

〈논 문〉

## 형상기억합금을 이용한 지능형 고분자 복합재료의 설계

정태헌\* · 이동주\* · 김홍건\*\*

(1997년 2월 4일 접수)

**Design of an Intelligent Polymer-Matrix-Composite  
Using Shape Memory Alloy**

T. H. Jeong, D. J. Lee and H. G. Kim

**Key Words:** Shape Memory(형상기억), Polymer Matrix Composites(고분자 재료), Intelligent/Smart Composite(지능형 복합재료), Modulus Ratio(물성비)**Abstract**

Thermo-mechanical behaviors of polymer matrix composite(PMC) with continuous TiNi fiber are studied using theoretical analysis with 1-D analytical model and numerical analysis with 2-D multi-fiber finite element(FE) model. It is found that both compressive stress in matrix and tensile stress in TiNi fiber are the source of strengthening mechanisms and thermo-mechanical coupling. Thermal expansion of continuous TiNi fiber reinforced PMC has been compared with various mechanical behaviors as a function of fiber volume fraction, degree of pre-strain and modulus ratio between TiNi fiber and polymer matrix. Based on the concept of so-called shape memory composite(SMC) with a permanent shape memory effect, the critical modulus ratio is determined to obtain a smart composite with no or minimum thermal deformation. The critical modulus ratio should be a major factor for design and manufacturing of SMC.

## 1. 서 론

형상기억합금(shape memory alloy)이란 미리 정 의된 모양에서 변형을 시킨후 열을 가하면 원래 모양으로 되돌아가는 독특한 성질을 가진 금속이다. 재료가 냉각 또는 변태온도보다 낮으면 항복응력은 낮고, 새로운 모양으로 쉽게 변형된다. 그러나 변태온도보다 높게 가열되면 결정구조를 변화시켜 원래 기억된 모양으로 되돌아가려고 한다. 또한 변태하는 동안 어떤 저항을 받으면 매우 큰 회복력(recovery force)이 발생하며, 온도가 증가할수록 항복응력이 증가하는 독특한 성질을 나타낸다.

형상기억효과를 나타내는 합금은 TiNi, CuZnAl, CuAlNi, AgCd 등 다양하며, 이와 같은 재료의 역학적 측면에서 회복되는 최적의 변형률, 변태시 발생하는 힘, 열피로를 고려한 형상기억효과 등에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.<sup>(2~5)</sup> 이중 특히 TiNi가 가장 예민한 형상기억효과를 나타내며, 최적의 회복률은 2~8%로 보고된다. 1962년 Buehler 등이 처음으로 TiNi에 형상기억효과를 발견한 이래로 금속학이나 실제 사용 가능성에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다.<sup>(1~10)</sup>

형상기억처리가 된 TiNi의 특징은 변태온도 이상에서는 오스테나이트 상이 형성되며, 이하에서는 마르텐사이트 상이 형성된다. 이와 같은 고유한 상변태는 형상기억합금의 독특한 성질이다. 일반적인 TiNi의 역학적 거동은 형상기억(shape memory)

\*회원, 영남대학교 기계공학부

\*\*회원, 전주대학교 기계공학부

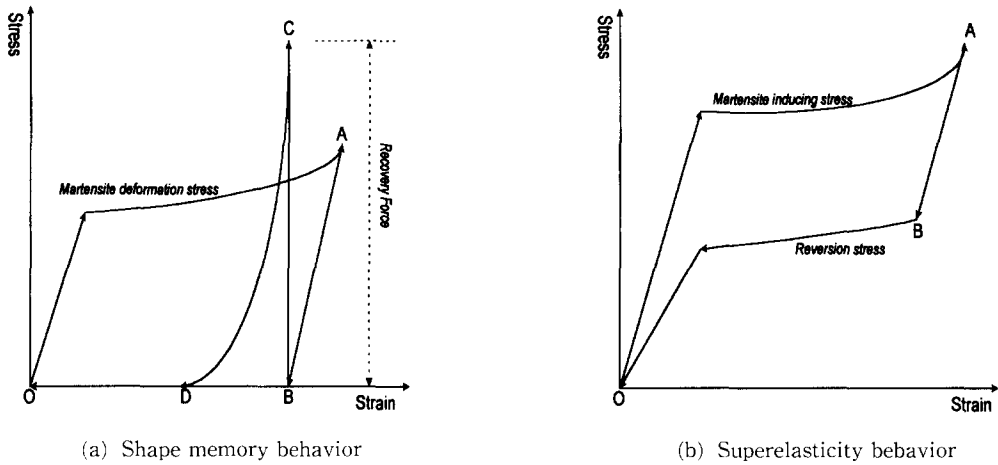


Fig. 1 Stress-strain curves showing shape memory behavior(a) and superelasticity behavior(b)

거동과 초탄성(superelasticity) 거동으로 구분된다.<sup>(1)</sup> Fig. 1(a)에서 형상기억이란 마르텐사이트 상에서 변형을 시킨 상태에서 변태온도 이상으로 가열하면 오스테나이트 상으로 바뀌며, 이 때 큰 힘이 발생하며, 전 모양으로 회복되는 것이다. 또한 초탄성이란 Fig. 1(b)에서 TiNi 합금이 변태온도보다 약간 높은 온도에서 하중을 가한 후 제거하면 원래의 모양으로 회복되며, 이것을 초탄성거동이라 한다.<sup>(11)</sup>

최근 TiNi의 독특한 성질을 이용한 지능형 복합재료(intelligent or smart composite)의 연구는 연속 TiNi가 보강된 다양한 복합재료의 역학적 거동에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>(6-10)</sup> 온도가 증가할수록 TiNi의 강화기구(strength mechanism)에 의해 인장강도가 향상되며, 지적 복합재료의 탄성계수, 항복응력 그리고 가공경화비(work hardening rate) 등은 TiNi의 체적비, Pre-strain 등에 의존한다고 보고되고 있다.

본 연구는 성형성이 좋고, 가볍고, 단열성이 우수하며, 또한 소음 및 진동 흡수가 좋은 고분자 재료와 형상기억합금을 이용한 지능형 고분자 복합재료를 개발하는데 의의가 있다. 지능형 복합재료의 기본개념은 냉각 후, 기지재료를 압축상태로 만들어 인장특성을 향상시킬 뿐 아니라 온도가 상승함에 따라 재료강도가 또한 향상되는 특징을 나타낸다. 이와 같은 지적 복합재료는 열팽창의 극소화, 온도가 상승함에 따라 더욱 더 튼튼해지는 특성으로 인하여 산업 전반에 효용도가 높을 것으로 예측된다. 그러나 아직까지 새로운 지적 복합재료에 대

한 재료 자체의 개발, 제조공정의 개발, 보다 좋은 재료 개발을 위한 응력해석방법은 현재까지 정립되지 않은 상태이며, 연속 TiNi로 강화된 금속기지 복합재료의 경우에만 부분적으로 연구가 진행되고 있다.<sup>(6-8)</sup>

본 연구는 기지의 물성변화에 따른 TiNi의 강화효과, TiNi의 Pre-strain 효과, 온도상승에 따른 열팽창계수의 변화 등을 예측하여 보강되는 형상기억합금의 단순보강효과 및 형상기억효과에 의해 열팽창을 극소화시키는 지적 복합재료의 실제 모델을 제시하고자 한다.

## 2. 이론해석

### 2.1 형상기억합금의 거동

형상기억합금의 역학적 거동은 Lagoudas,<sup>(8)</sup> Tanaka<sup>(11)</sup> 등에 의해 응력-변형률-온도의 관계를 예측하였다.

$$\sigma' = D \cdot \epsilon' + \Theta \cdot T' + \Omega \cdot \xi \quad (1)$$

$$\xi = f(\sigma, T) \quad (2)$$

로 표현된다.

여기서,  $D$ 는 탄성계수,  $\Theta$ 는 열탄성계수,  $\Omega$ 는 변태변형률계수, 즉 Pre-strain에 의해 결정되는 계수이며,  $\xi$ 는 마르텐사이트의 체적비이다. 식 (2)에서 마르텐사이트 체적비는 온도와 응력의 함수이며, 온도와의 관계에서 식 (3)과 식 (4)으로 표현할 수 있다. 즉, 마르텐사이트 변태(cooling)하는 동안  $\xi$ 는

$$0=f(0, M_s), 1=f(0, M_f) \quad (3)$$

또한 오스테나이트 변태(heating)하는 동안은

$$1=f(0, A_s), 0=f(0, A_f) \quad (4)$$

여기서,  $M$ 은 마르텐사이트 상,  $A$ 는 오스테나이트 상을 나타낸다. 첨자  $s$ 는 상변태가 시작하는 점, 첨자  $f$ 는 끝나는 점이다.

Tanaka<sup>(11)</sup>는 1차원 모델에서 형상기억합금이 변태할 때 마르텐사이트 체적비를 예측하였다. 마르텐사이트 변태(cooling)하는 동안 마르텐사이트 상의 체적비는

$$\xi=1-\exp[b_{MC_M}(M-T)+b_M\sigma], \quad M_s \leq T \leq M_f \quad (5)$$

역변태, 오스테나이트 변태(heating)하는 동안 마르텐사이트 체적비는

$$\xi=\exp[b_{AC_A}(A_s-T)+b_A\sigma], \quad A_s \leq T \leq A_f \quad (6)$$

이다.

여기서,  $b_A, C_A, b_M, C_M$ 은 재료상수이다.

위의 식에서  $\xi$ 는 TiNi의 재료상수와 일정부하응력( $\sigma$ )의 함수이다. 일정부하응력과  $\xi$ 는 비례관계가 있으며, 부하응력이 증가할수록 변태온도 또한 증가한다.<sup>(11)</sup> 본 연구는 부하응력( $\sigma$ )을 100 MPa로 하였다. 또한 식 (5)와 식 (6)은 식 (3)과 식 (4)를 만족하며, 온도변화에 의한 탄성계수는 마르텐사이트 상의 체적비 함수로 표현된다.

$$D=D_A+\xi(D_M-D_A) \quad (7)$$

$$D_{avg.}=\frac{D_A+D_M}{2}$$

여기서,  $D_M$ 은 마르텐사이트 상의 탄성계수,  $D_A$ 는 오스테나이트 상의 탄성계수이다. 즉, 변태하는 동안의 탄성계수는 마르텐사이트 상의 체적비 함수, 즉 온도의 함수이며,  $D_{avg.}$ 는 탄성계수의 산술적 평균이다. 형상기억효과는 역변태 과정(heating)에서 나타나며, 형상기억 열변형률은 온도와 마르텐사이트의 체적비 함수로 표현된다. 역변태과정에서 온도변화에 따른 형상기억 열변형률은

$$\epsilon=\epsilon_M^f+(\Omega/D)(\xi_M^f-\xi) \quad (8)$$

여기서,  $\Omega$ 는 변태변형률, 즉 Pre-strain에 관련된 변수이다.

또한 마르텐사이트 변태가 끝났을 때 체적비는  $\xi_M^f=0.99$  라 하면, 역변태(heating)가 시작되면 마르텐사이트 분율은 식 (6)에서

$$\xi=\xi_M^f \exp[b_{AC_A}(A_s-T)+b_A\sigma], \quad A_s \leq T \leq A_f \quad (9)$$

또한 식 (8)에서

$$Pre-strain, Ps=\Omega/D=\frac{\epsilon-\epsilon_M^f}{\xi_M^f-\xi} \quad (10)$$

으로 정의된다.

식 (7)을 식 (10)에 대입하면 변태변형률은

$$\Omega=Ps[D_A+\xi(D_M-D_A)] \quad (11)$$

이다.

형상기억을 나타내는 변태변형률은 위 식에서 예측할 수 있다. 이것은 가해진 Pre-strain과 마르텐사이트 체적비 함수이다. 또한 마르텐사이트 변태가 끝났을 때 변형률은 식 (8)에서 예측할 수 있다. 완전히 역변태가 일어나면  $\xi=\xi_M^f$ 이며, 이때 변형률은 가해진 Pre-strain 만큼 회복한다. 미리 가해진 Pre-strain과 TiNi의 온도변화에 따른 변태 변형률거동을 예측할 수 있다.

## 2.2 연속섬유보강 지능형 복합재료 모델

### 2.2.1 탄성거동

본 연구는 형상기억거동을 하는 연속 TiNi가 보강된 고분자 기지 복합재료의 열역학적 거동을 해석하였다. Fig. 2는 형상기억효과를 가진 연속 TiNi 섬유가 보강된 기본 모델이다. 온도변화에 따른 TiNi 거동은 식 (8)을 따른다. Step (a)는 마르텐사이트 상에서 Pre-strain을 가한 TiNi와 기지로 구성된 모델이며, TiNi에는 형상기억 변형률( $\epsilon_{ps}$ )이 존재한다. Step (b)는 기준 온도에서 역변태가 끝나는 온도, 즉  $A_f$ 점 이상으로 단계적으로 온도를 상승시키면 기지재료는 열팽창에 의해 인장방향으로 열변형이 발생하며, TiNi는 Pre-strain에 의해 형상기억 열팽창(SMTE; Shape Memory Thermal Expansion)에 의해  $A_f$ 점까지 가해진 Pre-strain만큼 열수축을 하려고 한다. 이 때 Step (c)에서 기지와 섬유의 열역학적 결합(thermo-mechanical coupling)에 의해 기지는 압축응력이 발생하며, 섬유는 인장응력이 발생한다. 형상기억 효과를 가진 TiNi와 기지의 상호작용에 의해 지능형 복합재료의 열변형률(thermal strain)이 결정될

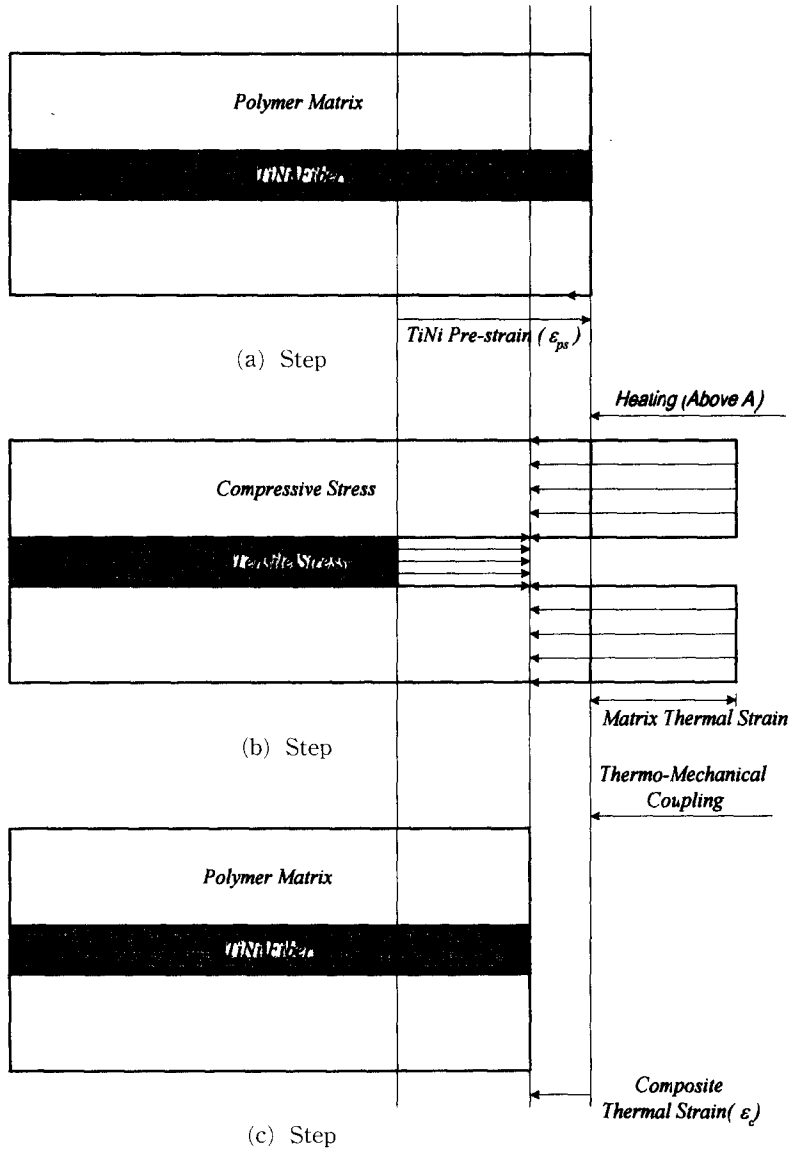


Fig. 2 Analysis model of continuous TiNi fiber reinforced composites

수 있으며, 보강되는 TiNi 체적비에 따라 복합재료의 열변형 방향을 결정하는 것이 가능하다. 이상의 단계로부터 TiNi/기지 복합재료의 열역학적 거동을 예측할 수 있다.

Step (b)에서 모델 전체에 균일하게  $\Delta T$ 만큼 온도를 상승시키면 섬유와 기지는 등변형 (iso-strain)을 한다. 모델 계면의 변위는 연속이라 하면 열역학적 결합에 의해 섬유와 기지에 발생하는 응력은 평형방정식으로부터

$$\sigma_m v_m + \sigma_f v_f = 0 \tag{12}$$

여기서, 첨자  $m$ 은 기지,  $f$ 는 섬유를 나타낸다. Step (b)에서 기지와 섬유의 열역학적 결합에 의해 기지부분에는 압축응력이 발생하며, 압축변형률은

$$\alpha_m \Delta T + \epsilon_c = -\frac{\sigma_m}{E_m} \tag{13}$$

여기서,  $\alpha$ 는 열팽창계수이며,  $\epsilon_c$ 는 복합재료의 열변형률이다.

또한 섬유부분은 인장응력이 발생하며, 인장변형률은

$$\alpha_f \Delta T + \varepsilon_c = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (14)$$

여기서,  $\alpha_f$ 는 TiNi에 가해진 Pre-strain에서 온도를  $A_f$  이상으로 증가시킬 때 온도변화에 따른 형상기억 열팽창계수(SMTE)이며, 식 (8)에서 알 수 있다.

식 (13)과 식 (14)의 관계에서

$$(\alpha_m - \alpha_f) \Delta T = \frac{\sigma_m}{E_m} - \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (15)$$

식 (12)과 식 (15)에서 섬유와 기지의 열역학적 결합에 의해 기지부분에 발생하는 압축응력은

$$\sigma_m = \frac{(\alpha_m - \alpha_f) \Delta T E_m E_f v_f}{E_f v_f + E_m v_m} \quad (16)$$

또한 섬유부분에 발생하는 인장응력은

$$\sigma_f = \frac{(\alpha_m - \alpha_f) \Delta T E_m E_f u_m}{E_f v_f + E_m v_m} \quad (17)$$

식 (13)에서 TiNi가 보강된 지적 복합재료의 열팽창계수는

$$\sigma_f = \frac{(\alpha_f E_f v_f + \alpha_m E_m v_m)}{E_c} = \alpha_c \quad (18)$$

여기서,  $E_c = E_f v_f + E_m v_m$ 이다. 또한  $\alpha_c$ 는 형상기억 열팽창계수이다. 형상기억효과를 가진 한방향 TiNi가 보강된 고분자 기지 복합재료의 열팽창계수를 보강되는 섬유체적비 및 TiNi/기지의 물성비에 따라 예측할 수 있다.

### 2.2.2 탄소성 모델

복합재료내의 연속 TiNi는 역변태 후에는 기지와 상호작용에 의해 각각 소성거동을 한다고 보고, 복합재료의 거동을 소성영역까지 확대하여 해석하였다. 기지와 섬유는 온도변화에 따라 단선형 경화 탄소성체라 하며, 소성영역까지 확장된 모델의 거동은 식 (13), 식 (14)을 바탕으로 식 (19), 식 (20)으로 정의한다.

$$\alpha_m \Delta T + \varepsilon_c = \frac{\sigma_{ym}}{D_m} + \frac{\sigma_m - \sigma_{ym}}{T_m} \quad (19)$$

$$\alpha_f \Delta T + \varepsilon_c = \frac{\sigma_{yf}}{D_f} + \frac{\sigma_f - \sigma_{yf}}{T_f} \quad (20)$$

여기서,  $T$ 는 접선계수(tangent modulus)이며,  $\sigma_y$ 는 항복응력을 나타낸다.

식 (19)과 식 (20)을 정리하여 식 (12)을 대입하면 TiNi에 걸리는 인장응력을 구할 수 있다.

$$\alpha_f = \frac{[(\alpha_m - \alpha_f) \Delta T v_m + \sigma_{yf} (\frac{v_f}{D_m} + \frac{v_m}{D_f})] T_m T_f}{T_f v_f + T_m v_m} - \sigma_{yf} \quad (21)$$

만약  $T_m = D_m$ 이면 탄성거동의 식 (17)과 같다. 또한 식 (20)에서

$$\varepsilon_c = \frac{[\sigma_{yf} (T_f - D_f) + (\sigma_f + \alpha_f \Delta T T_f) D_f]}{D_f T_f} \quad (22)$$

로 둘 수 있다.

식 (21)을 식 (22)에 대입하여 정리하면 1차원 모델의 소성영역까지 확장된 TiNi 보강 복합재료의 열변형률을 결정할 수 있다.

## 3. 유한요소해석

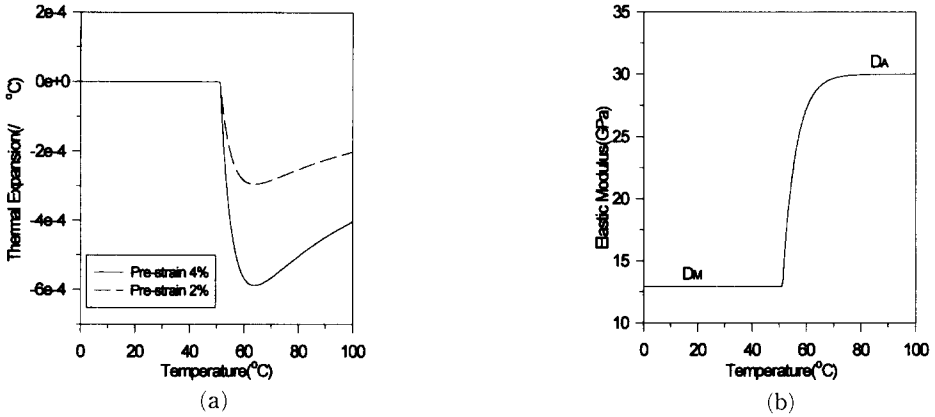
해석의 기본 모델은 연속 TiNi가 보강된 2차원 모델이다. 보강되는 섬유체적비가 0.5%와 1%에서 물성비(modulus ratio;  $MR = D_f/D_m$ )를 5:1, 10:1, 25:1, 50:1로 변화시키며 해석하였다. 해석에 사용된 기지물성은 온도변화에 대해 일정하다. 즉, 열팽창계수는  $55 \text{ E-6} (\text{/}^\circ\text{C})$ , 푸아송비는 0.33이다. 또한 기지의 탄성계수는 섬유와 기지의 물성비에 따라  $D_{ave}/MR$ 의 비로 사용한다. TiNi는 온도 변화에 따라 형상기억거동을 하며, 기본적인 물성은 Lagoudas<sup>(8,10)</sup>의 연구결과를 참고했으며, Table 1은 TiNi의 기본 물성을 나타냈다.

온도변화에 따른 탄성계수는 식 (7)의 거동을 따르며 TiNi의 형상기억 열변형률은 식 (8)을 따른다. Fig. 3은 Pre-strain이 4%, 2%일 때 식 (7), 식 (8)의 탄성계수와 열팽창계수를 나타냈다. 이의 결과는 유한요소해석의 기본데이터로 사용된다.

해석에 사용된 기본 모델은 Fig. 2와 같다. 기준 온도는  $0^\circ\text{C}$ 이며,  $0^\circ\text{C}$ 에서  $100^\circ\text{C}$ 까지  $5^\circ\text{C}$ 씩 모델내에 균일하게 온도를 증가시키며 해석하였다. 온도 변화에 따른 재료거동은 단선형 경화 탄소성체이며, 항복응력은 변형률이 1%일 때의 응력이며, 접선계수는 탄성계수의 1.0%로 했다. 소성영역의 해석은 Newton-Raphson법을 이용하며, 수렴 허용오차는  $0.1 \text{ E-4}$ 로 하였다. 또한 유한요소해석은 ANSYS 5.0<sup>(14)</sup>를 이용했다.

**Table 1** Mechanical properties of TiNi

Elastic modulus of austenite ( $E_A$ )	Elastic modulus of martensite ( $E_M$ )	Poisson's ratio	Martensite stress influence coefficient	Austenite stress influence coefficient
30 GPa	13 GPa	0.33	11.3 MPa/°C	4.5 MPa/°C
$M_f$	$M_s$	$A_s$	$A_f$	
5°C	23°C	29°C	51°C	



**Fig. 3** Thermal expansion (a) and elastic modulus (b) of TiNi fiber as a function of temperature and pre-strain

해석시 TiNi/기지 보강재료내에 발생하는 변형률과 응력은 아래의 식에서 결정되며, 해석에 사용된 경계조건은  $x=0$  에서  $u=0$  이고,  $y=0$  에서  $v=0$  이다. 여기서  $u, v$ 는  $x, y$ 방향의 변형량을 나타냈다.

기지 및 섬유에 발생하는 응력과 변형률은

$$[\sigma]_i = \frac{\int_n [\sigma]_n dv_n}{\int_n dv_n}, \quad [\epsilon]_i = \frac{\int_n [\epsilon]_n dv_n}{\int_n dv_n} \quad (23)$$

첨자  $i$ 는 조건에 따라  $f, m$ 을 나타낸다. 또한  $[\epsilon]_n$ 은  $n$ 번째 요소의 변형률을 나타내며,  $dv_n$ 은  $n$ 번째 요소의 체적을 나타낸다. 여기서  $f$ 는 섬유,  $m$ 은 기지이다. 또한 식 (23)에서 복합재료의 평균 응력 및 변형률은 혼합법칙(rule of mixture)을 이용하여 아래 식으로부터 계산하였다.

$$[\epsilon]_c = [\epsilon]_m v_m + [\epsilon]_f v_f$$

$$[\sigma]_c = [\sigma]_m v_m + [\sigma]_f v_f \quad (24)$$

#### 4. 결과 및 토의

먼저 이론해석에서 Fig. 4는 탄소성 영역까지 확

장하여 온도변화에 따른 TiNi 보강 복합재료의 열변형률을 나타냈다. 가해진 Pre-strain이 4%, TiNi의 체적비가 0.5%, 1.0%에서의 결과이다. 역변태 전에는 TiNi의 단순보강에 의해 역변태 후에는 단순보강효과 및 형상기억효과에 의해 열변형거동을 억제하였으며, 섬유와 기지의 물성비(Modulus Ratio : MR)가 증가할수록 열변형거동이 압축방향거동을 보인 것도 있으며, 체적비가 증가할수록 역변태 후 큰 압축변형률을 보였다.

Fig. 4(a), (b)의 결과로부터 예측할 수 있는 것은 일방향(one-way) 형상기억합금 특성은 미리 가한 변형률(pre-strain)이 역변태에 의해 모상으로 회복되나, 다시 냉각되면 Pre-strain만큼 되돌아가지 않는다. 즉, 복합재료 내의 온도변화에 따라 TiNi가 한번 압축방향으로 열수축이 발생되면 그 만큼의 형상기억효과가 사라진다. Fig. 4(a), (b)에서 물성비 및 TiNi의 체적비가 증가하면 역변태 후에 열변형률이 인장방향에서 압축방향으로 바뀌게 되는 것을 알 수 있다. 위의 거동에서 일정한 Pre-strain이 가해진 TiNi가 포함된 복합재료에서 TiNi는 형상기억효과에 의해 수축되는 것이 아니라, 기지의 열응력에 의해 인장방향으로 변형

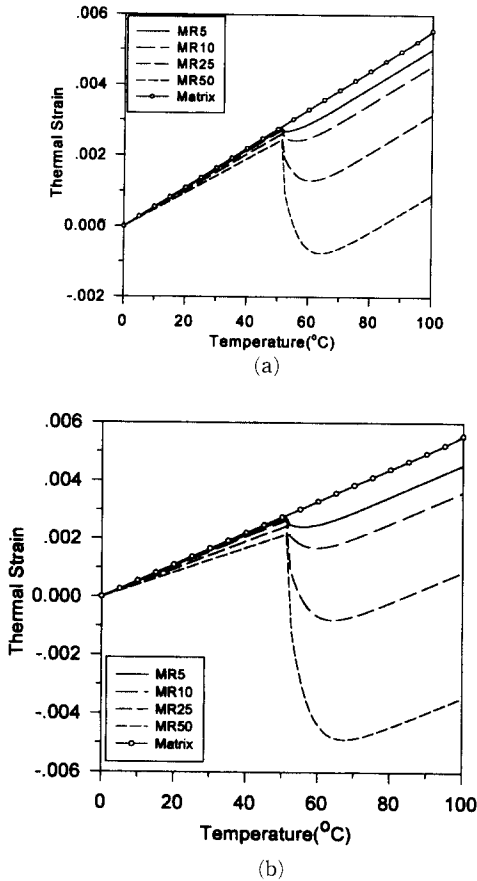


Fig. 4 Theoretical prediction of average thermal strain for continuous TiNi/matrix composite as a function of modulus ratio with volume fraction 0.5% (a) and 1.0% (b) when the applied pre-strain is 4%

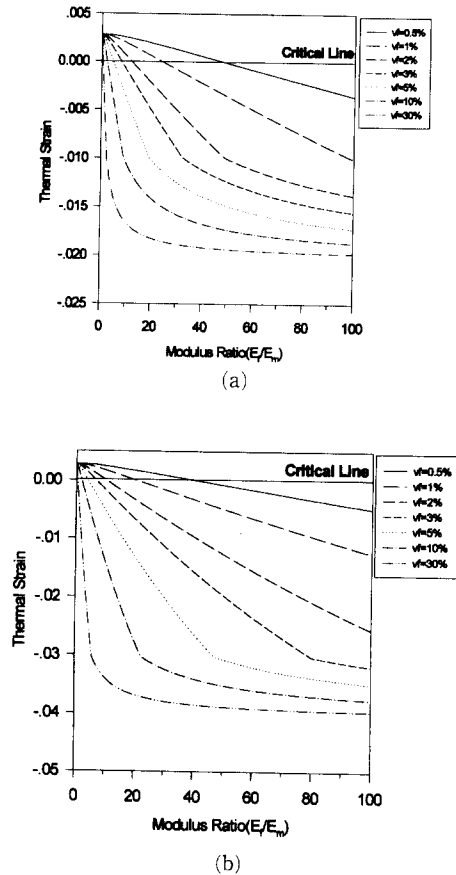


Fig. 5 Theoretical prediction of minimum thermal strain for TiNi/Matrix as a function of modulus ratio with different volume fractions and pre-strains (a) Pre-strain 2% (b) Pre-strain 4%

( $\epsilon \geq 0$ ) 되는 임계물성비(critical modulus ratio)를 결정할 수 있다. 임계물성비보다 작은 경우는 복합재료의 열팽창을 감소시키며, 기지부분에 압축응력을 발생시켜 인장강도의 향상을 예상할 수 있으며, 이것은 일방향(one-way)의 형상기억합금의 Pre-strain의 감소없이 열사이클을 받아도 TiNi의 단순보강효과 및 형상기억보강효과를 기대할 수 있다. 그러나 임계물성비보다 큰 경우 일방향에서 큰 열수축과 인장강도를 기대할 수 있으나, 열사이클(가열/냉각) 발생시 Pre-strain효과가 없어진다.

현재까지 직경이 0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm인 일방향 TiNi가 보강된 에폭시 복합재료를 제작하여 열피로(가열/냉각)의 반복실험을 통하여 TiNi/Epoxy 복합재료의 열변형을 측정하고 있다. 결과

적으로 TiNi와 기지의 열팽창의 차이에 의한 보강되는 TiNi의 단순보강효과 및 형상기억효과에 의한 고분자 복합재료의 열변형이 억제됨을 보였다. 이의 결과는 추후 보고할 예정이다.

Fig. 5(a), (b)는 Pre-strain이 2%, 4%일 때 각각의 체적비에서 물성비 변화에 따른 역변태 후 Fig. 4(a), (b)에서 알 수 있는 복합재료의 최저 열변형률을 나타냈다. TiNi 체적비가 증가하면 복합재료의 최저 열변형률등은 가해진 Pre-strain만큼 회복되었으며 TiNi의 체적비가 증가하면 임계물성비가 줄어들었다. Table 2는 Pre-strain2%, 4%에서 체적비 변화에 따른 임계 물성비이다.

위의 이론적 해석결과를 바탕으로 유한요소해석 결과와 비교 예측하면 Fig. 6은 TiNi의 체적비가

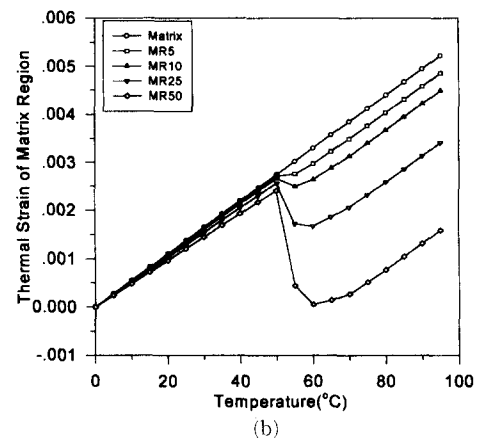
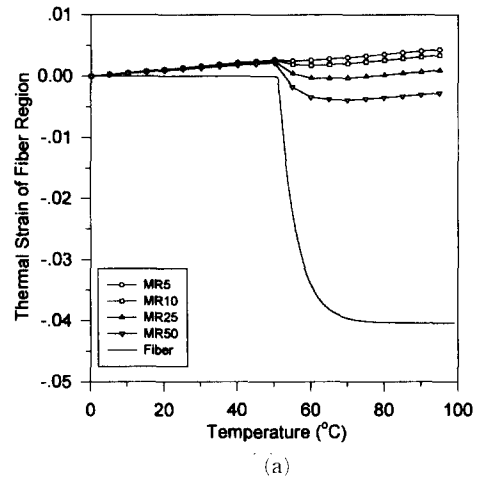
**Table 2** Theoretical prediction of critical modulus ratio for TiNi/matrix composite

Volume fraction \ Pre-strain	0.5%	1.0%	2.0%	3.0%	5.0%	10.0%	20.0%	30.0%
Pre-strain 2%	45.8	23.7	11.7	7.7	4.5	2.1	0.9	0.5
Pre-strain 4%	40.8	20.3	10.0	6.6	3.9	1.8	0.8	0.4

0.5%이고, Pre-strain이 4%일 때 온도변화에 따른 TiNi와 기지부분에 발생하는 열변형률을 나타냈다. Fig. 6(a), 즉 TiNi 부분의 열변형률은 물성 차이가 증가할수록 압축방향으로 거동이 발생되었으나, 물성비가 작을수록 형상기억효과를 나타내는 TiNi의 거동은 기지의 영향에 의해 인장방향의 변형이 발생한다. Fig. 6(b)는 기지부분에 발생하는 열변형률을 나타냈다. 역변태 전에는 단순보강효과에 의한 거동을 나타내며, 물성비가 작을 경우 역변태 후에 형상기억효과에 영향보다는 기지의 열변형거동이 복합재의 열변형거동에 큰 영향을 나타냈으나, 물성비가 증가할수록 형상기억효과에 의해 열수축이 발생한다. 물성비가 50:1인 경우 온도가 60°C 근방에서는 기지의 열변형이 영(zero)에 가까워진다.

Fig. 7은 TiNi의 체적비가 1.0%일때 Pre strain이 2%, 4%에서 TiNi 보강 복합재료의 열변형률을 나타냈다. 역변태전(60°C이하)은 단순보강효과의 영향에 의해 열변형률의 차이를 보이며, 역변태 후 물성비가 작을 경우 Pre-strain이 2%와 4%는 큰 차이가 없이 기지의 거동에 인접함을 보이나, 물성 차이가 증가할수록 Pre-strain의 영향에 의해 큰 차이를 보였다. Pre-strain이 2%에서는 압축방향의 열변형( $\epsilon_c$ )이 물성비가 50:1에서만 나타났으나, Pre-strain이 4%인 경우는 물성비가 25:1에서도 나타났으며, Pre-strain 효과는 물성비가 증가할수록 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 8은 온도가 단계적으로 증가하여 역변태 후 TiNi와 복합재료의 최소 열변형률을 물성비 변화에 따라 나타냈다. 온도가 증가할수록 열변형률은 선형적으로 감소하였으며, 이론해석결과와 비슷한 경향을 보였다. 또한, Fig. 8(a)에서 체적비가 증가할수록 TiNi 거동은 형상기억을 나타내는 Pre-strain 거동에 따르고 TiNi 체적비와 Pre-strain의 관계를 예측할 수 있다. 물성비가 작으면 역변태 후 TiNi 거동은 기지의 열변형거동에 큰 영향

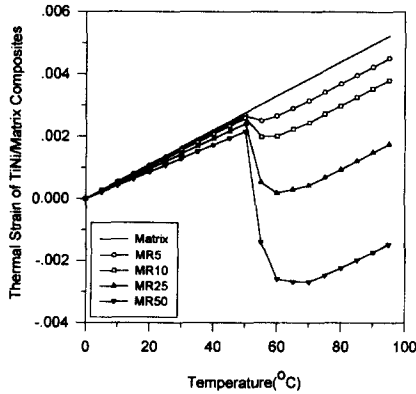
**Fig. 6** Numerical prediction of thermal strain in fiber(a) and matrix(b) as a function of temperature and modulus ratio.

을 받으나, 물성비가 증가할수록 TiNi는 형상기억 거동에 의해 압축방향으로 변형되었다. 또한 Fig. 8의 결과에서 지적 복합재료 설계에 중요한 인자인 임계물성비를 결정할 수 있으며, Table 3은 TiNi 부분과 복합재료의 유한요소해석의 결과이다.

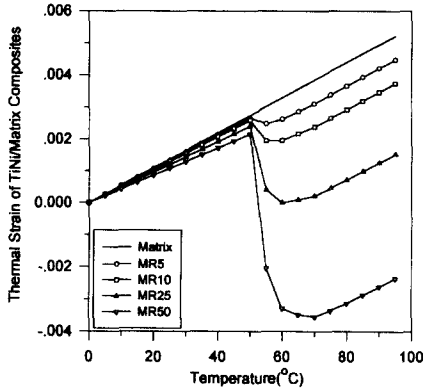


**Table 3** FEM prediction of critical modulus ratio for TiNi/matrix

Modulus ratio ( $M_f/M_m$ )	$v_f=0.5\%$ Pre-strain 2%	$v_f=0.5\%$ Pre-strain 4%	$v_f=1\%$ Pre-strain 2%	$v_f=1\%$ Pre-strain 4%
TiNi region	29.5	22.5	14.5	11.3
Composite	54.2	51.2	26.8	24.2



(a) 2% Pre strain

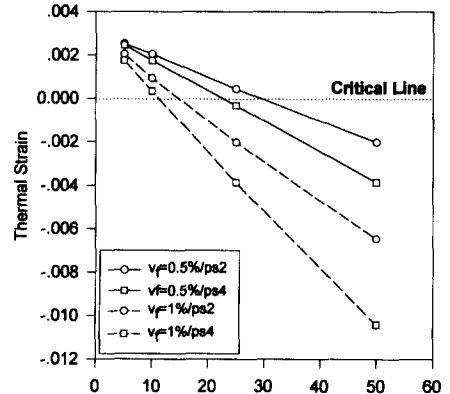


(b) 4% Pre-strain

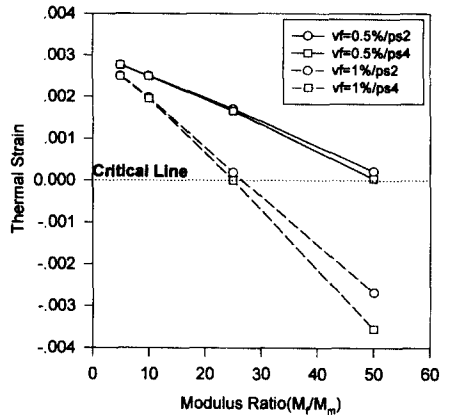
**Fig. 7** Numerical prediction of thermal strain in TiNi/matrix composite ( $v_f=1.0\%$ )

### 5. 결론

연속 TiNi 섬유가 보강된 복합재료에서 TiNi 체적비와 물성비(modulus ratio)를 변화시키며, 형상기억효과에 의한 열역학적 거동을 소성영역까지 확장된 이론 및 유한요소해석 모델을 제시하여 해석하였다. Pre-strain이 2%, 4%인 연속 TiNi/기지 복합재료 모델에서 기지부분에서는 압축응력, TiNi에 인장응력이 발생하고, 열피로를 고려할 경우 임



(a)



(b)

**Fig. 8** Minimum thermal strain of TiNi fiber(a) and composite(b) as a function of modulus ratio and volume fraction

계물성비(critical modulus ratio)를 결정할 수 있다. 임계물성비보다 높은 지적 복합재료는 사이클의 반복횟수가 증가함에 따라 형상기억효과가 없어지나, 임계물성비보다 낮을 때에는 형상기억효과와 감소없이 연속적으로 가해진 초기 변형만큼의 형상기억효과를 기대할 수 있다.

형상기억합금이 보강된 지적 복합재료의 설계 및 제작시 중요한 인자를 예측하여 지적 복합재료의

제작에 최적의 체적비와 물성비를 결정하여 열피로 시 단순보강효과 및 형상기억효과의 보강효과를 기대하여 열팽창을 극소화하는 복합재료 제작이 가능하다.

## 후 기

본 연구는 1995년도 교육부 연구 지원과제(과제 번호: ME 95-C-12) 연구비에 의하여 수행되었으며, 본 연구에 도움을 주신 분께 깊은 감사사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Taya, M. and Aresenault, R. J., 1989, *Metal Matrix Composites: Thermo-mechanical Behavior*, Pergamon Press, pp. 25~28.
- (2) Tadaki, T., Otsuka, K. and Shimizu, K., 1988, "Shape Memory Alloy," *Ann. Rev. Mater. Sci.*, Vol. 18, pp. 25~45.
- (3) Tadaki, T., and Otsuka, K., 1988, "Shape Memory Alloy," *Ann. Rev. Mater. Sci.*, pp. 25~45.
- (4) Tobush, H. and Tanaka, K., 1993, "Pseudoelasticity of TiNi Shape Memory Alloy," *JSME*, Vol. 36, No. 3, pp. 314~318.
- (5) Liu, C. T., Kunsmann, H. and Otsuka, K., 1992, "Shape Memory Materials and Phenomena Fundamental Aspects and Applications," *Proc. of Mat. Res. Society*, Vol. 246, pp. 299~369.
- (6) Furuya, Y., Sasaki, A. and Taya, M., 1993, "Enhanced Mechanical Properties of TiNi Shape Memory Fiber/Al Composites," *Materials Trans., Jim*, Vol. 34, No. 3, pp. 224~227.
- (7) Yamada, Y. and Taya, M., 1993, "Strength of Metal Matrix Composite by Shape Memory Effect," *Materials Trans. Jim*, Vol. 34, No. 3, pp. 254~260.
- (8) Boyd, J. G. and Lagoudas, D. C., 1994, "Thermomechanical Response of Shape Memory Composites," *J. of Intelligent Syst. and Struct.*, Vol. 5, pp. 333~346.
- (9) Lagoudas, D. C., and Tadjbakhsh, I. G., 1992, "Active Flexible Rods with Embedded SMA Fibers," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 1, pp. 162~167.
- (10) Lagoudas, D. C. and Boyd, J. G., 1994, "Micromechanics of Active Composites With SMA Fibers," *J. of Engineering Mat. and Tech.*, Vol. 116, pp. 337~347.
- (11) 田中喜久昭, 1993, "形状記憶合金の機械的性質" 養賢堂, pp. 62~122
- (12) Gibson, R. F., 1994, *Principles of Composite Mechanics*, McGraw-Hill.
- (13) Lewis, 1990, *Engineering Materials*, Prentice Hall.
- (14) Peter Kohnke, 1994, *ANSYS User's Manual for Revision 5.0*, Swanson Analysis System, Inc.
- (15) Wasilewski, R. J., 1971, "The Effect of Applied Stress on the Martensitic Transformation in TiNi," *Metallurgical Trans.*, Vol. 2, pp. 2973~2981.