

## 초음파 C-스캔 탐상을 이용한 경량 압전세라믹 복합재료 작동기의 피로거동과 계면변화의 관계 연구

김철웅\*(건국대학교 인공근육연구센터), 남인창(건국대학교 대학원 항공우주공학과), 윤광준(건국대학교 항공우주공학과)

### Experimental Evaluation of Fatigue Behavior and Interlaminar Phase in the Lightweight Piezoelectric Ceramic Composite Actuator Using the Ultrasonic C-scan Inspection

Cheol-Woong Kim(Artificial Muscle Research Center, Konkuk Univ.), In-Chang Nam(Graduate School, Aerospace Eng., Konkuk Univ.) and Kwang-Joon Yoon(Aerospace Eng., Konkuk Univ.)

#### ABSTRACT

It could make the Lightweight Piezoelectric Composite Actuator (LIPCA) damageable by the cyclic large deformation. If the progressive microvoid coalescence of LIPCA interlaminar took place, the decrease of the stiffness and the weakness of stress transmission and fiber bridging effect would make the fatigue characteristics worse suddenly. Therefore, it is required to study the variation of fatigue behavior and interlaminar condition in LIPCA under resonant frequencies. These studies such as the changeable fatigue phase and interlaminar behavior of LIPCA affected by the resonant frequencies should be carried out due to the strong anisotropy of CFRP layer. Hence, these studies are as follows. 1) The residual stresses distribution of interlaminar in LIPCA using the Classical Lamination Theory (CLT). 2) Comparative analysis of interlaminar behavior for the intact LIPCA versus LIPCA containing an artificial delamination during resonant frequency.

**Key Words :** Fatigue Behavior(피로거동), Interlaminar Phase(계면상), Lightweight Piezoelectric Composite Actuator(경량 압전 복합재료 작동기, LIPCA), Resonant Frequency(공진 주파수), Residual Stress(잔류응력), Micro Void Coalescence (미소공동합체, MVC), Delamination(층간분리)

#### 1. 서론

기존의 압전 세라믹 작동기는 변형률이 작기 때문에 큰 작동변위가 요구되는 경우 한계성이 있다. 또한, 피로하중에 의한 작동성능의 급격한 저하가 항상 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 미국 등에서는 내부물성을 변화시키고 산화물 세라믹층을 삽입한 RAINBOW (Reduced And Internally Biased Oxide Wafer) 압전 작동기를 개발한 바 있고, NASA에서는 박판 유니모프 작동기인 THUNDER (THin layer UNimorph DrivER)를 개발하여 이미 상용화 시킨 바 있다. 그러나 이상의 압전 작동기는 큰 작동변위에 비해 작동력이 작은 단점이 있다. 특히, PZT와 알루미늄 박판, 스테인리스

스틸의 적층구조로 이루어져 있는 THUNDER는 피로하중에 장시간 노출될 경우, 알루미늄 박판의 미세한 스크래치 또는 균열에 의해서도 급격한 피로 파손이 발생할 가능성이 매우 크다. 또한, 균열개구 변위(COD)와 응력확대계수( $K$ )를 효과적으로 감쇠할 수 없는 적층구조이므로 균열발생과 전파는 매우 빠른 속도로 진행되고 결국 PZT 층의 갑작스런 취성파괴를 야기하게 된다. 따라서 급격한 취성파괴를 효과적으로 방지할 수 있는 새로운 압전세라믹 작동기의 개발 및 개발된 작동기의 피로특성 평가는 매우 중요한 연구주제이다. 따라서 최근 본 연구그룹에서는 THUNDER의 피로 및 파괴특성의 취약점을 개선하고 더욱 우수한 작동성능을 발휘할 수 있는 압전세라믹 작동기를 개발하고 다양한 성

능평가를 수행한 바 있다.<sup>(1-4)</sup> 립카(Lightweight Piezoelectric Ceramic Composite Actuator, LIPCA)라고 명명된 고성능 경량 압전 복합재료 작동기는 THUNDER에 사용되던 알루미늄 박판과 스테인리스 스틸을 탄소섬유 강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) 및 유리섬유 강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)으로 대체하고 적층설계를 최적화하여 PZT 층에서 FRP 층으로의 응력전달 및 섬유가교효과를 극대화하였다. 그 결과, LIPCA는 5° 0' 사이클 이상의 피로한도 수명에서도 성능감소가 20% 이내인 매우 우수한 피로특성을 보유하고 있음을 평가할 수 있었다.<sup>(5)</sup> 그러나 이상의 피로시험은 교류전압 500Vpp, 작동주파수 5Hz 하에서 작동변위가 1.0mm 내외인 매우 안정적인 조건에서 수행된 결과이므로 더욱 큰 작동범위와 가혹한 조건에서의 피로거동을 파악해야 한다. 따라서 본 연구에서는 가장 큰 작동범위를 나타내는 공진주파수 하에서 LIPCA의 각층에 걸리는 잔류응력과 작용응력의 분포에 대해 파악하고, 이를 바탕으로 피로특성과 그에 따른 계면의 변화를 단계적으로 평가해보았다.

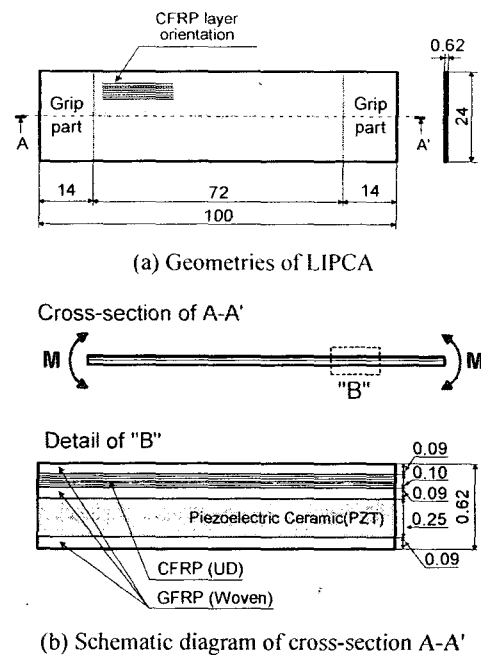
## 2. LIPCA의 제작 및 피로시험 방법

### 2.1 LIPCA 시험편의 제작

LIPCA는 각층마다 열팽창계수가 크게 다른 재료를 적층하여 경화 후 냉각 과정을 거치면서 점차적으로 곡률을 형성하게 된다. 일반적인 열경화성 에폭시 성형온도인 130°C보다 40°C 증가시켜 더욱 큰 곡률을 유도하였다. 따라서, 음의 열팽창계수(CTE) 보유한 CFRP층에 의하여 냉각 후 큰 곡률을 유도할 수 있게 된다. 또한, 작동시 편심을 증가시키기 위하여 Fig. 1과 같이 비대칭 적층구조로 설계하였다. Fig. 1(a)는 LIPCA 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이고, Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)에 제시된 A-A' 단면을 확대하여 적층순서와 각층의 두께를 나타낸 것이다. Table 1은 LIPCA를 구성하는 PZT, CFRP, GFRP의 공학적 상수들을 나타낸 것이다. Table 1을 이용하여 고전적층이론(Classical Lamination Theory, CLT) 해석을 수행하였고, 잔류응력 계산과 LIPCA의 공학적 상수 계산에 활용하였다.

### 2.2 실험장치 구성

LIPCA에 전력을 공급하기 위한 파워 서플라이어(power supplier : TD-2, Face International Co.)와 공급 전력을 확인하기 위한 오실로스코프(TDS-224 Tektronix), 그리고 안정적 작동구현을 위한 반고정 지그를 구성하였다. 또한, 작동변위를 측정하기 위해 비접촉식 레이저 변위 측정기 시스템(laser sensor



(b) Schematic diagram of cross-section A-A'

Fig. 1 Schematic diagram of LIPCA

Table 1 Mechanical properties of LIPCA components

Component Materials	Modulus					CTE <sup>3</sup>	
	E <sub>1</sub> (GPa)	E <sub>2</sub> (GPa)	G <sub>12</sub> (GPa)	ν <sub>12</sub>	ν <sub>21</sub>	α <sub>12</sub>	α <sub>21</sub>
Piezoelectric Ceramic (PZT)	67.0	67.0	25.6	0.31	0.31	3.0	3.0
CFRP	231.2	7.2	4.3	0.29	0.01	-1.58	32.2
GFRP	21.7	21.7	3.7	0.13	0.13	14.2	14.2

\* unit : 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>

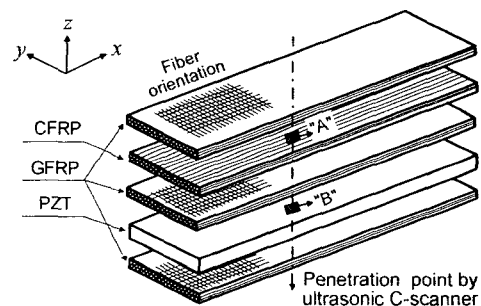


Fig. 2 Observation of interlaminar plane in LIPCA using an ultrasonic C-scan inspection

: Keyence LK-2101, indicator : RJ-800, DC voltage supplier : KV-U3)을 구축하였다. 측정된 데이터의 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 저장하기 위하여 데이터 저장 시스템(NI PCI-6024E DAQ board, LabVIEW program)을 활용하였다.

### 2.3 피로시험 방법 및 초음파 C-스캔 탐상법

피로시험은 LIPCA가 최대 진폭 20mm까지 구현할 수 있는  $\pm 200V_{pp}$ , 공진주파수 10~12Hz의 조건에서 수행되었다. 만약 시험 도중 전력공급의 중단으로 인한 제하가 이루어지면 PZT는 일시적 회복이 발생하여 작동변위가 다시 증가하게 된다. 따라서 부하초기부터 시험편의 파손이 발생할 때까지 제하없이 연속적으로 피로시험이 수행되어야 한다. 완전한 파손이 발생할 때까지 피로시험을 수행한 시험편은 초음파 C-스캔 탐상기(Hitachi Scanning Acoustic Microscope, HSAM)를 이용하여 계면관찰을 수행하였다. 고해상 탐촉자(140MHz)를 이용하여 Fig. 2에 제시된 경계면 "A", "B"를 관찰하였다.

### 3. 피로시험 결과 및 계면상 변화 분석

#### 3.1 고전적층이론(CLT)을 이용한 LIPCA의 잔류응력 해석

공진주파수 하에서 최대 진폭을 나타내는 LIPCA의 피로특성 저하와 그에 따른 계면특성 변화를 평가하기 위한 첫 번째 단계로 오토크레이브 진공성형 후 형성되는 잔류응력에 대해 평가해 보았다. LIPCA의 잔류응력 분포는 작동변위와 작동효율에 큰 영향을 미친다. 압축응력에는 강하지만 상대적으로 인장응력에 약한 압전세라믹(PZT)층에 인장과 압축이 동시에 걸린다면 작동기의 작동성능은 크게 저하하게 된다. Fig. 3은 Table 1에 주어진 LIPCA의 공학적 상수를 고전적층이론(CLT)에 적용하여 해석한 잔류응력분포 결과이다. LIPCA는 강한 방향성을 지닌 단방향 CFRP 층에 의해 x축 방향 잔류응력( $\sigma_{R1}$ )과 y축 방향 잔류응력( $\sigma_{R2}$ )이 전혀 다른 분포를 나타내지만, 작동 시에 x축 방향으로 순수굽힘을 받는다고 가정했을 때  $\sigma_{R2}$ 의 영향은 극히 미소하므로  $\sigma_{R2}$ 에 대한 영향은 고려하지 않

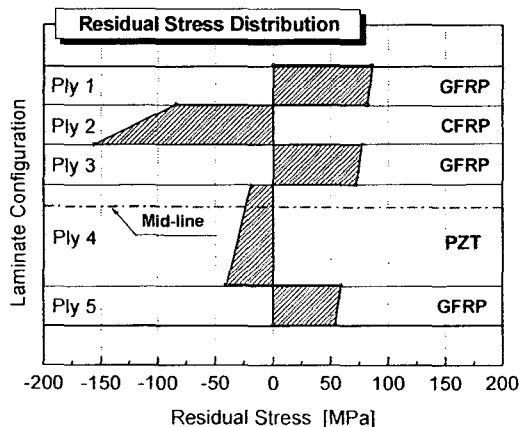


Fig. 3 Residual stress distribution of LIPCA

았다. 시험편의 외피와 PZT 층간에 직조형 GFRP를 삽입하여 PZT와 CFRP의 직접적인 접촉을 방지한 이유는 응력전달의 효과적인 재분배를 유도하기 위해서 뿐만 아니라, CFRP와 PZT의 직접적인 접촉으로 인한 갈바닉 부식 및 통전을 방지할 위해서이다. 전체적인 잔류응력 분포를 살펴보았을 때 PZT에는 압축 잔류응력만 작용하여 압축에 강한 세라믹의 특성에 부합되게 적용되었고,  $E_f$ 값이 CFRP의 1/10

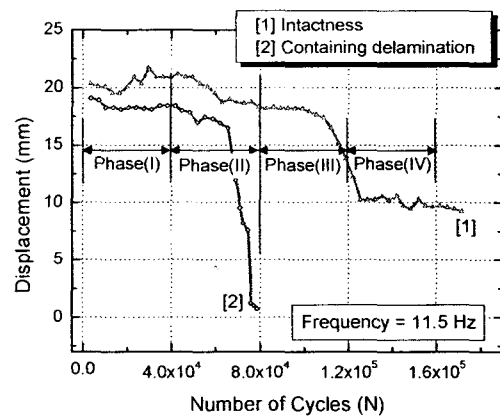


Fig. 4 Relationship between cycles and displacement in intact LIPCA and LIPCA containing artificial delamination

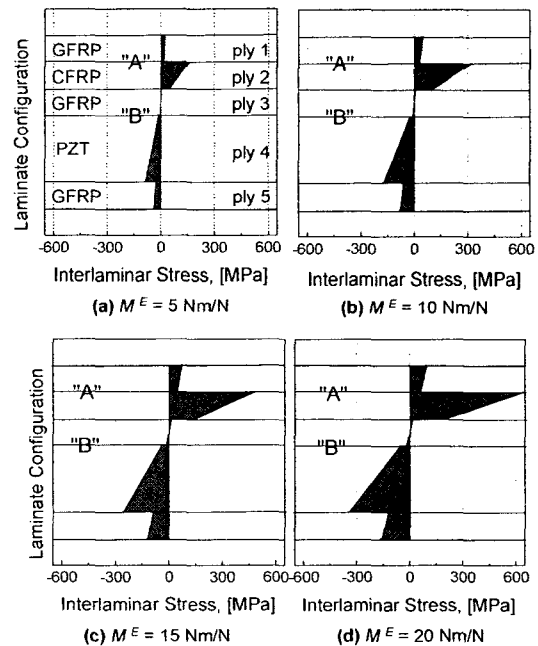


Fig. 5 Interlaminar stresses distribution in LIPCA due to increment of total effect moment ( $M^E$ )

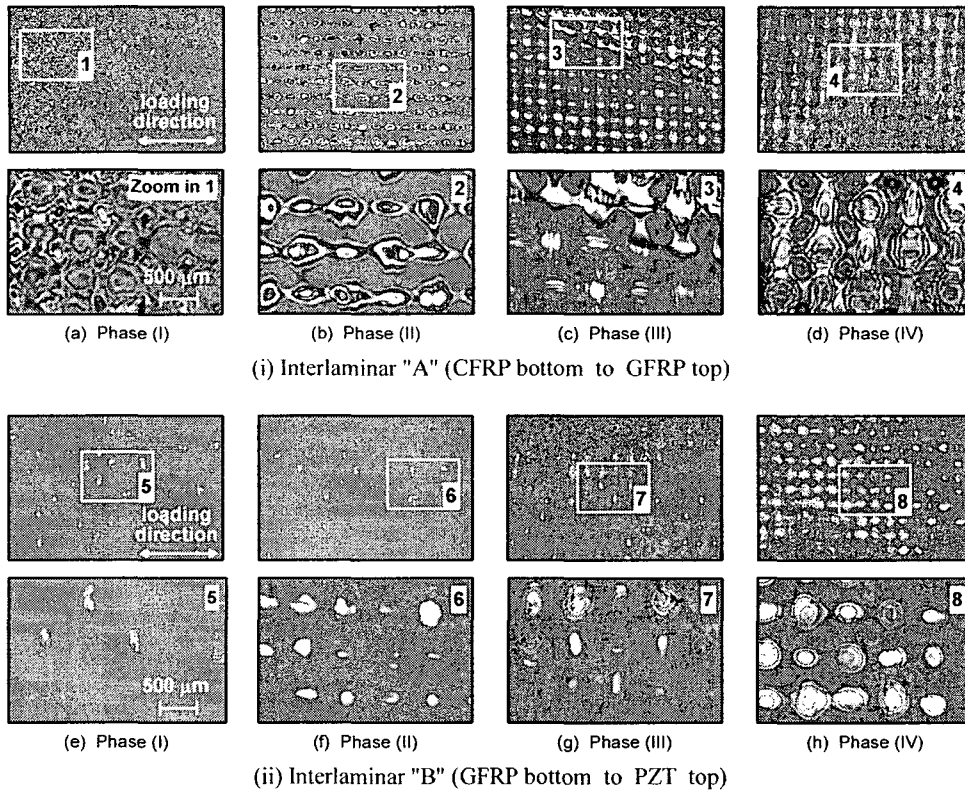


Fig. 6 Comparison of increment tendency on the micro void coalescence results from *interlaminar "A"* and *interlaminar "B"*

에 불과한 GFRP는 3개의 층이 거의 유사한 값의 인장 잔류응력을 받으며, 작동 시 CFRP 층과 PZT 층에 집중될 응력을 효과적으로 분산할 수 있는 구조를 보이고 있음을 확인할 수 있다. CFRP 층은 섬유방향의 열팽창계수 ( $\alpha$ )가 음의 값을 나타내므로 경화 시에는 수축하였다가 서냉 시에는 다시 팽창하려는 특성으로 인해 LIPCA에 곡률을 부여하게 된다. 그 결과, 잔류응력은 경화과정 중 발생한 섬유방향 수축으로 인해 압축 잔류응력이 작용하고 있다. 각 층의 잔류응력 분포에 대한 조화를 살펴 보았을 때, CFRP와 PZT 층은 음의 값을 그리고 그 사이에 삽입된 GFRP는 양의 값을 나타내며 서로 상응하는 구조를 이루고 있고, 하나의 층에 압축과 인장 잔류응력이 공존하면서 발생할 수 있는 잔류응력의 상쇄는 발생하지 않는 구조이다. 잔류응력 분포에 있어서 앞으로 추가적으로 연구해야 할 문제는 LIPCA의 작동성능 향상을 위해서 현재의 곡률과 CFRP 층의 압축 잔류응력이 최적의 조건인지를 평가하는 것이다. 일반적으로 350°C 이상의 온도에서는 PZT가 본래의 자기적 특성을 잃을 수 있고, 열경화성 에폭시는 250°C에서 최대발열량과 최대 가교결합력을 나타내는 점을 고려해 보았을 때 현재의 경화온도(170°C)보다는 증가된 200°C~250°C

의 경화온도에서 LIPCA를 제작하여 잔류응력 변화와 실제 작동성능에 미치는 영향을 비교해보는 연구도 추후에 수행할 예정이다.

### 3.2 층간분리가 피로거동에 미치는 영향

LIPCA가 최대 작동변위를 구현하는 공진주파수 11~12 Hz의 조건에서 피로하중의 증가에 의한 작동변위의 저하와 그에 따른 계면의 변화를 살펴보았다. 본 연구에서는 층간분리가 피로수명에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 2의 계면 "B" 중앙에  $b \times l = 24 \times 5 \text{ mm}^2$ 의 테프론 필름을 삽입하여 인공 층간분리를 삽입한 LIPCA를 별도로 제작하였다. 따라서 인공 층간분리를 삽입한 LIPCA와 삽입하지 않은 LIPCA를 11.5 Hz의 공진주파수에서 피로시험을 수행하였고 그 결과는 Fig. 4와 같았다. 층간분리를 삽입하지 않은 LIPCA의 피로수명이 약  $1.6 \times 10^5$  cycles 이상인데 비하여 인공 층간분리를 삽입한 LIPCA의 피로수명은  $8.0 \times 10^4$  cycles 정도로 인공 층간분리는 LIPCA의 피로수명을 약 50% 정도 저하시켰음을 알 수 있었다. 따라서, 순수한 LIPCA가 Phase(III) 후반에 서서히 작동변위가 저하된 반면, 인공 층간분리가 삽입된 LIPCA는 Phase(II) 중반에 작동변위의 급격한 저하가 나타났다. 그 이유는 반

복하중 하에서 계면의 균질성이 급변하는 인공층간 분리 선단에 응력이 집중되다가 Phase(II)에 들어서서 갑작스러운 층간분리 확장이 야기되었기 때문이다. 결국, 층간분리는 PZT층에서 섬유층으로의 원활한 응력전달과 응력재분포를 방해하였고 미시적으로는 섬유가교효과를 저해하였다. 이로 인해 상대적으로 PZT층에 큰 응력이 작용하여 급격한 성능저하와 취성파괴를 야기하였다.

### 3.3 피로수명과 계면상의 변화

LIPCA와 같은 적층제에서 가장 취약한 부분은 층간의 계면이다. 따라서 THUNDER에 비해 계면의 수가 많은 LIPCA의 작동특성은 계면 변화에 쉽게 민감해질 수 있다. Fig. 5는 총 유효모멘트( $M^e$ ) 증가에 따른 층간의 응력분포를 계산하여 나타낸 것이다. 가장 많은 응력이 작용하는 계면 "A"와 가장 적은 응력이 작용하면서 PZT 층과 직접적인 접촉을 하고 있는 계면 "B"를 Fig. 6에 제시한 초음파 탐상 결과와 비교해 보았다. "B"에 비해 상대적으로 층간에 큰 인장응력이 걸리는 "A"는 에폭시의 미소공동 성장과 합체가 매우 왕성하게 발생했음을 알 수 있다. Fig. 6(i)는 미소공동합체(Micro-Void Coalescence, MVC)의 전형적 단계인 형성(Phase(I)), 성장(Phase(II), (III)), 합체(Phase(IV))의 특징이 단계적으로 잘 나타났다. Fig. 6(i) (d)와 Fig. 6(ii) (h)는 미소기공의 최종합체가 이루어지는 시기로 층간에 작용한 응력 값의 변화로 인한 응력 이력을 예측할 수 있는 기공내 구배가 존재한다. 이러한 현상은 반복 굽힘모멘트에 의해 미소기공이 서서히 성장하다가 작동변위가 급격히 변화할 때마다 기공 내에 구배층을 형성한 것으로 생각된다. Fig. 6(i) (b)는 미소기공의 연신이 굽힘모멘트가 작용한 방향으로 이루어져 있음을 보여준다. 따라서 Fig. 6을 통하여 미소공동의 성장에 대한 두 가지 기구는 기공 핵생성 지점을 둘러싸고 있는 에폭시 기지의 소성 유동에 의한 기공과 기지 내에 있는 작은 입자들의 분리에 의해 증강된 소성 유동이 주된 기구임을 예측할 수 있다. 따라서 Phase(IV) 단계를 넘어서면 미소기공합체는 결국 큰 규모의 층간분리를 야기할 것이다.

## 4. 결론

1) LIPCA의 각 층에 작용하는 잔류응력 분포를 살펴본 결과, PZT에는 압축 잔류응력만 작용하여 압축에 강한 세라믹의 특성에 부합되게 설계되었고,  $E_f$ 값이 CFRP의 1/10에 불과한 GFRP는 3개의 층이 거의 유사한 값의 인장 잔류응력을 받으며 CFRP 층과 PZT 층에 집중되는 응력을 효과적으로 분산할 수 있는 구조를 보이고 있음을 알 수 있었다.

2) 인공 층간분리를 삽입한 LIPCA는 삽입하지 않은 순수한 LIPCA에 비해 약 50%의 피로수명 저하가 발생했다. 인공 층간분리가 삽입된 LIPCA는 부하중반 이후 작동변위의 급격한 저하가 나타났고 이후 PZT 층의 급격한 성능저하와 취성파괴를 야기했다. 그 이유는 인공 층간분리가 층간의 원활한 응력전달과 재분포를 방해하였고, 그로 인해 층간 분리 선단에서의 응력집중이 가속되어 상대적으로 PZT 층에 큰 응력이 작용하게 되었기 때문이다.

3) 큰 인장응력이 걸리는 층간에서는 에폭시의 미소공동 성장과 합체가 매우 왕성하게 발생했다. 또한, 응력의 이력을 예측할 수 있는 기공내 구배가 형성되었고, 굽힘모멘트가 작용한 방향으로 미소공동이 연신되어 있음을 관찰할 수 있었다. 이러한 미소기공합체는 결과적으로 큰 규모의 층간분리를 야기하는 원인이 된다.

## 후 기

본 연구는 학술진흥재단 중점연구소 지원사업(과제번호: KRF-2004-0055-B00047)으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. N. S. Goo, S. J. Shin, H. C. Park and K. J. Yoon, "Design Analysis / Manufacturing / Performance Evaluation of Curved Unsymmetrical Piezoelectric Composite Actuator LIPCA", *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1514-1519, 2001.
2. K. H. Park, K. J. Yoon, and H. C. Park, "Development of Lightweight Piezo-composite Curved Actuator", *Journal of the KSAS*, Vol. 30, No. 5, pp. 94-100, 2002.
3. K. Y. Kim, K. H. Park, K. J. Yoon and H. C. Park, "Experimental Performance Evaluation and Comparison for Lightweight Piezo-Composite Actuator LIPCA", *Journal of the KSCM*, Vol. 16, No. 2, pp. 41-47, 2003.
4. K. J. Yoon, K. H. Park, S. K. Lee, N. S. Goo and H. C. Park, "Analytical Design Model for Piezo-Composite Unimorph Actuator and Its Verification Using Lightweight Piezo-Composite Curved Actuators", *Smart Materials and Structures*, No. 13, pp. 1-9, 2004.
5. K. J. Yoon, K. Y. Kim, N. S. Goo, H. C. Park and J. R. Haw, "Actuator Performance Degradation of Piezo-Composite Actuator LIPCA Under Cyclic Actuation", *Key Engineering Materials*, Vols. 261-263, pp. 1331-1336, 2004.