Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 19, No. 10, p. 935, October 2006.

논 문 19-10-9

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[1], 김창일[1], 이영진[1], 임종인[1], 백종후[1,a]
(Eun-Kyeong Lim[1], Chang-Il Kim[1], Young-Jin Lee[1], Jong-In Im[1], and Jong-Hoo Paik[1,a])

Abstract

In this paper, the dielectric and piezoelectric properties of $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$+$0.6Pb(Zr_{405}Ti_{595})O_3$+ 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 ℃. By the addition of Fe_2O_3., sintering temperature of the system was lowered from 1250 ℃ to 1100 ℃. The piezoelectric properties showed the maximum value of εr = 4669, d_{33} = 810 (10^{-12} m/V), kp = 77 %, Qm = 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]. 이러한 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 전기기계결합계수를 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 0.4Pb($Ni_{1/3}Nb_{2/3}$)O_3 -0.6Pb ($Zr_{0.405}Ti_{0.595}$)O_3 (PNN-PZ-PT)시스템을 기본 조성으로 하였다[9]. 이 조성에 소결온도를 낮추고 압전정수와 전기기계결합계수를 증가시키기 위해서 acceptor dopant인 Fe_2O_3 를 첨가제로 사용하여 첨가량과 소결온도에 따른 결정구조, 유전 및 압전 특성에 대하여 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 %), Fe_2O_3 (Aldrich, 99 %)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 1100 ℃ - 1200 ℃에서 2시간동안 소결하였으며, 이때 승온속도는 분당 5 ℃로 하였다. 소결된 시편은 silver paste를 이용하여 600 ℃에서 소부하여 형성하였으며, 전극 처리된 시편은 120 ℃의 실리콘 절연유 내에서 2.5 KV/mm의 직류 전류계를 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 0.4Pb($Ni_{1/3}Nb_{2/3}$)O_3-0.6Pb($Zr_{0.405}Ti_{0.595}$)O_3+x wt% Fe_2O_3 (x =0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0)조성에서의 Fe_2O_3 첨가량에 따른 X-선 회절 결과를 나타내었다. Fe_2O_3가 첨가된 전체 조성에서 첨가량이 증가함에 따라 (110)기본 회절선(Fundamental reflection)이 순차적으로 이동하기 때문에 Fe_2O_3 가 PNN-PZ-PT세라믹 격자에 고용 되어 있음 을 알 수 있다. 첨가된 Fe 이온은 ABO_3 페로브스카이트 구조에서 이온반경과 원자가 보상에 의해서 B-site 에 치환된다.

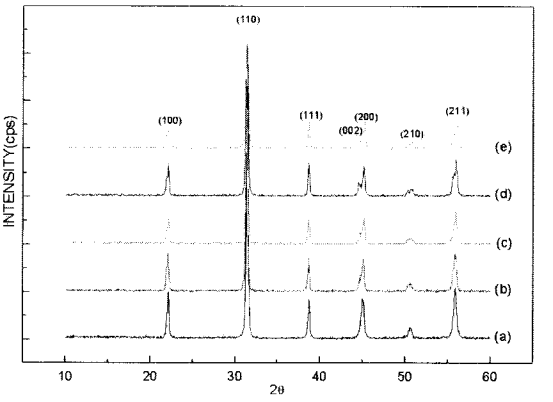

그림 1. 1150 ℃에서 2시간 소결한 0.4Pb($Ni_{1/3}Nb_{2/3}$)O_3 -0.6Pb($Zr_{0.405}Ti_{0.595}$)O_3 + x wt% Fe_2O_3 의 X선 회절패턴, (a) x=0, (b) x=0.25, (c) x=0.5, (d) x=0.75, (e) x=1.0.

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of 0.4Pb($Ni_{1/3}Nb_{2/3}$)O_3 -0.6Pb($Zr_{0.405}Ti_{0.595}$)O_3 + x wt% Fe_2O_3 sintered at 1150 ℃ for 2 hrs, (a) x=0, (b) x=0.25, (c) x=0.5, (d) x=0.75, (e) x=1.0.

삼방정(rhombohedral) 구조와 정방정(tetragonal) 구조를 나타내는 X선 회절 peak가 2 Θ=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. 그림에서 2Θ=45° 부근의 삼방정구조의 (200)면과 정방정 (tetragonal) 구조의 (200),(002)면을 살펴보면, x, 즉 Fe_2O_3 첨가량이 증가함에 따라 분리된 회절선이 나타나는 것으로 보아 Fe_2O_3 첨가에 의해 정방정 구조로 전이하는 것을 알 수 있다. 본 실험결과를 보면 x = 0.25에서 0.5 조성부근이 상경계 (Morphotropic Phase Boundary) 조성임을 알 수 있으며, Fe_2O_3 의 미량 첨가에 의해서도 결정구조가 현저히 변화하는 것을 확인하였다. 또한 특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 2차 상인 pyrochlore (2 Θ=28°부근에서 관찰) 상은 전체 조성에서 관찰되지 않았다.

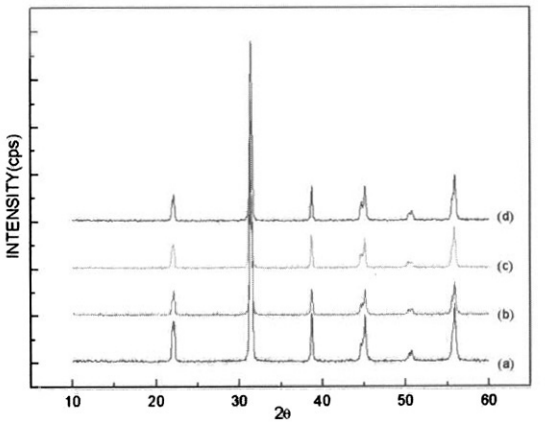

그림 2. $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ + 0.5 wt% Fe_2O_3 조성의 소결온도에 따른 X선 회절패턴, (a) 1100 ℃, (b) 1150 ℃, (c) 1200 ℃, (d) 1250 ℃.

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ -$0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ + 0.5 wt% Fe_2O_3 sintered at (a) 1100 ℃, (b) 1150 ℃, (c) 1200 ℃, (d) 1250 ℃.

그림 2는 $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ + 0.5 wt% Fe_2O_3 조성에서의 소결온도에 따른 X-선 회절 결과를 나타내었다. 1100 ℃에서 2시간 소결한 조성에서도 이차상이 없는 페로브스카이트 상을 합성할 수 있었으며 이는 Fe_2O_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 ℃에서 2시간 소결한 $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ + x wt% Fe_2O_3 조성에서의 Fe_2O_3 첨가량에 따른 주사전자 현미경 (SEM) 사진이다. 그림에 나타낸 바와 같이 Fe가 첨가하지 않은 조성 (x = 0)에서 는 전체적으로 평균 입경이 2 ㎛ 정도로 상대적으로 작게 나타났으나, Fe가 첨가된 조성에서는 Fe_2O_3 첨가량이 증가함에 따라 입경이 증가하는 경향을 보이고 있다. 전체적으로 평균 3-5 ㎛의 일정한 결정립을 가

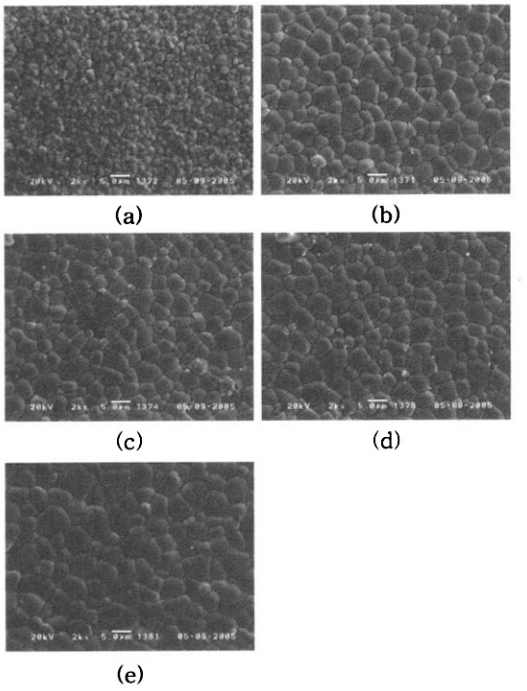

그림 3. $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ + x wt% Fe_2O_3 의 SEM 사진, (a) x=0, (b) x=0.25, (c) x=0.5, (d) x=0.75, (e) x=1.0.

Fig. 3. SEM micrographs of $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ + x wt% Fe_2O_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 Fe_2O_3 가 소결조제로 작용하여 결정립의 성장을 유도한 것으로 생각된다.

그림 4는 1150 ℃에서 2시간 소결한 $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ + x wt% Fe_2O_3 조성에서의 Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 밀도를 나타내었다. Fe가 첨가하지 않은 조성 (x = 0)에서는 1200 ℃ 소결시편에서 8.22 g/㎤ 의 최대특성이 나타났으나, Fe_2O_3 첨가량에 밀도가 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 1150 ℃ 소결시편에서는 0.25 wt% 조성에서 에서 8.16 g/㎤ 로 최대 값을 보이고 그 이후 서서히 감소하는 특성을 나타내었다. 또한 Fe_2O_3 첨가시편의 경우 오히려 1150 ℃에서 소결한 시편의 밀도가 1200 ℃의 시편보다 더 높은 값을 나타내었고 1100 ℃ 에서는

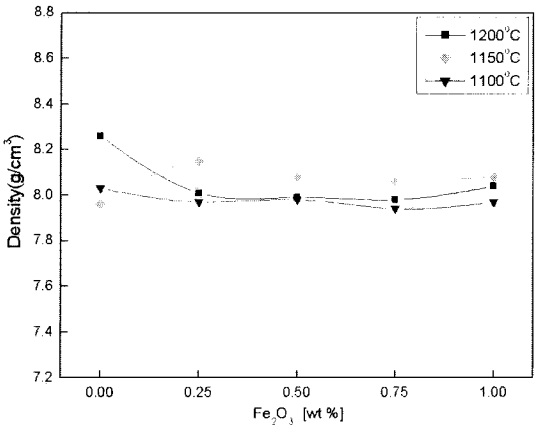

그림 4. Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 밀도.

Fig. 4. The bulk density with the Fe_2O_3 addition and sintering temperature.

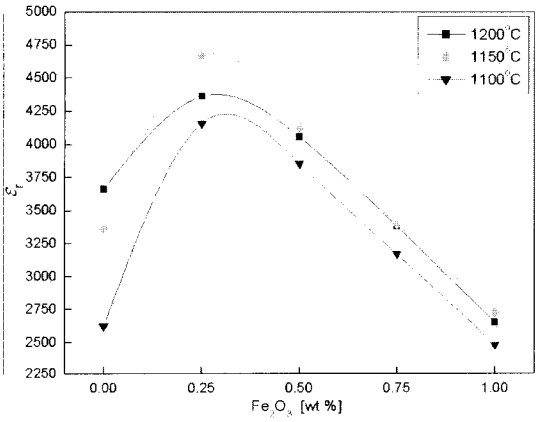

그림 5. Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 유전상수.

Fig. 5. The dielectric constant(εr) with the Fe_2O_3 addition and sintering temperature.

소결밀도가 오히려 감소되었기 때문에 Fe_2O_3 첨가 조성 에서는 1150 ℃의 소결온도가 적합한 소결온도 임을 알 수 있다.

그림 5는 Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 유전상수를 나타내었다. Fe_2O_3 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 ℃에서 가장 큰 값을 나타내

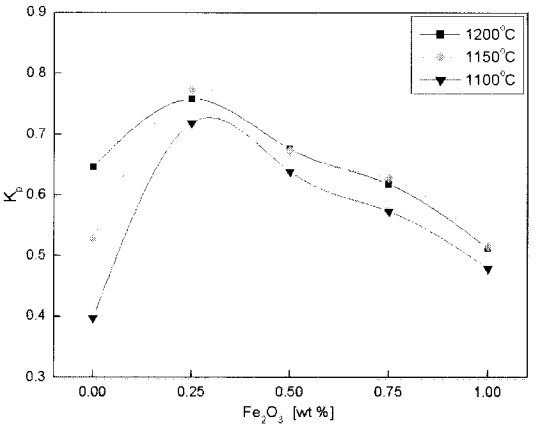

그림 6. Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 전기기계결합계수.

Fig. 6. Electromechanical coupling factor(K_p) with the Fe_2O_3 addition and sintering temperature.

었다. 유전상수의 증가는 결정구조의 이방성 증가에 따른 분극 값의 증대와 유전상수 값이 최대가 되는 상경계 영역(Morphotropic Phase Boundary)이기 때문으로 보여 진다[10]. 그리고 그 이상의 첨가량에서 나타나는 유전상수의 감소는 결정구조에서 볼 수 있듯이 유전특성이 최대가 되는 상경계 영역에서 벗어나기 때문으로 보이며, Fe_2O_3 첨가량 증가에 의한 억셉터 효과(Accptor effect) 때문으로 생각된다.

그림 6은 Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 전기기계결합계수(kp)를 나타낸 것이다. 전기기계결합계수는 Fe_2O_3 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_2O_3 첨가가 결정구조의 이방성 증가에 따른 유전상수의 증가와 결정구조변화에 의한 것으로 생각된다[11]. 또한 Fe_2O_3 첨가량이 0.25 wt% 조성부근, 즉 분극가능한 축이 공존하는 상경계 영역부근에서 분극특성이 향상됨에 따라 전기기계결합계수가 증가한 것으로 보이며 1150 ℃에서 소결된 0.25 wt% 조성에서 0.774의 최대 값을 나타내었다.

그림 7은 Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 기계적 품질계수(Qm)를 나타낸 것이다. 기계적 품질계

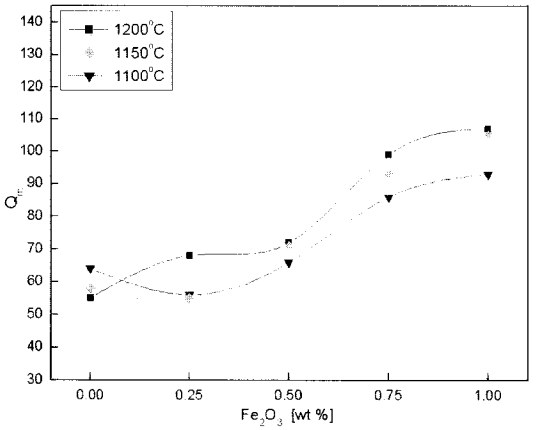

그림 7. Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 기계적 품질계수.

Fig. 7. Mechanical quality factor (Q_m) with the Fe_2O_3 addition and sintering temperature.

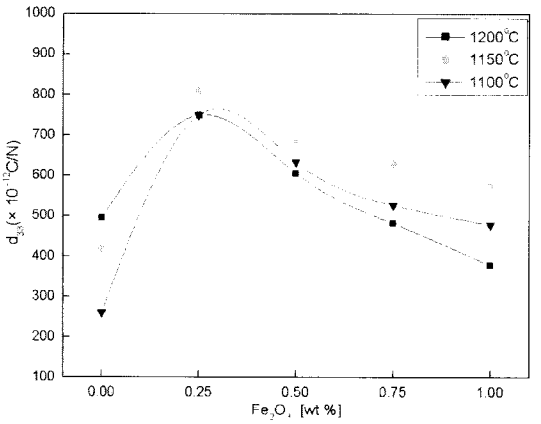

그림 8. Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 압전정수(d_{33}).

Fig. 8. Piezoelectric constant(d_{33}) with the Fe_2O_3 addition and sintering temperature.

수(Qm)는 Fe_2O_3 첨가량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 Fe_2O_3 첨가에 의하여 전하 보상을 위하여 생성된 산소 공공(vacancy)가 도메인벽(Domain wall)의 이동을 억제하기 때문에 Qm값이 증가하는 것으로 보여 진다[12]. 또한 소결온도가 증가함에 따라 기계적 품질계수(Qm)는 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 전체적으로 50에서 100정도의 값을 나타내었다.

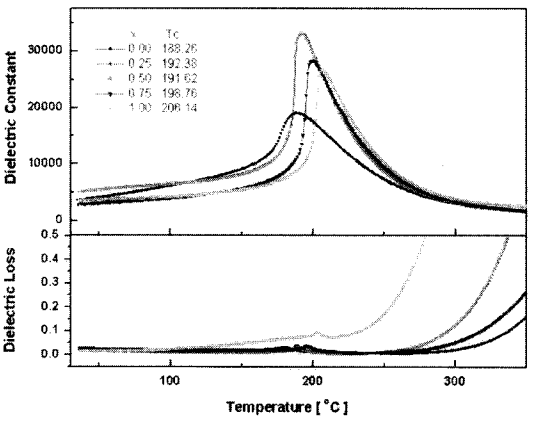

그림 9. Fe_2O_3 첨가량과 온도에 따른 유전상수 및 유전손실율.

Fig. 9. Variation of the (a) Dielectric constant and (b) Dielectric loss with temperature of the 0.4 Pb ($Ni_{1/3}$ $Nb_{2/3}$) O_3 + 0.6 Pb ($Zr_{0.405}$ $Ti_{0.595}$)O_3 + x wt% Fe_2O_3 sintered at 1150 ℃ for 2 hrs. (1 kHz).

그림 8은 Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 압전정수(d_{33})를 나타낸 것이다. Fe_2O_3 첨가량이 0.25인 조성에서 최대값을 나타내었다가 그 이상 조성에서 다시 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있으며 각 소결온도에서의 압전정수의 최대값은 750, 810, 750(×10^{-12}C/N)이었다.

압전상수(d_{33})는 전기기계결합계수(kp)와 유전상수에 의해 주로 결정되어지는데, 그림 5와 그림 6에 나타난 Fe_2O_3 첨가량에 따른 유전상수와 전기기계결합계수(kp)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_{33})는 1150 ℃에서 소결한 0.25 wt% 조성에서 810(×10^{-12}C/N)의 가장 큰 값을 얻었다.

그림 9는 Fe_2O_3 첨가량에 따른 유전상수와 유전손실의 온도의존성을 나타낸다. Fe_2O_3 첨가량이 증가함에 따라 Curie 온도는 증가하였으며, 1.0 wt % 첨가조성에서 206 ℃의 비교적 높은 값을 나타내었다.

표 1에 Fe_2O_3 첨가량과 소결온도에 따른 압전 및 유전특성을 나타내었다.

표 1. $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ + x wt% Fe_2O_3 세라믹스의 압전 특성.

Table 1. 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.

소결 온도(℃)	x	d_{33} (10^{-12}m/V)	e^T_{33}/e_0	kp	tan δ (%)	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. 결 론

본 연구에서 대변위용 압전 액츄에이터를 개발하기 위하여 $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ -$0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3$ + x wt% Fe_2O_3 조성에서 Fe_2O_3 첨가량을 0 - 1 wt%로 변화시키고 1100 ℃~1200 ℃의 소결온도에서 압전, 유전특성의 변화를 살펴보았으며, 그 결과를 종합해 보면 다음과 같다.

1. Fe_2O_3 첨가량이 0.25 wt%일 때 최대 유전상수 값 4669 이 나타났으며, 그 이상의 첨가에서는 감소하였다.
2. Fe_2O_3 첨가량 증가에 따라 삼방정(rhombohedral) 구조에서 정방정(tetragonal)구조로 상전이가 일어나는 것을 확인하였다.
3. Fe_2O_3 첨가에 의해서 소결온도를 1100 ℃로 낮출 수 있었으며, 소결온도에 따라 상경계(Morphotropic Phase Boundary) 가 달라지는 것을 확인하였다.
4. 1150 ℃에서 2시간 소결한 $0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $0.6Pb(Zr_{0.41}Ti_{0.59})O_3$ + 0.25 wt% Fe_2O_3 조성에서 최대의 전기기계결합계수(K_p) = 77 %, 압전정수(d_{33}) = 810 (10^{-12}C/N)을 얻었으며, 높은 압전정수가 요구되는 대변위 압전 액츄에이터에 응용될 수 있는 조성임을 확인하였다.

참고 문헌

[1] K. Uchino, "Piezoelectric and elecrostrictive 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 blicking 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 $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ -$PbTiO_3$-$PbZrO_3$ 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, "Cr_2O_3이 첨가된 PNN-PZT 압전 세라믹스에서의 미세구조 및 특성", 한국전기전자재료학회 2001하계학술대회논문집, 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 2004하계학술대회논문집, 5권, 2호, p. 569, 2004.

[10] EMAS-6001, 일본전자재료공학회, 1977.

[11] 김규수, 윤광희, 윤현상, 홍재일, 류주현, 박창엽, "전왜 액츄에이터용 PBZT 세라믹스의 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 $Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.5})O_3$", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 31, p. 3058, 1992.

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