형상기억합금 와이어의 거동 안정화를 위한 트레이닝과 작동기 응용

A training of SMA wire for stabilization of two-way behaviors and actuator application

김상헌*·양성필*·조맹효†

Sanghaun Kim, Sungpil Yang and Maenghyo Cho

Key Words : Shape Memory Alloy(형상기억합금), Two-way Effect(양방향효과), Training Effect(트레이닝 효과), Rate Effect (시간증분효과)

ABSTRACT

In this study, adaptation of two-way shape memory effect of SMA wire to the actuator is examined. Therefore the SMA characteristics which are training, material properties, response time at different thermal cycling rates are tested. During training, permanent deformation is accumulated till a certain number of cycle and then saturated. The amount of two-way strain is unchangeable over all cycle and the slope of strain(or stress)-temperature curve is slower as the increase of applied stress. The rate effect is observed resulted from the thermal distribution which heating profile differs from cooling as thermal cycling time. Using the estimated SMA properties, an experimental test for the simple smart wing is performed.

1. 서 론

형상기억합금(Shape Memory Alloy)은 오스테나이트(Austenite)와 마르텐사이트(Martensite)의 상변이(Phase transformation)에 의한 열기계적인 특성 때문에 작동기로 많이 이용되어진다. 특히 온도와 응력에 따라 형상기억합금의 큰 변형(Large Deformation)과 큰 회복력(Recovery force)을 가짐으로 작동기의 구조를 단순화하고 보다 효율적인 작동기를 제작하는데 유리하다. 그러나 형상기억합금의 초탄성효과(Pseudoelasticity), 형상기억효과(Shape Memory Effect), 양방향 효과(Two-way Effect)는 온도조건, 잔류응력(Residual stress), 트레이닝(Training), 열처리(Annealing) 등에 따라 매우 다르게 나타난다. 또한 반복적인 작용에 의한 형상기억합금의 영구변형(Permanent Deformation)의 발생은 작동기 설계 시 반드시 해결해야 할 문제이다. 따라서 작동기 설계에 앞서 형상기억합금의 특성을 미리 결정해야 하며, 트레이닝을 통한 형상기억합금 거동의 안정화와 특성실험이 필요하다.

† 책임저자, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : mhcho@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-1693, Fax : (02) 886-1693

* 서울대학교 기계항공공학부

본 연구에서는 온도와 잔류응력에 따른 형상기억합금의 특성에 초점을 맞추어, 다양한 인장실험과 양방향 효과(Two-way effect) 및 온도 변화율에 따른 특성을 파악하였다. 위 특성실험과 물성치를 바탕으로 양방향 효과를 이용한 간단한 작동기(Simple Smart Wing Actuator)를 제작하여 적용하였고, 마지막으로 형상기억합금의 구성방정식을 이용하여 현상학적인 모델과 열기계적인 모델을 이용하여 형상기억합금의 거동을 예측하고 분석하였다.

2. 형상기억합금 특성실험

2.1 인장실험(Tension Test)

2.1.1 실험방법

형상기억합금의 거동은 온도와 응력에 의존됨으로 특성 및 물성치 파악을 위하여 다양한 온도 하에서 인장실험을 실시하였다. 본 실험에서는 지름이 0.36mm이고 작동기 사용에 적합한 와이어를 사용하였다. 실험에 앞서 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimeter)를 통하여 비응력 하에서의 대략적인 상변이 온도를 측정하였으며, INSTRON5565와 자제 제작한 챔버(Heat-cool chamber)를 이용하여 -30~60℃의 범위에서 5℃ 간격으로 각각의 응력-변형률 관계를 측정하였다. 그러나 Fig. 1과 같이 반복적인 하중에 대해 상변이 응력(Transformation stress)이 낮아지며 영구변형이 누적되는 경향을 보인다. 따라서 인장실험에 앞서 오스테나이트 끝온도(Austenite finish

temperature) 이상에서 하중에 의한 트레이닝을 50회 실시하여 영구변형을 최소화하고 상변이 응력이 안정화 되도록 하였다. 매 실험 시 초기 마르텐사이트 상을 제거하기 위하여 비응력 상태에서 오스테나이트 끝 온도 이상으로 가열하였고 인장실험간 정확한 온도변화를 측정하기 위하여 5개의 열전대(K-type thermocouple)를 이용하였다.

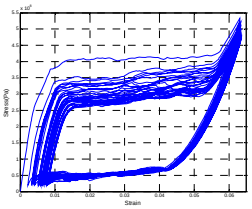


Fig. 1 Stress-induced training 50cycles at 30℃

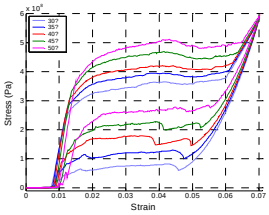


Fig. 2 Pseudoelasticity at T>Af

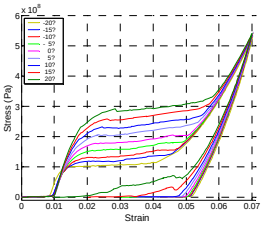


Fig. 3 Shape memory effect at t<Af

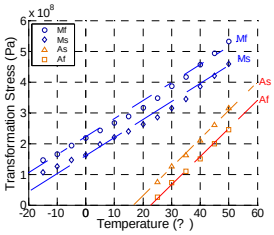


Fig. 4 Transformation stress versus temperature

2.1.2 실험결과

Fig. 2,3의 형상기억합금의 초탄성 효과와 형상기억효과에 대한 그래프를 통하여 트레이닝된 형상기억합금 와이어의 최대 상변이 변형률(약 0.04)과 온도에 따른 형상기억합금의 강성계수(Young's modulus)를 확인하였고, Fig. 4과 같이 상변이 응력과 온도를 통하여 하중 트레이닝된 와이어의 상변이 온도와 응력과의 관계를 예측하였다.

2.3 양방향 효과(Two-way experiment)

2.3.1 실험방법

온도사이클(Thermal cycling)에 의한 형상기억합금 와이어의 트레이닝 실험장치 구성은 Fig. 5과 같다. 형상기억합금 와이어를 지름이 작은 와이어에 적합하도록 자체 제작된 고정장치(Clamp)에 의해 양끝을 고정하고, 와이어의 하단부에는 일정한 하중을 위한 추(4, 4.5, 5, 6, 6.5, 7kg)를 연결하였다. 와이어의 온도는 중앙부분에 연결되어 있는 열전대를 이용하여 측정하였고, 형상기억합금 와이어의 온도변화는 직류전원공급기(DC Power Supply)를 이용하여 와이어 양단에 전류를 흘려 전기적 저항효과(Joule's Effect)를 이용하여 가열하고, 냉각시에는 전류량 조절을 통한 자연냉각을 실시하여 가열과 대칭을 이루도록 하였다. 또한 컴퓨터를 이용하여 온도 변화율을 주기당 30~1000초로 변화시켜 실험을 실시하였다. 형상기억합금은 온도변화에 따라 상하로 반복적인 움직임을 갖게 되며 이러한 길이 변화를 레이저를 이용한 변위측정계(LVDT)를 이용하여 측정한다.

따라서 트레이닝과 적용된 하중(Dead Load), 안정화되기 위한 트레이닝 횟수, 상변이에 의한 변형률, 영구 변형률과의 관계를 확인하였다. 또한 다양한 온도 변화율에 따른 실험을 통하여 온도와 변형률 그리고 이력곡선(Hysteresis)의 변화를 확인하였다.

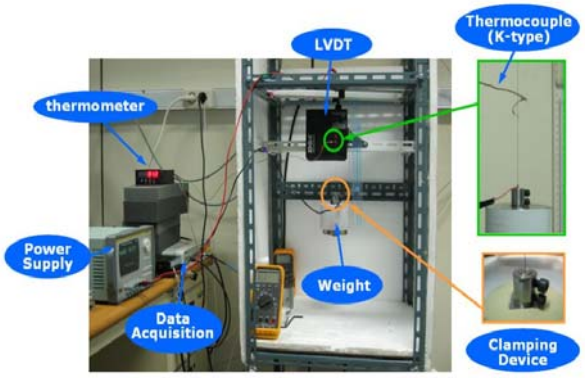


Fig. 5 The experimental Set-up of Two-way Training

2.3.2 실험결과

온도에 의한 트레이닝에 의한 형상기억합금 와이어의 변형률은 Fig 6(a)와 같이 점점 증가하며 50~100cycle후에 거의 안정화된 상태에 이르게 된다. 변형률은 Fig. 6(b)와 같이 상변이에 의한 변형률과 영구변형에 의한 변형률로 나누어지며, 상변이에 의한 변형률은 3.5~3.7%로 거의 일정하게 나타난다. 이것은 온도에 따라 거시적인 변형률을 일으키는 마르텐사이트 상변이를 유도하는 전위(Dislocation)의 재배열에 따른 소성변형의 포화상태(The saturation of plastic strain)에 이르기 때문이다.

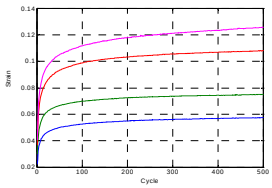


Fig. 6(a) A plastic strain during 500 thermal cycling at 494, 550, 597, 650MPa

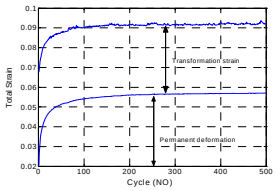


Fig. 6(b) A transformation and plastic strain during 500 thermal cycling at 446MPa

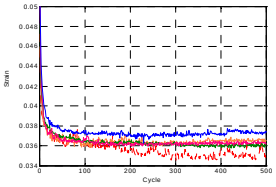


Fig. 6(c) A transformation strain at 446, 494, 550, 597, 650MPa

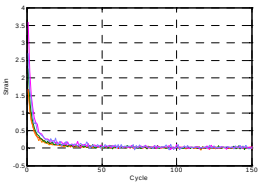
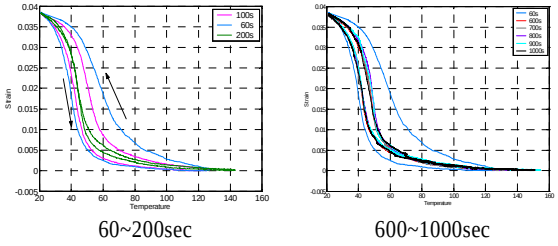


Fig. 6(d) The amount of plastic strain accumulated at each cycle

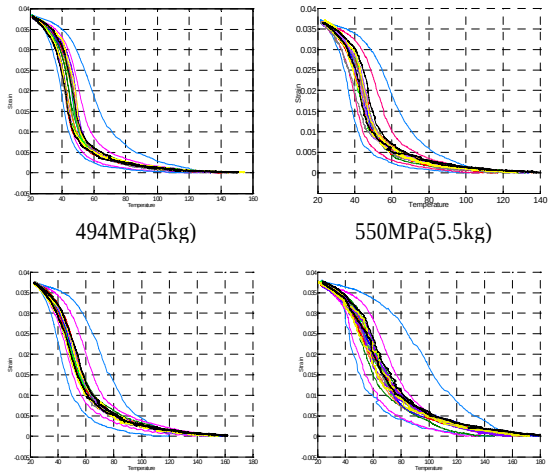
Fig. 7은 온도 변화율에 따른 실험결과를 보여준다. 온도 변화율이 60~200초인 빠른 경우에는 변형률-온도 곡선은 반시계 방향으로 움직이며 이력곡선은 매우 넓게 나타난다. 온도 변화율이 느려질수록 이력곡선은 점점 작아지며 약 200~300초 사이에서 완전히 사라지며, 보다 느린 변화율에서는 시계방향으로 움직이며 이력곡선은 일정한 양으로 고정되어 변화하지 않게 된다. 또한 Fig. 8과 같이 잔류응력이 클수록 상변이 변형률-온도 곡선의 기울기가 낮아지며, 폐곡선의 방향이 점점 고온방향으로 이동하는 경향을 보인다. 이것은 잔류응력 증가에 따라서 상변이 온도가 증가하기 때문이다.

위에서 나타난 온도 변화율에 따른 형상기억합금의 시간증분효과(Rate effect)는 좀더 다양한 원인을 고려해야 하지만, 구조적으로 접근할 경우 형상기억합금의 시간에 따른 온도 분포(Thermal distribution)가 발생하기 때문이라고 추정된다. 이는 외부환경 조건과 와이어 내의 열전도 및 대류현상 때문이며, 이로 인하여 서로 다른 온도에 따라 변형률이 다르게 나타나기 때문이다.



60~200sec 600~1000sec

Fig. 7 Strain versus temperature at different rates



494MPa(5kg) 550MPa(5.5kg)

597MPa(6kg) 650MPa(6.5kg)

Fig. 8 Strain versus temperature at each residual stress at each thermal cycling time

3. 형상기억합금을 이용한 작동기 응용

3.1 작동기 구성

위에서의 실험결과를 이용하여 Fig. 9과 같이 간단한 날개 형상의 작동기(Simple smart wing actuator)를 제작하여 실험을 실시하였다. 본 작동기는 지름이 0.36mm이고 길이가 150mm인 형상기억합금 와이어를 사용하였고, 토크 스프링(Torque spring)은 회전축에 연결되어 형상기억합금 와이어에 잔류응력을 주고, 와이어의 위 부분은 회전축(Rotation shaft)에 아래 부분은 하중 측정이 가능한 로드셀에 연결하였다. 길이조절장치(Displacement controller)와 로드셀을 연결하여 형상기억합금 와이어의 초기 길이를 변화시켜 잔류응력을 조절할 수 있도록 하였고, 직류전원공급기를 이용하여 온도를 변화시키고 이에 따른 형상기억합금의 길이변화를 이용하여 날개의 회전각(Attack angle)을 변화시켰다.

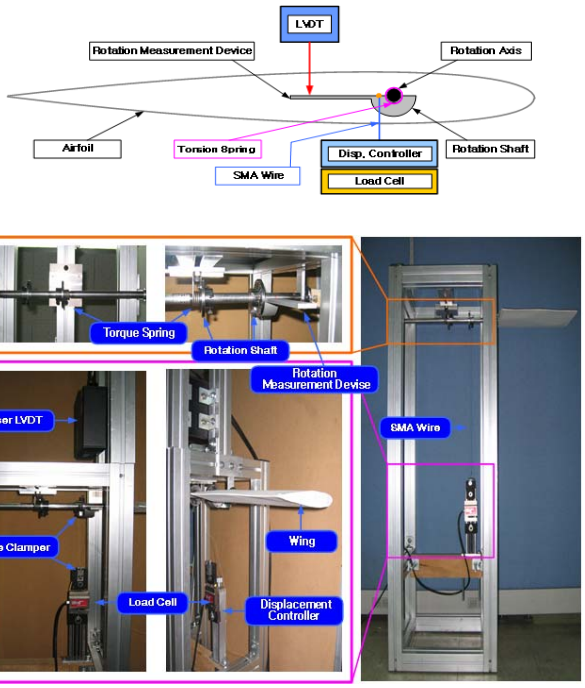


Fig. 9 The schematic of simple smart wing

3.2 작동시험 결과

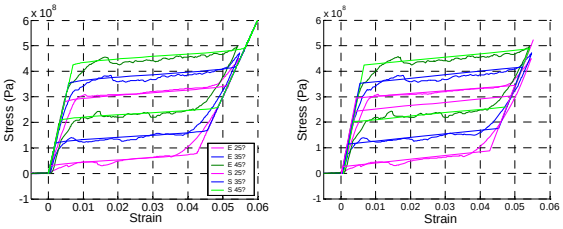
작동기의 실험에 앞서 반복에 의한 영구변형을 최소화하기 위해 650MPa하에서 500번의 트레이닝된 형상기억합금 와이어를 사용하였고 초기 마르텐사이트 상을 제거하기 위하여 비응력 하에서 오스테나이트 끝 온도 이상으로 가열하였다.

Fig. 10 The change of the attack angle

최초 온도 변화율을 20, 100, 300, 900 sec/cycle로 변화시켜 실험을 실시한 경우, 앞의 실험결과와 같이 이력곡선은 최초 넓게 나타나며, 온도 변화율이 느려질수록 점점 작아지며, 그 이상에서는 일정한 상태로 고정되게 된다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 본 작동기에서는 날개의 회전각을 약 10° 정도 변화시켰으며, 가장 빠른 작동을 하는 경우는 20초의 주기를 갖고, 온도 범위는 30～120℃로 좀 더 빠른 움직임을 구현하기 위해서는 냉각시간을 단축할 수 있는 장치가 필요하다.

4. 수치해석

4.1 형상기억합금 거동의 전산모사



(a) Using Brinson model (b) Using Lagoudas model

Fig. 11 The numerical simulation of SMA one-way behavior

형상기억합금의 인장실험을 통하여 얻은 특성과 물성치를 바탕으로 현상학적인 모델인 Brinson 모델(Fig.11(a))과 열-기계학적 모델인 Lagoudas 모델(Fig.11(b))을 이용하여 일방향 거동을 전산모사 하였으며 비교적 정확한 예측 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 형상기억합금 거동의 수치모사를 위해 형상기억합금의 특성과 재료 물성치를 위한 실험 장치를 구성하였고 하중-온도 트레이닝, 온도시간증분 효과, 잔류응력 하에서 양방향 효과 등을 포함하는 다양한 실험을 수행하였고 이를 통하여 거동 전산모사를 수행하였다. 그리고 이러한 결과들을 이용하여 간단한 작동기를 제작, 작동시험을 수행하였다.

실험을 통하여 트레이닝 동안 축적되는 영구변형은 약 100회의 반복으로 작동기로 사용가능한 안정화 상태에 이르고 양방향 변형률양은 항상 일정하며 잔류응력에 따라 변형률-온도곡선의 기울기가 완만해짐을 관찰할 수 있었다. 또한 온도주기시간에 따라 가열과 냉각 온도분포의 차이로 결과 되어지는 시간증분효과를 관찰하였다. 끝으로 형상기억합금 와이어를 이용한 간단한 작동기의 적용을 통하여, 형상기억합금은 반복적인 작동에 있어 우수한 성능을 가짐을 알 수 있다. 그러나 반복 작동동안의 영구변형의 축적과 외부환경에 쉽게 영향을 받는다는 것이 적용의 한계점으로 관찰되었다.

후 기

본 연구는 2007년도 두뇌한국 21 사업과 국방과학연구소의 기초연구과제(ADD-07-05-03)에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Birman, V., 1997, “Review of mechanicsof shape memory alloy structures”, Applied Mechanics Reviews 50, No.11, 629-649.

(2) Maenghyo Cho, Sanghaun Kim, 2005, “Structural Morphing Using Two-Way Shape Memory Effect of SMA”, Int. J. Solids Struct. 45, pp. 1759-1776.

(3) S. Kim, M. Cho, 2007, "Numerical simulation of double SMA wire actuator using two-way shape memory effect of SMA", Smart Mater. Struc. 16, pp. 372-381‘

(4) 김상헌, 조맹효, 김철, 2004, “형상기억합금을 이용한 더블엑추에이터의 수치해석”, 항공우주공학회지, 제32권, 제2호, pp. 56-65.

(5) 김상헌, 조맹효, 2007, “반복적인 작동을 위한 형상기억합금의 특성 실험과 거동 전산 모”, 대한기계학회논문집 A권, 제31권, 제3호, pp. 373-379.

(6) 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, US

(7) Shaw, J. A., 2000, "Simulations of localized thermo-mechanical behavior in a NiTi shape memory alloy", International Journal of Plasticity, Vol. 16, pp. 541-56‘

(8) J. G.. Boyd and D. C. Lagoudas, 1996. “A thermodynamic constitutive model for the shape memory alloy materials Part Ⅰ, the monolithic shape memory alloy”, Int. J. Plasticity 12, 805-842.

(9) F. Auricchio, S. Marfia and E. Sacco, “Modeling of SMA materials: Training and two way memory effect”, Computers & Structures 81, 2003, pp. 2301-2317.