

# MnO<sub>2</sub> 첨가에 따른 PbTiO<sub>3</sub>계 세라믹스의 구조적, 전기적 특성

論文  
44~11~13

## Structural & Electrical Properties of PbTiO<sub>3</sub> System as a Function of MnO<sub>2</sub> Addition

洪在一\* · 柳周鉉\*\* · 尹鉉祥\*\*\* · 尹洸熙\*\*\* · 張樂元\*\*\* · 朴昌燁§

(Jae-IL Hong · Joo-Hyun Yoo · Hyun-Sang Yoon · Kwang-Hee Yoon · Nak-Won Jang · Chang-Yub Park)

**Abstract** - In this study, the structural, electrical and dielectric properties were investigated in (Pb<sub>0.76</sub> Ca<sub>0.24</sub>)[(Co<sub>1/2</sub> W<sub>1/2</sub>)<sub>0.04</sub>Ti<sub>0.96</sub>]O<sub>3</sub> system ceramics which were manufactured with the addition of MnO<sub>2</sub>. According to the increment of MnO<sub>2</sub> addition, tetragonality was decreased. The specimen added with 1.5 mol% MnO<sub>2</sub> and sintered at 1150°C showed the highest density of 7.06[g/cm<sup>3</sup>]. The variations of grain size as a function of MnO<sub>2</sub> addition were negligibly small. But grain was grown until 7.88[μm] with increasing sintering temperature. Electromechanical coupling factor planar mode K<sub>p</sub> was decreased to a small value of K<sub>p</sub> ≈ 0 in all the specimens added with MnO<sub>2</sub> and sintered at 1150°C & 1200°C

**Key Words** : Tetragonality, Electromechanical Coupling Factor Planar Mode K<sub>p</sub>, Grain

### 1. 서 론

유전상수가 큰 Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub> 계의 2성분계나 3성분계 세라믹스는 다른 부품과의 임피던스 정합이 어렵고, 고주파수에서 사용되는 두께방향진동 진동자를 제작할 경우 경진동의 전기기계 결합계수 K<sub>p</sub>가 두께방향 진동모드의 전기기계 결합계수 K<sub>t</sub>와 거의 같기 때문에 K<sub>p</sub>에 의해 불요진동이 발생해서 우수한 두께방향진동 진동자를 만들기가 어렵다는 문제점이 발생하였다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 유전상수가 비교적 낮고 전기기계 결합계수의 이방성이 (K<sub>t</sub>/K<sub>p</sub>)이 크며 curie점이 높고 경시 변화율이 낮은 PbTiO<sub>3</sub>계 세라믹스가 각광받기 시작하였다.[1] 그러나 PbTiO<sub>3</sub>계 세라믹스는 소결이 잘 안되고, 분극하기가 또한 어려운 결함을 가지고 있다. 이는 정방성(c/a)이 1.064로 매우 커서 소결후 강은과정에서 큐리온도(약 490°C)를 지날때 결정구조가 입방정계에서 정방정계로 바뀌면서 내부 응력이 크게 되어 균열이 생기기 때문이다.

이러한 문제점 때문에 Y. Yamashita등은 Pb의 일부를 알칼리토금속인 Ba, Sr, Ca로 치환 시키고 소량의 Pb(Co<sub>1/2</sub>W<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>를 고용시켜 해결하였다.[2] 특히, (Pb, Ca)TiO<sub>3</sub>계 세라믹스는 K<sub>t</sub>가 52%, K<sub>p</sub>가 4.3%로 작기 때문에 큰 전기기계결합계수의 이방성(K<sub>t</sub>/K<sub>p</sub>=12)을 갖고 있다.

본 연구에서는 두께방향 진동의 수중 초음파기기용을 위한 Pb/TiO<sub>3</sub>계 세라믹스에 Ca를 Pb와 치환하고 Co, W을 Ti와 치환한(Pb<sub>0.76</sub> Ca<sub>0.24</sub>)[Co<sub>1/2</sub>W<sub>1/2</sub>]<sub>0.04</sub>Ti<sub>0.96</sub>]TiO<sub>3</sub>계 세라믹스에서 소결성을 개선하고 비저항을 높이고자 MnO<sub>2</sub>를 첨가하였다.

이는 Y. Yamashita등이 MnO[3], J. H. Liao등이 MnCO<sub>3</sub>[4]를 첨가하여 제작하였으나, 본 실험에서는 MnO<sub>2</sub>를 첨가하고, 소성온도를 변수로 두어 MnO<sub>2</sub>와 소성온도가 제반 구조적, 전기적, 유전적 특성에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

### 2. 실험방법

본 실험에서는 (Pb<sub>0.76</sub> Ca<sub>0.24</sub>)[(Co<sub>1/2</sub> W<sub>1/2</sub>)<sub>0.04</sub> Ti<sub>0.96</sub>]O<sub>3</sub>계 압전세라믹스에 MnO<sub>2</sub>를 0.05, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 [mol%]를 첨가하여 산화물 혼합법으로 원료 분말을 준비하여 850°C에서 2시간 하소(calcining)한 다음[3], 1000[kg/cm<sup>2</sup>]의 압력을 가하여 20φ×1.5[mm]의 크기로 성형한 후 소성온도를 1100, 1150, 1200°C로 MnO<sub>2</sub>첨가함에 따라 표2.1 처럼 2시간 소성하였다. 제조된 시편은 초음파로 세척하고 건조시킨후에 Dupont 7095은 전극을 실크스크린법으로 부착하여 600°C에서 10분간 열처리하였다.

또한 모든 시편은 30Kv/Cm의 전계로 100°C의 실리콘 유속에서 20분간 분극처리를 하였다. 또한 EMAS에 따라 두께 방향 진동모드는 17.5x1.75[mm], 경진동모드는 17.5x 1.0[mm], 길이방향 신축진동 모드는 12x3x1[mm]로(각각 K<sub>t</sub>, K<sub>p</sub>, K<sub>31</sub> 측정용)준비하였으며, 밀도는 수은법을 이용하였고 결정구조와 미세구조는 각각 XRD, SEM 사진을 이용하여 관찰하였으며 유전상수 및 저항율은 각각 LCR meter[HP4194A]와 Keithly사의 181 Nanovoltmeter를 이용하여 계산식으로 구하였으며, 전기적 특성은 Impedance/Gain-Phase Analyzer[HP4194A]를 사용하여 관찰하였다.

\* 正 會 員 : 大 石 工 業 專 門 大 電 氣 科 助 教 授 · 工 博

\*\* 正 會 員 : 世 明 大 工 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博

\*\*\* 正 會 員 : 延 世 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

§ 正 會 員 : 延 世 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1994 年 8 月 11 日

1 次 修 正 : 1994 年 12 月 14 日

2 次 修 正 : 1995 年 4 月 11 日

3 次 修 正 : 1995 年 10 月 9 日

**표 2.1** MnO<sub>2</sub> 첨가량과 소성조건에 따른 시편의 분류  
**Table 2.1** Classification of the specimens with added MnO<sub>2</sub> weight and sintering condition

온도\MnO <sub>2</sub>	0.0mol%	0.5mol%	1.0mol%	1.5mol%	2.0mol%	3.0mol%
1100℃	H1-0	H1-1	H1-2	H1-3	H1-4	H1-5
1150℃	H2-0	H2-1	H2-2	H2-3	H2-4	H2-5
1200℃	H3-0	H3-1	H3-2	H3-3	H3-4	H3-5

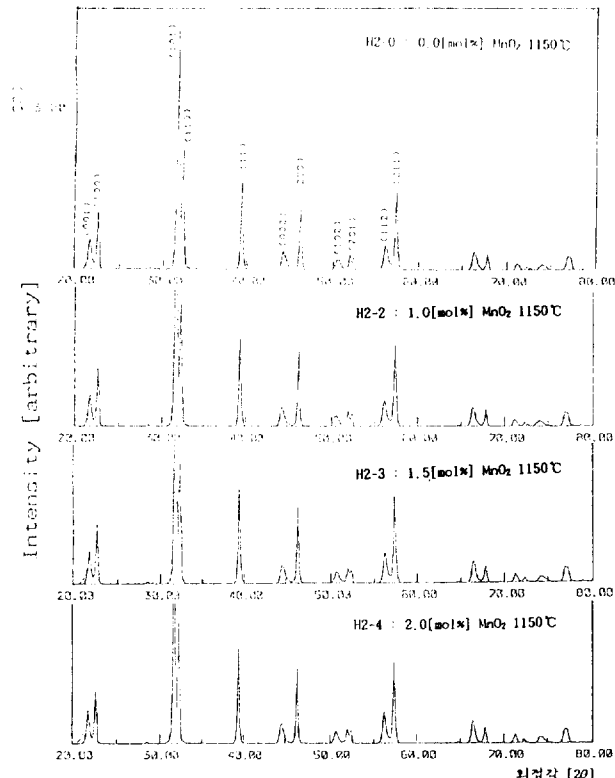
**3. 결과 및 고찰**

**3.1 구조적 특성**

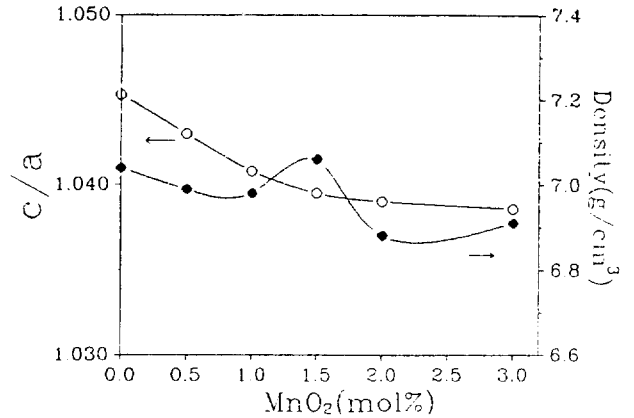
그림 3.1은 1150℃에서 2시간 동안 소성한 시편의 MnO<sub>2</sub>에 따른 X선 회절도이며 표3.1에는 X선 회절 분석결과를 나타내었다. 그림 3.1의 X선 회절도에서 회전각 2θ가 30°~34°나 42°~49°사이에서 각각 (101), (110) 및 (002), (200)번위에서 peak의 분리가 나타나는 것으로 보아 정방정계(tetragonal system)

**표 3.1** MnO<sub>2</sub>첨가와 소성온도에 따른 격자상수와 밀도  
**Table 3.1** Lattice Parameters and density of Specimens with MnO<sub>2</sub> addition, sintering temperature

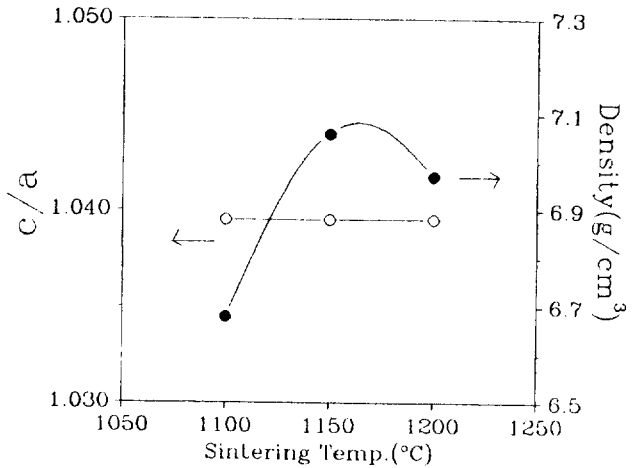
시편 종류	a <sub>0</sub>	c	정방성 (c/a)	이론밀도	밀도	상대밀도 (%)
H2-0	3.9001	4.0766	1.0453	7.12	7.04	98.9
H201	3.9111	4.0793	1.0430	7.08	6.99	98.7
H202	3.1959	4.0758	1.0408	1.07	6.98	98.7
H2-3	3.9111	4.0654	1.0395	1.10	7.06	99.4
H2-4	3.9111	4.0637	1.0390	7.11	6.88	96.7
H2-5	3.9143	4.0654	1.0386	7.09	6.91	97.4
H1-3	3.9159	4.0706	1.0395	1.08	6.68	94.3
H3-3	3.9159	4.0706	1.0395	1.08	6.97	98.4



**그림 3.1** MnO<sub>2</sub> 첨가량과 소성온도에 따른 X선 회절 모양  
**Fig. 3.1** X-ray diffraction patterns with MnO<sub>2</sub> addition and sintering temperature



**그림 3.2** MnO<sub>2</sub> 첨가량에 따른 정방정고 밀도 변화  
**Fig 3.2** Variations of tetragonality and density with MnO<sub>2</sub> additive



**그림 3.3** 소성온도에 따른 정방성과 밀도변화  
**Fig. 3.3** Variations of tetragonality and density with sintering temperature

임을 알수 있었다.[5, 6]

그림 3.2에서 MnO<sub>2</sub> 첨가량의 증가에 따라서 정방성(tetragonality)이 감소한것은 cooks의 보고[7]와 같이 Mn이 3가로서 AB<sub>2</sub>O<sub>3</sub>구조의 B자리에 치환되는데 MnO<sub>2</sub>의 이온 반경(0.66Å)이 Ti<sup>4+</sup>의 이온반경(0.68Å)및 Co<sup>2+</sup>의 이온반경(0.72Å)보다 적으므로 평균 부피가 감소되어 Goldschmit rule에 따라서 격자상수 c와 unit cell volume이 감소하기 때문이라고 한것과 일치하고 있다. MnO<sub>2</sub> 1.5mol% 첨가된 시편에서 밀도가 7.06[g/cm<sup>3</sup>]으로 가장 좋은 값을 나타내었다. 이는 그래인이 작은경우 치밀화가 쉽게 일어나기 때문이라 생각한다.

그림 3.3에서 MnO<sub>2</sub> 1.5[mol%] 첨가한 시편의 소성온도에 따른 정방성은 전혀 변화가 없었으나 소성온도에 따른 밀도는 1100℃에서 가장 밀도가 낮았고 1150℃에서 최고값을 보이고 1200℃에서 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 850℃에서 하소할시에 미처 반응 하지 못한 PbO가 액상으로 (Liquid Phase)있다가 본 소성시 치밀화를 촉진시키는 과정에서 1150℃가 적절 했으며, 1200℃이상에서 밀도가 감소한 이유는 격자점에 있는 Pb및 그래인 경계의 PbO 휘발에 의한 것으로 생각된다.

3.2 미세구조의 변화

MnO<sub>2</sub> 첨가량과 소성온도에 따른 미세구조변화를 SEM으로 촬영한 결과를 사진 3.1에 나타 내었다. 여기서, SEM 사진배율은 (a)와 (g)만 5000배이며 나머지는 200배율이다.

사진은 기초로 하여, Linear Intercept법으로 계산한 그레인의 크기를 표3.2에 나타내었다. MnO<sub>2</sub> 첨가량에 따른 미세구조의 변화를 나타내고 있는 사진 3.1(a)부터 (f)까지에서 그레인의 크기를 비교해보면 MnO<sub>2</sub> 0.5[mol%] 첨가시 약간 증가한 후 1.5[mol%]까지 2.66 $\mu$ m로 감소하였다가 다시 증가하였다. MnO<sub>2</sub>가 1mol[%]이상에서 그레인 성장이 억제되는 이유는 첨가된 이온이 그레인 경계에 침투되어 그레인 사이의 결합력을 증가시키는 강형이 있기 때문이라 생각된다.

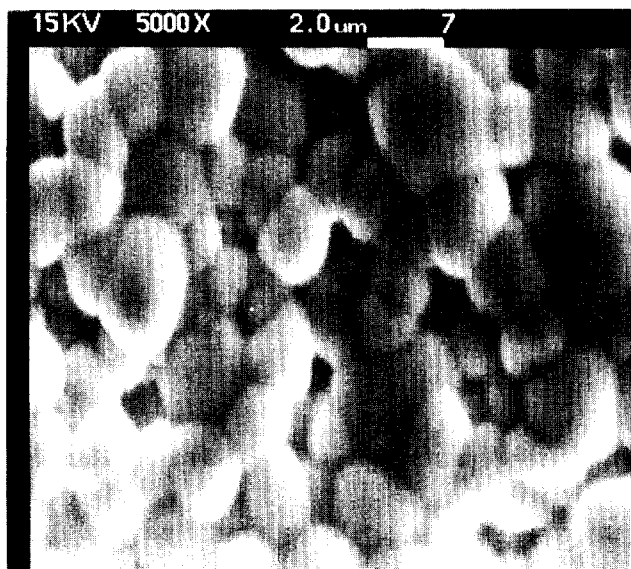
또한 소성온도에 따른 변화는 매우 커서, 1200 $^{\circ}$ C로 소성시 사진 3.1(h)처럼 7.88 $\mu$ m까지 그레인의 성장하였다.

표 3.2 MnO<sub>2</sub> 첨가량과 소성온도에 따른 그레인의 크기  
Table 3.2 Grain size with MnO<sub>2</sub> addition and sintering condition

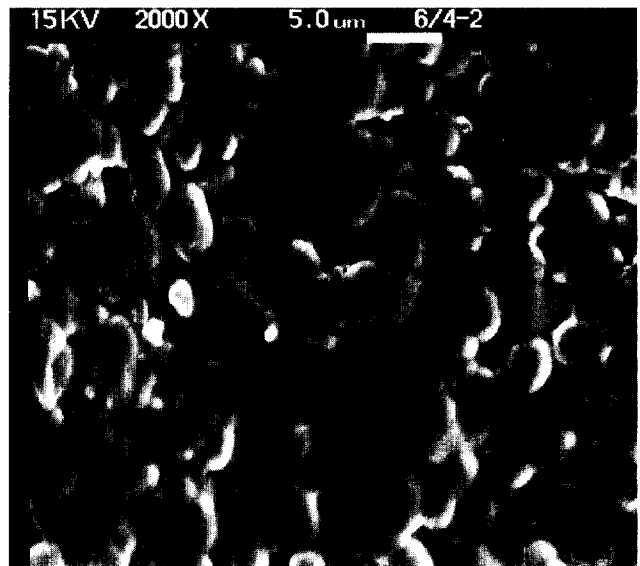
시편 번호	그레인 크기 [ $\mu$ m]
H2-0	2.30
H2-1	3.25
H2-2	2.99
H2-3	2.67
H2-4	2.77
H2-5	3.03
H1-3	1.66
H3-3	7.88

3.3 유전상수 및 저항률의 변화

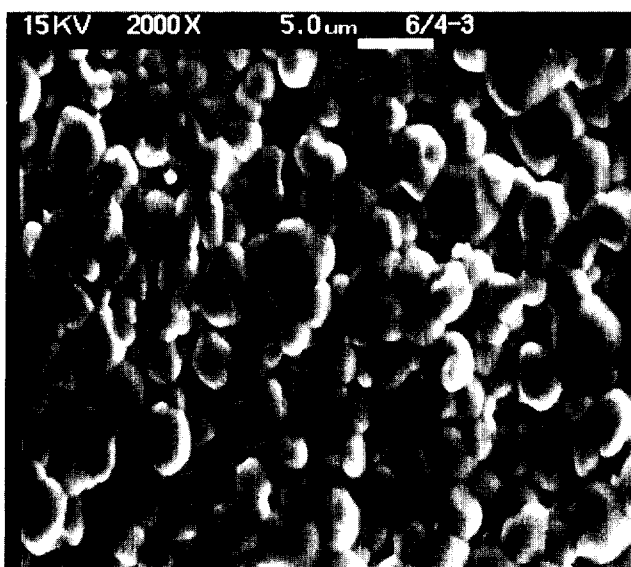
그림 3.4는 1150 $^{\circ}$ C에서 2시간 소성한 시편의 MnO<sub>2</sub>첨가량에 따른 온도에 대한 유전상수의 변화이며 큐리온도의 변화



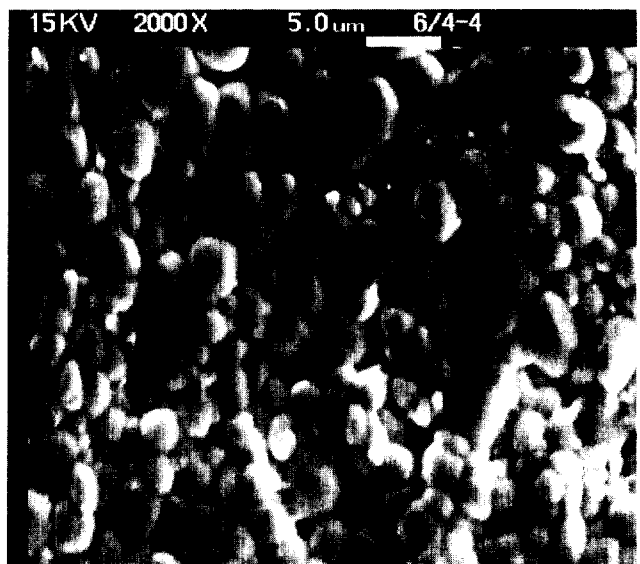
(a) H2-0 : 0.0% 1150 $^{\circ}$ C



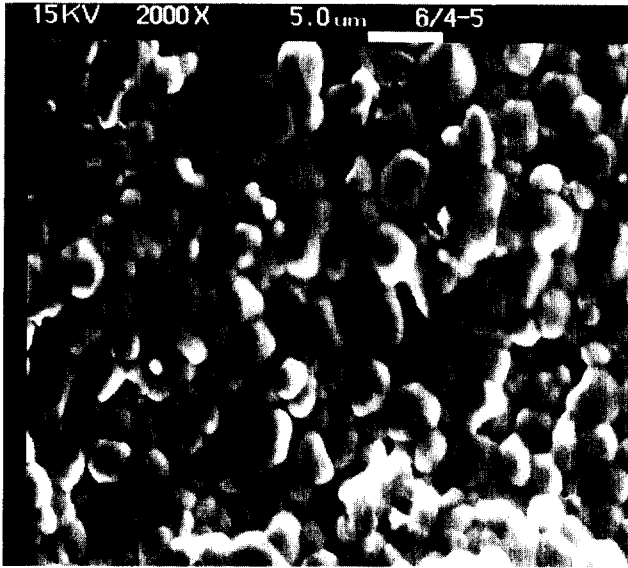
(b) H2-1 : 0.5mol%



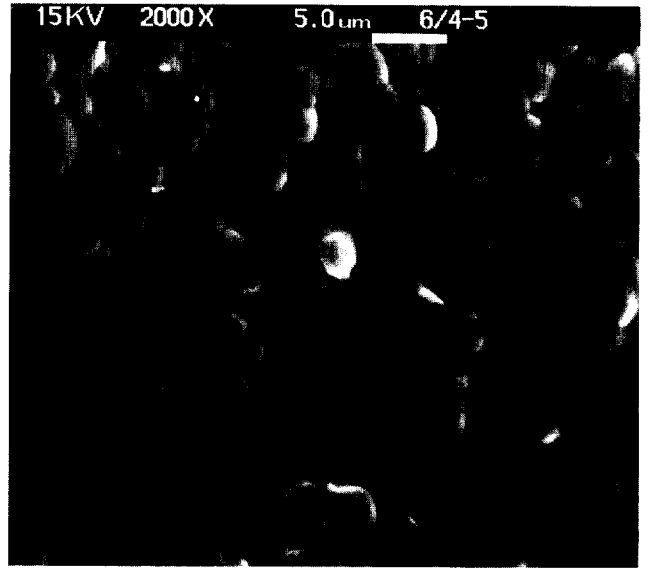
(c) H2-2 : 1.0mol%



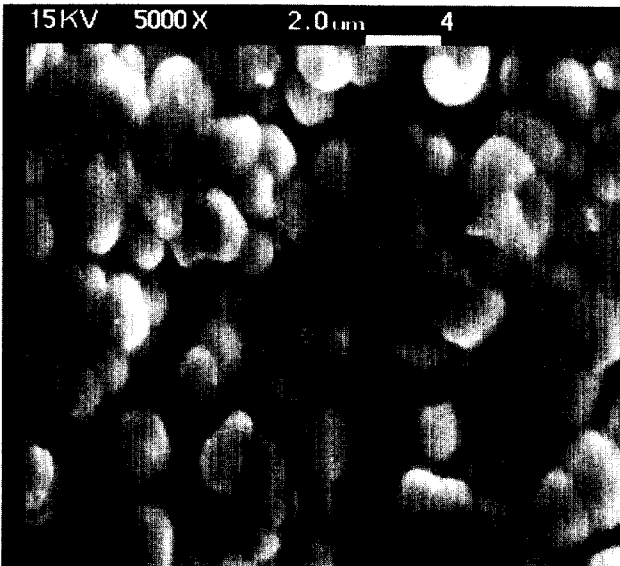
(d) H2-3 : 1.5mol%



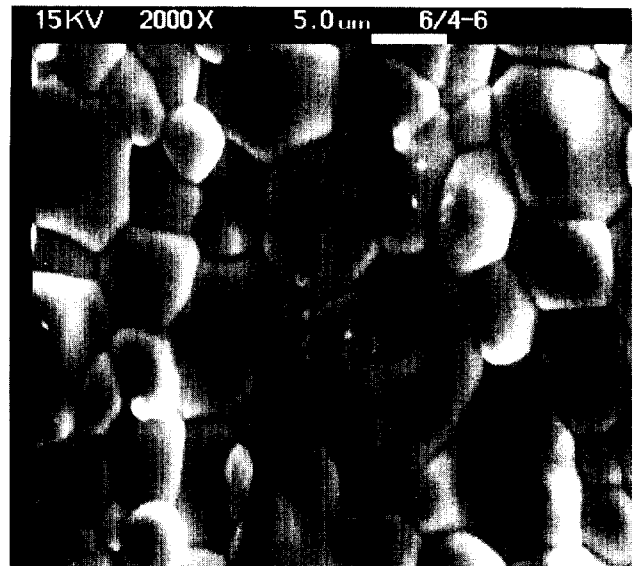
(e) H2-4 : 2.0mol%



(f) H2-5 : 3.0mol%



(g) H1-3 : 1100°C



(g) H3-3 : 1200°C

**사진 3.1** MnO<sub>2</sub> 첨가량과 소성온도에 따른 미세 구조

**photo 3.1** Microstructure with MnO<sub>2</sub> addition and sintering temperature

는 그림 3.5에 별도로 나타내었다.

그림 3.5에서 MnO<sub>2</sub>를 0.5[mol%]첨가시 큐리온도가 증가 했다가 MnO<sub>2</sub> 첨가량의 증가에 따라 계속 감소함을 보이고 있다. 또한 큐리온도에서의 유전상수는 MnO<sub>2</sub> 첨가량에 따라 2.0[mol%]까지 감소하다가 다시 증가하였다.

그림 3.6은 1150°C에서 소성한시편에 대한 MnO<sub>2</sub>첨가량에 따른 상온에서의 저항률 변화이다. MnO<sub>2</sub>가 1.5[mol%]까지 저항률이 증가하였으며 그 이후 부터는 감소하였다. 이는 Yamashita등이 본 논문과 같은 조성에서 MnO<sub>2</sub>첨가에 따른 저항률 변화와 유사한 경향을 보이고 있다.[3]

S. M. Alexander등은 Mn<sup>3+</sup>이온의 온도에 따른 변화를 다음과

같이 보고하였다.

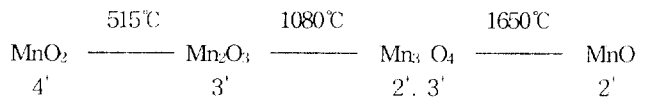


그림 D.T.A 분석으로 PZT형성 온도에서 Mn<sup>3+</sup>이온이 3개로 존재한다고 하였다.

본 실험에서, MnO<sub>2</sub>에 따른 저항률변화를 측정해 본 결과 1.5mol%를 전후하여 크게 변화하였다. 0.5mol% MnO<sub>2</sub> 첨가시에는 Mn<sup>3+</sup>가 Ti<sup>4+</sup>에 치환하여 역셀터 불순물로 작용

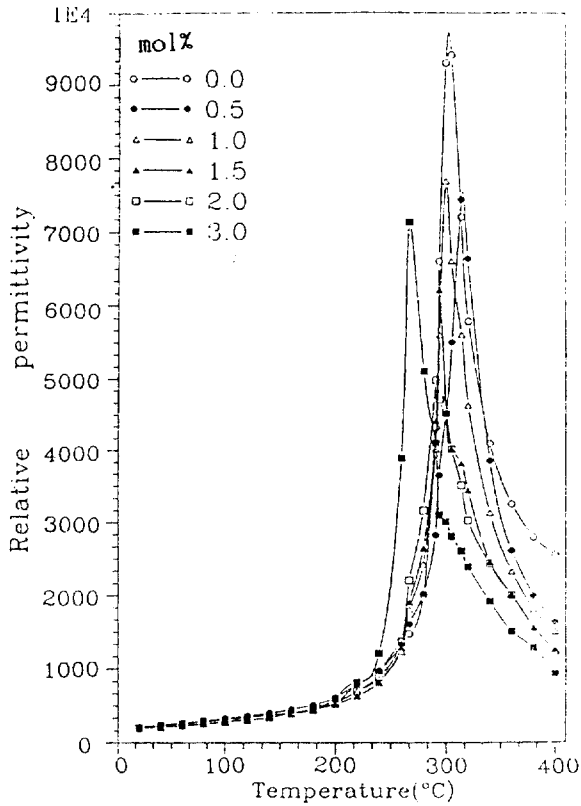


그림 3.4 MnO<sub>2</sub>첨가량에 따른 유전상수의 온도의 존성  
 Fig. 3.4 Temperature dependence of relative permittivity with MnO<sub>2</sub> additive

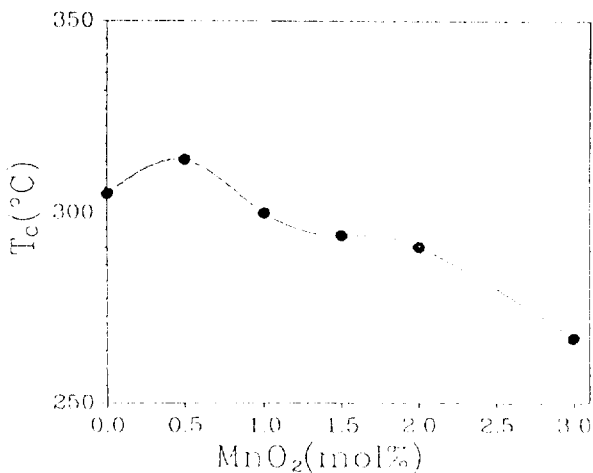


그림 3.5 MnO<sub>2</sub> 첨가량에 따른 큐리온도의 변화  
 Fig. 3.5 Variation of curie Temperature with MnO<sub>2</sub> additive

정공이 발생하게 되어 캐리어 농도가 증가, 표3.3처럼 K<sub>t</sub>가 감소되었으며 저항율도 다소 감소된 것이라 생각된다. 또한 0.5mol% MnO<sub>2</sub>이후에는 Mn<sup>3+</sup>가 Co<sup>4+</sup>에 치환하여 도너 불순물로 작용, 전자가 발생하여 전자-정공보상효과에 의해 캐리어 농도가 감소 K<sub>t</sub>의 증가와 점차 저항율도 증가 하였다. 1.5mol%이후에는 K<sub>t</sub> 및 저항율이 다시 감소하였는데 이는 MnO<sub>2</sub>의 고용 한계를 넘어 MnO<sub>2</sub>가 그레인 경계에 편석되었기 때문이라 생각된다.[8] 저항율은 분극에 영향을 미치는데, 저

항율이 낮게되면 분극시 누설전류가 발생할 이력이 있기때문에 고전계인가가 불가능하다. 그러나, MnO<sub>2</sub>를 첨가함으로써 저항율이 증가되어 30Kv/Cm까지의 고전계 인가가 가능하기 때문에 본 실험에서 제작한 (Pb<sub>0.76</sub>Ca<sub>0.24</sub>)[Co<sub>1/2</sub>W<sub>1/2</sub>]<sub>0.04</sub>Ti<sub>0.96</sub>O<sub>3</sub>계 세라믹스의 분극처리를 할 수 있었다. 이는 Yamashuta등의 MnO 첨가와 비교할때 다소 저항율이 떨어진 값을 나타낸 것으로 40-50Kv/Cm까지의 고전계 인가가 불가능하였으며, 분극 전계에 따른 제반 물성 특성을 측정하지 못하였다.

저항율이 떨어진 이유는 기본조성에 MnO<sub>2</sub>를 불순물로 첨가할 때 소성온도 (1100-1200°C)에서는 Mn이 3가로 존재하게 되나, 보다 안정한 화합물인 MnO보다 고용이 잘 안되어 그레인 경계에 많은 양이 편석된 것으로 생각된다.

표 3.3은 MnO<sub>2</sub> 첨가량과 소성온도에 따른 K<sub>p</sub>와 K<sub>t</sub>시편의 특성이다. 1150°C, 1200°C로 소성한 경우에 MnO<sub>2</sub>를 첨가한

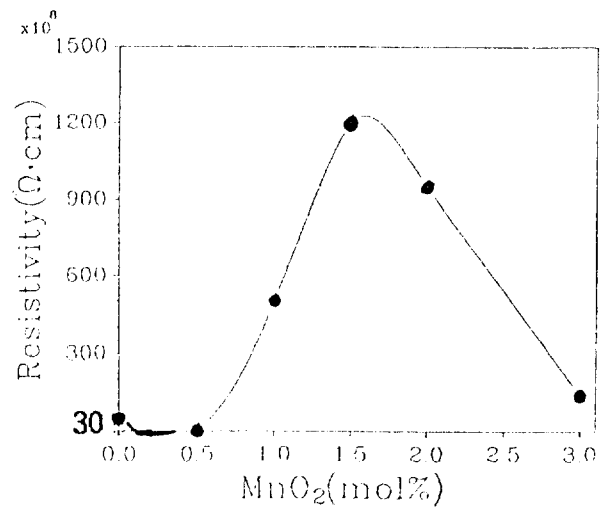


그림 3.6 MnO<sub>2</sub> 첨가량에 따른 저항율의 변화  
 Fig. 3.6 Variation of resistivity with MnO<sub>2</sub> addition

표 3.3 MnO<sub>2</sub>첨가량과 소성온도에 따른 시편의 특성  
 Table 3.3 Characteristics of specimens with MnO<sub>2</sub> addition and sinteringtemperature

시편종류	$\epsilon_r$	Nt[Hz · m]	k <sub>t</sub> [%]	k <sub>p</sub> [%]
H1-0	212.32	2095.3	31.2	15.1
H1-1	233.15	2071.1	31.5	11.3
H1-2	238.05	2186.7	16.6	10.5
H1-3	234.25	2181.6	37.7	7.2
H1-4	231.32	2200.4	39.5	8.0
H1-5	226.02	2188.3	30.4	8.5
H2-0	190.67	2238.5	35.0	8.5
H2-1	217.22	2295.2	17.8	≈0
H2-2	204.26	2261.9	31.2	≈0
H2-3	202.89	2180.8	49.0	≈0
H2-4	206.44	2128.3	41.7	≈0
H2-5	210.07	2145.2	36.4	≈0
H3-0	190.25	2203.5	31.0	10.2
H3-1	184.21	2227.1	25.7	≈0
H3-2	186.05	2270.5	30.3	≈0
H3-3	183.40	2214.5	42.3	≈0
H3-4	184.19	2144.8	38.6	≈0
H3-5	187.24	2160.2	32.7	≈0

참 고 문 헌

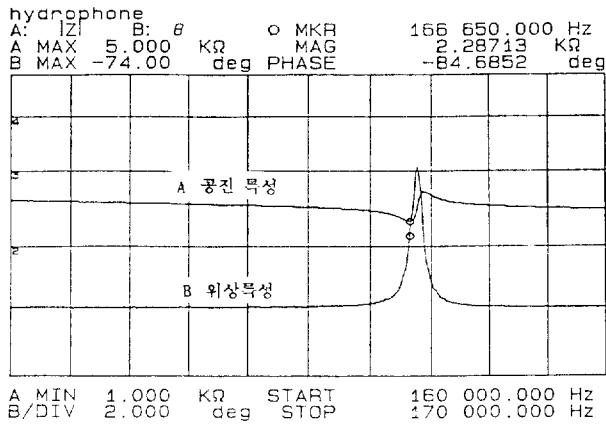


그림 3.7 시편 H1-3의 공진 및 위상 특성  
 Fig. 3.7 Resonance & Phase Properties of H1-3 specimen

모든 시편에서 거의  $K_p \approx 0$ 을 나타냈다. 이는 1100°C로 소성한 경우보다 그레인 크기가 증가하여 보다 많은 90° 도메인을 갖기 때문인데, 일반적으로 그레인 크기가 큰 강유전체 세라믹스는 그레인 크기가 작은 것보다 보다 많은 90° 도메인을 갖는 것으로 알려져 있다.[3] 따라서, 1100°C 소성된 조성보다 분극시에 더욱 많이 90° 도메인이 회전하게 된다. L. Pardo 등은[4] 적절한 미세구조를 갖는 세라믹스가 상대저공로 높은 퍼센트의 90° 도메인 재배열을 이루도록 분극되며 90° 도메인 재배열로 인해 미소 크랙과 같은 어떠한 결함으로 인해 결합부분에서 에너지 흡수와 탄성파의 분산이 이루어져 기계적 품질계수  $Q_m$ 을 저하시켜 정전동 모드 전기기계결합계수  $K_p$ 를 감소시킨다고 하였으며[4], 본 실험에서도 이와 같은 결과로 생각된다.

그림 3.7은 정전동 모드로 준비한 H1-3시편에 대한 분극후 1년 경과한 후에 측정된 공진 및 위상 특성이다.

H1-3는  $K_p=7.2\%$ 에서  $K_p=5.9\%$ 로 거의 떨어지지 않았으나  $MnO_2$ 를 첨가하여 1150, 1200°C에서 소성한 시편에서는 1년전이나 1년후도 거의 같이  $K_p \approx 0\%$ 로 본인이 실험한 공진, 반공진 방법의 측정 시스템으로는 시호레벨이 너무 낮아 관찰이 불가능하였다.

4. 결 론

본 연구에서는  $(Pb_{0.76} Ca_{0.24})[(Co_{1/2} W_{1/2})_{0.04} Ti_{0.96}]O_3$ 계에  $MnO_2$ 를 첨가하여 시편을 제조하여 이에 따른 전기적, 구조적 유전적 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)  $MnO_2$  첨가량의 증가에 따라서 저항율이 감소하였으며 밀도는:  $MnO_2$  1.5[mol%] 첨가하고 1150°C에서 소성한 경우  $7.06[g/cm^3]$ 으로 가장 높았다.
- (2)  $MnO_2$  첨가량의 증가에 따른 그레인 크기의 변화는 작았으며 소성온도의 증가에 따라 1200°C에서  $7.88[\mu m]$ 까지 성장하였다.
- (3)  $MnO_2$  첨가량의 증가에 따라 큐리온도와 큐리온도에서의 유전상수가 대체로 감소하였다.
- (4) 저항율은 1100°C로 소성하고,  $MnO_2$  첨가량이 1.5[mol%]일때  $1.2 \times 10^{11}[\Omega \cdot cm]$ 를 정점으로 증감 및 감소하였다.
- (5) 1150°C와 1200°C로  $MnO_2$ 를 첨가하여 소서오던 모든 시편에서  $K_p \approx 0\%$ 로 무시할 만큼 작은 값으로 감소하였다.

[1] B. Jaffe, "Piezoelectric Ceramics" p. 135, Academic pres, 1975  
 [2] Y. amashita, et al. (Ph, Ca)((Co<sub>1/2</sub> W<sub>1/2</sub>/Ti)O<sub>3</sub> Piezoelectric Ceramics & Their Applications Jpn. J. App[Phy. 20, p. 183, Suppl. 20-4(19810  
 [3] 山下洋八, 吉田情一, 高橋 孝, "異方性強化した壓電七うミクス", 東レビュー, 39(6), pp. 504-506, 1984  
 [4] L. Pardo, et al. Ferroelectrics, Vol. 94, p. 189-194(1989)  
 [5] E. C. Subbarao, J. Am. Ceram. Soc, 43[3], p. 119-121 1960  
 [6] K. Kakegawa, J. Mohri, ibid, 65[10], p 515-519, 1982  
 [7] W. R. Cook Jr. Ibid, Vol. 58, p. 151, 1975  
 [8] 김호기, 김맹응 등 Pb[(Cd<sub>1/2</sub> W<sub>1/2</sub>) Zr<sub>0.505</sub> Ti<sub>0.475</sub>]O<sub>3</sub> 조성에서의  $MnO_2$  첨가에 대한 영향 요업학회지 Vol. 25, No. 6, P. 571-576(1988)

저 자 소 개

홍재일 (洪在 一)

전기학회 논문지 제44권 4호 참조

류주현 (柳周 鉉)

전기학회 논문지 제44권 4호 참조



윤현상 (尹鉉祥)

1961년 12월 5일생. 1988년 인천대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 연세대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



윤광희 (尹洸熙)

1964년 1월 18일생. 1988년 연세대 전기공학과 졸업. 1990년 연세대 동 대학원 전기공학과 졸업. 1993년~현재 연세대 대학원 전기공학과 박사과정 재학중



장낙원 (張樂元)

1967년 11월 7일생. 1990년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정



박창엽 (朴昌燁)

1935년 2월 13일생. 1958년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1960년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1973년 동 대학원 졸업(공학). 현재 연세대 공대 전기공학과 교수