

음향방출법을 이용한 적층복합재료의 파괴거동 연구

오진수*, 우창기⁺, 이장규⁺

(논문접수일 2010. 01. 04, 심사완료일 2010. 03. 16)

A Study on the Fracture Behavior of Laminated Carbon/Epoxy Composite by Acoustic Emission

Jin-Soo Oh*, Chang-Ki Woo⁺, Zhang-Kyu Rhee⁺⁺

Abstract

In this study, DAQ and TRA modules were applied to the CFRP single specimen testing method using AE. A method for crack identification in CFRP specimens based on k-mean clustering and wavelet transform analysis are presented. Mode I on DCB under vertical loading and mode II on 3-points ENF testing under share loading have been carried out, thereafter k-mean method for clustering AE data and wavelet transition method per amplitude have been applied to investigate characteristics of interfacial fracture in CFRP composite. It was found that the fracture mechanism of Carbon/Epoxy Composite to estimate of different type of fractures such as matrix(epoxy resin) cracking, delamination and fiber breakage same as AE amplitude distribution using a AE frequency analysis.

In conclusion, the presented results provide a foundation for using wavelet analysis as efficient crack detection tool. The advantage of using wavelet analysis is that local features in a displacement response signal can be identified with a desired resolution, provided that the response signal to be analyzed picks up the perturbations caused by the presence of the crack.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP, 탄소섬유 강화 플라스틱), Fracture Behavior(파괴거동), Fiber breakage(섬유파단)

* 인천대학교 기계공학과 (ohcymer@hanmail.net)
주소: 406-772 인천광역시 연수구 송도동 12-1
+ 인천대학교 기계공학과

1. 서론

새로운 복합소재인 탄소강화플라스틱(CFRP)은 열팽창 계수가 작고, 내부식성, 고인성 등 기계적 성질이 일반 금속 재료에 비해서 우수하고, 중량이 가볍고, 복잡한 구조물 제작에 유리하여 항공우주, 자동차, 스포츠 용품 등 다양한 분야에 사용되고 있다.⁽¹⁻⁶⁾ 또한, 복합재료는 작용응력에 대하여 강화섬유의 배향각과 적층순서를 바꿀 수 있고, 국소적인 두꺼운 두께도 임의로 제작할 수 있으므로 경제적이고 합리적인 최적설계가 가능하다는 장점을 갖고 있다.

특히, 금속재 구조물은 제조, 시판되는 봉재나 판재등의 1차 제품을 절삭가공이나 소성가동을 한 후 용접 또는 볼트 등의 체결기구에 의해 필요한 구조로 조립하는 반면에, 복합소재 구조물은 강화재와 수지를 소재로 하여 최종 형태를 동시에 만드는 제조공정을 갖고 있다. 따라서 재료설계와 구조설계를 겸하고 있는 장점 때문에 아주 크고 복잡한 구조물도 한 번에 성형할 수 있다. 하지만, 복합 소재가 갖고 있는 비등방, 비균질성으로 인한 층간파괴, 섬유파단, 박리 등 파괴 원인과 다양한 파괴유형 때문에 원재료 및 구조물의 정확한 파괴 거동의 해석이 매우 어려운 실정이다.

일반적으로 섬유강화 복합적층구조물에서의 파괴현상을 거시적 관점에서 보면 강화섬유에 수직인 방향으로 파괴가 발생한 섬유의 횡방향 파단(translaminar fracture), 층 내부에서 강화섬유에 평행하게 기지(matrix)를 따라 파괴가 발생하는 층내 파단(intralaminar fracture/transverse cracking) 그리고 층과 층 사이의 경계면에서 파괴가 발생하는 층간 파단(interlaminar fracture)으로 구분할 수 있으며, 기존의 등방성 재료와는 달리 기지의 균열, 강화섬유와 기지의 접착 분리, 강화섬유의 파단 등과 같은 여러 가지 파괴양상들이 복합적으로 결합되어 발생한다.^(7,8) 이처럼 복합 적층된 구조물은 강화섬유의 배열상태에 따라 심한 이방성을 나타내며, 기존의 등방성 재료에서는 볼 수 없는 연계특성(coupling property)이 존재하여 복잡한 역학적 거동과 층간분리와 같은 파손 및 파괴현상이 나타난다.

그러므로 복합재료를 구조용 재료로 사용하기 위해서는 재료내부에 존재하는 각종 손상 및 결함에 대한 강도상의 안전성 확보를 위하여 기존 방법 보다 더 신뢰성 있는 평가 방법이 요구되고 있다. 즉, 섬유강화 복합재료에 대한 손상의 전개는 모재균열(파괴), 모재와 섬유의 계면분리, 층간분리, 섬유파단 등의 복잡하고 다양한 형태로 구성되어 있으므로 이에 대한 보다 정확한 이해가 필요하며, 최근 구조물의 안전성 평가를 위한 방안으로 비파괴 검사가 실용화되고 있

Table 1 Prepreg specifications, USN 125A

Resin content	36wt.%
Fiber density	1.77g/cm ³
Resin density	1.2g/cm ³
Total weight	195g/m ³
Fiber areal weight	125g/m ²
Tensile strength	450kgf/mm ²
Tensile modulus	24×10 ³ kgf/mm ²
Thickness	0.129mm

으며, 그 중에서도 음향방출(Acoustic Emission)법은 파괴 구조를 신속하고 정확하게 측정할 수 있어 널리 이용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 AE 신호의 후처리 분석(패턴인식과 웨이블릿의 응용)에 의한 섬유의 적층방법과 적용하중의 방법(모드 I 및 모드 II)에 따른 파괴양상이 어떤 AE 파라미터로 설명되는지를 해석하여 섬유강화 복합재료의 층간파괴 거동에 따른 파괴기구를 규명하고, 또 새로운 손상평가 방법을 제시함으로써 궁극적으로 산업현장에서의 섬유강화 복합재료 원료뿐만 아니라 적층복합재료를 사용한 구조물을 비파괴적으로 이력 관리하는데 필요한 데이터를 제공하고자 한다.

2. 실험 및 실험 방법

2.1 실험 재료 및 시험편 제작

여기에서 사용한 재료는 (주)SK케미칼에서 제조한 USN 125A 프리프레그(prepreg)이며, 그 성분과 기계적인 물성은 Table 1과 같다. 또한 HYSOL사의 액상 타입의 에폭시 접착제(모델명: EA9493 QT SYSTEM)를 사용하였다.

복합재 라이미네이트판 구조물의 파괴거동을 보다 명확히 관찰하기 위하여 일방향 프리프레그를 이용한 단순 평판 구조물을 연구 대상으로 설정하였다.

또한 시험편은 프리프레그의 섬유배향각 θ 와 적층수를 $[0^\circ]_{24}$, $[\pm 45^\circ]_{12}$ 로 하여 오토클레이브에서 진공백 성형하였다.⁽⁹⁾

USN 125A

U : Uni-direction(일방향 섬유)

S : Carbon fiber(탄소섬유, 일반탄성 $24 \times 10^3 \text{kgf/mm}^2$)

N : No scrim(scrim: 면직, 마직물의 일종)

125 : 탄소섬유의 단위체적당 무게(g/m³)

A : 수지함량(36wt.%)

오토클레이브 성형 시 온도를 올려주면 화학반응이 일어나 수지가 경화되는데, 이 때 복합재료 내부의 온도를 일정하게 유지시켜 복합재료가 내부에서 균일하게 경화되도록 해야 한다. 또한 압력을 주는 이유는 복합재료 적층판 내에 잉여수지를 짜내어 각 층간의 접합을 확실히 하는 동시에 기공의 크기를 최대한 작게 하기 위함이다. 이와 같이 오토클레이브 성형은 공정이 비교적 복잡하고 부자재가 많이 소요되며, 제조시간 및 장비가 고가인 단점이 있다. 오토클레이브 성형기술은 고품질 복합재료를 제조하는 성형기법으로 평판이나 곡물을 갖고 있는 판넬의 제작, 하이컴 샌드위치 구조물의 접착, 금속 및 복합재료 항공기 부품간의 접착 등에 많이 사용되고 있다. 일반적으로 고성능 복합재료의 제조에 있어서 열경화성수지 복합재료의 경우 판재나 셸(shell) 형태의 부품에는 오토클레이브 몰딩이 많이 사용된다.

오토클레이브 몰딩은 프리프레그 제조공정, 각 층을 섬유 배열방향으로 적층하는 레이업 공정(Teflon film lay up), 그리고 오토클레이브 경화(autoclave curing)공정의 3단계로 나눈다. 성형조건은 Fig. 1과 같이 3°C/min의 승온속도로 140°C까지 승온시킨 후, 90psi 압력하에서 120분간 유지하였다. 성형이 완료된 후 시험편의 힘을 방지하기 위하여 압력을 유지한 상태에서 3°C/min의 냉각속도로 서서히 상온까지 냉각하였다.

전술한 바와 같이 시험편 제작에 사용된 원재료인 (주)SK 케미칼의 카본 프리프레그(USN 125A)와 앞에서 제작된 피접착물의 표면은 이형제, 먼지 등에 의해 오염되어 있기 때문에 올바른 접착을 하기 위해서는 피접착물의 표면을 처리하여 오염된 층을 제거하였다. 복합재료 피접착물을 전처리 과정이 끝나자마자 HYSOL사의 액상 타입 에폭시 접착제를 이용하여 120°C에서 60분간 유지하여 성형하였다. 이때

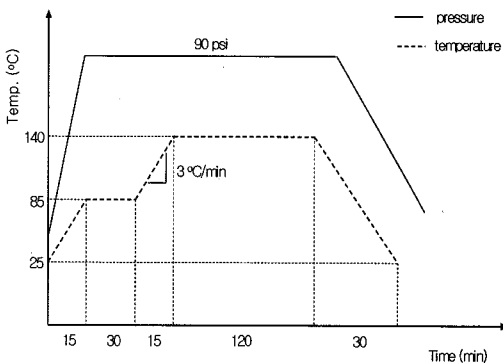


Fig. 1 Diagram of autoclave curing process

의 성형 압력은 접착 두께의 최적화를 위하여 20psi에서 50psi까지 변화시켰다.⁽¹⁰⁾

그리고 Fig. 2는 가공된 시험편의 형상이다.

2.2 실험 방법

전술한 바와 같이 3대의 AE 계측장비를 사용해 DAQ (Data acquisition) 및 TRA(Transient recorder analyzer)를 동시에 수행하였으며, 응력과 변형률, AE 신호의 파라미터, 파괴기구, 손상과정을 실시간으로 비교·분석할 수 있도록 하였다. 또한 계측된 AE 신호는 실시간에 원시데이터 형태로 저장 및 모니터링이 가능하도록 계측한 AE 신호를 K-means clustering과 wavelet transform을 적용하였다.

본 실험에 사용한 주요장비는 만능재료시험기 UTM (Autograph 25-TG, Shimadzu)과 AE 계측장비(Spartan 2000, DiSP 및 PCI-2 system, PAC)이다. 또한 AE의 검출 감도를 높이기 위해 공진주파수(resonant frequency)가 300kHz인 Nano30 센서를 부착하고, 또한 동일한 시험편에 대하여 Fig. 3에서 보는바와 같이 주파수 분석을 하기 위하여 공진역 센서인 Nano30 및 광대역센서인 WD를 시험편 상하에 각각 1개씩 부착하고 AE system에 연결하였다.

AE 신호는 AE 센서의 설치조건에 따라서 상당한 차이를 보일 수 있으므로 AE 센서의 부착은 AE파의 전달을 용이하

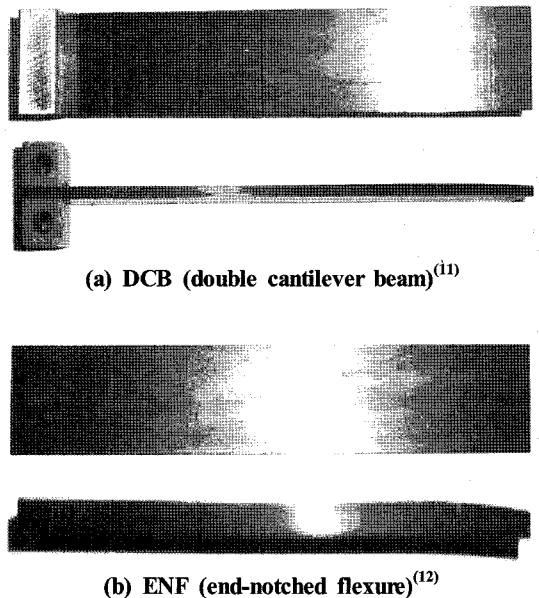


Fig. 2 Specimen configuration (unit: mm)

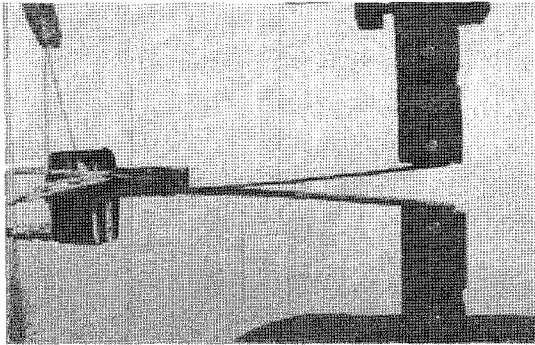


Fig. 3 Detail view of test section

Table 2 Experimental condition

Threshold (dB)	Gain (dB)	PDT (μsec)	HDT (μsec)	HLT (μsec)
Fixed, 45	20	50	100	300
Parametric sample rate (kHz)		Time driven data rate (msec)		
1000		1000		

게 하기 위해 먼저 접착부위를 알콜로 깨끗하게 세척한 후, 접촉매질(couplant)인 고진공그리스(Dow corning high vacuum grease)를 충분하게 도포하였다. Table 2는 본 연구의 전반에 걸쳐 주어진 AE 계측시스템의 환경조건이며 Threshold, Gain, PDT(peak definition time), HDT(hit definition time), HLT(hit lockout time)는 신호측정과정을 제어해 주는 파라미터들이다. 여기서, threshold는 채널의 감도를 제어하는 주 파라미터로 고정식(fixed type)과 부동식(floating type)의 두 가지로 구분되며, 이 중 부동식은 그 설정 값이 높거나 혹은 잡음(background noise)이 변하는 경우에 사용한다. 또한 gain은 에너지측정에 중대한 영향을 미치며, 일반적으로 고감도시험에서는 그 값을 높게 설정해 준다.

본 논문에서는 광대역센서인 WD를 사용하여 예비실험을 한 결과 대략 600kHz 미만의 주파수 범위를 나타냈기 때문에, 본 실험에서는 공진주파수가 300kHz인 Nano30 공진역 센서를 채택하여 사용하였고, 한 개의 이벤트가 대략 10~15 개 정도의 린다운카운트를 갖도록 PDT 50μs, HDT 100μs 및 HLT 300μs로 설정하였으며, threshold는 45dB로 고정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 모드 I 하중 조건에서 섬유배향각 $\theta [0^\circ]_{24}$ DCB 시험편 시험결과에 대한 것이며, Fig. 5는 모드 II 하중조건에서 섬유배향각 $\theta [\pm 45^\circ]_{12}$ ENF 시험편 시험 결과를 보여 주고 있다. UTM에서 얻은 하중-변위 및 하중-시간 변위 값에 대하여 각각 다른 Software를 사용하여 처리한 Data들을 나타낸 것이다.

즉, Fig. 4 와 Fig. 5에서 좌측은 Spartan 2000에서 병합한 외부입력신호(UTM)이며, (a)는 하중, (b) 변위, (c) 카운트 수, (d)는 에너지 값을 의미한다. 한편 우측은 DiSP에서 획득한 AE 신호에 대한 것으로 (f)는 카운트 수, (g) 에너지이며, 다양한 AE 파라미터 값을 AE전용 해석 도구인 NOESIS Professional V3.1에 의한 K-means clustering 패턴인식에 의한 결과를 나타낸 것으로 (h) 누적에너지, (i) 신호강도를 의미한다. 그리고 (e)와 (j)는 PCI-2의 AE 후처리 프로그램인 AEWIN™ 에서 패턴인식 결과인 class 3에 대하여 FFT 신호처리 결과를 웨이블릿 변환에 의하여 처리한 것이다.

3.1 모드 I : 섬유배향각 $\Theta [0^\circ]_{24}$ DCB시험편

Fig. 4 (a)-(d)는 시험편에 하중을 가하면, 시간이 경과하면서 600초 부근에서부터 crack선단으로부터 파단이 시작된 parameter변화가 보이며, (c),(f)는 accumulative counts에 대한 것으로 시간 경과에 따라 count 증가를 통하여 시험편의 층간분리가 진행되기 시작하면서부터 AE 신호가 검출되고 있음을 확인할 수 있다. (g)는 Time과Accumulative Energy에 대한 것으로 1750초가 지나면서 에너지 값이 급격히 소멸되는 것으로 보아 섬유의 파단이 일어난 것을 확인할 수 있다. (e)는 진폭분포를 K-means clustering 패턴인식을 수행한 결과이고, 클래스 3의 경우 17.7kHz, 2619mV의 진폭크기를 보였다. (j)는 (e)에 대한 class 3의 data를 FFT 신호 처리하여 웨이블릿 변환한 결과를 나타내었다. Class 3은 시험편에 거시적인 층간분리가 목격되는 시점으로 파형의 피크 값이 상당히 높은 진폭크기의 돌발형 신호를 보이고 있으며, 파형의 진폭크기를 기준으로 볼 때 상대적으로 낮은 주파수대인 130~180kHz의 신호를 보내고 있음을 알 수 있다.

또한 섬유배향각 $\theta = [0^\circ]_{24}$ DCB 시험편에 의한 층간 파괴 시험에서는 시험 전반에 걸쳐 비교적 50dB 미만의 낮은 진폭크기를 갖는 기지재의 미시적 파괴(matrix micro cracking)

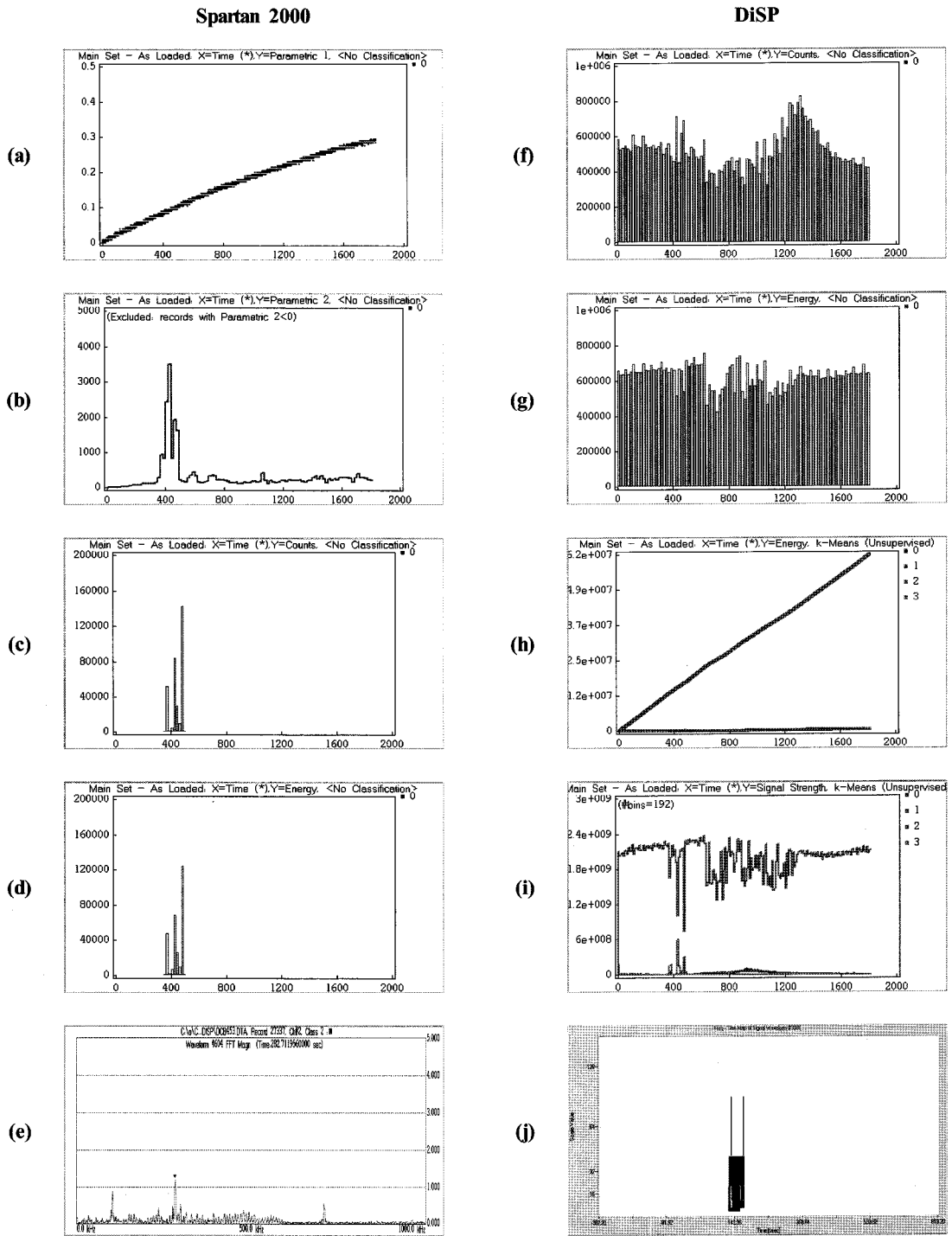


Fig. 4 AE amplitude distribution applied load on DCB test at $\theta = [0^\circ]_{24}$

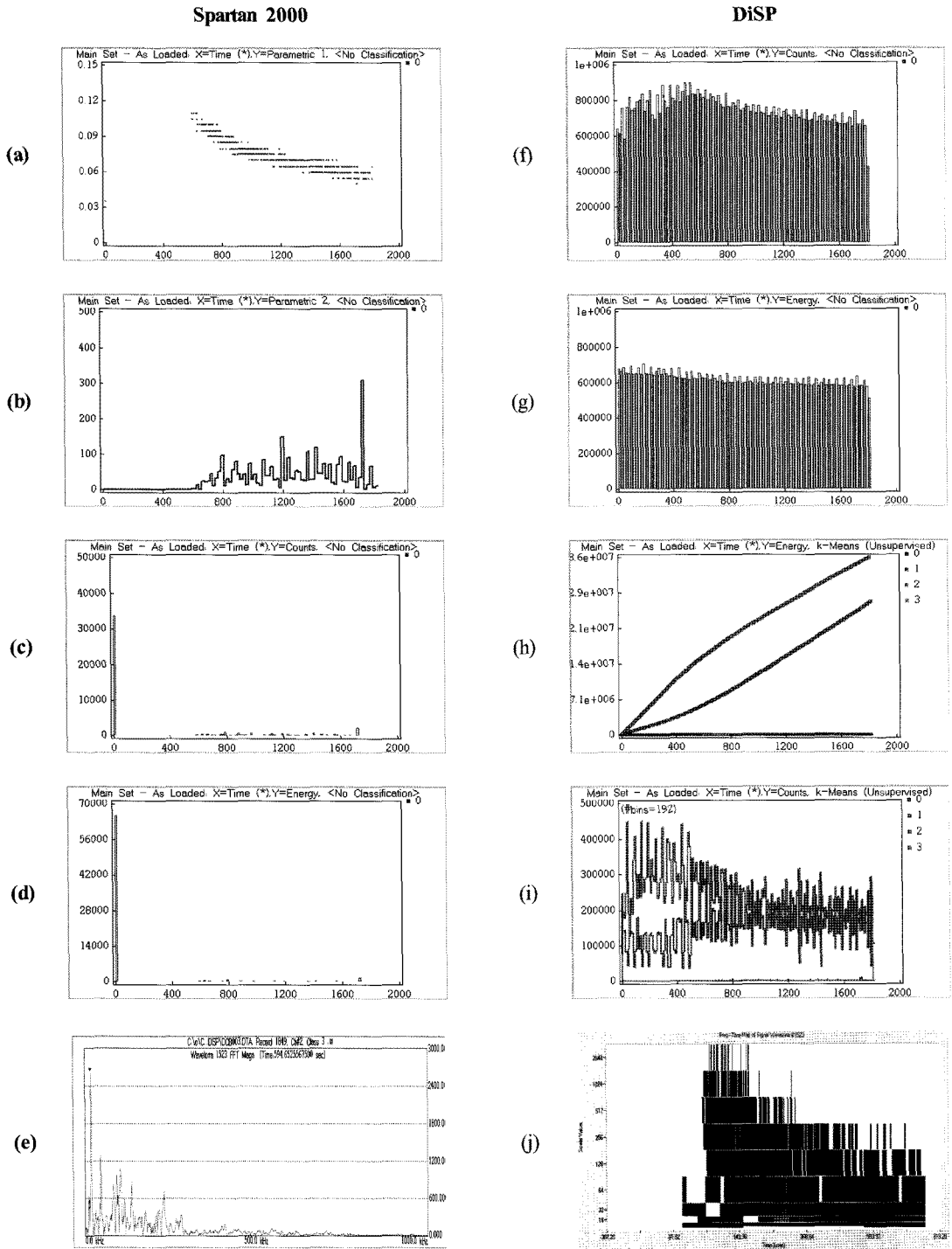


Fig. 5 Results of AE signals detected on ENF test at $\theta = [\pm 45^\circ]_{12}$

가 지배적이며, 60~80dB 진폭크기의 섬유브리징(fiber bridging)과 80dB 이상의 높은 진폭의 섬유파단(fiber breaking) 이후 50~60dB 중간 진폭크기의 균열선단의 갈라짐(interfacial delamination) 현상이 나타난다.

Fig. 6은 섬유배향각 $\theta = [0^\circ]_{24}$ 인 복합소재 DCB 시험편의 파괴 유형 별 진폭분포를 나타내고 있다.

모드 I의 경우, 즉 DCB시험편에 의한 층간파괴시험에서는 섬유파단(fiber breaking)과 섬유브리징(fiber bridging)이 많으며, 섬유의 표면에 기지재가 균일하게 남는 특성을 가진다. 또한 균열선단 뒷부분에서 두 개의 파면을 서로 연결하는 섬유의 가교현상인 섬유브리징 효과로 인하여 균열선단에서 일어나는 파손진행 영역의 크기 및 균열면 분리의 정도에 영향을 주며, 고분자수지의 인성의 정도가 일방향 적층판의 층간파괴에 매우 중요한 역할을 한다.

3.2 모드 II : ENF시험편의 경우

Fig. 5 (a), (b)는 섬유배향각 $\theta = [\pm 45^\circ]_{12}$ 로 사교 적층하여 성형한 CFRP의 모드 II 층간파괴시험의 하중-변위(시간) 선도를 나타낸 것으로, Fig. 5 (b)에서 최대하중의 30~60%에 비교적 낮은 하중 조건하에 빨리 복합재료의 거시적 층간파괴가 일어난 것을 알 수 있다. 즉 UTM의 하중-변위 제어 특성이 AE 측측시스템에 잘 반영되었음을 확인할 수 있다. 시험편에 하중을 가하면, 시간이 경과하면서 400초 부근에서 crack선단으로부터 파단이 시작된 parameter변화가 보이며, (c),(f)는 accumulative counts에 대한 것으로 count 증가를 통하여 시험편의 층간분리가 진행되기 시작하면서부터 AE 신호가 검출되고 있음을 확인할 수 있다. (d)는 Energy 값을 말하며, (g)는 Time-Accumulative Energy에 대한 것으로 1800초가 지나면서 에너지 값이 급격히 소멸되

는 것으로 보아 섬유의 파단이 일어난 것을 확인할 수 있다. (e)는 진폭분포를 K-means clustering에 의한 패턴인식을 수행한 결과이고, 클래스 3의 경우 17.7kHz, 2619mV의 진폭크기를 보였다. (j)는 (e)에 대한 class 3의 data를 FFT 신호 처리하여 웨이블릿 변환한 결과를 나타내었다. class 2와 3 높은 진폭크기를 가지며, 다소 진폭의 크기에 대한 차이는 있지만 그 중심주파수가 150~300kHz로 나타났다.

모드 II의 경우, 즉 ENF 시험편에 의한 층간파괴시험에서는 섬유배향각 $\theta = [\pm 45^\circ]_{12}$ 일 경우, 각 층이 $+45^\circ/-45^\circ$ 로 직교하고 있어 하중의 부하와 더불어 적층판 내 섬유끼리 점접촉에 의한 마찰을 일으키며 외력에 저항하여 섬유배향각 $\theta = [0^\circ]_{24}$ 에 비하여 기지재의 미시적 파괴(matrix micro cracking)와 간헐적인 거시적 파괴(matrix macro cracking)는 50dB 미만의 비교적 낮은 진폭크기를 갖지만 활발하게 일어나지 않으며, 50~60dB의 중간 진폭크기에서는 섬유의 마찰(fiber friction)이 일어나고, 60dB 이상의 비교적 높은 진폭범위에서는 층간분리 현상이 나타난다.

Fig. 7은 섬유배향각 $\theta = [\pm 45^\circ]_{12}$ 인 복합소재 ENF 시험편의 파괴 유형 별 진폭분포를 나타내고 있다

모드 II는 모드 I 시험에 비하여 상대적으로 크랙진전 속도가 빠르며, 모드 II 시험편인 ENF시험편의 하중-변위 선도 양상은 대부분 불안정한 크랙성장을 보인다. 일반적으로 모드 II 층간파괴시험에서는 섬유파단과 섬유브리징 현상을 찾아볼 수 없는데, 이는 섬유의 표면에는 기지재가 거의 접착되어 있지 않고 섬유 사이의 기지재에 헤클 크랙(hackle crack)이 발생하여 전형적인 불안정 크랙이 발생하기 때문이다.

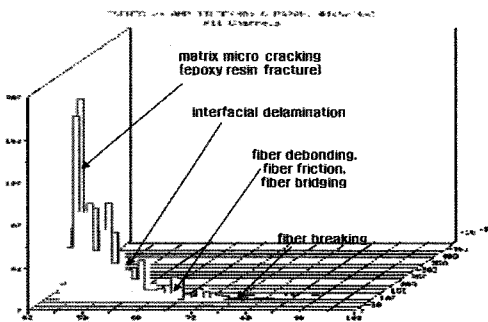


Fig. 6 AE amplitude distribution as a function of applied load on DCB test at $\theta = [0^\circ]_{24}$

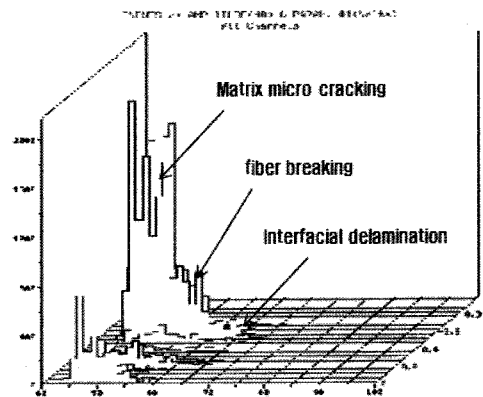


Fig. 7 AE amplitude distribution as a function of applied load on ENF test at $\theta = [\pm 45^\circ]_{12}$

4. 결론

본 연구에서는 단일시험편법에 의한 AE시험으로 동일시험편에 DAQ 및 TRA 모듈을 적용하였다. 수직하중조건(모드 I) 하에서의 DCB 시험과 전단하중조건(모드 II) 하에서의 3점 굽힘 ENF 시험으로부터 계속한 AE 신호를 K-means clustering의 적용과 wavelet transform에 의한 후처리로 CFRP 복합재료의 층간파괴 거동을 분석하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 모드별(모드 I, 모드 II) 각 부하조건에 따른 AE의 진폭 분포 및 진폭 상대적 크기에 따른 층간파괴 과정을 규명하였다.
- (2) CFRP 복합재료 내부에서 발생하는 파괴거동에 대한 보편적인 분석을 위하여 개체들 사이의 유사성의 정도에 따라서 개체들을 가까운 순서대로 연결하는 K-means clustering 알고리즘을 적용하여, 대규모 AE 데이터를 신속하고 편리하게 처리할 수 있는 AE 분석기법을 제공하였다.
- (3) 웨이블릿 변환(wavelet transform, WT)으로 모드별 부하조건에 따른 AE 신호특성을 시간-주파수 분포로 분류하여, 효율적인 신호처리와 등치선도로 복합재료의 모재균열, 계면분리, 층간분리, 섬유브리징, 섬유파단 및 섬유마찰 등에 대하여 가시적이고 상세한 파괴거동을 제시하였다.
- (4) AE법에 의한 모드별 층간파괴 거동해석을 통하여 복합재료 또는 이종재료(dissimilar materials)의 접합강도 평가기술을 개발하거나, 보다 신뢰성이 높은 복합재료의 접합강도 평가와 구조물에 대한 안전설계 방법의 확립에 기여할 것으로 기대한다.

후 기

본 논문은 2009년도 인천대학교 자체연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

(1) Mehan, R. L. and Mullin, J. V., "Analysis of Composite Failure Mechanisms Using Acoustic Emissions," *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, pp. 266~269, 1971.

(2) Zimmer, J. E., "Fracture Mechanics of a Fiber Composite," *Journal of Composite Materials*, Vol. 6, pp. 312~315, 1972.

(3) Adams, R. D. and Flitcroft, J. E., "Effect of Shear Damage on the Torsional Behaviour of Carbon Fibre Reinforced Plastics," *Journal of Composite Materials*, Vol. 7, pp. 68~75, 1973.

(4) Yang, J. N. and Du, S., "An Exploratory Study into the Fatigue of Composites Under Spectrum Loading," *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 511~526, 1983.

(5) Radhakrishnan, K., "Fatigue and Reliability Evaluation of Unnotched Carbon Epoxy Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, pp. 21~31, 1984.

(6) Soutis, C., Fleck, N. A., and Smith, P. A., "Failure Prediction Technique for Compression Loaded Carbon Fibre-Epoxy Laminate with Open Holes," *Journal of Composite Material*, Vol. 25, pp. 1476~1498, 1991.

(7) Lee, T. S., Choi, Y. G., and Chang, C. W., "A Study on Characteristics of Interlaminar Fracture Toughness and Fatigue Crack Propagation for Carbon/Epoxy Composites," *Transactions of the KSME Series A*, Vol. 21, No. 4, pp. 566~574, 1997.

(8) Yoon, J. H., Park, S.O., Rhee, Z. K., and Woo, C. K., "A study on the fracture characteristics of CFRP by AE," *Proceeding of KSTME fall conference*, pp. 283~288, 2003.

(9) Adams, D. F., Carlsson, L. A., and Pipes, R. B., "Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, 3rd Edition, CRC Press," 2003.

(10) ASTM Standard D5528-94a, 2001, *Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

(11) Japanese Industrial Standards JIS 7086, 1993, *Testing Methods for Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fiber Reinforced Plastics*, Japanese Standards Association, Tokyo, Japan.