

論文

형상기억합금 강화 복합재의 사전 변형률과 형상기억 효과에 대한 이론적 고찰

이재곤*, 김진곤*, 김기대**

An Analytical Study on Prestrain and Shape Memory Effect of Composite Reinforced with Shape Memory Alloy

J. K. Lee*, J. G. Kim*, G. D. Kim**

ABSTRACT

A new three-dimensional model for predicting the relationship between the prestrain of the composite and the amount of phase transformation of shape memory alloy inducing shape memory effect has been proposed by using Eshelby's equivalent inclusion method with Mori-Tanaka's mean field theory. The model composite is aluminum matrix reinforced with short TiNi fiber shape memory alloy, where the matrix is work-hardening material of power-law type. The analytical results predicted by the current model show that most of the prestrain is induced by the plastic deformation of the matrix, except the small prestrain region. The strengthening mechanism of the composite by the shape memory effect should be explained by excluding its increase of yield stress due to the work-hardening effect of the matrix.

초 록

복합재의 사전변형률과 형상기억합금의 형상기억효과를 유발하는 형상기억합금의 상변화량과의 관계를 예측하기 위하여 Eshelby의 등가개재물법과 Mori-Tanaka의 평균장이론을 이용한 새로운 3차원 모델을 제안하였다. 복합재 모델은 가공경화 현상을 갖는 알루미늄을 모재로, 단섬유 TiNi 형상기억합금을 강화재로 사용하였다. 모델 해석에 의하면 사전 변형률이 지극히 작은 영역에서는 사전변형률이 모두 강화재의 형상기억 효과를 유발하고, 이 보다 큰 영역에서 사전 변형률은 강화재의 형상기억 효과와 모재의 소성변형에 의한 것으로 나타났다. 이러한 복합재의 강화기구는 모재의 가공경화 현상과 형상기억 효과에 의한 항복응력 증가를 분리하여 제시되어야 한다.

Key Words: 형상기억합금 강화 복합재(shape memory alloy reinforced composite), 사전변형률(prestrain), 형상기억효과(shape memory effect), 상변태(phase transformation), Eshelby의 등가개재물법(Eshelby's equivalent inclusion method), Mori-Tanaka의 평균장 이론(Mori-Tanaka's mean field theory)

1. 서 론

형상기억합금은 초탄성 효과와 형상기억 효과를 갖는 특성으로 인해 복합재의 강화재로 널리 사용되어왔다. 복합재의 사용 온도에서 형상기억합금은 마르텐사이트 상에서 오스테나이트 상으로 상변화됨으로써 형상기억 현상에

의해 수축된다. 이러한 형상기억 효과가 모재에 압축응력을 발생시키게 되고 이러한 결과로 복합재의 항복응력이 증가하고 파괴인성이 향상된다.

현재까지 알루미늄 모재에 형상기억합금으로 강화된 복합재에 관한 실험적 연구[1-9] 및 이론적 연구[10-14]가 활발히 진행되어 왔으며, 이러한 연구 결과 형상기억 효과가

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

** 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부, 교신저자(E-mail:gidkim@cu.ac.kr)

복합재의 기계적 특성을 상당히 향상시키는 것으로 밝혀졌다. 그러나 실험적 연구에서 사용된 복합재는 장섬유로 강화된 복합재에 국한되었으며, 이론적 연구 또한 몇몇 연구 [10-12,15]를 제외하고는 대부분 장섬유 강화 복합재에 한정되었다는 한계를 가지고 있다.[7-9,13,14]

사전변형률(prestrain)이란 복합재에 외부 하중을 인가한 후 제거하였을 때 복합재에 남아있는 잔류변형률로 정의된다. 복합재를 제조하는 과정에서 인가한 사전변형률의 크기에 따라 형상기억 효과가 결정되는 것으로 알려져 있어 [1,3,4,7,15], 복합재 설계시 사전변형률은 중요한 인자로서 인식되어 왔다. 복합재에 외부하중을 인가하고 제거하면 복합재 내의 형상기억합금에 응력유도(stress-induced) 상변화가 발생하고 이로 인해 오스테나이트 상의 일부 또는 전부가 마르텐사이트 상으로 변하게 된다.

사전변형률이 항복 응력 증가에 미치는 효과를 파악하기 위하여 Taya[3], Hamada 등[7]은 장섬유를 사용하는 복합재에 대해 1차원 및 3차원 이론적 해석을 수행하였다. 단섬유 강화 복합재에 대한 실험적 연구는 전무한 실정이고, 이론적 연구 또한 극히 제한적으로 수행되었다[10-12,15]. 위 연구에서는 사전변형률 전체를 형상기억합금의 형상기억 효과를 발생시키는 인자로 취급하여 복합재의 항복응력 증가를 예측하였다. 그러나 사전변형률은 모재의 소성변형률과 강화재의 형상기억 효과 두 가지 모두에 기인하는 것으로서 모재의 소성변형률에 따른 가공경화로 인해 발생한 복합재의 항복응력 증가도 동시에 고려하여야 한다. 따라서 형상기억합금 복합재의 강화기구를 규명하기 위해서는 복합재에 주어지는 사전변형률에 따른 강화재의 형상기억 효과와 이때 모재에 발생하는 소성변형률을 정확히 예측하는 것이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 일방향으로 정렬된 단섬유 형상기억합금 강화 복합재에 대해 사전변형률과 강화재의 형상기억 변형률 사이의 관계를 3차원 모델링을 통하여 규명하였다. 연구에 사용된 모델 복합재로 모재는 가공경화 특성을 갖는 알루미늄이고, 강화재는 TiNi 형상기억합금이다. 복합재에 인가되는 사전변형률에 따른 모재의 소성변형률과 형상기억합금의 상변태량을 예측하는데 있어서 Eshelby 이론[16]과 Mori-Tanaka의 평균장 이론[17]을 사용하였다.

2. 이론 모델

2.1 복합재 모델의 기초이론

복합재에 응력을 가한 후 제거하였을 때 복합재에 남아 있는 변형률이 사전변형률이다. 이는 형상기억합금의 온도에 따라 쌍정구조의 마르텐사이트(twinned martensite)가 역쌍정구조의 마르텐사이트(detwinned martensite)로 변하거나,

오스테나이트 상에서 역쌍정구조의 마르텐사이트 상으로 변하여 발생되는 것이다[18]. 전자의 경로에 대해서는 구체적인 실험 데이터가 부족하기 때문에 후자의 경로에 대해 기술하기로 한다.

오스테나이트 상태에서 응력을 가하면 응력 유도 상변태가 발생하여 마르텐사이트 상으로 변하며, 다시 응력을 제거하여도 오스테나이트 변태 시작 온도 이하이므로 발생된 상변태는 변하지 않는다. 복합재가 일반적으로 사용되는 온도, 즉 오스테나이트 종류 온도 이상에서 형상기억합금은 마르텐사이트 상에서 다시 오스테나이트 상으로의 변화하는 역상변태가 발생한다. 이러한 역상변태량을 형상기억 효과라고 정의하고, 따라서 형상기억 효과의 크기는 사전변형률 생성 중 형상기억합금의 상변태량에 의해 결정된다.

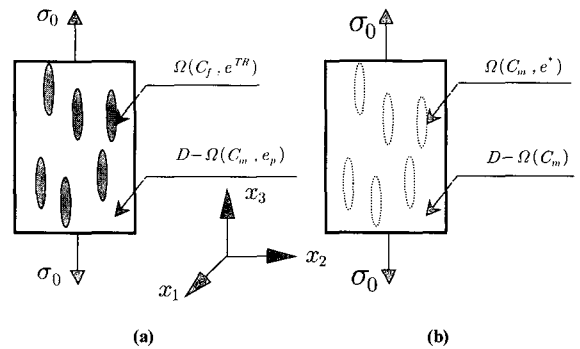


Fig. 1 An analytical model to compute stresses and strains in both the matrix and the fiber, (a) the original problem, (b) Eshelby's equivalent inclusion problem by superimposing e^e into the whole domain of the composite.

본 연구에 적용되는 모델 복합재는 Fig. 1과 같이 단섬유 형태의 형상기억합금이 알루미늄 모재에 x_3 방향으로 정렬된 것이다. 초기응력이 0인 복합재에 식(1)로 표현되는 하중을 x_3 방향으로 목표치까지 점진적으로 증가시킨다.

$$\sigma^o = \sigma^o \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = B\sigma^o \tag{1}$$

목표 하중은 강화재가 오스테나이트에서 완전히 마르텐사이트로 변태될 수 있는 하중이다. 하중의 증가로 인해 강화재의 응력이 마르텐사이트 변태 시작 응력에 도달한 이후부터 강화재는 오스테나이트로부터 마르텐사이트로 상변태가 발생한다. 이 변형률은 식(2)로 표현된다.

$$e^{TR} = \epsilon^{TR} \begin{bmatrix} -\nu_f & -\nu_f & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta\xi = V_T \epsilon^{TR} \Delta\xi \tag{2}$$

여기서 ϵ^{TR} , ν_f 및 $\Delta\xi$ 는 각각 상변태가 발생할 때 x_3

방향으로의 상변태 변형률, 강화재의 프와송비 그리고 마르텐사이트의 체적비의 증가량을 나타낸다. ξ 는 상변태 중 마르텐사이트의 체적비를 말하며, 이는 온도와 응력의 함수이다. 일정한 온도에서 ξ 는 응력만의 함수로 다음과 같이 표현된다[19].

$$\begin{aligned} \xi(\sigma_f)_{A \rightarrow M} &= 1 - \exp[a_{AM} + b_{AM} \times \sigma_f] \\ a_{AM} &= -\sigma_{ms} \ln(0.01) / (\sigma_{mf} - \sigma_{ms}) \\ b_{AM} &= -a_{AM} / \sigma_{ms} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 σ_f 는 형상기억합금이 받는 유효응력을 나타내고, σ_{ms} 와 σ_{mf} 는 각각 형상기억합금의 마르텐사이트 변태 시작응력, 변태 종료응력을 나타낸다.

인가 하중이 증가함에 따라 강화재의 상변태로 인한 변형이 발생하고 모재가 지지하는 하중이 급격히 증가하여 모재는 소성 변형된다. 이 변형률을 체적 일정 조건을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$e^p = [-0.5 \quad -0.5 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \varepsilon_p = P \varepsilon_p \quad (4)$$

모재는 가공경화재료로서 항복응력과 소성 변형률은 다음과 같이 power law type으로 근사화된다.

$$\sigma_{my} = \sigma_{my}^0 + K \times (\varepsilon_p)^n \quad (5)$$

여기서, σ_{my} 는 모재의 항복응력, σ_{my}^0 는 모재의 초기항복응력을 나타내고, K 및 n 은 모재의 가공경화상수를 나타낸다.

2.2 사전변형률과 형상기억합금의 상변태량

식(4)의 소성 변형률은 모재 영역에 정의되는 eigenstrain 이므로 복합재의 전영역에 $-e^p$ 를 중첩하면, Eshelby의 탄성문제가 된다. Fig. 1(a)는 모재 및 강화재 영역에 표시되어 있는 eigenstrain을 나타낸다. Eshelby의 등가개재물법에 의해 Fig. 1(a)는 Fig. 1(b)와 같이 강화재가 모재와 같은 재료로 치환되었을 때 강화재에 존재하는 변형률을 표시하며, 이로써 Eshelby의 등가개재물 문제로 전환된다.

Fig. 1(b)로부터 강화재의 응력(σ_f)과 모재내의 응력(σ_m)은 각각 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \sigma_f &= C_f \cdot (\bar{e}_o + \bar{e} + e^p - e^{TR}) \\ &= C_m \cdot (\bar{e}_o + \bar{e} + e - e^*) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sigma_m = C_m \cdot (\bar{e}_o + \bar{e}) \quad (7)$$

여기서 아래첨자 m 및 f 는 모재와 강화재를 나타낸다. 그리고 C 는 강성텐서, \bar{e}_o 는 비균질체(inhomogeneity)가 없을 경우 인가 하중 σ^o 에 의해 발생하는 모재의 균일 변형률장(uniform strain field), \bar{e} 는 모재 영역의 비균질체에 의한 평균 교란 변형률(average of disturbance strain), e 는 강화재 내의 교란 변형률, e^* 는 Eshelby의 등가개재물법에 의해 발생하는 등가 eigenstrain으로 계산될 값이다. 강화재의 영률(Young's modules)는 마르텐사이트 상의 체적비에 따라 달라지며, ξ 에 선형적인 함수로 가정하였다.

외부 하중의 경계조건은 σ^o 이므로, 교란응력을 복합재 전 영역에 걸쳐 체적 적분을 하면 0이 되어야 한다. 식(6)과 (7)로부터

$$\bar{e} + f(e - e^*) = 0 \quad (8)$$

여기서 f 는 복합재 내의 형상기억합금의 체적비를 나타낸다.

e , e^* , 그리고 Eshelby 텐서 S 사이에는 다음 관계가 존재한다.

$$e = S \cdot e^* \quad (9)$$

식 (2), (4), (6)-(9)를 이용하여 강화재의 평균 응력을 구하면 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma_f = RF \sigma^o + RFTR \Delta \xi + RFP \Delta \varepsilon_p \quad (10)$$

여기서, C_m

$$RF = [I + (1-f) C_m \cdot (S - I) \cdot A \cdot (C_m - C_{fam}) \cdot C_m^{-1}] \cdot B \quad (11)$$

$$RFTR = (1-f) C_m \cdot (S - I) \cdot A \cdot C_{fam} \cdot V_T \varepsilon_T \quad (12)$$

$$RFP = -(1-f) C_m \cdot (S - I) \cdot A \cdot C_{fam} \cdot P \quad (13)$$

$$A = (C_f - C_m) \cdot [(1-f)S + fI] + C_m^{-1} \quad (14)$$

RF , $RFTR$, RFP 는 6×1 , A 는 6×6 행렬을 나타내고 I 는 6×6 단위행렬을 나타낸다. 그리고 아래첨자 fam 은 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변화 중인 상태를 나타낸다.

식(8)의 유도에서 사용된 외부하중 조건으로부터 모재의 평균응력을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_m = -\frac{f}{1-f} \sigma_f + \frac{1}{1-f} \sigma^o \quad (15)$$

식(3), (5), (10) 및 (15)로부터 인가하중 σ^o 이 주어지면 미지수 $\Delta\xi$, ε_p , σ_f 및 σ_m 의 계산이 가능하다. 식(11)-(14)에 재료상수를 대입하여 행렬 $RF, RFTR, RFP$ 및 A 를 계산한다. 인가하중을 점진적으로 증가시키면서 마르텐사이트의 체적비 증가량($\Delta\xi$)을 가정하고 이 값을 바탕으로 모재의 응력이 항복응력에 도달하면 식(5)와 식(15)로부터 $\Delta\varepsilon_p$ 를 계산할 수 있다. 이렇게 계산한 $\Delta\xi$ 와 $\Delta\varepsilon_p$ 를 식(10)에 대입하여 σ_f 값을 계산하고 이를 다시 식(3)에 대입하여 $\Delta\xi$ 를 구한 후, 이 값과 가정한 $\Delta\xi$ 를 서로 비교하며 이들의 차이가 오차범위 내에 들면 수치계산을 종료하였다.

모재와 강화재의 변형률을 각각 e_m 및 e_f 라 하면, 복합재 전 영역에 중첩된 e^p 을 더하여 다음 식으로 표시된다.

$$e_m = e^o + \bar{e} + e^p \quad (16)$$

$$e_f = e^o + \bar{e} + e + e^p \quad (17)$$

따라서 하중 인가시 복합재의 전체 변형률은 복합재의 체적 적분에 의해 다음 식으로 표시된다.

$$e_c = (1-f) e_m + f e_f = e^o + f e^* + e^p \quad (18)$$

여기서, e 는 식(9)로부터 계산되고, e^* 는 식 (6)-(9)로부터 구해진다.

$$e^* = A[(C_m - C_f) C_m^{-1} \sigma^o - C_f(e^p - e^{TR})] \quad (19)$$

인가 하중이 목표치에 도달한 후 하중을 제거한다. 하중을 제거하는 과정은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 $e_{TR} = e_p = 0$ 인 상태이므로, 식 (16)-(19)로부터 하중 제거 시 복합재 전체 변형률을 계산할 수 있다. 따라서 사전 변형률과 복합재 내의 형상기억합금의 상변태량은 점진적으로 하중을 인가하고 제거하면서 수치적으로 계산된다.

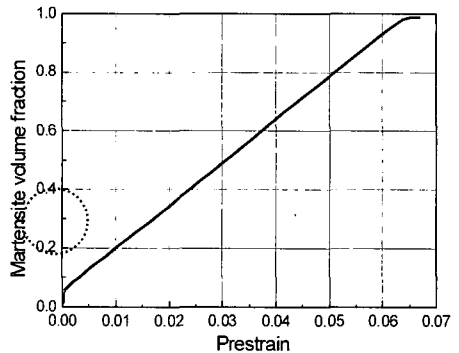
3. 결과 및 토의

본 연구에서 정립한 복합재의 사전변형률과 형상기억효과에 대한 모델을 검증하기 위하여, Table 1에 보이는 바와 같이 모델 복합재로 사용된 단섬유 형상기억합금 강화 알

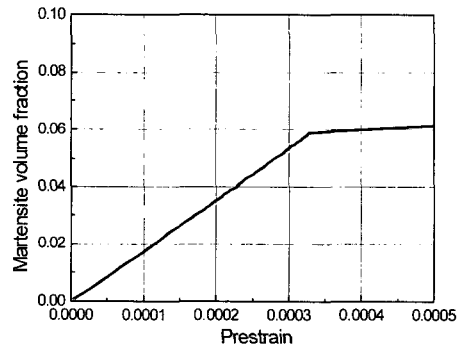
루미늄 복합재의 모재와 강화재의 재료상수를 참고문헌[7]에서 인용한 후, 이론적으로 고찰하였다. σ_{ms} 및 σ_{mf} 는 마르텐사이트 변태 시작온도 288K 이상인 298K에서 참고문헌으로부터 계산한 값을 나타낸 것이다.

Table 1 Material properties for model computations

	Aluminum	TiNi	
		Austenite	Martensite
Young's modulus	70GPa	67GPa	26.3GPa
Poisson's ratio	0.33	0.43	
Aspect ratio	-	5	
Volume fraction, f	-	0.1	
Transformation strain	-	0.06	
Yield stress	$\sigma_{my}^0 = 245\text{MPa}$ $K = 85\text{MPa}, n = 0.2$	-	
Stress for transformation		$\sigma_{ms} = 38.5$	$\sigma_{mf} = 100.1$
Transformation temperature	-	$M_s = 288\text{K}, M_f = 280\text{K}$ $A_s = 329\text{K}, A_f = 318\text{K}$	

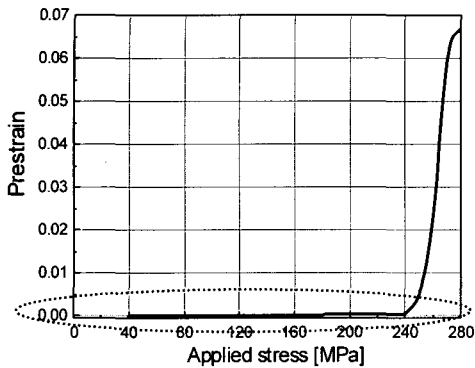


(a) Whole prestrain region

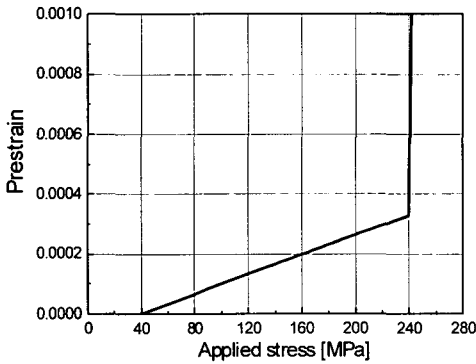


(b) Small prestrain region

Fig. 2 The amount of shape memory effect expressed in terms of the change of volume fraction of martensite in shape memory alloy as a function of prestrain given to the composite.



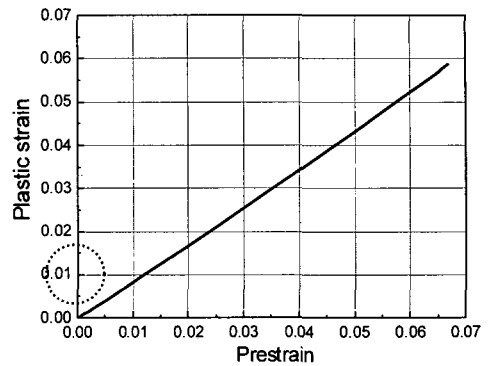
(a) whole prestrain region



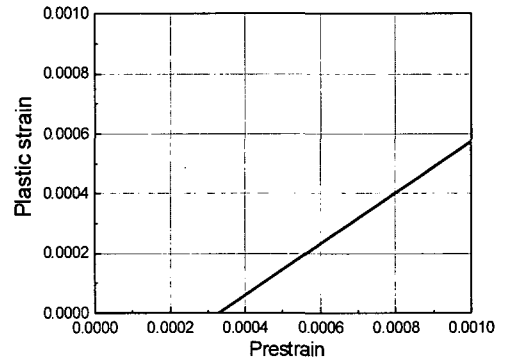
(b) small prestrain region

Fig. 3 The relation between applied stress and prestrain in the composite.

Fig. 2는 복합체에 인가되는 사전변형률의 크기에 따라 복합체 내의 단섬유 형상기억합금이 오스테나이트 상에서 마르텐사이트 상으로 상변화되는 체적비를 보여주고 있다. 전술한 바와 같이, 이러한 상변화로 인해서 복합체가 오스테나이트 종류 온도 이상에서 사용될 때 형상기억 효과를 발생하게 된다. 그림에서 나타난 바와 같이 사전변형률이 0일 때 형상기억합금의 마르텐사이트 체적비가 0, 즉 100% 오스테나이트 상태이며, 사전변형률이 6.5%에 도달할 때 100% 마르텐사이트로 상변화하였다. 사전변형률이 아주 미소하게 발생한 경우, Fig. 2(b)에서 보여주는 바와 같이 사전변형률이 0에서 3.3×10^{-4} 로 증가될 때 마르텐사이트 체적비는 0에서 0.059까지 급격히 증가하였다. 그 이유는 이 구간에서 인가 하중의 증가가 형상기억합금의 응력유도 상변화를 일으켜 복합체에 사전변형률을 발생시켰기 때문이다. 사전변형률 3.3×10^{-4} 이후부터는 마르텐사이트 체적비는 사전변형률이 증가함에 따라 서서히 증가하고, 모재는 마르텐사이트로의 상변화에 의해 인가하중 지지량이 증가하여 소성변형이 발생하게 된다.



(a) whole prestrain region



(b) small prestrain region

Fig. 4 Plastic strain along x_3 direction in the matrix as a function of prestrain given to the composite.

Fig. 3에 인가하중과 복합체의 사전변형률과의 관계를 보이고 있다. 인가하중이 240MPa에 도달할 때까지는 사전변형률이 아주 작은 값을 가지며, 이는 전적으로 형상기억합금의 상변화에 의해 발생하는 것이다. 그러나 이 값을 초과할 때부터 복합체의 사전변형률은 급격히 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이렇게 급격하게 사전변형률이 증가하는 이유는 지금까지 형상기억합금에 누적하여 발생한 상변화로 모재가 지지하는 응력이 급격히 증가하였고, 이로 인해 복합체에 모재의 항복응력보다도 낮은 하중이 가해지더라도 모재에 소성변형이 발생하였기 때문이다. 본 연구에서 사용된 복합체의 경우, 사전변형률을 약 6.5%까지 인가하여야 마르텐사이트 상으로 완전히 변태시킬 수 있다.

Fig. 4는 복합체의 사전변형률의 크기와 모재에 발생하는 하중 인가 방향의 소성 변형률의 크기와의 관계를 보여주고 있다. Fig. 4(b)에서 나타난 바와 같이 사전변형률이 0에서 3.3×10^{-4} 구간 동안 강화재의 상변화에 의해 인가하중이 강화재로부터 모재로 전달되어 항복응력에 도달하였기 때문에, 사전변형률이 3.3×10^{-4} 에서 소성변형이 시작됨

을 알 수 있다. Fig. 4(a)에서 알 수 있는 바와 같이 대부분의 사전변형률이 모재의 소성 변형률에 의해 발생하며, 사전변형률이 6.5%일 때 모재의 소성 변형률은 약 5.7% 정도로 나타났다.

모재에 소성 변형률이 증가하게 되면, 모재의 가공경화 현상에 의해 복합체의 항복응력이 증가하는 것은 당연한 현상이다. 따라서 형상기억합금을 강화제로 사용하여 사전 변형률에 따른 복합체의 항복응력 증가 현상을 설명하기 위해서는 형상기억 효과에 의한 항복응력 증가량과 모재의 가공경화 현상에 의한 항복응력 증가량을 분리하여 강화기구를 제시할 수 있어야 하며, 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

일방향으로 정렬된 TiNi 형상기억합금 단섬유 강화 복합체에 대해 사전변형률과 강화제의 형상기억 변형률 사이의 3차원 모델식을 제시하였으며, 이에 대한 이론적 고찰을 수행하였다. 모델 복합재료는 가공경화 특성을 갖는 알루미늄 모재와 TiNi 형상기억합금 강화제를 사용하였다. 사전변형률이 0에서 3.3×10^{-4} 구간에서는 형상기억합금의 응력 유도 상변태만이 발생하였다. 이 이후에는 모재의 소성변형과 상변태가 동시에 진행되었으며, 대부분의 사전 변형률은 모재의 소성 변형률에 의해 발생된다는 것을 밝혔다. 따라서 형상기억합금을 강화제로 사용하는 복합체의 강화기구를 설명하기 위해서는 형상기억 효과에 의한 항복응력 증가량과 모재의 가공경화 현상에 의한 항복응력 증가량을 분리하여 강화기구를 제시하여야 한다.

참고문헌

- 1) 박영철, 윤두표, 허선철, 김순국, 이준희, "TiNi 합금을 강화한 TiNi/Al 복합재료의 피로균열제어특성에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집 제7권 제3호, 1999, pp. 271-276.
- 2) Furuya Y, Sasaki A, Taya M, "On Enhanced Mechanical Properties of TiNi Shape Memory Fiber/Al Matrix Composite," *Mater Trans JIM*, Vol. 34, 1993, pp. 224-227.
- 3) Taya M, Shimamoto A, Furuya Y, "Design of Smart Composites Based on Shape Memory Effect," *Proc. of ICCM-10*, Vol. 5, 1995, pp. 275-282.
- 4) Furuya Y, Taya M, "Enhancement of High Temperature Mechanical Strength of Ti-Ni Fiber/Al Composite Induced by Shape Memory Effect," *Trans. Japan Inst. Metals*, Vol. 60, No. 12, 1996, pp. 1163-1172.
- 5) Porter GA, Liaw PK, Tiegns TN, Wu KH, "Fatigue and fracture behavior of nickel-titanium shape-memory alloy reinforced aluminum composites," *Materials Science and Engineering*, Vol. A314, 2001, pp. 186-193.
- 6) Armstrong WD, Lorentzen T, "Fiber phase transformation and matrix plastic flow in a room temperature tensile strained NiTi shape memory alloy fiber reinforced 6082 aluminum matrix composite," *Scripta Materialia*, Vol. 36, No. 9, 1997, pp. 1037-1043.
- 7) Hamada K, Lee JH, Mizuuchi K, Taya M, Inoue K, "Thermomechanical Behavior of TiNi Shape Memory Alloy Fiber Reinforced 6061 Aluminum Matrix Composite," *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 29A, 1998, pp. 1127-1135.
- 8) Armstrong WD, Lorentzen T, Brondsted P, Larsen PH, "An experimental and modeling investigation of the external strain, internal stress and fiber phase transformation behavior of a TiNi actuated aluminum metal matrix composite," *Acta mater.*, Vol. 46, No. 10, 1998, pp. 3455-3466.
- 9) Lee JK, "AE characteristic of the damage behavior of TiNi/Al6061 SMA composite," *Composite Structures*, Vol. 60, 2003, pp. 255-263.
- 10) 김홍진, "형상기억입자 강화 복합체의 탄성계수 평가," 대한기계학회논문집 A권, 제25권 제1호, 2001, pp. 25-31.
- 11) Yamada Y, Taya M, Watanabe R, "Strengthening of Metal Matrix Composite by Shape Memory Effect," *Materials Transactions JIM*, Vol. 34, No. 3, 1993, pp. 254-260.
- 12) Cherkaoui M, Sun QP, Song GQ, "Micromechanics modeling of composite with ductile matrix and shape memory alloy reinforcement," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 37, 2000, pp. 1577-1594.
- 13) Auricchio A, Marfia S, Sacco E, "Modeling of SMA materials: Training and two way memory effects," *Computers and Structures*, Vol. 81, 2003, pp. 2301-2317.
- 14) Lee WB, Jie M, Tang CY, "Constitutive modeling of aluminum matrix NiTi fiber-reinforced smart composite," *J. Materials Processing Technology*, Vol. 116, 2001, pp. 219-223.
- 15) 안득만, 김영구, 김부섭, 박익민, 조정목, 최일동, "단섬유 형상기억합금에 의한 복합재료의 강화기구 해석," 한국복합재료학회지, 10권 3호, 1997, pp. 1-15.
- 16) Eshelby JD, "The determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems," *Proc. of*

- the Royal Society of London*, Vol. A241, 1957, pp. 376-396.
- 17) Mori T, Tanaka K, "Average Stress in the Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions," *Acta Metallurgica*, Vol. 21, 1973, pp. 571-574.
 - 18) Brocca M., Brinson L.C., Bazant Z.P., "Three-dimensional constitutive model for shape memory alloys based on microplane model," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 50, 2002, pp. 1051-1077.
 - 19) Tanaka K, "A thermomechanical sketch of shape memory effect: one-dimensional tensile behavior," *Res Mechanica*, Vol. 18, 1986, pp. 251-263.