

SrWO₄가 첨가된 (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃의 마이크로파 유전특성

허 훈 · 박찬식 · 김경용* · 변재동

고려대학교 재료공학과

*한국과학기술연구원 세라믹공정센터

(1998년 12월 24일 접수)

Microwave Dielectric Properties of (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ with SrWO₄ addition

Hoon Heo, Chan-Sik Park, Kyung-Young Kim* and Jae-Dong Byun

Department of Material Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

*Ceramics Processing Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

(Received December 24, 1998)

초 록

SrWO₄가 첨가된 (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃의 마이크로파 유전특성에 관하여 조사하였다. 관찰된 조성영역에서 Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃과 Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃은 (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ 고용체를 형성하고, SrWO₄의 첨가는 고용체의 소결성을 향상시켜 소결온도 1550°C에서 상대밀도 97% 이상을 얻었다. 소결한 시편의 EDS분석결과, SrWO₄의 첨가량이 많은 시편에서 2차상이 존재하는 것을 알 수 있었다. 순수한 Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃에 SrWO₄를 0.01 mole 첨가하여 1550~1600°C에서 소결한 시편의 유전특성은 $\epsilon_r \approx 30$, $Q \times f_0 \geq 55000$, $\tau_f \approx -23$ ppm/°C이었다. 0.01 mole SrWO₄가 첨가된 (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ 고용체의 유전율과 온도계수는 x에 따라 점차적으로 계속 증가하였고, $Q \times f_0$ 는 $x \leq 0.25$ 에서 x에 따라 감소하고 $x \geq 0.3$ 에서 다시 증가하였다. (Sr_{0.65}Ba_{0.35})(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+0.01SrWO₄의 조성을 갖는 시편에서 $\epsilon_r \approx 34.4$, $Q \times f_0 \geq 50000$, $\tau_f \approx 0$ ppm/°C이었다.

ABSTRACT

The microwave dielectric properties of (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ with SrWO₄ addition were investigated. It was found that Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ and Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ formed a solid solution in the composition range investigated. The addition of SrWO₄ enhanced the sinterability of (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ and sintered density higher than 96% theoretical value has been achieved in the sintering temperature range of 1550°C to 1600°C. X-ray spectrometry(EDS) analysis of the sintered specimens showed the presence of second phase which is considered to be SrWO₄. Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ ceramics with 0.01 mole of SrWO₄ showed $\epsilon_r \approx 30$, $Q \times f_0 \geq 55000$ and $\tau_f \approx -23$ ppm/°C. ϵ_r and τ_f of (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ with 0.01 mole SrWO₄ gradually increased with x and $Q \times f_0$ was found to decrease with x for $x \leq 0.25$ and increase with x for $x \geq 0.3$. The specimen with the composition of (Sr_{0.65}Ba_{0.35})(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+0.01SrWO₄ showed $\epsilon_r \approx 34.4$, $Q \times f_0 \geq 50000$ and $\tau_f \approx 0$ ppm/°C.

Key words : Microwave dielectric properties, ϵ_r , $Q \times f_0$, τ_f Solid solution

1. 서 론

마이크로파 유전체 재료를 X-band대역에서 공진기로 응용하기 위해서는 유전율이 30 이상, $Q \times f_0$ 값이 40000이상이고 공진주파수의 온도계수가 ± 10 ppm/°C이어야 한다. 지금까지 개발되어 X-band 영역에서 상용화된 재료는 BaTi₄O₉,¹⁾ (Zr,Sn)TiO₄²⁾등이 있으나 최근 통신부품의 디지털 화가 추진됨에 따라 더 높은 Q값

을 갖는 재료가 필요하게 되었다.

A(B'B'')O₃로 표현되는 복합페로브스카이트 재료는 저손실을 갖는다는 특징 때문에 그동안 마이크로파 유전체 재료로 많이 연구되어 왔다.^{3,4)} 이 중에서 Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O₃와 Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃는 고주파 유전체 공진기로서 특히 많이 연구되어 높은 Q값을 얻을 수 있었다.^{3,4)} 그러나 X-band 대역에서 Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃는 상대적으로 낮은 유전율과 비용문제로, 한편 Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O₃는

유전을 30정도이나 Zn회발과 관련되는 특성의 불안정성과 수분흡수율등의 문제로 인하여 실제 응용상에는 제약이 많다.

$\text{Sr}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (이하 SMN)은 유전을 33, $Q \times f_0$ 23000, 온도계수 $-14 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 의 특성을 갖는 재료로 알려져 있다.⁶⁾ 그러나 1650°C까지도 소결이 되지 않는 난소결성과 낮은 Q값을 갖는 이유로 Ba-based 재료에 비해 그리 많은 연구가 이루어지지 않고 있다. 따라서 SMN의 소결성을 향상시키고 Q값을 증가시킬수 있다면 X-band영역에서 유전을 30대의 재료로 활용할 수 있을 것이다.

본 연구는 SMN의 소결성을 향상시켜 Q값을 개선하고, SMN의 온도계수를 $\pm 10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 이내로 조절하여 1.4~2.5 GHz대역에서 사용되는 PCS 기지국용 공진기를 개발하는 것이 목적이다. 따라서 SMN의 소결성을 향상시키기 위하여 첨가물로 용융온도가 1534°C인 SrWO_4 (이하 SW)를 선택하였고, 또한 공진주파수의 온도계수를 개선하기 위하여 Sr을 Ba으로 치환하였으며, sw의 첨가량과 Ba의 치환에 따른 유전특성의 변화를 고찰하였다.

2. 실험방법

실험에 사용한 시료는 고순도화학연구소의 순도 99.9%인 SrCO_3 , BaCO_3 , MgO , Nb_2O_5 , WO_3 이었다. SMN과 sw, BMN을 조성에 맞게 평량하여 폴리에틸렌통에서 지르코니아 불과 에탄올을 사용하여 각각 18시간동안 습식 혼합한 후 SMN은 1300°C, sw는 700°C, BMN은 1200°C에서 4시간동안 하소하였다. 각각 하소한 시료는 SMN+xsw 및 $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3+0.01\text{sw}$ 에 따라 x를 SMN+xsw의 경우에는 0에서 0.04까지, $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3+0.01\text{sw}$ 의 경우에는 0에서 0.5까지 변화시켜 평량하여 전과 동일한 방법으로 혼합 및 분쇄한 후 5 wt% PVA 결합제를 중량비로 8% 넣어 건조하였다. 건조한 시료는 granule로 만들어 내경 15 mm의 원주형 금속 몰드를 사용하여 $1 \text{ ton}/\text{cm}^3$ 의 압력으로 성형하였다. 성형한 시편의 PVA 결합제를 650°C에서 1시간 열처리하여 제거하고, 1550~1650°C 범위에서 3시간 대기중에서 소결하였다.

소결체의 상변화를 관찰하기 위하여 Philips 사의 PW 1710 Diffractometer를 이용하여 Cu-K_α radiation으로 회절각(2θ) 10~70° 범위에서 X-선 회절특성을 조사하였고, 시편의 결보기 밀도는 Archimedes법(ASM STD (373-72))으로 측정하였다. 시편의 미세구조 관찰은 1450°C에서 15분 열부식을 시킨 후 SEM을 이용하여 관찰하였으며, 미세구조내의 상의 확인은 Jeol JXA-8600

EPMA system에 의한 Mapping Image와 WDS 정량분석을 이용하였다. 한편, 유전율과 Q값은 Hakki-Colemann법을 사용하여 Network Analyzer(HP8510A)로 측정하였고,⁷⁾ 공진주파수의 온도계수는 상온과 65°C에서의 공진주파수를 측정하여 구하였다.

3. 결과 및 고찰

$(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 의 수축율은 $x \leq 0.5$ 범위에서 소결온도가 1650°C까지도 8% 이내로 소결성이 나쁘다. 이는 SMN의 소결성이 워낙 나쁘기 때문에 $x=0.5$ 인 조성에서도 소결이 안된다고 생각된다. 따라서 $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 의 유전특성을 고찰하기에 앞서 먼저 용융온도가 1534°C인 sw를 SMN에 첨가하여 이에따른 SMN의 소결성과 유전특성을 고찰하였다.

Fig. 1은 1600°C에서 소결한 SMN+xsw 시편의 X-선 회절분석 결과이다. 이 회절무늬는 B자리가 1:2로 규칙화된 hexagonal perovskite 구조⁸⁾에 해당한다. 한편 시편의 sw 함량이 증가함에 따라 tetragonal 구조를 갖는 sw의 회절 peak가 나타나는 것을 볼 수 있다.

2차상을 확인하기위하여 EPMA분석을 하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 (a)는 sw를 0.04 mole 첨가하여 1600°C에서 3시간 소결한 시편의 Back Scattered Image이고, (b)는 (a)와 동일한 영역에서 W 이온에 대한 Mapping Image를 나타낸 것이다. sw가 첨가된 SMN 시편에서 2차상이 관찰되었으며, W이온은 대부분

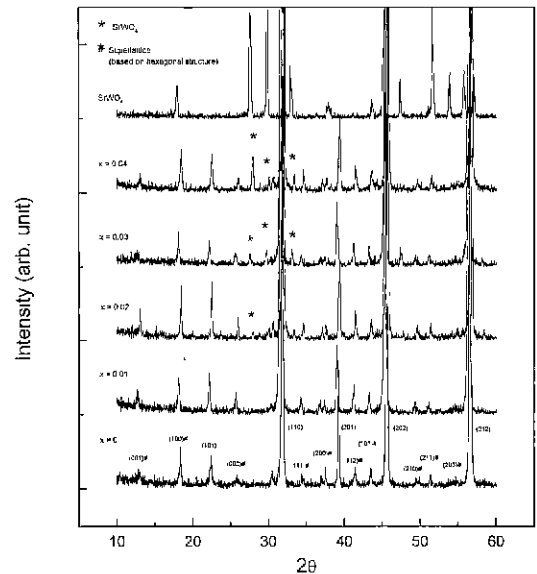


Fig. 1. XRD patterns of $\text{Sr}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3+x\text{SrWO}_4$ sintered at 1600°C for 3 h.

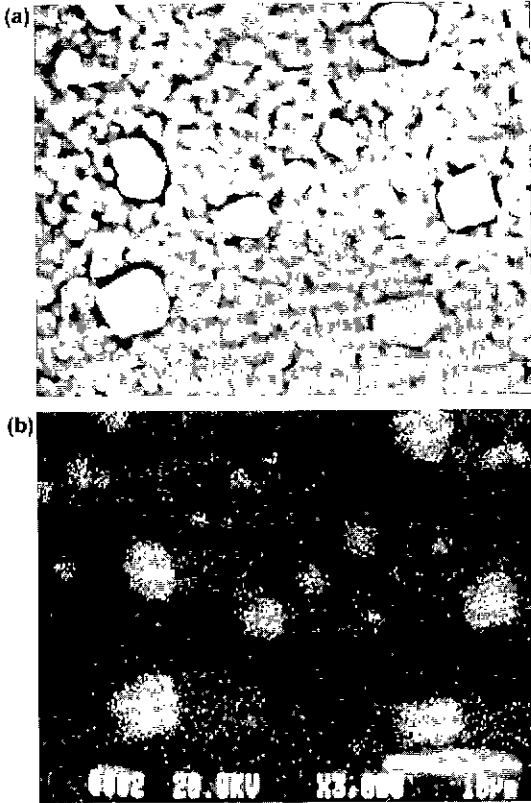


Fig. 2. (a) Backscattered image of Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+0.04SrWO₄ sintered at 1600°C for 3 h and (b) compositional mapping image of the same area as Fig. 2 (a) showing the distribution of tungsten ions.

Table 1. WDS Analysis of Matrix and Second Phase in Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+0.04SrWO₄ Sintered at 1600°C for 3 hrs

Element	Matrix	Second phases
	atom. %	atom. %
Mg	13.127	0.303
Nb	34.874	0.652
Sr	50.741	51.447
W	1.258	47.598

이 2차상에 함유되어 있음을 확인하였다. 2차상의 성분을 확인하기 위하여 WDS분석을 하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. 이 결과로부터 2차상은 sw임을 확인할 수 있었다. 이상의 결과로부터 SMN에 sw를 첨가하면 sw는 SMN matrix에 2차상으로 존재함을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 여러온도에서 3시간동안 소결한 sw의 첨가

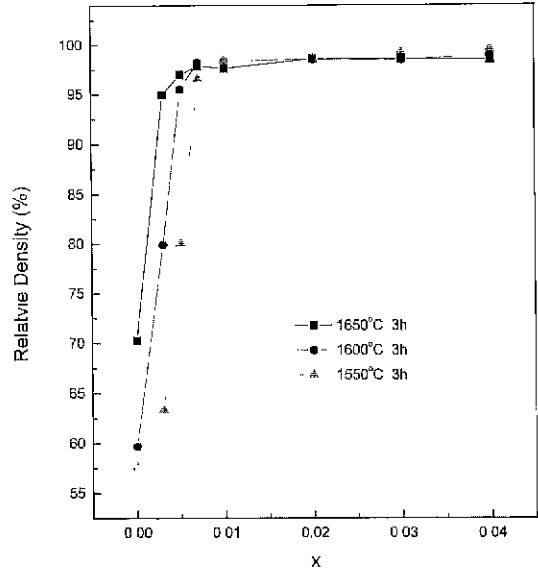


Fig. 3. Relative density of Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+xSrWO₄ sintered at various temperatures for 3h.

량에 따른 SMN의 겔보기 밀도를 나타낸 것이다. 순수한 SMN은 소결성이 매우 좋지 않아서 1650°C에서도 소결되지 않았다. 그러나 sw가 첨가됨에 따라 소결성이 크게 향상되었으며, x≥0.01에서는 1550°C에서도 상대 밀도가 97% 이상인 소결체를 얻을 수 있었다.

Fig. 4는 sw의 첨가량에 따른 SMN의 유전율 변화를

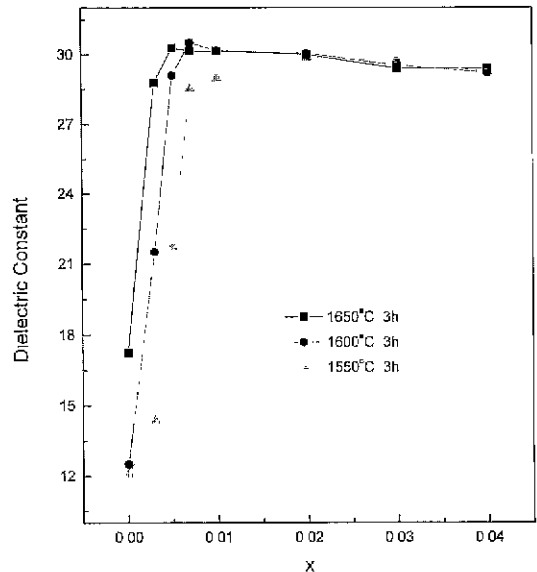


Fig. 4. Dielectric constant of Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+xSrWO₄ sintered at various temperatures for 3h.

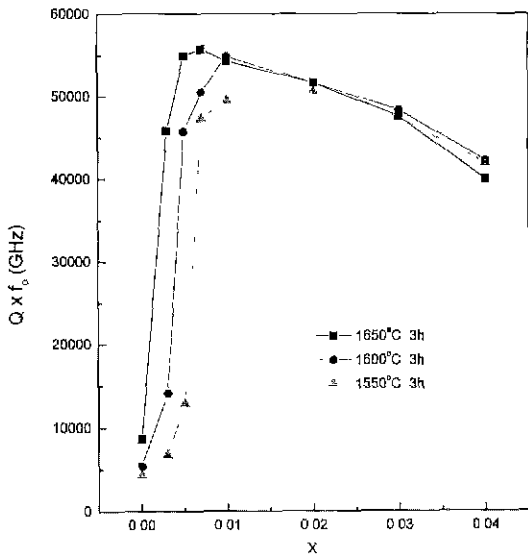


Fig. 5. $Q \times f_0$ of $\text{Sr}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + x\text{SrWO}_4$ sintered at various temperatures for 3h.

나타낸 것이다. 순수한 SMN은 전술하였던 것처럼 1650°C까지도 충분한 소결이 이루어지지 않아 유전율이 18이하로 매우 낮으나 sw가 첨가됨에 의해 유전율이 30까지 증가하며 sw의 첨가량이 0.01 mole 이상에서는 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 SMN에 유전율(7.4)이 작은 sw가 2차상으로 존재하여 유전율을 감소시키는 것으로 생각된다.

Fig. 5는 sw의 첨가량에 따른 SMN의 $Q \times f_0$ 값을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 SMN에 45136의 $Q \times f_0$ 값을 갖는 sw(상대밀도 93%일때)를 첨가하여 $Q \times f_0$ 값을 향상시킬수 있었으며 sw의 첨가량이 0.005~0.01몰일 때 55000정도의 $Q \times f_0$ 값을 얻을 수 있었다. 그러나 sw의 첨가량이 0.01몰 이상에서는 $Q \times f_0$ 값이 감소하였다. 이는 sw의 첨가량이 증가함에 따라 2차상이 증가하여 유전손실의 원인이 되는 계면이 증가하기 때문으로 생각된다.

Fig. 6은 sw의 첨가량에 따른 공진주파수의 온도계수를 나타낸 것이다. 본실험결과 순수한 SMN은 소결이 충분히 이루어지지 않은 조건에서 온도계수가 -8 ppm/°C이었으며, sw가 첨가되어 충분히 소결된 SMN의 온도계수는 -20 ppm/°C이었다.

이상의 결과로부터 기존에 보고된 특성보다 Q값이 개선된 SMN+sw계의 마이크로파 유전체 재료를 제조할 수 있었으나 실제 응용을 위해서는 공진주파수의 온도계수를 ± 10 ppm/°C 이내로 조절할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 SMN에 sw의 첨가량을 0.01 mole로 고정하고 Ba를 치환하여 유전특성을 개선할 수 있었

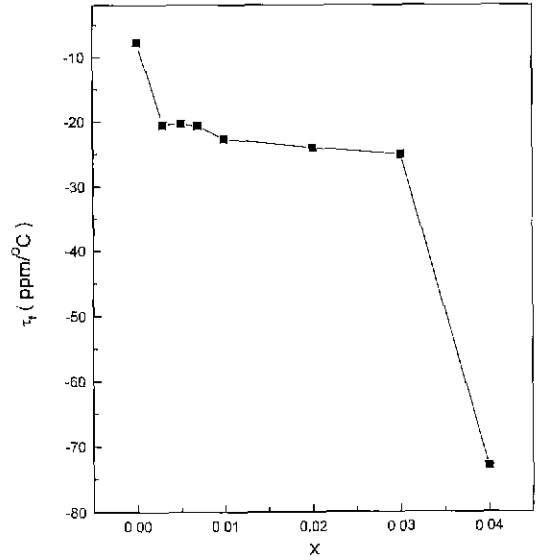


Fig. 6. The temperature coefficient of resonant frequency(τ_f) of $\text{Sr}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + x\text{SrWO}_4$ sintered at 1650°C for 3h.

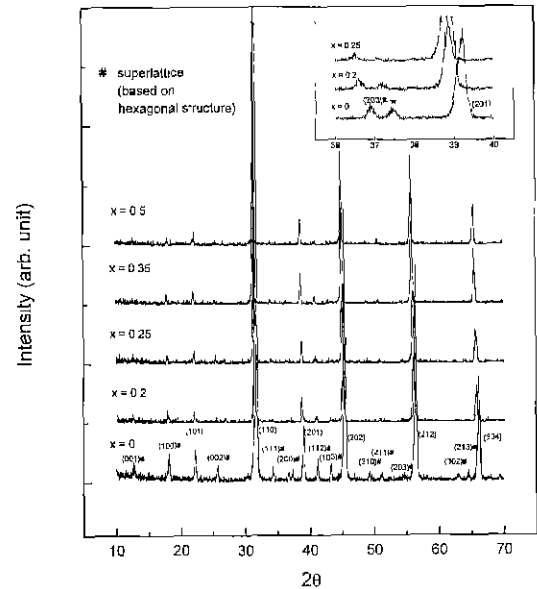


Fig. 7. XRD patterns of $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + 0.01 \text{SrWO}_4$ sintered at 1650°C for 3h.

며 Ba가 치환된 SMN의 실험결과는 다음과 같다.

Fig. 7은 1650°C에서 소결한 $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + 0.01\text{sw}$ 시편의 X-선 회절무늬이다. BMN과 SMN은 조사한 조성영역에서 고용체를 이루고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 Ba의 치환량이 증가함에 따라 단위晶의 크기가 커지는 것을 알 수 있다. 그림에서 면치수

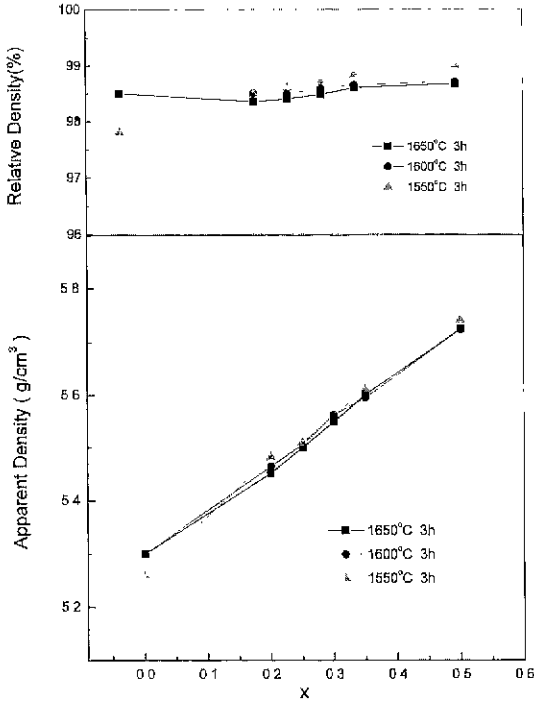


Fig. 8. Relative density and apparent density of (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+0.01SrWO₄ sintered at various temperatures for 3h.

는 BMN의 구조에 근거하여 표시하였으며 37° 근처에서 BMN에서는 볼 수 없는 회절피크(삽입된 그림에서 *로 표시)가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 회절피크는 산소팔면체 비틀림에 의한 peak이며⁶⁾ 이 피크의 강도는 Ba의 치환량이 증가함에 따라 감소하여 Ba의 치환량이 25%에서는 사라진 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 결정구조가 a=5.638, c=6.920이며 산소팔면체가 비틀린 구조를 갖는 SMN에서 Ba가 치환됨에 따라 a=5.776, c=7.089이며 untilted 구조를 갖는 BMN구조로 변화되는 것을 의미한다.^{6,8)}

Fig. 8은 Ba의 치환에 따른 상대밀도와 겉보기 밀도의 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 상대밀도 97%이상의 치밀한 소결체를 얻을 수 있었다. 그리고 겉보기밀도는 Ba의 치환량이 증가함에 따라 증가하였으며 이는 원자량이 큰 Ba이온이 원자량이 작은 Sr이온을 치환하여 나타나는 결과로 간주할 수 있다. 즉 Ba가 치환됨에 따라 이론밀도 5.378 g/cm³인 SMN에서 이론밀도가 6.211 g/cm³인 BMN쪽으로 변화되어 밀도가 증가하게 된다.^{6,9)}

Fig. 9는 1650°C에서 3시간 소결한 (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+0.01SrWO₄ 시편의 미세구조이다. 전반적으로 충분히 소결된 미세구조를 보여주고 있으며, 결정입자

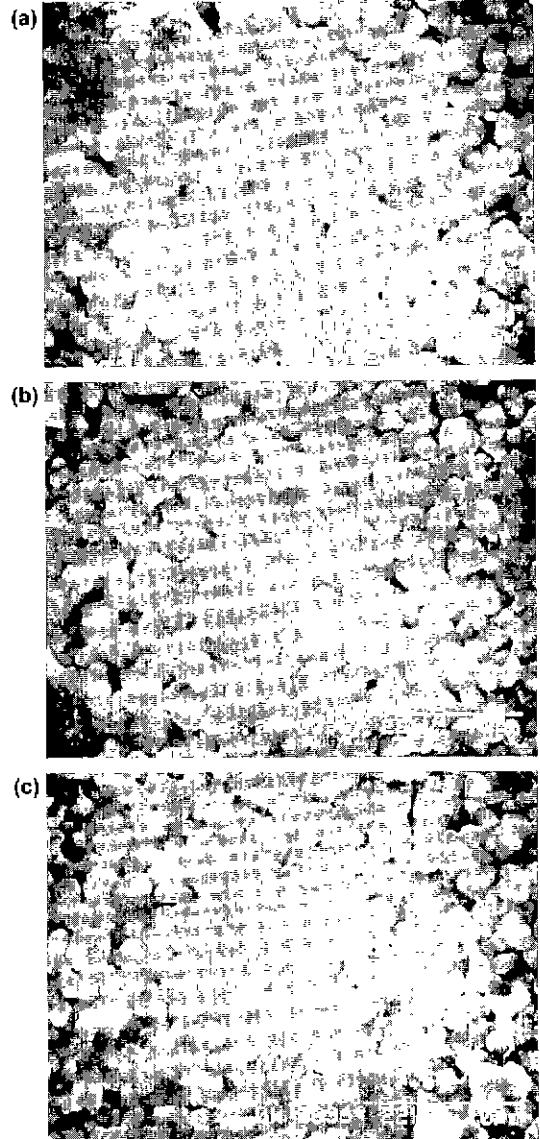


Fig. 9. SEM photographs of (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+0.01SrWO₄ sintered at 1650°C for 3h (a) x=0.2, (b) x=0.35 and (c) x=0.5

의 크기는 1에서 1.3 μm 정도로 균일하였으며 Ba양에 따른 변화는 없었다.

Fig. 10은 여러 온도에서 3시간 소결한 (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+0.01SrWO₄ 시편의 조성에 따른 유전율의 변화를 나타낸 것이다. SMN에 Ba가 치환됨에 따라 유전율이 증가하여 Ba가 50% 치환된 시편에서는 유전율이 35 이상이었다. A(B'B'')O₃계 복합페로브스카이트 물질에서 A자리 치환에 따른 유전율의 변화는 고용체형에서 높은 유전율을 갖는데 아직 이에 대한 정확한 원인은 밝혀지지

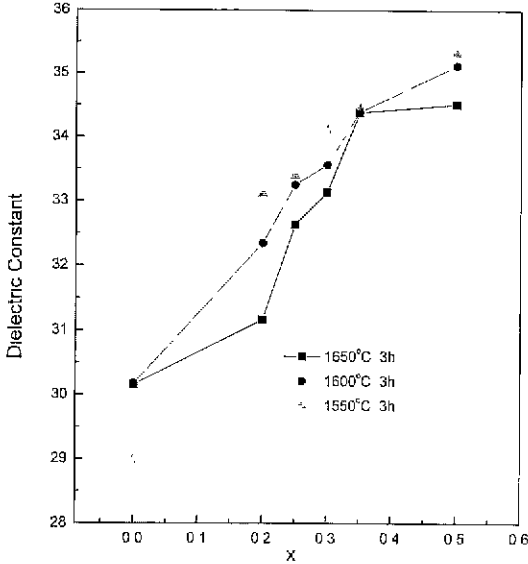


Fig. 10. Dielectric constant of $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + 0.01\text{SrWO}_4$ sintered at various temperatures for 3h.

않았으나 A양이온과 산소이온간의 상호작용과 관련이 있는 것으로 생각된다. A양이온과 산소 음이온은 공유결합성과 이온결합성을 함께 나타내고 있으며 Sr의 전기음성도는 0.95이고, Ba의 전기음성도는 0.89로 Ba가 Sr을 치환함에 의해 이온결합성이 증가하게 된다. 이러한 결과는 SMN에서 나타나는 산소 팔면체 비틀림을 감소시키는 원인이 된다.¹⁰⁾ 따라서 SMN에 Ba가 치환되면 결정구조는 낮은 대칭성을 갖는 구조에서 높은 대칭성을 갖는 구조로 변화할 것이며 이러한 변화는 이온의 이동과 이웃한 팔면체끼리의 상호작용을 용이하게 할 것이며 이로 인하여 유전율이 증가하는 것으로 생각된다. 또한 Sr을 이온반경이 큰 Ba가 치환하면 c/a비가 증가하게 되며 이러한 변화도 유전율의 증가를 가져오는 요인으로 생각할 수 있다.⁹⁾

Fig. 11은 1650°C에서 3시간 소결한 $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + 0.01\text{SrWO}_4$ 시편의 조성에 따른 공진주파수의 온도계수의 변화를 측정된 결과이다. x=0에서 온도계수는 -23 ppm/°C이며 Ba 양이 증가함에 따라 온도계수는 증가하는 것을 알 수 있으며 x가 0.35에서 0 ppm/°C였다. Reaney¹¹⁾ 등에 의하면 Ba-, Sr-계 복합페로브스카이트 구조를 갖는 재료의 유전율의 온도의존성은 산소팔면체의 비틀림과 관련이 있다. SMN에 Ba가 치환되면 antiphase tilting 구조를 갖는 SMN에서 un-tilted 된 구조를 갖는 BMN으로 구조적 변화가 발생한다.⁹⁾ 이는 Ba가 치환됨에 따라 산소팔면체의 비틀림이

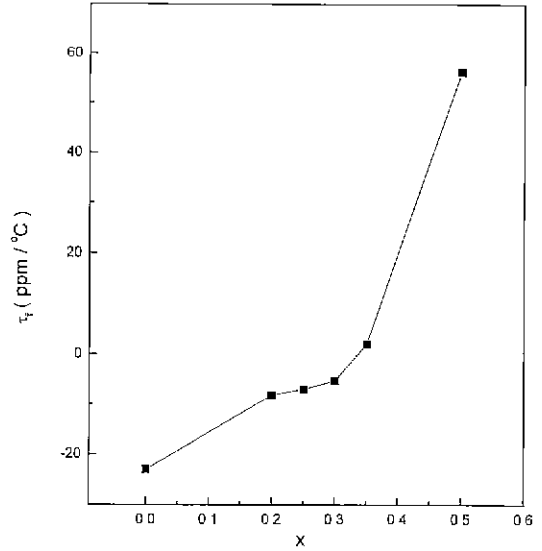


Fig. 11. The temperature coefficient of resonant frequency (τ_r) of $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + 0.01\text{SrWO}_4$ sintered at 1650°C for 3h.

감소하는 것을 의미하고 이러한 구조적인 변화가 공진주파수의 온도계수를 양의 값으로 변화시키는 것으로 생각된다.

Fig. 12는 여러온도에서 소결한 $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + 0.01\text{SrWO}_4$ 시편의 조성에 따른 $Q \times f_0$ 값의 변화이다. x=0에서의 $Q \times f_0$ 값은 55000이였으며 $x \leq 0.25$ 까지는 x에 따라 다소 감소하였으며 x=0.3부터 증가하여 0.5

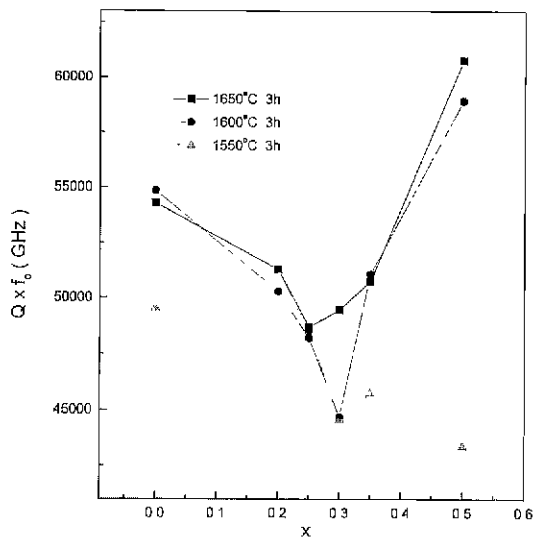


Fig. 12. $Q \times f_0$ of $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + 0.01\text{SrWO}_4$ sintered at various temperatures for 3h.

에서는 60000이었다. 이는 A(B'B'')O₃계 복합페로브스카이트의 Q와 결정구조와의 밀접한 관련에 기인하는 것으로 생각된다. 고용체형에서 Q값의 감소는 치환하는 이온과의 반경차이가 크기 때문에 나타나는 것으로 생각되며 이러한 결과는 La(Mg_{2/3}Ta_{1/3})O₃-Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃¹²⁾와 Ca(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃과 같은 고용체에서 나타난다. 그러나 (Sr_{1-x}Ba_x)(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ 고용체에서는 Sr과 Ba의 이온반경차이가 La(Mg_{2/3}Ta_{1/3})O₃-Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃, Ca(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃의 경우보다 작다. 따라서 Q값의 감소는 이들 경우보다 작게 나타나는 것으로 생각된다.

4. 결 론

SMN에 sw를 첨가하고, Ba를 치환하여 이에따른 마이크로파 유전특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃에 SrWO₄가 첨가될 경우 sw는 2차상으로 존재하며, SMN의 소결성을 증가시키고 이에 따라 Q값이 증가하여 SrWO₄가 0.01 mole 첨가된 Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃의 유전율은 30, 공진주파수의 온도계수는 -23 ppm/°C이고 Q×f₀값은 55000이었다.

2. SrWO₄가 0.01 mole 첨가된 Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃과 Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃은 고용체를 형성하였으며 고용체의 유전특성은 Ba양이 증가함에 따라 유전율은 증가하였으며, 온도계수는 음에서 양의 값으로 변하였다.

3. (Sr_{0.95}Ba_{0.05})(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃+0.01SrWO₄의 조성을 갖는 시편에서 ε_r≈34.4, Q×f₀≥50000, τ_f≈0 ppm/°C이었다.

REFERENCES

1. S. Nishigaki, S. Yono and H. Kato, "BaO-TiO₂-WO₃ Microwave Ceramics and Crystalline BaWO₄," *J. Am. Ceram. Soc.*, **71**(1), c-11-17 (1988).
2. R. Christoffersen, P. K. Davies and X. Wei, "Effect of Sn Substitution on Cation Ordering in (Zr_{1-x}Sn_x)TiO₄ Microwave Dielectric Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**(6), 1441-1450 (1994)
3. S. B. Desu and H. M. O'bryan, "Microwave Loss Quality of Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O₃ Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **68**(10) 546-551 (1985).
4. H. J. Youn, K. Y. Kim and H. Kim, "Microstructural Characteristics of Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ Ceramics and Its Related Microwave Dielectric Properties," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**(7), 3947-3953 (1996).
5. C. S. Park, S. Nahm, Y. S. Kim, H. J. Lee, M. H. Kim and J. D. Byun, "Effect of WO₃ on the Microstructure and Microwave Characteristics of Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃ Ceramics," *J. Kor. Phys. Soc.*, **32**, S340-342 (1998).
6. S. Nomura, "Ceramics for Microwave Dielectric Resonator," *Ferroelectrics*, **49**, 61-70 (1983).
7. B. W. Hakki and P.D. Coleman, "A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Capacities in the Millimeter Range," *IRE Trans. Microwave Theory Tech*, **MTT-8**, 402 (1960)
8. T. Nagai, M. Sugiyama, M. Sando and K. Nihara, "Structural Changes in Ba(Sr_{1/3}Ta_{2/3})O₃-Type Perovskite Compounds upon Tilting of Oxygen Octahedra," *Jpn. J. Phys.*, **36**(3A), 1146-1153 (1997).
9. K. H. Yoon, B. J. Jung and E. S. Kim, "Dielectric Properties of Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ Solid Solution," *J. Mater. Sci. Lett.*, **8**, (1989).
10. P. M. Woodward, "Octahedral Tilting in Perovskites. II. Structure Stabilizing Forces," *Acta Cryst.*, **B53**, 44-66 (1997).
11. I. M. Reaney, E. L. Colla and N. Setter, "Dielectric and Structural Characteristics of Ba- and Sr-based Complex Perovskites as a function of Tolerance Factor," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**(10), 3984-3990 (1994).
12. 윤혁준, "(1-x)Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃-xLa(Mg_{2/3}Ta_{1/3})O₃ 고용체에서의 MPB(Morphotropic phase boundary)와 마이크로파 유전특성," 박사학위 논문, 서울대학교, 118-120 (1996).