

TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 고온에서의 손상거동에 대한 AE 특성

AE Characteristics on the Damage Behavior of TiNi/Al6061 Shape Memory Alloy Composites at High Temperature

이진경*[†], 박영철**[†], 구후택***

Jin-Kyung Lee*[†], Young-Chul Park**[†] and Hoo-Taek Ku***

초 록 금속복합재료(MMC) 내부에서의 강화재와 기지재사이의 열팽창계수의 차이에 의해 발생하는 인장잔류응력은 복합재료의 인장강도를 저하시키는 심각한 문제중의 하나이다. 따라서 본 연구에서는 TiNi/Al6061 형상기억복합재료내부의 인장잔류응력의 문제를 해결하기 위하여 강화재로써 TiNi 합금을 사용하였다. TiNi 합금은 형상기억효과를 이용하여 복합재료내부에 압축잔류응력을 발생시킴으로써 인장강도를 증가시키는 역할을 한다. 복합재료내부에 압축잔류응력을 발생시키기 위하여 예변형(pre-strain)을 가하였다. 본 연구에서는 예변형의 변화에 따른 압축잔류응력의 영향을 평가하였으며 AE 기법을 이용하여 고온에서의 복합재료의 미시적 손상거동과 예변형의 영향을 평가하였다.

주요용어: 인장잔류응력, 압축잔류응력, 형상기억효과, 예변형, 형상기억합금

Abstract It has been known that tensile residual stresses occurring by the thermal expansion coefficient mismatch between fiber and matrix is a cause of the weak strength of metal matrix composites(MMCs). In order to solve this problem, TiNi alloy fiber was used as a reinforced material in TiNi/Al6061 shape memory alloy composite in this study. TiNi alloy fiber improves the tensile strength of the composite by causing compressive residual stress in matrix on the basis of its shape memory effect. Pre-strain was imposed to generate the compressive residual stresses inside the TiNi/Al6061 shape memory alloy composites. AE technique was used to quantify the microscopic damage behavior of the composite at high temperature. The effect of applied pre-strains on the AE behavior was also evaluated.

Keywords: tensile residual stress, compressive residual stress, shape memory effect, pre-strain, shape memory alloy(SMA)

1. 서 론

금속복합재료(Metal Matrix Composite, MMC)[1,2]에 있어서 이종 물질의 결합에 따른 강화재와 기지간의 열팽창계수의 차이로 인한 잔류응력이 복합재료의 강도를 크게 저하시킨다. 따라서, 복합재료의 강도를 향상시키기 위해서

는 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)[3-6]은 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.

Al기 지형상기억합금 복합재료는 형상기억합금의 형상복원력을 이용하면 Al기 지에 압축 잔류응력을 유발케 하여 기계적 특성을 향상시켜 양호한 구조재료로 활용될 가능성이 높은 복합재료이다. TiNi/Al6061 형상기억복합재료는 오스테나이트 상인 TiNi와이어를 Al기 지내에 강화시킨 후 제조한 복합재료에 형상기억 시효 열처리를 행하고 급냉시키면 강화재인 TiNi는 마르텐사이트 상이 된다. 강화재가 마르텐사이트 상인 TiNi/Al6061 복합재료 [7]에 인장 예변형(pre-strain)을 가하고 TiNi의 오스테나이트 변태 완료 온도인 Af점 이상(363K)으로 가열을 하면 TiNi의 형상기억효과에 의하여 TiNi와이어는 원래의 길이로 수축되려 한다. 이러한 TiNi와이어의 수축력은 Al기 지 내에 압축 잔류응력을 발생시켜 복합재료의 인장강도가 향상된다.

따라서 본 연구에서는 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 항공기용 부재로써 적용가능성을 평가하기 위하여 고온에서의 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 파손기구(failure mechanism) 및 예변형률에 따른 손상기동을 비파괴 평가기술로 모니터링하고자 하였다. 특히 고온에서 TiNi 형상기억합금의 형상기억효과를 이용하여 복합재료내의 발생한 미시적 균열의 진전을 저지시키고자 하였다. 더불어, 본 연구에서는 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 항공기용 부재로써 복합재료내의 미시적 균열의 발생을 측정하기 위하여 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[8-10]을 이용하였다.

2. 재료 및 시험편

2.1. 재료

본 연구에서는 TiNi/Al6061 형상기억합금 시험편을 제조하기 위한 기지재료로써 고압 하에서 내응력 및 내산화 부식성이 우수한 Al6061과 직경 500 μ m의 TiNi (Ti-50

at.%)와이어를 사용하였으며 최고 1273K까지 온도 유지가 가능한 250톤 용량의 고온 프레스(hot press)[11]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 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 담급질을 실시하였으며, 시험편의 기계적 특성을 증가시키기 위하여 공기 중에서 448K로 시효처리를 실시하였다. 마지막 단계로, 상온에서 시험편에 1 \times 10 $^{-4}$ mm/s로 예변형을 가하였다.

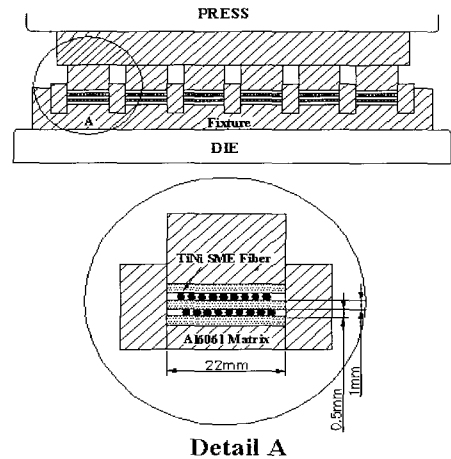


Fig. 1 Schematic diagram of hot pressing

Fig. 2는 형상기억복합재료의 내부에 압축잔류 응력을 발생시키기 위하여 본 연구에서 실시한 가공열처리 과정과 강화기구를 도식적으로 나타내었다.

그림에서 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. 열처리된 시험편을 (C)단계에서 인장하중을 가하여 예변

형을 가하게 되면 Al기지체는 소성변형이 발생하지만 TiNi 섬유는 마르텐사이트상 그대로의 초탄성영역을 유지하게된다.

이와 같이 예변형이 가해진 복합재료를 (D)단계에서와 같이 다시 Af온도 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 온도변화에 따라 변형이 일어나지 않으므로 구속을 받게 된다. 따라서 섬유 내부에는 인장응력이 발생하고, 기지재에는 역으로 압축응력이 발생하게된다.

Fig. 3은 Fig. 2의 제작과정을 통하여 제작한 TiNi/Al6061형상기억합금 복합재료의 인장시험편의 규격을 나타낸 것이며 본 연구에서는 363K의 고온에서 인장하중을 가하였으며 TiNi 와이어의 체적률은 5.2%이다.

Process	Micro-structure
Hot press (A)	Al matrix TiNi reinforcement
Shape memory heat treatment (B)	Martensite phase
Pre-strain (C)	Martensite phase
Heating above Ar temperature (D)	shrink less shrink more compressive residual stress (shape memory effect) →strength increase

Fig. 2 Strength enhancing mechanism of SMC

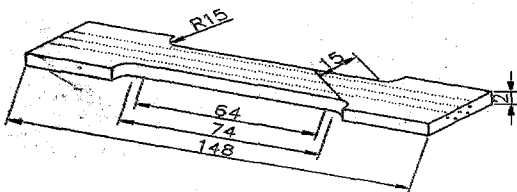


Fig. 3 Tensile test specimen

2.2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 AE 기법을 이용하여 TiNi/Al6061 형상기억합금의 고온 인장실험의 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.

시험편에 하중이 가해지게 되면 시험편내의 미세적 손상거동 및 시험편 내에 균열이 발생함에 따라 탄성파가 발생하게 되며 발생된 탄성파는 AE 센서에 의해 감지된 후 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 센서(FAC1220A, 100~1200kHz)를 부착하여 고온에서의 TiNi/Al6061 형상기억합금의 동적거동을 모니터링하였으며 주위의 잡음(noise)을 제거하기 위하여 문턱전압값(threshold level)은 45dB로 정하였다.

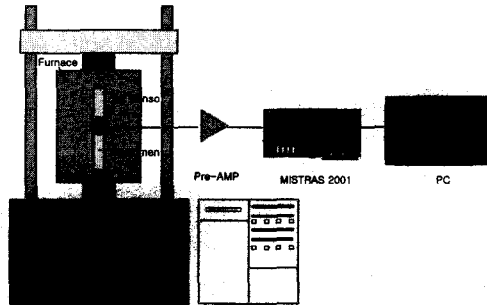


Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 예변형률에 따른 응력-변형률 곡선

본 연구에서는 고온에서 TiNi/Al6061 형상기억합금 복합재료의 강화제인 TiNi 합금과 Al기지체의 압축잔류응력의 영향을 평가하기 위하여 예변형률을 각각 달리하여 실험한 결과 Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 예변형을 전혀 가하지 않은 시험편에서의 강도가 가장 낮게 나타났으며 예변형이 1, 3%로 증가함에 따라 인장강도가 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 각 시험편에서의 Young's modulus(E)의 변화는 예변형률이 1, 3%로 증가

함에 따라 예변형률을 받지 않은 시험편에 비하여 증가함을 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 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 손상거동에 따른 AE신호 특성

본 연구에서 TiNi/Al6061형상기억복합재료의 고온에서의 미시적 손상거동에 따른 AE 신호특성을 평가하기 위하여 예변형률 1%인 복합재료의 손상정도에 따라 발생하는 AE 신호를 분석하였다.

Fig. 6은 예변형률 1%인 복합재료에 하중이 증가함에 따라 발생하는 AE 신호의 여러 파라미터들을 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 AE 카운트 및 AE 사상수의 발생경향에 따라 크게 4영역으로 나눌 수 있었다.

먼저 하중초기 AE 사상수와 카운트가 급격히 증가하는 stage I, 하중이 점차적으로 증가함에 따라 AE 사상수가 5초당 20여개 발생하고 AE 카운트 발생경향도 stage I 영역보다는 완만하게 증가하는 stage II, 그리고 최종 파단시점의 약 60% 지점부터 AE 사상수가 급격히 감소하여 5초당 10개 이하로 발생하고 AE 카운트 또한 증가하는 경향이 더욱더 완만해지는 stage III, 마지막으로

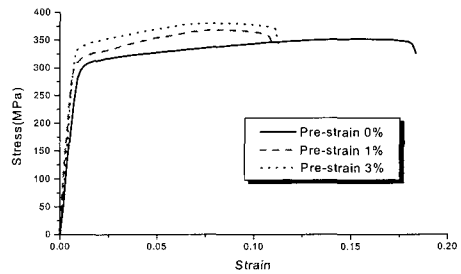


Fig. 5 Stress-strain curves of TiNi/Al6061 composites at various pre-strain(T=363K)

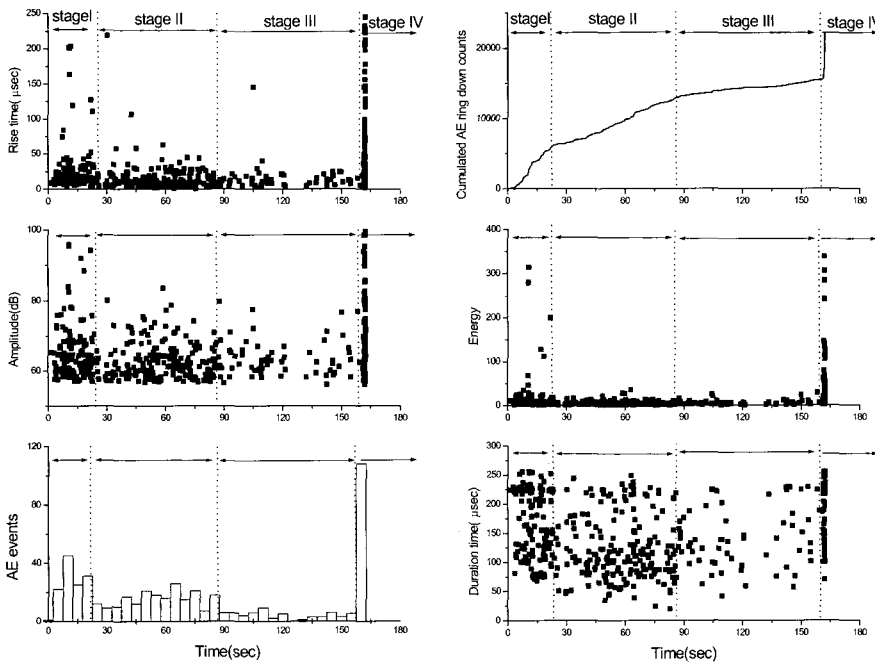


Fig. 6 Various AE behaviors of TiNi/Al6061 SMA composites(pre-strain 1%)

최종파단에 도달해서는 AE 사상수와 카운트가 급격히 증가하는 IV영역으로 구분할 수 있다. 먼저 하중초기, 즉 stage I 영역에서는 시험편에 하중이 가해짐에 따라 복합재료 내부의 국부적인 응력집중 및 강화재인 TiNi 합금과 기지체인 Al 사이의 계면분리 현상이 발생함에 따라 다수의 AE 신호가 발생하며 이때 발생하는 AE 신호는 상승시간, 진폭, 그리고 에너지 등이 II, III 영역에 비하여 현저히 높은 신호가 다수 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 지속시간은 다른 영역에서 발생하는 신호와는 큰 차이를 나타내지 않았다.

그리고 하중이 점차적으로 증가함에 따라 stage I 영역에서의 계면분리 현상이 더욱더 현저해지고 강화재와 기지체 사이의 균열이 성장함과 동시에 복합재료의 소성변형이 발생하는 stage II 영역에서의 AE신호의 파라미터는 stage I 영역에서 발생한 신호보다는 상승시간, 진폭, 특히 에너지 등이 현격히 감소함을 알 수 있다. 또한 최대 파괴시점의 60% 지점부터의 stage III 영역에서는 복합재료 내부의 강화재와 기지체 사이의 현격한 계면분리 현상은 많이 감소하는 반면 복합재료의 급격한 소성변형과 pull out 현상에 의해 AE 사상수 및 카운트의 발생경향은 현저히 감소하고 상승시간 및 진폭도 다른 영역에 비하여 낮음을 알 수 있다.

마지막으로 stage IV 영역에 도달하면 복합재료 내의 거시적 균열전파 및 강화재인 TiNi 합금의 파단에 의해서 급격히 AE 사상수 및 카운트가 증가하고 그때의 AE 신호의 상승시간 및 진폭 그리고 에너지 등도 다른 영역에 비하여 현저히 높음을 알 수 있다. 따라서 복합재료의 미시적 손상거동을 평가하기 위하여 여러 종류의 AE 파라미터들 중에 AE 사상수, 상승시간 및 에너지 등이 가장 유효한 파라미터로 사료된다.

한편 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 미시적 손상거동을 명확히 평가하기 위하여 AE 신호의 파형과 주파수 특성을 평가하였다.

Fig. 7에서는 복합재료 내부의 TiNi 합금과 기지체인 알루미늄 사이의 계면에서 debonding 현상이 발생할 때의 전형적인 AE 신호의 파형과 주파수 특성을 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 상승시간이 긴 돌발형 형태의 파형이 발생하며 그때의 주파수 대역은 260kHz에서 가장 높은 주파수를 나타내며 240kHz와 550kHz에서도 높은 주파수 특성을 나타내었다. 그러나 하중이 점차적으로 증가하여 debonding 현상이 계면사이로 전파함에 따라 발생하는 AE 신호의 특성은 Fig. 8에

서 보여주는 바와 같이 진폭이 낮은 돌발형 형태의 파형이 발생하며 주파수 대역은 490kHz에서 가장 높은 주파수 특성을 나타내었다.

Fig. 9에서는 최종파단 시점에 도달하였을 때 TiNi/Al6061 형상기억복합재료 내부에 거시적 균열이 전파함에 따른 전형적인 파형과 주파수 특성을 나타낸 것으로 높은 진폭을 나타내는 연속형 신호가 발생하고 240kHz의 낮은 주파수 특성을 나타내었다. 그러나 강화재인 TiNi 합금이 파단될 때에는 Fig. 10에서 보여주는 바와 같이 아주 높은 진폭의 돌발형 형태의 신호가 발생하고 주파수 대역은 480kHz에서 가장 높게 나타나며 150, 380, 570kHz의 주파수 대역에서도 높게 나타나 광범위한 주파수 대역을 보여주고 있다. 이와 같은 파형 관찰은 예비실험을 통하여 강화되지 않은 순수한 알루미늄 및 TiNi 강화재에서 발생하는 신호를 관찰하여 TiNi/Al6061 복합재료 내에서 발생하는 신호와 비교 검토하였으며 특히 뒤의 Fig. 14의 파단면 관찰에서 기지체와 강화재의 계면 손상 및 강화재의 파단 등을 관찰하여 각각의 영역에서 발생하는 전형적인 파형 형태를 기술하였다.

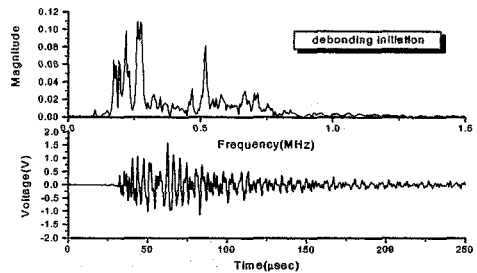


Fig. 7 Typical AE waveform and spectrum due to debonding initiation between TiNi fiber and Al matrix

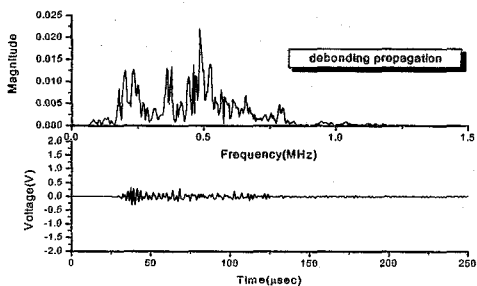


Fig. 8 Typical AE waveform and spectrum due to debonding propagation between TiNi fiber and Al matrix

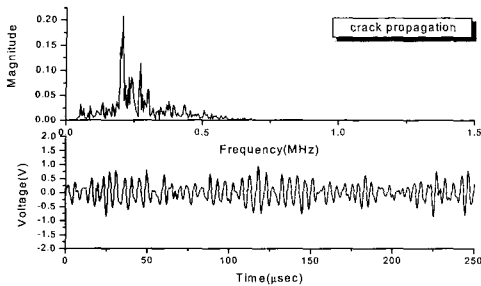


Fig. 9 Typical AE waveform and spectrum due to crack propagation in composite

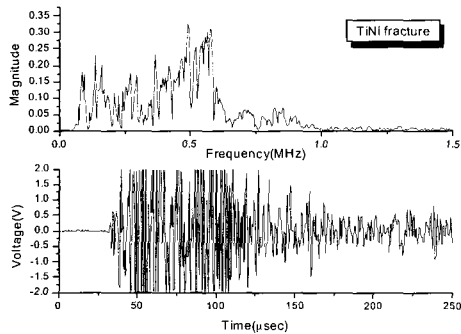


Fig. 10 Typical AE waveform and spectrum due to the fracture of TiNi fiber

3.3. 예변형률의 변화에 따른 AE 신호 및 파단면 관찰

본 연구에서는 TiNi/Al6061 복합재료의 예변형률의 변화에 따라 AE 신호의 특성을 분석하여 복합재료에 대한 예변형률의 영향을 평가하였다.

Fig. 11은 예변형률을 각각 0, 1, 3%로 받은 TiNi/Al6061 복합재료가 인장하중을 받을 때 발생하는 AE 신호의 카운트의 발생경향을 나타낸 것으로 예변형률 전형 받지 않은 0%의 시험편에서는 하중 초기에는 AE 카운트가 거의 발생하지 않지만 하중이 점차적으로 증가함에 따라 AE 카운트도 점차적으로 증가하며 파단 시점의 약 80% 지점부터 AE 카운트는 급격히 증가하여 최종파단에 도달하였다. 반면 예변형률 1% 받은 시험편에서는 하중 초기에 다수의 AE 카운트가 발생하며 하중이 점차적으로 증가함에 따라 AE 카운트는 급격히 발생하는 반면 3%의 예변형률 받은 시험편에서는 하중초기에 다수의 AE 카운트가 발생하지만 하중이 점차적으로 증가하더라도 AE 카운트는 거의 증가하지 않는 경향을 나타내었다.

이와 같이 예변형률 1, 3%로 증가시킴에 따라 발생하

는 AE 카운트는 점차적으로 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 그리고 파단되는 시점 역시 예변형률 전혀 받지 않은 시험편이 가장 길었으며 1, 3%로 예변형률 가함에 따라 파단되는 시점은 크게 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 12는 예변형률에 따른 AE 신호의 상승시간과의 관계를 나타낸 것으로 예변형률 전혀 받지 않은 시험편에서는 하중 초기 및 최종파단시점의 약 80% 지점에서는 100-200 μ s의 긴 상승시간을 나타내는 신호가 발생한다. 또한 1%의 예변형률 받은 시험편에서는 하중 초기 복합재료내부에서의 국부적인 응력집중 및 계면분리에 의해 발생하는 신호중 100 μ s 이상의 높은 상승시간을 나타내는 신호가 다수 발생한다. 그리고 최종파단의 70-80%지점에서 발생하는 신호는 예변형률 받지 않은 시험편과는 달리 낮은 상승시간을 나타내는 신호가 발생하게 된다. 그러나 3%의 예변형률 받은 시험편에서 하중 초기 발생하는 신호의 상승시간은 100 μ s 이하의 신호들이 발생하며 하중이 점차적으로 증가함에 따라 발생하는 신호들도 낮은 상승시간을 나타내는 신호들이 발생함에 따라 예변형률 받지 않은 시험편 및 1%의 예변형률 받은 시험편에서 발생하는 신호와 약간의 차이를 나타내었다. 한편 최종파단시점에 도달하여 시험편 내에 거시적 균열전파 및 TiNi 합금의 파단에 의해 발생하는 신호의 상승시간은 모든 시험편에서 현저히 높게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 13은 AE 사상수의 발생경향을 나타낸 것으로 예변형률 전혀 받지 않은 시험편에서는 하중 초기에 전혀 AE 신호는 발생하지 않지만 최대 하중의 약 80% 지점부터 다수의 AE 신호가 발생하며 최종 파단에 도달하게 된다. 반면 1, 3%의 예변형률 받은 시험편에서는 하중 초기에 다수의 AE 신호가 발생하고 하중이 점차적으로 증가함에 따라 AE 신호는 감소함을 알 수 있다. 따라서 예변형률 받은 시험편과 받지 않은 시험편에서의 AE 신호의 발생경향은 전혀 다른 경향을 나타내었다. 그러나 최종 파단시점에 도달하면 시험편 내의 거시적 균열의 전파와 TiNi 합금의 파단에 의해 예변형률 받은 시험편 및 받지 않은 시험편 모두에서 AE 신호가 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라서 최종파단시점의 70-80%지점부터 AE 사상수가 급격히 증가하면 예변형률 전혀 받지 않은 경우의 복합재료를 의미하며 이 시점에서 AE 사상수의 발생율이 감소하면 예변형률 받은 복합재료임을 알 수 있다.

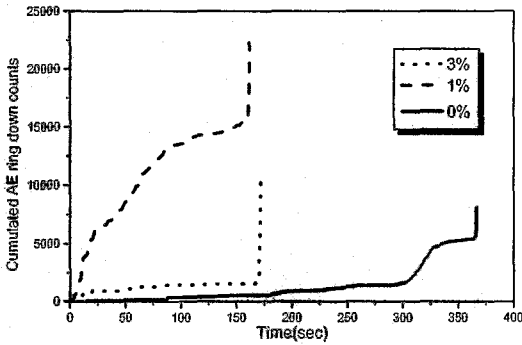


Fig. 11 Cumulated AE ring down counts vs. time

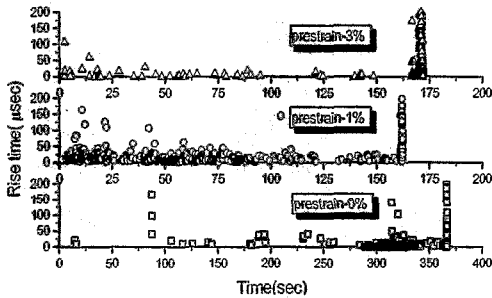


Fig. 12 Rise time vs. time

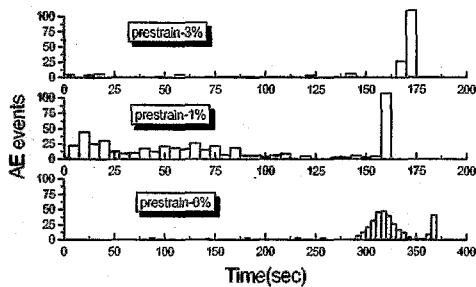


Fig. 13 AE events vs. time

Fig. 14에서는 시험편의 미시적 손상거동을 평가하기 위하여 전자현미경(SEM)을 이용하여 시험편의 파단면을 관찰한 것을 나타낸 것으로 Al 기지재와 TiNi 파이프의 경계면에서의 debonding 현상과 인장하중을 받음에 따라 알루미늄 기지재간의 접합손상이 발생함을 관찰할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 앞으로 이와 같은 기지재와 강화재와의 계면에서의 접합상태 및 계면손상을 최소화하기 위하여 강화재의 코팅 및 핫 프레스 방법으로 제조된 시험편을 다시 냉간 압연하여 제조하는 방법 등을 고

려하여 시험편을 제작하는 것이 복합재료의 인장강도 및 예변형률 효과를 더욱 극대화할 수 있을 것으로 사료되며 제조방법에 대한 연구를 계속적으로 진행하고 있다.

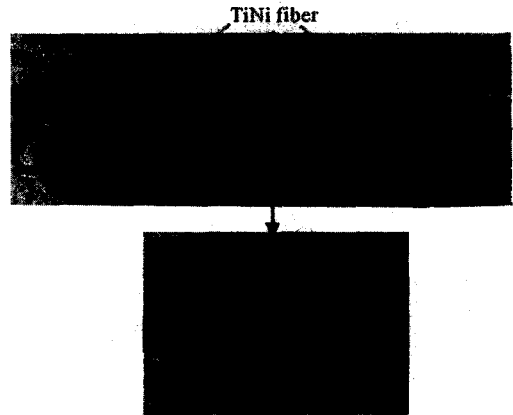


Fig. 14 Fracture surface of TiNi composite using SEM

4. 결 론

본 연구에서는 TiNi 합금 체적율이 5%인 TiNi/Al6061 형상기억복합재료에 대해 고온에서의 미시적 손상거동을 AE 기법을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. TiNi 강화재와 알루미늄 기지재의 계면에 발생하는 압축잔류응력의 영향을 평가하기 위하여 예변형률을 변화시킨 결과 예변형률이 증가함에 따라 형상기억복합재료 내부에 압축잔류응력의 증가에 의해 복합재료의 인장강도는 증가하는 경향을 나타내었다.
2. 예변형을 받은 TiNi/Al6061형상기억복합재료의 미시적 손상거동은 AE 신호에 따라 크게 4영역으로 나눌 수 있었다.
 - i) 영역-하중초기 응력집중 및 계면분리에 의해 다수의 AE 신호가 발생하며 에너지, 진폭 및 상승시간이 II, III영역에 비하여 현저히 높으며 돌발형 형태의 파형과 240, 260, 550kHz의 광범위한 주파수 범위를 나타내는 영역.
 - ii) II영역-계면분리 현상이 현저해지며 복합재료의 소성변형에 의해 초당 4개 정도의 AE 신호가 발생하며 에너지, 진폭 및 상승시간이 낮으며 돌발형 형태의 파형과 490kHz의 주파수 특성을 나타내는 영역.
 - iii) III영역-기지재 및 강화재의 급격한 소성변형에 의해 소수의 AE 신호와 I, II영역에 비하여 에너지,

진폭 및 상승시간이 현저히 낮으며 연속형 형태의 파형과 240kHz에서 가장 높은 주파수 범위를 나타내는 영역.

iv) IV영역-강화재와 기지재의 파단에 의해 다수의 AE 신호와 아주 높은 에너지, 진폭 및 상승시간을 나타내며 돌발형 형태의 파형과 150kHz~570kHz의 다양한 주파수 대역을 나타내는 영역.

3. 예변형률의 변화에 따른 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 AE 신호의 특성을 평가한 결과 예변형을 받지 않은 시험편에 비하여 예변형을 받은 시험편에서는 하중 초기 다수의 AE 신호가 발생하고 최종파단의 70-80%지점에서는 예변형을 받지 않은 시험편에서 AE 신호가 급격히 증가한 반면 예변형을 받은 시험편에서는 감소하는 경향을 나타내었다.

참고문헌

- [1] W. A. Logsdon and P. K. Liaw, "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, (1986)
- [2] 권재도, 안정주, 문윤배, "제적비가 SiCp/Al 복합재료의 기계적 및 피로균열진전 특성에 미치는 영향", *대한기계학회논문집 A*, 제 20권 제 4호, pp. 1301-1308, (1996)
- [3] Yuanti Huang, Gueping Y and Ping He, "The Investigation of Internal Friction Electric Resistance and Shape Change in TiNi Alloy During Phase Transformations," *Scripta Metallurgica*, Vol. 19, pp. 1033-1038, (1985)
- [4] 김영식, 박환수, "Ti-Ni계 형상기억합금 화이어의 회전급힘피로 특성", *대한기계학회논문집 A*, 제 23권 제 3호, pp. 490-496, (1999)
- [5] Liu M, Zhang X. M, Liu L, Li YY and Shelyakov AV, "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, (2000)
- [6] H. Prahlad, I. Chopra, "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, (1999)
- [7] 정태현, 이동주, "전단지연 이론을 이용한 단섬유 형태의 SMA 보강 고분자 복합재료의 열변형 거동 해석", *대한기계학회논문집 A*, 제 23권 제 6호, pp. 1001-1010, (1999)
- [8] J. K. Lee, J. H. Lee, S. R. Jeong, "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. II, pp. 781-786, (2000)
- [9] Bukkapatnam STS, Kumara SRT, Lakhtakia A, "Analysis of Acoustic Emission Signals Machining", *J. of Manufacturing Science & Engineering*, Vol. 121, No. 4, pp. 568-576, (1999)
- [10] A. C. Okafor, S. R. Birdsong, "Monitoring Drilling of Advanced Composites, Drill Wear and Exit Hole Delamination using Wave-Based Acoustic Emission", *Proc. of the Process Control and Sensors for Manufacturing II*, pp. 115-124, (1999)
- [11] Yano T, Budiayanto K, Yoshida K, Iseki T, "Fabrication of Silicon Carbide Fiber-Reinforced Silicon Carbide Composite by Hot-Pressing", *Fusion Engineering & Design*, Vol. 41, pp. 157-163, (1998)