

## 압축 하중사이클을 이용한 양방향 형상기억효과 특성 연구

유 영 익<sup>1)</sup> · 김 현 철<sup>1)</sup> · 이 정 주<sup>\*1)</sup> · 이 우 용<sup>2)</sup>

한국과학기술원 기계공학과<sup>1)</sup> · 국방과학연구소<sup>2)</sup>

### Experimental Study on the TWSME Characteristics using Compressive Loading Cycles

YoungIk Yoo<sup>1)</sup> · Hyunchul Kim<sup>1)</sup> · JungJu Lee<sup>\*1)</sup> · WooYong Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

<sup>2)</sup>Agency of Defence Development, 462 Jochiwongil, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea

(Received 4 December 2008 / Accepted 13 February 2009)

**Abstract** : Actuators using shape memory alloys use the one-way shape recovery stress. But when external load is applied the accumulated plastic strain induced by repeated deformation is the factor of generation of uncorrect recovery stress and unreliability. To solve this problem, two-way shape memory effect (TWSME) is considered. TWSME induced by plastic deformation have advantages including simple heating cycle without external force and enough recovery force for using actuators. but there is no research on cylinder-type or tube-type shape memory alloy actuators using two-way shape memory effect until now. Therefore in this study, characteristics of two-way shape memory effect is verified through the compression experiments using cylinder-type and tube-type specimens

**Key words** : Shape memory alloy(형상기억합금), Two-way strain(양방향 변형률), Two-way shape memory effect(양방향 형상기억효과), Two-way recovery stress(양방향 회복력)

### 1. 서 론

형상기억합금에 대한 연구는 1960년대에 NiTi 합금의 형상기억효과(shape memory effect:SME)가 발견된 이래로 활발히 진행되어 왔다. 여기서 형상기억효과란 변형이 어느 정도 이상으로 커졌을 때 가열을 하게 되면 변형전의 형상으로 되돌아오는 성질을 말한다. 이와 같은 특성으로 인하여 지능형 구조물에 많이 적용되었으며, 복합재료의 보강재나 센서로 사용되면서 연구가 활발히 진행되었다.<sup>1,2)</sup> 또한 단위 부피당 많은 힘을 낼 수 있고, 내부식성과 생화학적 적합성이 뛰어나기 때문 아니라<sup>3)</sup> 100,000사이클 이상의 긴 사용수명을 갖기 때문에 작동기

(actuator)로서 우수한 특성을 갖는다.<sup>4,5)</sup> 이러한 특징으로 인하여 1969년 미국의 레이첼 사(Raychem corp.)가 형상기억효과를 이용한 파이프 커플링을 실용화한 이후 군사 및 항공 우주 분야의 유도 미사일, 발사체, 인공위성 등의 비폭발식 분리장치나 가정에서 사용하는 온수 밸브, 구조물의 진동특성 저감장치, 그리고 자동차 트랜스미션 냉각장치 등 여러 분야에서 작동기로 이용되고 있으며, 현재 자동차 조향계의 진동특성을 저감시키기 위한 장치와 구조가 간단한 주유구 개폐장치 등 형상기억합금을 이용한 연구가 진행 중에 있다.

현재까지 형상기억합금을 작동기로 사용하게 될 때 모두 일방향 형상 회복력만을 사용하였다. 이것은 형상기억합금 작동기에 큰 변형을 일으킨다

\*Corresponding author, E-mail: leejungju@kaist.ac.kr

을 열을 가하여 회복력을 발생시키는 것이다. 그러나 형상기억합금은 하중을 가할 때 마다 소성변형이 발생하게 되고 이러한 소성변형이 반복적으로 쌓이게 되어 정확한 회복력을 발생시킬 수가 없게 되어 신뢰성이 떨어지며 매번 압축하중을 가해주어야만 하는 단점을 갖고 있다. 하지만 소성변형에 의해 발생하는 양방향 형상기억효과(Two-way Shape Memory Effect)를 이용한다면 하중을 가해야 하는 과정이 없고 간단한 열 사이클만을 통해 작동기를 운영할 수 있는 장점을 가지고 있으나 양방향 형상기억효과를 이용한 부피가 큰 실린더나 튜브 형상의 작동기 연구는 전문한 실정이다.

본 연구에서는 표준 시편으로 압축 반복하중에 대한 형상기억합금의 양방향 형상기억효과 특성을 파악하고, 실제 작동기 형상의 튜브형 형상기억합금을 제작하여 양방향 형상기억효과에 의한 양방향 변형률(Two-way strain)과 양방향 회복력(Two-way Shape Recovery Stress)을 정량적으로 측정하였다.

## 2. 형상기억합금

형상기억합금은 온도와 응력에 따라 크게 2가지 상으로 존재한다. 높은 온도에서는 오스테나이트(austenite)상으로 존재하며, 낮은 온도에서는 마르텐사이트(martensite)상으로 존재한다. 또한 마르텐사이트 상은 응력에 따라 쌍정(twinned)구조와 역쌍정(detwinned)구조로 나뉘며, 이러한 결정학적인 구조변화는 형상기억합금의 거시적인 변형을 가져온다. 응력이 없는 경우 형상기억합금은 네 개의 상변태 온도가 존재하며, 다음과 같이 정의된다.

$M_s$ : 마르텐사이트 상변태 시작온도

$M_f$ : 마르텐사이트 상변태 끝온도

$A_s$ : 오스테나이트 상변태 시작온도

$A_f$ : 오스테나이트 상변태 끝온도

거시적인 측면에서 형상기억합금의 특성은 크게 형상기억효과와 초탄성효과(Superelasticity:SE) 2가지로 나눌 수 있다. 첫째로 형상기억효과는 잔류변형이 남아있는 상태에서 적절한 온도이상으로 가열하였을 때 변형전의 상태로 되돌아가는 현상을 말하며 일방향 형상기억효과라고도 한다. 만약 잔류변형이 남아있는 상태에서 시편이 변형을 일으키지

못하도록 구속한 후에  $A_f$ 이상으로 가열할 경우 변형전의 형상으로 돌아가고자 하는 형상회복력이 발생한다. 이것을 형상기억효과에 의한 일방향 형상회복력이라 한다.

둘째로 초탄성효과는 높은 온도 환경에서 최초의 오스테나이트 상에서 응력을 증가시켰을 경우 역쌍정구조 마르텐사이트 상으로 상변이하게 되고 현재 환경이 고온이므로 응력을 제거시키는 과정에서 후방향 상변이가 발생하여 원래의 형상으로 되돌아가는 현상이다. 이때 응력-변형률 선도에서 이력현상(hysteresis)이 발생한다.

그 외에 기타 특성으로 양방향 형상기억효과란 과도한 변형이나 반복적인 변형이 형상기억합금에 가해져 합금 내에 전위(dislocation)밀도가 높아지게 되고 이로 인해 잔류응력장이 형성되어 온도에 따른 가역적이고 자발적인 변형을 가져오는 현상을 말한다.<sup>6,7)</sup> 이것은 일방향 형상기억효과와는 다르게 Fig. 1(a)와 같이 고온의 모상의 형태뿐만이 아니라 저온에서의 변형된 형태 모두를 기억시킬 수 있다.

이 때 무하중 상태에서 저온과 고온에서의 변형 차이를 양방향 변형률이라고 하며(Fig. 1(b)), 양방향 형상기억효과를 갖는 형상기억합금이 구속된 상태에서  $A_f$ 이상으로 가열될 경우 고온의 모상의 형상으로 돌아가고자 하는 양방향 형상회복력이 발생한다. 양방향 형상기억효과는 고유한 형상기억합금

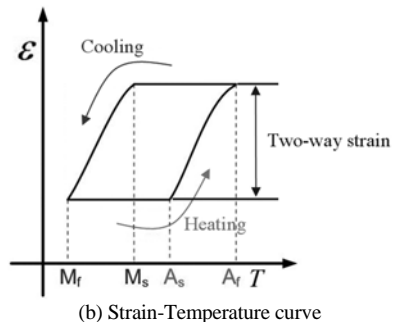
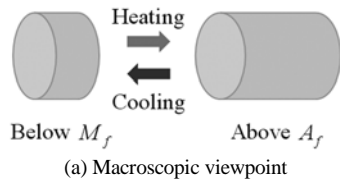


Fig. 1 Behavior of two-way shape memory effect

의 물성치가 아니기 때문에 양방향 형상기억효과를 생성시키기 위해 현재까지 약 20가지 정도의 방법이 연구되어왔다.<sup>8)</sup>

### 3. 양방향 형상기억효과 특성 실험

#### 3.1 실험 방법

본 실험에서는 사용한 재료는 Nitinol Devices and Components사의 SM495 형상기억합금을 사용하였다. SM495는 Ni(54.5 wt%)-Ti 합금이며 상온에서 형상기억 효과를 보인다. 제조사에서 제공하는 재료의 기본적인 물성은 Table 1에 나타내었다. 압축에서의 양방향 특성을 얻기 위해 ASTM E9 규격의 원통형 시편을 사용하였으며 압축실험을 통해 양방향 형상기억효과를 유도하였다. 압축실험은 최대 변형률에 따라 5번의 부하, 제하, 가열, 냉각을 반복하는 사이클을 수행하여 양방향 변형률의 생성정도를 확인하였다. 시편의 지름은 20mm, gage length는 60mm이다. 또한 실제 작동기에 적용하기 위해 작동기 형상을 갖는 외경 20mm, 내경 10mm, 길이 60mm 튜브형 시편을 제작하여 압축실험을 수행하여 양방향 형상기억효과를 유도한 후 양방향 변형률을 측정하여 비교하였다. Fig. 2는 각각의 시편의 형상을 나타낸다. 두 시편 모두 600°C에서 30분 동안 풀림(Annealing)처리를 하였으며 그 후에 쿨링(quenching)을 하였다. 변형률을 측정하기 위하여 strain gage를 사용하였으며 시편을 가열하기 위해 유연하고 구부릴 수 있는 히터 2개를 전원 공급 장치에 연결하여 시편 둘레에 부착하였고 열 손실을 방지하기 위해 히터 둘레에 다시 절연 물질인 stretch tape을 감쌌다. 이 tape은 히터와 시편을 밀착시킬 뿐만 아니라 시편과 외부 공기를 단열시켜서 가열 효율을 높여준다. 온도는 K type thermocouple을 spot welding 방식으로 부착하여 측정하였다. 압축실험은 MTS (Material Test System)를 사용하였으며 이 장비의 축 방향 최대하중은 250kN이다. 전체 실험 구성은 Fig. 3과 같다. 본 실험에서는 변위 제어 방식으로 변위 변화율을 0.125mm/min로 설정하여 수행하였다. 실험에 앞서 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimetry : DSC)를 통하여 무응력 하에서의 상변이 온도를 측정하였으며 결과는 Table 2와 같다.

Table 1 Material data of NiTi(SM495)

Properties	SM495
Melting point	1310°C
Density	6.5g/cm <sup>3</sup>
Electrical resistivity	76μohm-cm
Elastic modulus	28-41GPa
Coefficient of thermal expansion	6.6×10 <sup>-6</sup> / °C
Ultimate tensile strength	1100MPa
Total elongation	10%
Transformation temperature	60°C

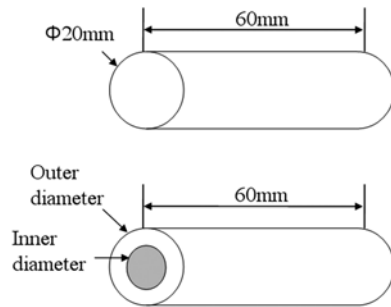


Fig. 2 Cylinder-type and Tube-type specimens

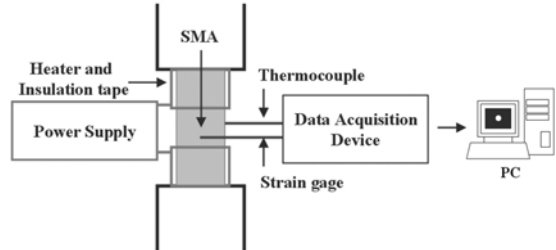


Fig. 3 Experimental setup for compression test

Table 2 Transformation Temperatures from DSC

$M_f$	$M_s$	$A_s$	$A_f$
35.7°C	52.3°C	66.2°C	87.5°C

#### 3.2 실험 결과 및 고찰

##### 3.2.1 압축하중 사이클에 의해 유도된 양방향 형상기억효과 특성

두 시편 모두 최대 압축 변형률을 1%에서 6%까지 1%간격으로 변화시켰으며, Fig. 4는 원통형 시편의 각각의 최대 변형률에 따라 5번의 부하, 제하, 가열, 냉각 사이클을 수행한 후 무하중 상태에서 가열과 냉각에 의한 열 사이클을 통해 얻은 변형률과 온

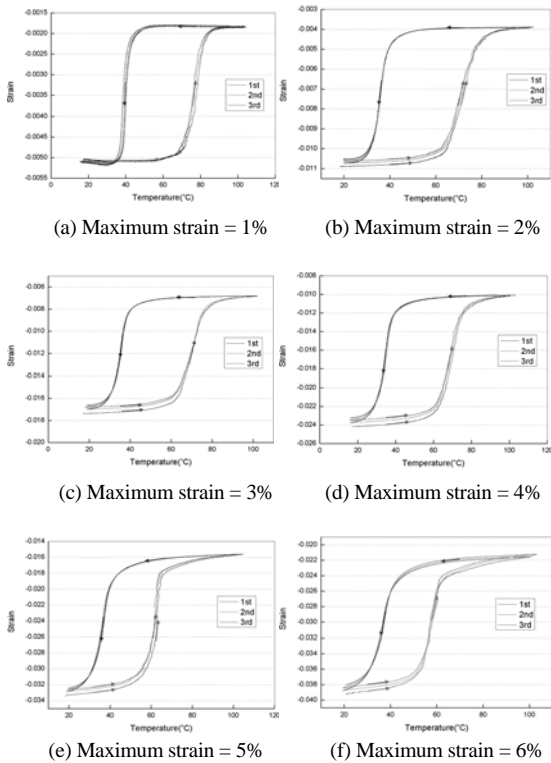


Fig. 4 Two-way strain-temperature curves obtained by compression test (Cylinder-type)

도 그래프이다. 각각의 양방향 변형률을 살펴보면, 최대 변형률 1% 후에는 0.33%, 최대 변형률 2%, 3%, 4%, 5%, 6% 후에는 각각 0.65%, 0.99%, 1.35%, 1.7%, 1.7%로 나타났다.

최대 변형률이 증가할수록 양방향 변형률이 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 5). 그러나 최대 변형률 6%에서는 양방향 변형률이 더 이상 증가하지 않고 5%에서와 같은 결과를 나타내어 양방향 변형률이 수렴하는 것을 확인하였다. 그리고 양방향 변형률 생성에 의한 양방향 회복력을 측정하기 위해 시편에 약 5MPa의 작은 압축응력을 주어 양끝 변위를 구속시킨 후 열 사이클을 실행하였다. Fig. 6은 각각의 최대 변형률에 따른 양방향 회복력을 측정된 결과이다.

최대 변형률이 증가함에 따라 양방향 회복력도 증가함을 알 수 있으며 최대 -210MPa로 측정되었다.

또한 실제 작동기 형상의 외경 20mm, 내경 10mm, 길이 60mm 형상기억합금을 제작하여 원통형 시편

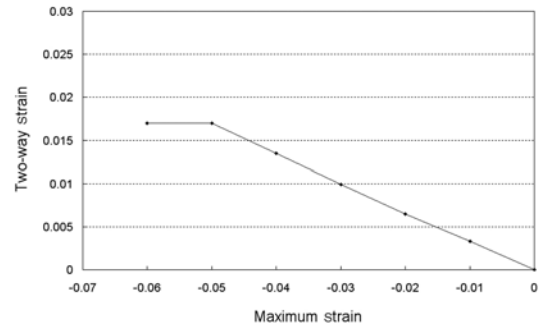


Fig. 5 Two-way strain and maximum strain relation (Cylinder-type)

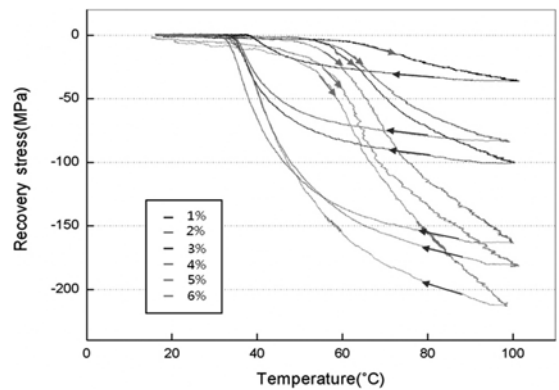


Fig. 6 Recovery stress-temperature curves obtained by compression test (Cylinder-type)

과 같은 방법으로 양방향 형상기억효과를 유도하여 양방향 변형률과 회복력을 측정하였다.

최대 변형률 1%부터 각각의 양방향 변형률은 0.3%, 0.75%, 1.20%, 1.50%, 2.30%, 2.30%로 측정되었다. Fig. 7과 같이 원통형 시편과 마찬가지로 최대 변형률에 따라 비례적으로 양방향 변형률이 증가하며 최대 변형률 5%에서 수렴하는 것을 확인하였다. 그러나 원통형 시편보다 최대 양방향 변형률이 더 크게 생성되는 것을 볼 수 있으며, 이것은 튜브형 시편이 원통형 시편보다 균질하게 열처리되었음을 나타낸다. 양방향 회복력은 최대 -330MPa로 측정되었다.

두 시편을 통하여 형상기억합금은 압축 하중에 의해 최대 변형률 5%까지는 비례적으로 양방향 변형률이 증가하고 있으며 그 이후는 수렴하는 것을 알 수 있다.

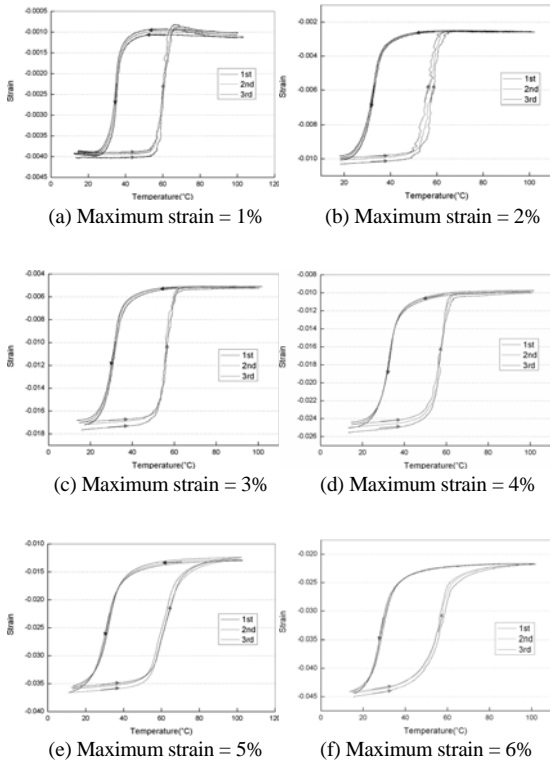


Fig. 7 Two-way strain-temperature curves obtained by compression test(Tube1)

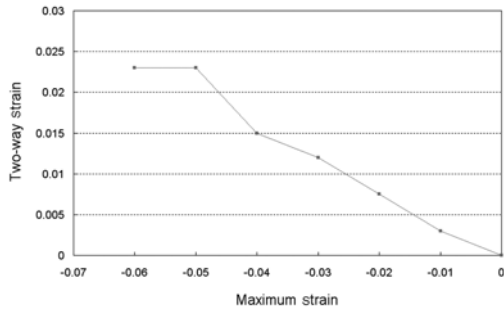


Fig. 8 Two-way strain and maximum strain relation(Tube1)

### 3.2.2 시편 두께에 따른 양방향 형상기억효과 특성

시편 두께에 따른 양방향 형상기억효과 특성을 알아보기 위해 외경 10mm, 내경 6.5mm, 길이 60mm 시편과 외경 9mm, 내경 6.5mm, 길이 60mm 시편을 이용하여 압축 실험을 통해 양방향 형상기억효과를 유도하였다. 외경 20mm는 Tube1, 외경 10mm는 Tube2, 외경 9mm는 Tube3라 하고 각각의 두께는 5mm, 1.75mm, 1.25mm가 된다. Fig. 6과 Fig. 7에서

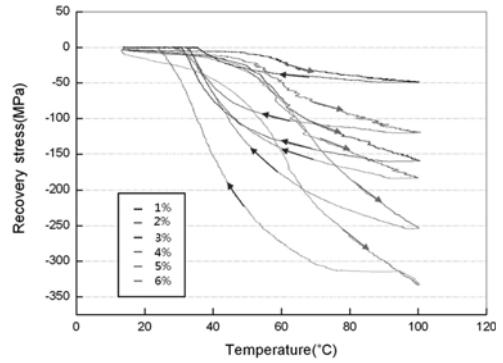


Fig. 9 Recovery stress-temperature curves obtained by compression test(Tube1)

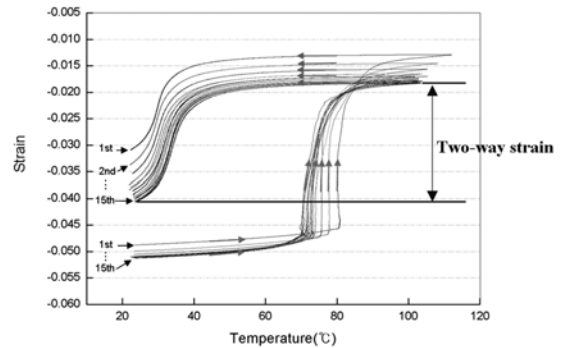
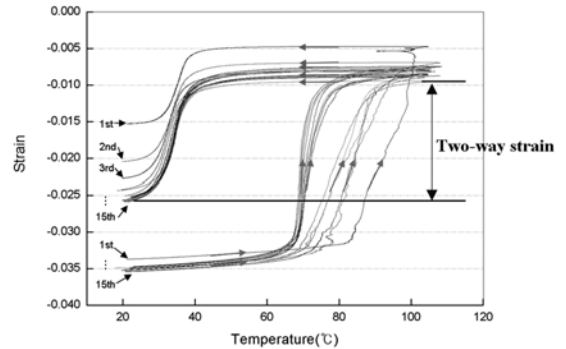


Fig. 10 Recovery strain-temperature curves obtained by compression test(Tube2)

양방향 변형률이 최대 변형률 5%에서 수렴하는 것을 확인하였으므로 Tube2는 최대 변형률을 4%와 6%로 압축 실험을 수행하였으며 Tube3은 최대 변형률 5%로 수행하였다. Fig. 11은 두 시편의 각 최대 변형률에서 압축실험을 수행할 때 하중을 부하하고

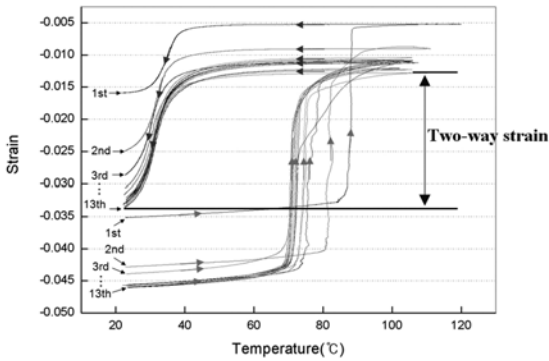


Fig. 11 Recovery strain-temperature curves obtained by compression test(Tube3)

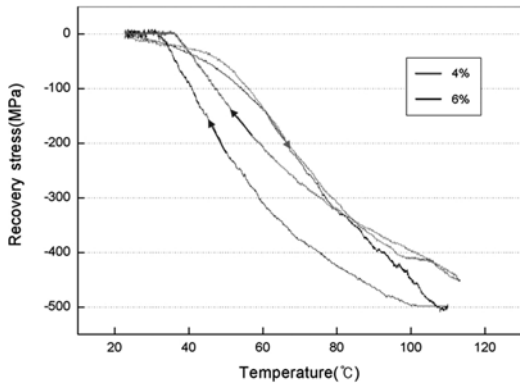


Fig. 12 Recovery stress-temperature curves obtained by compression test(Tube2)

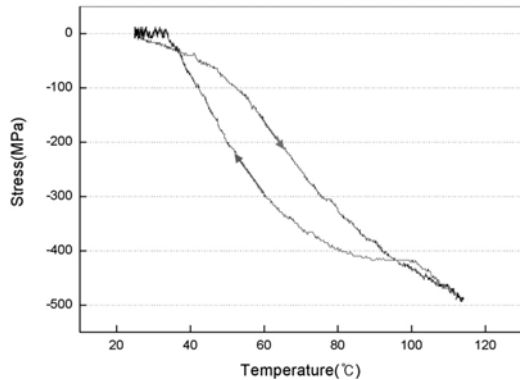


Fig. 13 Recovery strain-temperature curves obtained by compression test(Tube3)

제하한 후 잔류변형이 남아있는 상태에서 열 사이클을 실행하여 얻은 변형률과 온도 그래프이다.  $A_f$  이상에서  $M_f$  이하로 냉각될 때 발생하는 변형을 양

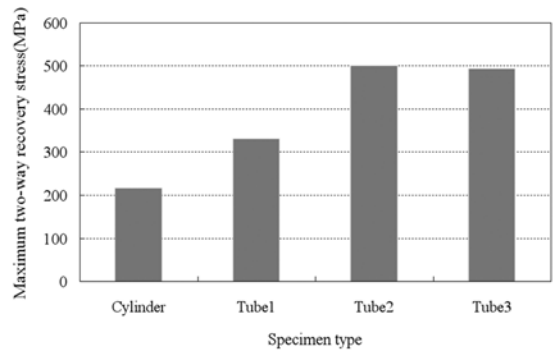


Fig. 14 Maximum two-way recovery stress of the specimens

방향 변형률이라 하고, 양방향 변형률이 수렴할 때까지 압축실험을 반복하였다. Tube2의 양방향 변형률은 각 최대 변형률에서 1.73%와 2.22%로 측정되었으며, Tube3은 2.2%로 측정되었다. 또한 각각의 시편에서 측정된 최대 양방향 회복력은 -500MPa과 -493MPa로 나타났다(Fig. 12, 13). 지금까지의 실험 결과로 보아 튜브형 형상기억합금의 경우 시편 두께가 작아지더라도 최대 변형률 5%와 6%에서 양방향 변형률이 거의 변하지 않고 일정하게 나타났다.

그러나 양방향 변형률은 거의 같지만 회복력에서 차이가 발생하는 것을 관찰하였다(Fig. 14). 이것은 열처리에 의한 형상기억합금 단면적의 불균질을 원인으로 들 수 있다. 형상기억합금의 부피가 클 경우 열처리를 할 때 외부와 내부에 균일하게 열처리를 할 수 없는 단점을 갖고 있어 일반적으로 인장 시험에서는 와이어나 얇은 박판 형태를 사용하고 있다.<sup>9)</sup> 본 연구에서 사용한 Tube2와 Tube3의 최대 양방향 회복력은 와이어를 이용한 기존 인장 시험에서 얻을 수 있는 최대 일방향 회복력과 거의 비슷한 수준이므로<sup>10)</sup> 두 시편은 균질하게 열처리 되었다고 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 압축에서의 형상기억합금 양방향 형상기억특성을 얻기 위한 기초 실험을 수행하였다. 표준 원통형 시편과 작동기 형상의 튜브형 시편으로 최대 압축 변형률에 따른 양방향 변형률과 양방향 회복력을 측정하였다. 실험 결과 형상기억합금은 압축 최대변형률 5%에서 양방향 변형률이 수

림하는 것을 확인 하였고, 튜브형 시편의 경우 두께에 따라 최대 양방향 변형률은 거의 일정하게 나타나지만 양방향 형상회복력은 두께가 작을 때 커진 것을 확인하였다. 이것은 시편의 두께가 작을수록 단면적이 균질하게 열처리됨을 나타내며 Tube2와 Tube3에서는 균질한 와이어를 이용한 인장시험에서 얻을 수 있는 큰 회복력을 측정할 수 있었다.

향후 계획으로는 양방향 형상기억효과에 직접적으로 영향을 주는 소성변형량과 양방향 변형률과 회복력의 관계를 고찰하고, 형상기억합금의 두께에 따라 단면적의 균질성을 높일 수 있는 열처리 방법을 연구하고자 한다.

### References

- 1) T. H. Jeong, D. J. Lee and H. G. Kim, "Development of Al Matrix Composite using Shape Memory Alloy," Transactions of KSAE, Vol.6, No.6, pp.53-62, 1998.
- 2) A. Baz, S. Poh and J. Gilheany, "A Multi-mode Distributed Sensor for Vibrating Beams," Journal of Sound and Vibration, Vol.165, No.3, p.481, 1993.
- 3) L. C. Chang and T. A. Read, "Elastic Deformation and Diffusionless Phase Changes in Metals-The Gold-Cadmium Betaface," American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Vol.191, p.47, 1951.
- 4) W. Huang, "Onthe Selection of Shape Memory Alloys for Actuators," Materials and Design, Vol.23, pp.11-19, 2002.
- 5) P. A. Neukomm, H. P. Bornhauser, T. Hjo-chuli, R. Paravicini and G. Schwarz, "Characteristics of Thin-wire Shape Memory Actuators," Sensors and Actuators, Vol.21, pp.247-252, 1990.
- 6) A. Falvo, F. Furgiele and C. Maletta, "Hysteresis Modeling of Two-way Shape Memory Effect in NiTi Alloys," Meccanica, Vol.43, pp.165-172, 2008.
- 7) T. W. Duerig, K. N. Melton, D. Stockel and C. M. Wayman, Engineering Aspect of Shape Memory Alloys, pp.195-206, Butterworth-heinemann, 1990.
- 8) X.M. Zhang, J. Fernandez and J. M. Guilemany, "Role of External Applied Stress on the Two-way Shape Memory Effect," Materials Science and Engineering: A, Vol.438-440, pp.431-435, 2006.
- 9) L. Orgeas and D. Favier, "Non-symmetric Tension-compression Behaviour of NiTi Alloy," Journal of Physics, Vol.5, No.8, pp.605-610, 1995.
- 10) J. Van Humbeeck, M. Chandrasekaran and L. Delaey, "Shape Memory Alloys: Materials in Action," Endeavour, New Series, Vol.15, No.4, pp.148-154, 1991.