

빗살형 전극을 이용한 적층 세라믹 박판 작동층 IDEAL의 설계/제조/성능시험

이제동 · 박훈철 · 구남서 · 윤영수* · 윤광준[†]
건국대학교 기계항공공학부 항공우주공학전공
*건국대학교 신기술융합학과
(2003년 12월 11일 접수; 2004년 1월 14일 승인)

Design/Manufacturing/Performance-Test of Stacked Ceramic Thin Actuation Layer IDEAL Using Interdigitated Electrodes

Je Dong Lee, Hoon Cheol Park, Nam Seo Goo, Young Soo Yoon,* and Kwang Joon Yoon[†]

Department of Aerospace Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

*Department of Advanced Fusion Technology, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

(Received December 11, 2003; Accepted January 14, 2004)

초 록

본 논문은 압전세라믹의 압전상수 d_{33} 를 이용한 적층 세라믹 박판 작동층 IDEAL (InterDigitated Electrode Actuation Layer)의 개발에 관한 것이다. 대부분의 박판 압전 작동층은 압전상수 d_{31} 효과를 이용하고 있다. 현재 개발된 압전작동기의 성능을 향상시키기 위해 많은 연구가 수행 중에 있으며, 그 중 한 방법이 압전상수 d_{33} 를 이용하는 방법이다. 압전세라믹의 압전상수 d_{33} 는 압전상수 d_{31} 보다 일반적으로 두배 정도이기 때문에 d_{33} 작동 효과를 활용하면 작동기의 성능을 향상시킬 수 있다. 미국 MIT에서 개발된 AFC와 NASA Langley 연구소 연구팀이 개발한 LaRC-MFCTM는 d_{33} 작동 효과를 활용하였으나 빗살형 전극이 작동층 상하 표면에 부착되어 있어 완전한 d_{33} 작동 효과를 활용하였다고 볼 수 없다. 본 논문에서는 빗살형 전극을 세라믹 층간에 삽입한 적층형 세라믹 박판 작동층을 설계하고 제작하였다. 제작된 작동층의 작동 스트레인을 측정하였고 LaRC-MFCTM의 작동 스트레인과 비교한 결과, 본 연구에서 개발한 박판 세라믹 작동층이 15% 이상의 작동 스트레인을 발생시킬 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper is concerned with the development of stacked ceramic thin actuation layer IDEAL (InterDigitated Electrode Actuation Layer) using d_{33} actuation mechanism of piezoelectric ceramic. Most of the thin piezoelectric actuators are operated with d_{31} actuation mechanism. Many kinds of piezoelectric ceramic actuators are strived now to improve the actuation performance. One of efforts to improve performance of piezoceramic actuators is the research trying to develop an actuator using the piezoelectric coefficient d_{33} . The piezoelectric coefficient d_{33} is almost twice larger than piezoelectric coefficient d_{31} . Therefore, the induced strain of PZT thin layer with d_{33} actuation mechanism is bigger than that with d_{31} actuation mechanism. The AFC(MIT) and LaRC-MFCTM which is developed by a research team of NASA Langley Research Center used d_{33} actuation mechanism with surface interdigitated electrode to enhance its actuation performance. But their actuation mechanism is not perfect d_{33} actuation mechanism since the interdigitated electrodes are placed at the surface of the actuation layer. In this research, the stacked ceramic thin actuation layer with imbedded interdigitated electrode is designed and manufactured. The actuation strain of stacked ceramic thin actuation layer is measured and compared with the actuation strain of the LaRC-MFCTM. The comparison shows that the developed stacked ceramic thin actuation layer can produce 15% more actuation strain than LaRC-MFCTM.

Key words : Stacked piezoelectric actuator, Piezoelectric coefficient d_{33} , InterDigitated Electrode, InterDigitated Electrode Actuation Layer

1. 서 론

고성능 압전 세라믹 작동기는 항공기, 미사일의 조종면

이나 유연 대형 우주구조물의 진동제어 및 로봇 등의 작동부위를 위해 사용되는 것으로, 최근에는 압전 세라믹 작동기의 성능을 향상시키기 위하여 다양한 방법의 연구가 진행되고 있다. 압전 세라믹은 최대 변형률이 매우 작아 큰 작동변위를 내지 못하기 때문에 압전 세라믹 박판을 이용한 다양한 방식의 압전 세라믹 작동기가 개발되고 있다. 대표적인 예로 RAINBOW (Reduced And Inter-

[†]Corresponding author : Kwang Joon Yoon
E-mail : kjoyoon@konkuk.ac.kr
Tel : +82-2-450-3549 Fax : +82-2-444-6670

Table 1. Comparison of d_{31} and d_{33} of CTS Ceramics

	PZT 3195HD	PZT 3203HD
d_{31} (pm/V)	-190	-320
d_{33} (pm/V)	390	650

nally Biased Oxide Wafer),^{1,2)} THUNDER (Thin layer composite Unimorph ferroelectric DrivER and sensor)^{3,4)}와 당 연구실에서 개발한 LIPCA (Lightweight Piezo-Composite Actuator),^{5,6)} 미국 MIT에서 개발한 AFC (Active Fiber Composite),⁷⁾ LaRC-MFC™ (NASA Langley Research Center Macro-Fiber Composite)⁸⁾ 등이 있다. 이 중 현재까지의 RAINBOW, THUNDER, LIPCA 작동기는 모두 압전상수 d_{31} 작동원리를 이용한 복합재료 구조라고 볼 수 있다.

압전상수 d_{31} 는 z축 방향(3방향)으로 전기장을 가했을 때, x축 방향(1방향)으로 늘어나는 정도를 나타내는 상수이고 d_{33} 는 z축 방향(3방향)으로 전기장을 가했을 때, z축 방향(3방향)으로 늘어나는 정도를 표현한 상수이다. Table 1은 미국 CTS사가 생산하고 있는 압전세라믹의 압전상수 d_{31} 과 d_{33} 를 비교한 것으로 d_{33} 가 d_{31} 에 비하여 약 2배 정도 크기 때문에 압전상수 d_{33} 를 활용하면 작동기의 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 압전상수 d_{33} 효과를 활용할 수 있도록 작동기 두께가 1 mm 이상 되는 적층형 세라믹 작동기⁹⁾가 개발되기도 하였으나, 그 제조 방법에 있어서 설계 작동층의 두께와 같은 너비의 단위 작동층을 모두 준비하여 적층하는 제조상의 어려움을 가지고 있다.

박판 작동층에 해당되는 AFC나 LaRC-MFC™는 Fig. 1과 같이 IDE (Inter-Digitated Electrode; 빗살형 전극)를 부착시킨 구조로 d_{33} 효과를 활용한 구조라고 볼 수 있다. 그러나, 빗살형 전극이 전체 작동층의 상하 표면에 부착되어 있어 기하학적 형상에서 완전한 d_{33} 작동구조가 아니고 전극 너비만큼의 손실도 유발된다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 빗살형 작동전극을 적층된 세라믹층 사이로 삽입시켜 완전한 d_{33}

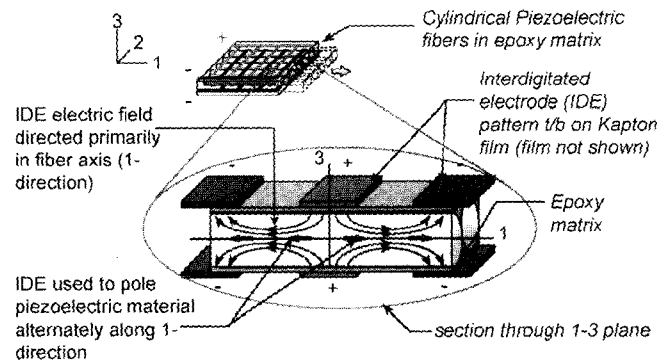


Fig. 1. Actuation mechanism of piezoelectric actuator with surface inter-digitated electrode.⁸⁾

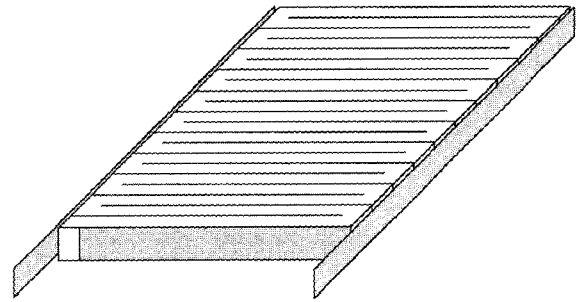


Fig. 2. Schematic of the designed IDEAL.

효과를 발생시킬 수 있는 구조의 적층 세라믹 박판 작동층 IDEAL (InterDigitated Electrode Actuation Layer)을 설계하였고 이러한 구조의 박판 작동기를 효율적으로 제조할 수 있는 방법도 제시하였다. 또한, 제조된 시편에 대하여 작동 스트레인 성능시험을 수행하여 기존에 개발된 우수한 작동층의 성능과 비교·분석하였다.

2. 적층 세라믹 박판 작동층 IDEAL의 설계/제조/성능시험

2.1. 적층 세라믹 박판 작동층 IDEAL의 설계

압전 세라믹의 d_{33} 작동효과를 극대화 하기 위하여 Fig. 2와 같이 빗살형태의 작동전극을 적층된 세라믹층들의 사이로 삽입시켰고 양극과 음극이 교차되어 배치될 수 있도록 삽입 전극과 옆면 주전극선을 그림과 같이 연결하였다. 또한 삽입 전극의 끝부분과 반대편의 주전극선과의 통전을 방지하기 위하여 1 mm 이상 떨어지도록 하였다.

2.2. 적층 세라믹 구조의 작동 스트레인 예측

Fig. 3은 적층 세라믹 구조의 평면 구성도이고, 이 그림에 세라믹층, 전극, 접착층의 두께가 정의되어 있다. 세라믹층 양면에 금속 전극이 입혀진 n 개의 세라믹 층이 적층되었을 경우, 표면 전극의 수는 $2n$ 개이며, 접착층의 수는 $(n-1)$ 개이다. 그리고 각층의 두께를 t_{ce} , t_{el} , t_{ad} 로 나타내었다.

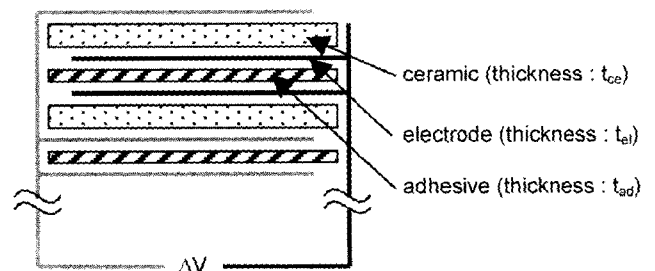


Fig. 3. Schematic for the stacked structure.

Table 2. Piezoelectric Strain Induced by d_{33} Actuation at 300 V/mm

t_{ce} (mm)	t_{el} (mm)	t_{ad} (mm)	n	t_{total} (mm)	Δt_{total} ($\times 10^{-6}$)	$\mu\epsilon$	V/Layer
0.1	0.003	0.035	72	10.01	1.4	139	30
0.25	0.003	0.035	35	10.02	1.71	168	75
0.5	0.003	0.035	19	10.02	1.85	181	150
1.0	0.003	0.035	10	10.04	1.95	188	300
2.0	0.003	0.035	5	10.02	1.95	192	600

이러한 IDEAL을 설계하기 위하여 작동 스트레인 예측 모델을 식 (1), (2), (3)과 같이 구성하였다.

$$\epsilon_a = \frac{\Delta t_{total}}{t_{total}} \tag{1}$$

$$t_{total} = (n) \cdot t_{ce} + (2n) \cdot t_{el} + (n-1) \cdot t_{ad} \tag{2}$$

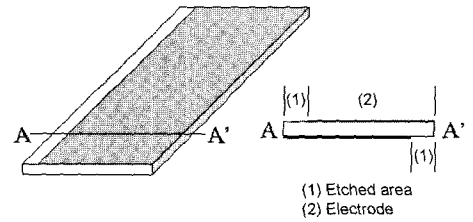
$$\Delta t_{total} = (n) \cdot \frac{d_{33}}{t_{ce}} \cdot \Delta V \cdot (t_{ce}) = n \cdot d_{33} \cdot \Delta V \tag{3}$$

적층된 세라믹 박판 작동층에 전기장이 걸리면 작동 스트레인 ϵ_a 는 식 (1)과 같이 표현된다. 식 (1)에서 t_{total} 은 적층 세라믹 구조 전체의 두께로 Fig. 3을 참조하면 식 (2)와 같이 표현된다. 이때 적층 세라믹 구조에 가해지는 전압을 ΔV 라 하면 의하여 에 의하여 작동되는 두께 변화를 Δt_{total} 로 정의하고 식 (3)과 같이 표현된다.

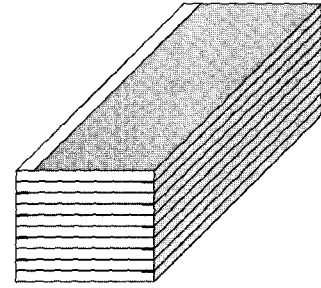
Table 2는 식 (1)~(3)을 사용하여 전체 두께가 10 mm 정도로 될 수 있는 5가지 경우의 적층형 세라믹 구조에 대하여 300 V/mm 전기장에서 예측되는 스트레인이다. 이때 접착층의 두께는 0.035 mm, 전극의 두께는 0.003 mm로 하였다. 적층 수가 증가할수록 예상 스트레인은 줄어들고 있으나 단일 세라믹 층의 두께가 상대적으로 더 많이 줄어들어 작은 작동전압으로도 상당한 스트레인을 발생시킬 수 있음을 볼 수 있다. 본 연구에서는 단일층 두께가 0.5 mm인 세라믹을 택하여 적층형 세라믹 작동기 구조를 제작하였다.

2.3. 적층 세라믹 박판 작동층 IDEAL의 제조

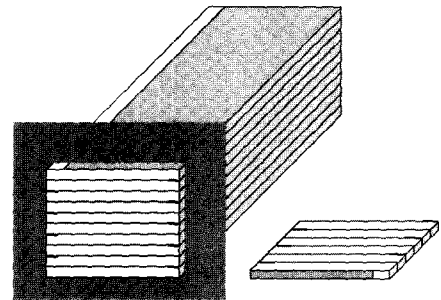
IDEAL의 제조과정은 Fig. 4(a)와 같이 먼저 압전세라믹 상하면에 부착되어 있는 니켈 전극 가장자리 1 mm 너비를 $FeCl_3$ (염화제2철)로 에칭하여 제거한 후에, Fig. 4(b)처럼 각각의 압전세라믹을 에폭시 접착제를 이용하여 적층을 하였다. 적층 시, 압전세라믹의 폴링방향이 번갈아 가면서 반대방향으로 적층되도록 하여야 한다. 그렇지 않으면 작동 전압을 가하여도 작동 스트레인이 발생하지 않는다. 에폭시 접착제가 경화된 후에 Fig. 4(c)와 같이 적층된 압전세라믹을 단면을 따라 박판 형상으로 Fig. 5와 같이 다이아몬드 휠을 사용한 정밀 절단기로 두께가



(a) Schematic of etched PZT layer



(b) Schematic of stacked PZT layer



(c) Schematic of sliced PZT stack layer

Fig. 4. Manufacturing process of IDEAL.

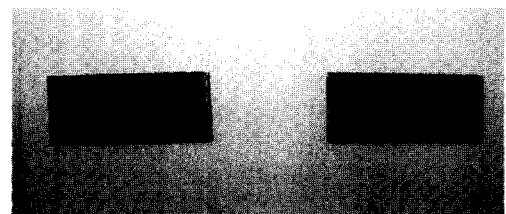


Fig. 5. Manufactured IDEAL specimens.

0.25 mm와 0.5 mm로 되도록 절단하였다. 절단된 박판 작동층의 좁은 옆면을 매끈한 평면이 되도록 폴리싱하여 실버 파우더가 섞인 통전 에폭시로 구리 박판 주전극선과 접착하여 빗살형 전극을 구성함으로써 IDEAL을 완성하였다.

2.4. 적층 세라믹 박판 작동층 IDEAL의 성능시험

준비된 IDEAL 시편의 작동 스트레인 성능을 알아보기 위하여 Fig. 6와 같이 시편의 중앙에 스트레인 게이지를 부착시키고 시편의 양 옆면의 구리 박판에 전선을 연결하여 DC 전원과 연결시켰다.

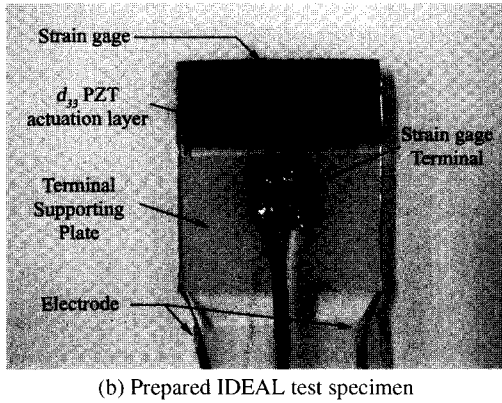
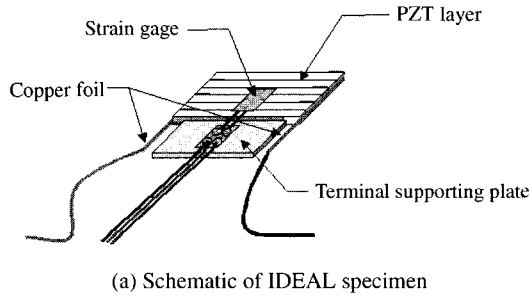


Fig. 6. IDEAL specimen.

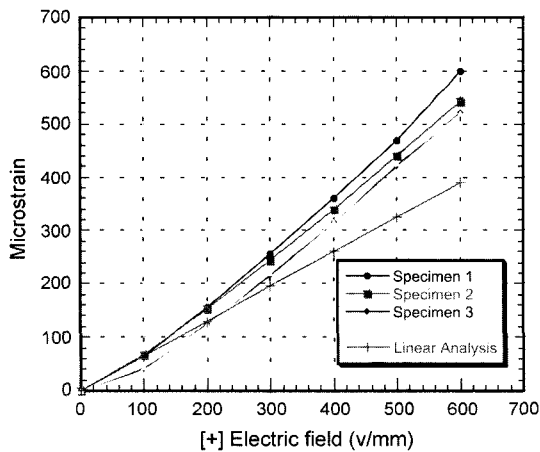


Fig. 7. Actuation strain comparison between the linear analysis and test result.

스트레인 인디케이터, 전압계, 전원공급장치를 이용하여 실험장치를 구성하였으며, DC 전압을 증가 시키며 작동 스트레인의 변화를 측정하였다. 실험과정에서 분극역 전현상(domain switching)이 대략 700 V/mm에서 발생하는 것이 관찰되어 전기장을 600 V/mm까지 증가시켰다.

4개 시편에 대한 실험 결과와 선형해석 예측 결과는 Fig. 7과 같다. 실험 결과가 수치해석 결과와 비교하여 초기에는 비슷하나 높은 전기장으로 갈수록 40%이상 큰 차이를 볼 수 있다. 높은 전기장에서 측정치와 예측치가 큰 차이를 보이는 이유는 제조 회사에서 제공한 d_{33} 는 전압

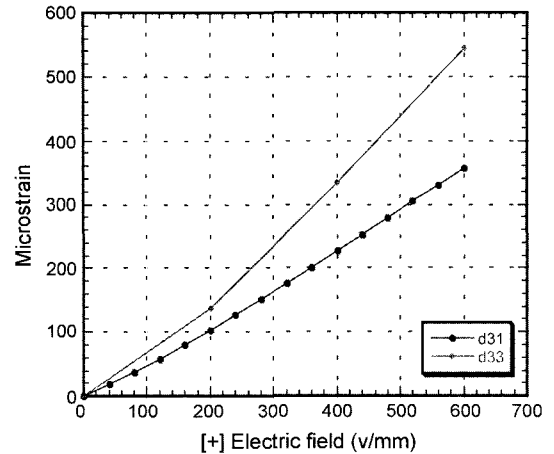


Fig. 8. Actuation strain comparison between d_{31} specimen and IDEAL.

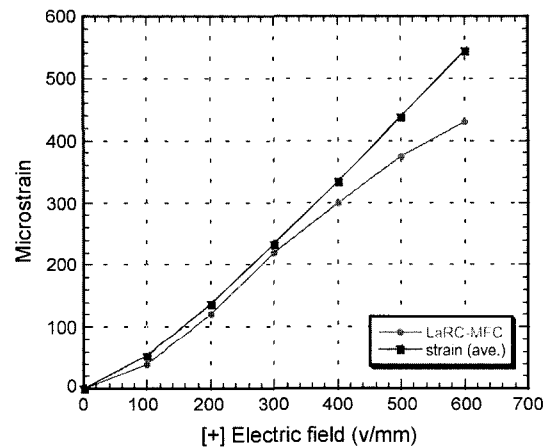


Fig. 9. Actuation strain comparison between IDEAL and LaRC-MFCTM.

이 비교적 낮은 범위에서 측정된 데이터로 전압이 분극역전 전압에 접근할 경우 d_{33} 가 비선형적으로 크게 변하는 경향 때문으로 판단된다. Fig. 8은 압전상수 d_{31} 효과와 d_{33} 효과를 사용하였을 때, 각각의 변형률을 서로 비교한 것이다. d_{33} 효과를 사용한 경우가 d_{31} 효과를 사용했을 때에 비해서 50%이상 큰 변형률을 보이고 있어 d_{33} 효과를 이용한 작동층의 작동 스트레인 성능이 1.5배 이상 될 수 있음을 확인하였다. 이 작동층의 성능을 보다 객관적으로 비교하기 위하여 현재까지 개발된 박판 세라믹 작동층 중에 가장 성능이 우수하다고 할 수 있는 LaRC-MFCTM의 작동 스트레인 성능과 비교한 것이 Fig. 9에 나타나있다. 전기장이 300 V/mm까지일 경우, IDEAL 시편의 작동 스트레인이 LaRC-MFCTM의 작동스트레인⁸⁾보다 10% 정도 크고 600 V/mm 전기장의 경우 25% 더 큼을 알 수 있었다. 이것은 표면 IDE 전극 구조보다 삽입 IDE 전극 구조가 더 완벽하게 d_{33} 효과를 낼 수 있는 것에서 기인되었다고 할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 삽입형 IDE 전극 구조를 적용하여 d_{33} 효과를 극대화한 IDEAL을 설계하였고 단위 적층판을 설계된 두께만큼 적층하여 접착한 후 박판 형상으로 얇게 절단하는 방법을 제시하였다. IDEAL 시제품에 대한 성능 평가 결과, 현재 우수 박판 압전 작동층으로 평가되고 있는 AFC나 LaRC-MFC 보다 작동 스트레인 성능면에서 우수함을 실험적으로 입증하였다. 비교적 길이가 긴 IDEAL 작동층을 제작함에 있어서 두께가 얇은 단위 작동기를 여러 개 적층하고 주전극을 앞서 적층된 작동층의 각각의 복잡한 빗살형 전극으로 완벽하게 연결하여야 하는 어려움이 수반된다. 이러한 제조 과정의 문제점은 MEMS기술이나 미세회로 제조 기술이 축적된 반도체 제조기술의 적용으로 해결하여야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정 연구실사업 (National Research Lab.)의 지원을 받아 수행된 연구 결과의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. G. H. Haertling, "Rainbow Actuators and Sensors : A New Smart Technology," *Proc. of SPIE Conference*, San Diego, CA, **3040** 3-4 March (1997).
2. S. A. Wise, "Displacement Properties of RAINBOW and THUNDER Piezoelectric Actuators," *Sensors and Actuators, A* **69** 33-8 (1998).
3. K. M. Mossi and R. P. Bishop, "Characterization of Different Types of High Performance THUNDER," *Proc. of SPIE Conference*, **3675-05**, Newport Beach, CA, 1-5 March (1999).
4. J. L. Pinkerton and R. W. Moses, "A Feasibility Study to Control Airfoil Shape Using THUNDER," *NASA Technical Memorandum* 4767, 1997.
5. K. H. Park, Y. B. Kim, Y. S. Kim, H. C. Park, and K. J. Yoon, "Experimental Performance Evaluation of Light-Weight Piezo-Composite Curved Actuators," *SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, 17-21 March, 2002.
6. N. S. Goo and K. J. Yoon, "Analysis of LIPCA Actuators," *International J. of Modern Physics B*, **17** [3&4] 647-52 (2003).
7. R. Gentilman, K. McNeal, G. Schmidt, A. Pizzochero, and G. A. Rossetti, Jr., "Enhanced Performance Active Fiber Composite," *SPIE's 10th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, USA, 2-6 March 2003.
8. W. K. Wilkie, R. G. Bryant, J. W. High, R. L. Fox, R. F. Hellbaum, A. Jalink, Jr., B. D. Little, and P. H. Mirick, "Low-Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications," *SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, CA, 5-9 March, 2000.
9. <http://www.trsceramics.com/actuators.html#products>.