

음향방출법을 이용한 평판형 압전 복합재료 작동기의 파괴거동 해석

Analysis of the Fracture Behavior of Plate-type Piezoelectric Composite Actuators by Acoustic Emission Monitoring

우성충*[†], 구남서**

Sung-Choong Woo*[†] and Nam Seo Goo*

초 록 3점 굽힘 하중을 받는 단일 PZT 및 평판형 압전 복합재료 작동기(PCA)의 파괴거동을 음향방출(AE) 법을 이용하여 살펴보았다. 단일 PZT의 경우 최대 굽힘하중에서 발생한 AE신호는 고진폭 및 긴 유지시간을 갖는 특징을 보였으며 FFT에 의한 지배 주파수 대역을 확인한 결과 100~230 kHz의 비교적 저주파수 대역이었다. PCA의 경우, stage I에서 발생한 80 dB이상의 고진폭 및 170~223 kHz의 저 지배 주파수 대역을 갖는 신호는 PZT층에서의 취성파괴 및 PZT층과 인근 섬유층 사이의 층간분리에 의한 것으로 추정되었다. 상기의 AE거동 해석결과와 광학현미경 및 주사전자현미경에 의한 손상관찰에 근거하여 비대칭으로 적층된 PCA의 파괴거동과 관련한 AE특성을 규명하였다.

주요용어: 음향방출, 평판형 압전 복합재료 작동기, 취성파괴, 층간분리, 지배 주파수 대역

Abstract Fracture behavior of a monolithic PZT and a plate-type piezoelectric composite actuator (PCA) has been investigated under a bending load at three points by an acoustic emission (AE) monitoring. AE signal from a monolithic PZT at the maximum bending load shows the characteristics of high amplitude and long duration with a low frequency band of 100~230 kHz which is confirmed by fast Fourier transform (FFT). For a PCA, it is concluded that AE signals with high amplitude over 80 dB and low dominant frequency band of 170~223 kHz emitted in the stage I are due to the brittle fracture in the PZT layer and the delamination between the PZT layer and the adjacent fiber composite layer. Based on the above analysis of AE behavior and damage observations with an optical microscopy and a scanning electron microscopy, AE characteristics related to fracture behavior of asymmetrically laminated PCA have been elucidated.

Keywords: Acoustic Emission, Plate-Type Piezoelectric Composite Actuator, Brittle Fracture, Delamination, Dominant Frequency Band

1. 서 론

섬유강화 복합재료나 금속재료 내에 압전세라믹(lead zirconate titanate, PZT)을 삽입하여 경량이면서 우수한 작동성능을 갖는 압전 작동기[1-6]가 항공우주 산업, 해양 산업, 의료 산업 등의 분야에

서 최근 각광을 받고 있다. 미 NASA에서는 THUNDERTM[2]라는 이름으로 1990년대 후반부터 상용화하였고 최근에는 MEMS기술을 이용하여 인체의 혈관이나 조직에 약물을 이송하는 초소형 펌프(micropump)[7]나 항공기 날개에서 발생하는 기류박리에 의한 실속을 지연 및 제어하는 고양력

장치 작동기(synthetic jet actuator)[8]에 관한 연구도 시도되고 있다.

그러나 압전 복합재료 작동기는 섬유 복합재료와 PZT의 접합으로 인해 발생하는 층간분리, 경화후의 PZT층과 섬유층의 열팽창계수의 차이로 인한 잔류응력 등의 문제점을 안고 있어 이러한 부분들에 대한 정확한 이해 및 평가가 필요하다. 또한, 작동용이나 제어용으로 개발되기에 작동변위나 작동력에 관한 연구가 대부분이며 작동기의 형상이 빔 모델에 편중되어 있다. 압전 작동기의 주된 작동모드는 굽힘 모드이므로 상기에 전술한 문제점들은 면외하중에 취약한 섬유강화 복합재료와 취성재료인 PZT로 구성된 압전 작동기의 건전성, 안전성, 그리고 신뢰성에 영향을 줄 수 있으며 미시적·거시적 파괴과정을 감시하고 그 파괴발생원을 규명하는 것은 압전 작동기의 실용적 측면에서 중요하다.

한편, 음향방출(acoustic emission, AE)은 구조물에 외력이 가해질 때 구조물 내의 미세손상과 균열의 발생과 성장, 소성변형 등이 발생할 때 방출되는 탄성(응력)파이다. 이러한 탄성파를 구조물 표면에 부착한 압전형 센서로 검출하여 신호 특성을 분석 평가함으로써 구조물의 건전성을 온라인으로 감시하는 비파괴 평가 기법을 음향방출법이라 한다.

AE특성을 파괴메카니즘과 관련시키기 위한 일련의 노력이 진행되어 왔는데, Groot 등[9]은 인장하중을 받는 탄소섬유 복합재료의 손상기구를 AE 주파수 분포를 이용하여 규명하고 모재 균열은 90~180 kHz, 섬유파단은 300 kHz 이상, 모재-섬유 계면분리는 240~310kHz 그리고 섬유뿔힘은 180~240 kHz의 주파수분포를 갖는다고 보고하였다. Xingmin 등[10]은 AE진폭의 분포로써 자가 강화 폴리에틸렌 복합재료의 손상기구를 확인하여 계면분리는 30~45 dB, 모재 균열은 30~60 dB, 섬유뿔힘은 60~80 dB, 섬유파단은 80~97 dB 그리고 층간분리는 60~85 dB의 AE진폭특성을 갖는다고 밝혔다. 또한 Huguet 등[11]은 Kohonen's map을 이용한 통계적 해석을 수행하여 GFRP 파이프 손상모드의 신호특성을 규명하였다. 이처럼 AE법은 건축 재료에서 혼합형 복합재료에 이르기까지 다양한 소재에 성공적으로 적용되었지만[12-22] 이를 압전 작동기에 적용하여 FRP의 파괴기구 외에 PZT의 취성파괴, PZT층과 섬유층사이의 층간분리의 발생과 성장 등 다중 손상기구를 규명한 연구는 거의 보고되지 않았다. 또한 압전 작동기의 AE특성을 보

다 정확히 이해하고 평가하기 위해서는 PZT층에 대한 AE특성 연구가 선행되어야 할 것이다.

본 연구의 저자들은 선행연구에서 직물형 탄소섬유-에폭시와 유리섬유-에폭시를 이용하여 비대칭 적층구성을 갖는 평판형 압전 복합재료 작동기(plate-type piezoelectric composite actuator, PCA)에 대해 성형시의 냉각과정에서 발생하는 잔류 열변형을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하여 PZT 두께, 적층순서, 경계조건, 인가전압 그리고 구동주파수가 횡방향 변위특성에 미치는 영향을 규명하고 성능실험을 통하여 확인한 바 있다[23-24].

본 연구에서는 선행연구에서 가장 우수한 작동 성능을 보인 작동기와 그렇지 못한 작동기를 대상으로 굽힘 하중하의 파괴과정에 따른 AE특성을 파악하고자 한다. 이를 위해, 단일 PZT박판의 AE특성을 먼저 파악하고 적층구성에 따른 PCA의 AE특성을 음향방출 인자해석과 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform)에 의한 지배 주파수 대역(dominant frequency band)을 통하여 해명하고자 한다. 굽힘 시험이 끝난 PCA에 대해서는 광학 및 주사전자현미경 관찰을 통하여 PCA의 손상 및 파괴기구를 관찰한다.

2. 실험

2.1. 작동기의 작동원리

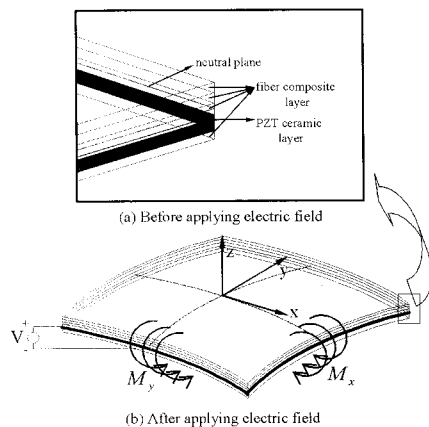


Fig. 1 The actuating principle of a plate-type piezoelectric composite actuator

Fig. 1은 PCA의 구조와 작동원리의 개략도를 보여준다. PZT층에 높은 전압을 인가하면 양전하와

음전하가 극화 방향 또는 극화 반대방향으로 배열되면서 분극현상(polarization)이 발생한다. PZT의 극화방향과 반대방향으로 전압을 인가하면 극화방향으로는 압축변형이 발생하고 극화 수직방향으로는 인장변형이 발생한다. 극화방향과 같은 방향으로 전압을 인가하게 되면 반대현상이 발생하게 되는데, Fig. 1과 같이 모멘트평형에 의한 중립면이 PZT층 외부에 있도록 적층하게 되면 위와 같은 압전효과로 인해 PZT층에는 압전 변형률 상수만큼 면내수축 또는 팽창과 같은 변형이 발생하게 되고 각 방향으로 굽힘 변형이 발생하게 된다. 만약 적층순서가 대칭이고 PZT가 중앙에 삽입되어 있다면 압전효과가 발생하더라도 굽힘 변형은 발생하지 않게 된다.

2.2. PCA 제작

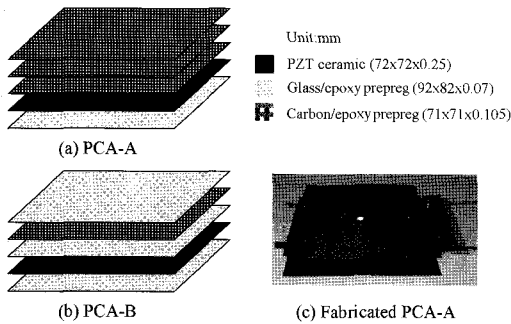


Fig. 2 Configuration of the (a) PCA-A and (b) PCA-B; (c) photograph of the fabricated PCA-A

Fig. 2에 본 연구에 사용된 PCA의 적층순서와 실제로 제작된 모습을 나타낸다. PCA제작에 사용된 재료는 두께가 0.25 mm인 단일 PZT (3203HD, CTS Co.), 직물형 탄소섬유-에폭시 프리프레그 (WSN1K-B, SK Chemicals) 그리고 직물형 유리섬유-에폭시 프리프레그 (GEP108, SK Chemicals)이다. PZT를 외부 환경으로부터 보호하기 위하여 바닥층(bottom layer)은 두께가 0.07 mm인 유리섬유-에폭시 프리프레그를 사용하였다. PZT를 기준으로 상층부는 두께 0.105 mm의 탄소섬유-에폭시 프리프레그와 유리섬유-에폭시 프리프레그의 적층위치와 장수를 달리하여 제작하였다. 탄소섬유-에폭시는 전도체이므로 작동성능 시험시에 전기적 단전을 방지하기 위하여 PZT세라믹보다 가로 및 세로로 1 mm

작은 크기를 사용하였고 유리섬유-에폭시 프리프레그는 작동기의 탭 부분을 제작하기 위해 가로 및 세로방향으로 10 mm 큰 것을 사용하였다. 본 연구에서 직물형 섬유 복합재를 사용한 이유는 Fig. 2(a), (b)와 같이 비대칭 적층이므로 경화 후에 말안장 곡률(anticlastic curvature)이 발생되지 않도록 하기 위함이다. PCA는 hand lay-up 방법으로 적층된 후 경화 사이클에 따라 오토클레이브 내에서 진공백(vacuum bag)방식으로 성형하였으며 Fig. 2(c)는 실제로 제작된 PCA-A의 모습을 나타낸다.

2.3. 3점 굽힘 및 AE 측정 시험

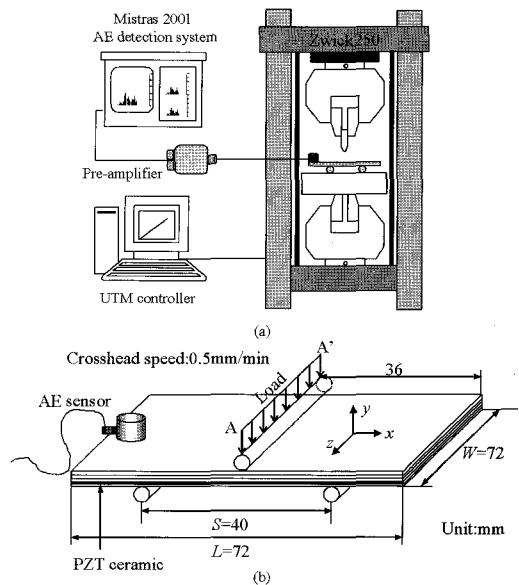


Fig. 3 Schematic of (a) the AE measurement system and (b) the bending test and location of the AE sensor

PCA에서 발생하는 AE신호를 실시간으로 감지하기 위하여 Fig. 3(a)과 같은 AE측정 시스템을 구현하여 Fig. 3(b)의 굽힘 시험 조건에서 3점 굽힘 및 음향방출 측정 시험이 수행되었다. 처짐 증가(crosshead speed: 0.5 mm/min)에 따른 파괴거동 및 손상평가를 위하여 AE센서(유효 주파수 검출대역: 100~600 kHz, 공진 주파수: 265 kHz)를 PCA의 한쪽 면에 Fig. 3(b)과 같이 진공 그리스를 사용하여 부착하였다. 만능 시험기(Zwick, 로드셀 최대용량: 1 kN)에 의해 굽힘 하중 하에서의 하중-처짐 곡

선을 얻었고 굽힘 시험은 PCA의 최종파단이 발생할 때까지 수행되었다. 감지된 AE신호는 전치증폭기(pre-amp, gain: 40 dB, threshold level: 40 dB)에 의해 증폭된 후 AE본체(Mistras 2001, sampling rate: 4 MHz)로 보내어져 AE인자(진폭, 에너지, 유지시간, 상승시간 등)별 시계열로 감시·분석된다. AE측정시 발생하는 노이즈를 제거하기 위해, 시험기의 롤러 지지대에 PCA를 위치시킨 상태에서 10여분 동안 발생하는 신호(25 μ s 이하의 유지시간과 에너지가 0인 신호)가 비정상적으로 짧은 전기적 잡음신호임을 확인하고, 최종 획득된 신호들을 인자 해석함에 있어 이들 신호에 대해서는 시험후의 데이터 처리과정에서 모두 제거하였다. 이를 통해 실제의 AE데이터를 확보하여 분석할 수 있었다.

2.4. 파손관찰

굽힘 시험이 끝난 각 PCA의 섬유층과 PZT층의 단면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 손상발생 정도를 관찰하였고 바닥층인 유리섬유층에서 발생한 주 균열 및 섬유파단은 광학현미경을 이용하였다.

3. AE거동의 해석

섬유강화 복합재료의 대표적인 파괴기구에는 모재균열, 층간분리, 섬유파단 등으로 나뉘는데 이러한 파괴기구에 따라 탄성파가 갖는 주파수 특성은 서로 다른 것으로 알려져 있다[14-17]. 따라서 본 연구에서는 굽힘 하중을 받는 PCA에서 검출된 신호를 인자해석과 함께 이를 FFT처리하여 주파수 영역에서 고찰[9,17,22]함으로써 파괴기구를 정량적으로 해명하고자 하였다.

3.1. 단일 PZT의 음향방출 특성

Fig. 4는 굽힘 하중 하에서의 단일 PZT의 하중-변위, AE 진폭 및 유지시간의 분포를 나타낸다. 단일 PZT의 경우, 전형적인 취성재료의 하중-변위 거동을 보였다. 처짐 변위 0.79 mm에 대응하는 최대 하중점에서 검출된 AE 사상(event)은 88 dB의 고진폭 신호였으며 8.6 ms의 긴 유지시간을 갖는 특성을 보였다. 이와 같이 고진폭의 긴 유지시간을 갖는 AE신호는 거시적 균열의 성장이나 층간분리를

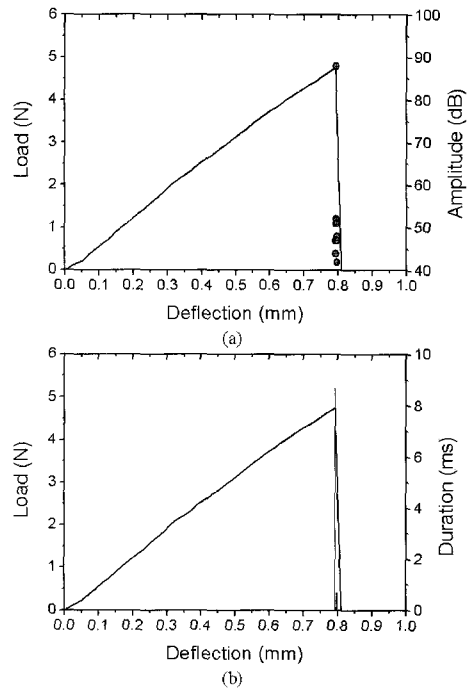


Fig. 4 AE signals from monolithic PZT ceramic: (a) a typical load-deflection curve and AE amplitude distribution; (b) load-deflection curve and duration distribution

동반한 최종 파단시점에서 주로 발생한다[21,22]. 단일 PZT의 경우 이러한 특징을 갖는 신호는 최대 굽힘하중에서 취성파괴가 발생할 때 축적된 내부 에너지가 탄성파로서 급격하게 방출된 것을 의미한다. 최대하중 이후에 발생한 신호들은 40~52 dB의 비교적 저진폭 신호와 0.1~0.7 ms의 유지시간을 갖는 신호들이었으며 취성파괴 이후 아주 짧은 시간 동안 세라믹의 결정입계에서 발생한 미소 손상에 의한 것이다.

Fig. 5는 단일 PZT의 모든 AE사상에 대해서 FFT에 의한 전형적인 지배 주파수 대역 특성을 나타낸다. 본 연구에서, 지배 주파수 대역이란 주파수 스펙트럼에서 에너지 강도(magnitude)가 가장 큰 피크 주파수와 세 번째로 큰 주파수 사이의 대역을 말한다. 단일 PZT에서 검출된 AE신호의 주파수 특성은 Fig. 5(a), (b)와 같이 크게 2가지 형태로 분류될 수 있었다. (a)는 최대 굽힘하중에서 발생한 주파수특성으로써 지배 주파수 대역이 100~230 kHz에 걸쳐 나타났고 신호의 강도가 컸다. (b)는 최대

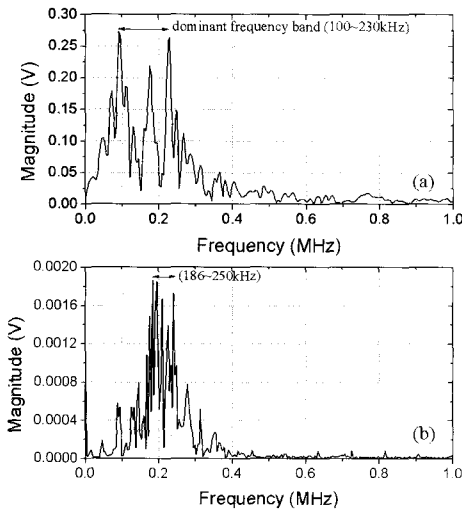


Fig. 5 Typical FFT results of the AE signal: (a) at P_{max} and (b) after P_{max}

하중 이후에서 최종파단 사이에서 발생한 신호로써 186~250 kHz의 지배 주파수 대역을 보였으며 (a)에 비하여 그 신호의 강도는 극히 낮은 수준이다. 따라서 단일 PZT세라믹에서 발생한 AE특성은

거시적 미시적 파괴 모드에 따라 신호의 진폭, 유지시간, 강도 및 지배주파수 대역에서 현저한 차이를 보였음을 알 수 있다.

3.2. 압전 복합재료 작동기의 음향방출특성

Fig. 6에 PCA-A의 변위-하중 곡선과 각 하중수준에 대응하는 누적 사상수, 진폭, 유지시간 그리고 상승시간의 분포를 순서대로 나타낸다. 참고로 선행연구[24]의 준 정적 작동성능 시험(구동주파수 1Hz)에서 PCA-A는 단순지지 조건과 외팔평판 조건에서 가장 우수한 작동성능을 나타내었다. 누적 사상수의 거동을 살펴 본 바, PCA-A에서 검출된 AE신호는 크게 2단계에 걸쳐 나타났다. stage I은 최초 AE사상 발생부터 누적 사상수의 기울기가 급격하게 증가하는 B지점까지이며 stage II는 B지점 이후에서 최종 파단까지이다. 변위 0.76 mm인 시점에서 쿨에 들릴 정도의 파단음과 함께 최초 AE사상이 감지되었다. AE본체에서 최초로 감지된 사상의 특성(진폭: 85 dB, 유지시간: 2.21 ms)은 단일 PZT가 최대 굽힘하중에서 발생한 AE특성(진폭: 88 dB, 유지시간: 8.6 ms)과

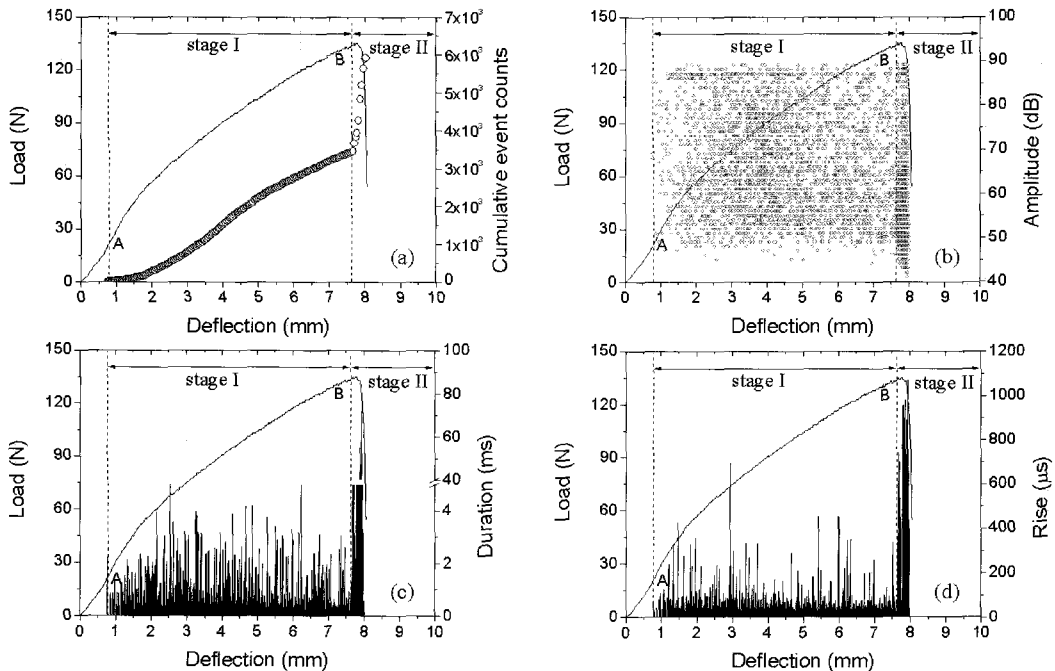


Fig. 6 Typical load-deflection curve and the corresponding behavior of AE parameters for a PCA-A subjected to a bending load

비슷하고 발생시의 처짐 변위값이 거의 일치하고 있으므로 유연한 섬유층보다는 취성이며 굽힘강도가 약한 PZT층에서 발생한 것이다. 이후, 누적 사상수는 7.72 mm까지 거의 일정한 기울기로 증가하였다. 누적 사상수가 일정하게 증가한다는 것은 이 구간에서 신호 발생율이 일정함을 의미한다. Fig. 6(b)의 AE진폭의 분포에서도 최초 사상발생 이후부터 45~90 dB 사이의 저·중·고진폭 신호가 stage I 전역에 걸쳐 일정분포로 발생하고 있다. 복합재료의 파손은 모재균열로부터 시작되어 섬유파단에 의해 최종 파괴에 이르는데 모재균열의 발생시에는 비교적 낮은 수준의 진폭 AE특성을 나타내므로[10,19] stage I에서 발생한 고진폭의 신호들은 PZT층에서 개시된 균열이 PZT와 섬유층 사이의 경계층을 따라 미소 층간분리가 성장하면서 발생한 것이다. B지점 이후부터 최종 파단까지의 구간(stage II)에서는 누적사상의 기울기가 급증하였고 87 dB이상의 고진폭 신호와 5 ms이상의 긴 유지시간을 갖는 신호들이 집중적으로 발생하였다. 또한 오름시간의 경우에는 stage I에 비하여 긴 신호들이 주류를 이루었다. 이 구간은 시간적으로 짧았지만 굽힘시험시 육안 관찰 결과, 높은 인장응력이 바닥 층(bottom layer)인 유리섬유층에 집중되어 유리섬유층의 가장 약한 지점에서 섬유파단이 발생함과 동시에 주 균열로써 급진전 하면서 최종파단에 도달한 시점과 일치한다. 따라서 stage II에서 발생한 고진폭의 긴 유지시간을 갖는 AE사상은 모재파손을 동반한 섬유파단, 섬유-모재 계면분리현상과 PZT와 섬유층 사이의 거시적인 층간분리에 의한 신호이며 비슷한 AE특성이 유리섬유/알루미늄 혼성 적층판[17,21-22]의 경우에도 나타난 바가 있다.

고속 푸리에 변환에 의한 지배 주파수 대역과 신호의 강도에 근거하여 PCA에서 발생하는 신호를 Fig. 7과 같이 3가지 형태로 분류할 수 있었다. AE 센서에서 최초로 감지된 신호를 FFT 처리한 type I의 피크주파수는 210 kHz 근방에서, 지배 주파수 대역은 170~270 kHz였고 85 dB이상의 진폭과 2 ms 이상의 유지시간을 갖는 신호였다. 이러한 주파수 특성은 Fig. 5(a)와 비교하여 알 수 있듯이 단일 PZT가 최대 굽힘하중에서 발생한 AE특성과 흡사하다. 따라서 FFT에 의한 주파수 분석에 의해서도 굽힘하중을 받는 PCA-A의 손상개시는 PZT층에서의 파괴로 인한 것임을 알 수 있다. Type II는 stage I과 II에서 지속적으로 발생한 대표적인 예로

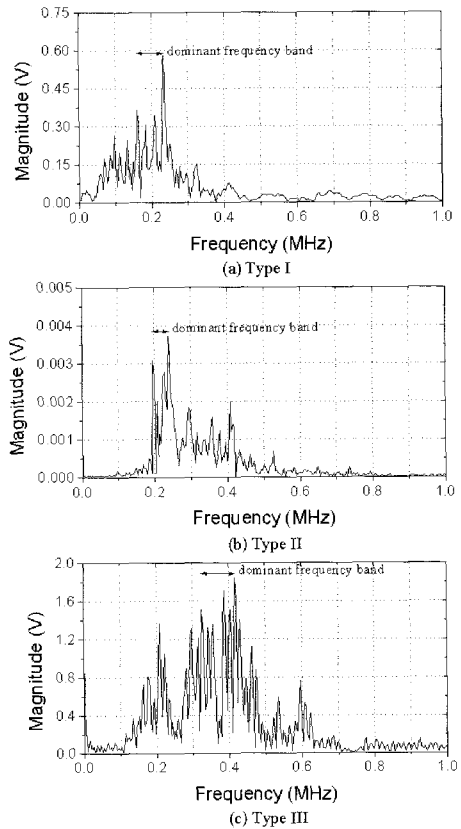


Fig. 7 FFT result for representative AE signals according to fracture process: (a) low dominant frequency band with high magnitude, (b) low dominant frequency band with low magnitude and (c) high dominant frequency band with high magnitude

써 피크주파수는 170 kHz 근방에서 지배 주파수 대역은 170~230 kHz로 type I의 주파수 특성과 크게 다르지 않았지만 신호의 강도가 type I과 비교하여 월등히 작고 40~65dB의 진폭특성과 30μs~2ms 사이의 유지시간을 보였다. 여기서 주목할 점은 stage I에서는 type I과 type II의 주파수 대역 특성을 갖는 신호들이 일정 비율로 함께 발생하였다는 것이다. 즉 누적 사상수의 기울기가 거의 일정하게 증가하면서 PZT층에서의 파괴, 미시적 층간분리 그리고 모재 손상이 지속적으로 발생하였다는 것을 의미한다. Type I이 실제로 PZT층의 파괴로 인한 신호라고 한다면, 작동기가 굽힘하중을 받고 있고 유지시간과 진폭의 AE특성을 고려할 때, type II는

모재손상, 모재-섬유 계면분리 그리고 섬유층과 PZT층 사이의 미시적 층간분리의 파괴 메커니즘에 대응시킬 수 있다. 이와는 대조적으로 type III와 같은 신호는 stage I보다는 stage II에서 주로 발생한 대표적인 신호로서 피크주파수는 420 kHz 근방에서 지배 주파수 대역은 350~420 kHz의 비교적 고 주파수 대역 또는 150~430 kHz에 이르는 광대역 주파수특성을 보였는데, 이와 같이 지배주파수 대역이 높은 신호들의 공통점은 고 진폭과 긴 유지시간의 AE특성을 나타내었다. 또한 stage I에서 발생한 신호들에 비해 강도 역시 높았다. 전술한 AE특성과 신호의 감지시점으로 보아 type III는 인장응력이 가장 심하게 작용하는 유리섬유 바닥층에서 굽힘응력을 견디지 못하고 섬유파단이 발생하여 주 균열로써 급진전하면서 PZT층과 섬유층 사이의 거시적인 층간분리로 인한 AE신호라고 할 수 있다[9,17]. 결국 해당 신호의 주파수영역에서 피크 주파수 및 지배 주파수 대역을 AE인자 거동과 함께 고찰함으로써 PCA의 파괴과정에 따른 주요 파괴모드를 감시할 수 있으므로 유효하다고 판단된다.

Fig. 8은 PCA-B에 대한 AE인자 특성을 보여준다. 전체적으로 PAC-A의 AE 거동과 크게 다르지

않았다. 단일 PZT가 파단될 때의 처짐변위와 비슷한 C시점(0.81 mm)에서 최초 신호가 감지되었다. 이후, D지점까지 누적 사상수의 증가거동은 거의 일정하였으며 AE진폭의 분포에서도 80~90 dB사이의 고진폭 신호가 stage I, II 전체에 걸쳐 발생하고 있다. PCA-B의 경우 최대 굽힘하중은 88.6N으로써 PCA-A의 그것(135N)보다 낮았는데, 이는 PCA-A의 경우 PZT를 중심으로 상층부는 강성이 높은 탄소섬유-에폭시만으로 적층된 반면 PCA-B는 유리섬유와 탄소섬유가 교대로 적층되었기 때문이다.

PCA의 굽힘 파괴 과정을 정량적으로 나타내기 위하여 Fig. 7에 분류한 신호들의 처짐 증가에 따른 AE발생수의 변화거동을 Fig. 9에 나타낸다. 두 작동기에 대해 각각 다른 파괴 메커니즘을 나타내는 신호형태의 변화거동은 발생시점 부터 최종파단까지 대체로 유사한 변화거동을 보였다. Type I은 처짐 변위 4 mm까지 완만하게 증가하다가 stage I의 후반부에서는 점진적인 감소를 보였다. Type II의 변화거동도 type I에 비해 다소 낮은 발생수를 보이지만 크게 다르지 않았다. 따라서 stage I에서는 주로 PZT층의 취성파괴와 미소 균열, 모재균열, PZT층과 섬유층 사이의 미시적 층간분리가 지배적

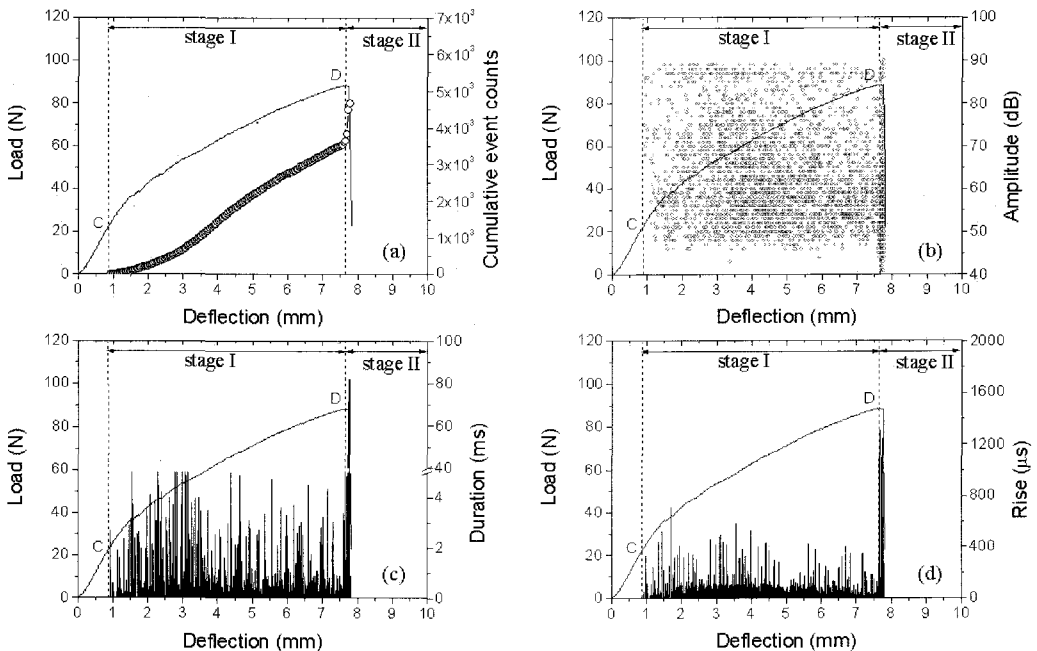


Fig. 8 Typical load-deflection curve and the corresponding behavior of AE parameters for a PCA-B subjected to a bending load

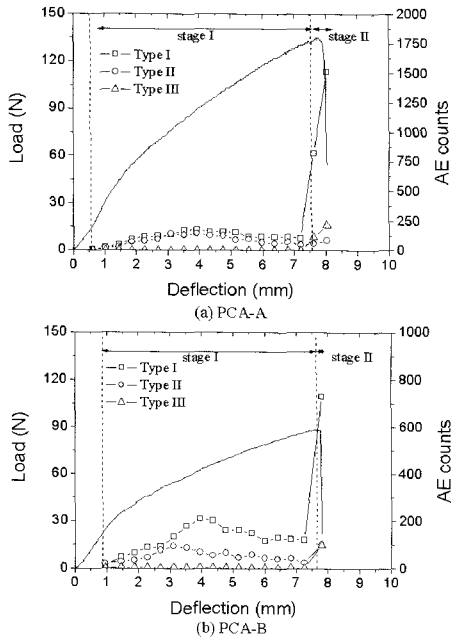


Fig. 9 Behavior of type I, II, III signals with increasing the deflection for (a) PCA-A and (b) PCA-B

이였음을 알 수 있다. 한편, stage I에서의 type III의 발생수는 극히 미미한 수준으로 변화거동은 거의 관찰되지 않았다. 하지만 누적 사상수가 급격히 증가하는 stage II에서 급격한 증가를 보였으므로

섬유파단[19]을 동반한 주 균열의 급진전과 PZT와 섬유층의 경계에서 거시적인 층간분리가 지배적인 파괴기구였음을 의미한다. 두 작동기의 전체적인 파괴과정이 비슷함을 고려할 때, 급힘하중을 받는 PCA의 AE특성은 적층순서에 영향을 받는 것이 아니라 상기에 열거한 각각의 파괴기구와 같은 발생 원에 영향을 받는 것으로 생각된다.

3.3. PCA의 손상역 관찰

Fig. 10은 급힘시험이 끝난 PCA-A의 파면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다. (a)와 같은 파면으로부터 급힘 하중을 받는 PCA의 균열 성장 거동을 예측할 수 있었다. 급힘 하중이 증가함에 따라 PZT층에서 최초 취성파괴가 발생하면서 생성된 균열로부터 섬유층의 경계면을 따라 (b)와같이 미세적 층간분리가 성장하였을 것이다. 이 파괴과정 동안에는 stage I에 해당하는 구간으로 지배 주파수 대역은 낮고, 저·중·고진폭의 AE가 발생하였을 것이다. Fig. 10(c), (d)는 섬유강화 복합재료에서 나타나는 전형적인 파괴기구로써 이와 같은 파면은 최대 급힘 하중 이후 가장 높은 인장응력을 받는 유리섬유 바닥층에서 주 균열이 급진전하면서 생긴 섬유파단, 모재-섬유 계면 분리 그리고 모재의 미세적 균열을 보여준다. 이와 같은 다중 파괴모드는 stage II에 걸쳐 나타나며 이 구간에서는 Fig. 7(c)와 같은 지배 주파수 대역이 높고 고진폭의 긴 유지시간을 갖는 신호가 집중적으로 발생한 것이다.

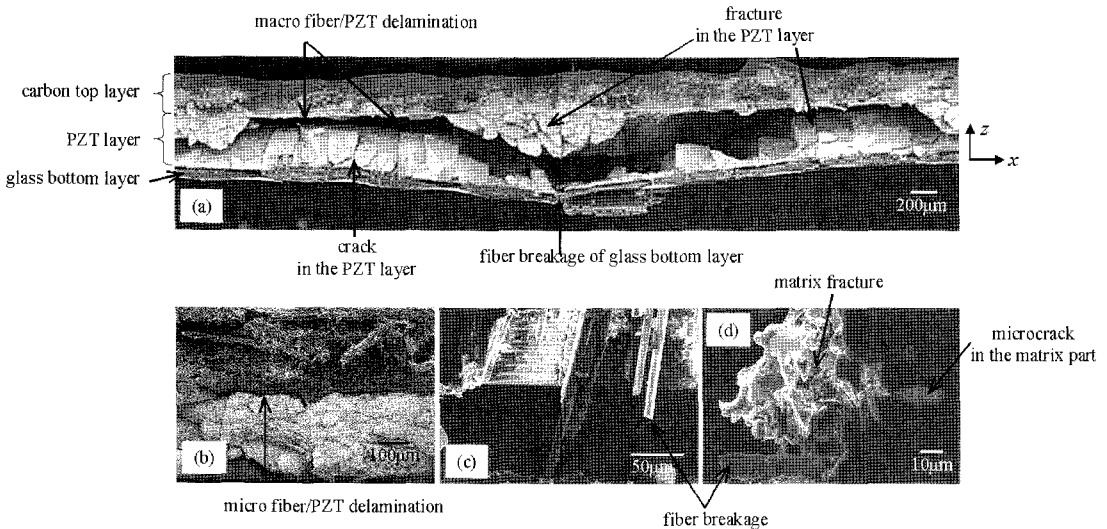


Fig. 10 SEM photographs taken from the fracture surface of PCA-A

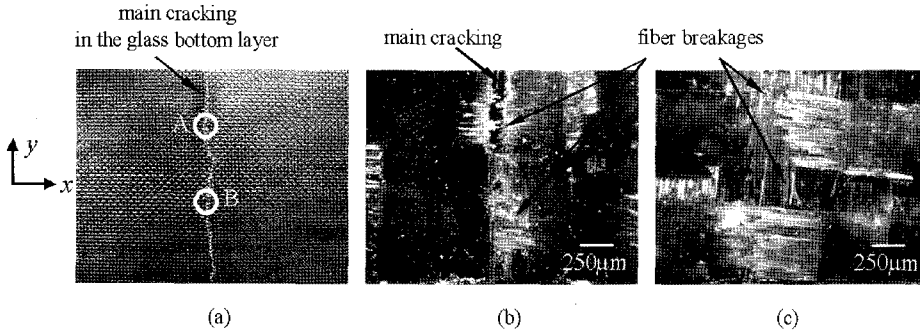


Fig. 11 Optical microscopy observation of damage in PCA-B: (a) the main cracking on the surface of glass/epoxy bottom layer; (b) an enlarged view of area A in photo (a); and (c) an enlarged view of area B in photo (a)

Fig. 11은 PCA-B의 유리섬유 바닥층의 x-y단면을 관찰한 광학현미경 사진들이다. 가장 높은 인장응력을 받은 유리섬유 바닥층에서 (a)와같이 주 균열이 거의 직진형으로 관찰되었지만 굽힘을 받는 동안 가장 높은 압축응력이 작용하는 유리섬유 표피층에서는 손상이 관찰되지 않았다. 이는 섬유강화 복합재료가 인장응력보다 압축응력에 강함을 의미한다. Fig. 11(a)의 A와 B부분을 확대한 (b)와 (c)사진에서는 주 균열이 빠른 속도로 성장하면서 생긴 다량의 섬유파단이 관찰되었다.

이와 같이 PZT가 삽입된 비대칭 압전 복합재료 작동기의 파괴기구는 섬유강화 복합재료의 파괴기구 외에도 PZT층의 취성파괴 및 섬유층과 PZT층의 층간분리를 포함하고 있으며 전술한 AE특성과 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있다.

3.4. 굽힘하중을 받는 PCA의 파괴과정

굽힘시험이 끝난 PCA의 파괴관찰과 AE특성에 근거하여 굽힘하중을 받는 PCA-A의 섬유층과 PZT층의 파괴과정에 따른 균열진전 및 층간분리 성장을 3단계로 분류하여 Fig. 12에 나타낸다. 그림내의 점선은 고전 적층판 이론으로부터 구한 모멘트평형에 의한 중립면의 위치를 나타낸다. (a) step 1은 PZT층에서 취성파괴가 발생하는 단계로서 AE신호가 최초로 감지되는 시점에 대응한다. (b) step 2는 step 1에서 발생한 균열이 섬유와 PZT 경계층 사이의 진전으로 인한 미시적 층간분리 그리고 PZT층 내에서는 지속적인 파괴가 발생하는 단계로서 Fig. 6의 stage I의 전 구간에 걸쳐 발생하였을 것으로

생각된다. (c)step 3은 유리섬유 바닥층의 배면부에 인장응력이 집중되어 이 응력을 견디지 못하고 섬유파단이 발생하여 주 균열이 급진전하는 단계이다. 이 파괴과정 동안에는 PZT층의 균열이 개구형 모드에서 전단형 모드로 천이가 발생하여 층별 파괴 모드가 달라짐에 따라 섬유층과 PZT층 사이에 거시적인 층간분리가 발생하면서 최종 파단에 도달한 것으로 생각된다. PCA-B의 경우에는 중립면의 위치가 PZT층 내에 존재하지만 PCA-A와 비교하여 그 파괴과정이 크게 다르지 않았을 것이다.

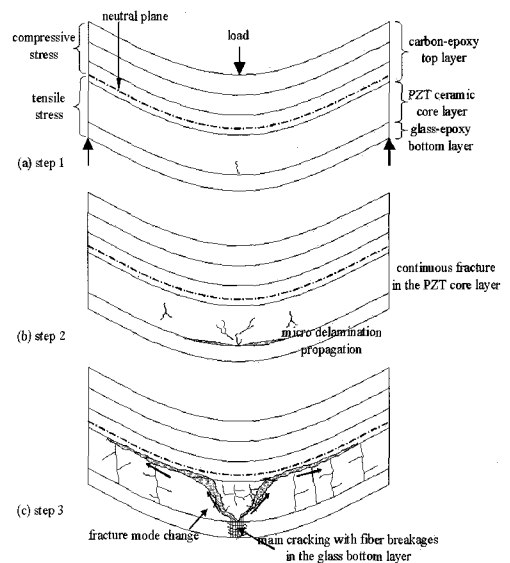


Fig. 12 Fracture process of PCA-A subjected to a bending load

4. 결 론

본 연구에서는 단일 PZT 박판과 비대칭으로 적층된 평판형 압전 복합재료 작동기(PCA)의 파괴과정에 따른 음향방출특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 굽힘하중을 받는 PCA에서 감지된 최초 AE 신호는 PZT층에서의 취성파괴가 발생하는 신호이며 이후 stage I에서 발생하는 지배주파수 대역이 낮고 고진폭의 짧고 긴 유지시간을 갖는 신호들은 섬유파단에 의한 것이 아니라, PZT층에서의 지속적인 파괴와 PZT층과 섬유층의 경계면을 따라 미시적인 층간분리 성장에 관련된 것으로 추정되었다.
- 2) 해당 신호의 주파수영역에서 피크 주파수 및 지배 주파수 대역을 AE인자 거동과 함께 고찰함으로써 굽힘하중을 받는 PCA의 파괴과정에 따른 다중 파괴모드를 감시할 수 있었다.
- 3) 적층구성이 서로 다른 PCA-A와 -B의 굽힘하중 하의 파괴과정에 따른 AE특성은 크게 다르지 않았으므로 굽힘하중을 받는 경우 압전 작동기의 AE특성은 적층순서보다는 모재 파손, 모재-섬유 분리, PZT층과 섬유층 사이의 층간분리, 섬유파단 그리고 PZT층에서의 취성 파괴와 같은 발생원에 영향을 받는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 중점연구소 지원 사업 (과제번호:KRF-2004-005-D00045/D00046) 의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] G. H. Haertling, "Rainbow ceramics - a new type of ultra-high-displacement actuator," Bull. Am. Ceram. Soc. 73. pp. 93-96, (1994)
- [2] R. Hellbaum, R. Bryant and R. Fox, "Thin layer composite unimorph ferroelectric driver and sensor," US patent No. 5632841, (1997)
- [3] A. Haris, N. S. Goo, K. C. Park and K. J. Yoon, "Modeling and analysis for the development of lightweight piezoceramic composite actuators (LIPCA)," Computational Materials Science, Vol. 30, Issues 3-4, pp. 474-481, (2004)
- [4] K. Y. Kim, K. H. Park, H. C. Park, N. S. Goo and K. J. Yoon, "Performance evaluation Lightweight piezo-composite actuator," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 120, pp. 123-129, (2005)
- [5] K. J. Yoon, K. H. Park., S. K. Lee, N. S. Goo and H. C. Park, "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, (2004)
- [6] C. S. Lynch, Y. Berthelot, D. Hopkinson, C. Keller, and A. Be'chet, "Development of stress gradient enhanced piezoelectric actuator composites with integrated ultrasonic NDE capability," ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Washington, DC, (2005)
- [7] M. Teymoori and A. Ebrahim, "Design and simulation of a novel electrostatic peristaltic micromachined pump for drug delivery applications," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 117, pp. 222-229, (2005)
- [8] Y. Liang, Y. Kuga and M. Taya, "Design of membrane actuator based on ferromagnetic shape memory alloy composite for synthetic jet applications," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 121, pp. 1-7, (2005)
- [9] De groot PJ, Wijnen PAM and Janssen RBF, "Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites," Composites Science and Technology, Vol. 55, pp. 405-412, (1995)
- [10] Z. Xingmin and Y. Xiong, "Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission," Composites Science and Technology, Vol. 66, pp. 444-449, (2006)

- [11] S. Hugueta, N. Godina, R. Gaertnera, L. Salmonb and D. Villardb, "Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1433-1444, (2002)
- [12] 이준현, 이진경, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적파괴특성의 온라인 모니터링", *비파괴검사학회지*, Vol. 19, pp. 25-33, (1999)
- [13] 김기복, 윤동진, 정중채, 박휘립, 이승석, "주성분회귀분석 및 인공신경망을 이용한 AE변수와 응력확대계수와의 상관관계해석", *비파괴검사학회지*, Vol. 21, pp. 80-90, (2001)
- [14] 김영복, 민대홍, 이덕보, 최낙삼, "열하중을 받는 복합재료 적층판의 손상에 대한 열-음향방출해석", *비파괴검사학회지*, Vol. 21, pp. 261-268, (2001)
- [15] S. C. Woo, J. H. Kim and N. S. Choi, "Fiber orientation Effects on the fracture process and acoustic emission characteristics of composite laminates," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 25, pp. 451-458, (2005)
- [16] Gang, "Wavelet-based AE characterization of composite materials," *NDT&E International*, Volume 33, pp. 133-144, (2000)
- [17] 우성충, 최낙삼, "유리섬유/알루미늄 혼합 적층판의 파괴과정과 음향방출 특성", *비파괴검사학회지*, Vol. 25, pp. 274-286, (2005)
- [18] S. T. Kim and Y. T. Lee, "Characteristics of damage and fracture process of carbon fiber reinforced plastic under loading-unloading test by using AE method," *Materials Science & Engineering, A*, Vol. 234-236, pp. 322-326, (1997)
- [19] N. S. Choi, K. Takahashi and K. Hoshino, "Characteristics of acoustic emission during the damage process in notched short-fibre-reinforced thermoplastics," *NDT&E International*, Vol. 25, No. 6, pp. 271-278, (1992)
- [20] S. C. Woo and N. S. Choi, "Analysis of fracture process in single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events," *Composites Science and Technology*, (in press)
- [21] S. C. Woo, D. J. Kim and N. S. Choi, "Acoustic emission characteristics of single-edge-notched glass fiber aluminum hybrid laminate," *Key Engineering Materials*, Vols. 306-308 pp. 19-24, (2006)
- [22] S. C. Woo and N. S. Choi, "Analysis of dominant frequencies of glass fiber/aluminum laminates during acoustic emission," *Key Engineering Materials*, Vols. 321-323 pp.901-906, (2006)
- [23] 우성충, 구남서, "잔류 열 변형을 고려한 평판형 압전 복합재료 유니모프 작동기의 해석", *대한기계학회논문집 A권*, Vol. 30(4), pp. 409-419, (2006)
- [24] 우성충, 구남서, "평판형 압전 복합재료 작동기의 작동 변위에 미치는 인가전압 및 구동주파수의 영향", *대한기계학회논문집 A권*, Vol. 30(5), pp. 576-584, (2006)