

논문 96-5-3-12

용융염합성법에 의한 $A_2B_2O_7$ 고온압전세라믹스의 제작과 전기적특성

박인호*, 김태규**, 남효덕***

Fabrication and Electrical Properties
of High T_c $A_2B_2O_7$ Piezoelectric Ceramics Using the Powders Prepared
by the Molten Salt Synthesis Method

In-Ho Park*, Tae-Gyu Kim**, Hyo-Duk Nam***

요 약

높은 큐리온도를 가진 다결정 세라믹스 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 및 $La_2Ti_2O_7$ 을 고상반응법과 용융염합성법으로 제조하고 조성과 하소 및 소결조건에 따른 분말특성, 상구조, 소결특성, 입자배향도 및 전기적 특성을 조사하였다.

용융염합성법에 의해 합성된 하소분말의 단일상은 고상반응법에 의한 것보다 100 - 150°C 낮은 하소온도에서 나타났다. 한편 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 소결체에서 Nb의 조성이 커질수록 입자배향도가 커지고 소결성 및 고온에서의 유전특성이 좋아졌다. 또 용융염합성법으로 $A_2B_2O_7$ 세라믹스를 제조할 경우 고상반응법에 비해 소결온도를 낮출 수 있고 비유전율도 다소 높일 수 있으나 압전특성이나 입자배향도는 향상되지 않았다.

Abstract

Polycrystalline $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ and $La_2Ti_2O_7$ ceramics having very high Curie temperatures were synthesized by the conventional oxide mixing method (CON) and the molten salt synthesis method (MSS). Physical characteristics and phase relationship of calcined powders, as well as the sintering behavior, the grain-orientation and dielectric properties of sintered ceramics were investigated as a function of composition and firing temperature.

The single $A_2B_2O_7$ phase was synthesized by using the MSS method at 100 - 150°C lower temperature compared to the CON method. As Nb content increased in $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ ceramics, the Curie temperature and the dielectric constant at Curie temperature were raised, and the sintering behavior and the degree of grain-orientation were also improved at the same time. The use of MSS-derived powders made it possible to lower the sintering temperature and to improve the dielectric properties of the sintering samples. However, the piezoelectric properties as well as the grain-orientation were not improved any further by the MSS route.

I. 서 론

- * 영남대학교 대학원 전자공학과 박사과정
(Graduate School, Yeungnam Univ.)
 - ** 영남대학교 대학원 전자공학과 석사과정
(Graduate School, Yeungnam Univ.)
 - *** 영남대학교 전자공학과
(Dept. of Electronic Eng., Yeungnam Univ.)
- <접수일자 : 1996년 3월 30일>

PZT를 비롯한 다수의 다결정 압전재료료가 그 다양한 압전특성 때문에 실온에서 광범위하게 사용될뿐 아니라 재료에 따라서는 이용 온도범위도 수백도에 이른다.^[1] 그런데 연소가스 조정용 액츄에이터를 비롯한 특수용 압전체의 응용분야에는 1000°C 이상의 온도범

위에서도 정상적인 동작이 되어야 하기 때문에 이에 부차시키는 압전체 역시 대단히 높은 큐리온도를 가져야 한다. 그렇지만 현재 널리 사용되고 있는 압전체인 PZT, PbTiO₃ 등도 그 큐리온도가 500°C를 넘지 못하여 새로운 재료 개발이 요구되고 있다.

그런데 1970년대 초에 발견된 평판형 페로브스카이트 구조를 가진 A₂B₂O₇형 화합물인 Sr₂Nb₂O₇ (Tc=1342°C)과 La₂Ti₂O₇(Tc=1500°C) 등은 큐리온도가 1300~1500°C에 이르고 있다.^[2,3] 이들 A₂B₂O₇형과 같이 큐리온도가 높은 압전재료는 개발 초기에는 단결정으로 성장시켜야 했으며, 지금까지 연구대상도 상전이점이나 결정구조를 조사하는 것을 비롯한 기초적 연구가 진행되어 왔을 뿐이고 압전특성을 향상시키는 실용적인 연구는 아직까지 미흡하다.^[4-7] 따라서 이들 압전체를 단결정으로 성장시키기 위해서는 복잡한 장치와 많은 경비가 소요되는 점을 감안한다면 쉽게 양산할 수 있는 다결정 소결체를 제조함과 아울러 실용화를 위해 압전특성을 향상시키는 연구의 필요성이 절실하다. 최근에야 Prasadarao 등^[8]은 졸-겔법으로 La₂Ti₂O₇ 박막을 제조한 바 있고, Fuierer 등^[9]은 처음으로 다결정 A₂B₂O₇ 세라믹스 제조를 시도하였으며, 필자도 Sr₂Nb₂O₇계 압전세라믹스를 제조하여 그 유전특성을 조사한 바 있다.^[10]

이와 같이 고온센서용 다결정 압전세라믹스 개발이 절실히 요구되는 점을 감안하여 본연구에서는 높은 큐리온도를 가진 A₂B₂O₇형 압전체인 다결정 Sr₂Nb₂O₇과 La₂Ti₂O₇ 세라믹스를 제조하여 그 특성을 조사하고자 한다. 우선 고상반응법(conventional oxide mixing method : CON)을 이용하여 조성과 하소 및 소결조건에 따른 소결특성과 전기적특성 등을 조사하였으며, 이를 단결정에서 얻은 결과와 비교하였다. 또 같은 조성의 압전체를 NaCl과 KCl을 flux로 사용한 용융염합성법(molten salt synthesis method : MSS)으로 제조함으로써 고상반응법에 비해 소성온도를 현저히 낮출 수 있음을 밝히고 아울러 여타의 제특성도 고상반응법과 비교하였다.

II. 실험 및 측정

1. 시편제조

본 실험에서는 고순도의 SrCO₃, Ta₂O₅ 및 Nb₂O₅를 사용하여 Sr₂(Ta_{1-x}Nb_x)₂O₇을, La₂O₃, TiO₂를 사용하여 La₂Ti₂O₇을 합성하였다. 고상반응법에서는 소원료를 소

정의 조성비로 조합하여 원료 : 불 : 증류수 = 1 : 2 : 2의 중량비로 혼합하였다. 용융염합성법을 위해서는 고상반응법과 같은 원료조성에 KCl과 NaCl을 flux로 가했는데, 원료분말에 대한 flux의 몰비율 1 : 1 되게, NaCl과 KCl의 몰비도 1 : 1로 하였다. 각 조성별로 조합한 시료를 지르코니아 불을 사용하여 8시간 혼합하였다. 혼합된 시료를 탈수 건조시킨 후 700~950°C에서 하소하였는데, 이 때의 온도 상승률은 150°C/hr로 하였다. 용융염합성법의 경우 잔존한 염은 AgNO₃으로 Cl⁻이온이 검출되지 않을 때까지 세척하여 다시 건조시켰다.

제조방법을 달리하여 합성된 분말에 3wt%의 P.V.A. 수용액을 3wt%의 중량비로 넣고 100메쉬 표준망체로 조립하였으며 98 MPa의 압력으로 직경 15mm, 두께 1.5mm 전후의 시편을 만들었다. 성형된 시편을 1200~1500°C의 온도범위에서 2시간 동안 소결하였는데, 이 때의 전기로의 온도상승과 하강속도는 150°C/hr로 하였으며 P.V.A.와 불순물 제거를 위해 400°C에서 2시간 동안 유지시켰다.

2. 측정

합성된 분말을 SEM 사진으로 입자의 형상과 크기를 관찰하였으며, 원심침강식 입도분석장치를 이용하여 분체의 입도분포를 관찰하였다. 또 XRD 분석으로 상구조를 조사함으로써 제조방법에 따른 단일상이 얻어지는 하소온도를 비교하였다. 각 방법으로 제작된 소결시편의 소결밀도를 측정하였으며 SEM 사진으로 결정립의 크기 및 모양을 관찰하는 동시에 XRD로 소결체의 상구조를 조사함과 아울러 Lotgering식^[11]에 의한 입자배향도를 계산하였다. 또 유전 및 압전특성 등 전기적 제특성도 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 하소분말 특성

고상반응법과 용융염합성법에 의해 여러 단계의 온도에서 하소한 합성분말에 대해 상구조를 조사하였는데, Fig.1은 La₂Ti₂O₇ 분말의 대표적인 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 고상반응법에서는 하소온도가 1000°C 되어야 단일상에 가까운 상이 나타난 반면 용융염합성법에서는 900°C의 하소온도에서 거의 단일상이 나타남을 알 수 있다. 이는 flux를 첨가함으로써 원료물질의

제조방법에 따른 X선회절 패턴에는 큰 차이가 없으나 전반적으로 (0k0) 피이크치가 두드러지며 특히 (080)면의 피이크치가 가장 크게 나타났다. Fig.3은 고상반응법에 의해 1500°C에서 소결한 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 에 대해 Nb의 조성 x 를 $x=0$, $x=0.8$, $x=1.0$ 으로 달리하고 소결시간을 1h, 3h, 6h로 변화시켰을 때 각 시편들의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 그림에서 Nb의 조성이 클수록 또한 소결 시간이 길수록 (0k0) 피이크를 대표하는 (080)의 피이크가 현저히 커짐을 볼 수가 있다.

이와 같은 XRD 패턴의 상대적인 피이크치로부터 소결과정에서 결정립이 동일한 방향으로 배향되는 입자배향도(grain orientation)를 짐작할 수 있는데, Lotgering은 입자배향도를 정량화하기 위하여 다음 (1)식을 제안하였다.^[11] 여기서 P는 입자배향된 시편의

XRD 피이크강도로 부터 구한 $\Sigma I(0k0)/\Sigma I(hkl)$ 이고, P_0 는 입자배향되지 않은 분말의 $\Sigma I(0k0)/\Sigma I(hkl)$ 이며, $I(hkl)$ 는 (hkl)면의 XRD상의 상대적인 피이크치를 나타낸 것이다.

$$f = (P - P_0) / (1 - P_0) \quad (1)$$

얻어진 XRD 패턴으로부터 식(1)에 의해 구한 $Sr_2Nb_2O_7$ 과 $La_2Ti_2O_7$ 의 조성 및 제조방법에 따른 입자배향도를 다른 측정치와 함께 Table 1에 나타내었다. 표에서 제조방법에 따른 입자배향도 f는 큰 차이가 없으나 Nb조성 x 가 커짐에 따라 입자배향도 f가 뚜렷이 증가하는 것을 볼 수가 있으며, 이는 소결온도를 1400°C로 고정하고 소결시간을 달리한 Fig.4의 SEM 사진에서 $x=0.8$ 시료에 비해 $x=1.0$ 시료의 입자배향도가 확실히 크다는 사실에서도 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 선행연구^[10]에 의하면 Nb 조성에 따른 SEM사진에서 $x=0.0$ 즉 $Sr_2Ta_2O_7$ 의 경우는 결정립의 크기가 2-3 μm 정도로 작고 입자의 배향도 역시 대단히 작은 반면, $x=1.0$ 즉 $Sr_2Nb_2O_7$ 의 경우는 결정립의 크기는 약 10 μm 에 이르고 동시에 입자배향 효과도 대단히 크다는 사실을 보고하였다. 한편 Fig.4의 SEM사진에서 $x=0.8$ 및 $x=1.0$ 의 조성 모두 소결시간이 길어짐에 따라 입성장이 더욱 잘 이루어지고 있을뿐만 아니라 입자배향도 f 역시 증가함을 보여주고 있다.

Fig.5는 고상반응법과 용융염합성법으로 제조된 $Sr_2Nb_2O_7$ 과 용융염합성법으로 제작한 $La_2Ti_2O_7$ 시편에 대해 소결온도를 달리한 소결체의 표면을 SEM사진으로 나타낸 것인데, 소결온도가 높을수록 결정립이 커지고 입자배향도가 좋을 수 있다. 한편 용융염합성법으로 높은 소결온도에서 제조한 시편, 즉 1500°C에서 소결한 $Sr_2Nb_2O_7$ 및 1600°C에서 소결한 $La_2Ti_2O_7$ 의 경우 그보다 낮은 온도에서 소결한 시편에 비해 기공이름을 볼 수 있는데, 이는 Fig.2에서 소결온도가 아주 높을 경우 고상반응법의 소결밀도가 용융염합성법에 비해 오히려 떨어지는 현상을 뒷받침하고 있다.

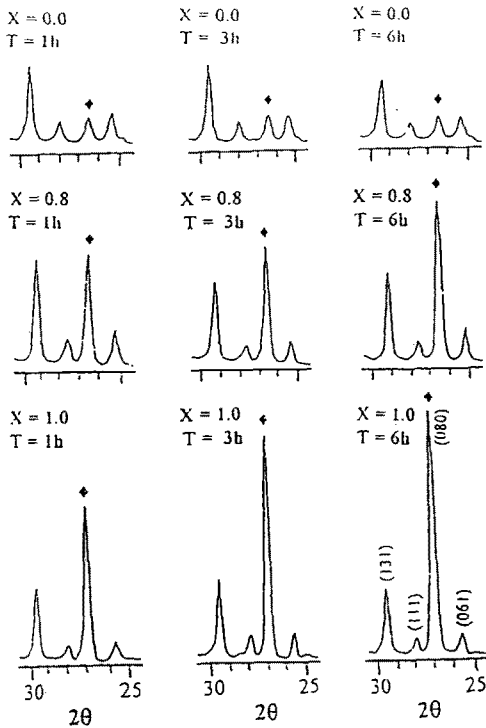


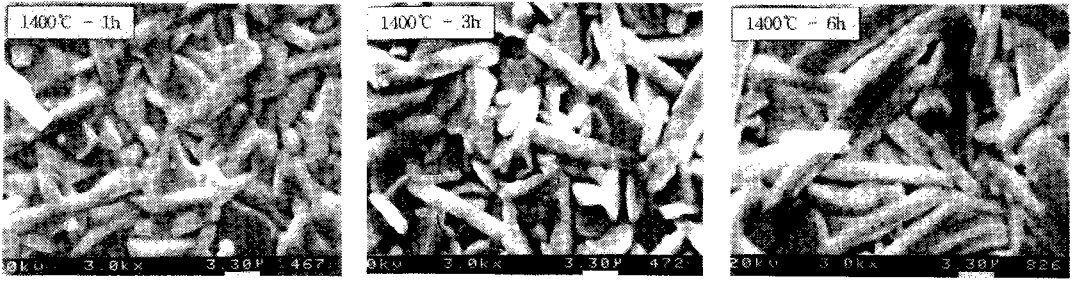
그림 3. 소결시간을 달리하면서 고상반응법으로 1400°C에서 소결한 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 세라믹스($x=0.0-1.0$)의 X선회절패턴.

Fig. 3. X-ray diffraction patterns for $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ samples ($x=0.0-1.0$) sintered at 1400°C during different time by the conventional method.

3. 유전특성

Nanamatsu 등^[3]은 $(1-x)Sr_2Ta_2O_7 \cdot xLa_2Ti_2O_7$ 조성에서 x 값이 0.0에서 1.0으로 커짐에 따라 큐리온도가 -170°C에서 1500°C로 높아짐을 보고하였으며, Nam^[10]도 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 조성에서 x 값이 커짐에 따라

a) $X=0.8$



b) $X=1.0$

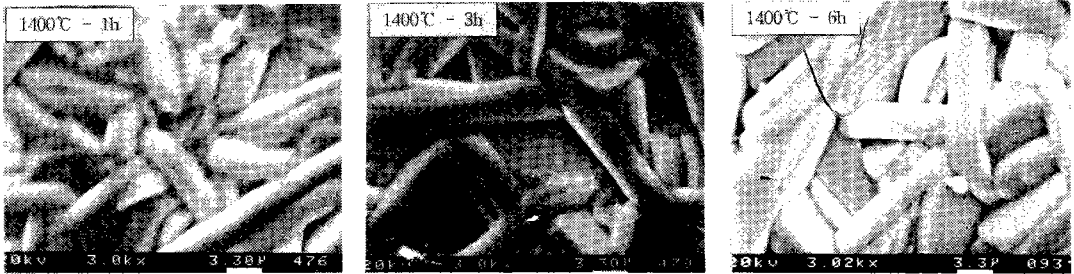


그림 4. 소결시간을 달리하면서 고상반응법으로 $1400^\circ C$ 에서 소결한 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 세라믹스($x = 0.8, 1.0$)의 전자주사현미경사진.

Fig. 4. SEM micrographs for $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ sample ($x = 0.8, 1.0$) sintered at $1400^\circ C$ for different time by the conventional method.

큐리온도가 높아지는 동시에 큐리온도에서의 유전율이 증가함을 보고한 바 있다. 이와 같이 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 에서 Nb의 조성 x 값이 클수록 큐리온도에서의 유전율은 높아지지만 본연구의 Table 1을 볼 때 상온에서의 유전율은 큐리온도가 극히 낮은 $x = 0.0$ 조성을 제외하고는 거의 비슷하였다. 이는 Nb의 첨가량이 많을수록 큐리온도에서의 유전율은 현저히 높아지지만 큐리온도도 같이 높아지기 때문에 낮은 온도에서의 유전율은 비슷할 수 밖에 없으며, 따라서 큐리온도가 현저히 다른 시료에 대해 상온에서의 유전율을 서로 비교하는 것은 무의미하다고 생각된다.

반면 제조방법에 따른 상온에서의 유전율을 살펴볼 때 $Sr_2Nb_2O_7$ 의 경우 고상반응법에서는 59인데 비해 용융염합성법에서는 70이었으며, $La_2Ti_2O_7$ 의 경우 고상반응법에서는 52인데 비해 용융염합성법은 55로 용융염합성을 사용함으로써 고상반응법에 비해 유전율을 다소 향상시킬 수 있음을 알 수 있는데, 이는 용융염합성법이 소결성을 향상시켰기 때문이라 사료된다. 한편

Table 1에서는 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 과 $La_2Ti_2O_7$ 각각에 대해 상온에서의 유전율 외에도 단일상이 얻어지는 하소온도, 전기기계결합계수, 이온밀도 및 입자배향도를 조성 및 제조방법 별로 측정한 데이터를 보여주고 있는데, 용융염합성을 사용함으로써 고상반응법에 비해 하소온도는 현저히 낮출 수 있음에 비해 압전특성이나 입자배향도 향상에는 도움을 주지 못함을 알 수 있다.

또한 Fig.6과 Fig.7은 각각 $1500^\circ C$ 에서 소결한 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 세라믹스에 대해 Nb 조성을 달리하면서, 주파수에 따른 유전율 및 저항을 나타낸 것이다. Fig.6에서 Nb의 조성이 커짐에 따라 유전율이 뚜렷이 증가하였으며, 조성에 관계없이 주파수가 커짐에 따라 유전율이 현저히 감소하였다. 또 Fig.7의 저항의 주파수 의존성에서도 유전율의 경우와 비슷한 경향을 나타내었다.

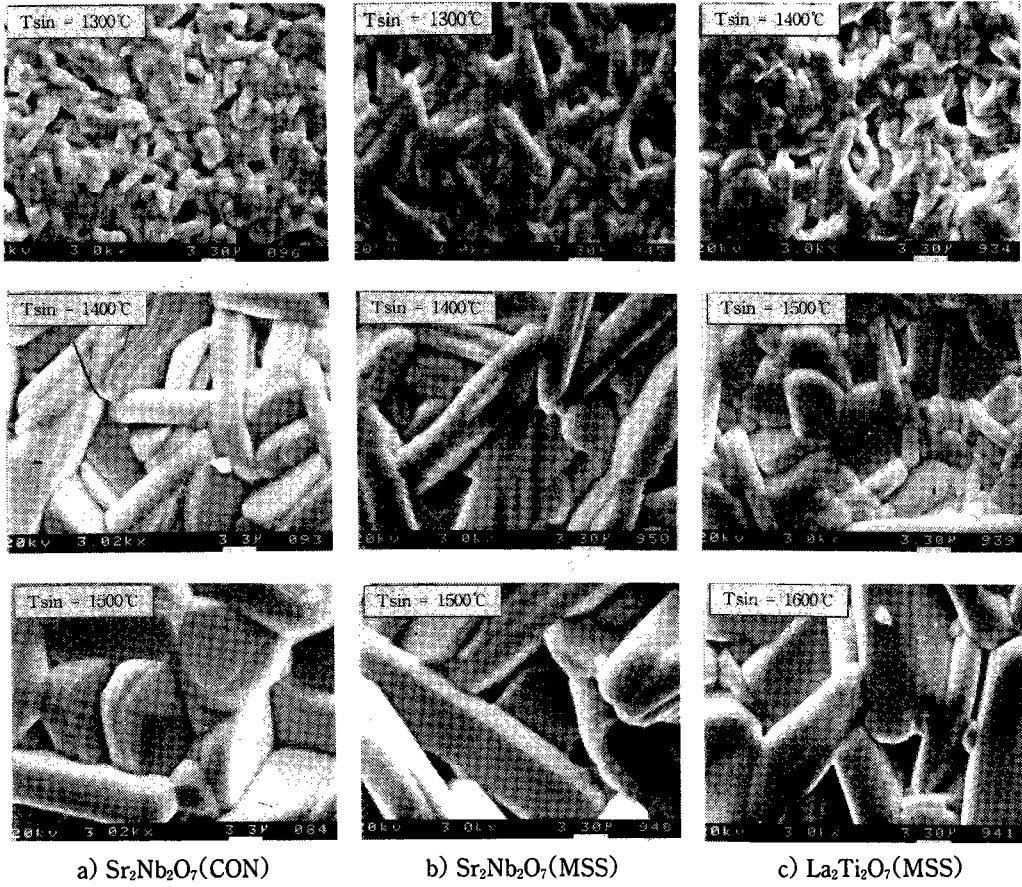


그림 5. 고상반응법과 용융염합성법으로 제조한 $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 와 $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 세라믹스의 전자주사현미경사진.

Fig. 5. SEM micrographs of sintered $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ and $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ceramic prepared by the conventional method and the molten salt synthesis method.

표 1. 고상반응법과 용융염합성법에 의해 1500°C에서 소결한 $\text{Sr}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_7$ 및 $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 세라믹스의 특성.
Table 1. Characteristics for $\text{Sr}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_7$ and $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ceramics sintered at 1500°C by the onventional method and the molten salt method.

Sample	$\text{Sr}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_7$				$\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$	
	CON			MSS	CON	MSS
Composition	x = 0.0 $\text{Sr}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$	x = 0.6	x = 1.0 $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$	x = 1.0 $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$	$\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$	$\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$
Cal.Temp.(°C)	1000	950	900	750	1000	900
Dielectric Const. ϵ_r	76	60	59	70	52	55
Electromechanical Coupling Factor k_{33}			0.26	0.24	0.21	0.20
Theoretical Density	87.6	93.7	94.2	94.0	93.8	95.1
Grain Orientation	0.01	0.02	0.34	0.31	0.27	0.25

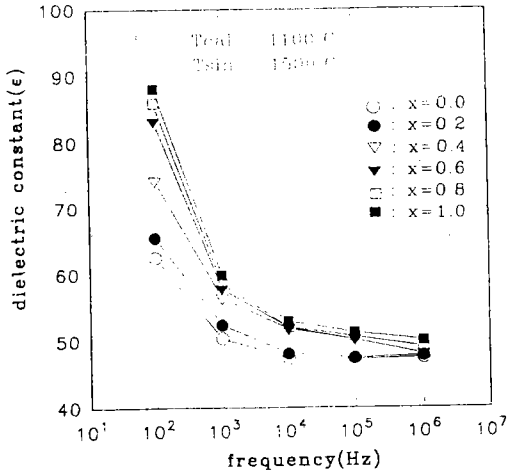


그림 6. 고상반응법으로 제조한 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 세라믹스의 유전율의 주파수 의존성.

Fig. 6. Frequency dependence of dielectric constant for $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ ceramics prepared by the conventional method.

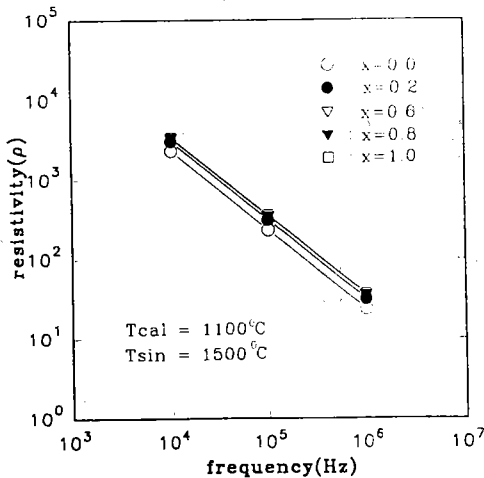


그림 7. 고상반응법으로 제조한 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 세라믹스의 저항의 주파수 의존성.

Fig. 7. Frequency dependence of resistivity for $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ ceramics prepared by the conventional method.

IV. 결 론

높은 큐리온도 때문에 고온센서용으로 사용할 수 있

는 다결정 $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 및 $La_2Ti_2O_7$ 세라믹스를 고상반응법과 용융염합성법으로 제조하고 조성과 제조 방법에 따른 분말특성, 소결특성 및 유전특성을 조사한 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 용융염합성법을 사용함으로써 고상반응법에 의한 것보다 $Sr_2Nb_2O_7$ 경우 150°C, $La_2Ti_2O_7$ 의 경우 100°C 낮은 하소온도에서 단일상의 하소분말을 합성할 수 있었다.

2. $Sr_2(Ta_{1-x}Nb_x)_2O_7$ 소결체에서 Nb의 조성값이 클수록 입자배향도가 커지고 입성장도 빨라지며 소결성 및 고온에서의 유전특성이 좋아졌다.

3. 용융염합성법으로 $A_2B_2O_7$ 세라믹스를 제조함으로써 고상반응법에 비해 소결온도는 현저히 낮출 수 있고 비유전율도 다소 향상시킬 수 있으나 압전특성이나 입자배향도는 향상되지 않았다.

4. $Sr_2Nb_2O_7$ 및 $La_2Ti_2O_7$ 모두 1300°C 이상의 높은 큐리온도를 가졌을 뿐만 아니라 다결정으로도 유전 및 압전특성을 얻을 수 있어서 고온용 압전체 응용분야에 사용할 수 있으리라 전망된다.

감사의 글

본논문은 1995학년도 영남대학교 학술연구조성비에 의해 수행된 것으로 학교 당국에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] B. Jaffe, W. R. Cook and H. Jaffe, "Piezoelectric Ceramics", Academic Press, (1971).
- [2] S. Nanamatsu, M. Kimura, K. Doi and M. Takahashi, "Ferroelectric Properties of $Sr_2Nb_2O_7$ Single Crystal", J. Phys. Soc. Japan., 30, pp. 300 - 301, (1971).
- [3] S. Nanamatsu, M. Kimura, K. Doi, S. Matsushida and N. Yamada, "A New Ferroelectric $La_2Ti_2O_7$ ", Ferroelectrics, 8, pp.511-513, (1974)
- [4] S. Nanamatsu, M. Kimura, T. Kawamura and M. Takahashi, "Crystallographic and Dielectric Properties of Ferroelectric $A_2B_2O_7$ (A=Sr, B=Ta,Nb) Crystals and Their Solid Solution", J. Phys. Soc. Japan, 38(3), pp.817-824 (1975).

- [5] N. Yamamoto, K. Honjo, M. Kimura and T. Kawamura, "New Phase of $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ Found by Electron Microscope and Diffraction", J. Phys. Japan, 48(1), pp.185-191, (1980).
- [6] N. Ishizawa, F. Marumo, S. Iwai, M. Kimura, and T. Kawamura "Compound with Perovskite-Type Slabs. V.A High-Temperature Modification of $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ", Acta Crystallogr., B38, pp.368-372, (1982).
- [7] N. Ishizawa, F. Marumo and S. "Compounds with Perovskite-Type Slabs. IV., Ferroelectric Phase Transition in $\text{Sr}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_7$ ($x=0.12$) and $\text{Sr}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$ ", Acta Cryst., B37, pp.26-31, (1981).
- [8] A. V. Prasadarao, U. Selvaraj, S. Komarneni and A. S. Bhalla, "Sol-Gel Synthesis of Strontium Pyroniobate", J. Am. Ceram. Soc., 75, pp.2697-2701, (1992).
- [9] P. A. Fuierer and R. E. Newnham, " $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ Ceramics", J. Am. Ceram. Soc., 74(11), pp.2876-2881 (1991).
- [10] H. D. Nam, "Low Temperature Sintering and Dielectric Properties of $\text{Sr}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_7$ Ceramics by the Flux Method", J. Korea Institute of Electrical and Electronic Material Eng., 8(3), pp.158-164 (1995).
- [11] E. F. Lotgering, "Topotactical Reaction with Ferrimagnetic Oxides Having Hexagonal Crystal Structures - 1", Inorg. Nucl. Chem., 9, pp.113 - 123, (1959).

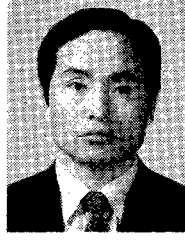
 著 者 紹 介


박인호

1952년생. 1975년 영남대학교 전자공학과 졸업. 1988년 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 1992년 동대학원 박사과정 수료. 현재 경북전문대학 전자과 조교수


김태규

1967년생. 1994년 경북산업대학교 전자과 졸업. 1996년 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업 (석사).


남효덕

1947년생. 1970년 경북대학교 사범대학 물리교육학과 졸업. 1972년 경북대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학석사). 1984년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학박사). 1984 ~ 85년 일본 방위대학교 방문교수. 1993년 ~ 94년 미국 Virginia Tech. 방문교수. 1979년 ~ 현재 영남대학교 전자공학과 교수.