

논문 15-11-4

ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 소결시간에 따른 전기적, 유전적 특성

Electrical and Dielectric Properties of ZPCCY-Based Varistor Ceramics with Sintering Time

남춘우, 김향숙

(Choon-Woo Nahm and Hyang-Suk Kim)

Abstract

The electrical and dielectric characteristics of ZPCCY-based varistor ceramics were investigated in the sintering time range of 1~3 h. Increasing sintering time deteriorated the nonlinearity, in which nonlinear exponent is decreased from 51.2 to 23.8 and leakage current is increased from 1.3 to 5.6 μA . As sintering time increases, the donor concentration was decreased in the range of $(1.25\sim 1.73)\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ and the density of interface states is $(3.64\sim 4.19)\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ with increasing sintering time. The increase in sintering time caused $\tan\delta$ to increase in the range of 0.043 to 0.062 and relaxation time to increase in the range of 1.55 to 2.23 μs .

Key Words : ZPCCY-based varistor ceramics, Sintering time, Electrical properties, Dielectric properties, Relaxation time

1. 서론

정보화 사회로의 진전에 따라 전자·정보시스템은 점점 외형적으로 소형화, 경량화되고, 기능적으로는 고성능, 고속화되어 가고 있다. 이에 따라 반도체 소자를 비롯한 전자부품은 박막화 및 소형화되고, 전자회로는 고집적화됨으로서 절연성능이 매우 취약하여 각종 썬지 칩입시 오동작이 일어날 가능성이 한층 높아졌다.

ZnO 바리스터 세라믹스는 비직선적인 전도특성을 이용하여 각종 썬지로부터 전자·통신기기를 보호하는데 널리 사용되는 비선형 세라믹 저항체

이다[1,2]. 소형화에 따른 절연한계를 극복하여 기기의 신뢰성을 향상시키는 방법중의 하나가 ZnO 바리스터 세라믹스의 응용이다. 따라서 무엇보다도 ZnO 바리스터 세라믹스 자체의 성능개선이 중요하다. 최근에는 높은 비직선성과 안정성을 갖는 고품질 바리스터를 개발하기 위해서 기존의 비스무스(Bi)계 대신 프라세오디뮴(Pr)계 바리스터에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3-19]. 그러나 Bi₂O₃계 바리스터와 비교시 연구 정도는 매우 미미한 실정이다. 초기에는 ZnO, Pr₆O₁₁, CoO 등으로 구성되는 3성분계 등[3-6]에 대한 기초연구가 대부분이었으며, 비직선성을 개선시키기 위해 희토류 산화물이 첨가된 4성분계[7-9], 5성분계[10-19] 바리스터 세라믹스가 최근에 다수 보고되고 있다.

본 논문에서는 ZnO, Pr₆O₁₁, CoO, Cr₂O₃, Y₂O₃ (ZPCCY)로 구성된 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터 세라믹스의 미세구조, V-I, C-V, 유전특성에 소결시간이 미치는 영향을 조사하였다.

동의대학교 전기공학과
(부산광역시 부산진구 가야동 산24번지)
Fax : 051-890-1669
E-mail : cwnahm@dongeui.ac.kr
2002년 7월 2일 접수, 2002년 8월 20일 1차 심사완료,
2002년 8월 29일 최종 심사완료

2. 실험 방법

97.5 mol% ZnO+0.5 mol% Pr₆O₁₁+1.0 mol% CoO+0.5 mol% Cr₂O₃+0.5 mol% Y₂O₃ 시료 조성식에 따라 10 μg의 오차범위까지 평량하였다. 평량된 시료를 24시간 분쇄 및 혼합하였고, 120℃에서 12시간 건조시킨 후, 750℃에서 2시간 하소하였다. 80 MPa 압력하에서 직경이 10 mm, 두께가 1.8 mm가 되게 성형한 후, 같은 조성의 분위기 분말과 함께 도가니에 넣어 같은 온도 승·하강율(4℃/min)로 1350℃에서 각각 1, 2, 3시간 동안 소결된 3종류의 소결체를 준비하였다. 소결된 시편을 1.0 mm 두께로 연마한 후, Ag 전극을 실크스크린 기법으로 직경이 5 mm되게 도포한 다음, 600℃에서 10분간 열처리하였다.

ZnO 바리스터 세라믹스의 V-I 특성은 컴퓨터와 IEEE 488로 인터페이스된 High Voltage Source Measure Unit(Keithley 237)를 사용하여, 실온(298K)에서 펄스폭이 1 ms, 듀티 사이클이 0.5 ms인 선형 계단전압을 인가하는 방법으로 전류밀도 50 mA/cm²까지 측정하였다. 바리스터 전압(V_{lma})은 전류밀도가 1 mA/cm²일 때의 전압, 누설전류(I_l)는 바리스터 전압의 80% 전압에서 각각 측정되었으며, 비직선 지수(α)는 다음 식으로 계산되었다.

$$\alpha = \frac{\log J_2 - \log J_1}{\log E_2 - \log E_1} \quad (1)$$

여기서 E₁과 E₂는 J₁=1 mA/cm²와 J₂=10 mA/cm²에 각각 대응되는 전계이다.

C-V 특성은 항온기, 정밀 RLC미터(QuadTech 7600), Electrometer/Voltage Source Unit(Keithley 617)로 구성되는 C-V 측정 시스템을 사용하여 25℃에서 on/off 시간이 60s/30s인 조건의 직류바이어스 전압을 변화시켜 1 kHz/1 V_{rms}의 교류신호로 정전용량 및 손실계수를 측정하였다. ZnO 결정립의 도너농도(N_d)와 입계에서의 장벽높이(φ_b)는 Mukae 등[20]에 의해 제안된 식 (2)로부터 직선의 기울기 및 교점으로부터 각각 구하였다.

$$\left(-\frac{1}{C_b} - \frac{1}{2C_{b0}}\right)^2 = \frac{2(\phi_b + V_{gb})}{q\epsilon N_d} \quad (2)$$

여기서 C_b는 입계의 단위 면적당 정전용량, C_{b0}는 입계당 인가전압 V_{gb}=0 V일 때 C_b, q는 전자의 전하량, ε는 ZnO의 유전율(8.5 ε₀)이다. 입계에

서의 계면상태밀도(N_t)는 도너농도와 장벽높이를 이용하여 다음 식으로 계산하였다.

$$N_t = \sqrt{\frac{2\epsilon\phi_b N_d}{q}} \quad (3)$$

입계를 중심으로 한쪽 결정립 내의 공핍층 폭(t)은 도너농도와 계면상태밀도를 이용하여 다음 식으로 계산하였다[21].

$$N_d \cdot t = N_t \quad (4)$$

유전특성은 RLC 미터(QuadTech 7600)를 사용하여 1 V_{rms} 소신호로 100 Hz~2 MHz 범위에서 측정되었다.

전기적 측정이 완료된 시편의 한면을 SiC 연마지로 래핑하여 0.3 μm Al₂O₃ 분말로 거울연마한 다음, 1100℃에서 20분간 열적 에칭한 후, SEM(S2400, Hitachi)으로 미세구조를 관찰하였다. 평균 결정립 크기(d)는 선형교차기법에 의한 식, d=1.56C_{eff}/MN_{eff}(C_{eff}는 테스트 길이의 유효길이, M은 SEM의 배율, N_{eff}은 입계와 테스트 길이와의 유효교차수)로 결정되었다[22]. 세라믹스의 밀도(ρ)는 밀도측정용 소프트웨어가 장착된 전자천평기를 이용하여, 아르키메데스법에 의한 식, ρ=Wρ₀/(W-W₀)(ρ₀는 물의 밀도, W는 공기속에서 시편의 무게, W₀는 물속에서 시편의 무게)로 구하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 1350℃에서 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 미세구조를 나타낸 SEM 사진이다. 미세조직상은 ZnO 결정립과 Pr₆O₁₁ 및 Y₂O₃-과다상인 벌크 입간상으로 구성된 2개의 상에 불과하였다. 이것은 회토류 산화물이 첨가된 4, 5성분계의 미세구조와 동일한 것으로 나타났다[6,15]. 소결시간에 따라 평균 결정립 크기(d)는 11.4~16.0 μm 범위로 증가하였으며, 세라믹스의 밀도(ρ)는 5.34~5.54 g/cm³ 범위로 증가하였다. SEM 사진에서도 소결시간이 증가할수록 ZnO 결정립이 커지며, 기공이 감소하여 치밀성이 증가함을 알 수 있다. 이는 이론 밀도(TD=5.78 g/cm³)의 92~96%로 같은 소결조건에서 이론밀도에 가까운 Er₂O₃가 첨가된 5성분계 바리스터 세라믹스보다

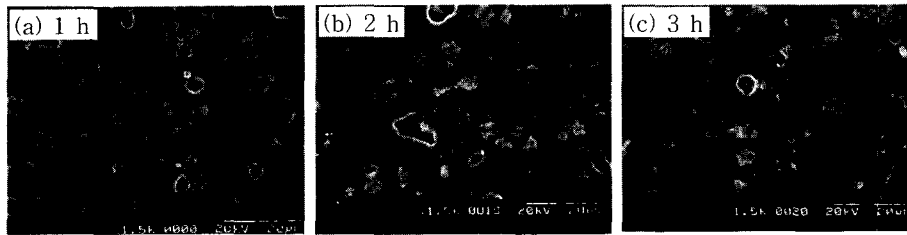


그림 1. 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 미세구조.

Fig. 1. SEM micrographs of ZPCCY-based varistor ceramics with sintering time.

낮은 밀도를 나타내었다. 그림 2는 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 전계(E)-전류밀도(J)의 특성 곡선을 소결시간에 따라 나타내었다. 소결시간이 증가할수록 곡선이 낮은 전압 및 높은 전류 측으로 이동함으로써 바리스터 전압(V_{1mA})의 감소와 누설 전류(I_t)의 증가를 예상할 수 있다. 자세한 $V-I$ 특성 파라미터를 표 1에 요약하여 나타내었다. 바리스터 전압(V_{1mA})은 소결시간의 증가에 따라 194.5~117.4 V/mm 범위로 감소하였다. 이는 결정립 크

기의 증가에 따른 일정 두께의 시편내에 존재하는 유효입계수의 감소로 오는 결과이다. 한편 입계당 전압(V_{gb})은 소결시간에 따라 대략 2 V/gb 내외로 일반적으로 잘 알려진 2~3 V/gb에 부합하는 것으로 나타났다.

그림 3은 소결시간에 따른 비직선 지수(α)와 누설전류(I_t)의 변화경향을 나타낸 것이다. 비직선 지수는 51.2~23.8 범위로 선형적으로 감소하였으며, 누설전류는 1.3~5.6 μA 범위로 선형적으로 증

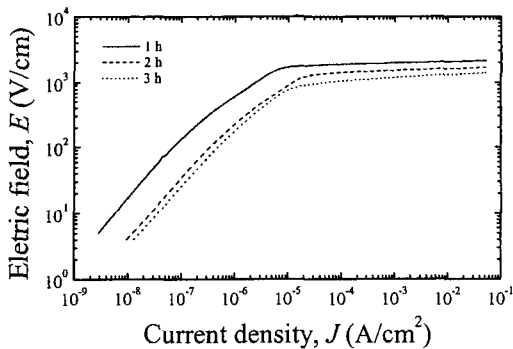


그림 2. 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 $E-J$ 특성.

Fig. 2. $E-J$ characteristics of ZPCCY-based varistor ceramics with sintering time.

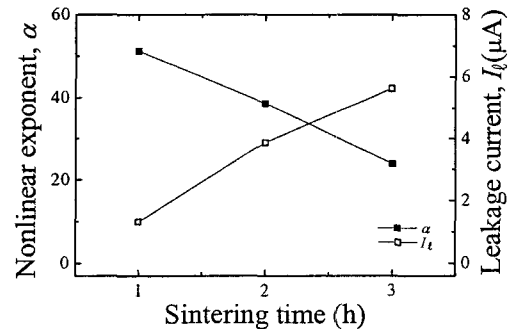


그림 3. 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 비직선 지수 및 누설전류.

Fig. 3. Nonlinear exponent and leakage current of ZPCCY-based varistor ceramics with sintering time.

표 1. 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 $V-I$ 및 $C-V$ 특성 파라미터.

Table 1. $V-I$ and $C-V$ characteristic parameters of ZPCCY-based varistor ceramics with sintering time.

Sintering time	V_{1mA} (V/mm)	V_{gb} (V/gb)	α	I_t (μA)	N_d ($10^{18} cm^{-3}$)	N_i ($10^{12} cm^{-3}$)	ϕ_b (eV)	t (nm)
1 h	194.5	2.2	51.2	1.3	1.25	3.61	1.13	29.1
2 h	149.3	2.1	38.6	3.9	1.42	3.78	1.07	26.7
3 h	117.4	1.9	23.8	5.6	1.73	4.19	1.08	24.1

가함으로서 비직선 지수와는 상반되는 경향을 나타내어 잘 대비되고 있다. 1시간 소결시 ZPCCY계 바리스터 세라믹스는 $\alpha=51.2$, $I_t=1.3 \mu A$ 로서 우수한 비직선성을 나타내었다. 2시간 소결된 바리스터 세라믹스는 $\rho=5.41 \text{ g/cm}^3$, $I_t=3.9 \mu A$ 로 우수한 안정성이 예상되며, 비직선 지수 또한 $\alpha=38.6$ 으로써 어레스터에 응용 가능할 것으로 사료된다. 소결시간의 증가에 따라 비직선성의 저하는 쇼트키 장벽높이에 기인하는 것으로 소결시간의 증가에 따라 장벽높이가 감소하여 Fowler-Nordheim 터널링에 의해 형성되는 전류보다 열전자 방출에 의해 형성되는 전류의 상대적인 증가에 의한 결과로 사료된다.

그림 4는 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 $(1/C_b-1/2C_{b0})^2$ vs. V_{gb} 관계를 도시한 것이다. 입계당 전압이 증가함에 따라 $(1/C_b-1/2C_{b0})^2$ 가 선형적 증가하는 것은 입계당 정전용량이 감소하는 것으로 이는 입계부근의 공핍층 폭의 증가에 기인하는 것이다. 자세한 C-V 특성 파라미터를 표 1에 요약하여 나타내었으며, 변화경향을 그림 5와 6에 도시하였다. 그림 5는 소결시간에 따른 도너농도 (N_d)와 공핍층 폭(t)의 변화경향을 나타낸 것이다.

소결시간이 증가할수록 도너농도(N_d)는 $(1.25 \sim 1.73) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 범위로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 고온소결시 소결시간이 증가할수록 연소에 의한 산소량의 감소로 산소분압의 감소가 초래된다. 따라서 산소분압이 감소하면 $[V_o^{\cdot x}] = k_d[Po_2]^{1/2}(V_o^{\cdot x}$ 는 중성의 산소공공, k_d 는 평형상수, Po_2 는 산소분압) 관계로부터 자연도너인 산소 공공

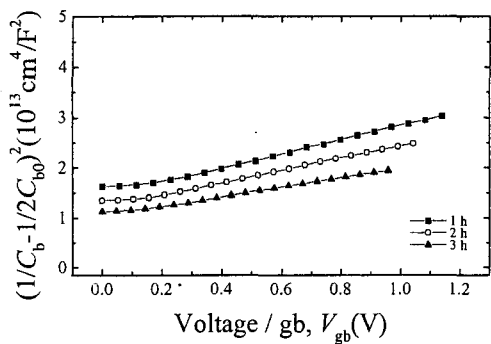


그림 4. 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 C-V 특성.

Fig. 4. C-V characteristics of ZPCCY-based varistor ceramics with sintering time.

이 증가하여 도너농도가 증가하는 것을 사료된다. 공핍층 폭(t)은 식 4에서 나타낸 바와 같이 도너농도와 계면상태밀도(N_t)에 관계되는데, 즉 N_d 가 감소할수록, N_t 가 증가할수록 증가하지만 표 1에서 N_d 와 N_t 가 모두 증가하였다. 결과적으로 소결시간에 따른 t 의 증가는 N_d 의 증가율이 N_t 의 증가율보다 큰데서 오는 결과이다. 그림 6은 소결시간에 따

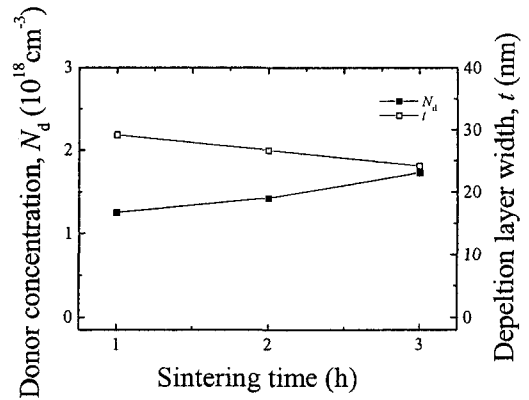


그림 5. 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 도너농도 및 공핍층 폭.

Fig. 5. Donor concentration and depletion layer of ZPCCY-based varistor ceramics with sintering time.

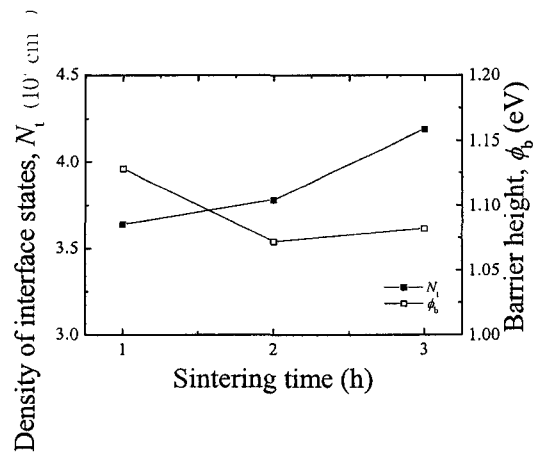


그림 6. 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 계면상태밀도 및 장벽높이.

Fig. 6. Density of interface states and barrier height of ZPCCY-based varistor ceramics with sintering time.

른 계면상태밀도(N_t)와 쇼트기 장벽높이(ϕ_b)의 변화경향을 나타낸 것이다. 소결시간이 증가함에 따라 N_t 는 $3.64 \sim 4.19 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 범위로 증가하였는데, 이러한 현상은 계면에서 전자에 대한 포획상태를 만드는 산소 흡착율의 증가이거나 계면에서 중

요한 결함중의 하나인 음으로 대전된 Zn 공공의 증가에 의한 것으로 생각된다. 쇼트기 장벽(ϕ_b)은 소결시간의 증가에 따라 1.13, 1.07, 1.08 eV로 1시간 소결시 가장 높았으며, 그 이상 소결시에는 거의 변화가 없었다. 장벽높이 ϕ_b 는 $\phi_b \propto N_t^2/N_d$ 관계에 의해 1→2 h 소결시에는 N_t^2 의 증가율 비해 N_d 의 증가율이 크며, 2→3 h 소결시에는 N_t^2 의 증가율이 N_d 의 증가율보다 작으므로 소결온도에 따른 변화경향을 해석할 수 있다.

그림 7은 소결온도에 따른 겔보기 비유전율(ϵ_{APP}'), 손실계수($\tan \delta$), 겔보기 비유전손율(ϵ_{APP}'')의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 유전현상은 전계에 따라 정. 부전하가 역방향으로 변위하는 즉, 전기쌍극자가 형성되기 때문인데 소결시간에 관계없이 주파수 증가에 따라 ϵ_{APP}' 는 감소하였으며, 100 kHz 부근에서 다소 감소율이 크게 나타났다. 주파수 증가에 따라 유전상수의 감소는 교류전계의 주파수에 추종할 수 있는 캐리어가 감소하는 유전분산현상으로 볼 수 있다. 전 주파수 범위에서 소결시간이 증가함에 따라 ϵ_{APP}' 는 증가하는 것으로 나타났다. ϵ_{APP}' 는 다음 식에서 알 수 있는 바와 같이 ZnO 결정립 크기(d)와 공핍층 폭(t)에 의해서 결정된다.

$$\epsilon_{APP}' = \epsilon_g \frac{d}{t} \quad (5)$$

여기서 ϵ_g 는 ZnO 유전상수(8.5)이다. 이 식으로부터 소결시간에 따른 ϵ_{APP}' 의 증가는 d 가 t 보다 상대적으로 증가율이 크기 때문이다. $\tan \delta$ 는 곡선의 변화로부터 100 Hz 이하에서 공간전하분극에 의한 큰 손실의 피크가 존재한다는 것을 예상할 수 있으며, 100 kHz 부근에서 배향분극에 의한 작은 손실의 피크가 나타남을 알 수 있다. 소결

표 2. 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 유전특성 파라미터.

Table 2. Dielectric characteristic parameters of ZPCCY-based varistor ceramics with sintering time.

Sintering time	ϵ_{APP}'	$\tan \delta$	ϵ_{APP}''	τ_p (μs)
1 h	1589.8	0.043	68.8	1.55
2 h	2047.3	0.057	116.2	1.70
3 h	2485.7	0.062	154.7	2.23

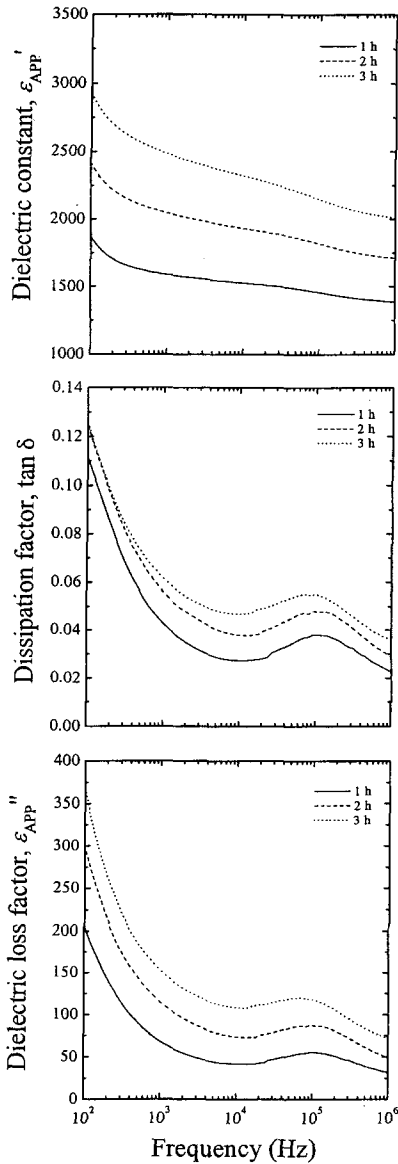


그림 7. 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 유전특성.

Fig. 7. Dielectric characteristics of ZPCCY-based varistor ceramics with sintering time.

시간에 따라 1 kHz에서 $\tan \delta$ 는 0.043~0.062 범위로 증가하였는데 이러한 증가는 누설전류의 영향에 따른 결과라 사료된다. ϵ_{APP} 는 유전체의 에너지흡수의 크기를 직접 표시한 양으로서 유전분산이 일어나는 주파수 영역에서 유전흡수가 발생하게 되며, ϵ_{APP} 의 피크는 완화과정이 어떤 것이든 간에 그 주기가 외부 전계의 주기와 같을 때에 생기며, 완화시간이 외부전계의 주기보다 클 때나, 완화과정이 외부전계의 주파수보다 빠를 때는 손실이 작다. 소결시간에 따른 ϵ_{APP} 는 $\epsilon_{APP} = \tan \delta \epsilon_{APP}'$ 에서 구할 수 있는데 68.8~154.7 범위로 증가하였다. 소결시간에 따라 완화시간은 1.55~2.23 μ s 범위로 길어짐으로서 재료의 점성저항이 증가하는 것으로 나타났다. 상세한 유전 파라미터를 표 2에 요약하여 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Y₂O₃ (ZPCCY)계 바리스터 세라믹스에 대한 소결시간을 변화시켜 그에 따른 전기적 특성을 조사하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 소결시간이 증가함에 따라 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 비직선 지수는 51.2~23.8 범위로 증가하였다.
2. 누설전류는 소결온도에 따라 1.3~5.6 μ A 범위로 증가하였다.
3. 소결시간의 증가에 따라 도너농도 및 계면상태 밀도는 증가하였다.
4. 유전완화시간은 소결시간의 증가에 따라 1.5~2.23 μ s 범위로 증가하였다.
5. 소결시간의 증가는 세라믹스의 점성저항 및 유전손실을 증가시켰다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정, 부산광역시 지원 지역협력연구센터인 동의대학교 전자세라믹스연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- [1] ニューケラスシリーズ 編集委員会, "半導体セ

ラミクスとその應用", 學獻社, p. 149, 1990.

- [2] 電氣學會, "酸化亞鉛避雷器の特性と評價試験法", 電氣學會技術報告, 第474号, 1993.
- [3] A. B. Alles, R. Puskas, G. Callahan, and V. L. Burdick, "Compositional effects on the liquid-phase sintering of praseodymium oxides-based zinc oxides varistors", J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 76, No. 8, p. 2098, 1993.
- [4] Y.-S. Lee, K.-S. Liao, and T.-Y. Tseng, "Microstructure and crystal phases of prasodymium in zinc oxide varistor ceramics", J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 79, No. 9, p. 2379, 1996.
- [5] S.-Y. Chun, K. Shizoaki, and N. Mizutani, "Formation of varistor characteristics by the grain-boundary penetration of ZnO-PrO_x liquid into ZnO ceramics", J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 82, No. 11, p. 3065, 1999.
- [6] S.-Y. Chun and N. Mizutani, "Mass transport via grain boundary in Pr-based ZnO varistors and related electrical effects", Mater. Sci. Eng. Vol. B79, No. 1, p. 1, 2001.
- [7] C.-W. Nahm, C.-H. Park, and H.-S. Yoo "Microstructure and varistor properties of ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Nd₂O₃ based ceramics", J. Mater. Sci. Lett., Vol. 19, No. 4, p. 271, 2000.
- [8] C.-W. Nahm, "The electrical properties and d.c. degradation characteristics of Dy₂O₃ doped Pr₆O₁₁-based ZnO varistors", J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 21, p. 445, 2001.
- [9] C.-W. Nahm and C.-H. Park, "Effect of Er₂O₃ addition on the microstructure, electrical properties, and stability of Pr₆O₁₁-based ZnO ceramic varistors", J. Mater. Sci., Vol. 36, No. 7, p. 1671, 2001.
- [10] 남춘우, 윤한수, 류정선, "ZPCCE계 바리스터의 미세구조와 전기적 성질 및 안정성", 한국전기전자재료학회논문지, 13권, 9호, p. 735, 2000.
- [11] 남춘우, 류정선, "Zn-Pr-Co-Cr-Er 산화물계 바리스터의 전기적 성질", 한국전기전자재료학회논문지, 14권, 5호, p. 362, 2001.
- [12] 남춘우, 류정선, 김향숙, 정영철, "Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 DC 가속열화특성", 전기전

- 자재료학회논문지, 14권, 10호, p. 808, 2001.
- [13] 남춘우, 김향숙, 정영철, "Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 전기적, 유전적 특성에 DC 가속열화 거동에 미치는 소결온도의 영향", 전기전자재료학회논문지, 15권, 3호, p. 244, 2002.
- [14] C.-W. Nahm and C.-H. Park, "Microstructure, electrical properties, and degradation behavior of praseodymium-based doped with Y₂O₃", J. Mater. Sci., Vol. 35, No. 12, p. 3037, 2000.
- [15] C.-W. Nahm, H.-S. Yoon, and J.-S. Ryu, "The nonlinear properties and d.c degradation characteristics of ZPCCE based varistors", J. Mater. Sci. Lett., Vol. 20, No. 5, p. 393, 2001.
- [16] C.-W. Nahm, "The nonlinear properties and stability of ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Er₂O₃ ceramic varistors", Mater. Lett., Vol. 43, No. 5, p. 393, 2001.
- [17] C.-W. Nahm and B.-C. Shin, "Effect of sintering temperature on electrical properties and stability of Pr₆O₁₁-based ZnO varistors", J. Mater. Sci.: Mater. Electron., Vol. 13, No. 2, p. 111, 2002.
- [18] C.-W. Nahm, "ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Er₂O₃ based-ceramic varistors with high stability of nonlinear properties", J. Mater. Sci. Lett., Vol. 21, No. 3, p. 201, 2002.
- [19] H. H. Hng and K. M. Knowles, "Microstructure and current-voltage characteristics of praseodymium-doped zinc oxide varistors containing MnO₂, Sb₂O₃, and Co₃O₄", J. Mater. Sci., Vol. 37, No. 6, p. 1143, 2002.
- [20] K. Mukae, K. Tsuda, and I. Nagasawa, "Capacitance-vs-voltage characteristics of ZnO varistors", J. Appl. Phys., Vol. 50, No. 6, p. 4475, 1979.
- [21] L. Hozer, "Semiconductor Cceramics; Grain Boundary Effects", Ellis Horwood, p. 21, 1994.
- [22] J. C. Wurst and J. A. Nelson, "Lineal intercept technique for measuring grain size in two-phase polycrystalline ceramics", J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 55, No. 97-12, p. 109, 1972.