

< 논문 >

반복적인 작동을 위한 형상기억합금의 특성 실험과 거동 전산 모사

김 상 현* · 조 맹 효†

(2006년 10월 23일 접수, 2006년 12월 16일 심사완료)

Experimental Test and Numerical Simulation on the SMA Characteristics and Behaviors for Repeated Actuations

Sanghaun Kim and Maenghyo Cho

Key Words : Shape Memory Alloy(형상기억합금), Behavior Stabilization(거동안정화), Training Effect(트레이닝 효과), SMA Constitutive Equation(형상기억합금 구성방정식)

Abstract

In this study, we observe the application of shape memory alloy(SMA) into smart structures for repeatable actuation, because SMA changes its material properties and characteristics progressively under cyclic loading conditions and finally reaches stable path(state) after a certain number of stress/temperature loading-unloading cycles, so called 'training'. In this paper, SMA wires that have been in a stable state through the training are used. Stress-strain curve of the SMA wire at different temperature levels are measured. In addition, we observe other important effects such as the rate effect according to strain rates for rapid actuation response. The current work presents the experimental test using SMA wire after training completion by mechanical cycling. Through these tests, we measure the characteristics of SMA. With the estimated SMA properties and effects, we compare the experimental results with the simulation results based on the SMA constitutive equations.

————— 기호설명 —————

M_f : 마르텐사이트 상변이 끝온도 [$^{\circ}C$ or $^{\circ}K$]
 M_s : 마르텐사이트 상변이 시작온도
 A_s : 오스테나이트 상변이 시작온도
 A_f : 오스테나이트 상변이 끝온도
 ※ 위 온도에서 아래첨자 o 의 추가는 비응력 상태를 의미
 C_{Mf} : 마르텐사이트 상변이 끝응력-온도의 기울기 [$\%/^{\circ}C$]
 C_{Ms} : 마르텐사이트 상변이 시작응력-온도의 기울기
 C_{As} : 오스테나이트 상변이 시작응력-온도의 기울기
 C_{Af} : 오스테나이트 상변이 끝응력-온도의 기울기

C_M : 마르텐사이트 Clausius-Clapeyron 상수 [$\%/^{\circ}C$]
 C_A : 오스테나이트 Clausius-Clapeyron 상수
 σ_s^{or} : M_{of} 에서 전방향 상변이 시작응력
 σ_f^{or} : M_{of} 에서 전방향 상변이 끝응력
 ΔS_o : 두 상의 초기 엔트로피 차(= $S_o^M - S_o^A$) [$J/kg^{\circ}K$]
 $\Delta \alpha$: 두 상의 열팽창 계수의 차(= $\alpha^M - \alpha^A$) [$\%/^{\circ}C$]
 ΔS : 두 상의 엔탈피의 차(= $E^M - E^A$)
 E^M : 마르텐사이트 엔탈피 [Pa]
 E^A : 오스테나이트 엔탈피
 σ : 현재 응력
 T : 현재 온도 [$^{\circ}C$ or $^{\circ}K$]
 ξ : 마르텐사이트 체적비
 ρ : 형상기억합금의 밀도 [kg/m^3]
 ν : 푸아송 비
 H : 최대 등가 상변이 변형률(Lagoudas model)
 ϵ_L : 최대 등가 상변이 변형률(Brinson model)

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : mhcho@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1693 FAX : (02)886-1693

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

1. 서론

형상기억합금(Shape Memory Alloy : SMA)은 오스테나이트(Austenite)와 마르텐사이트(Martensite)의 상변이(Phase transformation)에 의한 열과 기계적인 우수한 특성 때문에 작동기로 많이 이용되어진다. 특히 본 연구에서 사용된 형상기억합금은 니켈(Nickel)과 티타늄(Titanium)으로 이루어진 합금으로 다른 형상기억합금에 비하여 온도와 응력에 따라 큰 상변이 변형(Large transformation deformation)과 큰 회복력(Large recovery force)을 가지며, 전류에 의해 열을 가하기 쉬우며, 니켈(Ni)과 티타늄(Ti)의 합금 성분비에 의해서 상변이 온도(Transformation temperature)를 조절할 수 있으며, 비중(Specific weight)이 작기 때문에 작동기(Actuator)의 구조를 단순화하고 보다 효율적인 작동기를 제작하는데 유리하다.^(1,2) 또한 생물학적 적합성(Bio compatibility)으로 생체의 열을 이용하는 의학용 작동기에 적용되고 있다.

그러나 형상기억합금의 초탄성 효과(Pseudo-elasticity effect), 형상기억 효과(Shape memory effect : SME) 그리고 양방향 효과(Two-way effect)는 온도, 잔류응력(Residual stress), 하중 또는 온도 트레이닝(Mechanical / Thermal training), 열처리(Annealing) 조건 등에 따라 특성(Characteristics)과 물성치(Material properties)가 매우 다르게 나타난다. 자세히 말하면, 하중 또는 온도 트레이닝 동안 전위(Dislocation) 또는 복원되지 않는 마르텐사이트 상(Irreversible martensite variants)에 의한 영구변형(Permanent deformation) 때문에 형상기억합금 재료의 특성 곡선을 이동시킨다. 이러한 반복적인 작용에 의한 형상기억합금의 영구변형(Permanent deformation)의 발생과 거동 양상의 변화는 작동기 설계 시 반드시 해결해야 할 문제이다. 따라서 작동기 설계에 앞서 형상기억합금 재료의 반복적인 작동에서 구성 거동(Constitutive behavior)에서 똑같은 경로(Trajectory)를 따라가도록 형상기억합금의 재료 거동(SMA material behavior)의 안정화(Stabilization)가 필요하며, 광범위한 실험을 통하여 안정화된 형상기억합금의 특성과 재료상수를 미리 결정해야 한다.⁽³⁾

본 연구에서는 온도와 응력에 따른 하중트레이닝이 완료된 형상기억합금의 특성에 초점을 맞추어, 다양한 인장실험 및 변형률 시간중분(Strain rate)에 따른 인장 특성들을 파악하였다. 앞서 언급한 특성 실험과 물성치를 바탕으로 현재 가장 많이 사용되고 있는 형상기억합금의 구성방정식인

Table 1 Transformation Temperatures from DSC

M_{of}	M_{os}	A_{os}	A_{of}
-2.3	10.1	7.2	21.0

현상학적인 모델(Brinson model^(4,5) : Phenomenological model)과 열-기계적인 모델(Lagoudas model⁽⁶⁻⁸⁾ ; Thermo-mechanical model)을 이용하여 형상기억합금의 거동을 예측하여 실험결과와 비교하였다.

2. 형상기억합금 인장 특성실험

2.1 실험방법

형상기억합금의 거동은 온도와 응력에 매우 민감하게 의존하므로 특성 및 물성치 파악을 위하여 다양한 온도 하에서 인장실험을 수행하여야 한다. 본 실험에서는 지름이 0.361mm이고 상변이 온도가 낮으며 작동기 사용에 적합한 와이어를 사용하였다. 실험에 앞서 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimeter : DSC)를 통하여 비응력 하에서의 대략적인 상변이 온도를 측정하였으며 21°C에서 초탄성 거동이 시작됨을 알 수 있었고 결과는 Table 1과 같다. INSTRON5565TM와 자체 제작한 열-냉 챔버(Heat-cool chamber)를 이용하여 인장시험을 수행하였다. 우선 표준치(Standard values)를 파악하기 위해서 초기 재료(As-received material)에 대하여 상온(25°C)에서 재료가 파단 될 때까지 변형률 속도(Strain rate)를 달리하여 인장 시험을 수행하였으며 또한 반복적인 하중(Cyclic loading)에 의한 형상기억합금 거동이 동일성을 갖는지를 확인하였다. 이를 바탕으로 -20~50°C의 범위에서 5°C 간격으로 각각의 응력-변형률 관계 실험을 수행하였다.

2.2 실험결과

초기 재료(As-received material)에 대하여 상온(25°C)에서 재료가 파단 될 때까지 변형률 속도를 달리하여 인장 시험을 수행한 결과 작동기에 사용 가능한 최대 응력은 약 900MPa 이며 상변이 변형률은 약 4%로 나타났다(Fig. 1). 또한 변형률 속도를 크게 할수록 상변이 시작응력이 커짐을 알 수 있다. 이는 재료의 상변이 응력이 온도에 민감한 특성과 전방향 상변이(Forward transformation) 동안의 형상기억합금의 발열반응(Exothermic response)에 의해서 재료 자체의 온도가 상승하기 때문에

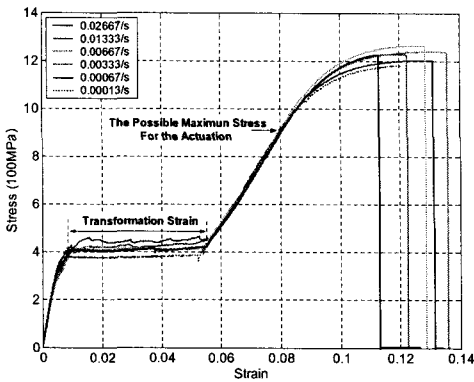


Fig. 1 The tension test until the as-received SMA wire is failed

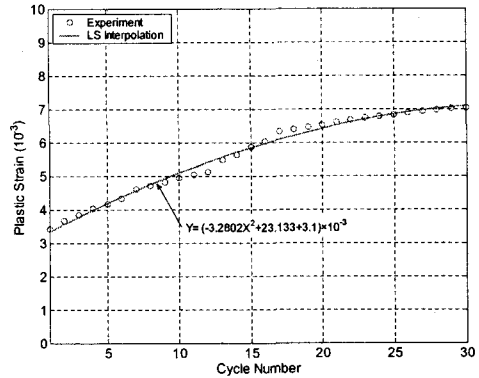


Fig. 3 The plastic strain accumulation during load training

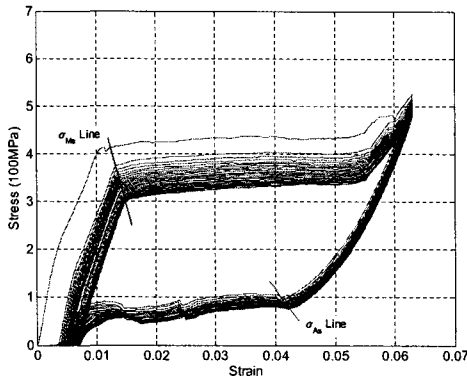


Fig. 2 The load / mechanical training at 25 °C

이러한 현상이 발생하며 점탄성(Visco-elasticity)의 효과와는 다르다.^(9,10) 그리고 Fig. 2와 같이 반복적인 하중에 의해서 형상기억합금의 거동이 변하게 됨을 볼 수 있다. 30회의 반복적인 초탄성 거동 동안에 Fig. 3과 같이 전위(Dislocation)에 의한 영구변형률이 0.7%이내에서 축적됨을 볼 수 있으며, Fig. 4와 같이 상변이 응력이 점점 작아지며 약 25회 이상에서 임의의 값에 수렴됨을 볼 수 있다. 특히 전방향 상변이 응력이 후방향 상변이 (Reverse transformation) 응력값에 비하여 초기치와 크게 차이를 보이며 수렴함을 알 수 있다. 한편 이 그래프에서 곡선과 수식은 3차 최소 자승 보간법(Least Square Interpolation : LSI)을 이용하여 구해졌다.

이러듯 제작사에서 제공한(As-received) 형상기억합금을 작동기에 적용하여 사용하게 되면 작동기의 성능이 점차적으로 떨어지며 작동기 거동 양상도 변화게 될 것이다. 따라서 형상기억합금을 작

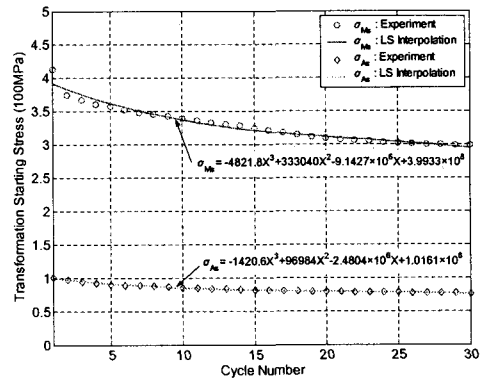


Fig. 4 The decrease (evolution) of transformation starting stresses during load training

동기에 적용하기 위해서, 또한 보다 정확한 작동기 거동 예측을 위해서는 형상기억합금의 재료 거동의 안정화가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 제작사에서 제공한 형상기억합금 재료에 대하여 상온에서 50회의 반복적인 하중을 주어 재료의 거동을 안정화시켰다. 이를 ‘하중 트레이닝’ 또는 ‘기계적 트레이닝’(Load / Mechanical training)이라고 하며 이는 인장 거동을 안정화시켜 반복적인 작동기 사용에 적합하게 하기 위하여 필요하다.

형상기억합금은 온도에 민감하게 반응하여 거동하는 재료이므로 Fig. 2와 같이 트레이닝 완료 후 -20~50°C의 범위에서 5°C 간격으로 각각의 응력-변형률 관계 실험을 수행한 결과 Fig. 5,6과 같이 초탄성 거동과 형상기억효과 거동을 얻을 수 있었다. 이들 그래프를 통하여 기계적 트레이닝이 완료된 형상기억합금 와이어의 비응력 하의 상변이 변형률은 약 4%, 오스테나이트 상에서 영률

Table 2 The slopes of transformation stress-temp. & transformation temps. about load trained SMA wire

Slop (MPa / °C)	C_{Mf}	C_{Ms}	C_{As}	C_{Af}
	5.61	5.33	9.43	8.89
Trans. Temp. (°C)	M_{of}	M_{os}	A_{os}	A_{of}
	-39.14	-33.19	17.35	21.65

(Young's modulus)은 약 70GPa, 완전하게 상변이된 상태인 마르텐사이트 상(Detwinned martensite phase)에서의 영률은 약 35GPa임을 확인하였다. 그리고 이들 그래프를 이용하여 네개의 상변이 응력과 온도와의 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같이 나타나며 이를 이용하여 형상기억합금의 거동을 수치해석하게 된다. Fig. 7의 그래프에서 각각의 상변이 응력-온도의 기울기와 비응력 하의 상변이 온도는 실험치를 바탕으로 1차 최소 자승 보간법을 이용하여 구하였으며 이들 값들은 Table 2에 명기되어 있다. 한편 DSC에 의해 측정된 값과 차이가 나는 이유는 하중 트레이닝 동안 재료 내부가 구조적으로 변화하여 상변이 응력이 변화했기 때문이며 특히 전방향 상변이 응력의 변화가 크기 때문에 마르텐사이트 상변이 시작과 끝온도가 크게 차이가 나게 된다.

3. 거동 전산 모사

3.1 구성방정식

본 연구에서는 상온에서 기계적 트레이닝이 완료 되어진 즉, 안정화된 형상기억합금의 거동을 전산 모사하기 위해서 현재 가장 많이 쓰이고 있는 형상기억합금 구성방정식 모델인 Brinson 모델과 Lagoudas 모델을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 두 모델의 자세한 수식 전개와 물리적 의미는 참고문헌을 참고하기 바란다.

두 모델을 간단하게 설명하면 다음과 같다. 두 모델 모두 상변이 응력의 Clausius-Clapeyron 거동을 나타내기 위해 온도에 의존하는 항복곡면(Yield Surface)을 사용하였다.

Brinson 모델^(4,5)은 Tanaka⁽¹¹⁾와 Liang-Rogers^(12,13) 두 모델을 이용하여 시간적 증분형태의 구성방정식으로 도출되었다. 여기서 다른 모델과 구별되는 것은 마르텐사이트 체적비(Martensite volume fraction : ξ)를 온도증분(TIM)에 의한 것(ξ_T)과 응력증분(SIM)에 의한 것(ξ_S)으로 분리시켰다는 것이다. 즉, 재료매개변수(Material parameter)는 등가 변형률(Equivalent strain), 절대온도, 마르텐사이트 체적비를 사용하지만 등온과정에서 응력-변형률 선

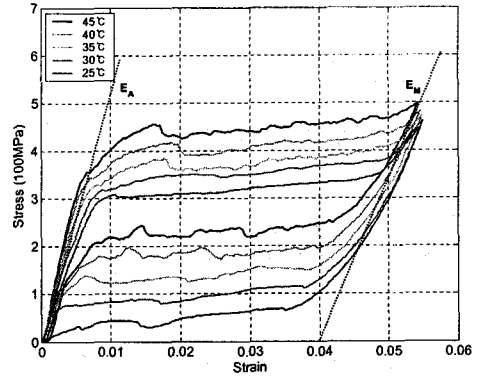


Fig. 5 The experimental result of isothermal tension behavior above 25°C (Pseudo-elastic behavior)

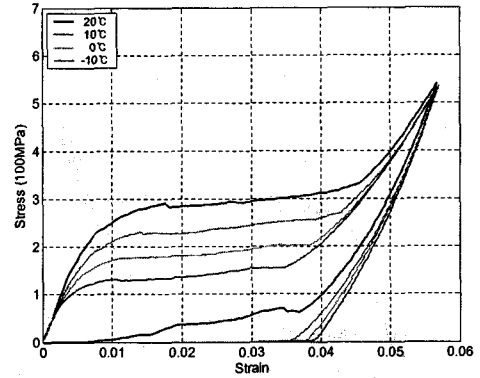


Fig. 6 The experimental result of isothermal tension behavior below 25°C (Shape memory effect behavior)

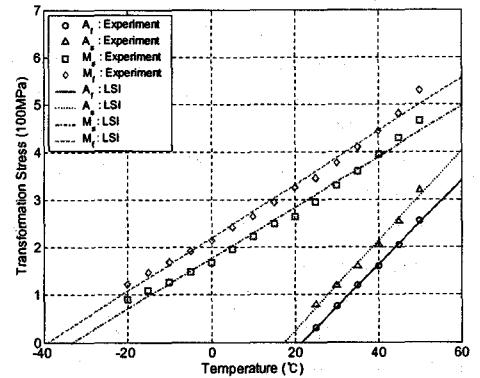


Fig. 7 The Transformation stresses - temperature curve from the experimental results

도는 응력증분에 따른 상변이 방정식만으로 결정되어진다는 것이다. 이 모델은 거동의 피팅(fitting)

에 주력한 모델이다.

Lagoudas 모델⁽⁶⁻⁸⁾은 Tanaka와 Liang-Rogers 모델을 수정보완하여 3차원을 해석할 수 있도록 하였다. 이 모델은 Liang-Rogers가 제안한 모델과 운동학적 상변이 가정이 유사하지만 상변이 구간에서 에너지 발산을 담당하는 경화함수(Hardening function)를 지수함수가 아닌 변곡점을 가진 다항식으로 표현하였다. 또한 탄성영역과 상변이 영역을 구분하여 해당온도에서 임계응력 전에는 탄성 구간으로 거동하다가 임계응력을 넘어서면 상변이 영역에서 거동하도록 모델링하였다. 이는 재료의 소성거동과 매우 유사한 이론이다. 이때 상변이 구간의 재료의 물성치는 혼합법칙(Rule of mixtures)에 의해 오스테나이트상, 마르텐사이트상의 물성치와 마르텐사이트 체적비로 표현하였다. 이와 더불어 에너지 발산(Clausius-Duhem Inequality)을 이용하여 탄성영역과 상변이 영역사이의 일관성을 표시하였다. 이 모델은 재료 거동의 열-기계적인 관점에 주력한 모델이다.

3.2 거동 모사 결과

Brinson 모델을 이용하여 거동을 예측하기 위해서 Fig. 7과 같이 1차 최소 자승 보간법에 의해 구해진 상변이 응력-온도의 기울기와 비응력하의 상변이 온도들을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 이 때 모델에서 각 상의 시작과 끝의 기울기는 같아야 하기 때문에 실험에서 구해진 기울기의 평균값을 이용하였으며 비응력하의 상변이 온도를 약간 조정하여 전범위 온도에 대한 거동의 오차를 줄였다(Fig. 8). 이 때 Brinson 모델의 특징인 마르텐사이트 시작온도(M_{σ})에서 응력에 의한 전방향 상변이 시작응력(σ_s^{σ})과 끝응력(σ_f^{σ})을 조절하여 전방향 상변이 구간의 응력-변형을 기울기를 조절하였다. 본 연구에서 Brinson 모델을 이용하여 상기 재료의 거동을 예측하기 위한 재료상수는 Table 3에 명기되어 있다.

Fig. 7를 자세히 관찰하면 A_{σ} 온도 이상에서 마르텐사이트 상변이 시작과 끝 응력-온도의 기울기가 급해짐을 볼 수 있다. 이는 초탄성 거동과 형상기억효과 거동의 경계에서 약간의 재료적 성질이 달라지기 때문으로 설명할 수 있으며 인장시험 결과(Fig. 6)에서도 이를 확인할 수 있다. Lagoudas 모델에서는 이러한 효과를 포함하여 거동을 예측해 보았다. 만약 Lagoudas 모델에서 Fig. 8과 같이 상변이 응력-온도와의 관계를 이용한다면 Brinson 모델과 똑같은 결과를 보이게 된다. 다만 이 모델

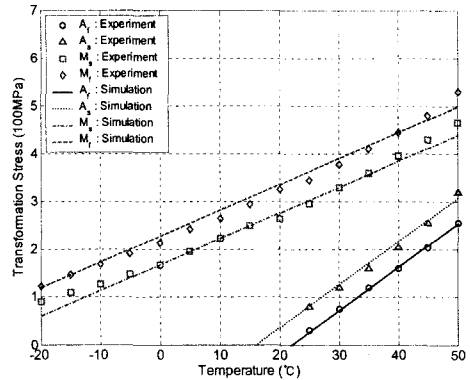


Fig. 8 The transformation stresses - temperature curve for Brinson model

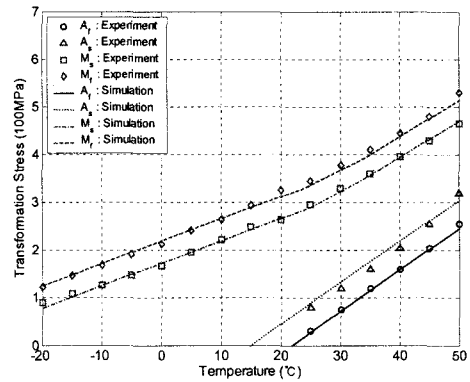


Fig. 9 The transformation stresses - temperature curve for Lagoudas model

에서는 σ_s^{σ} , σ_f^{σ} 와 같은 피팅(Fitting) 요소 없이 거동을 예측하게 된다.

Fig. 9와 같은 상변이 응력-온도 관계식을 만들기 위해서 식 (1)을 이용하고, A_{σ} 를 경계로 하여 초기 엔트로피 차(Δs_0)와 비응력하의 상변이 온도들을 Table 4와 같이 구간에 대하여 다르게 가정하여 형상기억합금의 거동을 예측해 보았다. (단, 여기서 $\Delta\alpha = 0$ ($\alpha_A = \alpha_M$) 로 가정하였다.) 결과적으로 Lagoudas 모델에서 보다 정확한 결과를 얻어졌음을 Fig. 10~13을 통하여 알 수 있다. 그러나 두 모델 모두 거동을 비교적 정확하게 수치해석함을 확인할 수 있다. 공통된 형상기억합금의 재료상수는 Table 5에 명기되어 있다.

$$C_{A \text{ or } M} \sim \frac{d\sigma}{dT} = -\frac{\rho(\Delta s_0)_{A \text{ or } M_1 \text{ or } 2} + \Delta\alpha\sigma}{H + \Delta S\sigma + \Delta\alpha\Delta T} \quad (1)$$

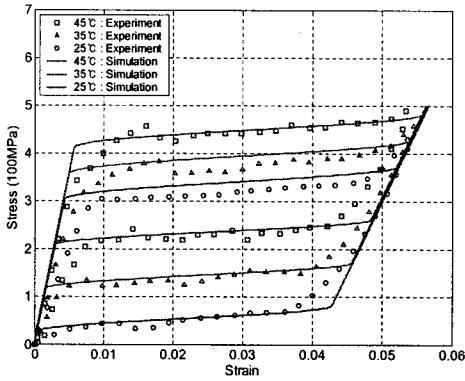


Fig. 10 The simulation result of pseudo-elasticity by Brinson model

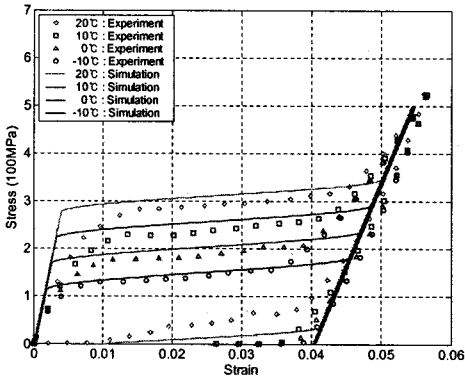


Fig. 11 The simulation result of SME by Brinson model

Table 3 The Clausius-Clapeyron constants and transformation temps. for Brinson model

C_M	C_A	σ_s^{σ}	σ_f^{σ}
5.47e+6	9.16e+6	0	70e+6
M_{of}	M_{os}	A_{os}	A_{of}
-42°C	-31°C	16°C	22°C

Table 4 The difference of entropy and transformation temps. for Lagoudas model

$(\Delta S_o)_{M1}$	M_{of1}	M_{os1}
-31	-46°C	-36°C
$(\Delta S_o)_{M2}$	M_{of2}	M_{os2}
-53	-14.3°C	-8.5°C
$(\Delta S_o)_A$	A_{os}	A_{of}
-56	16°C	23°C

Table 5 The SMA material constants for both models

ρ	E_A	E_M	ν	α	H, ϵ_L
6450	70e+9	35e+9	0.33	1.1e-5	0.04

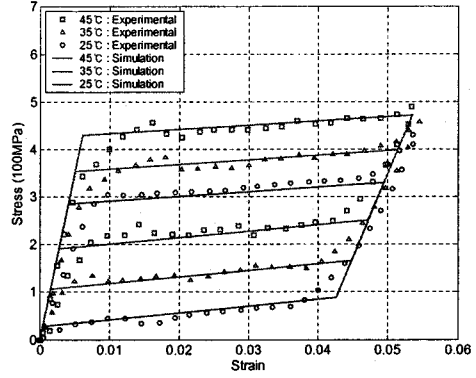


Fig. 12 The simulation result of pseudo-elasticity by Lagoudas Model

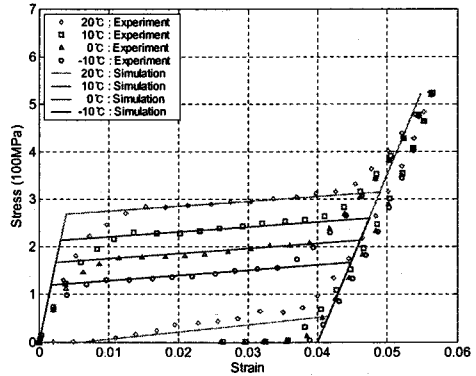


Fig. 13 The simulation result of SME by Lagoudas model

4. 결론

본 연구에서는 형상기억합금을 이용한 작동기를 설계함에 있어서 반복적인 작동에도 성능과 작동 거동이 변하지 않도록 형상기억합금의 하중 트레이닝 특성을 보여주었다. 또한 트레이닝이 완료된 형상기억합금 선에 대해서 다양한 온도하에서 인장 시험을 수행하였으며 이를 통하여 얻은 특성과 재료상수를 이용하여 현재 가장 많이 사용되고 있는 현상학적인 형상기억합금 구성 모델인 Brinson 모델과 열-기계적인 구성 모델인 Lagoudas 모델을

이용하여 거동을 전산 모사하였다. 또한 모델의 상변이 응력-온도의 기울기를 조정하여 더욱 정확하게 거동을 모사하도록 해 보았으며 이를 통하여 두 모델 모두 정확한 거동을 예측함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 비행특화연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Otsuka, K. and Wayman, C. M., 1999, "Shape Memory Materials," Cambridge University Press.
- (2) Birman, V., 1997, "Review of Mechanics of Shape Memory Alloy Structures," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 11, pp. 629~645.
- (3) Kim, S., Choi, H., Yoon, M. and Cho, M., 2006, "Experimental Test for Numerical Simulation SMA Characteristics and its Simulation, in: Smart Structures and Materials," Proc. of SPIE, Vol. 6170, San Diego, USA.
- (4) Brinson L. C., 1993, "One-dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys : Thermo-mechanical Derivation with Non-constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable," *J. Intelligent Mat. Syst. Struct*, Vol. 4, pp. 229~242.
- (5) Brinson L. C. and Lammering R., 1993, "Finite Element Analysis of the Behavior of Shape Memory Alloys and Their Application", *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 30, pp. 3261-3280.
- (6) Boyd, J. G. and Lagoudas, D. C., 1996, "A Thermodynamic Constitutive Model for the Shape Memory Alloy Materials Part I, The Monolithic Shape Memory Alloy," *Inter. J. Plasticity*, Vol. 12, pp. 805~842.
- (7) Lagoudas, D. C., Bo, Z. and Qidwai, M. A., 1996, "A Unified Thermodynamic Constitutive Model for SMA and Finite Element Analysis of Active Metal Matrix Composite," *Mechanics of Composite Materials and Structures*, Vol. 3, pp. 153~179.
- (8) Cho, M. and Kim, S., 2005, " Structural Morphing Using Two-way Shape Memory Effect of SMA," *Inter. J. Solids and Structures*, Vol. 42, pp.1759~1776.
- (9) Shaw, J. A., 2000, "Simulations of Localized Thermo-mechanical Behavior in a NiTi Shape Memory Alloy," *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, pp. 541~562.
- (10) Iadicola, M. A. and Shaw, J. A., 2004, "Rate and Thermal Sensitivities of Unstable Transformation Behavior in a Shape Memory Alloy," *Inter. J. Plasticity*, Vol. 20, pp. 577~605.
- (11) Tanaka, K., Kobayashi, S. and Sato, Y., 1986, "Thermomechanics of Transformation Pseudoelasticity and Shape Memory Effect in Alloys," *Int. J. Plasticity*, Vol. 2, pp. 59~72.
- (12) Liang, C. and Rogers, C. A., 1990, "One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials," *J. Intelligent Mat. Syst. Struct.*, Vol. 1, pp. 207~234.
- (13) Liang, C. and Rogers, C. A., 1992, "Design of Shape Memory Alloy Actuators," *J. Mech. Design*, Vol. 114, pp. 223~230.