

압전 단결정 재료를 이용한 이식형 인공중이용 적층 액츄에이터 개발

Development of a Multi-Layer Actuator With Piezoelectric Single Crystals for an Implantable Hearing Aid

선 주 현*, 이 상 구**, 노 응 래***

(Jooheon Seon*, Sang-gu Lee**, Yongrae Roh***)

*경북대학교 센서공학과, **㈜ 아이블 포토닉스, ***경북대학교 기계공학부

(접수일자: 2004년 9월 14일; 수정일자: 2005년 3월 2일; 채택일자: 2005년 3월 14일)

이식형 인공중이용 트랜스듀서는 주파수 특성 및 구동 성능이 우수해야 하고 크기가 작아야 한다. 이러한 트랜스듀서로서 단결정 압전 재료인 PMN-PT를 이용한 적층형 액츄에이터를 제안하였고, 유한요소해석 및 제작실험을 통해 그 타당성을 밝혔다. 실험에서는 두께 0.2mm를 갖는 시편을 14층으로 쌓아 최종적으로 1mm×1mm×2.8mm 크기의 PMN-PT 적층형 액츄에이터를 제작 하였다. 제작된 PMN-PT 액츄에이터의 성능은 Impedance Spectrum과 구동변위 측정을 통해 PZT 액츄에이터와 비교, 평가 하였고, 이를 통해 단결정 재료인 PMN-PT를 이용할 경우 우수한 성능의 인공중이용 액츄에이터 제작이 가능함을 확인하였다.

핵심용어: 이식형 인공중이, 적층형 액츄에이터, 단결정 압전재료, PMN-PT

투고분야: 음향측정 및 센서분야 (14.3)

Transducers for implantable hearing aids need to be small and to have good performance in frequency responses and vibration properties. From this viewpoint, we proposed a multi-layer actuator with the piezoelectric single crystal, PMN-PT, for the implantable hearing aid, and verified its adequacy through finite element analyses and experiments. PMN-PT multi-layer actuator samples were fabricated by stacking fourteen layers of the PMN-PT crystal. Each layer were 0.2mm thick and the actuator sample was 2.8mm thick in total. We evaluated the performance of the PMN-PT actuator through impedance analyses and vibration displacement measurements, and compared the result with that of a PZT actuator. Results of all the process confirmed the feasibility of the PMN-PT actuator as a good transducer for an implantable hearing aid.

Keywords: Implantable Middle Ear, Multi-layer actuator, Piezoelectric Single Crystal, PMN-PT

ASK subject classification: Acoustical Measurements and Sensors (14.3)

I. 서 론

최근 의료기술의 발달로 인한 고령화 및 산업화의 영향으로 난청인구의 수가 급증하고 있으며 이들의 청력을 보조하기 위한 여러 가지 청각 보조장치들이 활발히 연구되고 있다. 이러한 청각 보조장치의 종류로는 귀 뒤 혹은 와이도에 착용하는 공기전도형 보청기[1]와 골전도

형 보청기[2], 인공와우 이식[3], 이식형 인공중이[4] 등을 들 수 있다. 이들 중 중,고도 난청자 및 감음신경성 난청자를 위한 청각보조장치로서 이소골이나 내이 입구를 직접 구동하여 음성신호를 전달하는 이식형 인공중이가 크게 주목 받고 있는 추세이다[5].

이식형 인공중이는 체외기, 체내기 및 진동 트랜스듀서로 구성된다. 체외기는 마이크로폰과 신호 처리부 및 송신코일로 이루어져 있고, 체내기는 주로 유양돌기에 설치되며 피부를 거쳐 수신코일에 유도된 신호를 복원하는 검파기와 이소골에 설치되는 진동 트랜스듀서로 구성되어 있다. Fig. 1은 일반적인 인공중이 시스템의 구조이

고, Fig. 1에서 보는 바와 같이 진동 트랜스듀서는 중이 내의 매우 좁은 장소에 설치되어 전기적인 음성신호를 물리적인 진동신호로 전달하는 역할을 한다. 따라서 트랜스듀서는 작은 크기로 제작이 가능하면서도 이소골을 충분히 진동시킬 수 있는 큰 구동력을 갖추어야 한다. 이러한 진동 트랜스듀서는 작동원리에 따라 크게 전자기 형과 압전형으로 나눌 수 있다. 전자기형은 코일과 영구 자석으로 된 간단한 구조를 가지며, 코일에 교류 전류가 흐르게 되면 코일이 자장을 형성하고 자석이 이 자장에 의해서 힘을 받게 되어 진동하게 된다[6]. 구조가 간단하고 주파수 특성 및 생체 적합성, 구동력 등이 우수하지만 외부 자장에 의해 잡음이 발생하거나 동작에 문제가 생길 수 있다[7]. 기존의 압전형은 압전 효과를 가지는 세라믹 Bimorph 액츄에이터의 끝을 이소골에 부착시키고 교류전압에 의한 Bimorph 액츄에이터의 변위발생을 이용하여 진동을 발생시키는 구조이다[8]. Bimorph 액츄에이터는 내구성이 우수할 뿐 아니라 전압구동 방식이므로 검파 회로가 간단한 장점이 있지만, 구동력이 약한 단점이 있다. 때문에 큰 구동력을 얻기 위해서는 액츄에이터의 길이가 길어져야 하고 길어진 액츄에이터를 인체 내부에 넣기 위해 이소골이 모두 제거되어야 한다. 이로 인해 수술이 힘들고 복잡해지게 되며, 장기간 사용시 생체 내 지지부분의 변형으로 신호전달 성능이 변화할 가능성 또한 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 Bimorph 형 액츄에이터의 문제점을 극복하기 위한 압전 트랜스듀서로서 구동 효율이 우수한 적층형 액츄에이터를 제안하였고, 제안된 구조의 동특성 해석 및 실험적으로 액츄에이터를 제작, 평가함으로써 그 타당성을 밝히고자 한다.

적층형 액츄에이터의 구동변위는 ΔT , 최대 구동력은 F_{max} 로 표시하였을 때 적층된 층의 수 n 과 구동전압 V 에 따라 각각은 다음과 같이 표현된다[9].

$$\Delta T = n \Delta t = n d_{33} V \tag{1}$$

$$F_{max} = k_f \Delta T \tag{2}$$

여기서 Δt 는 적층된 층들 중 한 층의 구동 변위를 뜻하며 k_f 는 액츄에이터 재료의 두께방향 강성계수를 나타낸다. 수식에서 보는 바와 같이 적층된 층이 많을수록, 구동전압이 높을수록 그리고 압전재료의 두께방향 특성으로서 전압-변위 변환 비를 나타내는 상수인 d_{33} 값이 우수한 재료를 사용할수록 ΔT 를 증가시킬 수 있고, ΔT 를 증가 시킴으로써 고도 난청자에게 필요한 충분한 구동력 F_{max} 를 확보할 수 있음을 알 수 있다.

현재까지 대부분의 상용화된 적층형 액츄에이터들은 인공중이용으로 사용하기에는 그 크기가 너무 크고, 청각 보조 장치로서 필요한 만큼의 변위를 발생시키기 위해서는 고전압의 구동신호를 필요로 하기 때문에 인체 내부에 적용하기에는 부적합하다. 따라서 기존의 PZT보다 압전 특성이 우수하다고 알려진 압전 단결정 PMN-PT[10]를 사용하여 저전압에서도 충분한 구동력을 얻을 수 있는 소형 트랜스듀서를 제안 하고자 하며, 그 구조를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 구조는 적층 커패시터에 이미 널리 사용되고 있는 구조이나[11], 통상적인 압전세라믹인 PZT로는 저전압으로 충분한 변위를 발생시키기 어려운 문제가 있고, 반면 저전압으로 큰 변위를 발생시킬 수 있는 PMN-PT를 사용할 경우 압전 단결정의 특성상 Tape Casting 같은 종래의 적층커패시터 제작 기법을 적용하기 어렵다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 소형 제작이 가능한 공정 기법의 개발과 압전 특성이 우수한 PMN-PT를 이용해 이를 극복하고자 한다.

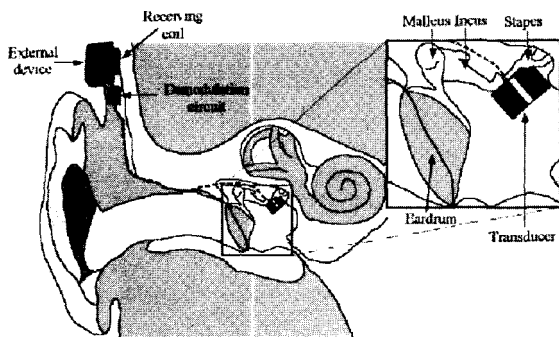


그림 1. 인공중이 시스템의 구조
Fig. 1. Structure of implantable middle ear systems.

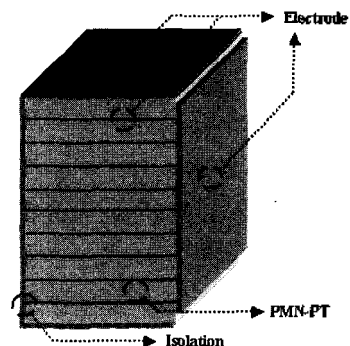


그림 2. PMN-PT를 이용한 적층형 액츄에이터의 형상
Fig. 2. Structure of the PMN-PT multi-layer actuator.

II. 압전 액추에이터의 유한요소 해석

앞서 언급되었던 단결정 PMN-PT를 이용하여 액추에이터를 제작할 경우 일반적인 압전 세라믹인 PZT를 사용하였을 때에 비해 어느 정도의 성능 향상이 있는지를 알아 보기 위하여 적응형 액추에이터에 대해 상용 유한요소해석 도구인 ANSYS를 이용한 사용재료별 구동변위 해석을 실행하였다.

적층형 액추에이터는 $w = 1\text{mm}$, $H = 1\text{mm}$, $t = 0.2\text{mm}$ 크기의 압전 세라믹 Layer를 두께방향으로 14층을 쌓아 올린 구조로 가정하였고 최종적으로 2.8mm 정도의 두께를 갖게끔 모델링 하였다. 유한요소해석에 사용된 적응형 액추에이터 모델의 형상과 전체 변위 분포는 Fig. 3에 나타내었고 이를 통해 액추에이터의 변위 발생 형상이 두께 방향 진동 임을 확인할 수 있다.

또한 적응형 액추에이터의 구동변위 특성을 보기 위해 주파수에 따른 변위해석을 수행 하였고 특히 1kHz에서의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그래프에서 y-축은 액추에이터에서 발생한 변위의 크기를 나타내고 x-축은 액추에이터 윗면에서의 변위 측정위치를 나타낸 것으로 왼쪽 중앙의 끝점이 0mm이고 값이 증가할수록 오른쪽 중앙 끝점으로 다가감을 나타낸다. 그래프에서 보는 바와 같이 액추에이터 윗면 중앙지점인 0.5mm에서의 값을 기준으로 하였을 때 PMN-PT를 사용한 액추에이터가 PZT-5H를 사용한 경우보다 약 260% 정도 우수한 구동 특성을 보여줌을 알 수 있고, 1kHz에서 뿐만 아니라 가청영역 전구간에 걸쳐 이와 유사한 경향을 확인할 수 있었다.

이상의 해석 결과를 통해 적응형 구조물 에서도 단결

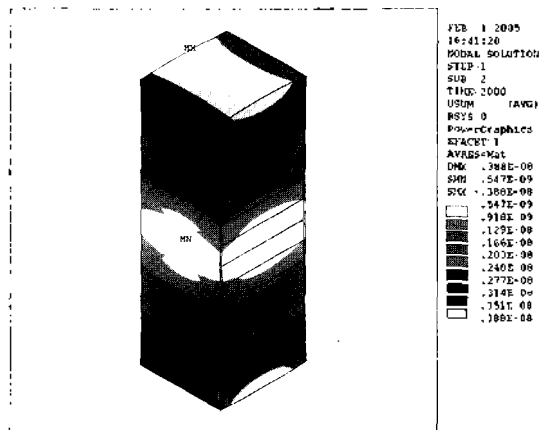


그림 3. 적응형 액추에이터의 변위분포
Fig. 3. Displacement distribution of the multilayer actuator.

정 PMN-PT의 성능이 기존의 압전 세라믹 재료인 PZT-5H 보다 월등히 뛰어난 것을 확인하였고, 이는 단결정 PMN-PT를 적응형 액추에이터 제작에 적용할 경우 크기가 작으면서도 저전압에서 큰구동력을 얻을 수 있는 인공중이용 트랜스듀서의 제작이 가능하다는 것을 의미한다.

III. 적응형 액추에이터 제작

본 연구에서 고안한 적응형 액추에이터 제작 방법은 Tape casting과 같은 기존의 적응 컨덴서 제작 방법과는 달리 bulk형 압전 단결정 시편을 이용해 적응 구조를 만드는 것이다.

먼저 압전 단결정을 얇게 연마하여 두께 0.2mm의 얇은 PMN-PT 평판 시편을 만든 다음, 시편 각각의 양면에 전극면을 형성하고 분극을 시행하였다. 분극이 완료된 시편의 표면을 깨끗이 세척한 다음 Fig. 5. (a)와 같이 전도성 Epoxy를 이용하여 각 시편들을 접착하였다. 이때 접착면 사이에 공기가 남아 있게 되면 Air Cavity를 형성하게 되고 이로 인해 성능 저하를 초래할 수 있으므로 균일한 밀착을 위해 진공 환경 하에서 윗면과 아래면에 적정 수준의 압력을 인가하며 접착공정을 수행하였다. 완성된 적응형 구조물을 Dicing Machine을 이용하여 Fig. 5. (b)와 같이 목표 크기로 Dicing하였고 구조물의 표면에 Fig. 5. (c)와 같이 절연성을 갖는 Polymer를 균일한 두께로 Coating하였다. Coating된 Polymer의 경화를 위해 Oven을 이용하여 70°C에서 Baking을

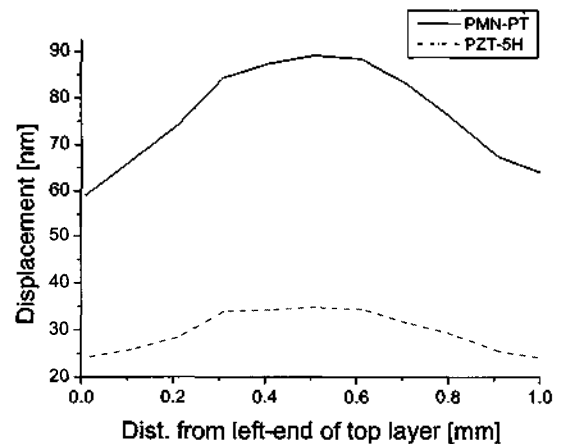


그림 4. PMN-PT 액추에이터와 PZT 액추에이터의 변위특성 비교
Fig. 4. Comparison of the PMN-PT and PZT-5H actuator displacements from finite element analyses.

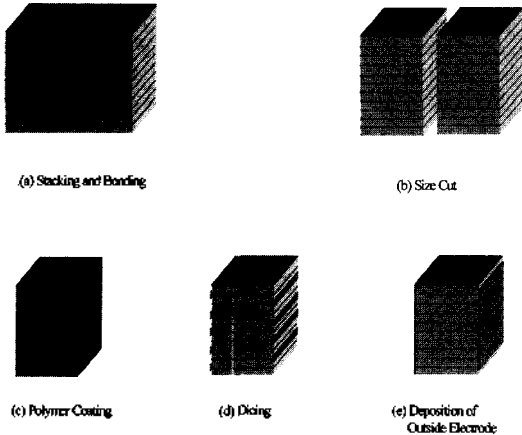


그림 5. PMN-PT 적층형 액츄에이터의 제작 공정
Fig. 5. Fabrication Process of the PMN-PT multi-layer actuator.

실행 하였고 Dicing Machine을 이용하여 Fig. 5. (d)와 같이 Isolation Pattern을 형성하였다. Isolation Pattern 위로 Thermal Evaporator를 이용하여 외부 전극을 증착하여, 최종적으로 Fig. 5. (e)와 같은 형태의 적층형 액츄에이터를 제작하였다.

제작된 적층형 액츄에이터는 가로 세로의 길이가 1mm, 1mm이고, 두께 0.2mm인 시편 14층이 쌓여 최종적으로 2.8mm의 두께를 갖도록 제작되었다. 완성된 PMN-PT 적층형 액츄에이터의 형태를 Fig. 6에 나타내었다.

IV. 측정 및 토의

액츄에이터의 성능 평가에는 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 인공중이용 트랜스듀서로서의 적용을 고려하였기 때문에 주파수 변화에 따른 Impedance 변화

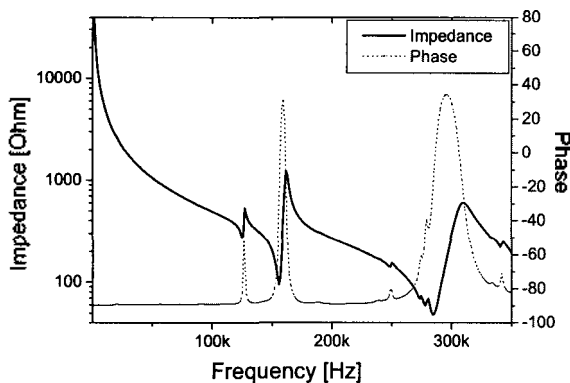


그림 7. PMN-PT 적층형 액츄에이터의 임피던스 스펙트럼
Fig. 7. Impedance spectrum of the PMN-PT multi-layer actuator.

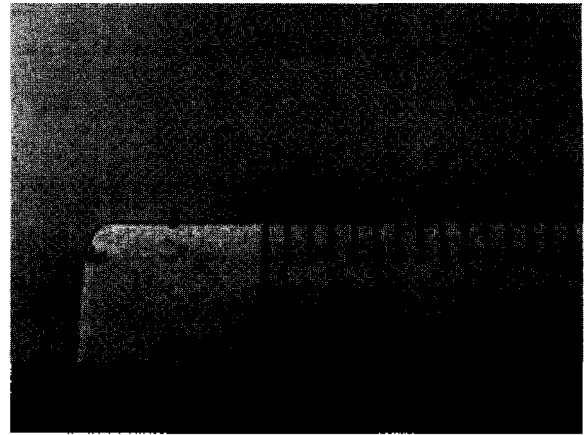


그림 6. PMN-PT 적층형 액츄에이터
Fig. 6. Photograph of the PMN-PT multi-layer actuator (thickness).

와 구동변위만을 측정하였다. 주파수 변화에 따른 Impedance 변화 측정에는 Impedance Analyzer HP 4194A를 사용 하였고 PMN-PT 액츄에이터의 Impedance curve를 100Hz부터 350kHz까지 범위에 대해 측정하여 Fig. 7에 나타내었다.

측정결과로부터 155kHz와 165kHz에서 명확한 두께 모드의 공진 및 반공진 특성을 확인할 수 있으며, 이는 압전재료로 만들어진 액츄에이터에서 흔히 볼 수 있는 Impedance 특성과 일치한다[12]. 따라서 본 연구에서 제작된 적층형 액츄에이터가 일반적인 압전 액츄에이터와 같이 정상적인 동작을 하고 있음을 알 수 있고, 이는 제작에 사용된 Polymer층이 Isolation 층으로서 적절히 사용되고 있음을 의미한다.

다음으로 단결정 재료인 PMN-PT를 사용할 경우 얼마만큼의 성능향상이 있는지를 비교해 보기 위해 일반적인 압전재료인 PZT를 이용하여 똑 같은 구조의 적층형 액츄에이터를 제작 하였고 이때의 Impedance 특성 역시 Fig. 8에 나타내었다. 측정결과 PMN-PT와 마찬가지로

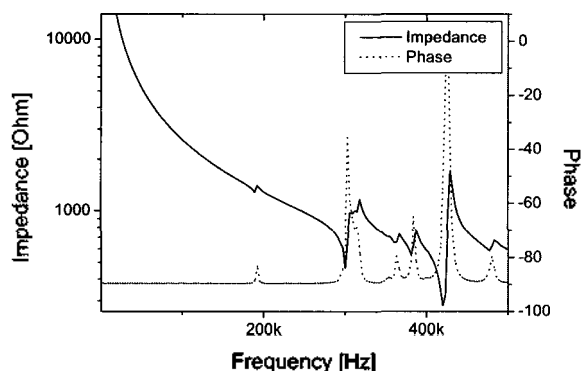


그림 8. PZT 적층형 액츄에이터의 임피던스 스펙트럼
Fig. 8. Impedance spectrum of the PZT multi-layer actuator.

명확한 압전 액츄에이터의 특성을 확인할 수 있다.

제작된 액츄에이터의 진동 특성을 평가하기 위해 Polytec사의 Laser Interferometer OFV-5000과 OFV-511을 이용하여 구동 변위를 측정 하였다. 신뢰성 있는 측정을 위해 액츄에이터를 방진 테이블에 고정 하였고, Function Generator (Tektronix, AFG 320)를 이용하여 구동 신호를 인가하였다. 측정시스템의 개략도는 Fig. 9에 나타내었다

측정결과 PMN-PT 액츄에이터는 가청 영역인 1kHz에서 10V의 입력신호에 대해 0.188 μ m의 구동 변위를 나타내었고, 2.48kHz에서 최대값인 0.251 μ m의 구동 변위를 보여주었다. 이는 Vlaming과 Feenstra의 연구에서 증명된 종이 내 이소골의 소요 구동 변위인 0.1 μ m를 충분히 만족하는 값으로, PMN-PT 적층형 액츄에이터를 이용할 경우 이러한 이소골을 대신할 수 있는 인공중이용 액츄에이터로의 응용이 가능하다는 것을 의미한다 [13].

반면 PZT 액츄에이터의 경우 1kHz에서 같은 조건하에 0.06 μ m의 구동 변위를 나타내었고, 1.5kHz에서 최대값인 0.076 μ m의 구동 변위를 보여주었다. 보다 광범위한 특성 비교를 위해 40kHz까지의 변위 특성을 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서의 결과는 앞서 유한 요소해석에서의 결과와 유사하게 PMN-PT를 사용하였을 경우 PZT를 사용하였을 때보다 평균적으로약 3배정도 우수한 변위 특성을 나타냄을 확인할 수 있다.

측정된 구동변위로부터 PMN-PT 액츄에이터의 구동력을 구하기 위해 앞서 언급된 식 (2)를 이용하였다. 최대 구동변위가 0.251 μ m 이고 이때의 입력 전압이 10V이

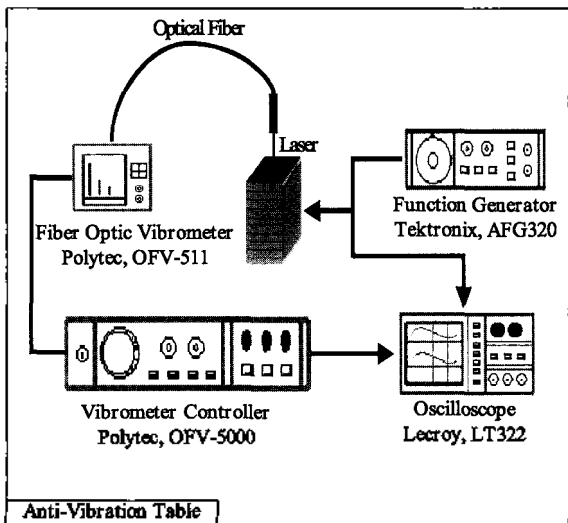


그림 9. 변위 측정 실험 시스템 구성도
Fig. 9. Experimental system to Measure the displacement.

므로, 1V당 변위는 0.025 μ m이다. PMN-PT의 두께방향 강성계수의 값이 11.20 x1010 N/m 이므로 단위 mm2 당 2.8 x10-3 N/V의 구동력이 발생함을 알 수 있다. 이는 Yanagihara 등 연구에서 개발된 Bimorph 액츄에이터의 0.765 x10-3N/V 보다 월등히 큰 값으로 제작된 액츄에이터가 인공중이용 트랜스듀서로서 충분한 구동력을 가지고 있음을 의미한다[8].

V. 결론

본 연구에서는 인공중이용 트랜스듀서로서 충분한 구동력을 갖춘 소형 적층형 액츄에이터의 개발을 위해 Polymer를 절연층으로 이용한 제작 공정을 개발하였고, 이러한 공정기법을 이용하여 2.8mm 두께의 단결정 PMN-PT 적층형 액츄에이터를 제작 하였다. 제작된 액츄에이터는 Impedance Analyzer를 이용하여 정상적인 압전특성을 확인하였고, Laser Interferometer를 이용하여 구동 변위를 측정하였다. 나아가 같은 구조의 PZT 액츄에이터와 변위 및 구동력 특성을 비교하여 그 성능이 어느 정도 향상되는지를 평가 함으로써, 적층형 PMN-PT 액츄에이터의 구동 특성이 인공중이용 트랜스듀서로서 기존의 PZT Bimorph 액츄에이터에 비해 우수하다는 것을 입증하였다. 따라서 인공중이용 트랜스듀서로 PMN-PT Multilayer 액츄에이터를 사용할 경우 큰 길이로 인해 이소골 제거수술 등의 복잡한 수술을 필요로 했던 기존의 여타 액츄에이터들에 비해 수술 절차가 간편하고, EMI 등 외부 환경에 의한 영향을 받지않는 우수한 성능의 청각 보조장치 개발이 가능할 것으로 기대된다.

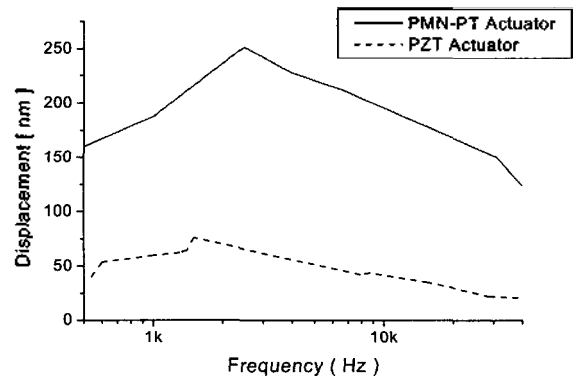


그림 10. PMN-PT 액츄에이터와 PZT 액츄에이터의 변위 특성 비교
Fig. 10. Comparison of the PMN-PT and PZT-5H displacement.

감사의 글

본 논문은 첨단감각기능 회복장치 연구센터의 연구사업인 "완전 이식형 인공중이 시스템 개발" 과제에 일환으로 수행한 결과입니다.

참고 문헌

1. J. Mitchell, W. Pruehsner, J. D. Enderle, "Digital hearing aid," IEEE, Bioengineering Conference, 133-134, 1999.
2. D. Portmann, P. Boudard, D. Herman, "Anatomical results with titanium implants in the mastoid region," Ear Nose Throat J, 76 (4), 231-236, 1997.
3. W. F. House, "Cochlea implant success : producing the rising tide," Am. J. Otol., 16, 547-554, 1995.
4. H. P. Zenner, H. Leysieffer, "Total implantation of the Implex TICA hearing amplifier implant for high frequency sensorineural hearing loss : the Tubingen University experience," The Otolaryngologic Clinics of North America, 34 (2), 417- 446, 2001.
5. A. J. Maniglia and W. H. Ko, "Contactless semi- implant able electromagnetic middle ear device for treatment of sensorineural hearing loss," The Otolaryngologic Clinics of North America, 28 (1), 121- 140, 1995.
6. S. Park, K. C. Lee, J. H. Cho and S. H. Lee, "Electromagnetic vibration transducer using polyimide elastic body for implantable middle ear hearing aid," Sensors and Actuators A, 97-98, 201-207, 2002.
7. J. M. Fredrickson, J. M. Coticchia, S. Khosla, "Ongoing investigations into an implantable electromagnetic hearing aid for moderate to severe sensorineural hearing loss," The Otolaryngologic Clinics of North America, 28 (1), 107- 120, 1995.
8. N. Yanagihara, Y. Hinohira, K. Gyo, "Surgical rehabilitation of deafness with partially implantable hearing aid using piezoelectric ceramic bimorph ossicular vibrator," Auris Nasus Larynx, 24, 91-98, 1997.
9. Z. G. Wang, E. W. Abel, R. P. Mills and Y. Liu, "Assessment of multi-layer piezoelectric actuator technology for middle-ear implants," Mechatronics, 12, 3-17, 2002.
10. 이상현, 노용래, "고상단결정법으로 성장된 0.68Pb(Mg1/3Nb2/3)O3-0.32PbTiO3 압전단결정의 물성 평가," 한국음향학회지, 23 (2), 103-108, 2004.
11. G. Skibinski, J. Pankau, "Use of multi layer ceramic (MLC) capacitors in high power converters," IEEE, Industry Applications Conference, 3, 1319-1326, 1996.
12. B. Jaffe, W. C. Cook and H. Jaffe, *Piezoelectric Ceramics*, (Academic press London and New York, 1971).
13. M. Vlaming, L. Feenstra, "Studies on the mechanics of the normal human middle ear," Clin. Otolaryngol, 11, 353-363, 1986.

저자 약력

• 선 주 현 (Jooheon Seon)



2003년 2월: 동서대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 2003년 9월~현재: 경북대학교 센서공학과 석사과정
 * 주관심분야: 음향 트랜스듀서 제작기술, 청각 유행학

• 이 상 구 (Sang-gu Lee)



1987년 2월: 서울대학교 화학공학과 졸업 (공학사)
 1991년 8월: 연세대학교 화학공학과 졸업 (공학 석사)
 1995년 8월: 서울대학교 화학공학과 졸업 (공학 박사)
 1997년 10월: 미국 스탠포드 대학 재료연구 센터 Post. Doc.
 1987년~1999년: 유한학 개발팀, 팀장
 1999년 10월~현재: ㈜아이블 포토닉스, 대표 이사

• 노 용 래 (Yongrae Roh)

한국음향학회지 제 20권 제 4호 참조