

論文

계면적을 고려한 형상기억합금 섬유강화 금속기
복합재료의 기계적 거동해석

안득만*

Modeling of Mechanical Behavior of Shape Memory Alloy Fiber
Reinforced Metal Matrix Composites considering Interface Effect

Deuk-Man An*

ABSTRACT

In this paper, strengthening mechanism of shape memory alloy fiber metal matrix composite considering interface area was studied. The tensile property of the composite material is strengthened by the compressive residual stress of the longitudinal direction due to shape memory effect. In analyzing the mechanical behavior of TiNi continuous fiber-Al composite, a law of mixture considering residual stress and interface area was used. By this model, we can explain the variation of tensile yield stresses due to interface area.

초 록

본 논문은 기지재료와 강화섬유간의 계면적을 고려한 형상기억합금 강화섬유 알루미늄 복합재료의 기계적 거동에 관한 연구결과이다. 형상기억효과에 의하여 기지재료의 축(길이)방향으로 압축잔류응력이 발생하고 이로 인하여 인장항복강도가 증가한다. 그러나 기지재료와 강화섬유의 접촉이 불완전하면 이로 인하여 기계적 성질이 저하된다. 본 연구에서는 TiNi 연속섬유 Al 복합재료의 기계적 거동을 형상기억효과에 의한 잔류응력과 강화섬유와 기지재료간의 계면적에서의 마찰을 고려한 혼합법칙을 이용하여 복합재료의 항복응력의 변화를 설명할 수 있는 모델을 제안하였다. 이 모델을 이용하여 실험에서 확인된 강화섬유와 기지재료 사이의 계면적에 따른 항복응력의 변화를 설명하였다.

1. 서 론

구조물의 소재 중 복합재료는 뛰어난 기계적 성질 때문에 항공기, 자동차 등에서 많이 응용되고 있으며, 앞으로 그 이용 범위는 더욱 확대될 것이다[1].

최근 형상기억합금(Shape Memory Alloy:SMA)을 강화섬유로 이용한 복합재료의 개발이 주목받고

있다.

형상기억합금을 강화섬유로 이용하면 기존의 일반적인 복합재료의 단점들을 보완하여 뛰어난 기계적 성질을 얻을 수 있다. 일반적인 복합재료는 제조과정시 고온에서 실온으로 냉각되면 기지섬유와 강화섬유의 열팽창계수의 차이에 의해서 기지섬유에 인장잔류응력이 발생하여 복합재료의 인장항복응력이 저하된다[2]. 그

*부산대학교

러나 형상기억합금으로 된 강화섬유를 이용하면 형상 기억효과에 의해 복합재료의 사용온도에서 기지섬유내에 압축잔류응력을 발생시켜 복합재료의 인장항복응력을 향상시키게 된다. 특히 TiNi계 형상기억합금은 큰 형상기억효과, 높은 감쇠능(damping capacity) 그리고 오스테나이트(austenite)단계에서의 높은 강성 등의 성질을 가지므로 복합재료의 인장강도 뿐만 아니라 감쇠능의 증가와 고온에서의 강도의 증가도 기대되므로 복합재료의 강화섬유로서 사용하기에 적합하다.

Al 기지재료에 TiNi계 형상기억합금을 강화섬유로 사용했을 경우에 대해서 Furuya[3], Yamada[4] 그리고 Taya[5] 등이 연구하였다. 이 연구결과에 의하면 인장강도 및 감쇠능이 증가함을 보였다. Taya[6]의 연구에 따르면 TiNi/epoxy 복합재료에서 형상기억효과에 의해 파괴인성치도 증가함을 보였다. 형상기억합금을 강화섬유로 실용화하기 위해서는 형상기억효과에 의한 강화기구의 정확한 이론적 규명과 이를 뒷받침할 폭 넓은 실험이 필요하다. 본 연구에서는 형상기억합금을 연속강화섬유로 이용한 금속기 복합재료의 거동을 이론적으로 모델링하여 강화섬유와 기지재료간의 계면적의 변화에 따른 형상기억합금 복합재료의 항복응력의 변화에 대한 영향을 규명하였다.

복합재료의 기계적 거동의 해석은 강화섬유의 형상 기억 효과와 기지재료와 강화섬유의 계면적의 영향을 고려한 혼합법칙을 사용하였다.

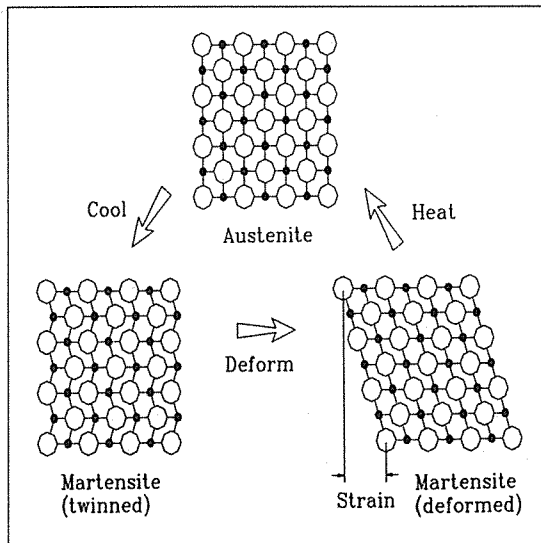


Fig. 1. The mechanism of shape memory of a TiNi alloy

2. TiNi/Al 복합재료

일반적으로 형상기억합금이란 일정온도 이상으로 상 승(하락)시키면 기억된 원래의 형태로 되돌아가는 재료이다. Fig. 1 에서와 같이 TiNi 합금은 고온의 오스테나이트 상태에서 저온의 마르텐사이트(martensite) 상태로 냉각되면 내부의 전단잔류응력에 의해서 쌍정이 발생하며, 마르텐사이트상에 외부하중이 가해지면 쌍정에 의해서 큰 변형이 가능하게 된다. 변형된 마르텐사이트를 오스테나이트변태가 일어나는 온도까지 올리면 오스테나이트는 쌍정형태의 변형을 수용할 수 없으므로 원래 형태로 돌아가게 된다.

TiNi 형상기억합금을 강화섬유로 이용한 Al 기지재료 복합재료의 기계적 성질의 강화를 도식적으로 설명하면 Fig. 2 와 같다.

- (1) 먼저 wire형태의 형상기억합금을 이용하여 가압 주조법으로 복합재료를 만든다. Fig. 2. (a)
- (2) 형상기억합금의 austenite finish(A_f)온도 이상에서 마르텐사이트 상까지 급랭시키는 열처리를 통해서 강화섬유의 초기 길이를 형상기억시킨다. Fig. 2.(b)
- (3) 형상기억합금의 마르텐사이트상에서 복합재료에 인장으로 예비변형을 가하여 변형시킨다. Fig. 2.(c)

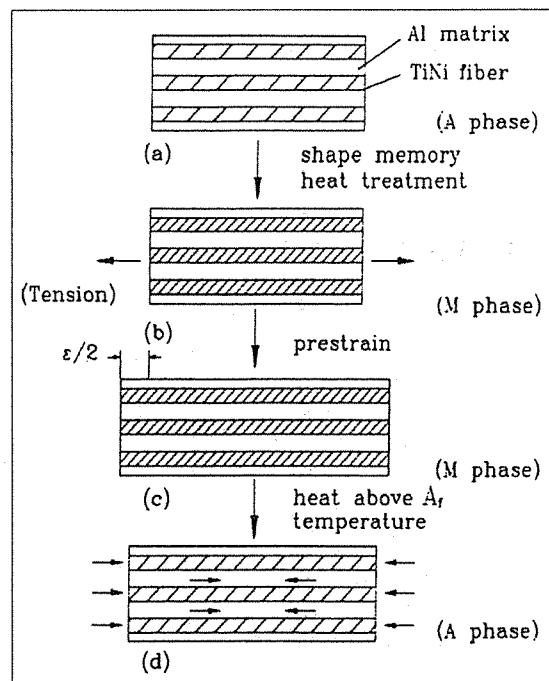


Fig. 2. Processing route of shape memory alloy MMC[4]

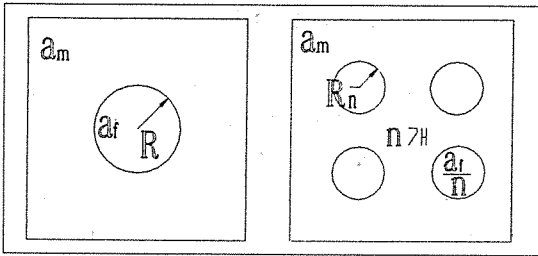


Fig. 3. Variations in the fiber radius under the same volume fraction

(4) 복합재료를 형상기억합금의 Af 온도 이상까지 가열하면 형상기억합금이 예비변형만큼 수축하려고 한다. 이렇게 함으로서 강화섬유에는 인장잔류응력이 발생하고 기지재료에는 압축잔류응력이 발생하게 된다. Fig. 2(d) 여기서 기지재료에 발생한 압축잔류응력에 의해서 인장성질이 강화된다. 이런 강화기구를 back stress strengthening[7]이라고 한다.

3. 해석적 모델

형상기억합금 강화섬유로 된 복합재료에서 기지재료에 발생하는 압축 잔류 응력은 강화섬유의 수축력이 계면을 통하여 기지재료에 전달되기 때문이다. 따라서 복합재료의 기계적 거동은 강화섬유와 기지재료의 계면적과 밀접한 관계가 있다. 여기서는 강화섬유와 기지재료의 계면적에서의 미끄러짐을 고려한 수정된 혼합법칙 모델을 사용하였다.

3.1 체적분률에 따른 계면적의 차이

주어진 강화섬유의 체적분률에서 기지재료와 강화섬유의 계면적의 변화는 다음과 같다.

먼저 체적분률 v 를 단위 면적내의 강화섬유 면적으로 나타내면 다음과 같다.

$$v = \frac{a_f}{a_m + a_f} = a_f \dots \dots \dots (1)$$

여기서 a_m 및 a_f 는 각각 복합재료의 단위면적당 기지재료 및 강화섬유가 차지하는 면적이다.

단위면적 내에 한 개의 강화섬유가 있는 경우 복합재료의 축방향으로 단위길이당 계면적 c_1 은

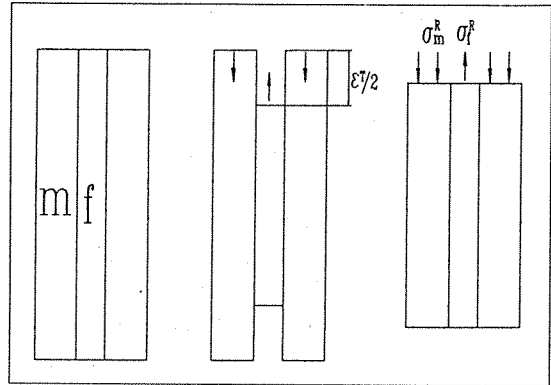


Fig. 4. Residual stress due to shape memory effects

$$c_1 = 2\pi \sqrt{\frac{a_f}{\pi}} = 2\sqrt{\pi a_f} \dots \dots \dots (2)$$

이고, n 개의 강화섬유인 경우에서의 계면적 c_n 은

$$c_n = 2\sqrt{n\pi a_f} \dots \dots \dots (3)$$

로 된다. 따라서, 같은 체적분률에서 강화섬유의 개수가 n 개 일때의 계면적은 강화섬유가 한 개인 경우에 대해 \sqrt{n} 배로 증가하게 된다.

3.2 수정된 혼합법칙

혼합법칙(rule of mixture)에 잔류응력항을 추가하고, 기지재료와 강화섬유계면에서의 전단응력을 고려하여, 응력변형을 관계를 구한다.

3.2.1 잔류 응력 계산

1) 미끄러짐이 없는 경우

복합재료내에서 형상기억효과에 의해서 강화섬유가 T 만큼 수축할 경우 강화섬유와 기지재료 사이의 전단응력이 강화섬유와 기지재료 각각에 수직응력으로 전달된다. 이때 계면에서의 마찰력이 충분하여 미끄러짐이 없는 경우를 먼저 생각하자. 강화섬유의 수축으로 기지재료에는 압축잔류응력이 발생하고 강화섬유에는 인장잔류응력이 생긴다.

강화섬유와 기지재료의 축방향의 인장잔류응력 및 압축잔류응력을 각각 σ_f^R , σ_m^R 이라 하고 항복응력을 σ_{fy} , σ_{my} 라 두면 Fig. 4의 자유물체도로부터, 평형방정식과 적합방정식은 다음과 같다.

$$-\sigma_m^R a_m + \alpha_f^R a_f = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_m^R}{E_m} + \frac{\alpha_f^R}{E_f} = \epsilon^T \quad (5)$$

여기서 E_f , E_m 은 강화섬유와 기지재료의 종탄성계수이다.

식 (4), (5)로부터 탄성영역에서 기지재료와 강화섬유의 잔류응력은 아래 식과 같이 기지재료에는 압축응력이 강화섬유에는 인장응력이 발생한다.

$$\sigma_m^R = \frac{v E_f E_m}{v E_f + (1-v) E_m} \epsilon^T$$

$$\sigma_f^R = \frac{(1-v) E_f E_m}{v E_f + (1-v) E_m} \epsilon^T \quad (6)$$

예비변형과 체적분률에 따라 기지재료와 강화섬유에 항복이 일어날 경우를 고려하면, 일정한 체적분률에서 기지재료와 강화섬유에 항복이 일어나는 예비변형 ϵ_m^T , ϵ_f^T 는 다음과 같다.

$$\epsilon_m^T = \frac{v E_f + (1-v) E_m}{v E_f E_m} \sigma_{my}$$

$$\epsilon_f^T = \frac{v E_f + (1-v) E_m}{(1-v) E_f E_m} \sigma_{fy} \quad (7)$$

여기서 $\epsilon_f^T < \epsilon_m^T$, $\epsilon_f^T > \epsilon_m^T$ 에 따라서 기지재료 또는 강화섬유에 항복이 일어나고, 식 (7)로부터 충분히 큰 예비변형 하에서 다음과 같은 기지재료와 강화섬유의 항복관계식을 얻을 수 있다.

$$\text{기지재료 항복 : } \sigma_{my} < \frac{v}{(1-v)} \sigma_{fy}$$

$$\text{강화섬유 항복 : } \sigma_{my} > \frac{v}{(1-v)} \sigma_{fy} \quad (8)$$

기지재료항복이 일어날 경우 강화섬유와 기지재료의 잔류응력의 크기는 다음과 같다.

$$\sigma_m^R = \sigma_{my}$$

$$\sigma_f^R = \frac{1-v}{v} \sigma_{my} \quad (9)$$

강화섬유항복이 일어날 경우는 다음과 같다.

$$\sigma_f^R = \sigma_{fy}$$

$$\sigma_m^R = \frac{1-v}{v} \sigma_{fy} \quad (10)$$

2) 미끄러짐이 있는 경우

계면에서 전달 수 있는 최대 마찰력이 충분히 크지 못하면 형상기억효과에 의한 강화섬유 수축시 계면에서 미끄러지게 된다. 계면에서 마찰이 없으면 잔류응력은 발생하지 않게 되고 마찰이 충분히 크면 강화섬유와 기지재료가 같이 움직인다고 생각할 수 있으므로 식 (9) 및 (10)에서와 같이 잔류응력을 계산할 수 있다. 강화섬유와 기지재료의 계면 상태에 따라 전달되는 최대 마찰력이 존재하게 되고 강화섬유의 수축력이 계면 마찰력보다 크게 되면 미끄러지게 된다. 따라서 미끄러짐을 방지하기 위해서는 계면 마찰력을 크게 하면 된다. 계면 상태가 같은 경우에는 계면적을 크게 하므로서 마찰력을 증가시켜 미끄러짐을 줄일 수 있다. 계면에서 강화섬유가 미끄러지는 경우의 해석은 매우 복잡하므로 우리는 여기서 미끄러짐이 일어나는 부분을 완전 접촉에서 전단응력이 작용하는 부분으로 가정하였다.

따라서 이 부분에서의 전단응력 즉 마찰력이 기지재료나 강화섬유가 항복이 일어날 때까지 전달되는 전단응력보다 작으면 기지재료나 강화섬유가 항복이 일어나기 전에 미끄러지기 시작하고, 따라서 잔류응력은 기지재료나 강화섬유의 항복응력에 미치지 못하게 된다. 미끄러짐이 발생하는 경우의 모델로 계면에서의 마찰력이 일정한 경우(Model-a)와 선형으로 마찰력이 증가하는 경우 (Model-b) 2가지로 가정하였다.

- Model-a 계면에서의 전단력이 일정하다고 가정

Fig. 5에서와 같이 끝부분에서부터 최대 전단응력이 $\frac{1}{2} \sigma_{my}$ 로 일정할 때 기지재료 또는 강화섬유가 항복이 일어날 때까지의 길이를 전단응력이 작용하는 길이로 생각하면, 이 부분에서 기지재료와 강화섬유의 계면에서 전달 수 있는 최대 전단응력 τ_{max} 는 계면에서의 마찰력과 같게 된다. 먼저 기지재료에 항복이 일어날 경우에서의 전단응력이 작용하는 길이는 다음과 같이 구해진다.

강화섬유의 반경을 R 이라 하고 Fig. 6 에서 힘의 평형을 고려하면 전단응력이 작용하는 길이 l은 다음

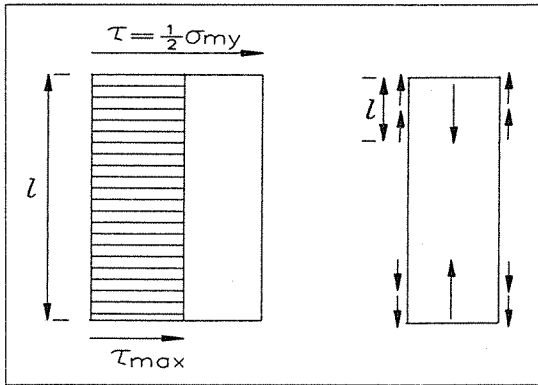


Fig. 5. Model-a

과 같다.

$$a_m \sigma_{my} = 2\pi R / \tau = 2\pi R l / \frac{1}{2} \sigma_{my} \quad (11)$$

$$l = \frac{a_m}{\pi R} \dots \dots \dots (11)$$

계면에서 전달 수 있는 최대 전단응력을

$$\tau_{max} = \mu \sigma_{my} \dots \dots \dots (12)$$

라 두면 힘의 평형으로 부터

$$a_m \sigma_m^R = 2\pi R l \tau_{max} \sqrt{n} \dots \dots \dots (13)$$

와 같이 된다. 식 (11)에서 구한 l을 식 (13)에 대입하면

$$\sigma_m^R = 2\mu \sigma_{my} \sqrt{n} \dots \dots \dots (14)$$

와 같이 되고 강화섬유에서의 잔류응력은 다음과 같다.

$$\sigma_f^R = \frac{a_m}{a_f} \sigma_m^R = \frac{1-v}{v} \sigma_m^R \dots \dots \dots (15)$$

만약 전단응력이 작용하는 길이 l을 강화섬유항복이 먼저 일어날 경우로부터 구하면 아래 식과 같이 된다.

$$a_f \sigma_{fy} = 2\pi R / \tau = 2\pi R l / \frac{1}{2} \sigma_{my}$$

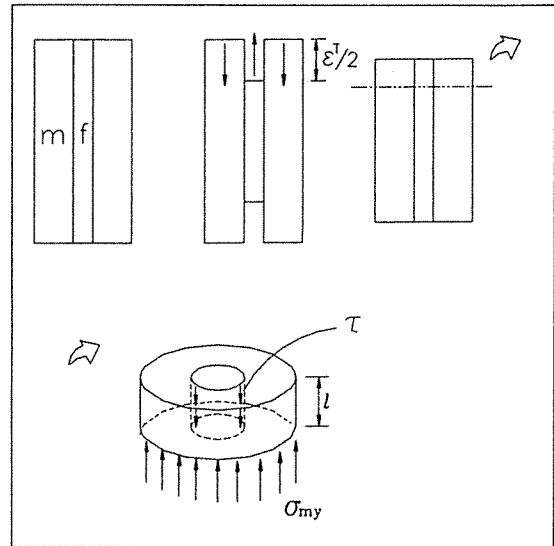


Fig. 6. Mechanism of stress transfer from shear stress to normal stress

$$l = \frac{a_f}{\pi R} \frac{\sigma_{fy}}{\sigma_{my}} \dots \dots \dots (16)$$

최대로 전달 수 있는 전단응력이 작용할 때 그에 따른 강화섬유의 잔류응력은 힘의 평형에 의하여

$$a_f \sigma_f^R = 2\pi R l \tau_{max} \sqrt{n} \dots \dots \dots (17)$$

와 같이 되고, 식 (16)으로부터 복합재료 내에 발생하는 잔류응력은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_f^R = 2\mu \sigma_{fy} \sqrt{n}$$

$$\sigma_m^R = \frac{a_f}{a_m} \sigma_f^R$$

$$= \frac{v}{1-v} \sigma_f^R \dots \dots \dots (18)$$

— Model-b) 전단력이 선형적으로 변한다고 가정

Fig. 7 과 같이 전단응력이 끝부분에서 최대 전단응력 $\frac{1}{2} \sigma_{my}$ 까지 선형적으로 변할 경우에 기지재료 또는 강화섬유가 항복이 일어날 때까지의 길이를 전단응력이 작용하는 길이로 생각하고, 이 부분에서 기지재료와

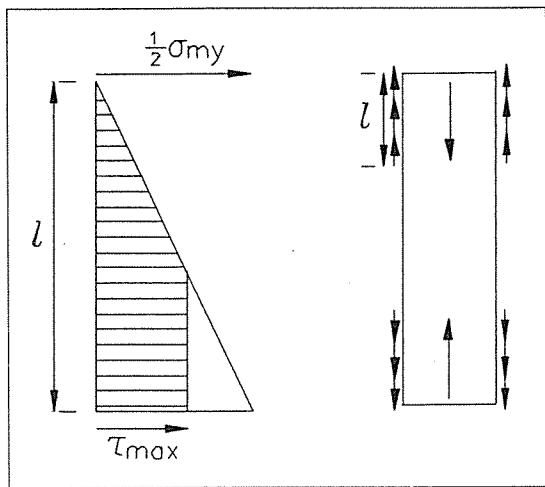


Fig. 7. Model-b

강화섬유의 계면에서 전달 수 있는 최대 전단응력 τ_{\max} 를 식 (12)로 주어진다고 가정한다.

기지재료항복이 먼저 일어날 경우에서의 전단응력이 작용하는 길이 l 은 Fig. 6, Fig. 7로부터 다음과 같이 구해진다.

$$l = \frac{2a_m}{\pi R} \dots\dots\dots (19)$$

계면에서의 최대전단응력이 τ_{\max} 일 때 기지재료에 발생하는 잔류응력은 힘의 평형으로부터

$$a_m \sigma_m^R = \frac{1}{2} 2\pi R l \left[1 + \frac{\frac{1}{2} \sigma_{my} - \tau_{\max}}{\frac{1}{2} \sigma_{my}} \right] \tau_{\max} \sqrt{n} \dots\dots\dots (20)$$

와 같이 되므로 잔류응력은 다음과 같다.

$$\sigma_m^R = 4\mu(1-\mu)\sigma_{my}\sqrt{n}$$

$$\sigma_f^R = \frac{a_m}{a_f} \sigma_m^R = \frac{1-\nu}{\nu} \sigma_m^R \dots\dots\dots (21)$$

만약 강화섬유항복이 먼저 일어나는 경우를 생각하

면 작용하는 길이 l 은 다음과 같이 구해진다.

$$l = \frac{2a_f}{\pi R} \frac{\sigma_{fy}}{\sigma_{my}} \dots\dots\dots (22)$$

식 (20)과 같은 방법으로 힘의 평형으로부터

$$a_f \sigma_f^R = \frac{1}{2} 2\pi R l \left[1 + \frac{\frac{1}{2} \sigma_{my} - \tau_{\max}}{\frac{1}{2} \sigma_{my}} \right] \tau_{\max} \sqrt{n} \dots\dots\dots (23)$$

가 되고, 복합재료내에 발생하는 잔류응력은 다음과 같다.

$$\sigma_f^R = 4\mu(1-\mu)\sigma_{fy}\sqrt{n}$$

$$\sigma_m^R = \frac{a_f}{a_m} \sigma_f^R = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_f^R \dots\dots\dots (24)$$

3.2.2 항복응력의 계산

잔류응력이 존재하는 복합재료에 인장을 가할 경우 항복응력은 다음과 같이 계산할 수 있다[8].

Fig. 8 과 같이 복합재료내에 하중 P 가 작용할때 강화섬유와 기지재료에 작용하는 하중을 P_f, P_m 이라 하면, 평형방정식으로부터,

$$P = P_f + P_m \dots\dots\dots (25)$$

이 되고, 이 식을 응력항으로 표현하면

$$\sigma = \nu \sigma_f + (1-\nu) \sigma_m \dots\dots\dots (26)$$

이 된다. 잔류응력으로 인한 강화섬유와 기지재료의 항복응력과 항복변형률을 각각 $\sigma'_{fy}, \sigma'_{my}, \epsilon'_{fy}, \epsilon'_{my}$ 라 하면 Fig. 9 와 같이 $\sigma_{fy} \rightarrow \sigma'_{fy}, \sigma_{my} \rightarrow \sigma'_{my}, \epsilon_{fy} \rightarrow \epsilon'_{fy}, \epsilon_{my} \rightarrow \epsilon'_{my}$ 로 변환 것과 같다.

복합재료의 항복응력을 σ_y 라 하고 각 구간에서 혼합 법칙을 적용하여 복합재료의 응력-변형률 관계를 구하면 다음과 같다.

(a) $\epsilon_{my} < \epsilon'_{fy}$ 일 경우

복합재료의 항복응력 σ_y 는 식 (26)에서 σ_f 는 기지재

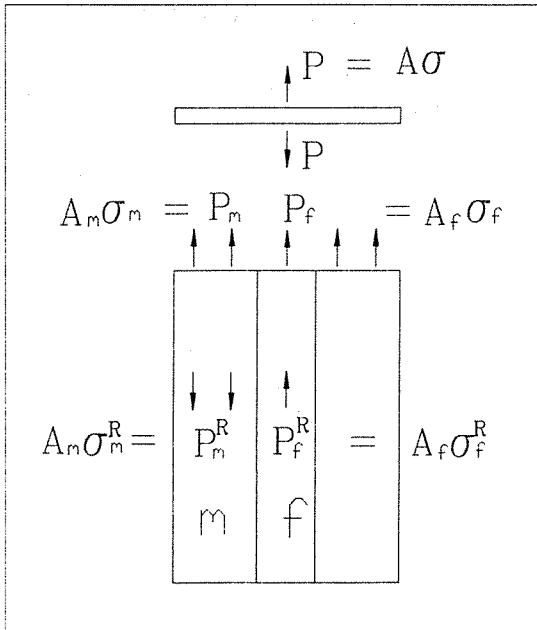


Fig. 8. Free body diagram under external loading

료 항복이 일어날 때까지의 변형률로서 구하여 지고 σ_m 은 기지재료의 항복응력에 잔류응력을 고려하여 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_y = \left[v \frac{E_f}{E_m} + (1-v) \right] (\sigma_{my} + \sigma_m^R) \quad (27)$$

강화섬유의 미끄러짐이 없는 경우에는 식 (9), (27)로부터 복합재료의 항복응력은 다음과 같고,

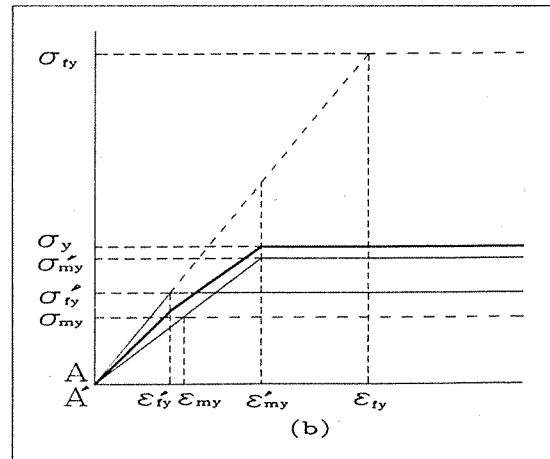
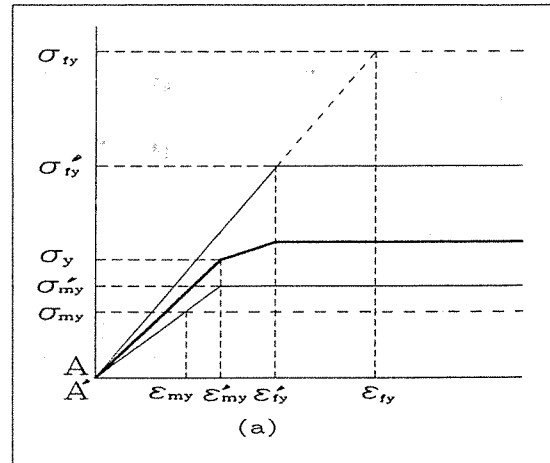
$$\sigma_y = 2 \left[v \frac{E_f}{E_m} + (1-v) \right] \sigma_{my} \quad (28)$$

강화섬유의 미끄러짐을 고려할 경우, Model-a 를 가정할 때 식 (14), (27)로부터 복합재료의 항복응력은

$$\sigma_y = \left[v \frac{E_f}{E_m} + (1-v) \right] (1 + 2\mu \bar{n}) \sigma_{my} \quad (29)$$

이고, Model-b 를 가정할 때 식 (21), (27)로부터 복합재료의 항복응력은

$$\sigma_y = \left[v \frac{E_f}{E_m} + (1-v) \right] [1 + 4\mu(1-\mu) \bar{n}] \sigma_{my} \quad (30)$$

Fig. 9. (a) $\epsilon_{my}' < \epsilon_{fy}'$ (b) $\epsilon_{my}' > \epsilon_{fy}'$

이다.

(b) $\epsilon_{my}' > \epsilon_{fy}'$ 일 경우

복합재료의 항복응력 σ_y 는 식 (26)에서 강화섬유와 기지재료 각각의 잔류응력을 고려하여 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_y = (1-v)(\sigma_{my} + \sigma_m^R) + v(\sigma_{fy} - \sigma_f^R) \quad (31)$$

강화섬유의 미끄러짐이 없는 경우에는 식 (10), (31)로부터 복합재료의 항복응력은

$$\sigma_y = (1-v)\sigma_{my} + v\sigma_{fy} \quad (32)$$

이 된다.

미끄러짐이 있는 경우에는 Model-a를 가정할 때 식 (18), (31)로부터 복합재료의 항복응력은

$$\sigma_y = (1-\nu)\sigma_{my} + \nu 2\mu \sqrt{n} \sigma_{fy} \quad (33)$$

이 되고, Model-b를 가정할 때 식 (24), (31)로부터 복합재료의 항복응력은

$$\sigma_y = (1-\nu)\sigma_{my} + \nu 4\mu(1-\mu) \sqrt{n} \sigma_{fy} \quad (34)$$

이 된다.

4. 실험 및 결과

Al/TiNi 복합재료의 인장시편은 체적분율 7%와 6.6% 두 종류로 Fig. 10 과 같이 제작하였다. 체적분율 7%에 삽입된 강화섬유의 개수는 2개이고 체적분율 6.6%에 삽입된 강화섬유의 개수는 10개이다. 그리고 강화섬유 및 기지재료의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Al/TiNi 복합재료를 500℃에서 210분 동안 시효형상기억 열처리한 후 4% 인장 예비변형을 가하였다.

예비변형이 가해진 시편에 부하된 하중을 제거하고 90℃에서 30분간 유지한 후 1.0mm/min.의 변형속도

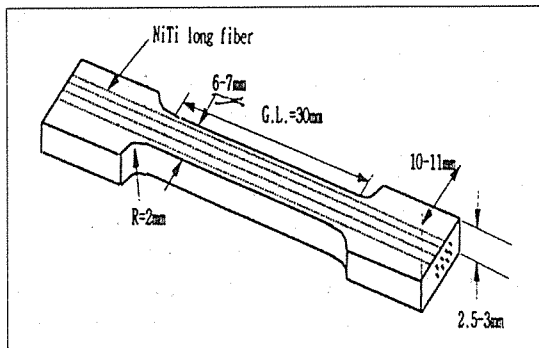


Fig. 10. a schematic of the tensile test specimen

Table 1. Mechanical properties of the matrix and fiber composite

	Young's modulus	Yield strength	Poisson ratio
AC4A Matrix	71613 MPa	127 MPa	0.34
TiNi Fiber	61725 MPa	700 MPa	0.43

로 인장시험을 하였다.

그 결과 강화섬유가 10개일 때는 미끄러짐이 관찰되지 않았고 복합재료의 항복응력이 200MPa이었고, 강화섬유가 2개일 때는 미끄러짐이 관찰되었고 항복응력이 165MPa이었다. Fig. 11, 12 는 강화섬유 직경에 따른 항복응력의 변화를 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 이론적인 모델링과 실험으로 AC4A

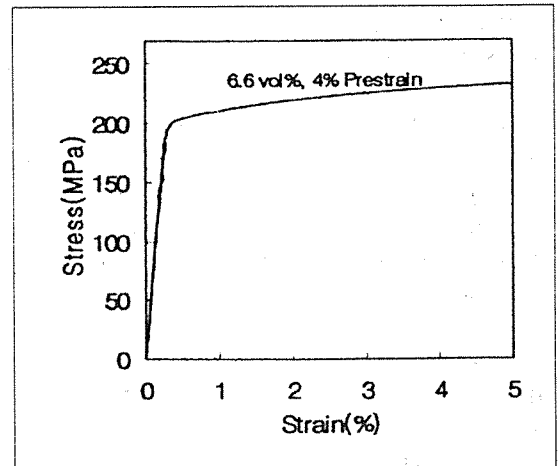


Fig. 11. σ - ϵ curve of the Al alloy composite reinforced with TiNi fiber having a diameter of 0.38mm

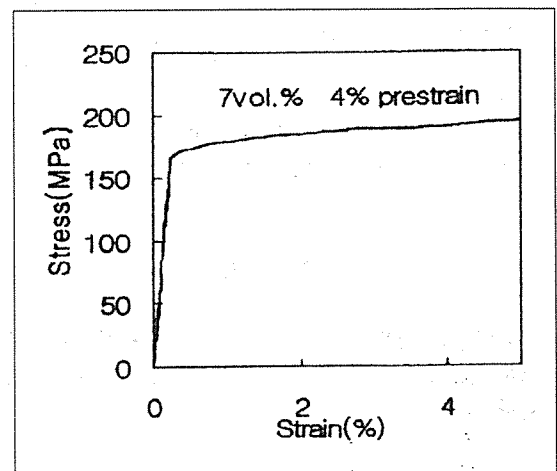


Fig. 12. σ - ϵ curve of the Al alloy composite reinforced with TiNi fiber having a diameter of 1mm

기지재료에 형상기억합금인 TiNi 강화섬유가 삽입된 복합재료에서 강화섬유 직경의 변화에 의한 계면적이 항복강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

같은 체적분율에서 강화섬유의 개수가 많아지면 계면적의 증가로 인하여 항복강도가 증가하였다. 실제로 비슷한 체적분율에서 직경 0.38mm TiNi 강화섬유가 삽입된 경우 미끄러짐이 관찰되지 않았고 복합재료의 항복응력은 200MPa이었고 직경 1mm TiNi 강화섬유인 경우에는 계면에서의 미끄러짐이 관찰되었고 항복응력은 165MPa이었다[9].

강화섬유와 기지재료의 계면에서 미끄러짐이 없다고 가정할 때 식 (8)에 의해 강화섬유 항복이 일어난 상태이므로 식 (32)로부터 복합재료의 항복응력은 164.8MPa이 된다. 이 값은 인장실험 결과로부터 얻은 항복응력 200MPa과 큰 차이를 보인다. 이 차이는 기지재료의 항복응력의 변화에 기인된다고 사료된다. 즉, 복합재료 제조과정시 기지재료가 가공경화되어 기지재료의 항복응력이 164.7MPa로 증가된다[10].

미끄러짐을 고려할 경우에 대한 항복응력의 예측을 위해 우선 강화섬유의 개수가 10개인 복합재료에 대한 인장실험에서 구해진 항복응력을 이용하여 Model-a를 가정할 경우 식 (33)으로부터 μ 를 구하면 0.16이 되고 Model-b를 가정할 경우 식 (34)로부터 μ 를 구하면 0.09가 된다. 그리고 강화섬유의 개수가 2개인 복합재료에도 계면적만 다르고 계면상태는 같기 때문에 이 값들을 이용할 수 있고 이 값들을 이용하여 미끄러짐을 고려한 복합재료의 항복응력을 Model-a를 이용할 경우와 Model-b를 이용할 경우에 대해 구하면 각각 175.3MPa, 175.9MPa이 된다. 이 값은 강화섬유의 개수가 2개인 복합재료의 항복강도와 거의 일치함을 보여준다.

따라서 계면적의 증감에 따른 복합재료의 항복강도의 변화를 이론적으로 모델링할 수 있었다.

후 기

본연구는 교육부의 신소재연구분야 연구지원으로 수행된 연구결과로서 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Taya, M. and Asenault, R. J., Metal matrix Composite Thermomechanical Behavior, Pergamon Press, Oxford, 1989.
2. Mura, T., Micromechanics of Defects in Solids, 2nd ed. Martinus Nijhoff, The Hague, 1987.
3. Furuya, Y., Sasaki, A. and Taya, M., "On Enhanced Mechanical Properties of TiNi Shape Memory fiber/Al matrix Composite," Materials Trans JIM, Vol. 34 No. 3, 1993, pp. 224-227.
4. Yamada, Y., Taya, M. and Watanabe, R., "Strengthening of Metal matrix Composite by Shape Memory Effect," Materials Trans JIM, Vol. 34 No. 3, 1993, pp. 254-260.
5. Taya, M., Furuya, Y., Yamada, Y., Watanabe, R., Shibata, S. and Mori, T., "Strengthening mechanisms of TiNi shape memory fiber/Al matrix composite." Proc. Smart Matter. ed. V.K. Varadan, SPIE 1916, 1993, pp. 374-383.
6. Taya, M., Shimamoto, A. and Furuya, Y., "Design of Smart Composites Based on Shape Memory Effect," Proceedings of ICCM-10, Whistler, B.C., Canada, August 1995.
7. Taya, M., Lulay, K. E. and Lloyd, D. J., "Strengthening of a Particulate Metal matrix Composite by Quenching", Acta metall. mater. Vol. 39, No. 1, 1991, pp. 73-87.
8. 김대수, "형상기억합금 섬유강화 금속기 복합재료의 강화와 거동 해석", 부산대학교 공과대학 공학석사 학위논문, 1996.
9. 김부섭, "TiNi계 형상기억합금을 이용한 Al기 금속 복합재료의 제조와 특성연구", 부산대학교 공과대학 금속공학과 공학박사 학위논문, 1998.
10. Cho, Y.S., Choi, I.D., Park, I.M., Cho, K.M., Kim, B.S. and An, D.M. : The 11th ICCM, Gold Coast, Australia, 14th-18th July 1997, VII-510