

음향방출 및 초음파시험을 이용한 CFRP 시험편의 파괴 거동 해석

Fracture Behavior Analysis in CFRP Specimens by Acoustic Emission and Ultrasonic Test

안석환*, 남기우**

Seok-Hwan Ahn* and Ki-Woo Nam**

초 록 단조인장시험하에서 CFRP적층재의 손상과정을 음향방출과 초음파시험에 의해 평가하였다. 시험편으로부터의 음향방출신호의 진폭 분포는 기지재 균열(matrix crack), 박리(debonding), 섬유 pull-out 및 섬유 파단(fiber fracture)과 같은 CFRP에서의 파괴기구를 분석하는데 도움을 주며, 초음파 진폭감쇠의 특성 또한 각각의 파괴기구를 분석하는데 유용하다. 여러종류의 CFRP시험편을 사용하여 음향방출신호와 초음파신호의 진폭감쇠를 조사하였다. 끝으로 하중제하중(unloading) 시험이 초음파내의 진폭비에 대한 Felicity effect와 감쇠를 조사하기 위해서 수행되었다. 전 실험에 걸쳐 초음파신호의 진폭감쇠와 음향방출 파라미터(parameter)들은 동시에 검출되었다. 이로써 음향방출과 초음파시험의 두 파라미터들이 CERP에서의 파괴기구를 분석하기 위해 효과적으로 사용될 수 있음이 확인되었다.

주요어어: 음향방출, 초음파시험, 탄소섬유강화복합재료, 파괴양식, 파괴거동

Abstract Damage process of CFRP laminates under monotonic tensile test was characterized by the correlation between Acoustic Emission(AE) and Ultrasonic Test(UT). The amplitude distribution of AE signal from a specimens is an aid to the determination of the extent of the different fracture mechanism such as matrix crack, debonding, fiber pullout and fiber fracture as load is increased. In addition, the characteristics of ultrasonic amplitude attenuation are useful for analysis of the different type of fracture mechanism. Different orientation of carbon fiber reinforced plastic specimens were used to investigate the AE amplitude range and ultrasonic amplitude attenuation. Finally, loading-unloading tests were carried out to check Felicity effect. During the tests, ultrasonic amplitude attenuation was investigated at the same time and compared with AE parameters. The result showed that two parameters of both AE and UT could be effectively used for analysis of fracture mechanism in CFRP laminates.

Keywords: acoustic emission, ultrasonic test, carbon fiber reinforced plastics, fracture mode, fracture behavior

1. 서 론

최근에 많은 연구자들이 재료시험의 평가수단으로서 X선법[1,2], acousto-ultrasonic법[3], 초음파법[4-6], 음향방출법[7] 등과 같은 비파괴 검사법으로 복합재료

의 결합검출 및 평가기술을 개발하는데 주력해왔다. 탄성파로 정의되는 음향방출(acoustic emission)은 복합재료의 주 파괴 기구인 기지재 균열(matrix crack), 섬유 파단(fiber fracture), 섬유 pull-out, 층간분리(delamination), 박리(debonding) 혹은 이들의 복합적

손상영역의 발생원 등에 민감하게 작용하기 때문에, 파괴기구를 해석하는데 유용한 도구로서 많은 연구가 이루어져 왔다[8-13]. 음향방출 신호의 파라미터들을 이용하여 복합재료의 파괴거동을 해석하는 방법들이 많이 이용되었지만 이러한 연구들은 복합재료의 비등방, 비균질의 특성 때문에 파괴거동의 해석에는 정확한 결과를 얻어내기가 어려운 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 복합재료의 주 파괴 기구인 기지계 균열, 섬유 파단, 층간분리, 박리, 섬유 pull-out 등과 같은 파괴기구를 해석하는 도구로서 음향방출과 초음파를 이용하여, 각각의 파괴특성이 나타나도록 시편(하중방향에 따른 섬유방향을 달리한 시편)을 제작하여 파단시 까지의 진폭 분포와 그때의 음향방출신호의 count를 이용하여 파괴기구를 해석하였으며, 이러한 부분적인 신호들의 해석을 통하여 전체 파괴기구의 특성을 규정지을 수 있도록 하였다. 또한 내부적인 결합영역을 관찰하기 위해서 초음파의 횡파를 사용하여 파괴양상을 규명하였다.

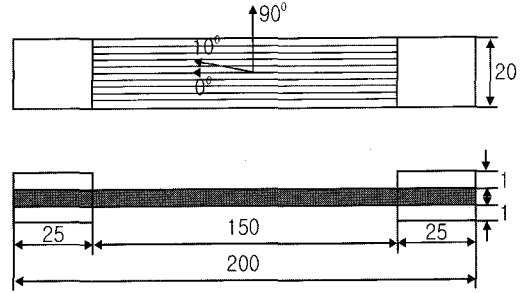
2. 시험편 및 실험방법

2.1. 시험편

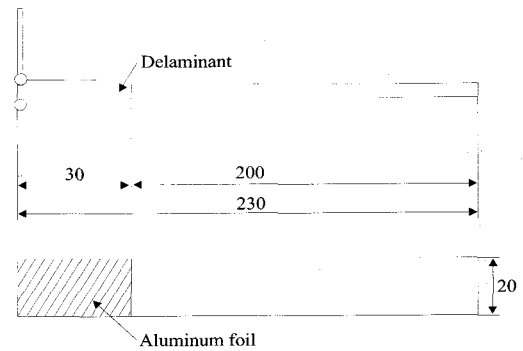
본 연구에 사용된 시험편은 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(한국화이버 : CUI25NS)를 사용하였고, Table 1에는 그 기계적 특성을 나타낸다. 이와 같은 재료를 핸드레이업(hand lay-up)법을 사용하여 [0°]8s, [10°]16s, [90°]32s, [0°/90°]2/0°]4s, [0°/90°]6/0°]2s로 적층하였다. 적층시에는 프리프레그를 한 장씩 둥근 유리병으로 적당하게 압력을 가하면서 적층하고 실리콘 오일의 이형제가칠하여진 금형에 넣은 후 진공상태로 30분간 유지시켰다.

Table 1 Mechanical properties of prepreg

Material	CUI25NS		
Tensile strength	axial 0°	kg/mm ²	164
	transverse 90°		12
Tensile modulus	axial 0°		12681
	transverse 90°		850
Fiber volume fraction	vol %		46



(a) Specimen for tensile and loading/unloading test



(b) DCB(double cantilever beam) specimen

Fig. 1 Geometrical dimensions of specimens(unit : mm)

그리고 열 프레스에서 130°C, 2.88기압의 압력하에서 90분간 유지하여 잔류기공을 제거한 후, 성형이 완료된 후 적층판을 실온상태에서 120분간 냉각하여 30° 이하로 떨어진 상태에서 개방하였다. 성형된 CFRP 적층판을 가공하여 Fig. 1과 같은 형상으로 시편을 제작하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 음향방출 시험

Fig. 2에 나타난 것처럼, 음향방출의 계측에는 PAC사의 R-15센서(공진주파수 150kHz)와 R-30센서(공진주파수 300kHz)를 이용하여 LOCAN 320 시스템 (PAC사: Physical Acoustic Corporation)을 사용하였고, R-15는 음향방출신호의 집속을 위해, 그리고 R-30은 잡음제거를 위한 guard sensor로 사용하였다. 그리고 시험편에서 발생하는 신호를 민감하게 측정하기 위해서 시험편과 센서 사이에 접촉매질인 그리스를 얇게 바른 후 테이프프로 압

작하였다. 시험편에서 지그가 잡는 부분에는 시험편의 손상을 막고 마찰에 의한 소음을 제거하기 위해 두께 1mm의 알루미늄박판(tap)을 부착해서 사용하였으며, 기계적 잡음이나 원하지 않는 신호를 제거하기 위해 150kHz의 공진센서에서 검출되는 신호를 100~300kHz범위의 필터(band pass filter)를 이용하여 공진되는 이외의 신호를 제거하였다. 필터에서 여과된 신호를 전치증폭기에서 40dB로 증폭하고 주증폭기에서 30dB로 증폭하였고, 오실로스코프상에서 잡음의 진폭을 확인하여 그 잡음 진폭의 1.5배인 100mV(30dB)로 문턱값을 설정하였다. 그리고 예비실험동안에 오실로스코프상에서 신호의 형상을 확인하고 PDT(peak definition time), HDT(hit definition time), HLT(hit lock time)를 Table 2와 같이 설정하였다. 센서 #1, #2의 위치는 시험편 중앙으로부터 30mm 떨어진 지점에 설치하여 신호를 받아들였다. 인장시험기는 Instron사의 UTM 4204인 용량 5ton의 전기유압식 만능시험기를 사용하였으며, crosshead speed는 Fig. 1의 (a)인 경우 0.2mm/min, (b)인 경우 7mm/min으로 제어하여 실온에서 행하였다.

2.2.2. 초음파 시험

초음파 탐상기는 Krautkrämer사의 USD15 model을 사용하였다. 탐촉자의 선택에 있어서는, 본 연구에 사용된 시험편이 얇은(1~3.5mm)판재이기 때문에 분해능이 좋은 높은 주파수(5~10MHz)의 탐촉자의 경우 예비 실험시 산란과 감쇠가 심해 통과율이 매우 낮아지기 때문에 2.25MHz의 탐촉자를 사용하였다, 접촉매질로는 파의 전달손실을 줄이기 위하여, 음향임피던스 값이 높은 글리세

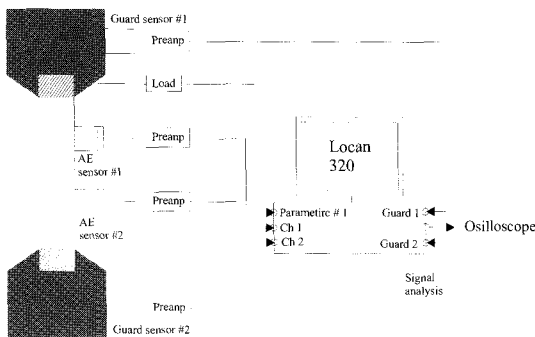


Fig. 2 Schematic diagram of acoustic emission used for monitoring of fracture mechanism in CFRP

Table 2 Acoustic emission hardware setup and timing parameters

System hardware setup and timing parameters	unit	value
Threshold value(Gain+Threshold)	mV	100
PDT(Peak definition time = Rise time out)	μsec	30
HDT(Hit definition time = Single channel event time out)	μsec	150
HLT(Hit lock time = Rearm time out)	μsec	200

린을 이용했다. 1 탐촉자법을 사용할 경우, 시험편이 박판이지만 산란과 감쇠에 의해 저면 에코의 반사율이 낮고, 저면 에코가 결함 등의 반사파들에 의한 수풀 모양의 파에 묻히므로 전체 파의 측정이 어려워 2 탐촉자법을 사용하여 파를 시험편에 수직으로 투과시켜 통과파의 감쇠를 측정하므로써 탐촉부 전체의 손상정도를 파악하고자 했다. Fig. 3에는 초음파 탐상기와 탐촉자 및 하중-변위의 측정을 위한 인장시험기와 컴퓨터의 interface를 도식적으로 나타내고 있다.

또한, 실험에 사용된 시험의 종류마다 초기 통과파의 최대 진폭에 차이가 있고 대부분 그 크기가 작으므로 gain의 증폭값을 조절하여 최대진폭대에 gate를 설정함으로써 화면상에 직접 최대진폭의 크기를 나타내고 실험중의 진폭값의 변화를 측정하였다. 이 값들은 최초 진폭값에 대한 비로 나타냄으로써 진폭의 감쇠를 표시할 수 있었다.

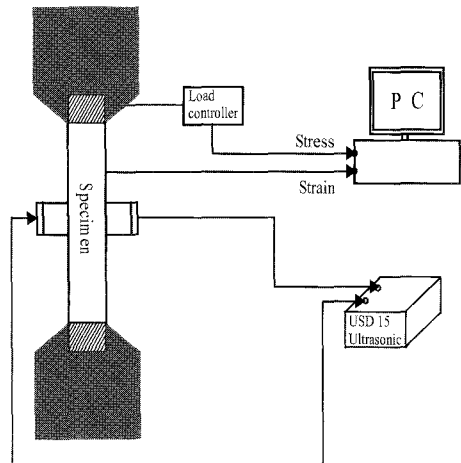


Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic used for monitoring of fracture mechanism in CFRP

3. 결과 및 토의

복합재료 적층판에서의 파괴특성은 초기영역이 기지 손상으로 구성된다. 이러한 균열 등은 거의 등거리로서, 특정 한계치까지 균열밀도가 증가하게 된다. 하중이 계속 증가하게 되면 다른 파손기구의 성장과 함께 기지와 섬유와의 박리와 횡단면에서의 미시적 층간 박리에 의해서 파괴가 발생하고, 최종적으로는 전 범위에 걸쳐 파손을 일으키는 섬유파괴의 형태로 관찰된다. 본 연구에 사용한 DCB 시험편은 각층간에서 delamination을 가장 많이 일으키는 시험편이다. 층간 파괴인성은 임계에너지 해방을에 의해서 특성화 시킬 수 있으며, 기지 재료의 파괴인성과 관련이 있다. 거의 최종단계에서 발생하는 섬유 파단의 경우 임의의 어떤 응력 수준에서 취약한 섬유가 파단하기 시작하면, 섬유에 걸리는 하중은 전단 지연에 의하여 파단섬유에 인접한 기지를 통하여 다른 섬유로 전달된다. 하중이 증가함에 따라 섬유는 계속적으로 파단되다가 단층의 단면적이 어느 정도에 이르면 치명적인 파괴가 발생한다[14]. 이러한 복합재료의 파괴기구에 대하여 음향방출과 초음파를 이용하여 시험한 결과를 아래에 나타낸다.

3.1. 파괴양식에 따른 음향방출신호 분석

3.1.1. $[90^\circ]_{32s}$

$[90^\circ]_{32s}$ 시험편의 경우에는, 섬유 방향에 평행하게 기지에서 주된 파괴가 일어나며 섬유 파단, 박리 현상은 발생하지 않는다. event의 발생은 다른 파괴양식과 비교하여 상대적으로 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 최약층의 기지 강도를 초과하는 응력수준이 가해지면 기지재 균열이 발생하고, 도달하게 되면 감쇄가 약한 평면파로 전파하게 된다. 이때 방출되는 에너지의 양은 섬유 및 기지의 특성과 응력수준에 의존하며 duration은 하중조건에 따라 조금씩 달라진다.

Fig. 4에서 파괴하중은 약 350kgf으로 파괴시까지 거의 선형적으로 증가하고 있다. 섬유방향과 수직으로 하중선이 작용하고 있기 때문에 파괴모드는 단지 기지재 균열에 의한 것임을 알 수 있으며, 섬유 파단이나 섬유 pull-out과 같은 현상이 발생되지 않기 때문에 파괴하중은 매우 낮게 나타난다. Fig. 5에서는 진폭에 대한 count의 분포를 나타내며, 이것으로 기지재 균열을 발생시키는

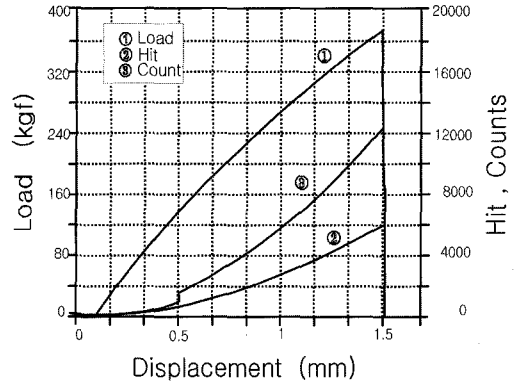


Fig. 4 Acoustic emission cumulative counts, hit and load versus displacement in $[90^\circ]_{32s}$ specimen

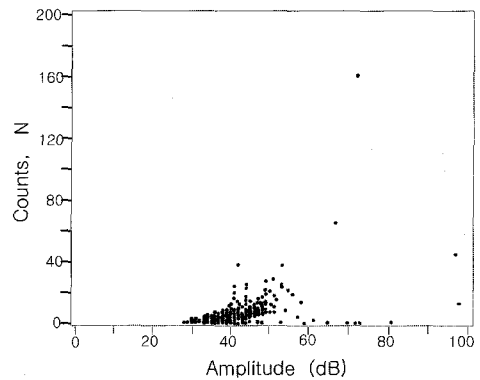


Fig. 5 Counts versus peak amplitude distribution of AE in $[90^\circ]_{32s}$ specimen

진폭 분포와 count의 상관관계를 알 수 있다. 즉 진폭이 30~50dB, 그때의 count가 1~25 정도의 분포를 가지는 음향방출신호는 기지재 균열을 발생시키고 있음을 알 수 있다.

3.1.2. $[10^\circ]_{16s}$

off-axis 각도가 10° 인 경우, 섬유 파단은 전혀 발생하지 않고 기지재 균열과 박리에 의해 음향방출신호가 발생한다. Fig. 6은 hit와 count의 변화가 큰 부분을 기준으로 3단계로 분류했다. Stage I은 기지부분에서 균열이 발생하는 단계로 정의할 수 있다. Stage II는 하나의 hit 당 count양이 갑작스럽게 증가하는 부분으로서, 이 부분에서는 섬유와 기지와의 박리 및 섬유 pull-out이 발생한

다고 판단된다. Stage III 에서는 일정한 count가 발생함으로써 기지재 균열이 계속 진전되는 양상임을 알 수 있다[14]. Fig. 7에 나타낸 바와 같이, 진폭에 대한 count의 분포에 있어서 박리가 발생할 때의 신호 특성은 진폭이 45~60dB 정도이고, 그 때의 count는 25~75 정도의 분포를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 기지재 균열이 발생할 때의 신호특성은 진폭이 30~50dB, 그때의 count는 1~25 정도의 분포를 나타내고 있다.

시험편의 형상이다. 초기에는 기지재 균열이 나타나고 각 층간이 박리되어짐에 따라서 진폭과 count의 관계가 거의 선형적인 신호가 대량으로 발생한다. 또한 균열이 진전됨에 따라 박리의 신호도 발견되지만, 그 이후부터는 층간분리의 거동이 주로 발생한다.이상의 결과로부터 층간분리가 발생할 때의 신호 특성은 진폭이 50~80dB 정도이고 그 때의 count는 60~100 정도의 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.1.3. DCB (Double Cantilever Beam)

Fig. 8은 double cantilever beam의 인장시험을 통하여 음향방출 진폭과 그때의 count량의 상관관계를 나타낸 것이다. DCB시험은 복합재료의 파괴에 지대한 영향을 끼치는 것으로 알려진 층간분리를 규명하기 위해 적절한

3.1.4. $[0^\circ]_{8s}$

$[0^\circ]_{8s}$ 시험편의 경우에는 복합재료에 발생가능한 파괴거동의 대부분이 나타나는 매우 복잡한 파괴 형태를 나타내며, 다른 시험편에서는 나타나지 않는 섬유 파괴가

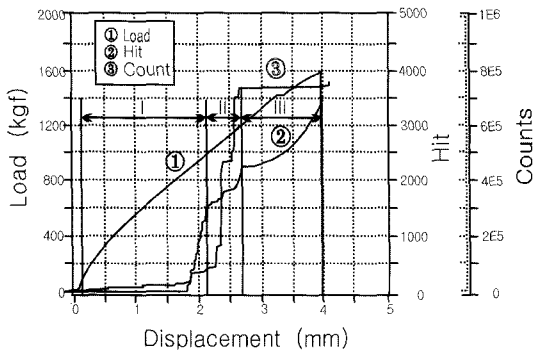


Fig. 6 Acoustic emission cumulative counts, hit and load versus displacement in $[10^\circ]_{16s}$ specimen

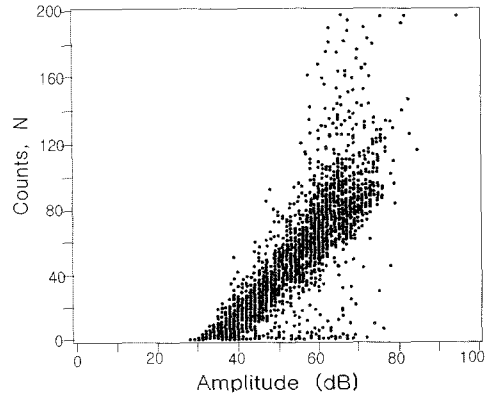


Fig. 8 Count versus peak amplitude distribution of acoustic emission in DCB specimen

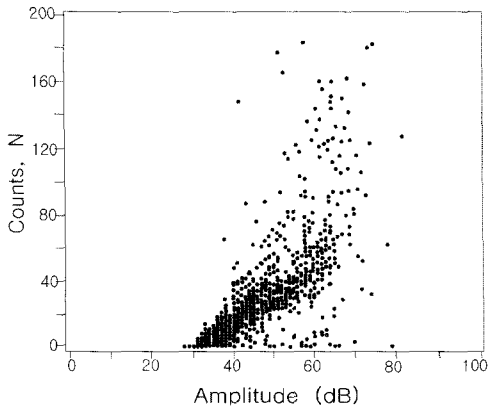


Fig. 7 Count versus amplitude distribution of acoustic emission in $[10^\circ]_{16s}$ specimen

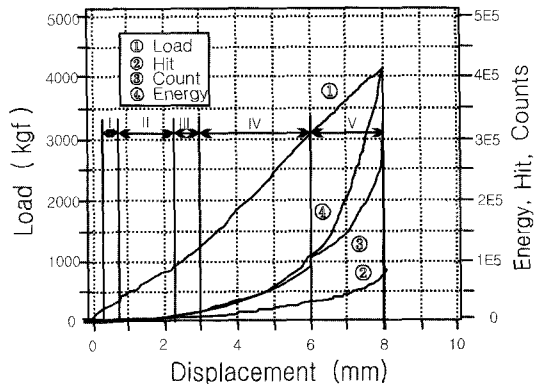


Fig. 9 Acoustic emission cumulative counts, hit, energy and load versus displacement in $[0^\circ]_{8s}$ specimen

인장 시험 후반부에 나타나는 것이 특징이다.

Fig. 9는 하중-변위선도에서 음향방출 신호들의 특징을 나타내며, Fig. 10은 음향방출 진폭과 count와의 관계를 나타낸 것이다. Stage I, II에서는 기지재 균열과 소량의 박리가 나타나고, Stage III에서는 섬유 pull-out 현상도 나타난다. Stage IV에서 중간분리가 많이 보이며 섬유 파단도 미세하게 나타났다. 파단 직전의 마지막 단계인 Stage V에서는 에너지가 큰 hit들이 다량으로 발견되고 섬유 pull-out과 섬유 파단을 포함하는 모든 파괴의 형태를 나타내는 신호들이 검출되었다.

3.1.5. $[0^\circ / 90^\circ / 2/0^\circ]_{4s}$ 과 $[0^\circ / 90^\circ / 6/0^\circ]_{2s}$

Fig. 11은 $[0^\circ / 90^\circ / 2/0^\circ]_{4s}$ 와 $[0^\circ / 90^\circ / 6/0^\circ]_{2s}$ 시험편의

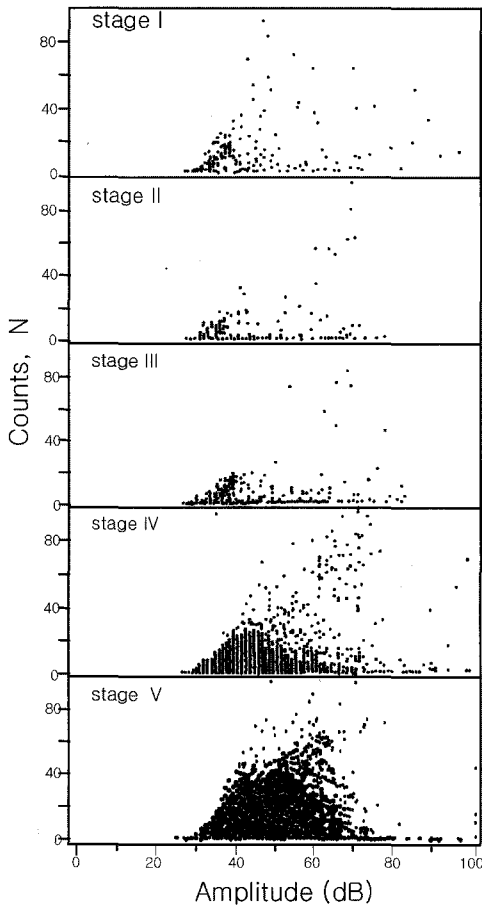


Fig. 10 Peak amplitude distribution of acoustic emission versus count in $[0^\circ]_{4s}$ specimen

진폭과 count의 관계를 나타낸 것이다. $[0^\circ / 90^\circ / 2/0^\circ]_{4s}$ 시험편과 $[0^\circ / 90^\circ / 6/0^\circ]_{2s}$ 시험편의 경우는 횡방향 기지재 균열의 특성을 알아볼 수 있는 방법을 제시한다. 즉 90° 의 적층이 증가할수록 기지재 균열은 증가하고 섬유 파단도 또한 증가하는 양상을 보인다. 이 결과로부터 기지재 균열은 30~50dB의 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 3은 이상의 실험으로부터 얻어진 각 파괴 양식에 대한 음향방출신호의 특성을 구분한 결과를 정리한 것이다. 진폭분포로만 구분하면 중복되는 진폭이 존재하고 정확한 파괴기구를 해석할 수 없기 때문에 각 진폭에 대한 count의 분포를 결합시키면 구분이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

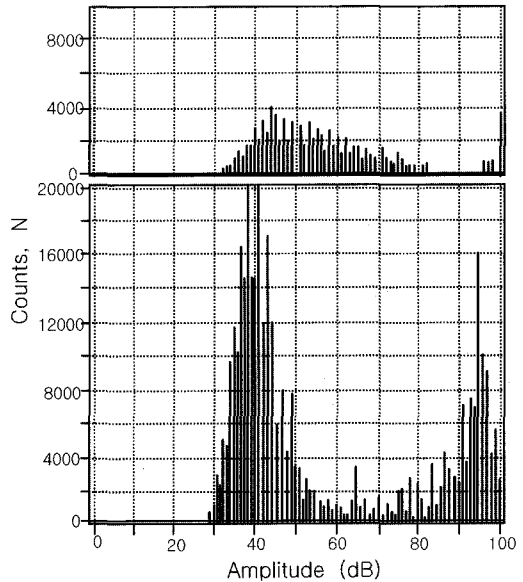


Fig. 11 Count histogram versus peak amplitude distribution of acoustic emission in $[0^\circ / 90^\circ / 2/0^\circ]_{4s}$ and $[0^\circ / 90^\circ / 6/0^\circ]_{2s}$ specimen

Table 3 Relation between fracture mechanism in CFRP laminates and acoustic emission signal

Fracture mechanism	Amplitude distribution(dB)	Count distribution
Matrix cracking	30-50	1-25
Debonding	45-60	25-75
Delamination	50-80	60-100
Fiber pullout	50-80	0-40
Fiber fracture	80-100	scatter

3.2. 파괴양식에 따른 초음파신호분석

3.2.1. $[90^\circ]_{32s}$

Fig. 12는 $[90^\circ]_{32s}$ 의 변형과 하중 및 진폭비의 관계를 나타낸 것이다. 초기에는 하중과 변형의 증가에 기인하여 재료의 인장시에 나타난 탄성의 증가로 인한 초음파 투과율이 좋아지기 때문에 초기에는 진폭비가 증가하여 나타나지만, 하중의 증가에 따른 기지재 균열의 증가로 진폭비의 감소가 나타난다. 그러나 섬유 방향에 따른 기지재 균열이 미소한 크기로 진행되므로 파단시까지 감쇠는 다시 지연되는 경향을 나타낸다.

3.2.2. $[10^\circ]_{16s}$

Fig. 13은 $[10^\circ]_{16s}$ 시험편의 변형과 하중 및 진폭비의 관계를 나타낸 것이다. 초음파의 감쇠율은 초기에 약간 상승하는 부분이 나타나다가 그 이후로는 거의 일정한 형태를 나타낸다. 그 것은 10° 시험편의 경우에는 섬유 파단이나 층간분리와 같은 파괴 형태가 전혀 발견되지 않기 때문이며 감쇠 현상은 기지재 균열에서는 거의 일정하게 나타남을 의미한다. 초기에 재료의 긴장에 의한 약간의 진폭비의 상승이 나타나지만, 섬유방향에 따라 기지재 균열이 진전되므로서 진폭비가 감소하는 경향을 나타내고 있다.

3.2.3. $[0^\circ]_{8s}$

Fig. 14는 $[0^\circ]_{8s}$ 시험편의 변형과 하중 및 진폭비의 관계를 나타낸 것이다. 초기에는 재료내에서의 파손이 거의 보이지 않지만, 하중과 변형의 증가로 재료가 긴장되어 음파의 투과율이 높아지는 경향이 뚜렷하게 나타난다. 따라서, 이후 섬유파괴가 일어나는 파괴모드로 변환시에는 진폭비는 더욱 떨어지고 있는 것을 알 수 있다.

3.2.4. $[0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]_{4s}$ 과 $[0^\circ/90^\circ_6/0^\circ]_{2s}$

Fig. 15에는 $[0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]_{4s}$, $[0^\circ/90^\circ_6/0^\circ]_{2s}$ 에 대한 변형과 하중 및 진폭비의 관계를 나타낸다. 90° 적층이 많은 재료일수록 작은 하중에서의 기지재 균열이 많이 발생하므로 초기의 진폭비의 상승이 줄어들고, 90° 적층이 증가할수록 지연구간 또한 짧아짐을 알 수 있고, 균열의 진전

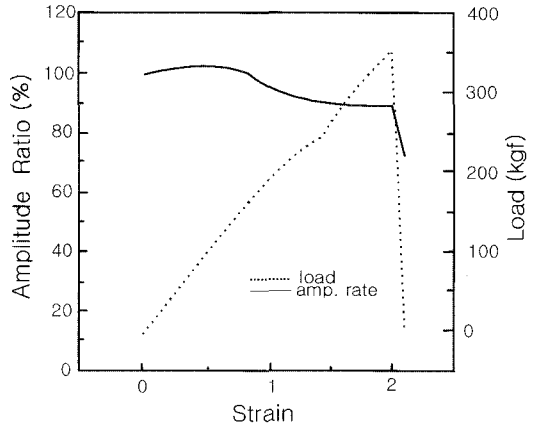


Fig. 12 Ultrasonic amplitude ratio and load versus displacement in $[90^\circ]_{32s}$ specimen

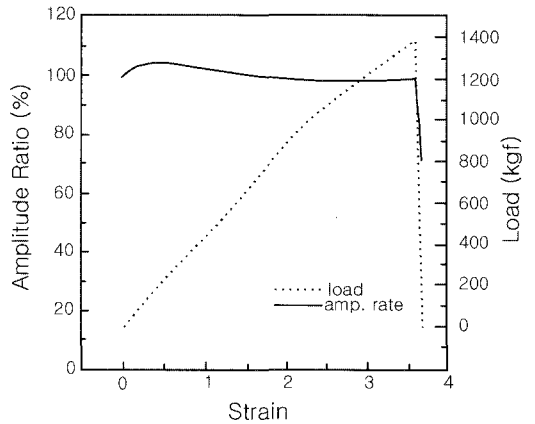


Fig. 13 Ultrasonic amplitude ratio and load versus displacement in $[10^\circ]_{16s}$ specimen

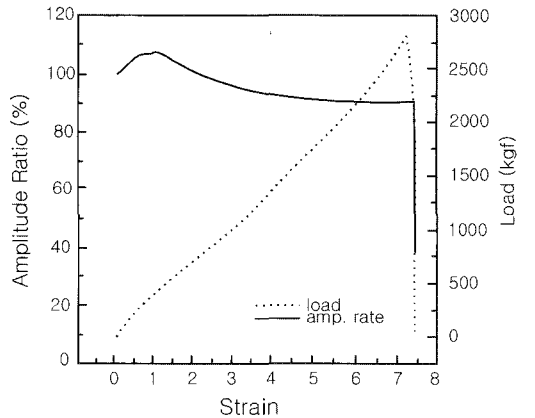


Fig. 14 Ultrasonic amplitude ratio and load versus displacement in $[0^\circ]_{8s}$ specimen

에 따라 진폭비가 감소하고 파단부에서 급격한 감쇠를 나타내고 있다.

3.3. 하중제하중(Loading-Unloading) 시험

3.3.1. 음향방출의 Felicity Ratio

Kaiser 효과와 대조적으로 기존에 받았던 응력에 도달하기 전에 음향 방출신호가 발생하는 경우에 기존 응력의 몇 퍼센트에서 음향방출이 발생하는가 하는 비율 나타내며, 대상 재료가 손상을 받아 미소 균열이 발생한 경우 Felicity Ratio가 손상을 입은 정도의 척도가 된다. Fig. 16에 나타난 바와 같이 90° 적층판이 증가할수록 Kaiser 효과는 어느 정도 지속되고 Felicity ratio값의 시작점도 상승하고 있음을 알 수 있다.

3.3.2. 초음파의 진폭비

Fig. 17의 (a)와 (b)에는 각각 [0° /90° 2/0°]4s와 [0° /90° 6/0°]2s 시험편에 대한 하중변화와 진폭비의 변화와의 상호관계를 나타낸다. 두 시험편 모두 진폭비가 서서히 감소하는 모양을 보이나 단순 인장에서의 같이 [0° /90° 2/0°]4s 시험편에서 [0° /90° 6/0°]2s 시험편보다 초기에 진폭비가 상승하는 모습이 더 명확히 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 한편, [0° /90° 2/0°]4s 시험편은 기지재 균열이 비교적 작게 발생하므로 하중제하중시의 진폭비

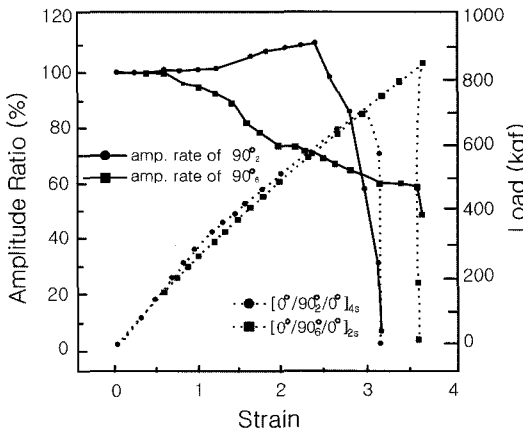
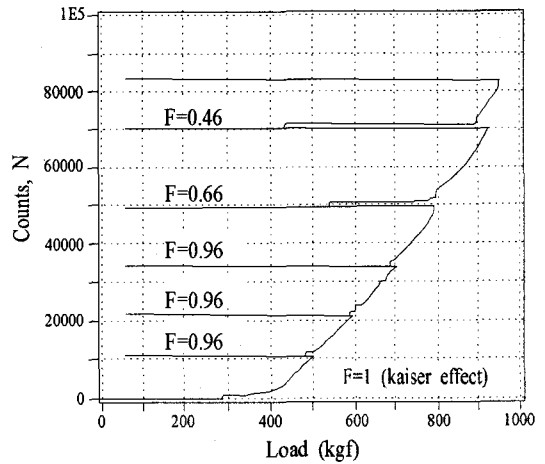
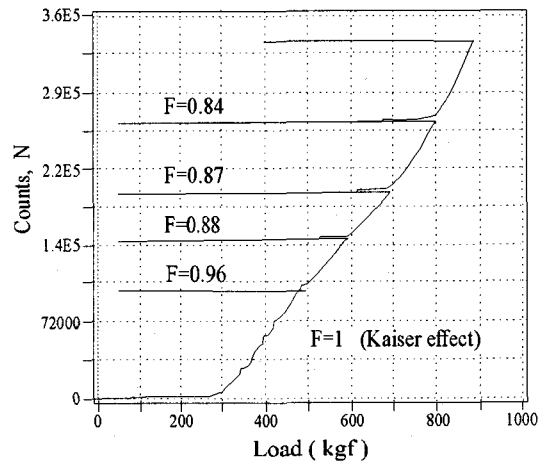


Fig. 15 Ultrasonic amplitude ratio and load versus displacement in [0° /90° 2/0°]4s and [0° /90° 6/0°]2s specimen

의 차가 크지 않지만 [0° /90° 6/0°]2s 시험편은 하중시에 기지재 균열이 많이 발생하고 제하시에 양쪽 0° ply의 수축으로 균열부위가 좁아지는 정도가 크므로 하중제하중시의 진폭비의 차가 많이 커진다. 또한 두 시험편 모두에서 균열이 많이 진전할수록 제하시의 진폭비의 증가폭이 차츰 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 복합재료의 파괴기구 규명시 초음파의 진폭비를 이용한다면 비파괴적으로 파괴거동을 해석할 수 있을 것으로 생각된다.

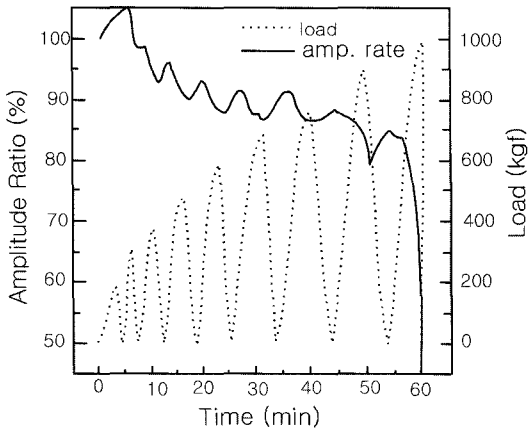


(a) [0° /90° 2/0°]4s

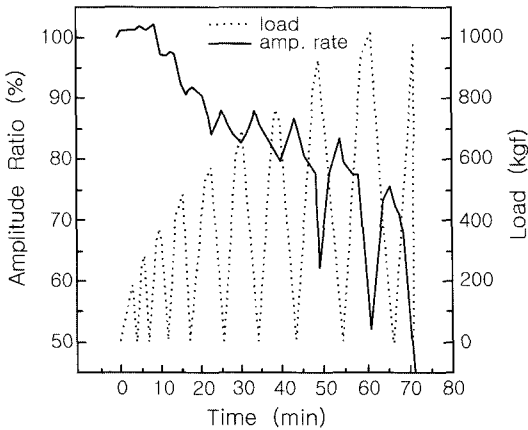


(b) [0° /90° 6/0°]2s

Fig. 16 Acoustic emission cumulative counts versus load by loading-unloading test in [0° /90° 2/0°]4s and [0° /90° 6/0°]2s specimen



(a) [0° / 90° 2/0°]4s



(b) [0° / 90° 6/0°]2s

Fig. 17 Ultrasonic amplitude ratio and load versus time by loading-unloading test in [0° / 90° 2/0°]4s and [0° / 90° 6/0°]2s specimen

4. 결 론

1. 기지재 균열은 전 시험편에 걸쳐서 폭 넓게 분포하고 있고, count는 상대적으로 낮은 값을 가진다. 또한 섬유방향에 따라 기지재 균열이 미소한 크기로 진행되므로 파단시까지 진폭감쇠는 거의 지연되는 경향을 나타내었다.
2. 음향방출의 진폭분포로만 파괴기구를 해석한다면 중복되는 진폭이 존재하고 정확한 파괴기구를 해석할 수

- 없었으나, 각 진폭에 대한 count의 분포를 결합시킬 경우 뚜렷한 파괴기구를 해석할 수 있었다.
3. 초음파의 진폭비는 균열이 진전함에 따라 감쇠가 뚜렷해지고, 결함이 많이 존재하는 상태일수록 제하시의 진폭비의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있었다. 따라서 복합재료의 파괴기구 규명시 초음파의 진폭비를 이용한다면 비파괴적으로 파괴거동을 해석할 수 있으리라 생각된다.
 4. 음향방출과 초음파사이에 상호 상관성들이 보이나, 병행한 실험에서 간섭효과가 뚜렷하게 나타나고 있으므로 간섭효과의 제거에 대한 연구가 고려되어야 한다고 생각한다.

참고문헌

- [1] Fassder, R. H. and Hagemaeier, D. J., "Low Kilo-graphy of Composites," *Materials Evaluation*, Vol. 41, No. 7, pp. 831-838, (1983)
- [2] Jones, T. S., Polansky, D. and Berger, H., "Radiation Inspection Methods for Composites," *NDT International*, Vol. 21, No. 4, pp. 277-282, (1988)
- [3] Tiwari, A., Henneke, E. G. II, and Reifsnider, K. L., "Damage Characterization of a Crossply Sic/CAS-II Ceramic Composite under Fatigue Loading using a Real-Time Acousto-Ultrasonic NDE Technique," *Journal of Composites Technology & Research*, JCTRER, Vol. 17, No. 3, pp. 221-227, (1995)
- [4] Anson, L. W., Chivers, R. C. and Puttick, K. E., "On the Feasibility of Detecting Pre-cracking Fatigue Damage in Metal-Matrix Composites by Ultrasonic Techniques." *Composites Science and Technology*, Vol. 55, pp. 63-73, (1995)
- [5] Kaczmarek, H., "Ultrasonic detection of damage in CFRPs," *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 1, pp. 59-95, (1995)
- [6] 이준현, "초음파를 이용한 입자강화 금속복합재료의 계면특성에 관한 이론적 연구", *한국비파괴검사학회지*, Vol. 13, No. 4, pp. 9-17, (1993)
- [7] Caprino, G. and Teri, R., "Residual Strength Evaluation of Impacted GHP Laminates with Acoustic Emission Monitoring," *Composites Science and Technology*, Vol. 53, pp. 13-57, (1995)

- [8] 湯山茂徳, 炭輝雄, “AEの新素材への適用,” 非破壊検査, Vol. 35, pp. 720-728, (1986)
- [9] 이상국, 오세규, 남기우, 김옥균, “음향방출법에 의한 탄소섬유복합재료의 인장 및 파괴인성시험시의 파괴 거동에 관한 연구,” 한국비파괴검사학회지, Vol.15, No. 1, pp. 277-290, (1995)
- [10] 이종오, 이주석, 윤운하, 이승희, “음향방출시험에 의한 복합재료 접합부의 비파괴평가,” 한국비파괴검사학회지, Vol. 16, No. 2, pp. 79-84, (1996)
- [11] 이종오, 이주석, 조경식, 이승희, 오세규, “CFRP복합재료의 인장시험시 파괴기구의 해석,” 한국복합재료학회지, Vol. 5, No. 2, pp.11-23, (1992)
- [12] 최낙삼, Takahashi.K., “섬유/플라스틱 사출성형 복합재료의 음향방출 진폭분포에 대한 감쇠효과,” 한국비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 1, pp. 1-8, (1998)
- [13] 이유태, 김광수, “비파괴검사법을 이용한 복합재료의 파괴인성 평가법 개발,” 한국비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 278-291, (1998)
- [14] 남기우, 안석환, 이상기, 김현수, 문창권, “시간-주파수 해석법에 의한 CFRP의 파괴 거동,” 한국비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 1, pp. 39-45, (2001)