

저온소결 (Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO₃ 세라믹의 마이크로파 유전특성에 관한 연구

A Study on Microwave Dielectric Properties of Low-temperature Sintered (Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO₃ Ceramics

심우성, 방재철*

(Woo sung Sim and Jae cheol Bang)

Abstract

The effects of sintering additives such as Bi₂O₃ and V₂O₅ on the microwave dielectric and sintering properties of (Zn_{1-x}Mg_x)TiO₃ system were investigated. Highly dense samples were obtained for (Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO₃ at the sintering temperature range of 870~900°C with Bi₂O₃ and V₂O₅ additions of <1 wt.%, respectively. The microwave dielectric properties of (Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO₃ with 0.45 wt.%Bi₂O₃ and 0.55 wt.%V₂O₅ sintered at 900°C were as follows: Q×f₀ = 50,800 GHz, ε_r = 22, and τ_f = -53 ppm/°C. In order to improve temperature coefficient of resonant frequency, TiO₂ was added to the above system. The optimum amount of TiO₂ was 15 mol.% when sintered at 870°C, at which we could obtain following results: Q×f₀ = 32,800 GHz, ε_r = 26, and τ_f = 0 ppm/°C.

Key Words : (Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO₃, Microwave dielectric properties, Sintering additives, Bi₂O₃, V₂O₅, TiO₂

1. 서론

최근 이동통신기기의 소형화, 경량화, 고성능화에 대한 요구가 증대함에 [1-3] 따라 소자의 다층화 기술이 주목을 받고 있다. 이 기술의 적용을 위해서는 소자를 구성하는 유전체가 내부전극용 금속의 용융점보다 낮은 온도에서 소결이 되어야 한다. 한편, 마이크로파 대역에서는 다층소자 내부전극의 저항에 의한 손실이 소자에 큰 영향을 미치므로 내부전극용 금속으로 Ag나 Cu와 같이 전기전도도가 높은 재료를 사용하여야 한다. 그러나, 기존에 개발된 대부분의 마이크로파 유전체 재료

는 소결온도가 1200°C 이상으로써, Ag(961°C)나 Cu(1084°C)의 용융점보다 매우 높으므로 이들을 그대로 사용할 수 없다. 따라서, 기존의 마이크로파 유전체 재료에 소결조제를 첨가하거나, 그 자체로 소결온도가 낮은 저온소결용 마이크로파 유전체 재료를 개발하기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다. 최근 (Zn_{1-x}Mg_x)TiO₃계, ZnTiO₃계 등의 유전체 세라믹이 일반적인 고상 반응법으로 합성시 1100°C 이하에서 소결이 가능하고 유전특성이 우수하다고 밝혀졌으며 [1, 4-7], Kim등은 [6] MAS(Mechanically activated synthesis)란 공정을 통하여 수십 나노 크기의 분말을 700°C의 저온에서 단상의 (Zn_{1-x}Mg_x)TiO₃ 고용체를 형성하여 소결조제 없이도 저온에서 소결이 가능한 것을 보고하기도 하였다. 하지만 MAS법은 복잡한 공정과 고비용이 문제점으로 지적된다.

본 연구에서는 일반적인 고상 반응법으로 합성 한 여러 Zn/Mg 몰비의 (Zn_{1-x}Mg_x)TiO₃계 유전체

* : 순천향대학교 신소재화학공학과
(충남 아산시 신창면 읍내리 646,
Fax : 041-530-1722

Corresponding Author : bangj@sch.ac.kr
2003년 1월 22일 접수, 2003년 2월 24일 1차 심사완료
2003년 3월 28일 최종 심사완료

세라믹에 대한 실험을 통하여 소결과 마이크로파 유전특성이 우수하게 나타난 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3$ 계 유전체를 선정하였으며, 소결온도의 저하와 마이크로파 유전특성의 조절을 위하여 Bi_2O_3 와 V_2O_5 를 첨가하고, 저온소결에 따른 마이크로파 유전특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

$(Zn_{1-x}Mg_x)TiO_3$ 세라믹 유전체를 제조하기 위해 출발원료로 99.9% 이상의 순도를 갖는 ZnO, MgO, TiO_2 (고순도 화학연구소, Japan)분말을 선택하여 ZnO : MgO : $TiO_2 = 1-x : x : 1$ mol.비로 칭량한 후, 탈이온수와 지르코니아불을 이용하여 24시간 습식혼합을 하였다. 혼합물은 건조 후, 5°C/min의 승온속도로 900°C에서 2시간 하소하였으며, 하소된 분말에 순도 99.9% 이상의 Bi_2O_3 와 V_2O_5 분말을 일정비로 혼합한 다음, 24시간 습식혼합하고 전기오븐에서 건조한 후, 바인더로서 1 wt.%의 PVA를 첨가하여 혼합하였다. 혼합분말을 과립화(granulation)한 후, 원주형 몰드에 넣고 1000kg/cm²의 압력으로 일축가압성형하여 직경 15mm, 두께 6.75mm의 중형비 0.45로 성형한 다음, 전기로에서 5°C/min의 승온속도로 870°C와 900°C의 온도에서 5시간 소결하였다. 소결된 각 조성별 시편의 소결 밀도는 아르키메데스법(ASTM 373-72)으로 측정하였고, Network Analyzer (8720ES, Agilent, USA)를 이용하여 Hakki와 Coleman[1,8-9]에 의해 제시되고 Kobayashi[1,10]등이 보정한 평행판법(parallel plate method)을 이용하여 유전율(ϵ_r)과 품질계수($Q \times f_0$)를 측정하였으며, 개방공진기법(open cavity method)으로 공진주파수 온도계수(τ_f)를 측정하였다. 각 조성별 소결시편의 결정상은 XRD(D/Max-2200PC, Rigaku, Japan)로 분석을 하였으며, 미세구조는 전자주사현미경(JSM-5310, Jeol, Japan)으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

기존의 $ZnTiO_3$ 계 세라믹 유전체는 약한 금속-산소 결합 때문에 상대적으로 불안하여 단상 $ZnTiO_3$ 상을 얻기가 어렵다는 연구보고가 있다[11]. 그러나, 일부 Zn^{2+} 를 Mg^{2+} 로 치환한 $(Zn_{1-x}Mg_x)TiO_3$ 계 고용체는 격자상수의 감소와 더불어 금속-산소간

결합력이 증대하며 상형성의 용이성과 상의 안정성이 향상되어 실용성을 증가시킬 수가 있다[4-7]. 이에 본 연구에서는 $(Zn_{1-x}Mg_x)TiO_3$ 세라믹 유전체의 저온 상형성 및 소결을 통해 LTCC로의 적용 가능성을 연구하였다. 여러 Zn/Mg 몰비의 $(Zn_{1-x}Mg_x)TiO_3$ 계 세라믹 유전체는 1100°C~1300°C에서 소결이 되었으며, 그림 1에 나타난 바와 같이 대부분의 조성에서 품질계수($Q \times f_0$)가 ~100,000 GHz 이상으로 우수하게 나타났다. 이 중에서 소결 온도에 따른 $Q \times f_0$ 값의 변화가 작으며, MgO의 함량이 작아서 소결조제에 의한 소결온도의 저하 효과가 큰 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3$ 계 유전체를 선정하였으며, 소결온도의 추가적인 저하와 마이크로파 유전특성의 조절을 위해 여러 조성의 Bi_2O_3 와 V_2O_5 를 첨가하고, 이에 따른 마이크로파 유전특성을 관찰하였다.

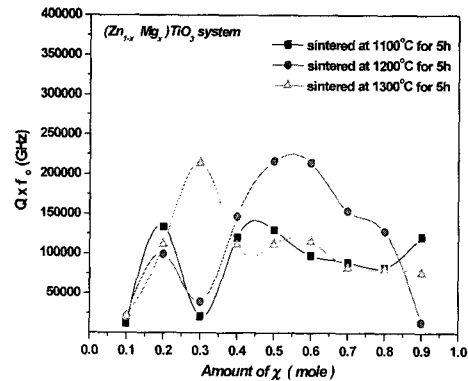


그림 1. 1100°C~1300°C에서 5시간 소결한 $(Zn_{1-x}Mg_x)TiO_3$ 계의 $Q \times f_0$ (GHz)값의 변화.

Fig. 1. Variation of $Q \times f_0$ (GHz) values of $(Zn_{1-x}Mg_x)TiO_3$ system sintered at 1100°C~1300°C for 5 h.

3.1 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + (1-x)$ wt.% $Bi_2O_3 + x$ wt.% V_2O_5 계의 마이크로파 유전특성

그림 2는 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3$ 에 $(1-x)$ wt.% $Bi_2O_3 + x$ wt.% V_2O_5 를 첨가하여 870°C와 900°C에서 각각 5시간 소결한 후에 측정된 소결밀도, 상대 유전상수(ϵ_r), 품질계수($Q \times f_0$), 및 공진주파수 온도계수(τ_f) 결과이다.

두 소결온도 모두에서 V_2O_5 가 0.2 wt.%이상 첨가되면 소결이 급격히 향상되어 치밀한 소결체를

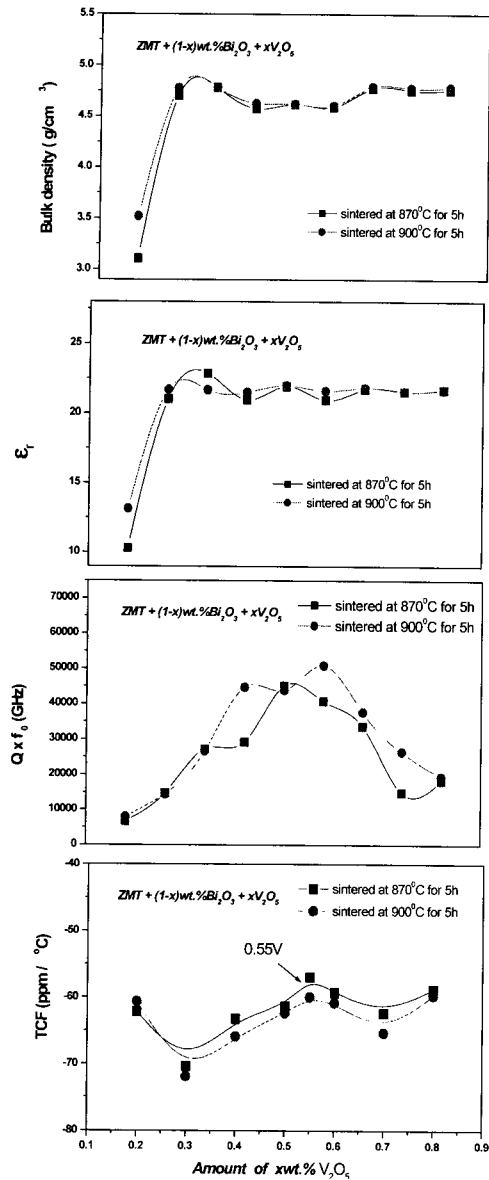
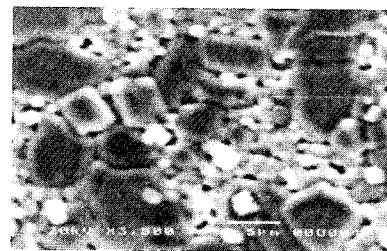


그림 2. 870°C와 900°C에서 5시간 소결한 (Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO₃ + (1-x) wt.%Bi₂O₃ + x wt.%V₂O₅ 계의 Bi₂O₃와 V₂O₅ 첨가에 따른 소결밀도와 마이크로파 유전특성의 변화.

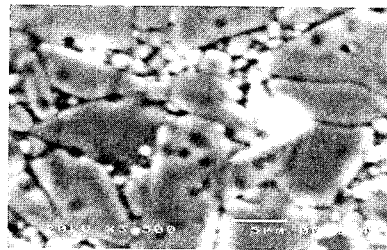
Fig. 2. Effect of Bi₂O₃ and V₂O₅ addition to (Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO₃ + (1-x) wt.%Bi₂O₃ + x wt. %V₂O₅ system on density and microwave dielectric properties. Specimens were sintered at 870°C and 900°C for 5 h.

얻을 수 있었다. ε_r은 두 소결온도 모두 0.2 wt.% ~ 1 wt.%V₂O₅ 조성에서 약 22로 큰 변화가 나타나지 않았다. Q×f₀값은 조성에 따라 큰 변화를 보였으며, 최대값은 소결온도에 따라 다르게 나타났다. 이중 소결온도 900°C에서 0.55 wt.%V₂O₅ 첨가 시 Q×f₀=50,800 GHz의 높은 값을 나타냈다.

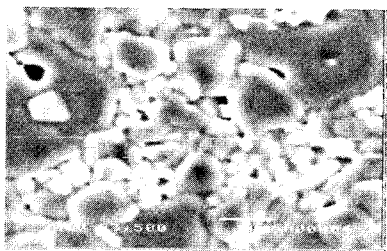
τ_f는 -55 ppm/°C ~ -70 ppm/°C 범위의 값으로 측정되었으며, 이는 (Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO₃의 τ_f가 음이라는 점으로부터 예측되었던 결과이다.



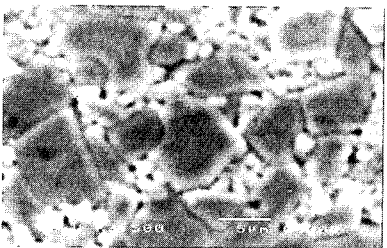
(a) 0.2 wt.%V₂O₅ (870°C)



(b) 0.55 wt.%V₂O₅ (870°C)



(c) 0.8 wt.%V₂O₅ (870°C)



(d) 0.2 wt.%V₂O₅ (900°C)

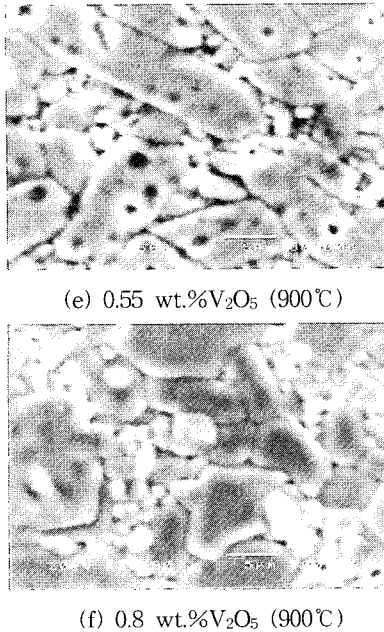


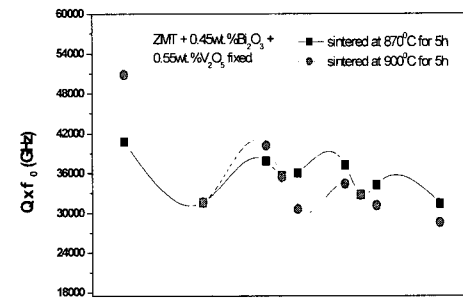
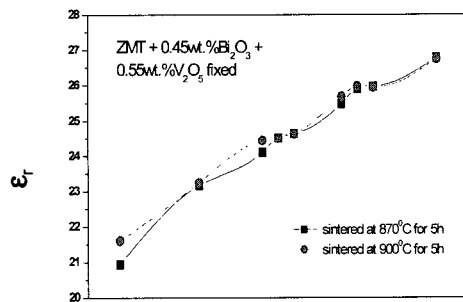
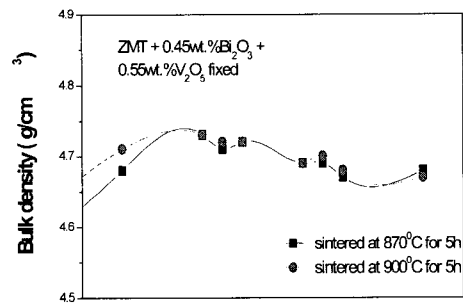
그림 3. 870°C와 900°C에서 5시간 소결한 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + (1-x) wt.\%Bi_2O_3 + x wt.\%V_2O_5$ 계의 Bi_2O_3 와 V_2O_5 첨가량에 따른 주사전자 현미경 미세구조.
 (a) $x=0.2 wt.\%$ (b) $x=0.55 wt.\%$
 (c) $x=0.8 wt.\%$ (870°C/5h) ;
 (d) $x=0.2 wt.\%$ (e) $x=0.55 wt.\%$
 (f) $x=0.8 wt.\%$ (900°C/5h).

Fig. 3. SEM micrographs of $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + (1-x) wt.\%Bi_2O_3 + x wt.\%V_2O_5$ system with Bi_2O_3 and V_2O_5 contents of (a) $x=0.2 wt.\%$ (b) $x=0.55 wt.\%$ (c) $x=0.8 wt.\%$ sintered at 870°C for 5h (d) $x=0.2 wt.\%$ (e) $x=0.55 wt.\%$ (f) $x=0.8 wt.\%$ sintered at 900°C for 5h.

그림 3에 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + (1-x) wt.\%Bi_2O_3 + x wt.\%V_2O_5$ 계 유전체를 870°C와 900°C에서 소결한 후의 미세조직 사진을 나타내었다. 두 온도 모두 0.45 wt.% $Bi_2O_3 + 0.55 wt.\% V_2O_5$ 의 조성에서 보다 치밀하고 결정립 크기 분포가 균일한 구조가 관찰되었으며, 이것이 품질계수가 높게 나타나는 주요 원인으로 사료된다[12-14]. 한편 870°C의 경우는 900°C의 경우보다 치밀화도가 상대적으로 떨어져 품질계수가 다소 낮게 나타난 것으로 판단된다.

3.2 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 wt.\%Bi_2O_3 + 0.55 wt.\%V_2O_5 + x mol.\%TiO_2$ 계의 마이크로파 유전특성

한편 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 wt.\%Bi_2O_3 + 0.55 wt.\%V_2O_5$ 계 유전체의 τ_f 를 양(+)의 값으로 증가시키기 위하여, $\tau_f \sim +430 ppm/^\circ C$, $\epsilon_r \sim 100$ 인 TiO_2 를 첨가하였으며, 이에 따른 소결 및 유전특성의 변화를 관찰하였다. 이를 Fig. 4에 나타내었는데 그림에서와 같이 두 소결온도에서 모두 TiO_2 양의 증가에 따라 소결밀도는 다소 감소하였으며 ϵ_r 과 τ_f 는 증가하는 경향을 보였다. $Q \times f_0$ 값은 불규칙적인 변화를 보였으나 TiO_2 첨가전 보다는 다소 저하되는 경향을 나타냈다. 이는 TiO_2 가 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3$ 에 고용되지 않고, 대부분 석출물 형태로 존재함을 나타낸다.



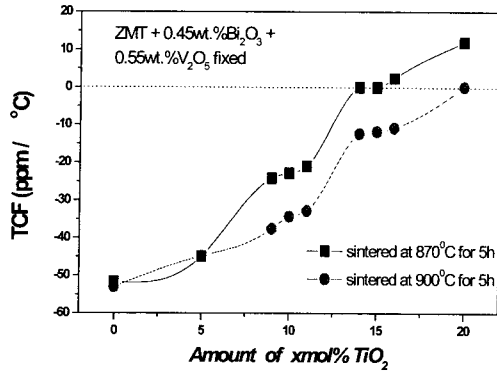


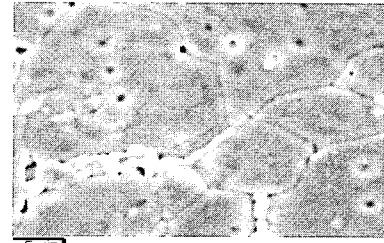
그림 4. 870°C와 900°C에서 5시간 소결한 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 \text{ wt.}\%Bi_2O_3 + 0.55 \text{ wt.}\%V_2O_5$ 계의 TiO_2 첨가에 따른 소결밀도와 마이크로파 유전 특성의 영향.

Fig. 4. Effect of TiO_2 addition to $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 \text{ wt.}\%Bi_2O_3 + 0.55 \text{ wt.}\%V_2O_5$ system on density and microwave dielectric properties. Specimens were sintered at 870°C and 900°C for 5h.

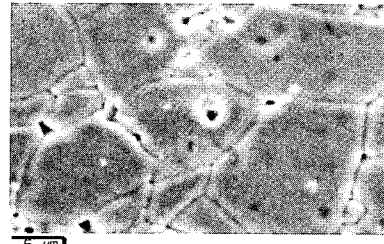
즉, rutile상의 TiO_2 석출물이 소결체의 치밀화를 억제하여 소결의 저하를 초래하며, 이에 따라 $Q \times f_0$ 값의 저하가 나타나고, TiO_2 자체의 높은 유전상수와 공진주파수 온도계수에 의하여 TiO_2 첨가량에 비례하여 혼합법칙에 따라 ϵ_r 과 τ_f 가 증가하는 것으로 사료된다[15-18].

한편, τ_f 는 870°C와 900°C 소결시편의 경우 각각 14 mol.%와 20 mol.% TiO_2 첨가시에 0 ppm/°C가 되었다. $Q \times f_0$ 값은 두 소결온도에서 9 mol.% TiO_2 에서 ~35,000GHz 이상의 최대값을 나타냈으며, 그 이후의 첨가량 증가에 대해서는 불규칙적인 양상을 보였으나 전반적으로 감소하였다.

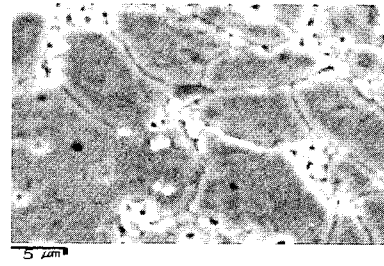
한편, 앞서 언급한 rutile상의 존재를 확인하기 위해 TiO_2 첨가에 따른 미세구조와 XRD 분석을 행하였다. 그림 5는 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 \text{ wt.}\%Bi_2O_3 + 0.55 \text{ wt.}\%V_2O_5$ 에 TiO_2 를 각각 5, 9, 15, 20 mol.% 첨가하여 870°C에서 소결한 후의 미세구조이다. TiO_2 의 첨가량이 증가할수록 소결의 저하에 따른 입계 기공도의 증가를 관찰할 수 있었다. 즉 앞서 언급한 TiO_2 첨가에 따른 품질계수의 전반적인 감소 추세의 이유를 확인할 수 있었다. 하지만 TiO_2 의 존재여부는 미세조직에서는 확인할 수 없었으며, 다만 9 mol.% TiO_2 를 첨가한 시편의 미세조직이 가장 치밀하고 균일함을 확인할 수 있었다.



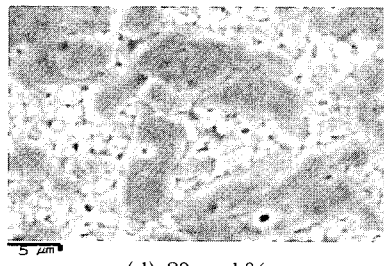
(a) 5 mol.%



(b) 9 mol.%



(c) 15 mol.%



(d) 20 mol.%

그림 5. 870°C에서 5시간 소결한 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 \text{ wt.}\%Bi_2O_3 + 0.55 \text{ wt.}\%V_2O_5$ 계에 TiO_2 를 첨가한 미세구조; (a) 5 mol.%, (b) 10 mol.%, (c) 15 mol.%, (d) 20 mol.%.

Fig. 5. SEM micrographs of $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 \text{ wt.}\%Bi_2O_3 + 0.55 \text{ wt.}\%V_2O_5$ system with TiO_2 contents of (a) 5 mol.%, (b) 10 mol.%, (c) 15 mol.%, and (d) 20 mol.%. Specimens were sintered at 870°C for 5h.

rutile상의 존재여부는 XRD 분석 결과로부터 확인할 수 있었는데 Fig. 6에 나타난 바와 같이 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 \text{ wt.}\%Bi_2O_3 + 0.55 \text{ wt.}\%V_2O_5$ 에 TiO_2 를 각각 0, 5, 10, 15, 20 mol.%를 첨가한 시편을 870°C와 900°C에서 소결하면, TiO_2 의 첨가량에 관계없이 hexagonal의 $(Zn,Mg)TiO_3$ 와 $ZnTiO_3$ 상이 공존하였으며 TiO_2 의 첨가량에 비례하여 hexagonal상에 고용되지 않는 rutile상의 회절강도가 증가함을 알 수 있다.

한편, 이차상으로 $BiVO_4$ 가 존재하는 것을 알 수 있었는데, $BiVO_4$ 가 저온소결 기구에 미치는 영향

은 현재 연구 중에 있다.

이상을 종합하면, Bi_2O_3, V_2O_5 를 소결조제로 첨가하여 900°C이하에서도 hexagonal의 $(Zn,Mg)TiO_3 + ZnTiO_3$ 상을 형성할 수 있음을 알 수 있었으며, 소결조제 첨가로 인한 마이크로파 유전특성의 저하가 있었으나, $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 \text{ wt.}\%Bi_2O_3 + 0.55 \text{ wt.}\%V_2O_5 + 15 \text{ mol.}\%TiO_2$ 조성을 870°C에서 소결하여 $Q \times f_0 = 32,800 \text{ GHz}, \epsilon_r = 26, \tau_f = 0 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 의 우수한 마이크로파 유전체를 제조할 수 있었다.

4. 결론

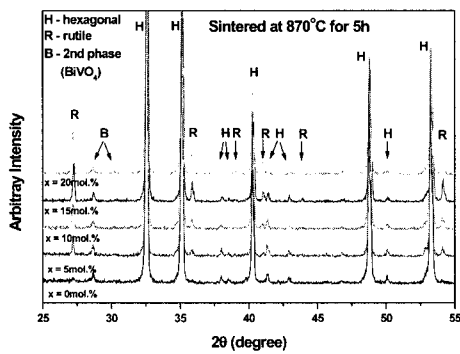
본 연구에서는 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3$ 세라믹 유전체의 저온소결 특성 및 마이크로파 유전특성의 조절을 위해 소결조제(Bi_2O_3, V_2O_5)와 TiO_2 를 첨가하여 시험하였다. $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 \text{ wt.}\%Bi_2O_3 + 0.55 \text{ wt.}\%V_2O_5$ 의 조성으로 900°C에서 5시간 소결한 시편의 경우 $Q \times f_0 = 50,800 \text{ GHz}, \epsilon_r = 22, \tau_f \sim -60 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 이 되었다. 공진주파수 온도계수를 개선하기 위하여 위 조성에 TiO_2 를 첨가한 결과, 15 mol.% 첨가시 870°C에서 5시간 소결하면 $Q \times f_0 = 32,800 \text{ GHz}, \epsilon_r = 26, \tau_f = 0 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 의 마이크로파 유전체를 얻을 수 있었다.

감사의 글

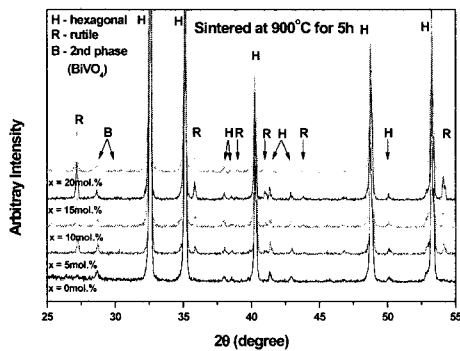
본 연구는 2002학년도 순천향대학교 대학자체 학술연구비 지원을 받아 수행한 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 이지형, 방재철, "ZnTiO₃계 마이크로파용 유전체 세라믹스의 저온소결에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 15권, 1호, p. 30, 2002.
- [2] W. Wersing, "High frequency ceramic dielectrics and their applications for microwave components", in Electronic Ceramics, edited by B. C. H. Steel, Elsevier Science Pub. Ltd., p. 67, 1991.
- [3] J. Plourde and C. L. Ren, "Application of dielectric resonators in microwave



(a)



(b)

그림 6. 870°C와 900°C에서 5시간 소결한 $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 \text{ wt.}\%Bi_2O_3 + 0.55 \text{ wt.}\%V_2O_5$ 계의 TiO_2 첨가에 따른 X-선 회절 패턴: (a) 870°C/5h, (b) 900°C/5h.

Fig. 6. XRD patterns of $(Zn_{0.8}Mg_{0.2})TiO_3 + 0.45 \text{ wt.}\%Bi_2O_3 + 0.55 \text{ wt.}\%V_2O_5$ system with TiO_2 contents sintered at (a) 870°C for 5h and (b) 900°C for 5h.

- components”, IEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-29, p. 754, 1981.
- [4] H. T. Kim, Y. H. Kim, and J. D. Byun, “Phase transtormation and thermal stability in zinc magnesium titanates”, J. Korean Phy. Soc., Vol. 32, No. 2, p. S159, 1997.
- [5] H. T. Kim, Y. H. Kim, and J. D. Byun, “Microwave dielectric properties of magnesium-modified zinc titanates”, J. Korean. Phy. Soc., Vol. 32, No. 2, p. S346, 1998.
- [6] Hyo Tae Kim, Sahn Nahm, and Jae Dong Byun, “Low-Fired (Zn,Mg)TiO₃ microwave dielectrics”, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 82, No. 12, p. 3476, 1999.
- [7] H. T. Kim, Y. H. Kim, and J. D. Byun, “Microstructure and microwave dielectric properties of modified zinc titanates(II)”, Mater. Res. Bull., Vol. 33, No. 6, p. 975, 1998.
- [8] B. W. Hakki and P. D. Coleman, “A dielectric resonator method of measuring inductive capacitance in the millimeter range”, IRE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-8, p. 402, 1960.
- [9] 김준철, 이형규, 방규석, “고주파 유전체 재료의 특성 측정방법”, 전기전자재료학회지, 11권, 5호, p. 412, 1998.
- [10] Y. Kobayashi and M. Kapoh, “Microwave measurement of dielectric properties of low-loss materials by the dielectric rod resonator method”, IEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-33, p. 586, 1985.
- [11] S. F. Bartram and R. A. Slepety, “Compound formation and crystal structure in the system ZnO-TiO₂”, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 44, No. 10, p. 493, 1961.
- [12] 박재환, 박재관, “마이크로파 유전체의 미세구조와 품질계수의 상관관계에 대한 컴퓨터 시뮬레이션”, 한국재료학회지, 11권, 2호, p. 146, 2001.
- [13] 안일석, 윤기현, 김응수, “(Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ 세라믹스의 마이크로파 유전특성에 미치는(B₂O₃, Li₂O)의 영향”, 한국재료학회지, 9권, 10호, p. 1041, 1999.
- [14] 한진우, 김동영, 전동석, 이상석, “Li을 첨가한 MgTiO₃-CaTiO₃계 세라믹 유전체의 마이크로파 유전특성”, 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, p. 190, 2001.
- [15] 최지원, 하종윤, 안병국, 박용욱, 윤석진, 김현재, “결정구조와 이온 분극률에 따른 (Al,Mg,Ta)O₂ 고용체의 마이크로파 유전상수 특성”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 2호, p. 108, 2003.
- [16] W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, “Introduction to Ceramics(2nd Edition)”, John Wiley & Sons, p. 947, 1976.
- [17] K. Tatsuki, “Dielectric properties of PbO-ZrO-ReOX ceramics at microwave frequency”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 26, No. 2, p. 80, 1987.
- [18] 이희영, 우동찬, 한주환, 김태홍, 최태구, “불순물 첨가에 따른 (1-x)MgTiO₃-xCaTiO₃ 세라믹스의 마이크로웨이브 유전특성변화”, 한국세라믹학회지, 34권, 8호, p. 843, 1997