

X7R용 적층 칩 세라믹 캐패시터 조성의 희토류 첨가에 따른 유전 특성

The Effect of Rare-Earth Additives on Dielectric Properties of X7R MLCC Composition

이석원*, 윤중락**

(Suk-Won Lee* and Jung-Rag Yoon**)

Abstract

Effects of Er_2O_3 , Ho_2O_3 and Dy_2O_3 addition on dielectric properties of non-reducible $BaTiO_3$ based X7R dielectrics with Ni electrode have been studied in a reduced atmosphere. As the content of rare-earth with Er_2O_3 , Ho_2O_3 , Dy_2O_3 was less than 3wt%, The TCC(Temperature Capacitance Change) and insulation resistance characteristics were improved by compensate the oxygen vacancies due to occupy either the Ba or Ti site. We developed the composition of X7R (EIA standard) for higher capacitance MLCC which had high reliability electric properties by the addition of Er ion into $BaTiO_3 + MgO + Y_2O_3 + MnO + (Ba_{0.4}Ca_{0.6})SiO_3$ composition.

Key Words : Ni electrode, Insulation Resistance, MLCC, X7R

1. 서 론

최근 휴대용 전화기나 노트북과 같은 휴대용 전자기기의 수요 증가와 함께 부품의 소형화, 고성능화, 저 소모 전력 부품의 요구가 증가되고 있다. 특히, 반도체 칩의 소형화, 고집적화와 더불어 수동 부품인 캐패시터, 인덕터, 저항의 소형화 및 표면 실장화 요구가 가속화되고 있다. 캐패시터의 경우 소형이면서 대용량을 얻기 위해 적층형 구조를 하고 있으며 세라믹 유전체, 내부 전극, 외부 전극으로 구성되며 높은 용량을 얻기 위해서는 유전율을 증가시키거나 유전체 두께를 얇게 하거나 내부 적층수를 증가시켜야 한다. 특히, 고용량의

경우 Ni-MLCC (BME MLCC : Base Metal Electrode Multi-Layer Ceramic Capacitor)의 지속적인 신뢰성 향상에 따라 내부 전극으로 Pd과 Ag-Pd와 같은 고가의 귀금속 대신 Ni과 Cu등과 같은 저가의 비귀속을 적용함으로써 기존의 탄탈 캐패시터의 고용량 영역까지 생산 공급이 가능해지고 있다[1,2].

Ni를 내부전극으로 사용하는 경우 Ni가 고온에서 NiO로 산화하므로 대기 분위기에서 소결이 불가능하다. 따라서 낮은 산소 분압인 환원 분위기에서 소결해야 하므로 유전체 세라믹이 내 환원성을 가져야 한다. 일반적으로 고용량 MLCC 제작을 위한 기본 재료로서 $BaTiO_3$ 가 상용화되어 있으며 EIA (Electronic Industries Association)에서는 대표적인 캐패시터의 규격으로 온도 특성에 따라 Y5V, X7R, NP0등으로 구분하고 있다. X7R 온도 특성은 -55 ℃에서 125 ℃의 온도범위에서 25 ℃에서의 용량을 기준으로 할 때 정전용량 변화율이 ±15 % 이하인 특성을 가지는 것으로 정의된다. 내

* : 호서대학교 전기정보통신공학부
(충남 아산시 배방면 새출리 산 29-1,
Fax: 041-540-5693
Corresponding Author : yoonjungrag@samwha.com)
** : (주) 삼화콘덴서
2003년 9월 18일 접수, 2003년 10월 8일 1차 심사완료,
2003년 10월 29일 최종 심사완료

환원성을 가지는 X7R MLCC의 연구는 1960년 초부터 시작되었으나 신뢰성 측면에 문제가 있어 많은 연구를 통하여 1980년대 중반부터 일부 생산되기 시작하였으며 1990년대 중반부터 고가의 내부전극인 Pd를 대체하면서 대량 생산되기 시작하였다. 내환원성을 가지면서 고 신뢰성의 X7R 온도 특성을 가지기 위해서는 열역학적 준안정상인 코어-셸(Core-Shell) 구조를 가지는 것이 안정한 것으로 알려져 있다. 코어는 강 유전체로 순수한 BaTiO₃로 구성된 영역을 의미하며 셸 영역은 첨가제의 확산으로 인해 BaTiO₃ 입자내에 형성되는 BaTiO₃ 입자 표면층을 의미한다. 셸 영역의 역할은 X7R 특성에서 중요한 온도특성을 온도 구배에 따른 조성의 차이로써 큐리 온도를 변화시켜 조절하거나 신뢰성, 내 환원성등 많은 특성에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다[2,3].

기존의 연구에서는 BaTiO₃를 주 재료로 하여 MgO, Y₂O₃, MnO₂, 희토류 (Dy₂O₃, Ho₂O₃, Er₂O₃, Sm₂O₃), 지온 소결소재 (V₂O₅, SiO₂, CaSiO₃)를 첨가하거나, 역시 BaTiO₃를 주 재료로 하고, MgO, Y₂O₃, MnO₂, 희토류 (Dy₂O₃, Ho₂O₃, Er₂O₃, Sm₂O₃), 유리 프릿 ((Ba, Ca)_xSiO_{2-x}계, BaO-SrO-Li₂O-SiO₂)을 첨가하여 유전 특성을 향상시켰다는 보고는 있으나 희토류 첨가에 의한 결정 구조 분석이나 온도 특성에 미치는 영향에 대한 분석은 부족하다.[3] 본 논문에서는 X7R 특성을 만족하면서 고 신뢰성 조성을 얻기 위해 BaTiO₃ - MgO - MnO₂ - Y₂O₃를 주성분으로 하고 소결 조제로서 (Ba_{0.4}Ca_{0.6})SiO₃ 유리 프릿을 첨가하고 온도특성 및 절연저항을 향상시키기 위하여 Ho₂O₃, Er₂O₃, Dy₂O₃를 첨가하여 첨가량에 따른 결정성과 결정성 변화에 따른 유전 특성 및 절연 저항 특성을 검토하였다. 또한 상기 조성을 이용하여 MLCC를 제작하여 전기적 특성 및 온도 특성을 연구하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용한 분말은 옥살레이트법으로 제조된 BaTiO₃ (Fuji Titanium Co. HPBT-1A)를 사용하였으며 첨가제로는 MgO, MnO₂, Y₂O₃를 첨가하였고 절연저항 및 온도특성 향상을 위하여 유리 프릿으로 (Ba_{0.4}Ca_{0.6})SiO₃와 희토류로 Ho₂O₃, Er₂O₃, Dy₂O₃를 첨가하였다. 유리프릿은 BaCO₃, CaCO₃, SiO₂를 건식 혼합한 후 1550°C에서 2시간 용융한 상태에서 순수물을 이용하여 급속냉각

한 후 불 밀을 이용하여 분말의 입도 D₅₀를 0.8 ~ 1.0 μm로 분쇄하였다. 주 조성으로 BaTiO₃ 95.65 mol%, MgO 2.5 mol%, Y₂O₃ 1.5 mol% 그리고 MnO₂ 0.35 mol%로 하고 유리 프릿을 1 ~ 3wt%, 희토류를 0 ~ 3 wt% 첨가하여 순수물과 지르코니아 불을 넣고 불 밀을 이용하여 24 시간 혼합, 분쇄하였다. 최종 분말은 유리 프릿이 점성 유동을 할 수 있는 온도인 800°C에서 2 시간 열처리한 후 불 밀을 이용하여 재 분쇄한 후 건조하였으며 이때 분말의 입도는 D₅₀을 0.6 ~ 0.8 μm로 조절하였다. 건조한 분말에 PVA를 소량 첨가하여 1.5 ton/cm²의 압력으로 성형하여 성형체를 만든 후 PO₂ 1 × 10⁻¹¹ (Pa) 분위기에서 소결 온도를 1320°C로 하여 2시간 소결하였다. 소성 후 재 열처리는 PO₂ 1 × 10⁻⁴ (Pa) 분위기로 1000°C에서 2시간 행하였다. MLCC는 PVB 바인더, 유기용제 및 유전 재료를 이용하여 슬러리를 만들어 닥터 브레이드법을 이용하여 11 μm 그린시트를 제작한 후 Ni 전극으로 내부전극을 인쇄하였으며 일반적인 적층 제조 공정에 따라 제작하였다. 조성에 따른 결정상을 확인하기 위하여 XRD (XRD, D/max-C, Rigaku, Japan)를 측정하였으며 유전율과 손실은 1KHz, 1 V_{rms} 조건으로 LCR 측정기 (HP4278A, HP, USA)를 이용하여 용량 값을 측정 한 후 유전율을 계산하였다. 절연저항 저항 측정은 100 V, 60초 인가한 후 고저항 측정기 (HP4339B, HP, USA)를 이용하여 측정하였으며 R*C 값으로 나타내었다. 온도 특성은 -55°C ~ 125°C, 1KHz, 1 V_{rms} 조건에서 온도특성 측정기 (4220A, S&A Inc., USA)와 LCR 측정기를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 유리프릿 첨가에 따른 유전율 및 절연 저항 특성으로서 유리 프릿 함량이 증가할수록 유전율은 감소하나 절연 저항 특성은 증가함을 볼 수 있다. 유전율의 경우 유리 프릿이 1wt% 첨가한 경우에도 유전율이 높은 것으로 보아 소결성은 양호한 것으로 예상되며 유리 프릿이 증가함에 따라 유전율이 감소하는 것은 입계간에 존재하는 저 유전율의 유리질이 많아서 나타나는 결과로 예상된다. 이와 같은 결과는 강유전성을 가지는 BaTiO₃와 Ti 과잉에 의해 생성된 저유전율의 Ti-과잉 결정립에 의한 결정립계에 따라 유전율이 다음식과 같이 변화한다는 결과와 유사하다[5].

$$(1/C_{Total}) = (d_{grain}/\epsilon_{grain}) + (d_{intergranular\ phase}/\epsilon_{intergranular\ phase})$$

여기서 C_{Total} 은 시편의 용량이고 d_{grain} 은 결정립 크기, ϵ_{grain} 은 결정립의 유전율, $d_{intergranular\ phase}$ 은 입계간의 두께이고 $\epsilon_{intergranular\ phase}$ 은 입계의 유전율로 표시된다. 또한, 절연저항 ($R \cdot C$) 값이 유리프릿이 2 wt%이상의 경우 절연저항 값이 포화되는 현상을 나타내는 것으로 보아 높은 절연저항을 가지는 결정립계 간에 유리질에 의해 나타나는 결과로 예측된다.

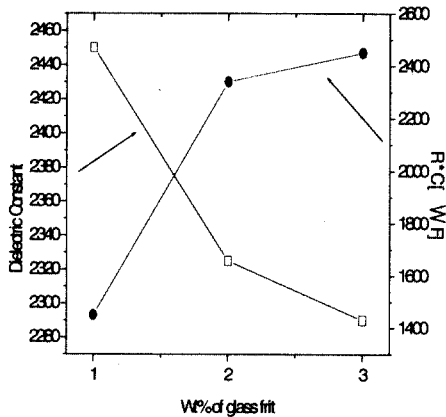


그림 1. 유리프릿 첨가에 따른 유전율 및 절연 저항.

Fig. 1. Insulation resistance and dielectric constant as a function of glass frit.

그림 2는 유리 프릿 첨가에 따른 온도특성의 변화로서 첨가량에 상관없이 X7R 특성을 만족함을 볼 수 있으나 90 ~ 100°C 부근에서 유리 프릿이 증가할수록 (-) 쪽으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 유리프릿 첨가에 따라 (-) 쪽으로 증가하는 이유는 첨가량이 증가함에 따라 저온에서 코어 셸이 형성됨에 따라 코어 셸 내에서의 농도 구배의 차이에 의해 나타난 결과로 예상된다. X7R 고용량 MLCC를 제작하기 위해서는 그린 시트의 두께를 얇게 할 필요가 있으며 일반적으로 5 ~ 8 um의 그린 시트를 사용하고 있다. 기존의 보고와 실험 결과에 의하면 그린 시트의 두께 얇아지면 온도 특성이 시계방향으로 기울어지게 나타나므로 고용량 MLCC 제작에 적합한 온도 특성으로는 80~100°C

부근에서 -1.5 ~ 1 이면서 125°C에서는 6 ~ 15 인 것이 적합하다고 보고하였다[2,6].

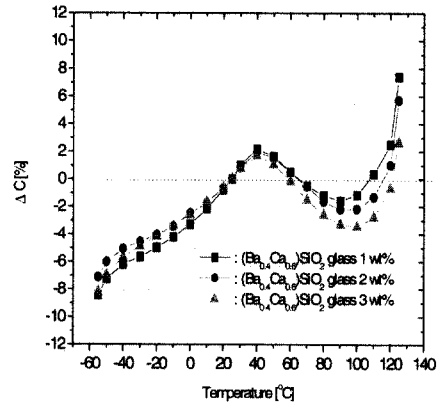


그림 2. 유리프릿 첨가에 따른 온도 특성.

Fig. 2.. Temperature characteristics as a function of glass frit.

그림 3의 (1)은 $(Ba_{0.4}Ca_{0.6})SiO_3$ 유리 프릿을 2 wt%로 고정한 후 희토류 첨가에 따른 XRD 결과를 나타내었다. 희토류 첨가량이 0.5wt%이하인 경우 첨가에 따른 $R_2Ti_2O_3$ (R : 희토류) 및 R_2TiO_5 로 예상되는 이차상이 나타나지 않는 것으로 보아 Er, Dy, Ho 이온이 Ba 위치 또는 Ti 위치에 완전 고용되었다고 볼 수 있으나 그 이상 첨가되는 경우 이차상이 나타나고 있으며 단일상의 경우 극히 좁은 영역임을 확인할 수 있었다. 그림 3의 (2)는 희토류 첨가량에 따른 44 ~ 46도 영역에서의 XRD 결과로서 $BaTiO_3$ 의 결정구조에서 45도 영역에서는 (200), 45.5도 부근에서는 (002) 면간격을 가지며 희토류가 첨가됨에 따라 (200) (002) 면간격이 작아지고 피크 분리가 불분명하다는 보고같이 피크 분리가 불분명하게 나타남을 볼 수 있다. 또한, Er, Dy, Ho 이온 모두 첨가량 증가에 따라 XRD 피크가 (-)측으로 이동하고 이온 반경(Er^{3+} (0.890 Å), Ho^{3+} (0.901 Å), Dy^{3+} (0.912 Å))이 작을 수록 (-)측으로 이동하였다. 이와 같은 결과는 $(Ba_{1-2x}R_{2x})(Ti_{1-x}Mg_x)O_3$ (R = La, Sm, Dy, Ho, Er, Yb)계에서 중간 이온반경을 가지는 Dy, Ho, Er 이온의 경우 이온크기에 따라 X가 작은 영역에서 격자 상수가 감소되고 X가 큰 영역에서는 격자상수가 증가한다는 결과와 유사함을 볼 수 있다.

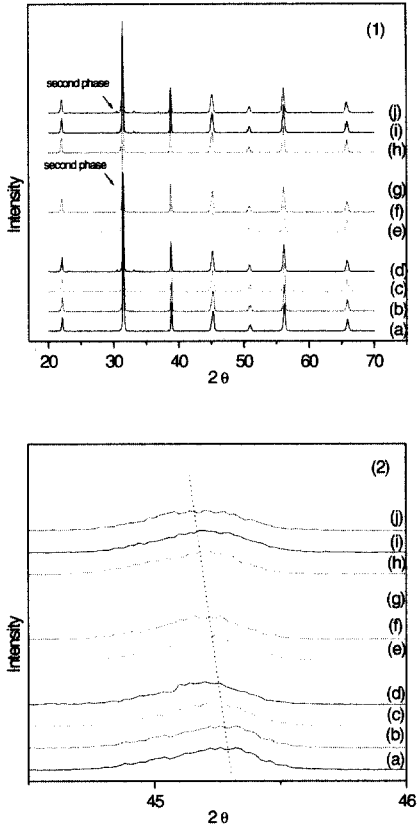


그림 3. 희토류 첨가에 따른 XRD 결과.

- (a) non - content (b) Er₂O₃ 0.5wt%
- (c) Er₂O₃ 1.0wt% (d) Er₂O₃ 3.0wt%
- (e) Ho₂O₃ 0.5wt% (f) HO₂O₃ 1.0wt%
- (g) Ho₂O₃ 3.0wt% (h) Dy₂O₃ 0.5wt%
- (i) Dy₂O₃ 1.0wt% (j) Dy₂O₃ 3.0wt%.

Fig. 3. XRD result as a function of rare-earth ions.

- (a) non - content (b) Er₂O₃ 0.5wt%
- (c) Er₂O₃ 1.0wt% (d) Er₂O₃ 3.0wt%
- (e) Ho₂O₃ 0.5wt% (f) HO₂O₃ 1.0wt%
- (g) Ho₂O₃ 3.0wt% (h) Dy₂O₃ 0.5wt%
- (i) Dy₂O₃ 1.0wt% (j) Dy₂O₃ 3.0wt%.

그림 4는 (Ba_{0.4}Ca_{0.6})SiO₃ 유리 프릿을 2 wt%로 고정된 후 희토류 첨가에 따른 유전율로 2000에서 2330정도의 값을 나타내었다. 희토류 첨가량이 증가함에 따라 유전율이 감소하는 경향을 보이며 특

히 1.0wt% 이상에서 급격히 낮아지지만 이온 반경에 따른 유전율의 영향은 크게 나타나지 않았다. X7R 조성의 경우 각각의 결정입자가 거의 순수한 BaTiO₃로 이루어진 코어 (core)상과 BaTiO₃ 첨가 성분이 고용된 셸 (shell)상으로 이루어지는 것으로 알려져 있으며 희토류의 종류 및 첨가에 따라 코어 셸 구조가 다르게 나타남을 보고했다[6]. 본 논문에서도 희토류 첨가에 따라 유전율이 저하되는 것으로 보아 희토류 원소의 확산에 의해 자유전율 상인 셸 영역이 상대적으로 증가함으로 나타난 결과로 예상된다.

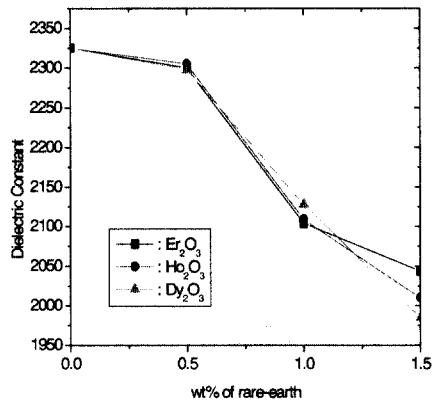


그림 4. 희토류 첨가에 따른 유전율.

Fig. 4. Dielectric constant as a function of rare-earth ions.

그림 5는 (Ba_{0.4}Ca_{0.6})SiO₃ 유리 프릿을 2 wt%로 고정된 후 희토류 첨가에 따른 절연저항 값이다. 희토류 첨가에 따라 절연저항 값이 증가함을 볼 수 있으며 희토류의 이온 반경에 따라 최적의 첨가량이 다르게 나타남을 볼 수 있다. 특히 Er₂O₃의 경우 0.5 wt% 첨가시 절연저항(R*C) 값이 4320으로 높은 값이 나타났으며 이온 반경이 클수록 첨가량이 증가할 때 높은 절연저항 값을 나타내었다. 이와같은 결과는 Er³⁺, Ho³⁺, Dy³⁺ 이온 반경 및 함량에 따라 BaTiO₃ 격자내에서 Ba 또는 Ti 위치를 치환하므로써 나타나는 결과이다. Ba 위치에 치환된 경우 도너로 작용하고 Ti 위치에서는 억셉터로 작용함으로 원자가 보상을 통하여 절연 저항이 증가하거나 감소하는 되는 것으로 판단된다. 기존의 보고에 의하면 다음과 같은 식으로 희토류가 A 위치 및 B 위치에 고용된다고 하였으며 이온

반경의 크기에 따라 A 위치에 존재하는 고용량의 한계가 있음을 보고하였다[7]. 본 실험에서도 이온 반경의 크기에 따라 최적의 첨가량이 있는 것으로 보아 이온 반경이 적을수록 A 위치에 고용되는 한계가 적음을 알 수 있다.

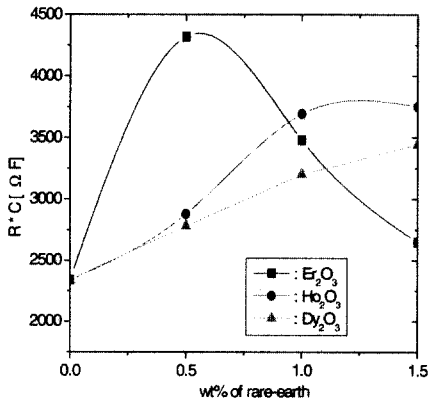
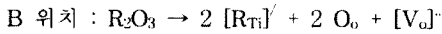
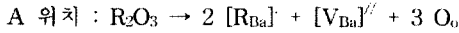


그림 5. 희토류 첨가에 따른 절연저항.

Fig. 5. Insulation Resistance as a function of rare-earth ions.

그림 6의 (a), (b), (c)는 희토류 첨가에 따른 온도 특성의 변화로서 희토류 종류와 무관하게 첨가량이 증가함에 따라 고온부(125°C)에서 (+) 방향으로 증가함을 볼 수 있다. 특히 Er_2O_3 의 경우 80 ~ 100°C 부근에서 -1.5 ~ 1 이면서 125°C에서는 6 ~ 15인 값을 가지며 고용량 MLCC 제작시 적합한 온도특성을 가짐을 알 수 있다. 희토류의 증가에 따라 온도 특성이 개선되는 것은 희토류 이온과 엑셉터 이온의 양극성 확산으로 형성되는 코어셸의 농도 구배에 따른 조성차이로 큐리온도가 서로 다른 셸 영역의 상호 보완적 증첩 효과로 예상된다. 이와 같은 결과는 그림 3의 XRD 결과와 이온 반경에 따른 고용한계와도 연관성이 있음을 볼 수 있다.

유전율, 절연저항, 온도특성을 고려하여 유리프릿 2wt%, Er_2O_3 가 0.5wt% 첨가된 조성을 이용하여 MLCC를 제작하였다. 설계시 소성 후 전극 간 두께를 9 μ m, 내부전극 층수를 72층, 가로 1.6mm, 세로 0.8 mm, 두께 0.8mm로 100 nF의 MLCC를

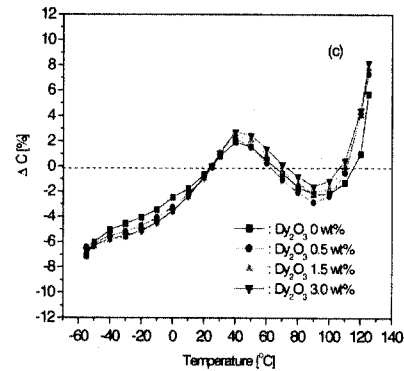
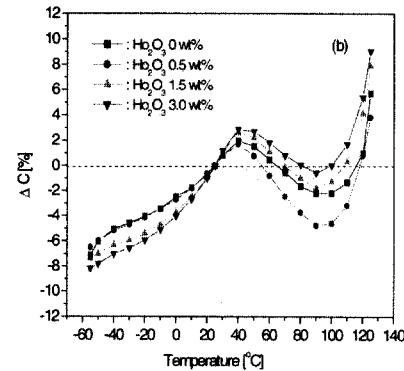
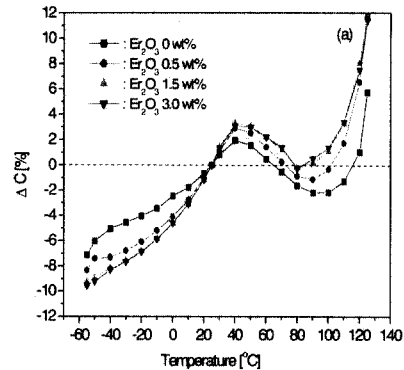


그림 6. 희토류 첨가에 따른 온도 특성 (a) Er_2O_3 첨가, (b) Ho_2O_3 첨가, (c) Dy_2O_3 첨가.

Fig. 6. Temperature characteristics as a function of rare-earth ions (a) Er_2O_3 addition, (b) Ho_2O_3 addition, and (c) Dy_2O_3 addition.

설계, 제작하였다. 제작 결과 용량 및 손실은 103 nF, 1.56 %으로 규격을 만족하였으며 내전압은 최소 350[V]이고 R·C는 최소 2500 [Ω F]으로 우수한

특성을 얻었다. 그림 7은 제작된 MLCC의 미세구조 사진으로서 전극 두께는 1.8 μm 이고 전극간의 두께는 9 μm 로 양호한 미세구조를 나타내었다. 그림 8은 온도 특성으로서 MLCC로 제작시 기존의 보고와 같이 저온측은 (+) 방향으로 증가하고 상온측은 (-) 방향으로 감소함을 볼 수 있지만 X7R 온도 특성을 만족하는 우수한 조성임을 확인할 수 있었다. MLCC 제작시 전극간의 두께가 얇을수록 온도특성이 다르게 나타나는 것은 Ni 내부전극과 세라믹 간의 Ni 확산 계면에 결정성 저하에 의한 영향, 코어 셸의 농도 구배에 의한 영향에 의해 큐리점이 이동하여 나타나는 것으로 예상되지만 향후 이에 대한 많은 연구가 필요하다[8].

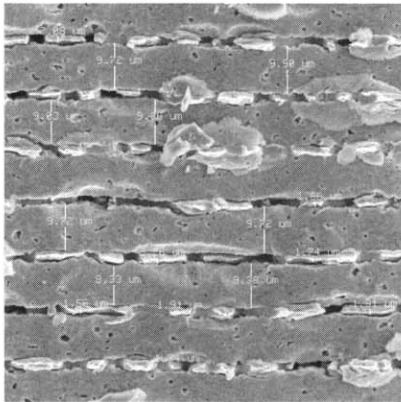


그림 7. MLCC 파단면 SEM.
Fig. 7. SEM of fracture surface of MLCC.

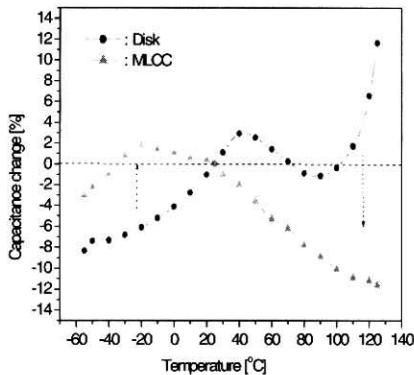


그림 8. MLCC의 온도 특성.
Fig. 8. Temperature characteristics of MLCC.

4. 결 론

주 조성으로 BaTiO₃ 95.65mol%, MgO 2.5 mol%, Y₂O₃ 1.5 mol% 그리고 MnO₂ 0.35 mol% 하고 유리 프리트 (Ba_{0.4}Ca_{0.6})SiO₃ 1 ~ 3 wt%, 희토류 (Er₂O₃, Ho₂O₃, Dy₂O₃) 0.5 ~ 3.0 wt% 조성에서 다음과 같은 특성을 얻을 수 있었다.

- (1) 유리 프리트 첨가에 따라 유전율은 감소하였으나 절연저항 값은 2wt%이상에서 2350 [ΩF] 이상의 값을 얻을 수 있었다.
- (2) 유리 프리트 2wt% 첨가한 후 희토류를 첨가한 경우 이온 반경의 크기에 따라 유전율은 차이가 크게 나타나지 않았지만 절연저항 및 온도 특성은 이온 반경의 크기에 따라 최적 첨가량이 다르게 나타났다.
- (3) 희토류 원소의 이온 반경에 따라 최적 첨가량이 다른 것은 희토류 이온 이 Ba 위치와 Ti 위치를 치환하는 고용 범위가 다름을 확인할 수 있었다.
- (4) 희토류 중 Er₂O₃를 0.5wt% 첨가한 경우 유전율 2300, 절연저항 4320 [ΩF]의 우수한 전기적 특성을 얻었으며 MLCC 제작 결과 온도 특성은 X7R을 만족하면서 절연 저항값이 최소 2500 [ΩF]의 값을 나타남을 확인하였다.

이상의 실험 결과 희토류 첨가로서 온도 특성 및 절연 특성을 향상할 수 있고 주조성에 유리 프리트 2wt%, Er₂O₃ 0.5 wt% 첨가시 고용량 MLCC 제작에 적합한 조성임을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 임인호, 윤원상, 박종주, 백동수, 박창엽 "AgPd 내부전극을 이용한 적층형 압전 액츄에이터 제조", 전기전자재료학회논문지, 13권, 1호, p. 33, 2000.
- [2] Hwan Moon, Jung Rag Yoon, and Tak-Serk Chung, "Effect of additives on dielectric properties and microstructure of MLCC X7R composition," J. Kor. Ceram. Soc., Vol. 40, No. 7, p. 644, 2003.
- [3] Hiroshi Kishi, Youichi Mizuno, and Hirokazu Chazono, "Base-metal electrode-multilayer ceramic capacitors: past, present and future perspectives," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 42,

No. 1, p. 1, 2003.

- [4] H. Kishi, N. Kohzu, J. Sugino, H. Ohsato, Y. Iguchi, and T. Okuda, "The effect of rare-earth (La, Sm, Dy, Ho and Er) and Mg on the microstructure in BaTiO₃," J. Eur. Ceram. Soc., 19, p. 1043, 1999.
- [5] Jung Kun Lee, Kug Sun Hong, and Jin Wook Jang, " Roles of Ba/Ti Ratios in the Dielectric Properties of BaTiO₃ Ceramics," J. Am. Ceram.Soc., 84[9], p. 20001, 2001.
- [6] Y. Okino, N. Kohzu, Y. Mizuno, M. Chazono, and H. Kishi, "Effect of the microstructure on dielectric properties for BaTiO₃-Based MLC with Ni electrode," Key Engineering Materials, p. 157, 1999.
- [7] Wen-Hsi Lee, Detler Hennings, and Ying-Chieh Lee, "Effect of Dy doping on resistance degradation of (Ba)(Ti,Zr)O₃ sintered in reducing atmosphere under highly accelerated life test", Journal of the Ceramic Society of Japan, 109[10], p. 823, 2001.
- [8] 김종희, "MLCC의 박층 대응량화 기술동향 및 고 전계하의 BaTiO₃ 세라믹스의 유전거동에 관한 연구" Multilayer ceramic capacitor processing academy, 2002 Fall, p. 29. 2002.