

## AE 기법을 이용한 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 고온파괴특성평가

이진경\* · 박영철\*\* · 강동현\*\*\* · 박동성\*\*\* · 이규창\*\*\*\*

### Fracture Characteristic of TiNi/Al6061 Shape Memory Alloy Composite at High Temperature using Acoustic Emission Technique

Jin-Kyung Lee, Young-Choul Park, Dong-Hyun Kang, Dong-Sung Park  
and Kyu-Chang Lee

**Key Words:** Tensile residual stress(인장잔류응력), Shape Memory effect(형상기억효과), Pre-strain(예변형률), Acoustic Emission(음향방출), Shape Memory Alloy(형상기억합금).

#### Abstract

Tensile residual stress happen by difference of coefficients of thermal expansion between fiber and matrix is one of the serious problems in metal matrix composite(MMC). In this study, TiNi fiber was used to solve the tensile residual stress as the reinforced material. TiNi fiber improves the tensile strength of composite by occurring compressive residual stress in matrix using shape memory effect of it. Pre-strain was added to generate compressive residual stress inside TiNi/Al6061 composite. It was also evaluated the effect of compressive residual stress corresponding to pre-strains variation. AE technique was used to clarify the microscopic damage behavior at high temperature and the effect of pre-strain difference of TiNi/Al6061 shape memory alloy composite.

#### 1. 서 론

금속복합재료(Metal Matrix Composite, MMC)<sup>(1,2)</sup>에 있어서 이중 물질의 결합에 따른 강화재와 기지간의 열팽창계수의 차이로 인한 잔류응력이 복합재료의 강도를 크게 저하시킨다. 따라서, 복합재료의 강도를 향상시키기 위해서는 재료내부 잔류응력을 없애는 것이 필수적이라 할 수 있으며, 보다 나아가 역으로 복합재료의 인장강도를 증가시키기 위하여 기지내에 압축잔류응력을 발생시킨다면 복합재료의 인장강도는 크게 향상되어질 것이다. 한편, TiNi 형상기억합금(shape memory alloy, SMA)<sup>(3~6)</sup>은 마르텐사이트 변태의 주된 특

성을 가지고 있으며, 이러한 특성으로 인해 형상회복성의 우수한 기능을 가진 재료이다. TiNi 형상기억합금을 강화제로 사용한 복합재료는 기존의 금속복합재료에 있어서 가장 큰 문제점으로 지적되었던 잔류응력에 의한 강도저하의 문제를 TiNi 형상기억합금의 형상기억효과를 이용하여 압축잔류응력을 유발시킴으로써 해결할 수 있다는 이점이 있다.

Al기지 형상기억합금 복합재료는 형상기억합금의 형상복원력을 이용하면 Al기지에 압축 잔류응력을 유발케 하여 기계적 특성을 향상시켜 양호한 구조재료로 활용될 가능성이 높은 복합재료이다. TiNi/Al6061 형상기억복합재료는 오스테나이트 상인 TiNi와이어를 Al기지내에 강화시킨 후 제조한 복합재료에 형상기억 시효 열처리를 행하고 급냉시키면 강화재인 TiNi는 마르텐사이트 상이 된다. 강화재가 마르텐사이트상인 TiNi/Al6061 복합재료<sup>(7)</sup>에 인장 예변형(pre-strain)을 가하고

\* 동의대학교 기계산업시스템공학부

\*\* 동아대학교 기계공학과

\*\*\* 동아대학교 대학원

\*\*\*\* 산업과학연구원 신뢰성 평가센터

TiNi의 오스테나이트 변태 완료 온도인  $A_f$ 점 이상( $90^\circ\text{C}$ )으로 가열을 하면 TiNi의 형상기억효과에 의하여 TiNi와이어는 원래의 길이로 수축되려 한다. 이러한 TiNi와이어의 수축력은 Al기지 내에 압축 잔류응력을 발생시켜 복합재료의 인장강도가 향상된다.

따라서 본 연구에서는 고온에서의 TiNi/Al6061 형상기억합금 복합재료의 파손기구(failure mechanism) 및 예변형률에 따른 손상기동을 비파괴 평가 기술로 모니터링하기 위해 재료가 하중을 받아 소성변형을 일으키거나 균열이 발생, 성장할 때 발생하는 탄성파를 이용하여 균열발생, 성장과 같은 동적인 과정(Dynamic Process)을 연속적으로 온라인 모니터링 하는데 아주 유용한 음향방출(Acoustic Emission, AE) 기법<sup>(8)</sup>을 이용하여 규명하고자 한다.

## 2. 재료 및 시험편

### 2.1 재료

본 연구에서는 TiNi/Al6061형상기억합금 시험편을 제조하기 위한 기지재료로써 고압 하에서 내응력 및 내산화 부식성이 우수한 Al6061과 직경  $500\mu\text{m}$ 의 TiNi(Ti-50 at.%)와이어를 사용하였으며 최고  $1000^\circ\text{C}$ 까지 온도 유지가 가능한 250톤 용량의 고온 프레스(hot press)를 제작하여 시험편을 제조하였다. Fig. 1에서는 시험편 제조과정을 나타낸 것으로 기지재인 Al6061 사이에 TiNi 와이어를 일정한 간격으로 고정시킨 후 고온 프레스의 온도조건을 833K, 압력을 60MPa로 고정하고 유지시간을 30분으로 하였다. 또한 Al6061 표면은 공기중에서 쉽게 산화되므로 아르곤 분위기에서 시험편을 제조하였으며 기지재인 Al6061의 강도를 증가시키기 위해 T6 열처리를 실시하였다. 복합재료에 대하여는 공기중에서 793K와 813K에서 1시간동안 용체화처리 후 냉각수에 담금질을 실시하였으며, 시험편의 기계적 특성을 증가시키기 위하여 공기 중에서 448K로 시효처리를 실시하였다. 마지막 단계로, 상온에서 시험편에  $1 \times 10^{-4}\text{mm/s}$ 로 예변형을 가하였다. 이러한 방법에 의해 제작된 시험편에 예변형을 가하여 363K에서 인장시험을 실시하였다.

Table. 1은 형상기억복합재료의 내부에 압축잔

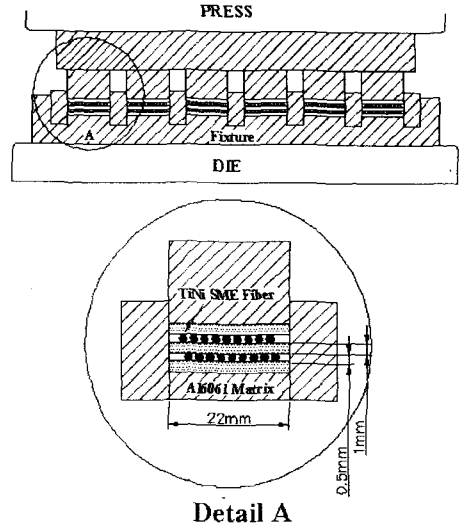


Fig. 1 Schematic diagram of hot pressing

Table. 1 Enhancing mechanism of SMC

Process	Microstructure
Hot press (A)	Al matrix TiNi reinforcement
Shape memory heat treatment (B)	Martensite phase
Prestrain (C)	$\epsilon/2$ Martensite phase
Heating above $A_f$ temperature and tensile at that temperature (D)	shrink less shrink more compressive residual stress (shape memory effect) → strength increase

류 응력을 발생시키기 위하여 본 연구에서 실시한 가공열처리 과정과 강화기구를 도식적으로 나타내었다.

표에서 보여주는 바와 같이 (A)는 가공 제작한 TiNi/Al6061 형상기억합금 복합재료를 (B)단계에서 TiNi 형상기억합금의 형상기억온도인 773K에서 30분간 가열처리하여 TiNi 섬유에 형상기억 열처리를 실시한 후, 빙수 냉각하여 TiNi 섬유를

마르텐사이트상으로 만들었다. 이와 같이 마르텐사이트상으로 된 TiNi 섬유는 마르텐사이트로 조직이 변태함에 따른 전위의 이동으로 대단히 연화되어 기지금속인 Al보다 더욱 낮은 강도를 갖게 된다.

이와 같이 열처리된 시료를 (C)단계에서 인장하중에 의하여 예변형을 가한다. 그러면 Al기지재는 소성변형이 발생하지만 TiNi 섬유는 마르텐사이트상 그대로의 초탄성영역을 유지하게 된다.

이와 같이 예변형이 가해진 복합재료를 (D)단계에서와 같이 다시  $A_f$  온도 이상인 363K로 재가열하면 TiNi 섬유는 마르텐사이트상에서 오오스테나이트상으로 역변태가 일어남으로써 (C)단계에서 가하여진 초탄성영역에 해당되는 예변형은 형상기억효과에 의하여 수축되어 원래의 (B)상태로 되돌아간다. 이에 반하여 기지금속인 Al은 온도 변화에 따라 변형이 일어나지 않으므로 구속을 받게 된다. 따라서 섬유 내부에는 인장응력이 발생하고, 기지내부에는 역으로 압축응력이 발생하게 된다.

Fig. 2는 Table. 1의 제작과정을 통하여 제작한 TiNi/Al6061형상기억합금 복합재료의 인장시험편의 규격을 나타낸 것으로 TiNi 와이어를 5가닥 강화하였다.

### 2.2 실험방법

본 연구에서는 AE 기법을 이용하여 TiNi/Al6061 형상기억합금의 고온 인장시험의 동적거동을 모니터링하기 위해 Fig. 3에 보여주는 바와 같이 TiNi/Al6061 형상기억합금 시험편에 대하여 인장시험기(SHIMADZU)에 노를 장착하여 시험편의 온도를 363K에서 30분간 유지한 후 1.0mm/min의 변형속도로 인장시험을 행하였다.

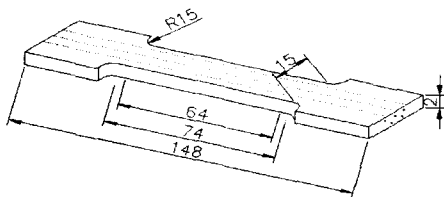


Fig. 2 Tensile test specimen

시험편에 하중이 가해지게 되면 시험편내의 미시적 손상거동에 의해 탄성파가 발생하게 되며 발생된 탄성파는 AE 센서에 의해 감지된후 프리앰프(Preamp)에서 40dB 증폭시켰다. 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 잡음(noise)을 제거하기 위하여 문턱전압값(threshold level)은 45dB로 정하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 예변형률에 따른 응력-변형률 곡선

본 연구에서는 고온에서 TiNi/Al6061 형상기억합금복합재료의 강화재인 TiNi 합금과 Al기지재의 압축잔류응력의 영향을 평가하기 위하여 예변형률을 각각 달리하여 실험한 결과 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 예변형을 전혀 가하지 않은 시험편에서의 강도가 가장 낮게 나타났으며 예변형을 1, 3, 5%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 역변

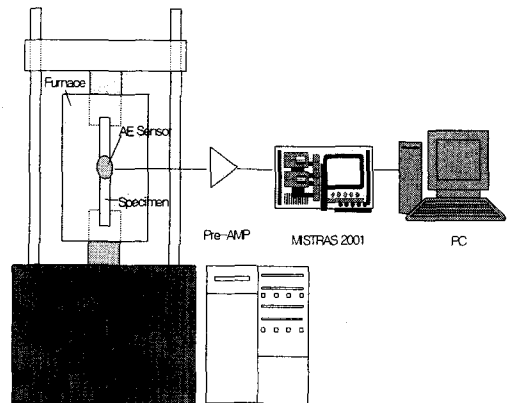


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

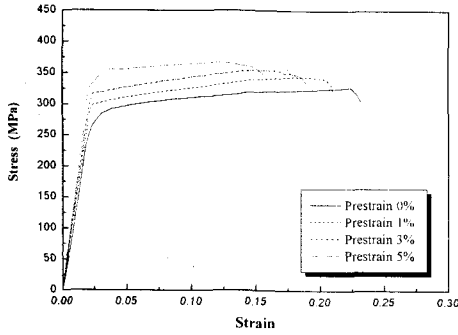


Fig. 4 Stress-strain curve of TiNi/Al6061 composite at various pre-strain(T=363K)

태가 일어나므로 변형이 없는 원래의 상태로 수축되지만 기지금속인 Al은 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.

### 3.2 TiNi/Al6061 복합재료의 AE 신호 특성

Fig. 5는 TiNi/Al6061 형상기억합금복합재료의 미시적 손상거동에 따른 AE 신호 특성을 평가하기 위하여 예변형률이 3%인 시험편에서 발생하는 AE 신호의 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 5(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 가하였기 때문에 다시 하중을 가하였을 때에 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 현

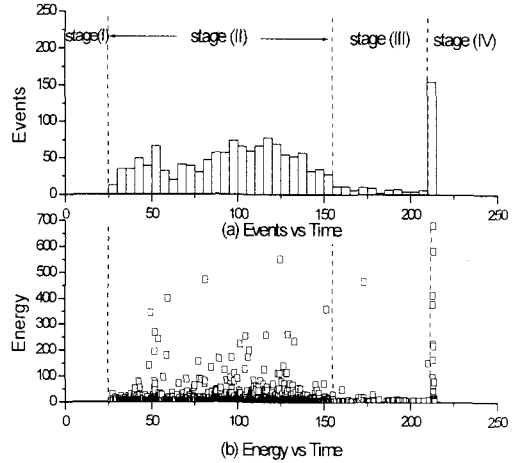


Fig. 5 AE event, energy vs time(sec) at 3% pre-strain composite(T=363K)

상은 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 문턱전압값(threshold level)에서 순수한 Al 및 순수한 TiNi 합금의 인장시험시 소성변형이 발생하더라도 AE 신호는 소수 발생하고 있음을 알 수 있었다.

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. 5(b)에서 보여주는 바와 같이 기지재와 강화재의 계면분리 현상이 급격한 II영역에서의 AE 신호의 에너지는 계면분리의 형태 및 크기에 따라 600까지 다양하게 분포하고 있지만 최종파단시점의 약 70%지점인 III영역에서 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 다양한 파라미터를 분석하여 AE신호의 특성을 평가함으로써 복합재료의 미시적 손상거동을 예측, 평가할 수 있었다.

한편 TiNi/Al6061형상기억복합재료의 미시적 손상기구를 명확히 하기 위하여 AE 신호의 파형과 주파수 특성을 평가하였다.

Fig. 6는 기지재인 Al에서의 하중증가에 따라 재료내부에서 발생하는 AE 신호의 전형적인 파형과 주파수 특성을 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 연속형의 신호가 발생하며 주파수 특성도 240kHz에서 최대 주파수 범위를 나타내었다.

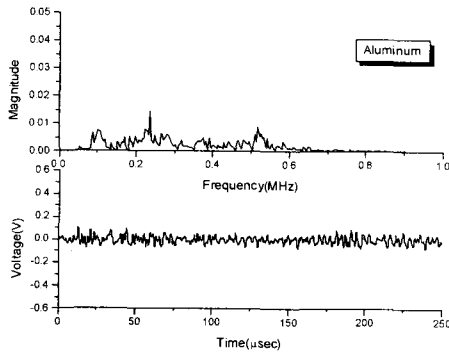


Fig. 6 Typical waveform and spectrum due to crack propagation in aluminum

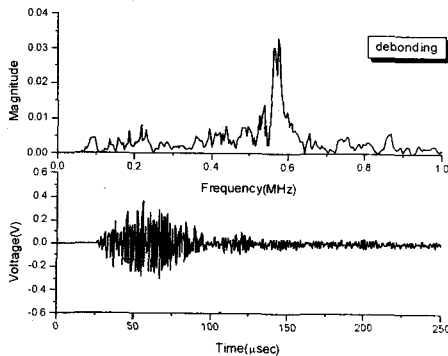


Fig. 7 Typical waveform and spectrum due to debonding between TiNi fiber and Al

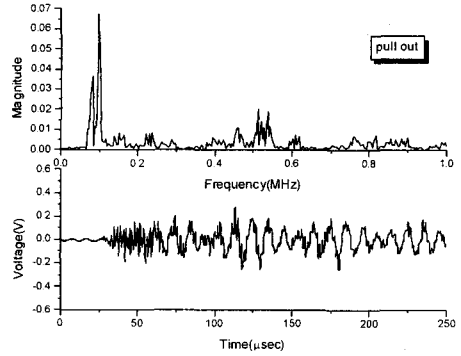


Fig. 8 Typical waveform and spectrum due to pull out of TiNi fiber

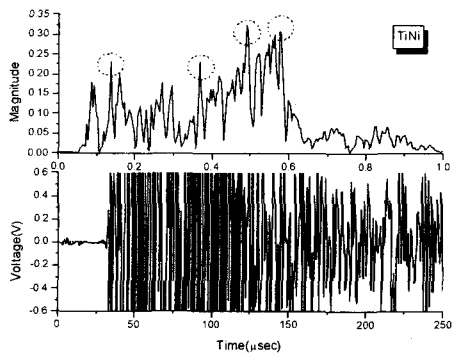


Fig. 9 Typical waveform and spectrum due to the fracture of TiNi fiber

Fig. 7은 TiNi/Al6061형상기억복합재료에서 TiNi 강화재 합금과 Al 기지재와의 계면분리현상이 발생할 때 나타나는 전형적인 파형으로 상승시간 (rise time)이 긴 돌발형 신호가 발생하며 주파수도 580kHz에서 가장 큰 주파수 범위를 나타내었다. 이와 같이 강화재와 기지재 사이의 계면손상에 의한 신호는 크고 작은 돌발형 신호가 발생하며 주파수 범위도 580kHz로 큰 주파수 대역을 나타내었다.

Fig. 8은 강화재가 기지재에서 pull out 될 때 나타나는 파형을 나타낸 것으로 기지재인 Al에서 발생하는 신호와 비슷하게 연속형 신호가 발생하지만 주파수 대역이 약 100kHz로 기지재인 Al의 손상거동으로부터의 신호보다 아주 낮은 주파수 대역을 나타내었다.

Fig. 9는 강화재인 TiNi합금이 파단될 때 발생하는 전형적인 신호를 나타낸 것으로 아주 높은 진폭의 돌발형 파형이 발생하며 주파수 대역도 150, 380, 480, 570kHz 등으로 다양하게 분포하고 있음을 보여주고 있다.

이와 같이 복합재료 내부에서 발생하는 AE 신호의 파형 분석과 주파수 특성을 평가함으로써 TiNi/Al6061형상기억복합재료의 미시적 손상정도 및 파손형태를 예측할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 AE기법을 이용하여 TiNi/Al6061형상기억복합재료의 고온에서 파괴특성을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. TiNi 강화재와 Al 기지재와 계면에서의 압축 잔류응력의 영향을 평가하기 위하여 예변형률을 변화시킨 경우 예변형률의 증가에 따른 압축잔류응력의 증가에 따라 형상기억복합재료의 인장강도는 증가하는 경향을 나타내었다.

2. AE기법을 이용한 예변형을 받은 TiNi/Al6061형상기억복합재료의 미시적 손상평가결과 AE 신호에 따라 크게 4영역으로 나눌 수 있었다.

i) I영역-하중은 증가하지만 AE 신호가 전혀 발생하지 않는 영역

ii) II영역-강화재와 기지재의 계면손상에 의해 초당 5개 이상의 AE 신호와 600까지의 에너지 범위를 나타내는 영역

iii) III영역-기지재 및 강화재의 급격한 소성변형에 의해 소수의 AE 신호와 50이하의 에너지 범위를 나타내는 영역

iv) IV영역-강화재와 기지재의 파단에 의해 다수의 AE 신호와 700이상의 에너지 범위를 나타내는 영역

3. 복합재료의 미시적 손상거동에 따른 AE 신호의 파형과 주파수 특성을 평가한 결과 기지재인 Al 내부로 균열이 전파할 때에는 연속형 신호와 240kHz 주파수 범위, 강화재와 기지재의 계면손상에 의한 AE 신호는 돌발형 신호로써 580kHz의 주파수 범위를 나타내었으며 pull out 현상에 의한 신호는 연속형 신호이지만 100kHz의 낮은 주파수 범위, 마지막으로 TiNi 합금의 파단 시 현저히 높은 진폭의 돌발형 파형과 150kHz에서 570kHz의 다양한 주파수 대역폭을 나타내었다.

- (1) W. A. Logsdon and P. K. Liaw, 1986, "Tensile, Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Rate Properties of Silicon Carbide Whisker and Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composite", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 24, No. 5, pp. 737~751
- (2) 권재도, 안정주, 문윤배, 1996, "제적비가 SiCp/Al 복합재료의 기계적 및 피로균열진전 특성에 미치는 영향", *대한기계학회논문집 A*, 제 20권 제 4호, pp. 1301~1308
- (3) Yuanti Huang, Gueping Y and, Ping He, 1985, "The Investigation of Internal Friction Electric Resistance and Shape Change in TiNi Alloy During Phase Transformations", *Scripta Metallurgica*, Vol. 19, pp. 1033~1038
- (4) 김영식, 박환수, 1999, "Ti-Ni계 형상기억합금 화이어의 회전굽힘피로 특성", *대한기계학회논문집 A*, 제 23권 제 3호, pp. 490~496
- (5) Liu M, Zhang XM, Liu L, Li YY, Shelyakov AV, 2000, "In Situ TEM Observations of Martensite-Austenite Transformations in a Ni49Ti36Hf15 High Temperature Shape Memory Alloy", *J. of Materials Science Letters*, Vol. 19, No. 15, pp. 1383~1386
- (6) H. Prahlad, I. Chopra, 1999, "Experimental Characterization of Ni-Ti Shape Memory Alloy Wires under Complex Loading Conditions", *Smart Structures and Materials 1999: Smart Structures and Integrated Systems*, pp. 604~616
- (7) 정태현, 이동주, 1999, "전단지연 이론을 이용한 단섬유 형태의 SMA 보강 고분자 복합재료의 열변형 거동해석", *대한기계학회논문집 A*, 제 23권 제 6호, pp. 1001~1010
- (8) J. K. Lee, J. H. Lee, S. R. Jeong, 2000, "A Study on Microscopic Damage Behavior of Carbon Fiber Sheet Reinforced Concrete using Acoustic Emission Technique", *Proc. of the 2-Asia-Australasian Conference on Composite Materials*, Vol. 11, pp. 781~786