

## 음향방출법에 의한 탄소 섬유 복합 재료의 인장 및 파괴 인성시험시의 파괴 거동에 관한 연구

이상국\*, 오세규\*, 남기우\*\*, 김옥균\*\*

\* 부산수산대 기계공학과

\*\* 부산수산대학교 재료공학과

요약 본 연구는  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ 와  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ 의 2종류 탄소섬유복합재료에 대한 인장 및 파괴인성 시험시의 파괴거동과 음향방출 특성을 해석하고 성형시의 성형압력과 인장강도 및 파괴인성 간의 상관성을 알아내기 위하여 수행되었다. AE신호는 음향방출장비를 이용하여 성형과정, 인장 및 파괴인성 시험중에 각각 검출하였다. 인장강도는 성형가압 단계수가 적을수록, 그리고  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  시험편 쪽이  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  시험편보다 높은 강도를 나타내었다. 파괴인성은 동일한 온도영역에서 거의 같은 값을 나타내나 시험온도가 높아질수록 점차 낮아짐을 알 수 있었다. 한편 인장 및 파괴인성 시험시의 파괴거동과 AE신호간의 상관성을 조사하기 위하여 AE데이터의 AE변수들에 대한 후 신호처리(post processing)와 광학현미경 및 주사형 전자현미경 관찰이 각각 수행되었다.

### 1. 서론

섬유강화 복합재료를 구조용 소재로 사용함에 있어 재료내부의 균열, 손상형태나 위치를 파악하기 위한 방법으로 1970년 이후 X-선법, 초음파 C-scan법, acousto-ultrasonic법 등이 적용되어왔다<sup>1-6)</sup>. 그러나 이들 방법으로는 재료내부의 결함이 어떠한 성장과정을 거쳐 궁극적 파괴에 이르게 되는가에 관한 해석과 재료의 변형이나 초기에 발생하는 미시결함의 검출, 동적 파괴기구의 식별이 곤란하다. 또한 섬유강화 복합재료는 이종소재의 조합에 의한 복합구조로 되어 있어 제작과정에서 발생하는 재료의 기계적 특성편차가 비교적 크며 결함의 내재 가능성도 높은 것으로 알려져 있다.<sup>7-8)</sup>

이러한 동적 파괴기구의 감시수단 및 해석방법과 제작과정의 기계적 특성편차를 조절하기 위한 방법

으로 음향방출(acoustic emission:AE) 방법이 큰 가능성을 제시하고 있으며, 이에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고있다.<sup>8-11)</sup>

본 연구에서는 AE법을 이용하여 탄소섬유복합재료의 성형과정부터 재료의 강도와 성형압력간의 상관성을 해석하여 성형 과정에 대한 감시수단과 제작과정의 기계적 특성 편차를 조절하기 위한 방법으로 AE방법의 적용성을 검토하였다. 성형시 압력을 여러단계로 변화시키면서 AE신호를 검출하여 이때 방출되는 AE신호와 이들 각각에 대한 인장강도를 비교분석하였다. 또한 탄소섬유복합재료의 파괴거동을 해석하기 위해 AE를 이용하여 결정된 적정압력으로 성형한 적층판을 대상으로 인장 및 온도변화에 따른 파괴인성 시험시에 발생하는 AE특성과 파괴거동을 비교검토하고, AE 변수들에 의한 해석의 오류를 제거하기 위해 광학 현미경 및 주사

형 전자현미경 관찰을 병행하여 탄소섬유복합재료에 대한 인장 및 파괴인성 시험시의 손상특성과 AE법의 유용성을 규명하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편 제작

본 연구에서 사용된 시험편은 일방향 강화 탄소 섬유/에폭시 수지의 프리프레그(국내 K社 CU250NS)를 적층성형하여 제작하였으며, 사용된 섬유 및 프리프레그의 기계적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. The mechanical properties of fiber and prepreg.

Property	Unit	Carbon Fiber (INTER-MEDIATE MODULUS)	Carbon/Epoxy (CU250NS)
Tensile Strength	kgf/mm <sup>2</sup>	520	180
Tensile Modulus	kgf/mm <sup>2</sup>	30,500	13,831
Elongation	%	1.7	-
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.76	-
Filament Count		12,000	-
Yield(Tex)		410	-
Filament DIA	μm	5	-
R/C(resin content)	Wt%	-	36±2%
CF Wt	g/m <sup>2</sup>	-	250

준비된 프리프레그를 [0°/90°]2s 및 [0°/90°]2s의 2종류 적층방법으로 8층(ply)을 적층한 후, 열성형기에서 섬유의 중량함유율이 53 wt%가 되도록 Table 2와 같은 적층순서 및 가압방법에 따라 성형하였으며 이때 성형온도 사이클은 Fig. 1과 같다.

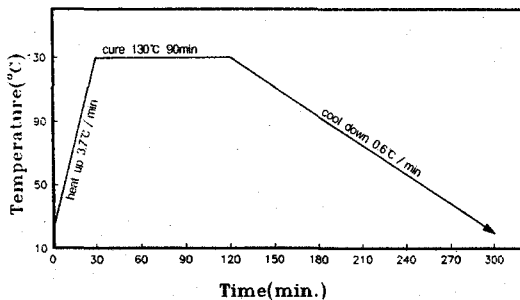


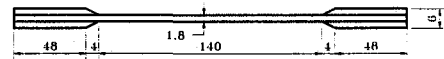
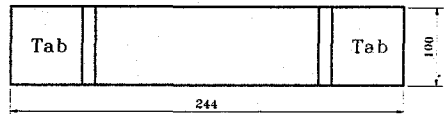
Fig. 1. Curing temperature cycle of CFRP specimen.

Table 2. Stacking sequence and pressurizing method of CFRP specimen.

Stacking Method Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	[0°/90°]2s	[0°/90°]2s	[0°/90°]2s	[0°/90°]2s
20→40→80→120→160→200	①	②		
20→50→100→150→200	③	④		
20→100→200	⑤	⑥		
20→200	⑦	⑧	⑨	⑩

성형이 완료된 후, 시험편의 휨을 방지하기 위해 압력을 유지한 상태에서 0.6°C/min의 냉각속도로 서서히 상온까지 냉각하였다.

성형된 탄소섬유복합재료 적층판은 다이아몬드 휠톱을 사용하여 Fig. 2와 같이 인장시험편과 ASTM E-399-78에 의거하여 표준형 CT시험편으로 가공하였다.



(a) tensile specimen

(b) compact specimen

Fig. 2. Shape of tensile and compact specimen, in mm.

2.2. 응력확대계수의 계산

본 실험에 사용된 콤팩트 시험편은 ASTM E-399-78에 의한 표준형 CT시험편으로 응력확대계수  $K_I$ 는 (1)식으로 계산하였으며, (1)식 중의  $F_I(a/W)$  즉,  $F_I(\xi)$ 는 (2)식으로 계산하였다.

$$K_I = P/B\sqrt{W} \cdot F_I(\xi) \dots\dots\dots(1)$$

$$F_I(\xi) = 4.55 - 40.32\xi + 414.7\xi^2 - 1698\xi^3 + 3781\xi^4 - 4287\xi^5 + 2017\xi^6 \dots\dots(2)$$

(0.2 ≤ ξ ≤ 0.8 에서 0.5%, Newman, ξ = a/W)

여기서 P는 하중, B는 판두께, W는 시험편 폭, a는 균열길이,  $F_I(\xi)$ 는 균열길이에 따른 보정계수이다.

2.3. 실험 방법

탄소섬유복합재료의 성형 압력변화가 강도에 미치는 영향을 AE에 의해 고찰하기 위하여 성형시 압력을 단계별로 변화시켜 성형하면서 AE신호를 검출하였다. 이때 검출된 AE신호 및 가압방법과 인장시험 결과를 토대로 적정 압력조건을 결정하였다. 또한 적정압력조건으로 성형한 적층판을 대상으로 인장시험 및 파괴인성시험을 수행하여 이들 파괴거동과 AE특성을 상호 비교검토하였다.

성형시의 AE실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같으며, 성형, 인장 및 파괴인성시험시의 증폭기(amplifier)

증폭 및 검출신호 주파수는 Table 3과 같이 하여 AE장비에 내장된 CPU에 필요한 자료가 처리되도록 하였다.

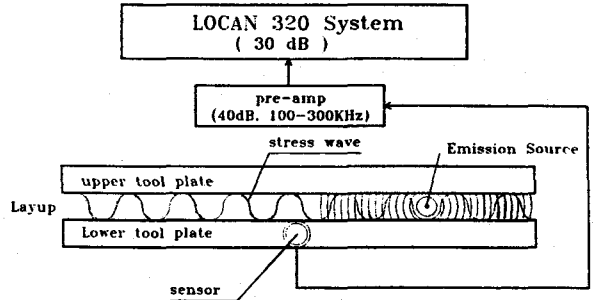


Fig. 3. Test setup for measuring acoustic emission during curing.

Table 3. Amplification, frequency and threshold voltage setting for AE test during curing, tensile test and fracture toughness test.

		Curing	Tensile Test	Fracture Toughness Test
Amplifier 증폭	Pre-Amp.	40 dB	40 dB	40 dB
	Main-Amp.	30 dB	26 dB	34 dB
Frequency		100-300kHz	100-300kHz	100-300kHz
Threshold Voltage		0.3V	0.2V	0.4V

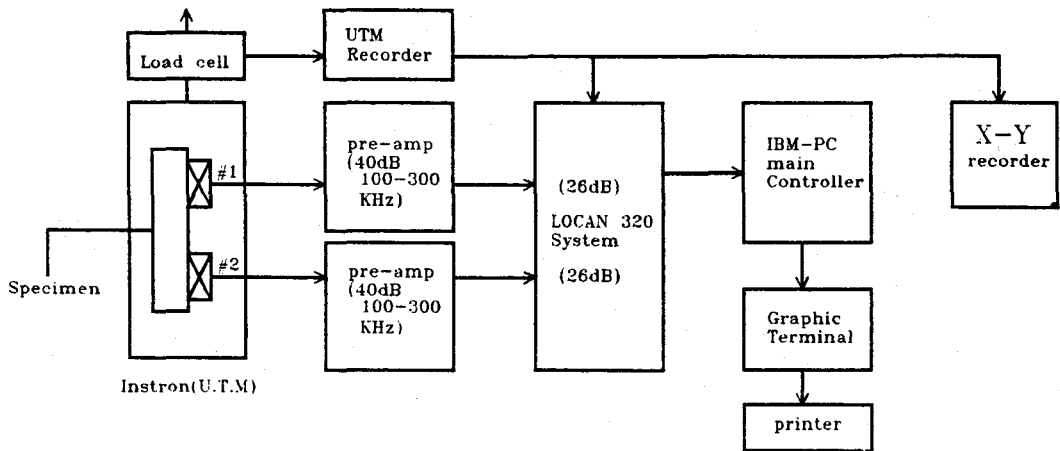


Fig. 4. Block diagram of experimental setup for acoustic emission measurements.

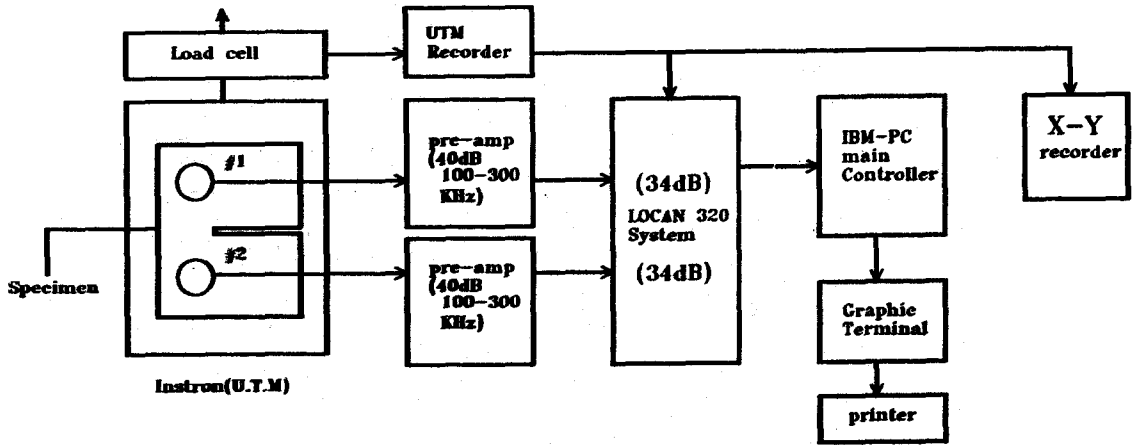


Fig. 5. Block diagram of experimental setup for acoustic emission measurements.

방출되는 AE신호의 측정 및 분석에는 LOCAN 320 시스템이 사용되었고, 실험장치 구성도는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

Fig. 4 및 Fig. 5에서와 같이 센서 #1 및 센서 #2는 AE신호의 검출강도를 높이기 위해 175kHz 공진형 센서를 사용하였으며, 각각의 센서들은 발생하는 신호를 민감하게 수집하기 위해 시편과 센서 사이에 실리콘 그리스 및 정압클램프(constant force clamp)를 이용하여 균일한 어코스틱 커플링(acoustic coupling)이 되도록 부착하였다.

인장시험시 두 센서는 예상되는 주 결합발생부위를 중심으로 6cm간격을 두고 부착하여 인장시험기 및 그리드(grid)부위에서의 잡음(noise)을 제거하였다.

한편 파괴인성시험시는 인장시험기 및 시험편 홀(hole)에서의 잡음을 제거하기 위해, 두 센서는 균열 중심선으로부터 각각 20mm간격을 두고 부착하였으며 시험편 홀에 윤활유를 발라주어 마찰에 의한 AE를 최소화 하였다.

또한, 시험편의 종류 및 손상진전에 따라 변화하는 파괴양상을 확인하기 위해 AE에 의해 손상진전을 감시하여 적절한 하중까지 인장시험을 행한 후 가해진 하중에 의한 손상진전의 양상과 최종 파단시편 및 인장시험전의 시편 각각을 광학 현미경으로 관찰하였으며 파괴인성시험시의 최종 파단시편에 대한 상온 및 고온에서의 균열진전 및 파괴거동을 미시적으로 고찰하기 위해 파단면을 주사형전자

현미경(SEM)으로 각각의 상황을 관찰하였다.

### 3. 연구 결과 및 고찰

#### 3.1. 탄소 섬유 복합 재료의 성형시 AE 특성 및 성형 압력 변화에 따른 강도와 AE량

탄소섬유복합재료의 성형시 가압방법의 변화가 재료의 강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가압방법을 여러가지로 변화시켜 AE량을 조사하였다. 이것은 적정성형압력을 결정하고 이때의 AE특성을 정량화하여 탄소섬유 복합재료의 성형시 품질을 감시하기 위한 것이다.

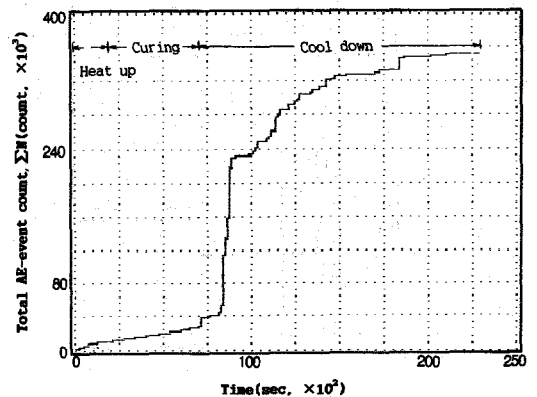


Fig. 6. Total AE-event count vs. time curve for  $[0^{\circ}_2/90^{\circ}_2]_s$  specimen during curing.

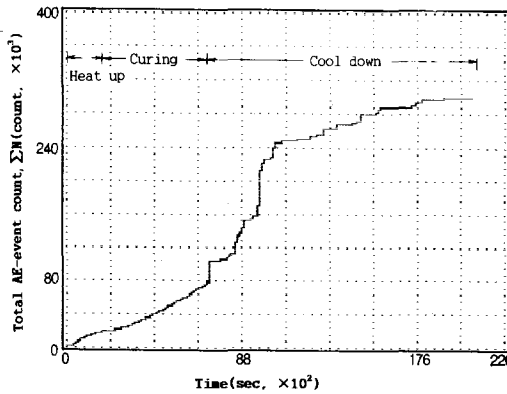


Fig. 7. Total AE-event count vs. time curve for  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  specimen during curing.

Fig. 6과 Fig. 7은  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  및  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  의 2 종류의 방법으로 적층하여 성형유지압력  $200\text{kgf/cm}^2$  에 도달하기전 4가지의 압력변화를 주면서 성형가압할때, 총 AE-event count에 대한 시간적 변화를 나타낸 곡선의 대표적인 것이다. 이들 그림에서 2종류 적층방법에 따른 총 AE-event count는 거의 비슷한 값을 보여주고 있으나, 승온(heating up), 성형(curing) 및 냉각(cooling down) 때를 각각 구분했을 때 AE-event count의 변화(곡선의 기울기)를 보면 냉각 초기에 가장 급격한 AE량의 변화를 보여주었는데, 이는 냉각 초기에 빠른 냉각속도(약  $2.5^\circ\text{C}/\text{min}$ )로 인하여 재료내부에 발생한 큰 응력변화에 기인한 것으로 판단되었다.

따라서 냉각시의 냉각속도가 재료의 파괴기구나 강도에 미치는 영향을 고려해보면, 급냉의 경우는 금속재료와 같이 탄소섬유복합재료 내부에 잔류응력이 발생하여 재질을 취약하게 하므로 서냉이 재료에 가장 적절할 것으로 보인다. 그리고 서냉속도의 정도에 대한 최적화를 고찰하기 위해서는 냉각속도 변화에 따른 파괴기구의 정성적 측정과 잔류응력조절, 재료의 치수불안정에 대한 방지 및 품질개선 등을 AE에 의해 통제해야 할 필요성이 있다고 생각한다.

Fig. 8은 Table 2에 나타난 것과 같이 가압방법을 4가지 방법으로 변화시켜 성형한 탄소복합재료 시험편에 대한 인장시험의 결과이다. 횡축의 번호는 Table 2의 적층방법 및 가압방법에 따른 시험편의 일련번호를 나타낸 것으로 전체 인장강도의 분포를

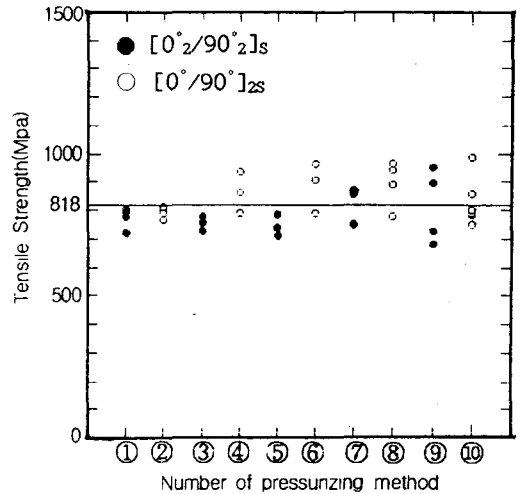


Fig. 8. Tensile strength curve for  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  and  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  specimen.

보면  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  시험편이  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  시험편보다 10~20%정도 높게 나타났다. 또한 가장 높은 인장강도 값을 나타내는 것은 성형초기압력  $20\text{kgf/cm}^2$ , 성형유지압력  $200\text{kgf/cm}^2$ 의 조건에서  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ 의 경우,  $380\sim 427(\times 10^3)$  count이었으며,  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ 의 경우  $390\sim 420(\times 10^3)$  count이었다. 이와 같은 가압방법에 따른 강도차이는 다단계 가압의 경우, 성형유지압력 이하의 낮은 압력으로 여러번 가압에 의한 각 층간의 다소 불완전한 접합계면의 형성에 의한 것으로 생각된다. 그리고 접합계면의 공극(void)함유를 최소화 시키는 방법으로 다단계 가압은 적절하지 못하며 오히려 강도가 저하됨을 알 수 있었다.  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ 의 시험편에 비해  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ 의 시험편의 강도가 비교적 높은 것은 적층구조에 있어서 인장부하시  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  쪽이 주하중 방향인 수직응력에 의한 계면 전단강도 증가와 섬유 엉킴현상 등에 의한 영향에 기인된 것으로 사료된다.

## 3.2. 인장시험시의 파괴 거동 및 AE 발생 거동

### 3.2.1. $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ 시험편

Fig. 9는  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  적층(cross ply)시험편의 인장 시험시 하중 및 AE-event count의 시간적 변화를

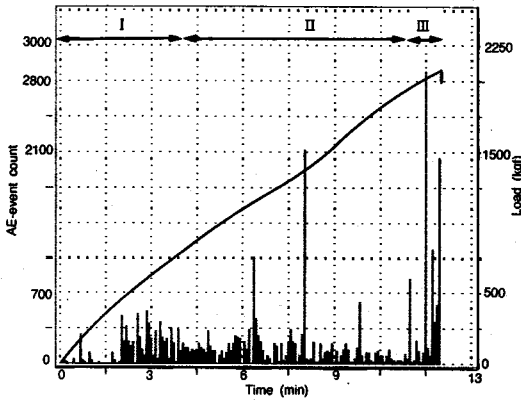


Fig. 9. AE-event counts and load vs. time curve for  $[0^\circ/90^\circ]_2$ s specimen during tensile test.

나타낸 것이다. 이때의 인장시험시 시험속도(cross-head speed)는 0.5mm/min로 일정하게 유지하였다. 그리고 크로스헤드(cross-head)의 변위는 인장시간과 선형적 비례관계를 가지므로 하중-변위 및 AE event count-변위 곡선으로 볼 수 있다.

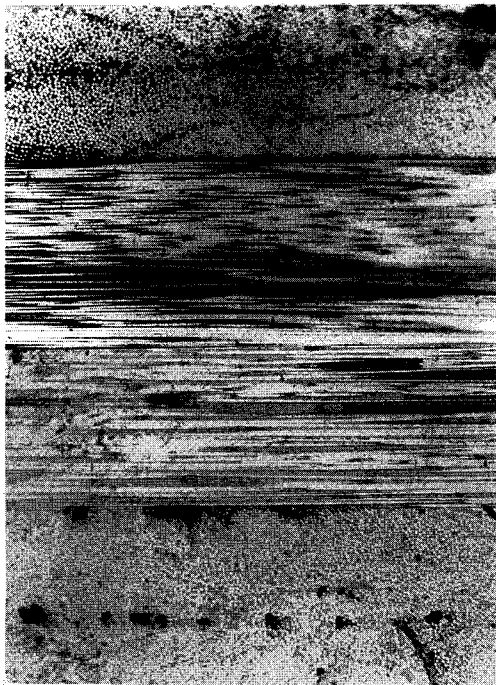


Fig. 10. Optical microscopy for  $[0^\circ/90^\circ]_2$ s specimen loaded up to 1100kgf [ $\times 50$ ].

Fig. 9는 인장부하 초기에 많은 AE신호가 급격히 증가되는 구간을 stage I, 그 다음 AE-event count rate가 비교적 낮은 구간을 stage II, 최종 파단시 AE신호가 급격히 증가되는 구간을 stage III로 하여 손상단계를 구분하여 AE-event count 및 하중-변위 곡선으로 나타내었다.

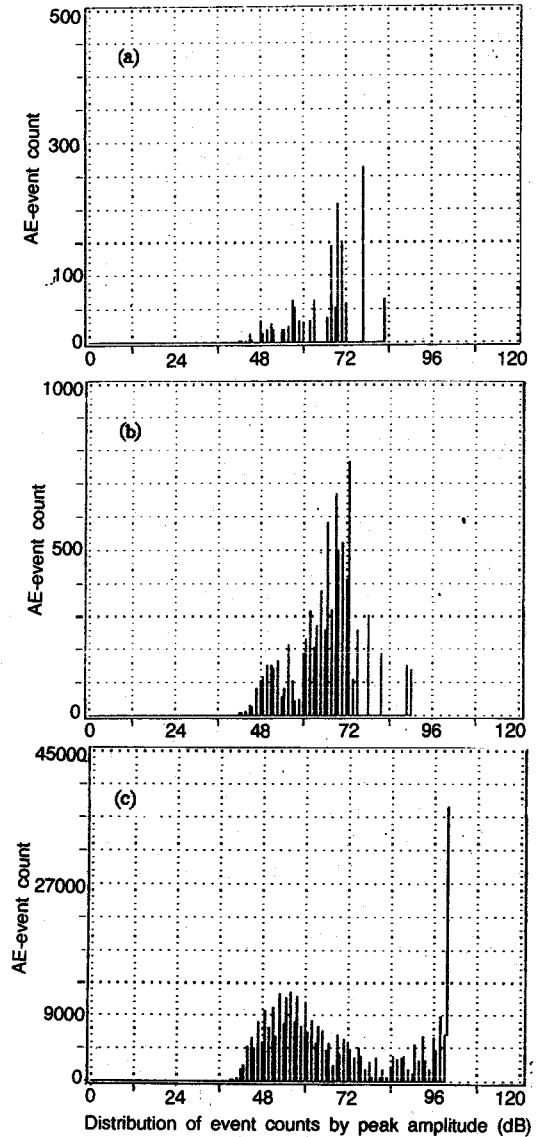


Fig. 11. Peak amplitude distribution for  $[0^\circ/90^\circ]_2$ s specimen.  
a) Stage I b) Stage II c) Stage III

인장하중 증가에 따라 최종 파단시까지 하중-변위곡선은 서서히 변화하며 pop-in현상은 관측되지 않았다. 이때 AE는 60kgf의 하중에서 부터 검출되기 시작하였으며 1150kgf 부근과 1350kgf 부근에서 각각 급격한 AE신호가 발생했는데, 이는 90° 층의 취성 매트릭스(matrix)가 파괴된 것으로 추정되었다. 이러한 예측은 1150kgf 부근과 1350kgf 부근의 하중단계까지 인장하중을 가한 시편의 현미경 단면 사진(Fig. 10)으로 이를 확인할 수 있었다. 500kgf (stage I)까지 인장하중을 가한 시편의 현미경 단면 사진으로 부터 균열이 시편의 표면쪽 90° 층에서 부터 성장하여 시편의 두께방향으로 성장하여 시편을 관통한 splitting현상을 나타내었다.

Fig. 11은 파손과정 중 방출된 AE신호들의 진폭 분포를 하중단계(stage)별로 나타낸 것이다. stage I에서의 AE진폭은 Fig. 11a)에서와 같이 42~78dB의 분포를 나타내었는데, 이들은 90° 층균열로부터 방출된 것으로 추정되었다.

또한 Fig. 11b), c)에서 볼 수 있는 바와 같이 진폭 분포가 stage II에서는 66dB 주위에서 넓은 peak를 보였으며, 80dB이상의 큰 진폭의 신호도 부분적으로 검출되었다. 한편 stage III에서는 60dB정도의 진폭을 가진 AE신호가 가장 많이 나타났으며 80dB 이상의 큰 진폭 신호는 stage II보다 많이 검출되었다.

이들 중 낮은 진폭을 가진 AE신호로는 90° 층균열로 추정되었으며 80dB이상의 큰 진폭을 가지는 AE신호로는 0° 층균열로 추정된다.

### 3.2.2. [0° /90° ]<sub>2S</sub> 시험편

Fig. 12는 [0° /90° ]<sub>2S</sub> 적층시험편의 인장시험시 하중 및 AE-event count의 시간에 대한 변화를 나타낸 것으로 인장하중의 증가에 따라 최종 파단시까지 하중-변위곡선은 서서히 변화하였다.

[0° /90° ]<sub>2S</sub>시험편의 경우와 마찬가지로 손상단계를 3단계로 구분하였으며, 인장하중은 stage I에서 710kgf의 하중까지 거의 선형적으로 증가하다 stage III에서 pop-in현상이 다소 관측되면서 파단에 이르는 것으로 나타났다.

이때 AE신호는 80kgf의 하중에서부터 검출되기 시작하였으며 730kgf 부근에서 급격히 큰 신호가 발생했는데 이는 90° 층에서 발생한 것으로 추정되었

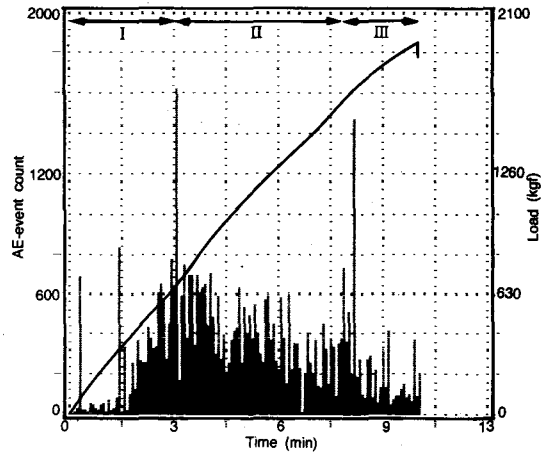


Fig. 12. AE-event counts and load vs. time curve for [0° /90° ]<sub>2S</sub> specimen during tensile test.

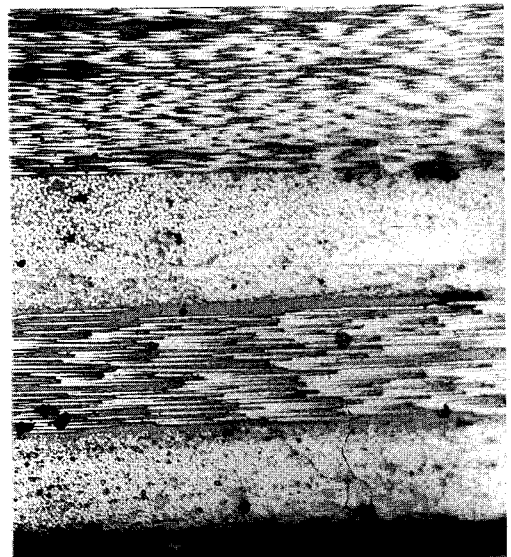


Fig. 13. Optical microscopy for [0° /90° ]<sub>2S</sub> specimen loaded up to 900kgf [x50].

다. 이러한 손상의 미시적 양상은 900kgf까지 인장하중을 가한 시편의 현미경 단면사진으로 이를 확인할 수 있었다.



Fig. 14. Optical microscopy for  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  specimen loaded up to 2160kgf [ $\times 100$ ].

Fig. 13은 900kgf(stage II)까지 인장하중을 가한 시편의 현미경 단면사진으로, 균열이 시편의  $90^\circ$  층을 관통한 후 정지한 파괴양상을 관찰할 수 있었으며 층간박리(delamination)는 관측되지 않았다. 그러나 Fig. 14의 stage III(2160kgf)까지 인장하중을 가한 시편의 현미경 단면사진으로 부터 stage III에서는  $0^\circ$  및  $90^\circ$  층 사이의 층간박리가 많이 성장한 것도 관측되었다.

Fig. 15는  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  시험편의 AE 데이터로부터 얻은 각 하중단계에서의 진폭분포이다.

Stage I에서의 AE진폭은 Fig. 15a)에서와 같이 42~99dB의 넓은 분포를 나타내었는데 이들은  $0^\circ$  층사이에 골고루 배열된  $90^\circ$  층균열로 부터 방출된 것으로 보이며 이 결과는  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  시험편에서 동일한 파손기구로 부터 방출된 AE신호의 진폭분포에 비해 10dB정도 크게 나타났다. 이러한 차이는 시험편 적층구조의 차이 및 그것에 의한 AE 방출시의 응력이  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  시험편의 경우가 크기 때문으로 판단되었다. Fig. 15 b), c)에서 볼 수 있는 바와 같이 stage II와 stage III에서는 AE 진폭분포

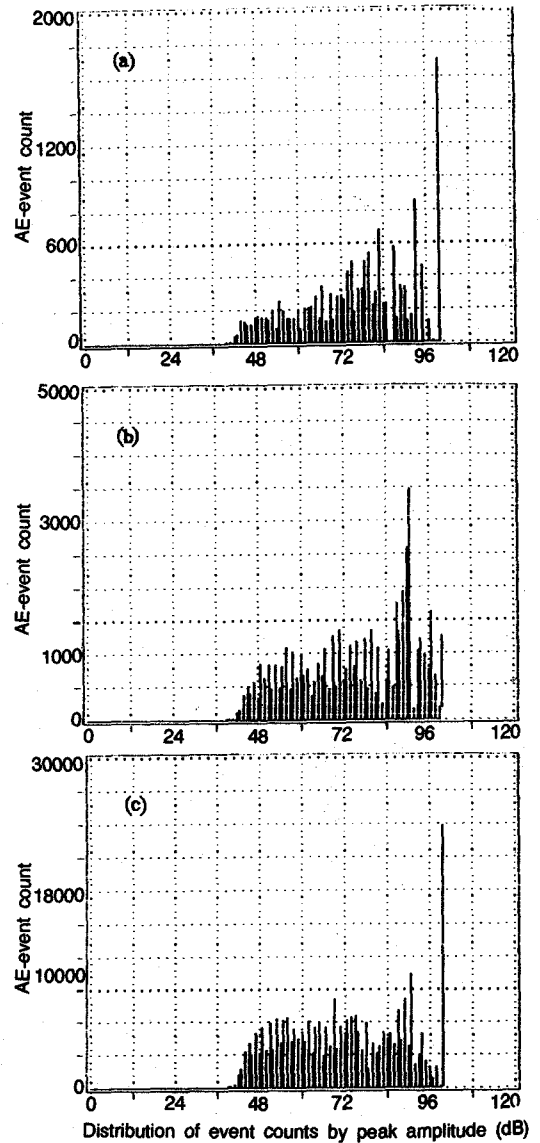


Fig. 15. Peak amplitude distribution for  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  specimen.

a) Stage I b) Stage II c) Stage III

가 72dB 주위에서 넓은 peak를 보였으며 85dB 이상의 큰 진폭의 신호도 다수 검출되었다. 이들중 stage II의 낮은 진폭을 가지는 AE신호로는  $0^\circ$  층사이에 골고루 배열된  $90^\circ$  층균열 및 층간박리(delamination)로 추정되었으며, 85dB 이상의 큰 진폭을 가지는 AE



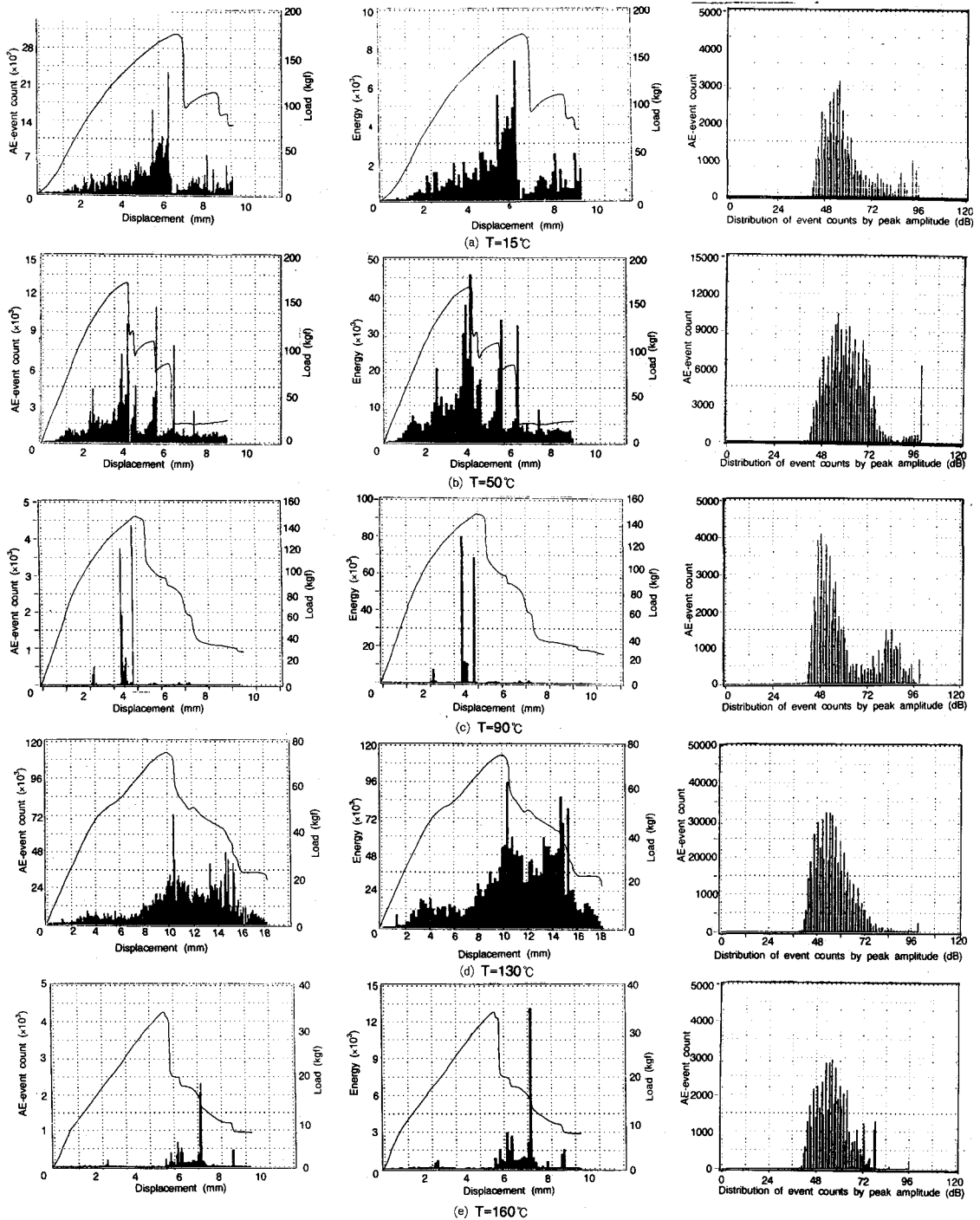


Fig. 16. AE-event count, energy, peak amplitude and load vs. displacement curve for  $[0^\circ z/90^\circ z]_s$  specimen during fracture toughness test.

신호로는 0° 층의 균열로 판단되었다.

따라서 AE의 진폭분포를 통하여 AE진폭은 파손 기구와 서로 밀접한 상관관계를 가짐을 확인하였다. 또한 하중증가에 따라 최대진폭을 갖는 AE-event count는 넓은 진폭분포영역에서 크게 누적되었는데, 이것은 모든 손상이 기지균열, 섬유파단 및 층간박리와 계속적으로 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 판단되었다.

3.3. 파괴 인성시험시의 AE 발생 거동 및 파괴 상태 관찰

3.3.1. [0°/90°]s 시험편

Fig. 16는 [0°/90°]s의 콤팩트(CT) 시험편에 대해 시험온도를 상온(15°C)에서 160°C까지 5단계로 변화시켰을 때의 파괴인성시험 중에 나타난 AE 발생 거동 및 하중-변위 곡선이다.

Fig. 16의 AE-event count 및 AE energy에 대한 하중-변위곡선을 보면 시험온도에 관계없이 하중증가와 함께 AE 신호발생은 서서히 변화하며 AE 신호가 거의 직선적으로 증가하여 최대하중점에서 peak를 보인다. 그 후 pop-in 현상이 거듭되면서 AE 신호도 같이 감소하는 경향을 나타내었다. 최대 하중 총 AE-event count 및 AE energy는 시험온도가 증가할수록 감소하였다.

그리고 AE신호는 시험온도가 증가할수록 낮은 하중에서 발생함을 알 수 있었다. 이는 시험온도가 증가함과 동시에 mode I 응력이 작용하면 기지의 점도증가로 섬유와 기지의 계면결합이 저하되고 이 부분에 응력집중이 생겨 초기손상이 급진전되는 점탄성거동에 의한 것으로 사료된다.

한편 AE 진폭분포를 보면, 15°C~130°C의 경우, 약 42~99dB의 넓은 분포를 나타내었으며, 160°C의 경우는 약 42~78dB의 분포를 나타내었다. 그리고 15°C~90°C에서는 54dB 전후에서 폭넓은 peak를 보였으며, 80dB 이상의 큰 진폭의 신호도 다수 검출되었다. 여기서, 낮은 진폭을 가지는 AE 신호는 90° 층의 기지균열, 층간박리 및 섬유인발 등에 의한 것으로 추정되며, 80dB 이상의 큰 진폭을 가지는 AE 신호는 0° 층의 인장방향과 평행하게 작용하는 수직응력에 의한 기지파단과 섬유파단에 의한 것으로 판단되었다. 그러나 유리전이온도 근방의 130°C 및

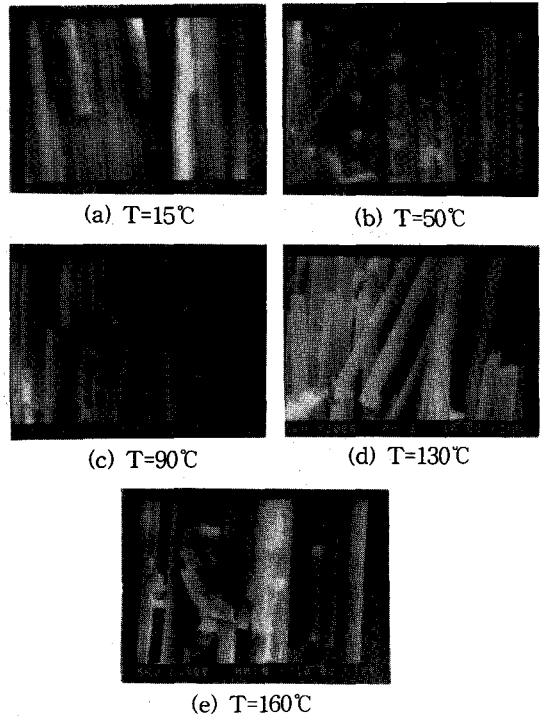


Fig. 17. SEM photograph of fracture surface for [0°/90°]s CT specimen after fracture toughness test.

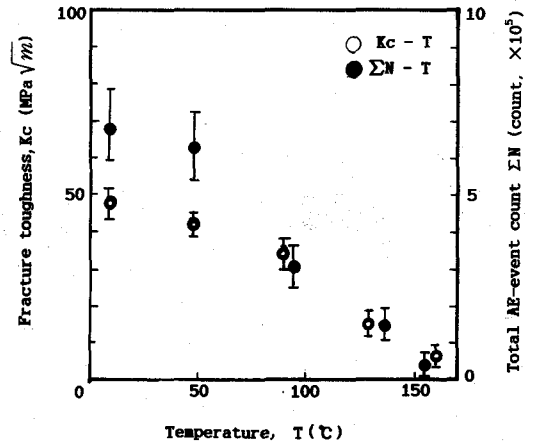


Fig. 18. Fracture toughness and total AE-event count vs. temperature for [0°/90°]s specimen.

그 이상의 온도인 160°C에서는 54dB에서 비교적 좁은 peak를 보여주고 있다. 그러나 130°C의 경우,

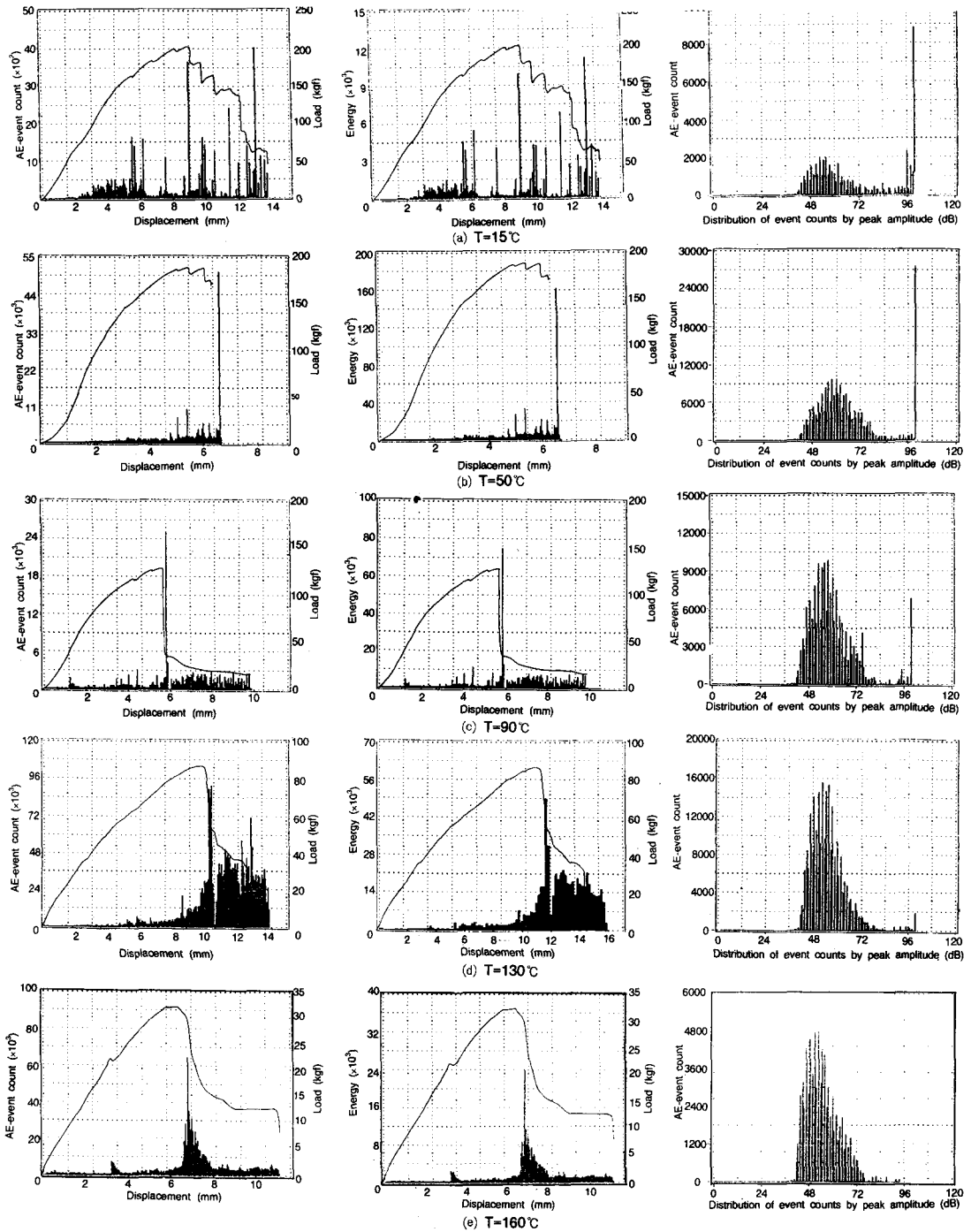


Fig. 19. AE-event count, energy, peak amplitude and load vs. displacement curve for  $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$  specimen during fracture toughness test.

80dB 이상의 큰 진폭을 가진 신호가 미소하게 검출되어 기지파단과 섬유파단이 부분적으로 발생함을 알 수 있다. 한편 160°C의 경우는 80dB 이상의 진폭 신호가 검출되지 않는 것으로부터 기지파단과 섬유파단이 일어나지 않고 기지균열, 섬유인발 및 층간박리가 발생하여 최종 파단되는 것으로 추정된다. 이는 T. Kish 등<sup>12)</sup>의 보고와 일치하며 Fig. 17의 130°C 및 160°C 시험편에 대한 최종 파단면사진의 관찰로부터 알 수 있었다.

Fig. 18은  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$  시험편에 대하여 온도증가에 따른 파괴인성 Kc와 AE-event count의 변화를 나타낸 것으로, 시험온도가 증가함에 따라 파괴인성과 총 AE-event count가 감소하는 경향을 나타내었다.

이를 통하여  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$  시험편의 온도증가에 따른 파괴인성과 AE 신호와의 상관관계를 조사할 수 있었다.

### 3.3.2. $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ 시험편

Fig. 19는  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ 의 콤팩트(CT)시험편에 대해 시험온도를 상온에서 160°C까지 5단계로 변화시켰을 때의 파괴인성시험 중에 나타난 AE 발생거동 및 하중-변위곡선이다.

AE-event count 및 AE energy에 대한 하중-변위곡선을 보면, 시험온도에 관계없이 일정하중까지는 변위의 증가와 함께 하중이 거의 선형적으로 비례하면서 증가하다가 최대하중점의 전후에 다수 또는 부분적인 pop-in 현상을 보이면서 파단되는 양상을 보였다. 이때 AE 신호는 pop-in 현상과 거의 비슷한 주기로 증감이 반복되었다. 그러나, 시험온도가 증가할 수록 pop-in 현상과 AE 신호 증감의 반복은 현저히 감소하며 최대하중과 총 AE-event count 및 AE energy도 감소하는 경향을 나타내었다.

그리고 AE 신호는 Fig. 16의  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ 의 경우와 같이, 시험온도가 증가할 수록 낮은 하중에서 발생함을 알 수 있었으며 이는 시험온도 증가에 따른 점탄성거동에 의한 것으로 생각된다.

한편 AE 진폭분포를 보면 Fig. 16의  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ 의 시험편과 같이, 15°C~130°C의 경우 약 42dB~99dB, 160°C의 경우 약 42~78dB의 분포를 나타내었다. 그리고 15°C~90°C에서는 54dB 전후에서 폭

넓은 peak를 보였으며, 80dB 이상의 큰 진폭의 신호도 다수 검출되었다. 여기서 낮은 진폭을 가지는 AE 신호로는 90° 층의 기지균열, 층간박리 및 섬유인발 등에 의한 것으로 추정되었으며, 80dB 이상의 큰 진폭을 가지는 AE 신호로는 0° 층의 기지파단과 섬유파단에 의한 것으로 판단되었다. 그러나 유리전이온도 근방의 130°C 및 그 이상의 온도인 160°C의 시험온도에서는 54dB에서 비교적 좁은 peak를 나타낸다. 130°C의 경우, 80dB 이상의 큰 진폭을 가진 신호가 미소하게 검출되어 기지파단과 섬유파단이 부분적으로 발생함을 알 수 있으나, 160°C의 경우는 80dB 이하의 낮은 진폭신호의 발생원인 기지균열, 섬유인발 및 층간박리가 발생하여 최종 파단되는 것으로 추정된다. 이는 T.Kish 등<sup>12)</sup>의 보고와 일치하며 Fig. 20의 130°C와 160°C 시험편에 대한 최종 파단면 사진의 관찰로부터 예측할 수 있었다.

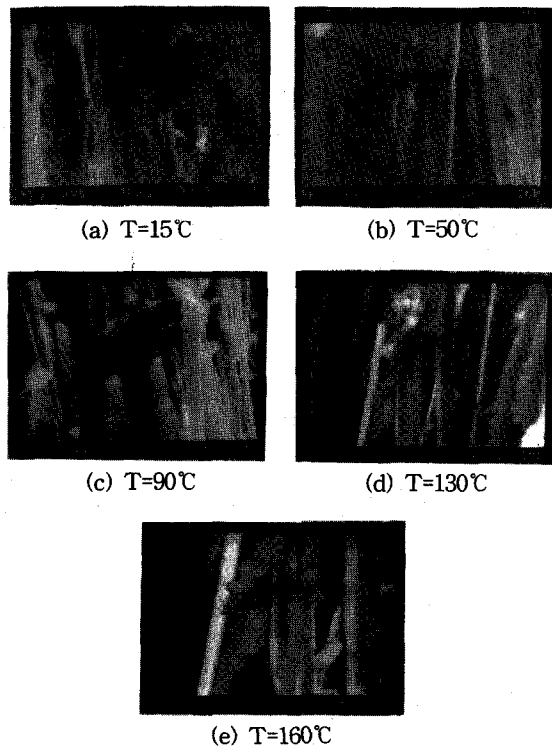


Fig. 20. SEM photograph of fracture surface for  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$  CT specimen after fracture toughness test.

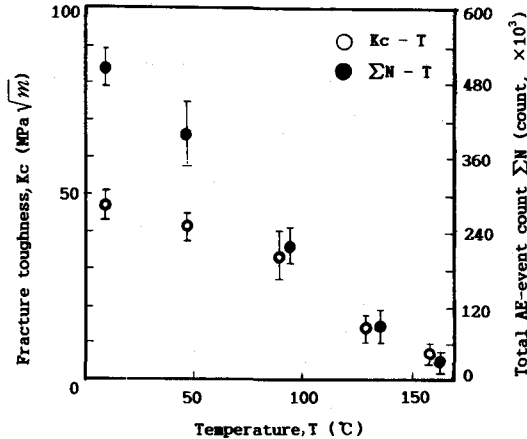


Fig. 21. Fracture toughness and total AE-event count vs. temperature for  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$  specimen.

Fig.21은  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ 의 시험편에 대하여 온도증가에 따른 파괴인성  $K_c$ 와 AE-event count의 변화를 나타낸 것으로, 시험온도가 증가함에 따라 파괴인성과 총 AE-event count가 같이 감소하는 경향을 나타낸다.

이를 통하여  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$  시험편의 온도증가에 따른 파괴인성과 AE 신호와의 상관관계를 조사할 수 있었다.

#### 4. 결론

탄소복합재료의 성형압력과 재료강도와의 상관성 해석을 통하여 AE를 성형과정에 대한 품질감시 및 기계적 특성편차를 조절하기 위한 수단으로의 적용성을 검토하고, 탄소섬유복합재료의 인장 및 파괴인성시험시의 파괴거동과 손상특성 및 손상기구를 AE에 의해 해석, 평가하기 위해 얻어진 중요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 탄소섬유복합재료에 대한 성형시 가압조건에의 조절과 인장시험 및 AE의 모니터링을 통해 본 실험에서 결정된 탄소섬유복합재료 적층재의 적정 성형조건은 성형초기압력  $20\text{kgf/cm}^2$ , 성형유지압력  $200\text{kgf/cm}^2$ 이며, 이때 총 AE-event count는  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ 는  $380\sim 427(\times 10^3)$ ,  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ 는  $390\sim 420(\times 10^3)$  count이었다.

- 2) AE신호의 AE-event count rate 발생정도에 따라 손상단계를 구분하여 각 하중단계별 하중과 현미경 조직검사에 의하여 파괴기구를 분석할 수 있었다.
- 3) 탄소섬유복합재료의 파괴인성  $K_c$ 는 온도가 증가할 수록 감소하며,  $130^\circ\text{C}$  이상에서 파괴인성이 급격히 감소하는 점탄성거동이 확인되었다. 또한 온도증가에 의한 파괴인성 저하의 요인은 기지의 점도증가 현상에 따른 섬유-기지사이의 계면결합 저하에 의한 것으로 판단되었다.
- 4) 하중-변위선도의 하중증가 양상과 AE 신호해석으로부터 온도증가에 따른 파괴인성시험시의 초기손상 및 손상진전과정을 예측할 수 있었다.

#### <후 기>

본 연구는 1993년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 지원 연구비로서 연구되었으며, 연구과제 "CFRP의 파괴거동 및 AE평가에 관한 연구"의 일부임.

본 연구에 사용된 재료는 한국화이버(주)에서 제공받은 것이며, 관계 제위에게 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- 1) Fassbender, R. H. and D. J. Hagemaiier, "Low Kilovoltage Radiography of Composites", Materials Evaluation, Vol. 41, No. 7 (1983), pp. 831-838.
- 2) James, T. S., D. Polansky and H. Berger, "Radiation Inspection Methods for Composites", NDT International, Vol. 21, No. 4 (1988), pp. 277-282.
- 3) Jones, T.S., "Inspection of Composites Using the Automated Ultrasonic Scanning System", Materials Evaluation, Vol. 43, No. 6 (1985), pp. 746-753.
- 4) Bar-Cohen, Y. and R. L. Crane, "Acoustic Backscattering Imaging of Sub-Critical Flaws in Composites", Materials Evaluation, Vol. 40, No. 9 (1982), pp. 970-975.

- 5) Vary, A. and R. F. Lark, "Correlation of Fiber Composite Tensile Strength with the Ultrasonic Stress Wave Factor", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 7, No. 4 (1979), pp. 185-191.
- 6) Talreja, R., "Application of Acousto-Ultrasonics to Quality Control and Damage Assessment of Composites", Acousto-Ultrasonics: Theory and Application eds. J. C. Duke, Plenum Press, New York (1988), pp. 191-200.
- 7) Joachim Block, "Monitoring of Defect Progression by Acoustic Emission", Conference Proceedings : Meeting of the Structures Materials Panel (56th), Held in London (1983), pp. 720-728.
- 8) Stephan W. Tasi, Composite Design, 3rd Ed., Think Composites, Dayton, Ohio(1987)
- 9) Suzuki M., Nakanishi H., Iwamoto M., Jinen E., Maekawa Z., Mori A. and Sun F., "Studies on Fracture Mechanism of CFRP by Acoustic Emission Method," J. of JSME (Part A), Vol. 53, No. 492 (1987), pp. 1459-1466.
- 10) R. G. Lipital, "Acoustic Emission from Composite Materials," ASTM STP 496 (1972), pp. 285-298
- 11) I Kimpara, I. Ohsawa, T. Ozaki and S. Takada, "Characterization of Tensile Failure Process of Unidirectional Hybrid Composites by Acoustic Emission," Progress in Acoustic Emission 2, JSNDI (1984), pp. 464-471
- 12) 湯山茂徳, 岸輝雄, "AEの新素材への適用," 非破壊検査, Vol. 35(1986), pp. 720-728

## A Study on the Fracture Behavior of CFRP in Tensile and Fracture Toughness Tests by Acoustic Emission

Sang-Guk Lee\*, Sae-Kyoo Oh\*, Ki-Woo Nam\*\* and Og-Gyun Kim\*\*

\* : Dept. of Mech, Engrg., College of Engrg., Natl. Fi. Univ. of Pusan

\*\* : Dept. of Mech, Engrg., College of Engrg., Natl. Fi. Univ. of Pusan

**Abstract** The study was carried out to analyze the fracture behavior and the acoustic emission(AE) characteristics and to find the relationship among tensile strength, fracture toughness and cure pressure in cure process of the carbon fiber reinforced composites of two types,  $[0^\circ / 90^\circ]_{2s}$  and  $[0^\circ / 90^\circ]_{2l}$ . AE signals were detected during the curing process, tensile tests and fracture toughness tests by acoustic emission(AE) measurements, respectively. Tensile strengths showed that the less cure pressurizing steps and the side of  $[0^\circ / 90^\circ]_{2s}$  specimens had the higher strengths than those of the others. Fracture toughness by the change of test temperature showed nearly same values in the same temperature region, but the higher test temperature had the lower fracture toughness values. In order to examine the relationship between fracture behavior of CFRP in tensile and fracture toughness tests and AE signals, the post processing for AE parameters of AE data and the observations of microscope and SEM have been carried out respectively.

---

(Received : July 1, 1994)