

# LIPCA의 PZT 취성파괴 예측의 실험적 기법

\*남인창<sup>1</sup>, 김철웅<sup>2</sup>, 윤범수<sup>1</sup>, 윤광준<sup>3</sup>

<sup>1</sup>건국대학교 일반대학원 항공우주공학과, <sup>2</sup>고려대학교 기계공학과/유엔아이(주) 고려대연구소, <sup>3</sup>건국대학교 항공우주공학과

## A Experimental Method of PZT Brittle Fracture of LIPCA

\* I. C. Nam<sup>1</sup>, C. W. Kim<sup>2</sup>, B. S. Yoon<sup>1</sup>, K. J. Yoon<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Aerospace Eng., Konkuk Univ., <sup>2</sup> Mech. Eng., U&I Research Center, Korea Univ., <sup>3</sup> Dept. of Aerospace Eng., Konkuk Univ.

Key words : LIPCA, CFRP, PZT, Brittle Fracture

### 1. 서론

최근 내구성이 강하고 피로특성이 우수한 경량 압전세라믹 복합재료 작동기에 대한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 기존의 단일 (unimorph) 압전 작동기는 변형률이 작기 때문에 큰 작동변위가 요구되는 경우 한계성을 보였고, 피로하중에 의한 작동성능의 급격한 저하가 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 바이모프 (bimorphs) 압전 작동기가 개발된 바 있고, 내부물성을 변화시켜 산화물 세라믹 층을 삽입한 RAINBOW (Reduced And Internally Biased Oxide Wafer) 압전 작동기가 개발되었으며, 최근에는 NASA에서 박판 유니모프 작동기인 THUNDER (THin layer UNimorph DrivER)를 개발하여 상용화에 성공하였다. 그러나 이상의 압전 작동기는 큰 작동변위에 비해 작동력이 작다는 단점이 있다. THUNDER는 PZT와 알루미늄 박판, 스테인리스 스틸의 적층구조로 이루어져 있어 장시간 피로하중에 노출될 경우, 알루미늄 박판의 미세한 스크래치 또는 균열에 의해서도 급격한 피로파손이 발생할 가능성이 매우 크다. 또한, 균열개구변위(COD)와 응력확대계수(K)를 효과적으로 감소시키는 섬유강화플라스틱(FRP)과 같은 보강층이 존재하지 않으므로 섬유가교효과(fiber bridging effect)<sup>(1-7)</sup>와 같은 균열전파 억제 기구를 기대할 수 없다. 따라서 균열전파속도가 매우 빠르게 진행되고 결국 PZT 층의 갑작스런 취성파괴를 야기하게 된다. 본 연구그룹에서는 이상과 같은 THUNDER의 피로파괴 특성의 취약점을 개선하고 더욱 우수한 작동성능을 발휘할 수 있는 압전세라믹 작동기를 개발하는데 성공하였다.<sup>(8-12)</sup> 립카 (Lightweight Piezoelectric Composite Actuator, LIPCA)라고 명명된 고성능 압전세라믹 복합재료 작동기는 알루미늄 박판과 스테인리스 스틸을 Carbon/epoxy와 Glass/epoxy 로 대체하고 적층설계를 최적화하여 PZT 층에서 섬유층으로의 응력전달 및 섬유가교효과를 극대화 하였다. 그러나 LIPCA의 구조적 특성상 장시간 피로하중에 노출될 경우, 적층된 섬유 층의 층간분열이 예상되었다. 선행 연구<sup>(13)</sup>에서 임의로 층간분열을 유도한 실험을 하였으며, 그 결과 일정 작동시간이 지난 후에는 급격한 작동변위의 감소를 확인할 수 있었다. 그래서 본 연구에서는 PZT의 피로하중에 의한 취성파괴를 확인하기 위하여 임의로 조정된 상태에서 피로시험을 하였고, 이에 관한 실험적 기법을 제시한다.

### 2. 시편제작 및 시험

Table 1 은 시험편의 재료와 치수이고, Fig. 1 과 같은 적층구조로 설계하였다. Fig. 1(a) 는 구성된 적층 순서를 제시하였고, Fig. 1(b) 는 실험형태이며, Table 2 는 시험편을 구성하는 PZT와 UD CFRP의 공학적 상수들을 나타낸 것이다.

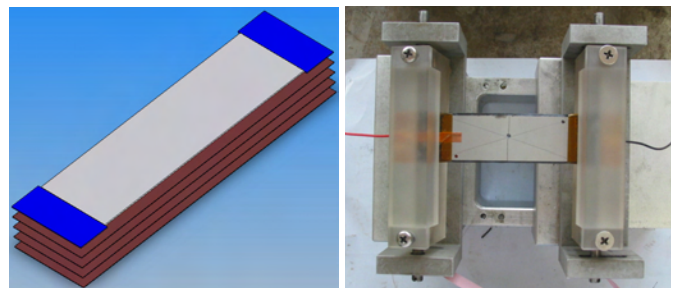
Table 1 Material properties

Material	Size	Ply
PZT	71*23*0.25	1
UD* CFRP	90*25*0.1	4
GFRP	10*25*0.09	2(4)

\*UD = unidirectional / \*\* unit : (1×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>)

Table 2 Engineering constants of lamina strength for LIPCA component

Component Material	Modulus					CTE	
	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>1</sub> **	α <sub>2</sub> **
PZT	67.0	67.0	25.6	0.31	0.31	3.0	3.0
UD* CFRP	231.2	7.2	4.3	0.29	0.01	-1.58	32.2



(a) 3D-Modeling (b) Experimental Model  
Fig. 1 Experimental setup of LIPCA Specimen

시험은 시험편의 가운데에 구멍가공(φ2)전과 후로 나눈다. PZT 에 전력을 공급하기 위한 파워 서플라이어(power supplier : TD-2)와 공급전력을 확인하기 위한 오실로스코프(TDS-224), 그리고 안정적 작동구현을 위한 반고정지그를 구성하였다. 작동변위측정은 비접촉식 레이저 변위 측정기 시스템(laser sensor : Keyence LK-2101, indicator : RJ-800, DC voltage supplier : KV-U3)을 사용하였다. 측정된 데이터는 아날로그를 디지털로 전환하여 저장하는 시스템(NI PCI-6024E DAQ board, LabVIEW program)을 활용하여 1초 단위로 저장하였다. 작동성능은 최대 진폭을 구현하는 ±200Vpp, 공진주파수는 1.9Hz의 조건에서 6시간동안 수행하였다.

### 3. 연구결과

시험결과는 구멍가공 전과 구멍가공 후로 나눌 수 있다.

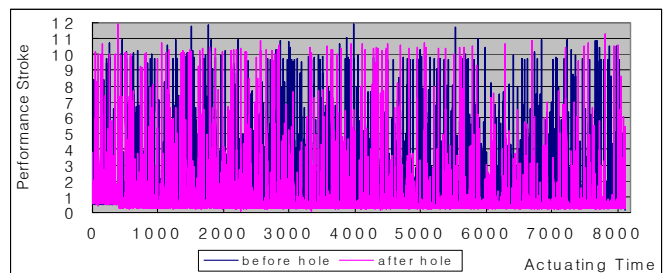


Fig. 2 Relationship between actuating time and performance stroke

Fig. 2 는 전체 사이클의 그래프이며, 파란 그래프는 구멍가공 전의 시험편의 작동변위를 나타내고, 붉은 그래프는 구멍가공 후의 시험편의 작동변위를 나타낸다.

Fig. 3 은 취성파괴가 일어났음을 보여주는 부분의 확대도이다.

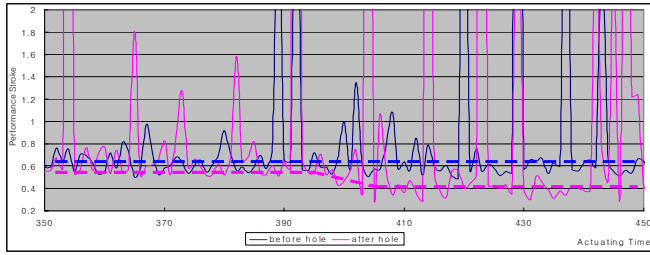


Fig. 3 Zoom in relationship between actuating time and performance stroke

Fig. 3에서 추세선의 변화가 급격함을 볼 수 있고, 이것으로 유추해볼 때 취성이 강한 PZT가 균열의 생성과 동시에 취성파괴가 발생했을 것이라는 추측을 할 수 있다. 작동 후 10분 정도 경과한 후에 취성파괴가 발생한 것을 그래프를 통해 알 수 있었다. 본 연구에서는 CFRP의 방향성을 0°로 하였는데, 그 외에 45°, 90° 등으로 제작/시험하면 이미 수행된 복합재료의 섬유배향각에 따른 층간분리 거동<sup>(6-7)</sup>과 연계하여 PZT의 방향성에 대한 모멘트를 산출할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 실험을 통하여 PZT의 취성파괴특성을 살펴 보았다. 그리고 본 실험을 통하여 THUNDER의 피로파괴를 예상할 수 있는 간접적인 결과를 얻고, LIPCA의 층간분리 발생 시 급격한 작동변위 저하원인을 추측할 수 있게 되었다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) PZT의 피로시험을 통하여 취성파괴 특성을 알 수 있었다.
- 2) LIPCA의 층간분리시의 급격한 작동변위 저하원인이 PZT와 GFRP층의 분리로 인한 PZT 층에서 섬유층으로의 응력전달 및 섬유가교효과의 저하임을 알 수 있다.
- 3) 재료는 다르나 유사한 적용형태를 지닌 본 실험의 시편과 THUNDER를 비교하여 THUNDER의 피로파괴의 특성을 간접적으로 경험할 수 있었다.

#### 후기

여기에 본 연구는 학술진흥재단 중점연구소 지원사업(과제번호 : KRF-2004-005-D00047)으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Song, Sam Hong and Kim, Cheol Woong, 2001, "The Delamination and Fatigue Crack Propagation Behavior in Al5052/AFRP Laminates Under Cyclic Bending Moment", Transactions of the KSME, A, Vol. 25, No. \*, pp. 1277~1286.
2. Song, Sam Hong and Kim, Cheol Woong, 2003, "Fatigue Crack and Delamination Behavior in the Composite Material Containing a Saw-cut and Circular Hole (I)", Transactions of the KSME, A, Vol. 27, No. 1, pp. 58~65.
3. Song, Sam Hong and Kim, Cheol Woong, 2003, "The Analysis of Fatigue Behavior Using the Delamination Growth Rate ( $dA_D/da$ ) and Fiber Bridging Effect Factor ( $F_{BE}$ ) in Al/GFRP Laminates", Transactions of the KSME, A, Vol. 27, No. 2, pp. 317~326.
4. Song, Sam Hong and Kim, Cheol Woong, 2003, "Analysis of Delamination Behavior on the Stacking Sequence of Prosthetic Foot Keel in Glass Fiber Reinforced Laminates", Transactions of the KSME, A, Vol. 27, No. 4, pp. 623~631.
5. Song, Sam Hong and Kim, Cheol Woong, 2004, "Evaluation of Delamination Behavior in Hybrid Composite Using the Crack Length and the Delamination Width", Transactions of the KSME, A, Vol. 28, No. 1, pp. 55~62.

6. Song, Sam Hong and Kim, Cheol Woong, 2004, "Evaluation of Delamination for Fiber Reinforced Metal Laminates Using a Pseudo Crack Model", Transactions of the KSME, A, Vol. 28, No. 2, pp. 174~180.
7. Song, Sam Hong and Kim, Cheol Woong, 2004, "The Effect of Fiber Stacking Angle on the Relationship Between Fatigue Crack and Delamination Behavior in a Hybrid Composite Materials", Transactions of the KSME, A, Vol. 28, No. 3, pp. 281~288.
8. Goo, N. S., Shin, S. J., Park, H. C. and Yoon, K. J., 2001, "Design Analysis / Manufacturing / Performance Evaluation of Curved Unsymmetrical Piezoelectric Composite Actuator LIPCA", Transactions of the KSME, A, Vol. 25, No. 10, pp. 1514~1519.
9. Park, K. H., Yoon, K. J. and Park, H. C., 2002, "Development of Lightweight Piezo-Composite Curved Actuator", Journal of the KSAS, Vol. 30, No. 5, pp. 94~100.
10. Kim, K. Y., Park, K. H., Yoon, K. J. and Park, H. C., 2003, "Experimental Performance Evaluation and Comparison for Lightweight Piezo-Composite Actuator LIPCA", Journal of the KSCM, vol. 16, No. 2, pp. 41~47.
11. Yoon, K. J., Park, K. H., Lee, S. K., Goo, N. S. and Park, H. C., 2004, "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.
12. Yoon, K. J., Kim, K. Y., Goo, N. S., Park, H. C. and Haw, J. R., 2004, "Actuator Performance Degradation of Piezo-Composite Actuator LIPCA Under Cyclic Actuation", Key Engineering Materials, Vols. 261-263, pp. 1331~1336.
13. Kim, C. W., Oh, D. J. and Yoon, K. J., 2005 "New Calculation Method for the Total Effective Moment of LIPCA Using Actuating Height", International Pacific Conference on Automotive Engineering, No. 186.