

(1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 마이크로파 유전 특성

論 文
55C-7-2

Microwave Dielectric Properties of the (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) Ceramics

金 再 植[†] · 崔 儀 善^{*} · 裴 善 基^{**} · 李 永 熙^{***}
(Jae-Sik Kim · Eui-Sun Choi · Seon-Gi Bae · Young-Hie Lee)

Abstract - The effect of x on microwave dielectric properties of the (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) ceramics for microwave components were investigated. All specimens prepared by the conventional mixed oxied method and sintered at 1450°C. Microwave dielectric properties of the (1-x)Mg₄Ta₂O₉-xTiO₂ ceramics were influenced by MgTi₂O₅ phase. Also the microwave dielectric properties of the (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(CaTiO₃, SrTiO₃) ceramics were dominated with an addition of CaTiO₃ and SrTiO₃. The dielectric constant (ϵ_r), quality factor ($Q \times f_r$) and temperature coefficient of the resonant frequency (TCRF, τ_f) of the (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) ceramics were 12.96~70.98, 5,132~186,410 GHz and -35.82~+75.96 ppm/°C, respectively, and depend on x and addition materials.

Key Words : Mg₄Ta₂O₉, High Quality Factor, TiO₂, MgTi₂O₅, (Ca, Sr)TiO₃

1. 서 론

마이크로파 집적회로 기술은 위성 DMB와 같은 3D 영상을 위한 통신시스템의 발전을 가져왔다. 유전체 세라믹스는 이들 통신 시스템에서 공진기나 필터로 사용되어진다.[1] 이런 유전체 세라믹스의 사용은 집적도, 온도 안정성, 저가격화 등의 장점을 가져온다. 이들 유전체 공진기는 그 사용 용도 상 소형화, 높은 주파수 선택성 및 고신뢰도 등의 특성을 갖추어야 한다.[2] 일반적으로 유전체 공진기의 크기는 $\lambda \cdot k^{-1/2}$ (λ : wavelength, k : dielectric constant)에 비례하므로 높은 유전율을 가지는 재료를 사용함으로써 유전체 공진기의 크기를 줄일 수 있다. 이에 1990년도 초에는 BaO-Re₂O₃[3], (Pb_{1-x}Ca_x)ZrO₃[4]와 같은 높은 유전율(약 100)을 가지는 물질에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. 그러나 최근 사용주파수의 S대역(2~4GHz) 또는 X대역(8~12.5GHz)으로의 이동으로 인하여 높은 유전율을 갖는 재료 보다는 높은 품질계수(quality factor, $Q \cong \tan \delta^{-1}$)를 갖는 재료가 요구되고 있다.[5] 높은 품질계수 특성과 관련하여, 몇몇 유전체 세라믹스 재료가 연구되어 왔다. 그 중, MgO-Ta₂O₅ system에서는 MgTa₂O₆와 Mg₅Ta₄O₁₅ 세라믹스가 각각 59,600 GHz와 14,400 GHz를 가지는 것으로 보고되었다.[6, 7] 그러나 이 재료들의 품질계수 특성은 마이크로파 구성소자로서 요구되는 특성을 충분히 만족시키지 못한다. 따라서 더욱 개선된

기능을 위하여 낮은 손실을 가지는 새로운 재료가 요구된다.[8]

이에 본 연구에서는 우수한 품질계수를 가지는 재료의 개발을 위하여 MgO-Ta₂O₅ system 중에서 연구가 미흡한 Mg₄Ta₂O₉ 세라믹스의 마이크로파 유전 특성을 조사하였고, 또한 Mg₄Ta₂O₉를 TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃ 와[9-11] 몰비로 혼합함으로써 첨가물에 따른 마이크로파 유전 특성을 조사하였다.

2. 실 험

모든 (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스는 일반적인 산화물 혼합법으로 제조하였다. 고순도 산화물과 탄화물을 출발물질로 사용하였다. 출발물질을 Mg₄Ta₂O₉, CaTiO₃, SrTiO₃의 조성식에 맞게 평량한 후 볼밀을 사용하여 알코올을 분산매로 하여 24시간동안 혼합하였다. 혼합된 파우더를 건조하였고, 각각 1200°C와 1100°C에서 3시간동안 소소하였다. 하소한 Mg₄Ta₂O₉, CaTiO₃, SrTiO₃ 파우더와 TiO₂를 (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃)의 조성식으로 혼합한 후 건조하였다. 혼합된 파우더를 직경 12mm의 원통 모양으로 1000kg/cm³의 압력으로 단축성형하였고, 1450°C의 소결온도에서 10시간동안 소결하였다.

소결된 시편의 밀도는 아르키메데스 방법을 사용하여 측정하였다. 마이크로파 유전특성을 측정하기 전에 표면처리를 하여 시편 표면의 불균일을 제거하였다. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 결정구조는 Cuka1의 방사선을 0.05°의 주사폭, 5°/min의 주사속도로 10°~70°의 2θ 범위로 주사하여 X-선 회절 분석을 이용하여 측정하였다. 표면처리후 열에칭을 한 표면을 SEM으로 측정하여 결정립 등의 미세구조를 조사하였다. 마이크로파대역에서의 유전특성은 Hakki와 Coleman[12]에 의해 제시되고 Kobayashi[13]에 의해 보정된 유전체 공진기법으로 HPE5071B 네트워크

† 교신저자, 正會員 : 光云大學 電子材料工學科 博士課程
E-mail : hulhaha@kw.ac.kr

* 正會員 : 光云大學 電子材料工學科 工博

** 正會員 : 仁川大學 電氣工學科 教授 · 工博

*** 正會員 : 光云大學 電子材料工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2006年 3月 7日

最終完了 : 2006年 6月 7日

분석기를 사용하여 조사하였다. 공진주파수의 TE₀₁₁ 모드에서 유전상수를 결정하였고 TE₀₁₆ 공진모드에서 확인하였다. 공진주파수의 온도계수는 다음 식으로부터 구하였다.

$$TCRF = \left(\frac{1}{f_{25}} \right) \cdot \left(\frac{f_{85} - f_{25}}{60} \right) \cdot 10^6 (\text{ppm}/^\circ\text{C}) \quad (1)$$

여기서 f₂₅ 와 f₈₅ 은 각각 25°C 와 85°C에서의 공진주파수이다.

3. 결과 및 고찰

1450°C에서 소결한 (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 X-선 회절패턴을 그림 1과 2에 나타내었다. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-xTiO₂ 세라믹스의 경우 (그림 1.), x ≤ 0.3의 조성에서는 주상으로 Mg₄Ta₂O₉ 상이 나타났다. 하지만 x=0.3의 조성에서부터 MgTi₂O₅ 상의 회절피크가 나타났다. (2θ=17.8°, 45.4°, 58.8°)[14] 이 MgTi₂O₅ 상은 결합성이 강한 상의 형성에 의한 것으로 TiO₂를 첨가함에 따라 일반적인 산화물 혼합법에서 흔히 나타나는 것으로 보고되고 있다.[15] TiO₂가 다량 첨가된 x=0.7의 조성에서는 주상으로 MgTi₂O₅ 상이 나타났고, MgTi₂O₅ 상은 ε_r=17.4, Q×f_r=47,000 GHz, τ_f=66 ppm/°C의 특성을 갖는 것으로 보고되고 있다.[16] (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 경우 (그림 2), 주상으로 Mg₄Ta₂O₉ 상이 나타났으며 첨가량이 증가함에 따라 CaTiO₃ 상과 SrTiO₃ 상이 나타났다. 또한 Mg₄Ta₂O₉ 상과 CaTiO₃, SrTiO₃ 상의 반응에 의한 상이 나타나지 않았다. 이로 인하여 Mg₄Ta₂O₉ 상과 CaTiO₃, SrTiO₃ 상은 반응 없이 공존하는 것으로 생각된다. 2θ=32.4°에서 회절 피크의 이동이 나타났다. 이는 Mg₄Ta₂O₉ 상과 CaTiO₃, SrTiO₃ 상의 공존에 의하여 Mg₄Ta₂O₉ 상의 결정구조가 왜곡되었기 때문으로 생각된다. 그림 2의 X-선 회절분석 결과, CaTiO₃와 SrTiO₃의 첨가가 (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 마이크로파 유전특성에 영향을 줄 것으로 생각된다.

(1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 미세구조를 그림 3에 나타내었다. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-xTiO₂ 세라믹스의 경우(그림 3-a, b, c), x ≤ 0.3의 조성에서는 x가 증가함에 따라 기공이 감소하였다. 이는 치밀화를 증진시키는 것으로 알려진 TiO₂의 첨가 때문으로 생각된다. TiO₂를 첨가하였을 경우, 분자의 확산계수가 증가되어 소결성이 증가되는 것으로 보고되고 있다.[17] 하지만, x ≥ 0.4의 조성에서는 기공이 증가하였다. 이는 TiO₂ 첨가에 의하여 형성되는 MgTi₂O₅가 1500~1550°C[16]의 소결온도를 가지기 때문에 (1-x)Mg₄Ta₂O₉-xTiO₂ 세라믹스의 소결온도인 1450°C에서는 MgTi₂O₅ 상이 치밀화 되지 못하여 기공이 증가하는 것으로 생각된다. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 경우, 모든 조성에서 치밀한 미세구조를 나타내었다. 또한 (1-x)Mg₄Ta₂O₉-xCaTiO₃ 세라믹스(그림 3-d)와 (1-x)Mg₄Ta₂O₉-xSrTiO₃ 세라믹스(그림 3-e)는 두 가지 모양의 결정립을 나타내었다. 이는 X-선 회절 분석에서 알 수 있듯이, Mg₄Ta₂O₉가 각각 CaTiO₃, SrTiO₃와 공존하기 때문으로 생각된다.

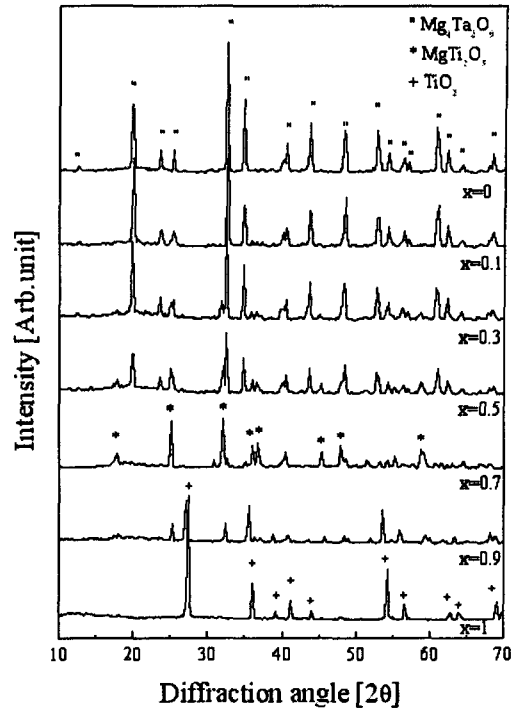


그림 1. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-xTiO₂ 세라믹스의 X-선 회절 패턴.
Fig. 1. X-ray diffraction patterns of (1-x)Mg₄Ta₂O₉-xTiO₂ ceramics.

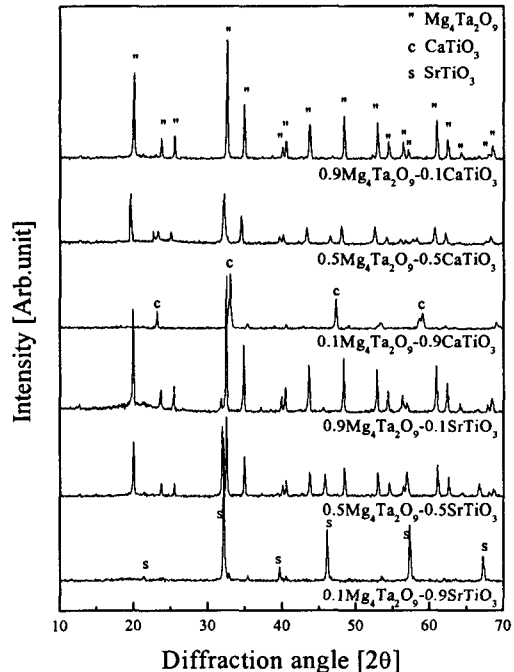
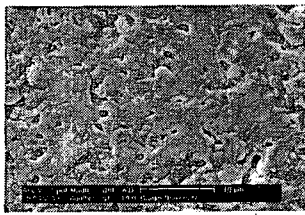
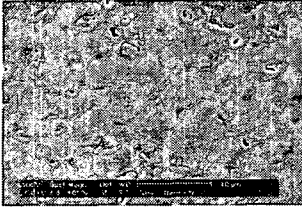


그림 2. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 X-선 회절 패턴.
Fig. 2. X-ray diffraction patterns of (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(CaTiO₃, SrTiO₃) ceramics.



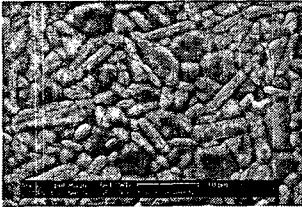
(a) 0.9Mg₄Ta₂O₉-0.1TiO₂



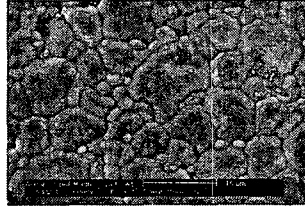
(b) 0.7Mg₄Ta₂O₉-0.3TiO₂



(c) 0.5Mg₄Ta₂O₉-0.5TiO₂



(d) 0.7Mg₄Ta₂O₉-0.3CaTiO₃



(e) 0.7Mg₄Ta₂O₉-0.3SrTiO₃

그림 3. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 미세구조.

Fig. 3. Microstructure of (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) ceramics.

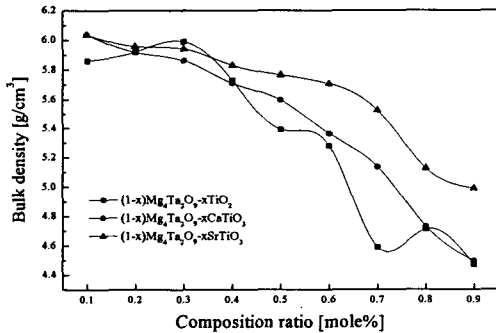


그림 4. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 밀도.
Fig. 4. Bulk density of (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) ceramics.

그림 4에 (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 소결밀도를 나타내었다. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-xTiO₂ 세라믹스의 경우, 낮은 밀도값을 가지는 TiO₂ (4.25g/cm³)를 첨가함에 따라 순수한 Mg₄Ta₂O₉ (이론밀도 : 6.17g/cm³)보다 낮은 값을 나타내었지만, 0.2 ≤ x ≤ 0.3의 조성에서는 치밀화를 증진시키는 TiO₂의 영향으로 밀도가 증가하였다. 하지만 x ≥ 0.4의 조성에서는 TiO₂ 첨가에 의하여 형성되는 MgTi₂O₅의 높은 소결온도에 의한 기공이 증가하면서 밀도가 감소하는 것으로 생각된다. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 경우, Mg₄Ta₂O₉과 공존하는 CaTiO₃ (이론밀도 : 4.03g/cm³)와

SrTiO₃ (이론밀도 : 4.98g/cm³)가 낮은 밀도를 가지고 있기 때문에 첨가량이 증가함에 따라 밀도가 감소하는 것으로 생각된다.

(1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 유전상수를 그림 5에 나타내었다. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-xTiO₂ 세라믹스의 경우, 100의 높은 유전상수 값을 가지는 TiO₂를 첨가함에도 불구하고 순수한 Mg₄Ta₂O₉보다 약간 높은 값을 나타내었다. 이는 TiO₂가 낮은 유전상수 값을 가지는 MgTi₂O₅ (ε_r=17.4)로 존재하기 때문으로 생각된다. 또한 0.8 ≤ x ≤ 0.9의 조성에서는 다른 조성보다 높은 값을 나타내었다. 이는 그림 1에서 알 수 있듯이 0.8 ≤ x ≤ 0.9의 조성에서는 TiO₂가 존재하기 때문으로 생각된다. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 유전상수는 CaTiO₃ (ε_r=170)와 SrTiO₃ (ε_r=270)가 높은 값을 가지기 때문에 CaTiO₃와 SrTiO₃를 첨가함에 따라 증가하는 것으로 생각된다. X-선 회절 분석에서 알 수 있듯이, Mg₄Ta₂O₉과 CaTiO₃, SrTiO₃는 반응없이 공존하기 때문에 CaTiO₃, SrTiO₃의 첨가량에 따라 (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 유전상수가 결정되는 것으로 생각된다.

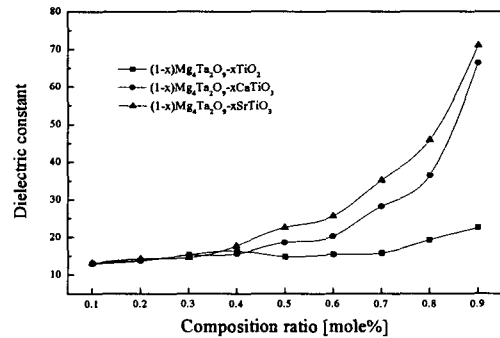


그림 5. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 유전상수.

Fig. 5. Dielectric constant of (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) ceramics.

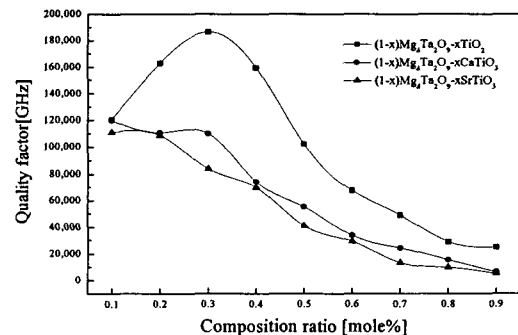


그림 6. (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹스의 품질계수.

Fig. 6. Quality factor of (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) ceramics.

그림 6에 (1-x)Mg₄Ta₂O₉-x(TiO₂, CaTiO₃, SrTiO₃) 세라믹

스의 품질계수를 나타내었다. $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x\text{TiO}_2$ 세라믹스의 경우, TiO_2 를 첨가함에 따라 순수한 $\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9$ 세라믹스보다 낮은 밀도를 나타내지만(그림 4), $x \leq 0.3$ 의 조성에서는 높은 품질계수를 나타내었다. 이는 첨가하는 TiO_2 의 영향으로 치밀화와 결정립 크기의 균일화가 증가되었기 때문으로 생각된다. 하지만, $x \geq 0.4$ 의 조성에서는 TiO_2 의 첨가로 인하여 나타나는 이차상인 MgTi_2O_5 상의 형성에 의하여 품질계수가 감소하는 것으로 생각된다. 또한 MgTi_2O_5 상의 높은 소결온도로 인한 기공의 증가도 품질계수 감소의 원인으로 생각된다.[18, 19] $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ 세라믹스의 경우, $\text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3$ 를 첨가함에 따라 품질계수는 감소하였다. 이는 미세구조결합의 증가보다는 CaTiO_3 (12,900 GHz), SrTiO_3 (3,000 GHz)가 낮은 품질계수를 가지기 때문으로 생각된다.

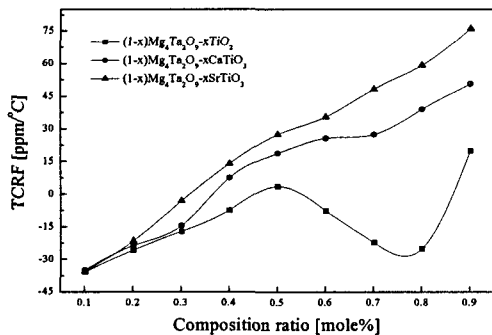


그림 7. $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{TiO}_2, \text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ 세라믹스의 공진주파수의 온도계수.

Fig. 7. Temperature coefficient of resonant frequency of $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{TiO}_2, \text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ ceramics.

표 1. $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{TiO}_2, \text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ 세라믹스의 마이크로파 유전 특성.

Table. 1. Microwave dielectric properties of the $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{TiO}_2, \text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ ceramics.

Composition	Dielectric Properties	ϵ_r	$Q \times f_r$ [GHz]	τ_f [ppm/°C]
$\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9$ ceramics		11.76	116,800	-36.02
$0.5\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-0.5\text{TiO}_2$ ceramics		14.83	102,100	+3.46
$0.6\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-0.4\text{CaTiO}_3$ ceramics		15.58	74,368	+7.46
$0.7\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-0.3\text{SrTiO}_3$ ceramics		14.56	83,924	-3.14

그림 7에 $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{TiO}_2, \text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ 세라믹스의 공진주파수의 온도계수를 나타내었다. 전체적으로 TCRF는 $\text{TiO}_2, \text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3$ 의 첨가에 따라 양의 방향으로 이동하였다. 이는 첨가하는 물질들이 큰 양의 TCRF를 가지고 있기 때문으로 생각된다. 그러나 $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x\text{TiO}_2$ 세라믹스의 경우, $0.6 \leq x \leq 0.8$ 의 조성에서는 TCRF가 음의 방향으로 이동하였다. 이 현상은 그림 1의 X-선 회절 분석 결

과에서 알 수 있듯이, 음의 TCRF를 가지는 MgTi_2O_5 (-66 ppm/°C)의 형성이 많이 증가하였기 때문으로 생각된다. 이외의 모든 경우에는 TiO_2 (+450 ppm/°C), CaTiO_3 (+800 ppm/°C), SrTiO_3 (+1,200 ppm/°C)의 TCRF 값에 의하여 $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{TiO}_2, \text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ 세라믹스의 TCRF가 영향을 받는 것으로 생각된다.

이상의 결과로 1450°C에서 소결한 $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{TiO}_2, \text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ 세라믹스의 마이크로파 유전특성을 표 1에 나타내었다.

4. 결 론

일반적인 산화물 혼합법으로 $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{TiO}_2, \text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ 세라믹스를 제조하였다. 모든 시편은 1450°C의 소결온도에서 조성에 따라 4.47~6.036 g/cm³의 소결밀도를 나타내었다. X-선 회절 분석 결과, $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x\text{TiO}_2$ 세라믹스에서 TiO_2 를 첨가함에 따라 MgTi_2O_5 상이 형성되었다. 또한 $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ 세라믹스에서는 $\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9$ 가 각각 $\text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3$ 와 반응없이 공존하였다. $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x\text{TiO}_2$ 세라믹스의 마이크로파 유전특성은 MgTi_2O_5 상의 영향을 받았다. $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x\text{TiO}_2$ 세라믹스에서 TiO_2 첨가에 따라 유전상수는 지속적인 증가를 나타내었고, 품질계수는 $x=0.3$ 의 조성에서 최대값을 나타내었다. 또한 TCRF는 양의 방향으로 이동하였지만 $0.6 \leq x \leq 0.8$ 의 조성에서는 음의 방향으로 이동하였다. $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ 세라믹스의 경우, CaTiO_3 와 SrTiO_3 의 첨가에 의하여 마이크로파 유전특성에 영향을 받았다. CaTiO_3 와 SrTiO_3 를 첨가함에 따라 유전상수는 증가하였고 품질계수는 감소하였다. 또한 TCRF는 양의 방향으로 이동하였다. 1450°C에서 10시간 동안 소결한 $(1-x)\text{Mg}_4\text{Ta}_2\text{O}_9-x(\text{TiO}_2, \text{CaTiO}_3, \text{SrTiO}_3)$ 의 유전상수, 품질계수 그리고 공진주파수의 온도계수는 각각 12.96~70.98, 5,132~186,410 GHz, -35.82~+75.96 ppm/°C의 범위를 나타내었다.

Acknowledgements

This work was supported by the Realistic 3D-IT Research Program of Kwangwoon University under the National Fund from the Ministry of Education and Human Resources Development (2005).

참 고 문 헌

- [1] S. Kamba, J. Petzelt, E. Buixaderas, D. Haubrich, P. Vanek, P. Kuzel, I. N. Jawahar, M. T. Sebastian and P. Mohanan, "High frequency dielectric properties of $\text{A}_5\text{B}_4\text{O}_{15}$ microwave ceramics", Journal of Applied Physics, Volume 89, Issue 7, p.3900, 2001.
- [2] D. Kolar and D. Suvorov, "High Permittivity Microwave Ceramics", Eur. J. Solid State Inorg. Chem., 32, p. 751, 1995.
- [3] H. Sata, K. Aynsawa, M. Sato, K. Kawamura, I.

Kawakami, and K. Nihei, Proc. 3rd IEE IEMT Symp. p. 149. 1987.

[4] K. Wakino, T. Minai and H. Ichimura, "Microwave Characteristics of (Zr,Sn)TiO₄ and BaO-PbO-Nd₂O₃-TiO₂ Dielectric Resonators", J. Am. Ceram. Soc. 67. p. 278, 1984.

[5] Y. Konishi, "Novel dielectric waveguide components-microwave applications of new ceramic materials", Proc. IEEE 79, p. 726, 1991.

[6] Lee, H. J., Kim, I. T. and Hong, K. S., "Dielectric Properties of AB₂O₆ Compounds at Microwave Frequency (A=Ca, Mg, Co, Ni, Zn and B=Nb, Ta)", Jpn. J. Appl. Phys., Vol 36, Part 2, No.10A, p.L1318, 1997.

[7] I. N. Jawahar, P. Mohanan, M.T. Sebastian, "A₅B₄O₁₅ (A=Ba, Sr, Mg, Ca, Zn; B=Nb, Ta) microwave dielectric ceramics", Materials Letters, Volume 57, Issues 24-25, p.4043-4048, 2003.

[8] Sam Solomon, Manoj Kumar, K. P. Surendran, M. T. Sebastian, P. Mohanan, "Synthesis, characterization and properties of [RE_{1-x}RE'_x]TiNbO₆ dielectric ceramics", Mater. Chem. Phys., Vol. 67, Issue 3, pp.291, 2001.

[9] A. Templeton, X. Wang, S. J. Penn, S. J. Webb, L. F. Cohen and N. McN. Alford, "Microwave Dielectric Loss of Titanium Oxide", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 83, No. 1, pp.95~100, 2000.

[10] R. C. Kell, A. C. Greeham, G. C. E. Olds, "High-permittivity temperature stable ceramics with low microwave loss", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 56, pp.352~354, 1973.

[11] P. L. Wise, I. M. Reaney, W.E. Lee, T. J. Price, D. M. Iddles, D. S. Cannel, "Structure-microwave property relations in (Sr_xCa_(1-x))_{n+1}Ti_nO_{3n+1}", J. Eur. Cer Soc., Vol. 21, pp.1723~1726, 2001.

[12] B. W. Hakki et al., "A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Capacities in the Millimeter Range", IRE Trans. on Microwave Theory and Technique, Vol. MTT-24, No. 10, pp.402, 1960.

[13] 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, pp.586, 1985.

[14] JCPDS card No. 79-0833

[15] K. Wakino, "Recent Development of Dielectric Resonator Materials and Filters in Japan", Ferroelectrics 91, pp.61, 1989.

[16] Hyunho Shin, Hee-Kyun Shin, Hyun Suk Jung, Seo-Yong Cho, Kug Sun Hong, "Phase evolution and dielectric properties of MgTi₂O₅ ceramic sintered with lithium borosilicate glass", Materials Research Bulletin, Vol. 40, Issue 11, pp.2021-2028, 2005.

[17] R. L. Coble, "Effect of TiO₂ on Initial Sintering of Al₂O₃", J. Am. Ceram. Soc., 55[2] pp.114-115, 1971.

[18] W. D. Kingery, H. K. Bowen and D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", John Wiley & Sons, Second edition, pp.937, 1976.

[19] H. Tamura, "Microwave Loss Quality of (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ Ceramics", Am. Ceram. Soc. Bull., 73(10), pp.92, 1994.

저 자 소 개

김 재 식 (金 再 植)



2003년도 광운대 전자정보대 반도체및신소재공학과 졸업. 2004년도 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자재료 공학과 박사과정
Tel : 02-940-5164
E-mail : hulhaha@kw.ac.kr

최 의 선 (崔 儀 善)



1998년 서남대 공대 전자공학과 졸업. 2000년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학박).
Tel : 02-940-5164
E-mail : sunsee@kw.ac.kr

배 선 기 (裴 善 基)



1976년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 연세대 산업대학원 졸업(석사). 1989년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(공학박). 현재 인천대 공대 전기과 교수
Tel : 032-770-8432
E-mail : sgbae@incheon.zc.kr

이 영 희 (李 永 熙)



1973년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 광운대 공대 전자재료공학과 교수
Tel. 02-940-5164
Fax : 02-915-8084
E-mail : yhlee@daisy.kw.ac.kr