

# 액츄에이터 응용을 위한 $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbZrO_3-PbTiO_3$ 세라믹스의 압전 특성에 미치는 $Fe_2O_3$ 첨가 영향

## Effects of $Fe_2O_3$ Addition on Piezoelectric Properties of $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbZrO_3-PbTiO_3$ Ceramics for Actuator Applications

임은경<sup>1</sup>, 김창일<sup>1</sup>, 이영진<sup>1</sup>, 임종인<sup>1</sup>, 백종후<sup>1,a</sup>

(Eun-Kyeong Lim<sup>1</sup>, Chang-Il Kim<sup>1</sup>, Young-Jin Lee<sup>1</sup>, Jong-In Im<sup>1</sup>, and Jong-Hoo Paik<sup>1,a</sup>)

### Abstract

In this paper, the dielectric and piezoelectric properties of  $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3+0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3+x$  wt%  $Fe_2O_3$  ceramics were investigated with the addition of  $Fe_2O_3$  and sintering temperature. Dielectric constant and piezoelectric constant increased with amount of  $Fe_2O_3$  up to 0.25 wt% and then decreased the further addition of  $Fe_2O_3$ . It seems that  $Fe_2O_3$  acts as a sintering aid at the sintering temperature of 1150 °C. By the addition of  $Fe_2O_3$ , sintering temperature of the system was lowered from 1250 °C to 1100 °C. The piezoelectric properties showed the maximum value of  $\epsilon_r = 4669$ ,  $d_{33} = 810$  ( $10^{-12}$  m/V),  $k_p = 77$  %,  $Q_m = 55$ , in  $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - 0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3 + 0.25$  wt%  $Fe_2O_3$  ceramics having composition near the morphotropic phase boundary. The composition may be appropriate for actuator materials because of high piezoelectric constant and electromechanical coupling factor.

**Key Words** : Piezoelectric, Morphotropic phase boundary, Electromechanical coupling factor, Dielectric constant, Actuator

### 1. 서 론

최근 압전 세라믹을 이용한 압전 액츄에이터 (piezoelectric actuator)는 크기가 작고, 진동과 충격에 대하여 강하며, 미세 변위제어가 용이하기 때문에 정밀한 제어가 요구되는 광학기기, 반도체 장치, 정밀기기, 소형 모터 등의 주요부품으로 각광을 받고 있다[1]. 이러한 압전 액츄에이터는 바이몰프형(bimorph type)과 적층형(multilayer type) 액츄에이터가 주로 사용되는데, 바이몰프형은 변위에 비해서 발생력이 작고, 적층형은 발생력에 비해 변위가 작은 단점을 가지고 있어서 이를 구조적으로 개선하고자 하는 연구가 진행되고 있다[2]. 이

러한 구조에는 Moonie, RAINBOW, Thunder, Inchworm등이 있으며, 각각의 형태에 따라 장단점이 있어서, 이를 보완하기 위한 새로운 구조의 액츄에이터가 개발되고 있다[3,4]. 또한 액츄에이터의 변위특성 등을 개선하기 위한 방법으로 압전 액츄에이터의 압전특성, 즉 높은 압전정수와 전기기계 결합계수를 갖는 조성의 개발을 들 수 있으며, 여러 연구자에 의해서 조성연구가 이루어졌다. 대표적인 조성을 살펴보면  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - PbTiO_3 - PbZrO_3$ ,  $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - PbTiO_3 - PbZrO_3$ ,  $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - PbTiO_3 - PbZrO_3$ , 등이 있으며 [5,6], 여기에 특성을 향상시키기 위해서  $Fe_2O_3$ , NiO, CoO로 대표되는 acceptor dopant 나  $La_2O_3$ ,  $Bi_2O_3$ , 로 대표되는 donor dopant를 첨가하는 연구가 이루어지고 있다[7,8].

최근에 연구되고 있는 진동모터, Harvesting system, valve system과 같은 대변위 압전 액츄에이터를 구현하기 위해서는 변위가 크고 발생력이 큰 압전 액츄에이터의 개발 필요성이 대두되고 있다.

1. 요업기술원 전자부품팀

(서울시 금천구 가산동 233-5)

a. Corresponding Author : jhpaik@kicet.re.kr

접수일자 : 2005. 10. 7

1차 심사 : 2005. 11. 3

심사완료 : 2006. 9. 15

따라서 본 연구에서는 변위 확대형 액츄에이터를 제작하기위해서 압전특성이 우수한  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3$  (PNN-PZ-PT) 시스템을 기본 조성으로 하였다[9]. 이 조성에 소결 온도를 낮추고 압전정수와 전기기계결합계수를 증가시키기 위해서 acceptor dopant인  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  를 첨가제로 사용하여 첨가량과 소결온도에 따른 결정구조, 유전 및 압전 특성에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험

본 연구에서 출발물질로 사용한 분말원료는  $\text{PbO}$  (Aldrich, 99.9 %),  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (Aldrich, 99.9 %),  $\text{NiO}$  (고순도 화학, 99.9 %),  $\text{ZrO}_2$  (Aldrich, 99 %),  $\text{TiO}_2$  (고순도 화학, 99.9 %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Aldrich, 99 %)이며, 전자 저울을 사용하여 원료분말을  $\pm 0.1$  mg의 오차범위에서 정밀하게 평량하였다. 평량한 분말의 혼합은 HDPE jar에서 지르코니아 불을 사용하여 습식으로 36시간 하였다. 혼합된 시료는 100-150 °C에서 건조한 후, 850 °C에서 2시간 하소하였다. 하소분말은 지르코니아 불을 사용하여 습식으로 48 시간을 분쇄하였다. 충분히 건조시킨 후 이를 일축 성형하여 지름 13 mm인 disc 시편을 만들었다. 성형시편들은 1100 °C - 1200 °C에서 2시간동안 소결하였으며, 이때 승온속도는 분당 5 °C로 하였다. 소결된 시편은 silver paste를 이용하여 600 °C에서 소부하여 형성하였으며, 전극 처리된 시편은 120 °C의 실리콘 절연유 내에서 2.5 KV/mm의 직류 전류제를 15분 인가하여 분극처리하였다. 소결시편의 상 합성과 결정구조 등은 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[9] 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.

## 3. 결과 및 고찰

그림 1은  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + x$  wt%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $x = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ ) 조성에서의  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가량에 따른 X-선 회절 결과를 나타내었

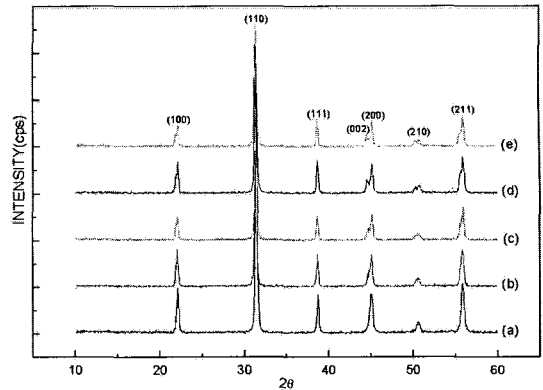


그림 1. 1150 °C에서 2시간 소결한  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + x$  wt%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 X선 회절패턴, (a)  $x=0$ , (b)  $x=0.25$ , (c)  $x=0.5$ , (d)  $x=0.75$ , (e)  $x=1.0$ .

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + x$  wt%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sintered at 1150 °C for 2 hrs, (a)  $x=0$ , (b)  $x=0.25$ , (c)  $x=0.5$ , (d)  $x=0.75$ , (e)  $x=1.0$ .

다.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 첨가된 전체 조성에서 첨가량이 증가함에 따라 (110)기본 회절선(Fundamental reflection)이 순차적으로 이동하기 때문에  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 PNN-PZ-PT세라믹 격자에 고용 되어 있음을 알 수 있다. 첨가된 Fe 이온은  $\text{ABO}_3$  페로브스카이트 구조에서 이온반경과 원자가 보상에 의해서 B-site에 치환된다.

삼방정(rhombohedral) 구조와 정방정(tetragonal) 구조를 나타내는 X선 회절 peak가  $2\theta=45^\circ$  부근에서 존재하며, 정방정 구조는 (200)과 (002)면이 공존하며, 삼방정 구조는 (200)면만 존재하는데, 이들 회절 peak에 의하여 상경계 지점을 판단 할 수 있다. 그림에서  $2\theta=45^\circ$  부근의 삼방정구조의 (200)면과 정방정 (tetragonal) 구조의 (200),(002)면을 살펴보면,  $x$ , 즉  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가량이 증가함에 따라 분리된 회절선이 나타나는 것으로 보아  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가에 의해 정방정 구조로 전이하는 것을 알 수 있다. 본 실험결과를 보면  $x = 0.25$ 에서 0.5 조성부근이 상경계 (Morphotropic Phase Boundary) 조성임을 알 수 있으며,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 미량 첨가에 의해서도 결정구조가 현저히 변화하는 것을 확인하였다. 또한 특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 2차 상인 pyrochlore ( $2\theta=28^\circ$  부근에서 관찰) 상은 전체 조성에서 관찰되지 않았다.

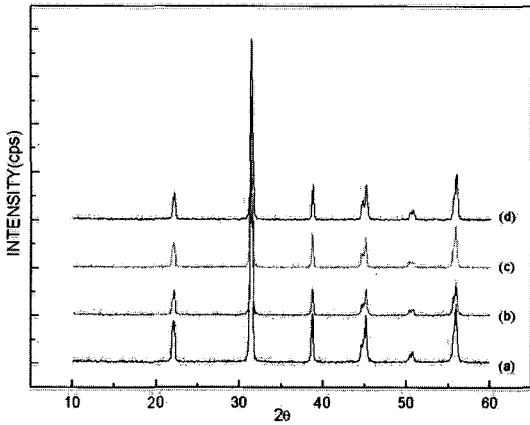


그림 2.  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3-0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + 0.5 \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  조성의 소결온도에 따른 X선 회절패턴, (a) 1100 °C, (b) 1150 °C, (c) 1200 °C, (d) 1250 °C.

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + 0.5 \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  sintered at (a) 1100 °C, (b) 1150 °C, (c) 1200 °C, (d) 1250 °C.

그림 2는  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3-0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + 0.5 \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  조성에서의 소결온도에 따른 X-선 회절 결과를 나타내었다. 1100 °C에서 2시간 소결한 조성에서도 이차상이 없는 페로브스카이트 상을 합성할 수 있었으며 이는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  가 소결조제로 작용하였기 때문으로 생각된다. 소결 온도에 따라 삼방정 (rhombohedral) 구조와 정방정 (tetragonal) 구조의 공존 범위가 달라지는 것을 알 수 있으며, 소결온도가 증가함에 따라 (200)과 (002)면의 분리된 회절선이 더 강하게 나타나는 것으로 보아 정방정 구조로 상전이가 일어나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 소결온도가 결정 구조의 변화에 영향을 받는 유전상수 등의 압전 특성에 영향을 미칠 것을 의미한다.

그림 3은 1150 °C에서 2시간 소결한  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + x \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  조성에서의  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가량에 따른 주사전자 현미경 (SEM) 사진이다. 그림에 나타난 바와 같이  $\text{Fe}$ 가 첨가하지 않은 조성 ( $x = 0$ )에서는 전체적으로 평균 입경이 2  $\mu\text{m}$  정도로 상대적으로 작게 나타났으나,  $\text{Fe}$ 가 첨가된 조성에서는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가량이 증가함에 따라 입경이 증가하는 경향을 보이고 있다. 전체적으로 평균 3-5  $\mu\text{m}$ 의 일정한 결정립을 가

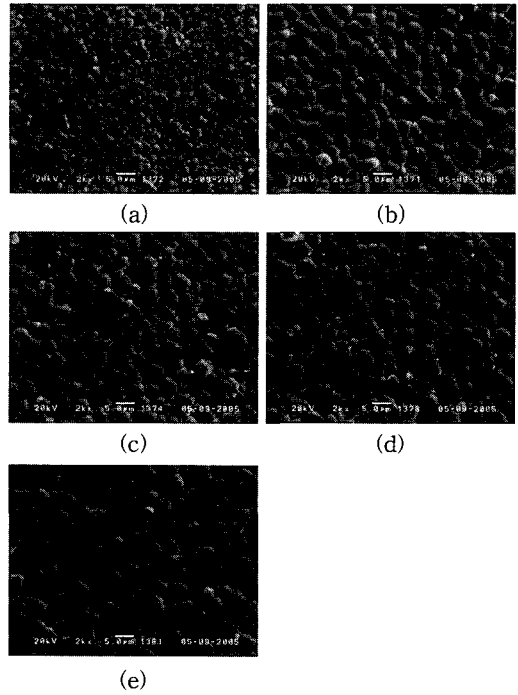


그림 3.  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3-0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + x \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  의 SEM 사진, (a)  $x=0$ , (b)  $x=0.25$ , (c)  $x=0.5$ , (d)  $x=0.75$ , (e)  $x=1.0$ .

Fig. 3. SEM micrographs of  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + x \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$ , (a)  $x=0$ , (b)  $x=0.25$ , (c)  $x=0.5$ , (d)  $x=0.75$ , (e)  $x=1.0$ .

지고 있으며, 입도분포도 일정하게 나타난 것을 알 수 있다. 이것은  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  가 소결조제로 작용하여 결정립의 성장을 유도한 것으로 생각된다.

그림 4는 1150 °C에서 2시간 소결한  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + x \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  조성에서의  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가량과 소결온도에 따른 밀도를 나타내었다.  $\text{Fe}$ 가 첨가하지 않은 조성 ( $x = 0$ )에서는 1200 °C 소결시편에서 8.22  $\text{g}/\text{cm}^3$ 의 최대특성이 나타났으나,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가량에 밀도가 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 1150 °C 소결시편에서는 0.25 wt% 조성에서 8.16  $\text{g}/\text{cm}^3$ 로 최대 값을 보이고 그 이후 서서히 감소하는 특성을 나타내었다. 또한  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가시편의 경우 오히려 1150 °C에서 소결한 시편의 밀도가 1200 °C의 시편보다 더 높은 값을 나타내었고 1100 °C에서는

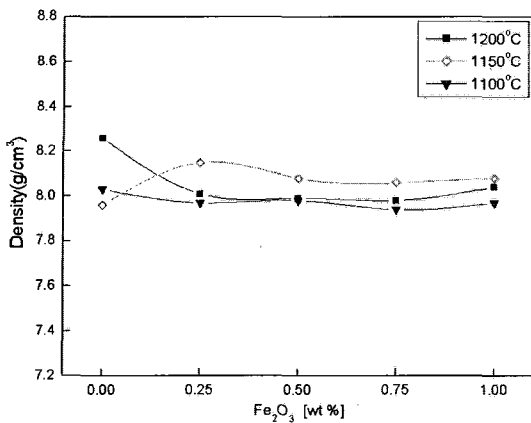


그림 4. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소결온도에 따른 밀도.  
Fig. 4. The bulk density with the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition and sintering temperature.

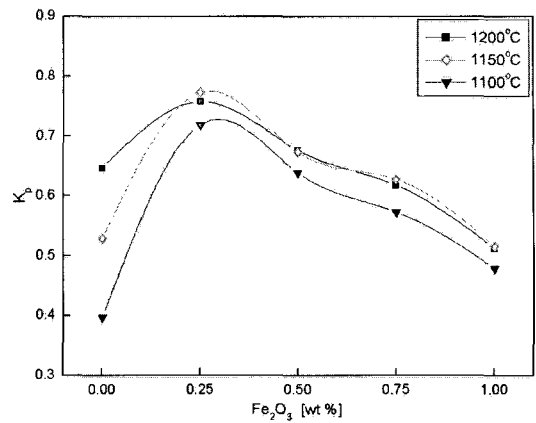


그림 6. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소결온도에 따른 전기기계결합계수.  
Fig. 6. Electromechanical coupling factor(K<sub>p</sub>) with the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition and sintering temperature.

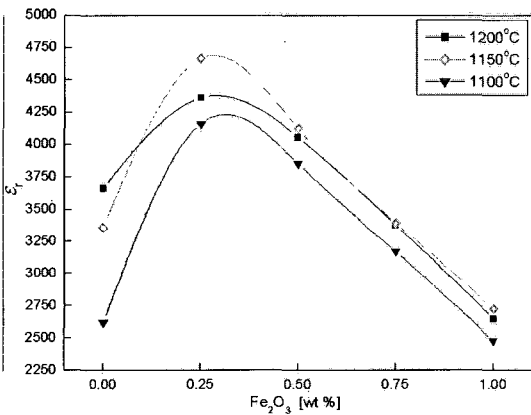


그림 5. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소결온도에 따른 유전상수.  
Fig. 5. The dielectric constant(ε<sub>r</sub>) with the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition and sintering temperature.

소결밀도가 오히려 감소되었기 때문에 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가 조성에서는 1150 °C의 소결온도가 적합한 소결 온도임을 알 수 있다.

그림 5는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소결온도에 따른 유전상수를 나타내었다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량이 0.25 wt% 조성에서 급격히 증가하였다가 그 이상 조성에서 감소하였으며, 전체 소결온도 영역에서 같은 경향을 보여 주고 있다.

각 소결온도에서의 유전상수의 최대값은 4363, 4669, 4160이며, 1150 °C에서 가장 큰 값을 나타내

었다. 유전상수의 증가는 결정구조의 이방성 증가에 따른 분극 값의 증대와 유전상수 값이 최대가 되는 상경계 영역(Morphotropic Phase Boundary)이기 때문으로 보여진다[10]. 그리고 그 이상의 첨가량에서 나타나는 유전상수의 감소는 결정구조에서 볼 수 있듯이 유전특성이 최대가 되는 상경계 영역에서 벗어나기 때문으로 보이며, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량 증가에 의한 억셉터 효과(Acceptor effect) 때문으로 생각된다.

그림 6은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소결온도에 따른 전기기계결합계수(k<sub>p</sub>)를 나타낸 것이다. 전기기계결합계수는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량이 0.25 wt% 조성에서 급격히 증가하였다가 그 이상 조성에서 완만하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 각 소결온도에서의 전기기계결합계수의 최대 값은 0.758, 0.774, 0.719이며, 그림 5의 유전상수의 변화와 일치함을 알 수 있다. 이러한 전기기계결합계수의 증가는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가가 결정구조의 이방성 증가에 따른 유전상수의 증가와 결정구조변화에 의한 것으로 생각된다[11]. 또한 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량이 0.25 wt% 조성부근, 즉 분극 가능한 축이 공존하는 상경계 영역부근에서 분극특성이 향상됨에 따라 전기기계결합계수가 증가한 것으로 보이며 1150 °C에서 소결된 0.25 wt% 조성에서 0.774의 최대 값을 나타내었다.

그림 7은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소결온도에 따른 기계적 품질계수(Q<sub>m</sub>)를 나타낸 것이다. 기계적 품질계

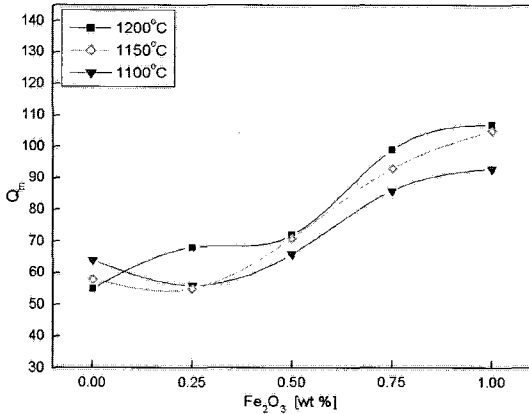


그림 7. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소결온도에 따른 기계적 품질계수.  
 Fig. 7. Mechanical quality factor (Q<sub>m</sub>) with the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition and sintering temperature.

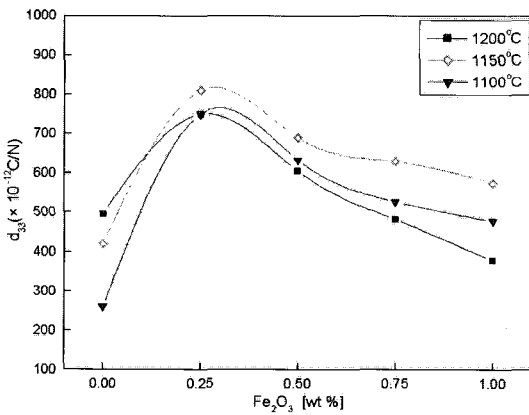


그림 8. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소결온도에 따른 압전정수(d<sub>33</sub>).  
 Fig. 8. Piezoelectric constant(d<sub>33</sub>) with the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition and sintering temperature.

수(Q<sub>m</sub>)는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가에 의하여 전하 보상을 위하여 생성된 산소 공공(vacancy)가 도메인벽(Domain wall)의 이동을 억제하기 때문에 Q<sub>m</sub>값이 증가하는 것으로 보여진다[12]. 또한 소결온도가 증가함에 따라 기계적 품질계수(Q<sub>m</sub>)는 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 전체적으로 50에서 100정도의 값을 나타내었다.

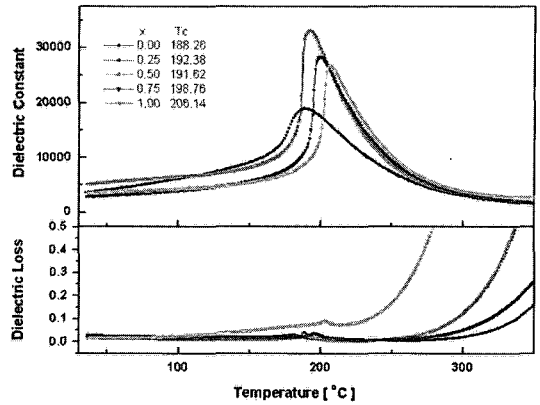


그림 9. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 온도에 따른 유전상수 및 유전손실율.  
 Fig. 9. Variation of the (a) Dielectric constant and (b) Dielectric loss with temperature of the 0.4 Pb (Ni<sub>1/3</sub> Nb<sub>2/3</sub>) O<sub>3</sub> + 0.6 Pb (Zr<sub>0.405</sub> Ti<sub>0.595</sub>)O<sub>3</sub> + x wt% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sintered at 1150 °C for 2 hrs. (1 kHz).

그림 8은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소결온도에 따른 압전정수(d<sub>33</sub>)를 나타낸 것이다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량이 0.25인 조성에서 최대값을 나타내었다가 그 이상 조성에서 다시 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있으며 각 소결온도에서의 압전정수의 최대값은 750, 810, 750(×10<sup>-12</sup>C/N)이었다.

압전상수(d<sub>33</sub>)는 전기기계결합계수(k<sub>p</sub>)와 유전상수에 의해 주로 결정되어지는데, 그림 5와 그림 6에 나타난 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량에 따른 유전상수와 전기기계결합계수(k<sub>p</sub>)의 변화와 유사한 형태를 보여주고 있으며, 이것은 이방성 증가에 따른 분극 값의 증대와 상경계 영역에서의 결정구조 변화등의 복합적인 효과에 위해서 나타난 결과로 생각된다[13]. 압전정수(d<sub>33</sub>)는 1150 °C에서 소결한 0.25 wt% 조성에서 810(×10<sup>-12</sup>C/N)의 가장 큰 값을 얻었다.

그림 9는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량에 따른 유전상수와 유전손실의 온도의존성을 나타낸다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량이 증가함에 따라 Curie 온도는 증가하였으며, 1.0 wt % 첨가조성에서 206 °C의 비교적 높은 값을 나타내었다.

표 1에 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소결온도에 따른 압전 및 유전특성을 나타내었다.

표 1.  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + x \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  세라믹스의 압전 특성.

Table 1. Piezoelectric properties of  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + x \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  ceramics.

소결 온도(°C)	x	$d_{33}$ ( $10^{-12}\text{m/V}$ )	$e_{33}^T/e_0$	kp	tan $\delta$ (%)	Qm
1200	0	496	3665	0.646	2.7	55
	0.25	750	4363	0.758	2.1	68
	0.5	606	4056	0.676	1.7	72
	0.75	482	3381	0.618	2.1	99
	1	378	2652	0.512	2.9	107
1150	0	420	3364	0.528	3	58
	0.25	810	4669	0.774	2.1	55
	0.5	690	4123	0.673	1.7	71
	0.75	630	3399	0.628	1.9	93
	1	575	2727	0.516	2.7	105
1100	0	260	2624	0.397	3	64
	0.25	750	4160	0.719	2.3	56
	0.5	634	3855	0.639	1.9	66
	0.75	527	3173	0.573	1.7	86
	1	477	2482	0.479	1.9	93

#### 4. 결론

본 연구에서 대변위용 압전 액츄에이터를 개발하기 위하여  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.405}\text{Ti}_{0.595})\text{O}_3 + x \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  조성에서  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가량을 0 - 1 wt%로 변화시키고 1100 °C~1200 °C의 소결온도에서 압전, 유전특성의 변화를 살펴보았으며, 그 결과를 종합해 보면 다음과 같다.

1.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가량이 0.25 wt%일 때 최대 유전상수 값 4669 이 나타났으며, 그 이상의 첨가에서는 감소하였다.
2.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가량 증가에 따라 삼방정(rhombohedral) 구조에서 정방정(tetragonal)구조로 상전이가 일어나는 것을 확인하였다.
3.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  첨가에 의해서 소결온도를 1100 °C로 낮출 수 있었으며, 소결온도에 따라 상경계(Morphotropic Phase Boundary)가 달라지는 것을 확인하였다.
4. 1150 °C에서 2시간 소결한  $0.4\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.6\text{Pb}(\text{Zr}_{0.41}\text{Ti}_{0.59})\text{O}_3 + 0.25 \text{ wt}\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  조성에서

최대의 전기기계결합계수( $K_p$ ) = 77 %, 압전정수( $d_{33}$ ) = 810 ( $10^{-12}\text{C/N}$ )을 얻었으며, 높은 압전정수가 요구되는 대변위 압전 액츄에이터에 응용될 수 있는 조성임을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- [1] K. Uchino, "Piezoelectric and electrostrictive actuator", Proc. the 6th IEEE ISAF, p. 610, 1986.
- [2] S. Takahasi, "Longitudinal mode multilayer piezoceramic actuator", Cerm. Bull., Vol. 65, No. 88, p. 1156, 1986.
- [3] 최성영, 김진수, "심벌 액츄에이터의 제작과 변위 특성의 분석", 전기전자재료학회논문지, 12권, 5호, p. 401, 1999.
- [4] Q.-M. Wand and L. Eric Cross, "Tip deflection and blinking force of soft PZT-based cantilever rainbow actuators", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 82, No. 1, p. 103, 1999.
- [5] H. Ohuchi and m. Nishida, "On the origin if piezoelectric activity maximum in  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3$  Ceramics", Ferroelectrics, Vol. 169, p. 309, 1995.
- [6] H. Yamaguchi, "Behavior of electric-field-induced strain in PT-PZ-PMN ceramics", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 82, No. 6, p. 1459, 1999.
- [7] 박정호, 김철수, 김성곤, 이상렬, " $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 이 첨가된 PNN-PZT 압전 세라믹스에서의 미세구조 및 특성", 한국전기전자재료학회 2001학계 학술대회논문집, p. 972, 2001.
- [8] C. Tanasoiu, E. Dimitriu, and C. Miclea, "Effect of Nb, Li doping on structure and piezoelectric properties of PZT type ceramics", J. of the Euro. Ceram. Soc., Vol. 19, p. 1187, 1999.
- [9] 백종후, 임은경, 이미재, 지미정, 최병현, "Processing and properties of RAINBOW piezoelectric actuator" 한국전기전자재료학회 2004학계학술대회논문집, 5권, 2호, p. 569, 2004.
- [10] EMAS-6001, 일본전자재료공학회, 1977.
- [11] 김규수, 윤광희, 윤현상, 홍재일, 류주현, 박창엽, "전왜 액츄에이터용 PBZT 세라믹스의  $\text{WO}_3$  첨가에 따른 특성", 전기전자재료학회논문지, 10권, 9호, p. 909, 1997.

- [12] K. Kakegawa, J. Mohri, S. Shirasaki, and K. Takahashi, "Sluggish transition between tetragonal and rhombohedral of PZT prepared by application of electric field", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 65, No. 10, p. 515, 1982.
- [13] T. Kamiya, T. Suzuki, T. Tsurumi, and M. Daimon, "Effects of manganese addition on piezoelectric properties of  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ ", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 31, p. 3058, 1992.
- [14] B. Jaffe, W. R. Cook, and H. Jaffe, "Piezo-electric Ceramics", Academic Press, p. 160, 1971.