

Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃ Ceramics의 구조와 전기적특성

논문
12-4-3

Structure and Electrical Properties of Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃ Ceramics

김부근*, 김재윤*, 김강언*, 정수태*, 조상희**

(Boo Keun Kim*, Jae Youn Kim*, Kang Eun Kim*, Su Tae Chung*, Sang Hee Cho**)

Abstract

The sintering characteristics and electrical properties of the dielectric resonator ceramic, Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃ were studied. Good ceramics were obtained by substitution of Sr in Ba [Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃ system. The hexagonally ordered superstructure was observed in all samples, the height of superstructure lines of the X-ray patterns increased with increasing Ta. The dc resistivities of samples were 10¹³ - 10¹⁴ Ωcm at room temperature, these values were nearly constant at 180(x=0) - 300 ℃(x=1). However, the resistivity of samples decreased rapidly above those temperature and their activation energy were from 1.75 to 2.07 eV. With the increasing of Ta, the relative dielectric constant was linearly decreased 32.2(x=0) to 25.9(x=1) and also the temperature coefficient of resonance frequency, τ_f was decreased 58.4(x=0) to 32.5(x=1) ppm/℃. The quality factor(Q×f) of sample was the highest at x=0.8 and its value was 81,674 GHz.

Key Words(중요용어) : Dielectric resonator(유전체공진기), Superstructure(초격자), Activation energy(활성화 에너지), Resonance frequency(공진주파수), Quality factor(품질계수)

1. 서 론

Ba(B'_{1/3}B''_{2/3})O₃의 구조를 갖는 페롭스카이트 상 화합물^{1, 2)}은 B site의 이온이 1:1이나 1:2의 정렬을 갖고 있으며, Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃[BMT]는 1:2의 정렬을 갖는 6방정계의 상유전체로 알려져 있다. 일반적으로 B site의 이온이 잘 배열된 Ba(B'_{1/3}B''_{2/3})O₃ 화합물은 마이크로파에서 유전률의 값이 주파수 및 온도의 변화에 비교적 안정하고, 유전손실이 적으므로 마이크로파의 유전체공진자로 개발되고 있다^{3, 4)}. 특히 품질계수(유전손실의 역수)가 높고, 공진주파수의 온도안정성이 매우 우수한 물질로 알려진 BMT는 최근 많은 연구자들이

관심을 갖고 있다⁵⁻⁷⁾.

그러나 BMT는 마이크로파 공진자로서 높은 품질계수를 갖고 있지만, 그의 조성 물질 중에 Ta₂O₅은 마이크로파 유전체공진자에 사용되는 다른 산화물에 비교하여 산화물의 가격이 비싸고, 또한 비슷한 결정구조를 갖는 다른 유전체공진자에 비하여 그 유전률도 조금 낮다. 그런데 Ta대신에 Nb가 치환된 Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ [BMN]^{8, 9)}은 BMT와 마찬가지로 B site의 이온이 1:2의 정렬을 갖는 6방정계의 상유전체이고, BMT보다 유전률이 조금 높다. 그래서 원소주기율표에서 Ta와 동일한 5A족이고, 비교적 물질의 가격이 싼 Nb를 Ta의 위치에 일부 치환시킨 시료의 소결특성과 그의 유전특성에 미치는 영향을 조사할 필요성이 있다. 한편 BMT 세라믹은 하소분말에 바람직하지 않은 결정상들이 포함되면 소결이 저하됨이 보고되었고¹⁰⁾, 본 저자도 시료의 소결상태가 제조공정에 의존됨을 확인하였다. 그래서 Ba의 위치에 이온반경이 적은 Sr을 일부 치환함으로써 소결성을 향상시킬 것으로 생각된다.

* : 부경대학교 전자공학과
(608-080 부산시 남구 용당동 산 100번지, 051-620-1508)

** : 경북대학교 무기재료공학과
1999년 1월 23일 접수, 1999년 3월 11일 심사완료

본 실험에서는 Ba 자리에 Sr을 0.2몰 치환한 (1-x)Ba_{0.8}Sr_{0.2}(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ [BSMN] - xBa_{0.8}Sr_{0.2}(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ [BSMT]계 세라믹스에서 Nb와 Ta 고용비(x의 변화량)에 대한 소결특성을 X선회절곡선과 미세구조 및 소결밀도로 비교 분석하였고, Sr을 치환하므로써 소결특성이 향상되었음을 논의하였다. 그리고 시료의 도전률-온도특성으로부터 물리적특성의 온도안정성을 규명하고, 마이크로파 영역에서 시료의 유전률, 품질계수 및 공진주파수의 온도계수를 조사하였다.

2. 실험

산화물 혼합방법으로 Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃계 세라믹스를 제조하였으며, x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0을 선택하였다. 사용된 시약은 BaCO₃, SrO, MgCO₃, Nb₂O₅ 및 Ta₂O₅이며, 순도가 모두 시약 특급인 것을 사용하였다. 조성에 맞게 칭량한 분말을 16시간 동안 습식혼합(용매 알코올)하고 건조한 후에 1250℃에서 2시간 열처리하였다. 다시 동일한 조건으로 습식혼합 후에 건조하였다. 이 분말에 결합제(10 % PVA 용액)를 분말 100 g당 4 cc의 비율로 섞고, 직경 약 0.2 mm의 스테인레스 망을 통과시켜 과립으로 만들었다. 이 과립상의 분말을 직경 10 mm의 스테인레스 성형기에 넣어서 약 1000 kg/cm²의 압력을 가하여 원통상의 시편을 만들었다. 이 성형된 시료를 1650℃에서 4시간 소결하였으며, 온도하강은 1000℃까지 100℃/h로 하고 그 이하의 온도에서는 로냉하였다. 얻어진 시료에 대하여 X선 회절분석으로 결정구조를 조사하였고, 전자현미경으로 파단면의 입자형태를 관찰하였다.

전기적특성은 소결시료를 두께 2 mm로 연마 후에 은전극을 도포하여 전기도전도를 측정하였다. 도전도 측정은 610C electrometer를 이용하여 전압강하법으로 하였다. 그리고 가열장치를 통하여 시료에 열을 가하였고, 100~500℃범위에서 온도를 5℃/min 비율로 변화시켰다. 온도에 따른 도전율은 Arrhenius 곡선으로 나타내었고, 다음 식으로부터 활성화에너지를 계산하였다. 여기서 σ는 주어진 온도에 있어서 도전도, σ₀는 T→∞일때 도전도, E_a는 활성화에너지, k는 Boltzmann 상수 및 T는 절대온도이다.

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/kT) \quad (1)$$

마이크로파 유전특성은 시편의 크기를 직경(D)에 대한 두께(L)의 비 L/D=0.45가 되도록 연마하여 두장의 은판사이에서 TE₀₁₁ 공진모드를 이용한 Hakki and Coleman의 방법¹¹⁾으로 측정하였다. 공진주파수 온도측정은 Cavity법으로서 측정시 열팽창계수를 고려하여 온도급을 한 시료를 이용하였다. 측정온도범위는 25℃~80℃이고, 식(2)를 이용하여 공진주파수의 온도계수를 계산하였다. 여기서 f₀ : 25℃에서의 공진주파수, df₀ : 25℃와 T℃ 사이의 공진주파수의 변화량, dT : 25℃와 T℃ 사이의 온도의 변화량이다.

$$\tau_f = \frac{1}{f_0} \frac{df_0}{dT} \times 10^6 \text{ [ppm/℃]} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 소결특성

A. Halliyal 등¹²⁾은 페롭스카이트결정의 안정성을 판단하는 데에 있어서 관용계수(tolerance factor)와 전기음성도(electronegativity difference : END)를 도입하였는데, 관용계수와 전기음성도가 클수록 페롭스카이트 구조가 안정됨을 설명하였다. 여기서 관용계수는 Goldschmidt에 의해서 제안된 것으로 페롭스카이트 결정구조의 안정성을 나타내며, 전기음성도는 Pauling에 의해서 제안된 것으로 이온결합성의 정도를 판정하는 기준에 이용된다. 그림 1은 Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃ [BSMNT]계 세라믹스의 기본조성으로 생각되는 BMT, BMN, SMT [Sr(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃] 및 SMN [Sr(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃]의 전기음성도와 관용계수를 나타낸 것이다. 그림에서 BMT와 BMN은 Ba위치에 Sr이 치환된 SMT와 SMN에 비하여 관용계수가 크므로 소결상태가 양호할 것으로 생각된다. 이와 같이 세라믹의 소결상태는 결정구조와 밀접한 관계가 있으므로, 본 절에는 시료에 대한 X선 회절분석, 미세구조의 관찰 및 소결밀도 등으로부터 소결특성을 논의하였다.

그림 2는 Nb/Ta의 치환량(x=0, 0.4, 1.0)에 따른 BSMNT시료의 X선 피커를 나타낸 것이다. Galasso와 Pyle¹³⁾은 A(B'_{1/3}B''_{2/3})O₃ 페롭스카이트 물질에 대한 B site 이온의 배열에 대하여 조사하였다. 그의 보고에 의하면 A(B'_{1/3}B''_{2/3})O₃ 페롭스카이트 물질에서 B site 이온 사이의 반경의 차가 클수록 B site 이온이 규칙적으로 배열되어지

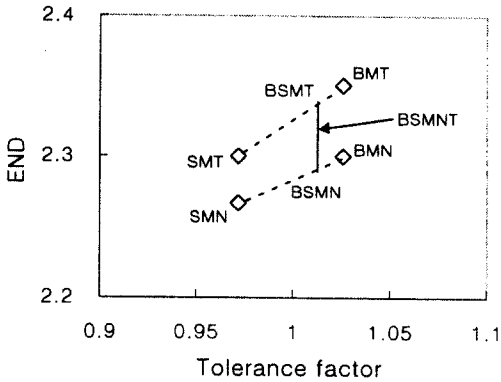


Fig. 1. Plot of electronegativity difference vs tolerance factor.

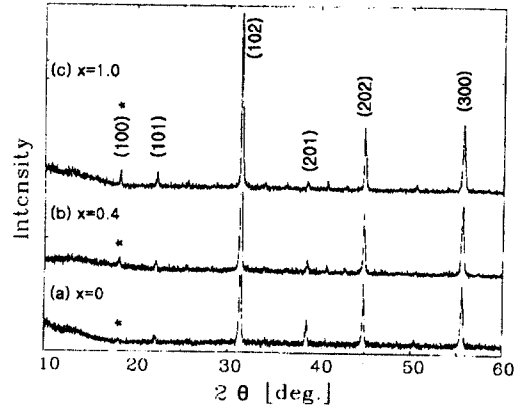


Fig. 2. X-ray diffraction patterns for $Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O_3$ ceramics ($x=0, 0.4, 1.0$).

고, 6방정계의 초격자구조를 갖는다. 초격자구조는 X선회절 피이크로 구분이 가능하므로, 소결시료의 X선 회절 분석에서 초격자가 나타나면 B site 이온이 규칙적으로 배열되었음을 의미한다. 그림 2에서 별표(*)로 표시된 것은 초격자 반사를 나타내며, 모든 시료에서 Nb나 Ta의 치환량에 관계없이 6방정계의 초격자를 나타내는 회절 피이크가 $2\theta = 17.5^\circ$ 범위에서 나타났다. 이 초격자는 B'와 B'' 이온들이 1:2로 배열된 trigonal 단위격자이다^{2,7)}. 그리고 Ta의 치환량이 증가함에 따라서 초격자의 피이크 강도가 점차로 증가함을 보였다. 단일 조성의 물질에서는 초격자피이크 강도의 증가는 B' 이온과 B'' 이온의 배열정도가 증가함을 의미하지만¹³⁾, 본 실험에서 시료의 조성이 BSMN-BSMT의 복합조성이므로 초격자피이크의 증가는 B site 이온의 배열상태가 나아졌다고 단정하기에는 무리다. 그러나 초격자피이크가 BSMN($x=0$)의 물질보다 BSMT($x=1$)의 물질에서 보다 크게 나타난 이유는 그림 1에서 BSMT가 BS-MN보다 전기음성도가 크기 때문에 결정격자의 배열상태가 향상되었기 때문이라 생각된다.

그림 3은 BSMN(a)와 BSMT(b)시료의 미세구조를 나타낸 것이고, 그림 4는 Ta의 치환량에 대한 입자의 크기를 나타낸 것이다. BSMN($x=0$)의 경우에는 평균입경이 약 $1.2 \mu m$ 이었고, Ta의 치환량이 증가함에 따라서 입경이 서서히 증가하다가 $x=0.8$ 이상에서 크게 증가하여 BSMT($x=1$)에서는 평균입경이 약 $3 \mu m$ 였다. 이러한 결과는 Sr이 치환되는 영향과 더불어 Nb/Ta의 비에 따른 전기음성도(그림 1참조)에서 Ta의 함유량이 많을

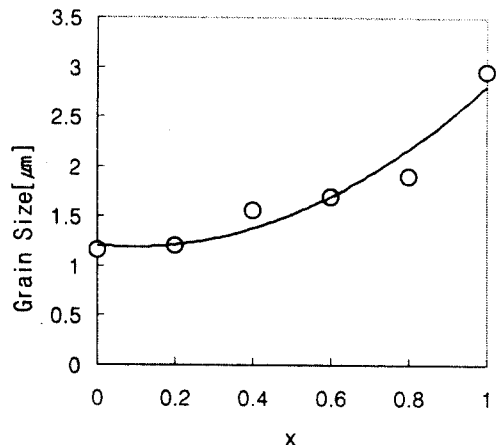


Fig. 4. Grain size for $Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O_3$ ceramics.

수록 전기음성도가 크기 때문에 열역학적으로 소결이 촉진되었다고 생각된다.

그림 5는 BMNT(BMN-BMT)계와 BSMNT(BSMN-BSMT)계의 소결밀도를 나타낸 것으로 2 종류의 문제점을 제시하고 있다. 첫째, BMN-BMT계와 BSMN-BSMT계에서 Ta의 치환량이 증가함에 따라서 시료의 소결밀도는 증가하였다. 이것은 BMN과 BMT의 결정구조와 격자상수는 비슷하지만(JCPDS카드에 의하면 BMT는 a=5.782Å, c=7.067Å이고, BMN은 a=5.77Å, c=7.08Å이다), Nb(원자량 92.91)의 위치에 원자량이 큰 Ta(원자량 180.9)가 치환되었기 때문이다.

둘째, BMNT계는 BSMNT계 보다 소결밀도가 저하함을 나타내었다. 본 실험에서 제작한 BMT의 소결밀도는 약 6.9 g/cm³을 나타내었으며, 이 값은 BMT 이론밀도⁷⁾(7.89 g/cm³)의 87% 밖에 되지 않았다. 이러한 이유는 Chen 등¹⁰⁾의 지적과 같이 소결온도가 높아도(1650℃ 이상) BMT의 하소분말에 바람직하지 않은 결정상(BMT의 결정구조가 아닌 물질)들이 포함되면 시료의 소결밀도가 저하된다고 생각한다. 그런데 동일한 실험방법으로 제작한 BSMNT계에서는 다음의 원인에도 불구하고 소결밀도가 증가하였다. 즉 원자량이 큰 Ba(원자량 137.3)의 위치에 원자량이 적은 Sr(원자량 87.62)을 치환하면 소결밀도가 감소하며, 그림 1에서 BSMNT의 관용계수와 전기음성도가 BMNT계 보다 낮기 때문에 소결상태가 저하될 것이다. 그러나 오히려 그 반대의 현상이 나타난 이

유는 무엇일까? 그림에서 Sr=0.2을 치환한 BSMT(x=1)는 BMT(소결밀도 6.9 g/cm³)와 동일한 제조공정임에도 소결밀도가 증가한 7.4 g/cm³을 나타내었다. 이 값은 BSMT의 이론밀도(추정 : 약 7.7 g/cm³)에 96% 이상이라고 생각된다. 이와 같이 Sr을 치환한 BSMNT에서 소결이 향상된 이유는 Chen¹⁰⁾이나 관용계수와는 다른 이유가 있다고 생각된다. 즉 Setter와 Cross¹⁴⁾ 등의 보고와 같이 원자반경이 큰 Ba(1.74Å) 대신에 원자반경이 적은 Sr(1.58Å)이 일부 치환되면, B site의 원자가 규칙적으로 배열되어 시료가 치밀한 구조를 갖게되기 때문이다. 이러한 결과는 그림 6의 X선 회절결과에서 나타낸 바와 같이 Sr을 Ba 위치에 일부 치환한 시료에서 6방정계의 초격자(* 표시)가 증가한 이유(B site의 원자배열이 증가)와도 일치한다.

3.2. 전기적특성

유전체 세라믹의 전기적특성 중에 가장 중요한 것은 전기적저항, ρ(도전도의 역수 1/σ)와 유전률, ε, 및 유전손실, tan δ이다. 식(3)은 이러한 관계식을 나타낸 것으로 ω = 2πf[rad/s], f는 주파수이고, ε₀는 진공의 유전율(8.855×10⁻¹² F/m)이다.

$$\sigma = 1/\rho = \omega \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \quad (3)$$

식(3)에서 유전손실은 실제 계산값과 측정값 사

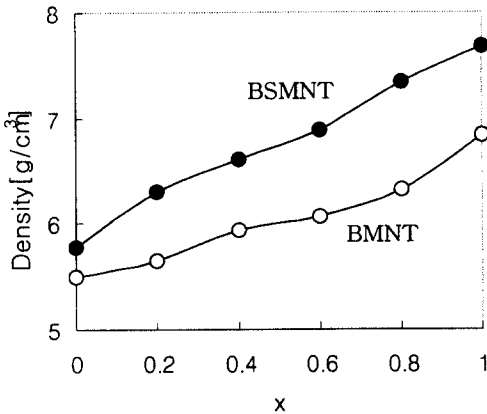


Fig. 5. Densities of Ba[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃ and Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃ ceramics.

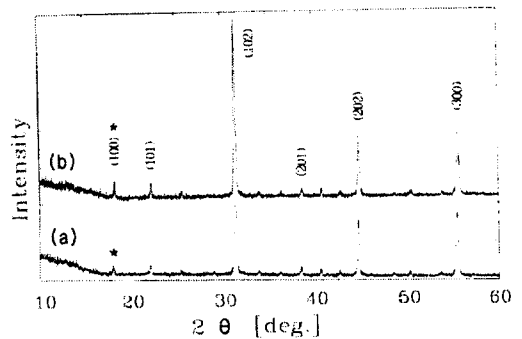


Fig. 6. X-ray diffraction patterns for (a) Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ and (b) Ba_{0.8}Sr_{0.2}(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃.

이에는 큰 차이가 있을 수 있다. 그리고 유전체의 특성상 전기도전도가 작아야 절연성이 향상되어 소자의 에너지손실이 감소하며, 유전률은 클수록 공진자의 부피가 작아진다. 그리고 유전손실이 적을수록 품질계수가 높아져서 마이크로파 신호의 감쇄량이 작아진다. 본 실험에서는 시료에 대한 전기적 저항의 온도의존성과 마이크로파 영역에서의 유전 특성을 논의하였다.

그림 7은 BSMNT시료(x=0, 0.6, 1.0)에 대하여 전기도전도의 온도특성(Arrhenius 곡선)을 나타낸 것이다. 본 실험의 모든 시료에 있어서 전기도전도의 역수인 비저항값은 실온 부근에서 약 $10^{13} \sim 10^{14} \Omega \text{cm}$ 를 나타내었으며, 이 값들은 세라믹 절연체의 비저항값과 버금가는 높은 값들이다¹⁵⁾. 실온에서의 도전도는 BSMN(x=0)의 경우에 약 180℃까지 거의 일정하였고, Ta의 치환량이 증가함에 따라서 임계점(도전도의 온도의존성이 나타나는 점)의 온도는 증가하였으며, BSMT시료(x=1)의 경우에는 약 300℃이었다. 그리고 임계점 이상의 온도영역에서 직선의 기울기로부터 구한(식1) 활성화에너지는 Nb/Ta의 치환량에 다소 차이는 있으나, 그 값은 약 1.75~2.07 eV를 나타내었다. 이 값들은 BaTiO₃¹⁶⁾(0.7~0.98 eV)나 Pb(Zr, Ti)O₃¹⁷⁾(0.7~1.4 eV)에 비하여 큰 값을 나타내었다. 활성화에너지가 크면 온도변화에 대한 캐리어의 운동상

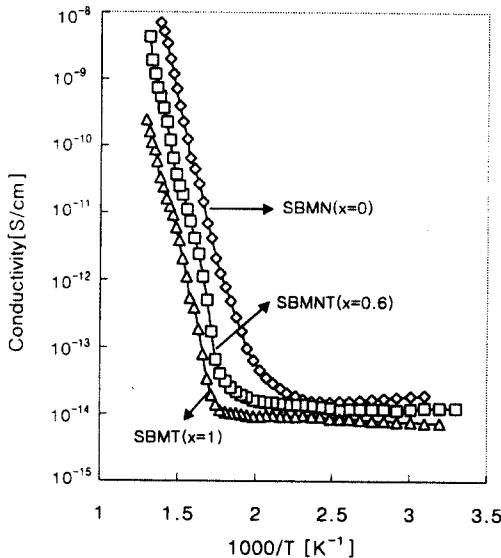


Fig. 7. Temperature dependence of the electrical conductivity of Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃ ceramics (x=0, 0.6, 1).

태가 큼을 의미하고 또한 열역학적으로 결정구조의 변화가 크다. 그러나 높은 온도에서 시료의 활성화에너지가 약 2 eV 정도의 다소 큰 값을 나타내었지만, 180~300℃의 임계점 이하에서 전기도전도의 변화가 매우 적기 때문에, 소자의 실제 사용되는 온도(상온에서 약 100℃ 범위)에서는 물리적성질의 온도의존성이 매우 적고 안정된 물질임을 알 수 있다.

시료의 유전특성은 약 10 GHz의 마이크로파에서 측정하였으며, 표 1은 BSMNT계 세라믹스에 대한 측정 자료이다.

그림 8은 Nb/Ta 조성에 따른 비유전률과 품질계수를 나타낸 것이다. 비유전률은 x가 증가함에 따라서 32.2에서 25.9로 거의 직선적으로 감소하였다. 즉 Nb와 Ta의 비율에 따라서 비유전률이 비례적으로 감소한 것으로 미루어 보아서 화합물이 조성에 따라서 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다.

Table 1. Measured dielectric properties of Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃ ceramics

x	f[GHz]	ε _r	Q	Q×f [GHz]	τ _r
0.0	9.315	32.2	6,735	62,736	+58.4
0.2	9.775	30.4	6,877	67,222	
0.4	9.695	29.1	7,449	72,218	+43.2
0.6	10.045	28.2	7,760	77,959	
0.8	10.235	27.8	7,976	81,634	
1.0	10.320	25.9	6,859	70,785	+32.5

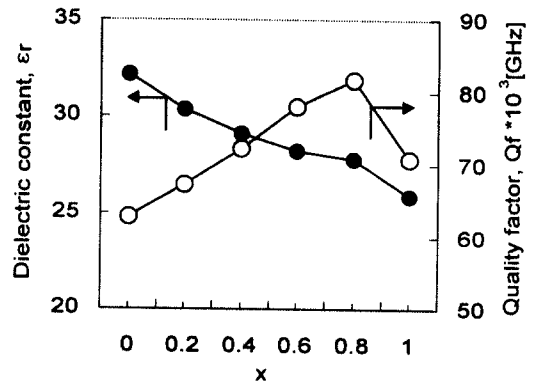


Fig. 8. Dielectric constant and quality factor of Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃ ceramics

지금까지 알려진 BMN, SMN, BMT 및 SMT 세라믹스의 마이크로파에서 유전특성은 표 2와 같다. 여기서 표2에 나타낸 값들은 제조공정에 따라서 그 차이가 크게 다를 수도 있다. 표에서 Ba 위치에서 Sr을 치환한 시료는 비유전률이 저하함을 나타내었으므로 BSMNT에서도 약간 저하할 것으로 예상되으나, 큰 영향은 없었다. 그리고 품질계수 역시 표 2에서 나타낸 개별화합물의 혼합비율에 의존성이 거의 없었으며 오히려 높은 값을 나타내었다. 본 실험에서는 x=0.8의 조성인 BSMNT가 가장 높은 품질계수를 나타내었고, Q×f는 81,634 GHz이었다. 한편 공진주파수의 온도계수는 표 2에서 BMT와 BMN은 양의 값을, 그리고 SMT와 SMN은 음의 값을 나타내었다. 특히 BMT는 그 값이 거의 영에 근접하므로 적은 량의 Sr 첨가에 의해서도 음의 값으로 쉽게 변화될 것으로 생각되어진다. 그러나 본 실험에서는 Ta의 량이 증가함에 따라서 공진주파수의 온도계수가 +58.4(x=0)에서 +32.5(x=1) ppm/°C로 감소하였으나, 조성에 관계없이 모든 시료가 양의 값을 나타내었다. Sugiyama 와 Nagai^{22, 23)}의 보고에 의하면 (Ba_{1-x}Sr_x)(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃계에서 x<0.6의 조성에 대한 공진주파수의 온도계수는 양의 값을 나타낸 반면에 x>0.6의 조성은 음의 값을 나타내었다. 본 논문에서는 x의 값이 0.2이므로 Sugiyama 와 Nagai의 결과와 동일하게 공진주파수의 온도계수가 양의 값을 가진다고 생각한다.

Table 2. Microwave dielectric resonator materials.

Material	ε _r	Q	τ _f	Ref.
BMT	25	4,500~20,000	+2	3,18
SMT	22	800	-50	19
BMN	33	3,900	21	20
SMN	30	6,200	-27	21

4. 결 론

본 실험에서는 Ba_{0.8}Sr_{0.2}[Mg_{1/3}(Nb_{1-x}Ta_x)_{2/3}]O₃계 세라믹스에서 Nb와 Ta의 고용비에 대한 소결특성과 전기적특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Nb/Ta의 조성에 관계없이 B site의 이온 배열을 의미하는 6방정계의 초격자피이커가 존

재하였으며, 그 크기는 Ta의 량이 증가함에 따라서 비례적으로 증가하였다. 그리고 시료의 입경도 Ta의 양이 증가함에 따라서 지수적으로 증가하였으며, BSMN시료의 입경이 1.2 μm 입에 비하여 BSMNT시료의 입경은 3 μm 이며 약 2.5배 증가하였다.

2. 소결성이 결여된 BMT-BMN계에 Ba보다도 원자반경이 적은 Sr을 일부 치환하므로써 이론밀도의 96% 이상의 소결체를 얻을 수 있었다.
3. 실온에서 시료의 직류저항은 10¹³~10¹⁴ Ωcm 이었으며, 이러한 값들은 180(x=0)~300°C (x=1.0)의 온도범위까지 일정하였다. 그러나 이 이상의 온도에서는 도전도(저항의 역수)가 급격히 증가하였고, 이때 활성화에너지는 약 1.75~2.07 eV이었다.
4. Ta의 치환량 x가 증가함에 따라서 비유전률은 32.2(x=0)에서 25.9(x=1), 공진주파수의 온도계수는 +58.4(x=0)에서 +32.5(x=1) ppm/°C로 거의 직선적으로 감소하였다. 그리고 품질계수(Q×f)는 x=0.8인 시료에서 가장 높은 81,674 GHz을 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며 이에 감사를 드립니다. 그리고 시료의 유전특성을 측정해 준 한국과학기술연구원 김경용박사에게도 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. F. Galasso and J. Pyle, "Ordering in Compounds of the A(B'_{0.33}Ta_{0.67})O₃ Type", Inorganic Chemistry, Vol. 2, No. 3, pp. 482-484, 1963.
2. Y. Du and A. S. Nowick, "Structural Transitions and Proton Condition in Nonstoichiometric A₃B'B₂O₉ Perovskite Type Oxides", J. Am. Ceram. Soc. Vol. 78, (11), pp. 3033-3039, 1995.
3. K. Wakino, "Recent Development of Dielectric Resonator Materials and Filters in Japan", Ferroelectrics, Vol. 91, pp. 69-86, 1989.

4. B. C. H. Steele, *Electronic Ceramics*, Elsevier Applied Science, London and New York, pp. 67-120, 1991.
5. S. Nomura, K. Toyama and K. Kaneta, "Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ Ceramics with Temperature Stable High Dielectric Constant and Low Microwave Loss", *Janpan J. Appl. Phys.* Vol. 21, No. 10, pp. L624-L626, 1982.
6. H. Matsumoto, H. Tamura and K. Wakino, "Ba(Mg, Ta)O₃ - BaSnO₃ High-Q Dielectric Resonator", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 30, No. 9B, pp. 2347-2349, 1991.
7. O. Renoult, J. P. Boilot, F. Chaput, R. Papiernik, L. G. Hubert-Pfalzgraf and M. Lejeunce, "Sol-Gel Processing and Microwave Characteristics of Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ Dielectrics", *J. Am. Ceram. Soc.*, 75[12], pp. 3337-3340, 1992.
8. H. J. Lee, H. Ryu, H. M. Park, J. H. Paik, S. Nahm and J. D. Byun, "Interfacial Structure of Ordered Domains in Barium Lathanum Magnesium Niobate", *J. Am. Ceram. Soc.*, 81 [6], pp. 1685-1699, 1998.
9. M. A. Akbas anf P. K. Davies, "Structure and Dielectric Properties of the Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ - La(Mg_{2/3}Nb_{1/3})O₃ System", *J. Am. Ceram. Soc.*, 81[8], pp. 2205-2208, 1998.
10. X. M. Chen, Y. Suzuki, N. Sato, "Sinterability improvement of Ba(Mg_{1/3} Ta_{2/3}) O₃ dielectric ceramics", *J. of Mater Sci., Mater. Electro.*, 5, pp. 244-247, 1994.
11. B. W. Hakki and P. D. Coleman, "A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Capacities in the Millimeter Range", *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-8, pp. 402-410, 1960.
12. A. Halliyal, U. Kumar, R. E. Newnham and L. E. Cross, "Stabilization of the Perovskite Phase and Dielectric Properties of Ceramics in the Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-BaTiO₃ System", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 66[4], pp. 671-676, 1987.
13. In-Tae Kim, Yoon-Ho Kim and Su Jin Chung, "Ordering and microwave dielectric properties of Ba(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃ ceramics", *J. Mater. Res.*, vol. 12, no. 2, pp. 518-525, 1997.
14. N. Setter and L. E. Cross, "The contribution of structural disorder to diffuse phase transitions in ferroelectrics", *J. Mater. Sci.*, 15, pp. 2478-2482, 1980.
15. R. C. Buchanan, *Ceramic Materials for Electronics*(2nd edition), Marcel Deckker Inc., New York, pp. 4-5, 1991.
16. 岡崎 清, *セラミック誘電・工学*(増補版), 東京, 學獻社, pp. 205-206, 1978.
17. J. Dudek and Z. Wrobel, "Dependence of Electric Properties of Pb(Zr_x Ti_{1-x})O₃ Solid Solutions on their Composition", *Ferroelectrics*, Vol. 18, pp. 161-164, 1978.
18. H. J. Youn, K. S. Hong and H. Kim, "Coexistence of 1:2 and 1:1 long range ordering types in La modified Ba(Mg_{0.33} Ta_{0.67})O₃ ceramics", *J. Mater. Res.*, 12,[3], pp. 589-592, 1997.
19. H. Tamura, T. Konoike, Y. Sakabe and K. Wakino, "Improved High-Q Dielectric Resonator with Complex Perovskite Structure", *J. Am. Ceram. Soc.*, C59-C61, 1994. 4.
20. M. A. Akbas and P. K. Davies, "Ordering Induced Microstructures and Microwave Dielectric Properties of Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ - BaZrO₃ System", *J. Am. Ceram. Soc.*, 81[3], pp. 670-676, 1998.
21. K. Fukuda and R. Kitoh, "Far-Infrared Reflection Spectra of Dielectric Ceramics for Microwave Applications", *J. Am. Ceram. Soc.*, 77[1], pp. 149-154, 1994.
22. T. Nagai, T. Inuzuka and M. Sugiyama, "Contribution of Dielectrc Constant to Change in Temperature Coefficient of Resonant Frequency in (Ba_{1-x}Sr_x)(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ Compounds", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31, part 1. No. 9B, pp. 3132-3135, 1992.
23. M. Sugiyama and T. Nagai, "Anomaly of Dielectrc Constant of (Ba_{1-x}Sr_x)(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ Solide Solution and Its Relation to Structural Change", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32, part 1. No. 9B, pp. 4360-4363, 1993.