

TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 기계적특성에 관한 실험 및 해석적 평가

박동성*(동아대 대학원 기계공학과), 박영철(동아대 기계공학과),
이동화(동아대학교 기계공학과 대학원), 이규창(포항산업과학연구원 신뢰성평가팀)

The Evaluation of Mechanical Properties of TiNi/Al6061 Shape Memory Composites by Using Experimental and Finite Element Analysis

D. S. Park(Mech. Eng Dept, Dong-A Univ.), Y. C. Park(Mech. Eng. Dept., Dong-A Univ.),
D. H. Lee(Mech. Eng. Dept., Dong-A Univ.), G. C. Lee(RIST)

ABSTRACT

Al alloy matrix composite with TiNi shape memory fiber as reinforcement has been fabricated by hot pressing to investigate mechanical properties. The stress-strain behavior of the composites was evaluated at temperatures between 363K and room temperature as a function of pre-strain by using experimental and finite element analysis, and both cases showed that the tensile stress at 363K was higher than that of the room temperature. Especially, the tensile stress of this composite increases with increasing the amount of pre-strain, 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 pre-strained

Key Words : Shape Memory Alloy (SMA: 형상기억합금), Shape Memory Effects(SME: 형상기억효과), Hot Press (고온프레스), Pre-strain (예변형), Finite Element Analysis(FA: 유한요소해석),

1. 서론

TiNi 섬유와 형상기억효과(Shape Memory Effect SME)를 이용하여 알루미늄 6061을 기지 금속으로 하는 복합재료를 핫 프레스법(Hot Press Method)으로 제조하였다⁽¹⁾. 지금까지 TiNi 형상기억합금(Shape Memory Alloy SMA)이 강화된 지적복합재료(Smart Composite)에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다⁽²⁻⁴⁾ 이러한 지적복합재료의 설계개념은, 상온(마르텐사이트 상)에서 인장 예변형을 지적 복합재료에 부가하고, 온도를 올리면 강화제인 TiNi 섬유가 오스테나이트 변태를 일으켜 예변형량 만큼 복합재료 내에서 줄어들러는 성질이 나타난다 이러한 성질은 TiNi 섬유의 형상기억효과 때문이며, 이러한 형상기억효과에 의해 기지에는 압축잔류응력이 발생하여, 전체적으로 복합재료의 강도가 증가하게 된다⁽¹⁾. 이는 기존의 금속복합재료(Metal Matrix Composite: MMC)에 있어서 가장 큰 문제점인 기지

와 강화제 사이의 열팽창계수 차이로 발생한 인장 잔류응력⁽⁷⁾이 복합재료의 강도를 저하시키는 문제를 극복할 수 있다는 이점이 있다. 용탕단조법이나 분말야금법을 이용한 지적복합재료의 제조에 관한 연구는 국내에서도 활발히 추진되어 왔다⁽⁵⁾ 그러나 이런 방법들로 제조된 지적복합재료는 강도특성 면에서 만족할 만한 수준이 아니었으며, 강화제인 섬유의 배열문제 등 많은 문제점들이 노출되었다 본 연구에서는 이와 같은 강도문제외 섬유와 배열문제 등을 동시에 해결할 수 있는 방안으로 핫 프레스법을 채용하였다. 핫 프레스법의 장점으로는 다양한 크기의 복합재료를 제조할 수 있으며, 다양한 섬유 함유량을 가진 복합재료를 제조할 수 있다는 점이다. 또한, 후판으로 재조할 수 있으므로 복합재료의 상용화 측면에서 매우 유리하다. 그러나 핫 프레스법은 기존의 상치를 이용할 수 없으므로, 새로운 장비의 설계가 필요하며, 섬유의 배열문제를 해결하기 위한 별도의 섬유 고정용 치구의 설계가 필요하다

본 연구에서는 체적함유량이 각각 3.2%, 5.2%, 7%인 시험편을 제조하여 기계적 특성을 평가하였으며, 예변형에 의한 강도증가를 평가하기 위하여 예변형량을 각각 1%, 3%, 5%를 부가하였다. 또한 복합재료의 강도특성을 평가하기 위하여 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 이용하였다. 상용 구조해석용 프로그램인 앤시스(ANSYS, version5.6)을 이용한 유한요소해석으로 구한 응력-변형률 선도와 실험으로 구한 응력-변형률 선도를 비교함으로써 해석의 타당성을 입증하였으며, 아주 적은 비용과 노력으로 복합재료의 강도를 평가할 수 있는 기틀을 마련하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 형상기억복합재료를 제조하기 위하여 판형 Al6061(1mm)와 직경 500 μm 의 TiNi 섬유(Ti-50.0 at % Ni)를 사용하였다. TiNi 섬유는 150mm \times 22mm \times 1mm의 알루미늄 6061 판재사이에 일정한 배열로 고정되며, 알루미늄 판재는 Fig. 1과 같이 프레스다이 사이에 놓고 고온에서 압력을 가하였다. 실험에 사용된 복합재료는 섬유의 체적함유량이 3.2%, 5.2% 및 7%인 3종류이다. TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 제조조건은 833K의 온도에서 30분간 60MPa로 가압하였다. 온도의 측정은 두 알루미늄 판 사이에서 측정하였으며, 압력은 압력을 가하기 전인 초기의 알루미늄 치수를 기준으로 계산하였다. 가지인 알루미늄의 표면은 공기 중에서 쉽게 산화가 일어나므로 아르곤 분위기에서 시험편을 제조하였다. 판형의 인장시험편의 형상 및 치수를 Fig. 2에 나타낸다.

가지인 알루미늄 6061의 강도를 증가시키기 위하여 T6 열처리를 실시하였다. 복합재료에 대하여는 공기 중에서 각각 793K와 813K로 1시간동안 용체화 처리 후 빙수 담금질을 실시하였으며, 기지의 기계적 특성을 증가시키기 위하여 시험편을 공기 중에서 448K로 시효처리를 실시한 후, 빙수 담금질을 실시하였다. 이 때 시효처리 시간은 1시간 간격으로 13시간동안 실시하였다. Fig. 3는 시효처리 시간과 비커스 경도와의 관계를 나타낸다. Fig. 3에서 알 수 있듯이, 813K에서의 경도가 높게 나타났으며, 448K에서 5시간 이상 시효처리하면 경도의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 제작된 시험편에 대하여 813K에서 1시간동안 용체화 처리를 실시한 후, 448K에서 5시간 동안 시효처리를 수행하였다.

마지막 단계로, 상온에서 시험편에 1×10^{-1} mm/s로 예변형을 가하였다. 예변형을 가한 시험편에 대

하여 363K에서 인장시험을 실시하였다. 실험온도는 열전대를 이용하여 시험편의 표면에서 측정하였다.

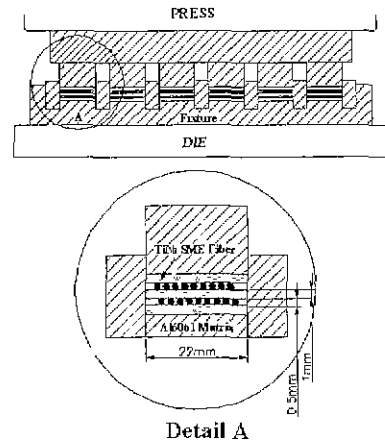


Fig. 1 Schematic diagram of hot pressing condition

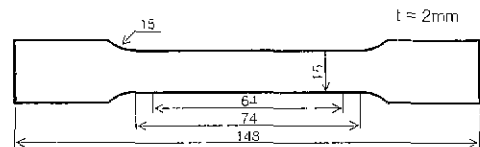


Fig. 2 The shape of tensile test specimen

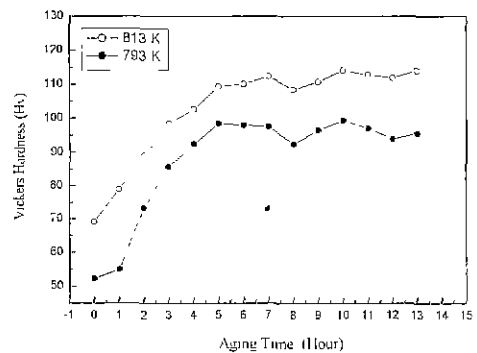


Fig. 3 The Vickers hardness as function of aging time

3. 유한요소해석

본 연구에서는 TiNi SMA를 강화제로 사용한 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 강도를 유한요소해석법으로 평가하기 위하여 이미 해의 정확성과 유용성이 검증된 상용구조 해석 프로그램인 앤시스(version5.6)를 이용하였다.

Fig. 4는 형상기억복합재료의 설계개념을 나타내며, step1에서는 pre-strain을 주기 위하여 예변형을 주는 과정으로서 변위제어를 이용하여 예변형을 주었으며, 다시 이러한 변위제어를 하중제어로 치환하여 이 하중을 서서히 제거함으로써 해석을 구현하였다

그리고, step3은 온도가 서서히 올라가서 변태온도에 도달하게 되면 마르텐사이트상에서 오스테나이트상으로 변화하게 되는데, 이러한 효과를 구현하기 위하여 온도에 따른 탄성계수와 선팽창계수를 이용하였다

TiNi 섬유가 평상기의 온도 이상에서 마르텐사이트상에서 오스테나이트상으로 변태를 한다. 이때, 물리적으로는 TiNi 섬유의 탄성계수가 증가하게 되고 따라서 마르텐사이트에서 소성거동을 하여 영구변형이 일어났다 하더라도 오스테나이트조직으로 변태를 일으키면 동일 부하에서 오스테나이트조직에서는 아직까지 탄성영역에 해당하게 되므로 탄성복원을 하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 온도가 일정온도 이상으로 되었을 경우에 재료의 기계적 성질을 변화시킴으로써 형상기억효과를 시뮬레이션 할 수 있다

TiNi/Al6061 복합재료의 강도를 해석하기 위해서, 섬유와 모재의 계면은 완전히 결합된 상태로 가정하였으며, 해석의 단순화를 위해서 해석모델은 하나의 섬유와 모재를 Fig. 5과 같이 2차원 축대칭 모델로서 가정하였다. 또한, 섬유자체의 제조공정에 따른 섬유내의 잔류응력은 없는 것으로, 균질등방성재료(homogenous and isotropic material)이라고 가정하면, 온도에 따른 섬유와 기지의 물성값은 Table 1과 같다.

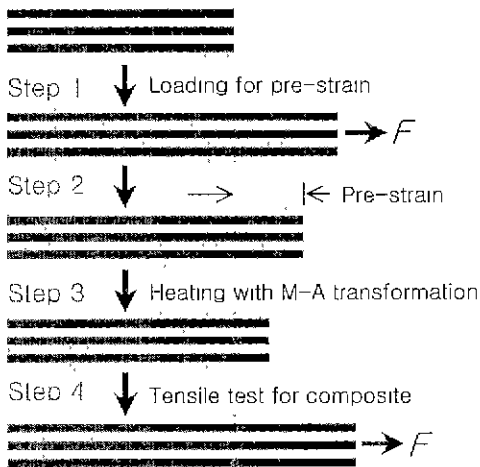


Fig 4 Design concept of TiNi/Al6061 composite

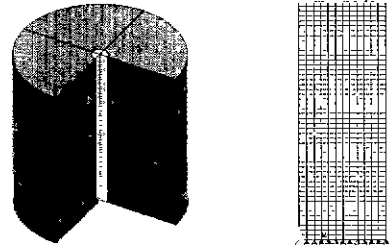


Fig 5 FE model (2D axisymmetric) and Boundary condition

Table 1 Mechanical properties of TiNi and Al6061

	Al 6061		TiNi	
	R.T.	363K	R.T.	363K
Elastic Modulus [GPa]	70	70	41	83
Poisson's Ratio	0.33	0.33	0.43	0.43
Coeff. Of Thermal Expans. [X 10 ⁻⁶ /K]	23.4	23.4	6.6	11
Yield Stress [MPa]	275	260	280	710

TiNi/Al 6061 형상기억복합재료에 초기의 예변형을 주기 위해서 변위제어기법을 이용하여, 0%, 1%, 3%, 5%, 7%의 예변형을 각각 주고, 변위하중을 제거하여 초기 잔류응력을 만든다 그런데, 적용된 변위가 갑자기 없어지는 경우 탄성에너지로 인한 급작스러운 스프링 복원이 발생하여 헤가 발생하므로 변위제어로부터 하중제어로 전환한 뒤 서서히 하중을 제거한다. 예변형에 의한 초기 잔류응력을 가진 상태에서 온도를 변태온도(363K)까지 올리게 되면, TiNi 섬유와 Al6061 TiNi 섬유의 물성치가 바뀌게 된다 그리고, 다시 변위제어로서 복합재료의 응력과 변형률을 구한다.

4. 결과 및 고찰

TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 상온 및 고온에서의 체적함유량에 따른 인장강도의 변화를 Fig 6에 나타낸다. Fig 6에서 알 수 있듯이, 상온에서의 복합재료의 인장강도는 체적함유량이 증가할수록 오히려 미소하게 감소하는 결과를 나타낸다 이는 상온에서는 강화제인 TiNi 형상기억합금의 강도가 기지인 Al6061보다 낮기 때문이다. 그러나 363K에서

는 섬유의 체적함유량이 증가할수록 높은 인장강도를 나타낸다. 고온인 363K에서 상온과는 달리 체적함유량에 따라 강도가 증가하는 이유는 강화재인 TiNi 섬유의 강도가 고온에서 매우 높기 때문이다.

Fig. 7은 363K에서 예변형에 따른 응력-변형률 선도를 나타낸다. Fig. 7에서 알 수 있듯이, 복합재료의 인장강도는 예변형량의 증가에 따라 증가한다. 이는 TiNi 섬유의 형상기억효과에 의해 기지인 알루미늄 6061에 압축잔류응력이 발생하기 때문으로, TiNi 섬유는 As이상의 온도에서는 형상기억효과를 발휘하여 초기의 형상으로 되돌아가려는 성질이 생기며, 이 성질에 의해 기지인 알루미늄에는 압축잔류응력이 발생하고, As이상의 온도에서는 섬유 자체의 강도도 증가하기 때문에 복합재료 전체의 강도가 증가하는 것이다

Fig 7에서, 예변형량이 증가할 수록 복합재료의 변형률은 줄어드는데, 이는 예변형량이 증가할수록 기지인 알루미늄에 많은 소성변형이 존재하기 때문이며, 복합재의 변형률은 기지인 Al6061에 의존적임을 의미한다.

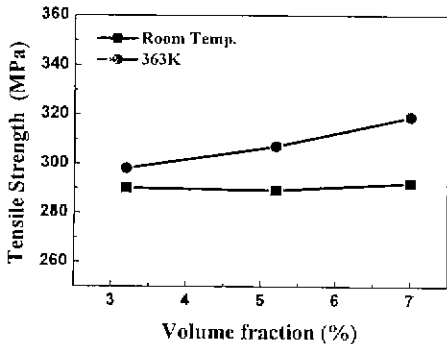


Fig. 6 The relationship between volume fraction and tensile strength at room temperature and 363K

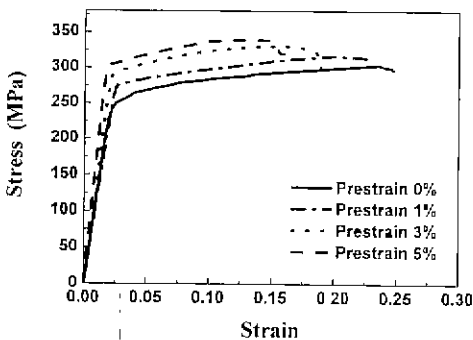


Fig. 7 Stress-strain curve of TiNi/Al6061 composite (volume fraction=5%)

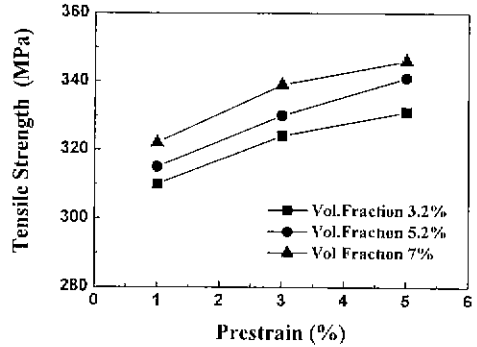


Fig. 8 The relationship between pre-strain and tensile strength as a function of volume fraction at 363K by using experimental

Fig. 8은 363K에서 체적함유량의 변화에 따른 인장강도와 예변형과의 관계를 나타낸다. TiNi 섬유의 체적함유량이 증가함에 따라 복합재료의 인장강도는 증가를 나타내며, 모든 체적함유량의 복합재료에서 예변형량이 증가할수록 인장강도의 증가폭은 둔화되는 경향이 나타난다. 이는 복합재의 강도는 예변형량 보다 체적함유량에 지배적으로 의존함을 의미한다.

Fig 9는 유한요소해석법으로 구한 인장강도와 예변형량의 관계를 나타낸다. 각 체적함유량의 복합재료는 섬유의 체적함유량이 증가할수록 높은 강도를 나타낸다. 또한 예변형량이 증가할수록 높은 인장강도를 나타낸다. 그러나 예변형량이 5%보다 높아지면 복합재료의 인장강도는 더 이상 증가하지 않는다. 이는 후루야⁽⁴⁾ 등의 결과와 잘 일치하는 것이다.

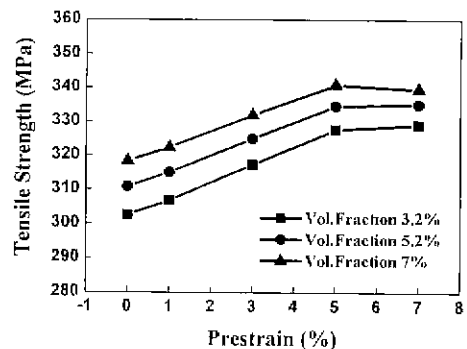
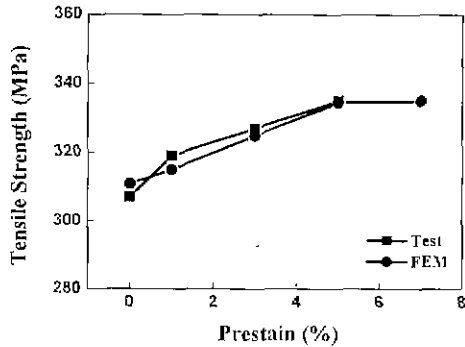
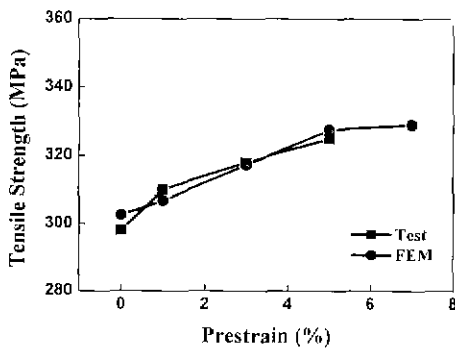


Fig 9 The relationship between pre-strain and tensile strength as a function of volume fraction at 363K by using finite element analysis

Fig 10은 실험으로 구한 결과와 유한요소해석에 의한 결과를 비교하기 위하여, 섬유와 매트릭스의 체적함유량이 각각 3.2%, 5.2%인 경우에 예변형량과 인장강도와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 실험치와 해석치는 비교적 잘 일치하고 있으므로, 유한요소해석은 복합재료의 강도를 예측하는 좋은 수단임을 알 수 있다.



(a) Vf=3.2%



(b) Vf=5.2%

Fig 10 FE Analysis and experimental results of the tensile strength in the composite as a function of pre-strain of TiNi fiber

5. 결론

- 1 상온에서의 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 인장강도는 TiNi 섬유의 체적함유량이 증가할수록 미소한 감소를 나타내었으며, 고온에서는 TiNi 섬유의 체적함유량이 증가할수록 높은 인장강도를 나타내었다
- 2 고온에서 복합재료에 예변형을 가한 경우의 인장강도가 예변형을 가하지 않은 경우의 인장강도보다 높게 나타났으며, 예변형량이 증가할수록 높은 인장강도를 나타내었으나 예변형량 증가할수록 강도증가의 폭은 둔화되었다
- 3 TiNi섬유의 체적함유량과 예변형량에 의존하는

복합재료의 강도를 예측하기 위하여 형상기억복합재료의 강도를 평가할 수 있는 유한요소해석 모델을 제안하였으며 유한요소해석 결과, 실험치와 잘 일치하였으며, FEM 모델은 복합재료의 강도를 예측하는 유용한 방법임을 확인하였다.

4. 유한요소해석 결과, 5.2%이상으로 예변형을 가하는 것은 의미가 없으며, 5.2%가 최적의 예변형량을 추정할 수 있었다.

참고문헌

1. K. Hamada, J. H. Lee, K. Mizuuchi, M. Taya, K. Inoue, "Thermomechanical Behavior of TiNi Shape Memory Alloy Fiber Reinforced 6061 Aluminum Matrix Composite", METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTION(A), Vol. 29A, pp. 1127-1135, 1998
2. Y. C. Park, Y. Furuya, "Thermal Cyclic Deformation and Degradation of Shape Memory Effect in Ti-Ni Alloy". Nondestr. Test. Eval., Vol. 4, No. 8, pp. 541-554, 1992
3. Y. Furuya, "Design and Experimental Verification of Intelligent Materials Using Shape Memory Alloy", Proceeding of the International Symposium on the Microsystems, Intelligent Materials and Robots, Sendai, Japan, pp. 313-318, 1995
4. 關口行雄, "Ti-Ni形状記憶合金의 SME 사이클による機械的特性への影響", 日本工業材料, 第31巻第1號, pp61-64, 1992
5. H. Ehen Stein, "Production and Shape memory Effect of Nickel-Titan", Proceeding of the International Conference on Material Transformation, pp. 1083-1086, 1986
6. Yuanqi Hunag, Guoping Yang, Ping He, "The Investigation of Internal Friction Electric Resistance and Shape Change in NiTi Alloy During Phase Transformation". Scripta Metallurgica, Vol. 19, pp. 1033-1038, 1985
7. M. Taya, Y. Furuya, Y. Yamada, R. Watanabe, S. Shibata, T. Mori, "Proceedings Smart material", edited V. K. Varadani, SIM, No. 1916, p.373, 1993
8. 박영길, 윤두표, 이규창, Y. Furuya, "TiNi/Al 형상기억복합재료의 기계적특성 및 강화기구" 대한기계학회논문집(A), 제21권 제3호, pp. 405-413, 1997
9. Yasubumi Furuya, Minoru Taya, "Enhancement of High Temperature Mechanical Strength of TiNi Fiber/Al Composite Induced by Shape Memory Effect", J Japan Inst Metals, Vol. 60, No.12, pp1163-1172, 1996