

# 국부열손상을 받은 복합재료의 강도특성 및 비파괴평가

남기우\* · 김영운\*\*

\*부경대학교 재료공학부

\*\*부경대학교 재료공학과

## Strength Characteristics and Non-Destructive Evaluation of Composites with Heat Damage

KI-WOO NAM\* AND YOUNG-UN KIM\*\*

\*Division of Materials Science and Engineering College of Engineering, Pukyong National University, Pusan, 608-739, Korea

\*\*Dept. of Materials Science and Engineering College of Engineering, Pukyong National University, Pusan, 608-739, Korea

**KEY WORDS:** Carbon Fiber Reinforced Plastic(탄소섬유강화 플라스틱, CFRP), Glass Fiber Reinforced Plastic(유리섬유강화 플라스틱, GFRP), Fracture Mode(파괴모드), Acoustic Emission(음향방출), Time-Frequency Analysis Methods(시간-주파수 분석법)

**Abstract:** Fourier transform has been one of the most common tools to study the frequency characteristics of signals. With the Fourier transform alone, it is difficult to tell whether signal's frequency contents evolve in time or not. Except for a few special cases, the frequency contents of most signals encountered in the real world change with time. Time-frequency methods are developed recently to overcome the drawbacks of Fourier transform, which can represent the information of signals in time and frequency at the same time. In this study, heat damage process of a carbon fiber reinforced plastic(CFRP) and glass fiber reinforced plastic(GFRP) under monotonic tensile loading was characterized by acoustic emission. Different kinds of specimens were used to determine the characteristics of Strength and AE signals. Time-frequency analysis methods were employed for the analysis of fracture mechanism in CFRP such as matrix cracking, debonding and fiber fracture.

### 1. 서론

최근에 들어 산업 분야가 다양해지고 경량화를 요구함에 따라 기존의 재료에 비하여 비강성, 비강도, 내부식성 등의 재료특성을 가진 복합재료로 대체하여 많이 쓰여지고 있다.

탄소섬유강화 복합재료(CFRP)는 내식성, 내열성, 전도성, 생체친화성 및 비탄성을 등이 매우 뛰어나 우주 항공산업 및 스포츠 오락분야를 비롯한 금속재료의 대체 재료로서 이용분야가 확대되고 있는 추세이다. 특히 내식성이 우수하여 최근에는 선박 및 석유 시추를 위한 해양구조물 등의 해양 분야에서 적용이 활발히 진행되고 있으며 유리섬유강화 복합재료(GFRP)의 경우에는 기존의 복합재료의 특성(비강성, 비강도, 내부식성)과 중량감소의 측면에서 우수한 특성을 나타내고 있다.

하지만, 이러한 복합재료의 적용에 있어서 가장 큰 문제점은 재료가 하중을 받을 때 강도, 강성, 및 수명의 감소를 일으키는 손상의 복잡한 기구와 불규칙한 파괴양상에 의한 신뢰도의 부족이다. 복합재료에 있어서 손상의 전개는 재래식

금속재료와는 근본적으로 큰 차이를 나타내며, 모재의 균열, 모재와 섬유 분리, 층간분리, 섬유파단 등의 복잡한 형태로 구성되어 있으므로 손상된 재료의 파괴거동은 매우 복잡한 양상을 보인다. 따라서 종래에 금속재료의 파괴특성을 파악하기 위하여 실행하였던 실험만으로는 복합재료의 파괴특성을 정확하게 파악하기란 거의 불가능하다. 이러한 복합재료의 파괴특성을 파악하고 신뢰성을 확보하기 위해서는 먼저 손상과 파괴기구에 대한 정량적 규명을 행한 결과를 바탕으로 파괴특성의 평가를 행하는 것이 중요한 과제로 되어 있다. 한편 강화복합재료의 평가법으로서 비파괴 평가법은 확립되어져 있다고 할 수는 없다. 그것은 종래의 비파괴 검사법이 금속재료 등의 균일 등방성체를 대상으로 발전되어진 방법으로서 복합재료와 같은 불균일 재료에 그대로 적용시키기에는 많은 문제점을 안고 있을 뿐만 아니라, 실시간 평가법이 아니므로 복잡한 파괴기구를 갖고 있는 복합재료의 평가법으로는 부적당한 점이 많았다. 그 중 AE(acoustic emission)에 의한 비파괴검사법은 대상물에 붙인 AE 탐촉자에서 미시적인 파괴에 따른 탄성파를 수신하여 광범위하게 손상의 위치, 크기, 종류를 실시간적으로 평가할 수 있는 잠재력을 갖고 있는 평가법으로서 주목받고 있다.

본 연구에서는 CFRP 및 GFRP에 국부 열손상을 가한 후, 열손상 시간에 따른 강도 특성을 조사하고, 실험 중에 검출

\*남기우 : 부산광역시 남구 용당동 부경대학교 용당캠퍼스 재료공학과 (Tel: 051-620-1640)

된 음향방출 신호를 시간-주파수 분석을 실시하여 파괴 메커니즘에 따른 신호의 주파수 영역을 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편 제작

본 연구에서는, 탄소섬유 프리프레그(CU250NS, 한국화이버(주))와 유리섬유 프리프레그(????, 한국화이버(주))를 사용하였다. 인장시험을 위한 적층판은 각각 프리프레그를 6겹씩 적층하였고, 130°C, 1hr 경화시켜 제작하였다. Table 1에 사용된 prepreg의 조성을 나타내었고, Fig. 1에 시험편의 형상을 나타내었다.

Table 1 Properties of Prepreg

Specimen	Fiber Wt.(gr/m <sup>2</sup> )	Resin Wt.(gr/m <sup>2</sup> )	R/C Wt.(%)	Total Wt.(gr/m <sup>2</sup> )
CU250NS	250	140	36±2	390
	204.7	151.3	42.5	356

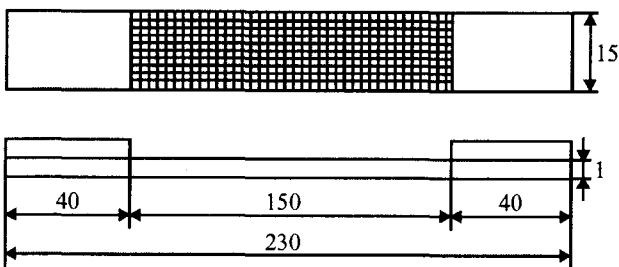


Fig. 1 Shape and dimension of tensile test specimen

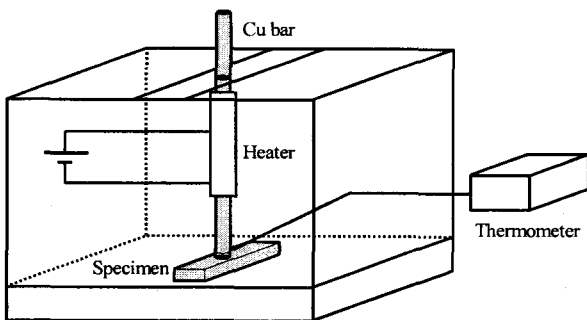


Fig. 2 Schematic drawing of heat damage system

### 2.2 국부 열손상 장치

본 연구에서는 시험편에 국부 열손상을 가하기 위하여, 필요한 장비를 직접 제작하여 사용하였다. 그 모식도를 Fig. 2

에 나타내었다. 즉, 슬라이더를 이용하여 전류를 조절함으로써 온도를 제어하였다. 열손상 온도는 350°C(CFRP)와 300°C(GFRP)로 온도 유지시간을 각각 5, 10, 15, 45 및 60min으로 하였다.

### 2.3 음향방출 시스템

인장시험 중 발생하는 음향방출신호의 측정 시스템을 Fig. 3에 나타내었다. 시험중 발생하는 음향방출 신호는 PAC社의 Mistras 2001(2 channel)을 사용하여 검출하였다. AE센서는 1MHz 광대역 센서를 사용하였고, 검출된 음향방출 신호를 100~1200kHz 아날로그 필터가 내장된 Pre-amp에서 40dB 증폭시킨 후, Mistras 2001 Board 내부에 포함된 A/D변환기로 디지털 변환시킨 다음, 최종적으로 시간-주파수 해석법을 사용하여 실시간적으로 분석하였다. 본 실험에서는 전기적 및 기계적 잡음을 제거하기 위하여, Threshold를 40dB로 설정한 후 신호를 검출하였다.

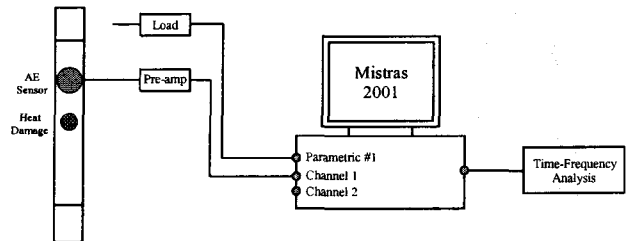


Fig. 3 Schematic diagram of AE system

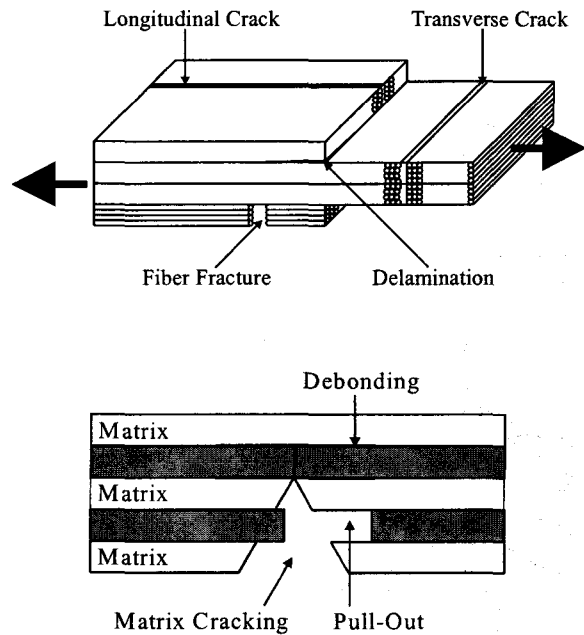


Fig. 4 Schematic representation of the main macroscopic damage in CFRP and GFRP

### 3. 복합재료의 파괴기구

일반적으로 복합재료 적층판에서의 파괴특성은 초기영역이 matrix 손상으로 구성된다. 이러한 균열 등은 거의 등거리로서, 특정 한계치까지 균열밀도가 증가하게 된다. 하중이 계속 증가하게되면 다른 파손기구의 성장과 함께 기지와 섬유와의 debonding과 횡단면에서의 미시적 층간 박리에 의하여 파괴가 발생하고, 최종적으로는 전 범위에 걸쳐 파손을 일으키는 섬유파괴의 형태로 관찰된다. 거의 최종단계에서 발생하는 섬유파단의 경우 임의의 어떤 응력수준에서 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. Fig. 4는 복합재료의 대표적인 파괴기구를 도식적으로 나타낸 것이다.

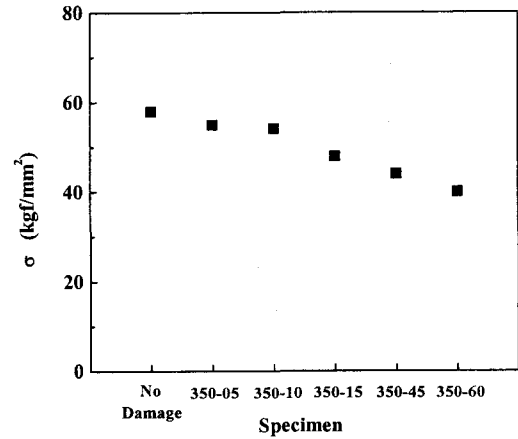
### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 인장특성

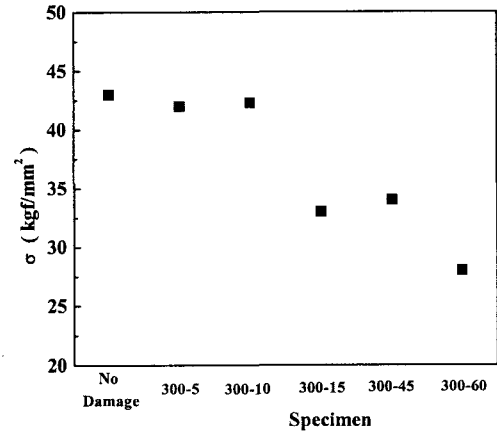
Fig 5는 열손상 시간에 따른 응력값과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 나타나는 것처럼 CFRP 및 GFRP 모두 전체적으로 열손상 시간이 증가할수록 응력값은 저하하고 있음을 알 수 있다. CFRP의 경우는 350℃에서 10분까지의 시험편에서는 응력 감소폭이 다소 작지만, 15분 열손상 받은 시험편에서부터는 그 감소폭이 커지고 있는 것을 알 수 있다. GFRP의 경우는 300℃에서 10분까지의 시험편에서는 응력폭의 감소가 거의 없고, 15분 열손상을 받은 시험편에서부터는 그 감소폭이 커지며 60분 열손상을 받은 시험편은 응력폭의 감소율이 약 50%정도까지 이르렀다.

이것은 열손상 시간이 증가할수록 matrix의 감소가 커지고, 그에 따른 섬유와 matrix사이의 계면전단강도 감소 및 열손상 시간의 증가에 따른 섬유 자체의 손상 또한 커지게 되는 것 등의 원인에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 6는 각각의 시험편을 인장 실험을 실시한 후에 관찰한 것을 나타낸 것이다. CFRP 및 GFRP 시험편에서는 Fig. 6에 나타나는 것처럼 열 손상(○표시)을 적게 받은 시험편은 한 부분에서 파단되지 않고 좌측과 우측 양쪽에서 동시에 파단이 일어났다. 이와 같은 것으로 미루어볼 때, Fig. 5의 응력그래프에서도 나타나는 것처럼 CFRP는 350℃에서 열손상을 받을 경우 15분 미만까지는 큰 영향을 미치지 못하지만, 15분 이상의 열 손상을 받은 경우에는 강도에 큰 영향을 미치며, GFRP의 경우는 15분 이상부터 열 손상을 받은 경우 강도에 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.



(a) Tensile strength of CFRP



(b) Tensile strength of GFRP

Fig. 5 Effect of heat damage time on the tensile properties of specimens

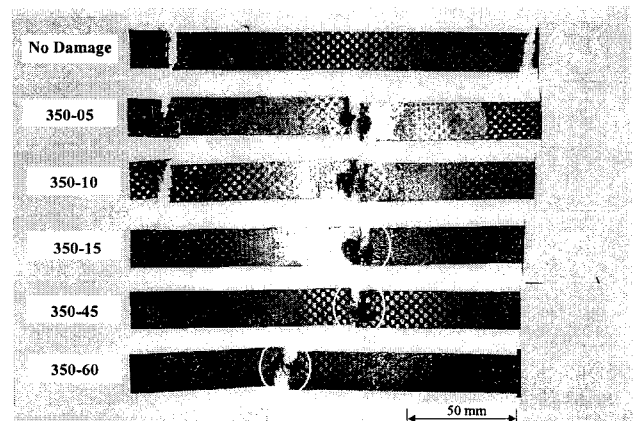


Fig. 6 Each specimen of on the tensile test

#### 4.2 열손상에 의한 비파괴평가

Fig. 7은 인장시험 중 발생한 음향방출신호들의 count값과 하중(load)값을 겹쳐서 나타낸 것이다. 본 실험에서는 모든 시험편에 대하여 음향방출 신호를 검출하여 분석하였지만, 여기서는 대표적으로 CFRP의 350-45시험편에 대하여 나타내었다. Fig. 7에서 나타나는 것처럼 전체적으로 하중이 증가할수록 count값이 커지고 있음을 알 수 있다. 이것은 복합재료의 파괴양상이 처음에는 매트릭스 파괴로 시작하여 debonding과정을 거쳐 최종적으로 섬유파괴로 나타나게 된다. 본 연구에서도 이것에 기인하여

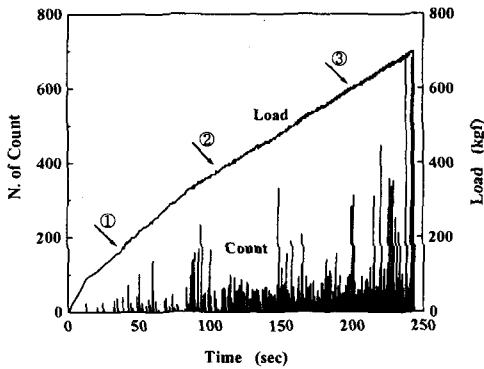


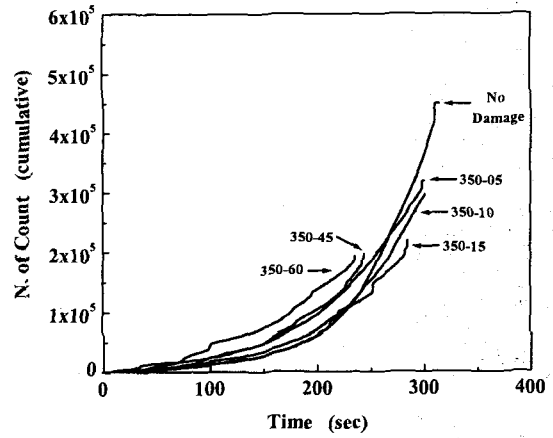
Fig. 7 AE count produced during the tensile test

①부분에서는 주로 매트릭스 파괴, ②부분은 매트릭스 파괴와 debonding, ③부분에서는 매트릭스 파괴, debonding 및 섬유파괴가 동시에 발생하기 때문에 실험 시간이 증가할수록 count값이 커지게 된다고 판단된다.

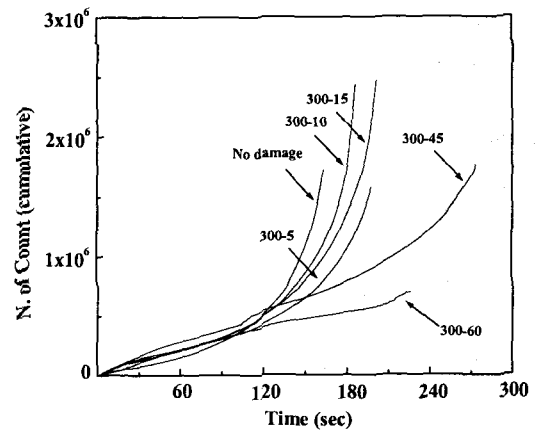
Fig. 8은 인장 실험중에 검출된 음향방출신호들의 count의 누적값을 시간에 대하여 나타낸 것이다.

CFRP의 경우는 열 손상 시간이 증가할수록 누적 카운터값이 작아지고 있음을 알 수 있다. 음향방출은 재료가 외부에서 외력을 받는 경우에 재료 내부의 변형에 의하여 방출되는 탄성파로 정의된다. 재료가 열 손상을 많이 상태에서 외력을 받게되면, 응력이 열 손상 부위로 집중됨으로 인하여 재료의 변형부분이 감소하게된다. 이와 같은 이유에서 열손상을 많이 받을수록 누적 카운터 값은 감소하는 것으로 판단된다. 또, 15분 열손상을 받은 시험편을 기준으로 누적카운터 값의 감소폭이 변화하고 있음을 알 수 있다.

GFRP의 경우에는 모재나 열 손상을 적게 받은 시험편에서는 파단이 여러 부분에서 동시에 일어났으며 이러한 파단 형태로 15분까지 열손상을 받은 시험편에서는 열손상에 따른 일정한 누적 카운터값이 나타나지 않았다. 그러나 45분 이상부터 같은 시간대를 기준으로 보았을 때 열 손상에 따른 응력의 집중으로 열손상을 받은 부분에서의 파단이 주를 이루어 누적 카운터값이 15분이하의 열손상을 받은 시험편보다 누적 카운터값이 저하되는 것을 알 수 있었고 60분 열손상을 받은 시험편에서는 누적 카운터값이 최소가 되었다.



(a) CFRP



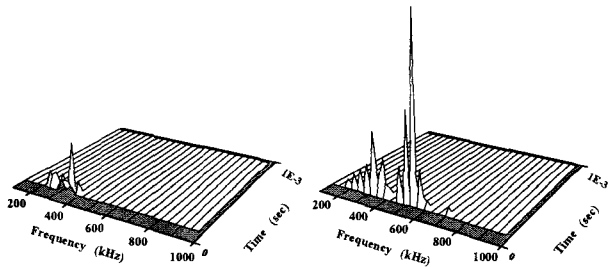
(b) GFRP

Fig. 8 AE count produced during the tensile test

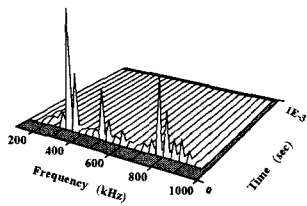
#### 4.3 시간-주파수 분석

본 논문에서는 CFRP의 모든 시험편에 대하여 음향방출신호를 검출하여 분석하였지만, 대표적으로 350-45시험편에서 검출된 음향방출 신호를 시간-주파수 분석을 실시한 것을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)은 Fig. 7의 ①부분에서 검출된 신호를 분석한 것으로서 그 주파수 범위가 300kHz로 나타났다. 인장 초기부분에는 시험편에 외력이 가해지면서 matrix에 균열이 발생하게 되는데 이것에 의한 신호라고 판단된다. Fig. 9(b)는 Fig. 7의 ②부분에서 검출된 신호로 그 주파수 영역이 300kHz와 500kHz의 두 가지로 나타났다. 300kHz영역은 (a)에서와 같이 matrix 균열의 발생에 의한 것으로 판단되고, 500kHz영역은 debonding에 의하여 나타나는 영역이라고 판단된다. Fig. 9(c)는 시험 말기부분 즉, Fig. 7의 ③에서 검출된 신호를 분석한 것으로서 그 영역이 300kHz, 500kHz 및 700kHz의 3 영역으로 나타났다. 300kHz 및

500kHz는 앞의 설명에 의한 것이라고 판단되고, 700kHz 영역은 섬유파괴에 의한 것이라고 판단된다.



(a) Fracture of matrix (b) Debonding + fracture of matrix



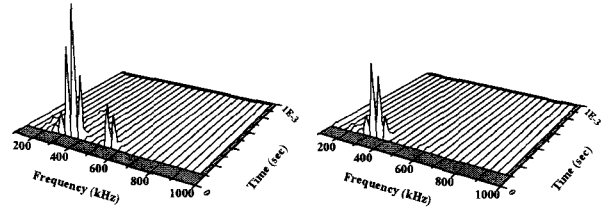
(c) Fracture of carbon fiber and matrix + debonding

Fig. 9 Time-frequency analysis of CFRP by acoustic emission test

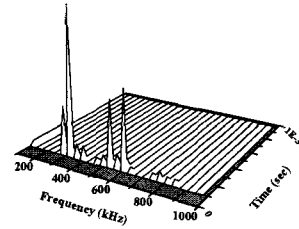
Fig. 10은 GFRP시험편 중에서 대표적인 300-0시험편에서 검출한 음향방출 신호를 시간-주파수 분석을 행한 그림이다. CFRP와 동일하게 크게 3가지 영역으로 나눌 수 있었다. Fig. 10(a)는 인장영역 초기인 Fig. 7의 ① 부분에서 주를 이루는 신호로서 350kHz의 주파수 범위가 나타났으며, Fig. 10(b)는 Fig. 7의 ② 부분에서 나타난 신호로서 주파수 범위는 350kHz + 550kHz를 나타냈다. 그리고 Fig. 10(c)는 Fig. 7의 ③ 부분에서 주로 나타나는 신호로서 그 주파수 범위는 350kHz + 550kHz + 800kHz를 나타냈다. 이러한 주파수 범위는 CFRP와 동일하게 인장시험 초기에는 매트릭스 파괴에 의한 350kHz 범위의 비교적 저주파수대가 그리고 인장시험 중기 및 말기에는 debonding과 유리섬유의 파괴에 의하여 550kHz와 800kHz 범위의 고주파수대가 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 11은 GFRP의 300-60시험편에서 검출한 신호를 분석결과를 나타내었다. 모재(300-0)과 유사하게 인장초기에는 매트릭스 파괴, 인장시험 중기 및 말기에는 debonding, 유리섬유 파괴의 순서로 파괴 기구가 구별되었다. 그러나 인장시험 전 영역에서 매트릭스의 파단과 동시에 debonding되거나 또는 매트릭스 파괴, debonding, 유리섬유의 파괴가 동시에 나타나는 Fig. 11(a), Fig. 11(b)경우의 신호가 많이 나타났다. 이는 인장시험 초기의 매트릭스 파괴, 인장시험 중기 및 말기의 debonding, 유리섬유의 파괴의 과정을 거치지 않고 시험편의 국부적인 열 손상을 가함으로서 매트릭스 및 유리

섬유의 손상에 의한 것으로 판단된다.

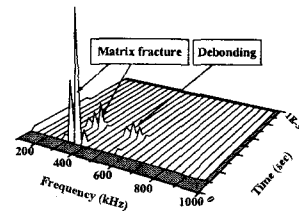


(a) Fracture of matrix (b) Debonding + fracture of matrix

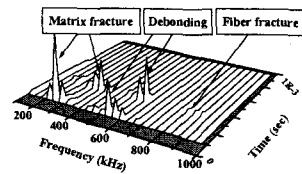


(c) Fracture of glass fiber and matrix + debonding

Fig. 10 Time-frequency analysis of GFRP by acoustic emission test



(a) Fracture of matrix → debonding



(b) Fracture of matrix → debonding → fracture of glass fiber

Fig. 11 Continuous time-frequency analysis of GFRP according to time by acoustic emission test

## 5. 결론

본 연구에서는 CFRP 및 GFRP에 국부 열손상을 가한 후, 열손상 시간에 따른 강도 특성을 조사하고, 실험 중에 검출

된 음향방출 신호를 시간-주파수 분석을 실시하여 파괴 메커니즘에 따른 신호의 주파수 영역을 분석하였다. 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 열손상 시간이 길어질수록 응력값은 감소하였으며, 15분 열손상을 받은 시험편에서부터 감소폭이 증가하였다.
- 2) CFRP의 경우는 누적 카운터 값은 열손상 시간이 길어질수록 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 GFRP의 경우 열손상 시간이 적게 받은 시험편에서는 열손상 부분 외에 다른 부분에서의 파괴가 같이 일어남으로 인한 누적 카운터값의 열손상 시간에 따라 일정하지는 않았지만 45분, 60분 열손상을 가한 시험편에서는 누적 카운터값이 낮은 경향이 나타났다.
- 3) 시간-주파수 분석에 의하여 인장시험 초기의 matrix의 파괴, 인장시험 중기 및 말기의 debonding, 섬유파괴에 의하여 발생하는 주파수 영역의 구별이 가능하였고, 열손상에 의하여 매트릭스 파괴, debonding 및 섬유파괴가 연속적으로 일어나는 음향방출 신호를 검출할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- 남기우, 안석환, 이상기, 김현수, 문창권, "시간-주파수 해석법에 의한 CFRP의 파괴거동", 비파괴검사학회지, 제21권, 제1호, pp. 39~45, 2001
- 김상태, 김덕윤, "음향방출법을 이용한 Glass Fiber/PET 복합재료의 손상평가", 한국복합재료학회지, 제14권, 제1호, pp. 1~7, 2001
- 전홍재, I. M. Daniel, "초음파와 음향방출법을 이용한 복합재료 직교적층판의 점진적 손상과정에 관한 연구", 대한기계학회논문집 A권 제24권, 제5호, pp. 1084~1092, 2000
- 이유태, 김상태, 김광수, "음향방출법을 이용한 탄소섬유강화복합재료(CFRP)의 파괴인성평가", 한국복합재료학회지, 제10권, 제1호, pp. 23~33, 1997
- 金原勳, 岸輝雄, H. C. Kim, "複合材料の超音波による材質評價", 日本機械學會誌, 第82卷, 第32號 pp. 77~82, 1979
- 金原勳, "複合材料の非破壊検査の現状と問題點" 新素材びその製品の非破壊検査シンポジウム, 日本非破壊検査協會, 東京, pp 37~42, 1985
- Coper, G. A., "Micromechanics Aspects of Fracture and Toughness Composite Materials", Wiley. New York, pp. 415~448. 1976
- Fowler, T. J., "Acoustic Emission Testing of Chemical Process Industry Vessels", Progress in Acoustic Emission II JSNDI, Sendai, pp. 421~449, 1984
- Holoryd, T. J., "AE from and Industrial Application View Point", Progress in Acoustic Emission IV JSNDI, Kobe, pp. 39~48, 1988
- Smith, T. R. and Owen, M. J., "Progressive Nature of Fatigue Damage in FRP", Modern Plastic, pp. 128~133, 1969
- Vaidya U. K, Rarj P. K., "Identification of Failure Models of Carbon-Carbon Composite at Various Processing Stage Using the Acoustic Emission Technique", Journal of Vibration and Acoustic, Vol. 118, pp. 446~453, 1996