

유한요소법을 이용한 TiNi/Al6061 형상기억 복합재료의 강도평가

박영철*, 이규창**, 박동성***, 이동화***

The Strength Evaluation of TiNi/Al6061 Composite by Using Finite Element Method

Young Chul Park*, Guy Chang Lee**, Dong Sung Park***, Dong Hwa Lee***

ABSTRACT

Thermomechanical behavior and mechanical properties of Al6061 matrix composite with shape memory alloy(SMA) fiber are studied by using finite element analysis(FEA). The smartness of the SMA 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. In this paper, an analytical model is assumed two dimensional axisymmetric model of one fiber and around the matrix. To evaluate the strength of composite using FEM, the concept of smart composite was simulated on computer. The Shape memory effect(SME) simulation is very difficult using FEM because of the nonlinear analysis and the elastic plastic analysis. Thus, in this paper, the FEA was carried out at two critical temperature conditions; room temperature and high temperature(363K). The analysis is compare the finite element analysis result with the test result for the analysis validity.

Key Words : Shape Memory Alloy(SMA, 형상기억합금), Shape Memory Effect(SME, 형상기억효과), Smart Alloy(지적재료), Prestrain(예변형률), Volume Fraction (체적함유율), Finite Element Analysis (FEA, 유한요소해석)

1. 서론

형상기억합금(shape memory alloy; SMA)은 형상을 기억시킨 모양에서 변형을 시킨 후에 열을 가하면 원래의 모양으로 되돌아가는 성질을 가진 금속이다.⁽¹⁾⁽²⁾ SMA는 온도감지와 구동기구, 시간적 기억과 회복기능 등을 재료자체가 가지고 있으므로 지적재료의 조건을 모두 갖추고 있을 뿐만 아니라

대변형과 고강도 액츄에이터로서의 특징이 있기 때문에 금속, 폴리머(polymer), 콘크리트(concrete) 등과의 복합화에 의하여 지능 구조물을 만들 수 있다. 형상기억효과(Shape Memory Effect;SME)를 나타내는 합금은 TiNi, CuZnAl, CuAlNi, AgCd 등 다양하며, 이와 같은 재료의 역학적 측면에서 회복되는 최적의 변형률, 변태시 발생하는 힘, 열피로를 고려한 SME 등에 대한 많은 연구^{(3)~(7)}가 수행되어

접수 2001년 6월 29일

* 동아대학교 기계공학과

** 포항산업과학연구원

*** 동아대학교 기계공학과 대학원

왔다. 특히, 그 중에서 TiNi 형상기억합금은 마르텐 사이트 변태의 주된 특성을 가지고 있으며, 이러한 특성으로 발생하는 형상회복성 뿐만 아니라, 변형 에너지의 저장성과 방진성을 이용할 수 있는 우수한 기능을 가지고 있는 기능성 재료이다.⁽⁸⁾ 최근 TiNi를 이용한 지능형 복합재료(smart composite)의 연구는 TiNi가 보강된 다양한 복합재료의 역학적 거동에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 복합재료 제조방법은 용탕단조법, 분말야금법, 핫프레스법 등 다양한 방법이 있으며⁽⁹⁾, 제조방법과 기지금속의 종류에 따라 복합재의 강도는 달라진다.

온도가 증가할수록 TiNi의 강화기구(strength mechanism)에 의해 인장강도가 향상되며, 지적 복합재료의 탄성계수, 항복응력은 TiNi의 체적함유율, 예변형률에 의존한다고 알려져 있다⁽⁹⁾. 이러한 여러 가지 요인에 의해 복합재료의 강도는 결정되기 때문에 복합재료를 제작함에 있어서 최적의 조건을 결정하기가 쉽지가 않다. 또한 이러한 여러 가지의 인자에 의한 복합재료의 강도를 정도높게 예측할 수 있다면 시간적, 공간적, 비용적인 측면에서 보다 효율적일 것이다.

따라서 본연구에서는 최적의 체적함유율과 최적의 예변형률을 미리 알아낼 수 있도록 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하고자 한다. 그리고, 유한요소법에 의하여 구해진 결과와 이론 강도값인 복합층에 의한 값을 비교하고, 또한 hot press 법으로 만들어진 복합재료의 인장시험결과의 응력-변형률 선도와 유한요소해석을 통하여 얻어진 응력-변형률 선도를 비교함으로써 유한요소법에 의한 해석의 타당성과 유용성을 확인하고자 한다.

2. 복합재료의 이론강도

일방향 복합재료를 섬유축 방향으로 인장하는 경우의 복합재료의 응력과 변형률과의 관계는 등변형을 진재로 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_f 및 ϵ_{mu} 는 각각 섬유와 기지의 파괴 변형이다. 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 복합층(Law of

Mixture)으로 다음과 같이 기술할 수 있다.

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

여기서 σ_f 와 σ_m 은 강화섬유 및 기지 내에서 발생하는 응력이며, V_f 는 강화섬유의 체적함유율, E_f 와 E_m 은 강화섬유 및 기지의 종탄성계수이다. 강화섬유 또는 기지 중 어느 한쪽이 파괴될 때까지는 이 식이 유효하다⁽¹⁰⁾. 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 섬유의 함유량을 V_{fer} 이라 하면,

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

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

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

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 체적함유율은 3.2%, 5.2%, 7%이다.

3. 유한요소해석

3.1 해석개념

Fig. 1은 형상기억복합재료의 설계개념을 나타낸다.⁽¹¹⁾ step1은 예변형을 부가하기 위해 인장력을 가하는 과정이고, step 2에서는 가해진 인장력을 제거함으로써 예변형을 발생시킨다. 이 단계에서 예변형율을 TiNi 섬유의 초탄성 영역 이내에 해당하는 범위인 1, 3, 5, 7%로 부여하였다. step 3에서 온도를 Af 온도 이상인 363K로 올리면 TiNi 섬유는 마르텐사이트상에서 오스테나이트상으로 역변태가

일어나 초탄성 범위내에서 부가된 예변형은 형상기억효과에 의해 원래의 상태(A의 상태)로 되돌아 간다. 반면 기지금속인 Al6061은 363K에서 열변형에 의해 인장이 발생하게 되지만 TiNi 섬유에 의해 구속이 발생되어 기지에는 압축응력이 발생하게 된다. step 4는 이 상태에서 인장시험을 수행하는 과정이다. 이러한 과정을 유한요소법을 이용해 해석하기 위해 다음과 같이 해석을 수행하였다.

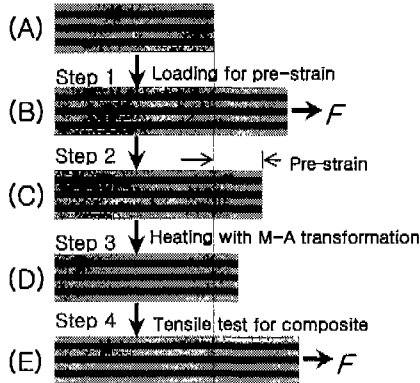


Fig. 1 Design concept of smart composite

step1에서는 변위제어를 이용하여 예변형을 주었다. step 2에서는 (B)의 상태에서 주어진 변위를 제거하는 과정이다. 그런데 적용된 변위가 갑자기 없어지는 경우 탄성에너지로 인한 급작스러운 스프링 복원이 발생하여 해가 발산하게 되므로 변위제어로부터 하중제어로 전환을 한 뒤에 서서히 하중을 제거하였다. step3은 온도가 서서히 올라가서 변태온도에 도달하게되면 마르텐사이트상에서 오스테나이트상으로 변화하게 되는데, 이러한 효과를 주기 위하여 온도에 따른 탄성계수와 선팽창계수를 이용하였다. TiNi 섬유가 형상기억 온도 이상에서 마르텐사이트상에서 오스테나이트상으로 변태를 한다. 이 때, 물리적으로는 TiNi 섬유의 탄성계수가 증가하게되고 따라서 마르텐사이트에서 소성거동을 하여 영구변형이 일어났다 하더라도 오스테나이트로 조직이 변태를 일으키면 동일한 하중조건에서 오스테나이트조직에서는 아직까지 탄성영역에 해당하게 되므로 탄성복원을 하게된다. 이러한 원리를 이용하여 온도가 일정온도(363K) 이상으로 되었을 경우에 재료의 기계적 성질을 변화시킴으로써 형상기억효과를 고려한 해석을 수행할 수 있다.

step 4는 (D)의 상태에서 변위제어로서 인장을 하여 해석을 수행하고, 응력-변형률 선도를 구하였다.

3.2 해석모델 및 해석방법

TiNi/Al 6061 형상기억 복합재료의 형상기억효과를 유한요소법을 이용하여 해석하려면, 복잡한 비선형 해석⁽¹⁰⁾을 수행해야한다. 따라서 해석모델은 해석의 단순화를 위해 하나의 섬유와 기지로 이루어진 원통형의 3차원 축대칭 모델로 가정하여, Fig. 2와 같이 2차원으로 해석을 수행하였다. 복합재료의 강도를 유한요소법으로 해석하기 위해서, 섬유와 모재의 계면은 완전히 결합된 상태이며, 섬유자체의 제조공정에 따른 섬유내의 잔류응력은 없으며, 균질등방성재질(homogenous and isotropic material) 이라고 가정하였다. 해석에서 온도 의존성의 물성치를 사용하였고, 온도는 상온과 고온(363K)에서의 물성치를 각각 이용하였으며, 온도에 따른 섬유와 기지의 물성값은 Table 1과 같다.

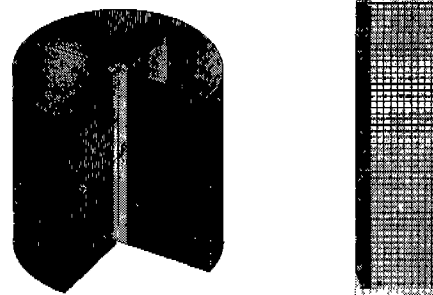


Fig. 2 Finite Element model (2D symmetric)

Table 1 Mechanical properties of TiNi and Al6061

	Al 6061		TiNi	
	Room Tem.	363 K	Room Tem.	363 K
Elastic Modulus [GPa]	70	70	41	83
Poisson's Ratio	0.33	0.33	0.43	0.43
Coef. Of Thermal Expans. [X 10 ⁻⁶ /K]	23.4	23.4	6.6	11
Yield Stress [MPa]	275	260	280	710

경계조건은 2차원 축대칭모델에 대하여 부여하였으며 온도가 363K로 안정화된 상태에서 해석을 수행하였다.

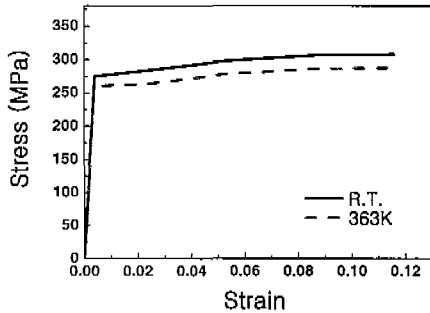


Fig. 3 Engineering Stress-Strain curve of Al6061

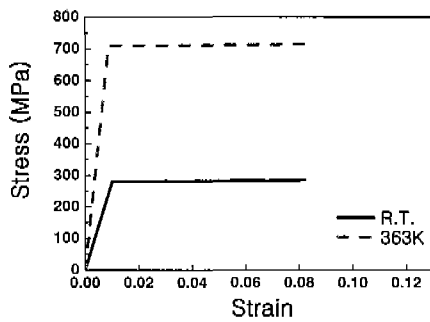


Fig. 4 Engineering Stress-Strain curve of TiNi

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 온도에 따른 Al6061과 TiNi의 공칭응력-공칭변형률 선도이다. 그림에서 알 수 있듯이 Al6061의 경우는 고온보다는 상온에서 더 큰 항복응력과 최대인장응력이 발생하는 반면에 TiNi 섬유는 오히려 상온보다는 고온에서 더 큰 항복응력과 인장응력을 가진다. 그리고, Fig. 5와 Fig. 6은 각각 상온과 고온에서의 Al6061과 TiNi 섬유의 열팽창계수와 탄성계수를 나타낸다. Al6061의 선팽창계수는 상온에서 $23.4 \times 10^{-6} / K$ 이고, 고온에서도 $23.4 \times 10^{-6} / K$ 이며, TiNi의 선팽창계수는 상온에서 $6.6 \times 10^{-6} / K$ 이고, 고온에서는 $11 \times 10^{-6} / K$ 이다. Al6061의 탄성계수는 상온과 고온에서 70GPa로써 일정한 값을 가지며, TiNi의 탄성계수는 상온에서는 41GPa, 고온에서는 83GPa이다. 탄성계수와 열팽창계수는 상온과 고온에서의 값만을 이용하였는

데, 이는 복합재료의 온도가 363K로 안정화된 상태에서 해석을 수행하기 때문이다. 최종적으로 Fig. 7과 같은 방법으로 유한요소 해석 결과를 바탕으로 진응력-진변형률 선도를 구하여 공칭응력-공칭변형률 선도로 변환하였다.

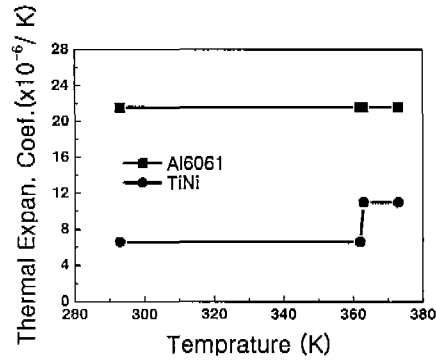


Fig. 5 Thermal Expansion Coefficient

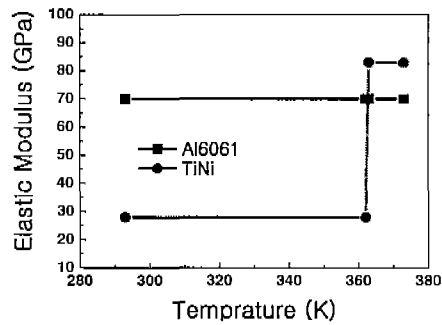


Fig. 6 Elastic Modulus

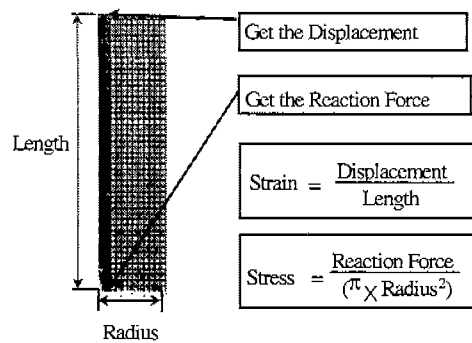


Fig. 7 Get the Engineering Stress-Strain curve

3.3 해석결과 및 고찰

Fig. 8은 Al6061만의 상온 및 363K에서의 응력-변형률 선도로서 해석에 사용된 선도와 해석적으로 구한 선도를 비교한 그래프이다. 그림에서, 입력한 응력-변형률 선도와 해석적으로 구한 응력-변형률 선도가 일치하고 있다. Fig. 9는 TiNi만의 상온과 363K에서의 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 해석적으로 구한 응력-변형률 선도와 입력한 선도가 같은 결과를 나타낸다. 따라서 Fig. 8과 Fig. 9로부터 단일 재료에 대하여 유한요소해석에 대한 신뢰성을 확보하였으므로, Al6061과 TiNi가 복합된 TiNi/Al6061 복합재에 대해서도 신뢰성 있는 해석이 가능함을 알 수 있다. 또한 단일재료에 대한 해석결과로부터 반력과 변위를 구하는 위치와 방식이 타당함을 확인하였고, 진응력-진변형률로부터 공칭 응력-공칭변형률로의 변환방식도 타당함을 확인하였다.

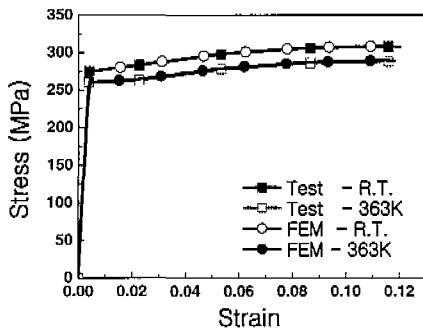


Fig. 8 Comparison of Al6061 at analysis and test

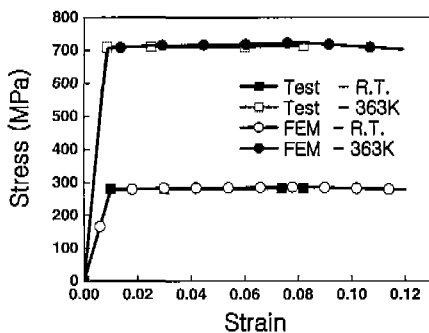


Fig. 9 Comparison of TiNi at analysis and test

유한요소법을 이용하여 체적함유율이 각각 3.2%, 5.2%, 7%인 복합재료에 대하여 예변형률을 각각 1%, 3%, 5%, 7%부가한 후 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 10은 체적함유율이 3.2%인 복합재료에 대하여 예변형률 1%주었을 경우 응력-변형률 선도를 나타낸다. 그림에서 항복응력은 유한요소 해석 결과가 시험 결과 보다 높게 평가되었으나 인장강도는 낮게 평가되었다. 시험에 의한 인장 강도는 310 MPa이고, 해석에 의한 인장강도는 306.731 MPa이다. Fig. 11은 체적함유율이 3.2%, 예변형이 3%인 경우의 해석결과와 시험결과를 비교한 것이다. 시험에 의한 인장강도는 318 MPa이고, 해석에 의한 인장강도는 317.203 MPa로 평가되었다. 유한요소 해석결과를 시험결과와 비교해 본 결과 항복강도는 다소 높게 평가되고 인장강도는 낮게 평가되었으나 해석결과가 시험결과를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 유한요소해석에 의해서 각각의 체적함유율 3.2%, 5.2% 7%인 경우에 있어서 인장강도를 나타낸 것이다. 예변형률 5%이하에서는 예변형이 증가함에 따라 복합재료의 최대인장강도가 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으나, 예변형률이 5%이상으로 높아지면 복합재료의 최대인장강도향상에 미치는 예변형의 효과가 급격히 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 체적함유율에 따른 복합재료의 인장강도를 나타낸 것이다. 체적함유율이 3.2, 5.2%일 경우에는 선형적으로 최대인장강도가 증가함을 알 수 있으나, 예변형률이 5% 이상인 경우에는 모든 체적함유율에서 예변형률 5%인 경우와 비교해서 강도증가 효과가 없음을 알 수 있다. 예변형이 7%인 경우에 대하여 해석적으로 구한 강도를 살펴보면, 예변형의 효과는 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 기지금속인 Al6061은 363K에서 소성거동을 보이나 강화재인 TiNi 섬유는 탄성거동을 하고 있기 때문이다. 따라서 임의의 체적함유율의 복합재료에 예변형률이 가해질 때, 예변형률이 5%이하에서는 복합재료의 강도에 영향을 미치나, 예변형률이 5% 이상에서는 강도증가에 영향을 미치지 않으므로 임의의 체적함유율의 복합재료에 예변형이 주어질 때 임계 예변형률이 5%가 됨을 알 수 있다.

복합체에 의한 강도는 해석에 의한 강도보다 낮게 나타났다. 예변형을 부가하지 않은 경우에 대해서는 복합체를 이용하여 복합재료의 강도를 평가할

수 있으나, 예변형이 부가된 경우에는 복합층을 이용한 복합재료의 강도평가는 불가능함을 알 수 있다. 즉 복합층으로 섬유강화효과는 평가할 수 있으나 형상기억효과에 의한 강도증가효과를 평가할 수 없었다.

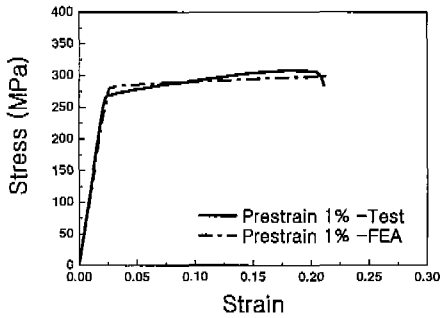


Fig. 10 Comparison of Al6061 between FEA and tensile test at pre-strain 1% and volume fraction 3.2%

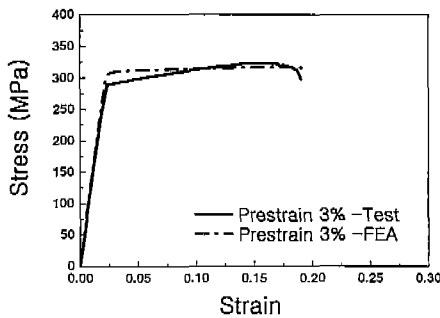


Fig. 11 Comparison of Al6061 between FEA and tensile test at pre-strain 3% and volume fraction 3.2%

Fig. 14는 체적함유율이 3.2%인 경우의 예변형률에 따른 유한요소해석을 통해 얻은 인장강도와 인장시험을 통하여 구한 최대인장강도를 비교하여 나타낸 것이다. 유한요소해석에서는 예변형이 0, 1, 3, 5, 7%인 경우에 대하여, 시험에서는 0, 1, 3, 5%인 경우에 대하여 나타내었다. 유한요소해석 결과와 시험 결과는 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 15는 체적함유율이 5.2%인 경우의 유한요소해석과 시험에서의 최대인장강도를 나타내었다. 체적함유율 5.2%인 경우에 대해서도 시험결과와 잘 일치한다.

그리고 시험값보다는 유한요소해석 결과에 의한 값이 더 큰 응력변화율을 가지고 증가하는 경향을 나타내었다.

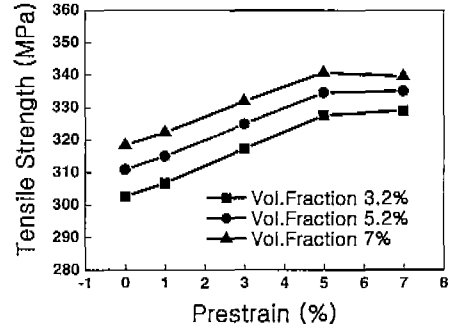


Fig. 12 Tensile stress according to pre-strain

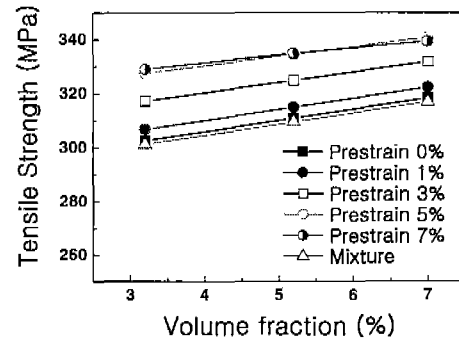


Fig. 13 Tensile stress according to volume fraction

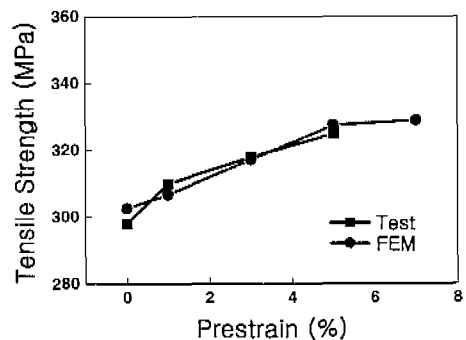


Fig. 14 Comparison of test results with FEA results at volume fraction 3.2%

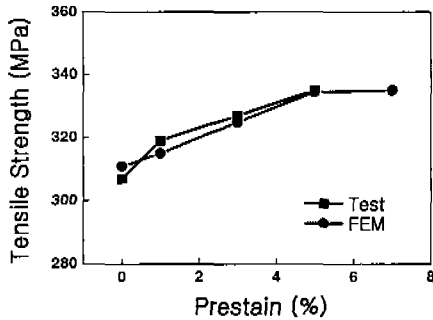


Fig. 15 Tensile stress with respect to pre-strain($V_f=5.2\%$)

4. 결론

TiNi/Al 6061 형상기억지적복합재료의 강도를 평가하기 위해서 각각의 체적함유율과 예변형에 따른 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였다. 단순 복합층 및 시험결과를 통하여 유한요소 해석에 대한 타당성을 검토하였으며, 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TiNi/Al 6061 형상기억복합재료의 강도를 단순 복합층에 의한 이론강도 값과 비교한 결과 단순 복합층에 의한 강도평가는 예변형에 의한 강도 향상을 반영하지 못하였다.
2. 체적함유율이 5.2%이하에서는 예변형량의 증가에 따라 선형적인 강도증가가 이루어졌으나, 예변형률이 5% 이상인 경우에는 모든 체적함유율에서 예변형률에 의한 강도증가효과는 나타나지 않았다.
3. 시험결과와 유한요소해석 결과는 정도 높게 일치하였으며, 유한요소해석의 타당성과 유용성을 확인하였다.
4. 형상기억합금이 보강된 복합재료의 설계 및 제작시 중요한 인자인 예변형률과 체적함유율을 유한요소해석을 통해서 미리 예측함으로써, 보다 성능이 우수한 복합재료의 제작을 위한 가능성을 확인하였다.

후기

본 논문은 2001학년도 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Ehrenstein H., "Production and Shape Memory Effect of Nickel-Titan," Proceedings of the International Conference on Martensitic Transformations, pp. 1083~1086, 1986.
2. Yuanti Huang, Gueping Yang, and Ping He, "The Investigation of Internal Friction Electric Resistance and Shape Change in NiTi Alloy During Phase Transformations," *Scripta Metallurgica*, Vol. 19, pp. 1033~1038, 1985.
3. Tadaki, T., Otsuka, K. and Shimizu, K., "Shape Memory Alloy," *Ann. Rev. Mater. Sci.*, Vol. 18, pp. 25~45, 1988.
4. Tadaki, T., and Otsuka, K., "Shape Memory Alloy," *Ann. Rev. Mater. Sci.*, pp. 25~45, 1988.
5. Liu, C. T., Kunsmann, H. and Otsuka, K., "Shape memory Materials and Phenomena Fundamental Aspects and Applications," *Proc. of Mat. Res. Society*, Vol. 246, pp. 299~369, 1992.
6. Duerig, T. W., Melton, K. N., Stockel, D. and Wayman, C. M., "Engineering Aspects of Shape Memory Alloys," Butterworth-Heinemann, pp. 394~413, 1990.
7. 홍성원, 임병희, 이오연, "Ti-Ni-B 형상기억합금의 상변태 및 열처리 특성," *대한금속학회지*, 제28권 8호, pp. 743~751.
8. Furuya, Y. and Hishinada, "Materials & Design," 12-1, pp. 21~27, 1991.
9. 박영철, 윤두표, 이규창, Y Furuya, "TiNi/Al 형상기억복합재료의 기계적특성 및 강화기구," *대한기계학회논문집(A)*, 제21권 제3호, pp. 405-413, 1997.
10. T. Fujii, M. Zako, "複合材料の破壊と力學," 實數出版株式會社, pp. 13~16, 1992.
11. K. Hamada, J.H. Lee, K. Mizuuchi, M. Taya, and K. Inoue, "Thermomechanical Behavior of TiNi Shape Memory Alloy Fiber Reinforced 6061 Aluminum Matrix Composite," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 29A, pp. 1127~1135, 1998.
12. ANSYS Inc., "Structural Nonlinearities User's Guide for Revision 5.5," Volume 1.