

[논문] - 비파괴검사학회지
*Journal of the Korean Society
 for Nondestructive Testing*
 Vol. 20, No. 5 (2000. 10)

음향방출과 SFC 시험법에 의한 금속복합재료의 기지재 열처리 효과에 따른 미시적 파손기구 트서 평가

Evaluation of Microscopic Deformation Behaviors of Metal Matrix Composite due to Heat Treatment by means of SFC Test and Acoustic Emission

강문필*, 이준현**

Moon-Phil Kang* and Joon-Hyun Lee**

초 록 금속기지 복합재료의 미시적 파손기구는 작용하중의 방향, 재료의 열처리 상태, 기지재 및 강화재의 특성, 섬유체적률 등 여러 인자의 영향을 받는다. 이중 특히 재료의 열처리는 금속기지 복합재료의 기계적 특성을 지배하는 주요한 인자인 강화섬유와 기지재 사이의 계면특성에 큰 영향을 준다. 강화섬유와 기지재는 매우 큰 열팽창계수 차이를 가지기 때문에 금속기지 복합재료의 제조과정에 있어서 급격한 온도강하가 있을 경우에는 강화섬유와 기지재 사이의 계면에서는 잔류응력이 형성되며 이 때 발생한 잔류응력은 금속복합재료의 파손기구는 물론 기지재와 강화섬유 사이의 계면전단강도에도 중대한 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 금속복합재료에 있어서 기지재와 강화재 사이의 계면전단강도에 대한 잔류응력의 영향을 평가하는 것은 금속복합재료의 실질적인 응용측면에서는 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 복합재료에 있어서의 음향방출 기법과 SFC시험법을 동시에 이용하면 기지재와 강화재의 균열 및 기지재와 강화재 사이의 계면분리현상에 의한 미시적 파손기구를 명확하게 분리, 관찰할 수 있는 크나큰 이점이 있다. 따라서 본 연구에서는 음향방출기법과 SFC시험법을 이용하여 금속복합재료의 열처리 효과에 따른 미시적 파손기구 및 계면전단강도 변화특성을 체계적으로 연구, 고찰하였다.

주요용어: 금속기지 복합재료, 열처리, 열팽창계수, 잔류응력, 계면전단강도, SFC시험법, 음향방출

Abstract Metal matrix composites(MMCs) have been rapidly becoming one of the strongest candidates for structural materials for high temperature application. It is well recognized that MMCs always experience at least one large cool-down from processing temperature before any significant applied service loading. Due to the large difference in thermal expansion coefficient between the fiber and matrix, large thermal residual stresses generally develop in composites. It was reported from many previous studies that the effects of thermal residual stress on mechanical properties and fracture behavior were much more complex and dramatic than conventional engineering materials. Therefore it is crucial to evaluate the effect of heat treatment which changes the characteristic of distribution of thermal residual stress in MMCs. Single fiber composite(SFC) test based on the balance in a micromechanical model is a quite convenient method to evaluate interfacial shear strength(IFSS) and the failure mode of composite. In this study the effect of heat treatment on IFSS and the microscopic failure mechanism of MMC is investigated by combining acoustic emission(AE) technique with SFC test. The characteristic of AE signal, IFSS and microscopic failure mechanism due to heat treatment condition is discussed.

Keywords: metal matrix composite, heat treatment, coefficient of thermal expansion, residual stress, interfacial shear strength, SFC test, acoustic emission

1. 서론

금속기지 복합재료는 기존의 금속재료에 비해서 비강도, 비강성, 내열성, 내마모성 및 내구성이 우수할 뿐만 아니라 고분자기지 복합재료에 비해서도 내충격성 및 강성이 우수하며 고온에서의 열적 안정성이 높다. 그리고 극저온 특성 및 열팽창 특성도 우수하여 금속기지 복합재료는 자동차, 선박 및 항공우주산업 분야에 이르기까지 그 응용범위가 다양하다. 최근에 이러한 이점으로 그 중요성이 크게 대두되었으나 실제로 이와 같은 금속복합재료의 응용을 위해서는 먼저 재료에 대한 신뢰성의 확보가 이루어져야 한다. 이러한 측면에서 최근 금속기지 복합재료의 기계적거동, 파괴특성 및 파괴기구를 지배하는 강화재의 분포상태, 형태, 기지재 입자의 크기 등이 재료의 미시적 파괴기구에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 행하여져왔다[1-5]. 금속기지 복합재료의 미시적 파손기구는 작용하중의 방향, 재료의 열처리 상태, 기지재 및 강화재의 특성, 섬유체적률 등 여러 인자의 영향을 받는다. 이중 특히 재료의 열처리리는 금속기지 복합재료의 기계적 특성을 지배하는 주요한 인자인 강화섬유와 기지재 사이의 계면특성에 큰 영향을 준다. 강화섬유와 기지재는 매우 큰 열팽창계수(coefficient of thermal expansion: CTE) 차이를 가지기 때문에 금속기지 복합재료의 제조 과정에 있어서 용탕(기지재)의 용침이나 급격한 온도강하가 있을 경우에는 강화섬유에 비해 기지재의 급격한 수축이 일어나 강화섬유와 기지재 사이의 계면에서는 잔류응력이 형성되며 이 때 발생한 잔류응력은 금속복합재료의 파손기구는 물론 기지재와 강화섬유 사이의 계면전단강도에도 중대한 영향을 미칠 수도 있다[6-10]. 일반적으로 복합재료에 있어서 계면전단강도가 너무 낮으면 복합재료내의 섬유에 의한 강화효과를 기대하기 어렵고, 반면 계면전단강도가 너무 높으면 용력에 의한 균열의 진전에 대한 저항성이 약하여 복합재료의 파괴인성치를 저하시킨다. 따라서 금속복합재료에 있어서 기지재와 강화재사이의 계면전단강도에 대한 잔류응력의 영향을 평가하는 것은 금속복합재료의 실질적인 응용측면에서는 매우 중요한 과제라 할 수 있다[11-12]. 한편 이러한 복합재료의 강화섬유와 기지재 사이의 계면전단강도의 해석을 통한 미시적 파괴특성에 관한 연구에서 최근 SFC시험법(single fiber composite test)이 이용되어 왔다. SFC 시험법은 종래의 일반적인 bulk 복합재료에서 보여지는 복잡한 미시적 파손기구와는 달리 기지재와 강화재의 균열 및 기지재와 강화재 사이의 계면분리현상에 의한 미

시적 파손기구를 명확하게 분리, 관찰할 수 있는 이점이 있어 복합재료의 미시적 변형기구를 이해하는데 매우 유용하게 이용되어져 왔다[13-14]. 특히 금속복합재료의 기계적 특성에 대한 잔류응력의 영향을 검토하는 측면에 있어서 SFC시험편의 경우 실제 구조물에 적용되는 금속복합재료와 비교해 매우 낮은 강화섬유 체적비를 가지고 있기 때문에 잔류응력의 역할을 보다 명확하게 관찰할 수 있는 이점이 있다. 또한 음향방출(Acoustic Emission, AE)기법은 재료 내부의 미시적 동적거동을 on-line 모니터링할 수 있는 장점을 가지고 있어 최근 복합재료의 미시적 파손기구 해석에 활발하게 응용되고 있다[15-17]. 따라서 본 연구에서는 잔류응력이 복합재료의 계면에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 SFC시험편과 음향방출(AE)법을 이용하여 single fiber composite에서의 잔류응력이 기지재와 강화섬유 사이의 계면전단강도에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 특히 본 연구에서 금속복합재료의 계면전단강도의 평가는 SFC시험편과 AE기법으로 시험편의 임계파단길이(critical fragmentation length)를 구하여 Kelly & Tyson[18]에 의해 제시된 다음 식을 사용하였다.

$$\tau_i = \frac{d\sigma_f}{2l_c} \quad (1)$$

여기서, τ_i 는 계면전단강도, d 는 섬유의 직경, σ_f 는 섬유의 인장강도, l_c 는 임계파단길이

2. 재료 및 실험방법

본 연구에서는 강화재로서 탄화규소섬유(SiC, Nicalon)를 기지재로 Al6061 알루미늄합금을 사용하였다. 강화섬유의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

시험편은 dog-bone 형상으로 SiC섬유가 강화되지 않은 Al6061 기지재 시험편과 하중축에 평행하게 SiC섬유가 강화된 SiC/Al6061 single fiber composite를 준비하였다. Al6061 기지재 시험편은 알루미늄을 전기로내에서

Table 1 Mechanical properties of SiC fiber

	Density (cm ³)	Diameter (μm)	Young's modulus (GPa)	Strength(GPa)	
				at 20°C	at 1400°C
SiC	2.6	10~20	180	2	0.5

730°C의 온도에서 용융시켜서 금형에 주입시켜서 제조하였는데, 용탕주입에 필요한 금형의 온도인 450°C 정도를 유지하기 위해서 730°C로 유지되고 있는 전기로내에 금형을 넣어 19분동안 예열한 후 용탕을 주입하였다. 그런 다음 약 30초간 응고시킨 후 담금질(quenching)하였다. SiC/Al6061 복합재료는 single fiber가 고정된 금형에 주입시킨 것을 제외하고는 Al6061 기지재의 제조방법과 동일하다. Fig. 1에 시험편의 형상이 나타나 있다. 그리고 잔류응력이 복합재료에 미치는 영향을 알아보기 위하여 시험편을 제작한 후 일부 시험편에 대하여 풀림(annealing)처리를 하였다. 풀림은 Fig. 2에서 보여주듯이 담금질된 시험편을 360°C로 유지되고 있는 전기로에 120분간 방치해 두었다가 노 내에서 냉각시켰다.

음향방출(AE)법을 병행한 SFC시험법을 위한 실험장치의 개요도를 Fig. 3에 나타내었다. 인장시험은 최대하중 10ton의 유압식 재료시험기(Instron 8501)를 사용하였으며 인장은 0.05mm/min의 변위제어를 하였다. 공진형 AE 센서(R15, PAC)를 시험편의 중앙에 부착하여 AE신호를 측정하였다. 센서에 의해 검출된 신호는 μV 수준의 아주 미약한 신호이므로 계측기에서 검출가능하도록 100~300kHz의 대역필터를 가진 프리엠플에 의해 40dB 증폭되어 AE신호분석장비로 보내졌다. AE신호분석장비로는

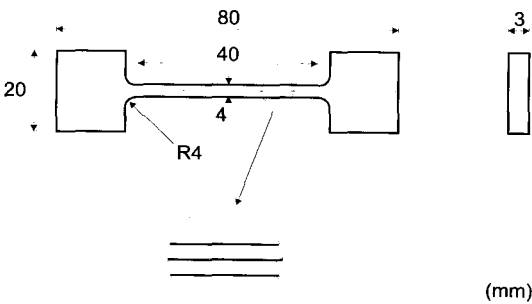


Fig. 1 Dimensions of SFC test specimen

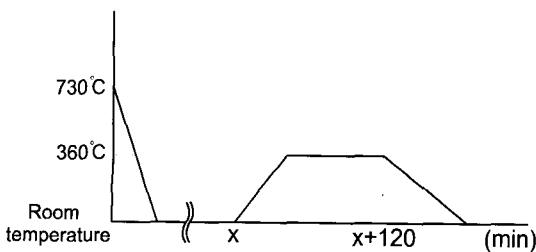


Fig. 2 The principle of annealing in this study

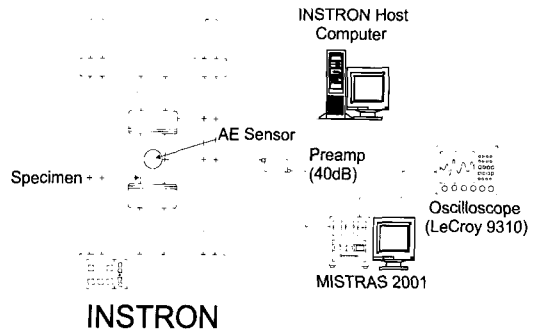


Fig. 3 Schematic diagram of instrumentation for tension test

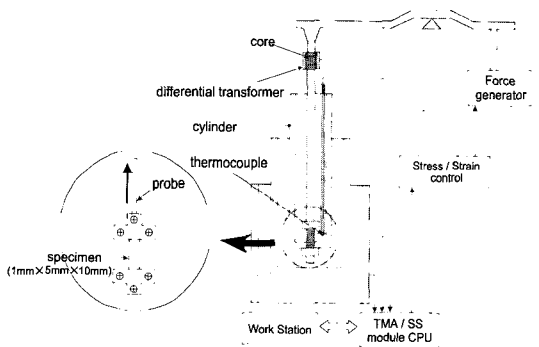
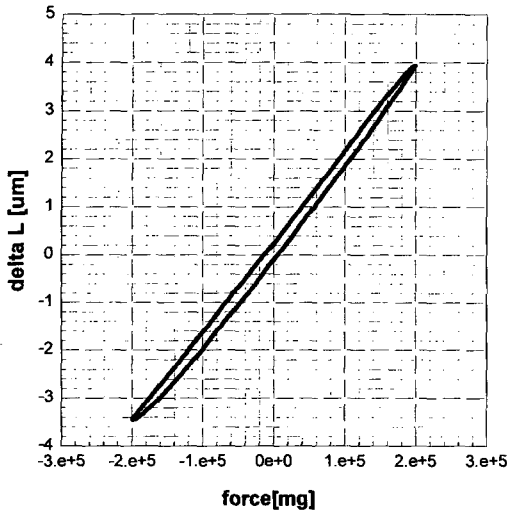


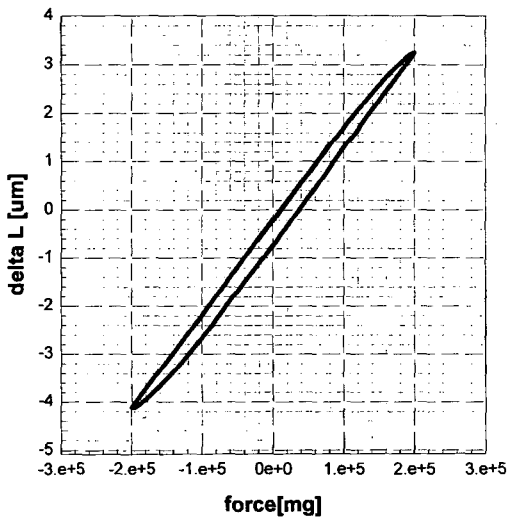
Fig. 4 Schematic diagram of instrumentation for TMA-SS

MISTRAS2001(PAC)이 사용되었으며 전기적, 기계적 잡음 제거를 위한 문턱전압값(threshold level)은 17.8mV (45dB)로 설정되었다. 잔류응력의 영향을 평가하기 위하여 먼저 담금질한 시험편의 인장시험시에 발생하는 AE 신호특성을 파악한 후 풀림처리된 시험편에 대하여 실험하였다.

또한 본 연구에서는 잔류응력이 기지재의 기계적 성질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 TMA-SS(Thermo Mechanical Analyzer 120C, Seiko)를 사용하여 Al6061 기지재의 이력곡선을 측정하였다. Al6061 기지재 시험편은 1mm×5mm×10mm 크기의 막대 모양으로 준비하여 연마한 다음 시험편의 양끝을 실린더와 probe의 끝에 있는 척(chuck)에 시료집계를 통해 각각 연결한다. 장치의 대략적인 모습은 Fig. 4에 나타나 있다. 시료가 놓이는 실린더는 차동변환기(differential transformer)와 연결되어 있고 probe는 변환기속에 있는 core와 연결되어 있다. force generator에 의해 probe로 하중이 전달되고 이 하중은 시험편으로 전달되어 압축력과 인장력을 주게 된다.



(a) quenched Al6061 matrix



(b) annealed Al6061 matrix

Fig. 5 The displacement-force hysteresis loop for Al6061 specimens

하중이 가해짐에 따라 시험편의 길이가 변하면 척과 연결되어 있는 probe가 시험편의 길이변화만큼 움직이고 probe와 곧바로 연결된 core가 움직이게 된다. 그래서 변환기 속에서의 core의 위치가 변하고 여기에서 전기적 신호가 출력되어 변화량을 측정하게 된다. 이 장치에서는 ±500g 범위의 힘을 가할 수 있고 최소 0.02 μm의 길이

의 변화를 측정할 수 있다. 본 연구에서 가한 힘은 상에서 -200g에서 200까지 30g/min의 비율로 가해졌다. Fig. 5에 Al6061 지지재의 이력곡선을 나타내었다. 실험 결과에 보여주는 바와 같이 Fig. 5(b)의 풀림처리한 Al6061 지지재는 Fig. 5(a)의 담금질한 Al6061 지지재에 비하여 약 0.2 μm 정도의 영구변형이 증가하였음을 알 수 있는데, 이는 풀림처리를 함으로써 담금질한 시험편의 내부에 존재하고 있는 잔류응력이 국부적으로 해소됨에 따라 재료가 연화되어 담금질한 시험편에 비해 연성이 증가하였기 때문으로 해석된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 열처리효과에 따른 AE특성 평가

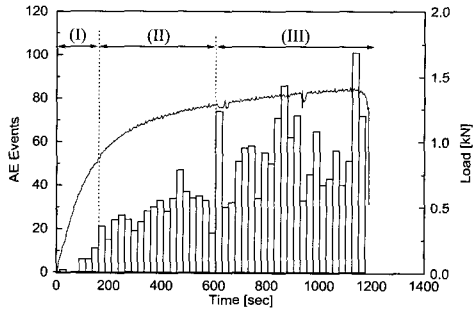
본 연구에서는 열처리 효과에 따른 지지재와 강화섬유 사이의 계면특성을 평가하기 위해 SFC 시험 동안에 강화섬유의 파단을 AE기법을 이용하여 연속적으로 on-line 모니터링 하였다. 열처리 효과에 따른 계면특성을 비교하기 위해 담금질(quenching) 처리한 Al6061 지지재와 SiC/Al6061 복합재료에 대한 SFC시험을 행한 후, 담금질 후 풀림(annealing) 처리한 Al6061 지지재와 SiC/Al6061 복합재료에 대한 SFC시험을 행하여, 각각의 시험편에 대한 AE신호 특성을 비교 분석하였다. Fig. 6는 각각의 시험편에 대한 하중과 AE 사상수의 변화를 나타낸다. Fig. 6의 (a)와 (b)의 담금질된 시험편의 경우에 하중의 증가에 따라 AE 사상수 발생률도 증가하는 경향을 보이고 있으며 그 증가 특성에 따라 다음과 같이 세 영역(stage)으로 나누었다.

stage(I) : 0 ~ 180sec의 탄성변형영역

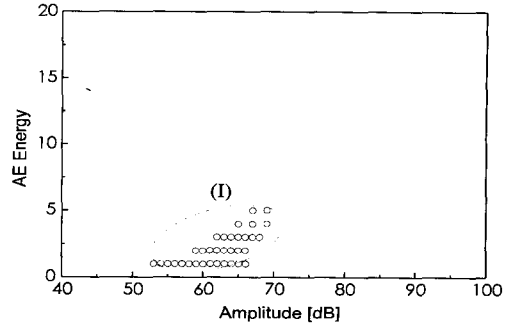
stage(II) : 180 ~ 620sec의 소성변형 전반기 영역

stage(III) : 620sec 이후의 소성변형 후반기 영역

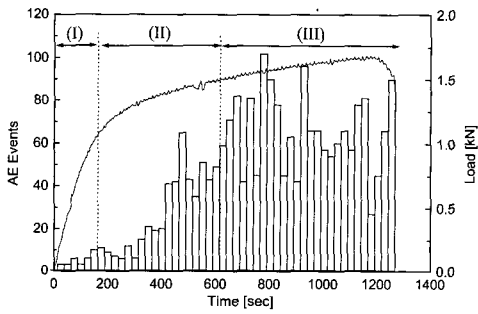
Fig. 6(a)의 담금질된 Al6061 지지재에서 영역(I)의 AE 사상수 발생률은 비교적 적는데 이는 미소균열의 발생 및 성장률이 크지 않고 재료가 변형에너지를 방출하지 않고 내부에 저장이 가능하기 때문이다. 영역(II)에서는 AE 사상수 발생률이 서서히 증가하는데 이는 응력이 증가함에 따라 지지재 내에 존재하는 미소기공(porosity) 및 개재물(inclusion)과 지지재 사이의 결합을 끊는 미소균열에 의한 변형에너지를 방출에 기인한 것이다. 영역(III)에서는 앞의 영역들에 비해 AE 사상수 발생률이 비교적 급격하게 증가함을 보여주며 이것은 계속되는 미소



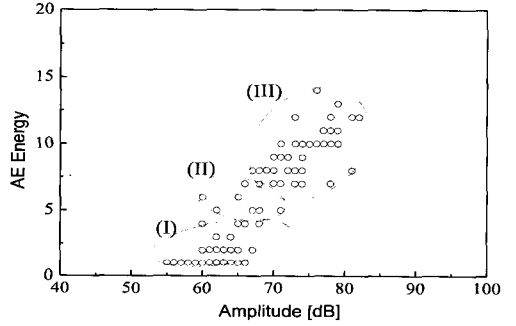
(a) Quenched Al6061 matrix



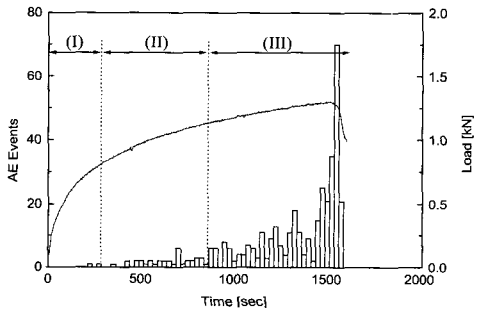
(a) Quenched Al6061 matrix



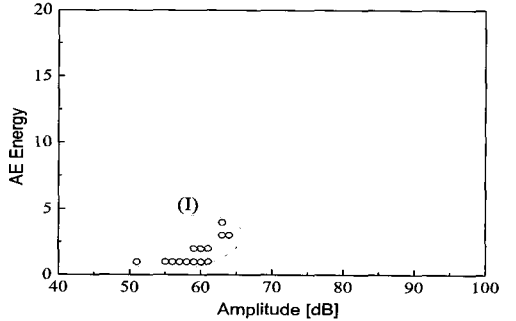
(b) Quenched SiC/Al6061 composite



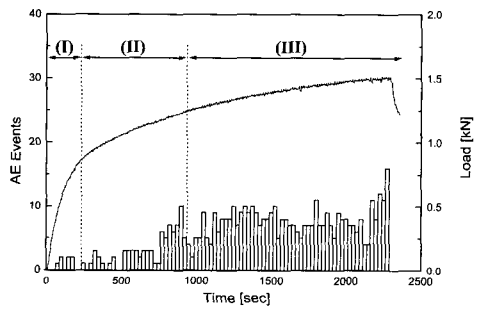
(b) Quenched SiC/Al6061 composite



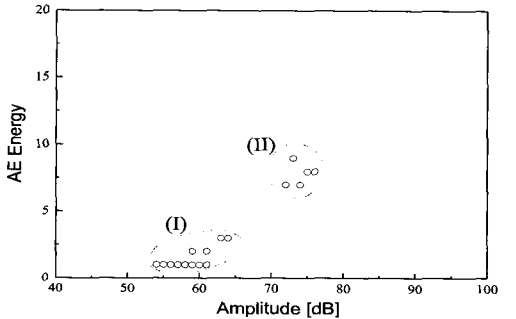
(c) Annealed Al6061 matrix



(c) Annealed Al6061 matrix



(d) Annealed SiC/Al6061 composite



(d) Annealed SiC/Al6061 composite

Fig. 6 AE events and load vs. time

Fig. 7 AE energy vs. amplitude

균열의 증가와 앞에서 생성된 미소균열들의 합체(link-up)에 의한 것이다. Fig. 6(b)의 담금질된 SiC/Al6061 복합재료의 경우에 Fig. 6(a)의 Al6061 기지재에 비해 영역(II)에서 AE 사상수 발생률은 급격히 증가한다. 이는 기지재내에 존재하는 미소기공들에서의 미소균열의 발생과 함께 부분적인 섬유와의 파단에 기인하며 영역(III)에서는 계속되는 미소균열의 증가와 함께 그것들의 성장과 합체, 그리고 강화섬유의 파단 및 강화섬유와 기지재 사이의 계면분리(debonding)현상에 의한 것이다. 마찬가지로 Fig. 6의 (c)와 (d)의 풀림된 시험편도 하중의 증가 특성에 따라 다음과 같이 구분하였다.

- stage(I) : 0 ~ 250sec의 탄성변형영역
 stage(II) : 250 ~ 900sec의 소성변형 전반부 영역
 stage(III) : 900sec 이후의 소성변형 후반부 영역

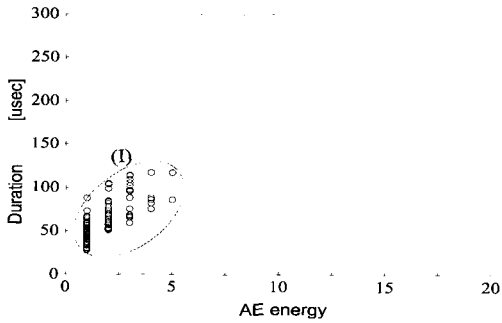
Fig. 6(c), (d)의 결과에서 보여주는 바와 같이 풀림된 시험편도 담금질 시험편에서와 마찬가지로 하중이 증가하여 파단되어질 때까지 AE 사상수가 점점 증가함을 알 수 있으며 담금질된 시험편과 비교해 볼 때 내부잔류응력이 소거되고 재결정 상태를 거쳐 결정립이 성장하는 어닐링된 시험편이 훨씬 더 적은 AE 사상수 발생을 나타냄을 알 수 있다. 이는 풀림된 시험편의 경우 결정립 성장과 함께 전위의 집적으로 인한 응력집중이 생기는 결정립계의 면적이 상대적으로 줄어들며 담금질시 기지재 내에 존재하는 개재물(inclusion)과 기지재 사이에 집중되어진 응력이 풀림에 의해 상당부분 해소되었기 때문이다. 한편 시험편이 파단되기까지의 시간을 비교하면 담금질된 시험편보다 풀림된 시험편이 훨씬 길다. 이것은 풀림에 의해 기지재가 연화되어 연성이 증가하였음을 보여준다.

Fig. 7는 AE 에너지와 진폭의 관계를 나타내고 있다. Fig. 7의 (a)와 (b)의 담금질된 시험편에서 Al6061 기지재는 70dB이하의 진폭과 5이하의 에너지를 갖는데 비해 SiC/Al6061 복합재료는 14까지의 에너지와 80dB이상의 진폭분포도 다수 검출되었다. 그래서 Al6061 기지재와 비교하여 SiC/Al6061 복합재료를 다음과 같이 구분하였다: 65dB이하의 진폭과 5이하의 에너지를 갖는 기지재의 균열 영역(I), 60~70dB의 진폭과 5~6의 에너지를 갖는 기지재의 균열 및 기지재와 섬유사이의 계면분리(debonding) 영역(II), 그리고 70dB이상의 진폭과 6이상의 에너지를 갖는 섬유파단 영역(III). 한편 Fig. 7에서 (c)와 (d)의 풀림된 시험편의 경우 Al6061 기지재는 65dB이하의 진폭과 5이하의 에너지를 나타내었고 SiC/Al6061 복

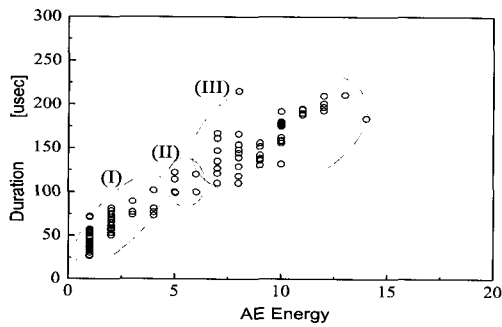
합재료는 77dB이하의 진폭과 10이하의 에너지분포를 보여주었다. 담금질된 시험편에서와 마찬가지로 (d)의 풀림 처리된 SiC/Al6061 복합재료 시험편을 Al6061 기지재 시험편과 비교하여 다음과 같이 구분하였다. 65dB 이하의 진폭과 5이하의 에너지를 갖는 기지재의 균열영역(I), 70dB 이상의 진폭과 5 이상의 에너지를 갖는 섬유파단 영역(II).

Fig. 8은 AE 에너지와 지속시간(duration)의 관계를 보여준다. Fig. 8에서 (a)와 (b)의 담금질된 시험편의 경우 (a)의 Al6061 기지재의 AE 신호 특성과 비교하여 (b)의 SiC/Al6061 복합재료를 다음과 같이 구분하였다: 5이하의 AE 에너지와 100 μ s이하의 지속시간을 갖는 기지재의 균열 영역(I), 5~6의 에너지와 100~120 μ s의 지속시간을 갖는 기지재의 균열 및 계면분리 영역(II), 그리고 6 이상의 에너지와 120 μ s이상의 지속시간을 갖는 섬유의 파단 영역(III). 그리고 Fig. 8(c), (d)의 풀림된 시험편의 경우는 (c)의 Al6061 기지재와 비교하여 (d)의 SiC/Al6061 복합재료는 100 μ s이하의 지속시간과 5이하의 AE 에너지를 갖는 영역(I)과 5~10의 AE 에너지와 140 μ s이상의 지속시간을 갖는 영역(II)로 구분할 수 있다. 여기서 AE 에너지와 지속시간의 관계로 구분된 각 영역에서의 AE 사상수를 Fig. 7의 AE 에너지와 진폭과의 관계로 구분된 각 영역에서의 사상수와 비교하면, 담금질된 SiC/Al6061 시험편의 사상수는 영역(I), (II), (III)에 걸쳐 비교적 잘 일치하였고, 풀림처리된 SiC/Al6061 시험편의 사상수는 Fig. 7(d)에 분류된 각 영역에서의 사상수와 정확하게 일치하였다.

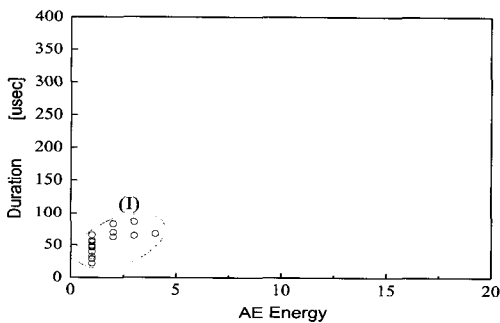
이상의 AE 파라미터들의 관계로부터 담금질된 시험편과 풀림된 시험편을 비교해 볼 때 풀림된 시험편이 연화되어짐으로 인하여 더 작은 진폭과, 에너지, 그리고 짧은 지속시간을 가짐을 알 수 있다. 담금질 되어진 SiC/Al6061 복합재료의 경우 Al6061 기지재 시험편에서 나타나지 않았던 계면분리와 강화섬유의 파단에 의한 신호가 나타나 있는 반면 풀림처리된 SiC/Al6061 복합재료 시험편에서는 계면분리에 의한 것으로 추정되는 신호가 구분되어지지 않았으며 강화섬유의 파단에 의한 신호도 담금질한 시험편과는 달리 아주 적게 나타났다. 이는 담금질된 SiC/Al6061 복합재료 시험편에서는 갑작스런 온도하중에 의한 열적 수축이 강화섬유 주위에서 일어나며 이로 인하여 섬유의 반경방향과 길이 방향으로 압축응력이 생기기 때문이다. Table 2에는 Fig. 7과 Fig. 8에서 구분한 영역들을 토대로 하여 파괴기구에 대한 AE신호특성을 분류하였다.



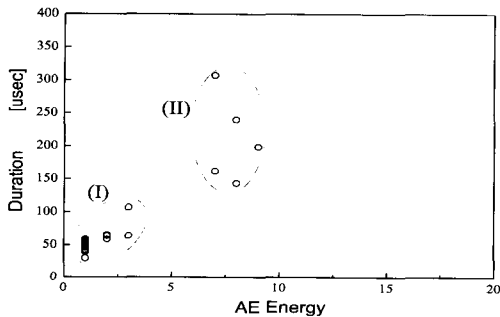
(a) Quenched Al6061 matrix



(b) Quenched SiC/Al6061 composite



(c) Annealed Al6061 matrix



(d) Annealed SiC/Al6061 composite

Fig. 8 Duration vs. AE energy

3.2. 계면전단강도 평가

금속기지 복합재료는 고분자기지 복합재료에 비해서 더 다양하고 복잡한 파괴기구를 갖게 된다. 이것은 금속 기지재 자체가 갖는 내부결함이나 개재물등의 존재가능성이 더 크기 때문이다. 따라서 고분자기지 복합재료에서 처럼 섬유와 기지재의 파단에 의한 AE신호가 명확하게는 구분되지 않는다. 그러나 Al6061 기지재 시험편을 SiC/Al6061 복합재료와 동일한 조건하에서 인장시험을 실시하여 AE신호의 특성을 비교, 평가함으로써 섬유의 파단에 발생하는 AE 사상수를 구하였다. 담금질된 SiC/Al6061 복합재료와 풀림처리된 SiC/Al6061 복합재료 모두 Table 2에서 분류한 각 파괴기구 영역에서 진폭과 에너지, 지속시간의 특성을 모두 만족하는 AE 신호의 사상수로부터 강화섬유의 파단 개수를 구하여 식 (2)와 같이 시험편의 표점거리(gage length)를 섬유파단 개수로 나누면 섬유의 평균임계섬유파단길이(average critical fiber fragmentation length)를 구할 수 있으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 그리고 계면전단강도는 식 (1)로부터 구하여 Table 4에 나타내었다.

$$\frac{\text{표점거리}}{N_f} = l_c \tag{2}$$

여기서, N_f : 섬유파단개수

l_c : 평균임계섬유파단길이

Table 2 Classification of AE signals due to failure mechanisms of MMC

	Matrix cracking		Matrix cracking + Interfacial debonding		Fiber breakage	
	quenching	annealing	quenching	annealing	quenching	annealing
AE Amplitude	~65dB	~65dB	60 ~ 70dB	undistinguishable	70dB~	70dB~
AE Energy	~5	~5	5~6	undistinguishable	6~	5~10
Duration	~100 μ s	~100 μ s	100 ~ 120 μ s	undistinguishable	120 μ s~	140 μ s~

Table 3 Average critical fiber fragmentation length from AE

	Gage length(mm)	Fiber breakage	Average critical fiber fragmentation length(mm)
quenched SiC/Al6061	40	54	0.727
annealed SiC/Al6061	40	5	8

Table 4 Calculation of IFSS for each SFC specimens

	σ_f (GPa)	d (μm)	l_c (mm)	τ_i (MPa)
quenched SiC/Al6061	2	15	0.727	20.6
annealed SiC/Al6061	2	15	8	1.865

4. 결 론

본 연구에서는 잔류응력이 금속복합재료의 계면에 미치는 영향을 평가하기 위하여 SFC시험법과 AE기법을 이용하여 single fiber composite의 열처리에 따른 기지재와 강화섬유사이의 계면특성을 연구하였다. 열처리효과에 따른 AE 특성은 담금질한 SiC/Al6061 복합재료에 비해 담금질 후 풀림처리한 SiC/Al6061 복합재료는 AE 사상수가 현저하게 줄어들었다. 이는 풀림 과정에서의 결정립 성장으로 인해 상대적으로 응력집중을 일으키는 결정립계의 면적을 줄임으로써 AE 방출원이 감소한 것으로 보인다. 또한 계면전단강도는 담금질한 SiC/Al6061의 경우 20.6MPa 인데 비해 풀림처리한 SiC/Al6061 복합재료의 계면전단강도는 약 1.865MPa로 크게 떨어졌다. 이는 담금질한 SiC/Al6061 금속복합재료의 경우 Al6061 기지재와 SiC강화섬유 사이의 열팽창계수 차이로 인하여 담금질시 SiC 강화섬유 주위에 압축잔류응력이 발생하여 계면전단강도를 높이는데 비하여 담금질 후 풀림처리한 SiC/Al6061 금속복합재료에 있어서는 강화섬유의 주변에 형성된 압축잔류응력이 제거되어 상대적으로 계면전단강도의 저하를 가져온 것으로 해석된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Zhirui Wang and Ruby Zhang, "Mechanical Behavior of Cast Particulate SiC/Al(A356) metal Matrix Composites," Metall. Trans. A, Vol. 22A, pp. 1585, July 1991
- [2] T. G. Nieh, R. A. Rainen and D. J. Chellman, "Microstructure and Fracture in SiC Whisker Reinforced 2124 Aluminum Composite," Proc. ICCM-5, edited by W.C. Harrigan, Jr. et al., TMS of AIME, pp. 835-842, (1985)
- [3] T.W. Clyne, "Fabrication and Microstructure of Metal Matrix Composites," Proc. ICCM-6/ECCM-2, edited by F.L. Matthews, et al., Vol. 2, pp. 2286-2295, (1987)
- [4] A. Koyama and N. Igatu, "Microstructures and Mechanical Properties of SiC Fiber Reinforced Aluminum Composite Materials and Their Preform Wires," Proc. ICCM-4, edited by W.C. Harrigan et al., TMS of AIME, pp. 609-621, (1985)
- [5] J. K. Shang and R. O. Ritchie, "On the Particle Size Dependence of Fatigue Crack Propagation Thresholds in SiC-Particulate Reinforced Aluminum Alloy Composites: Role of Crack Closure and Crack Trapping", Acta. Metall. Vol. 37, No. 8, pp. 2267-2278, (1989)
- [6] R.P. Nimmer, "Fiber-Matrix Interface Effects in the Presence of Thermally Induced Residual Stresses," J. Comp. Tech. Res., Vol. 12, No. 2, pp. 65-75, (1990)
- [7] M. Detassis, A. Pegoretti, and C. Migliaresi, "Experimental evaluation of residual stresses in single fiber composites by means of the fragmentation test,"
- [8] J. P. Armistead and A.W. Snow, "Influence of Matrix Properties on Fragmentation Test," J. Adhesion, Vol. 52, pp. 209-222, (1995)
- [9] 이준현, 손봉진, "금속기지 복합재료의 제조 및 성형

- 시에 발생하는 열적잔류응력의 정량적 평가 및 예측에 관한 이론적 연구", J. KSNT, Vol. 17, No. 2, (1997)
- [10] R.J. Arsenault and M. Taya, "Thermal Residual Stress in Metal Matrix Composite," *Acta Metallurgica*, Vol. 35, No. 3, pp. 651-659
- [11] L. Molliex, J. P. Favre, A. Vassel and M. Rabinovitch, "Interface Contribution to the SiC-Titanium and SiC-Aluminum Tensile Strength Prediction," *J. Mater.*, Vol. 29, pp. 6033-6049, (1994)
- [12] J. M. Park, B. J. Son and J. H. Lee, "Analysis of Interfacial Shear Strength and Micro-failure Mechanism of SiC fiber Reinforced Aluminum Composites using Single Fiber Composites and Acoustic Emission Technique," *ICCE-2*, pp. 617-618, (1996)
- [13] L. T. Drzal, M. J. Rich and P. F. Lloyd, "Adhesion of Graphite Fibers to Epoxy Matrix; I. The Role of Fiber Surface Treatment," *J. Adhesion*, Vol. 16, pp. 1-30, (1982)
- [14] L. T. Drzal, J. J. Rich and S. Subramoney "Fiber-matrix Bonding and Its Effect on Composite Properties", in *Advanced Composites III-expanding the Technology: Proceedings of the 3rd Annual Conference on Advanced Composites*, pp. 305-308, ASM International, Materials Park, OH, (1987)
- [15] J. H. Lee & W. J. Sung, "Acoustic Emission Characterization of Single and Dual Fiber Reinforced Metal Matrix Composites," *Review of Progress in QNDE*, Vol. 17, pp. 549-556, (1998)
- [16] Joon-Hyun Lee et al., "Acoustic Emission Monitoring of Fracture Process of SiC/Al Composite Under Cyclic Loading," *AECM-4*, pp. 300-309, (1994)
- [17] A. N. Netravali, W. Sachse, H. F. Wu, "Determination of fiber/matrix interfacial shear strength by an acoustic emission technique", *J. Mater. Sci.*, Vol. 26, pp. 6631-6638, (1991)
- [18] A. Kelly and W. R. Tyson, "Tensile Properties of Fiber Reinforced Materials: Copper/Tungsten and Copper/Molybdenum," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 13, pp. 329-350, (1965)