

● 論 文

## 탄소섬유복합재료의 AE에 의한 충격손상재강도와 손상특성평가

이 상 국\* · 오 세 규\* · 남 기 우\*\* · 김 옥 균\*\*

(94년 12월 10일 접수)

### The Evaluation of Strength and Damage Characteristics by AE in Impact Test of CFRP

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

**Key Words** : AE(Acoustic Emission : 음향방출), CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic : 탄소섬유 복합재료), Total AE-Event Count(음향방출 사상 총계수), Energy Gradient Method(에너지 기울기법), Delamination Area(박리면적), Impact Energy(충격에너지), Tensile Strength Ratio(충격손상재의 강도비), Impact Velocity(충격속도)

### Abstract

This study is aimed to have a database of system development for the prediction, monitoring, analyzing, and evaluation of tensile strength and damage characteristics through AE technique for CFRP. Therefore the correlations between impact characteristics(such as impact velocity, impact energy, delamination area etc) and AE signals for CFRP laminates were investigated. And also it were accomplished the evaluation of tensile strength and the investigation on correlation with AE signals for impact damaged specimen of CFRP laminates.

\* 부산수산대 기계공학과

\*\* 부산수산대 재료공학과

## 1. 서 론

탄소섬유복합재료(carbon fiber reinforced plastic)는 재료특유의 이방성(anisotropy)과 불균일성(inhomogeneity) 또는 재료의 제조과정에서 발생할 수 있는 각종 형태의 결함을 내재할 가능성이 크다. 특히 탄소섬유복합재료 적층체에 있어서는 적층각 및 적층순서에 따라 매우 복잡한 파괴특성을 갖고 있어 현재까지 진행되어 온 내충격성 평가방법과 잔류강도 예측방법에 의한 내충격성 및 잔류강도예측<sup>1,3)</sup> 등의 결과를 정확히 신뢰하여 정량화하기 어려운 실정이다. 또한 현재까지의 탄소섬유복합재료에 대한 잔류강도를 평가하기 위한 연구는 주로 손상재 내부에 존재하는 잔류압축강도, 잔류파괴강도에 관한 평가가 대부분으로 충격손상재에 대한 재료내부의 충격손상과정 및 파괴기구를 모니터링할 수 있는 파괴메카니즘의 평가방법이 어느때보다 시급히 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 AE법을 이용하여 충격손상재에 대한 재료내부의 충격손상정도와 파괴기

구를 모니터링하여 평가한 후, 이들을 정량화하고 최종적으로 충격손상재강도의 예측과 파괴메카니즘을 규명하는데 있다.

## 2. 실 험

### 2-1 시험편제작

본 연구에서 사용된 시험편은 일방향강화 탄소섬유/에폭시 프리프레그(한국화이버, CU 100NS)를 열성형기에서 적층성형하여 제작하였다. 사용된 탄소섬유 및 프리프레그의 기계적특성은 Table 과 같다. 준비된 프리프레그를 Table 2와 같이 4 종류의 적층방법으로 8ply를 적층한 후, 열성형기에서 탄소섬유의 중량함유율을 A, B재가 62%wt, C, D재가 56%wt가 되도록 성형하였다. 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. 1과 같은 형상과 치수로 가공하였다.

Table 1. The mechanical properties of fiber and prepreg for A, B, C, D specimen.

property	unit	carbon fiber	prepreg(CU100NS)
tensile strength axial(0°) tranverse(90°)	kgf/mm <sup>2</sup>	345 -	160 10
tensile modulus axial(0°) tranverse(90°)	kgf/mm <sup>2</sup>	21,500 -	12,047 825
poisson's ratio axial(0°) tranverse(90°)		none	0.27 -
compressive strength axial(0°) tranverse(90°)	kgf/mm <sup>2</sup>	none	101 21
compressive strength axial(0°) tranverse(90°)	kgf/mm <sup>2</sup>	none	11,200 -
shear strength shear modulus	kgf/mm <sup>2</sup>	none	10 992
density	g/cm <sup>3</sup>	1.75	1.59
R/C(resin content)	wt%	-	-

Table 2. Specification of A, B, C, D specimen

material	stacking sequence	size(mm)
A	$[0^{\circ}_2/90^{\circ}_2]_s$	25.4W×244L×0.95T
B	$[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$	25.4W×244L×0.95T
C	$[0^{\circ}_2/90^{\circ}_2]_{ss}$	25.4W×244L×1.85T
D	$[0^{\circ}/90^{\circ}_2]_s$	25.4W×244L×1.85T

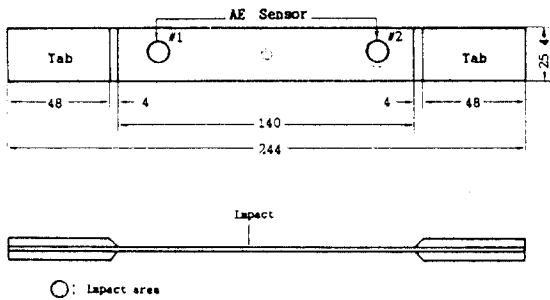


Fig. 1 Shape of impact tensile specimen, All dimension in mm

## 2-2 실험장치 및 방법

### 2-2-1 AE 시험방법 및 장치

충격시험 및 충격손상재에 대한 인장시험중의 AE신호의 측정 및 분석에는 LOCAN 320 시스템이 사용되었으며 AE 센서(sensor)는 공진형(공진주파수 150KHZ, PAC R-15)으로 주위의 잡음을 제거하기 위해 광대역 필터(band-pass filter)를 사용하였다. 또한 센서 #1 과 센서 #2 는 신호를 민감하게 수집하기 위해 시편과 센서사이에 고진공 실리콘 그리이스 및 정압클램프(constant force

clamp)와 접착테이프로 고정하여 균일한 커플링(coupling)이 되도록 부착하였다. 충격시험 및 충격손상재에 대한 인장시험시의 LOCAN 320 시스템의 변수설정값을 Table 3에 나타낸다.

### 2-2-2 충격시험 및 AE 측정방법

시험편에 초기손상을 주기위해 공기압식 충격시험장치를 이용하여 직경 8.8mm(2.7g)의 강구를 시험장치에 부착된 내경 9mm의 발사관(유리관)을 통과시켜 시험편에 충돌시켰다. 충격시험장치는 공기압축기(air compressor), 발사관, 지지대(barrel), 시편고정대, 전자식 카운터(digital counter), 제어밸브 및 타이머로 구성되었다. 그리고, 시편고정대에는 50×40(mm)의 정방형 구멍을 내고 두께 4mm의 고무판을 붙인 후, 중앙부에 시편을 고정하여 시편중심에 강구가 충돌하도록 하였다. 또한, 공기압축기는 8.5kgf/cm<sup>2</sup>까지 일정한 압력으로 충격시험이 가능하며, 가압된 공기를 제어밸브에서 타이머를 통하여 순간적으로 개폐되면서 충돌체의 속도를 가속시킬 수 있도록 하였다. 충돌체의 속도측정은 발사관아래 지지대에 수광다이오드를 센서로 이용하여 200mm 간격을 두고 설치하여 2개의 수광다이오드 설치지점을 통과하는 시간차로

Table 3. Amplification frequency and threshold voltage setting for AE test during impact test, tensile test, versus impact specimen

AE parameter		test	impact test	tensile test
Amplifier	pre-Amp.		40dB	40dB
	main-Amp.		20dB	26dB
Frequency			100~300KHz	100~300KHz
Threshold Voltage			2.5V	0.2V

계산하였으며, 사용된 디지털카운터는  $10^{-4}$ sec까지 측정 가능하다. 한편, 충격속도는 제어밸브를 이용하여 공기압축기의 압력을 변화시켜 25m/s~150m/s 충격 범위의 속도로 변화시킬 수가 있었다. 발사공기압력과 발사속도와의 관계를 Fig. 2에 나타내며, 본 실험장치에서는 발사속도를 대략  $\pm 3\%$ 의 정확도로 제어가능하였다. 충격시험시의 충격 실험장치 개략도를 Fig. 3에 각각 나타낸다. 또한, 충격시험 중의 AE신호의 측정은 예비실험과 본 실험으로 구분하여 AE데이터를 산출하였다.

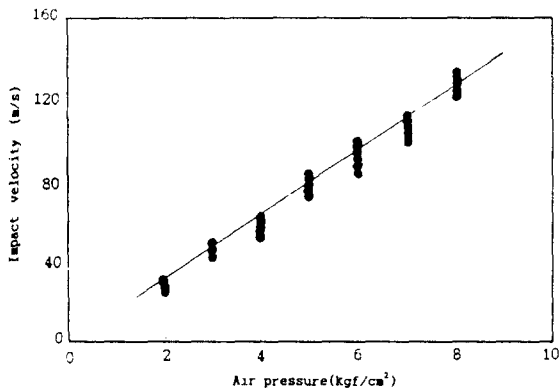


Fig. 2 Relation of air pressure and impact velocity

### 2-2-3 인장시험 및 AE 측정방법

Table 2의 A, B, C, D재의 4종류 탄소섬유복합재료 적층판의 인장시험에 대한 충격손상재의 인장강도를 조사하기 위한 인장시험기는 인스트론사(Instron, model 4204) 유압식만능시험기를 이용하였고, 최대하중 5ton의 로드셀(load cell)이 사용되었다. 시험속도(cross-head speed)는 1.0mm/min로 하였으며, 인장시험중 센서로부터 검출된 AE신호는 광대역 필터(band-pass filter)를 거쳐 pre-amp. 및 main amp.에서 각각 증폭시켜 AE장비에 내장된 CPU에 필요한 자료가 처리되도록 하였다. 인장시험시 AE변수 설정값을 Table 3에 나타낸다. 인장시험에 부착하는 센서는 예상되는 주 결합발생 부위를 중심으로 60mm간격을 두고 부착하여 인장

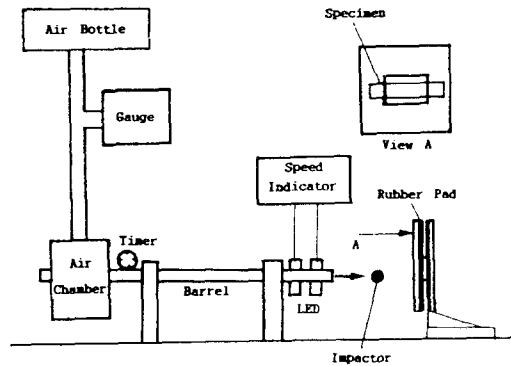


Fig. 3 Schematic diagram of impact apparatus

시험기 및 그리드(grid) 부위에서의 잡음(noise)을 최소화 하였다. 또한 손상하중정도를 확인하기 위하여 AE에 의해 손상진전을 감시하여 소정의 손상하중까지 인장시험을 수행한 후 손상진전 양상을 에폭시 몰딩(epoxy moulding)하여 단면을 절단 및 폴리싱(polishing)한 후 광학현미경으로 관찰하였다.

### 2-2-4 충격손상재의 초음파 C-scan 측정방법 및 박리면적 산출

충격에 의한 충격손상량을 조사하기 위해 손상재 전체시험면에 대해 초음파 C-scanner를 이용하여 박리면적을 산출하였다. 초음파 C-scan 시험장치는 MATEC사의 MBS 8000 시스템 및 US 450 C-scanner를 사용하였으며, 시험에 사용된 초음파 주파수는 2MHZ 및 5MHZ였다. 그리고 진폭(amplitude)과 펄스폭(pulse width)을 변화시켜 시험면의 저면에서 반사된 신호에 대해 최적탐상조건을 설정하였다. 탐상조건은 진폭 0.3V, 이득(receiver gain) 20dB, 펄스폭 0.05 $\mu$ sec, 스캔 피치(scan pitch) 0.3mm이었다. 박리면적 계산방법은 적층판의 각층간 계면 박리면적을 합산하여 총 박리면적으로 할 수 있다. 그러나 본 실험에서는 시험면의 표면에서 scanning된 박리손상의 면적을 면적계(digital planimeter, kp-90)로 측정한 값을 박리면적이다. 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1 충격시험에 의한 손상량과 충격 및 AE 특성평가

Fig. 4는 A, B형 시편에 대한 충격시험시 충격 속도 변화에 따른 박리면적과 충격시 발생한 총 AE사상수(total AE-event count)와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 충격속도가 증가함에 따라 박리면적과 총 AE사상수도 같이 증가함을 알 수 있다.

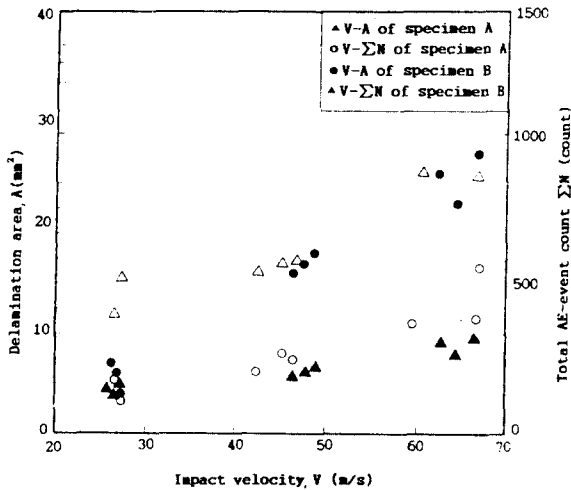


Fig. 4 Relation of delamination area total AE-event count vs. impact velocity of specimen A, B

Fig. 4에서 보면, B형 시편이 A형 시편에 비해 다소 큰 박리면적과 AE사상수가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 A형 시편의 경우, 중앙의 90° ply 4개층이 충격에 저항할 수 있는 구조로 충격 흡수가 많아지며, B형 시편은 0° 및 90° ply가 교대로 적층되어 있어 충격시 충격흡수에 약하여 충격손상이 커지므로 인하여 탄성변형에 의한 AE사상수가 다소 많아진 것으로 사료된다.

C, D형 시편에 대한 충격시험시 속도 변화에 따른 박리면적과 충격시 발생한 총 AE사상수와의 관계에서도 충격속도의 증가에 따라 박리면적과

총 AE사상수가 같이 증가하는 경향을 보였다.

따라서, C, D의 경우도 A, B형의 경우와 같이 적층구조상 충격흡수의 많고 적음에 기인하여 서로 다른 박리면적과 AE사상수가 발생함을 알 수 있었다.

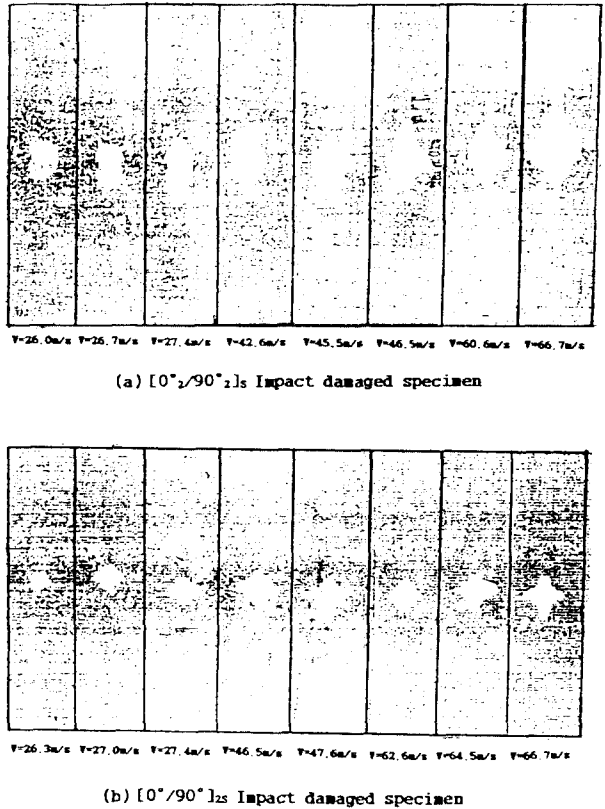


Fig. 5 The results of ultrasonic C-scan for specimen A, B

A, B형 시편에 대해 충격시험을 행한 후 초음파 C-scan으로 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 속도증가에 따라 박리면적이 증가하는 양상을 잘 알 수 있다.

#### 3-2 충격손상재의 인장강도와 AE 특성평가

##### 3-2-1 충격속도 및 에너지와 인장강도와의 관계 및 AE 특성

Fig. 6은 A, B형 시편의 충격속도에 대한 미손

상재의 인장강도와 충격 후의 손상재에 대한 인장 강도 및 인장시험중에 발생한 총 AE사상수와와의 관계를 나타낸 것이다. 충격에너지는 충격속도와 충돌체의 질량으로부터 계산되는 값이므로, Fig. 6의 횡축의 충격속도는 충격에너지(impact energy)로 바꾸어 쓸 수 있다.<sup>1)</sup> 한편, 횡축의 속도 0점에 충격손상을 주지 않은 시편의 인장강도 및 총 AE사상수를 A, B재에 대해 각각 표시하였다. Fig. 6에서 보면, 속도가 30m/s 이내의 속도범위에서 A, B재 양시편의 강도가 급격히 감소하는 거동을 나타내었다.

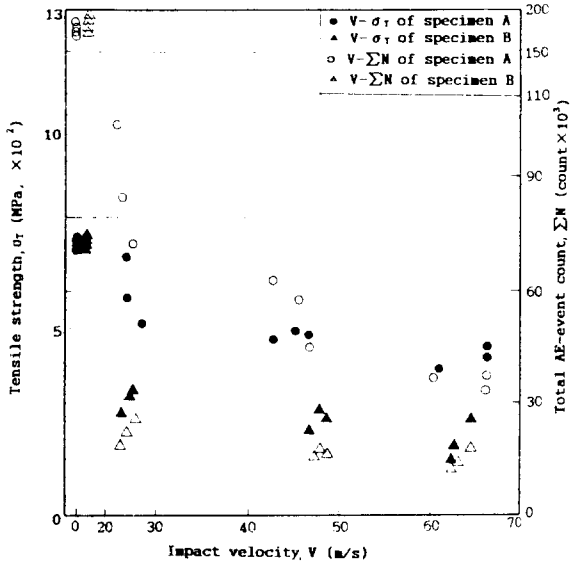


Fig. 6 Relation of tensile strength and total AE-event count vs. impact velocity for specimen A, B after impact test

따라서, A, B재에 대하여 이들 관계를 속도증가에 따른 충격손상재의 강도비를 충격에너지와의 관계로 나타내면 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 충격손상재의 강도비(tensile strength ration)는 미손상재 시편의 인장강도를 100%로 했을 때, 손상재의 강도를 백분율로 나타낸 값이다. 역시 A재의 경우보다 B재의 손상재의 강도 저하가 더 커짐을 알 수 있다. B재의 이와같은 손상재의 강도저하는 3-1-1에서 전술한 바와 같이 적층구조상 A재에 비해 충

격에 약한 특성에 의한 것으로 생각된다. A재의 경우, 30m/s(1.2J) 전후에서 손상재의 강도비는 약 81%이었으나, B재는 30m/s(1.2J) 전후에서 크게 감소하여 손상재의 강도비는 약 43%가 되었다. 그리고 30m/s 이상의 속도에서는 강도가 크게 감소하지 않고 완만하게 감소하여 재료의 적층구조에 따라 서로 다른 손상재의 강도비를 가짐을 알 수 있었다.

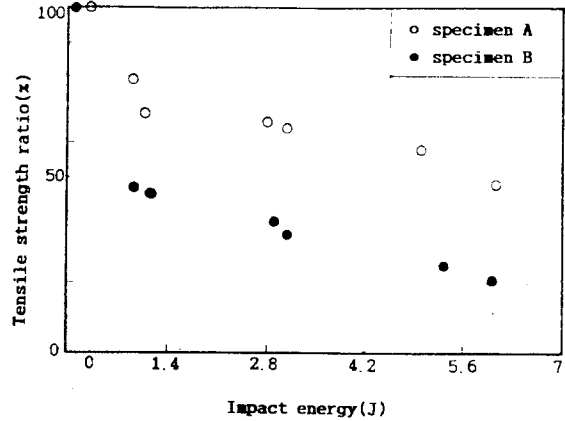


Fig. 7 Relation between impact energy and tensile strength ratio of specimen A, B

한편, 미손상재 및 충격손상재에 대한 총 AE사상수의 변화를 보면 충격속도 30m/s이내에서 미손상재의 경우를 100%로 하였을 때 A재가 약 84%이었으나, B재는 약 12% 정도로 크게 낮은 AE사상수가 나타났다. 따라서 충격손상재의 강도저하의 양상과 같이 충격속도가 증가함에 따라 AE량이 감소하는 경향을 보인다. 이와같이 속도에 따른 AE량의 감소율관계를 정량화하여 속도증가에 따른 손상재의 인장강도를 AE에 의해 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

또한 C, D형 시편의 충격속도에 대한 미손상재의 인장강도와 충격후 손상재의 인장강도 및 총 AE사상수와와의 관계는 전술한 A, B재 시편의 경우와 같은 경향을 나타내었다. C, D재에 대해 속도증가에 따른 손상재의 강도비를 충격에너지와의 관계로 나타내면 Fig. 8과 같다.

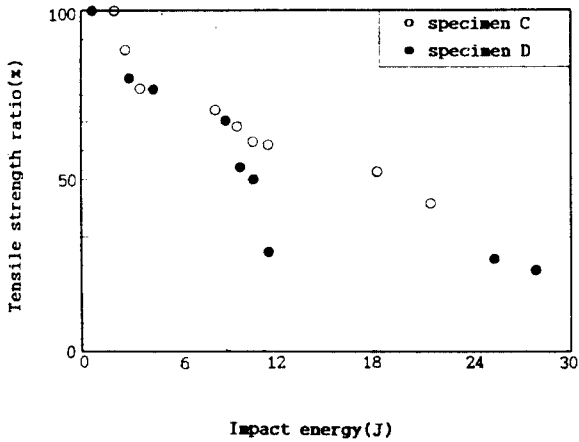


Fig. 8 Relation between impact energy and tensile strength ratio of specimen C, D

Fig. 8에서, C시편의 경우 40m/s(2.2J) 전후의 속도에서 미손상재에 대한 손상재의 강도비는 미손상재의 인장강도를 100%로 하였을 때, 대략 79%, D시편은 77%로 A재의 손상재의 강도비 81%와 거의 비슷한 값을 가졌다. 그러나 역시 D시편이 C시편에 비해 손상재의 강도저하가 커짐을 알 수 있었다. 따라서 전술한 B재의 급격한 손상재의 강도저하와 비교해 보면, 시편두께의 영향을 받은 것으로 생각된다. 이와는 달리 미손상재 및 충격손상재에 대한 총 AE사상수의 변화를 보면 미손상재의 AE량을 100%로 하였을 때, C재의 경우 약 71%, D재는 약 32%로 크게 낮은 AE량이 나타났다. 이로써 본 실험에 사용된 A, B, C, D재의 경우, Fig. 6, 7, 8을 조사하여 손상재의 강도감소율과 총 AE사상수의 감소율을 속도에 따라 추정해 볼 수 있었다.

### 3-2-2 박리면적과 손상재의 강도와 관계 및 AE 특성

Fig. 9는 A, B형 시편의 충격손상에 의한 박리면적과 손상재의 인장강도와 총 AE사상수의 관

계를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보면, 박리면적이 증가함에 따라 손상재의 인장강도와 총 AE사상수가 감소하는 경향을 보였다. B재의 경우 박리면적이 커짐에 따라 손상재의 인장강도 및 총 AE사상수가 약간씩 감소하는 경향을 보이나, A재의 경우는 급격히 감소하였다. 이는 충격속도와 박리면적 관계에서 전술한 바와 같이 서로 다른 적층구조에 따른 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig. 9의 결과를 이용하여 박리면적량으로부터 손상재의 인장강도 및 총 AE사상수를 예측해 볼 수 있었다.

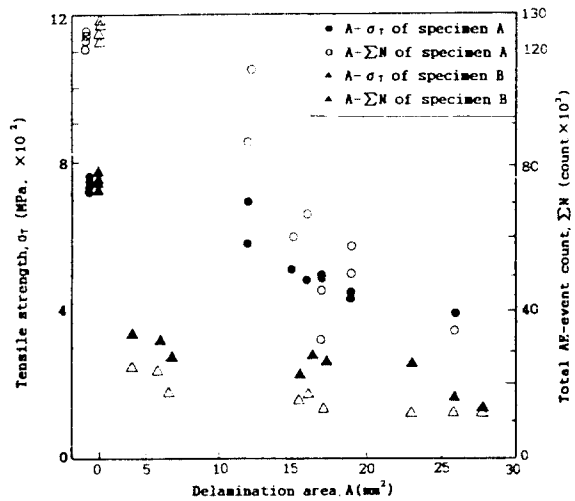


Fig. 9 Relation of tensile strength and total AE-event count vs. delamination area for specimen A, B

C, D재 시편의 충격손상에 의한 박리면적과 손상재의 인장강도 및 총 AE사상수와 관계는 A, B재와 같은 경향을 낸다. 그리고 전체적으로 박리면적이 증가함에 따라 손상재의 인장강도와 총 AE사상수가 감소하는 경향을 보였다. C, D재 모두 박리면적증가에 따른 손상재의 인장강도 및 총 AE사상수의 감소정도는 거의 비슷하였으나, C재에 비해 D재의 경우가 감소정도가 크게 나타났다. 이는 3-2-1에서 전술한 충격속도와 박리면적관계를 고려해보면, 결국 박리면적의 증가는 속도증가와 비례관계에 있으므로 속도증가에 따른 손상재의 강도 및 총 AE사상수의 감소와 밀접한 관계가

있음을 알 수 있다.

3-2-3 충격손상재의 인장시험시 손상하중과 AE량 및 파괴기구 해석

인장하중 부하시 손상하중을 조사하여 각 손상 하중별로 파손기구를 규명하여 허용 임계손상하중, 재료의 강도 및 수명예측에 대한 기초자료를 제공하기 위하여 인장시험시 방출되는 총 AE 에너지곡선의 기울기를 이용하여 손상하중을 추정할 수 있었다. AE 에너지기울기법의 설명도를 Fig. 10에 나타낸다.

Fig. 10의 설명도에서 총 AE 에너지를  $E_{AE}$ 로 하면  $E_{AE}=A \cdot \exp(B(\delta-\delta_0))$ 로 표시할 수 있다. 여기서 A, B는 정수,  $\delta$ 는 시편의 인장시험시 변위,

$\delta_0$ 는 AE 에너지가 방출되기 시작할 때의 변위를 각각 나타낸다. 총 AE에너지곡선에서 AE 에너지가 발생하기 시작하여 종료할 때까지의 전체변위를 미소한 등간격 변위 a로 나누어, 그 때의 곡선을 직선으로 근사했을 때의 각 구간의 높이를  $d_1, d_2, d_3, \dots$ 로 한다. 그 다음 a와  $d_1$ 과의 각도를  $\theta_1$ 이라 하고,  $\theta_1=\tan^{-1}(d_1/a)$ , a와  $d_2$ 와의 각도를  $\theta_2$ 라 하고  $\theta_2=\tan^{-1}(d_2/a)$ ,  $\theta_3=\tan^{-1}(d_3/a), \dots$ 와 같은 방법으로 기울기각을 취해나간다. 그 다음 기울기각의 차이, 즉  $(\theta_1-\theta_0), (\theta_2-\theta_1), (\theta_3-\theta_2), \dots$ 를 구하여 횡축의 ①점에서 종축에  $(\theta_1-\theta_0)$ , 그 다음 ②점에서 종축에  $(\theta_2-\theta_1), \dots$ 을 차례대로 그려나가면, 임의의 좌표에서 X와 같은 곡선으로 된다. 최종적으로 곡선의 변곡점 b, c에서 그 때의 하중  $P_b, P_c$ , 곡선 X의 최고점 q에서의 하중  $P_q$ 를 구한다. 이와 같은 총 AE 에너지곡선의 기울기각도차에 의해 변곡점의 하중을 구하는 방법을 AE 에너지 기울기법(AE energy gradient method)<sup>5) 6)</sup>이라 하고, 에너지 기울기법의 물리적 의미는 다음과 같다.

즉, 총 AE 에너지곡선의 일정변위에 상응하는 기울기는 그 변위의 사이에 발생하는 에너지량으로 된다. 임의의 변위에다 일정한 변위를 증가시켰을 때의 AE 에너지량의 차를 연결한 곡선이 Fig. 10의 X곡선이므로  $P_b$ 점은 이 곡선의 변위에 관한 1차 미분이 증가에서 감소할 때의 하중이므로, 이 하중에서 변위가 크게 되면 AE 에너지량

차이는 작게 된다.  $P_0$ 점은 이 곡선의 최대값을 표시한 것으로 이 곡선의 변위에 관한 1차 미분은 0로 되기 때문에, 이 하중 전후에는 변위에 대한 에너지량은 변하지 않는다. 또한  $P_c$ 점은 이 곡선에 관한 1차 미분이 다시 증가에서 감소하는 하중점이므로, 이 하중에서 변위가 크게 되면 AE 에너지량의 차이는 다시 적게 되고 불안정 파단하게 되는 것을 나타내고 있다.

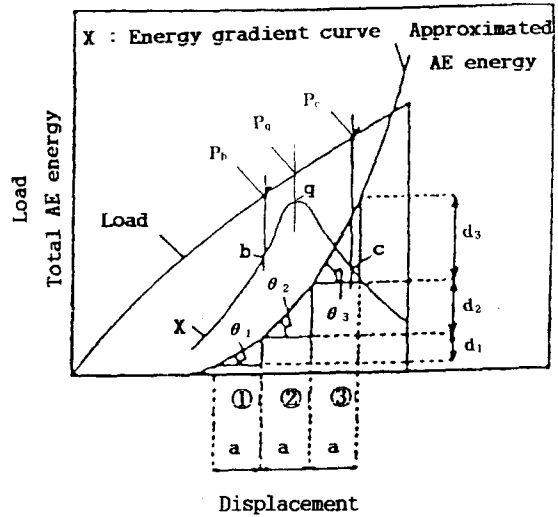


Fig. 10 Schematic illustration of AE energy gradient method

이 방법에 의해 얻어진 A, B, C, D재 시편의 인장시험시 최대하중  $P_{max}$ 와 손상하중  $P_b, P_q, P_c$  값과의 비(즉  $P_b/P_{max}, P_q/P_{max}, P_c/P_{max}$ )와 표준편차, 각부재의 손상하중  $P_b, P_q, P_c$ 에서의 AE-event count와 총 AE-event count로 나눈 각각의 값을 Table 4에 나타낸다.

Table 5는 각 시험편에 대하여 에너지 기울기법에 의하여 손상상태를 확인하기 위해 각 손상하중까지 하중을 가한 후, 광학현미경과 주사현미경 등을 이용하여 관찰한 결과이다. 이는 시험편 제조상에 생기는 재질의 결함과 관찰오인으로 인하여 다소 오차가 발생할 있으나, 본 실험의 경우 Table 5와 거의 일치함을 알 수 있었다. 따라서 Table 4~5는 충격손상재에 대한 탄소섬유복합재



Table 4. Mean value and standard deviation (SD) by energy gradient method.

Damage Load(MPa) and total AE-event count(N)			Specimen			
			A	B	C	D
Damage Load (MPa)	$P_b/P_{max}$	Mean	0.77	0.62	0.69	0.72
		SD	0.14	0.22	0.19	0.15
	$P_q/P_{max}$	Mean	0.84	0.71	0.83	0.80
		SD	0.14	0.23	0.10	0.10
	$P_c/P_{max}$	Mean	0.90	0.82	0.90	0.86
		SD	0.11	0.20	0.30	0.11
Total AE-event count(N)	$N_b/N_T$	Mean	0.45	0.37	0.46	0.50
		SD	0.18	0.10	0.38	0.20
	$N_q/N_T$	Mean	0.70	0.50	0.71	0.72
		SD	0.16	0.16	0.30	0.17
	$N_c/N_T$	Mean	0.89	0.60	0.87	0.91
		SD	0.15	0.16	0.33	0.24

Table 5. Damage mode of specimen A, B, C, D by AE energy gradient method

Specimen	Load(MPa)	Damage mode
A	$P_b$	Matrix cracking
	$P_q$	Fiber debonding
	$P_c$	Delamination and/or Fiber breaking
B	$P_b$	Matrix cracking
	$P_q$	Fiber debonding and/or Delamination
	$P_c$	Fiber breaking
C	$P_b$	Matrix cracking
	$P_q$	Fiber debonding and/or Delamination
	$P_c$	Delamination and/or Fiber breaking
D	$P_b$	Matrix cracking and/or Fiber breaking
	$P_q$	Fiber debonding and/or Delamination
	$P_c$	Delamination and/or Fiber breaking

료 적층재의 내충격 설계 및 AE를 이용한 손상 모니터링에 적용 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

탄소섬유복합재료의 AE에 의한 충격손상재 강도의 손상특성 평가에 관한 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 충격시험시 발생한 탄소섬유복합재료의 박리면적은 충격속도 및 AE 신호의 총 AE사상수와 비례하여 증가하였다.

(2) 충격손상재에 대한 손상재의 인장강도와 총 AE사상수는 충격속도 및 박리면적의 증가에 따라 감소하며, 적층방법에 따라 손상재의 인장강도비

가 달라짐을 확인하였다.

(3) 충격손상재의 인장강도와 충격속도 및 박리면적은 충격 및 인장시험시 발생한 AE신호의 총 AE사상수와 일정한 상관관계가 있음이 확인되었다. 탄소섬유복합재료의 내충격설계시 충격손상량과 충격손상재강도에 대한 정량적 평가를 AE신호로부터 해석할 수 있을 것으로 사료되었다.

(4) 에너지 기울기법과 현미경관찰 등을 통하여 충격손상재의 손상정도에 따른 손상하중과 손상기구를 AE에 의해 예측이 가능할 것으로 평가된다.

#### 후 기

이 논문은 1993년 한국학술진흥재단의 대학부

설연구소 지원연구비로서 연구되었으며, 연구과제 “CFRP의 파괴거동 및 AE평가에 관한 연구”의 일부임.

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

### 참 고 문 헌

1. Husmann, G. E., Whitney, J. M. and Halpin, J. C., 1975, "Residual Strength Characterization of Laminated Composites Subjected to Impact Loading." ASTM STP 568, p. 92.
2. Mar, J. W. and Lin, K. J., 1977, "Fracture of Boron/Aluminum composites with Discontinuities." J. compos. Mater., Vol. 11, p. 405.
3. Caprino, G., 1983, "On the Prediction of Residual Strength for Notched Laminates." J. Mater. Sci., Vol. 18, p. 2269.
4. F. Higashida and K. Ogawa, 1990, "Impact three-point bending tests on FRP by Split-Hopkinson Bar Technique. J. Soc. Mat. Sci., Vol. 39, No. 445, pp. 1462-1468.
5. M. Suzuki, S. Kida, H. Miyashita and S. Morohashi, 1993, JSME(Part A), Vol. 59, No. 566, pp. 2271~2277.
6. M. Suzuki, S. Kida, A. Ohta, Y. Katoh and H. Miyashita, 1993, JSME(Part A), Vol. 59, No. 561, pp. 1306~1312.