

핫프레스법에 의한 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 제조 및 기계적 특성에 관한 연구

박영철* · 박동성* · 이준희** · 이규창***
(2001년 3월 26일 접수, 2002년 5월 2일 심사완료)

Fabrication and Characterization of TiNi Shape Memory Alloy Fiber Reinforced 6061 Aluminum Matrix Composite by Using Hot Press

Young-Chul Park, Dong-sung Park, Jun-Hee Lee and Guy-Chang Lee

Key Words: Shape Memory Alloy(형상기억합금), Smart Composite(지적복합재료), Hot Pressing (고온프레스), Prestrain(예변형)

Abstract

Al alloy matrix composite with TiNi shape memory fiber as reinforcement has been fabricated by hot pressing to investigate microstructures and mechanical properties. The analysis of SEM and EDS showed that the composites have shown good interface bonding. The stress-strain behavior of the composites was evaluated at temperatures between 363K and room temperature as a function of prestrain, and it showed that the yield stress at 363K was higher than that of the room temperature. Especially, the yield stress of this composite increases with increasing the amount of prestrain, and it also depends on the volume fraction of fiber and heat treatment. The smartness of the composite is given due to the shape memory effect of the TiNi fiber which generates compressive residual stress in the matrix material when heated after being prestrained. Microstructural observation has revealed that interfacial reactions occur between the matrix and fiber, creating two intermetallic layers.

1. 서론

TiNi 형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)이 강화된 지적복합재료(Smart Composite)에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다.^(1,2) 이러한 지적복합재료의 설계개념은 상온(마르텐사이트 상)에서 인장 예변형을 지적 복합재료에 부가하고, 온도를 올리면 강화제인 TiNi 섬유가 오스테나이트 변태를 일으켜 예변형량 만큼 복합재료 내에서 줄어들려는 성질이 나타난다. 이러한 성질은 TiNi

섬유의 형상기억효과(Shape Memory Effect, SME) 때문이며, 이러한 SME에 의해 기지에는 압축잔류응력(Compressive Residual Stress)이 발생하여 전체적으로 복합재료의 강도가 증가하게 된다.^(3,7) Armstrong⁽⁴⁾은 TiNi SMA 섬유가 강화된 Al6061 기지 복합재료에 대하여 일차원 모델을 이용한 이론적 방법과 실험적 방법의 비교를 통한 열적 거동을 보고하였으나, 복합재료의 제조공정이나 강화기구에는 초점을 둔 것은 아니었다. 또한 Taya와 이준희⁽⁵⁾ 등은 고온 프레스(Hot Press, HP)법을 이용하여 진공 분위기에서의 TiNi/Al 6061 복합재료의 최적 제조조건과 실험적 방법과 이론적 방법의 비교를 통한 복합재료의 강화기구에 대하여 보고하였다. 그러나 제조방법상 섬유의 체적함유량을 높이는 데 한계가 있어 섬유의 체적함유량을 5.3% 이내의 범위

* 책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학과
E-mail : parkyc67@donga.ac.kr
TEL : (051)200-7652 FAX : (051)200-7656
* 동아대학교 대학원 기계공학과
** 동아대학교 금속공학과
*** 포항산업과학연구원

로 한정하였으며, 예변형량 또한 2.9% 이내의 범위로 한정함으로써, 체적함유량과 예변형량의 관계를 명확히 규명하지 못하였다.

본 연구의 목적은 TiNi/Al6061 복합재료를 후관으로 제조하기 위한 기초 연구로서 HP법을 채용하여 복합재료를 제조하고 복합재료의 강화기구를 규명하는 것이다. 국내에서는 용탕단조법이나 분말야금법을 이용한 지적복합재료의 제조에 관한 연구가 활발히 추진되어 왔다.¹⁸⁾ 그러나 이런 방법들로 제조된 지적복합재료는 강도특성 면에서 만족할 만한 수준이 아니었으며, 강화재인 섬유 배열문제 등 많은 문제점들이 노출되었다. 강도문제와 섬유의 배열문제를 동시에 해결할 수 있는 대안으로써 HP법은 아주 유용한 방법이다. HP법의 장점으로는 다양한 크기의 복합재료를 제조할 수 있으며, 다양한 섬유함유량을 가진 복합재료를 제조할 수 있다는 점이다. 또한 후관으로 제조할 수 있으므로 복합재료의 상용화 측면에서 매우 유리하다.

본 연구에서는 TiNi 섬유의 SME를 이용하여 알루미늄 6061을 기지 금속으로 하는 복합재료를 HP법으로 제조하였으며, 최적제조조건을 결정하기 위하여 다양한 온도와 압력조건 하에서 복합재료를 제조하였다. 최적조건을 결정은 단면 SEM분석을 통한 접촉계면에서의 섬유와 기지의 계면분리여부 및 EPMA분석에 의한 확산층의 관찰을 이용하였다. 최적의 제조조건 하에서 섬유의 체적함유량이 각각 3.2%, 5.2%, 7%인 시험편을 제조하여 상온 및 고온(363K)에서 기계적 특성을 평가하였으며, 예변형에 의한 강도증가효과를 평가하기 위하여 예변형량을 각각 1%, 3%, 5%를 부가하였다. 또한 복합측(Law of mixture)을 이용하여 TiNi 형상기억합금의 강화효과에 대한 평가를 시도하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 형상기억복합재료를 제조하기 위하여 관재 Al6061(1mm)와 직경 500 μ m의 TiNi 섬유(Ti-50.0 at.% Ni)를 사용하였다. 또한 TiNi/Al6061 형상기억복합재료를 제조하기 위하여 유압실린더에 의해 작동되는 250톤 용량의 고온 프레스를 제조하였다. 이 프레스 장치는 고온 도내에 장착되어 있으며, 최고 800°C까지 온도 유

지가 가능하다.

Fig. 1은 섬유인 형상기억합금이 서로 접촉되지 않고 일정한 간격으로 직선적인 배열을 유지하도록 고안된 치구를 나타낸다. 이 치구를 사용함으로써 섬유가 일정한 간격으로 배치된 동일한 시험편을 반복적으로 제작할 수 있을 뿐만 아니라, 섬유를 다층으로 고정할 수 있기 때문에 섬유의 체적함유량을 자유로이 변경하면서 시험편을 제작할 수 있다.

TiNi 섬유는 150mm×22mm×1mm의 알루미늄 6061 판재 사이에 일정한 배열로 고정되며, 알루미늄 관재는 Fig. 2와 같이 프레스다이 사이에 넣고 고온에서 압력을 가하였다. 실험에 사용된 복합재료는 섬유의 체적함유량이 3.2%, 5.2% 및 7%인 3종류이다. TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 최적제조조건을 결정하기 위하여 두 온도조건(803K, 833K), 두 압력조건(40MPa, 60MPa)에서 30분간 압력을 가하였다. 온도의 측정은 두 알루미늄판 사이에서 측정하였으며 압력은 압력을 가하기 전인 초기의 알루미늄 치수를 기준으로 계산하였다. 기지인 알루미늄의 표면은 공기 중에서 쉽게 산화가 일어나므로 아르곤 분위기에서 시험편을 제조하였다.

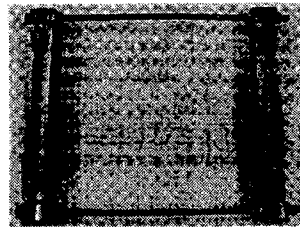


Fig. 1 Fixture for keeping TiNi shape memory alloy fiber

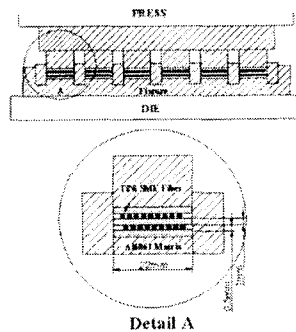


Fig. 2 Schematic diagram of hot pressing

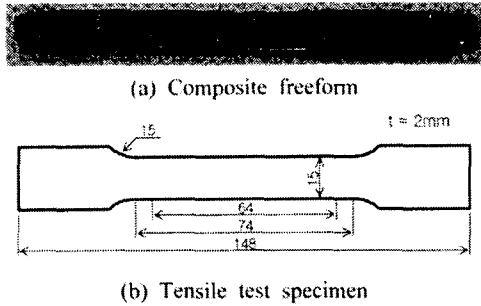


Fig. 3 The shape of composite freeform and specimen

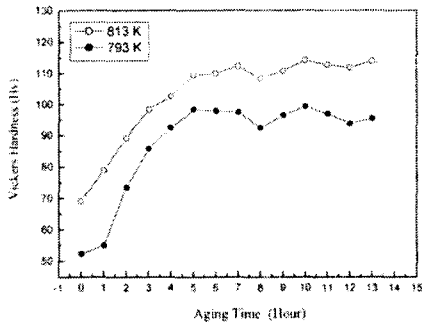


Fig. 4 The Vickers hardness as a function of aging time

HP법으로 제조된 복합재료의 프리폼과 이를 이용하여 가공한 판형 인장시험편의 형상 및 치수를 Fig. 3에 나타낸다.

기지인 알루미늄 6061의 강도를 증가시키기 위하여 T6 열처리를 실시하였다. 제작된 시험편에 대하여 공기 중에서 각각 793K와 813K로 1시간 동안 용체화처리 후 수냉 처리하였으며, 이어서 448K에서 시효처리를 실시하였다. Fig. 4는 시효처리 시간과 비커스 경도와와의 관계를 나타낸다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 복합재료의 경도는 813K에서 용체화처리를 한 경우가 793K에서 용체화처리 한 경우보다 높은 경도 특성을 나타낸다. 또한, 813K 및 793K의 두 온도조건 모두에서 5시간 이상 시효처리하면 경도값은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 열처리조건에 따른 복합재료의 강도특성을 평가하는 대신에 기지인 Al6061의 경도특성이 우수한 열처리 조건을 결정하고, 결정된 열처리 조건에서 복합재료를 제조하였다. Fig. 4의 결과를 참고하여

제작된 시험편에 대하여 813K에서 1시간동안 용체화 처리를 실시한 후, 448K에서 5시간 동안 시효처리를 수행하였다.

예변형은 상온에서 시험편에 대하여 1×10^{-4} mm/s로 인장하여, 1, 3, 5%를 가하였다. 예변형을 가한 시험편에 대하여 363K에서 인장시험을 실시하였다. 실험온도는 열전대를 이용하여 시험편의 표면에서 측정하였다. HP법으로 제조되는 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 최적 제조조건을 결정하기 위하여 TiNi 함유와 기지인 Al6061의 접합계면에서 SEM에 의한 접합성 평가 및 EPMA에 의한 화학조성의 변화를 관찰하였다. 최적 제조조건 결정에 사용된 시험편은 섬유의 체적함유량이 3.2%이다. 섬유의 체적함유량이 7%인 경우 인접한 섬유와의 간격이 0.7mm로 섬유의 직경 0.5mm보다 넓고, 또한 833K의 고온에서 압력을 가하므로 섬유의 간격은 접합상태에 영향을 미치지 못하였다.

3. 복합재료의 이론강도

일방향 복합재료를 섬유축 방향으로 인장하는 경우의 복합재료의 응력과 변형률과의 관계는 등변형을 전제로 하는 경우,

$$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m, \quad \epsilon_{fu} \leq \epsilon_{mu} \quad (1)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 ϵ_c 는 복합재료의 평균변형, ϵ_m 및 ϵ_{mu} 는 각각 섬유와 기지의 파괴변형이다. 식 (1)에 의해,

$$\frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m}, \quad \sigma_{fu} \leq \left(\frac{E_f}{E_m}\right)\sigma_{mu} \quad (2)$$

가 얻어진다. 또한 응력은 선형 복합칙(Law of Mixture)으로 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_c &= V_f \sigma_f + (1 - V_f)\sigma_m \\ &= \{V_f E_f + (1 - V_f)E_m\}\epsilon_c \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 σ_f 와 σ_m 은 강화섬유 및 기지 내에서 발생하는 응력이며, V_f 는 강화섬유의 체적함유량, E_f 와 E_m 은 강화섬유 및 기지의 종탄성계수이다. 강화섬유 또는 기지 중 어느 한쪽이 파괴될 때까지는 이 식이 유효하다.⁽⁹⁾ 등가섬유응력을 $\bar{\sigma}_{fu}$ 라 하면,

$$\frac{\sigma_c}{V_f} = \bar{\sigma}_{fu} = \sigma_{fu} \left(1 + \frac{1 - V_f}{V_f} \cdot \frac{E_m}{E_f}\right) \quad (4)$$

이 된다. σ_c 가 기지의 강도와 같아지는 섬유 함유량을 V_{kr} 이라 하면,

$$V_{kr} = \frac{\sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\epsilon fu}}{\sigma_{fu} - (\sigma_m)_{\epsilon fu}} \quad (5)$$

가 된다. 또한 섬유의 파괴시 기지의 파괴가 동시에 발생하는 섬유의 함유량을 V_{min} 이라 하면,

$$V_{min} = \frac{\sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\epsilon fu}}{\sigma_{fu} + \sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\epsilon fu}} \quad (6)$$

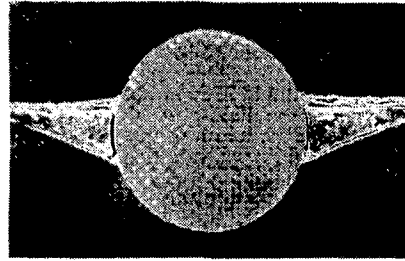
와 같이 나타낼 수 있다. 이와 같은 강도계산에 있어서 문제점으로는 섬유의 파괴보다 기지의 항복이 먼저 발생하는 경우의 거동 및 섬유의 강도에 산포가 있는 경우에 강도를 어떻게 평가할 것인가 하는 것이다. 또한 계산된 값이 실제의 강도보다 큰 값을 나타낸다는 것이다. 특히, 섬유의 강도에 산포가 있는 경우의 취급이 아주 중요하다. 따라서 본 연구에서는 섬유 강도의 산포를 무시하기 위하여 평균된 섬유 강도값을 사용하였다. 단순 복합층에 의한 강도 계산에 사용된 TiNi 섬유의 체적함유량은 3.2%, 5.2%, 7%이다. 또한, 이론강도와 실험적으로 얻은 강도와의 비교를 통하여 TiNi 섬유의 강화효과 및 고온에서의 형상 기억효과에 의한 복합재료의 강도증가를 평가하였다.

4. 결과 및 고찰

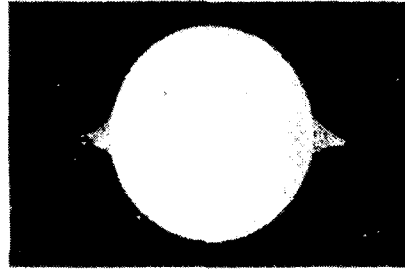
4.1 최적 제조조건의 결정

복합재료의 최적 제조조건을 결정하기 위하여, 복합재료의 강도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 세 가지 요인(온도, 압력, 시간)을 고려하였다. 다양한 조건에서 제조된 복합재료의 미세조직을 Fig. 5에 나타낸다. 그림에 의하면, 온도 및 압력 조건에 따라서 섬유와 기지의 접합정도에 차이를 보이고 있다. (d)의 온도 833K 압력 60MPa로 30분간 유지한 상태에서 최적의 접합상태를 나타낸다. (a), (b), (c)의 조건에서는 기지와 기지의 접합면에서 접합라인이 관찰되었으며, 섬유와 기지의 접합면에서도 완전한 접합이 되지 않은 상태로 존재함을 관찰할 수 있다. Fig. 6은 Fig. 5(d)의 사각박스부분을 EPMA분석한 결과이다. 결과에 의하면 확산층의 두께는 약 $400\mu\text{m}$ 이며, Ti_3Al 성분이 확산층에서 관찰되었다. 확산층의 존재는 기지와 섬유가 화학적 반응의 결과로 계면접합의 중요 정보가 된다. 접합면에 대한

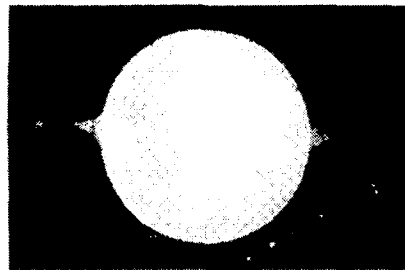
SEM과 EPMA분석 결과로부터 TiNi/Al6061 형상 기억복합재료의 최적 제조조건으로 833K, 60MPa에서 30분간으로 결정하였다.



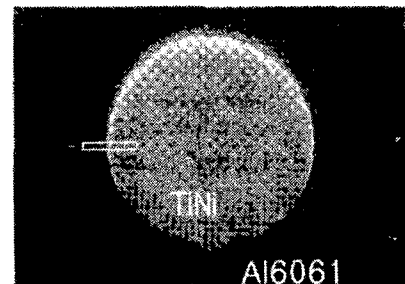
(a) 803K, 40MPa, 30min.



(b) 803K, 60MPa, 30min.



(c) 833K, 40MPa, 30min.



(d) 833K, 60MPa, 30min.

Fig. 5 SEM micrograph of the TiNi/Al6061 composite made by various processing conditions

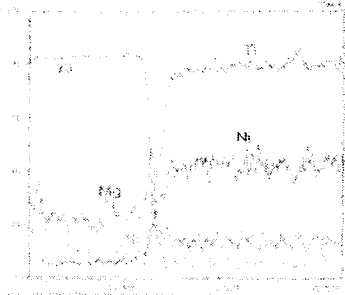


Fig. 6 EPMA analysis of the interface of fiber and matrix

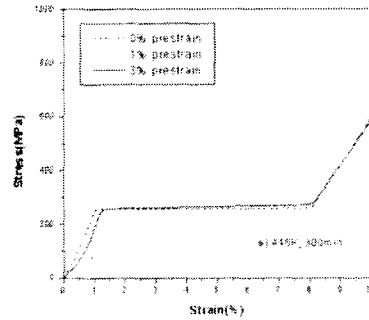
4.2 기계적 특성평가

4.2.1 TiNi 함유의 강도특성

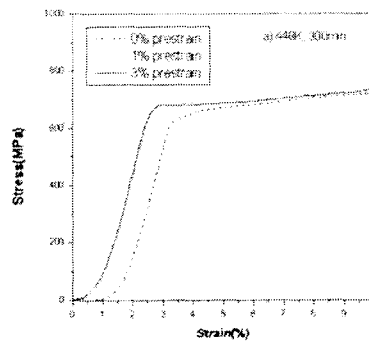
TiNi 형상기억합금의 기계적 특성을 평가하기 위하여 시험편의 제작 조건과 동일한 온도(448K)와 동일한 시간(5 시간)으로 열처리를 실시하였다. 이는 TiNi 함유가 기지인 알루미늄6061에 강화되었을 때와 같은 조건에서 기계적 특성을 평가하기 위함이다.

마르텐사이트변태 개시온도인 M_s 와 오스테나이트 변태 완료온도인 A_f 는 응력유기 마르텐사이트 변태의 증가에 의해 부하응력이 증가할수록 완만한 증가를 보이며, 94MPa에서의 M_s 및 A_f 온도는 304K와 339K로 보고⁽⁸⁾되었다. 따라서 본 실험에서는 고온의 경우 충분히 높은 온도인 363K에서 기계적 특성을 평가하였다.

Fig. 7은 상온에서 예변형(0%, 1%, 3%)을 가한 TiNi 함유에 대하여 상온 및 고온인 363K에서 인장시험을 실시한 결과를 나타낸다. Fig. 7(a)에서 알 수 있듯이 TiNi 함유의 상온에서의 응력-변형을 곡선은 일반강과는 대단히 다른 형태를 나타내고 있으며, 이 곡선을 전체적으로 탄성구역, 초탄성구역, 마르텐사이트 경화구역으로 나눌 수 있다.^(8,10) 여기서 초탄성구역이란 1.5~8%의 범위를 의미한다. TiNi 함유의 경우는 상온에서는 예변형의 효과는 관찰할 수 없으며 초탄성구역에서의 강도는 284MPa이다. 반면, 고온인 363K에서는 탄성구역과 초탄성구역의 두 구간으로 나눌 수 있다. 초탄성구역에서의 강도는 715MPa로 상온에서의 강도와 비교해서 상당히 높은 강도를 나타낸다. 또한 고온에서는 미소하나마 예변형에 의한 강도증가 효과를 관찰 할 수 있다.



(a) At room temperature



(b) At 363K

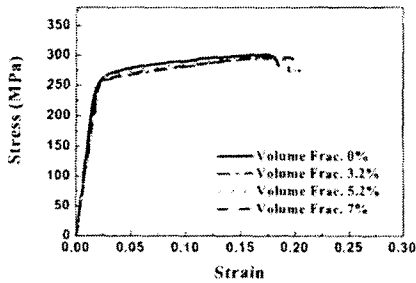
Fig. 7 Stress-strain curve of TiNi SMA fiber at each temperature

(aging time=300min. prestrain=0%, 1%, 3%)

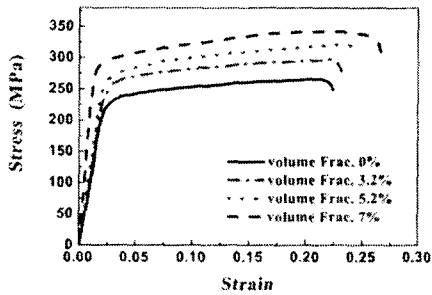
TiNi 형상기억합금의 응력-변형을 선도로부터, 고온에서의 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 강도는 예변형에 의한 강도증가 효과보다 함유의 체적함유량의 증가에 의한 강도증가 효과가 더 두드러질 것으로 예상할 수 있다.

4.2.2 복합재료의 기계적 특성

TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 기계적 특성에 미치는 함유 체적함유량의 영향을 평가하기 위하여 체적함유량이 0%, 3.2%, 5.2%, 7%인 시험편에 대하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 상온(TiNi 함유의 M_s 온도와 A_s 온도 사이) 및 고온(A_s 온도 이상)의 두 온도에서 실시하였다. Fig. 8은 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 상온 및 363K에서의 응력-변형률 선도를 나타내며, TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 상온 및 고온에서의 체적함



(a) At room temperature



(b) At 363K

Fig. 8 Stress-strain curve of TiNi/Al6061 composite at room temperature and 363K

유량에 따른 인장강도의 변화를 Fig. 9에 나타낸다. Fig. 9에서 알 수 있듯이, 상온에서의 복합재료의 인장강도는 체적함유량이 증가할수록 오히려 미소하게 감소하는 결과를 나타낸다. 이는 강화제인 TiNi 형상기억합금의 초탄성구역에서 복합재료가 파단됨을 의미한다. 즉, 상온에서는 섬유와 기지의 인장강도 차이에 의해 섬유와 기지의 계면분리가 발생되었기 때문이다. 그러나 363K에서는 섬유의 체적함유량이 증가할수록 높은 인장강도를 나타낸다. 고온인 363K에서 상온과는 달리 체적함유량에 따라 강도가 증가하는 이유는 강화제인 TiNi 섬유의 강도가 고온에서 매우 높고 또한 인장력이 작용하는 동안 TiNi 섬유의 형상기억효과가 지속적으로 작용하기 때문이다 사료된다. 그러나 모재가 항복될 때까지는 계면분리가 발생하지 않았으나 이후 기지와 모재의 열팽창계수의 차이에 기인하여 계면분리가 발생하였다. 계면분리현상을 최소화하기 위해서는 복합재료의 제조 시 TiNi SMA 섬유의 적경도 고려해야 할 것으로 판단된다.

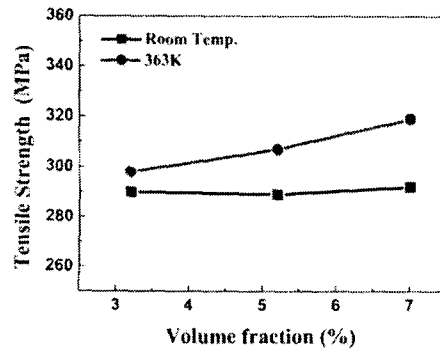
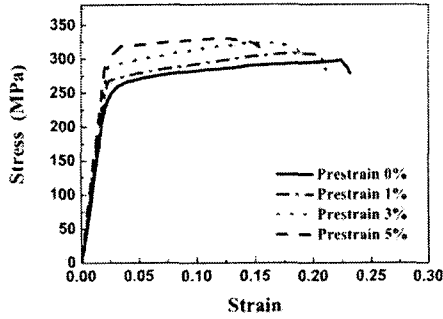


Fig. 9 The relationship between volume fraction and tensile strength

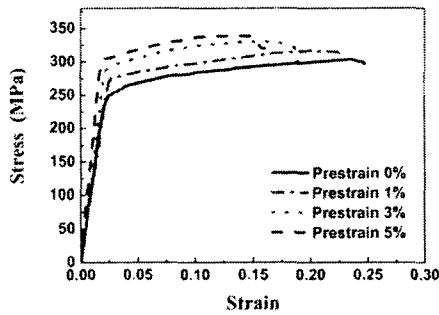
Fig. 10은 363K에서 예변형에 따른 응력-변형률 선도를 나타낸다. Fig. 10에서와 같이, 복합재료의 인장강도는 예변형량의 증가에 따라 증가한다. 이는 TiNi 섬유의 형상기억효과에 의해 지지인 알루미늄 6061에 압축잔류응력이 발생되기 때문이다. TiNi 섬유는 As이상의 온도에서는 형상기억효과를 발휘하여 초기의 형상으로 되돌아가려는 성질이 생기며, 이 성질에 의해 지지인 알루미늄에는 압축잔류응력이 발생하고 As이상의 온도에서는 섬유 자체의 강도도 증가하기 때문에 복합재료 전체의 강도가 증가하는 것이다.

Fig. 10에서 TiNi 섬유의 체적함유량이 증가할수록 복합재료에는 큰 변형이 발생한다. 그러나 예변형량이 증가할수록 복합재료의 변형량은 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 예변형량이 증가할수록 지지인 알루미늄에 많은 소성변형이 생기기 때문이다. 따라서 복합재료의 전체 연신은 체적함유량이 높은 Al6061에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다.

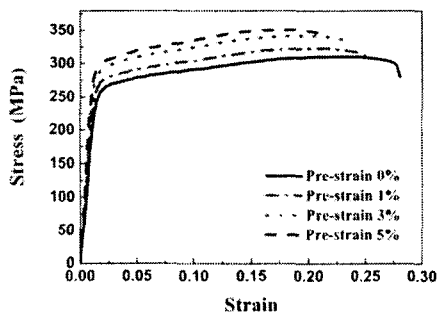
363K에서 예변형량에 따른 인장강도와 체적함유량의 관계를 Fig. 11에 나타낸다. TiNi 섬유의 체적함유량이 증가함에 따라 복합재료의 인장강도는 거의 선형적인 증가를 나타내며, 섬유의 체적함유량의 증가에 따라 인장강도의 증가폭이 커짐을 알 수 있다. 반면 모든 체적함유량의 복합재료에서 예변형량이 증가할수록 인장강도의 증가폭은 둔화되는 경향이 나타난다. 이는 TiNi 섬유가 예변형에 의한 강도증가의 효과가 미소하기 때문이다. 따라서 TiNi/Al6061 형상기억복합재료



(a) $V_T = 3.2\%$



(b) $V_T = 5.2\%$



(c) $V_T = 7\%$

Fig. 10 Stress-strain curve of TiNi/Al6061 composite

의 강도를 증가시키기 위해서는 복합재료의 예변형을 증가시키는 쪽보다는 섬유와 기지의 체적함유량을 증가시키는 것이 훨씬 효과적임을 알 수 있다.

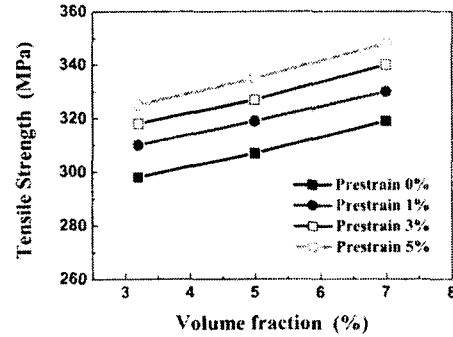


Fig. 11 The relationship between volume fraction and tensile strength as a function of prestrain at 363K

4.2.3 복합재료의 이론강도

Table 1에 기지인 알루미늄6061과 TiNi 섬유와 상온 및 고온에서의 기계적 특성을 나타낸다. TiNi 섬유의 경우는 초탄성영역에서의 강도값을 사용하였다. 이는 실험결과 상온에서의 복합재료의 파단은 섬유의 초탄성영역에서 발생하기 때문이다. 고온인 363K에서는 강화재 섬유의 강도가 높게 나타난다. Fig. 12는 식 (3)을 이용하여 계산한 상온 및 363K에서 섬유의 체적함유량에 따른 강도를 나타내며, Fig. 13은 실험적으로 얻은 복합재료의 인장강도와 단순 복합축으로 계산한 복합재료의 인장강도를 나타낸다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 상온에서의 인장강도보다 고온인 363K에서의 인장강도가 더 높게 나타난다. 이 결과는 Fig. 9의 결과와 같은 경향으로 고온에서 강화재인 TiNi 섬유의 강도가 높은 것에 기인한다. Fig. 13에서 상온에서의 인장강도는 실험적 방법으로 구한 결과와 복합축으로 구한 결과가 모두 섬유의 체적함유량에 따라 강도의 감소를 나타낸다. 이는 상온에서는 기지인 알루미늄의 강도가 강화재인 TiNi 섬유의 강도보다 높기 때문이며, 복합축으로 구한 강도값이 더 높게 나타나는 것은 복합축의 경우 섬유와 기지의 계면분리현상이 반영되지 않기 때문이다. 고온에서는 실험적으로 구한 강도값과 복합축을 이용하여 계산한 강도값이 거의 일치한다. 그러나 낮은 체적함유량의 복합재료에서는 복합축에 의한 강도가 높게 나타났으며, 7%의 체적함유량에서는 실험치에 의한 강

Table 1 Mechanical properties of Al6061 and TiNi Fiber

	Temp.	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Tensile Strength (MPa)
Al6061	R.T.	70	0.33	307.9
	363K	70	0.33	288
TiNi	R.T.	41	0.43	284
	363K	83	0.43	715

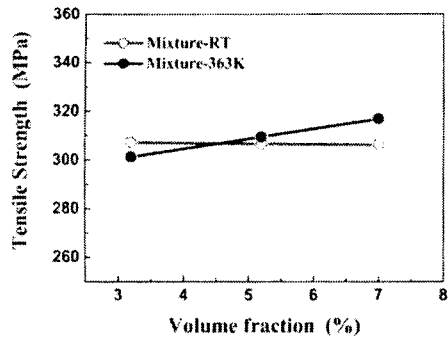


Fig. 12 Analysis of the tensile strength in the composite as a function of volume fraction of TiNi fiber

도가 높게 평가되었다. 낮은 체적함유량에서는 복합축으로 계산한 강도값이 실험값보다 높게 평가되고, 체적함유량이 높아질수록 실험에 의한 강도가 높게 평가되는 것으로부터 예변형을 가하지 않아도 고온인 363K에서는 미소하나마 형상 기억효과에 의한 강도증가분이 존재함을 예측할 수 있다. Fig. 14는 예변형을 가한 경우의 복합재료의 강도와 단순 복합축으로 계산한 강도를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 예변형을 가한 경우의 강도가 복합축으로 계산한 강도보다 훨씬 높게 나타났다. 이는 복합축을 이용하여 예변형을 가한 경우의 복합재료의 강도를 평가하는 것은 불가능함을 나타낸다. 예변형을 가한 경우는 섬유 자체의 체적함유량이 증가함에 따라 복합재료의 강도가 증가된다. 그러나 예변형을 가하지 않은 경우에는 섬유의 체적함유량의 증가에 따른 복합재료의 강도증가가 두드러지지 않는다. 따라서 복합재료의 강도를 증가시키는 효과적인 방법은 섬유의 체적함유량과 예변형을 동시에 고려하는 것이다.

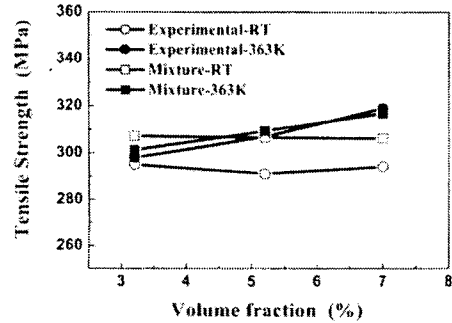


Fig. 13 Analysis and experimental results of the tensile strength in the composite as a function of volume fraction of TiNi fiber

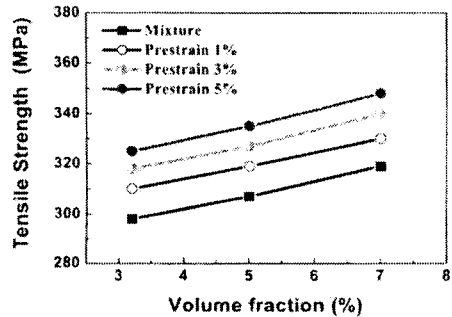


Fig. 14 Analysis and experimental results of the tensile strength in the composite as a function of pre-strain of TiNi fiber

5. 결론

핫 프레스법을 이용한 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 제조조건 및 복합재료의 기계적 특성에 대한 본 연구에서 다음의 결과를 얻었다.

(1) 핫 프레스법을 이용한 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 최적 제조조건은 온도 833K, 압력 60MPa 및 유지시간 30분임을 알았으며, EPMA 분석으로부터 섬유와 기지의 집합계면에 확산층이 존재함을 확인하였다.

(2) 복합재료의 강도특성을 813K 및 793K의 두 온도 조건에서 비교한 결과 높은 온도인 813K에서 강도 특성이 우수하였으며, 5시간 이상 시효 처리하면 기지금속인 Al6061의 강도변화는 거의 없었다.

(3) 고온에서 복합재료에 예변형을 가한 경우의 인장강도는 예변형량이 증가할수록 높은 강도특성을 나타내었으나 예변형량이 증가할수록 강도증가의 폭은 둔화됨을 확인하였다.

(4) 복합재료는 예변형량의 증가에 의한 강도증가 효과보다 강화섬유의 체적함유량의 증가에 따른 강도증가 효과가 더 현저하게 나타났으므로 복합재료의 강도를 증가시키기 위해서는 강화섬유의 체적함유량을 증가시키는 것이 효과적임을 확인하였다.

(5) 단순 복합축과의 비교에서, 고온에서는 미소하나마 순수하게 형상기억효과에 의한 강도증가치가 존재함을 확인하였다. 또한 예변형을 가한 경우는 복합축을 이용한 복합재료의 강도 평가는 불가능하였다.

참고문헌

- (1) Hamada, K., Lee, J. H., Mizuuchi, K., Taya, M. and Inoue, K., 1998, "Thermomechanical Behavior of TiNi Shape Memory Alloy Fiber Reinforced 6061 Aluminum Matrix Composite," *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTION(A)*, Vol. 29A, pp. 1127-1135.
- (2) Park, Y. C. and Furuya, Y., 1992, "Thermal Cyclic Deformation and Degradation of Shape Memory Effect in Ti-Ni Alloy," *Nondestr. Test. Eval.*, Vol. 4, No. 8, pp. 541-554.
- (3) Furuya, Y., 1995, "Design and Experimental Verification of Intelligent Materials Using Shape Memory Alloy," *Proceeding of the International Symposium on the Microsystems, Intelligent Materials and Pobots, Sendai, Japan*, pp. 313-318.
- (4) William D. Armstrong, 1996, "A One-Dimensional Model of a Shape Memory Alloy Fiber Reinforced Aluminum Metal Matrix Composite," *J. Intell. Mater. System Struct.*, Vol. 7, pp. 448-453.
- (5) Furuya, Y and Park Y. C 1992, "Thermal Cycle Deformation and Degradation of Shape Memory Effect in Ti-Ni Alloy," *Nondestr. Test. Eval*, Vol. 8-9, pp. 541-554.
- (6) H. Ehren Stein, 1986, "Production and Shape memory Effect of Nickel-Titan," *Proceeding of the International Conference on Material Transformation*, pp. 1083-1086.
- (7) Yuanti Hunag, Gueping Yang and Ping He, 1985, "The Investigation of Internal Friction Electric Resistance and Shape Change in NiTi Alloy During Phase Transformation," *Scripta Metallurgica*, Vol. 19, pp. 1033-1038.
- (8) Park Y. C., Yun D. P., Lee G. C. and Furuya, Y., 1997, "Material Properties Strengthening Mechanism in Shape Memory TiNi Fiber Reinforced Al Matrix Composite," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 21, No. 3, pp. 405-413.
- (9) Fujii, T. and Zako, M., 1992, "Fracture Mechanics of Composite Material," Real Number Edition, Inc., Tokyo, Japan, pp. 13-16.
- (10) Wayman, C. M., 1980, "Application of Shape Memory Alloy," *Journal of the Japan Inst. Metals*, Vol. 19, No. 5, pp. 26-32.
- (11) Park Y. C., Oh S. W, Cho Y. B, Hue C. W. and Lee M. Y, 1992, "A Study on Cyclic Deformation and Fatigue Phenomenon of Shape Memory Alloy," *Korea Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 6, No. 1, pp. 87-95.