

(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ 세라믹스의 소결 및 마이크로파 유전특성에 미치는 B₂O₃의 영향

이득우* · 박재환 · 김인태 · 박재관 · 김윤호 · 최덕균*

한국과학기술연구원 복합기능세라믹스연구소

*한양대학교 무기재료공학과

(1997년 12월 11일 접수)

Effects of B₂O₃ Addition on the Sintering Behavior and the Microwave Dielectric Properties of (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ Ceramics

Duk-Woo Lee*, Jae-Hwan Park, In-Tae Kim, Jae-Gwan Park,
Yoonho Kim and Duck-Kyun Choi*

Multifunctional Ceramics Research Center, Korea Institute of Science and Technology

*Department of Inorganic Material Engineering, HanYang University

(Received December 11, 1997)

요 약

(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ 마이크로파용 세라믹스에 액상소결소재로서 0.1~1.0 wt%의 B₂O₃를 첨가하였을 때 소결특성과 마이크로파 유전특성의 변화를 조사하였다. (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃에 B₂O₃를 첨가함으로써 소결온도를 1350°C에서 1200°C로 낮출 수 있었으며, 이 때 마이크로파 유전특성 중 품질계수는 오히려 향상되었으며 유전율과 공진주파수의 온도계수도 안정된 결과를 보여주었다. (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃에 대한 B₂O₃의 첨가량이 증가함에 따라 소결밀도의 증가 및 입성장이 뚜렷이 나타났으며, 0.15~1.0 wt%의 B₂O₃가 첨가된 영역에서는 94%의 상대밀도를 갖는 소결체를 얻을 수 있었다. 또한 0.2~0.4 wt%의 범위에서는 안정된 마이크로파 유전특성을 나타내었다. 품질계수(Q×f)의 최대값은 0.3wt%의 B₂O₃가 첨가되었을 때 약 70000이 나타났고, 유전율(ε_r)은 24~25의 범위를 나타냈으며, 이 범위에서 공진주파수의 온도계수는 0 ppm/°C를 나타내었다.

ABSTRACT

The effects of B₂O₃ addition on the sintering behavior and the microwave dielectric properties of (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ ceramics were investigated. By addition of B₂O₃, the specimens were sintered at 1200°C for 2 hours and better quality factor was obtained. As the amount of B₂O₃ increases, the density of the ceramics increases and grain growth enhances. It was densified to over 94% of (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ theoretical density by the addition of 0.15~1.0 wt% B₂O₃ and stable microwave dielectric properties observed by the addition of 0.2~0.4wt% B₂O₃. (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ ceramics sintered at 1200°C exhibits maximum dielectric constants of 24~25, quality factor(Q×f) of more than 70000 and temperature coefficient of resonant frequency of 0 ppm/°C by adding of 0.15~0.4 wt% B₂O₃.

Key words : Microwave ceramics, (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃, B₂O₃, Quality factor, Low temperature sintering

1. 서 론

통신용 전자부품으로 사용되는 마이크로파 유전체 세라믹은 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, 공

진기의 유전손실을 적게 하기 위하여 품질계수가 커야하고, 온도변화에 따른 공진주파수의 안정화를 위하여 유전체의 공진주파수의 온도계수를 0에 가까운 값으로 쉽게 조절할 수 있어야 한다.¹⁾ 이러한 재료에는 BaO-TiO₂, (Mg,Ca)TiO₃, Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O₃ 등이 있다.²⁾

이 가운데서 (Mg,Ca)TiO₃는 마이크로파용 세라믹 유

전체 필터로 널리 사용되고 있는데 ilmenite구조의 $MgTiO_3$ 와 perovskite구조의 $CaTiO_3$ 의 두 상이 서로 공존되어 있는 상태의 복합체이다. $MgTiO_3$ 의 경우 마이크로웨이브 특성이 우수하여 순수한 $MgTiO_3$ 단일상의 마이크로파 특성에 관한 연구^{2,3)} 및 첨가제의 효과에 관한 연구⁴⁾ 등이 이루어진 바 있다. 그러나 $MgTiO_3$ 는 -45 ppm/°C에 가까운 공진주파수의 온도계수를 가지므로 이러한 낮은 온도계수를 보정하기 위하여 $+800$ ppm/°C의 온도계수를 가지고 있는 $CaTiO_3$ 를 첨가하게 된다.⁵⁾

$(Mg,Ca)TiO_3$ 마이크로웨이브 세라믹스는 Ba이나 Pb계열의 마이크로파 유전체⁶⁻¹⁰⁾에 비하여 원료의 가격이 저렴하고 소결이 비교적 용이하므로 재현성 있는 마이크로파 유전특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다.⁵⁾ 그러나 순수한 $MgTiO_3$ 의 마이크로파 유전특성이나 $CaTiO_3$ 의 첨가량에 관한 연구보고들은 있지만 소결조제의 첨가에 의한 저온소결 효과에 대하여 연구된 바는 없다. 따라서 본 연구에서는 $(Mg,Ca)TiO_3$ 에 저융점의 액상소결조제인 B_2O_3 를 첨가하여 저온액상소결을 시도함으로써 소결온도를 낮추고 이러한 저온소결의 결과 마이크로파 특성이 그대로 유지될 수 있는가를 살펴보고자 하였다.

2. 실험방법

출발원료로는 MgO (99.9%, ProChem Co., USA), TiO_2 (99.9%, ProChem Co., USA), $CaCO_3$ (99.99%, High Purity Chem. Co., Japan)를 사용하였다. 예비 실험을 통해 $CaTiO_3$ 가 7 mol% 첨가되었을 때 공진주파수의 온도계수가 0에 가까운 값을 가짐을 확인하였다. 따라서 최종적인 조성이 $(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO_3$ 가 되도록 원료를 칭량하였고 이를 탈이온수와 지르코니아 불을 이용하여 24시간 혼합하였으며, 이를 건조한 뒤 5°C/mm의 승온속도로 1200°C에서 2시간 동안 공기중에서 하소하였다. 하소한 분말은 40 kV, 30 mA, 0.024°/sec의 조건으로 $Cu K\alpha$ 선을 이용하여 X선 회절분석을 통하여 상합성 여부를 조사하였다. 그 후 하소한 분말에 소결 첨가제로 백한 B_2O_3 (99.98%, Aldrich)를 0.1~1.0wt%범위로 첨가하여 다시 불필을 이용하여 24시간 동안 혼합, 분쇄하였다. 분쇄한 후 1000 kg/cm²의 압력으로 직경 10 mm의 몰드에 일축가압성형하였으며 이 시편은 5°C/min의 승온속도로 1100, 1150, 1200, 1350°C의 온도에서 2시간동안 소결한 후 로냉하였다.

소결한 후 상의 합성여부를 알아보기 위해 소결체를 분쇄한 후 X선 회절분석을 행하였다. 소결체의 밀도는 Archimedes법을 이용하여 측정하였다. 제조된 소결체의 표면조도가 Q값을 저하시키는 원인이 되므로 #2000

SiC연마지를 사용하여 소결체의 양면을 직경대 두께비가 10:4~5의 범위로 연마하여 마이크로파 특성 측정에 사용하였다. 표면분석을 위하여 시편을 1 μ m의 다이아몬드 연마제로 연마한 후 1030°C에서 15분간 thermal etching하여 표면의 미세구조를 주사전자 현미경 (SEM)으로 관찰하였으며, 소결체의 구성 성분과 양을 알기 위해 전자빔 미세영역 분석법 (EPMA: Electron Probe Micro-analysis)을 시행하였다.

소결체의 마이크로파 유전특성을 측정하기 위해서 Hakki-Coleman 방법용 측정치구와 금속 공진기를 사용하여 회로망분석기(8720C, Network Analyzer, Hewlett-Packard, U.S.A.)로 X-band (8~12 GHz)에서의 유전상수(ϵ_r), 품질계수($Q \times f$, Q : 무부하 품질계수, f : 측정주파수), 공진주파수의 온도계수(τ_f)를 측정하였다.⁴⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 원료의 합성

출발원료인 MgO , TiO_2 , $CaCO_3$ 로부터 $MgTiO_3$ 와 $CaTiO_3$ 가 합성되는 하소온도를 찾기 위해 1100~1200°C의 온도에서 2시간동안 가열하여 반응시키고 2θ 가 20~70°인 범위에서 X선 회절분석을 하였으며 Fig. 1에 $(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO_3$ 의 회절분석 결과를 나타내었다. 1100°C와 1150°C에서 합성한 시료는 일반적으로 $MgTiO_3$ 상과 $CaTiO_3$ 상의 일부는 형성되지만 30°와 35°부근의 $CaTiO_3$ 의 회절피크가 나타나지 않고 있다. 반면에 1200°C에서 합

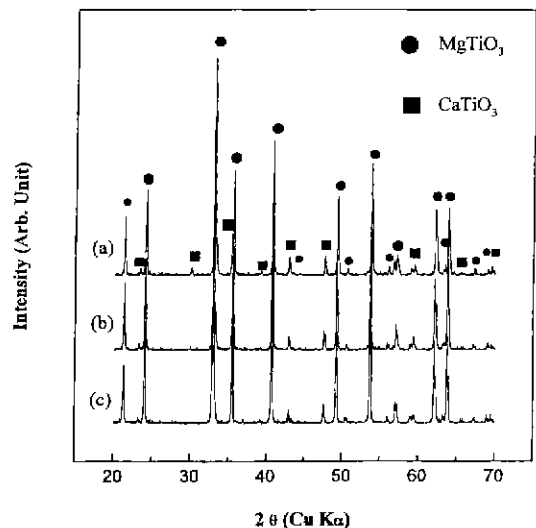


Fig. 1. Powder X-ray diffraction patterns of the $(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO_3$ calcined at (a) 1200°C (b) 1150°C and (c) 1100°C.

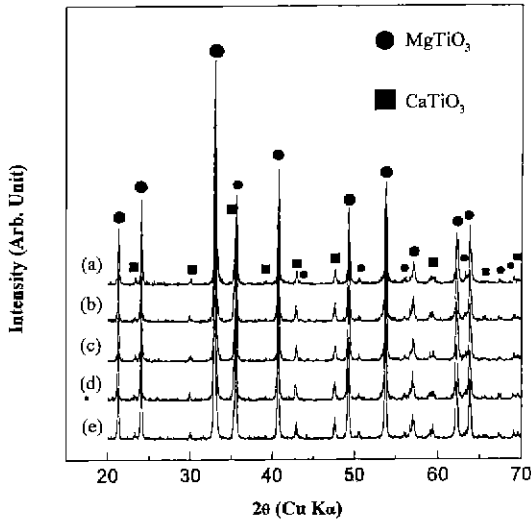


Fig. 2. Powder X-ray diffraction patterns of the (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ with B₂O₃ sintered at 1200°C. (a) 0.4 wt%. (b) 0.3 wt%, (c) 0.2 wt%, (d) 0.15 wt% and (e) 0 wt% of B₂O₃ were added.

성한 시료의 경우 MgTiO₃상과 CaTiO₃상의 모든 회절 피크를 얻을 수 있었으며, CaCO₃의 CO₂도 모두 사라진 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 1200°C의 온도가 MgTiO₃과 CaTiO₃의 상형성이 모두 이루어지는 적절한 하소온도임을 확인할 수 있었다. 이와 같이 합성된 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ 혼합체에 녹는점이 460°C이며 끓는점이 1860°C인 B₂O₃를 액상소결조제로 선택하고 0.1~1.0 wt%의 범위로 첨가하여 1100, 1150, 1200, 1350°C에서 각각 2시간 동안 공기중에서 소결한 후 로냉하였다.

Fig. 2에는 1200°C에서 소결한 시료의 X선 회절분석 결과를 나타내었다. B₂O₃의 첨가량에 관계없이 모두 동일한 X선 회절피크를 보여주고 있는데, 이는 B₂O₃가 (Mg, Ca)TiO₃의 상 합성에 영향을 주지 않으면서 액상소결에 의한 치밀화를 일으키고 있음을 나타내주고 있다.

3.2. 소결특성 및 미세구조.

Fig. 3에서는 1100, 1150, 1200, 1350°C에서 소결한 시편의 B₂O₃ 함량에 따른 수축율의 변화를 보여주고 있다. 소결온도가 증가함에 따라 수축율은 증가하였으며 일반적으로 보고되고 있는 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃의 소결온도인 1350°C에서 소결한 경우는 15%이상의 수축율을 나타냈다. 소결온도 1200°C에서의 수축율도 B₂O₃의 첨가량이 0.2 wt%이상인 경우에는 거의 15%에 가까운 수축율을 나타내었다.

Fig. 4에서는 1100, 1150, 1200, 1350°C에서 소결한 시편의 B₂O₃ 함량에 따른 소결밀도의 변화를 보여주고

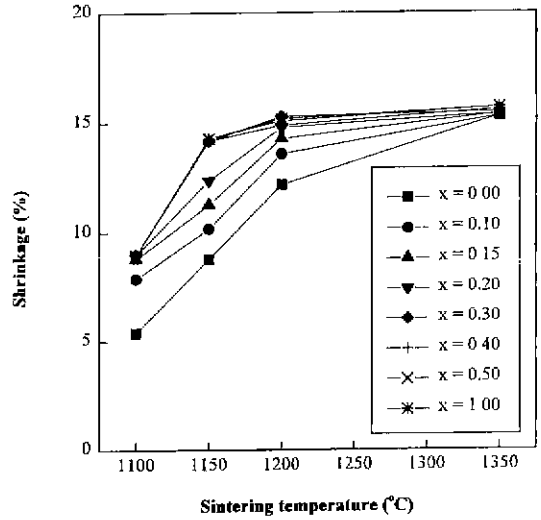


Fig. 3. Shrinkage of the (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ with xB₂O₃ sintered for 2 hours (x=wt%).

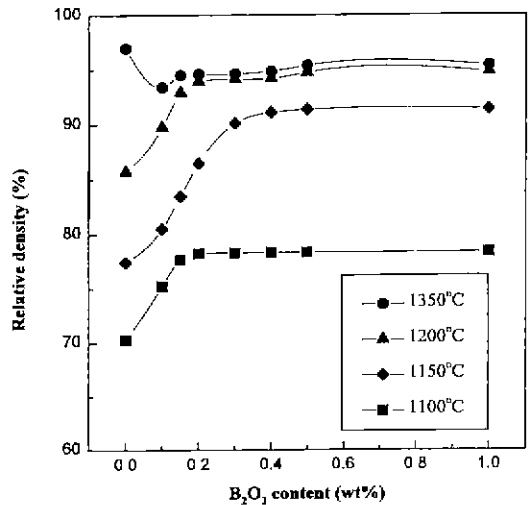


Fig. 4. Relative densities of the (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ with B₂O₃ sintered at different temperatures.

있다. 1100°C나 1150°C에서는 소결이 완전히 이루어지지 않았으며 이는 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃의 하소온도인 1200°C보다 낮은 온도에서 소결함으로 인해 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃의 소결특성이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 그러나 1200°C에서 소결한 경우는 1350°C와 비교하여 약간 낮은 소결밀도를 보이고 있지만 B₂O₃의 첨가량이 0.15 wt%이상인 범위에서는 이론밀도대비 94%이상의 높은 소결밀도를 나타내었다.

비교적 높은 밀도를 보이고 있는 1200°C 소결시편의

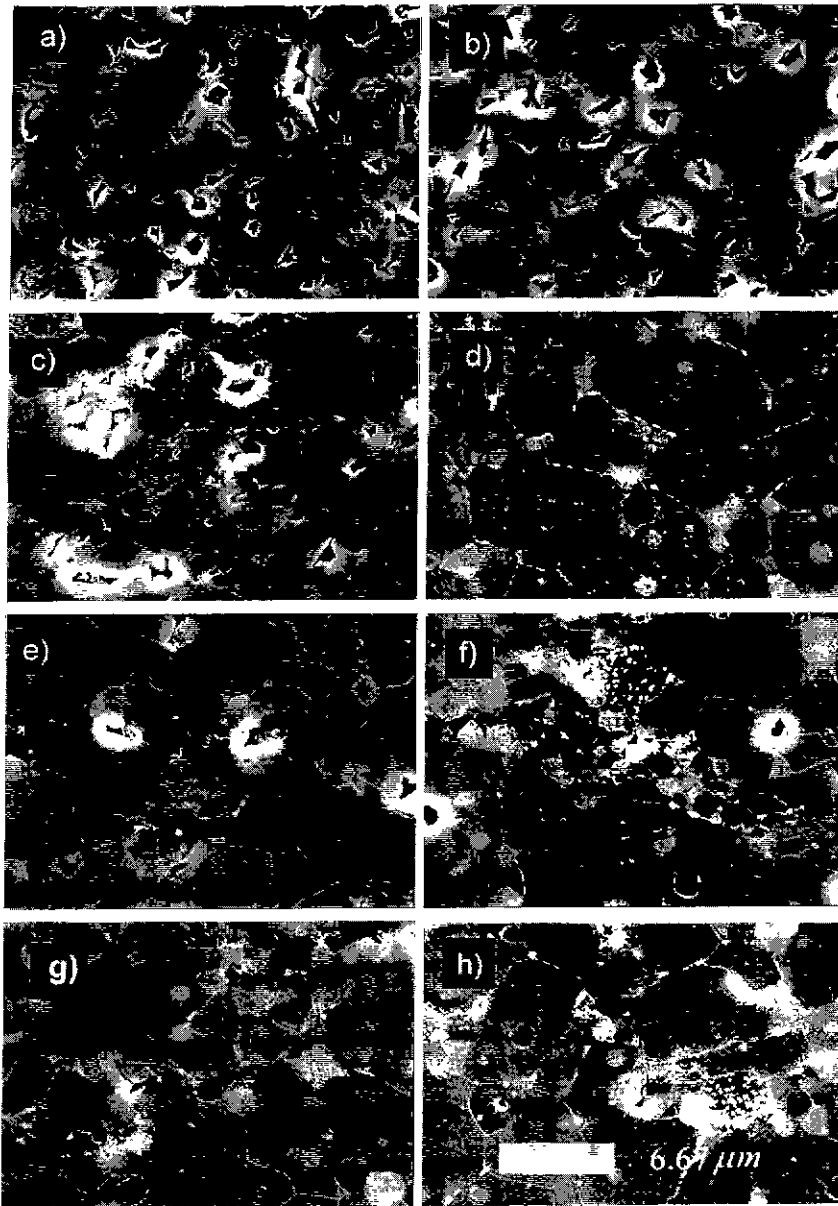


Fig. 5. SEM photographs of the $(\text{Mg}_{0.93}\text{Ca}_{0.07})\text{TiO}_3$ with $x\text{B}_2\text{O}_3$ series sintered at 1200°C . (a) $x=0.00$, (b) $x=0.10$, (c) $x=0.15$, (d) $x=0.20$, (e) $x=0.30$, (f) $x=0.40$, (g) $x=0.50$ and (h) $x=1.00$.

표면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 0.1 wt%이하의 B_2O_3 가 첨가된 영역에서는 소결 밀도가 낮아 소결성이 나타나지 않았으나 0.2 wt%이상의 B_2O_3 를 첨가한 범위의 경우에는 뚜렷한 입성상을 나타내며 소결에 의한 치밀화를 보여주고 있다. 이와같이 B_2O_3 가 일정범위로 첨가됨으로써 나타나는 소결성의 향상에 대해 알아보기 위해 전자빔 미세영역 분석법

(EPMA)으로 관찰한 결과를 Fig. 6과 Table 1에 나타내었다. MgTiO_3 와 CaTiO_3 는 서로 다른 결정구조를 하고 있으므로 두상이 이론적으로는 고용되지 않으나 Nakata¹⁾ 등은 MgTiO_3 와 CaTiO_3 가 서로 일부분 치환되며 CaTiO_3 에 MgTiO_3 가 더 많은 양이 고용됨을 보고하였다.

EPMA 분석을 통하여 미량으로 첨가된 B_2O_3 를 검출할 수는 없었지만, MgTiO_3 와 CaTiO_3 의 상영역을 확인할 수

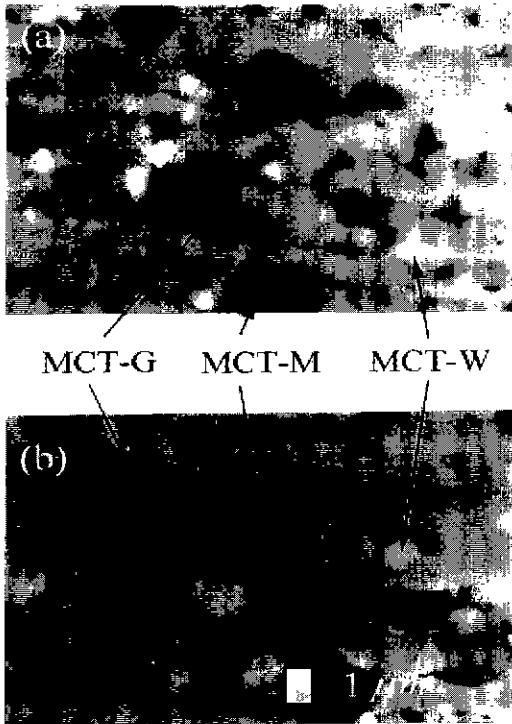


Fig. 6. EPMA analysis of the (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ with xB₂O₃ sintered at 1200°C. (a) x=0.3 wt% and (b) x=0.5 wt%.

Table 1. EPMA Analysis of (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ with B₂O₃ (Unit : atom%)

0.3 wt% B ₂ O ₃	Mg	Ca	Ti	Main composition
MCT-G	52.523	0.731	46.746	MgTiO ₃
MCT-M	60.854	5.525	33.621	MgTiO ₃ +CaTiO ₃
MCT-W	5.085	42.439	52.476	CaTiO ₃
0.5 wt% B ₂ O ₃	Mg	Ca	Ti	Main composition
MCT-G	50.516	0.359	49.125	MgTiO ₃
MCT-M	62.059	4.357	33.584	MgTiO ₃ +CaTiO ₃
MCT-W	2.714	45.263	52.023	CaTiO ₃

있었다. Fig. 6에서 나타난 MCT-G부분은 MgTiO₃가 주 성분인 영역이며 약간의 Ca가 나타나는 것은 상계부분에 고용되어 나타난 결과로 생각되며, MCT-W부분은 CaTiO₃가 주 성분인 영역으로 일부 나타난 Mg는 CaTiO₃의 주변의 영향과 일부 고용으로 인한 결과로 나타났으며, MCT-M부분은 일반적인 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃에서는 나타

나지 않는 MgTiO₃와 CaTiO₃가 공유되어 있는 제3상으로 존재하고 있는 것을 볼 수 있었다.

3.3. 소결체의 마이크로 유전특성.

Fig. 7은 일반적으로 알려진 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ 소결온도인 1350°C와 저온액상소결을 위해 1200°C에서 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃에 B₂O₃를 첨가하여 소결한 시편들에 대한 유전율의 변화를 보여주고 있다. 1350°C에서는 거의 일정한 유전율 값인 25~26의 값을 나타내며 B₂O₃를 첨가하여 1200°C에서 소결한 경우는 B₂O₃의 첨가량이 0.15 wt%이상인 범위에서 24~25의 값을 일정하게 나타내었다. 이러한 변화는 밀도와 수축율의 변화와 동일한 것으로서 미세구조가 치밀해짐에 따라 유전율이 증가하는 일반적인 경향으로 생각된다. MgTiO₃에 혼합되는 CaTiO₃의 양이 증가함에 따라 유전율이 증가하는 사실은 Sato²⁾ 등에 의해 보고된 바 있으며 본 실험에서도 7 mol%의 CaTiO₃를 함유한 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃의 경우가 더 큰 유전율을 나타내었다. 이는 상호 일치되는 결과로서 MgTiO₃의 유전율은 17이며 CaTiO₃의 유전율은 170임을 생각할 때 타당한 결과로 이해될 수 있다.⁷⁾

Fig. 8에서는 1100, 1150, 1200, 1350°C의 소결온도에서 B₂O₃ 첨가량의 변화에 따른 품질계수의 변화를 나타내었다. 1350°C에서 소결한 경우 소결첨가제의 양이 증가함에 따라 품질계수가 조금씩 감소함을 볼 수 있으며, 이것은 융점이 낮은 소결첨가제가 고온에서 반응하여 액상을 형성하여 시편내의 불순물로 존재하는 손실인자로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 소결온도가 1200°C인 경우는 소결첨가제의 양이 적정범위에 이를

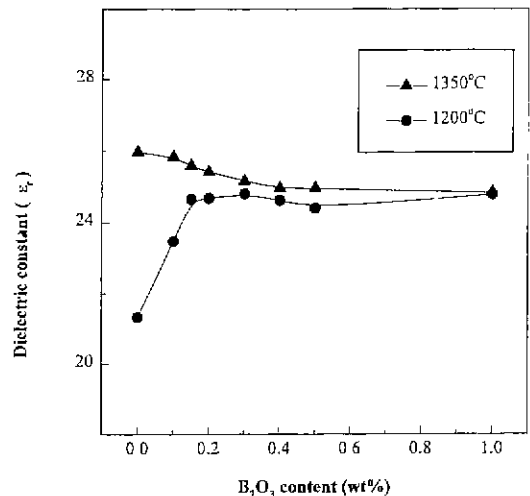


Fig. 7. Dielectric constant of the (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃ with B₂O₃ sintered at 1200°C and 1350°C.

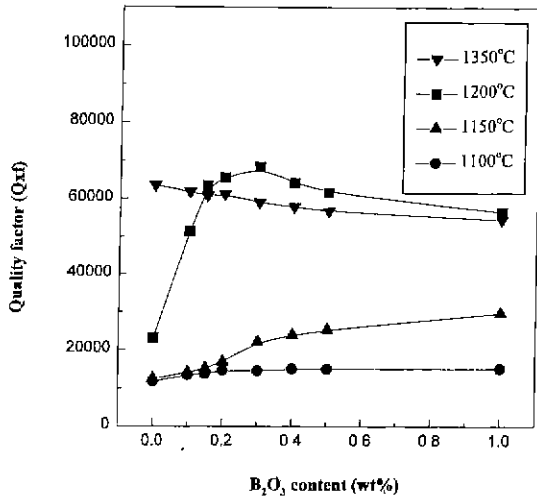


Fig. 8. Quality factor ($Q \times f$) of the $(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO_3$ with B_2O_3 sintered at different temperatures.

때까지는 품질계수가 급격히 증가하다가 0.3 wt% 이상으로 과잉첨가되면 소결성은 증진되지만 첨가된 소결첨가제가 1350°C에서와 같이 시편내의 손실인자로 작용하여 품질계수값이 하강하는 것으로 보여진다. 초기의 급격한 품질계수 값의 상승은 B_2O_3 첨가로 인해 소결성이 증진되기 때문으로 보이며, 1200°C에서 적정량의 B_2O_3 를 첨가한 영역에서는 1350°C에서 소결한 순수한 $(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO_3$ 보다 높은 품질계수값을 나타내었다. 이는 적정량의 B_2O_3 가 첨가되어 소결성이 증진되고 $MgTiO_3$ 와 $CaTiO_3$ 가 공유되어 있는 상을 형성하기 때문으로 보여진다. 이 밖에 1100°C와 1150°C에서 소결한 시편의 경우는 소결성과 연관되어 품질계수가 30000이하의 낮은 값을 나타내고 있다.

이러한 결과를 볼 때 소결첨가제를 적정범위내에서 첨가할 경우 기존의 $(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO_3$ 보다 더 낮은 소결

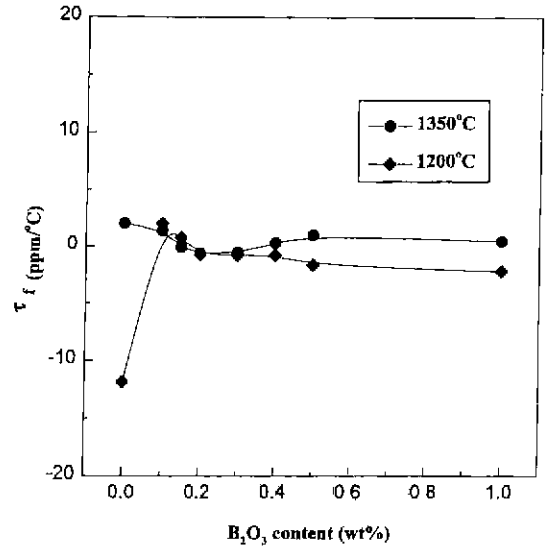


Fig. 9. Temperature coefficient of resonant frequency of the $(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO_3$ with B_2O_3 sintered at different temperatures.

온도에서 더 높은 품질계수값을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 X선 회절분석에서 나타난 결정구조에 영향을 미치지 않는 소결첨가제의 성질로 인해 저용점의 소결첨가제로 인한 저온소결에서 적정 첨가제 적용범위에 따른 $(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO_3$ 의 특성값 향상이 나타난 것으로 보인다. 또한 EPMA를 통해 나타난 $MgTiO_3$ 와 $CaTiO_3$ 가 공유되어 있는 제 3상이 마이크로파 유전특성에 미치는 영향을 확실히 규명할 수는 없지만, 이러한 마이크로파 유전특성 향상의 원인 중의 하나가 될 수 있다고 판단되는데 이에 대한 부분은 추후 보완 연구가 필요하다.

세라믹 유전체가 사용되는 온도범위는 상황에 따라 다양하게 적용되며 일반적으로 ± 5 ppm/°C범위가 회로의 안정성을 위한 적정범위로 사용되고 있다. Fig. 9는 일반

Table 2. Microwave Dielectric Properties of $(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO_3$ with $x B_2O_3$

x(wt%)	Sintering temperature (°C)	Relative density (%)	Shrinkage ratio (%)	Dielectric constant (ϵ_r)	Quality factor ($Q \times f$)	Temperature coefficient of resonant frequency (τ_f)
0.00	1350	97.0	15.3	25.96	64000	2.03
0.00	1200	85.7	12.2	21.32	23000	-11.87
0.10	1200	89.8	13.6	23.47	51500	2.02
0.15	1200	92.9	14.3	24.64	63500	0.75
0.20	1200	94.0	14.8	24.67	66000	-0.73
0.30	1200	94.2	15.3	24.79	68500	-0.79
0.40	1200	94.2	15.0	24.61	64500	-0.81
0.50	1200	94.8	15.1	24.39	62000	-1.66
1.00	1200	94.8	15.2	24.76	57000	-2.23

적으로 사용되는 20~80°C의 범위에서 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃에 B₂O₃를 첨가한 시편의 공진주파수의 온도계수를 보여주고 있다. 1200°C와 1350°C의 소결온도에서 모두 0 ppm/°C에 가까운 값을 보이며 1200°C에서는 미량의 소결첨가제를 첨가하여도 안정된 온도계수를 나타내었다. 이는 공진주파수의 온도계수를 0 ppm/°C로 보정한 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃조성에 소결첨가제를 첨가하여 나타난 결과라고 생각된다. 이를 통해 소결첨가제인 B₂O₃는 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃상의 공진주파수의 온도계수에도 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 즉 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃에 첨가된 B₂O₃는 마이크로파 유전특성에 품질계수는 향상시키며 공진주파수의 온도계수와 유전율에는 영향을 주지않는 소결첨가제임을 알 수 있었다. Table 2에 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃에 B₂O₃를 첨가하여 얻은 소결특성과 마이크로파 유전특성을 나타내었다.

4. 요약 및 결론

(Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃에 0.1~1.0 wt%의 B₂O₃를 첨가하여 합성하고 소결 및 마이크로파 유전 물성을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃의 소결온도를 B₂O₃의 첨가에 의해 1350°C보다 낮은 온도인 1200°C에서 소결하여 이온 밀도 대비 94%이상의 시편을 얻었다.
2. X선 회절분석을 통해 B₂O₃의 첨가가 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃의 결정구조에 영향을 주지않는 액상소결조제임을 알 수 있었다.
3. B₂O₃의 첨가량이 증가함에 따라 뚜렷한 입성장을 볼 수 있었고, 표면분석과 성분분석을 통하여 MgTiO₃와 CaTiO₃의 두 상이 형성됨을 확인할 수 있었으며, 또한 MgTiO₃와 CaTiO₃가 공유되어 있는 제3상을 관찰할 수 있었다.
4. (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃의 저온 소결에 효과를 나타내는 적정 B₂O₃의 범위는 0.15~0.4 wt%이며, 이 범위에서 (Mg_{0.93}Ca_{0.07})TiO₃의 마이크로파 유전특성은 유전율(ε_r)

은 24~25, 품질계수값(Q×f)는 70000, 공진주파수의 온도계수(τ_f)는 0 ppm/°C의 값을 나타내었다.

REFERENCES

1. 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**, 3173-74 (1983).
2. T. Sato, R. Miyamoto and A. Fukasawa, "Deviation of Dielectric Properties in Magnesium Titanate Ceramics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, 151-154 (1981).
3. J. H. Sohn, Y. Inaguma, S. O. Yoon, M. Itoh, T. Nakamura, S. J. Yoon and H. J. Kim, "Microwave Dielectric Characteristics of Ilmenite-type Titanates with High Q Values," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 5466-5470 (1994).
4. V. M. Ferreira and J. L. Baptista, "Loss Spectra of Pure and La-doped MgTiO₃ Microwave Ceramics," *J. Mater. Res.*, **10**, 2301-2305 (1995).
5. B. W. Hakki and P. D. Coleman, "A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Capacitance in the Millimeter Range," *IRE Trans Microwave Theory Tech.*, **8**, 402-410 (1960).
6. D. Kolar and D. Suvorov, "High Permittivity Microwave Ceramics," *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.*, **32**, 751-760 (1995).
7. H. Ouchi and S. Kawashima, "Dielectric Ceramics for Microwave Application," *J. Appl. Phys. Jpn.*, **24**, 60-64 (1985).
8. I. Burn, "Flux Sintered BaTiO₃ Dielectrics," *J. Mater. Sci.*, **17**, 1398-1408 (1982).
9. K. Wakino, T. Nishikawa, Y. Ishikawa and H. Tamura, "Microwave Characteristics of (Zn,Sn)TiO₃ and BaO-PbO-Nd₂O₃-TiO₂ Dielectric Resonator," *J. Am. Ceram. Soc.*, **67**(4), 278 (1984).
10. K. Wakino, T. Nishikawa, Y. Ishikawa and H. Tamura, "Dielectric Resonator Materials and Their Applications for Mobile Communication Systems," *Br. Ceram. Trans. Jpn.*, **89**, 39-43 (1990).