

소결온도와 Sr몰비에 따른 $Mg_{1-x}Sr_xTiO_3$ 세라믹스의 구조 및 마이크로파 유전특성

論 文
50C-5-5

Structural and Microwave Dielectric Properties of the $Mg_{1-x}Sr_xTiO_3$ Ceramics with Sintering Temperature and Sr Mole Ratio

崔義善* · 鄭長鎬** · 柳基元*** · 李永熙[§]
(Eui-Sun Choi · Jang-Ho Chung · Ki-Won Ryu · Young-Hie Lee)

Abstract - The $Mg_{1-x}Sr_xTiO_3$ ($x=0.02\sim 0.08$) ceramics were fabricated by the conventional mixed oxide method. The sintering temperature and time were $1250^{\circ}C\sim 1350^{\circ}C$, 2hr., respectively. From the X-ray diffraction patterns, it was found that the perovskite $SrTiO_3$ and ilmenite $MgTiO_3$ structures were coexisted in the $Mg_{1-x}Sr_xTiO_3$ ($x=0.02\sim 0.08$) ceramics. The dielectric constant(ϵ_r) was increased with addition of $SrTiO_3$. The temperature coefficient of resonant frequency(τ_f) was gradually varied from negative value to the positive value with increasing the $SrTiO_3$. The temperature coefficient of resonant frequency of the $Mg_{1-x}Sr_xTiO_3$ ($x=0.036$) ceramics was near zero, where the dielectric constant, quality factor, and τ_f were 20.65, 95120 and $+1.3ppm/^{\circ}C$, respectively.

Key Words : $Mg_{1-x}Sr_xTiO_3$, Quality factor, Dielectric constant(ϵ_r), Temperature coefficient of resonant frequency(τ_f)

1. 서 론

통신용 전자부품으로 사용되는 마이크로파 유전체 세라믹스는 소형화, 저가격화, 고기능화의 요구가 점점 더 증대되고 있으며 이와 연관된 다양한 연구가 현재 진행되고 있다. 일반적으로 마이크로파에서 사용되는 유전체는 공진기의 소형화를 위하여 유전상수가 높아야 하며, 공진기의 유전손실을 적게 하기 위하여 품질계수가 커야하고, 온도변화에 따른 공진주파수의 안정화를 위하여 유전체의 공진주파수의 온도계수를 '0'에 가까운 값을 가져야한다.[1],[2]

이러한 재료에는 $BaO-TiO_2$, $(Mg,Ca)TiO_3$, $Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ 등이 있으며[3], 이 가운데서 $(Mg,Ca)TiO_3$ (이하 MCT)는 마이크로파용 유전체 세라믹스 필터로 널리 사용되고 있다. MCT계 재료는 1940년대말 Schoenberg 등에 의해 온도보상용 세라믹 커패시터 소재로의 응용이 연구되기 시작한 이후 이러한 용도로 널리 사용되어 왔으며[4], 공진기용 유전체재료로의 응용은 1970년대에 들어서부터 본격적으로 연구되기 시작하였다.[5] 또한 MCT 마이크로웨이브 세라믹스는 Ba나 Pb계열의 마이크로파 유전체에 비하여 원료의 가격이 저렴하고 소결이 비교적 용이하여 재현성 있는 마이크로파 유전특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다.[6],[7]

$MgTiO_3$ 의 경우 ilmenite구조를 가지고 있으며, 높은 값의 품질계수(22,000 at 50GHz)를 갖고는 있으나, 낮은 유전율($\epsilon_r=16$)과 공진주파수의 온도계수가 비교적 큰($-45ppm/^{\circ}C$) 음(-)의 값을 가진다는 단점 때문에 유전체 공진기로 사용하기에 부적합한 것으로 알려져 있다. 반면 페로브스카이트(perovskite)구조의 $CaTiO_3$ 는 품질계수가 낮지만(1,800 at 2 GHz), 높은 유전율($\epsilon_r=170$)과 공진주파수의 온도계수가 비교적 큰($+800ppm/^{\circ}C$) 양(+)의 값을 가진다.[8]

따라서 본 실험에서는 $MgTiO_3$ 세라믹스의 음의 온도계수($\tau_f=-45ppm/^{\circ}C$) 특성을 개선하기 위하여 MCT계의 $CaTiO_3$ 보다 큰 유전율($\epsilon_r=255$)과 양(+)의 공진주파수의 온도계수($+1700ppm/^{\circ}C$)를 갖는 $SrTiO_3$ [9],[10] 세라믹스를 합성하여 안정화된 공진주파수의 온도계수를 갖는 $Mg_{1-x}Sr_xTiO_3$ ($x=0.02\sim 0.08$)를 제조하고, 마이크로파 유전특성을 조사하여 위성통신용 마이크로파 유전체로서의 응용가능성을 조사하였다.

2. 실험

본 연구에서는 $MgTiO_3$ 의 공진주파수의 온도계수($-45ppm/^{\circ}C$)를 개선하기 위하여 양의 공진주파수의 온도계수를 갖는 $SrTiO_3$ ($+1700ppm/^{\circ}C$)를 혼합하여 $Mg_{1-x}Sr_xTiO_3$ ($x=0.02\sim 0.08$) 세라믹스를 일반 소성법으로 제작하였으며, 출발원료는 MgO , TiO_2 , $SrCO_3$ 를 사용하였다. MgO , $SrCO_3$ 와 TiO_2 를 조성식에 따라 평량한 후, 아세톤을 분산매로 지르코니아볼로 24시간 동안 혼합분쇄한 다음, $100^{\circ}C$ 전기오븐에서 24시간 동안 건조한 후 알루미늄 도가니에 넣어 $1000^{\circ}C$ 에서 2시간 동안 하소하였다. 하소한 분말을 원통형 금형($\phi=12.8mm$)에 넣고 $1000kg/cm^2$ 의 압력을 가해 성형을 하였으며, 성형한 시료를 $1250^{\circ}C\sim 1400^{\circ}C$ 에서 2시간 동안 소결하였다.

2. 실험

혼합 분쇄된 시료의 가열과정 중에서 발생하는 물리, 화학적 변화를 고찰하고 이에 따른 시편의 열처리 조건을 선택하기 위하여 시차열분석(Differential Thermal Analysis) 및 열

* 正會員 : 光云大 電子材料工學科 碩士課程

** 正會員 : 韓元마이크로웨이브 責任研究員 · 工博

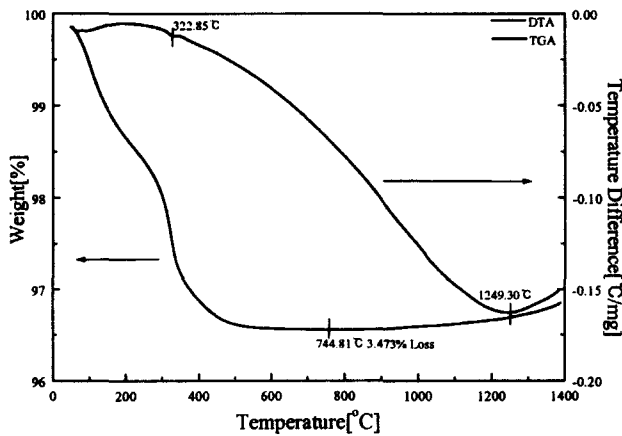
*** 正會員 : 驪州大 電子科 教授 · 工博

[§] 正會員 : 光云大 電子材料工學科 教授 · 工博

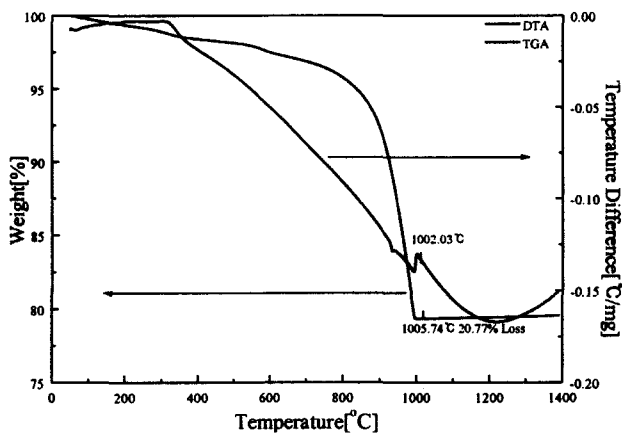
接受日字 : 2001年 2月 20日

最終完了 : 2001年 4月 12日

중량분석(Thermal Gravimetric Analysis)을 하였다. 그림 1(a) MgTiO₃ 분말의 경우 322.82°C에서 흡열피크가 발생하였으며, 이는 휘발성 불순물 및 불밀 과정에서 혼합된 유기물의 연소에 의해 발생한 것이다. 또한, 744.81°C까지 3.473%의 중량감소가 발생하였다. 1249.3°C이상에서 발열피크가 관찰되는데 이는 재결정화 및 결정립의 성장에 의한 것이다. SrTiO₃ 분말의 경우 800°C~1000°C 사이에서 급격한 중량감소가 발생하였으며, 이는 SrTiO₃ 시료자체에 포함된 CO₂의 휘발에 의한 것이다. 1005.74°C까지 20.77%의 중량감소가 나타났다. 소결온도 및 조성변화에 따른 결정구조의 변화 및 고용체 형성과정을 고찰하고자 X-선(CuK_{α1}, λ=1.542Å) 회절분석을 하였으며, 스텝 폭과 주사 속도는 0.05deg., 10deg./min로 하였다. 주사전자현미경을 이용하여 결정립의 형태, 결정립계, 기공 등의 미세구조를 고찰하였다. 그리고 소결체의 구성 성분과 양을 알기 위해 에너지분산형 X-선분광기 분석법(EDS)을 시행하였다.



(a) MgTiO₃



(b) SrTiO₃

그림 1 MgTiO₃와 SrTiO₃ 분말의 시차열분석 및 열중량분석
Fig. 1 DTA and TGA patterns of the MgTiO₃ and SrTiO₃ powder

마이크로파 유전특성은 양면을 거울면 연마한 실린더형 시편에 대하여 Hakki와 Coleman에[11] 의해 제시되고 Kobayashi등이[12] 보정한 평판형 공진기법(parallel plate method)으로 유전율(ϵ_r)을, 투과모드의 캐비티 공진기법(cavity resonator method)으로 무부하 Q와 공진주파수의 온도계수(τ_f)값을 측정하였다. τ_f 값은 25°C와 85°C에서 측정된 값들의 평균값을 택하였다. 위의 값들은 TE_{01δ} 공진모드에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

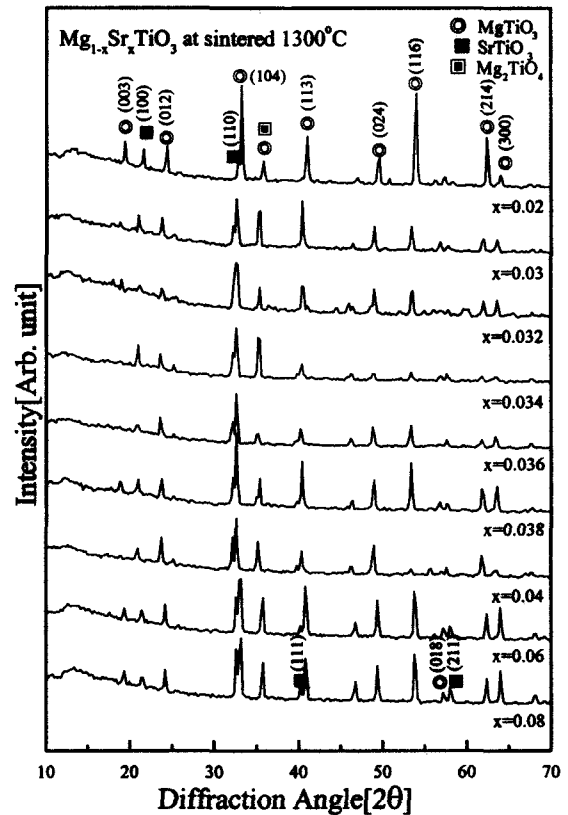
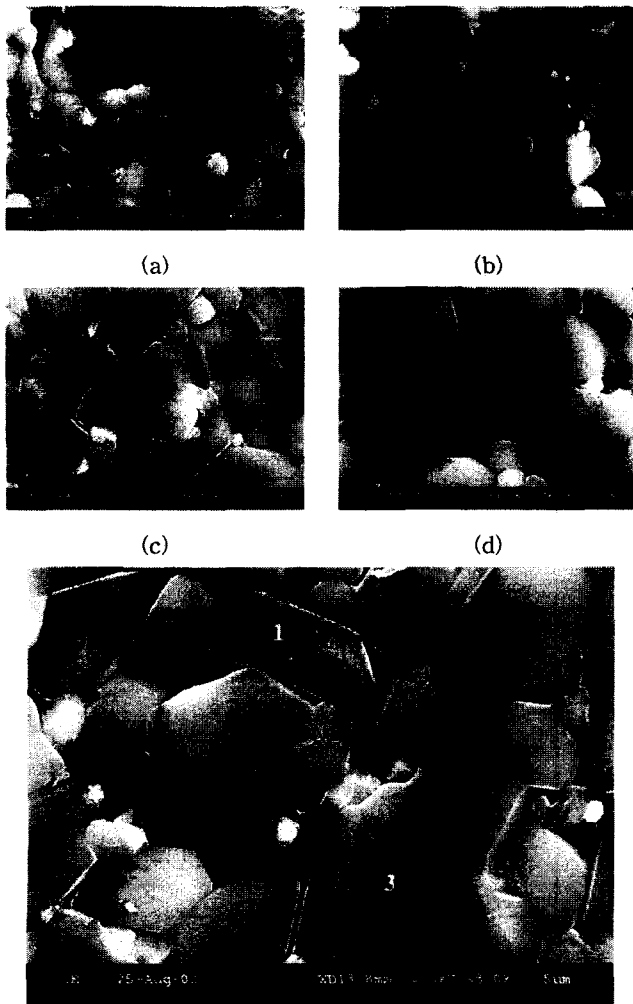


그림 2 1300°C에서 소결한 Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) 세라믹스의 X-선 회절분석

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of the Mg_{1-x}Sr_xTiO₃ (x=0.02~0.08) ceramics sintered at 1300°C

그림 2는 1300°C에서 소결한 Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) 세라믹스의 X-선 회절패턴을 나타내고 있다. JCPDS 파일 No.06-0494, No.35-0734, No.25-1157을 이용하여 MgTiO₃, SrTiO₃와 Mg₂TiO₄의 상을 분석하였으며, 모든 조성에서 Mg₂TiO₄의 이차상이 나타났다. Mg₂TiO₄의 경우 유전율은 약간 감소하지만 품질계수는 증가되는 것으로 보고되어 있으며, Sr의 몰비의 증가에 따라 SrTiO₃의 회절강도는 강하게 나타났다. 그림 1에서 32.8° 부근의 MgTiO₃ (104)면, 32.4° 부근의 SrTiO₃ (110)면과 40.65° 부근의 MgTiO₃ (113)면, 39.95° SrTiO₃ (111)면은 하나의 피크로 합쳐져 구분이 불가능하였다. 이런 결과는 a축 5.054Å(c축 13.898Å)인 일메나이트

(ilmenite)구조의 $MgTiO_3$ 와 a축이 3.905Å인 페로브스카이트(perovskite)구조의 $SrTiO_3$ 와의 고용에 의한 결과는 아니며, 두상의 공존에 의한 것으로 사료된다. x값의 증가에 따라 $SrTiO_3$ 와 $MgTiO_3$ 피크의 분리가 확연히 나타났으며, 35° 부근의 $MgTiO_3$ (110) 면과 Mg_2TiO_4 (311)면은 하나의 피크로 합쳐져 나타났다.



(e) SEM & EDS

그림 3 소결온도에 따른 $Mg_{0.964}Sr_{0.036}TiO_3$ 세라믹스의 미세 구조 특성

Fig. 3 Microstructure of the $Mg_{0.964}Sr_{0.036}TiO_3$ ceramics with different sintering temperature
(a)1250°C (b)1275°C (c)1325°C (d)1350°C (e)1300°C

그림 3은 $Mg_{0.964}Sr_{0.036}TiO_3$ 세라믹의 소결온도에 따른 시편의 결정립의 형태로서 소결체의 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. 소결온도 상승에 따라 결정립 크기는 증가하였으며, 소결에 의한 치밀화를 보여주고 있다. 그러나 1350°C의 경우 결정립의 과잉성장과 결정립 크기의 분포가 불균일하게 나타났다. 유전체 세라믹스의 경우 과대 입성장이나 결정립 크기의 분포가 불균일 할수록 품질계수값은 작아진다.[13]

그림 3(e)와 표1에서는 $Mg_{0.964}Sr_{0.036}TiO_3$ 세라믹스의 에너지분산형 X-선분광기 분석(EDS)을 나타내었다. $MgTiO_3$ 와 $SrTiO_3$ 는 서로 다른 결정구조를 하고 있으므로 두상이 이론적으로 고용되지 않는 것으로 보고되어있으나[14], 이와 비슷한 구조의 $MgTiO_3$ 와 $CaTiO_3$ (페로브스카이트구조)의 경우 Nakata 등은 이 두상은 $CaTiO_3$ 에 $MgTiO_3$ 가 더 많은 양이 고용됨을 보고하였다.[15] $CaTiO_3$ 보다 더 큰 이온반경을 가진 $SrTiO_3$ 경우 $MgTiO_3$ 가 고용될것으로 생각된다. 표 1에서도 알수 있듯이 전체적으로 약간의 Sr이 고용된 것으로 나타났다. 그림 3(e)에 표시된 2와 4의 결정립의 경우 다른 결정립에 비해 매우작으며 또한 Sr의 양이 더 많이 나타났다. 이는 $MgTiO_3$ 보다 소결온도가 높은 Sr에 의해 성장억제된 것으로 생각된다.

표 1 $Mg_{0.964}Sr_{0.036}TiO_3$ 세라믹스의 에너지분산형 X-선 분광기 분석(EDS)

Table 1 Energy Dispersive X-ray Spectrometer(EDS) of the $Mg_{0.964}Sr_{0.036}TiO_3$ ceramics

No.	Element	k-ration (calc.)	Atom %	Element wt%	wt% Err. (1-Sigma)
1	Mg	0.1599	60.83	44.00	±0.46
	Ti	0.4959	39.02	55.62	±0.46
	Sr	0.0031	0.15	0.39	±0.44
2	Mg	0.1245	53.88	37.11	±0.47
	Ti	0.5644	45.87	62.26	±0.52
	Sr	0.0052	0.25	0.63	±0.50
3	Mg	0.1694	62.43	45.72	±0.47
	Ti	0.4812	37.52	54.16	±0.45
	Sr	0.0010	0.05	0.12	±0.44
4	Mg	0.1295	54.86	37.48	±0.48
	Ti	0.5254	43.57	58.67	±0.49
	Sr	0.0316	1.56	3.85	±0.77

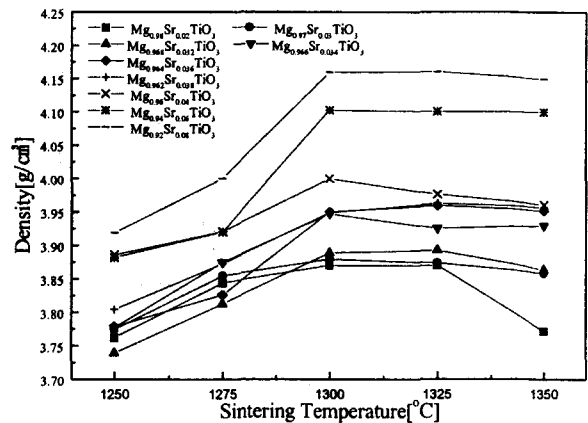


그림 4 소결온도에 따른 $Mg_{1-x}Sr_xTiO_3$ (x=0.02~0.08) 세라믹스의 밀도 변화

Fig. 4 Density of the $Mg_{1-x}Sr_xTiO_3$ (x=0.02~0.08) ceramics with sintering temperature(2hr.)

그림 4에서는 소결온도의 증가와 Sr증가에 따른 밀도의 변화를 나타내었으며, 소결온도의 증가에 따라 밀도는 증가하였다. 그러나 1325°C부터 밀도는 약간 감소하였으며, 이는 결정립의 과잉성장에 의한 것으로 생각된다. Sr의 첨가량의 증가에 따라 밀도는 증가한 것을 볼수 있으며, 이는 Sr의 원자량이 Mg나 Ti의 원자량보다 큰것에 기인하는 것으로 믿어진다. 즉, 원자량이 큰 첨가물을 넣어준 경우 더 높은 밀도가 얻어졌는데, 이는 바로 밀도계산에 원자량이 반영되기 때문이다. Sr의 몰비가 0.04이하의 경우 1300°C에서 소결한 시편에서 가장 높은 밀도를 나타내었다. 그러나 Sr의 몰비가 0.06이상의 경우에도 1325°C에서 소결한 시편이 가장 높은 밀도를 나타내었다. 이는 MgTiO₃보다 높은 소결온도를 가지는 SrTiO₃에 의한 것으로 생각된다.

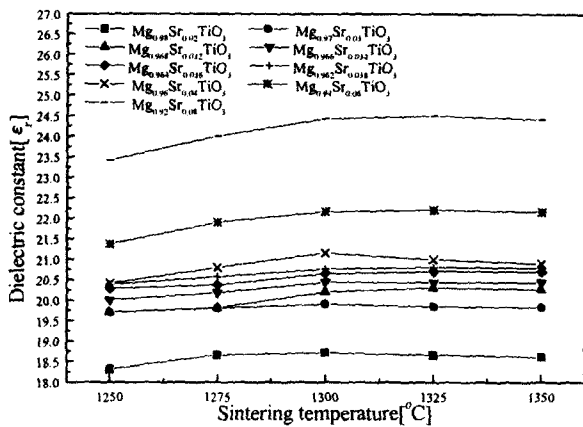


그림 5 소결온도에 따른 Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) 세라믹스의 유전율
 Fig. 5 Dielectric constant of the Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) ceramics with sintering temperature

그림 5에서는 소결온도에 따른 Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) 세라믹스의 유전율을 나타내었다. 소결온도의 증가에 따라 유전율은 증가하였다. 그러나 1325°C 이상의 온도에서는 약간의 유전율 감소가 나타났다. 그 이유는 미세구조와 밀도의 변화에 나타나듯이 결정립의 과잉성장에 의한 것과 밀도의 감소에 의한 것으로 Sr의 몰비의 증가에 따라 유전율은 증가하였다. 이는 SrTiO₃의 높은 유전율(ε_r=255)에 의한 것으로 생각되며, 유전상수는 일반적인 유전체 세라믹스에서 나타나는 대수혼합법칙(logarithmic mixing rule)[16]과 잘 부합하여 Sr의 몰비의 증가에 따라 유전율이 증가하는 것을 알 수 있었다.

그림 6에서는 소결온도에 따른 Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) 세라믹스의 품질계수를 나타내었으며, 소결온도의 증가에 따라 직선적으로 품질계수가 증가하였으며, 1325°C 이후에서는 품질계수의 값이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 소결 온도의 증가에 따라 결정립의 분포가 불균일하고 밀도가 감소한 것에 의한 것으로 생각된다. 또한 Sr의 몰비의 증가에 따라 품질계수는 하락하였으며, 이는 SrTiO₃의 낮은 품질계수(700 at 2GHz)에 의한 것으로 생각된다.

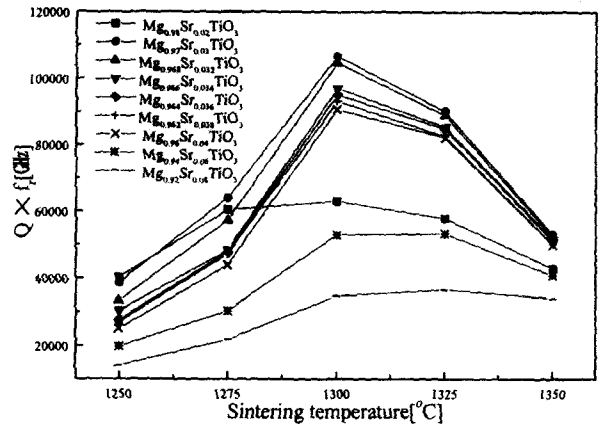


그림 6 소결온도에 따른 Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) 세라믹스의 품질계수
 Fig. 6 Quality factors of the Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) ceramics with sintering temperature

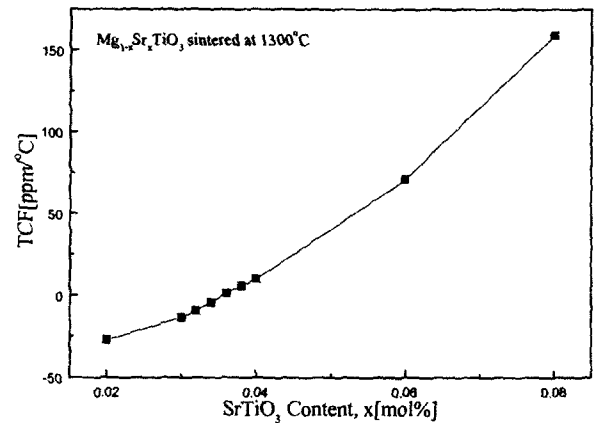


그림 7 조성비에 따른 Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) 세라믹스의 공진주파수의 온도계수
 Fig. 7 Temperature coefficient of resonant frequency of the Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) ceramics

그림 7에서는 Sr몰비에 따른 Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) 세라믹스의 공진주파수의 온도계수를 나타낸 것으로, Sr몰비의 증가에 따라 음(-)의 방향의 공진주파수가 양(+)의 방향으로 이동하였다. 이는 SrTiO₃의 큰 양의 온도계수(+1700ppm/°C)에 의한 것이다. Mg_{0.964}Sr_{0.036}TiO₃ 세라믹스의 공진주파수의 온도계수는 +1.3ppm/°C이다.

3. 결 론

Mg_{1-x}Sr_xTiO₃(x=0.02~0.08) 세라믹스의 마이크로파 유전 특성을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Sr(x=0.03~0.04)의 조성에서 소결온도가 1300°C일 때 양호

- 한 마이크로파 유전특성을 나타내었다.
2. Sr 몰비의 증가에 따라 유전율과 밀도는 증가하였고, 품질계수는 감소하였다.
 3. Sr 몰비의 증가에 따라 공진주파수의 온도계수는 음의 방향에서 양의 방향으로 이동하였다.
 4. 1300℃에서 소결한 시편중, Sr의 몰비가 0.034~0.036일 때 유전율, 품질계수, 공진주파수의 온도계수는 각각 $\epsilon_r=20.44\sim 20.65$, 97035~95120, $\tau_f = -4.25\sim 1.3$ 이었다.

이상의 결과로부터 Sr의 몰비가 0.034~0.036 이고 소결온도가 1300℃인 시편은 높은 품질계수와 안정화된 온도계수를 가지므로 위성통신용 마이크로파 유전체 공진기로서의 응용이 가능할것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국 학술진흥재단의 자유공모과제 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.
(1998-001-E00553)

참 고 문 헌

- [1] N. Negas, G. Yeager, S. Bell, and R. Amren, "Chemistry and Properties of Temperature Compensated Microwave Dielectrics". NIST spec. publ. 804. in Chemistry of Electronic Ceramic Materials, pp.21, 1991.
- [2] E. Nagata, J. Tanaka, M. Tsutumi and E. Bannai, "Distribution of Calcium Ion in the Crystal of MgTiO₃-CaTiO₃ System", Bull. Chem. Soc. Jpn., 56, pp.3173~3174, 1983.
- [3] D. Kolar and D. Suvorov, "High Permittivity Microwave Ceramics", Eur. J. Solid State Inorg. Chem., 32, pp.751~760. 1995.
- [4] 이경희 역, "세라믹 유전체 공학", 대광출판사, pp.341~346, 1991.
- [5] K. Wakino et al., "Dielectric Materials for Dielectric Resonator", in 1976 Joint Convention Record of Four Institute of Electrical Engineers, No.235, Japan, 1976.
- [6] J. Burn, "Flux Sintered BaTiO₃ Dielectrics", J. Mater. Sci., 117, pp.1398~1408, 1982.
- [7] K. Wakino et al., "Microwave Characteristics of (Zn,Sn)TiO₄ and BaO-PbO-Nd₂O₃-TiO₂ Dielectric Resonator", J. Am. Ceram. Soc., 64(7), 278, 1984.
- [8] V. M. Ferreira et al., "The Effect of Cr and La on MgTiO₃ and MgTiO₃-CaTiO₃ Microwave Dielectric Ceramics", J. Mater. Res., Vol.12, No.12, pp.3293~3299, 1997.
- [9] M. Furuya et al., "Microwave Dielectric Properties for Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃-A(Mg_{1/2}W_{1/2})O₃ (A=Ba, Sr and Ca) Ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.33, No.9B, 1994.
- [10] 이영희 등, "소결온도에 따른 0.9MgTiO₃-0.1SrTiO₃ 세라믹스의 구조 및 마이크로파 유전특성", 대한전기학회지, Vol.49C, No.5, pp.294~298, 2000.
- [11] B. W. Hakki et al., "A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Capacities in the Millimeter Range", IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.MTT-24, No.10, 1960.
- [12] Y. Kobayashi et al., "Microwave Measurement of Dielectric Properties of Low-Loss Materials by the Dielectric Rod Resonator Method", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.MTT-33, No.7, 1985.
- [13] K. Wakino, "Relations between Microwave Dielectric Losses and Microstructure on (Zn,Sn)TiO₃ Dielectric Ceramics", J. Jpn. Ceram., 88(8), pp.475~482, 1980.
- [14] T. Hirata et al., "Vibrational Spectroscopy and X-Ray Diffraction of Perovskite Compounds Sr_{1-x}M_xTiO₃(M=Ca, Mg: 0≤x≤1)", J. Solid State Chem., Vol.124, pp.353~359, 1996.
- [15] E. Nagata, J. Tanaka, M. Tsutumi and E. Bannai, "Distribution of Calcium Ion in the Crystal of MgTiO₃-CaTiO₃ System", Bul. Chem. Soc. Jpn., Vol.56, pp.3173~3174, 1983.
- [16] K. Tatsuki, "Dielectric Properties of PbO-ZrO₂-REOX Ceramics at Microwave Frequency", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.26(Suppl. 26-2), pp.80~82, 1987.

저 자 소 개



최 의 선 (崔 義 善)

1998년 서남대 공대 전자공학과 졸업. 2000년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자재료공학과 박사과정

Tel : 02-940-5164

E-mail : sunsee@explore.kwangwoon.ac.kr



류 기 원 (柳 基 元)

1985년 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1987년 광운대 산업정보대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학). 현재 여주대학 전자과 교수

Tel : 031-880-5200

E-mail : kwryu@yeojoo.ac.kr



정 장 호 (鄭 長 鎬)

1987년 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학). 현재 (주)한원 마이크로웨이브 책임연구원

E-mail : jhchung@korfirst.co.kr



이 영 회 (李 永 熙)

1973년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1985~1986년 Penn. State MRL 객원 연구원. 현재 광운대 공대 전자재료공학과 교수

Tel : 02-940-5164

E-mail : yhlee@daisy.kwangwoon.ac.kr