

## TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 미시적 손상거동과 손상위치측정에 관한 연구

이진경<sup>†</sup> · 박영철\* · 구후택\*\* · 이규창\*\*\*  
(2001년 9월 24일 접수, 2002년 7월 8일 심사완료)

### A Study on the Microscopic Damage Behavior and the Damage Position Evaluation of TiNi/Al6061 Shape Memory Alloy Composite

Jin-Kyung Lee, Young-Chul Park, Hoo-Taek Ku and Kyu-Chang Lee

**Key Words:** Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Shape Memory Effect(형상기억효과),  
Pre-Strain(예변형률), AE Technique(AE기법), Source Location(위치추정)

#### Abstract

TiNi alloy fiber was used to solve the problem of the tensile residual stress as the reinforced material. TiNi alloy fiber improves the tensile strength of composite by occurring compressive residual stress in the matrix using shape memory effect. In order to generate compressive residual stress in TiNi/Al6061 shape memory alloy(SMA) composite, 1, 3 and 5% pre-strains were applied to the composite in advance. It was also evaluated the effect of compressive residual stress corresponding to the pre-strain variation and the volume fraction of TiNi alloy. AE technique was used to clarify the microscopic damage behavior at high temperature and the effect of pre-strain in TiNi/Al6061 SMA composite. The results of the microscopic damage evaluation of TiNi/Al6061 SMA composite under various pre-strain using AE technique can be divided into three stage corresponding to the AE signals. AE counts and events were useful parameters to evaluate the fracture mechanism according to the variation of pre-strain. In addition, two dimensional AE source location technique was applied for monitoring the crack initiation and propagation in composite.

#### 1. 서론

일반적으로 금속복합재료(Metal Matrix Composite, MMC)<sup>(1~3)</sup>는 강화재와 기지재 사이의 열팽창 계수의 차이에 의해 기지재 내에 발생하는 잔류응력의 문제로 인해 복합재료 전체의 강도가 저하되고 있다. 따라서 최근에는 복합재료의 강화재로써 형상기억합금(shape memory alloy, SMA)<sup>(4~7)</sup>

을 사용한 지능형 복합재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 형상기억합금은 큰 변형을 가하여도 일정한 온도로 가열하면 원래의 형상으로 돌아가는 현상을 가진 합금이므로 이러한 특성을 잘 이용하면 복합재료내의 잔류응력의 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 고강도 복합재료개발을 위한 강화재로써 매우 유익한 재료라고 할 수 있다. 한편, TiNi 형상기억합금은 마르텐사이트 변태의 주된 특성을 가지고 있으며, 이러한 특성으로 인해 형상 회복성의 우수한 기능을 가진 재료이다. TiNi 형상기억합금을 강화재로 사용한 복합재료는 기존의 금속복합재료에 있어서 가장 큰 문제점으로 지적되었던 잔류응력에 의한 강도저하의 문제를 TiNi 형상기억합금의 형상기억효과를 이용하여 압축잔류응력을 유발시킴으로써 해결할 수 있다는 이점이 있다.

---

† 책임저자, 회원, 동의대학교 기계공학과  
E-mail : leejink@dongeui.ac.kr  
TEL : (051)890-1663 FAX : (051)890-2232  
\* 회원, 동아대학교 기계공학과  
\*\* 동아대학교 대학원  
\*\*\* 산업과학연구원 신뢰성 평가센터

---

TiNi/Al6061 형상기억복합재료는 오스테나이트 상인 TiNi와이어를 Al기지내에 강화시킨 후 제조한 복합재료에 형상기억 시효 열처리를 행하고 급냉시키면 강화재인 TiNi는 마르텐사이트 상이 된다. 강화재가 마르텐사이트 상인 TiNi/Al6061 복합재료에 인장 예변형(pre-strain)을 가하고 TiNi의 오스테나이트 변태 완료 온도인  $A_r$ 점 이상(363K)으로 가열을 하면 TiNi의 형상기억효과에 의하여 TiNi와이어는 원래의 길이로 수축되려 한다. 이러한 TiNi와이어의 수축력은 Al기지 내에 압축 잔류응력을 발생시켜 복합재료의 인장강도가 향상된다.

본 연구에서는 TiNi/Al6061 형상기억복합재료를 제조하여 복합재료 내부에 잔류응력의 변화를 평가하기 위하여 예변형(pre-strain)을 1, 3%로 가하여 고온에서의 복합재료의 강도를 측정하였으며 또한 TiNi 합금의 체적률에 따른 복합재료의 강도 변화를 평가하였다. 특히 고온에서의 TiNi/Al6061 형상기억합금 복합재료의 파손기구(failure mechanism) 및 예변형률에 따른 손상거동을 비파괴 평가 기술로 모니터링하기 위하여 재료가 하중을 받아 소성변형을 일으키거나 균열이 발생, 성장할 때 발생하는 탄성파를 이용하여 균열 발생, 성장과 같은 동적인 과정(Dynamic Process)을 연속적으로 온라인 모니터링 하는데 아주 유용한 음향방출(Acoustic Emission, AE) 기법<sup>(8~10)</sup>을 이용하여 규명하였다. 더불어 2차원 AE 위치추정(source location)기법<sup>(11,12)</sup>을 이용하여 복합재료가 하중을 받아 재료 내부에 미소균열의 발생 및 성장과정을 평가하였다.

## 2. 재료 및 시험편

### 2.1 재료

본 연구에서는 Al6061과 500 $\mu$  m의 TiNi(Ti-50 at.%)와이어를 사용하여 TiNi/Al6061 형상기억합금 시험편을 제조하였다. 먼저 최고 1000 $^{\circ}$ C까지 온도 유지가 가능한 250톤 용량의 고온 프레스(hot press)<sup>(13)</sup>를 제작하여 시험편을 제조하였다. Fig. 1에서는 시험편 제조과정을 나타낸 것으로 기지재인 Al6061 사이에 TiNi 와이어를 일정한 간격으로 고정시킨 후 고온 프레스의 온도조건을 833K, 60MPa의 압력으로 고정하고 30분 동안 가압하였

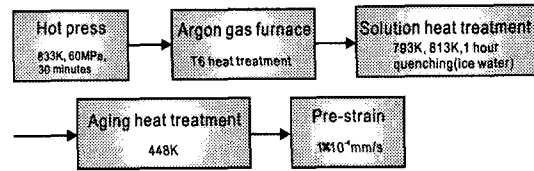


Fig. 1 Specimen manufacturing process

다. 또한 Al6061 표면은 공기중에서 쉽게 산화되므로 아르곤 분위기에서 시험편을 제조하였으며 기지재인 Al6061의 강도를 증가시키기 위해 T6열처리를 실시하였다.

TiNi/Al6061 형상기억복합재료에 대하여는 793K와 813K에서 1시간동안 용체화처리 후 냉각수에 담급질을 실시하였으며, 시험편의 기계적 특성을 증가시키기 위하여 공기 중에서 448K로 시효처리를 실시하였다. 마지막 단계로, 상온에서 시험편에  $1 \times 10^{-4}$  mm/s로 예변형을 가하였다. 이러한 방법에 의해 제작된 시험편에 예변형을 가하여 363K에서 인장시험을 실시하였다.

### 2.2 AE 발생원 위치추정방법

비파괴 시험에서 재료내부의 결함위치를 측정하기 위하여 초음파(ultrasonic wave)를 사용하는 경우가 많이 있지만 이러한 방법은 재료의 국소적인 부분만 탐지할 수 있다. 그러나 AE 시험에서는 AE 발생원 위치를 측정하기 위하여 단지 몇 개의 센서를 이용하여 재료의 전 영역을 정확하게 측정할 수 있다. AE 발생원 위치추정 기법은 각 시험체 재료의 속도를 알고 AE 발생원에서 발생한 신호가 각각의 센서에 도달하는 시간차를 이용하여 발생원의 위치를 정확하게 측정하는 방법이다. 이러한 방법은 재료의 속도를 정확하게 측정하는 것이 대단히 중요하므로 본 연구에서는 시험체에 두개의 센서를 부착하고 시험체 반대편에서 연필심을 부러뜨려 각각의 센서에 도달하는 신호의 시간차를 디지털 오실로스코프를 이용하여 구하였으며 두 센서간의 거리를 측정하여 형상기억복합재료의 속도를 측정하였다. 일반적으로 센서의 위치선정에 따라 1차원적인 선형적(linear) 방법 및 2차원적인 삼각법(triangle), 사각법(rectangle) 등의 여러 가지 방법들이 제안되고 있지만 본 연구에서는 시험체의 규격을 고려한 예비 실험을 통해 2차원적인 삼각법 방법이

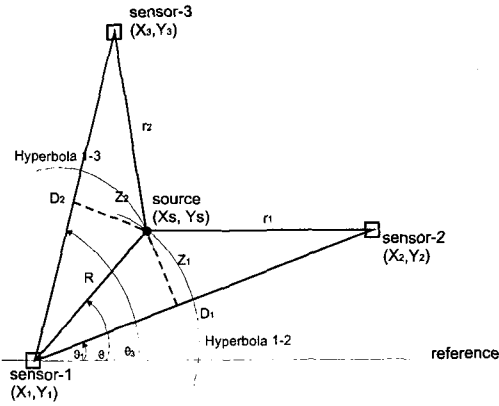


Fig. 2 AE source location in two dimension

가장 적합한 것으로 나타났다. 삼각법 방법은 Fig. 2와 같이 센서1, 센서2, 센서3를 시험체에 부착하고 발생원에서 센서1과 센서2에 수신되는 신호의 시간차( $\Delta t_1$ ), 또는 발생원에서 센서1과 센서3에 수신되는 신호의 시간차( $\Delta t_2$ )와 재료의 속도( $V$ )와의 곱은 식 (1), (2)와 같이 항상 일정한 값을 가지기 때문에 이를 이용하면 그림과 같은 각각의 센서 방향에 대한 쌍곡선을 얻을 수 있다. 그리고 각 센서에서 AE 발생원까지의 거리는 다음 식 (3), (4)에 의해 구할 수 있으며 이렇게 구한 세 쌍곡선의 교점을 구하면 그 교점의 위치가 AE 발생원의 위치가 되는 것이 삼각법 방법이다.

$$\Delta t_1 V = \vec{r}_1 - \vec{R} \quad (1)$$

$$\Delta t_2 V = \vec{r}_2 - \vec{R} \quad (2)$$

$$\vec{R} = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 V^2}{\Delta t_1 V + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \quad (3)$$

$$\vec{R} = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - \Delta t_2^2 V^2}{\Delta t_2 V + D_2 \cos(\theta_3 - \theta)} \quad (4)$$

여기서,

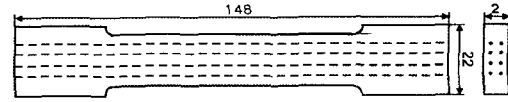
$\vec{r}_1, \vec{r}_2$  = AE 발생원에서 센서1, 센서2 사이 위치벡터.

$\vec{R}$  = AE 발생원에서 센서1 사이 위치벡터.

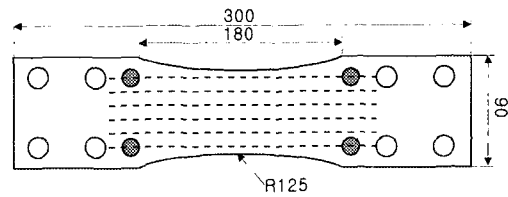
$D_1, D_2$  = 센서1에서 센서2, 센서3 사이 위치벡터

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$  = 기준점에서 센서2, 발생원, 센서3 사이의 각도.

Fig. 3(a)는 Fig. 1의 제작과정을 통하여 제작한



(a) Tensile specimen



(b) Specimen for source location

Fig. 3 Dimensions of specimen (unit:mm)

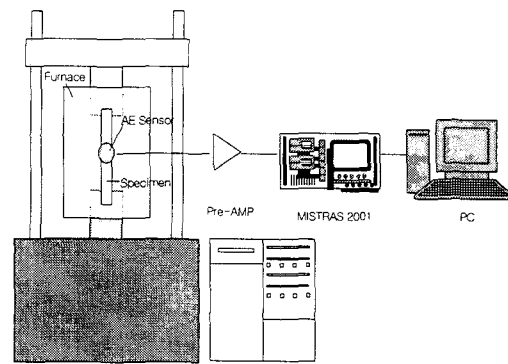


Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up

TiNi/Al6061형상기억합금 복합재료의 인장시험편의 규격을 나타낸 것으로 TiNi 와이어를 적층으로 제조하였으며 TiNi 파이프의 체적률은 7%이다. 또한 Fig. 3(b)는 2차원 AE 위치추정을 위하여 300×90×2(mm)으로 시험편을 제작하여 시험편 양쪽에 R=125mm의 노치를 도입한 시험편의 형상을 나타낸 것이다.

### 2.3 실험방법

본 연구에서는 AE 기법을 이용하여 TiNi/Al6061형상기억합금의 고온 인장실험의 동적거동을 모니터링하기 위해 Fig. 3에 보여주는 바와 같이 TiNi/Al6061형상기억합금 시험편에 대하여 인장시험기(SHIMADZU)에 노를 장착하여 시험편의 온도를 363K에서 30분간 유지한 후 1.0mm/min의

변형속도로 인장시험을 행하였다.

시험편에 하중이 가해지게 되면 시험편내의 미시적 손상거동 및 시험편 내에 균열이 발생함에 따라 탄성파가 발생하게 되며 발생된 탄성파는 AE 센서에 의해 감지된후 프리앰프(Preamp)에서 40dB 증폭된다. 증폭된 신호는 AE 본체(MISTRAS 2001)에서 AE 파라미터를 분석하여 컴퓨터에 저장된다. 그리고 고온의 노내 시험편에 광대역(wide band) AE 센서를 부착하여 고온에서의 TiNi/Al6061 형상기억합금의 동적거동을 모니터링하였으며 주위의 기계적, 전기적 잡음(noise)을 제거하기 위하여 문턱전압값(threshold level)은 45dB로 정하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 응력-변형을 곡선

본 연구에서는 고온에서 TiNi/Al6061 형상기억합금 복합재료의 강화재인 TiNi 합금과 Al기 기재의 압축잔류응력의 영향을 평가하기 위하여 예변형률을 각각 달리하여 실험을 실시하였다.

Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 예변형을 전혀 받지 않은 시험편에서의 강도가 가장 낮게 나타났으며 예변형을 1, 3%로 증가함에 따라 인장강도가 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 각 시험편에서의 Young's modulus(E)는 예변형률의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다.

이와 같이 예변형률이 증가함에 따라 인장강도값이 증가하는 것은 앞에서 언급하였듯이 TiNi형상기억합금의 열탄성 특성에 의하여 363K에서는 마르텐사이트상에서 오오스테나이트상으로 역변태가 일어나므로 변형이 없는 원래의 상태로 수축되지만 기지급속인 알루미늄은 363K에서도 예변형이 그대로 소성변형으로 잔류하게 되므로 TiNi와 Al 사이의 열팽창의 차이에 의해 복합재료내에서 압축잔류응력이 발생하게 된다.

따라서 예변형률을 증가시킬수록 TiNi/Al6061형상기억합금 복합재료내에는 압축잔류응력이 증가하여 인장강도 역시 증가되어짐을 알 수 있다.

Fig. 6에서는 TiNi/Al6061 형상기억복합재료내에 TiNi 합금의 체적률에 따른 강도의 변화를 나타낸 것으로 1%의 예변형을 받은 시험편 중 TiNi 합금의 체적률이 3%, 5%, 7%로 증가함에 따른 강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보

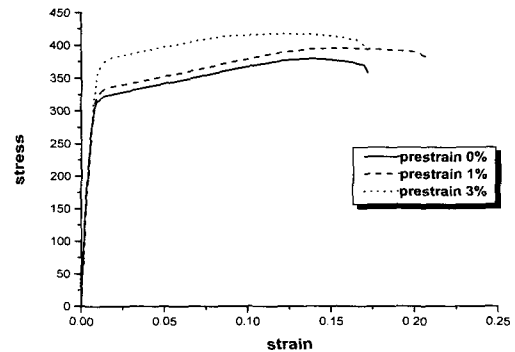


Fig. 5 Stress and strain curve corresponding to pre-strain variation

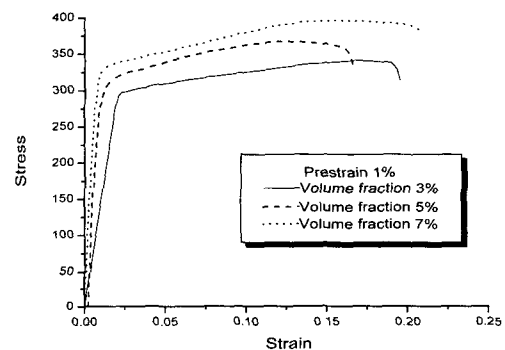


Fig. 6 Stress and strain curve corresponding to volume fraction of TiNi alloy

여 주는 바와 같이 TiNi 합금의 체적률이 3%에서 7%까지 점차적으로 증가함에 따라 인장강도값도 점차적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 결과는 고온에서 TiNi 합금의 강도가 기지재인 Al보다는 현저히 높기 때문에 TiNi 합금의 체적률이 증가할수록 복합재료의 인장강도가 증가하는 결과를 가져온다. 또한 Young's modulus는 앞의 Fig. 5에서 예변형률의 변화에 따라서는 거의 변화가 없었지만 TiNi 합금의 체적률이 증가함에 따라서는 Young's modulus 값도 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

#### 3.2 TiNi/Al6061 복합재료의 미시적 손상거동에 따른 AE 신호특성

본 연구에서는 TiNi 합금이 7%의 체적률을 차지하는 TiNi/Al6061 복합재료를 제작하여 고온에서 인장하중을 받았을 때 AE 기법을 이용하여

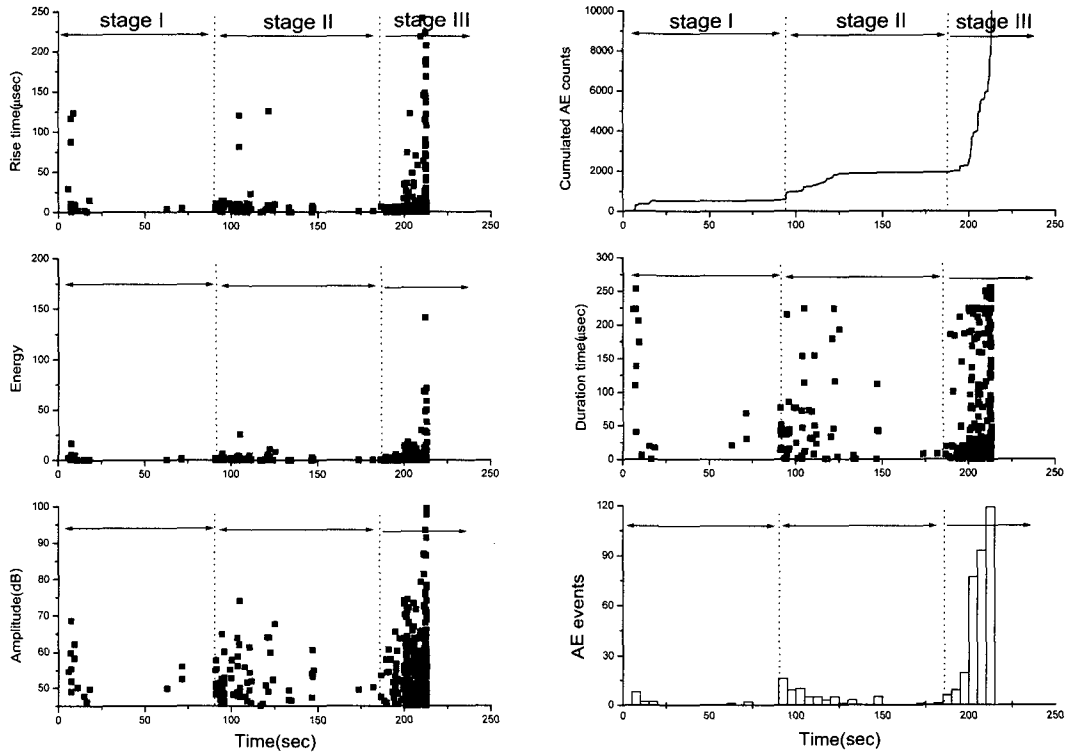


Fig. 7 AE parameters vs. time (pre-strain:1%)

복합재료의 미시적 손상거동을 평가하고자 하였다.

Fig. 7은 TiNi 합금의 체적률이 7%인 TiNi/Al 6061 복합재료가 예변형을 1% 받을때의 인장하중이 가하여 졌을 때 발생하는 AE 신호의 여러 인자들을 나타낸 것이다.

그림에서 보여주는 바와 같이 AE 신호의 카운터와 사상수의 발생경향에 따라 크게 3영역으로 나눌 수 있다. 먼저 하중초기에 AE 카운터와 사상수가 발생하여 하중이 증가하더라도 더 이상 카운터와 사상수가 거의 변하지 않는 I영역, 하중이 증가함에 따라 AE 카운터가 다시 단계적으로 증가하며 사상수 또한 다수 발생하는 II영역, 그리고 최대 파괴시점의 약 90% 지점부터 AE 카운터와 사상수가 급격히 발생하는 III영역으로 구분 지을 수 있다.

먼저 하중초기, 즉 I영역에서는 하중이 가해짐에 따라 재료 내부의 국부적인 응력집중에 의해 AE 신호가 다수 발생하게 된다. 이때 발생하는 AE 신호는 그림에서 보여주는 바와 같이 상승시

간이  $50\mu\text{s}$  이상의 신호, 진폭은 60dB 이상, 지속시간 역시  $100\mu\text{s}$  이상의 신호가 발생하게 된다. 그러나 하중이 점차적으로 증가함에 따라 극소수의 AE 신호가 재료 내부의 TiNi 합금과 기지재인 Al 사이의 계면분리에 의해 발생하게 되며, 하중이 가하여져 II영역에 도달하게 되면 급격하게 계면분리 현상이 진행되어 다수의 AE 신호가 발생하게 된다.

이때 발생하는 AE 신호는 TiNi 합금과 Al 사이의 계면분리의 크기와 방향 등의 여러 인자에 의해 AE 파라미터의 여러 인자들도 광범위하게 분포하고 있음을 보여준다. 먼저 상승시간은 대부분  $25\mu\text{s}$  이하지만  $100\mu\text{s}$ 의 신호도 발생하며 에너지는 25이하의 신호가 다수 발생하고 진폭 또한 70dB이하의 신호가 대부분이다. 그리고 지속시간은  $100\mu\text{s}$  이상부터  $230\mu\text{s}$ 까지의 신호도 다수 발생하였다. 그러나 이 영역에서 하중이 점차적으로 가해지면 이러한 급격한 계면분리 현상은 감소하여 AE 신호는 거의 발생하지 않는다. 그리고 파괴시점의 90%지점, 즉 III영역에 도달하게

되면 복합재료의 급격한 소성변형과 더불어 복합재료 내부의 거시적 균열의 진전 및 TiNi 합금의 파단에 의해 AE 신호가 현저히 증가하게 된다.

III영역에서 발생하는 AE 신호의 AE인자들 증상시간은 복합재료의 거시적 균열이 발생함에 따라 150 $\mu$ s 이상의 신호가 발생하며 TiNi 합금의 파단에 의해서는 250 $\mu$ s까지의 신호가 발생한다. 그리고 에너지, 진폭 및 지속시간 또한 다른 영역에 비하여 현저히 높은 신호가 발생하고 특히 TiNi 합금이 파단될 때에는 두드러지게 높은 신호가 발생하게 된다.

### 3.3 예변형률의 변화에 따른 AE 신호특성

본 연구에서는 앞에서 언급한 바와같이 TiNi 합금의 체적률이 7%인 TiNi/Al 6061 복합재료에 대하여 재료내부에 압축잔류응력의 영향을 평가하기 위하여 예변형률을 변화시킨 결과 각각의 시험편에 대하여 인장하중을 가하여 발생한 AE 신호의 특성을 평가하고자 하였다.

Fig. 8에서는 예변형을 가하지 않은 0%의 예변형을 시험편과 1, 3%로 예변형을 증가시킨 시험편에서 발생한 AE 신호의 AE 카운터의 결과를 나타낸 것으로 예변형을 전혀 받지 않은 시험편인 경우 하중초기에 하중이 가해지더라도 AE 신호는 전혀 발생하지 않고 하중이 점차적으로 증가함에 따라 재료내부의 강화재와 기지재 사이의 계면분리 현상에 의해 소수의 AE 카운터가 발생하여 점차적으로 증가하며 계면분리 현상이 현저해짐에 따라 AE 카운터도 급속히 증가하게 된다. 그리고 TiNi/Al6061 형상기억합금 복합재료가 급격히 소성변형이 발생함에 따라 AE 카운터의 증가는 완만해지며 파단직전 거시적 균열의 발생과 TiNi 합금의 파단에 의해 다시 급속히 증가하는 양상을 나타내었다.

반면 1%의 예변형을 받은 시험편에서는 하중 초기 AE 카운터가 발생하여 하중이 가해짐에 따라 점차적으로 증가하며 계면분리 현상이 급격히 발생하게 되면 AE 카운터는 단계적으로 증가하는 양상을 나타내고 파단직전에 다시 급격히 증가하는 경향을 보인다. 그리고 3%의 예변형을 받은 시험편에서는 1%의 예변형을 받은 시험편과 마찬가지로 하중 초기에 AE 카운터가 발생하고 하중이 증가함에 따라 단계적으로 증가하는 양상을 나타낸다. 그러나 총 발생하는 AE 카운터

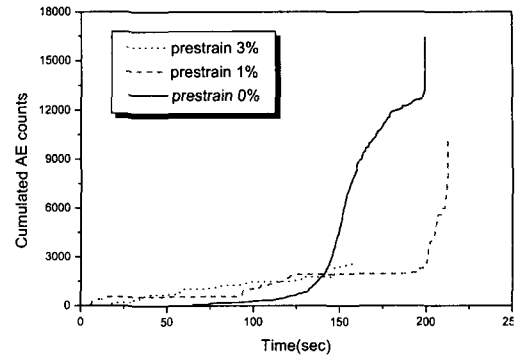


Fig. 8 Cumulated AE counts vs. time

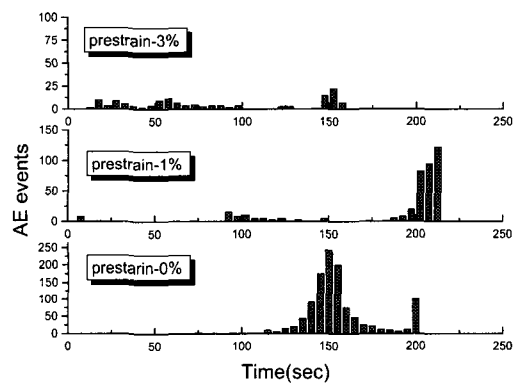


Fig. 9 AE events vs. time

의 수는 예변형을 증가시키기에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 9는 예변형률에 따른 AE 신호의 사상수와 관계를 나타낸 것으로 예변형률 0%인 시험편인 경우 하중 초기 AE 신호는 발생하지 않지만 하중이 증가함에 따라 계면분리에 의해 다수의 AE 신호가 발생하고 복합재료의 급격한 소성변형이 발생함에 따라서는 점차적으로 AE 신호가 감소하며 최종파단 시점에서 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 한편 1%, 3%의 예변형을 받은 시험편에서 하중 초기 AE 신호가 발생하며 하중이 증가함에 따라 소수의 AE 신호가 발생하고 시험편에 소성변형이 급속히 발생함에 따라 AE 신호는 거의 발생하지 않지만 재료 내부의 거시적 균열의 발생 및 진전 그리고 TiNi 강화재의 파단시에는 다수의 AE 신호가 발생하게 된다. Fig. 9에

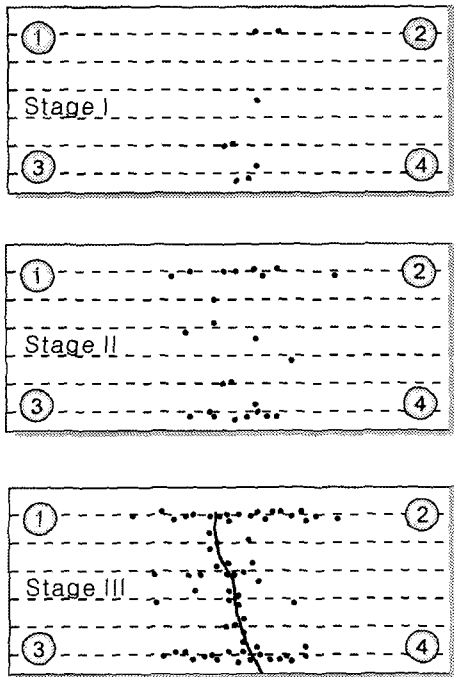


Fig. 10 The result of AE source location

서 보여주는 바와 같이 AE 신호의 발생경향은 예변형을 전혀 받지 않는 시험편과 예변형을 받은 시험편에서 차이가 나타남을 알 수 있다.

### 3.4 2차원 AE 위치추정

본 연구에서는 TiNi/Al6061형상기억합금 복합재료 내에 미소 균열이 발생, 성장하는 위치를 측정하기 위하여 4개의 AE 센서를 시험편의 한 쪽에 부착하여 2차원 AE 위치추정을 실시하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 2차원 AE 위치추정을 위하여 300×90×2(mm)으로 시험편을 제작하여 시험편 양쪽에 노치를 도입하였다. 그리고 각 센서간의 거리는 190×50(mm)로 정하였다. 한편 Fig. 10에서는 실험결과를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 하중초기인 stage I 영역에서는 복합재료 내부의 국부적인 응력집중에 의해 중앙의 노치부분 근처의 강화재와 기지재의 계면에서 AE 신호가 극소수 발생하고 있으며 하중이 점차적으로 증가하여 stage II에 도달하게 되면 강화재인 TiNi 합금과 Al 기지재 사이의 계면에서 계면분리현상이 발생하며 이에 따라 계면분리가 발생하는 지점 및 중앙 양쪽에서 AE 신

호가 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 최종 파단시점인 stage III에 도달하게 되면 시험편에 거시적 균열이 발생함과 동시에 균열을 따라 다수의 AE 신호가 발생하고 시험편 전체적으로 기지재와 계면사이에서 급속히 AE 신호가 발생하게 된다. 따라서 AE 신호가 발생하는 위치를 평가함으로써 복합재료 내부의 미시적 손상거동 및 손상정도를 평가할 수 있으며 균열이 발생, 성장하는 시점 및 위치를 정확하게 측정할 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 AE기법을 이용하여 TiNi 합금의 체적률과 예변형에 따른 TiNi/Al6061 복합재료의 미시적 손상을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 7%의 TiNi 체적률을 가지는 TiNi/Al6061형상기억합금 복합재료에서 예변형률이 증가함에 따라 인장강도의 값은 증가하였으며 TiNi 체적률이 증가함에 따라 인장강도 및 Young's Modulus가 증가하였다.

(2) AE 기법을 이용하여 TiNi/Al6061형상기억합금 복합재료의 미시적 손상을 평가한 결과 AE 신호의 사상수 및 발생경향에 따라 크게 3 영역으로 나눌 수 있었으며 각 영역에서 발생하는 AE 신호의 파라미터를 이용하여 복합재료의 손상정도를 평가할 수 있었다.

(3) 예변형에 따른 AE신호 특성은 예변형을 받지 않은 시험편 및 1, 3%의 예변형을 받은 시험편에서의 AE 카운터 및 사상수의 발생경향을 평가함으로써 AE 신호에 의해 예변형률의 유무 및 정도를 평가할 수 있었다.

(4) 2차원 AE 위치추정결과 하중이 증가함에 따라 기지재와 강화재의 계면손상에 의해 계면에서 다수의 AE 발생원이 발생하며 최종 파단에 도달하게되면 AE 신호가 균열을 따라 급격히 증가함을 알 수 있었다. 따라서 2차원 AE 위치추정 기법은 복합재료의 계면손상의 위치 및 정도 등을 연속적으로 온라인 모니터링 할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 1999년도 동아대학교 학술연구조성

비(공모과제)에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- (1) Park, B.G., Crosky, A.G. and Hellier, A.K., 2001, "Material Characterization and Mechanical Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al Metal Matrix Composites," *J. of Materials Science*, Vol. 36, No. 10, pp. 2417~2426.
- (2) Oguocha, I.N.A., Radjabi, M. and Yannacopoulos, S., 2000, "The Effect of Cooling Rate on the Quench Sensitivity of 2618 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC," *J. of Materials Science*, Vol. 35, No. 22, pp. 5629~5634.
- (3) Kim, Y.I., Chun, W.C., Baek, B.J., Kim, J.T., and Pak, B.C., 1998, "Forced Air Cooling by Using Manifold Microchannel Heat Sinks," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 3, pp. 709~718.
- (4) Kashiwagura, N., Ohsawa, Y., Iwata, S., Jin, J.-Y., and Kamioka, H., 2000, "Ultrasonic Behavior of Ti<sub>0.49</sub>-Ni<sub>0.51</sub> Shape Memory Alloy between 0°C and 90°C," *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, Vol. 39, No. 5B, pp. 2928~2932.
- (5) Kim, H.G., 2001, "Evaluation of Elastic Modulus in a Particulate Reinforced Composite by Shape Memory Effect," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 1, pp. 25~31.
- (6) Liu, M., Zhang, X.M., Liu, L., Li, Y.Y. and Shelyakov, A.V., 2000, "In Situ TEM Observations of Martensite-Austenite Transformations in a Ni<sub>49</sub>Ti<sub>36</sub>Hf<sub>15</sub> High Temperature Shape Memory Alloy," *J. of Materials Science Letters*, Vol. 19, No. 15, pp. 1383~1386.
- (7) Goo, B.C., 1998, "Modeling of the Mechanical Behavior of a Shape-memory Alloy by a Micro-Mechanical Approach," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 6, pp. 1063~1072.
- (8) Lee, J.K., Lee, J.H., Choi, H.S. and Lee, M.R., 2000, "AE Characteristics on Microscopic Failure Behavior of Carbon/Epoxy Composite Prepared by Cocure and Precure Process," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 24, No. 10, pp. 2520~2528.
- (9) Enoki, M., Ohtake, S. and Kishi, T., 2001, "Classification of Micro-Fracture Process Type in Glass Matrix Composites by Quantitative Acoustic Emission Method," *Materials Transactions*, Vol. 42, No. 1, pp. 108~113.
- (10) Fregonese, M., Idrissi, H., Mazille, H., Renaud, L. and Cetre, Y., 2001, "Monitoring Pitting Corrosion of AISI 316L Austenitic Stainless Steel by Acoustic Emission Technique: Choice of Representative Acoustic Parameters," *J. of Materials Science*, Vol. 36 No. 3, pp. 557~563.
- (11) Jhang, K.Y., Kim, D.J. and Lee, W.H., 1998, "AE Source On-line Localization on Material with Unkown Acoustic Wave Propagation Velocity," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 3, pp. 688~694.
- (12) Li, Z.J., Li, F.M., Li, X.S. and Yang, W.L., 2000, "P-Wave Arrival Determination and AE Characterization of Concrete," *J. of Engineering Mechanics-ASCE*, Vol. 126, No. 2, pp. 194~200.
- (13) Yano, T., Budiyo, K., Yoshida, K. and Iseki, T., 1998, "Fabrication of Silicon Carbide Fiber-Reinforced Silicon Carbide Composite by Hot-Pressing," *Fusion Engineering & Design*, Vol. 41, pp. 157~163.