

ZPCCY계 바리스터의 열화특성에 미치는 소결시간의 영향

남춘우[†] · 박종아

동의대학교 전기공학과

(2004년 3월 19일 접수; 2004년 5월 21일 승인)

Effect of Sintering Time on Degradation Characteristics of ZPCCY-Based Varistors

Choon-Woo Nahm[†] and Jong-Ah Park

Department of Electrical Engineering, Dongeui University, Busan 614-714, Korea

(Received March 19, 2004; Accepted May 21, 2004)

초 록

ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Y₂O₃계 세라믹스로 구성된 ZPCCY계 바리스터의 소결시간별 DC 가속열화 스트레스에 대한 전기적 안정성을 조사하였다. 소결시간은 전기적 특성 및 안정성에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 소결시간이 증가함에 따라 비직선 지수는 51.2~23.8의 범위로 감소하였으며, 누설전류는 1.3~5.6 μA의 범위로 증가하였다. 1시간 소결된 바리스터는 비직선성은 우수하나 밀도가 낮은 관계로 안정성이 상대적으로 낮았으며, 3시간 소결된 바리스터는 안정성은 양호하나 비직선성이 다소 낮은 것으로 나타났다. 2시간 소결된 바리스터는 비직선 지수가 38.6, 누설전류가 3.6 μA로 양호하고, DC 스트레스-0.95 V_{1mA}/150°C/12 h에서 바리스터 전압, 비직선 지수, 누설전류, 손실계수 변화율이 각각 -0.8%, -1.8%, +74.4%, +0.9%를 나타냄으로서 안정성이 우수한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

The electrical stability of ZPCCY-based varistors composing of ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Y₂O₃ ceramics were investigated in various DC accelerated aging stress with sintering times. Sintering time greatly affected electrical properties and stability. Sintering time decreased nonlinear exponent in the range of 51.2~23.8 and increased leakage current in the range of 1.3~5.6 μA. The varistor sintered for 1 h exhibited high nonlinearity, whereas relatively low stability. On the contrary, the varistor sintered for 3 h exhibited low nonlinearity, whereas relatively high stability. But the varistor sintered for 2 h exhibited not only good nonlinearity, with nonlinear exponent of 38.6 and leakage current of 3.6 μA but also high stability, in which the variation rates of varistor voltage, nonlinear exponent, leakage current, and dissipation factor are -0.80%, -1.81%, +74.4%, and +0.88%, respectively.

Key words : ZPCCY, Sintering time, Nonlinearity, Stability, DC accelerated aging stress

1. 서 론

오늘날 전자정보통신소자나 시스템은 더 빠르게, 더 많이, 더 편리하게 정보를 보내기 위해서 외형적으로는 경박단소화되고, 기능적으로는 복합화, 다기능성, 고주파화 등 첨단화되어가고 있다. 첨단화 못지 않게 중요한 것은 시스템 전체의 신뢰성 확보이며, 그렇지 않을 경우에는 심각한 장애를 동반할 수 밖에 없다. 신뢰성을 위협하는 것 중의 하나는 각종 시스템에 내외적으로 나타나는 각종 썬지(이상전압)이다. 시스템 자체적으로 썬지에 대한 저항력을 높이는 것은 시스템을 중후장대화 함으로써 해

결할 수도 있지만 첨단화에 배치될 뿐만 아니라 비용이 증가하기 때문에 비직선 저항체의 일종인 바리스터를 사용하는 것이 매우 효과적이다. 현재 전기전자정보통신 시스템에는 주성분이 산화아연(ZnO)인 바리스터가 광범위하게 사용되고 있다.

ZnO 바리스터는 전압에 따라 저항이 변화는 비직선 저항체로서 피보호소자에 병렬로 결선되어 평상시에는 고임피던스를 나타내는 절연체로 동작한다.^{1,2)} 그러나 썬지 침입시 저항이 급격히 감소함으로써 마치 단락된 것과 같이 동작하여 썬지를 방전시킴으로서 피보호소자를 썬지로부터 보호하게 된다. 따라서 바리스터는 수동 전자세라믹스로서 중요한 기능을 하기 때문에 바리스터 그 자체의 특성을 개선시키려는 노력이 지속적으로 이루어지고 있다. 최근에는 대부분의 ZnO 바리스터가 가지고 있는 중요한 첨가물인 Bi₂O₃의 높은 휘발성과 반응성으로부터

[†]Corresponding author : Choon-Woo Nahm
E-mail : cwnahm@deu.ac.kr
Tel : +82-51-890-1669 Fax : +82-51-890-1664

나타나는 문제점³⁾을 극복하기 위한 하나의 방법으로 Pr₆O₁₁에 대해서 다양한 연구가 이루어지고 있다.^{4,14)}

본 논문에서는 Zn-Pr-Co-Cr-Y(ZPCCY)계 산화물로 구성된 바리스터에 소결시간이 비직선성 및 유전특성의 안정성에 미치는 영향을 고찰한다.

2. 실험방법

2.1. 시편 제작

97.5 mol% ZnO + 0.5 mol% Pr₆O₁₁ + 1.0 mol% CoO + 0.5 mol% Cr₂O₃ + 0.5 mol% Y₂O₃의 시료 조성식에 따라 전자저울로 10 μg의 오차범위까지 칭량하였다. 칭량된 시료를 지르코니아 불이 든 폴리프로필렌 병에 넣은 다음, 아세톤을 분산매로 하여 24시간동안 불밀하였다. 12시간 건조시킨 후, 750°C에서 2시간 하소하였다. 하소된 시료를 시편양 만큼 마노유발에서 재분쇄한 후, 성형조제로 시료무게의 2 wt% PVA 수용액을 첨가하여 혼합한 다음, 200 mesh체로 조립하였다. 80 MPa 압력에서 직경이 10 mm, 두께가 1.8 mm가 되게 성형한 후, 1350°C에서 각각 1, 2, 3시간 소결하였다. 소결된 시편의 양면을 경면가공하여 두께가 1.0 mm가 되게 한 후, 은전극을 실크스크린 기법으로 직경이 5 mm 되게 도포한 다음, 600°C에서 10분간 열처리하였다.

2.2. 미세구조 관찰

시편의 한면을 SiC 연마지로 래핑하여 0.3 μm Al₂O₃ 분말로 경면가공한 다음, 1100°C에서 20분간 열적 예칭한 후, 표면을 Au로 코팅하여 SEM(S2400, Hitachi)으로 미세구조를 관찰하였다. 평균 결정립 크기(*d*)는 선형교차기법¹⁵⁾에 의한 식(1)로부터 구하였다.

$$d = 1.56 \cdot \frac{C_{\text{eff}}}{MN_{\text{eff}}} \quad (1)$$

여기서 C_{eff} 는 test-line의 유효길이, M 은 SEM의 배율, N_{eff} 은 입계와 test-line과의 유효교차수로 결정되었다. 세라믹스의 밀도(ρ)는 밀도측정용 소프트웨어가 장착된 전자저울을 이용하여, 아르키메데스원리에 의한 약식(2)로써 계산하였다.

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{W}{W - W_0} \quad (2)$$

여기서 ρ_0 는 물의 밀도, W 는 공기속에서 시편의 무게, W_0 는 물속에서 시편의 무게이다.

2.3. 전기적 특성 측정

전압-전류(V - I) 특성은 High Voltage Source-Measure Unit (Keithley 237)을 사용하여 전류밀도 50 mA/cm²까지 측정

하였다. 바리스터 전압($V_{1\text{mA}}$)은 전류밀도가 1 mA/cm²일 때의 전압으로, 누설전류(I_L)는 0.80 $V_{1\text{mA}}$ 에서의 전류로 정의되었으며, 비직선 지수(α)는 식(3)으로 계산하였다.

$$\alpha = 1/(\log V_{10\text{mA}} - \log V_{1\text{mA}}) \quad (3)$$

여기서 $V_{1\text{mA}}$ 와 $V_{10\text{mA}}$ 는 전류밀도 1 mA/cm²와 10 mA/cm²에 각각 대응되는 전압이다.

유전상수(ϵ_{APP})와 손실계수($\tan \delta$)와 같은 유전특성은 100 Hz~2 MHz 범위의 주파수를 갖는 1 V_{rms} 소신호를 사용하여 RLC 미터(QuadTech 7600)로 측정하였다.

2.4. DC 가속열화 시험

바리스터의 비직선성 및 유전특성의 안정성을 평가하기 위해서 스트레스 인가전 V - I 특성을 측정한 시편에 다음과 같은 각각의 DC 가속열화 스트레스를 인가하였으며, 각 스트레스 인가시 1분 간격으로 전류가 측정되어 기록되도록 하였다.

- 1차 스트레스-0.80 $V_{1\text{mA}}/90^\circ\text{C}/12\text{ h}$
- 2차 스트레스-0.85 $V_{1\text{mA}}/115^\circ\text{C}/12\text{ h}$
- 3차 스트레스-0.90 $V_{1\text{mA}}/120^\circ\text{C}/12\text{ h}$
- 4차 스트레스-0.95 $V_{1\text{mA}}/125^\circ\text{C}/12\text{ h}$
- 5차 스트레스-0.95 $V_{1\text{mA}}/150^\circ\text{C}/12\text{ h}$

1차 스트레스가 완료된 다음, 전기적 특성을 측정하였으며, 계속적으로 2~5차 스트레스를 바리스터에 인가하여 1차 스트레스와 동일하게 전기적 특성을 측정하였다. 스트레스 인가동안 스트레스 시간에 따른 누설전류의 변화인 열화율 계수(K_T)는 식(4)로 계산하였다.¹⁶⁾

$$I_L = I_{L0} + K_T \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

여기서 I_L 은 시간 t 에서의 누설전류이며 I_{L0} 는 $t=0$ 에서의 I_L 이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 1350°C에서 각각 1~3시간 소결된 바리스터 세라믹스의 미세구조를 나타낸 사진이다. 바리스터 세라믹스의 안정성에 큰 영향을 미치는 소결밀도(ρ)는 소결시간에 따라 5.34~5.54 g/cm³ 범위로 점차 증가하였으며, 3시간에서는 ZnO의 TD(5.78 g/cm³)의 95%에 도달하는 치밀성을 나타내었다. 평균 결정립 크기(d)는 소결시간에 증가함에 따라 11.4~16.0 μm 범위로 증가하였다. 소결시간에 따른 평균 결정립 크기와 밀도를 Table 1에 요약하여 나타내었다.

Fig. 2는 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 전계(E)-전류밀도(J) 특성곡선을 나타낸 것으로 예비항복영역과 항복영역으로 대별됨을 알 수 있다. ZnO 결정립-입계-ZnO 결정립으로 구성되는 마이크로 바리스터의

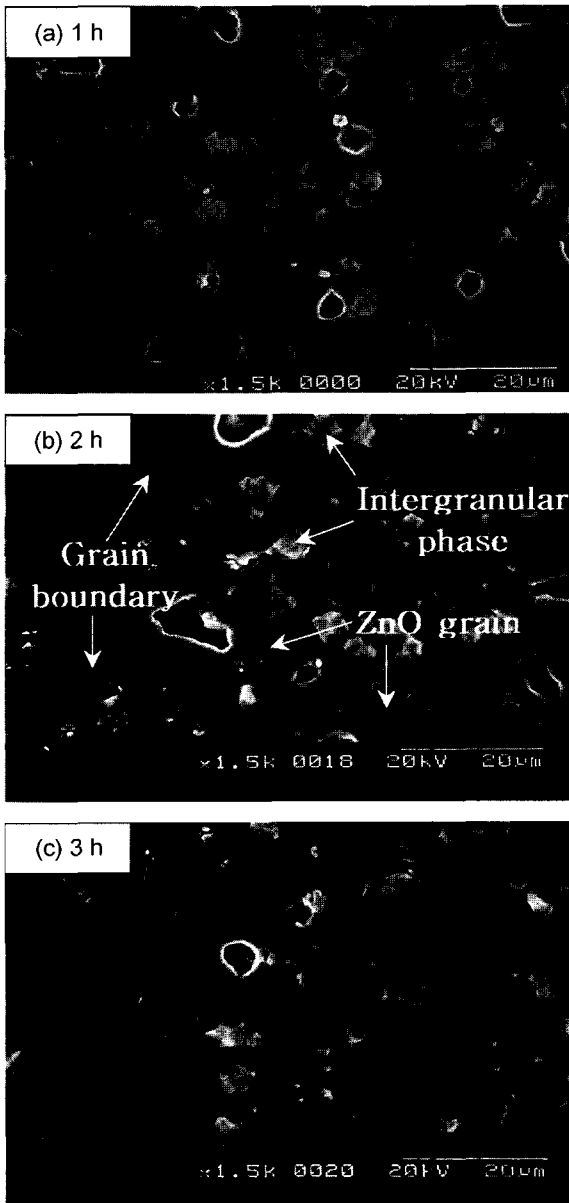


Fig. 1. SEM micrographs of ZPCCY-based varistor ceramics with sintering time.

전도특성은 현재까지 K. Eda¹⁷⁾에 의해 제안된 이중쇼트키 장벽모델로 설명하는 것이 가장 일반적이다. 항복전계 이하에서는 쇼트키 열전자방출기구가, 항복전계 이상에서는 Fowler-Nordheim 터널링기구가 우세하게 작용한다는

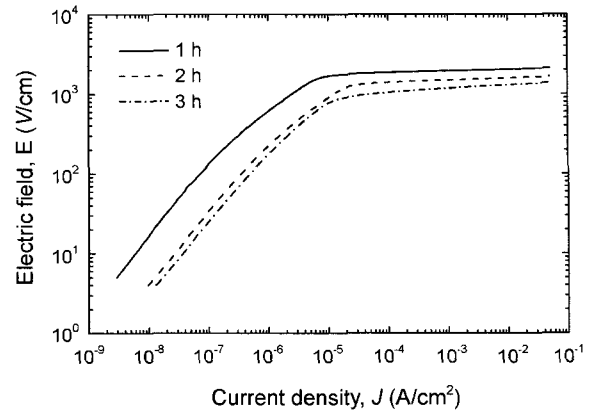


Fig. 2. E - J characteristics of ZPCCY-based varistors with sintering time.

해석으로부터 E - J 특성곡선을 이해 할 수 있다. 외부에서 인가한 전압은 대부분이 입계영역의 공핍층에 인가되므로 바리스터 시편의 일정두께(여기서는 1 mm) 내에 전극 사이에 직렬로 연결된 입계 수가 많을수록 바리스터 전압은 증가한다. 따라서 소결시간의 증가에 따른 194.5~117.4 V/mm 범위로 V_{1mA} 의 증가는 평균 결정립 크기의 감소에 의한 입계 수의 증가에 따른 것이다. 항복현상이 일어날 때 입계당 전압(V_{gb})은 $V_{gb} = V_{1mA}/n = (d/D)V_{1mA}$ 관계식으로 구할 수 있는데, 여기서 n 은 입계의 수, D 는 시편두께, d 는 평균 결정립 크기이다. 비직선 지수(α)는 소결시간의 증가에 따라 51.2~23.8로 크게 감소하였고, 반대로 누설 전류(I_L)는 1.3~5.6 μA 로 증가하였다. 이것은 소결시간의 증가에 따라 쇼트키 장벽높이가 감소하여, 터널링에 의해 형성되는 전류보다 열전자 방출에 의해 형성되는 전류가 상대적으로 증가하였기 때문에 나타나는 결과로 판단된다. 결과적으로 소결시간의 증가는 미세구조적으로 치밀성은 향상시키지만 전기적으로 비직선성을 감소시키는 결과를 가져다줄 수 있다. 자세한 V - I 특성 파라미터는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 3은 소결시간에 따른 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 유전 특성곡선을 나타낸 것이다. 주파수 증가에 따라 유전상수(ϵ_{APP}')의 감소는 교류전계의 주파수에 추종할 수 있는 쌍극자 수의 감소에 따른 결과로 소위 유전분산현상에 의한 것으로 볼 수 있다. 소결시간이 증가함에 따라 유전상수는 증가하는 것으로 나타났으며, ZnO 결정립 자

Table 1. Microstructure, V - I , and Dielectric Parameters of ZPCCY-Based Varistors with Sintering Time

Sintering time (h)	d (μm)	ρ (g/cm^3)	V_{1mA} (V/mm)	V_{gb} (V/gb)	α	I_L (μA)	ϵ_{APP}'	$\tan \delta$
1	11.4	5.34	194.5	2.2	51.2	1.3	1589.8	0.043
2	13.9	5.41	149.3	2.1	38.6	3.9	2047.3	0.057
3	16.0	5.54	117.4	1.9	23.8	5.6	2485.7	0.062

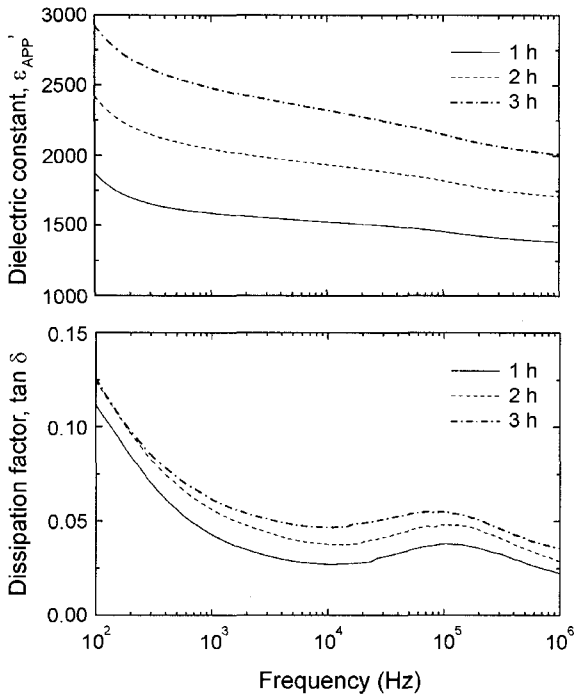


Fig. 3. Dielectric characteristics of ZPCCY-based varistors with sintering time.

체의 유전상수(8.5)보다 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이것은 식 (5)에 나타난 바와 같이 ZnO 결정립 크기(*d*)와 공핍층 폭(*t*)에 의해서 결정된다.

$$\epsilon_{APP} = \epsilon_g \frac{d}{t} \tag{5}$$

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.

손실계수(tan δ)는 곡선의 변화로부터 100 Hz 이하에서 공간전하분극에 의한 큰 손실 피크가 존재함을 예상할 수 있으며, 100 kHz 부근에서 배향분극에 의한 작은 손실 피크가 나타남을 알 수 있다. 1 kHz에서의 tan δ는 소결시간이 증가함에 따라 0.043~0.062 범위로 증가하였는데 이러한 증가는 누설전류의 영향에 따른 결과라 사료된다.

Fig. 4는 ZPCCY계 바리스터 세라믹스의 소결시간에 따른 DC 가속열화 스트레스 동안의 누설전류의 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 높은 안정성을 유지하고 있으며, 소결시간이 안정성에 미치는 영향을 누설전류 곡선의 기울기로부터 확인할 수 있다. 직관적으로 3차 스트레스까지는 누설전류가 거의 일정한 것으로 보이며, 4차 스트레스에서 약간의 누설전류의 증가가 확인된다. Table 2에 나타난 열화율 계수(K_T)를 보면 보다 가혹한 스트레스인 3차 이후에는 2시간 소결된 바리스터가 1, 3시간 소결

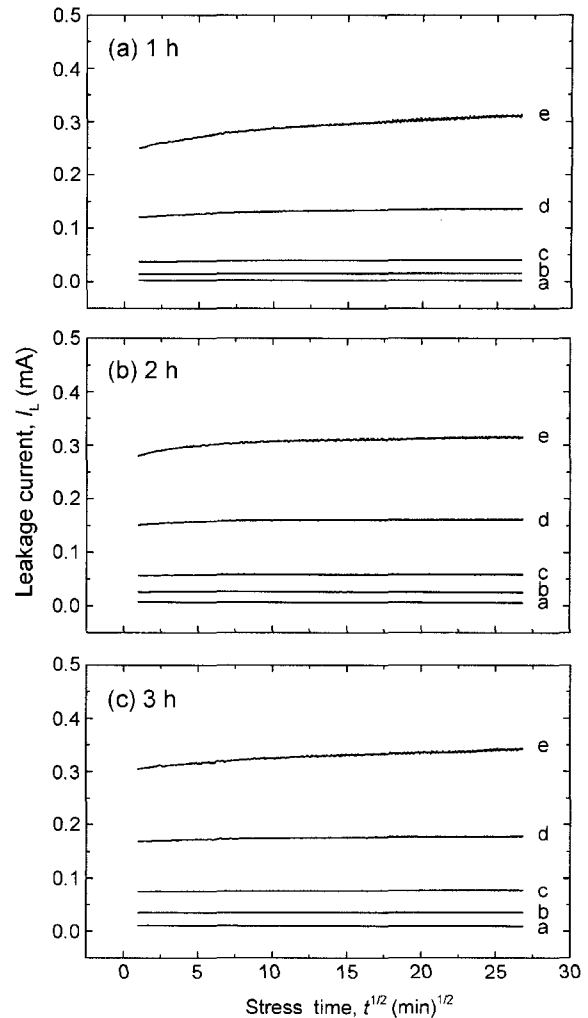


Fig. 4. Leakage current of ZPCCY-based varistors during DC accelerated aging stress with sintering time; a : 1st, b : 2nd, c : 3rd, d : 4th, and e : 5th.

Table 2. Degradation Rate Coefficient of ZPCCY-Based Varistors During DC Accelerated Aging Stress with Sintering Time

Stress condition	$K_T (\mu A \cdot h^{-1/2})$		
	Sintering time		
	1 h	2 h	3 h
1st	-0.004	-0.30	-0.30
2nd	0.29	-0.63	0.17
3rd	0.52	0.05	0.83
4th	2.53	0.52	1.33
5th	10.38	3.68	7.22

된 바리스터보다 기울기가 작다는 것을 알 수 있다. 5차 스트레스동안에는 열화율계수가 1시간보다 1/3, 3시간보다는 1/2에 불과한 낮은 값($K_T=3.68 \mu A \cdot h^{-1/2}$)을 나타냄으로써 안정성이 가장 우수한 것으로 나타나고 있다.

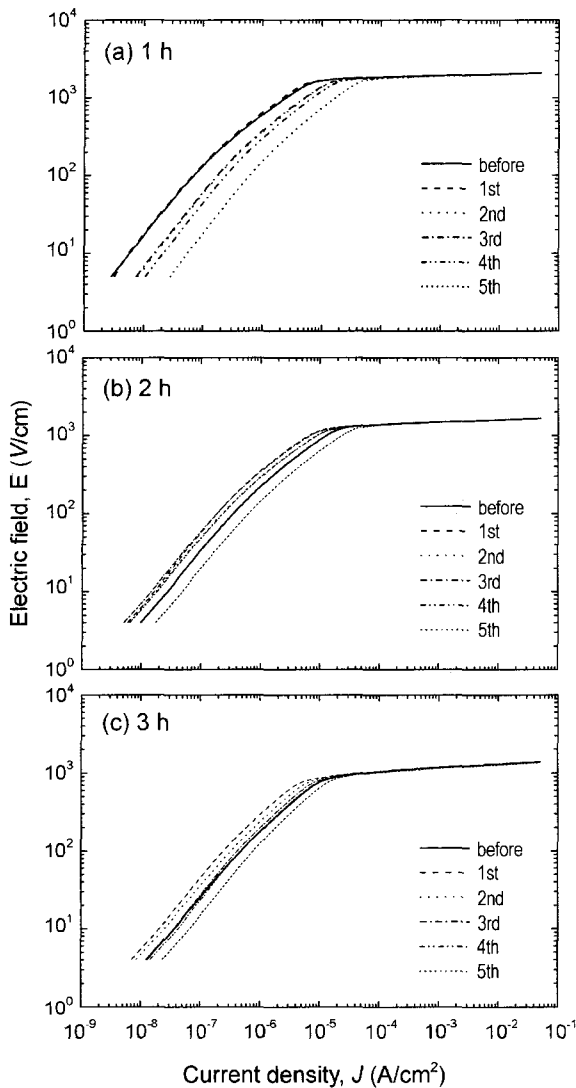


Fig. 5. Variation of E - J characteristic curves of ZPCCY-based varistors before and after DC accelerated aging stress with sintering time.

Fig. 5는 DC 가속열화 스트레스전·후의 E - J 특성곡선의 변화추이를 나타낸 것이다. 예비항복영역 즉 누설전류 영역에서 스트레스에 따른 특성곡선들 간의 변화폭은 안정성과 직접적으로 관계되며, 스트레스전의 특성곡선을 기준으로 누설전류 증·감방향의 곡선간의 폭이 바로 노화정도의 척도가 된다. 2시간 소결된 ZPCCY계 바리스터는 전체 스트레스전·후의 곡선간의 폭이 3시간과 비슷하나 4차 스트레스까지의 곡선이 초기치보다 아래에 위치함으로써 상대적으로 안정성이 우수할 것으로 예상된다.

소결시간에 따른 DC 가속열화 스트레스 후의 V - I 특성 파라미터의 변화율을 Table 3에 요약하여 나타내었다. V - I 특성 파라미터 중에서 스트레스에 따른 바리스터 전압 변화율($\% \Delta V_{1mA}$)은 안정성에 가장 중요한 평가척도로 사용된다. 일반적으로 상용의 바리스터의 경우 $0.85V_{1mA}/$

$85^{\circ}\text{C}/1000\text{ h}$ 조건에서 $\% \Delta V_{1mA} \leq 10\%$ 로 규정하고 있다. 스트레스에 따른 바리스터의 감소는 바로 노화로 이어지기 때문에 가능한 $\% \Delta V_{1mA}$ 이 작은 것이 안정성이 좋은 바리스터라 할 수 있다. 1시간 소결된 바리스터의 경우 전압 변화율($\% \Delta V_{1mA}$)은 -1.4% , 비직선 지수 변화율($\% \Delta \alpha$)은 -4.9% 로 다소 낮게 나타났으나, 누설전류 변화율($\% \Delta I_L$)은 $+495.5\%$ 로서 상대적으로 매우 높게 나타났다. 특히 누설전류는 5차 스트레스 후에는 크게 변하여 2, 3차 스트레스 후의 누설전류보다 큰 것으로 나타났다. 3시간 소결된 바리스터의 경우 $\% \Delta V_{1mA}$ 는 -2.6% , $\% \Delta \alpha$ 는 -3.6% 로 1시간 보다 $\% \Delta V_{1mA}$ 는 크나 $\% \Delta \alpha$ 는 작았다. $\% \Delta I_L$ 는 $+5.3\%$ 로 누설전류의 안정성은 가장 높은 것으로 나타났다. 2시간 소결된 바리스터의 $\% \Delta V_{1mA}$ 는 -0.8% 로 상대적으로 1, 3시간의 것보다 훨씬 작아서 안정성이 보다 높다는 것을 알 수 있다. $\% \Delta \alpha$ 도 역시 -2.0% 로 1, 3시간의 것보다 작다. 다만 $\% \Delta I_L$ 는 $+74.9\%$ 로 1시간 보다는 낮은 변화율을 나타내었지만 3시간보다는 높은 것으로 나타났다. 이것은 밀도가 3시간 소결된 세라믹스보다 낮음으로서 상대적으로 전도경로가 작아 입계당 누설전류가 높은데서 오는 결과라 사료된다. 한편 2시간 소결된 바리스터가 상대적으로 높은 안정성을 나타냄을 Fig. 6에 나타낸 유전특성에서도 확인할 수 있다. 스트레스 후의 E - J 특성에서도 언급한 바와 같이 2시간 소결된 바리스터가 유전특성 곡선간의 간격이 보다 조밀함으로서 특성의 변화가 작다는 것을 알 수 있다. 소결시간이 증가함에 따라 유전상수 변화율($\% \Delta \epsilon_{APP}$)은 $1.9 \sim 7.1$ 범위로 증가하였으며, 유전손실 변화율($\% \Delta \tan \delta$)은 $0.1 \sim 60.1$ 범위로 나타났으며, 2시간에서 가장 낮았다. 소결시간에 따른 DC 가속열화 스트레스 후의 유전특성 파라미터의 변화율을 Table 3에 요약하여 나타내었다.

4. 결 론

ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Y₂O₃계 세라믹스로 구성된 ZPCCY계 바리스터의 소결시간별 DC 가속열화 스트레스에 대한 전기적 안정성을 조사하였다.

1. 소결시간은 전기적 특성 및 안정성에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.
2. 소결시간이 증가함에 따라 비직선 지수는 $51.2 \sim 23.8$ 의 범위로 감소하였으며, 누설전류는 $1.3 \sim 5.6 \mu\text{A}$ 의 범위로 증가하였다.
3. 1시간 소결된 바리스터는 비직선성은 우수하나 밀도가 낮은 관계로 안정성이 상대적으로 낮았으며, 3시간 소결된 바리스터는 안정성은 양호하나 비직선성이 다소 낮은 것으로 나타났다.
4. 2시간 소결된 바리스터는 비직선 지수가 38.6, 누설전류가 $3.6 \mu\text{A}$ 로 양호하고, DC 스트레스- $0.95 V_{1mA}/150^{\circ}\text{C}/$

Table 3. Variation of V - I and Dielectric Characteristic Parameters of ZPCCY-Based Varistors before and after DC Accelerated Aging Stress with Sintering Time

Sintering time	Stress condition	V_{1mA} (V/mm)	% V_{1mA}	α	% $\Delta\alpha$	I_L (μA)	% ΔI_L	ϵ_{APP}'	% $\Delta\epsilon_{APP}'$	$\tan \delta$	% $\Delta\tan \delta$
1 h	before	194.5	0	51.2	0	1.3	0	1589.8	0	0.0433	0
	1st	194.5	0	51.2	0	1.2	-7.7	1523.1	-4.2	0.0340	-21.5
	2nd	194.0	-0.3	51.1	-0.2	2.6	100.0	1588.7	-0.1	0.0406	-6.2
	3rd	193.6	-0.5	50.8	-0.8	2.6	100.0	1590.1	0	0.0426	-1.6
	4th	193.0	-0.8	50.1	-2.2	3.4	161.5	1594.2	0.3	0.0479	10.6
	5th	191.7	-1.4	48.7	-4.9	7.9	507.7	1619.7	1.9	0.0693	60.1
2 h	before	149.3	0	38.6	0	3.9	0	2047.3	0	0.0568	0
	1st	149.2	-0.1	38.5	-0.3	2.2	-43.6	2039.3	-0.4	0.0492	-13.4
	2nd	149.1	-0.1	38.5	-0.3	2.8	-28.2	2119.3	3.5	0.0494	-13.0
	3rd	149.0	-0.2	38.4	-0.5	2.3	-41.0	2126.6	3.9	0.0487	-14.3
	4th	148.7	-0.4	36.7	-4.9	2.4	-38.5	2130.6	4.1	0.0490	-13.7
	5th	148.1	-0.8	37.9	-1.8	6.8	74.4	2145.5	4.8	0.0573	0.9
3 h	before	117.4	0	23.8	0	5.6	0	2485.7	0	0.0622	0
	1st	117.2	-0.2	23.8	0	4.1	-26.8	2588.3	4.1	0.0583	-6.3
	2nd	116.9	-0.4	23.6	-0.8	4.4	-21.4	2608.3	4.9	0.0597	-4.0
	3rd	116.4	-0.9	23.3	-2.1	4.8	-14.3	2612.0	5.1	0.0621	-0.2
	4th	115.9	-1.3	23.0	-3.4	5.2	-7.1	2623.3	5.5	0.0656	5.5
	5th	114.3	-2.6	23.0	-3.4	5.9	5.4	2661.8	7.1	0.0677	8.8

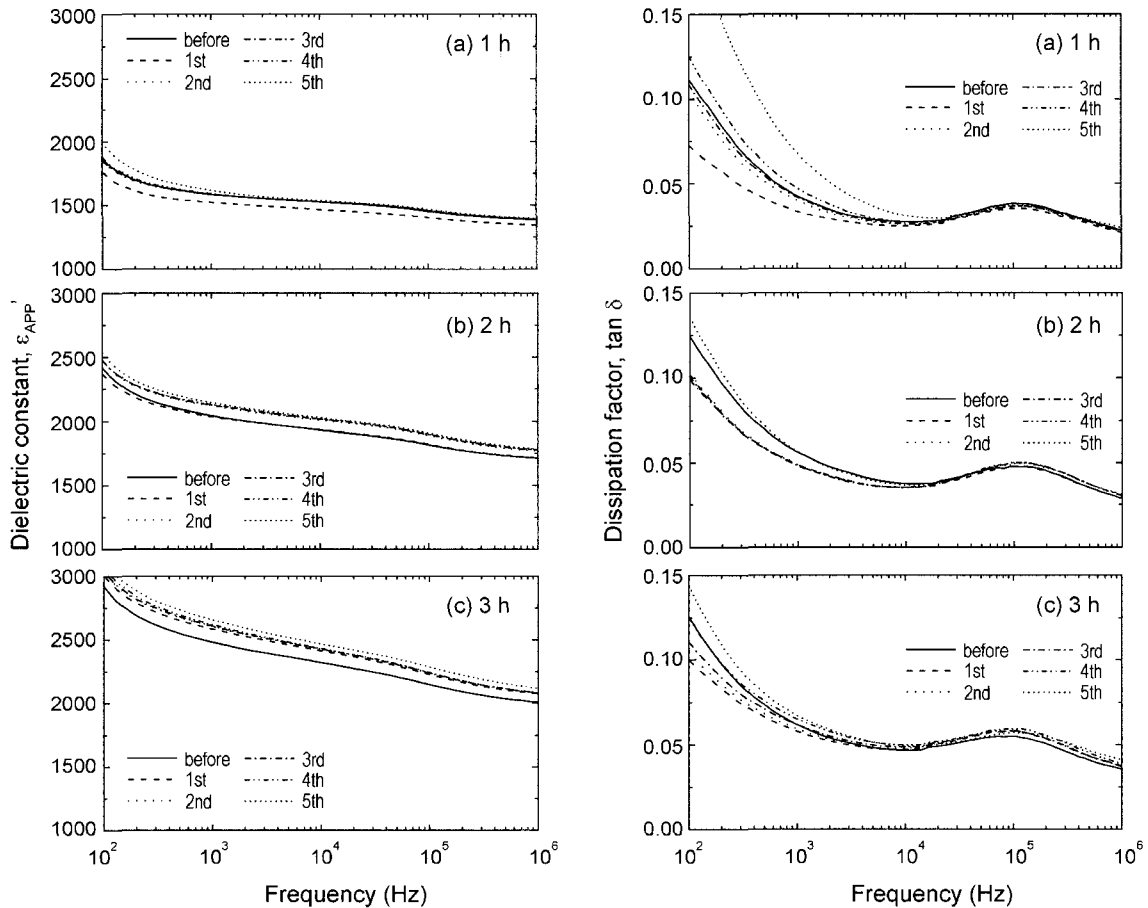


Fig. 6. Variation of dielectric curves of ZPCCY-based varistors before and after DC accelerated aging stress with sintering time.

12 h에서 바리스터 전압, 비직선 지수, 누설전류, 손실계수 변화율이 각각 -0.8%, -1.8%, +74.4%, +0.9%를 나타냄으로서 안정성이 우수한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 결과물은 과학기술부 · 한국과학재단에서 지정한 지역협력연구센터(RRC) 및 산업자원부 · 한국산업기술평가원에서 지정한 지역기술혁신센터(TIC)인 동의대학교 전자세라믹스센터의 지원을 받았습니다.

REFERENCES

1. L. M. Levinson and H. R. Pilipp, "Zinc Oxide Varistor-A Review," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **65** [4] 639-46 (1986).
2. T. K. Gupta, "Application of Zinc Oxide Varistor," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73** [7] 1817-40 (1990).
3. Y.-S. Lee and T.-Y. Tseng, "Phase Identification and Electrical Properties in ZnO-Glass Varistors," *J. Am. Ceram. Soc.*, **75** [6] 1636-40 (1992).
4. A. B. Alles and L. Burdick, "The Effect of Liquid-Phase Sintering on the Properties of Pr_6O_{11} -Based ZnO Varistors," *J. Appl. Phys.*, **70** [11] 6883-90 (1991).
5. A. B. Alles, R. G. Puskas, Callahan, and V. L. Burdick, "Compositional Effect on the Liquid-Phase Sintering of Praseodymium Oxides-Based ZnO Varistors," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [8] 2098-102 (1993).
6. Y.-S. Lee, K.-S. Liao, and T.-Y. Tseng, "Microstructure and Crystal Phases of Praseodymium Oxides in Zinc Oxide Varistor Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **79** [9] 2379-84 (1996).
7. C. W. Nahm, "The Nonlinear Properties and Stability of ZnO- Pr_6O_{11} -CoO- Cr_2O_3 - Er_2O_3 Ceramic Varistors," *Mater. Lett.*, **47** [3] 182-87 (2001).
8. C.-W. Nahm, "ZnO- Pr_6O_{11} -CoO- Cr_2O_3 - Er_2O_3 Based-Ceramic Varistors with High Stability of Nonlinear Properties," *J. Mater. Sci. Lett.*, **21** [3] 201-04 (2002).
9. C.-W. Nahm and B.-C. Shin, "Effect of Sintering Temperature on Electrical Properties and Stability of Pr_6O_{11} -Based ZnO Varistors," *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **13** [2] 111-20 (2002).
10. C.-W. Nahm and H.-S. Kim, "Influence of Cooling Rate on Stability of Nonlinear Properties of ZnO- Pr_6O_{11} -Based Varistor Ceramics," *Mater. Lett.*, **57** [9-10] 1544-49 (2003).
11. C.-W. Nahm and B.-C. Shin, "Highly Stable Electrical Properties of ZnO- Pr_6O_{11} -CoO- Cr_2O_3 - Y_2O_3 -Based Varistor Ceramics," *Mater. Lett.*, **57** [7] 1322-26 (2003).
12. C.-W. Nahm, "Microstructure and Electrical Properties of Y_2O_3 Doped ZnO- Pr_6O_{11} -Based Varistor," *Mater. Lett.*, **57** [7] 1317-21 (2003).
13. C.-W. Nahm, J.-A. Park, M.-J. Kim, and J.-S. Ryu, "Electrical and Dielectric Properties of Zn-Pr-Co-Cr-Dy Oxides-Based Varistors," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [10] 897-901 (2003).
14. C.-W. Nahm, J.-A. Park, M.-J. Kim, and J.-S. Ryu, "Electrical Stability of Zn-Pr-Co-Cr-Dy Oxides-Based Varistor Ceramics," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [11] 1067-72 (2003).
15. J. C. Wurst and J. A. Nelson, "Lineal Intercept Technique for Measuring Grain Size in Two-Phase Polycrystalline Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **97** [12] 109-11 (1972).
16. J. Fan and R. Freer, "Deep Level Transient Spectroscopy of Zinc Oxide Varistors Doped with Aluminum Oxide and/or Silver Oxide," *J. Am. Ceram. Soc.*, **77** [10] 2663-68 (1994).
17. K. Eda, "Conduction Mechanism of Non-Ohmic Zinc Oxide Ceramic," *J. Appl. Phys.*, **49** [5] 2964-72 (1978).