

< 논문 >

## 파형 및 주파수해석에 근거한 굽힘 압전 복합재료 작동기 손상모드의 비파괴적 평가

우 성 충<sup>†</sup> · 구 남 서<sup>\*</sup>

(2007년 2월 2일 접수, 2007년 7월 9일 심사완료)

### Nondestructive Evaluation of Damage Modes in a Bending Piezoelectric Composite Actuator Based on Waveform and Frequency Analyses

Sung-Choong Woo and Nam Seo Goo

**Key Words:** Piezoelectric Composite Actuator(압전 복합재료 작동기), Acoustic Emission(음향방출), Waveform(파형), Peak Frequency(피크주파수), Damage Mode(손상모드)

#### Abstract

In this study, various damage modes in bending unimorph piezoelectric composite actuators with a thin sandwiched PZT plate during bending fracture tests have been evaluated by monitoring acoustic emission (AE) signals in terms of waveform and peak frequency as well as AE parameters. Three kinds of actuator specimens consisting of woven fabric fiber skin layers and a PZT ceramic core layer are loaded with a roller and an AE activity from the specimen is monitored during the entire loading using an AE transducer mounted on the specimen. AE characteristics from a monolithic PZT ceramic with a thickness of 250  $\mu\text{m}$  are examined first in order to distinguish different AE signals from various possible damage modes in piezoelectric composite actuators. Post-failure observations and stress analyses in the respective layers of the specimens are conducted to identify particular features in the acoustic emission signal that correspond to specific types of damage modes. As a result, the signal classification based on waveform and peak frequency analyses successfully describes the failure process of the bending piezoelectric composite actuator exhibiting diverse failure mechanisms. Furthermore, it is elucidated that when the PZT ceramic embedded actuators are loaded mechanical bending loads, the failure process of actuator specimens with different lay-up configurations is almost same irrespective of their lay-up configurations.

#### 1. 서 론

섬유강화 복합재료는 비강도 (specific strength) 및 비강성 (specific stiffness)이 우수하여 경량화 설계를 위한 소재로 그 사용이 확대되고 있고

PZT (lead zirconate titanate)세라믹은 압전특성, 강유전성, 초전도성이 뛰어나지만 뿐만 아니라 빠른 응답특성을 지니고 있어 의료산업, 정밀기기 그리고 항공우주산업 분야에서 널리 사용되어 왔다. 1980년대 이후, 금속 박판이나 섬유강화 적층판 내에 PZT세라믹을 삽입하여 경량이면서 동시에 우수한 작동성능을 갖는 압전 작동기에 관한 연구가 다방면에서 수행되어 왔다.<sup>(1-3)</sup> 특히 위치, 진동, 형상제어가 요구되는 시스템이나 가용 사이즈와 무게가 제한적인 구조물에 적용되고 있다. 지금까지 PZT세라믹을 기반으로 한 압전 작

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 건국대학교 인공근육연구센터

E-mail : lilsuzy@hanyang.ac.kr

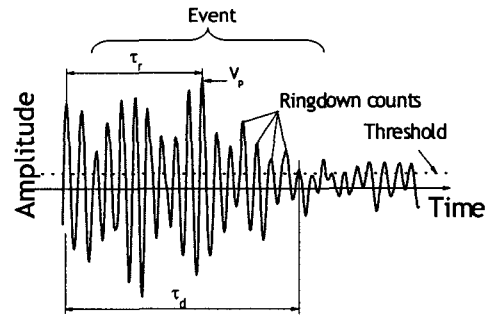
TEL : (02)3436-7091 FAX : (02)452-7091

<sup>\*</sup> 회원, 건국대학교 신기술융합학과 지능형마이크로 시스템전공

동기에 관한 많은 연구들이 수행되었지만 이들 연구의 대부분이 압전 작동기의 작동변위 및 작동력 향상에 집중되었다. 하지만 PZT세라믹은 매우 취성적인 재료이며 섬유강화 복합재료는 굽힘, 충격, 피로와 같은 면의 하중에 취약한 특성을 나타낸다.<sup>(9,10)</sup> PZT세라믹의 대표적인 파손기구에는 기계적 또는 전기적 하중에 의한 응력집중 현상으로 형성되는 미소균열<sup>(11)</sup>에 의한 취성파괴로 알려져 있고 섬유강화 복합재료의 파손기구에는 모재균열 및 변형, 섬유-모재 분리, 층간분리, 섬유파단으로 크게 나뉜다.<sup>(12-16)</sup> 지금까지 섬유강화 복합재료와 PZT세라믹 각각에 대한 파손기구는 규명되었다. 하지만 전기적 하중 또는 기계적 하중을 받는 압전 작동기의 신뢰성과 건전성에 관한 연구는 압전 작동기가 실제로 사용될 수 있는지를 결정하는 기본적인 중요한 문제 중의 하나임에도 불구하고 압전 복합재료 작동기와 같이 이중 재료(PZT세라믹+섬유강화 복합재료)로 구성되어 있는 작동 시스템에 대한 연구는 국·내외적으로 거의 전무한 실정이다. 특히, 기계적 하중은 전기적 하중보다 작동기의 건전성에 더욱 치명적인 영향을 주며 PZT세라믹의 파손은 압전 작동기의 성능과 직결되므로 이들 작동기의 폭넓은 응용과 신뢰성 확보를 위해서는 압전 작동기의 파손기구에 대한 깊은 연구가 필요하다.

한편, 구조물에 대한 신뢰성과 안전성에 대한 평가는 복잡하며 어려운 작업이다. 이러한 이유로 구조물을 감시하고 진단하는 기술은 그 중요성이 증가하고 있다. 이러한 기술들 중에 음향방출(acoustic emission) 신호 해석을 통한 비파괴 평가 방법은 1960년대 이후 많은 연구자들에 의해 다양한 재료에 적용되어 효과적인 방법으로 입증되었다.

본 연구의 저자들은 선행연구<sup>(17-19)</sup>에서 평직형 탄소섬유-에폭시와 유리섬유-에폭시를 이용하여 비대칭 적층구성을 갖는 평판형 압전 복합재료 작동기에 대해 성형시의 냉각과정에서 발생하는 잔류 열 변형 효과를 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하고 PZT 두께, 적층순서, 경계조건이 횡방향 작동변위에 미치는 영향을 규명하였다. 또한 이를 제작하고 정적 및 동적 작동시험을 통하여 연구범위 내에서 최대의 작동성능을 갖는 적층구성을 찾았다. 본 연구는 일련의 연구 중 한 부분으로써 기계적 굽힘 하중을 받는 평판형 압



- Peak amplitude ( $V_p$ )
- Rise time ( $\tau_r$ )
- Duration time( $\tau_d$ )
- Ringdown Counts :18
- Event count :1
- Signal energy ( $E = \int V_p^2 dt$ )

Fig. 1 Typical acoustic emission (AE) signal and the definition of AE parameters

전 작동기의 손상모드를 비파괴적으로 평가하고자 한다. 이를 위해, 실시간 감시가 가능하고 복합재료의 비파괴 평가수단으로 인정받고 있는 AE법을 적용하여 작동기의 파손기구를 해명하고 압전 작동기의 실시간 진단 기구로서의 타당성을 평가한다.

## 2. 음향방출

음향방출(acoustic emission, AE)<sup>(20,21)</sup>은 구조물에 외력이 가해질 때, 구조물 내부에 저장되어 있던 에너지가 국부적인 발생원으로부터 일시적으로 방출되는 탄성파이다. 이 탄성파는 구조물의 표면을 따라 전파되며 전기적인 신호로 변환해주는 AE센서를 이용하여 탐지된다. 이러한 방식으로 손상원의 존재와 위치에 대한 정보를 얻을 수 있다. 따라서 AE법은 다른 비파괴평가 방법에 비해 손상이 발생함과 동시에 이를 실시간으로 감지할 수 있는 장점을 지니고 있다.

AE해석에는 크게 두 가지 방법이 있다. AE인자해석은 센서로부터 감지된 AE신호로부터 Fig. 1에 나타난 다양한 AE인자들을 추출하여 이의 특성을 분석하는 방법이다. 이 방법의 장점은 해석이 간단하며 구조물내의 손상의 개시와 진전에 대한 유용한 정보를 제공한다는 것이다. 하지만 구조물내부에서 탄성파의 전파과정은 복잡하고 다중 손상으로 인해 AE인자가 중첩되는 현상이 발생하기 때문에 손상기구를 구별해 내기란 쉽지

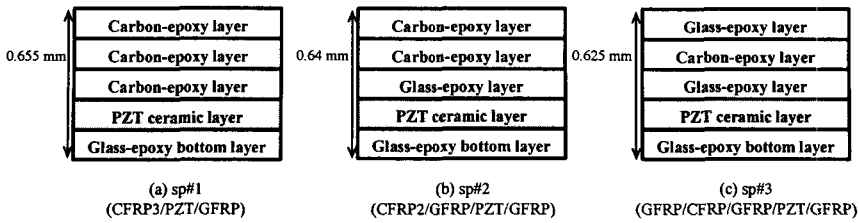


Fig. 2 Lay-up configuration of the actuating specimens used in the study

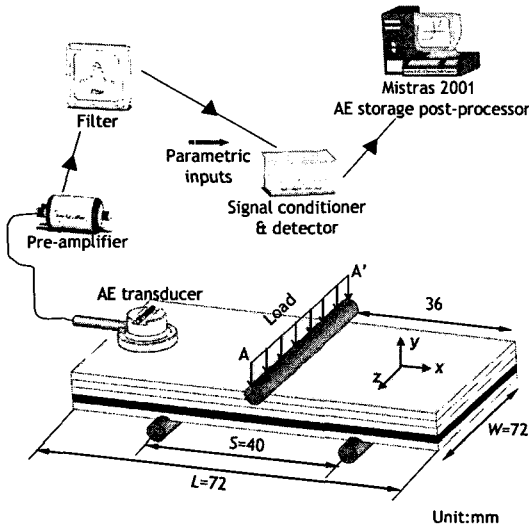


Fig. 3 Experimental set-up for a three-point bending test and AE data acquisition

않다. 이의 대안으로 사용하는 방법이 과도해석이다. 이 방법은 신호의 파형을 웨이블릿 변환(WT)이나 단 시간 푸리에 변환(STFT)을 이용하여 시간-주파수 영역에서 파손모드를 해석하는 방법이다. 이 방법은 처리과정을 거쳐야하고 시간이 걸리는 단점이 있지만 컴퓨터의 발달로 대부분이 해결 되고 있고 인자해석보다 손상 발생원에 대한 더욱 정확한 정보를 제공한다.<sup>(22)</sup>

본 연구에서는 인자해석과 함께 AE신호의 파형과 STFT에 의한 주파수성분 해석을 통하여 손상 발생원에 따라 신호를 분류하여 해석하는 방법으로, 제작된 압전 복합재료 작동기의 손상 모드를 규명하는데 주안점을 두었다.

### 3. 실험

#### 3.1 재료 및 시험편 제작

작동용 시험편을 제작하기 위해 상용 PZT 웨이

Table 1. Basic setting of the AE measurement system

Model of AE sensor	Micro30, PAC
Channel	1
Pre-amplifier gain	40 dB
Threshold level	40 dB
High filter	< 1200 kHz
Low filter	> 10 kHz
Event lock out time	1 ms
Length of event	1 k (0.256 ms)

퍼 (72 X 72 X 0.25 mm), 평직형 탄소섬유-에폭시 프리프레그 (71 X 71 X 0.105 mm) 그리고 평직형 유리섬유-에폭시 프리프레그 (82 X 82 X 0.07 mm)를 사용하였다. PZT세라믹을 외부 환경으로부터 보호하기 위하여 바닥층은 유리섬유-에폭시 프리프레그를 공통적으로 배치하였다. Fig. 2와 같이 Hand lay-up 방법으로 적층한 후 경화 사이클에 따라 오토클레이브 내에서 진공백 방식으로 3시간 동안 성형되었다.

#### 3.2 실험방법 및 절차

굽힘 하중을 받는 작동시험편의 손상진전에 따른 AE신호를 실시간으로 감시·분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 굽힘 시험과 AE측정이 가능한 시스템을 구성하였다. 40 mm의 고정된 간격을 갖는 2개의 롤러 지지대 위에 시험편을 위치시킨 상태에서 굽힘 시험은 만능 시험기(Zwick250, testXpert)에 의해 변위제어 (0.5 mm/min) 방식으로 직경 3.2 mm의 상부롤러에 의해 하중이 부가되었으며 시험편의 최종파단이 발생할 때까지 수행되었다. AE신호의 측정을 위해서는 100~600 kHz의 유효 주파수 범위를 갖는 단 채널 AE센서(Micro30, PAC)를 시험편 상면 가장자리에 진공그리스를 사용하여 Fig. 3과 같이 부착하였다. 감지된 AE신호는 전치증폭기에 의해 증폭된 후 AE본체 (Mistras 2001, PAC)에 저장된다. 시험 종료

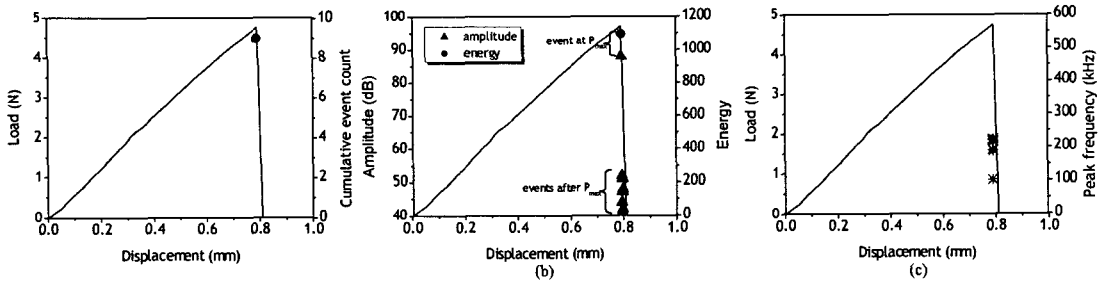


Fig. 4 AE responses for a monolithic PZT ceramic under a bending load: a typical load-displacement curve versus the distribution of (a) cumulative event count, (b) amplitude and energy and (c) peak frequency

후, 트랜지언트 기록 분석기(MI-TRA, PAC)를 이용하여 파형 및 주파수성분 분석을 하고 이를 토대로 특성이 비슷한 신호타입을 4가지로 분류하였다. Table 1은 AE측정을 위한 기본 설정 값을 나타낸다. 시험이 끝난 후 SEM (JSM-6380)과 광학현미경(Camscope)을 이용하여 각 시험편의 손상역을 관찰하였다.

#### 4. 파손기구에 따른 AE해석 결과 및 고찰

##### 4.1 PZT세라믹의 파손기구와 AE신호 특성

굽힘 하중을 받는 압전 복합재료 작동기의 굽힘 손상진전 따른 AE특성을 보다 정확히 파악하고자 단일 PZT세라믹만을 별도로 굽힘 시험하여 AE신호를 획득하고 그 특성을 분석하였다. Fig. 4는 굽힘 하중을 받는 단일 PZT세라믹의 하중-변위 선도와 이에 대응하는 AE 누적 사상수, 진폭, 에너지 그리고 피크주파수의 분포를 순서대로 나타낸 것이다. 하중증가에 따라 단일 PZT세라믹의 변위는 최대하중에 도달할 때까지 선형적으로 증가하면서 전형적인 취성재료의 거동을 보였다. 최대 하중 이전에는 PZT세라믹 내부에서 손상이 발생하지 않아서 AE신호가 검출되지 않았다. Fig. 4(b)와 (c)를 보면 최대 하중에서 검출된 AE 사상(event)은 88 dB의 고진폭, 1000이상의 높은 에너지, 200 kHz의 피크주파수 성분을 갖는 신호특성을 보였다. 즉 PZT세라믹이 급작스럽게 취성 파괴 될 때 내부에 축적된 에너지가 탄성파로써 일시적으로 방출된 것이다. 이와 같이 고 진폭의 고 에너지 특성을 갖는 AE신호는 일반적으로 재료 내부에서 거시적 손상이 발생하거나 최종파단

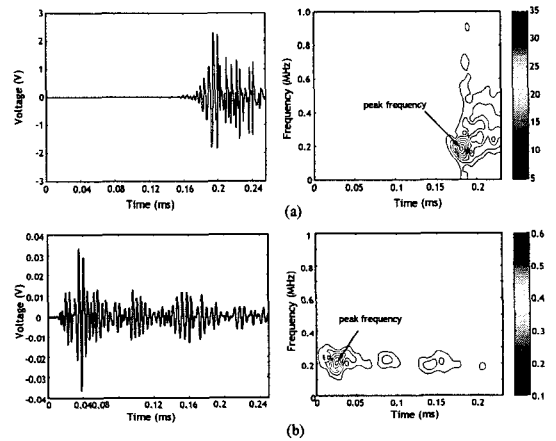


Fig. 5 Waveform and STFT contour map from a PZT ceramic: (a) signal at the maximum load and (b) signal after the maximum load presented in Fig. 4

될 때 방출되는 것으로 알려져 있다. 최대하중 이후에서 최종 파단시점 사이의 아주 짧은 순간에 발생한 AE신호들은 55 dB 미만의 저 진폭 신호들이었으며 10 미만의 상당히 낮은 에너지를 갖는 특성을 보여 최대하중에서 검출된 신호와는 확연히 달랐다. 그러나 피크주파수 성분은 101-223 kHz에 걸쳐 나타났으며 최대하중에서 발생한 신호의 피크주파수 성분과 크게 다르지 않았다. 이러한 신호들은 취성파괴 후, 세라믹의 결정입계에서 발생한 미소 손상<sup>(23)</sup>에 의한 것으로 여겨진다.

Fig. 5는 단일 PZT세라믹에서 검출된 AE신호의 파형과 MATLAB을 이용하여 STFT처리한 주파수 성분을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 최대 하중에서 검출된 신호로써 돌발형에 가까운 파형이

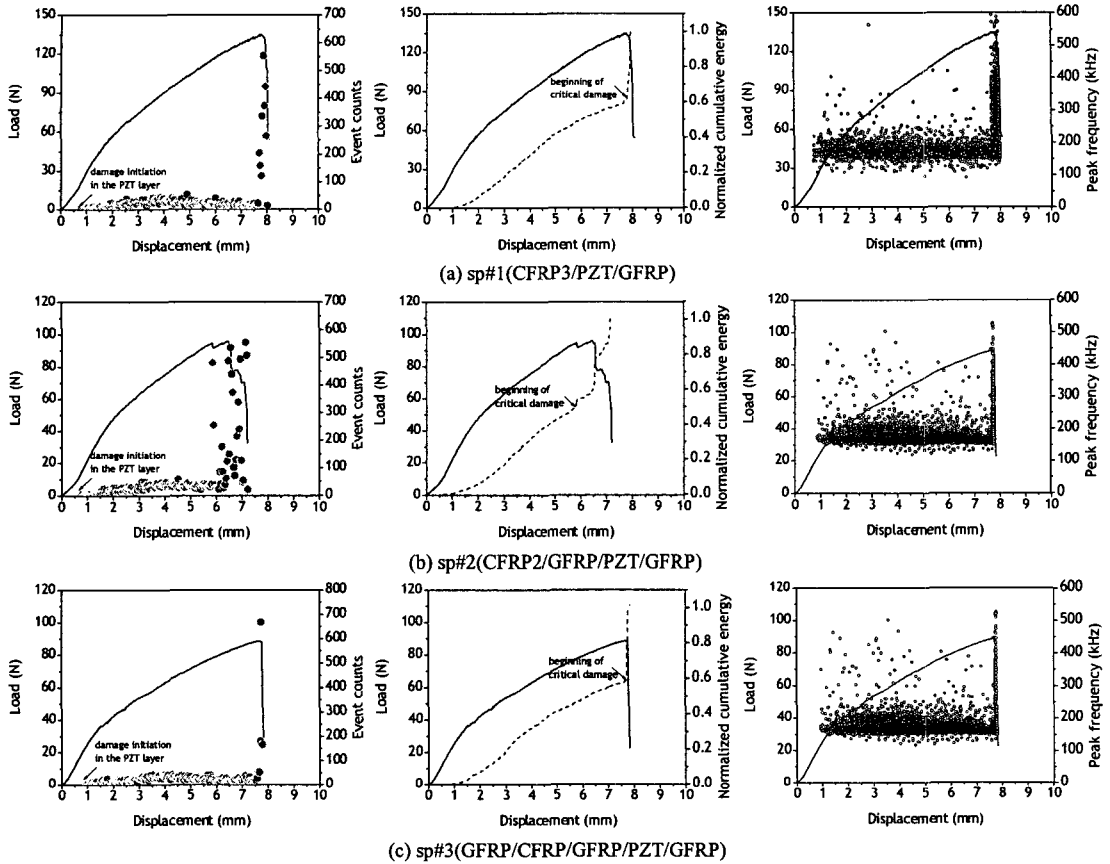


Fig. 6 Load and displacement curve and corresponding AE response in terms of event counts, normalized cumulative energy and the distribution of peak frequency for each specimen

며 피크주파수가 고강도의 신호였다. 이와는 대조적으로 Fig. 5(b)는 최대하중 이후에 발생한 신호들 중의 대표적인 것으로서 파형은 연속형에 가깝고 피크주파수의 강도는 Fig. 5(a)에 비해 상당히 낮았다. 결국, 단일 PZT세라믹에서 발생한 파손 모드는 피크주파수 성분으로는 구별하기 어려웠고 신호의 파형과 강도에 따라 뚜렷한 차이로써 구별할 수 있었다. 이와 같은 단일 PZT세라믹의 AE특성은 압전 복합재료 작동 시험편에서 검출된 AE특성으로부터 신호 유형을 분류하는데 활용되었다.

#### 4.2 압전 복합재료 작동기의 파손 기구와 AE신호 특성

Fig. 6은 Fig. 2에 나타난 각 시험편의 하중-변위 곡선과 이에 대응하는 사상수, 누적 에너지,

피크주파수의 분포를 순서대로 나타낸 것이다. 각 시험편 별로 미소한 차이가 있지만 약 0.78 mm 전후에서 강한 파단음의 최초 AE신호가 발생하였고 이 때, 하중-변위 선도의 기울기가 약간 변함을 알 수 있다. 각 시험편에서 감지된 최초 신호의 피크주파수는 169 kHz, 164 kHz 그리고 177 kHz로 각각 확인되었다. 피크주파수 성분만을 고려한다면 이 신호들은 모재 변형 또는 모재에서의 미소균열에 의한 것으로 판단할 수 있다. 왜냐하면 일반적으로 복합재료의 파손은 모재에서 시작되고 90-180 kHz의 낮은 피크주파수 특성을 보이기 때문이다.<sup>(16)</sup> 하지만 각 신호의 진폭 값을 확인한 결과, 각각 85 dB, 86 dB 그리고 85 dB였다. 보고된 연구결과에 따르면 모재파손 시 발생하는 AE진폭 특성은 일반적으로 저 진폭 특성을 갖는다.<sup>(14-15)</sup> 따라서 급침 하중을 받는 압

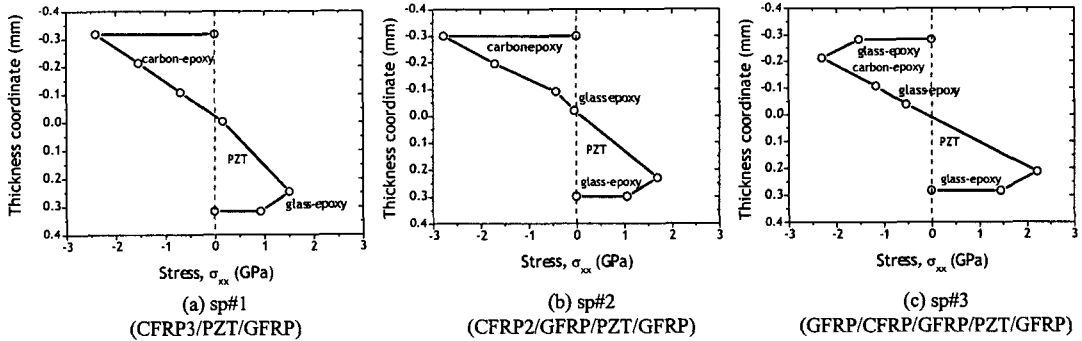


Fig. 7  $\sigma_{xx}$  distribution through the thickness at the in-plane center for each specimen subjected to a bending load of 30 N: (a) sp#1, (b) sp#2 and (c) sp#3

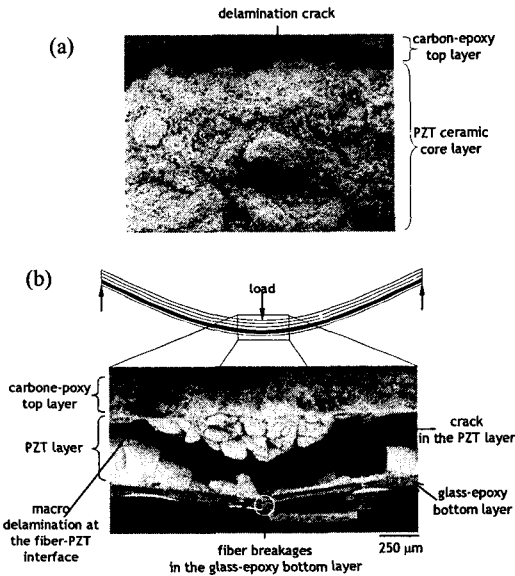


Fig. 8 SEM micrographs showing (a) the local delamination crack between the fiber-PZT interface layer and (b) the damage state at the center portion of the sp#1(CFRP3/PZT/GFRP)

전 복합재료 작동기에서 최초로 감지된 고 진폭의 AE신호들은 모재 파손으로부터 발생했다고 단언하기 어렵다.

Fig. 7은 30 N의 굽힘 하중을 각 시험편에 가했을 때 각 층에서 발생하는 x방향 응력분포를 ANSYS를 이용하여 구한 결과를 나타낸 것이다. 모든 적층구조에 대해 PZT세라믹 코어층과 유리섬유-에폭시 바닥층 층간에서 최대 인장응력이

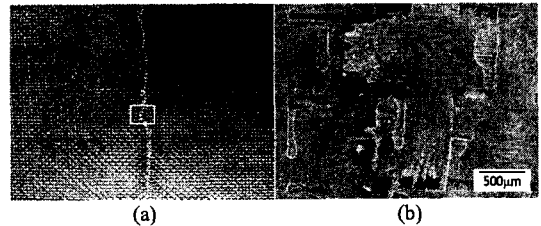


Fig. 9 Optical micrograph showing (a) a main cracking on the glass-epoxy bottom layer of the sp#1 and (b) a magnified SEM micrograph of the rectangular mark shown in Fig. 9(a), showing fiber breakages and fiber-matrix debondings

발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 작동기 시험편에서 감지된 최초 신호특성이 앞서 언급한 단일 PZT세라믹의 최대하중에서 발생한 신호의 진폭 및 피크주파수 특성과 흡사하고 그 검출시점이 PZT세라믹이 취성과파괴 될 때의 변위 수준과 거의 유사한 점을 고려해 볼 때, 유연한 유리섬유-에폭시 바닥층 보다는 PZT세라믹 층에서 초기 손상이 발생했던 것이다. 다시 Fig. 6으로 돌아가서 최초 신호발생 이후에서 누적에너지의 기울기가 급격하게 변하기 전까지 AE 발생률의 격차가 크지 않은 것으로 보아 시험편 내부에서의 손상이 안정적으로 성장한 것으로 판단된다. 한편, 이 구간에서의 피크주파수 분포(Fig. 6)를 시험편별로 자세히 살펴보면, 150-250 kHz의 성분이 지배적이고 이 구간에서의 진폭 값을 확인한 결과 40-90 dB의 높고 낮은 신호들이 분산되어 있었다. 각 시험편 별로 최대 굽힘하중의 75% 수준까지 하중을 가한 다음 시험을 중단하고 sp#1의 손

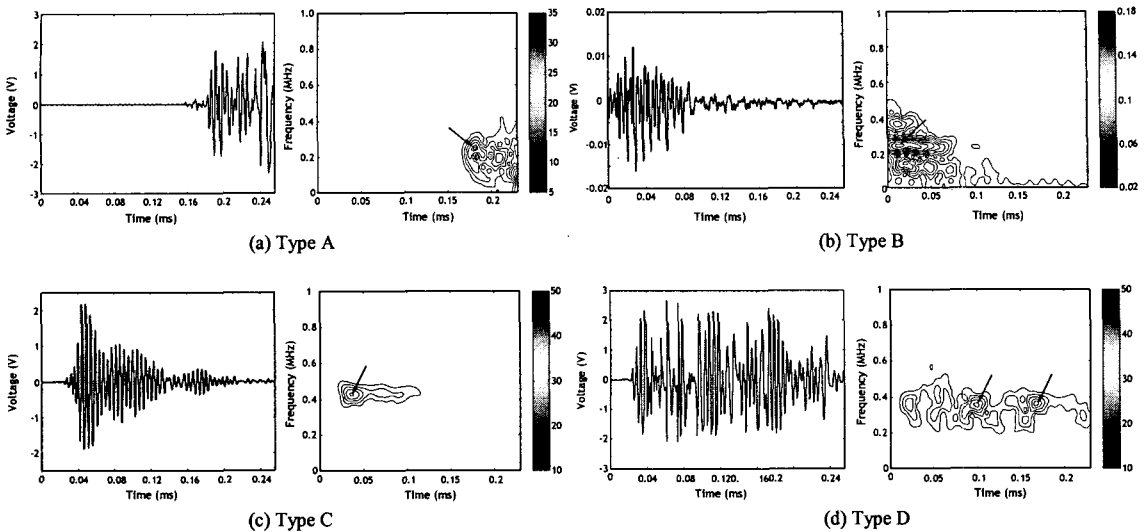


Fig. 10 Classification of AE signals based on the waveform and the peak frequency via STFT. Arrow in the figure indicates a peak frequency

상 상태를 SEM 관찰한 사진을 Fig. 8(a)에 나타내었다. 급힘 하중이 증가함에 따라 PZT세라믹 코어층에서 개시된 균열이 PZT세라믹과 탄소섬유-에폭시층 층간을 따라 진전했음을 확인할 수 있었다. 한편, Fig. 6의 각 시험편의 피크주파수 분포를 자세히 살펴보면 150-250 kHz의 성분이 지배적이긴 하지만 300 kHz 이상의 고주파수 성분을 갖는 신호가 이 구간에서 일부 관찰된 것으로 보아 Fig. 8(a)와 같은 국부적인 층간분리가 성장하는 동안 층간에서 가교된 섬유의 파단이 발생한 것으로 추정된다.<sup>(12,16)</sup> 누적에너지의 기울기가 급격하게 변하는 지점 이후부터 최종 파단까지의 구간에서는 신호 발생률이 현저하게 크며 300 kHz 이상의 피크주파수 성분을 갖는 신호들이 모든 시험편에서 다량 검출되었는데 이는 AE 발생원에 해당하는 내부 손상이 크고 격렬했기 때문이다. Fig. 8(b)는 sp#1의 손상상태를 최종 파단 후에 관찰한 것으로써 PZT세라믹층에서의 취성과 파괴, 유리섬유-에폭시 바닥층에서의 섬유파단 그리고 이들 층간에서의 거시적인 층간분리가 두드러짐을 알 수 있다. 또한 유리섬유-에폭시 바닥층의 배면부를 관찰한 Fig. 9에서는 섬유-모재 계면분리와 섬유파단으로 인한 주 균열이 진전해 있었다. 따라서 파면관찰을 통한 손상상태와 Fig. 7의 응력분포를 고려하면 유리섬유-에폭시 바닥층의

배면부에 높은 인장응력이 집중되어 섬유파단이 발생함과 동시에 주 균열로써 급진전 하고 이 과정에서 거시적인 층간분리가 발생하여 최종 파단에 도달한 것이다.

### 4.3 손상모드에 따른 신호분류

신호의 파형과 STFT에 의한 피크주파수 성분 분석에 근거하여 작동기 시험편에서 감지된 신호를 크게 4종류로 분류하고 그 대표적인 신호유형을 Fig. 10에 나타내었다. Type A는 각 시험편별로 AE센서에서 최초로 감지된 신호로서 파형은 돌발형에 가깝고 210 kHz의 고강도 피크주파수 성분을 갖는다. Fig. 5(a)와 비교하여 알 수 있듯이, Type A는 단일 PZT세라믹이 최대 하중에서 검출된 신호특성과 매우 유사하다. 따라서 Type A는 PZT세라믹이 취성과 파괴 될 때 발생한 신호라고 볼 수 있다. Type B는 Type A와 비슷한 피크주파수 성분을 갖지만 파형이 연속형이며 신호의 강도가 Type A에 비해 월등히 작다. 즉, 이들 신호타입의 발생원이 각각 다르다는 것을 의미한다. Type B의 진폭특성이 45-75 dB에 걸쳐 나타나는 것으로 보아 모재변형이나 PZT세라믹의 미소균열 그리고 섬유층과 PZT세라믹층 사이의 마찰 및 국부적인 층간분리의 파손모드에 대응시킬 수 있다.<sup>(24)</sup> 이와는 대조적으로, 70-95 dB의 비교

적 높은 진폭특성을 갖는 Type C는 돌발형이며 400 kHz이상의 피크주파수 성분이 지배적이었다. 더욱이, Type C의 검출시점은 최대하중 직전에서 최종파단까지 현저하게 발생하였고 이 검출 구간에서 Fig. 9(a)와 같은 주 균열의 급진전이 관찰 되었으므로 Type C는 높은 인장응력이 작용하는 유리섬유-에폭시 바닥층에서의 섬유파단으로 인한 주 균열의 급진전시 발생한 신호들에 관련시킬 수 있다.<sup>(15,16)</sup> Type D는 Type C와 비슷하게 고강도의 신호 특성을 나타내었고 그 검출시점이 거의 일치하였지만 파형이 연속형이며 다중 피크 주파수 성분을 포함하였다. 섬유강화 복합재료의 경우, 층간분리는 일반적으로 모재파손, 계면분리 그리고 가교섬유의 파단과 같은 다양한 파손모드를 포함하고 있다.<sup>(12,13)</sup> 따라서 Type D는 유리섬유 바닥층에서 주균열이 급진전 할 때 PZT세라믹층과 유리섬유 바닥층 사이에서 거시적인 층간 분리가 발생하면서 상기에 열거한 Type A~C의 다양한 파손모드가 동시에 복합적으로 중첩되어 나타난 신호에 의한 것이다.

4.4 분류된 신호타입의 거동

각 시험편의 굽힘 손상진전에 따른 파손과정을 파악하기 위하여 신호파형과 피크주파수 성분에 따라 분류된 각 신호타입의 누적 사상수를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 각 신호타입에 대한 누적 사상수의 기울기 변화는 서로 다른 손상모드의 특징적 거동을 보여주었다.<sup>(25,26)</sup> Type A는 음향방출 활성도 측면에서 가장 크며 중반 하중 수준까지 비교적 일정하게 증가하다가 최종 파단에 근접하거나 하중-변위 선도의 팝인 시점에서 급격히 상승함을 알 수 있다. 이는 PZT세라믹 코어층에서의 취성파괴의 진전은 AE발생 시작부터 지속적으로 진행되다가 최종파단에 가까워짐에 따라 층간분리가 발생하면서 더욱 활발하였음을 의미한다. Type B의 거동은 중반 하중 수준까지 Type A와 비슷한 거동을 보이지만 그 활성도 측면에서도 낮은 발생수를 보이고 최종파단에 이르러서도 뚜렷한 변화는 보이지 않았다. 따라서 모재의 변형 및 파손, PZT세라믹층에서의 입계균열, 국부적인 층간분리와 같은 미시적 손상이 지속적으로 발생하였음을 뜻한다. Type B의 진폭분포가 45-75 dB에 걸쳐 나타나는 것으로 확인되었

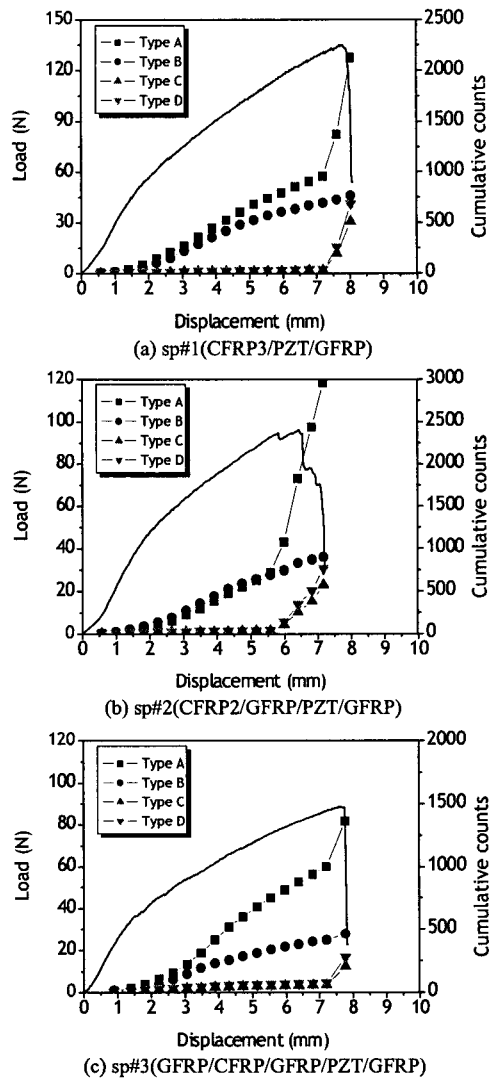


Fig. 11 Behavior of the classified signal type presented in figure 10 in terms of cumulative counts: (a) sp#1, (b) sp#2 and (c) sp#3

고 Fig. 9(b)의 파단면 사진으로 보아 국부적인 층간분리가 진행되는 동안 섬유와 모재 사이의 계면분리(debonding) 및 마찰에 의한 손상도 발생한 것으로 보인다. 한편, Type C와 Type D의 거동은 최대하중 이전까지 Type A와 Type B에 비해 상당히 미미한 수준을 보였다. 하지만 이들 신호타입에 대한 누적사상수의 기울기가 최대하중에 이르러서는 현저하였다. 즉, 유리섬유-에폭



시 바닥층에서 섬유과단을 동반한 주 균열이 급진전하면서 PZT세라믹층과 섬유층 사이의 거시적인 층간분리가 거시적으로 발생한 시점과 일치하였다. 선행연구<sup>(19)</sup>에서 sp#1(CFRP3/PZT/GFRP)의 경우가 적층구조로 인해 가장 우수한 작동변위 및 작동력 성능을 보였지만, 본 연구에서처럼 기계적 굽힘 하중을 받는 경우, 각 시험편별로 다른 파손모드를 나타내는 신호타입의 변화거동은 적층구조와는 무관하게 발생시점 부터 최종과단 까지 비교적 비슷하였다. 이는 시험편에서 발생한 주요 손상은, Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었듯이, 최대 인장응력이 작용하는 PZT세라믹층과 유리 섬유-에폭시 바닥층에서 집중적으로 발생하고 시험편 제작에 사용된 섬유강화 복합재료가 평직형이기 때문이다. 만약 일방향 섬유-에폭시 프리프레그를 사용하였다면 섬유배향에 따라 상이한 AE거동을 보였을 것이다.<sup>(12-13)</sup> 이와 같이 손상모드에 따라 분류된 신호를 하중-변위 선도와 함께 나타냄으로써 파손과정을 효과적으로 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 평직형 섬유강화 복합재료와 PZT세라믹으로 구성된 굽힘 압전 복합재료 작동 시험편에 대해 굽힘 하중하의 파손기구를 음향방출 신호의 파형과 주파수 성분 분석, 인자해석, 각 층에서의 응력분포 그리고 파면관찰을 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 파형 및 주파수분석에 근거하여 단일 PZT세라믹만의 신호특성을 우선 분석함으로써 굽힘 압전 복합재료 작동 시험편에서 발생하는 다양한 손상모드로부터 PZT층에서의 발생하는 손상모드를 구별해 낼 수 있었고 굽힘 하중을 받는 압전 복합재료 작동기의 초기 발생원은 PZT세라믹 층에서의 미소균열에 의한 취성파괴로 밝혀졌다.

2) 선행연구의 결과에서는 sp#1이 성형 후 열변형으로 인해 작동기내 저장 탄성 에너지가 크고 모멘트 평형에 의한 중립면이 PZT세라믹 외부에 존재하도록 적층구조를 가지고 있어 준정적 및 동적 작동시 변위 성능 및 하중 특성이 가장 우수하였으나 본 연구에서처럼 기계적인 굽힘 하중에 노출될 경우 작동층인 PZT세라믹층과 이

를 보호하고 있는 유리섬유-에폭시 바닥층에서의 응력집중으로 인한 주요 손상(섬유과단 및 거시적 층간분리)이 공통적으로 발생하여 취약함을 보였다. 따라서 초소형항공기의 자세제어나 플레퍼, 생체 모방형 근육 작동기에 충분히 응용될 수 있지만 기계적 하중을 받는 곳에는 적용이 어려울 것으로 생각된다.

3) 음향방출 신호의 파형과 피크주파수에 근거하여 손상모드를 분류하고 분류된 신호타입의 거동을 하중이력에 따라 고찰함으로써 다중 손상모드를 보이는 작동기내부의 파손과정을 효과적으로 파악할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 중점연구소 지원사업 (과제번호: KRF-2006-005-J03302)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Aimmanee, S. and Hyer, M. W., 2004, "Analysis of The Manufactured Shape of Rectangular THUNDER-Type Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 1389~1406.
- (2) Mulling, J., Usher, T., Dessent, B., Palmer, J., Franzon, P., Grant, E. and Kingon, A., 2001, "Load Characterization of High Displacement Piezoelectric Actuators with Various End Conditions," *Sensors and Actuators A*, Vol. 94, pp. 19~24.
- (3) Hyer, M. W. and Jilani, A., 1998, "Predicting The Deformation Characteristics of Rectangular Unsymmetrically Laminated Piezoelectric Materials," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, pp. 784~791.
- (4) Schwartz, R. E. and Narayanan, M., 2002, "Development of High Performance Stress-Biased Actuators Through The Incorporation of Mechanical Pre-loads," *Sensors and Actuators A*, Vol. 101, pp. 322~331.
- (5) Zhang, X. D. and Sun, C. T., 1999, "Analysis of a Sandwich Plate Containing a Piezoelectric Core," *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, pp. 31~40.
- (6) Chung, S. W., Hwang, I. S. and Kim, S. J.,

- 2006, "Large-Scale Actuating Performance Analysis of a Composite Curved Piezoelectric Actuator," *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, pp. 213~220.
- (7) Yoon, K. J., Park, K. H., Lee, S. K., Goo, N. S. and Park, H. C., 2004, "Analytical Design Model for a Piezo-composite Unimorph Actuator and Its Verification Using Lightweight Piezo-Composite Curved Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 459~467.
- (8) Mossi, K., Mouhli, M., Smith, B. F., Mane, P. P. and Bryant, R. G., 2006, "Shape Modeling and Validation of Stress-Biased Piezoelectric Actuators," *Smart Materials and Structures*, 15, pp. 1785~1793.
- (9) Kim, S. B., Kim, D. Y., Kim, J. J. and Cho, S. H., 1990, "Effect of Grain Size and Poling on The Fracture Mode of Lead Zirconate Titanate," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 73, pp. 161~163.
- (10) Hill, M. D., White, G. S. and Hwang, C. S., 1996, "Cyclic Damage in Lead Zirconate Titanate," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 79, pp. 1915~1920.
- (11) Jiang, Q., Cao, W. and Cross, L. E., 1994, "Electric Fatigue in Lead Zirconate Titanate Ceramics," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 77, pp. 211~215.
- (12) Woo, S. C. and Choi, N. S., 2007, "Analysis of Fracture Process in Single-edge-notched Laminated Composites Based On The High Amplitude Acoustic Emission Events," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 1499~1508.
- (13) Choi, N. S., Woo, S. C. and Rhee, K. Y., 2007, "Effects of Fiber Orientation On The Acoustic Emission and Fracture Characteristics of Composite Laminates," *Journal of Materials Science*, Vol. 42, pp. 1162~1168.
- (14) Xingmin, Z. and Xiong, Y., 2006, "Investigation of Damage Mechanisms in Selfreinforced Polyethylene Composites by Acoustic Emission," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 444~449.
- (15) Hugueta, S., Godina, N., Gaertner, R., Salmon, L. and Villard, D., 2002, "Use of Acoustic Emission to Identify Damage Modes in Glass Fibre-Reinforced Polyester," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1433~1444.
- (16) De groot, P. J., Wijnen, P. A. M. and Janssen, R. B. F., 1995, "Real-Time Frequency Determination of Acoustic Emission for Different Fracture Mechanisms in Carbon/Epoxy Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 55, pp. 405~412.
- (17) Woo, S. C. and Goo, N. S., 2006, "Analysis of a Plate-type Piezoelectric Composite Unimorph Actuator Considering Thermal Residual Deformation," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 4, pp. 409~419.
- (18) Woo, S. C. and Goo, N. S., 2007, "Prediction of Actuating Displacement in a Piezoelectric Composite Actuator with a Thin Sandwiched PZT Plate by a Finite Element Simulation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 455~464.
- (19) Woo, S. C., Park, K. H. and Goo, N. S., 2007, "Influences of Dome Height and Stored Elastic Energy on The Actuating Performance of a Plate-Type Piezoelectric Composite Actuator," *Sensors and Actuators A*, Vol. 60, pp. 731~744.
- (20) Beattie, A. G., 1983, "Acoustic Emission, Principles and Instrumentation," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 2, pp. 95~128.
- (21) Eitzen, D. G. and Wadley, H.N.G., 1984, "Acoustic Emission: Establishing The Fundamentals," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 89, pp. 75~100.
- (22) Piotrkowski, R., Gallego, A., Castro, E., Garcia-Hernandez, M. T. and Ruzzante, J. E., 2005, "Ti and Cr Nitride Coating/Steel Adherence Assessed by Acoustic Emission Wavelet Analysis," *NDT&E International*, Vol. 38, pp. 260~267.
- (23) Chen, W. and Lynch, C. S., 1998, "A Micro-Electro-Mechanical Model for Polarization Switching of Ferroelectric Materials," *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 5303~5311.
- (24) Godin, N., Hugueta, S., Gaertner, R. and Salmon, L., 2004, "Clustering of Acoustic Emission Signals Collected during Tensile Tests on Unidirectional Glass/Polyester Composite Using Supervised and Unsupervised Classifiers," *NDT&E International*, Vol. 37, pp. 253~264.
- (25) Anastassopoulos, A. A. and Philippidis, T. P., 1995, "Clustering Methodologies for The Evaluation of AE from Composites," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 13, pp. 11~22.
- (26) Pappas, Y. Z., Markopoulos, Y. P. and Kostopoulos, V., 1998, "Failure Mechanisms Analysis of 2D Carbon/Carbon Using Acoustic Emission Monitoring," *NDT&E International*, Vol. 31, pp. 157~163.