

# TiNi/Al 6061 형상기억 복합재료의 강도해석 모듈 개발

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

## Development of Strength Analysis Modules for TiNi/Al 6061 Shape Memory Alloy

D. H. Lee(Mech. Eng. Dept., DAU), Y. C. Park(Mech. Eng. Dept., DAU),  
D. S. Park(Mech. Eng. Dept., DAU), G. C. Lee(RIST)

### ABSTRACT

Thermo-mechanical behavior and mechanical properties of intelligent polymer matrix composite with SMA fiber are experimentally studied. It is found that increment of compressive thermal strain is observed as the pre-strain and TiNi volume fraction increase. 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 the paper, it is attempted to develop of the analysis module of shape memory alloy. The analysis module of shape memory alloy is based on the general purpose commercial code ANSYS. And for the purpose of easy and fast user's analysis, it is developed the Graphical User Interface by using Tcl/Tk language.

**Key Words** . Shape Memory Alloy(SMA, 형상기억합금), Smart Alloy(지적재료), Graphical User Interface(GUI, 그래픽 사용자 인터페이스), Pre-Strain(예변형률)

### 1. 서론

지능형 재료로 알려진 형상기억합금(Shape Memory Alloy; SMA)을 이용한 복합재료의 연구는 다양한 분야에서 진행되어지고 있다. 특히 형상기억합금의 독특한 성질인 고온에서 강도가 증가한다는 특징을 이용하여 형상기억합금이 보강된 금속기지의 복합재료에 다양하게 이용되고 있으며, 또한 그 응용 범위가 다양하게 확대되어 가고 있다. 형상기억 복합재료의 강화제로 사용되어지는 섬유는 주로 TiNi, TiNiCo<sup>(1)</sup> 등이 있으며, 기지로 사용되어지는 금속은 Al6061(T4), Al6061(T6), 순수 Al 등 여러 가지가 있다. 용당단조법, 분말야금법, 핫프레스법 등 다양한 제조방법이 있으며, 제조방법과 기지금속의 종류에 따라 복합재의 강도는 달라진다. 또한, 형상기억 복합재료의 강도에 영향을 미치는 주된 인자인 예변형률과 섬유와 기지의 제적함유량에 따라라도 복합재의 강도는 달라지게 된다. 실험의 특성상 다양한 범위에 걸쳐서 다양한 방법으로 강도특성을 평가하기에는 시간적, 공간적, 비용적인 면에서 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 복합재의 강도

를 평가하는데 있어 유한요소법을 이용하여 복합재의 강도예측방법을 찾고자 한다. 하지만, 형상기억 복합재료의 형상기억 효과를 유한요소법을 이용하여 해석하는데에는 많은 어려움이 있다. 왜냐하면, 형상기억합금의 독특한 성질을 해석하기가 쉽지 않기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 TiNi를 강화제로한 복합재료의 강도를 평가하기 위하여 이미 해의 정확성 및 유용성이 검증된 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 이용하여 해석을 하였다. 또한 형상기억 합금이 강화제로 사용되어진 복합재료의 강도해석을 위한 해석모듈을 ANSYS의 매크로 기능<sup>(2)</sup>을 이용하여 모듈화 하여, 형상기억 복합재료의 섬유가 TiNi, TiNiCo 일 경우와 기지가 Al6061(T4), Al6061(T6), 순수 Al일 경우의 해석을 수행할 수 있도록 하였다. 이러한 해석 매크로를 이용하면, 형상기억 복합재료의 강도 평가를 위한 실험을 하기 전에 복합재료의 강도를 평가함으로써 실험의 효율성을 높일 수 있으며, 실험에서 평가 하지 못한 영역까지 강도를 예측할 수 있다는 잇점이 있다. 또한, 사용자의 편리성을 위하여 사용하기 쉽고, 이식성이 우수한 Tcl/Tk 스크립트 프로그래밍 언어<sup>(3)</sup>를 이용하

여 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)<sup>(4)</sup>를 구현함으로써 ANSYS 프로그램에 능숙하지 않은 사용자도 짧은 시간안에 해석을 수행하고 해석 결과를 볼 수 있도록 하였다

## 2. 그래픽 사용자 인터페이스 구성

형상기억 복합재료의 해석을 위한 인터페이스는 ANSYS에 기본적으로 포함되어있는 Tcl/Tk 언어를 사용하였다 Tcl/Tk 언어는 스크립트 언어로서 그래픽 사용자 인터페이스를 간단하고 손쉽게 작성할 수 있도록 해주며 unix 계열 window9x/NT 매킨토시로도 이식이되어 호환성이 뛰어난 언어이다. 기본적인 ANSYS의 사용방법만 알면 쉽게 해석을 수행할 수 있도록 해석의 복잡한 부분은 매크로를 이용하였고, 필요한 파라미터를 간단한 GUI 환경으로 구성을 하였다

복합재료를 해석하는데 있어서 재료의 강도증가에 영향을 미치는 원인은 일반적으로 체적함유량과 예변형률이 주된 요인으로 알려져 있다 따라서, 체적함유량과 예변형률을 해석의 파라미터로서 이용하였다 그리고 여러 가지 재료의 조합이 가능하도록 섬유와 기지의 재료도 파라미터로서 구성을 하였다 또한 복합재료가 아닌 단일 재료의 해석도 할 수 있도록 파라미터를 사용하였다. 그리고, 온도에 따라 물성치가 변화되므로 해석의 조건으로서 온도의 파라미터도 이용하였다 이상의 파라미터로서 모놀을 구성하는 파라미터로 사용하여, 여러 가지 재료의 조합과 해석조건에 따른 해석결과를 검토할 수 있도록 하였다.

Table 1 solution procedure and parameter

	parameter	
Material	matrix, fiber, analysis type	
Modeling	fiber radius, volume fraction pre-strain	mesh
Solution	analysis temperature, pre-strain	solution
Post		result

인터페이스의 구성은 ANSYS에서 지원하는 UIDL을 이용하여, 메인메뉴에 메뉴항목을 추가하였으며, 이 메뉴항목과 Tcl/Tk 인터페이스를 연결하였다 메뉴는 Material, Modeling, Solution, Post 4개의 탭으로서 구성되어 있다.

Table 1은 프로그램의 구성을 간략히 나타내고 있다. Material 단계에서는 파라미터로서 matrix와 analysis type을 이용하였고, Modeling 단계에서는 fiber radius와 volume fraction, pre-strain을 이용하였으며, Solution 단계에서는 analysis temperature와 pre-strain을 이용하였다 그리고 Modeling 단계에서는 메시가 수행되고, Solution 단계에서는 해석이 수행된다

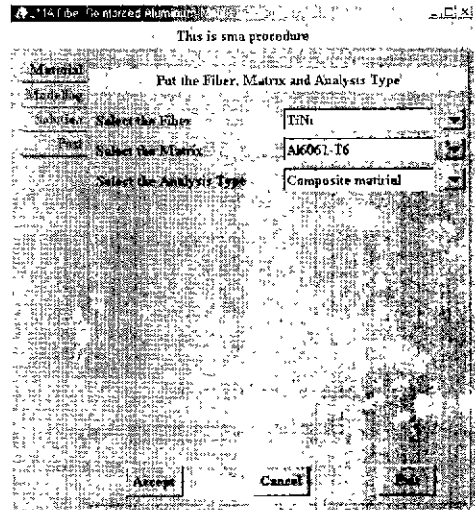


Fig. 1 The Material interface window

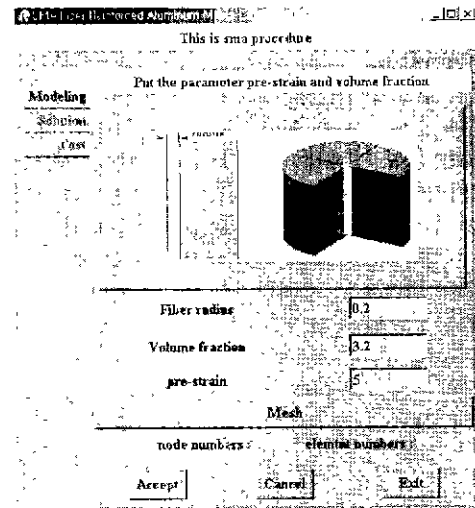


Fig 2 The Modeling interface window

먼저 Fig 1에서 보여지는 것과 같이 Material 단계에서는 섬유와 기지의 재료를 선택할 수 있도록 하였다. 섬유는 TiNi와 TiNiCo를 선택할 수 있도록

하였으며, 기지는 AI6061(T6)와 AI6061(T4) 그리고, 순수 AI을 선택할 수 있도록 하였다. 또한 복합재료가 아닌 단일 재료의 강도도 평가 할 수 있도록 하였다. 이것은 해석의 타당성을 검토하기 위한 것이다. Fig. 2에서는 Modeling 단계에서의 화면을 보여주고 있다. 이 단계에서는 섬유와 매트릭스의 체적함유량, 그리고, 예변형의 수치 데이터를 입력 받을 수 있도록 하여 다양한 체적함유량과 예변형의 조합이 가능하도록 하였다. 그리고, Mesh 버튼을 누르게 되면, ANSYS에서 자동으로 요소망이 생성되며, 생성된 결점의 갯수와 요소의 갯수가 아래에 나타나게 하였다.

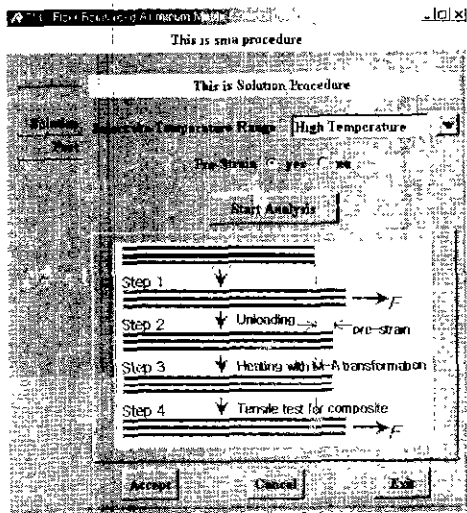


Fig. 3 The Solution interface window

Fig. 3에서는 solution 단계의 화면이며, 여기서는 해석의 온도 범위를 상온과 고온으로 선택할 수 있도록 하였으며, 고온의 경우에는 예변형을 주는 경우와 주지 않을 경우를 선택 할 수 있도록 하였다.

마지막으로 post의 단계에서는 해석 결과를 각각의 해석단계별로 결과를 출력할 수 있도록 하였다. 그리고, 각 해석 단계의 아랫부분에 있는 Accept 버튼은 다음 단계로 넘어가는 버튼이며, Cancel은 모든 데이터를 초기화하고, 처음의 단계로 넘어 가는 버튼이며, Exit 버튼은 모듈의 실행을 종료하는 버튼이다.

### 3. 모듈을 이용한 유한요소 해석

유한요소법을 이용하여 형상기억효과를 해석하려고 하면, 복잡한 비선형 해석을 수행해야되므로, 해석의 단순화를 위해 하나의 섬유와 기지로 이루어진 원통형 형상의 3차원 모델을 상정하여, Fig 4와

같이 2차원 축대칭모델을 이용하였다. 그리고, 경계 조건은 모델의 아랫부분은 고정조건을 대입하였고, 응력-변형률 선도를 구하기 위하여 모델의 윗부분과 아랫부분은 각각 y축 방향으로 커플링 구속(자유도 구속)을 하였다

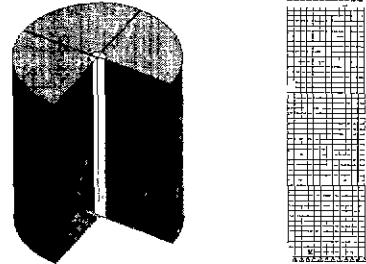


Fig. 4 FE model and boundary condition

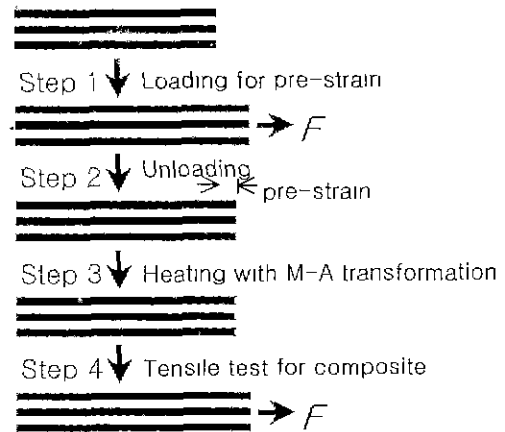


Fig. 5 Design concept of smart composite

Fig 5는 해석의 개념을 보여주고 있다. 그림의 step1에서는 pre-strain을 주기 위하여 인장하는 단계이며, 해석에서는 변위제어를 이용하였다. step2에서는 다시 이러한 변위제어를 하중제어로 치환하여 이 하중을 서서히 제거함으로써 예변형이 주어진 단계이다. 그리고, step3은 온도가 서서히 올라가서 섬유가 변태온도이상의 온도에 도달하게 되면 마르텐사이트상에서 오스테나이트상으로 변화하게 되는데, 이러한 상변태는 물성치의 변화를 가져오며, 해석에서는 이것을 온도에 따른 탄성계수와 선팽창계수 및 응력-변형률 선도를 적용하여 온도가 변태점 이상이 되었을 경우는 고온의 물성값을 가지고 해석을 수행하도록 하였다. Tini 섬유가 형상기억 온도 이상에서 마르텐사이트상에서 오스테나이트상으로 변태를 한

다 이 때, 물리적으로는 TiNi 섬유는 탄성계수가 증가하게 되고 따라서 마르텐사이트에서 소성거동을 하여 영구변형이 일어났다 하더라도 오스테나이트조직으로 변태를 일으키면 같은 하중조건에서 오스테나이트조직에서는 아직까지 탄성영역에 해당하게 되므로 탄성복원을 하게 된다. 그러나, 기지와 접합이 이루어져 있기 때문에 복원은 하지 못하고, 인장방향으로 인장 잔류응력이 발생하게 되고, 반면에 기지에는 압축잔류응력이 발생하게 되어 복합재료의 강도를 증가시키게 된다. step4는 예변형이 주어진 상태에서 인장을 하는 단계로서, 해석에서는 변위제어를 이용하였다

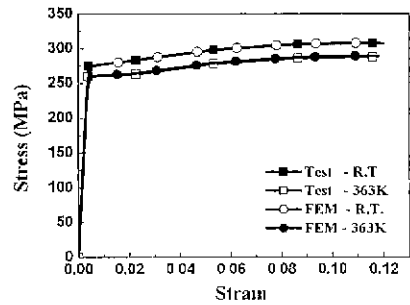
해석은 온도에 따른 물성치를 이용하였으며, 온도는 상온(R T)과 고온(373K)에서의 물성치를 각각 이용하였다. 해석에 사용된 TiNi 섬유와 기지인 Al6061의 물성값은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Mechanical Property of TiNi and Al

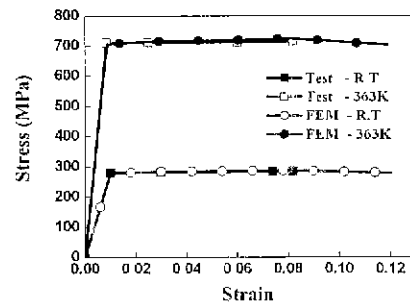
	Temp.	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Coef Of Thermal Expans. [ $\times 10^{-6} / K$ ]
Al6061	R T.	70	0.33	23.4
	363K	70	0.33	23.4
TiNi	R.T	41	0.43	6.6
	363K	83	0.43	11

해석을 수행한 후 응력-변형률 선도를 구하기 위하여 실험에서 구하는 방법을 이용하였다. 이 방법은 모델의 아래부분에서 반력을 구하여, 이것을 단면적으로 나누어 응력을 구하였으며, 모델의 윗부분에서 변위를 구하여, y방향 길이로 나누어 변형률을 구하였다. Fig 6은 Al6061(T6)과 TiNi에서의 상온과 고온에서의 해석결과와 응력-변형률 선도와 실험에서 얻어진 응력-변형률 선도를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 거의 동일한 결과를 나타내고 있으며, 이것은 해석의 방법이 타당함을 보여주고 있다.

Fig. 7에서는 체적함유량이 각각 3.2%, 5.2%일 때의 실험에서 구한 최대인장응력과 유한요소해석을 이용하여 구한 최대인장응력을 비교하였다. 실험은 예변형률을 주지 않은 경우와 1%, 3%, 5%를 각각 준 경우에 실시하였으며, 실험과 유한요소해석의 결과가 아주 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 개발한 복합재료의 강도해석 모델을 이용하면 짧은 시간과 간단한 조작만으로 형상기억복합재료의 강도를 평가할 수 있어, 매우 효율적임을 알 수 있다.

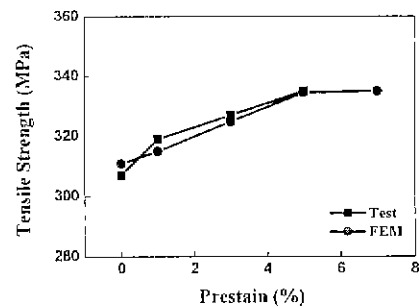


(a) Al6061 matrix

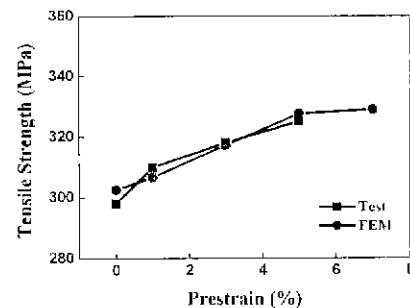


(b) TiNi fiber

Fig. 6 Comparison of input data with FEA results



(a)  $V_f=3.2\%$



(b)  $V_f=5.2\%$

Fig. 7 FE Analysis and experimental results of the tensile strength in the composite as a function of pre-strain of TiNi fiber