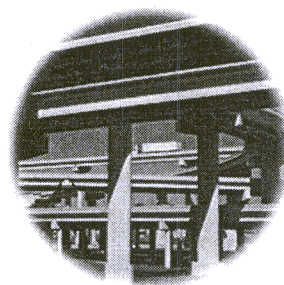
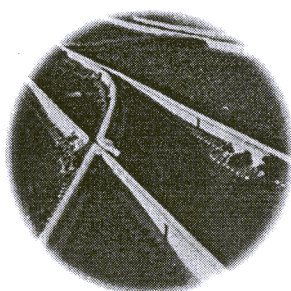
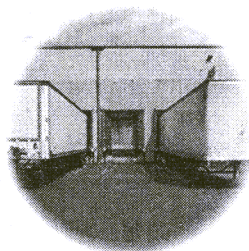
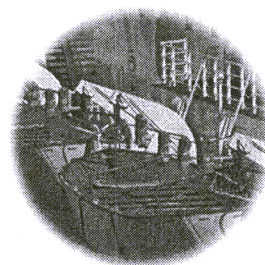


2006年度

秋季學術發表大會 論文集



- 日時：2006年 11月 23日(木)
- 場所：금오공과대학교 테크노관
- 主催：社團法人 韓國複合材料學會
금오공과대학교 나노정밀부품소재
인력양성사업단
- 後援：韓國科學技術團體總聯合會
韓國學術振興財團
금오공과대학교

목 차

제 1 발표장		
9:00~10:40 복합재료제조공정 I(Composite Materials Manufacturing Processes I)		좌장: 엄문광
09:00 ~09:20	광섬유센서를 이용한 구조물의 모니터링 기법 및 그 응용사례..... 5 김기수*, 윤재중	
09:20 ~09:40	국내교량의 FRP-콘크리트 합성바닥판 개발 11 주형중*, 이의중, 김창원, 이기범, 홍순중, 윤순중	
09:40 ~10:00	하이브리드 강철/복합재료 원판형 절삭공구의 개발 17 김병중*, 이대길	
10:00 ~10:20	Poly(trimethylene terephthalate)/ABS 블렌드의 혼합성과 유동 특성 21 Mei-ling Xue*, 이택수, 김남훈, 이중희	
10:20 ~10:40	유기 개시제를 이용한 Inverse-emulsion 법에 의해 제조된 Poly(aniline-co-acrylonitrile)에 대한연구 25 T.Jeevananda Siddaramaish*, 심태희, 이중희	
10:40 ~10:50	Coffee Break	
10:50~11:20	총 회	좌장 : 박종만
11:20~12:00	특별강연	좌장 : 강태진
13:30~15:10 복합재료제조공정 II (Composite Materials Manufacturing Processes II)		좌장: 이중희
13:30 ~13:50	국내 광물로부터 무기질 연속성유 제조와 그 물리적 특성 29 김재근*, 나상문, 김승일, 진용진	
13:50 ~14:10	Effect of Plasma Treated Wood Powder on Wood Plastic Composites..... 33 Nguyen Minh Hai* ,하종학, 김동욱, 김병선, 이종훈	
14:10 ~14:30	Mesh Modeling of Angle-ply Laminated Composite Plates For DNS..... 37 Joris Wismans*, 김승조	
14:30 ~14:50	AS4/PEEK 복합재의 용착 공정조건에 관한 연구..... 41 엄문광*, 김영규, 이상용, 변준형	
14:50 ~15:10	신 목질복합재료의 전망 - 시장과 기술의 측면에서 45 한유수*	
15:10 ~15:30	Coffee Break	
15:30~17:10 복합재료 물성평가 III(Composites Properties Evaluation III)		좌장: 구교남
15:30 ~15:50	Effect of Dispersion Methods on Mechanical Properties of VGCF/epoxy..... 49 Nguyen Quang Khuyen*, 김진봉, 김병선, 이수	
15:50 ~16:10	주기 가열법을 이용한 BMS10-102 단열재의 열확산도 측정 53 남기원*, 공철원, 이영무, Akira Ohnishi	
16:10 ~16:30	자체 윤활 특성을 가지는 입자를 함유한 복합재료의 마모 특성 57 유하나*, 김성수, 이대길	
16:30 ~16:50	천연섬유강화 고분자복합재료의 물성 향상에 미치는 알칼리처리의 영향..... 62 서정민*, 이현석, 조채욱, 조동환	
16:50 ~17:10	실험 및 해석 모델을 통한 Ni-Ti SMA Ribbon 의 열기계적 특성 연구 67 노진호*, 한재홍, 이인	

실험 및 해석 모델을 통한 Ni-Ti SMA Ribbon의 열기계적 특성 연구

노진호*·한재흥**·이 인***

Experimental and Numerical Investigation on Thermomechanical Behaviors of Ni-Ti SMA Ribbon

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

Abstract

The thermomechanical behaviors of Ni-Ti shape memory alloy (SMA) ribbon are experimentally and numerically investigated. The evolution of stress-strain curves with various annealing temperatures is experimentally observed. To characterize the temperature-induced transformation, different scanning calorimeter (DSC) is applied. The numerical algorithm of the 2-D SMA thermomechanical constitutive equation is developed and implemented into the ABAQUS finite element program by using the user defined material (UMAT) subroutine. The new parameters are first introduced in the research to describe unique behaviors of this SMA ribbon. The numerical results are compared with experimental data.

Key Words: Thermomechanical behavior, Ni-Ti Shape Memory Alloys, R-phase.

1. 서론

형상기억합금(SMA)은 형상기억효과, 의탄성(pseudoelasticity) 거동, 생체적합성, 그리고 큰 감쇠(damping) 특성을 보여주고 있으며, 이런 기계적 특성을 이용하여 생물의학, 미세 전자·기계 시스템(MEMS), 그리고 항공우주공학 분야에 많이 응용되어 지고 있다 [1, 2]. 특히, 형상기억합금을 매우 얇은 박막(thin film) 형태의 작동기로 제작할 경우 적은 작동 전력, 단위 부피/무게 당 큰 작동력, 그리고 비교적 빠른 응답 시간(100Hz) 등의 장점을 가지게 된다 [3]. 이런 이유로, 얇은 박막 형태의 미소(micro) 작동기에 형상기억합금이 많이 응용 연구되어지고 있다. 하지만 형상기억합금은 매우 복잡한 열기계적 특성을 가지고

있기 때문에, 실제적인 작동기로 적용되기 위해서는 충분한 실험 및 해석 연구가 필요하고 형상기억합금 작동기의 표준화, 성능 평가 그리고 설계를 위하여 수치적인 해석 모델의 개발도 필요하다.

본 연구에서는 응력과 열에 의해 유도되는 상변형에 관한 Ni-Ti SMA ribbon의 열기계적 특성을 실험적 그리고 해석적으로 살펴보았다. 열처리(annealing) 온도에 따른 Ni-Ti SMA 시편의 상변형(phase transformation) 온도 및 응력-변형률 선도 특성 변화를 관찰하였다. DSC(Differential Scanning Calorimeter)를 이용하여 상변형 온도를 측정하였고 열처리 온도에 따른 R-phase(rhombohedral phase) 상변형, 영구 변형률 및 부분 의탄성 거동들을 확인하였다. SMA ribbon의 열기계적 거동을 수치적으로 묘사하기 위해 해석 모델링이 제시되었고 상용프로그램 ABAQUS와 연계하여 유한요소해석(FEM)을 통한 SMA ribbon의 특성을 수치적으로 예측하였다. 영구 변형률과 R-phase 변형의 새로운 변수를 정의하여 해석 모델링을 제시하였다.

* 박사후 연구원, 한국과학기술원

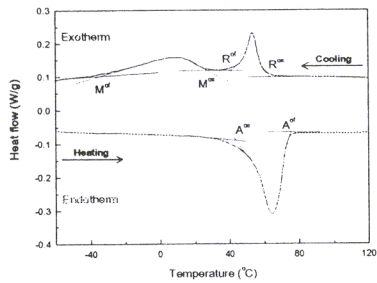
** 부교수, 한국과학기술원

*** 교수, 한국과학기술원

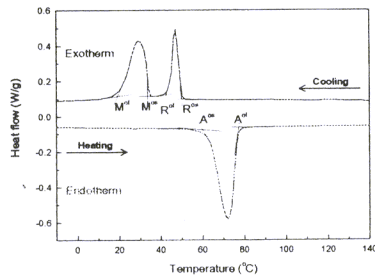
2. SMA Ribbon의 열기계적 특성 실험

Ni-Ti SMA의 열기계적 특성을 실험적으로 살펴보기 위하여 Ni-55.32at.%Ti SMA ribbon을 Special Metals Corporation에서 구입하여 7mm(width)×150mm(length)×0.25mm(thickness)의 시편 크기로 시험하였다.

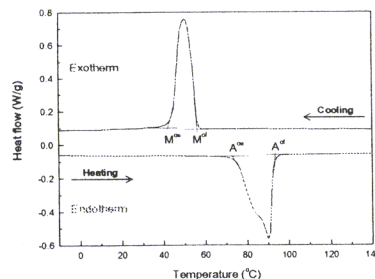
열처리(annealing) 온도는 Ni-Ti SMA의 열기계적 특성을 결정하는 중요한 요인으로 작용하고 있다 [4]. 400°C, 500°C, 그리고 600°C 열처리 온도에서 30분 동안 전기로를 이용하여 SMA 시편의 풀림작업을 수행하였다. 이후, 각각의 시편에 대하여 DSC(Differential Scanning Calorimeter)를 이용하여 상변형 온도 특성을 살펴보았다. Fig. 1은 열처리 온도에 따른 DSC heat flow 선도를 나타낸다. 400°C 그리고 500°C의 열처리 온



(a) Heat treat: 400°C for 30min



(b) Heat treat: 500°C for 30min



(c) Heat treat: 600°C for 30min

Fig. 1 Evolution of DSC heating/cooling curves

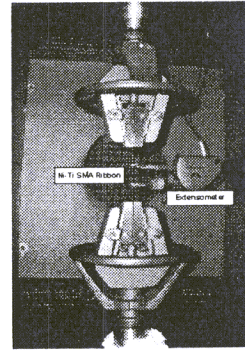


Fig. 2 Experimental setup for loading-unloading test at various temperatures

도에서 R-phase 상변형이 생김을 확인할 수 있고 열처리 온도가 증가함에 따라 마르텐사이트 상과 R-phase 상변형 온도 범위가 좁아지면서 600°C의 열처리 온도에서는 R-phase 상변화가 없어짐을 확인할 수 있다.

등온상태에서 Ni-Ti SMA ribbon의 인장 실험을 열챔버와 INSTRON을 이용하여 수행하였다 (Fig. 2). 변형률을 측정하기 위하여 45mm gage length의 extensometer를 사용하였다. 열처리 온도에 따른 의탄성(pseudoelasticity) 거동 특성을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 일반적인 형상기억합금에서, 의탄성 거동 특성은 오스테나이트 이상의 온도에서 발생하게 된다. 하지만, 500°C에서 열처리를 한 경우에는 완전하진 않은 의탄성 거동을 보여주고 있으며 또한 영구변형이 남게 됨을 알 수 있다. 600°C인 경우, 형상기억합금의 상변형에 따른 응력-변형률 선도와는 다른 소성(plasticity) 거동을 보여주고 있다. Ni 성분이 50.5%를 초과하는 형상기억합금의 경우 침전(precipitation)에 의해서 300°C와 500°C사이의 열처리 온도에서 열기계적 특성이 매우 민감하다고 알려져 있다 [4]. 또한, fully annealed된 경우는 부분적인 의탄성 거동 특성을 보여주고 있다 [5]. 본 연구에서 사용된 SMA 시편은 55.3%의 Ni 성분을 가지고 있으며, 500°C의 열처리 온도의 시편에서 부분적인 의탄성 거동을 보여주고 있으며 따라서 fully annealed 되었다고 판단된다. 또한, 600°C 열처리 온도의 시편에서는 일반적인 SMA 특성과 다른 거동을 보여주고 있어 구조적 재결정(recrystallization)이 일어났다고 판단된다.

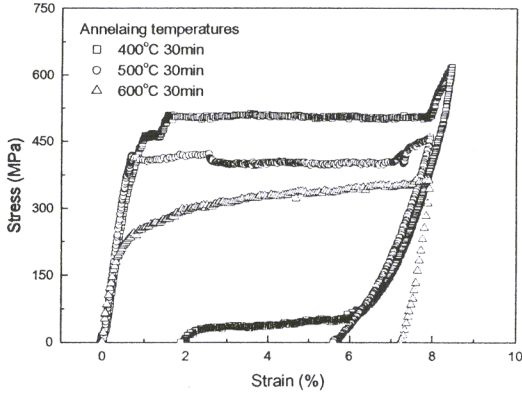


Fig. 3 Stress and strain curves at temperature of 90°C

3. SMA Ribbon의 해석 모델링

실험결과로부터, 600°C 에서 열처리된 Ni-Ti SMA 시편에서는 SMA의 거동과 다른 응력-변형률 선도를 보여주고 있어 임계(critical) 재결정(recrystallization) 온도로 판단된다. 또한 500°C 에서 열처리된 시편에서는 단지 부분 의탄성 거동 특성을 보여주고 있어, 400°C 에서 열처리 작업을 마친 시편에 대하여 수치적 모델을 고려하였다. 실험결과로부터 얻어진 데이터를 이용하여 수치 해석에 필요한 계수들을 찾아내었고 이것은 열역학적 에너지 식과 관련된 것으로서, 실험결과와 수치해석 간의 차이를 최소화 하는 방향으로 계수들을 결정해 주었다. SMA ribbon의 거동을 예측하고 위해 Lagoudas 모델[6]을 수정하였고 수치 변수들을 새롭게 정의하였다.

응력-변형률 선도를 관찰해 보면 R-phase 상변형과 slip에 의한 영구변형이 생김을 확인할 수 있다. 따라서 이런 특별한 현상을 수치적으로 모

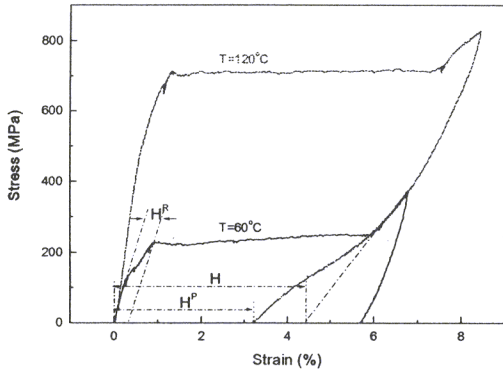


Fig. 4 Hysteresis of stress-strain curves

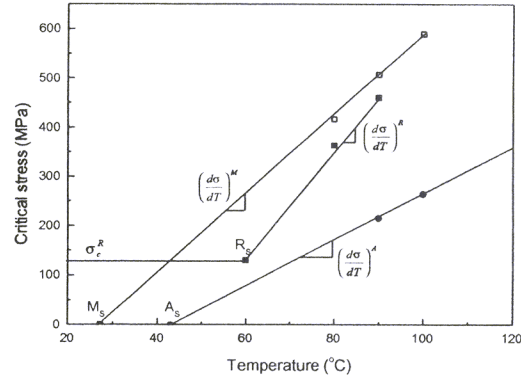


Fig. 5 The temperature dependence of critical stress for phase transformation

델링 하기 위하여, 영구 변형률, H^P , 그리고 R-phase 변형률, H^R 의 새로운 변수를 정의하였다. H^P , H^R , 그리고 최대 변형률, H , 을 Fig. 4. 에서 측정하였고, 오스테나이트 그리고 마르텐사이트 상의 Young's modulus를 측정할 수 있다. 온도에 따른 임계 상변형 응력의 기울기를 Fig. 5에 표현하였고, 각각의 $(d\sigma/dT)^M$, $(d\sigma/dT)^A$, 그리고 $(d\sigma/dT)^R$ 값을 측정하였다.

SMA의 R-phase와 영구 변형 특성을 묘사하기 위하여 열역학적 에너지식을 이용하여 표현하였다. 유효 비열의 차이는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \rho \Delta s_o^A &= - (H + H^P)(d\sigma/dT)^A, \\ \rho \Delta s_o^M &= - H(d\sigma/dT)^M, \\ \rho \Delta s_o^R &= - H^R (d\sigma/dT)^R \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)을 바탕으로 상변형 변형률 물질 상수들을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{2} (\rho \Delta s_o^M M^{os} + \rho \Delta s_o^A A^{of} + \rho \Delta s_o^R R^{os}), \\ \rho b^A &= - \rho \Delta s_o^A (A^{of} - A^{os}), \\ \rho b^M &= - \rho \Delta s_o^M (M^{os} - M^{of}) \\ &\quad - H(d\sigma/dT)^R (R^{os} - R^{of}) - \frac{1}{2} H\sigma_c^R \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, σ_c^R 은 R-phase 상변형이 생기게 되는 임계 응력을 나타내고 Fig. 5에서 측정할 수 있다. 또한, 상변형에 의한 내부에너지의 분산량, Y^* 를

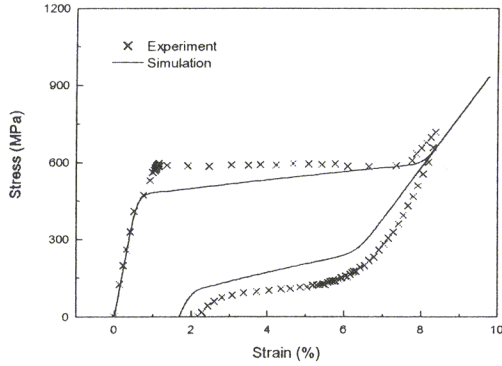


Fig. 6 Stress-strain curve at temperature of $100^{\circ}C$

식(3) 과 같이 유도 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y^* = & -\frac{1}{2}\rho\Delta s_o^A(A^{of}) + \frac{1}{2}\rho\Delta s_o^M(M^{os}) + \\
 & \frac{1}{4}\rho\Delta s_o^M(M^{os} - M^{of}) - \frac{1}{4}\rho\Delta s_o^A(A^{of} - A^{os}) - \\
 & \frac{1}{2}\rho\Delta s_o^R R^{os} + \frac{1}{4}\rho\Delta s_o^R(R^{os} - R^{of})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

따라서, Ni-Ti SMA ribbon의 응력에 의한 상변형 거동 그리고 열에 의한 상변형 특성을 묘사할수 있는 열기계적 물성치를 모두 구할 수 있으며 자세한 해석 방법은 참고문헌[2, 6]에 잘 설명되어져 있다.

온도에 따른 응력-변형률 선도 특성을 실험과 해석결과들을 비교해 보았다. Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 실험결과와 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 온도 증가에 따른 복원력을 측정하였다. 전기저항을 이용하여 SMA의 온도를 증가시켰고 thermocouple를 이용하여 온도를 측정하였다 (Fig. 7). 잔류 변형을 가해주었고 시편의 양

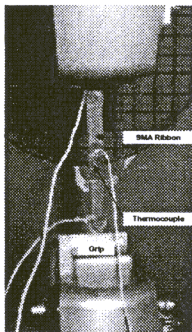


Fig. 7 Experimental setup for measurement of recovery stress and temperature

쪽 끝은 grip을 이용하여 고정 시켰다. 시편의 온도를 증가시켜줌에 따라 형상기억효과에 의하여 복원응력이 발생하게 된다. Fig. 8은 온도 증가에 따른 SMA의 복원력을 나타낸다. 오스테나이트 시작 온도($A^{os} = 42^{\circ}C$)에서부터 온도에 의한 상변형으로 복원력이 발생하는 것을 확인할 수 있고 해석모델이 실험결과를 잘 예측함을 알 수 있다.

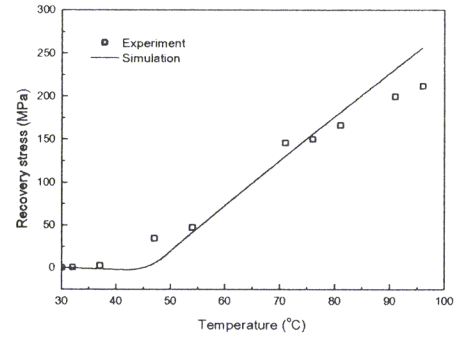


Fig. 8 Recovery stress with 4.5% initial strain

4. 결론

열처리 온도가 Ni-Ti SMA의 의탄성 거동에 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, R-phase, 영구 변형, 그리고 부분 의탄성 거동 특성을 열처리 온도에 따라 관찰 할 수 있었다. R-phase 상변형과 영구 변형을 고려하기 위하여 새로운 변수를 정의하여 변형 함수를 구성하였고 효과적으로 형상기억합금의 열기계적 특성을 묘사할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2006년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Smart Materials and Structures, **13**, 1345 (2004)
- (2) J. Int. Mat. Syst. Str., **17**(11), 1007 (2006)
- (3) Sensor and Actuator A. **119**, 151 (2005)
- (4) Scripta Materialia. **45**, 153 (2001)
- (5) Shape Memory Materials, Cambridge Univ. Press. (1998)
- (6) Int. J. Numer. Meth. Engng. **47**, 1123 (2000)