

## FEM과 AE를 이용한 지적복합재료의 기계적특성 평가

### Evaluation on Mechanical Properties of a Smart Composite Using the Finite Element Method and the Acoustic Emission Technique

박영철\*, 이진경\*\*†

Young Chul Park\* and Jin-Kyung Lee\*\*†

**초 록** 지능재료는 안경테, 치아 교정과 같은 의료용 재료, 각종 센서 및 밸브 등의 광범위한 분야에서 적용되고 있다. 이와 같은 지적재료의 형상기억효과를 이용한 지적복합재료는 항공기의 부품, 산업구조물 및 항공산업에서도 그들 시스템의 모니터링을 위하여 사용되어 질 수 있다. 그러나 지능복합재료의 형상기억효과에 대한 분석과 시뮬레이션은 대단히 어렵다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 기지재와 하나의 강화섬유에 대한 2차원의 축대칭 모델에 대하여 분석하였다. 상온(293K)과 고온(363K)에서 각각 해석되었으며 해석결과와 실험결과와의 강도값을 비교검토하였다. 더불어 음향방출 기법을 이용하여 지능복합재료(TiNi/Al6061)의 예변형률과 고온에서의 미시적 손상거동을 평가하였다.

**주요용어:** 지능복합재료, 형상기억효과, 축대칭모델, 음향방출기법, 예변형률

**Abstract** Smart material is used in various applications such as for glass frame, for medical instruments and for a part of sensors. Smart composite materials can be applied to a part of aircraft and to the on-line monitoring system for industrial structures, using the shape memory effect. However, it is very difficult to simulate and analyze the shape memory effect in smart composites. In this paper, a two dimensional axisymmetric model was proposed to analyze the smart composite of one fiber and matrix using the finite element method(FEM). The finite element analysis was carried out in two conditions of the room temperature (293K) and a higher temperature (363K). The results were compared with the experimental results to confirm the validity of the analysis. In addition, the acoustic emission(AE) technique was used to study the microscopic damage behavior and the effect of pre-strains on TiNi/Al6061 shape memory alloy composite.

**Keywords:** smart composite, shape memory effect, axisymmetric model, acoustic emission, pre-strain

#### 1. 서 론

금속재료의 경우 외력이 가해져 탄성변형이 유발되었을 때 외력을 제거하면 원래의 형상으로 되돌아가지만 변형이 탄성영역을 지나면 소성변형이 발

생하고 이는 외력을 제거해도 원상태로 되돌아가지 않는다. 형상기억합금(shape memory alloy(SMA))은 형상을 기억시킨 모양에서 변형을 시킨 후에 열을 가하면 원래의 모양으로 되돌아가는 성질을 가진 금속이다[1,2]. 즉 이 합금은 일단 어떤 형상을

기억하면 여러 가지 형상으로 변형시켜도 적당한 온도로 가열하면 변형전의 형상으로 되돌아오는 성질이 있다. 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, 이들 합금 중 TiNi 형상기억합금[3]은 B2모상(cubic)에서 B19'마르텐사이트(monoclinic)로 마르텐사이트 변태의 주된 특성을 가지고 있으며, 이러한 특성으로 인해 형상 회복성의 우수한 기능을 가진 재료이다. 본 연구에서의 TiNi 형상기억합금을 강화재로 사용한 복합재료는 기존의 금속복합재료에 있어서 가장 큰 문제점으로 지적되었던 강화재와 기지재간의 열팽창 계수의 차이에 의한 복합재료 내부의 잔류응력에 의한 강도저하의 문제를 TiNi 형상기억합금의 형상기억효과를 이용하여 압축잔류응력을 유발시킴으로써 해결할 수 있다는 가능성을 제시하고 있다. 특히 형상기억합금은 온도가 증가할수록 TiNi의 강화기구(strength mechanism)에 의해 인장강도가 향상되며, 지능복합재료의 탄성계수, 항복응력은 TiNi의 체적함유율(Volume fraction( $V_i$ )), 예변형률(Pre-strain)[4]에 의존한다고 알려져 있다. 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 예측할 수 있다면 시간적, 공간적, 비용적인 측면에서 보다 효율적인 것이다.

따라서 본 연구에서는 최적의 TiNi 형상기억합금의 체적함유율과 최적의 예변형률을 미리 알아낼 수 있도록 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하였다. 그리고, 유한요소법에 의하여 구해진 결과와 이론 강도 값을 비교하고, 또한 hot press 법[5]으로 만들어진 복합재료의 인장시험결과의 응력-변형률 선도와 유한요소해석을 통하여 얻어진 응력-변형률 선도를 비교함으로써 유한요소법에 의한 해석의 타당성과 유용성을 확인하였으며 음향방출기법[6]을 이용하여 지능복합재료의 파손기구 및 손상정도를 평가하고자 하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1. 유한요소해석모델링 및 방법

본 연구에서는 Al6061과  $500\mu\text{m}$ 의 TiNi(Ti-50 at.%)와이어를 사용하여 TiNi/Al6061형상기억합금 시험편을 제조하였다. 그리고 TiNi/Al 6061 형상기억 복합재료의 형상기억효과를 유한요소법을 이용하여 해석[7]하려면, 복잡한 비선형 해석[8]을 수행해야한다. 따라서 해석모델은 해석의 단순화를 위해 하나의 섬유와 기지로 이루어진 원통형의 3차원 축대칭 모델로 가정하여, Fig. 1과 같이 2차원 비선형 해석을 수행하였다. 본 연구에 이용된 해석 프로그램은 ANSYS 5.7을 이용하였으며 요소모양은 2차원 평면 4절점을 이용하여 576개의 요소개수(element) 및 노드갯수는 637개로 정하였다. TiNi/Al 6061 형상기억복합재료의 강도를 유한요소법으로 해석하기 위해서, 섬유와 모재의 계면은 완전히 결합된 상태이며, 섬유자체의 제조공정에 따른 섬유내의 잔류응력은 없으며, 균질등방성재질(homogeneous 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[4].

경계조건은 2차원 축대칭모델에 대하여 부여하였으며 온도가 363K로 안정화된 상태에서 해석을 수행하였다. Fig. 2와 같은 방법으로 유한요소 해석 결과를 바탕으로 진응력-진변형률 선도를 구하여 식 (1)에 의해 공칭응력-공칭변형률 선도로 변환하였다. 유한요소해석결과에서의 변위(displacement)와 반력(reaction force)을 구하여 아래의 식 (2),(3)에 의해 응력과 변형률을 구하였다.

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \epsilon) \quad (1)$$

$\bar{\sigma}$ 는 진응력,  $\sigma$ 는 공칭응력,  $\epsilon$ 는 공칭변형률.

$$\text{Stress} = \frac{\text{reaction force}}{(\pi \times \text{radius}^2)} \quad (2)$$

$$\text{Strain} = \frac{\text{displacement}}{\text{length}} \quad (3)$$

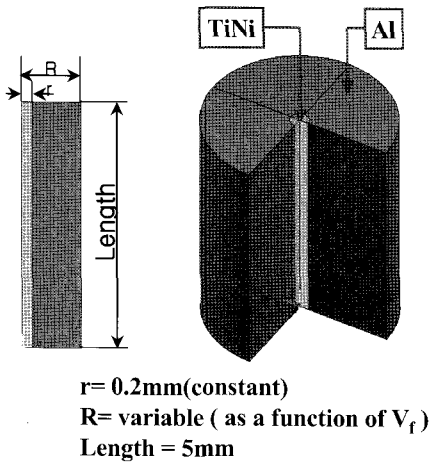


Fig. 1 Geometry model

Table 1 Mechanical properties of TiNi alloy and Al6061

	Al 6061		TiNi	
	293K	363 K	293K	363 K
Elastic Modulus [GPa]	70	70	41	83
Poisson's Ratio	0.33	0.33	0.43	0.43
Coef. Of Thermal Expans. [ $\times 10^{-6} /K$ ]	23.4	23.4	6.6	11
Yield Stress [MPa]	275	260	280	710

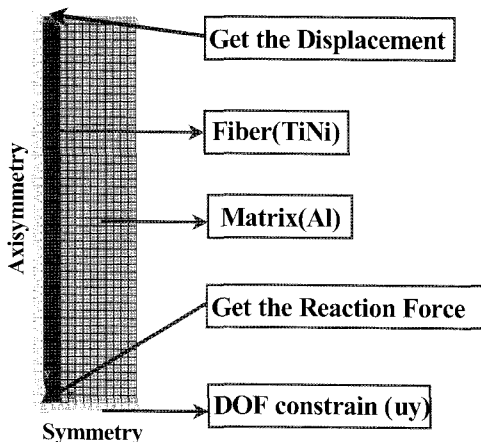


Fig. 2 Finite element model and boundary condition

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 유한요소법에 의한 해석결과

Fig. 3은 Al6061만의 상온 및 363K에서의 응력-변형률 선도로서 실험에 의해 구한 선도와 해석적으로 구한 선도를 비교한 그래프이다. 본 연구에서는 TiNi/Al6061 형상기억합금 시험편에 대한 강도 평가를 위하여 인장시험기를 이용하여 363K에서 1.0mm/min의 변형속도로 인장시험을 행하였다. 그림에서, 실험에 의한 응력-변형률 선도와 해석적으로 구한 응력-변형률 선도가 일치하고 있다. Fig. 4는 TiNi만의 상온과 363K에서의 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 해석적으로 구한 응력-변형률 선도와 실험에 의한 선도가 같은 결과를 나타낸다. 따라서 Fig. 3과 Fig. 4로부터 단일 재료에 대하여 유한요소해석에 대한 신뢰성을 확보하였으므로, Al6061과 TiNi가 복합된 TiNi/Al6061 복합체에 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. 특히 Fig. 3과 Fig. 4의 결과에서 Al인 경우 상온에서 인장강도가 363K보다 약간 높지만 TiNi 형상기억합금인 경우 363K에서 상당히 높게 나타난다. 이것은 TiNi 합금인 경우 363K에서 형상기억효과가 나타나기 때문에 상온보다 인장강도가 높게 나타난다.

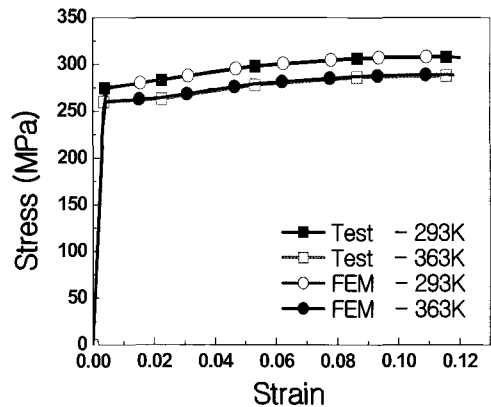


Fig. 3 Comparison of FEM analysis and tensile strength results for Al6061

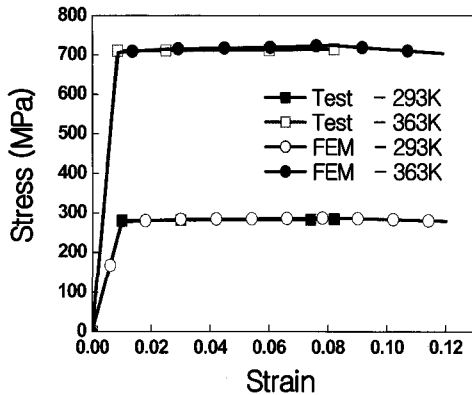


Fig. 4 Comparison of FEM analysis and tensile strength results for TiNi

예비실험을 통하여 유한요소법에 이용되어진 시험편의 조건은 체적함유율이 각각 3.2%, 5.2%, 7%인 TiNi/Al 6061 형상기억복합재료에 대하여 예변형률을 각각 1%, 3%, 5%, 7%부가한 후 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 5는 체적함유율이 3.2%인 복합재료에 대하여 예변형을 1% 주었을 경우 응력-변형률 선도를 나타낸다. 그림에서 항복응력은 유한요소 해석 결과가 시험 결과 보다 높게 평가되었으나 인장강도는 낮게 평가되었다. 시험에 의한 인장강도는 310 MPa이고, 해석에 의한 인장강도는 306.7 MPa이다. Fig. 6은 체적함유율이 3.2%, 예변형이 3%인 경우의 해석결과와 시험결과를 비교한 것이다. 시험에 의한 인장강도는 318 MPa이고, 해석에 의한 인장강도는 317.2 MPa로 평가되었다. 유한요소 해석결과를 시험결과와 비교해 본 결과 항복강도는 다소 높게 평가되고 인장강도는 낮게 평가되었으나 해석결과가 시험결과를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 특히 예변형률이 1%에서 3%로 증가함에 따라 TiNi/Al 6061 형상기억복합재료 내부의 압축잔류응력 증가에 의해 인장강도가 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 7은 유한요소해석에 의해서 각각의 체적함유율 3.2%, 5.2% 7%인 경우에 있어서 예변형률에 따른 인장강도를 나타낸 것이다. 예변형률 5%이하에서는 예변형이 증가함에 따라 모든 경우의 체적함유율에서 TiNi/Al 6061 형상기억복합재료의 최대인장강도가 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으나, 예변형률이 5%이상으로 높아지면 복합재료의 인장강도의 증가 효과는 급격히 감소하는 것을 알

수 있다. 이러한 현상은 복합재료에 너무 많은 예변형을 가하게 되면 형상기억합금 자체의 과도한 소성변형에 의한 형상기억효과의 감소에 의한 것으로 예비실험을 통해서도 5%이상의 예변형을 받은 시험편인 경우 인장강도의 효과는 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 8은 체적함유율에 따른 TiNi/Al 6061 형상기억복합재료의 인장강도를 나타낸 것이다. 체적함유율이 3.2%, 5.2%, 7%인 경우에는 선형적으로 최대인장강도가 증가함을 알 수 있다. 그러나, 예변형률이 5%이상인 경우에는 모든 체적함유율에서 예변형을 5%인 경우와 비교해서 강도증가 효과가 없음을 알 수 있다. 예변형이 7%인 경우에 대하여 해석적으로 구한 강도를 살펴보면, 예변형의 효과는 줄어드는 것으로 나타났다. 이것은 예변형률 5%이상에서는 기지금속과 강화재 모두 소성변형을 나타내는 영역이지만 363K의 온도에서 강화재인 TiNi 섬유는 원래의 상태로 돌아가려고 하는 성질을 가지고 있기 때문에 수축하게 된다. 따라서 재료내부에 압축응력이 발생하여 인장강도값이 증가하게 되는데 너무 과도한 예변형률, 즉 5%이상에서는 TiNi 섬유의 과도한 소성변형에 의해 원래의 상태로 돌아가려는 탄성회복력이 증가하지 않는 것으로 사료된다. 따라서 임의의 체적함유율의 TiNi/Al 6061 형상기억복합재료에 예변형률이 가해질 때, 예변형률이 5% 이하에서는 복합재료의 강도에 영향을 미치지 않으나, 예변형률이 5% 이상에서는 강도증가에 영향을 미치지 않으므로 임의의 체적함유율의 복합재료에 예변형이 주어질때에 임계 예변형률이 5%가 됨을 알 수 있다. 복합법칙 이론에 의한 강도는 해석에 의한 강도보다 낮게 나타났다. 예변형을 부가하지 않은 경우에 대해서는 복합법칙 이론을 이용하여 복합재료의 강도를 평가할 수 있으나, 예변형이 부가된 경우에는 복합법칙 이론을 이용한 복합재료의 강도평가는 불가능함을 알 수 있다. 이러한 결과는 복합법칙에서의 강도는 식 (3)과 같이 단순히 강화재와 기지재의 체적비와 각각의 응력과의 곱으로 쉽게 표현되어진다. 그러나 식 (3)에서는 전혀 예변형의 효과에 대한 항이 없기 때문에 단순히 복합법칙을 이용하여 예변형이 부가된 TiNi/Al 6061 형상기억복합재료의 강도평가는 할 수 없었다.

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

여기서  $\sigma_i$ 와  $\sigma_m$ 은 강화섬유 및 기지 내에서 발생하는 응력이며,  $V_f$ 는 강화섬유의 체적함유량,  $E_f$ 와  $E_m$ 은 강화섬유 및 기지의 종탄성계수이다.

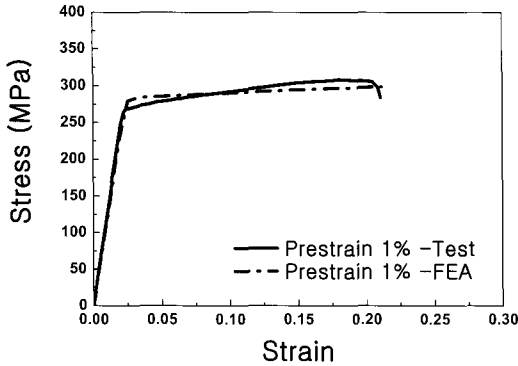


Fig. 5 Tensile strength results from the FEM analysis and the test (pre-strain 1%,  $V_f$  3.2%,  $T=363K$ )

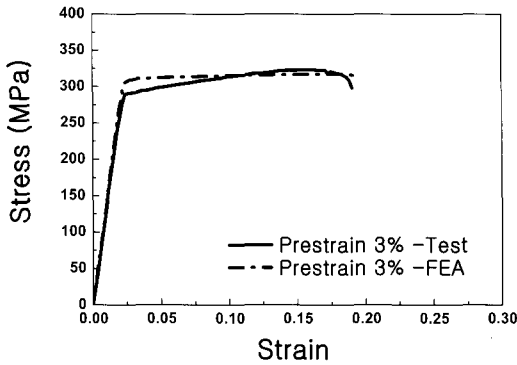


Fig. 6 Tensile strength results from the FEM analysis and the test (pre-strain 3%,  $V_f$  3.2%,  $T=363K$ )

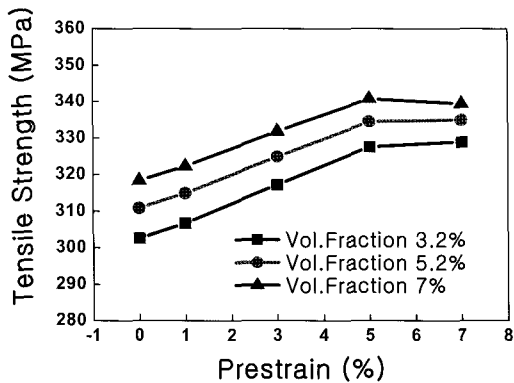


Fig. 7 Relationship between tensile strength and pre-strain for various volume fraction( $T=363K$ )

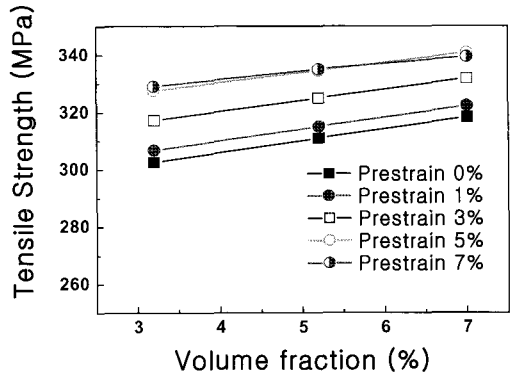


Fig. 8 Relationship between tensile strength and volume fraction for various pre-strain( $T=363K$ )

### 3.2. 복합재료의 미시적 손상에 따른 음향방출특성

본 연구에서는 음향방출기법을 이용하여 TiNi/Al6061 형상기억합금의 고온 인장실험의 동적 거동을 모니터링하기 위해 인장시험기(SHIMADZU)에 노를 장착하여 시험편의 온도를 363K에서 30분간 유지한 후 1.0mm/min의 변형속도로 인장시험을 행하였다. 시험편내의 미시적 손상거동 및 시험편내에 균열이 발생함에 따라 탄성파가 발생하게 되며 발생된 탄성파는 음향방출센서에 의해 감지된후 프리앰프(Preamp)에서 40dB 증폭된다. 증폭된 신호는 시험장치(MISTRAS 2001)에서 음향방출 파라미터를 분석하여 컴퓨터에 저장된다. 그리고 사용된 센서는 광대역(wide band) 센서를 부착하였으며 주위의 기계적, 전기적 잡음(noise)을 제거하기 위하여 문턱전압값(threshold level)은 45dB로 정하였다.

Fig. 9는 TiNi/Al6061 형상기억합금복합재료의 미시적 손상거동에 따른 AE 신호 특성을 평가하기 위하여 예변형률이 3%인 시험편에서 발생하는 AE 신호의 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 9(a)에서 보여주는 바와 같이 AE신호의 발생경향에 따라 크게 4영역으로 나눌수 있음을 알 수 있다. 먼저 하중초기 AE 신호가 전혀 발생하지 않는 I영역, 하중이 증가함에 따라 AE 신호가 초당 5개이상 발생하는 II영역, 그리고 최종파단의 약 70%지점부터 AE 발생비율이 급격히 감소하는 III영역, 마지막으로 AE 신호가 급격히 증가하는 IV영역으로 구분할 수 있다.

먼저 I영역에서 AE 신호가 전혀 발생하지 않는 것은 시험편 제조시 미리 3%의 예변형률을 가하였

기 때문에 다시 하중을 가하였을 때 AE 신호는 거의 발생하지 않는다. 그러나 하중이 점차적으로 증가하여 II영역에 도달하게 되면 기지재인 Al과 강화재인 TiNi 합금과의 계면분리 및 층간분리 현상이 발생함에 따라 다수의 AE 신호가 발생하게 된다. 그리고 최종 파단의 약 70% 지점인 III영역에서는 복합재료의 급격한 계면분리 현상은 감소하고 기지재인 Al의 소성변형 및 pull out 현상에 의해 소수의 AE 신호가 발생하고 있다. 이러한 결과는 II영역에서 TiNi/Al6061 복합재료가 하중을 받을 때 먼저 응력이 집중되어 있는 강화재와 기지재 사이의 계면에서 계면분리현상이 발생한 후 하중이 점차적으로 증가함에 따라 강화재인 TiNi 합금과 기지재인 Al이 직접적으로 하중을 받아 결과적으로 최종파단 시점의 약 70%지점인 III 영역에서 AE 사상수가 급격히 감소함을 보여주고 있다. 실질적으로 예비실험을 통해 45dB의 문턱전압값에서 순수한 Al 및 순수한 TiNi 합금의 인장시험시 소성변형이 발생하더라도 AE 신호는 소수 발생하고 있음을 알 수 있었다. 이것은 주위의 노이즈를 제거하기 위하여 문턱전압값이 상대적으로 높은 값으로 형성되었기 때문이다.

마지막으로 IV영역에 도달하게 되면 강화재인 TiNi의 파단과 기지재료의 급격한 균열전파로 인해 다수의 AE 신호가 발생하였다.

한편 발생한 AE 신호의 에너지 분포는 50이하의 에너지부터 600-700까지의 높은 에너지를 나타내었다. Fig. 9(b)에서 보여주는 바와 같이 기지재와 강화재의 계면분리 현상이 급격한 II영역에서의 AE 신호의 파형분석 결과 전형적인 계면분리신호인 돌발형 형태의 신호형태로써 AE 신호의 에너지는 계면분리의 형태 및 크기에 따라 600까지 다양하게 분포하고 있지만 최종파단시점의 약 70%지점인 III영역에서 Al의 소성변형에 의한 연속형 형태의 신호로써 Al 기지재의 소성변형 및 pull out 현상 등에 의한 AE 신호의 에너지는 50이하의 아주 낮은 값을 나타내었다. 그리고 마지막으로 TiNi 형상기억합금의 파단 및 거시적 균열전파에 의한 IV영역에서의 AE 신호는 700이상의 에너지 분포를 나타내는 신호가 발생하였다. 따라서 이와같은 사상수 및 에너지와 같은 AE 신호의 파라미터를 분석하여 AE신호의 특성을 평가함으로써 TiNi/Al 6061 형상기억복합재료의 미시적 손상거동을 예측, 평가할 수 있었다.

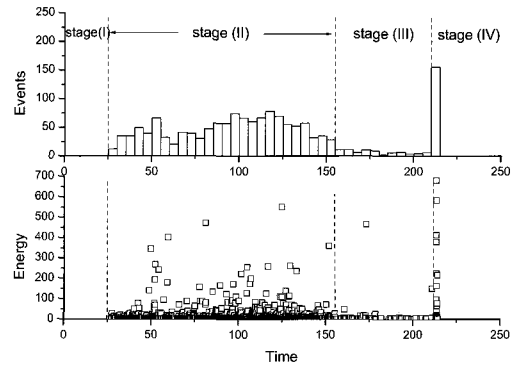


Fig. 9 AE events and energy vs. time at 3% pre-strain composite (T=363K)

Fig. 10은 예변형률에 따른 AE 신호의 사상수의 변화를 나타낸 것으로 예변형을 전혀 받지 않은 0%인 경우 하중 초기 재료내부의 응력집중 및 계면손상에 의해 다수의 AE 사상수가 발생하며 최종 파단의 약 70%에 도달해서는 AE 사상수가 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 3.1절에서 언급하였듯이 최종파단의 약 70%지점에서는 강화재인 TiNi 합금과 기지재 사이의 계면분리 현상이 급격히 감소하고 가해지는 하중은 직접적으로 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 급격한 소성변형에 사용되어진다. 그리고 복합재료가 파단될 때에는 거시적 균열의 발생 및 진전, TiNi 강화재의 파단 등으로 인해 다수의 AE 사상수가 발생한다.

한편 예변형을 받은 시험편에서의 AE 사상수 발생 경향은 세 경우 모두 비슷하게 발생하고 있지만 가장 많은 5% 예변형을 받은 시험편의 AE 사상수가 가장 적게 발생하였다. 이러한 결과는 최종파단 시점의 40%지점까지는 복합재료 내부의 압축잔류 응력의 증가와 외부의 인장응력의 상쇄에 의해 AE 사상수는 거의 발생하지 않지만 최종 파단의 약 40% 지점이후부터 복합재료 내부에도 인장 응력이 발생하여 기지재와 강화재의 계면손상 등에 의해 AE 신호가 발생하고 있음을 알 수 있다. 특히 1% 예변형의 시험편과 3%의 예변형 시험편에 발생한 전체적인 AE 신호는 거의 비슷하지만 3% 예변형 시험편에서 AE 신호 발생초기에 1% 예변형률보다 다소 많은 신호가 발생하고 있다. 이러한 결과는 시험편이 복합재료이기 때문에 기지재와 강화재와의 결합상태에 의한 펄리티 효과[9] 및 시험조건 등에 의해 1% 예변형률 시험편에 비하여 하중초기

다소 많은 AE 신호가 발생한 것으로 사료되어 두 조건에 대해서는 심도있는 연구가 진행되어야 한다. 한편, Fig. 10의 AE 사상수의 분석결과로부터 하중이 증가함에 따라 AE 사상수가 급격히 감소하는 영역이 발생하면 TiNi/Al6061 복합재료의 최종과단 시점의 약 70%까지 진행되었음을 예측할 수 있다.

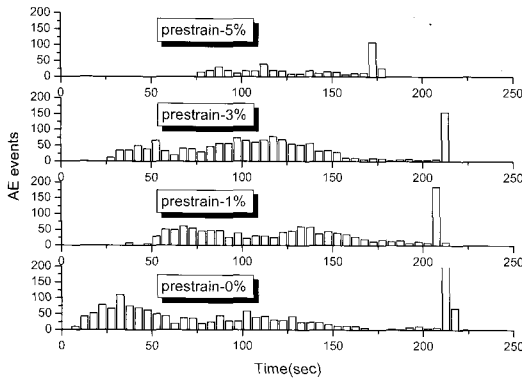


Fig. 10 AE events following the pre-strain variation

#### 4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석법과 음향방출기법을 이용하여 TiNi/Al6061 지능복합재료의 기계적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유한요소 해석과 시험을 비교해 본 결과 항복강도는 다소 높게 평가되고 인장강도는 다소 낮게 평가되었으나 여타의 거동결과는 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.
2. 형상기억합금이 보강된 지능복합재료의 설계 및 제작시 예변형률과 체적함유율에 대한 강도변화를 유한요소해석을 통해서 미리 예측함으로써, 보다 성능이 우수한 지능복합재료의 제작을 위한 가능성을 확인하였다. 본연구에서는 5%의 예변형률과 7%의 체적함유율에서 가장 성능이 우수한 지능복합재료를 제조할 수 있었다.
3. 예변형률의 증가에 따라 강도가 증가하였으며 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 AE 신호의 특성을 평가한 결과 AE 신호의 발생경향 및 에너지 레벨의 분포는 비슷하지만 AE 신호의 발생시점 및 사상수에 있어서는 1%, 3% 예변형률에서는 비슷한 경향을 보이지만 전체적으로 예변형률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

#### 참고문헌

- [1] H. Ehrenstein, "Production and Shape Memory Effect of Nickel-Titanium," Proceedings of the International Conference on Martensitic Transformations, pp. 1083-1086, (1986)
- [2] H. Yuanti, Y. Gueping, and H. Ping, "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] 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)
- [4] 박영철, 윤두표, 이규창, Y. Furuya, "TiNi/Al 형상기억복합재료의 기계적특성 및 강화기구", *대한기계학회논문집(A)*, 제21권 제3호, pp. 405-413, (1997)
- [5] T. Yano, K. Budiyo, K. Yoshida, T. Iseki, "Fabrication of Silicon Carbide Fiber-Reinforced Silicon Carbide Composite by Hot-Pressing," *Fusion Engineering & Design*, Vol. 41, pp. 157-163, (1998)
- [6] S. T. S. Bukkapatnam, S. R. T. Kumara and A. Lakhtakia, "Analysis of Acoustic Emission Signals Machining," *J. of Manufacturing Science & Engineering*, Vol. 121, No. 4, pp. 568-576, (1999)
- [7] 박영철, 박동성, 이준희, 이규창, "핫프레스법에 의한 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 제조 및 기계적 특성에 관한 연구", *대한기계학회논문집 A권*, 제26권 제7호, pp. 1223-1231, (2002)
- [8] 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)
- [9] R. K. Miller, P. McIntire, *Nondestructive Testing Handbook*, Vol. 5, (1987)