6 - C_4 C_7} \dot{\epsilon} \dots \quad (5)$$

$$+ \frac{C_5 - C_2 C_5 C_6}{1 - C_2 C_6 - C_3 C_4 C_6 - C_4 C_7}$$

$$\dot{\xi} = \frac{C_1 C_6}{1 - C_2 C_6 - C_3 C_4 C_6 - C_4 C_7} \dot{\epsilon} \dots \quad (6)$$

$$+ \frac{C_3 C_5 C_6 - C_5 C_7}{1 - C_2 C_6 - C_3 C_4 C_6 - C_4 C_7}$$

그리고 마르텐사이트에서 오스테나이트로의 상변형이 일어날 경우는 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$\dot{\sigma} = \frac{C_1 - C_1 C_4 C_9}{1 - C_2 C_8 - C_3 C_4 C_8 - C_4 C_9} \dot{\epsilon} \dots + \frac{C_3 C_5 + C_2 C_5 C_9}{1 - C_2 C_8 - C_3 C_4 C_8 - C_4 C_9} \dot{\epsilon} \dots \quad (7)$$

$$\dot{T} = \frac{C_1 C_4 C_8}{1 - C_2 C_8 - C_3 C_4 C_8 - C_4 C_9} \dot{\epsilon} \dots + \frac{C_5 - C_2 C_5 C_8}{1 - C_2 C_8 - C_3 C_4 C_8 - C_4 C_9} \dot{\epsilon} \dots \quad (8)$$

$$\dot{\xi} = \frac{C_1 C_8}{1 - C_2 C_8 - C_3 C_4 C_8 - C_4 C_9} \dot{\epsilon} \dots + \frac{C_3 C_5 C_8 - C_5 C_9}{1 - C_2 C_8 - C_3 C_4 C_8 - C_4 C_9} \dot{\epsilon} \dots \quad (9)$$

여기서 각각의 상수들은 아래와 같이 표현된다.

$$C_1 \equiv E(\xi), \quad C_2 \equiv \Omega(\epsilon, \xi), \quad C_3 \equiv \theta, \quad (10a)$$

$$C_4 \equiv \frac{1}{\rho_o c_p} \left[ \sigma \epsilon_l + \frac{E_a - E_m}{2} \epsilon_{cl}^2 + \rho_o L \right], \quad (10b)$$

$$C_5 \equiv - \frac{\kappa}{\rho_o c_p V} (T - T_o), \quad (10c)$$

$$C_6 \equiv - \frac{1 - \xi_o}{2} \sin \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \left[ \sigma - \sigma_f^{cr} - C_M (T - M_s) \right] \right\} \dots \cdot \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \quad (10d)$$

$$C_7 \equiv \frac{1 - \xi_o}{2} \sin \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \left[ \sigma - \sigma_f^{cr} - C_M (T - M_s) \right] \right\} \dots \cdot \frac{\pi C_M}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \quad (10e)$$

$$C_8 \equiv \frac{\xi_o}{2} \sin \left[ a_A \left( T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] \cdot \frac{a_A}{C_A}, \quad (10f)$$

$$C_9 \equiv - \frac{\xi_o}{2} \sin \left[ a_A \left( T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] \cdot a_A \quad (10g)$$

따라서, 응력, 온도 그리고 마르텐사이트의 시간에 따른 변화량을 아래와 같은 함수로 표현할 수 있다.

$$\dot{\sigma} = F_1(\sigma, T, \xi, \epsilon, \dot{\epsilon}) \quad (11)$$

$$\dot{T} = F_2(\sigma, T, \xi, \epsilon, \dot{\epsilon}) \quad (12)$$

$$\dot{\xi} = F_3(\sigma, T, \xi, \epsilon, \dot{\epsilon}) \quad (13)$$

Eqs. 11-13의 해를 구하기 위하여 Fourth-Order Runge-Kutta Method를 이용하여 변형률-속도에 따른 응력, 온도 그리고 상변화 값을 얻을 수 있다.

## 2.2 변형률 효과에 따른 형상기억합금의 열-기계적 특성 변화

변형률을 고려한 형상기억합금의 열-기계적 특성을 실험적으로 관찰하기 위하여 MEMRY GmbH (www.memry.com)에서 Alloy S를 구입하였다. Alloy S 제품은 상온에서 초탄성거동 특성을 갖는 제품으로 지름은 약 2.31mm가 된다. 실온에서 15 cycles로 loading-unloading을 반복하여 인장시험을 수행하였고 안정된 응력-변형률 이력 선도를 얻은 후 형상기억합금의 해석 모델링에 필요한 각각의 파라미터를 Fig. 1을 통하여 얻을 수 있다. 표시된 상수들은 아래 같다.

$E^A$ : 오스테나이트 상의 탄성계수,  $E^M$ : 마르텐사이트 상의 탄성계수,  $\epsilon_l$ : 최대회복 변형률,  $\sigma^{Ms}$ : 마르텐사이트 상으로 상변형이 시작되는 응력,  $\sigma^{Mf}$ : 마르텐사이트 상으로 상변형이 끝나는 응력,  $\sigma^{As}$ : 오스테나이트 상으로 상변형이 시작되는 응력,  $\sigma^{Af}$ : 오스테나이트 상으로 상변형이 끝나는 응력.

안정화된(trained) 시편을 이용하여, 외부 온도가 각각,  $25^\circ C$ ,  $30^\circ C$ ,  $40^\circ C$ , 그리고  $50^\circ C$  에서의 응력-변형률 선도들을 관찰하였다. 외부 온도변화에 따른 각각의 상 변형 시작 또는 끝나는 응력 값을 측정하였고, 온도에 따른 형상기억합금의 응력-변형률 선도를 관찰하였다. Fig. 2와 같

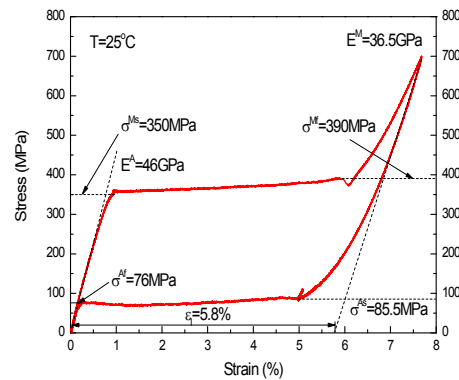


Fig. 1. Pseudoelastic loading/unloading results and derivation of parameters for various testing

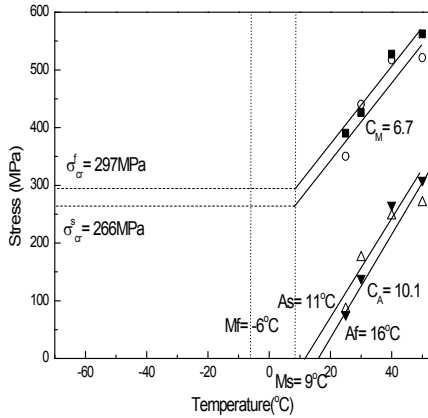


Fig. 2. Critical stress for transformation as function of temperature

이 형상기억합금의 상변형이 시작 또는 끝나게 되는 응력( $\sigma^{Ms}$ ,  $\sigma^{Mf}$ ,  $\sigma^{As}$ ,  $\sigma^{Af}$ )을 온도에 대한 함수로 나타낼 수 있으며, 열물성치 측정 장비를 이용하여 형상기억합금의 종합적인 열-기계적 물성치를 Table 1과 같이 정리하였다.

개발된 형상기억합금 해석 모델에 기초하여, 실험을 통한 형상기억합금 선의 열-기계적 물성치를 이용하여 해석 결과와 시험결과를 비교하였

Table 1. Thermomechanical properties of SMA wire

Moduli	$E_A = 46 GPa$ $E_M = 36.5 GPa$ $\theta = 0.0 MPa/^\circ C$
Transformation Constants	$C_M = 6.7 MPa/^\circ C$ $C_A = 10.1 MPa/^\circ C$ $\sigma_{cr}^s = 266 MPa$ $\sigma_{cr}^f = 297 MPa$
Transformation Temperature	$M_f = -6^\circ C$ $M_s = 9^\circ C$ $A_s = 11^\circ C$ $A_f = 16^\circ C$
Maximum Residual Strain	$\epsilon_l = 0.058$
Thermodynamic Constants	$C_p = 2667 J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ $L = 24200 J kg^{-1}$ $\kappa = 0.042 W ^\circ C^{-1}$
Density	$\rho_o = 6465 kg m^{-3}$

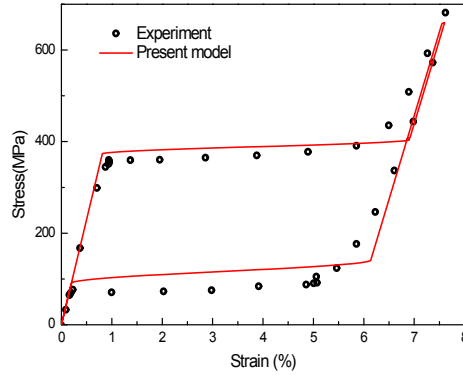


Fig. 3. Superelastic behavior of SMA wire at 25°C

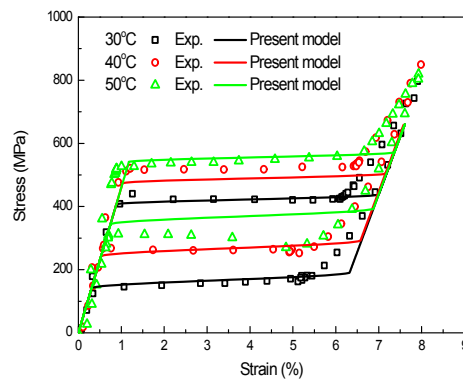


Fig. 4. Superelastic behaviors of SMA wire for various temperature

다. Fig. 3 그리고 4에서 볼 수 있듯이 온도에 따른 형상기억합금의 이력선도가 서로 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

또한, 서로 다른 변형률-속도에 따른 응력-변형률 선도를 실험적으로 살펴보았다. Fig. 5에서 볼 수

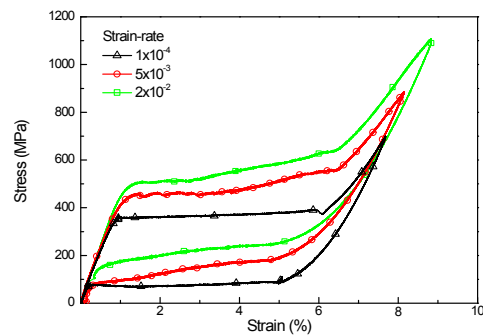


Fig. 5. Superelastic behaviors of SMA wire at various strain-rates

있듯이 변형률-속도에 따라, 응력-변형률선도의 특성이 크게 변화해 됨을 관찰할 수 있다. 특히, 상변화가 일어나게 되는 임계 응력값들 ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ ) (Fig. 6)이 크게 변화함을 알 수 있었다. 형상기억합금의 상변화의 임계값의 영향을 주는 상수값  $C_M$ 와  $C_A$ 를(Eq. 3) 변형률-속도( $a$ ),  $S_M$ , 그리고  $S_A$ 의 함수로 Eq. 14과 같이 새롭게 정의하였다.

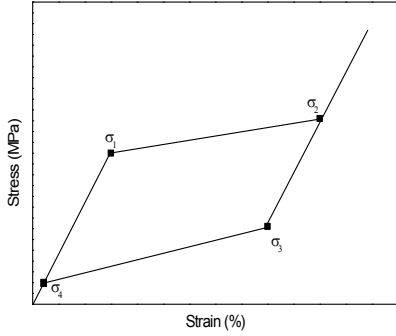


Fig. 6. Critical stresses,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3,$  and  $\sigma_4$  in superelasticity of SMAs

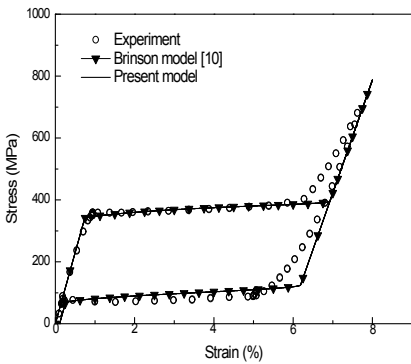


Fig. 7. Superelastic curve at strain-rate,  $1 \times 10^{-4} s^{-1}$

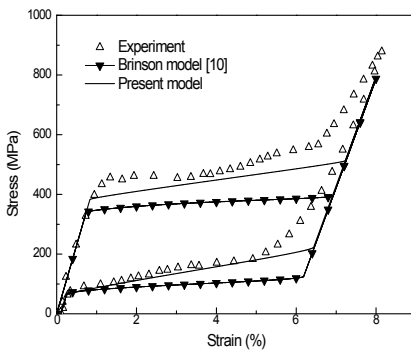


Fig. 8. Superelastic curve at strain-rate,  $5 \times 10^{-3} s^{-1}$

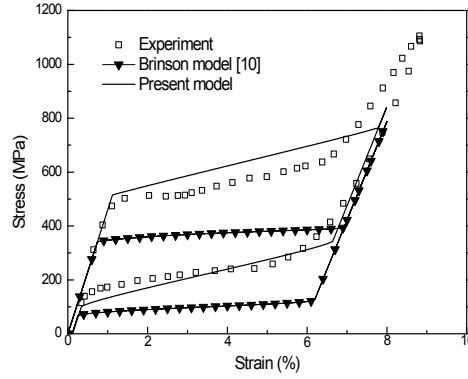


Fig. 9. Superelastic curve at strain-rate,  $2 \times 10^{-2} s^{-1}$

$$C_M = C_M + S_M \times \sin(0.05 \cdot \dot{\epsilon}) \quad (14a)$$

$$C_A = C_A + S_A \times \sin(0.05 \cdot \dot{\epsilon}) \quad (14b)$$

여기서,  $S_M$ 은 변형률-속도( $\dot{\epsilon}$ )에 따른 응력 값,  $\sigma_1$  그리고  $\sigma_2$ 의 변화의 기울기 값을 그리고  $S_A$ 는  $\sigma_3$  그리고  $\sigma_4$ 의 변화의 기울기 값을 나타내고 각각의 값은 다음과 같다.

$$S_M = 15665.4 MPa s^{-1}, S_A = 8195.6 MPa s^{-1} \quad (15)$$

Fig. 7, 8, 그리고 9는 서로 다른 변형률-속도에서의 형상기억합금의 응력-변형률 선도를 실험, Brinson 모델 그리고 본 연구에서 제시된 해석 모델 결과와 비교하였다. 본 연구에서 제시된 변형률-속도에 따른 형상기억합금의 해석 모델이 실험결과 값을 잘 예측함을 알 수 있다. 변형률-속도가  $2 \times 10^{-2} s^{-1}$  으로 매우 빠른 경우, 본 논문에서 제시된 해석 모델이 매우 효과적임을 확인할 수 있다. Fig. 10, 11, 그리고 12는 각각의 변형률-속도에 따른 형상기억합금(시편길이=125mm)의 온도 변화를 살펴보았다. 변형률-속도가  $1 \times 10^{-4} s^{-1}$ 으로 매우 작은 준정적인 경우 온도 변화는 약  $2^\circ C$ 로 작지만 변형률-속도가 커질수록 형상기억합금 시편의 온도가  $10^\circ C$  이상으로 변화함을 확인할 수 있다. 변형률-속도가  $1 \times 10^{-4} s^{-1}$ 인 경우 (Fig. 10) 온도변화가  $2^\circ C$  정도로 그 변화가 미비하여, 측정 및 수치적인 오차가 나타나는 것으로 판단되지만, 변형률-속도에 따른 전체적인 온도 변화 경향성을 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

변형률-속도가 매우 작은 준정적인 하중 상태에서는 형상기억합금의 온도 변화는 매우 작아 초탄성 거동 변화에 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

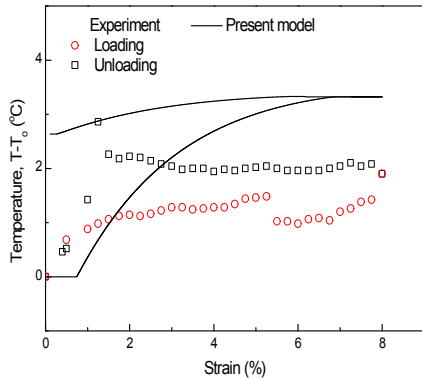


Fig. 10. Temperature variation at strain-rate,  $1 \times 10^{-4} s^{-1}$

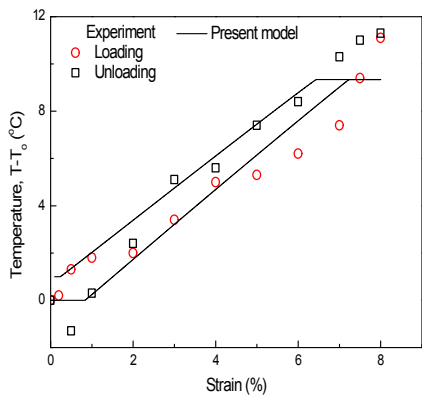


Fig. 11. Temperature variation at strain-rate,  $5 \times 10^{-3} s^{-1}$

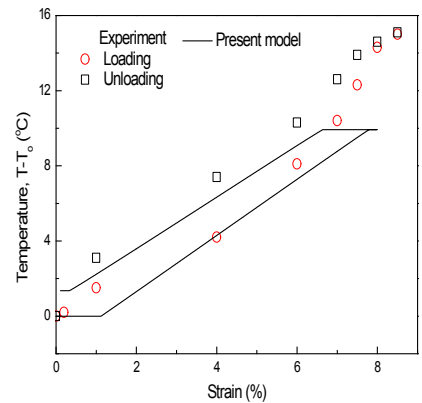


Fig. 12. Temperature variation at strain-rate,  $2 \times 10^{-2} s^{-1}$

하지만, 변형률-속도가 큰 동적인 하중을 받는 조건에서는 형상기억합금내의 온도 변화가 크게 일어나게 되며, 형상기억합금의 전체적인 초탄성

거동에 큰 영향을 미침을 예상할 수 있다. 따라서, 구조물의 진동제어를 위한 형상기억합금의 응용 연구를 위해서는 변형률-속도를 고려한 형상기억합금의 실험 연구 및 해석모델 개발의 필요성을 확인할 수 있다.

### III. 결 론

본 연구에서는, 변형률-속도에 따른 형상기억합금의 초탄성 거동 특성 변화를 실험 그리고 수치적으로 살펴보았다. 변형률 속도를 고려한 1-D 형상기억합금의 구성방정식을 유도하였고, 해석 모델을 새롭게 개발하였다. 형상기억합금의 열-기계적 실험 결과를 바탕으로 해석모델을 이용하여 형상기억합금의 초탄성 거동 특성 변화를 예측하였으며, 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 변형률-속도에 따른 형상기억합금의 열-기계적 특성 변화는 준정적인 하중 상태에서는 큰 영향이 없지만, 동적인 하중을 받는 조건에서는 큰 차이를 보여주게 되므로, 구조물의 진동제어를 위한 작동기 및 감쇠기의 응용 연구를 위해서는 반드시 고려해 주어야 하는 매우 중요한 특성이라 정의 할 수 있다.

### 후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2009-0073279)의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) Roh, J. -H., Han, J. -H., Lee, I., "Nonlinear Finite Element Simulation of Shape Adaptive Structures with SMA Strip Actuator", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, 2006, pp. 1007-1022.
- 2) Roh, J. -H., Kim, E. -H., Lee, I., "Low Velocity Impact Behaviors of Composite Structures with Embedded Shape Memory Alloy Films", *49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference*, 2008.
- 3) Hill, J., Roh, J. -H., Wang, K. -W., "Position Control of Shape Memory Alloy Actuators with Load and Frequency Dependent

Hysteresis Characteristics", *SPIE International Symposium Smart Structures and Materials*, 2009.

4) Nashif, A. D., Jones, D. I., and Henderson, J. P., *Vibration Damping*, Wiley, 1985, pp. 74-78.

5) Mukherjee, K., Sircar, S., and Dahotre, N. B., "Thermal Effects Associated with Stress-induced Martensitic Transformation in a Ti-Ni Alloy", *Materials Science and Engineering*, Vol. 74, 1985, pp. 75-84.

6) Entemeyer, D, Patoor, E., Eberhardt, A., and Berveiller, M., "Strain Rate Sensitivity in Superelasticity", *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, 2000, pp. 1269-1288.

7) Tobushi, H., Nakahara, T., Shimeno, Y., and Hashimoto, T., "Low-cycle Fatigue of TiNi Shape Memory Alloy and Formulation of

Fatigue Life", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 122, 2000, pp. 186-191.

8) Zhu, S., and Zhang, Y., "A Thermomechanical Constitutive Model for Superelastic SMA Wire with Strain-rate Dependence", *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, 2007, pp. 1696-1707.

9) 노진호, "변형률 효과를 고려한 형상기억합금의 열-기계적 특성", 한국항공우주학회지, 38(2), 2010, pp. 129-134.

10) Brinson, L. C., "One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, 1993, pp. 229-242.