AE와 Fragmentation 시험법을 이용한 금속복합재료의 열처리 효과에 따른 계면전단강도 특성 평가

이준현*, 강문필**, 박종만***
* 부산대학교 기계공학부, ** 부산대학교 대학원
*** 경상대학교 고분자공학과

1. 서론

금속기지 복합재료의 미시적 파손기구는 작용하중 방향, 재료의 열처리 상태, 기지재 및 강화재의 특성, 섬유체적률 등 여러 인자에 의해서 영향을 받는다. 이중 특히 재료의 열처리는 금속기지 복합재료의 기계적 특성을 지배하는 주요한 인자인 강화섬유와 기지재 사이의 계면특성에 큰 영향을 준다. 강화섬유와 기지재는 매우 다른 열팽창계수(coefficient of thermal expansion: CTE)를 가지기 때문에 금속기지 복합재료에 제조과정에 있어서 용탕(기지재)의 용침이나 급격한 온도강하가 있을 경우에는 강화섬유에 비해 기지재의 급격한 수축이 일어나 강화섬유와 기지재 사이의 계면에서는 잔류응력이 형성되며 이때 발생한 잔류응력은 금속복합재료의 파손기구는 물론 기지재와 강화섬유 사이의 계면전단강도에도 중대한 영향을 미칠 수도 있다[1-3]. 일반적으로 복합재료에 있어서 계면전단강도가 너무 낮으면 복합재료내의 섬유에 의한 강화효과를 기대하기 어렵고, 또한 계면전단강도가 너무 높으면 응력에 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[4-5]. 한편 이러한 복합재료의 강화섬유와 기지재 사이의 계면전단강도의 해석을 통한 미시적 파괴특성에 관한 연구에서 최근 Fragmentation시험법이 이용되어 왔다. Fragmentation시험법은 종래의 일반적인 bulk 복합재료에서 보여주는 복잡한 미시적 파손기구와는 달리 기지재와 강화재의 균열 및 기지재와 강화재 사이의 계면분리현상에 의한 미시적 파손기구를 명확하게 분리, 관찰할 수 있는 이점이 있어 복합재료의 미시적 변형기구를 이해하는데 매우 유용하게 이용되어져 왔다[6-7]. 특히 금속복합재료의 기계적 특성에 대한 잔류응력의 영향을 검토하는 측면에 있어서 Fragementation시험법에 사용되는 SFC(Single Fiber Composite)시험편의 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[8-9]. 따라서 본 연구에서는 잔류응력이 복합재료의 계면에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Fragmentation시험법과 음향방출(AE)법을 이용하여 single fiber composite에서의 잔류응력이 기지재와 강화섬유 사이의 계면전단강도에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 특히 본 연구에 있어서의 금속복합재료의 계면전단강도의 평가는 Fragmentation시험법과 AE기법으로 시험편의 임계파단길이(critical fragmentation length)를 구하여 Kelly & Tyson[10]에 의해 제시된 다음 식을 사용하였다.

$$\tau_i = \frac{d\sigma_f}{2l_c} \tag{1}$$

여기서, τ_i는 계면전단강도, d는 섬유의 직경, σ_f는 섬유의 인장강도, l_c는 임계파단길이

2. 재료 및 실험방법

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

Table 1. Mechanical properties of SiC fiber

	Density(㎎)	Diameter(㎛)	Modulus(GPa)	Strength(GPa)	
				at 20℃	at 1400℃
SiC	2.6	10~20	180	2	0.5

시험편은 dog-bone 형상으로 SiC섬유가 강화되지 않은 Al6061 기지재 시험편과 하중축에 평행하게 SiC섬유가 강화된 SiC/Al6061 single fiber composite를 준비하였다. Fig. 1.에 시험편의 형상이 나타나 있다. 잔류응력이 복합재료내 미치는 영향을 알아보기 위하여 시험편을 제작한 후 일부 시험편에 대하여 풀림(annealing)처리를 하였다. 풀림은 Fig. 2.에서 보여주듯이 시험편 제조시에 담금질된 시험편을 360℃로 유지되고 있는 전기로에 120분간 방치에 두었다가 노 내에서 냉각시켰다.

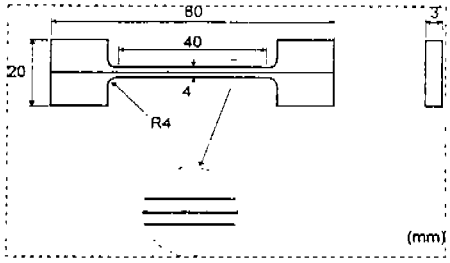


Fig. 1. Dimensions of SFC test specimen

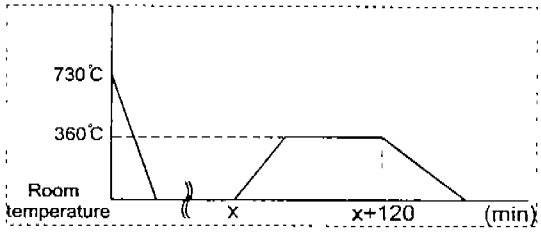


Fig. 2. The principle of annealing in this study

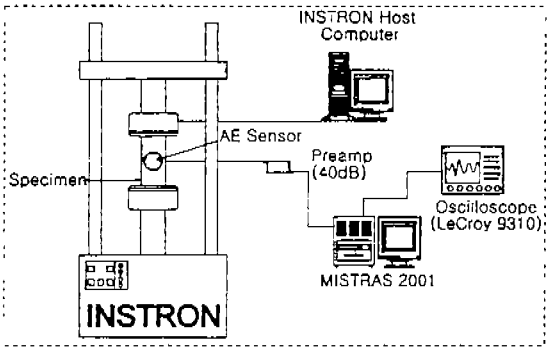


Fig. 3. Schematic diagram of instrumentation for tension test

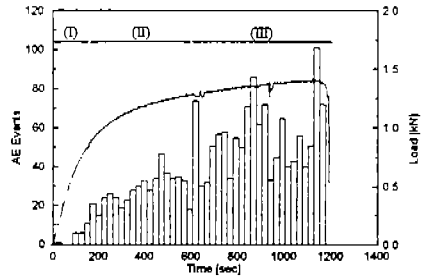
음향방출(AE)법을 병행한 Fragmentation시험법을 위한 실험장치의 개요도를 Fig. 3.에 나타내었다. 인장시험은 최대하중 10ton의 유압식재료시험기(INSTRON)를 사용하였으며 인장은 0.05mm/min의 변위제어를 하였다. 광대역 AE 센서(PAC)를 시험편의 중앙에 부착하여 AE신호를 측정하였다. 센서에 의해 검출된 신호는 ㎶수준의 아주 미약한 신호이므로 계측기에서 검출가능하도록 100~300kHz의 대역필터를 가진 프리엠프에 의해 40dB 증폭되어 AE신호분석장비로 보내졌다. AE신호분석장비로는 MISTRAS2001(PAC)이 사용되었으며 전기적, 기계적 잡음 제거를 위한 문턱전압값(threshold level)은 17.8㎷(45dB)로 설정되었다. 잔류응력의 영향을 평가하기 위하여 먼저 담금질 한 시험편의 인장시 AE신호특성을 파악한 후 풀림처리된 시험편을 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

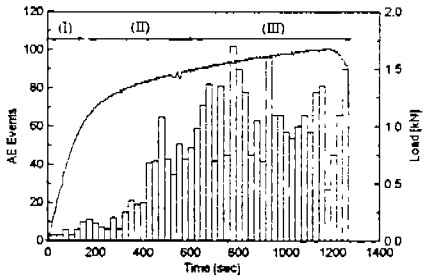
3.1 열처리효과에 따른 AE특성 평가

본 연구에서는 열처리 효과에 따른 기지재와 강화섬유 사이의 계면특성을 평가하기 위해 Fragmentation시험 동안에 강화섬유의 파단을 AE기법을 이용하여 연속적으로 on-line 모니터링 하였다. 열처리 효과에 따른 계면특성을 비교하기 위해 담금질(quenching)된 Al6061 기지재와 SiC/Al6061 복합재료에 대한 Fragmentation 시험을 행한 후, 담금질 후 풀림(annealing)된 Al6061 기지재와 SiC/Al6061 복합재료에 대한 Fragmentation시험을 행하여, 각각의 시험편에 대한 AE신호 특성을 비교 분석하였다. Fig. 4.는 각각의 시험편에 대한 하중과 AE 사상수의 변화를 나타낸다. Fig. 4.의 (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.

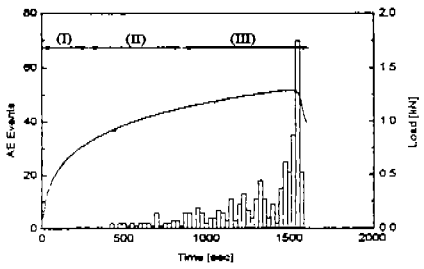
stage(Ⅰ) : 0 ~ 180sec의 탄성변형영역
stage(Ⅱ) : 180 ~ 620sec의 소성변형 전반부 영역
stage(Ⅲ) : 620sec 이후의 소성변형 후반부 영역



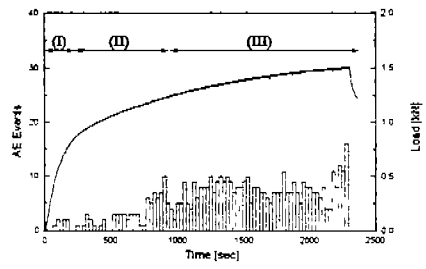
(a) Quenched Al6061 matrix



(b) Quenched SiC/Al6061 composite



(c) Annealed Al6061 matrix



(d) Annealed SiC/Al6061 composite

Fig. 4. AE events and load vs. time

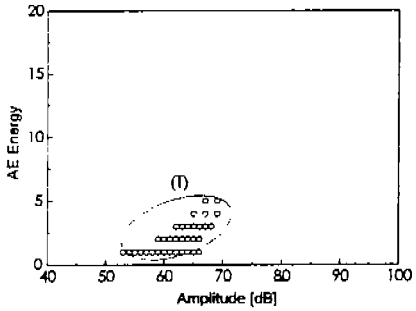
Fig. 4(a)의 담금질된 Al6061 기지재에서 영역(Ⅰ)의 AE 사상수 발생률은 비교적 적은데 이는 미소균열의 발생 및 성장률이 크지 않고 재료가 변형에너지를 방출하지 않고 내부에 저장이 가능하기 때문이다. 영역(Ⅱ)에서는 AE 사상수 발생률이 서서히 증가하는데 이는 응력이 증가함에 따라 기지재 내에 존재하는 미소기공

(porosity) 및 개재물(inclusion)과 기지재 사이의 결합을 끊는 미소균열에 의한 변형에너지의 방출에 기인한 것이다. 영역(Ⅲ)에서는 앞의 영역들에 비해 AE 사상수 발생률이 비교적 급격하게 증가함을 보여주며 이것은 계속되는 미소균열의 증가와 앞에서 생성된 미소균열들의 합체(link-up)에 의한 것이다. Fig. 4(b)의 SiC섬유가 강화된 담금질된 SiC/Al6061 복합재료의 경우에 Fig. 4(a)의 Al6061 기지재에 비해 영역(Ⅱ)에서 AE 사상수 발생률은 급격히 증가한다. 이는 기지재내에 존재하는 미소기공들에서의 미소균열의 발생과 함께 부분적인 섬유의 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. 4.의 (c)와 (d)의 풀림된 시험편도 하중의 증가 특성에 따라 다음과 같이 구분하였다.

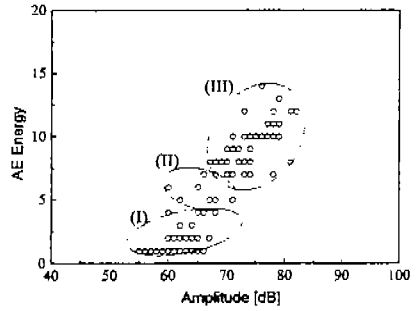
stage(Ⅰ) : 0 ~ 250sec의 탄성변형영역
stage(Ⅱ) : 250 ~ 900sec의 소성변형 전반부 영역
stage(Ⅲ) : 900sec 이후의 소성변형 후반부 영역

Fig. 4(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 시편보다 풀림된 시험편이 훨씬 길다. 이것은 풀림에 의해 기지재가 연화되어 연성이 증가하였음을 보여준다.

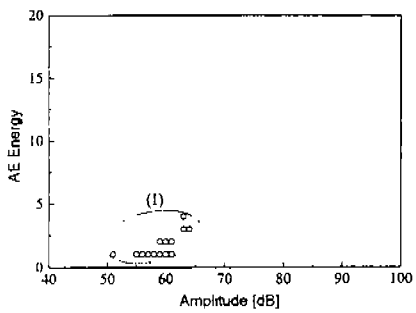
Fig. 5는 AE 에너지와 진폭의 관계를 나타낸다. 각 시험편 모두 문턱전압값을 17.8mV(45dB)로 설정했기 때문에 45dB 이하의 신호는 검출되지 않았다. Fig. 5.의 (a)와 (b)의 담금질된 시험편에서 Al6061 기지재는 70dB 이하의 진폭과 5이하의 에너지를 갖는데 비해 SiC/Al6061 복합재료는 14까지의 에너지와 80dB이상의 진폭분포도 다수 검출되었다. 그래서 Al6061 기지재와 비교하여 SiC/Al6061 복합재료를 다음과 같이 구분하였다: 65dB이하의 진폭과 5이하의 에너지를 갖는 기지재의 균열 영역(Ⅰ), 65~70dB의 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. 5.에서 (c)와 (d)의 풀림된 시험편의 경우 Al6061 기지재는 65dB이하의 진폭과 5이하의 에너지를 갖고 SiC/Al6061 복합재료는 65dB이하의 진폭과 10이하의 에너지분포를 보여주는데 섬유파단으로 추정되는 신호는 명확히 구분되지만 아주 적게 나타나 있다.



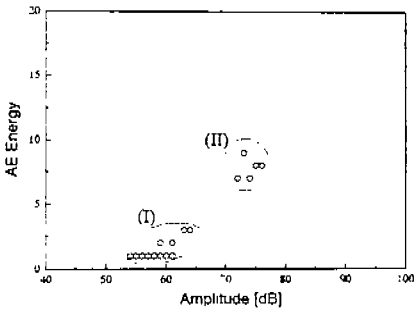
(a) Quenched Al6061 matrix



(b) Quenched SiC/Al6061 composite



(c) Annealed Al6061 matrix



(d) Annealed SiC/Al6061 composite

Fig. 5. AE energy vs. Amplitude

이상의 AE 파라미터들의 관계로부터 담금질된 시험편과 풀림된 시험편을 비교해 볼 때 풀림된 시험편이 연화되어짐으로서 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 담금질 한 시험편과는 달리 아주 적게 나타났다. 이는 담금질된 SiC/Al6061 복합재료 시험편에서는 갑작스런 온도하강에 의한 열적 수축이 강화섬유 주위에서 일어나며 이로 인하여 섬유의 반경방향과 길이 방향으로 압축응력이 생기기 때문이다. Table 2.에는 위의 파라미터들을 토대로 하여 파괴기구에 대한 AE신호특성을 분류하였다.

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	65~70dB	undistinguishable	70dB~	70dB~
AE Energy	~5	~5	5~6	undistinguishable	6~	5~10
Duration time	~100μs	~100μs	100~120μs	undistinguishable	120μs~	140μs~

3.2 계면전단강도 평가

금속기지 복합재료는 고분자기지 복합재료에 비해서 더 다양하고 복잡한 파괴기구를 갖게 된다. 이것은 금속기지재 자체가 갖는 내부결함이나 개재물등의 존재가능성이 더 크기 때문이다. 따라서 고분자기지 복합재료에서처럼 섬유와 기지재의 파단에 의한 AE신호가 명확하게는 구분되지 않는다. 그러나 Al6061 기지재 시험편을 SiC/Al6061 복합재료와 동일한 조건하에서 인장시험을 실시하여 AE신호의 특성을 비교, 평가함으로써 섬유의 파단시에 발생하는 AE 사상수를 구하였다. 담금질된 SiC/Al6061 복합재료와 풀림처리된 SiC/Al6061 복합재료 모두 강화섬유의 파단에 의한 AE신호는 70dB이상의 진폭을 가짐을 알았다. 이렇게 해서 강화섬유의 파단 개수를 구하여 시험편의 표점거리(gage length)를 섬유파단 개수로 나누면 섬유의 평균임계파단길이(average critical fiber fragmentation length)를 구할 수 있으며, 그것으로 식(1)로부터 계면전단강도를 구하여 Table 3.에 나타내었다.

Table 3. 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. 결론

본 연구에서는 잔류응력이 금속복합재료의 계면에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Fragmentation시험법과 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 줄어들었으며 이는 풀림 과정에서의 결정립성장으로 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 상대적으로 계면전단강도를 높이는데 비하여 담금질 후 풀림처리한 SiC/Al6061 금속복합재료에 있어서는 강화섬유의 주변에 형성된 압축잔류응력이 제거되어 상대적으로 계면전단강도의 저하를 가져온 것으로 생각된다.

참고문헌

[1] 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

[2] J.P. Armistead and A.W. Snow, "Influence of Matrix Properties on Fragmentation Test", J. Adhesion, Vol.52, pp.209-222, 1995

[3] 이준현, 손봉진, "금속기지 복합재료의 제조 및 성형시에 발생하는 열적잔류응력의 정량적 평가 및 예측에 관한 이론적 연구", J. KSNT, Vol.17, No.2, 1997

[4] 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

[5] 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.

[6] 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

[7] 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

[8] J.H.Lee & W.J.Sung, "Acoustic Emission Characterization of Single and Dual Fiber Reinforced Metal Matrix Composites", Review of Progress in QNDE, Vol17, pp.549-556, 1998.

[9] Joon-Hyun Lee et al., "Acoustic Emission Monitoring of Fracture Process of SiC/Al Composite Under Cyclic Loading", AECM-4, pp.300-309, 1994

[10] A. Kelly and W.R. Tyson, "Tensile Properties of Fiber Reinforced Materials: Copper/Tungsten and Copper/Molybdenium", J. Mech. Phys. Solids, Vol.13, pp.329-350, 1965