

TiNi/Al기 형상기억복합재료의 강도평가를 위한 전문가시스템의 개발

박영철[†]·이동화^{*}·박동성^{*}

(2003년 10월 30일 접수, 2004년 6월 14일 심사완료)

The Development of Expert System for Strength Evaluation of TiNi Fiber Reinforced Al Matrix Composite

Young Chul Park, Dong Hwa Lee and Dong Sung Park

Key Words: Expert System(전문가시스템), Finite Element Analysis(유한요소해석), Shape Memory Alloy (SMA, 형상기억합금), Shape Memory Effect(SME, 형상기억효과), Smart Composite (지적복합재료), Volume Fraction(체적함유율)

Abstract

In this paper, a study on the development of expert system for Al matrix composite with shape memory alloy fiber is performed to evaluate thermomechanical behavior and mechanical properties. Expert system is very useful computer-based analysis system designed to make analysis technique and knowledge conveniently available to a lot of fabricable condition. In the developed system, it is possible to predict thermomechanical behavior and mechanical properties for other composite with shape memory alloy fiber. The smartness of the shape memory alloy 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. For finite element analysis, an analytical model is assumed two dimensional axisymmetric model compared of one fiber and the matrix. To evaluate the strength of composite using FEM, the concept of smart composite was simulated on computer. Thus, in this paper, the FEA was carried out at two critical temperature conditions; room temperature and high temperature(363K). The finite element analysis result was compared with the test result for the analysis validity.

1. 서 론

TiNi 형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)이 강화된 지적복합재료(Smart Composite)에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.^(1,3) 이러한 지적복합재료는 TiNi 섬유와 형상기억효과(Shape Memory Effect, SME)를 이용한 것으로, SME에 의해 기지

에는 압축잔류응력(Compressive Residual Stress)이 발생하여 전체적으로 복합재료의 강도가 증가하게 된다.^(4,5) SMA는 온도감지와 구동기구, 시간적 기억과 회복기능 등을 재료자체가 가지고 있으므로 지적재료의 모든 조건을 갖추고 있을 뿐만 아니라 대변형과 고강도 액추에이터로서의 특징이 있기 때문에 금속, 폴리머, 콘크리트 등과의 복합화에 의하여 지적구조물을 만들 수 있다. SME를 나타내는 많은 합금들이 있으나 그 중에서도 TiNi 형상기억합금은 마르텐사이트 변태의 주된 특성을 가지고 있으며, 이러한 특성으로 발생하는 형상회복성, 변형에너지의 저장성과 방진성을 이용할 수 있는 우수한 기능을 가지고 있는 기능

[†] 책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학과

E-mail : parkyc67@donga.ac.kr

TEL : (051)200-7652 FAX : (051)200-7656

^{*} 동아대학교 대학원 기계공학과

성재료이다. 이러한 복합재료는 용탄단조법, 분발 야금법, 핫프레스법 등의 다양한 방법으로 제조하고 있으며,⁽⁶⁾ 제조방법과 기지금속의 종류에 따라 복합재의 강도는 달라진다.

형상기억복합재료는 장섬유인 TiNi와 기지금속을 복합화 함에 있어서 일정한 체적함유량을 유지해야 하는 어려움과 동일한 시료를 동일한 조건에서 제조해야 하는 어려움 등 현실적인 문제를 극복하는 것이 과제로 남아 있다. 뿐만 아니라, 복합화 과정에서 발생하는 기지금속의 강도 변화와 TiNi섬유의 연신정도 및 섬유와 기지의 계면분리 등도 극복해야 할 과제이다. 이러한 문제를 극복할 수 있는 방법으로서 저자 등은 유한요소법(Finite Element Analysis, FEA)을 이용하여 TiNi/Al6061형상기억복합재료에 대한 강도평가 방법을 선행연구에서 제시하였다.⁽⁷⁾ FEA를 이용함으로써 다양한 체적함유량의 복합재에 대한 평가가 가능하였으며, 섬유와 기지의 상태를 다양하게 변화시키면서 복합재의 특성을 파악할 수 있었다. 또한 실험적인 검증을 통하여 해석의 신뢰성을 확보함으로써 FEA를 이용한 복합재의 특성평가는 복합재의 특성평가에 유용한 방법임을 입증하였다.

본 연구에서는 형상기억복합재료의 기계적 특성을 편리하고 손쉽게 결정할 수 있도록 FEA 전문가시스템(Expert System)을 개발하고자 한다. 전문가시스템을 이용하면 섬유의 종류 및 치수의 변화는 물론 기지금속의 종류도 다양하게 변화시킬 수 있다. 또한 다양한 체적함유량의 복합재에 대하여 실험으로 평가하기 어려운 조건에 대하여도 평가할 수 있는 특징이 있다. 형상기억복합재료에 대한 FEA 프로세스를 전문가시스템으로 구현한 후 TiNi섬유와 Al6061기지를 복합화한 TiNi/Al6061에 대하여 기계적 특성을 평가하였다. FEA 전문가시스템은 상용유한요소해석 프로그램인 ANSYS의 서브루틴 프로그램으로 개발하였다. 또한 전문가 시스템을 이용하여 평가한 TiNi/Al6061형상기억 복합재료의 기계적 특성에 대한 실험적 평가를 위하여 핫프레스법(HP법)으로 TiNi/Al6061형상기억복합재료를 제조하였으며, 두 방법에 의한 복합재료의 기계적 특성을 비교하였다. 끝으로 TiNi섬유와 Al2024기지를 복합화한 TiNi/Al2024형상기억 복합재료에 대한 기계적 특성을 전문가시스템을 이용하여 예측하였다.

2. 전문가시스템의 개발

2.1 전문가시스템

전문가시스템은 어떤 특정의 제품에 대한 해석을 수행하기 위하여 개발된 그래픽사용자 인터페이스(GUI) 환경의 유한요소해석 전용모듈이다. 상용 유한요소해석 프로그램에 기초한 전문가시스템은 해석 프로그램에 대한 전문지식이나 유한요소 해석에 대한 기초지식이 없는 엔지니어라 할지라도 GUI 환경에서 제품에 대한 정보(치수, 하중, 구속조건 등)를 수치로 입력함으로써 편리하고 쉽게 해석을 수행할 수 있을 뿐만 아니라 그 결과도 쉽게 평가할 수 있는 장점이 있다. 또한 제품에 대한 다양한 정보를 변화시켜 입력하여도 모델이 자동으로 생성되는 물론 변화된 치수 및 새로운 하중에 대한 제품의 성능평가가 가능하도록 구성함으로써 제품의 성능에 영향을 미치는 파라미터를 쉽게 도출할 수 있다.

본 연구에서 전문가시스템은 상용 유한요소해석프로그램인 ANSYS에 기반을 두었다. 전문가시스템을 개발하기 위해서는 우선 ANSYS에서 제공하는 명령어를 이용하여 전처리과정(Pre-processor), 해석과정(Solution) 및 후처리과정(Post-processor)을 명령어파일로 생성해야 한다. 명령어파일 생성시 모델의 필요한 부분은 변수처리를 하여야 하며, 요소의 크기, 하중의 크기, 구속할 자유도 등도 필요에 따라서는 변수로 정의한 후 전체 명령어파일을 매크로로 정의한다. 변수들 중 그 값을 변화시키고자 하는 것, 해석조건이나 상태를 대표하는 옵션, 하중의 크기 및 출력하고자 하는 내용 등은 엑셀, 비주얼베이직, Tcl/Tk와 같은 언어를 이용하여 GUI로 구성한다. 본 연구에서는 웹 스크립터 언어인 Tcl/Tk를 사용하여 GUI를 구성하였다. Tcl/Tk 언어는 GUI를 간단하고도 손쉽게 작성할 수 있도록 해주며 unix계열, windows 9x/NT, windows 2000, 매킨토시 등에도 이식이 되며 호환성이 아주 뛰어난 언어이다. ANSYS에서도 기본적으로 Tcl/Tk 언어를 지원한다. Tcl(Tool Command Language)는 일종의 명령어 해석기인 인터프리터로 구성이 되며, Tk(Tool Kit)는 Tcl을 이용하여 편리하게 그래픽 사용자 인터페이스를 구성할 수 있게 해 준다.

2.2 유한요소해석의 개념

Fig. 1은 형상기억복합재료의 설계개념을 나타낸다.⁽⁸⁾ Step 1은 예변형을 부가하기 위해 인장력을 가하는 과정이고, Step 2에서는 가해진 인장력을 제거함으로써 예변형을 발생시킨다. Step 3에서 온도를 오스테나이트 완전변태온도(A_f) 이상인 363K로 올리면 TiNi 섬유는 마르텐사이트상에서 오스테나이트상으로 역변태가 일어나 초탄성 범위 내에서 부가된 예변형은 형상기억효과에 의해 원래의 상태(A의 상태)로 되돌아 간다. 반면 기지금속은 363K에서 열변형에 의해 인장이 발생하게 되지만 TiNi 섬유에 의해 구속이 발생되어 기지에는 압축응력이 발생하게 된다. Step 4는 이 상태에서 인장하중을 적용한다.

이러한 과정을 유한요소법을 이용해 해석하기 위해 다음과 같이 해석을 수행하였다. 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 도달하게 되면 마르텐사이트상에서 오스테나이트상으로 변화하게 되는데, 이러한 효과를 주기 위하여 온도에 따른 탄성계수와 열팽창계수를 이용하였다. TiNi 섬유가 형상기억 온도 이상에서 마르텐사이트상에서 오스테나이트상으로 변태를 한다. 이 때, 물리적으로는 TiNi 섬유의 탄성계수가 증가하게 되고 따라서 마르텐사이트에서 소성거동을 하여 영구변형이 일어났다 하더라도 오스테나이트로 조직이 변태를 일으키면 동일한 하중조건에서 오스테나이트조직에서는 아직까지 탄성영역에 해당하게 되므로 탄성복원을 하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 온도가 일정 온도(363K) 이상으로 되었을 경우에 재료의 기계적 성질을 변화시킴으로써 형상기억효과를 고려한 해석을 수행할 수 있다. Step 4는 (D)의 상태에서 변위제어으로써 인장하는 과정이다.

2.3 해석모델 및 해석방법

TiNi/Al기 형상기억 복합재료의 형상기억효과를 유한요소법을 이용하여 해석하려면, 복잡한 비선형 해석을 수행해야한다.⁽⁷⁾ 따라서 해석모델은

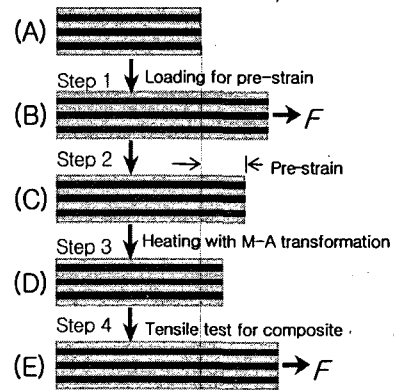


Fig. 1 Design concept of smart composite

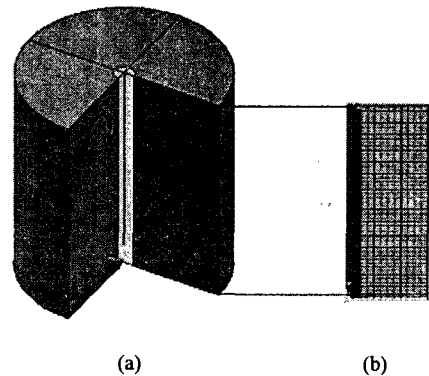


Fig. 2 Solid and finite element analysis model for tensile test (a) 3-dimensional shape of composite, (b) 2-dimensional axisymmetric finite element model

해석의 단순화를 위해 하나의 섬유와 기지로 이루어진 원통형의 3차원 축대칭 모델로 가정하였으며 2차원 축대칭모델에 대하여 또 다시 대칭성을 고려하여 Y축(모델의 길이 방향)을 중심으로 1/2만 모델을 생성하였으며 Fig. 2에 기하모델과 유한요소 모델을 나타낸다. 경계조건은 Fig. 2의 하부끝단에 대하여 대칭조건으로 구속하였으며 상부 끝단에 대하여 Y방향으로 일정변위를 부여한 후 온도가 363K로 안정화된 상태에서 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 가정

Table 1 Mechanical properties of TiNi and matrix

	Al6061		Al2024		TiNi	
	RT	363K	RT	363K	RT	363K
Elastic Modulus [GPa]	70	70	72.4	72.4	41	83
Poisson's Ratio	0.33	0.33	0.33	0.33	0.43	0.43
Coef. Of Thermal Expans. [$\times 10^{-6}/K$]	23.4	23.4	23.2	23.2	6.6	11
Yield Stress [MPa]	275	260	325	315	280	710

하였다. 해석에서 온도 의존성의 물성치를 사용하였고, 온도는 상온과 고온(363K)에서의 물성치를 각각 이용하였으며, 온도에 따른 섬유와 기지의 물성값은 Table 1과 같다.

Fig. 3에서 Fig. 5는 각각 온도에 따른 Al6061, Al2024 및 TiNi의 공칭응력-공칭변형률 선도이다. 그림에서 알 수 있듯이 Al6061과 Al2024의 경우는 고온보다는 상온에서 더 큰 항복응력과 최대 인장응력이 발생하는 반면에 TiNi 섬유는 오히려 상온보다는 고온에서 더 큰 항복응력과 인장응력을 가진다. 그리고, Fig. 6와 Fig. 7은 각각 상온과 고온에서의 Al6061, Al2024 및 TiNi 섬유의 열팽창계수와 탄성계수를 나타낸다. Al6061의 선팽창계수는 상온에서 $23.4 \times 10^{-6}/K$ 이고, 고온에서도 $23.4 \times 10^{-6}/K$ 이며, Al2024의 선팽창계수는 상온에서 $23.2 \times 10^{-6}/K$ 이고, 고온에서도 $23.2 \times 10^{-6}/K$ 이며, TiNi의 선팽창계수는 상온에서 $6.6 \times 10^{-6}/K$ 이고, 고온에서는 $11 \times 10^{-6}/K$ 이다. Al6061의 탄성계수는 상온과 고온에서 70GPa로서 일정한 값을 가지며, Al2024의 탄성계수도 상온과 고온에서 72.4GPa로서 일정한 값을 가진다. 그러나 TiNi의 탄성계수는 상온에서는 41GPa, 고온에서는 83GPa이다. 탄성계수와 열팽창계수는 상온과 고온에서의 값을 이용하였는데, 이는 복합재료의 온도가 363K로 안정화된 상태에서 해석을 수행하기 때문이다. 최종적으로 Fig. 8과 같은 방법으로 유한요소 해석 결과를 바탕으로 응력-변형률 선도를 구하였다.

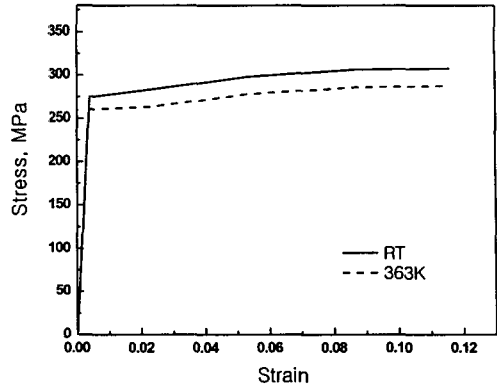


Fig. 3 Engineering stress-strain curve of Al6061

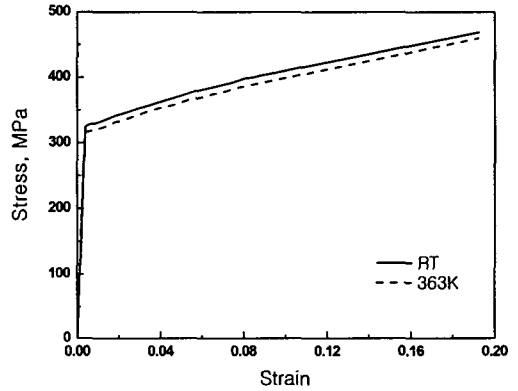


Fig. 4 Engineering stress-strain curve of Al2024

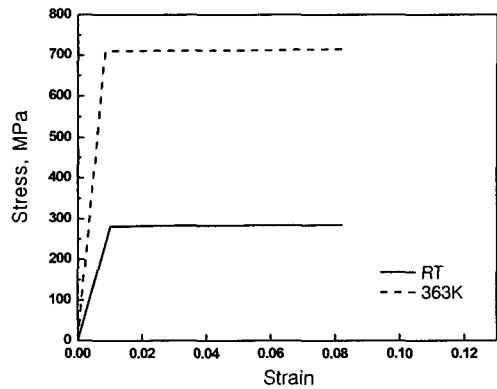


Fig. 5 Engineering stress-strain curve of TiNi fiber

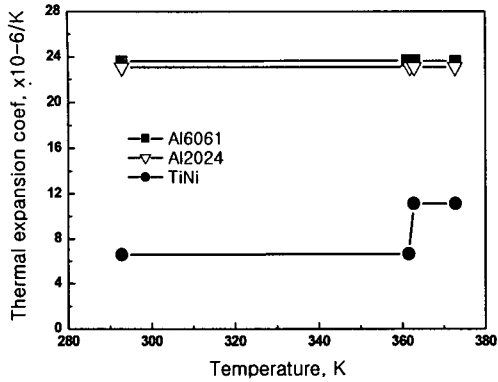


Fig. 6 Thermal expansion coefficient

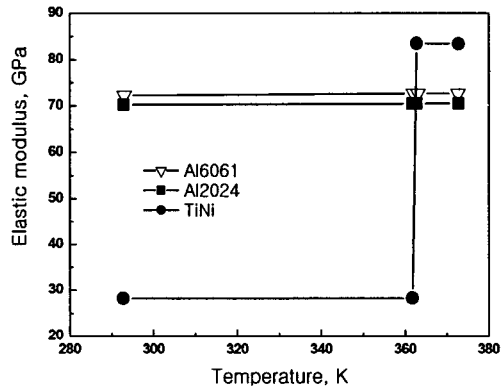


Fig. 7 Elastic modulus

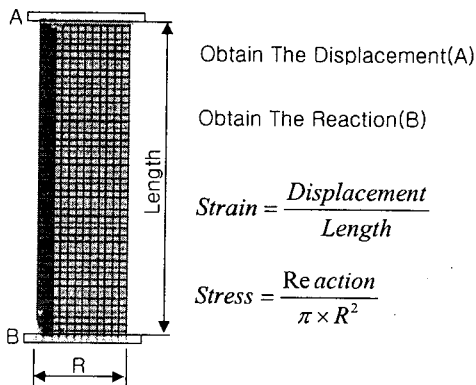


Fig. 8 Obtain the engineering stress-strain curve

2.4 그래픽사용자 인터페이스 구성

Fig. 9는 TiNi/Al기 형상기억복합재료의 강도특성을 평가하기 위해 Tcl/Tk를 이용하여 개발한

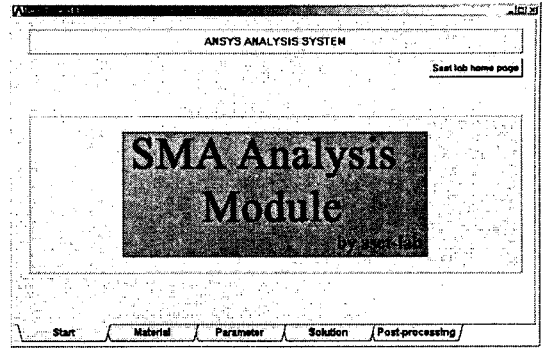


Fig. 9 Main window of expert system

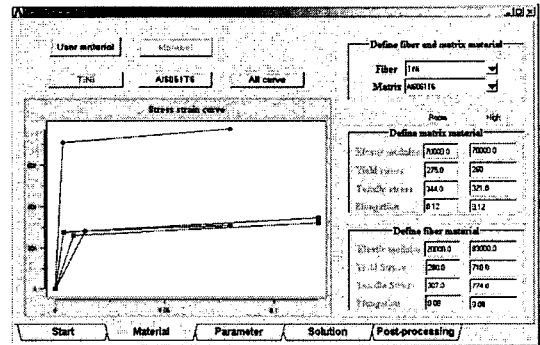


Fig. 10 Material window of expert system

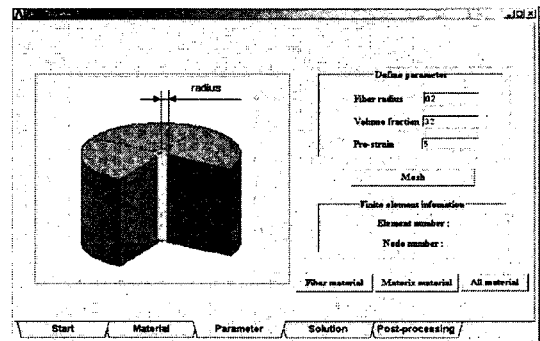


Fig. 11 Parameter window of expert system

전문가시스템의 초기화면이다. 윈도우의 아래쪽의 다섯 개의 버튼은 각각 'Start', 'Material', 'Parameter', 'Solution', 'Post-processor'를 나타낸다.

Fig. 10은 'Material' 섹션이다. 여기서는 이미 저장되어 있는 물성값을 사용할 수 있을 뿐만 아니라 사용자가 직접 입력할 수도 있도록 구성하였다. 좌측상단의 'User material' 버튼을 클릭하면

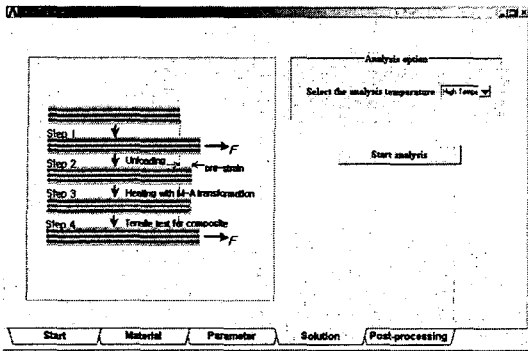


Fig. 12 Solution window of expert system

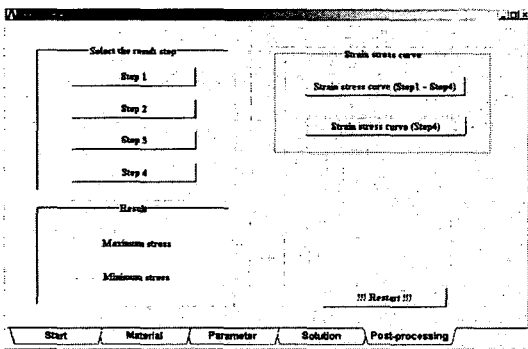


Fig. 13 Postprocessing window of expert system

우측하단의 'Matrix'와 'Fiber'의 상온 및 고온에서의 'Elastic modulus', 'Yield Stress', 'Ultimate Stress', 'Elongation' 값을 직접 입력할 수 있다. 이 때 우측 상단의 선택 메뉴는 비활성화 된다. 그리고 좌측상단의 'Material' 버튼을 클릭하면 우측상단의 선택메뉴가 활성화되어 'Fiber'와 'Matrix'를 선택할 수 있다. 좌측상단의 두 번째 줄 버튼은 각각 'Fiber', 'Matrix', 'Fiber와 Matrix'의 응력-변형률 선도를 그래프로 출력할 수 있다.

Fig. 11은 'Parameter' 섹션이다. 여기서는 섬유와 반지름과 체적함유량(Volume Fraction) 그리고 예변형률(Pre-strain)을 입력한다. 중간에 'Mesh'를 클릭하면 ANSYS에서 모델링과정과 메쉬과정이 자동으로 수행되고 요소수와 절점수가 피드백 되어 실시간으로 나타나게 된다.

Fig. 12는 'Solution' 섹션이다. 여기서는 해석의 온도조건을 정의한다. 상온조건에 대하여 해석을 수행할 수 있음은 물론 상온에서 고온으로 변화하는 조건에 대해서도 해석을 수행할 수 있도록 해석 프로세스를 자동화하였다. 우측중간의 'Start

analysis' 버튼을 클릭하면 ANSYS 내에서 자동으로 해석이 수행된다.

Fig. 13은 해석이 끝난 후에 결과를 확인하는 'Post-processor' 섹션이다. 좌측의 'Step 1', 'Step 2', 'Step 3', 'Step 4'는 각각의 해석단계에서의 해석 결과를 읽어 들이는 기능을 한다. 좌측의 하단은 선택된 해석 단계에서의 최대응력과 최소응력을 출력해 주는 부분이다. 우측 상단의 버튼은 전체 해석 단계에서의 응력-변형률 선도를 출력해 주는 부분이다. 'Step 1 ~ Step 4'는 전체 해석단계에서의 결과를 그래프로 출력해 주며, 'Step 4'는 마지막 단계만의 결과를 출력한다. 우측 하단의 'Restart'버튼은 해석을 다시 처음부터 수행하는 기능을 한다. ANSYS에서 모델링과정과 메쉬과정이 자동으로 수행되고 요소수와 절점수가 피드백 되어 실시간으로 나타나게 된다.

3. HP법에 의한 복합재료의 제조 및 실험방법

본 연구에서는 TiNi/Al6061형상기억 복합재료를 제조하기 위하여 판재 Al6061(1mm)와 직경 500 μm 의 TiNi 섬유(Ti-50.0 at.% Ni)를 사용하였다. Fig. 14는 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 뿐만아니라, 섬유를 다층으로 고정할 수 있기 때문에 섬유의 체적함유량을 자유로이 변경하면서 시험편을 제작할 수 있다.

TiNi 섬유는 200mm×200mm×1mm의 알루미늄판재 사이에 일정한 배열로 고정되며, 알루미늄 판재는 Fig. 15와 같이 프레스다이 사이에 놓고 고온에서 압력을 가하였다. 핫프레스법으로 섬유의 체적함유량이 3.2%, 5.2% 및 7%인 3종류의 복합재료를 제조한 후 Fig. 16과 같이 시험편을 취하였다.

기존인 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. 17은 시효처리 시간과 비커스 경도와의 관계를 나타낸다.

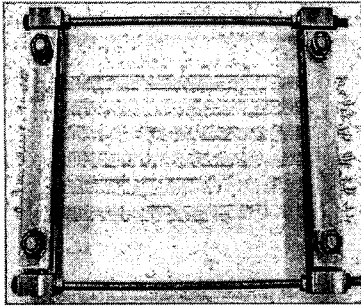


Fig. 14 The fixture for fixing and arraying SMA fibers

Fig. 17의 결과를 참고하여 제작된 시험편에 대하여 813K에서 1시간동안 용체화 처리를 실시한 후, 448K에서 5시간 동안 시효처리를 수행하였다.

예변형은 상온에서 시험편에 대하여 1×10⁻⁴mm/s로 인장하여, 1, 3, 5%를 가하였다. 예변형을 가한 시험편에 대하여 363K에서 인장시험을 실시하였다. 실험온도는 열전대를 이용하여 시험편의 표면에서 측정하였다.

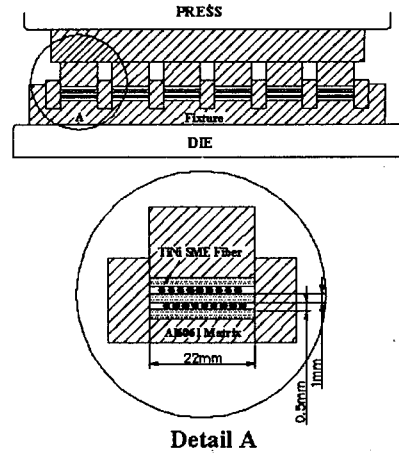


Fig. 15 Schematic diagram of hot pressing

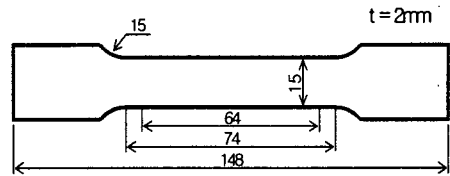


Fig. 16 The shape and dimension of test specimen

4. 전문가시스템을 이용한 해석결과의 평가

4.1 해석결과에 대한 타당성 평가

Fig. 18은 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. 19는 TiNi만의 상온과 363K에서의 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 해석적으로 구한 응력-변형률 선도와 입력한 선도가 같은 결과를 나타낸다. 따라서 Fig. 18과 Fig. 19로부터 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 공칭응력-공칭변형률로의 변환방식도 타당함을 확인하였다.

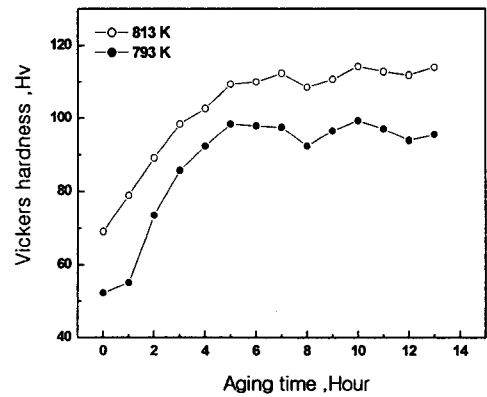


Fig. 17 The Vickers hardness as a function of aging time

4.2 해석결과 및 고찰

체적함유율이 각각 2%, 3.2%, 5.2%, 7%인 TiNi/Al6061과 TiNi/Al2024형상기억 복합재료에 대하여 예변형률을 각각 1%, 3%, 5%, 7%부가한 후 유한요소해석을 수행하였다.

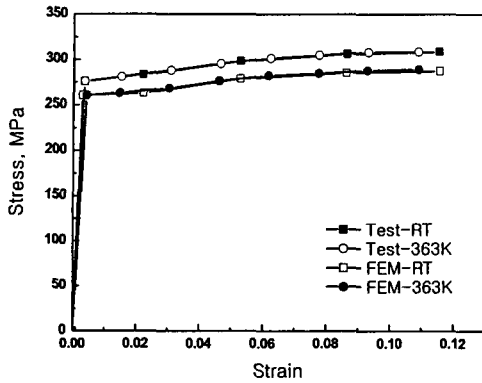


Fig. 18 Comparison of the results from the finite element analysis and tensile test for Al6061

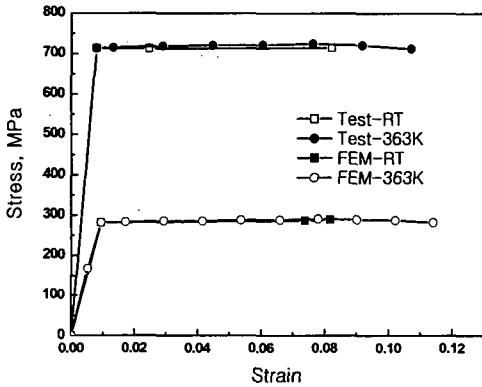


Fig. 19 Comparison of the results from the finite element analysis and tensile test for TiNi fiber

Fig. 20은 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 설계개념에 따라 'step1'에서 'step4'까지의 전 과정에 대한 해석 모델의 거동을 나타낸 그래프이다. 그림에서 'step1'은 예변형을 가하는 단계이며, 'step2'는 예변형을 가한 후 하중을 제거하는 단계이다. 또한 'step3'는 하중이 제거된 상태에서 온도를 363K로 올리는 단계이다. 이때 그래프 상에서 응력의 증가는 없이 변위만 증가하는데, 이는 하중이 제거된 상태이므로 Fig. 8과 같이 반력을 이용하여 응력을 출력하였으므로 온도의 증가에 의한 응력은 없는 것으로 나타난다. 그러나 'step4'의 인장에 의한 응력이 'step1'의 예변형 시의 응력과 비교해서 높게 나타나는 것으로부터 'step3'의 과정에서 형상기억복합재료의 가장 중

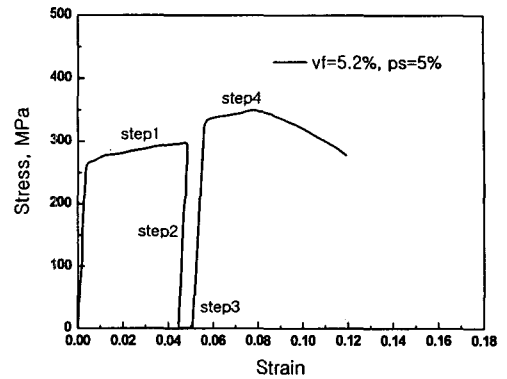


Fig. 20 Stress and strain history of TiNi/Al6061 composite for the tensile test using FEA

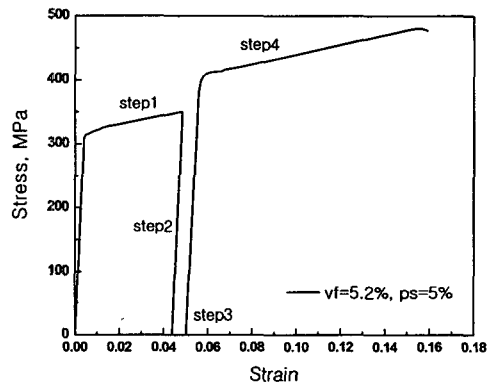


Fig. 21 Stress and strain history of TiNi/Al2024 composite for the tensile test using FEA

요한 설계개념인 섬유와 기지사이에 압축잔류응력이 발생하였음을 예측할 수 있다. Fig. 21은 TiNi/Al2024 형상기억복합재료의 설계개념에 따라 'step1'에서 'step4'까지의 전 과정에 대한 해석 모델의 거동을 나타낸 그래프이다. 그림에서 형상기억합금의 형상기억효과에 의해 복합재료의 강도가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 22는 TiNi 섬유의 체적함유량이 5.2%인 경우 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 예변형률에 따른 응력-변형률 선도를 나타낸다. 그림에서 예변형률이 증가할수록 인장강도는 증가하고 있다. 그러나 응력-변형률 선도에서 섬유의 체적함유량이 증가할수록 연신량이 줄어드는데, 이는 고온인 363K에서의 TiNi섬유와 기지인 Al6061의 강성

(stiffness) 차이가 크고, 기지인 Al6061의 체적함유량이 줄어들어 기지에 큰 변형이 발생하기 때문으로 판단된다. Fig. 23은 TiNi 섬유의 체적함유량이 5.2%인 경우 TiNi/Al2024 형상기억복합재료의 예변형률에 따른 응력-변형률 선도를 나타낸다. 그림에서 TiNi 섬유의 체적함유량이 증가할수록 TiNi/Al6061 복합재료와 마찬가지로 복합재료의 인장강도가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 24와 Fig. 25는 각각 TiNi/Al6061과 TiNi/Al2024 형상기억복합재료의 각 체적함유량에 대하여 예변형률과 인장강도와의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서 체적함유량이 높을수록, 예변형률이 증가할수록 인장강도가 높게 나타남을

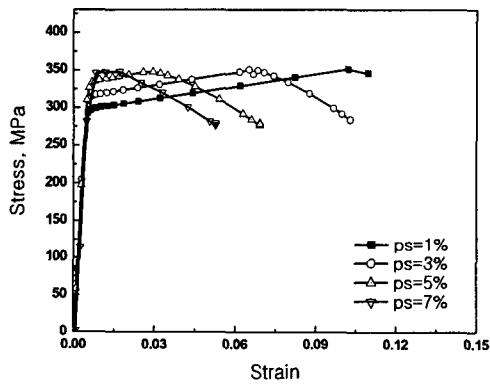


Fig. 22 Stress-strain curves of TiNi/Al6061 composite as a function of pre-strain ($vf=5.2\%$)

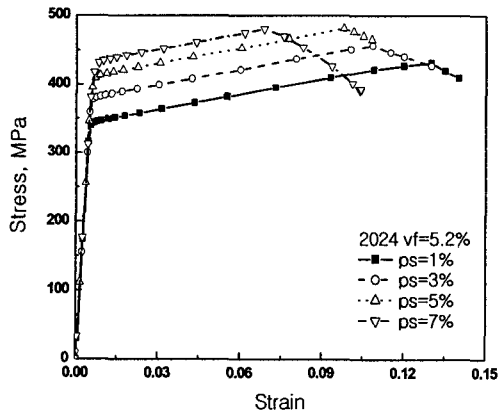


Fig. 23 Stress-strain curves of TiNi/Al2024 composite as a function of pre-strain ($vf=5.2\%$)

알 수 있다. Fig. 26은 체적함유량이 5.2%인 복합재료의 인장강도를 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 복합재료 모두 실험으로 구한 인장강도와 해석을 통한 인장강도가 비교적 잘 일치하고 있으며, 해석을 이용한 결과가 전체적으로 높은 값을 나타낸다. TiNi/Al6061 형상기억복합재료와 TiNi/Al2024 형상기억복합재료의 인장강도를 비교할 때 TiNi/Al2024 형상기억복합재료의 인장강도가 훨씬 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 기지인 Al2024의 강도가 Al6061의 강도보다 높기 때문으로 판단된다.

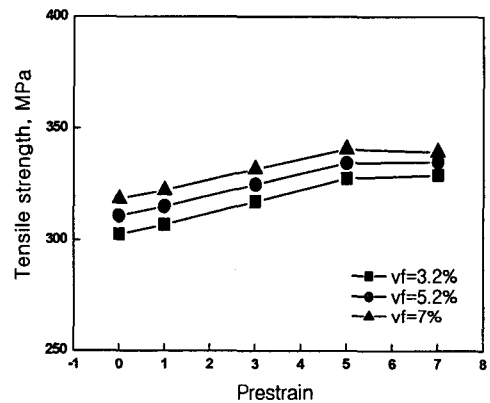


Fig. 24 The relationship between the tensile strength of TiNi/Al6061 composite obtained from FEA and prestrain

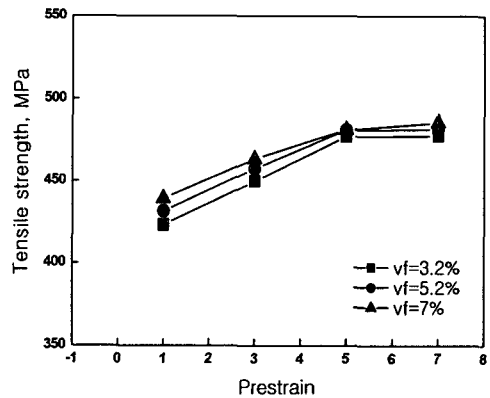


Fig. 25 The relationship between the tensile strength of TiNi/Al2024 composite obtained from FEA and prestrain

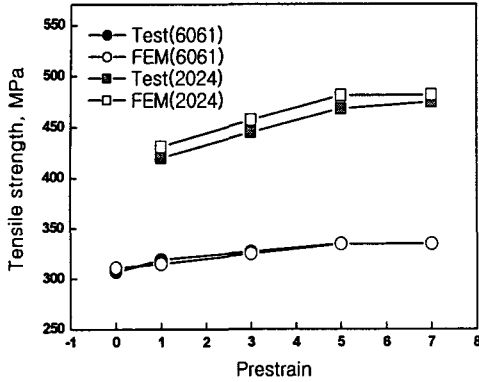


Fig. 26 Comparison of the results from finite element analysis and tensile test for TiNi/Al6061 and TiNi/Al2024 composite (vf=5.2%)

5. 결 론

TiNi첨유가 강화된 Al기, 형상기억 복합재료의 기계적 특성을 평가하기 위하여 유한요소해석 전문가시스템을 개발에 관한 본 연구에서 다음의 결론을 얻었다.

(1) 개발된 전문가 시스템을 이용하여 복합재료의 기계적 특성인 인장강도를 정도 높게 평가할 수 있었다.

(2) 복합재료의 거동이력을 통하여, 실험적으로는 확인할 수 없었던 형상기억효과에 의한 강도 증가를 정량적으로 확인할 수 있었다.

(3) 복합재료의 강도는 기지금속의 강도에 많은 영향을 받음을 확인하였다.

(4) 제안된 유한요소해석 모델과 해석방법은 형상기억 복합재료의 강도특성을 평가하기에 적합하였다.

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) Tadaki, T. and Otsuka, K., 1988, "Shape Memory Alloy," *Ann. Rev. Mater. Sci.*, pp. 25~45
- (5) Liu, C. T., Kunsmann, H. and Otsuka, K., 1992, "Shape memory Materials and Phenomena Fundamental Aspects and Applications," *Proc. of Mat. Res. Society*, Vol. 246, pp. 299~369
- (6) Young-Chul Park, Dong-Sung Park, Jun-Hee Lee and Guy-Chang Lee, 2002, "Fabrication and Characterization of TiNi Shape Memory Alloy Fiber Reinforced 6061 Aluminum Matrix Composite by Using Hot Press," *Korea Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 26, No. 7 pp. 1223~1231
- (7) Young-Chul Park, Dong-Sung Park, Dong-Hwa Lee and Guy-Chang Lee, 2002, "The Strength Evaluation of TiNi/Al6061 Composite by Using Finite Element Method," *Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 72~78
- (8) Hamada, K., Lee, J.H., K. Mizuuchi, K., Taya, M. and Inoue, K., 1998, "Thermomechanical Behavior of TiNi Shape Memory Alloy Fiber Reinforced 6061 Aluminum Matrix Composite," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 29A, pp. 1127~1135