

〈논 문〉

## TiNi/Al 형상기억 지적복합재료의 기계적 특성 및 강화기구

박영철\* · 윤두표\* · 이규창\*\* · 古屋泰文\*\*\*

(1996년 5월 9일 접수)

### Material Properties and Strengthening Mechanism in Shape Memory TiNi Fiber Reinforced Al Matrix composite

Young Chul Park, Doo Pyo Yun, Gyu Chang Lee and Y. Huruya

**Key Words :** Intelligent Material(지 적 재 료), Composite(복 합 재 료), Shape Memory Strengthening Effect(형상기억 강화효과), Inverse Transformation(역변태)

#### Abstract

In the present paper, it is attempted to reconfirm the "Intelligent" material properties using both the sintered TiNi/Al(1100) matrix composite made by powder metallurgy method and the squeeze-casted TiNi/Al6061 specimens. A metal matrix composite is, its fault has been considered to deteriorate a strength of composite by heating residual stress of the matrix. Therefore, it is necessary to remove a tensile residual stress, to produce the strength of a composite better. On the contrary, if compressive residual stress happens in matrix of composite in place of tensile residual stress, it will make the strength of composite better. So that, this paper introduce the development of a high strength of composite, by using compressive residual stress well, on the study. By using these specimens, shape memory strengthening effects in tensile strength and fatigue crack propagation above inverse transformation temperature of TiNi fiber were investigated. We occurs the prestrain and volume fraction for to discuss the effects of a composite strength. Moreover, by SEM observation, the effect of the residual stress at the interface between Al matrix and TiNi fiber and some brittle precipitation layers such as inter metallic compounds on fracture mechanisms was discussed metallurgically.

#### 1. 서 론

항공기, 인공위성, 원자로 등은 고립된 극한 환경 속에서 사용하기 때문에 가동기간 중에는 인강이 직접 관리할 수가 없다. 따라서, 가동 중 이상 진동이나 미소균열의 발생을 발견하지 못하고 계속

사용하게 된다면, 항공기 사고나 원자로 사고와 같은 큰 사고를 유발할 가능성이 대단히 크다. 그러나 항공기 기체구조의 재료 자신이 이상 진동이나 미소균열의 발생에 대하여 자기검출 및 회복기능을 갖추고 있다면, 이와 같은 사고는 미연에 방지될 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 차세대 항공우주용 재료로서 이상진동이나 미소균열의 발생에 대하여 자신이 검출, 진단하고 회복시킬 수 있는 소위 지적기능을 갖춘 지적재료의 사용이 불가피할 것으로 생각되며, 따라서 이와 같은 지적재료의 개발에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.

\*회원, 동아대학교 기계공학과

\*\*산업과학기술연구소

\*\*\*日本, 東北大學 材料加工學科

한편, 금속복합재료(metal matrix composite, MMC)는 기존의 금속재료에 비하여 비강성, 비강도 뿐만 아니라 내열성, 내마모성 등이 뛰어나기 때문에 현재 각광받는 신재료 중의 하나이다.

그러나, 이러한 금속복합재료의 강도개선에 있어서 가장 문제점으로 지적되고 있는 것은 바로 기지내의 열적 잔류응력에 기인한 복합재료의 강도저하라 할 수 있다. 즉, 금속복합재료는 기지의 열팽창계수(Coefficients of thermal expansion, CTE)가 섬유에 비하여 대단히 크기때문에 복합재료 제조시 두 재료의 열팽창계수 차이에 기인하여 기지내에는 인장응력이 잔류하게 되며, 이와 같은 열적 인장잔류응력은 복합재료의 강도를 저하시키는 요인이 되므로 항상 문제점으로 지적되고 있다.

따라서, 복합재료의 강도를 개선하기 위하여서는 내부 인장잔류응력을 없애는 것이 필수적이라 할 수 있으며, 보다 나아가 역으로 복합재료의 기지내에 인장잔류응력 대신에 압축잔류응력을 발생시킨다면 복합재료의 강도는 압축잔류응력의 영향에 의하여 크게 향상되어 질 것이다.

복합재료에 압축잔류응력을 발생시키는 방법으로서 앞에서는 설명한 기지와 섬유간의 열팽창계수의 차이를 역으로 이용한 방법과 상변태에 의한 체적변화를 이용하는 방법이 있으나, 후자가 보다 효율적인 방안이라고 할 수 있으며 본 연구에서는 상변태에 의한 체적변화를 이용하여 고강도 복합재료 개발에 대하여 검토하고자 하였다.

형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)은 온도 및 응력변화에 의하여 상변태를 일으켜서 큰 체적변화가 유발되므로 고강도 복합재료 개발을 위한 섬유재료로서 최적재료라고 할 수 있으며, 뿐만 아니라 형상기억합금 중에서 TiNi 합금은 우수한 기계적 특성은 물론 온도감지와 구동기구 그리고 시간적 기억, 회복기능 등의 지적재료의 조건을 전부 갖추고 있으므로 지적복합재료의 섬유재료로서는 최적재료라고 할 수 있다.<sup>(1)</sup>

따라서 본 연구에서는 이와 같은 우수한 지적특성과 상변태에 의한 체적변화의 특성도 아울러 겸비한 TiNi 형상기억합금을 섬유로 이용하여 형상기억복합재료를 시료로 제작하여, 우선 형상기억효과<sup>(2-4)</sup>에 의하여 발생한 압축잔류응력이 복합재료의 정적강도의 향상에 미치는 영향을 정량적으로 검토함과 아울러 피로특성에 미치는 영향에 대하여서도 명백히 밝혀냄으로써 형상기억복합재료가 우

수한 지적복합재료로서의 실용화 가능성을 명확히 하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 형상기억복합재료의 제조

본 연구에서 사용한 강화섬유로서는 일본 관동특수강(주)에서 제작 시판한 직경 0.4 mm인 냉간가공된 Ti-Ni<sub>50%</sub> 형상기억합금 와이어를 사용하였다.

TiNi/Al 복합재료는 용탕단조법과 분말야금법의 각각 다른 두 가지 방법에 의하여 제조하여 그 특성을 비교하였다.

우선 용탕단조법에 의한 형상기억복합재료의 제조는 Ti-Ni 와이어를 복합재료의 제작을 위하여 110 mm 크기로 절단한 후 Fig.1에서 보는 바와 같은 전용 복합재료 제작용 치구의 상하 섬유 고정판에 끼워 고정하였다. 이때, TiNi 섬유의 체적률을 실험목적에 따라 0%, 3%와 5%의 세 종류의 시료를 준비하였다.

이와 같이, TiNi 와이어로 채워진 치구를 573 K로 가열된 가압주조용 전용 금형에 장착한 후 금형내에 1073 K의 Al6061 합금용탕을 주입한 후 펀치

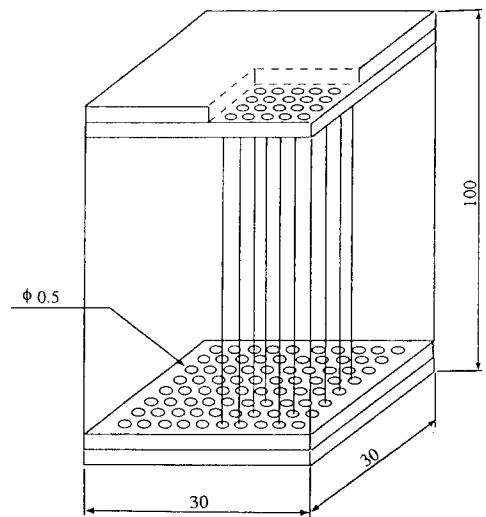


Fig. 1 Model for aligning TiNi fiber

Table 1 Chemical composition of Al 6061

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.60	0.3	0.26	0.02	1.0	0.10	0.06	Vol

**Table 2** Mechanical properties of Al 6061

Temperature	Tensile stress(Mpa)	Elastic modulus(Gpa)	Elongation(%)
R. T	135	64.3	11.9

를 이용하여 금형내의 용탕에 75 MPa의 압력을 가압하여 시료를 제작하였다. 본 연구에서 지지금속으로는 금속복합재료에 일반적으로 이용되는 Al6061을 사용하였으며, 주조 후의 지지금속의 화학적 성분은 Table 1, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

제조된 시료는 방진가공을 이용하여 Fig. 2(a)와 같이 기계가공을 한 후, 압축잔류응력 유도를 위한 가공열처리를 Fig. 3과 같은 조건으로 실시하였으며, 가공열처리 후의 시험편에 대하여 인장시험을 실시하였다.

Fig. 3은 형상기억복합재료의 내부에 압축잔류응력을 발생시키기 위하여 본 연구에서 실시한 가공열처리과정과 강화기구를 모식적으로 나타내었다.

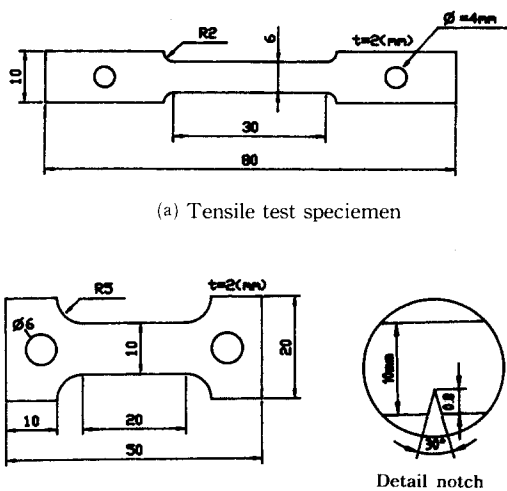
그림에서 보는 바와 같이 (a)와 같이 가공 제작한 TiNi/Al6061 형상기억복합재료를 (b) 단계에서 TiNi 형상기억합금의 형상기억온도인 773 K에서 30분간 가열처리하여 TiNi 섬유에 형상기억 열처리를 실시한 후, 빙수냉각하여 TiNi 섬유를 마르텐사이트상으로 만들었다. 이와 같이 마르텐사이트상으로 된 TiNi 섬유는 마르텐사이트로 조직이 변태함에 따른 전위의 이동으로 대단히 연화되어 기

지금속 Al6061보다 더욱 낮은 강도를 갖게 된다.

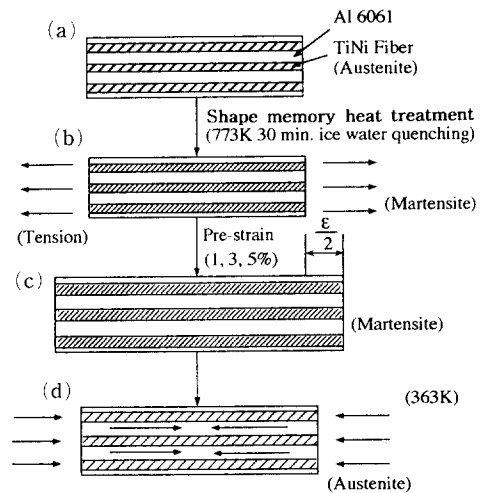
이와 같이 열처리된 시료를 (c) 단계에서 인장하중에 의하여 3%와 5%의 두 종류의 예변형을 가한다. 그러면 Al합금은 소성변형되나, TiNi 섬유는 마르텐사이트상 그대로의 초탄성영역에 있다. 이와 같이 예변형이 가하여진 복합재를 (d) 단계에서와 같이 다시 Af온도 이상인 363 K로 재가열하면 TiNi 섬유는 마르텐사이트상에서 오스테나이트로 역변태가 일어남으로써 (d) 단계에서 가하여진 초탄성영역에 해당되는 예변형은 형상기억효과에 의하여 수축되어 원래의 (b) 상태로 되돌아간다. 이에 반하여 지지금속인 Al6061합금은 온도변화에 따라 변형이 일어나지 않으므로 따라서 구속을 받게 되어 섬유 내부에는 인장응력이 발생하고, 지지 내부에는 역으로 압축응력이 발생하게 된다.

이상과 같은 가공열처리과정 중 (a), (b) 과정을 실시한 TiNi/Al6061 복합재료 시편을 공시재로 하여 기계적 성질을 시험하였다.

Fig. 4는 분말야금법의 시료 제조과정을 모식도로서 나타낸 것이다. 분말야금법에 의한 복합재료의 제작은 지지금속으로 순 Al 분말을 사용하였다. 즉, 그림에서 보는 바와 같이 전용 금형에 순 Al



(a) Tensile test specimen  
(b) Fatigue test specimen  
**Fig. 2** Geometry of a specimens



**Fig. 3** Heat treatment of a shape memory fiber/metal matrix composite

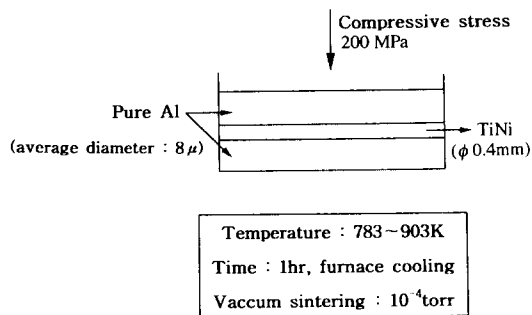


Fig. 4 Manufacturing of TiNi/Al composite

분말을 채운 후, TiNi 와이어를 순 Al분말 중에 길이 방향으로 배열시킨 다음 유압 press를 이용하여 200 MPa로 실온 압분한 후 783~903 K의 온도로 진공소결( $10^{-4}$ torr)하여 시료를 제작하였다.

이와 같은 시료를 다시 Fig. 2(a)와 같이 방전가공을 실시한 후 Fig. 3과 같은 가공열처리를 거친 후 공시재로 하여 인장시험을 하였다. 이때, 압축 잔류응력을 발생시키기 위한 가공열처리과정에서 분말야금법에서는 783~903 K로 진공소결하였으므로, Fig. 3의 (b)단계는 생략하였으며, (c)단계의 예변형은 분말야금법의 재료는 변형이 그렇게 크지 않으므로 1%, 3%로 고정하여 실험하였다.

## 2.2 실험방법

본 연구는 크게 두 가지 방향으로 나누어 연구를 진행하였다. 우선 첫째로 형상기억복합재료에 있어서 강화기구와 지적특성을 발휘하는데 중점적인 역할을 하는 섬유재료인 TiNi 와이어의 형상기억특성에 대하여 우선적으로 검토하였으며, 그 후 형상기억복합재료의 강도특성 및 지적특성에 대하여 검토하였다.

우선 형상기억합금의 변태특성에 대하여 검토하기 위하여 본 연구에서는 TiNi 와이어를 773 K에서 30분간 진공열처리하여 형상기억열처리를 실시한 후 수냉을 한 시험편에 대하여 자체 제작한 시험장치를 이용하여 94, 150, 180, 250 MPa의 각 일정응력하에서 가열냉각에 따른 변태 변형률-온도 Hysteresis 특성을 측정하고 그 선도로부터 각 응력상태에서의 TiNi 와이어의 변태온도( $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$ ,  $A_f$ )를 구하였다.

또한, TiNi 와이어의 고온 인장특성은 오토그래프 인장시험기를 이용하여 293, 313, 333, 363 K의 각 온도에서의 인장특성을 검토하였다.

한편, 형상기억복합재료의 지적특성에 대하여서는 우선, 분말야금법으로 제작된 TiNi/Al 시험편에 대하여 최적 소결온도를 도출하기 위하여 843, 873, 903 K에서 각각 1시간 진공소결한 시료를 만능시험기에서 인장시험하였다. 또한, 예변형에 의한 잔류응력이 복합재의 강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 인장시험기를 이용하여 1%, 3%, 용탕단조법에 의해 제조되어진 복합재료에 있어서는 각각 3%, 5%의 영구변형을 가한 후 363 K에서 인장시험을 하였다.

또한, TiNi/Al 분말야금 형상기억복합재료의 피로균열진전거동 특성을 검토하기 위하여 체적률이 3%인 시료에 대하여 영구변형을 1% 가한 후, 일정응력, 응력비  $R=0$ , 주파수 10 Hz의 반복하중하에서 피로균열진전시험을 수행하였다. Fig. 2(b)에 피로시험편의 형상과 치수를 나타내었으며, 피로시험에 사용된 시험기는 전기유압 서보 피로시험기인 Instron 1331을 사용하였다. 또한 전기로(Instron Model 3111)를 이용하여 363 K에서 노내의 분위기를 안정화시켰다. 한편 형상기억합금의 압축잔류응력이 피로균열진전의 제어에 미치는 영향을 검토하기 위하여 처음에는 상온(R. T.)에서 피로균열진전시험을 수행하다가 어느 정도 피로균열이 진행된 후에  $A_f$  역변태 온도보다 다소 높은 363 K로 시험 온도를 급격히 상승시켜 이 온도에서 피로균열진전 실험을 계속하여 압축잔류응력이 피로균열진전 제어에 미치는 영향을 명확히 검토하였다. 이때의 균열길이는 공구식 이동현미경을 이용하여 0.1 mm 간격으로 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 TiNi 형상기억합금의 변태 및 기계적 특성

Fig. 5는 TiNi 와이어를 293, 313, 333, 353, 363 K의 각 온도에서 인장시험한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 TiNi 합금은 일반 금속과는 전혀 다른 응력-변형거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.

즉, 상온의 낮은 온도 구역인 293~313 K의 온도범위에서는 대단히 낮은 영률과 항복강도를 나타내고 있으며, 또한 곡선도 전체적으로 탄성구역, 초탄성구역, 경화구역의 3구역<sup>(5,6)</sup>으로 나눌 수 있고, 가열에 의하여 회복될 수 있는 초탄성영역의 변형률이 1~6%로 대단히 크다는 것을 알 수 있

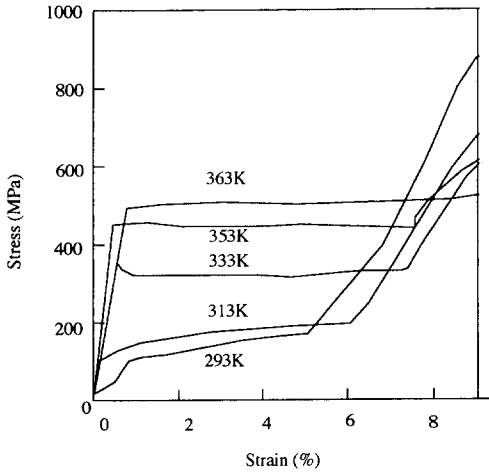


Fig. 5 Stress-strain curve of Ti-Ni wire at various temperature

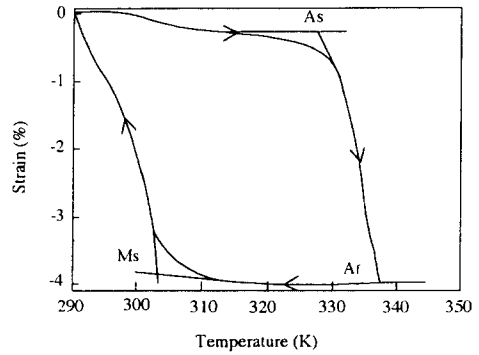
다. 따라서 TiNi 와이어를 이용하여 형상기억복합 재료를 제작할 경우 이용할 수 있는 예변형률은 대체적으로 최소 1%에서 최대 6%까지 이용할 수 있음을 알 수 있다.

또한, TiNi 합금은 온도가 높아지게 되면 조직이 마르텐사이트에서 오스테나이트상으로 역변태함에 따라 항복강도와 탄성률은 증가하며 응력-변형률 선도의 형상도 일반적인 금속의 선도와 거의 같은 형상으로 변화됨을 알 수 있다. 따라서, TiNi 형상기억합금은 저온의 마르텐사이트상에서 가열함에 따라 오스테나이트상으로 변태됨과 아울러 큰 가공경화현상을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

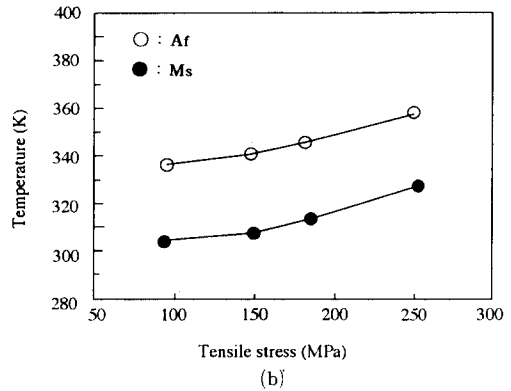
Fig. 6은 (a)의 변태 변형률-온도선도로부터 각 부하응력에 있어서의 마르텐사이트 변태개시온도인  $M_s$ 와 오스테나이트변태 완료온도인  $A_f$ 의 온도변화를 정량적으로 검토한 결과를 (b)에 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 94 MPa의 하중 하에서의  $A_f$ 와  $M_s$ 는 각각 339K, 304 K이었으며,  $M_s$  온도와  $A_f$ 온도는 부하응력이 증가할수록 완만하게 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 부하응력에 따라 변태온도가 증가하는 것은 응력유기 마르텐사이트 변태<sup>(7-9)</sup>의 증가에 의한 것이라 할 수 있다.

### 3.2 분말야금법으로 제작된 형상기억복합재료의 강도특성

Fig. 7은 분말야금법으로 제작된 Al 모재와 섬유체적률이 3%인 TiNi/Al 복합재료의 소결온도에 따른 상온 인장특성을 검토한 결과이다. 인장강도



(a)



(b)

Fig. 6 Hysteresis loop and transformation temperature  $A_f$ ,  $M_s$  under constant stress

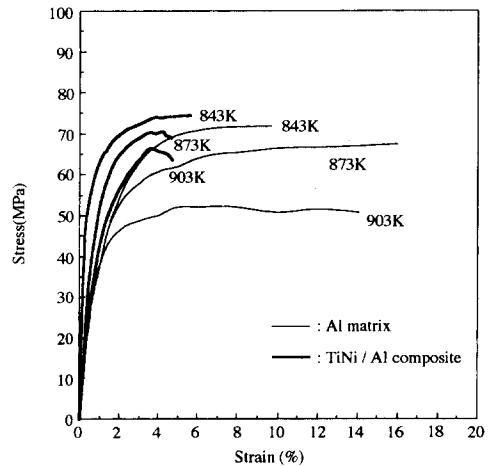


Fig. 7 Stress-strain curve of Al matrix and TiNi/Al composite ( $V_f=3\%$ ) depend on sintering temperature

를 비교하여 보면 그림에서 보는 바와 같이 Al 모재와 체적률 3%인 TiNi/Al 복합재료의 인장강도는 둘다 843 K에서 최대를 나타낸 후 소결온도가

높을수록 저하됨을 알 수 있다. 또한, 변형률을 비교하여 보면 순 Al 모재의 경우 본 연구의 소결 온도 범위에서는 대체적으로 10% 이상의 큰 변형률을 나타내나, TiNi/Al 복합재료의 경우에는 순 Al의 변형률에 비해 크게 줄어들어 최대 약 5% 정도의 변형률을 가짐을 알 수 있다.

따라서, 일반적으로 형상기억복합재료를 제작할 경우 예변형을 부가한 후 가열에 의하여 형상수축을 유발시켜 모재 내부에 압축잔류응력을 발생시킴으로써 재료의 가공경화 및 균열개쇄 작용을 일으키도록 한다. 따라서, 이때 보다 큰 압축잔류응력을 발생시키기 위하여 TiNi 합금의 초탄성 변형을 최대한으로 이용할 수 있을 정도로 충분한 변형률을 가지는 복합재료의 제조가 필수적이라는 것을 알 수 있다. 본 연구의 TiNi 합금의 경우 앞의 Fig. 5의 결과로부터 5%정도가 최대로 이용될 수 있는 초탄성 변형률임을 알 수 있으므로, 본 연구에서는 5%까지의 예변형을 견딜 수 있는 기계적 성질을 가진 복합재료의 제조가 필수적이라 할 수 있다. 이와같은 관점에서 보면 분말야금법으로 제작된 TiNi/Al 복합재료는 Al 모재의 경우 10%의 변형률을 그리고 체적률 3%인 TiNi/Al 복합재료의 경우에는 5%의 변형률을 나타내므로 TiNi 합금의 초탄성 변형을 최대한으로 이용할 수 있는 충분한 변형률을 가지고 있음을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 3% 예변형을 적용하여 예변형에 의하여 발생하는 압축잔류응력이 강도 향상에 미치는 효과에 대하여 검토하였다.

한편 소결온도로서는 843 K가 가장 최적의 소결 온도임을 알았으며, 이하 본 연구에서는 소결온도를 843 K로 고정하여 연구를 진행하였다.

Fig. 8은 분말야금법으로 제작된 TiNi/Al 형상기억복합재료의 섬유체적률에 따른 363 K의 고온 인장강도의 변화를 검토한 결과이다. 비교를 위하여 앞의 상온에서의 시험결과도 함께 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 모재보다 복합재료가, 그리고 섬유의 체적률이 증가할수록 상온 및 고온 강도가 증가함을 알 수 있다. 이와같이 복합재료에 있어서 섬유체적률의 증가에 따른 강도의 증가는 일반적인 금속복합재료의 섬유강화 특성으로 잘 설명되어질 수 있다.

또한, 각 체적률에서의 상온강도와 고온강도를 비교하여 보면 체적률이 0%의 순 Al에 있어서는 상온 인장강도가 고온 인장강도보다 높게 나타나

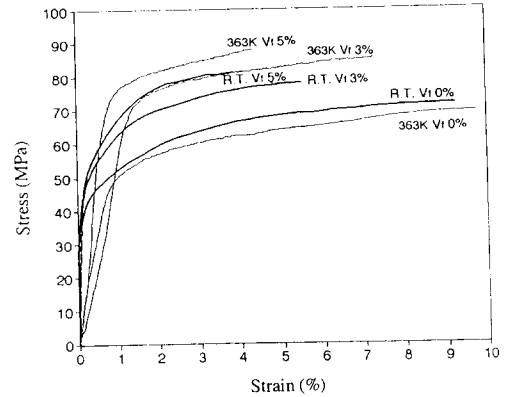


Fig. 8 Stress-strain curve of TiNi/Al composite at 363K and room temperature

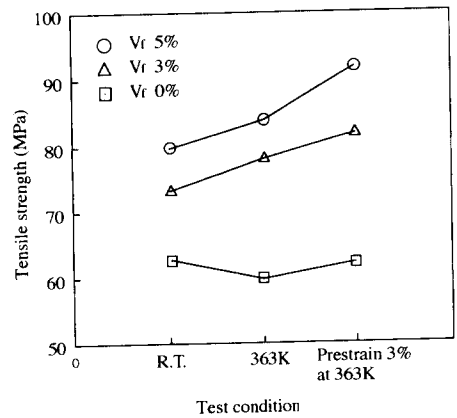


Fig. 9 Change of tensile strength of TiNi/Al composite at various test conditions

나, TiNi 섬유가 함유된 형상기억복합재료에서는 체적률이 3%, 5% 모두 고온 인장강도가 상온 인장강도보다 오히려 높게 나타남을 알 수 있으며, 그 증가의 폭은 3% 보다 5%가 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

이와같이 TiNi/Al 복합재료에서 상온강도보다 363 K의 고온강도가 높게 나타나는 이유는 기지금속인 Al은 상온보다 고온에서 강도가 낮아지나 섬유로 사용하고 있는 TiNi는 앞의 Fig. 5에서 보는 바와 같이 상온에서는 마르텐사이트 조직으로 대단히 연화하여 낮은 강도를 나타낸다. 그러나 Al은 온도 이상인 363 K에서는 조직이 마르텐사이트에서 오스테나이트로 변태되어 강도가 500 MPa로 상온 강도의 약 3배 이상의 높은 강도를 나타내므로 이와 같은 TiNi 섬유의 고온강도의 증가가 모재의

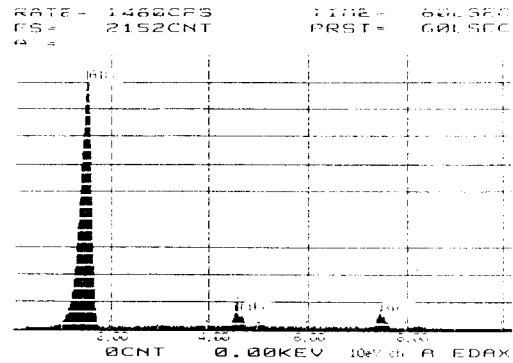
강도저하 요인보다 훨씬 크게 작용하므로 TiNi/Al 복합재료에서는 고온강도가 오히려 상온강도보다 높게 나타난다.

Fig. 9는 압축잔류응력이 TiNi/Al 형상기억복합재료의 강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 체적분이 3% 및 5%인 TiNi/Al 형상기억복합재료에 예변형을 3%로 가한 시료에 대하여 363 K에서 인장시험한 결과이다. 비교를 위하여 앞의 예변형을 가지지 않은 시료의 인장강도를 함께 표시하였다.

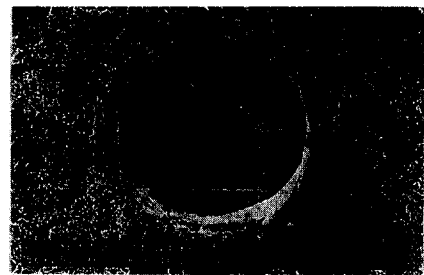
그림에서 알 수 있는 바와 같이 예변형에 의하여 모재인 Al의 강도 상승은 크게 보이지 않으나, 복합재료의 강도는 크게 향상되어졌음을 알 수 있으며, 강도의 증가폭은 섬유함유율이 클수록 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 복합재료에서는 상온보다 고온인 363 K에서 강도가 높게 나타나며, 또한 예변형을 가한 시료의 고온강도가 더욱 향상되어, 본 연구에서는 체적분이 5%인 복합재료에 예변형을 3% 가한 시료가 가장 높은 강도를 나타내었다. 이와같이 예변형에 의하여 복합재료의 강도가 향상되어지는 것은 앞에서 설명한 바와 같이 상온에서 예변형에 의하여 복합재료내의 섬유와 기지가 변형되었으나, 실험온도인 363 K로 복합재료를 가열하면, 섬유의 경우에는 본 실험온도인 363 K가  $A_1$  변태온도 이상이므로 TiNi 합금의 열탄성 특성에 의하여 마르텐사이트에서 오스테나이트로 변태되므로 예변형으로 가하여진 변형이 변태에 의하여 수축되어 변형이 없는 원상태로 되돌아간다. 그러나 Al 기지금속의 경우에는 고온에서도 3%의 예변형이 그대로 소성변형으로 잔류하게되므로, 결국 섬유와 기지조직의 열팽창의 차이에 의하여 기지내에는 압축잔류응력이 발생하게 된다. 이와같은 기지내에 발생된 압축잔류응력의 영향에 의하여 강도는 향상되어 진다고 설명할 수 있다.

이상의 실험결과로부터 예변형을 가한 복합재료의 강도는 TiNi 섬유에 의한 섬유강화작용과 예변형에 의하여 발생되어지는 압축응력이 복합적으로 작용하기 때문에 보다 더 복합재료의 강도를 향상시킬 수 있다는 것을 알았다.

Fig. 10은 분말야금법으로 제조된 TiNi/Al 형상기억복합재료의 파면을 EDAX 및 SEM에 의해 관찰한 결과이다. 그림 (a)에서 보는 바와 같이 각 원소의 성분은 Al은 1.487 KEV, Ti는 4.56 KEV, Ni는 7.447 KEV를 보이고 있으며, 계면에서의 생성물은 확인할 수 없었다. 이는 (b)의



(a)



(b)

Fig. 10 SEM fractograph and analysis diagram by EDAX of TiNi/Al composite

SEM의 관찰에서도 확인할 수 있었다. 그러나, (b)의 SEM의 관찰에서 보는 바와 같이 고온인장시 TiNi 와이어의 변형에 따른 단면적의 감소로 인하여 계면 주위에 약간의 틈새가 벌어짐을 알 수가 있다. 이것은 상온에서 고온으로 온도가 높아짐에 따른 TiNi 와이어의 변태변형에 의한 것으로 생각되어 진다.

### 3.3 용탕단조법으로 제작된 형상기억복합재료의 강도특성

Fig. 11은 용탕단조법에 의해 제조된 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 TiNi 와이어의 섬유체적분이 0%, 3%, 5%인 시료에 대하여 상온과 363 K에서의 인장시험 결과이다. 섬유의 체적분이 증가할수록 강도가 높아짐을 알 수가 있다. 이는 분말야금법으로 제조된 시료의 결과에서와 같이 복합재료의 섬유강화효과를 나타내고 있음을 알 수가 있다. 또한 앞의 분말야금의 시료의 결과와 동일하게 모재의 고온강도는 상온강도보다 저하하나, 복합재료의 경우에는 고온강도가 상온강도보다 높게 나타남을 알 수 있다.

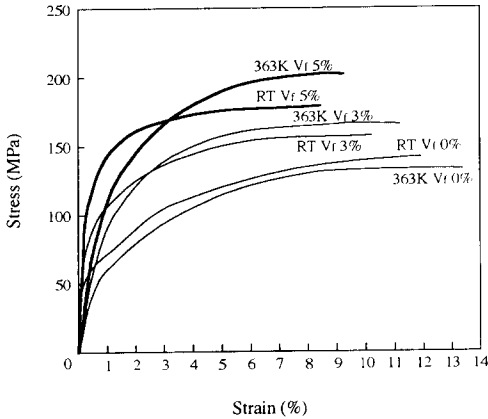


Fig. 11 Stress-strain curve of TiNi/Al6061 composite at 363 K and room temperature

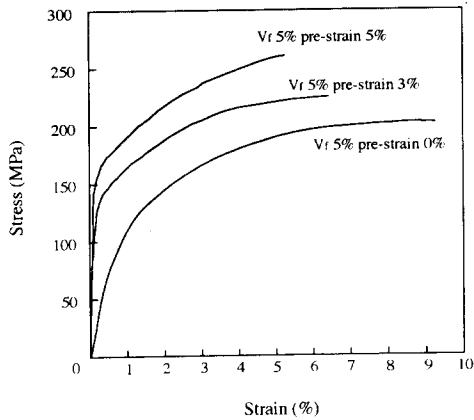


Fig. 12 Stress-strain curve of volume fraction 5% at 363 K

Fig. 12는 압축잔류응력이 TiNi/Al6061 복합재료의 강도향상에 미치는 영향을 검토하기 위하여 섬유체적분이 5%인 시료에 예변형률을 각각 0%, 3%, 5%로 부가한 후 363 K에서 인장시험한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 예변형에 의하여 인장강도는 상승되었으며, 가하여지는 예변형률이 클수록 강도상승은 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 이는 예변형에 의하여 생성되는 압축잔류응력은 예변형이 클수록 크게 나타나므로 이와같은 압축잔류응력에 의하여 복합재료의 강도를 크게 향상시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 피로균열 제어특성

Fig. 13은 TiNi 형상기억효과가 피로균열전파속

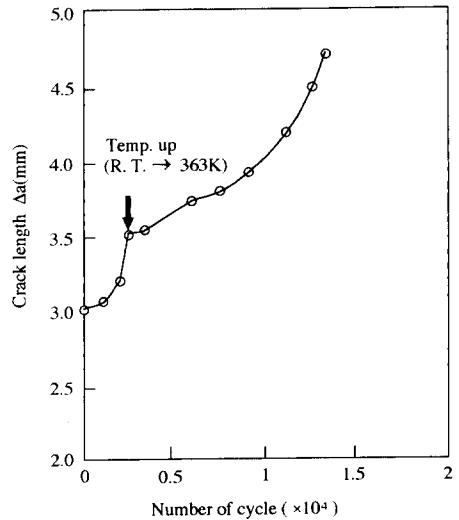


Fig. 13 Correlation of da/dN in TiNi/Al composite (V<sub>Ti</sub>=3%) from R.T. to 363 K

도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 분말야금법으로 제작한 3% TiNi/Al 복합재료에 대하여 피로균열 진전시험을 실시하여 a-N선도를 정리한 결과이다.

반복횟수의 증가에 따라 피로균열 길이는 급격히 증가함을 보인다. 어느 정도 균열이 진전되었다고 생각되는 균열길이 a=3.5 mm에서 시험온도를 상온에서 363 K로 시험온도를 변화시킨 후부터는 뚜렷한 균열진전제어가 나타남을 알 수 있다. 이것은 시험온도를 상온에서 363 K로 변화시킴으로서 균열선단 주위의 TiNi 섬유가 마르텐사이트에서 오스테나이트로 역변태를 일으킴으로써 이와같은 형상수축에 의해 발생하는 압축응력에 의하여 피로균열의 진전이 적극적으로 제어되어졌다고 할 수 있다.

Fig. 14는 압축잔류응력이 피로균열진전의 제어에 대한 효과를 보다 명확히 검토하기 위해 3% TiNi/Al 복합재료에 예변형률 1%를 가한 시험편에 대하여 상온 및 363 K 온도에서 피로균열진전 시험을 실시한 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 TiNi/Al 복합재료의 피로진전속도는 상온보다 363 K에서의 피로균열진전속도가 대단히 느리다는 것을 알 수 있다. 더욱이 예변형 1%를 부가한 경우의 피로균열진전속도는 예변형량을 부가하지 않은 시험편에 비하여 약 10배정도 피로균열의 진전속도가 늦어짐을 알 수 있다. 이와같이 예



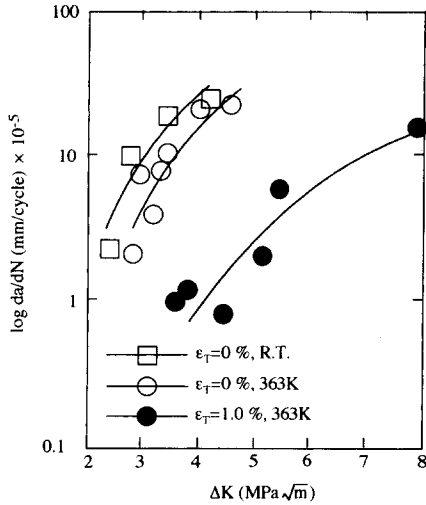


Fig. 14 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta K$  in TiNi/Al composite

변형에 의하여 피로균열의 진전이 적극적으로 제어되어지는 이유는 균열선단의 TiNi 섬유의 A<sub>r</sub>변태 온도 이상에서 나타나는 국부적인 변태효과와 예변형에 의하여 TiNi 섬유의 수축에 의하여 생기는 압축잔류응력의 효과가 중첩적으로 작용하기 때문에 피로균열진전이 크게 저지되어 진다는 것을 알 수 있다. 따라서 이와같은 피로균열 제어특성을 적극적으로 이용하면 피로파괴에 의한 돌연적인 파괴 사고는 충분히 방지되어질 수 있다고 생각된다.

## 5. 결 론

형상기억합금을 이용하여 분말야금법 및 용탕단조법으로 제조되어진 TiNi/Al 형상기억 복합재료의 지적특성에 관한 연구 결과는 다음과 같다.

(1) TiNi/Al 형상기억복합재료의 강도는 TiNi 섬유의 함유체적률이 증가할수록 향상되었다. 이는 강화섬유의 함유량의 증가에 따른 섬유강화효과로 사료된다.

(2) TiNi/Al 형상기억복합재료의 강도는 예변형에 의하여 향상되어 졌다. 이것은 TiNi 섬유의 형상기억효과에 의하여 발생되어지는 기지의 압축잔류응력의 발생에 기인한다고 생각되어 진다.

(3) 용탕단조법으로 제조된 형상기억복합재료가 분말야금법으로 제조된 형상기억복합재료 보다 압축잔류응력에 의한 강도 상승효과가 크게 나타남을 알았다.

(4) TiNi/Al 복합재료의 피로균열진전속도는 TiNi 섬유의 역변태온도보다 높은 363 K로 가열함으로써 균열진전속도를 크게 저지할 수 있었다. 또한 TiNi 섬유에 예변형을 가함으로써 이와같은 복합재료의 균열진전의 저지에는 보다 더 큰 효과가 있었다.

## 후 기

본 연구는 1994년 기계공학분야(과제번호 94-C-02) 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로서, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Furuya, Y. and Hishinada, 1991, "Materials & Design," 12-1, pp 21~27.
- (2) 關口行雄, 1992, "Ti-Ni 形狀記憶合金의SME 사이클による機械的性質への影響," 日本工業材料, 第31卷 第1號, pp. 61~64.
- (3) Ehrenstein H., 1986, "Production and Shape Memory Effect of Nickel-Titan," *Proceedings of the International Conference on Martensitic Transformations*, pp. 1083~1086.
- (4) Yuanti Huang, Gueping Yang, and Ping He, 1985, "The Investigation of Internal Friction Electric Resistance and Shape Change in NiTi Alloy During Phase Transformations," *Scripta Metallurgica*, Vol. 19, pp. 1033~1038.
- (5) Wayman, C. M., 1980, "形狀記憶合金の應用," 日本金屬學會報, 第19卷, 第5號, pp. 26~32.
- (6) 박영철, 오세욱, 조용배, 허정원, 이명열, 1992, "형상기억합금의 반복변형특성과 피로현상에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제6권, 제11호, pp. 87~95.
- (7) 川口揆, 大橋義夫, 戸伏壽昭, 1990, "Ti-Ni合金の反復し變態の彈性特性," 日本機械學會論文集(A)篇, 第56卷, 第521號, pp. 150~155.
- (8) 田村裕一, 1986, "豫荷重試験によるTiNi合金の應力有期變態," 日本金屬學會誌, 第50卷, 第6號, pp. 546~554.
- (9) Wayman, C. M. and Duerig, T. W., 1990, *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, Butterworth-Heinemann, pp. 3~20.