

국부 열손상을 받은 복합재료의 탄성파특성

남기우* · 김영운**

*부경대학교 재료공학부

**한국해양수산연수원

Characteristics of Elastics Waves of Fiber-Reinforced Plastic with Localized Heat Damage

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

*Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan, 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 Method 시간-주파수 분석법, Nondestructive Technique 비파괴기법

ABSTRACT: Fiber-reinforced composites are extensively used in electronic, ship and aerospace applications due to their high strength and high toughness. In these applications, they are often subjected to localized heat damage due to various sources. In order to ensure their reliability, it is important to predict their residual properties using nondestructive evaluation techniques. Fabric fiber composite specimens were manufactured with six layers of the glass-fiber prepreg and the carbon-fiber prepreg, respectively. The specimens were subjected to a localized heat damage using a heated copper tip with a diameter of 10mm at 350°C(CFRP) and 300°C(GFRP), respectively. The specimens were then subjected to tension tests while acoustic emission (AE) activities of specimens were collected. The AE activity of all specimens showed three types of distinct frequency regions. Those are matrix cracking, failure of the fiber/matrix interface and fiber breakage.

1. 서 론

최근 산업분야가 다양해지고 경량화를 요구함에 따라서 기존의 재료에 비하여 강성과 강도특성이 우수하고, 경량성과 내수·내약품성 등의 재료특성을 가진 복합재료가 많이 사용되고 있다. 섬유강화 복합재료는 내식성, 내열성, 전도성, 생체친화성 및 비탄성을 등이 매우 뛰어나 우주 항공산업, 전자산업, 압력용기, 구조물 및 스포츠 오락분야를 비롯한 금속재료의 대체 재료로서 이용분야가 확대되고 있는 추세이다(장석운 등, 2001). 특히 내식성이 우수하여 최근에는 선박 및 해양구조물 등의 해양분야에서 적용이 활발히 진행되고 있다(김상현과 반석호, 2002). 이와같은 응용에 있어서, 복합재료는 불가피하게 국부적으로 열손상을 받을 수도 있다(Fisher et al., 1995). 이러한 복합재료의 파괴특성을 파악하고 신뢰성을 확보하기 위해서는 먼저 손상과 파괴기구를 정량적으로 규명하기 위하여, 유용한 비파괴적 평가 기법을 사용하여 파괴특성의 평가를 실시하는 것이 중요하다.

한편 강화복합재료를 비파괴적으로 평가하기 위하여 많은 연구자들이 노력하고 있다(Henneke, 1990; Laksimi et al., 1994;

전홍재와 Daniel, 2000; 김상태와 김덕윤, 2001). 그것은 종래의 비파괴 검사법이 금속재료 등의 등방성재료를 대상으로 발전된 방법으로서 복합재료와 같은 이방성 재료에 그대로 적용하기는 많은 문제점을 안고 있을 뿐만 아니라, 실시간 평가법이 아니므로 복잡한 파괴기구를 갖고 있는 복합재료의 평가법으로는 부적당한 점이 많았다. 그 중 음향방출(acoustic emission)에 의한 비파괴검사법은 피검체에 붙인 음향방출 탐촉자에서 파괴에 따른 탄성파를 수신하여 광범위하게 손상의 위치, 종류, 균열의 진전 등을 실시간적으로 평가할 수 있는 잠재력을 갖고 있는 평가법으로서 주목받고 있다(남기우 등, 2001; 남기우와 문창권, 2002).

본 연구에서는 CFRP 및 GFRP에 국부 열손상을 가한 후, 열손상 시간에 따른 강도특성을 조사하고, 실험 중에 검출된 음향방출신호의 시간-주파수를 분석하였다. 이와 같이 분석된 음향신호의 주파수 영역과 파괴 메커니즘을 분석하여, 복합재료로 구성된 대형 구조물의 파괴 감시를 위한 기초적인 자료로 제공하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작

본 연구에서는 평직직물 형태인 탄소섬유 프리프레그와 유

제1저자 남기우 연락처 : 부산광역시 남구 용당동 100

051-620-1640 namkw@pknu.ac.kr

리섬유 프리프레그(한국화이버(주))를 사용하였다. Table 1에 사용된 prepreg의 조성을 나타낸다. 인장시험을 위한 시험편은 핸드레이업(Hand Lay-up)법을 사용하여 프리프레그를 6겹씩 적층하였고, 적층시에는 프리프레그를 한 장씩 둥근 유리병으로 적당하게 압력을 가하면서 적층하고 실리콘 오일의 이형제가 칠하여진 금형에 넣은 후 진공상태로 30분간 유지시켰다. 그리고 열 프레스에서 130℃, 2.88기압의 압력하에서 60분간 유지하여 잔류기공을 제거하고 성형이 완료된 후, 적층판을 실온상태에서 120분간 냉각하여 30°이하로 떨어진 상태에서 개방하였다. 성형된 복합재료 적층판을 가공하여 Fig. 1과 같은 형상의 시험편을 제작하였다.

Table 1 Properties of prepreg

Specimen	Fiber Wt.(gr/m ²)	Resin Wt.(gr/m ²)	R/C Wt.(%)	Total Wt.(gr/m ²)
CF prepreg	250	140	36±2	390
GF prepreg	204.7	151.3	42.5	356

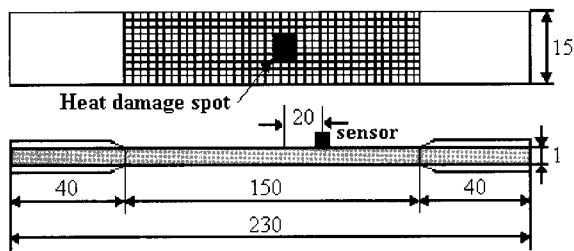


Fig. 1 Shape and dimension of specimen (unit : mm)

2.2 국부 열손상 장치

본 연구에서는 시험편에 국부 열손상을 가하기 위하여, 필요한 장비를 직접 제작하여 사용하였다. 그 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 시험편의 열손상은 직경 10mm의 구리봉을 사용하여, 중앙부에 접촉시켰다. 이때 온도는 슬라이드스를 이용하여 전류를 조절함으로써 제어하였다. 열손상 온도는 350℃(CFRP)와 300℃(GFRP)로 온도 유지시간을 각각 5, 10, 15, 45 및 60min으로 하였다.

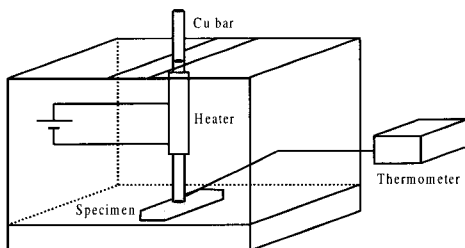


Fig. 2 Schematic drawing of heat damage system

2.3 음향방출 시스템

인장시험에 사용한 인장시험기는 Instron사의 용량 5톤을 사용하였으며, 크로스헤드 속도는 2mm/sec로 제어하여 실온에서

실시하였다. 인장시험 중 발생하는 음향방출신호의 측정 시스템을 Fig. 3에 나타내었다. 시험중 발생하는 음향방출신호는 PAC사의 Mistras 2001(2 channel)을 사용하여 검출하였다. AE 센서는 1MHz 광대역 센서를 사용하였고, 검출된 음향방출신호를 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.

그리고, 시험편에서 발생하는 신호를 민감하게 측정하기 위해서 시험편과 센서사이에 접촉매질인 그리스를 얇게 바른 후 테이프로 압착하였다. 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 필터 제거방법과 진흙을 이용하여 제거하였다.

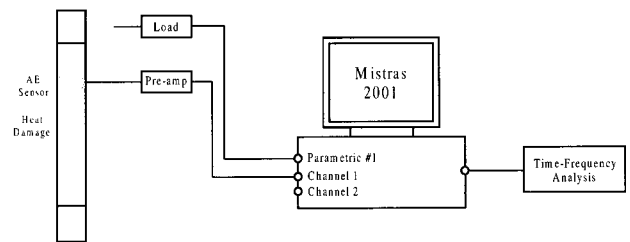
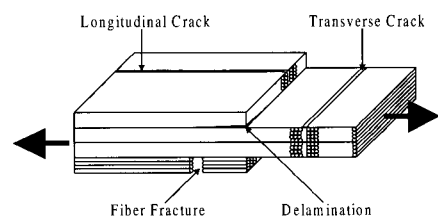


Fig. 3 Schematic diagram of AE system

3. 복합재료의 파괴기구

일반적으로 복합재료 적층판에서의 파괴특성은 다음과 같이 3가지 파괴기구를 가진다(Sun, 1989; Uenoya, 1988). (i) matrix 균열 ; 이것은 복합재료 적층판에서 외부하중을 받을 때, 수직이 많은 곳과 하중 방향에 대하여 수직하게 배열된 섬유층에서 발생한다. 특히, 후자는 저변형률에서 규칙적인 간격으로 재료표면에 나타나는 수직한 미소균열로서 관찰된다. (ii) 섬유와 matrix 계면의 손상 ; 이것에는 다음과 같은 두 가지가 있다. a) 외부응력으로 인하여 섬유와 matrix debonding, b) 외부응력으로 인하여 적층판 내부 계면에서 국부적인 박리. (iii) 섬유 파괴 ; 이것은 대체적으로 하중방향으로 배열된 섬유에서 발생한다. 적층판에서 하중방향에 대하여 수직층의 경우에는 잘못된 섬유 배열과 공정중에 발생한 초기결합에서 발생하며, 초기 변형단계에서 나타난다. Fig. 4는 복합재료의 대표적인 파괴기구를 도식적으로 나타낸 것이다.



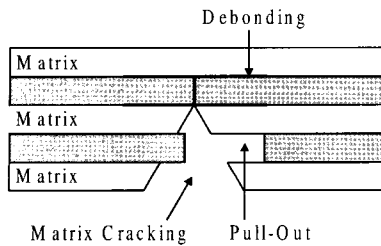


Fig. 4 Schematic representation of the main macroscopic damage in CFRP and GFRP

4. 실험결과 및 고찰

4.1 인장특성

탄소섬유와 유리섬유의 대표적인 변형률 선도를 Fig. 5에 나타낸다. 이 그림에서 탄소섬유와 유리섬유는 취성적인 파괴곡선을 나타내고 있으며, 유리섬유가 강도는 낮지만 더 큰 변형률을 나타내고 있다.

Fig. 6는 열손상 시간에 따른 응력값과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6에 나타내는 것처럼 CFRP와 GFRP는 전체적으로 열손상 시간이 증가할수록 응력이 저하하고 있음을 알 수 있다. CFRP의 경우는 350°C에서 10분 열손상된 시험편에서는 응력 감소가 다소 작지만, 15분 열손상된 시험편 부터는 응력 감소가 커지고 있는 것을 알 수 있다. GFRP의 경우는 300°C에서 10분 열손상된 시험편에서는 응력폭의 감소가 거의 없고, 15분 열손상된 시험편 부터 응력 감소가 커지며 60분 열손상된 시험편은 응력의 감소율이 약 50%정도까지 이르렀다.

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

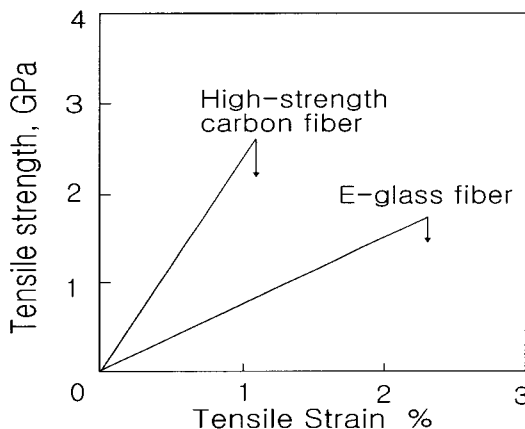


Fig. 5 Representative stress-strain curves of select advanced reinforcedment fibers (Jang, 1994)

Fig. 7은 대표적으로 CFRP 시험편을 인장 실험한 후 파단 외관을 나타낸 것이다. CFRP와 GFRP 시험편은 Fig. 7에 나

타나는 것처럼 열손상(○표시)을 적게 받은 시험편은 손상된 부분에서만 파단되지 않고, 미손상 부분에서도 파단이 발생하였다. 이와 같은 것으로 미루어 볼 때, Fig. 6의 응력그래프에서도 나타나는 것처럼 CFRP는 열손상 시간 10분까지는 큰 영향을 미치지 못하지만, 15분 이상의 열손상을 받은 경우에는 강도에 큰 영향을 주었다. 그리고, GFRP의 경우에도 CFRP와 유사하게 열손상 시간 10분까지는 강도에 영향이 거의 없었으나, 15분 이상의 열손상을 받은 경우에는 강도에 큰 영향을 주었다.

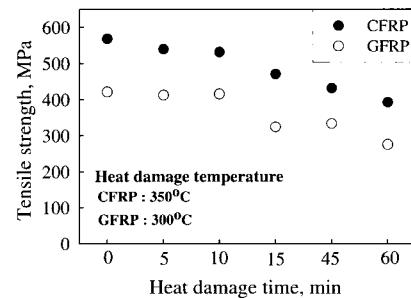


Fig. 6 Tensile strength of CFRP and GFRP by heat damage time

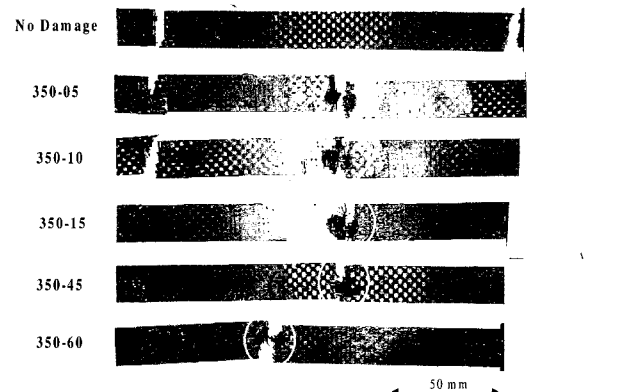


Fig. 7 CFRP specimens after the tensile test

4.2 열손상에 의한 비파괴평가

Fig. 8은 인장시험 중 발생한 음향방출신호들의 count값과 하중(load)값을 겹쳐서 나타낸 것이다. 본 실험에서는 모든 시험편에 대하여 음향방출신호를 검출하여 분석하였지만, 여기서는 대표적으로 45분간 열손상된 CFRP 시험편에 대하여 나타내었다. Fig. 8에 나타내는 것처럼 전체적으로 하중이 증가할수록 count값이 커지고 있음을 알 수 있다. 이것은 복합재료의 파괴양상은 복합재료 파괴기구에서 설명하였듯이 처음에는 matrix 균열로 시작하여 섬유와 matrix 계면의 손상과정을 거쳐 최종적으로 섬유파괴로 나타나게 된다. 본 연구에서도 ① 부분은 주로 matrix 균열, ② 부분은 matrix 균열, 섬유와 matrix 계면의 손상, ③ 부분은 matrix 균열, 섬유와 matrix 계면의 손상 및 섬유파괴가 동시에 발생하기 때문에 실험시간이 증가할수록 count값이 커지게 된다고 판단된다.

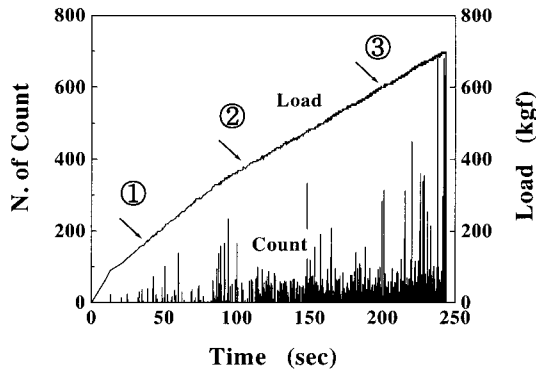
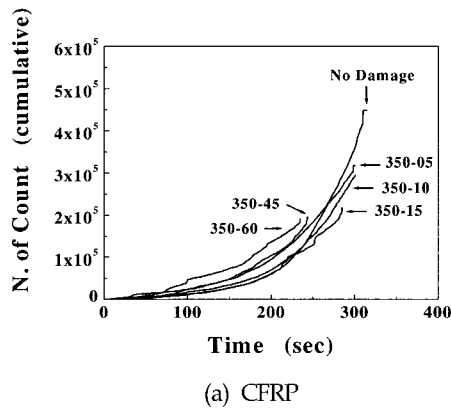
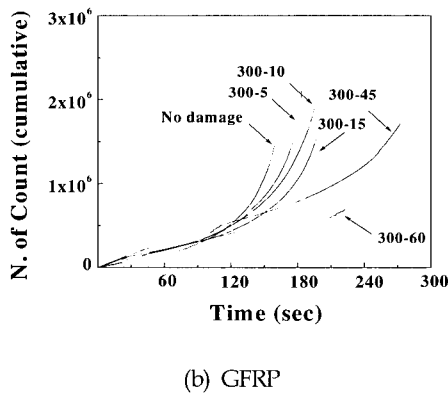


Fig. 8 AE count produced during the tensile test



(a) CFRP



(b) GFRP

Fig. 9 AE count produced during the tensile test

Fig. 9(a), (b)는 인장 실험중에 검출된 음향방출신호의 누적값을 시간에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 9(a)의 CFRP는 열 손상 시간 15분까지는 누적값이 작아지고 있음을 알 수 있다. 이것은 matrix의 손상이 증가하게 되어, matrix 균열에 의한 음향방출이 적어지기 때문이라고 판단된다. 그러나 45분과 60분은 matrix의 손상이 많음과 동시에 섬유도 손상이 발생하여, 섬유손상부에서 많은 신호가 단시간에 발생하면서 판단한 것으로 판단된다. 또, 15분 열손상된 시험편을 기준으로 누적값이 감소하고 있는 것은 Fig. 6의 강도변화와 일치하고 있다. Fig. 9(b)에서 GFRP의 5, 10분 시험편은 표면이 열화되어 파괴

시에 matrix에 균열이 많이 발생함으로서 음향방출이 많이 발생한 것으로 판단되며, Fig. 6에서 알 수 있듯이 모재와 거의 비슷한 강도를 유지하였다. 그러나 15분 이상 열손상된 시험편은 matrix의 손상이 심하여 파괴시 음향방출이 적게 발생하였다고 생각된다. 그리고 15분 이후의 시험편에서 판단시간이 긴 것은 손상시간이 길어지면서 matrix는 손상되고, 유리섬유가 주로 인장응력을 받기 때문이라고 판단된다. 손상시간에 따라서 음향방출이 저하되는 것을 알 수 있었고, 60분 열손상을 받은 시험편에서는 음향방출의 누적값이 최소가 되었다. 이 그림에서 15분 손상의 음향방출이 적은 것은 Fig. 6에서 강도가 적은 것과 일치하고 있다. Fig. 9(a), (b)는 Fig. 5의 선도와 좋은 일치를 보이고 있다.

4.3 시간-주파수 분석

본 논문에서는 CFRP와 GFRP의 모든 시험편에 대하여 음향방출신호를 검출하여 분석하였지만, 대표적으로 45분간 열손상된 CFRP 시험편과 모재의 GFRP 시험편에서 검출된 음향방출신호의 시간-주파수를 분석하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10의 (a)는 Fig. 8의 ①부분에서 검출된 신호를 분석한 것으로서 그 주파수 범위가 300kHz로 나타났다. 인장 초기부분에는 시험편에 외력이 가해지면서 matrix에 균열이 발생하게 되는데 이것에 의한 신호라고 판단된다. Fig. 10의 (b)는 Fig. 8의 ②부분에서 검출된 신호로 그 주파수 영역이 300kHz와 500kHz의 두 가지로 나타났다. 300kHz영역은 matrix 균열에 의한 것이고, 500kHz영역은 섬유와 matrix 계면의 손상에 의하여 나타나는 영역이라고 판단된다. CFRP열어진 Fig. 10(c)는 시험 말기부분 즉, Fig. 8의 ③부분에서 검출된 신호를 분석한 것으로서 그 영역이 300kHz, 500kHz 및 800kHz의 3 영역으로 나타났다. 800kHz영역은 섬유파괴에 의한 것이라고 판단된다.

그리고 GFRP의 Fig. 10(c)는 Fig. 8의 ③ 부분에서 주로 나타나는 신호로서 그 주파수 범위는 300kHz, 500kHz, 770kHz를 나타내었다. 이러한 주파수 범위는 CFRP와 동일하게 인장 시험 초기에는 매트릭스 균열에 의한 300kHz 범위의 비교적 저주파수대, 인장시험 중기의 섬유와 matrix 계면의 손상에 의한 500kHz, 말기에 유리섬유의 파괴에 의한 770kHz 범위의 고주파수대가 나타난 것으로 판단된다. 이와 같이 섬유파괴에 의한 주파수 범위가 다른 것은 Fig. 5와 같이 두 섬유의 파괴특성이 다른 것이 원인이라고 생각한다.

Fig. 11은 60분 열손상된 GFRP 시험편에서 검출된 신호를 시간-주파수 분석한 것을 나타내었다. 모재 시험편과 같은 주파수 범위가 나타났다. 그러나 인장시험 전 영역에서 매트릭스 균열, 섬유와 matrix 계면의 손상 및 유리섬유의 파괴가 동시에 발생하는 Fig. 11(a), (b)의 신호가 많이 나타났다. 이는 인장시험 초기의 매트릭스 균열, 중기의 섬유와 matrix 계면의 손상, 말기의 유리섬유 파괴 과정을 거치지 않고 시험편이 국부적인 열 손상을 받음으로서 매트릭스 및 유리섬유의 손상에 의한 것으로 판단된다. 이것은 CFRP에서도 같은 경향을 나타내었다.

이와같은 연구결과는 적층된 복합재료를 사용하여 만들어진 구조물의 파괴감시에 유용하게 응용될 수 있을 것이라고 생각

된다.

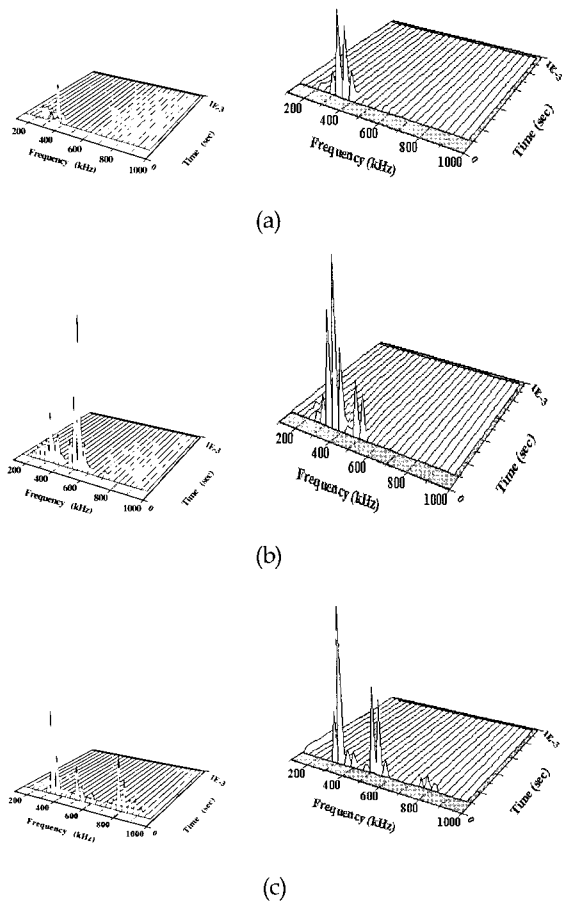


Fig. 10 Time-frequency analysis of acoustic emission from CFRP and GFRP specimen under tension test

- (a) Matrix cracking
(b) Matrix cracking and failure of the fiber/matrix interface
(c) Matrix cracking, failure of the fiber/matrix interface and fiber breakage

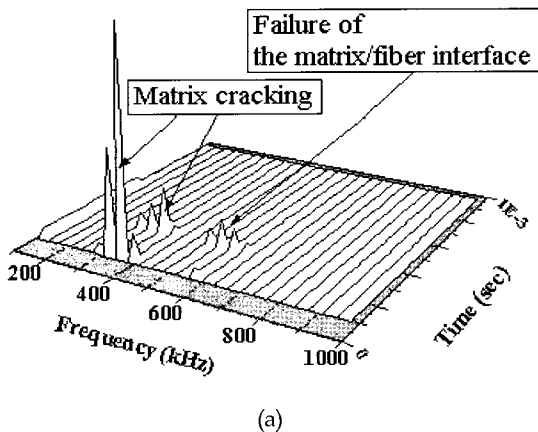


Fig. 11 Continuous time-frequency analysis of GFRP according to time by acoustic emission test

- (a) Matrix cracking and failure of the fiber/matrix interface
(b) Matrix cracking, failure of the fiber/matrix interface and fiber breakage

5. 결 론

본 연구에서는 CFRP 및 GFRP에 국부 열손상을 가한 후, 열 손상 시간에 따른 강도 특성을 조사하고, 실험 중에 검출된 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) 시간-주파수 분석에 의하여 matrix 균열, 섬유와 matrix 계면의 손상 및 섬유파괴에 의하여 발생하는 주파수 영역의 구별이 가능하였다.
- 3) 따라서 이와같은 연구결과는 복합재료를 사용하여 만들어진 구조물의 파괴감시에 유용하게 응용될 수 있을 것이라고 생각된다.

참 고 문 헌

- 김상현, 반석호 (2001). "국내 해양레저와 레저선박 산업의 현황 및 전망," 대한조선학회지, 제39권, 제1호, pp 36-45.
김상태, 김덕운 (2001). "음향방출법을 이용한 Glass Fiber/PET 복합재료의 손상평가," 한국복합재료학회지, 제14권, 제1호, pp 1-7.
남기우, 안석환, 이상기, 김현수, 문창권 (2001). "시간-주파수 해석법에 의한 CFRP의 파괴거동," 비파괴검사학회지, 제21권, 제1호, pp 39-45.
남기우, 문창권 (2002). "CFRP적층 형태에 따른 파괴시 음향방출 신호특성," 한국해양공학회지, 제16권, 제2호, pp 67-71.
장석운, 지효선, 손병직 (2001). "노후화된 교량 바닥판 대체용 복합재료 교량 바닥판의 거동에 관한 실험적 연구," 한국강구조학회 논문집, 제13권, 제6호, pp 631-641.

- 전홍재, I.M. Daniel (2000). “초음파와 음향방출법을 이용한 복합재료 직교적층판의 점진적 손상과정에 관한 연구,” 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제5호, pp 1084-1092.
- Fisher, W.G., Storey, J. M.E., Sharp, S.L., Janke, C.J. and Wachter, E.A. (1995). “Nondestructive Inspection of Graphite-Epoxy Composites for Heat Damage Using Laser-Induced Fluorescence,” *Applied Spectroscopy*, Vol 49, pp 1225-1231.
- Jang, B.Z. (1994). “Advanced Polymer Composites: Principle and Applications,” *The Materilas Information Society*, pp 7-12.
- Henneke, E.G. (1990). *Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Advanced Composite, Nondestructive Testing of Fiber Reinforced Plastic Composites*, ed. J. Summerscales, Vol 2, Elsevier Applied Science, London. .
- Laksimi. A., Gong. X.L. and Benzeggagh. M.L. (1994). “Analysis of Damage Mechanism in a Centrally Notched Glass-Fiber/Epoxy Plate,” *Composite Science and Technology*, Vol 52, pp 85-91.
- Sun, F., Iwamoto, M., Jinen, E. and Sizuki, M. (1989). “Fracture Mechanics of Fabric Glass Laminates Plate,” *Zairyo*, Vol 38, pp 360-366.
- Uenoya, T. (1988). *Progress in Acoustic Emission IV*, eds. K. Yamaguchi et al., Japan Soc. NDI, Tokyo.
-
- 2002년 5월 31일 원고 접수
2002년 7월 29일 최종 수정본 채택