

## 전기적 피로하중을 받는 압전 작동기의 손상 메커니즘

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

(2008년 4월 16일 접수, 2008년 9월 18일 수정, 2008년 9월 23일 심사완료)

### Damage Mechanisms of a Piezoelectric Actuator under Electric Fatigue Loading

Sung-Choong Woo and Nam Seo Goo

**Key Words:** Electric Fatigue(전기적 피로), Piezoelectric Actuator(압전 작동기), Damage Mechanism(손상 메커니즘), Intergranular Cracking(입계 균열)

#### Abstract

Damage mechanisms in bending piezoelectric actuators under electric fatigue loading are addressed in this work with the aid of an acoustic emission (AE) technique. Electric cyclic fatigue tests have been performed up to  $10^7$  cycles on the fabricated bending piezoelectric actuators. An applied electric loading range is from  $-6$  kV/cm to  $+6$  kV/cm, which is below the coercive field strength of the PZT ceramic. To confirm the fatigue damage onset and its pathway, the source location and distributions of the AE behavior in terms of count rate and amplitude are analyzed over the fatigue range. It is concluded that electric cyclic loading leads to fatigue damages such as transgranular damages and intergranular cracking in the surface of the PZT ceramic layer, and intergranular cracking even develops into the PZT inner layer, thereby degrading the displacement performance. However, this fatigue damage and cracking do not cause the final failure of the bending piezoelectric actuator loaded up to  $10^7$  cycles. Investigations of the AE behavior and the linear AE source location reveal that the onset time of the fatigue damage varies considerably depending on the existence of a glass-epoxy protecting layer.

#### 1. 서 론

소형 경량이면서 우수한 작동변위와 응답특성을 지닌 압전 작동기는 인공근육형 로봇의 추진 및 작동시스템, 위치제어, 초소형 비행기의 형상 가변의 그리고 능동 진동제어가 요구되는 시스템 등에 응용되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 특히, 비 작동층이 섬유 강화 복합재료로 이루어진 유니모프 압전 복합재료 작동기(PCA)의 경우 금속재료와 PZT (lead

zirconate titanate) 세라믹으로 구성된 압전 작동기에 비해 작고 가벼우면서 동시에 우수한 작동성능을 갖추고 있는 것으로 밝혀졌으며 적층 각을 조절함으로써 설계의 유연성을 갖게 되었다.<sup>(3)</sup> 최근에는 가용 사이즈와 무게가 제한적인 마이크로 펌프<sup>(4)</sup> 그리고 큰 작동력이 요구되는 생체 모방 소형 로봇 시스템 등으로 그 응용 범위가 확대되고 있는 추세이다. 하지만 PCA는 PZT세라믹과 섬유강화 복합재, 이들 이종 재료의 접합으로 인해 야기될 수 있는 층간분리, 성형 후 각 재료의 열팽창계수의 차이로 발생하는 잔류응력 그리고 PZT세라믹 자체의 상당히 취성적인 재료적 특성 등의 다양한 문제점을 안고 있다. 또한, PCA는

<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, 인공근육 및 스마트로봇 센터

작동용 또는 제어를 위한 목적으로 개발되어왔기 때문에 지금까지 이들에 대한 연구는 작동성능의 향상에 관한 연구에 편중되었다.

압전 작동기는 사용 환경에 따라 전기장 또는 이와 동시에 기계적인 반복하중에 노출된다. 장시간 동안 이러한 환경 하에 노출되면 작동기 내에 피로 균열이 발생하여 성장하고 최종적으로는 작동기의 고장을 초래할 수 있다. PCA에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔으나<sup>(5-8)</sup> 이들의 피로 특성을 작동기의 성능변화와 관련지어 연구한 사례는 국내외적으로 거의 전무한 실정이다. 뿐만 아니라 앞서 언급한 문제점들은 면외 하중(out of plane loading)에 취약한 섬유강화 복합재료와 취성재료인 PZT세라믹으로 이루어진 작동기의 건전성과 신뢰성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 전기적 반복하중 하에서 장기간 사용되는 PCA의 건전성과 신뢰성을 위해서 전기적 반복하중하의 피로특성을 PCA의 작동성능과 연계하여 평가할 필요가 있다. 또한, 손상의 개시와 성장에 대한 정보는 작동기의 성능과 직결되므로 전기적 피로에 의한 손상 메커니즘을 규명하는 것은 이의 실용적인 측면에서도 중요하다.

지금까지 섬유강화 복합재료 및 단일 PZT세라믹에 대한 개별적인 피로특성에 관한 연구는 활발히 진행되어 왔다. PZT세라믹의 주요 손상 메커니즘에는 노화,<sup>(9)</sup> 피로,<sup>(10)</sup> 균열<sup>(11)</sup> 그리고 절연파괴(dielectric breakdown)<sup>(12)</sup>에 의한 것으로 널리 알려져 있다. 특히, 전기적 반복하중에 의해 발생하는 피로 손상은 절연 파괴와 거시적인 균열뿐만 아니라 사용 초기에 재료의 물성을 저하시키기 때문에 가장 치명적인 것으로 알려져 있다. 한편, 섬유강화 복합재료의 피로거동은 구성재료, 미시적 구조 그리고 하중 형식에 따라 다르게 나타나며 피로손상은 미소균열의 생성과 합체에 의한 누적된 결과로써 모재균열, 섬유와 모재사이의 분리, 층간분리 그리고 섬유파단과 같은 형태로 나타난다.<sup>(13,14)</sup>

저자들은 선행연구<sup>(15-20)</sup>에서 섬유강화 복합재료를 이용하여 비대칭 적층구조를 갖는 평판형 압전 복합재료 작동기에 대해 성형시의 냉각과정에서 발생하는 잔류 열 변형 효과를 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하고 PZT 두께, 적층구조, 경계조건이 횡 방향 작동변위에 미치는 영향을 규명하였다. 이 결과에 근거하여 압전 작동기

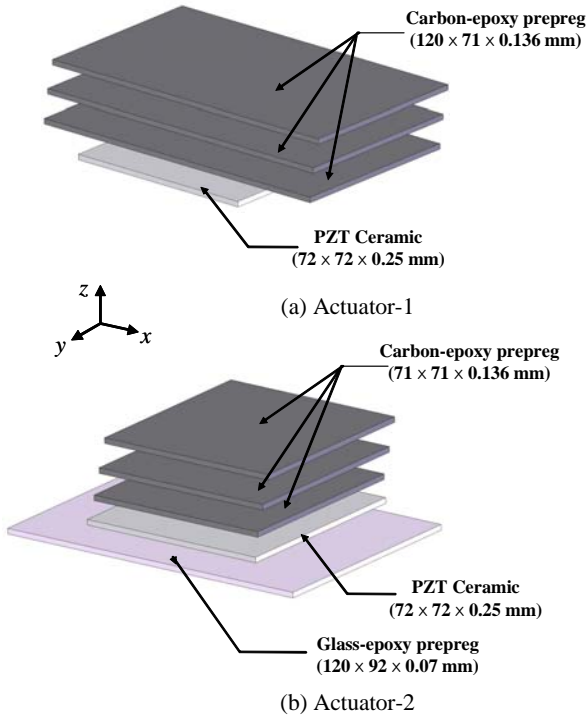
를 제작하고 성능실험을 통하여 연구범위 내에서 최대의 작동변위 및 작동력을 갖는 적층구조를 찾았다. 또한 준정적 기계적 굽힘 하중을 받는 평판형 압전 작동기에 대해 음향방출법(AE)을 이용한 비파괴 평가법을 적용하여 굽힘 파괴 과정과 파손 메커니즘을 규명하고 건전성을 평가한 바가 있다.

본 연구에서는 선행연구에서 작동성능이 가장 우수하였던 적층구조를 갖는 작동기(actuator-2)와 바닥 층이 복합재료로 보강되지 않은 작동기(actuator-1)를 대상으로 이들의 전기적 피로에 의한 손상 메커니즘을 작동성능의 변화와 관련지어 평가한다. 또한, 피로시험과 병행하여 작동기 내부에서 발생하는 손상 메커니즘을 비파괴 평가법 중의 하나인 음향방출 신호해석과 파면 관찰을 통하여 확인한다.

## 2. 실험

### 2.1 압전 작동기 제작

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 두 가지 형태의 압전 작동기 구조를 나타낸다. 선행연구<sup>(16-19)</sup>의 결과에 따르면 actuator-2는 시뮬레이션과 작동시험 결과 적층구조의 영향으로 인해 우수한 작동력 및 작동변위를 나타내었다. 작동기를 구성하는 재료의 적층순서에 따라 강성 및 성형 후 저장에너지가 달라져서 작동성능에 큰 영향을 미치게 된다. Actuator-2와 비교해 볼 때 actuator-1은 유리섬유 바닥 층이 없는 경우로써 PZT층의 보호 유무가 작동기의 피로특성과 작동성능에 미치는 영향을 파악하고 PZT층에서의 피로손상을 용이하게 관찰하기 위하여 실험대상에 포함시켰다. 압전 작동기 제작을 위해서는 압전재료로 널리 사용되고 있는 PZT 웨이퍼(3203HD, CTS Co.), 평직형 탄소섬유-에폭시 프리프레그(WSN1K-B, SK Chemicals) 그리고 평직형 유리섬유-에폭시 프리프레그(GEP108, SK Chemicals)를 사용하였다. 평직형 섬유강화 복합재료를 사용한 이유는 성형 후 고른 곡률을 유도하기 위함이다. 또한 두께방향의 강화를 통하여 층간분리에 대한 저항성을 높이고 기존의 일방향 복합재료보다 높은 횡방향 강도를 가짐으로써 충격하중에 대한 저항성을 높이기 위해서다.<sup>(21)</sup> 적층시 전압공급을 위해 PZT 아래·위에 구리선을 배치하였다. PZT층과 섬유



**Fig. 1** Configurations of piezoelectric actuators: (a) actuator-1; (b) actuator-2. The poling direction of the PZT is along the z-axis, from the bottom to the top

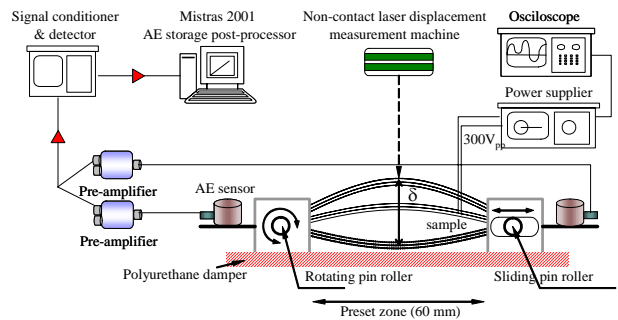
층 사이의 접합은 경화과정 동안 수지의 자연적인 흐름을 통해 이루어졌다. Fig. 1과 같이 hand lay-up 방법으로 적층한 후, 경화 사이클에 따라 오토클레이브 내에서 진공백 방식으로 180분 동안 성형하였다.

2.2 전기적 피로시험

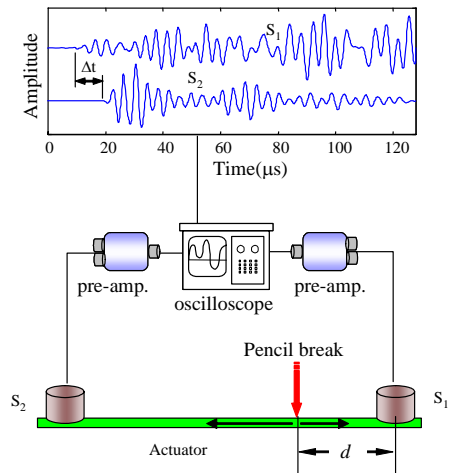
Fig. 2는 전기적 피로시험 동안의 굽힘 작동변위를 측정하고 작동기에서 검출되는 AE신호를 실시간으로 감시하기 위한 전체적인 실험장치의 개략도를 나타낸다. 72 mm의 간격을 갖는 지지대 위에 작동기를 위치시켜 전압 공급기 (Face International Co.)를 이용하여  $\pm 6$  kV/cm 교류 전압을 정현파의 형태로 PZT에 인가하였다. 사전에 각 작동기별 공진주파수(최대 작동변위는 내는 주파수)를 측정한 결과 actuator-1은 24 Hz 그리고 actuator-2는 13.1 Hz이었다. 실험조건을 동일하게 하기 위하여 구동주파수는 actuator-2의 공진주파수인 13.1 Hz로 정하고  $10^7$  사이클까지만 전기적 피로시험을 각 작동기별로 3회씩 수행하였다. 작동변위는 비 접촉식 레이저 변위계 (Keyence

**Table 1** Basic setting of the AE measurement system

Model of AE sensor	Micro30, PAC
Channel	2
Pre-amplifier gain	40 dB
Threshold level	45 dB
High filter	< 600 kHz
Low filter	> 40 kHz
Event lock out time	1 ms
Length of event	1 k (0.256 ms)



**Fig. 2** Schematic of experimental set-up for an electric cyclic fatigue test and in-situ acoustic emission monitoring

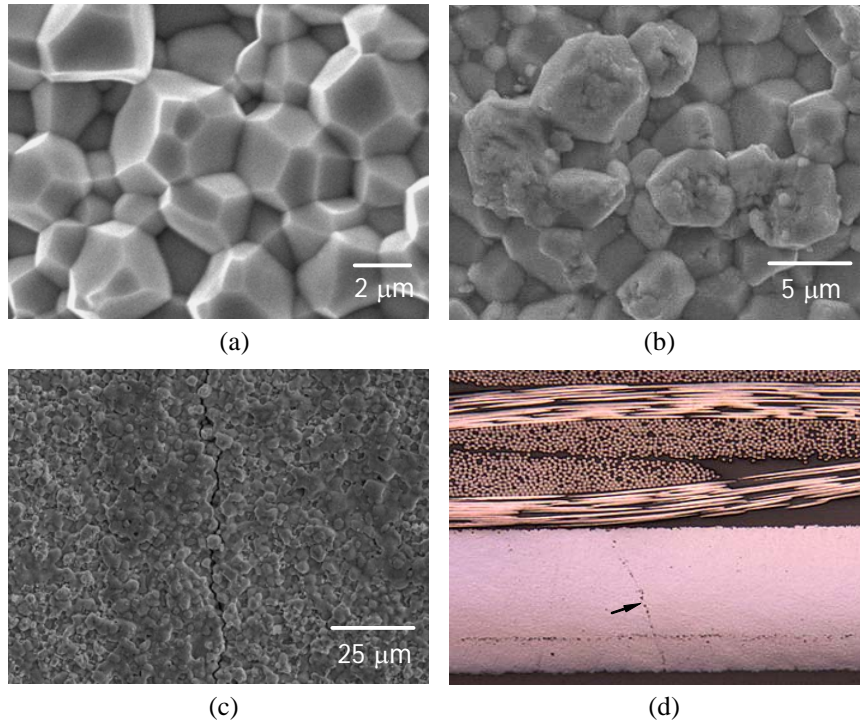


**Fig. 3** Measurement of AE wave speed

LK-081)를 이용하여 시험편의 위치로부터 시험편 중앙지점의 횡방향 굽힘 변위를 측정하였다.

2.3 음향파의 속도 측정

음향방출 발생원의 정확한 위치표정과 두 센서 사이에서 발생하는 신호만을 탐지하고 이외의 영역에서 발생하는 노이즈를 제거하기 위하여 Fig.



**Fig. 4** Micrographs of actuator-1: (a) grains and boundaries on the surface of PZT ceramic with no electric cyclic loading; (b) dominant transgranular fatigue damages loaded up to  $10^7$  cycles; (c) an intergranular fatigue main crack propagated across the center of surface; (d) crack developed from the bottom surface to the top surface of the PZT ceramic layer

3과 같은 음향파 측정시스템을 구현하여 작동기 표면에서의 전파 속도를 측정하였다. 서로 비슷한 특성을 갖는 2개의 공진형 AE 센서  $S_1$ ,  $S_2$ 를 작동기의 한쪽 표면에 일정거리를 두어  $S_1$ 의 위치로부터  $d$  만큼 떨어진 위치에서 연필심을 파단시켜 음원을 발생시킨 후, 탄성파가 두 센서에 각각 도달하는데 걸리는 시간차를 구하고 연필심 파단 위치로부터 각 센서간의 거리차를 측정하여 전파속도를 구하였다. 10회 반복하여 측정된 음파의 속도의 평균값은 약 2910 m/s이었으며 이 값은 위치표정을 계산하는 시스템 알고리즘의 입력 값으로 설정하였다.

#### 2.4 AE 측정 및 손상역 관찰

피로시험동안 발생하는 AE신호를 측정하기 위해 100~600 kHz의 유효 주파수 범위를 갖는 압전형 AE센서(Micro30, PAC) 2개를 작동기의 측면 탭에 진공 그리스를 사용하여 Fig. 2와 같이 고정하였다. 감지된 AE신호는 전치증폭기에 의해 증폭된 후 AE본체 (Mistras 2001, PAC)에 저장된다.

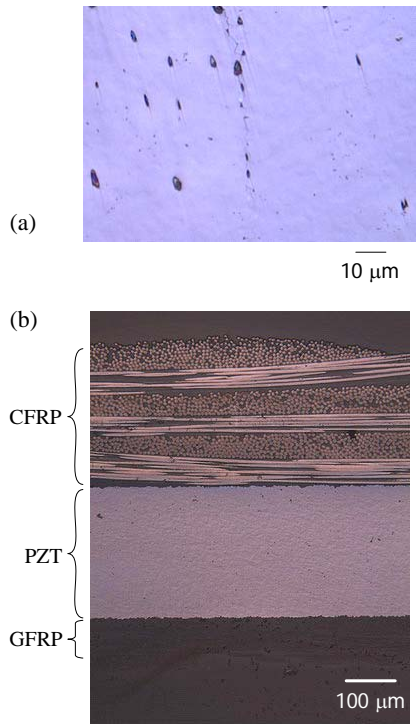
Table 1은 AE측정을 위한 기본 설정 값을 나타낸 것이다.

피로 시험 후, 피로 손상 부위를 절취하여 폴리싱 과정을 거친 후 주사전자현미경(SEM)과 반사식 광학현미경을 이용하여 작동기의 손상역을 정밀 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피로균열 및 피로파면

Fig. 4는 actuator-1의 PZT세라믹 표면을 SEM으로 관찰한 파면을 보여준다. Fig. 4(a)는 피로시험을 하기 전 PZT표면을 관찰한 것으로써, 세라믹 결정립의 평균 크기는 약 1-3  $\mu\text{m}$ 였고 피로하중을 받지 않았기 때문에 손상되지 않은 결정립과 입계를 보여주고 있다. 이에 반해  $10^7$  사이클까지 전기적 피로 하중을 받은 PZT층 표면(Fig. 4b)에서는 입내 파괴 (transgranular fracture)가 지배적으로 관찰되었으며 입계 파괴 (intergranular fracture)는 거의 관찰되지 않았다. 전기적 하중을 받는 PZT세라믹의 경우, 균열은 입계에서가 아니라 입



**Fig. 5** Micrographs of actuator-2: (a) surface crack on the PZT ceramic; (b) no fatigue damages in PZT ceramic and fiber composite layers

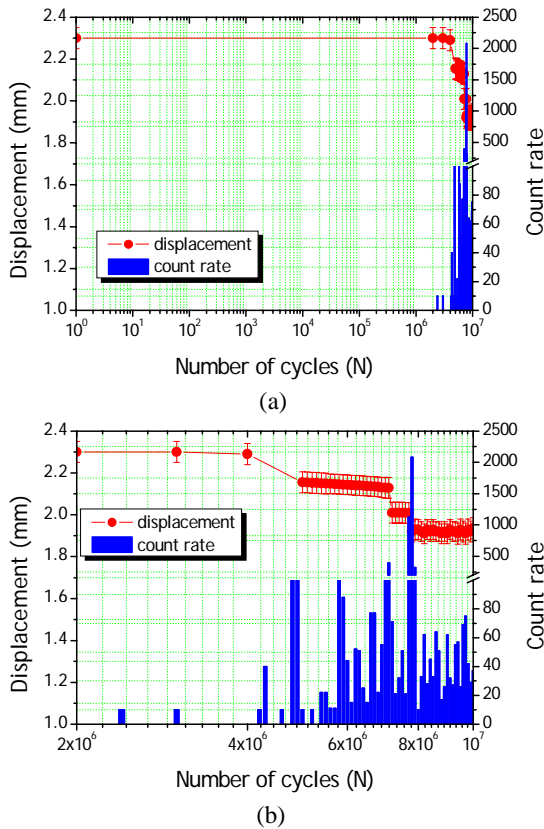
내 균열의 형태로 나타난다는 Chung 등<sup>(22)</sup>의 연구 결과와 일치하고 있다. 이와는 대조적으로 작동기의 최대 굽힘 변위가 발생하는 PZT의 중앙 표면에서 관찰한 사진(Fig. 4c)에서는 전기적 피로에 의한 주 균열이 입계를 따라 뚜렷하게 진전되어 있었으며 육안으로도 쉽게 식별이 가능하였다. 일반적으로 전기적 피로하중을 받는 PZT에서의 균열은 인가전압이 항전계(Coercive Field Strength,  $E_c$ ) 이상일 때 발생하는 것으로 알려져 있으나<sup>(23)</sup> 본 연구에서 가한 전압은 PZT세라믹의  $E_c$ 인 8 kV/cm 범위 내에 있다. 이와 같은 피로 균열은 작동기가 굽힘 거동을 할 때 균열 선단에 국부적으로 응력이 집중되면서  $E_c$ 를 초과하여 균열이 성장한 것으로 생각된다.<sup>(24)</sup> 또한, 균열의 좌우에 PZT세라믹이 높은 전압에 장시간 노출되어 녹아내린 흔적도 관찰되었다. 그럼에도 불구하고 주 균열 좌우로는 여전히 입내파괴가 지배적이었다. Fig. 4(d)는 Fig. 4(c)의 단면을 폴리싱 과정을 거친 후 반사식 광학현미경으로 관찰한 사진으로, PZT층 표면에서 생성된 균열이 PZT 내부로까지 진전되어 있었다. 그러나 섬유강화 복합재층에서는 피로에 의한 손상이 관찰되지 않았다.

Actuator-2의 경우, PZT 아래위로 복합재로 보호되어 있기 때문에 손상상태를 육안으로 관찰할 수 없다. 따라서 PZT층을 정밀 관찰하기 위해 정밀절단기를 이용하여 균열발생이 예상되는 지점(최대 굽힘 변위가 발생하는 지점)을 절취한 다음 알루미나 분말( $Al_2O_3$  powder, grade 0.01  $\mu m$ )을 이용하여 폴리싱 작업을 하였다. Fig. 5는 그 파면을 반사식 광학 현미경으로 관찰한 결과이다. Fig. 5(a)와 같이 PZT세라믹 표면에서 균열이 생성되어 진전해 있는 반면 이의 단면을 관찰한 사진(Fig. 5b)에서는 actuator-1과는 달리 PZT층에서 균열이 발생되지 않았다. 즉 PZT에서의 표면 균열이 발생하였지만 GFRP 바닥 층이 PZT층을 보호하고 있었기 때문에 표면 균열은 내부로 성장하기 어려웠던 것이다. Actuator-1과 마찬가지로 섬유강화 복합재 층에서의 손상은 관찰되지 않았다. 파면 관찰 결과, PZT층의 보호유무에 따라 작동기의 피로손상 진전은 상이하였으며 전기적 피로에 의한 이와 같은 손상들은 작동기의 성능에 적지 않은 영향을 미쳤을 것이다.

### 3.2 Actuator-1의 전기적 피로거동

Fig. 6은 13.1 Hz로 가진 하였을 때 actuator-1의 작동 사이클 증가에 따른 횡방향 굽힘 변위와 이에 대응하는 음향방출 사상률의 거동을 나타낸 것이다. 사상률은  $10^5$  사이클 당 음향방출 사상 발생수로 정의되며 굽힘 변위는  $-6$  kV/cm와  $+6$  kV/cm에서 각각 측정된 절대변위의 총 합이다. 작동 초기 변위는 2.3 mm이었으며 최초 AE 발생 시점인  $2.4 \times 10^6$  사이클까지 작동변위는 거의 감소하지 않았다. 하지만, 약  $5.0 \times 10^6$  그리고  $7.2 \times 10^6$  사이클에서 뚜렷한 변위의 감소를 보였으며 이 시점에서 AE 발생률이 비교적 높았다. 즉 작동기 내부에서 거시적인 손상이 발생한 것이다. 또한  $7.8 \times 10^6$  사이클에서 6.1%의 변위 감소와 함께 AE 발생률은 최대에 이르렀다. 이는 이 시점에서 작동기의 PZT층에서 Fig. 4(c)와 같은 입계 균열이 PZT층에서 빠른 속도로 진전하였기 때문이며 육안으로도 관찰할 수 있었다. 하지만 PZT 표면에서의 균열이 작동기의 최종 고장을 초래하지는 않았다. 굽힘 변위의 감소가 없거나 미미한 구간에서는 AE 발생률이 매우 낮은 수준임을 알 수 있는데 Fig. 4(b)와 같이 PZT 결정립 내에서 입내파괴(전기적 피로에 의한 미소균열)가 지속적으로

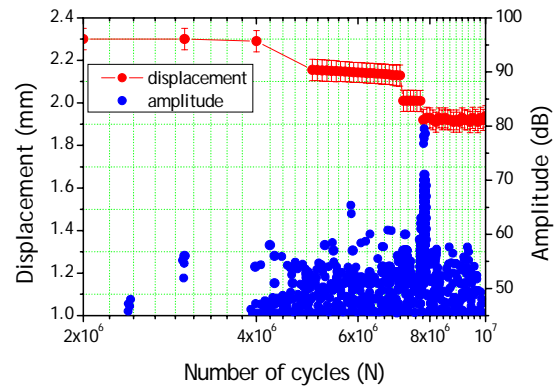




**Fig. 6** Behavior of displacement and the AE count rate with increasing the number of cycles for actuator-1: (a) the entire cycling loading and (b) the loading range between  $2 \times 10^6$  and  $10^7$  cycles.

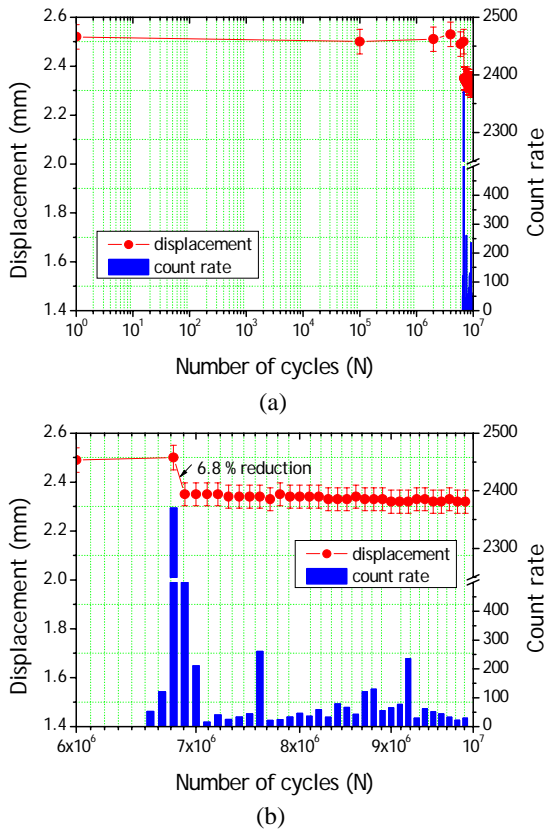
발생한 것으로 보인다.

전기적 피로에 의한 손상 발생원과 진전과정을 더욱 면밀히 조사하기 위해  $2 \times 10^6 \sim 10^7$  사이클 구간에서 발생한 변위거동과 AE진폭의 분포를 Fig. 7에 도시하였다. 최대 AE 발생지점인  $7.8 \times 10^6$  사이클에서 75 dB 이상의 고진폭 신호들이 발생<sup>(25)</sup>하였으며 이와 동시에 변위도 크게 감소한 반면,  $7.8 \times 10^6$  이후에서  $10^7$  사이클 구간에서는 AE 발생률도 낮은 수준이며 45-60 dB 사이의 비교적 중·저진폭 신호들만이 탐지되었다. 작동기가 전기적 하중을 받는 동안 PZT세라믹은 면내 방향으로 압축과 팽창을 반복하게 되고 모멘트 평형에 의한 중립면이 PZT층 상부에 존재하여<sup>(15,16)</sup> 작동기는 굽힘 거동을 하게 된다. 이로 인해 PZT표면에 생성된 균열은 열림 및 닫힘 거동을 반복하게 되고 이러한 과정에서 균열 면 (crack face) 사이에서 마찰에 의한 미시적 마멸



**Fig. 7** Behavior of displacement and the AE amplitude for actuator-1 between  $2 \times 10^6$  and  $10^7$  cycles.

및 미끄러짐이 지속적으로 발생하게 된다. 따라서 피로균열이 생성된 이후 탐지된 중·저진폭의 신호들은 입내손상과 균열면 사이에서 발생한 미시적 손상에 의한 것으로 여겨진다. Fig. 4의 파면관찰과 Figs.6-7의 변위 및 AE거동을 종합하면, 전기적 하중을 받는 굽힘 압전 작동기에서 발생하는 초기 손상원은 PZT층 결정립 내에서의 미시적 피로손상(입내 파괴)에 의한 것이며 이러한 입내 파괴는 작동기의 변위감소에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 보인다. 또한, 작동 사이클이 증가함에 따라 굽힘 변위는 일정하게 감소하는 것이 아니라 오직 입계균열이 성장하는 동안에만 단계적으로 발생하며 이 때 고 진폭의 AE신호가 집중적으로 발생한 것을 보아 PZT 표면에서 발생한 입계균열이 작동기의 성능을 감소시키는 지배적인 인자로 생각된다. PZT세라믹에서의 균열은 인가전압이  $E_c$  이상인 경우에서만 발생한다고 일반적으로 알려져 있다. 하지만 본 연구에서 적용한 인가전압은  $0.75 E_c$ 에 해당한다. 그럼에도 불구하고 명백히 균열이 발생하였다. 이는 입내 손상이 지속적으로 누적되어 입계에서 균열이 개시되고 균열선단에서 국부적인 전압이  $E_c$ 를 넘어서서 발생된 것으로 볼 수 있다.<sup>(24)</sup> 또한, 선행 연구의 결과를 보면 굽힘 거동을 하는 압전 작동기의 경우, 최대 응력은 PZT층과 섬유 바닥층 사이의 층간에서 발생한다. 따라서 파괴인성이 낮은 PZT층에서 균열이 개시하여 PZT 내부로 성장한 것이다. Actuator-1의 경우,  $10^7$  사이클에서 측정된 변위는 약 1.94 mm로써 작동초기 변위 2.3 mm에

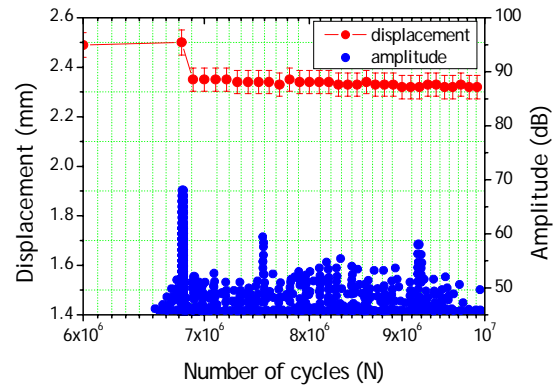


**Fig. 8** Behavior of displacement and the AE count rate with increasing the number of cycles for actuator-2: (a) the entire cycling loading range and (b) the loading range between  $6 \times 10^6$  and  $10^7$  cycles

비해 15.8 % 감소하였다.

3.3 Actuator-2의 전기적 피로거동

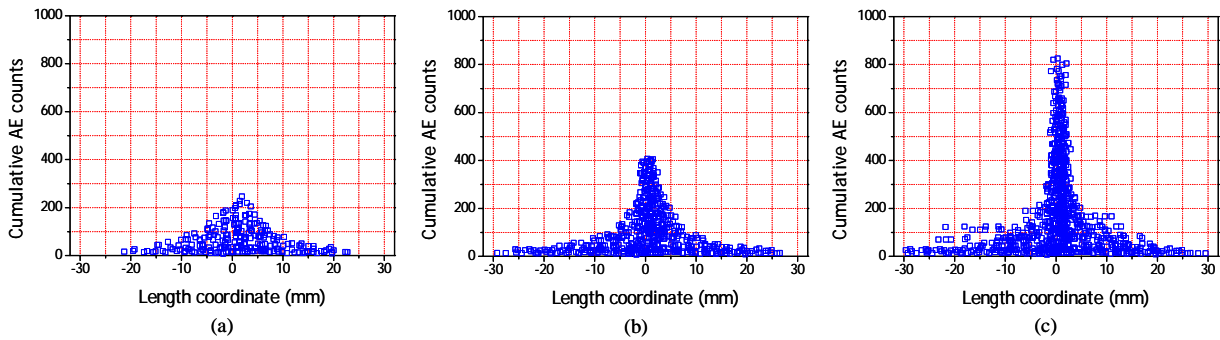
Fig. 8은 PZT세라믹 아래-위로 섬유강화 복합재로 보호되어 있는 actuator-2의 전기적 피로 시험 결과를 나타낸다. 전체적인 굽힘 변위 및 AE거동은 actuator-1과 비교하여 상당히 다르게 나타났다. 작동 초기 변위는 2.52 mm로 측정되었으며 actuator-1보다 약간 높은 값이다. 압전 작동기는 공진주파수에서 최대의 작동성능을 나타내는데<sup>(20)</sup> 구동 주파수 13.1 Hz는 actuator-2의 실험으로 측정된 공진주파수이다. 이로부터 압전 작동기의 작동성능은 구동 주파수를 조정함으로써 제어할 수 있다. 최초 AE신호는  $6.6 \times 10^6$  사이클에서 발생하기 시작하였다. Actuator-1이  $2.4 \times 10^6$  사이클에서 AE발생이 시작된 것에 비하면 초기 손상시점이 상당히 지연되었음을 알 수 있다. 이후 AE



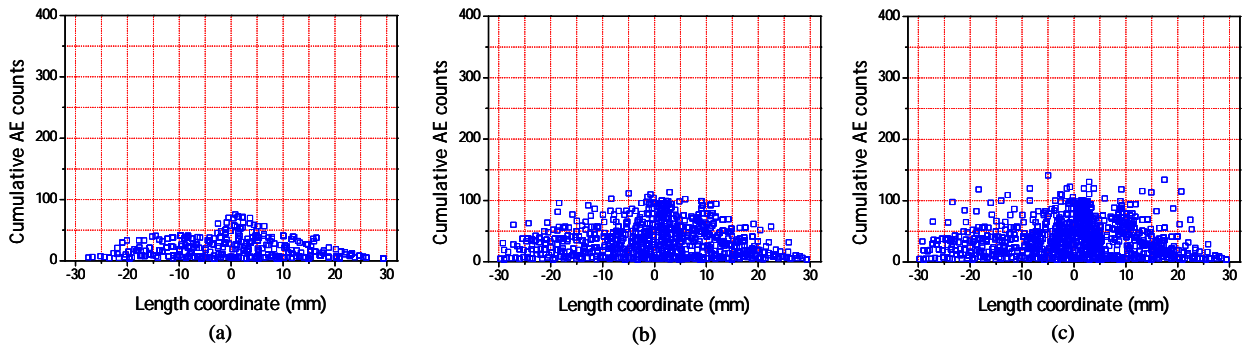
**Fig. 9** Behavior of displacement and the AE amplitude for actuator-2 between  $6 \times 10^6$  and  $10^7$  cycles

발생률은 최대 사상률 발생지점인  $6.9 \times 10^6$  사이클까지 급격히 증가하였으며 이 시점에서 측정된 변위는 2.35mm로 작동초기의 변위보다 6.8% 감소하였다. 강유전체인 PZT에서 AE 발생률은 미소 균열의 생성<sup>(26)</sup> 그리고 분역 반전 (domain switching)<sup>(27)</sup>에 의해 증가하는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서 사용한 PZT는 약  $\pm 8.2$  kV/cm에서 분역 반전이 발생하므로 Fig. 8에서 초기 AE 발생률이 증가하는 것은 작동기 내부에서 Fig. 5(a)와 같은 균열이 개시하여 진전하였기 때문이다. 이후 천만 사이클까지 AE발생률은 급감하였고 굽힘 변위의 감소율도 상당히 미약한 수준이었다. 변위와 AE발생률의 거동을 감안할 때, 최대 사상률 발생지점에서 생성된 균열은 더 이상 급진전 하지 않았거나 다른 거시적 손상이 발생하지 않은 것으로 생각된다. 이는 actuator-2의 경우 PZT세라믹 아래-위로 섬유강화 복합재로 적층되어 있어 PZT세라믹에서의 균열성장을 저해하였기 때문이다.

Fig. 9에는 사이클 증가에 따른 AE진폭의 분포를 나타내었는데 최대 사상률 발생시점 이전에는 45-53 dB의 저진폭 신호가 주류를 이루었으나 최대 사상률의 발생지점인  $6.9 \times 10^6$  사이클에서는 45-69의 비교적 높고 낮은 신호들이 집중적으로 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 AE특성은 Fig. 4(b)와 같이 입내에서 미시적인 피로손상이 누적되어 균열 발생이 용이한 입계에서 균열이 발생하였음을 말해주고 있다. 이후 AE진폭의 분포는 다시 낮아졌다. 이러한 AE진폭의 특성을 고려해



**Fig. 10** Location of the detected AE counts for actuator-1: (a) at  $6.0 \times 10^6$  cycles; (b) at  $7.2 \times 10^6$  cycles; (c) at  $10^7$  cycles



**Fig. 11** Location of the detected AE events for actuator-2: (a) at  $7.0 \times 10^6$  cycles; (b) at  $9.0 \times 10^6$  cycles; (c) at  $10^7$  cycles

볼 때, actuator-2의 경우 PZT층에서 입내 피로손상이 지배적이었음을 알 수 있다.  $10^7$  사이클에서 측정된 굽힘 변위는 2.32 mm로써 작동초기 변위에 비해 7.9 % 감소하였으며 actuator-1의 변위 감소율(15.8%)에 비해 낮은 수준이다. Fig. 5에서 확인되었듯이, 이는 PZT층 아래위로 섬유강화 복합재료로 보호되어 있는 actuator-2의 경우 PZT층에서의 표면 균열이 층 내로 진전하지 않아 작동 성능의 감소가 크지 않았던 것이다.

### 3.4 위치표정

Fig. 10은 actuator-1에 대하여 특정 사이클 단계에서 기록한 위치표정의 결과를 나타낸 것이다. x축 상의 -30에서 +30의 길이는 AE 센서1과 센서2 사이에 미리 설정된 유효 위치표정 영역을, 사각기호는 누적된 AE 사상수를 각각 나타낸다.  $6.0 \times 10^6$  사이클(Fig. 10a)에서부터 균열진전 경로에 위치표정이 많은 것을 알 수 있다.  $7.2 \times 10^6$  사이클(Fig. 10b)에서는 균열이 생성된 지점에서 AE 발생수의 분포가 더욱 두드러졌으며 위치표정 영

역도 압전 작동기 길이방향으로 확대되었음을 알 수 있다. 피로시험 종료시점인  $10^7$  사이클(Fig. 10c)에서는 PZT층에서의 표면 균열이 입계를 따라 성장하고 심지어 내부층으로 표면 균열이 진전한 상태이기 때문에 균열진전 위치에서 상당량의 신호가 집중되었을 뿐만 아니라 균열 진전 경로 이외의 영역에서도 AE신호들이 다량 감지되었다.

Fig. 11은 actuator-2에 대하여 특정 사이클 단계에서 기록한 위치표정의 결과를 나타낸 것이다. Actuator-1과는 달리, 사이클이 증가함에 따라 균열 진전 위치 이외의 영역에서도 많은 AE신호들이 누적되었는데, 이는 Fig. 5(b)에 나타내었듯이 PZT층에서 발생한 균열이 보강되어 있는 섬유바닥층 때문에 PZT층 내로 성장하지 못하였기 때문이다. 이와 같은 이유로, 물론 actuator-2에서도 PZT층에서 균열은 관찰되었지만, 누적된 AE 활성화도 측면에서도 actuator-1에 비해 상당히 낮음을 알 수 있다.



#### 4. 결 론

본 연구에서는 적층구성이 다른 압전작동기에 대해 전기적 피로하중하의 손상 메커니즘을 음향 방출법과 파면분석을 통해 고찰하고 전기적 피로 손상이 작동기의 성능에 어떤 영향을 미치는지 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전기적 피로 하중에 의해 발생하는 압전 작동기의 손상은 PZT층에서 입내 파괴로부터 개시하며 사이클이 증가함에 따라 이 피로손상이 누적되고 또한 결정립계에서 응력이 집중되어 피로 균열이 발생하였다. 사이클 증가에 따른 작동기의 변위 감소 거동은 연속적이거나 점진적으로 감소하는 것이 아니라 오직 입계 균열이 성장하는 동안에만 단계적으로 발생하였다. 이와 같은 결과는 본 연구에 소개된 압전 작동기가 굽힘 거동을 하기 때문이다.

(2) 섬유강화 복합재 층에서는 전기적 피로에 의한 손상을 관찰할 수 없었는데 이는 복합재가 강한 취성을 보이는 PZT세라믹에 비해 상당히 유연하며 작동시의 굽힘 변위가 복합재료의 손상을 초래할 정도로 크지 않았기 때문이다.

(3) 음향방출법을 이용한 신호해석, 파면관찰 그리고 작동변위의 감소율을 하중이력에 따라 고찰함으로써 전기적 피로하중을 받는 압전작동기의 파손 메커니즘을 효과적으로 파악할 수 있었다.

(4) Actuator-2는 선행 연구에서 가장 우수한 작동 변위 및 작동력을 지닌 것으로 입증되었으며 천만 사이클까지 전기적 피로시험을 작동성능과 관련지어 시험한 결과 굽힘 변위의 감소는 크지 않았고 최종 고장을 초래하지도 않았다. 보다 폭 넓은 분야에 적용되기 위해서는 더욱 더 긴 사이클 동안에서의 피로특성에 관한 연구가 요구된다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

(1) Heo, S., Wiguna, T., Goo, N.S. and Park, H.C.,

- 2007, "Mechanical Design, Fabrication and Test of a Biomimetic Fish Robot Using LIPCA as an Artificial Muscle," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 1, pp. 36~42.
- (2) Akella, P., Chen, X., Cheng, W., Hughes, D. and Wen, J.T., 1994, "Modelling and Control of Smart Structures with Bonded Piezoelectric Sensors and Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, pp. 344~353.
- (3) 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.
- (4) Teymoori, M. and Ebrahim, A., 2005, "Design and Simulation of a Novel Electrostatic Peristaltic Micromachined Pump for Drug Delivery Applications," *Sensors and Actuators A*, Vol. 117, pp. 222~229.
- (5) Uchino, K., 1998, "Piezoelectric Ultrasonic Motors:Overview," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, pp. 273~285.
- (6) Wood, R.J., Steltz, E. and Fearing, R.S., 2005, "Optimal Energy Density Piezoelectric Bending Actuators," *Sensors and Actuators A*, Vol. 119, pp. 476~488.
- (7) 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
- (8) 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.
- (9) Robels, U., Schneider-Stormann, L., and Arlt, G., 1995, "Dielectric Aging and Its Temperature Dependence in Ferroelectric Ceramics," *Ferroelectrics*, Vol. 168, pp. 301~311.
- (10) Pan, M.J., Park, S.E., Park, C.W., Markowski, K.A., Yoshikawa, S. and Randall, C.A., 1996, "Superoxidation and Electrochemical Reactions during Switching in Pb(Zr<sub>2</sub>Ti)O<sub>3</sub> Ceramics," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 79, pp. 2971~2974.
- (11) Atsushi, F. and Kenji, U., 1993, "Dynamic Observation of Crack Propagation in Piezoelectric Multilayer Actuators," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 76, pp. 1615~1617.

- (12) Chen, X., Kingon, A.I., Al-Shareef, H. and Bellur, K.R., 1994, "Electrical Transport and Dielectric Breakdown in Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> Thin Films," *Ferroelectrics*, Vol. 151, pp. 133~138.
- (13) Gamstedt, E.K. and Sjogren, B.A., 1999, "Micromechanisms in Tension-Compression Fatigue of Composite Laminates Containing Transverse Plies," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 167~178.
- (14) Dzenis, Y.A., 2003, "Cycled-based Analysis of Damage and Failure in Advanced Composites Under Fatigue: 1.Experimental Observation of Damage Development Within Loading Cycles," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 499~510.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) Woo, S.C. and Goo, N.S., 2006, "Influence of Applied Electric Fields and Drive Frequencies on The Actuating Displacement of a Plate-type Piezoelectric Composite Actuator," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 5, pp. 576~584.
- (18) Woo, S.C. and Goo, N.S., 2007, "Non-destructive Evaluation of Damage Modes in Bending Piezoelectric Composite Actuators Based on the Waveform and Frequency Analysis," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 4, pp. 409~419.
- (19) Woo, S.C. and Goo, N.S., 2007, "Identification of Failure Mechanisms in a Smart Composite Actuator with a Thin Sandwiched PZT Plate Based on Waveform and Primary Frequency Analysis," *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, pp. 1460~1470.
- (20) 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. 137, pp. 110~119.
- (21) Naik, N.K., Sekher, Y. and Meduri, S., 2000, "Damage in Woven-Fabric Composites Subjected to Low-Velocity Impact," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 731~744.
- (22) Chung, H.T., Shin, B.C., and Kim, H.G., 1989, "Grain-Size Dependence of Electrically Induced Microcracking in Ferroelectric Ceramics," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 72, pp. 271~277.
- (23) Jiang, Q.Y., Cross, L.E., 1993, "Effects of Porosity on Electric Fatigue Behavior in PLZT and PZT Ferroelectric Ceramics," *Journal of Materials Science*, Vol. 28, pp. 4536~4543.
- (24) Fang, D. and Liu, B., 2004, "Fatigue Crack Growth in Ferroelectric Ceramics Driven by Alternating Electric Fields," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 87, 840~846.
- (25) Choi, D.G. and Choi, S.K., 1997, "Dynamic Behaviour of Domains During Poling by Acoustic Emission Measurements in La-Modified PbTiO<sub>3</sub> Ferroelectric Ceramics," *Journal of Materials Science*, Vol. 32, pp. 421~425.
- (26) Prabakar, K. and Rao, S.P.M., 2006, "Study of Domain Depinning during Repeated Polarization Reversal in Hard PZT Ceramics Using Acoustic Emission," *Journal of Physics D*, Vol. 39, pp. 2433~2437.
- (27) Mohamad, I.J., Mangion, L.Z., Lambson, E.F. and Saunders, G.A., 1982, "Acoustic Emission from Domain Wall Motion in Ferroelectric Lead Germanate," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 43, pp. 749~759.