

굽힘 압전 복합재료 작동기의 전기적 피로 거동

우 성 충[†]·구 남 서^{*}

Electric Fatigue Behavior of a Bending Piezoelectric Composite Actuator

Sung-Choong Woo and Nam Seo Goo

Key Words: Bending Piezoelectric Composite Actuator(굽힘 압전 복합재료 작동기), Electric Fatigue(전기적 피로), Intergranular Cracking(입계 균열),

Abstract

In the present work, we address electric fatigue behavior in bending piezoelectric actuators using an acoustic emission technique. Electric cyclic fatigue tests have been performed up to ten million cycles on the fabricated specimens. To confirm the fatigue damage onset and its pathway, the source location and distributions of the AE behavior in terms of count rate 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. The electric-induced fatigue behavior seems to show not a continuous process but a step-by-step process because of the brittleness of PZT ceramic. Nevertheless, 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

전기장 또는 기계적인 반복하중이 압전 작동기에 장시간 가해질 경우 작동기 내에 피로 균열이 발생하여 성장하고 이로 인해 최종적으로는 작동기의 고장을 초래할 수 있다. 섬유강화 복합재료와 PZT세라믹으로 구성된 압전 복합재료 작동기(PCA)는 최근에 경량 압전 작동기 및 스마트 구조 재료로서의 응용이 활발해짐에 따라 많은

연구가 수행되어 왔으나^(1,2) 이들의 피로거동을 작동기의 성능변화와 관련지어 연구한 사례는 드물다. 따라서 PCA의 건전성과 신뢰성을 위해서 전기적 반복하중하의 피로거동을 작동성능과 연계하여 평가할 필요가 있다. 또한, 작동기내 손상의 개시와 성장에 대한 정보는 작동기의 성능과 직결되므로 전기적 피로에 의한 손상 메커니즘을 파악하는 것은 이의 실용적인 측면에서도 중요하다.

본 연구에서는 선행연구에서 작동성능이 가장 우수하였던 적층구조를 갖는 작동기와 바닥층이 복합재료로 보강되지 않은 작동기를 대상으로 이들의 전기적 피로 거동과 손상 메커니즘을 작동성능의 변화와 관련지어 평가한다. 또한, 피로시험과 병행하여 작동기 내부에서 발생하는 손상

† 회원, 건국대학교 인공근육연구센터
E-mail : lilsuzy@hanyang.ac.kr
TEL : (02)3436-7091 FAX : (02)452-7091

* 회원, 건국대학교 신기술융합학과, 인공근육 및 스마트 로봇센터

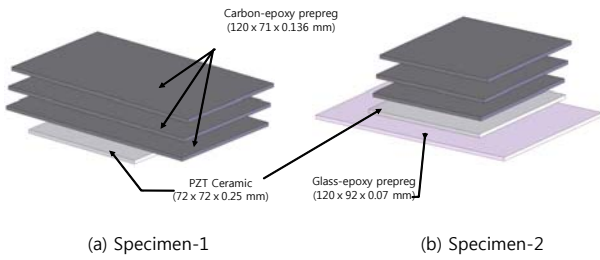


Fig. 1 Schematic of bending piezoelectric actuators.

메커니즘을 음향방출 신호해석과 파면 관찰을 통하여 확인한다.

2. 실험

2.1 시험편 제작

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 두 가지 형태의 압전 작동기 구조를 나타낸다. 선행연구^(3,4)의 결과에 따르면 specimen-2는 시뮬레이션과 작동시험 결과 연구 범위 내에서 가장 우수한 작동력 및 작동변위를 보였다. Specimen-2와 비교하여 specimen-1은 유리섬유 바닥층이 없는 경우로써 PZT층의 보호 유무가 작동기의 피로특성과 작동 성능에 미치는 영향을 파악하고 PZT층에서의 피로손상을 용이하게 관찰하기 위하여 실험대상에 포함시켰다. 시험편 제작을 위해서는 PZT 웨이퍼 (3203HD, CTS Co.), 평직형 탄소섬유-에폭시 프리프레그 (WSN1K-B, SK Chemicals) 그리고 평직형 유리섬유-에폭시 프리프레그 (GEP108, SK Chemicals)를 사용하였다. PZT층과 섬유층 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 피로시험

Fig. 2는 전기적 피로시험 동안의 굽힘 작동 변위를 측정하고 작동기에서 검출되는 AE신호를 실시간으로 감지하기 위한 전체적인 실험장치의 개략도를 나타낸다. 72 mm의 간격을 갖는 지지대 위에 작동기를 위치시켜 전압 공급기 (Face International Co.)를 이용하여 ± 6 kV/cm 교류 전압을 정현파의 형태로 PZT에 인가하였다. 사전에 작동기별 공진주파수를 측정된 결과 specimen-1은

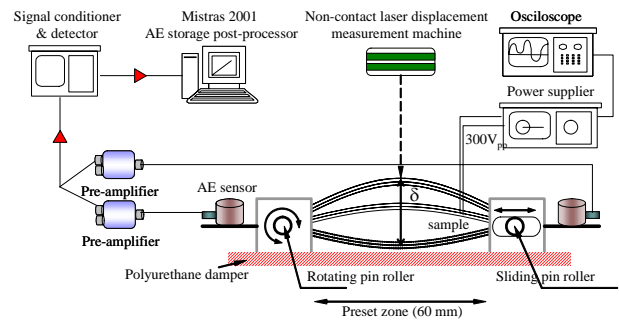


Fig. 2 Schematic of experimental set-up for an electric cyclic fatigue test and in-situ acoustic emission monitoring.

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)

24 Hz 그리고 specimen-2는 13.1 Hz이었다. 실험 조건을 동일하게 하기 위하여 구동주파수는 specimen-2의 공진주파수인 13.1 Hz로 설정하고 천 만 사이클까지 피로시험을 각 작동기별로 3회씩 행하였다. 작동변위는 비 접촉식 레이저 변위계를 이용하여 시험편의 위치로부터 시험편 중앙 지점의 굽힘 변위를 측정하였다.

2.3 실시간 피로 손상 감시

작동기 내부의 손상을 감지하기 위해 압전형 AE센서(Micro30, PAC) 2개를 작동기의 측면 탭에 진공 그리스를 사용하여 Fig. 2와 같이 고정하였다. 감지된 AE신호는 전치증폭기에 의해 증폭된 후 AE본체에 저장된다. Table 1에 AE측정에 사용한 기본 설정 값을 나타내었다.

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

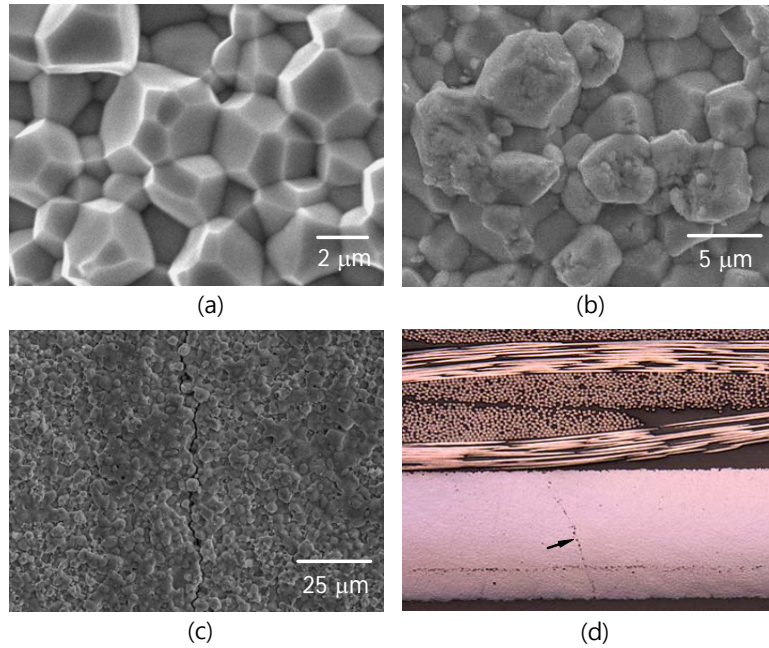


Fig. 3 Micrographs of actuator-1: (a) grains and boundaries on the surface of PZT ceramic with no electric cyclic loading; (b) dominant transgranular fatigue damages loaded up to 10^7 cycles; (c) an intergranular fatigue main crack propagated across the center of surface; (d) crack developed from the bottom surface to the top surface of the PZT ceramic layer.

3.1 피로균열 및 피로파면

Fig. 3은 specimen-1의 파면을 관찰한 것이다. Fig. 3(a)는 피로시험을 하기 전 PZT표면을 관찰한 것으로써, 피로하중을 받지 않았기 때문에 손상되지 않은 결정립과 입계를 보여주고 있다. 이에 반해 10^7 사이클까지 전기적 피로 하중을 받은 PZT층 표면(Fig. 3b)에서는 입내 파괴(transgranular fracture)가 지배적으로 관찰되었으며 입계 파괴(intergranular fracture)는 거의 관찰되지 않았다. 이는 전기적 하중을 받는 PZT세라믹의 경우, 균열은 입계에서가 아니라 입내 균열의 형태로 나타난다는 Chung 등⁽⁵⁾의 연구 결과와 일치하는 것이다. 이와는 대조적으로 작동기의 최대 굽힘 변위가 발생하는 PZT의 중앙표면에서 관찰한 사진(Fig. 3c)에서는 전기적 피로에 의한 주 균열이 입계를 따라 뚜렷하게 진전되어 있었다. 일반적으로 전기적 피로하중을 받는 PZT에서의 균열은 인가전압이 항전계(Coercive Field Strength, E_C) 이상일 때 발생하는 것으로 알려져 있으나⁽⁶⁾ 본 연구에서 가한 전압은 PZT세라믹의 E_C 인 8 kV/cm 범위 내에 있다. 따라서 이와 같은 피로 균열은 작동기가 굽힘 거동을 할 때 균열 선단에 국부적으로 응력이 집중되면서 E_C 를 초과하여 균

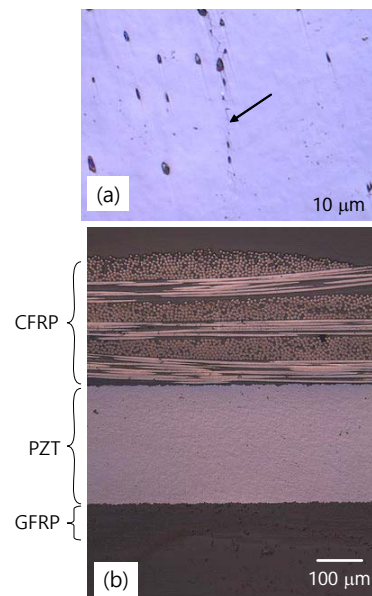


Fig. 4 Micrographs of actuator-2: (a) surface crack on the PZT ceramic; (b) no fatigue damages in PZT ceramic and fiber composite layers.

열이 성장한 것으로 생각된다.⁽⁷⁾ 그럼에도 불구하고 주 균열 좌우로는 여전히 입내파괴가 지배적

이었다. Fig. 3(d)는 Fig. 3(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.

Specimen-2의 경우, PZT 아래.위로 복합재로 적층되어 있어서 육안으로 손상상태를 관찰할 수 없다. 따라서 PZT층을 관찰하기 위해 정밀절단기를 이용하여 균열발생이 예상되는 지점(최대 굽힘 변위가 발생하는 지점)을 절취한 다음 알루미늄 분말(Al_2O_3 powder, grade 0.01 μm)을 이용하여 폴리싱 작업을 하였다. Fig. 4는 그 파면을 반사식 광학 현미경으로 관찰한 결과이다. Fig. 4(a)와 같이 PZT세라믹 표면에서 균열이 생성되어 진전해 있는 반면 이의 단면을 관찰한 사진(Fig. 4b)에서는 specimen-1과는 달리 PZT층에서 균열이 발생되지 않았다. 즉 PZT에서의 표면 균열이 발생하였지만 GFRP 바닥층이 PZT층을 보호하고 있었기 때문에 표면 균열은 내부로 성장하기 어려웠던 것이다. Specimen-1과 마찬가지로 복합재층에서의 손상은 관찰되지 않았다.

3.2 Specimen-1의 피로거동

Fig. 5는 13.1 Hz로 가진 하였을 때 specimen-1의 작동 사이클 증가에 따른 횡방향 굽힘변위와 음향방출 사상물의 거동을 나타낸 것이다. 사상물은 10^5 사이클 당 음향방출 사상 발생수로 정의된다. 작동 초기 변위는 2.3 mm였으며 최초 AE 발생시점인 2.4×10^6 사이클까지 작동변위는 거의 감소하지 않았다. 하지만, 약 5.0×10^6 그리고 7.2×10^6 사이클에서 뚜렷한 변위의 감소를 보였으며 이 시점에서 AE 발생률이 비교적 높았다. 또한 이 시점에서 고진폭의 신호들이 다량 발생하였다. 즉 작동기 내부에서 거시적 손상이 발생한 것이다. 또한 7.8×10^6 사이클에서 6.1%의 변위 감소와 함께 AE 발생률은 최대에 이르렀다. 이는 이 시점에서 작동기의 PZT층에서 Fig. 3(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. 3(b)와 같이 PZT 결

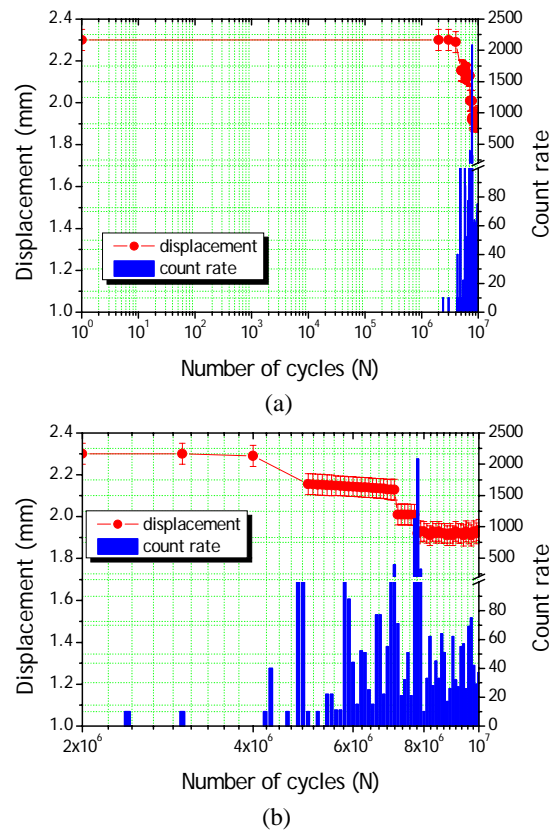


Fig. 5 Behavior of displacement and the AE count rate for specimen-1: (a) the entire cycling loading and (b) the loading range between 2×10^6 and 10^7 cycles.

정립 내에서 입내 파괴(전기적 피로에 의한 미세 균열)가 지속적으로 발생한 것으로 보인다.

Fig. 3의 파면 관찰과 Fig. 5의 변위 및 AE 거동을 종합하면, 전기적 하중을 받는 굽힘 압전 작동기에서 발생하는 초기 손상원은 PZT층 결정립 내에서의 미세적 피로손상(입내 파괴)에 의한 것이며 이러한 입내 파괴는 작동기의 변위감소에 큰 영향을 미치지 않는다. 또한, 작동 사이클이 증가함에 따라 굽힘 변위는 일정하게 감소하는 것이 아니라 오직 입계균열이 성장하는 동안에만 단계적으로 발생하며 이 때 고진폭의 AE 신호가 집중적으로 발생한 것을 고려하면 PZT 표면에서 발생한 입계균열이 작동기의 성능을 감소시키는 지배적인 인자로 생각된다. 일반적으로 PZT세라믹에서의 균열은 인가전압이 E_c 이상인 경우에서만 발생한다고 알려져 있다. 하지만 본 연구에서 적용한 인가전압은 $0.75 E_c$ 에 해당한다. 그럼에도 불구하고 명백히 균열이 발생하였다. 이는 입내

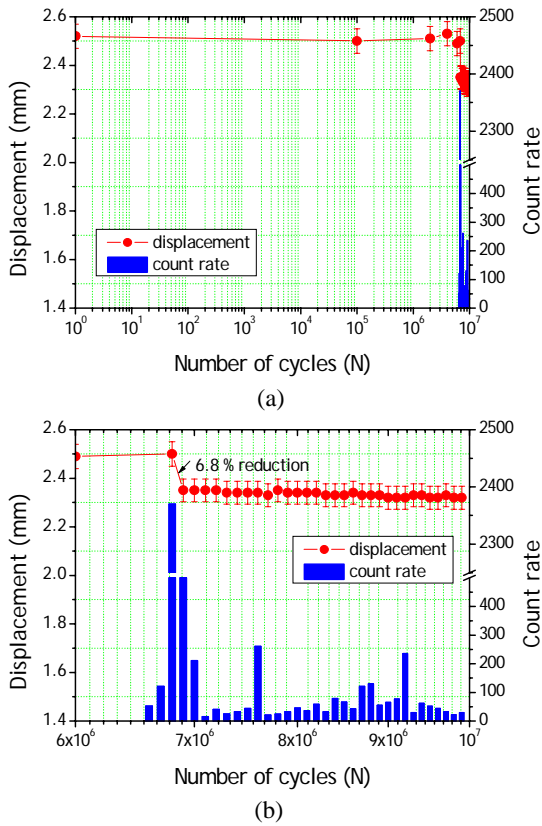


Fig. 6 Behavior of displacement and the AE count rate for specimen-2: (a) the entire cycling loading range and (b) the loading range between 6×10^6 and 10^7 cycles.

손상이 지속적으로 누적되어 입계에서 균열이 개시되고 균열선단에서 국부적인 전압이 E_c 를 넘어서서 발생된 것으로 볼 수 있다.⁽⁷⁾ 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. Specimen-1의 경우, 10^7 사이클에서 측정

된 변위는 약 1.94 mm로써 작동초기 변위 2.3 mm에 비해 15.8 % 감소하였다.

3.3 Specimen-2의 피로거동

Fig. 6은 PZT세라믹 아래.위로 섬유강화 복합재로 보호되어 있는 specimen-2의 전기적 피로 시험 결과를 나타낸다. 최초 AE신호는 6.6×10^6 사이클에서 발생하기 시작하였다. Specimen-1이 2.4×10^6 사이클에서 AE발생이 시작된 것에 비하면 초기 손상시점이 상당히 지연되었음을 알 수 있다. 이후 AE 발생률은 최대 사상률 발생지점인 6.9×10^6 사이클까지 급격히 증가하였으며 이 시점에서 측정된 변위는 2.35mm로 작동초기의 변위보다 6.8% 감소하였다. 강유전체인 PZT에서 AE 발생률은 미소 균열의 생성⁽⁸⁾ 그리고 분역 반전 (domain switching)⁽⁹⁾에 의해 증가하는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서 사용한 PZT는 약 ± 8.2 kV/cm에서 분역 반전이 발생하므로 Fig. 6에서 초기 AE 발생률이 증가하는 것은 작동기 내부에서 Fig. 4(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 specimen-2의 경우 PZT세라믹 아래.위로 섬유강화 복합재로 적층되어 있어 PZT세라믹에서의 균열성장을 저해하였기 때문이다. 이와 같이 PZT층의 보호유무에 따라서 압전 작동기의 전기적 피로거동은 상당히 상이한 거동을 보였으며 작동기의 성능감소율도 다르게 나타났다.

3.3 위치표정

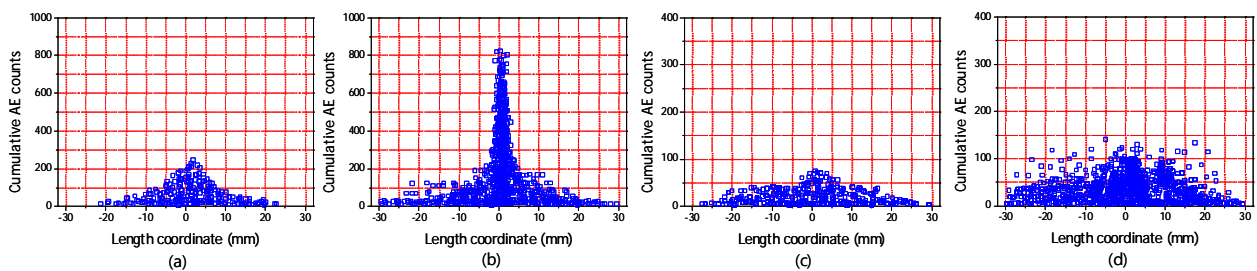


Fig. 7 Location of the detected AE counts: (a) at 6.0×10^6 cycles for specimen-1; (b) at 10^7 cycles for specimen-1; (c) at 7.0×10^6 cycles for specimen-2; (d) at 10^7 cycles for specimen-2.

Fig. 7은 specimen-1과 -2에 대하여 특정 사이클 단계에서 기록한 위치표정의 결과를 나타낸 것이다. x축상의 -30에서 +30의 길이는 AE 센서1과 센서2 사이에 미리 설정된 유효 위치표정 영역을, 사각기호는 누적된 AE 사상수를 각각 나타낸다. 6.0×10^6 사이클(Fig. 7a)에서부터 균열진전 경로에 위치표정이 많은 것을 알 수 있다. 피로시험 종료시점인 10^7 사이클(Fig. 7b)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.

Specimen-2의 경우(Fig. 7c-d) specimen-1과는 달리, 사이클이 증가함에 따라 균열 진전 위치 이외의 영역에서도 많은 AE신호들이 누적되었는데, 이는 Fig. 4(b)에 나타내었듯이 PZT층에서 발생한 균열이 보강되어 있는 섬유 바닥층 때문에 PZT층 내로 성장하지 못하였기 때문이다. 이와 같은 이유로, 물론 specimen-2에서도 PZT층에서 균열은 관찰 되었지만, 누적된 AE활성도 측면에서도 specimen-1에 비해 상당히 낮음을 알 수 있다.

4. 결론

- (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.
- (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 압전 작동기의 피로 거동을 효과적으로 파악할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.