

## 論文

## 비파괴 기법을 이용한 스마트 복합재료의 열충격손상평가

이진경<sup>+</sup>, 박영철<sup>\*</sup>, 이규창<sup>\*\*\*</sup>, 이준현<sup>\*\*\*\*</sup>

## Evaluation on Thermal Shock Damage of Smart Composite using Nondestructive Technique

Jin-Kyung Lee<sup>\*</sup>, Young-Chul Park<sup>\*\*</sup>, Kyu-Chang Lee<sup>\*\*\*</sup>, Joon-Hyun Lee<sup>\*\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

Tensile residual stress is occurred by difference of coefficients of thermal expansion between fiber and matrix is one of the serious problems in metal matrix composite(MMC). 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 with occurring of compressive residual stress in the matrix by its shape memory effect. A hot press method was used to create the optimal fabrication condition for a Shape Memory Alloy(SMA) composite. The bonding effect of the matrix and the reinforcement within the SMA composite by the hot press method was strengthened by cold rolling. In addition, acoustic emission technique was used to quantify the microscopic damage behavior of cold rolled TiNi/Al6061 shape memory alloy composite at low temperature. The damage degree for the specimen that underwent thermal shock cycles was also discussed.

## 초 록

금속복합재료에서는 강화재와 기지재 사이의 열팽창계수 차이에 의해 복합재료 내부에 잔류응력이 남아있어 복합재료 전체의 강도저하를 가져온다. 본 연구에서는 TiNi 형상기억합금을 강화재료로써 이러한 잔류응력 문제를 해결하기 위하여 이용하였다. TiNi 형상기억합금은 형상기억효과를 이용하여 복합재료의 잔류응력문제를 해결할 뿐만 아니라 복합재료의 인장강도를 증가시키는 역할을 한다. 핫프레스 방법에 의해 제작된 형상기억복합재료의 강도증가를 위하여 냉간압연을 실시하여 실험을 실시하였다. 이와 같이 제작된 형상기억복합재료의 저온에서의 미시적 손상거동을 평가하기 위하여 음향방출기법을 이용하였다. 또한 열충격을 받은 시험편의 손상에 대한 연구도 이루어졌다.

**Key Words** : 금속복합재료(Metal Matrix Composite), 잔류응력(Residual Stress), 형상기억합금(Shape Memory Alloy), 냉간압연(Cold Rolling), 음향방출(Acoustic Emission)

## 1. 서 론

형상기억합금이란 일반적인 금속재료와는 달리 재료에 외력이 가해져 탄성영역을 넘어 소성영역까지 변형을 하였더라도 일정한 온도 및 외력을 제거하게 되면 다시 원래의 형상으

로 돌아가는 합금을 말한다.(1-3) 이러한 형상기억합금에는 Ti-Ni계, Cu계, Fe계 등의 여러 종류가 있으며 이중 Ti-Ni계 형상기억합금은 다른 형상기억합금에 비하여 형상기억효과, 부식저항 그리고 안정성이 우수하여 실용화의 측면에서 가장 주목을 받고 있는 합금이다. 본 연구에서는 일반적인 복합재

<sup>+</sup> 동의대학교 기계공학과 비파괴전공, 교신저자(E-mail:leejink@deu.ac.kr)

<sup>\*\*</sup> 동아대학교 기계공학과 재료공학전공

<sup>\*\*\*</sup> 포항공과대학교기술연구원(RIST) 신소재전공

<sup>\*\*\*\*</sup> 부산대학교 기계공학부 비파괴 전공

료의 제조 및 응용에 단점으로 지적되는 강화재와 기지재간의 열팽창계수의 차이에 의해 발생하는 복합재료의 강도저하를 이와 같은 형상기억효과를 이용하여 보완하고자 한다. 특히 실용화 측면에서 많은 주목을 받고 있는 TiNi 계 형상기억합금과 알루미늄을 이용하여 TiNi/Al6061 형상기억복합재료를 제조하였다. TiNi/Al6061 형상기억복합재료는 기존의 순수한 알루미늄에 비하여 강도 증가는 물론 일반적인 섬유강화 복합재료에 비하여 강화재와 기지재 사이의 균열발생시 형상기억합금의 형상기억효과에 의하여 균열의 전파를 억제할 수 있는 장점도 가지고 있다. 이러한 특성 및 부식저항의 장점 때문에 기존의 알루미늄이 적용되어온 항공기 구조물의 여러 부품 및 해양구조물에도 다양한 적용이 기대되고 있다. 그러나 항공기 및 선박 등의 구조물은 매우 높은 낮은 온도 및 가혹한 환경하에서 운행되어야할 경우가 많다. 그러나 이러한 형상기억복합재료에 대하여 고온에서의 강도 및 손상특성에 대한 연구는 많이 이루어져왔으며 현재에도 다양한 연구가 진행 중에 있다. 특히 형상기억복합재료에 있어서 고온에서 형상기억합금의 형상기억효과에 의한 연구가 대부분을 차지하고 있다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 형상기억복합재료의 광범위한 적용을 위해서는 단지 고온에서 형상기억효과에 대한 연구뿐만 아니라 저온에서 형상기억복합재료의 손상기구 및 형상기억합금의 미시적 거동에 대해서도 연구가 꼭 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 저온에서의 미시적 손상거동 및 강도의 변화 등에 대하여 연구하였으며 특히 항공기 등은 반복적으로 열충격을 받기 때문에 형상기억복합재료에 대한 열충격 손상거동도 동시에 평가하였다. 특히 복합재료의 손상특성의 해석에 있어서 일반적인 파괴시험보다 더 유효한 비파괴 시험법의 하나인 음향방출기법을 이용하여 파손기구를 평가하였다.(4-6) 이러한 음향방출기법은 실시간으로 구조물의 안전성 및 손상정도를 평가할 수 있는 이점을 가지고 있다.

## 2. 재료 및 실험방법

본 연구에 이용된 형상기억합금은 직경 500 $\mu$ m의 TiNi(Ti-50(at%), (Ms=303K, As=327K, Af=337K, Mf=290K))와이어를 사용하였으며 기지재인 Al6061을 적층하고 그 사이에 TiNi 와이어를 일정한 간격으로 고정시킨 후 고온 프레스(hot press)를 이용하여 형상기억복합재료를 제조하였다. Table 1에서는 TiNi 형상기억합금의 물리적 성질을 나타낸 것이다. 이 때 Al6061 표면은 공기중에서 쉽게 산화되므로 아르곤 분위기에서 시험편을 제조하였다. 이렇게 제조한 복합재료인 경우 인장하중을 받을 경우 와이어와 기지재 사이에 계면분리현상이 두드러지기 때문에 다시 냉간 압연을 실시하여 최종적으로 시험편을 제조하여 저온인장시험을 실시하였다. 저온(-45 $^{\circ}$ C)을 유지하기 위하여 드라이 아이스와 알코올을 이용한 챔버를 제작하여 인장시험기에 결합하여

1mm/min으로 인장하중을 가하여 실험을 실시하였다. Fig. 1에서는 실험개요도를 나타낸 것으로 시험편에 인장하중이 가해지면 재료내부의 균열발생 및 성장에 의해 탄성파가 발생하고 발생한 탄성파는 시험편에 부착된 AE 센서에 의해 감지된다. 그러나 초기 인장하중을 가하지 않더라도 드라이 아이스와 알코올의 반응에 의해 AE 센서에는 다수의 신호가 감지된다. 이러한 신호를 제거하기 위하여 일정한 값 이상(50dB)의 문턱전압값을 설정하였다. 한편 인장하중에 의해 발생한 탄성파는 AE 센서에 의해 감지된 후 프리앰프에서 40dB 증폭되어 AE 파라미터들에 의해 분석되어지며 본 연구에 사용된 AE 센서는 광대역 센서(100-1200kHz)를 사용하였다. 한편 TiNi/Al6061 후판(plates) 복합재 시험편에 열충격을 주기 위하여 열충격 장치가 제작되었으며 열충격 실험을 위하여 먼저 시험편 아래에 있는 냉각장치(223 K)에 시험편을 10분 동안 냉각시킨다. 10분 동안 냉각된 후 시험편을 다시 상온에서 10분동안 유지시킨 후 다시 냉각시키는 방법으로, 반복적으로 열충격을 가하였다. 복합재료의 열충격 특성을 평가하기 위하여 50, 100, 300, 500, 700회로 열충격을 가하여 시험편의 손상을 평가하였다. 이와 같이 열충격을 받은 시험편에 대하여 인장하중을 가하여 열충격 사이클에 따른 인장강도의 변화를 관찰하였다. 또한 음향방출기법을 이용하여 열충격을 받은 TiNi/Al6061 후판 복합재의 미시적 파괴특성을 평가하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 압하율과 와이어 체적률에 따른 인장강도

Fig. 2와 Fig. 3에서는 TiNi 와이어의 체적율과 압하율(Reduction of Area)에 따른 강도의 변화를 나타낸 것으로 먼저 압하율을 전혀 가지 않은 0%인 경우 와이어의 체적율이 증가함에 따라 강도도 점차적으로 증가하는 현상을 나타내었으며 압하율이 10%인 경우 와이어의 체적율이 7%로 증가함에 따라 3%, 5%의 체적율을 나타내는 시험편보다 높은 인장강도를 나타내었다. 이러한 결과는 기지재의 강도보다 와이어의 강도가 더 높기 때문에 강화재인 와이어의 체적율이 증가할수록 인장강도도 높게 나타남을 알 수 있다. 그러나 20%의 압하율에서는 체적율이 5%인 시험편에서의 인장강도가 가장 높게 나타나고 3%의 체적율을 나타내는 시험편에서 가장 낮은 인장강도를 나타내었다. 따라서 20%이상의 압하율에서는 와이어의 체적율이 증가하더라도 인장강도는 더 이상 증가하지 않고 오히려 감소할 수 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과에 의해 TiNi/Al6061 형상기억복합재료를 제조할 때 저온에서의 최고의 강도를 위한 최적의 조건을 찾는 데 하나의 기초자료가 될 수 있음을 알 수 있다. 한편 같은 체적율에서 압하율을 변화시킨 경우 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 압하율이 증가함에 따라 인장강도값이 저하하는 현상을 나타내었다. 이러한 결과는 고온에서의 압하율을 증가시켰을 경우의 인장강도의 변화와는 상반된 결과를 나타내었다. 따라서 저온에서

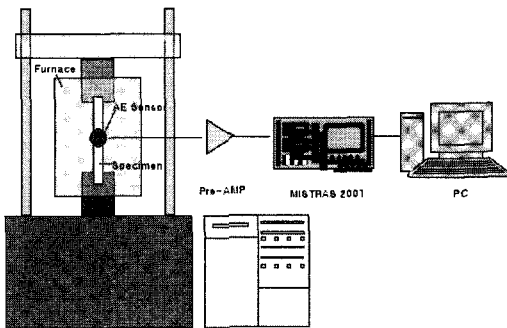


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up.

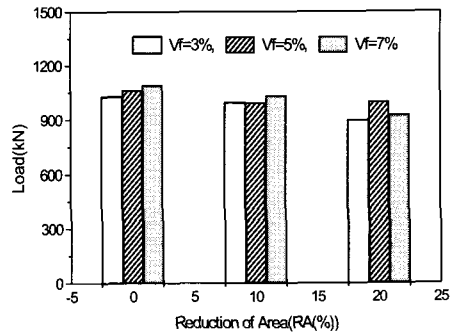
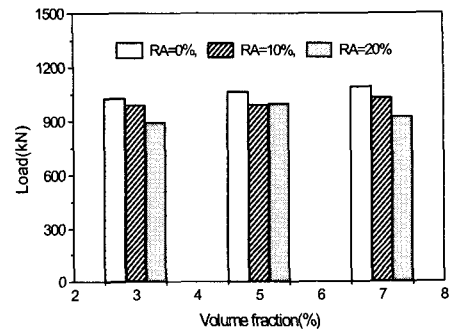


Fig. 2 Strength variation according to the reduction of area.

Table 1 Mechanical properties of TiNi alloy

	Temp.	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Tensile Strength (MPa)
TiNi	R.T.	41	0.43	284
	363K	83	0.43	715



TiNi/Al6061 형상기억복합재료를 사용할 경우 제조시 hot press 방법에 의해 제작된 시험편에 전혀 냉간압연을 가하지 않고 사용하는 것이 더욱더 효과적임을 알 수 있다.

3.2 복합재료의 미시적 손상에 따른 AE 신호특성

저온에서 TiNi/Al6061 형상기억복합재료가 인장하중을 받을시 재료내부의 강화재와 기지재의 접합균열발생 및 이들 균열들의 성장 등과 같은 미시적 손상에 따른 AE 신호의 특성을 관찰하였다. Fig. 4는 강화재인 TiNi 형상기억합금의 체적율이 7% 함유된 시험편에서의 압하중의 변화에 따른 AE 카운트의 변화를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 압하중이 0%인 시험편에서는 복합재료의 항복점 주위에서 다수의 AE 신호가 발생하여 하중이 점차적으로 증가함에 따라 AE 신호의 카운트는 거의 변화를 보여주지 않는다. 그러나 최종파단시점의 약 70% 지점에서 급격히 AE 카운트가 단계적으로 발생하고 파단직전에 또다시 급격히 AE 카운트가 발생함을 알 수 있다. 이에 비하여 5%의 압하중을 나타내는 시험편인 경우 압하중을 가하지 않은 시험편에 비하여 AE 카운트의 발생시점이 늦어지고 발생하는 경향도 복합재료의 소성영역이 증가 함에따라 급격히 증가하여 시험편이 파단되는 양상을 나타내었다. 그리고 압하중이 가장 높은 20%인 경우 앞의 0%, 10%의 압하중을 나타내는 시험편에 비하여 AE 카운트의 발생시점이 가장 늦게 발생하며 짧은 시간에 단계적으로 증가하여 최종 파단에 도달하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 압하중에 따라 AE 카운트의 변화결과에서 압하중이 증가함에 따라 AE 카운트의 발생 시점이 점차적으로 늦추어지는 경향이 있으며 총 발생시간도 짧아짐을 알 수 있다. 이러한

Fig. 3 Strength variation according to the volume fraction of TiNi.

결과는 압하중이 증가함에 따라 강화재와 기지재 사이의 결합이 훨씬 강화되어 복합재료의 소성변형이 어느 정도 진행하더라도 복합재료 내부에는 균열의 발생 및 성장이 상당히 지연된다는 것을 의미한다. 그러나 균열이 발생한 후에는 급속히 성장하여 파단되는 것을 알 수 있다. 이것은 압하중을 증가시킨 시험편에서 인장하중을 가하였을 경우 재료내부에 균열이 발생하고 난 후 하중이 증가하면 순식간에 파단에 도달하는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 저온에서 급격한 파단을 방지하기 위해서는 hot press 방법으로 제작된 시험편을 될 수 있으며 냉간압연을 가하지 않는 것이 인장강도 및 급격한 파단을 방지할 수 있음을 말해준다.

3.3 복합재료의 열충격 특성

본 연구에서는 형상기억복합재료의 열충격 특성을 평가하기 위하여 열충격 시험기를 제작하였으며 실험결과를 나타내었다. Fig. 5는 열충격 사이클이 증가함에 따른 강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 TiNi/Al6061 후판 복합재는 열충격 사이클이 증가함에 따라 인장강도 및 항복강도는 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 열충격 사이클이 증가함에 따라 후판 복합재의 기계적 성질이 점차적으로 취화되고 강화재와 기지재사이의 경계에서

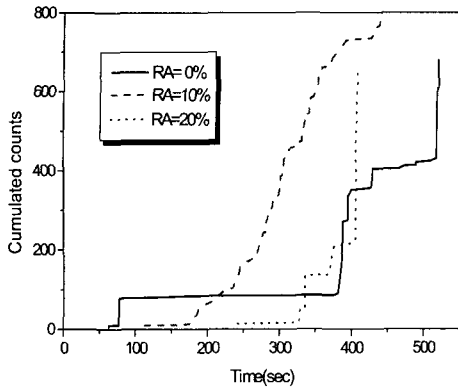


Fig. 4 Cumulated AE count according to reduction of area(RA).

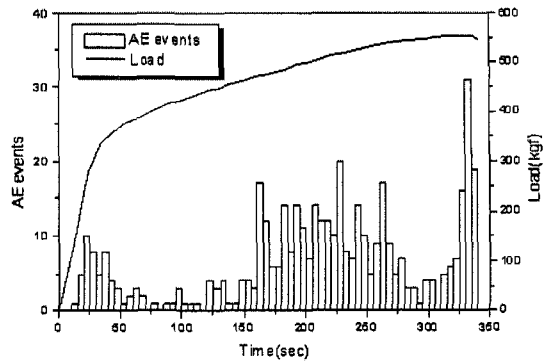


Fig. 6 Relationship between the AE events and tensile strength(500 cycles).

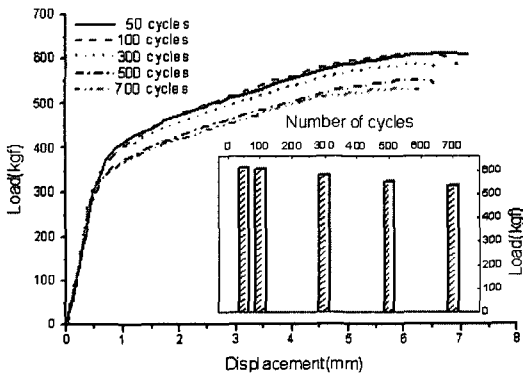


Fig. 5 Tensile strength according to the thermal shock cycle.

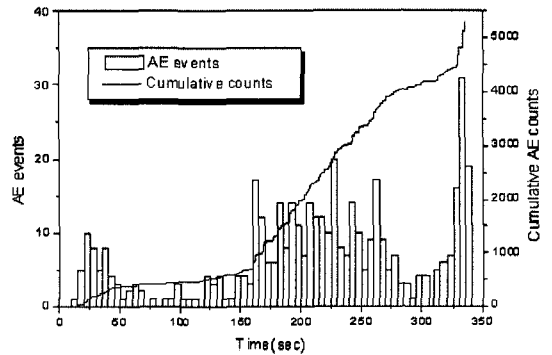


Fig. 7 Relationship between the AE events and cumulative AE counts (500 cycles).

접합강도가 점차적으로 약화되기 때문에 복합재료의 강도가 감소하는 것으로 판단된다. 그러나 탄성계수는 열충격 사이클이 증가하더라도 변동이 거의 없었다.

Fig. 6에서 Fig. 8은 500회의 열충격을 받은 시험편에 대한 손상거동과 AE신호와의 관계를 나타낸 것으로 Fig. 6에서는 500회의 열충격을 받은 시험편에서의 하중과 AE 사상수와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 하중초기 탄성영역에서 많은 AE신호가 발생하고 있음을 알 수 있다. AE 사상수는 소성영역초기부터 점차적으로 감소하지만 복합재료의 최종파단의 50% 지점부터 다시 증가하는 경향을 보여주고 있으며 최대 하중지점에서 AE 사상수는 급격히 증가하고 있다. 하중 초기에 다수의 AE 사상수가 발생하는 것은 복합재료 내부에 인장하중이 가해짐과 동시에 debonding 현상에 의해 AE신호가 발생하였기 때문이다. 일반적으로 금속재료에서 탄성영역에서는 AE신호가 거의 발생하지 않는 현상에 비하여 복합재료에서 복합재료 내부의 균열과 같은 결함에서 소수의 AE신호가 발생한다. 그러나 500회의 열충격을 받은 시험편인 경우 열충격에 의해 강화재와 기지재 사이에 결합력이 약해져 외부의 하중이

가해질 경우 debonding에 의해 하중 초기 소수의 AE신호가 발생한다. 소성영역 초기에 AE 사상수가 감소한 것은 미리 탄성영역에서 외부 하중에 의해 다수의 debonding현상이 발생하였기 때문이라 사료된다. 그러나 하중이 점차적으로 가해짐에 따라 복합재료의 급격한 소성거동과 debonding 현상의 발생에 다수의 AE 사상수가 발생하고 있음을 알 수 있다. 마지막으로 복합재료가 완전 파단됨과 동시에 fiber의 파단과 거시적 균열의 발생, 성장에 따라 다수의 AE 사상수가 발생한다.

Fig. 7에서는 AE 사상수와 AE 카운터와의 관계를 나타낸다. 하중초기 AE 사상수의 증가에 따라 AE 카운터 수는 점차적으로 증가하고 있지만 AE 사상수가 감소하는 영역, 즉 소성영역의 초기에서는 카운터 수는 거의 증가하지 않는다. 완전파단의 약 50% 지점에서 AE 카운터는 급속히 증가하고 증가속도는 최종파단의 약 80% 지점에서 급속히 감소한다. 이와 같이 AE 카운터의 변화를 통해서 복합재료의 손상정도를 추정할 수 있다. Fig. 8에서는 하중증가에 따른 AE 에너지의 변화를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 탄성영역과 소성영역 초기에서는 10 이하의 에너지 신호가 발생하지만 소성영역이 진행됨에 따라 10

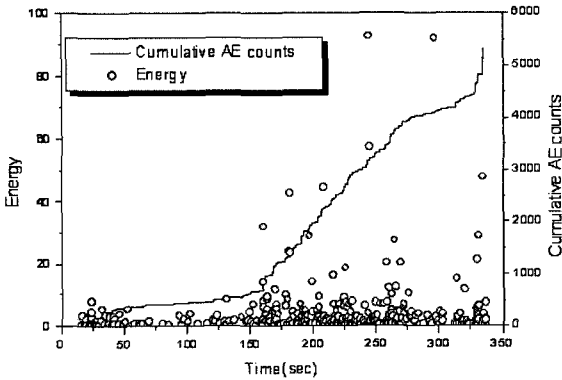


Fig. 8 Relationship between the energy and cumulative AE count.

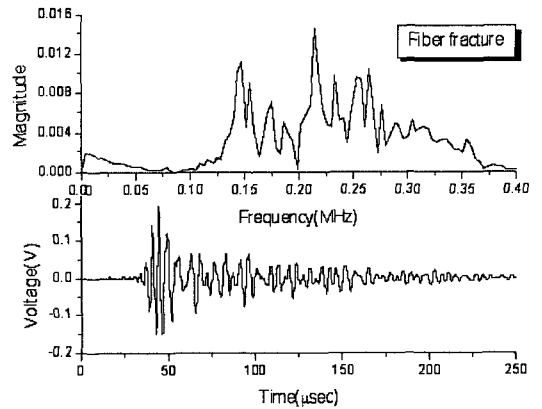


Fig. 10 Typical waveform and spectrum due to the fiber fracture.

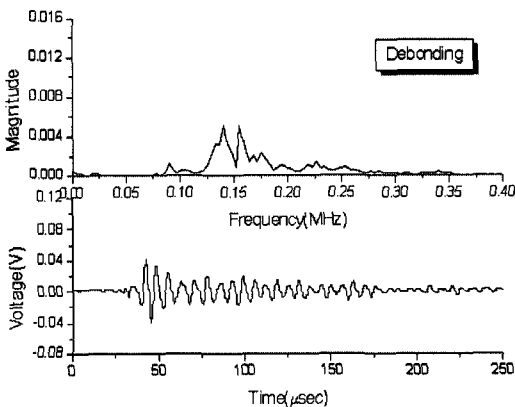


Fig. 9 Typical waveform and spectrum due to the debonding.

### 결론

저온에서의 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 미세적 손상에 따른 음향방출 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) TiNi 형상기억합금의 체적률이 증가함에 따라 복합재료의 인장강도는 증가하였지만 냉간압연을 실시하여 압하율을 증가시킨 결과 압하율이 증가함에 따라 인장강도는 감소하는 경향을 나타내었으며 열충격 사이클이 증가함에 따라 인장강도는 선형적으로 감소하였다.
- (2) AE 신호평가 결과 AE 카운트는 저온에서 복합재료의 미세적 손상을 평가하고 손상정도 및 잔여수명(최종파단의 70%) 등을 평가하는데 유용한 파라미터이었다. 한편 열충격을 받은 복합재료에 대하여 AE 사상수는 하중초기 탄성영역에서는 debonding에 의해 다수 발생하지만 소성 영역의 초기부터는 감소하였으며 최대하중에서 다시 급격히 증가하였으며 AE 사상수, 카운터, 에너지가 미세적 손상거동을 평가하는데 유용한 파라미터이었다.
- (3) Debonding에 의해 발생한 파형은 펄스형태이며 160 kHz의 주파수 특성을 보여주고 fiber의 파단에 의한 신호는 높은 크기의 펄스형이지만 주파수 영역은 220 kHz를 나타내었다.

### 후기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(KRF-2005-206-D00001)

이상의 에너지를 갖는 신호가 다수 발생하고 있다. 이러한 결과는 10 이상의 에너지를 가지는 AE신호가 발생하면 복합재료 원전파단의 50% 지점까지 도달하였음을 나타낸다. 이와 같은 결과로부터 AE 파라미터 중 AE 사상수, 카운터 그리고 에너지들은 열충격을 받은 복합재료의 손상거동 및 손상정도를 평가하는데 유용한 파라미터임을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에서는 복합재료의 미세적 손상거동에 따른 전형적인 파형과 주파수 특성을 보여주고 있다. Fig. 9에서는 하중초기 debonding에 의해 발생하는 신호의 파형과 주파수 특성을 보여주고 있다. 파형은 펄스형과 최대 160 kHz의 주파수 특성을 보여주고 있다. 발생하는 파형의 크기는 debonding의 크기 및 방향 등에 따라 다양하게 나타나지만 주파수는 160 kHz의 주파수 특성을 보여주었다. Fig. 10에서는 fiber의 파단에 의해 발생하는 파형과 주파수 특성을 나타낸 것으로 대단히 높은 크기의 펄스형 파형과 최대 주파수가 220kHz를 나타내었다.

파형은 debonding의 것과 비슷하지만 주파수 영역은 fiber의 파단에 의한 신호가 높은 주파수 특성을 나타내었다.

## 참고문헌

- 1) 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, 1985, pp. 1033-1038.
- 2) Prahlad, H., and Chopra, I, "Experimental Characterization of Ni-Ti Shape Memory Alloy Wires under Complex Loading Conditions," *Smart Structures and Materials 1999: Smart Structures and Integrated Systems*, 1999, pp. 604-616.
- 3) Arup K., Maji and Ihosvany Negret, "Smart Prestressing with Shape-Memory Alloy," *J. of Engineering mechanics*, Vol. 124, No. 10, 1998, pp. 1121-1128.
- 4) Bukkapatnam STS., Kumara SRT. and Lakhtakia A, "Analysis of Acoustic Emission Signals Machining," *J. of Manufacturing Science & Engineering*, Vol. 121, No. 4, 1999, pp. 568-576.
- 5) Okafor, A.C., and Birdsong, S.R, "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*, 1999, pp. 115-124.
- 6) Lee, J.K., Lee, J.H., Choi, H.S. and Lee, M.R, "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, 2000, pp. 2520-2528.