

## 시간-주파수 해석법에 의한 CFRP의 파괴 거동

### Fracture Behavior of CFRP by Time-Frequency Analysis Method

남기우\*, 안석환\*\*, 이상기\*\*\*, 김현수\*\*\*, 문창권\*

Ki-Woo Nam\*, Seok-Hwan Ahn\*\*, Sang-Kee Lee\*\*\*, Hyun-Soo Kim\*\*\*  
 and Chang-Kwon Moon\*

**초 록** 신호처리법으로 현재 많이 사용되고 있는 푸리에 변환은 신호의 주파수 성분이 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 표현하지 못한다. 따라서 최근 이와 같은 푸리에 변환의 단점을 보완하여, 신호의 시간과 주파수에 대한 정보를 동시에 표현할 수 있는 시간-주파수 해석법들이 개발되었다. 본 연구에서는 음향방출을 이용하여 복합재료의 주요 발생원으로 알려져 있는 기지균열, 섬유분리, 섬유파괴 및 층간분리 등과 같은 파괴기구를 해석하였다. 각각의 파괴특성이 나타나도록 시험편을 제작하여 인장시험 시 검출된 음향방출신호의 시간-주파수 해석을 통해 전체 파괴기구의 특징을 분석하였다.

**주요용어:** 탄소섬유강화 복합재료, 파괴모드, 음향방출, 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, however, 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 analysis 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, damage process of a cross-ply carbon fiber reinforced plastic (CFRP) under monotonic tensile loading was characterized by acoustic emission. Different kinds of CFRP specimens were used to determine the characteristics of AE signals. Time-frequency analysis methods were employed for the analysis of fracture mechanisms in CFRP such as matrix cracking, debonding, fiber fracture and delamination.

**Keywords:** carbon fiber reinforced plastic, fracture mode, acoustic emission, time-frequency analysis methods

#### 1. 서 론

복합재료란 일반적으로 가공성이 좋은 경량 matrix 재료에 섬유상 또는 입상의 강화 소재를 보강하여 구조용 재료로서 요구되는 우수한 기계적 특성을 보유한 재료를 말하며, 이러한 복합 재료는 이종소재의 조합에 의한 복합 구조로 되어 있어 제작이나 사용 중에 원하지 않는 결합의 발생 가능성이 높다. 이러한 내부균열, 손상형태

나 위치를 파악하기 위한 방법으로 1970년 이후 X-선법, 초음파 C-Scan법, acousto-ultrasonic법 등이 적용되어 왔다[1-6]. 그러나 이들 방법으로는 재료내부의 결함이 어떠한 성장과정을 거쳐 궁극적 파괴에 이르게 되는 것에 관한 해석과 재료의 변형이나 초기에 발생하는 미시 결합의 검출, 동적 파괴기구등을 식별하기에는 곤란하다.

탄성파로 정의되는 음향방출은 복합재료의 주 파괴원인인, matrix crack, 섬유파괴, pull-out, delamination,

debonding 또는 이들의 복합적 damage zone의 발생원 등에 민감하기 때문에, 파괴기구를 해석하는데 유용한 도구로서 많은 연구가 이루어져 왔다[7-9]. 음향방출 신호의 파라미터들을 이용하여 복합재료의 파괴거동을 해석하는 방법들이 많이 있지만, 이들 방법들에 의해서는 복합재료가 가지고 있는 비등방, 비균질의 특성 때문에 파괴거동의 해석에 있어서 정확한 결과를 얻어내기가 어려운 실정이다.

신호처리 방법에 있어서 고전적인 푸리에 변환방식이 가장 일반적으로 널리 사용되고 있다. 그러나, 일반적인 신호의 주파수 성분들은 시간에 대하여 변화하는 시간함수이기 때문에, 고전적인 푸리에 변환에서는 시간영역과 주파수 영역의 신호를 동시에 해석할 수 없다. 따라서 최근 고전적인 푸리에 변환이 가지는 단점을 보완하여, 신호가 가지는 시간 영역과 주파수 영역의 정보를 시간과 주파수의 2차원 평면상에 동시에 표현할 수 있는 시간-주파수 해석법이 이용되고 있다. 이와 같은 시간-주파수 표현은 푸리에 변환과 같은 선형표현과 에너지 분포로 정의되는 2차 표현인 파워 스펙트럼으로 분류할 수 있다. 선형표현은 단시간 푸리에 변환(STFT), Gabor expansion, wavelet 등이 있으며, 에너지 개념으로 사용되는 2차 표현은 위그너빌 분포(WVD)와 Choi-Williams distribution(CWD) 등이 있다[10,11].

따라서 본 연구에서는 음향방출을 이용하여 복합재료의 주 파괴원인인 matrix crack, 섬유파괴, delamination, debonding 등과 같은 파괴기구를 해석하였다. 각각의 파괴특성이 나타나도록 시험편을 제작하여 인장시험시 검출된 음향방출(AE)신호의 시간-주파수 해석을 통해 전체 파괴기구의 특징을 규정지을 수 있도록 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 단시간 푸리에 변환법(STFT)

단시간 푸리에 변환법(STFT: short time Fourier transform)은 푸리에 변환이 시간변화에 대하여 주파수 표현을 하지 못하는 단점을 보완하여, 짧은 시간 단위로 신호를 분리하고 푸리에 변환을 하는 방법이다. 즉, 시간과 주파수 영역에서 동시에 존재하는 창 함수(window function)를 이용하여 각 시간에서의 주파수를 구하는 방법으로 식 (1)과 (2)같이 표현된다[11].

$$STFT(t, w) = \int s(\tau)\gamma_{t,w}^*(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$= \int s(\tau)\gamma^*(\tau-t)e^{-jw\tau} d\tau$$

$$FS(t, w) = |STFT(t, w)|^2 \quad (2)$$

식 (1)은 일반적인 내적(inner product)을 이용한 표현으로서, signal  $s(t)$ 와 기본함수(elementary function)  $\gamma(\tau-t)e^{jw\tau}$  사이의 유사성을 나타낸다. 식 (1)에서 \*는 공액 복소 성분을 의미한다. 식 (2)는 STFT spectrogram으로 시간-주파수 평면상에 주파수 성분의 에너지 분포를 나타내는 것으로, STFT의 자승으로 표현된다. 창 함수의 크기에 따라 시간 또는 주파수 분해능이 달라지게 되는데, 시간 영역의 분해능을 높이기 위해서는 주파수 분해능이 떨어지게 되고, 주파수 분해능을 높이기 위해서는 시간영역의 분해능이 떨어지는 창 효과(window effect)가 발생하는 단점을 가진다.

### 2.2. 복합재료의 파괴기구

복합재료 적층판에서의 crossply 적층판의 파괴특성은 초기영역이 matrix 손상으로 구성된다. 이러한 균열 등은 거의 등거리로서, 특정 한계치까지 균열밀도가 증가하게 된다. 하중이 계속 증가하게 되면 다른 파손기구의 성장과 함께 기지와 섬유의 debonding과 횡단면에서의 미시적 층간 박리에 의해서 파괴가 발생하고, 최종적으로는 전 범위에 걸쳐 파손을 일으키는 섬유파괴의 형태로 관찰된다. 본 연구에 사용한 DCB 시험편은 각층간에서

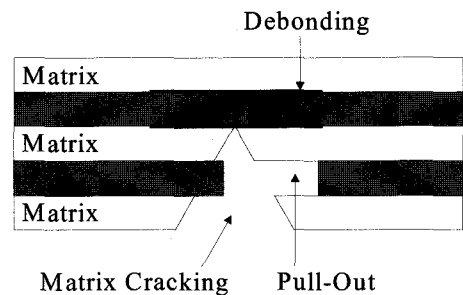
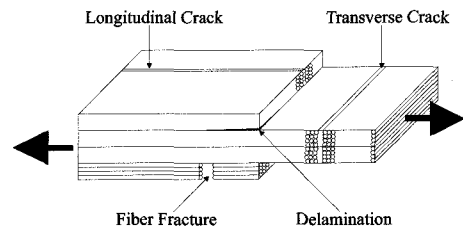


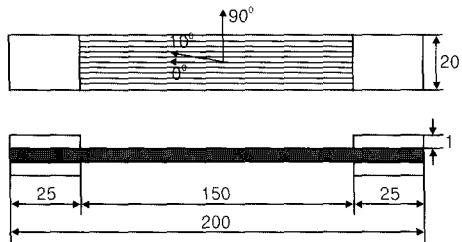
Fig. 1 Schematic representation of the main macroscopic damage in CFRP

delamination을 가장 많이 일으키는 시험편이다. 층 간 파괴인성은 임계에너지 해방율에 의해서 특성화시킬 수 있으며, 기지 재료의 파괴인성과 관련이 있다. 거의 최종 단계에서 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. Fig. 1은 복합재료의 대표적인 파괴기구를 도식적으로 나타낸 것이다.

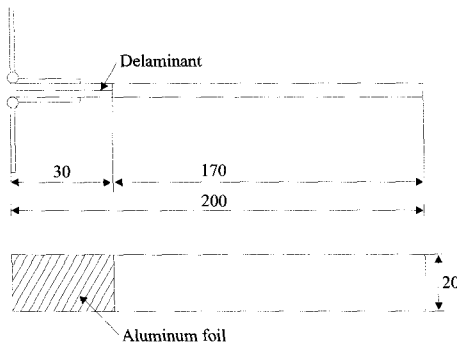
3. 실험방법

3.1. 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 unidirectional carbon /epoxy prepreg(한국화이바; CU250NS)를  $[90^{\circ}]_{32s}$ ,  $[10^{\circ}]_{16s}$ ,  $[0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}]_{16s}$ 로 적층하여 hot press에서 성형하였다. 성형조건은 130℃, 1.0kgf/cm<sup>2</sup>로 10분간 유지시킨 다음, 압력을 5.0kgf/cm<sup>2</sup>으로 증가시켜 60분간 유지시킨후 상온에서 50℃정도까지 층분히 공냉시켜 적층판을 제작하였다. 성형된 CFRP 적층판을 가공하여 Fig. 2과 같은 형상으로 시험편을 제작하였다.



(a) specimen for tensile test



(b) Double Cantilever Beam(DCB) specimen

Fig. 2 Dimension of specimens (unit ; mm)

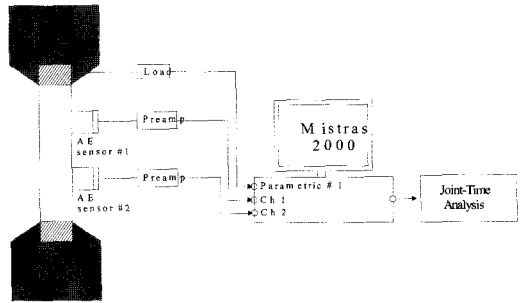


Fig. 3 Schematic diagram of AE for monitoring of fracture mechanism in CFRP

3.2. 실험장치 및 방법

인장시험을 통해서 나오는 AE신호의 계측을 위하여 Mistras 2000을 사용하였고, 그 측정 시스템을 Fig. 3에 나타낸다. AE 파라미터를 검출하기 위하여 PAC사의 R-50센서를, 주파수분석을 위해서는 1MHz 광대역센서를 이용하였다. 그리고 시험편에서 발생하는 신호를 민감하게 측정하기 위해서 시험편과 센서사이에 접촉매질을 얇게 바른 후 테이프로 압착하였고, 전기적 노이즈를 제거하기 위해 아날로그 필터링 처리를 하였다. 시험편의 지그 부착부분에는 시험편의 손상을 최소화하기 위해 두께 1mm의 알루미늄 박판을 부착하였다. 센서는 시험편 중앙으로부터 25mm 떨어진 지점에 설치하여 신호를 받아들여, 검출된 AE신호는 전치증폭기에서 40dB로 증폭하였다. 시험은 최대용량 10ton의 만능시험기(Model EHF-ED10; Shimadzu)를 사용하였으며, cross head speed는 3mm/min로 하여 실온, 대기 중에서 단조인장시험을 행하였다.

4. 실험결과 및 토의

4.1. 시간에 따른 하중-count 관계

CFRP 시험편으로 인장시험을 실시한 후, 시간에 따른 각 시험편의 counts 및 하중과의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. (a)는 섬유방향에 대하여 수직으로 하중을 부하한 경우 ( $[90^{\circ}]_{32s}$ )로서 다른 파괴모드와 비교했을 때 하중과 count가 상대적으로 낮았고, 하중이 증가하여 일정하중에 도달했을 때 count가 많이 발생하면서 파괴되었다. 이것은 섬유방향에 수직하게 하중이 작용하여 matrix에서 주된 파괴가 발생하였기 때문이다 생각되어진다. (b)는 off-axis 각도가 10°인 시험편( $[10^{\circ}]_{16s}$ )의 경우로서,  $[90^{\circ}]_{32s}$  시험편

의 경우와 비교하였을 때, 하중과 count가 높게 나타나고 있다. 이것은 섬유가  $10^\circ$  경사져서 배열되어 있기 때문에  $90^\circ$ 로 배열되어 있는 시편에 비해 전단강도가 크게 작용하고 있기 때문인 것으로 생각된다. 하중이 가해지는 초기부터 count가 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. (c)는  $[0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]_{1s}$  시편편으로 다른 시편과 비교해서 하중이 높게 나타났고 count도 상대적으로 많이 나타났으며, 최대하중에서 count의 발생이 급격히 증가하는 양상을 나타내었다. 이는 matrix 균열, debonding 및 섬유파괴가 복합적으로 나타났기 때문에 인장하중이 높게 나타나기 때문이라고 생각된다. 최대하중 부근에서는 matrix crack이나 debonding 보다는 오히려 섬유파괴가 주로 발생하였기 때문에 count가 많이 발생한 것으로 생각된다. (d)는 Double Cantilever Beam(DCB) 시편으로 하중이 매우 낮게 나타났으며, count는 균열이 진전함에 따라 비교적 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2. 시간-주파수 분석

본 연구에서 CFRP 시편편에 나타난 각각의 파괴모드에 대한 시간-주파수 분석결과를 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 5에서는 3개의 창이 보이는데, 종축에 있어서 좌측상단의 창은 주파수(Hz)를, 좌측하단의 창은 전압(V)을 그리고 우측상단의 창은 파워스펙트럼을 각각 나타내고, 횡축은 시간(sec)을 나타낸다. 먼저, 하중을 가하지 않았을 때의 음향방출 신호를 검출한 후 시간-주파수 분석을 실시한 결과 200kHz이하의 주파수 영역을 얻었고, 이 200kHz이하의 신호는 noise로 분류하였다.

(a)는 섬유가 하중방향에 수직하게 배열된  $[90^\circ]_{32s}$  시편편에 인장하중을 가하였을 때 검출된 신호로, Fig. 4의 (a)에서 count가 급격히 발생했을 때의 AE 신호를 시간-주파수 해석법에 의해 분석한 것이다. 이 시편의 경우, matrix crack이 주된 파괴모드로, 실험결과 약 250kHz

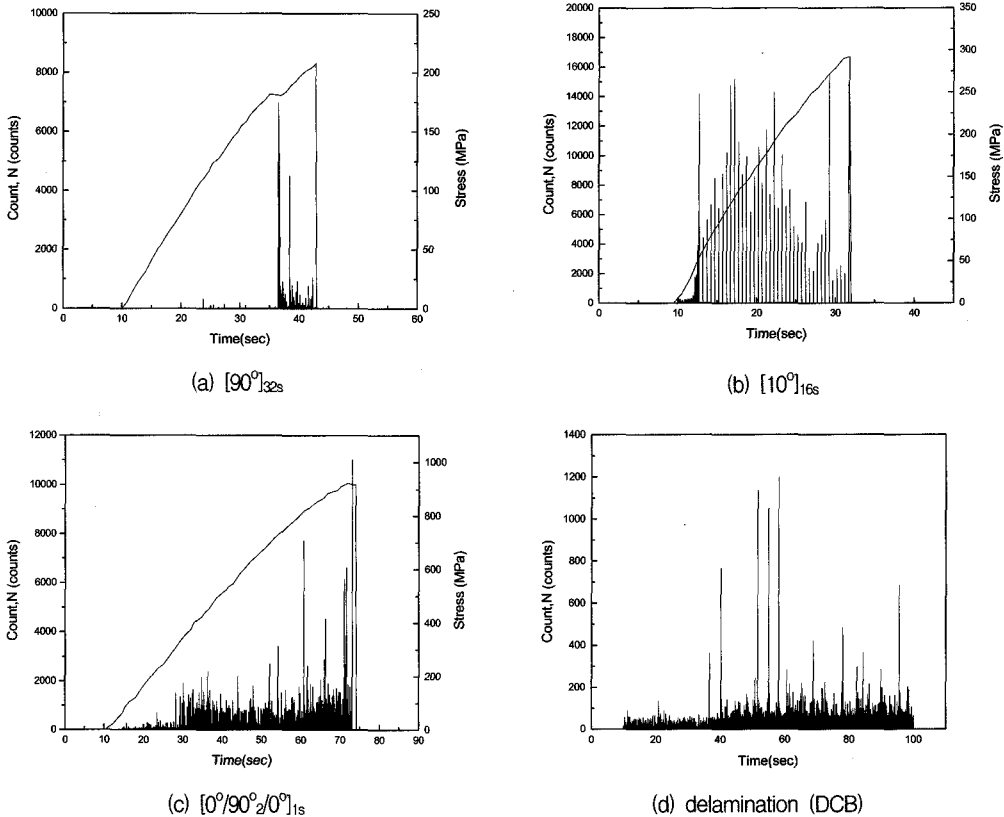
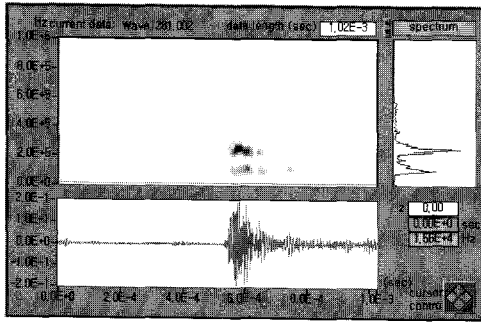
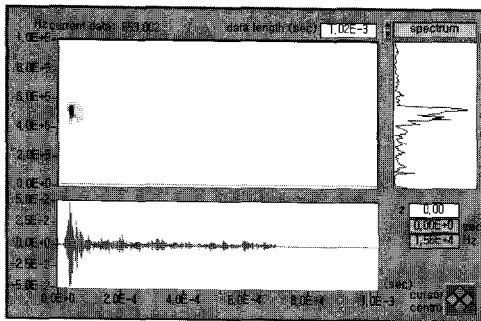


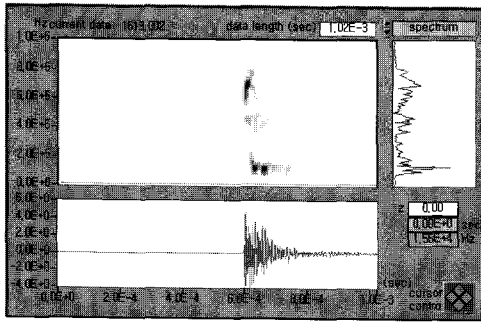
Fig. 4 AE counts and stress versus time for constant strain rate loading



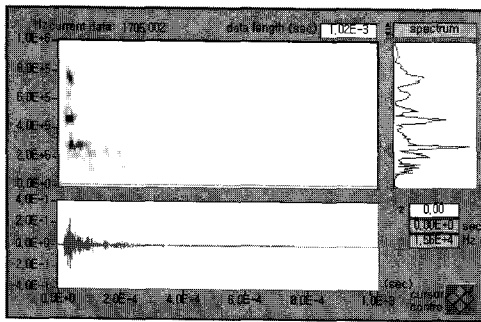
(a) Matrix Crack



(b) Debonding



(c) Fiber Fracture



(d) Delamination

Fig. 5 AE signal analysis results of fracture mechanism

대의 비교적 낮은 주파수 영역을 나타내었다. (b)는  $[10^\circ]_{6s}$  시험편의 인장시험 결과이다. 이 시험편의 경우에는, 섬유파괴는 거의 발생하지 않고 matrix crack과 debonding에 의해 AE신호가 발생하고 있음을 알 수 있다. 시간-주파수 분석결과, 250kHz대의 낮은 주파수 영역과 500kHz대의 주파수 영역으로 나타났다. 250kHz대의 주파수 영역은 matrix crack에 의해서, 또한 500kHz대의 주파수 영역은 debonding에 의해 발생된 것으로 생각된다. 그림에는 debonding만에 의한 신호를 보이기 위하여 500kHz대의 주파수 영역을 표시하고 있고, 250kHz대의 주파수 영역은 matrix crack에 의한 것이므로 나타나지 않았다. (c)는  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]_6s$  시험편의 인장시험의 결과로 나타난 파괴모드인 섬유파괴의 주파수 영역을 구별한 것이다. 이 시험편의 경우에는 matrix crack, debonding, 섬유파괴 등의 복합적인 파괴모드가 나타났다. 특히, matrix crack, debonding의 주파수 영역을 분리 시키므로써 섬유파괴의 주파수 영역을 구별할 수 있었다. Fig. 4 (c)에서 나타나는 바와 같이, 하중이 가해지는 초기에는 상대적으로 강도가 약한 matrix crack이 주 파괴 원인으로 생각되어진다. 최대하중에 이르렀을 때 섬유파괴로 인한 count가 급격히 발생하고 있음을 알 수 있다. 이와같이 count가 급격히 발생하였을 때에 검출된 AE 신호의 시간-주파수 해석을 실시한 결과, 700kHz대의 주파수 영역은 섬유파괴로 인한 것으로 생각되어진다. (d)는 DCB 시험편의 인장시험 결과로, 이 시험편의 경우에는 복합재료의 파괴에 큰 영향을 미치는 delamination의 파괴모드가 주로 나타났다. 시간-주파수분석 결과, 250, 500, 700kHz대의 주파수 영역이 동시에 나타났다. 이것은 앞에서 서술한 바와 같이, matrix crack, debonding, 섬유파괴시 발생하는 주파수영역과 동일영역을 나타내고 있고, 따라서 이러한 파괴모드가 동시에 발생하였다고 생각된다.

그러나, 본 연구에서 얻어진 특정 주파수영역대는 재료의 적층을 단순화시켜 얻어진 결과이므로 적층순서, 적층 방법 등을 달리하여 실험할 필요가 있다고 사료된다.

### 4.3. 파면 관찰

CFRP 적층판에 인장하중을 부하한 후, 각 시험편의 손상영역내에 나타난 파괴 형태를 SEM으로 분석한 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

먼저, Fig. 6 (a)는  $[90^\circ]_{2s}$  시험편의 파단면을 나타낸다. matrix에서 주로 파단이 일어나고 있음을 알 수 있다.

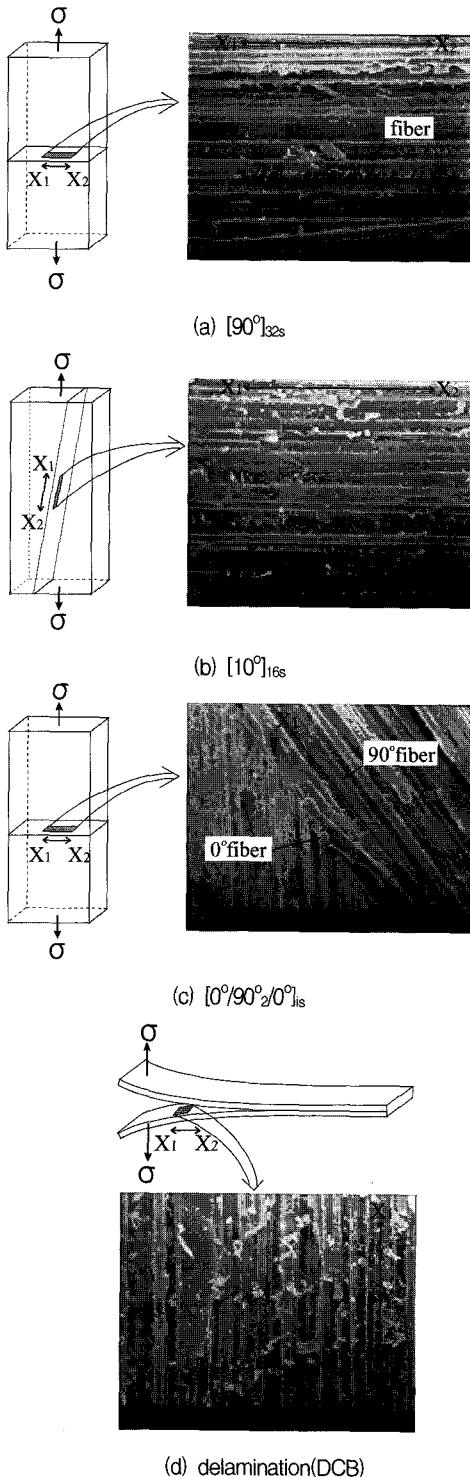


Fig. 6 SEM fractographs showing the fracture surfaces ( $\times 500$ )

(b)는  $[10^\circ]_{16s}$  시험편의 경우로서, 부하하중에 의한 전단력의 영향으로 섬유배양각을 따라서 debonding이 발생하고 있다. (c)는  $[0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]_{1s}$ 의 경우로서, matrix crack과 debonding 뿐만아니라 섬유파괴도 발생하고 있음을 알 수 있다. (d)는 DCB 시험편에 발생한 delamination 파단면을 나타낸다. 결과적으로 (c) 및 (d)의 경우에는 matrix crack, debonding 뿐만 아니라 섬유파괴가 복합적으로 일어나고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

CFRP의 단조인장시험을 통해 검출된 음향방출신호의 시간-주파수 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서, matrix crack은 250kHz대의 낮은 주파수 영역을, debonding은 500kHz대의 주파수 영역을, 섬유파괴는 700kHz대의 높은 주파수 영역을 각각 나타내었다.
2. delamination 파괴의 경우에는 matrix crack, debonding, 섬유파괴 등의 파괴모드도 동시에 발생하였다.
3. 시간-주파수 분석을 통해 복합재료의 주 파괴원인으로, matrix crack, 섬유파괴, debonding, delamination 등과 같은 파괴기구를 구별할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] Fassbender R.H. and D.J. Hagemacier, "Low Kilovoltage Radiography of Composites," *Materials Evaluation*, Vol. 41, No. 7, pp. 831-838, (1983)
- [2] James, T.S., D. Polansky and H. Berger, "Radiation Inspection Methods for Composites," *NDT International*, Vol. 21, No. 4, pp. 277-282, (1988)
- [3] Jones, T.S, "Inspection of Composites Using the Automated Ultrasonic Scanning System," *Materials Evaluation*, Vol. 43, No. 6, pp. 746-753, (1985)
- [4] Bar-Cohen. Y. and R. L. Crane, "Acoustic-Backscattering Imaging of Sub-Critical Flaws in Composites," *Materials Evaluation*, Vol. 40, No. 9, pp. 970-975, (1982)
- [5] Vary, A. and R. F. Lark, "Correlation of Fiber Composite Tensile Strength with the Ultrasonic Stress Wave Factor," *Journal of Testing and*

- Evaluation*, Vol. 7, No. 4, pp. 185-191, (1979)
- [6] Talrefa, R., "Application of Acousto-Ultrasonics to Quality Control and Damage Assessment of Composites," *Acousto-Ultrasonics: Theory and Application*, J. C. Duke, Ed, Plenum Press, New York, pp. 191-200, (1988)
- [7] Caprino. G. and Teti. R, "Residual Strength Evaluation of Impacted GRP Laminates with Acoustic Emission Monitoring," *Composites Science and Technology*, Vol. 53, pp. 13-57, (1995)
- [8] 이상국, 오세규, 남기우, 김옥균, "음향방출법에 의한 탄소섬유 복합재료의 인장 및 파괴인성 시험시의 파괴거동에 관한 연구", *비파괴검사학회지*, Vol. 15, No. 1, pp. 277-290, (1995)
- [9] Yoshihiro Mizutani, Kenji Nagashima and Mikio Takemoto, "Progression of internal damages in locally loaded cross-ply CFRP plate by modal analysis of the lamb waves," *ACCM-1*, pp. 645-1~645-4, (1998)
- [10] 이건찬, 오정환, 남기우, 이주석, "열화된 SUS 316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 19, No. 4, pp. 270-276, (1999)
- [11] M. A. Malik, X. M. Jin and J. San Ie, "Joint time-frequency processing of ultrasonic signals," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 15B, pp. 2089-2096, (1996)