

논문 98-7-4-08

## 복합재료 보에 삽입된 Ni-Ti 형상기억합금 선의 센서로의 응용을 위한 연구

이창호\*, 이정주\*, 허증수\*\*

A Study on the Application of Ni-Ti Shape Memory Alloy  
Wire Embedded in Composite Beam as a Sensor.

Chang Ho Lee\*, Jung Ju Lee\*, and Jeung-Soo Huh\*\*

## 요 약

형상기억합금은 액츄에이터로서의 우수한 특성으로 인해 공학의 많은 분야에서 사용되고 있다. 그 중의 한 예로서 복합재료 구조물에 삽입되어 지능형 복합재료 구조물의 작동소재로서 유용하게 사용될 수 있다. 형상기억합금 선의 전기저항은 변형률에 대하여 큰 영향을 받는데, 이를 이용하여 형상기억합금 선을 이들 물리량에 대한 센서로 활용할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 복합재료 보에 삽입된 형상기억합금 액츄에이터의 센서로서의 활용 가능성을 연구 조사하여 이를 변위센서로 활용할 수 있음을 밝혔다.

## Abstract

Shape Memory Alloy(SMA) has been used in many engineering fields because of its good characteristics of actuator. For example, SMA wire can be embedded easily in the polymer composite laminate and then be used as actuator for structural control. Since the strain have a significant influence on the electrical resistance of SMA wire, It is a possible to use the SMA wire as a sensor of such physical quantities. In this study, the possibility for the application of Ni-Ti SMA wire as a sensor embedded within a composite laminate is investigated.

## 1. 서 론

지능형 구조물(smart structure)이란 감지 혹은 작동 능력을 가진 지능형 재료(smart materials)들을 이용하여 구성된 구조물로서 외부의 자극에 대한 변형 및 손상을 스스로 감지할 수 있고 또한 이에 대한 적응능력을

가진 구조물을 말한다<sup>[1]</sup>. 이에 사용되는 지능형 재료는 여러 가지가 있으나 주로 광섬유(optical fiber), 전장유체(electro-rheological fluids), 압전재료(piezoelectric materials) 그리고 형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)등이 많이 사용된다. 이 중 광섬유는 주로 센서(sensor)로 사용되며 전장유체는 복합재료 등의 구조물에는 삽입이 곤란하다. 압전재료는 센서와 액츄에이터(actuator)로서의 특성이 우수하나 대변형이 힘든 단점이 있다. 형상기억합금은 센서와 액츄에이터로 모두 사용이 가능하고 대변형이 가능하다. 또한 단위 부피당 비

\* 한국과학기술원 기계공학과(Dept. of mechanical engineering, KAIST)

\*\* 경북대학교 금속공학과(Dept. of metallurgical engineering, Kyungbook Nat'l Univ.)

<접수일자 : 1998년 3월 30일>

교적 큰 에너지를 낼 수 있으며 다루기가 쉬워 낮은 주파수 영역에서 작동되는 대변형 액츄에이터로 적합하다. 1932년에 Au-Cd 합금으로부터 형상기억효과(Shape Memory Effect, SME)를 처음 발견한 이후로 지금까지 여러 종류의 금속에서 형상기억효과를 발견하였다<sup>[2]</sup>. 그러나 공학적으로 많이 쓰이는 것은 Ni-Ti 합금과 Cu-base 합금이다. 이 중 Ni-Ti 합금은 내부식성(corrosion resistance)과 생화학적 적합성(biocompatibility)이 우수하다<sup>[3]</sup>.

근래에는 이러한 형상기억합금을 지능형 구조물에 삽입되는 액츄에이터나 센서로 이용하기 위한 연구가 진행 중이다. Rogers 등<sup>[4]</sup>은 Ni-Ti 합금 선이 삽입된 복합재료 적층판의 정적 및 동적 거동을 조사하여, Ni-Ti 합금 선을 구조물의 능동제어(active structural control)에 효과적으로 이용할 수 있음을 제시했다. 이후 Baz<sup>[5][6]</sup>, Takeda<sup>[7]</sup> 그리고 Pruski 등<sup>[8]</sup>은 각각 복합재료 내에 Ni-Ti 합금 선을 삽입하여 임계좌굴하중의 증가, 전기저항과 변위 사이의 선형성 그리고 정하중과 정온 상태에서의 변위와 전기저항 관계 특성 등을 연구 발표하였다.

형상기억합금의 기계 및 전기적 특성은 온도에 따라 민감하게 변한다. 따라서 지금까지의 형상기억합금 선을 센서로 사용하기 위한 연구는 주로 일정한 온도 상태가 유지되는 실험적 환경에서 이루어져 왔다. 그러나 실제 환경에서의 사용시 일정한 온도의 유지가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 복합재료 보에 삽입된 형상기억합금 액츄에이터를 변위센서로 사용하기 위하여 이의 온도에 의한 영향을 줄이기 위한 연구를 수행하였다. 온도 변화에 따른 형상기억합금 선의 변형률과 저항 변화율의 비의 변화를 알아 보기 위하여 항온 인장 실험을 수행하였다. 이를 위하여 본 연구에서 제작한 Fig. 1의 소형 재료실험 장치를 구성한 후 이 실험 장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 그리고 이 결과를 형상기억 합금선의 일차원 거동 모델을 통하여 검증하였다. 이러한 결과를 바탕으로 하여 복합재료 보 내에 삽입되어진 형상기억합금 선의 센서로서의 특성을 고찰하였다.

## 2. 형상기억합금 선의 일차원 거동 모델

Liang 등<sup>[9]</sup>은 마르텐사이트상의 분율인  $\xi$ 를 나타내기 위하여 다음의 코사인 관계식을 사용하였다.

$$\begin{aligned}\xi^{M \rightarrow A} &= \frac{1}{2} \{ \cos [ a_A ( T - A_f^s ) ] + 1 \} \\ \xi^{A \rightarrow M} &= \frac{1}{2} \{ \cos [ a_M ( T - M_f^s ) ] + 1 \}\end{aligned}\quad (1)$$

$$a_A = \frac{\pi}{A_f^s - A_s^s}, \quad a_M = \frac{\pi}{M_s^s - M_f^s}$$

여기에서  $\xi^{M \rightarrow A}$ 와  $\xi^{A \rightarrow M}$ 은 각각 마르텐사이트상에서 오스테나이트상 그리고 오스테나이트상에서 마르텐사이트상으로의 변태시  $\xi$ 의 거동을 의미하고,  $A_f^s$  (Austenite finish)  $A_s^s$  (Austenite start)  $M_f^s$  (Martensite finish)  $M_s^s$  (Martensite start)는 마르텐사이트 상변태온도를 의미한다. 이러한 상변태온도는 작용응력에 대해 다음의 선형관계가 존재한다.

$$\begin{aligned}M_s^s &= M_s + \frac{\sigma}{C_M}, \quad M_f^s = M_f + \frac{\sigma}{C_M} \\ A_s^s &= A_s + \frac{\sigma}{C_A}, \quad A_f^s = A_f + \frac{\sigma}{C_A}\end{aligned}\quad (2)$$

또한 다음과 같은 형태의 형상기억합금 선의 일차원 구성방정식을 이용한다<sup>[6]</sup>.

$$\begin{aligned}d\sigma &= Dd\varepsilon + \Theta dT + \Omega d\xi \\ &= Dd\varepsilon + \left( \Theta + \Omega \frac{\partial \xi}{\partial T} \right) dT + \Omega \frac{\partial \xi}{\partial \sigma} d\sigma \\ d\varepsilon &= \frac{1}{D} \left( 1 - \Omega \frac{\partial \xi}{\partial \sigma} \right) d\sigma - \frac{1}{D} \left( \Theta + \Omega \frac{\partial \xi}{\partial T} \right) dT\end{aligned}\quad (3)$$

위의 식에서  $D$ ,  $\Theta$ ,  $\Omega$ 는 각각 영의 계수(Young's modulus), 열탄성 텐서(thermoelastic tensor), 그리고 상변태 텐서(transformation tensor)를 나타낸다. 이 중  $D$ 와  $\Theta$ 는 오스테나이트상과 마르텐사이트상에서 서로 다른 값을 갖는데 특히 영의 계수인  $D$ 는 재료의 거동에 비교적 큰 영향을 미친다. 따라서 이들을 다음과 같이 가정한다.

$$\begin{aligned}D &= (D_M - D_A)\xi + D_A \\ \Theta &= (\Theta_M - \Theta_A)\xi + \Theta_A\end{aligned}\quad (4)$$

위 식에서  $D_M$ ,  $\Theta_M$ 과  $D_A$ ,  $\Theta_A$ 는 각각 마르텐사이트상과 오스테나이트상에서의 영의 계수와 열탄성 텐서를 의미한다.

길이가 긴 원통 형상의 도체 내에 길이 방향으로 균

일한 전기장장이 형성되어 있고 각 단면에서의 전류 밀도가 일정하면 이 도체의 전기저항은 다음의 관계식으로 표시된다.

$$\text{전기저항} = \frac{\text{길이}}{\text{단면적}} \times \text{비저항} \quad (5)$$

형상기억합금 선은 길이가 반지름에 비하여 매우 큰 원통 형상을 하고 있으므로 형상기억합금 선의 전기저항( $R$ )은 다음의 관계식으로 표시할 수 있다.

$$R = \frac{(1+\varepsilon) L_0}{(1-\nu\varepsilon)^2 r_0^2 \pi} \times \gamma \quad (6)$$

여기에서  $L_0$ 와  $r_0$ 는 초기의 길이와 반지름이고,  $\gamma$ 는 비저항이다. 변형이 그리 크지 않은 경우에 (6)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R &\approx \frac{L_0}{r_0^2 \pi} (1+\varepsilon) \times (\gamma_0 + \Delta\gamma) \\ &\approx \frac{L_0}{r_0^2 \pi} (\gamma_0 + \Delta\gamma + \varepsilon \gamma_0) \\ R - R_0 &\approx \frac{L_0}{r_0^2 \pi} (\Delta\gamma + \varepsilon \gamma_0) \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 형상기억합금 선의 마르텐사이트 상변태에 의한 비저항변화는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$R - R_0 \approx \frac{L_0}{r_0^2 \pi} ((\gamma_M - \gamma_A)\varepsilon + \varepsilon \gamma_A) \quad (8)$$

위의 (1), (3) 그리고 (8)식을 이용하여 형상기억합금 선의 전기저항을 응력, 변형률 그리고 온도 중 둘만의 함수로 표현할 수 있다. 변위센서로의 응용을 위하여 전기저항을 변형률과 온도의 함수로 나타내었고 온도가 전기저항과 변형률사이의 관계에 미치는 영향을 알아보았다.

### 3. 형상기억합금 선의 거동

본 실험에서는 Fig. 1의 실험장치를 이용하였고, 0.38mm 지름의 Ni-Ti 계열 형상기억합금 선을 시편으로 사용하였다. 이의 표면은 산화 피막(oxide coating)

처리가 되었고, 곧게 펴진 형상을 기억시키기 위해 500°C에서 1~3 분간 곧게 어닐링(straight annealing) 처리 되었다. 본 Ni-Ti 계열 형상기억합금은 R 상변태를 수반한다. 본 실험에서는 사이클 효과<sup>[10]</sup>를 배제하기 위하여 형상이 기억된 후 변형 사이클을 겪지 않은 형상기억합금 선 시편을 사용하였다.

형상기억합금 선의 온도에 따른 변형률과 비저항의 관계는 Fig. 2과 같다. 전기저항은 기하학적 신장량과 비저항의 곱으로 나타낼 수 있는데 형상기억합금의 비저항은 각 상의 분율과 온도에 따라서 변하게 된다. 비저항은 (6)식에 의해 전기저항과 변형률로부터 계산할 수 있다. 이에서 알 수 있듯이 25°C에서 45°C사이의 온도구간에서는 전반적으로 비저항이 크며 변형률에 따른 비저항의 변화가 크지 않다. 또한 50°C이후에는 변형률에 따라 비저항이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 비저항의 변화는 변형률에 의한 형상 변화와 함께 형상기억합금 선의 전기저항을 변화시키게 된다. Fig. 3은 변형률에 대한 전기저항의 거동을 나타낸다. 25°C에서 45°C사이의 온도구간에서의 초기 저항은 50°C 이상에서의 초기 저항보다 크다. 이는  $A_s$  온도 이하에서의 초기 탄성구간에서 나타나는 R상의 비저항이  $A_s$  온도 이상에서의 오스테나이트상보다 비저항이 크기 때문이다. 또한 50°C이후 온도구간에서의 전기저항 변화는 다른 온도 구간에 비하여 선형성이 우수함을 알 수 있다. Table 1에는 실험을 통해서 얻어진 재료 상수를 정리하였고 Ni-Ti 형상기억합금 선의 일차원 거동 모델을 통하여 예측된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 Ni-Ti 형상기억합금 선의 거동 모델이 오스테나이트상과 마르텐사이트상 사이의 거동만을 고려하고 있으므로  $A_s$  온도 이상에서의 항온 인장 거동을 나타낼 수 있다.

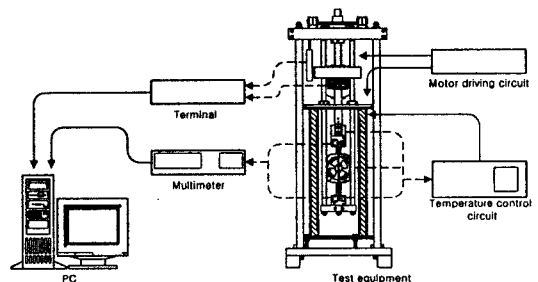


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up for SMA wire test

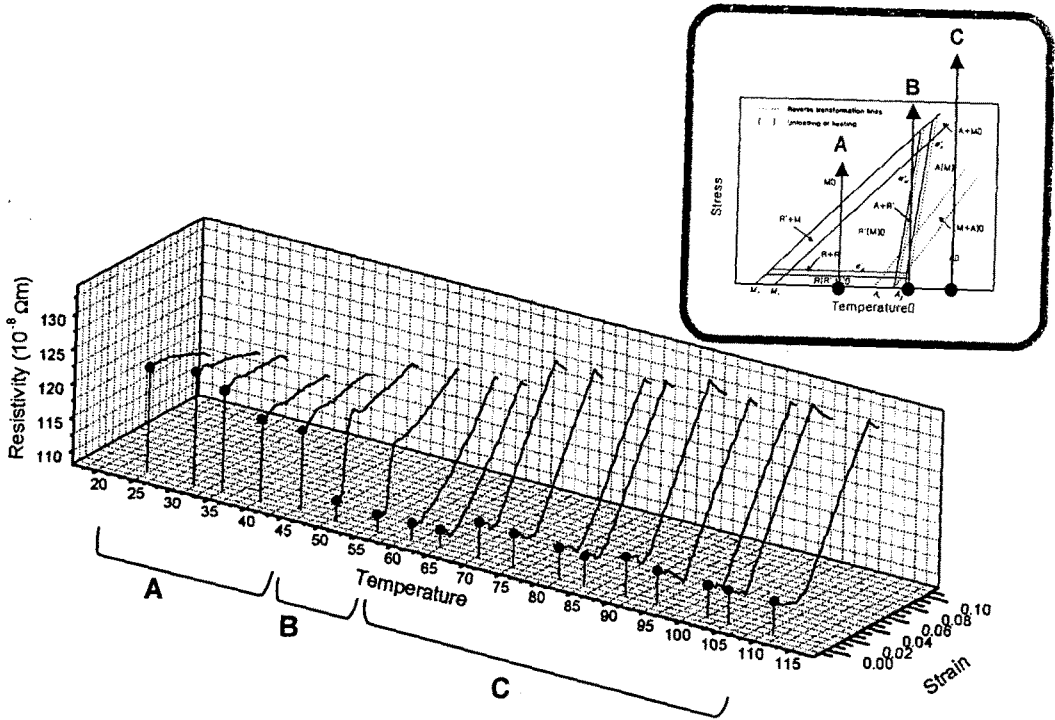


Fig. 2. Isothermal resistivity vs. strain curves of Ni-Ti alloy (phase diagram was referred to [11])

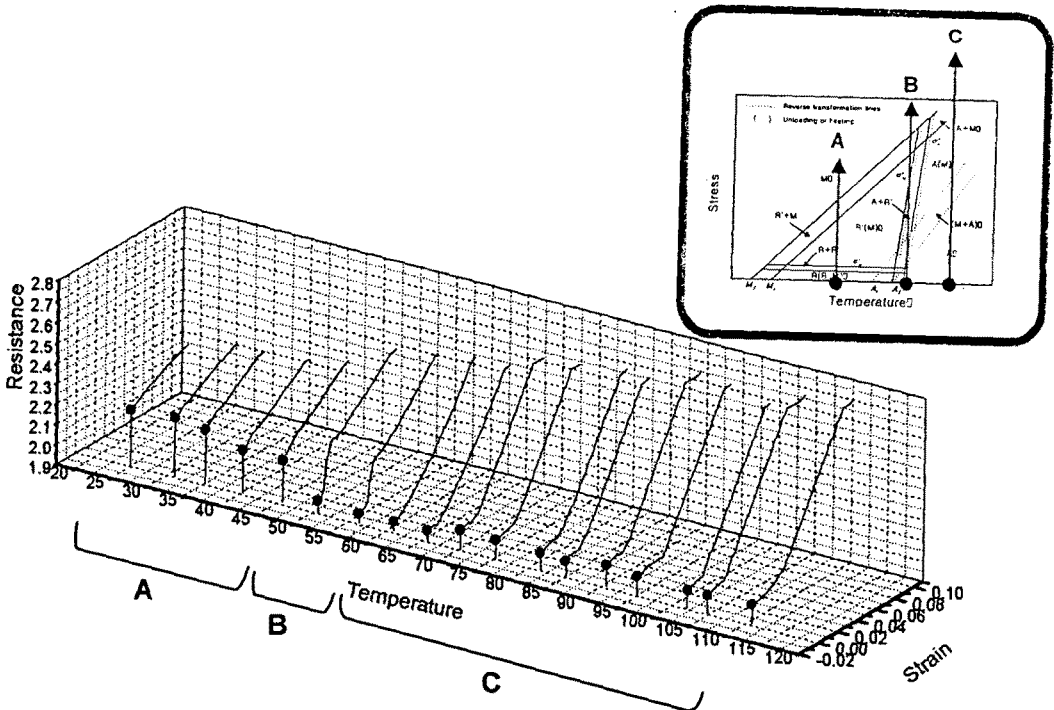


Fig. 3. Isothermal resistance vs. strain curves of Ni-Ti alloy (phase diagram was referred to [11])

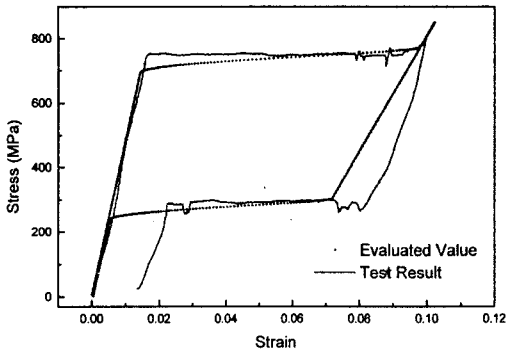


Fig. 4. Relation between stress and strain at T=105°C

Table 1. Material constants for constitutive equation

$C_M$	8 MPa
$C_A$	7 MPa
$D_M$	16 GPa ~ 20 GPa
$D_A$	49 GPa ~ 68 GPa
$\theta_M$	-132 KPa/°C ~ -105 KPa/°C
$\theta_A$	-748 KPa/°C ~ -539 KPa/°C
$\Omega$	-5 GPa ~ -3 GPa

#### 4. 복합재료보에 삽입된 Ni-Ti형상기억합금 선의 센서로의 응용

복합재료 내에 삽입되어진 Ni-Ti 합금 선의 변위 센서로의 거동을 알아보기 위하여 Fig. 5와 같이 두께방향의 양쪽에 Ni-Ti 합금 선을 삽입한 시편을 네점굽힘실험(four-point bending test)을 하였다. 네점굽힘실험을 할 경우 시편에는 순수굽힘모멘트(pure bending moment)가 작용하게 되어 압축 단을 제외한 대부분의 구간에서 곡률이 동일하게 된다. 따라서 시편의 두께방향으로 동일한 위치에서의 변형률이 동일하다.

또한 이를 이용할 경우 Ni-Ti 합금선의 길이방향 압축실험을 할 수 있다. 복합재료 내에 삽입되어진 Ni-Ti 합금 선을 모두 직렬로 결선한 후 각 Ni-Ti 합금 선에 일정한 전류가 흐르도록 하였다. 그리고 두께방향의 양쪽에 삽입된 Ni-Ti 합금 선의 저항변화를 측정하기 위하여 위쪽과 아래쪽 Ni-Ti 합금 선의 전압 차를 각각

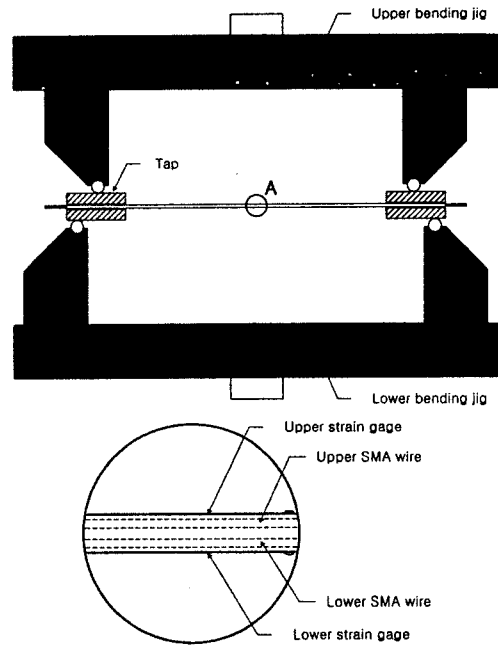


Fig. 5. Schematic diagram of test set-up (A : showing four-point bending test)

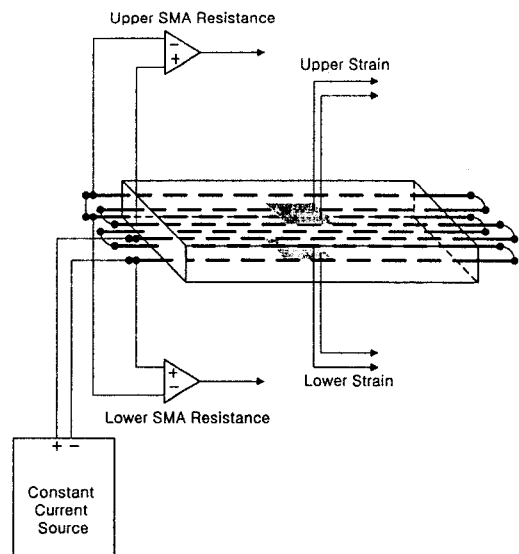


Fig. 6. Schematic diagram of test set-up (B : showing connection of SMA wire for measuring electrical resistance)

측정하였다. 시편 양쪽 표면의 중앙 부위에 설치된 스트레인 게이지로부터의 신호를 통하여 복합재료 내에

삽입되어진 Ni-Ti 합금 선에 작용하는 변형률을 알 수 있다. 형상기억합금의 저항변화와 시편의 횡변형을 측정하기 위하여 Fig. 6과 같이 실험장치를 구성하였다.

Fig. 7과 Fig. 9는 Ni-Ti 합금선의 전형적인 저항과 변형률의 변화를 나타낸다. 횡 변형은 압축위치에서의 횡 변형을 의미한다. 전반적으로 Ni-Ti 합금 선은 스트레인 게이지에 비해 비선형적인 거동을 함을 알 수 있다. 이러한 비선형성은 Ni-Ti 합금 선에 흐르는 전류가 클수록 커진다. 또한 위쪽과 아래쪽 Ni-Ti 합금선의 비선형적 거동이 서로 동위상임을 알 수 있다. 위쪽과 아래쪽 Ni-Ti 합금 선이 동위상의 거동을 함은 이러한 비선형 거동이 Ni-Ti합금 선의 온도 변화에 의해 생기는 것임을 의미한다. 따라서 전류의 크기가 커질수록 Ni-Ti 합금 선의 발열량이 많아지게 되고 시편의 온도는 주위의 유동특성에 많은 영향을 받게 되므로 이의 온도변화는 더욱 커지게 된다.

Fig. 8과 Fig. 10은 시편 양쪽의 변형률의 차와 Ni-Ti 합금 선의 전기저항 변화량의 차의 거동을 나타

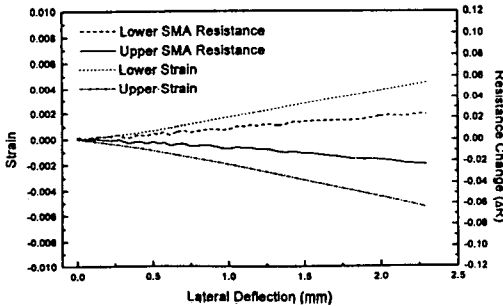


Fig. 7. Relation between resistance change and strain at current=100mA

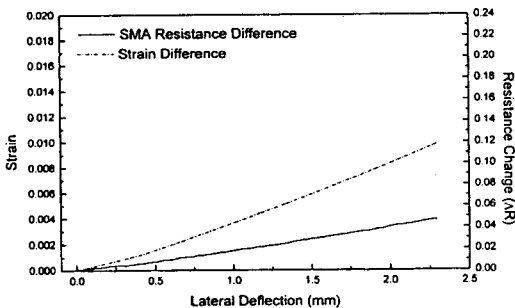


Fig. 8. Relation between resistance change and strain at current=400mA

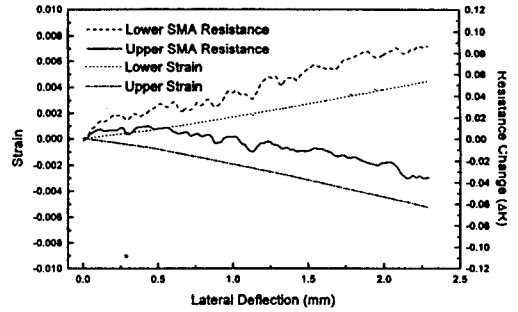


Fig. 9. Relation between the difference of resistance change and strain at current=100mA

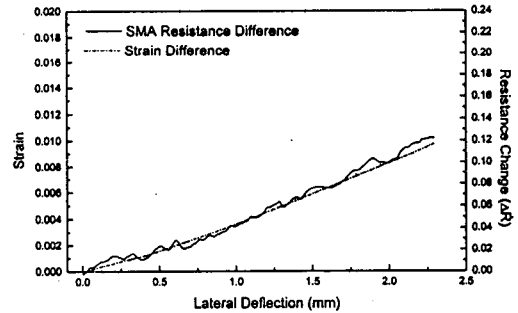


Fig. 10. Relation between the difference of resistance change and strain at current=400mA

낸다. Ni-Ti 합금 선의 전기저항의 동위상의 비선형 성분이 서로 상쇄되어 변형률에 대해 우수한 선형성을 가짐을 알 수 있다. 이는 양쪽 Ni-Ti 합금선 저항 변화량의 차동 연산에 의하여 온도에 의한 Ni-Ti 합금 선의 비저항 변화가 상쇄되었기 때문이다. 그러나 전류의 크기가 계속 커지게 되면 역시 비선형성이 증가하게 된다.

$A_s$  온도 이하에서 역쌍정구조의 R 상으로부터 역쌍정구조의 마르텐사이트상으로의 변태 시는 비저항이 크게 변화하지 않음을 Fig. 2에서 관찰 할 수 있다. 따라서 이 과정에서는 비저항을 온도만의 선형 함수로 생각할 수 있고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma &= \Delta\gamma + \gamma_0 \\ &= aT + \gamma_0 \end{aligned} \tag{9}$$

위의 관계를 사용하여 (7)식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R - R_0 \approx \frac{L_0}{r \frac{2}{0}\pi} (aT + \gamma_0 \epsilon) \quad (10)$$

위의 식에서 볼 수 있듯이 Ni-Ti 합금 선의 전기저항 변화는 온도와 변형률에 의한 영향의 선형 중첩으로 나타난다. 따라서 온도에 의한 전기저항의 변화는 차동 연산에 의하여 상쇄되게 된다.

$$R_1 - R_2 \approx \frac{L_0}{r \frac{2}{0}\pi} \gamma_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (11)$$

그러나 전류의 크기가 더욱 커져서 삽입된 Ni-Ti 합금 선의 온도가  $A_s$  온도 이상으로 올라가게 되면 오스테나이트상으로부터 역쌍정구조의 R상으로의 변태가 발생하게 되고 이때는 비저항이 크게 바뀌게 된다. 따라서 더 이상 비저항을 온도만의 선형함수로 생각할 수 없고 온도에 의한 항과 상변태에 의한 항의 합으로 나타내어야 한다. 따라서 차동 연산을 수행하여도 동위상의 비선형성이 완전히 사라지지 않게 된다. 복합재료보 양쪽 면의 변형률 차이는 복합재료보의 횡변형으로 나타낼 수 있으므로 Ni-Ti 합금선의 온도가  $A_s$ 보다 크지 않도록 소량의 전류를 측정 전류로 흘릴 경우 이를 횡변위 센서로 활용할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 액츄에이터로 사용되어지는 형상기억합금 선을 변위센서로 활용하기 위해 Ni-Ti 계열 형상기억합금의 기본 특성을 살펴보고 이를 실제로 복합재료 구조물에 삽입하여 변위센서로서의 특성을 알아보았다. 이상과 같은 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

가) 형상기억합금은 상(phase)과 온도에 따라 그 비저항이 크게 변한다. 특히  $A_s$  온도 이상에서 마르텐사이트 상변태를 할 경우 비저항이 크게 증가한다. 또한 전기 저항 변화와 변형률의 관계에 우수한 선형성이 존재한다. 따라서 온도가 일정하게 유지될 경우 기존의 스트레인 게이지에 비해 약 2.5배 가량 큰 게이지 상수를 가지므로 변형에 대해 비교적 큰 응답을 갖는 변위 센서로 활용할 수 있다.

나)  $A_s$  온도 이하에서는 외부변형에 대하여 R상에서 역쌍정구조의 마르텐사이트상으로의 변태가 일어난다. 이때는 비저항이 거의 바뀌지 않는다. 따라서 비저항을 온도 변화의 선형 함수로 가정 할 수 있는데, 이 경우 온도에 의한 영향은 같은 온도상태에 있는 또 다른 형상기억합금의 비저항 변화와의 차로써 제거될 수 있다. 따라서 복합재료보나 판 등과 같이 횡방향 변형을 측정해야하는 경우 복합재료 구조물 내에 삽입되어진 형상기억합금 액츄에이터를 활용할 수 있다.

다) 형상기억합금 선을 신뢰성 있는 센서로 활용하기 위해서는 히스테리시스효과에 의한 영향과 사이클 효과에 의한 영향을 고려해야 한다.

라) 기존의 오스테나이트상과 마르텐사이트상 사이의 거동 모델로는 R 상변태가 수반된 형상기억합금의 거동을 완전히 나타낼 수 없다. 따라서 오스테나이트상과 마르텐사이트상 이외에 R상의 거동이 고려된 모델이 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] Toshinori Takagi, The concept and the recent research on intelligent materials, Paper presented at the third ICIM/ECSSM 96, Lyon 96, 1996
- [2] L. C. Chang and T. A. Read, Trans. AIME, Vol. 191, p. 47, 1951
- [3] Technical informations of shape memory alloys, Shape memory applications, inc. (<http://www.sma-inc.com>)
- [4] C. A. Rogers, C. Liang and J. Jia, Structural modification of simply-supported laminated plates using embedded shape memory alloy fibers, Computers and structures, Vol. 38, No. 5/6, p. 569, 1991
- [5] A. Baz, J. Ro, M. Mutua and J. Giheany, Active buckling control of nitinol-reinforced composite beams., Papers presented at the ADPA/AIAA/ASME/SPIE conf. on active materials and adaptive structures
- [6] 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
- [7] M. Taketa, M. Hashimoto and K. Sato, A new displacement sensor using pseudoelastic titanium-nickel alloy wire, Journal of robotic systems, Vol. 3, No. 4, p. 441, 1986
- [8] A. Pruski and H. Kihl, Shape memory alloy hysteresis, Sensors and actuators, A36, p.29, 1993
- [9] C. Liang, The constitutive modeling of shape memory alloys, PhD dissertation, Virginia polytechnic institute and state university, 1990
- [10] H. Tobushi, P. H. Lin, T. Hattori and M. Makita, Cyclic deformation of TiNi shape memory alloy, JSME international journal, Series A, Vol. 38, No. 1, p. 59, 1995
- [11] H. Tobushi, K. Tanaka, K. Kimura, T. Hori and T. Sawada, Stress-strain-temperature relationship associated with R-phase transformation in TiNi shape memory alloy, JSME international journal, Series I, Vol. 35, p.278

---

 著 者 紹 介
 

---



## 이 창 호

1973년 7월 29일생. 1996년 성균관대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1998년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학 석사), 현재 한국항공우주연구소 근무. 주관심분야 : 지능형 복합재료 구조물

## 이 정 주

「센서학회지 제5권 제6호」 논문 96-5-6-03, p.24 참조  
현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수

## 허 중 수

「센서학회지 제4권 제4호」 논문 95-4-4-12, p.87 참조  
현재 경북대학교 금속공학과 조교수