RAINBOW 압전 액츄에이터의 제조와 물성

백종후, 임은경, 이미재, 지미정, 최병현
요업기술원

Processing and Properties of RAINBOW Piezoelectric Actuator

Jong-Hoo Paik, Eun-Kyeong Lim, Mi-Jae Lee, Mi-Jung Jee, Byung-Hyun Choi,
KICET

Abstract

RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafers) are a new class of high-displacement, piezoelectric actuator produced by selectively removing oxygen from one surface of ceramic using a high-temperature chemical reduction process. In this paper, RAINBOW composition of $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ were prepared. Its dielectric and piezoelectric properties were investigated in the vicinity of MPB. The strain - electric field characteristics of RAINBOW actuator were significantly improved comparison with the conventional bulk actuator.

Key Words : RAINBOW, Piezoelectric, Actuator, Reduction, High-displacement

1. 서 론

최근 압전 세라믹을 이용한 압전 액츄에이터(piezoelectric actuator)는 크기가 작고, 진공과 충격에 대하여 강하며, 미세 변위제어가 용이하기 때문에 정밀한 제어가 요구되는 광학기기, 반도체 장치, 정밀기기, 소형 모터등의 주요부품으로 각광을 받고 있다.[1] 기존의 압전 액츄에이터는 바이몰프형(bimorph type)와 적층형(multilayer type) 액츄에이터가 주로 사용되었는데, 바이몰프형은 변위에 비해서 발생력이 작고, 적층형은 발생력에 비해 변위가 작은 단점을 가지고 있다.[2-3]

특히 진동모터, 광학기기등과 같이 대변위와 고하중을 필요로 하는 장치에는 변위가 크고 발생력이 큰 압전 액츄에이터의 개발 필요성이 대두되고 있다.

따라서 본 연구에서는 제조공정이 간단하고 변위와 발생력이 큰 RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafers) 액츄에이터를 제조하고자 하였다.[4] 이때 사용한 조성은 압전특성이 우수한 PNN-PZ-PT계를 선택하였으며, $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (PNN-PZT)을 기본 조성으로 하여 Zr/(Zr+Ti) 첨가량에 따른 압전특성의 변화를 조사하였다. 이때 제조된 조성으로 환원온도를 변화시켜 RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafers) 액츄에이터를 제작한 후 인가전압에 따른 변위특성의 변화를 조사하였다.

2. 실 험

본 연구에서 출발물질로 사용한 분말원료는 PbO (Aldrich, 99.9%), Nb_2O_5 (Aldrich, 99.9%), NiO (고순도 화학, 99.9%), ZrO_2 (Aldrich, 99%), TiO_2 (고순도 화학, 99.9%)이며, 전자 저울을 사용하여 원료분말을 ±0.1 mg의 오차범위에서 정밀하게 평량하였다. 평량한 분말의 혼합은 HDPE jar에서 지르코니아 볼을 사용하여 습식으로 36시간 하였다. 혼합된 시료는 100-150℃에서 건조한 후, 850℃에서 2시간 하소하였다. 하소분말은 지르코니아 볼을 사용하여 습식으로 48 시간을 분쇄하였다. 충분히 건조시킨 후 이를 일축 성형하여 지름 13 ㎜인 disc 시편을 만들었다. 성형시편들은 1250℃에서 2시간동안 소결하였으며, 이때 승온속도는 분

당 5℃로 하였다. 소결된 시편은 고밀도의 graphite block과 함께 놓고 750 - 850℃의 온도에서 가열하여 시편의 한쪽 면을 환원시켰다. 환원처리된 시편은 silver epoxy paste를 이용하여 150℃에서 소부하여 형성하였으며, 전극 처리된 시편은 120℃의 실리콘 절연유 내에서 2.5KV/mm의 직류 전류계를 15분 인가하여 분극처리 하였다. 소결시편의 상 합성과 결정구조등은 XRD(Mac Science KFX-987228-SE)로 분석하였으며, 시편의 미세구조는 주사전자현미경(SEM- Topcon SM-300)과 광학현미경(Olympus SZ-60)으로 분석하였다.

전기적 특성은 IRE standard에 근거하여 [5] Impedance Analyzer(Agilent, 4294A)를 이용하여 공진-반공진법으로 측정, 계산하였으며 압전정수(d_{33})는 Piezo d_{33} Tester(American Piezo Ceramics, Pennebaker Model 8000)로 측정하였다. 전계에 대한 미소변위측정을 위해서 길이 36㎜, 폭 2.5㎜, 두께 0.2㎜의 소자를 제작하였으며, 변위측정은 비접촉 레이저 (MTI Instruments, Microtrak 7000)방식으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

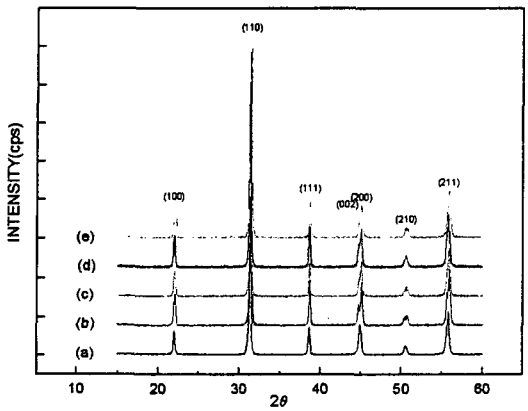

그림 1. 1250 ℃에서 2시간 소결한 $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$의 X선 회절패턴, (a) x=0.39, (b) x=0.395, (c) x=0.4, (d) x=0.405, (e) x=0.41.

Fig 1. X-ray diffraction patterns of $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ sintered at 1250℃ for 2hrs, (a) x=0.39, (b) x=0.395, (c) x=0.4, (d) x=0.405, (e) x=0.41.

그림1은 $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (x, Zr/(Ti+Zr)=0.39, 0.395, 0.40, 0.405, 0.41) 조성에서의 Zr/(Ti+Zr)에 따른 X-선 회절 결과를 나타내었다. 삼방정(rhombohedral)구조와 정방정(tetragonal)구조를 나타내는 X선 회절 peak가 2Θ=45°부근에서 존재하며, 정방정 구조는 (200)과 (002)면이 공존하며, 삼방정 구조는 (200)면만 존재하는데, 이들 회절 peak에 의하여 상경계 지점을 판단 할 수 있다. [6] 본 실험결과를 보면 0.40 조성부근에서 상경계(Mophotropic Phase Boundary)조성임을 알 수 있으며, 이 조성에서 멀어지면서 정방성이 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 2차 상인 pyrochlore(2Θ=28°부근에서 관찰) 상은 전체조성에서 관찰되지 않았다.

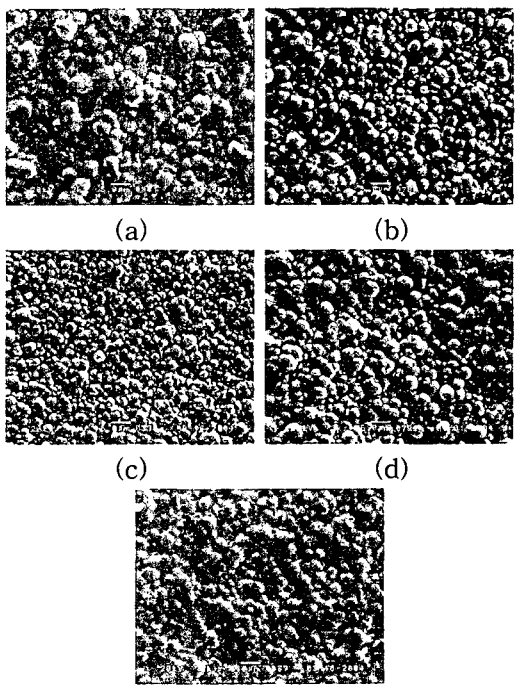

그림 2. $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$의 SEM 사진, (a) x=0.39, (b) x=0.395, (c) x=0.4, (d) x=0.405, (e) x=0.41.

Fig 2.. SEM micrographs of $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ at (a) x=0.39, (b) x=0.395, (c) x=0.4, (d) x=0.405, (e) x=0.41.

그림 2는 1250℃에서 2시간 소결한 PNN-PZT 조성에서의 Zr/(Ti+Zr)에 따른 주사전자 현미경(SEM) 사진들로서 그림에 나타낸 바와 같이 전체적으로 평균 입경이 2 - 3㎛ 정도로 일정한 결정립을 나타내었으며, 입도분포도 일정하게 나타난 것을 알 수 있다.

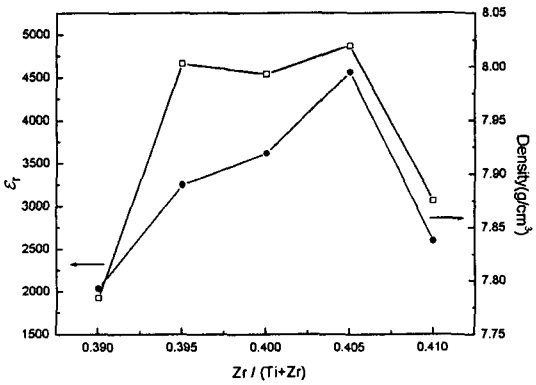

그림 3. Zr/(Ti+Zr)에 따른 유전 상수와 밀도

Fig 3. Dielectric Constant(εr) and Bulk density of PNN-PZT with the Zr/(Ti+Zr) content ratio.

그림 3은 PNN-PZT조성에서의 Zr/(Ti+Zr)에 따른 밀도와 유전상수를 나타내었다. Zr/(Ti+Zr)가 증가함에 따라 밀도가 증가하였으며, 0.405조성에서 0.799g/㎤의 최대밀도를 나타내었으며, 0.41 조성에서 7.837g/㎤ 정도로 감소하였다. 유전상수는 Zr/(Ti+Zr)가 증가함에 따라 증가하였으며, 0.405조성에서 4871으로 최대 값을 나타내었다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 유전상수가 감소하는 것은 결정구조에서 볼 수 있듯이 유전특성이 최대가 되는 상경계 영역에서 벗어 나기 때문으로 보인다.

그림4는 PNN-PZT조성에서의 Zr/(Ti+Zr)에 따른 전기기계결합계수(kp)와 기계적 품질계수(Qm)을 나타낸 것이다. 밀도와 유전상수를 나타내었다. 전기기계결합계수는 0.395조성까지 증가하였다가 그 이상 조성에서 감소하였다. 그러나 0.405조성에서 다시 증가하였으며, 이것은 분극가능한 축이 공존하는 상경계 영역에서 분극특성이 향상됨에 따라 전기기계결합계수가 증가한 것으로 보인다.[7]

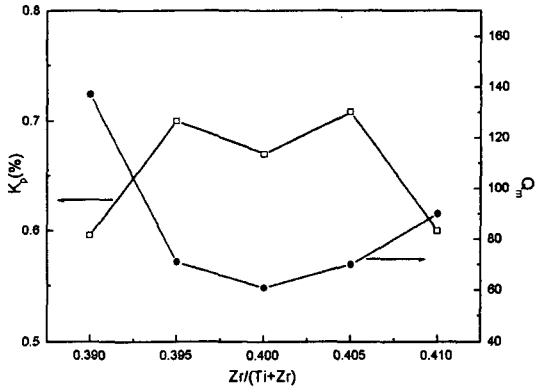

그림 4. Zr/(Ti+Zr)에 따른 전기기계결합계수와 기계적 품질계수

Fig 4. Electromechanical Coupling factor(K_p) and Mechanical quality factor (Q_m) of PNN-PZT with the Zr/(Ti+Zr) content ratio

기계적 품질계수(Qm)는 Zr/(Ti+Zr)가 증가함에 따라 급격히 감소하였고, 0.40조성에서 최소값을 나타내었으나, 그 이상에서 조성에서 약간 증가하는 경향을 보이고 있으나, 전반적으로 90 이하의 작은 값을 나타내었다.

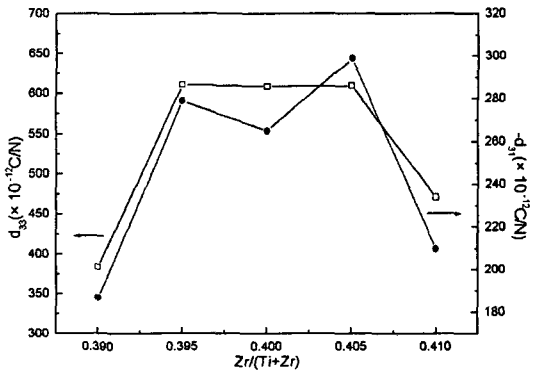

그림 5. Zr/(Ti+Zr)에 따른 압전정수(d_{33}, d_{31})

Fig 5. Piezoelectric constant(d_{33}, d_{31}) of PNN-PZT with the Zr/(Ti+Zr) content ratio.

그림5는 PNN-PZT조성에서의 Zr/(Ti+Zr)에 따른 압전상수(d_{33}, d_{31})을 나타낸 것이다. Zr/(Ti+Zr)가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 0.405조성에서 최대값

을 나타내었다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 압전상수는 전기기계결합계수(kp)와 유전상수에 의해 주로 결정되어지는데, 그림4에서 나타낸 Zr/(Ti+Zr)에 따른 전기기계결합계수(kp)의 변화와 유사한 형태를 보여주고 있다. d_{33}과 d_{31}는 0.405조성에서 각각 610, -299(10^{-12}C/N)의 우수한 값을 얻을 수 있었다.

지금까지 PNN-PZT조성에서의 Zr/(Ti+Zr)에 따른 압전특성의 변화를 살펴 보았으며, 가장 우수한 특성을 보인 $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ 조성을 선택하여 RAINBOW actuator을 제조하였다.

그림 6은 여러 온도에서 4시간동안 환원처리한 시편의 파단면 미세구조를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 온도가 증가함에 따라 환원층의 두께가 증가하는 것을 확인하였다. 환원층의 두께는 발생력과 변위량에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며, 환원층의 두께와 미세구조의 적절한 조절이 필요하다고 하겠다. [8-9]

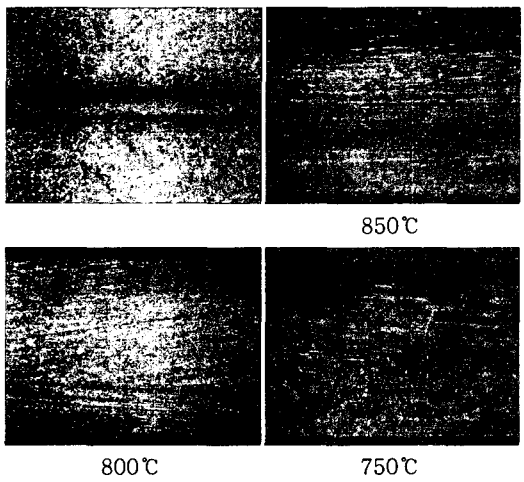

그림 6. 환원온도에 따른 RAINBOW 액츄에이터 광학현미경 사진.

Fig 6. Optical photograph of RAINBOW actuator depending on the reduced temperature.

RAINBOW actuator는 시편을 고밀도의 graphite block과 함께 놓고 750 - 950℃의 온도에서 가열하면 그 경계면에서 산소가 휘발되어 금속성의 비압전 재료층이 생기면서 기존 압전재료층과 일체화된 구조를 갖게 된다. 이를 냉각시키면 두층 사이의 열팽창계수의 차이와 환원층의 부피 감소에 의해서 곡률을 가지게 된다. 이와같이 형성된 RAINBOW actuator는 큰 작동변위를 나타낸다.

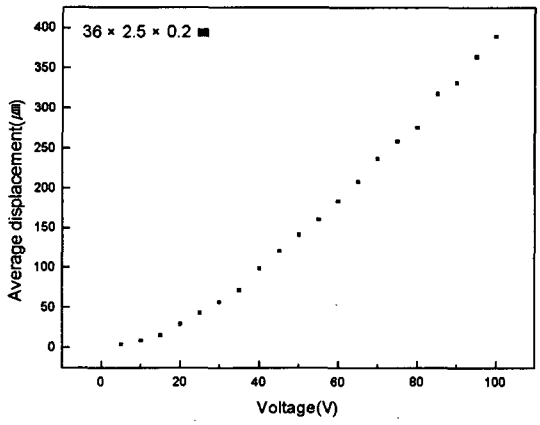

그림 7. 인가전압에 따른 RAINBOW 액츄에이터의 변위특성

Fig 7. Average displacement characteristics of RAINBOW actuator depending on applied voltage.

그림7은 800℃에서 4시간 환원처리한 $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ 조성의 변위특성을 나타내었다. 미소변위측정을 위해서 길이 36㎜, 폭 2.5㎜, 두께 0.2㎜의 소자를 제작하였으며, 인가전압은 0 -100V DC 까지 변화시켜 측정하였다.

인가전압에 따른 변위량은 전반적으로 일정한 비율로 증가하였으며, 100V DC에서 390㎛의 대변위를 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서 $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (PNN-PZT)을 기본 조성으로 하여 Zr/(Zr+Ti) 첨가량에 따른 압전특성의 변화를 조사하였으며, 이때 제조된 조성으로 환원온도를 변화시켜 RAINBOW (Reduced And Internally Biased Oxide Wafers) 액츄에이터를 제작한 후 인가전압에 따른 변위특성에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ 조성에서 다음과 같은 우수한 압전특성을 얻었다.

Properties	Value
Bulk density	7.995(g/㎤)
εr	4871
K_p	0.71(%)
Q_m	70
d_{33}	$610(10^{-12}C/N)$
d_{31}	$-299(10^{-12}C/N)$

2. graphite block과의 환원반응을 통해서 나타나는 금속성의 비압전 재료층을 확인하였으며, 환원온도가 증가함에 따라 환원층의 두께가 증가하는 것을 확인하였다.
3. 제작된 RAINBOW 액츄에이터는 인가전압이 100V DC에서 390㎛의 최대 변위특성을 나타내었으며 다른 형태의 압전 액츄에이터보다 아주 우수한 변위특성을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

[1] K. Uchino, "Piezoelectric and Elecrostrictive Actuator", Proc. the 6th IEEE ISAF, pp. 610-618, 1986.

[2] T. Uchino et al, "A Piezoelectric Ceramic Meterial and a Bimorph for Auto~Tracking in VTR", Jpn. J. Appl. Phys. 20. Suppl 20-4, 97-100, 1981

[3] S. Takahasi, "Longitudinal Mode Multilayer Piezoceramic Actuator", Cerm. Bull., 65, 88, 1156'1157, 1986.

[4] Hearling, Gene H, "Chemically Reduced PLZT Ceramic for Ultra-High Displacement Actuators", ferroelectrics, vol. 154, pp. 101-106, 1994.

[5] EMAS-6001, 일본전자재료공학회, 1977.

[6] K. Kakegawa, J. Mohri, S. Shirasaki and K. Takahashi, J. Am. Ceram. Soc. vol. 65, pp. 515

[7] B. Jaffe, W. R. Cook and H. Jaffe, Piezoelectric Ceramics, Academic Press, p. 160, 1971

[8] Q. M. Wang and L. E. Cross, " Analysis of High-Temperature Reduction Processing of RAINBOW Actuator", Mater. Chem. Phys. Vol. 58, No. 1. p. 434-43, 1997.

[9] S. A. Wise, "Displacement Properties of RAINBOW and THUNDER Piezoelectric Actuator", Sens. Actuators, A. Vol. 69, No. 1. p. 33-38, 1998