

Electrical Properties and Stability of ZPCCD-Based Varistors with Sintering Time

Choon-Woo Nahm,[†] Jong-Ah Park, Dea-Hoon Yoo, and Hyong-Kwon Suh*

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

*APK Co. Ltd., Kyungnam 630-850, Korea

(Received May 10, 2005; Accepted July 8, 2005)

소결시간에 따른 ZPCCD계 바리스터의 전기적 특성 및 안정성

남춘우[†] · 박종아 · 유대훈 · 서형권*

동의대학교 전기공학과

*(주)에이피케이

(2005년 5월 10일 접수; 2005년 7월 8일 승인)

ABSTRACT

The electrical properties and stability of the varistors composed of ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Dy₂O₃ system were investigated with sintering time in the range of 1~3 h at 1350°C. As the sintering time was increased, the varistor voltage and leakage current increased, but the nonlinear exponent decreased. The varistors sintered for 1 h exhibited excellent nonlinearity, with a nonlinear exponent of 55.3 and a leakage current of 0.1 μA, whereas presented relatively low stability. The varistors sintered for 2 h exhibited not only high nonlinear exponent of 46.3, low leakage current of 0.3 μA, low dielectric dissipation factor of 0.0431, but also the highest stability, in which the variation rates of varistor voltage, nonlinear exponent, leakage current, dielectric constant, and dielectric dissipation factor were -3.0%, -4.1%, +3056.2%, +5.1%, and -12.5%, respectively, after DC accelerated aging stress state of 0.95 V_{1mA}/150°C/24 h. On the whole, the nonlinearity and stability of these varistors are greatly affected by the sintering time.

Key words : Varistors, Nonlinearity, Stability, DC accelerated aging stress

1. 서 론

대표적인 n형 반도체 산화물인 ZnO는 다양한 첨가물과의 혼합조성에 기인하는 흥미로운 전기적, 광학적 특성 때문에 전기, 전자, 정보통신 분야에서 광범위하게 응용되고 있다. 특히 최근들어 첨단기술의 시험무대인 가전기 기 시장의 급격한 성장과 더불어 관련부품의 수요가 급증하고 있어 ZnO를 이용한 소자의 특성 개발이 활발히 추진되고 있다.

ZnO 바리스터는 써지보호소자로서 이들 전자기기가 점차 고집적화, 소형화됨에 따라 필연적으로 저하되는 절연 내력을 보강하여 다양한 경로를 통해 유입되는 써지로부터의 피해를 미연해 방지하는데 사용된다. ZnO 바리스터는 주성분인 ZnO에 소량의 바리스터 형성산화물과 특성 개선용 산화물을 혼합하여 만들어진 반도체 세라믹스 소자이다. 미세구조적으로 ZnO 바리스터의 내부는 비직선성을 나타내는 최소단위인 마이크로 바리스터가 체적만

큼 존재하는데, 이것은 산화아연 결정립-입간층-산화아연 결정립의 구조로 구성되어 있다. 이런 반도체-절연체-반도체 구조에서 독특한 전류-전압 특성인 비직선성 뿐만 아니라 우수한 에너지 흡수성이 나타난다. 때문에 ZnO 바리스터는 고전압에서 저전압에 이르기까지 다양한 응용 범위를 갖게 된다. 통상 피보호기기의 전단 및 전원부에 병렬로 연결되어서 절연체로 동작하다가 써지 침입시에만 도체로 동작하여 접지로 써지를 방출시킨 후 다시 절연체로 회복한다.¹⁻⁹⁾

한편 ZnO 바리스터의 특성 개선은 주로 반영구적인 안정성 향상을 목표로 조성 또는 공정의 다변화를 통해 시도되고 있다. 이미 외국기업체를 필두로 기존의 바리스터 형성산화물인 Bi₂O₃를 대체하는 조성물 개발에 지속적인 연구가 진행되고 있으며, 근래에는 국내에서도 Pr₆O₁₁을 바리스터 형성산화물로 사용하는 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터에서 우수한 전기적 특성 및 안정성이 보고되고 있다.¹⁰⁻¹⁴⁾

본 연구에서는 소결시간에 따른 ZPCCD(ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Dy₂O₃)계 바리스터의 전기적 특성 및 안정성을 DC 가속열화 시험으로 평가하여 그 응용가능성을 고찰하였다.

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

2. 실험 방법

2.1. 시편 제작

96.5 mol% ZnO, 0.5 mol% Pr₆O₁₁, 2.0 mol% CoO, 0.5 mol% Cr₂O₃, 0.5 mol% Dy₂O₃ 조성식에 따라 순도 99.9% 시료를 10 μg의 오차범위까지 칭량한 다음, 지르코니아 불과 아세톤이 든 폴리프로필렌 용기에 넣어 24시간 동안 불밀하였다. 120°C에서 12시간 동안 건조시킨 후, 750°C에서 2시간 하소시켰다. 시편 양만큼의 시료를 마노 유발로 재분쇄한 다음, 성형조제 PVA 수용액을 시료무게의 2 wt% 첨가시켜 균일하게 혼합하여 200 mesh 체로 조립하였다. 800 kg/cm² 압력하에서 직경이 10 mm, 두께가 1.8 mm가 되게 원판형으로 성형한 후, 같은 조성의 분위기 분말과 함께 도가니에 넣어 4°C/min의 상승·하강율로 1350°C에서 각각 1, 2, 3시간 소결하였다. 소결된 시편을 1.0 mm 두께로 연마하여 초음파 세척 후, 직경이 5 mm되게 양면에 은전극을 도포한 다음, 600°C에서 10분간 열처리하여 오음성 접촉이 되게 하였다.

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 선형교차기법에 의한 식 (1)로부터 구하였다.¹⁵⁾

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

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

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

여기서 *ρ₀*는 물의 밀도, *W*는 공기속에서 시편의 무게, *W₀*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 측정하였다. 바리스터 전압(*V_{1mA}*)은 전류밀도가 1 mA/cm²일 때의 전압으로, 누설전류(*I_L*)는 0.80 *V_{1mA}*에서의 전류로 정의되었으며, 비직선 지수(*α*)는 식 (3)으로 계산하였다.

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

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

유전 특성은 100 Hz~2 MHz 범위의 주파수를 갖는 1 *V_{rms}* 소신호를 사용하여 RLC 미터(QuadTech 7600)로 조사하였다.

2.4. DC 가속열화 시험

안정성을 평가하기 위해서 스트레스 인가전 *V-I* 특성을 측정된 소자에 다음과 같은 각각의 DC 가속열화 스트레스를 인가하였으며, 각 스트레스 인가시 1분 간격으로 전류가 측정, 기록되도록 하였다.

- 1차 스트레스-0.85 *V_{1mA}*/115°C/24 h
- 2차 스트레스-0.90 *V_{1mA}*/120°C/24 h
- 3차 스트레스-0.95 *V_{1mA}*/125°C/24 h
- 4차 스트레스-0.95 *V_{1mA}*/150°C/24 h

1차 DC 스트레스가 완료된 다음, 전기적 특성을 측정하였으며, 계속적으로 2, 3, 4차 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*에서 누설전류, *I_{L0}*는 *t*=0에서 *I_L*이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 소결시간에 따른 ZPCCD계 바리스터의 SEM 사진이다. 전체 소결시간에서 ZnO 결정립과 입간상을 제외한 불필요한 반응상이 존재하지 않는 전형적인 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 단순 미세구조를 나타내었다. 소결시간이 증가함에 따라 ZnO 결정립은 커지고, 기공의 분포가 적어짐을 확인할 수 있다. 밀도(*ρ*)와 평균 결정립 크기(*d*)는 각각 5.49~5.63 g/cm³와 14.5~19.5 μm 범위로 증가하여 세라믹스의 구조적 치밀성이 소결시간의 증가로 향상되었음을 알 수 있다. 밀도는 이후에 언급될 바리스터의 안정성에 영향을 미치는 중요한 요소로서 밀도가 증가하면 안정성이 향상된다. 자세한 미세구조 파라미터를 Table 1에 요약하였다.

Fig. 2는 소결시간에 따른 ZPCCD계 바리스터의 전계-전류밀도(*E-J*) 특성을 나타낸 것으로 직관적인 바리스터의 비직선성 판단에 용이하다. 저전계에서 고전계 방향으로 특성 곡선을 관찰해보면 누설전류가 차츰 증가하는 예비항복영역과 임의의 전계부분에서 급격한 증가를 보이는 항복영역으로 대별된다. 이 임의의 전계부분에 바리스터 전압(*V_{1mA}*)이 존재하는데 크기에 따라 응용범위가 결정된다. 바리스터의 비직선성은 저전계의 예비항복영역에

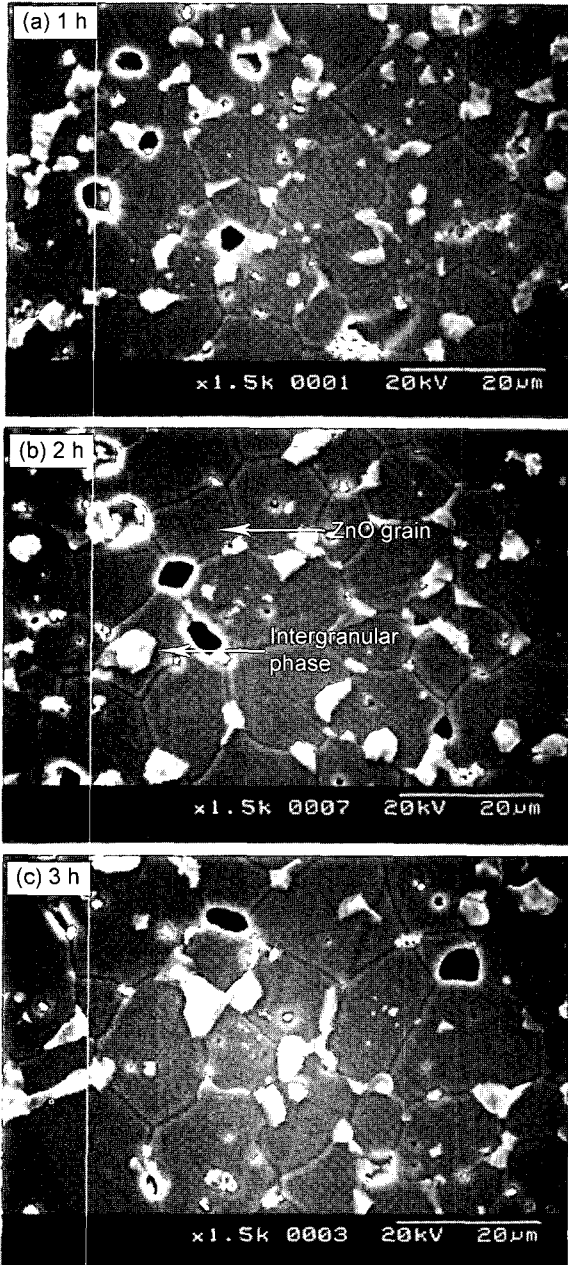


Fig. 1. SEM micrographs of ZPCCD system varistors with various sintering time.

서는 최대한 낮은 누설전류만을 허용하며 유사절연체 특성에 근접할수록, 항복영역에서는 날카로운 꺾임성을 나타낼수록 우수하게 된다. 소결시간이 증가함에 따라 비직

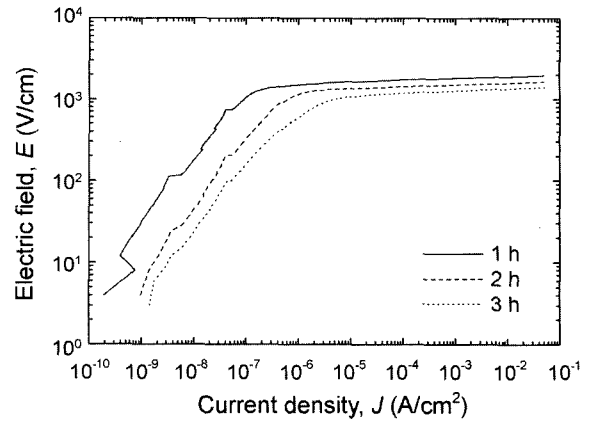


Fig. 2. E-J characteristics of ZPCCD system varistors with various sintering time.

선 지수(α)는 55.3~38.2 범위로 감소하고, 누설전류(I_L)는 0.1~1.1 μA 범위로 증가하였다. 바리스터 전압은 전도경로 내에 존재하는 유효입계 즉, 마이크로 바리스터의 수가 많을수록 증가하는데, 소결시간의 증가로 평균 결정립 크기가 증가하여 오히려 유효입계수는 감소하였으므로 181.9~126.7 V/mm 범위로 감소하였다. 자세한 V-I 특성 파라미터를 Table 1에 나타내었다.

Fig. 3은 소결시간에 따른 ZPCCD계 바리스터의 유전 특성을 나타낸 것이다. 유전상수(ϵ_{APP})는 주파수가 증가할수록 감소하였는데, 이것은 교류전계의 주파수 추종 캐리어의 수가 주파수 증가에 따라 감소하는 유전분산현상에 기인하는 결과이다. 유전상수는 식 (5)에서 평균 결정립 크기(d)와 공핍층 폭(t)에 의해서 결정되며, ϵ_g 는 ZnO 유전상수(8.5)이다.¹⁷⁾

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

전체 주파수 범위에서 소결시간이 증가함에 따라 유전상수가 증가하는 것은 평균 결정립 크기의 증가율이 공핍층 폭보다 상대적으로 크기 때문이다. 1 kHz에서 측정된 유전손실계수($\tan \delta$)는 소결시간이 증가함에 따라 0.0228~0.0505 범위로 증가하였다. 유전손실계수는 열적손실과 재료의 점성저항에 의해 나타나는데, 소결시간의 증가로 누설전류가 증가하고, 주파수에 따른 유전상수의 감소율이 커지는 것과 관련이 있다. 한편 유전분산이 나타나는

Table 1. Microstructural, V-I, and Dielectric Characteristic Parameters of ZPCCD System Varistors with Various Sintering Time

Sintering time	d (μm)	ρ (g/cm^3)	V_{1mA} (V/mm)	α	I_L (μA)	ϵ_{APP}' at 1 kHz	$\tan \delta$ at 1 kHz
1 h	14.5	5.49	181.9	55.3	0.1	1933.9	0.0228
2 h	16.5	5.58	150.3	46.3	0.3	2908.4	0.0431
3 h	19.5	5.63	126.7	38.2	1.1	3505.0	0.0505

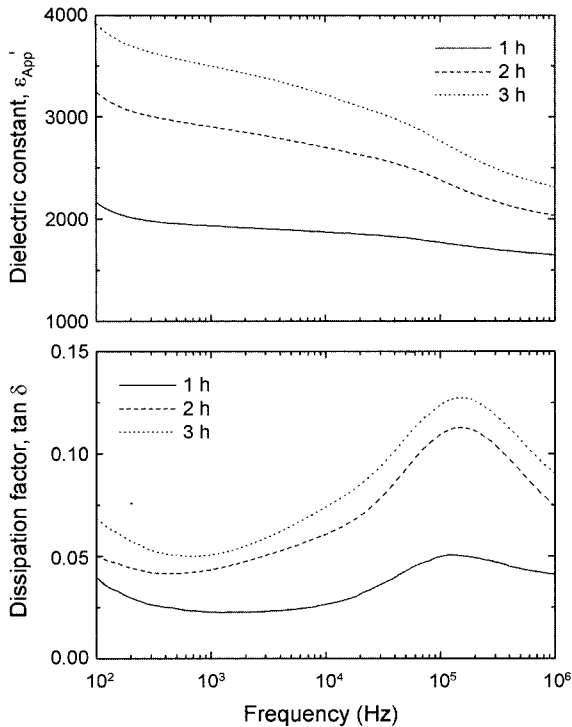


Fig. 3. Dielectric characteristics of ZPCCD system varistors with various sintering time.

특정 주파수에는 손실 피이크가 나타나며 피이크 주파수에서 유전손실이 나타남을 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 일반적으로 배향분극에 따른 유전분산은 100~300 kHz 범위에서 발생하는데, 이 때 피이크 주파수에서 유전손실은 소결시간이 증가함에 따라 0.0507 → 0.1128 → 0.1274로 증가하였다. 자세한 유전 특성 파라미터를 Table 1에 나타내었다.

Fig. 4는 소결시간에 따른 ZPCCD계 바리스터의 DC 가속열화 스트레스 동안의 누설전류를 나타낸 것이다. 바리스터의 안정성을 시험하는 방법은 여러 가지가 있으나 특히 열적, 전기적 스트레스를 이용한 안정성 평가가 일반적이다. 우수한 안정성을 나타내는 바리스터는 일단 스트레스 동안에 발생되는 누설전류가 작고, 안정상태에 도달하는 소요시간이 짧으며, 스트레스 차수에 따른 누설전류의 변화폭이 작다. 그리고 무엇보다도 스트레스 후의 특성변화가 작은 것이 특징이다. 전체적인 곡선의 형태를 관찰해보면 모든 소결시간에서 스트레스 시간에 따른 누설전류는 비교적 단시간에 안정화되어 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 이것은 Table 2에 나타낸 누설전류 변화의 기울기에 대한 정량적 파라미터인 열화율 계수(K_T)에서도 확인할 수 있다. 바리스터에 인가된 전기적, 열적 스트레스에 누설전류는 열적전계방출에 의한 전도전자의 생성과 입계의 결함에서 포획되어 재결합되는 전도전자의 소멸의 조합으로 발생되며, 재료적 특성이나 공정조건

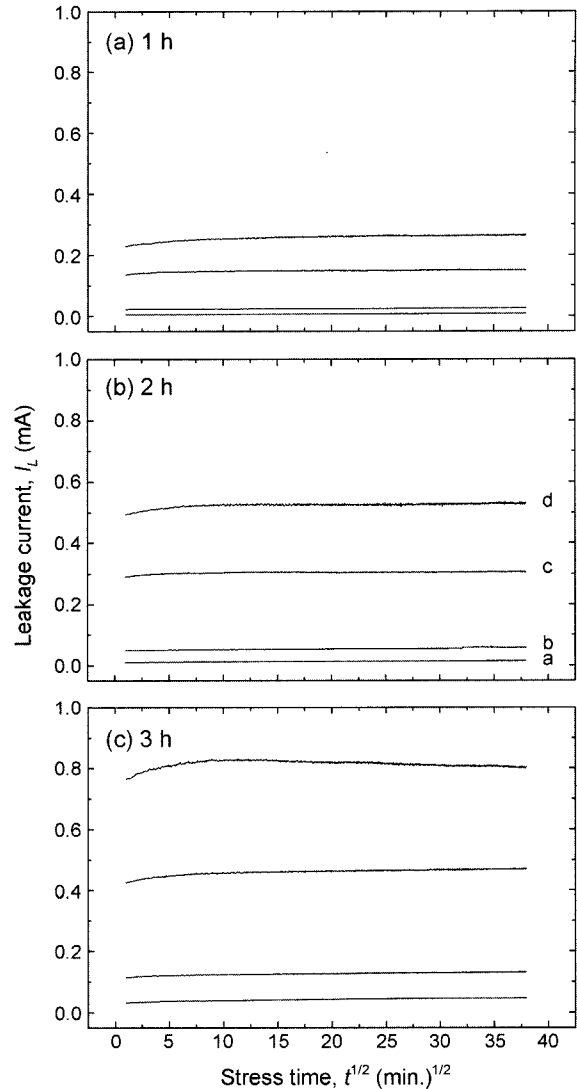


Fig. 4. Leakage current of ZPCCD system varistors during DC accelerated aging stress with various sintering time; a: 1st, b: 2nd, c: 3rd, and d: 4th.

Table 2. Degradation Coefficient of ZPCCD System Varistors During DC Accelerated Aging Stress with Various Sintering Time

Stress condition	K_T ($\mu\text{A} \cdot \text{h}^{-1/2}$)		
	Sintering time		
	1 h	2 h	3 h
1st	0.2	0.7	2.1
2nd	0.6	2.2	2.2
3rd	1.0	0.3	2.9
4th	2.3	1.3	-7.4

에 따라 상이한 형태를 나타내게 된다. 이들 전도전자의 생성이 소멸보다 우세하면 열화율 계수는 양의 값을 나타내며, 소멸이 생성보다 우세하면 음의 값을 나타내게

되는데, 전체 소결시간에서 대부분 $2.9 \mu\text{A} \cdot \text{h}^{-1/2}$ 이하의 낮은 PCLC(Positive Creep of Leakage Current)를 보이며 비교적 양호한 형태의 누설전류를 나타내었다. 반면 소결시간이 증가함에 따라 누설전류의 크기와 스트레스 차수에 따른 변화폭은 점차 증가하였다. 통상 3시간 소자와 같이 상대적으로 가장 큰 초기 누설전류를 보이면 스트레스 후에도 가장 큰 증가율을 나타내게 된다. 또한 3시간 소자의 경우 미세구조는 치밀한 반면 가장 낮은 비직선 지수를 나타내었다. 비직선 지수가 낮게 되면 전위장벽의 높이가 낮아지게 되는데, 장벽높이가 낮다는 것은

열전자방출에 의한 전도전자의 수가 많아져 누설전류를 증가시키는 원인이 된다. 이렇게 누설전류가 증가하는 현상은 소자의 열화진행을 촉진시켜 종국에는 열폭주가 발생할 가능성을 키지게 함으로 안정성을 향상시키기 위해서는 지양해야 한다.

Fig. 5는 소결시간에 따른 ZPCCD계 바리스터의 DC 가속열화 스트레스 전·후의 E - J 특성을 나타낸 것이다. 모든 소결시간에서 바리스터의 특성 곡선이 스트레스 차수가 증가함에 따라 우하향으로 이동함을 확인 할 수 있다. 이것은 스트레스 차수에 따른 누설전류의 증가를 나타내며 바리스터의 열화가 차츰 진행됨을 의미한다. 따라서 스트레스 차수에 따른 특성 곡선들 간의 변화폭이 클수록 안정성은 저하된다. 1, 3시간과 비교하여 2시간 소결된 바리스터의 특성 곡선이 조밀한 간격을 유지하며 우수한 안정성을 나타내었다. 표 3에서 나타낸 스트레스 후의 전기적 특성 파라미터중에서 특히 바리스터 전압 변화율($\% \Delta V_{1\text{mA}}$)은 열화와 직결되기 때문에 상용 바리스터에서는 통상적인 $\% \Delta V_{1\text{mA}}$ 를 $0.85 V_{1\text{mA}}/85^\circ\text{C}/1000 \text{ h}$ 조건의 스트레스 시험에 대해 $\pm 10\%$ 이내로 제한하고 있다. 1, 2시간 소자와 비교하여 3시간의 $\% \Delta V_{1\text{mA}}$ 이 $-2.1 \sim -3.9$ 로 가장 크게 나타났으나 상용 바리스터 조건과 비교하면 작은 변화이다. 4차 스트레스 후의 비직선 지수와 누설전류의 변화는 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1시간 순서로 크게 나타났다. 2시간 소결된 바리스터는 비직선 지수 변화율($\% \Delta \alpha$)과 누설전류 변화율($\% \Delta I_L$)에서 각각 $-4.1 \sim -7.1$, $+33.3 \sim +166.7$ 로 가장 우수한 안정성을 나타내었다. 반면 1시간 소결된 바리스터는 $\% \Delta \alpha$ 에서, 3시간 소결된 바리스터는 $\% \Delta I_L$ 에서 상대적으로 높은 변화를 보였다.

Fig. 6은 소결시간에 따른 ZPCCD계 바리스터의 DC 가속열화 스트레스 전·후의 유전 특성을 나타낸 것이다. 모든 소결시간에서 3차 스트레스까지의 유전상수는 스트레스 차수가 증가할수록 점차 증가하였다. 이것은 식 (5)에서 노화의 진행으로 입계의 공핍층 폭(l)이 감소하는데 기인하는 결과이다. 2시간 소자는 4차 스트레스 후에도 지속적으로 증가하였으나 1, 3시간에서는 오히려 감소하였다. 한편 1, 3시간 소결된 바리스터의 유전손실계수 변화율($\% \Delta \tan \delta$)은 스트레스가 진행됨에 따라 점차 증가하다가 특히 4차 스트레스 후 각각 $+315.4$, $+179.8$ 로 급격히 증가하며 특성 곡선에서도 확인한 변화를 보였다. 반면 2시간에서는 $-12.5 \sim -22.0$ 의 범위로 스트레스 전보다 오히려 감소하여 우수한 안정성을 나타내었는데, 이것은 불안정한 입계상태가 1차 스트레스와 같은 낮은 스트레스 조건에서 일시적으로 안정화되는 것에 기인하는 결과로 판단된다. 그러나 스트레스 후의 유전손실계수가 초기 보다는 낮게 나타났으나, 2차 스트레스 후 점차 증가하며 스트레스에 의한 노화를 나타내었음을 확인 할 수 있다. 자세한 유전 특성 파라미터의 변화를 Table 3에 요약하였다.

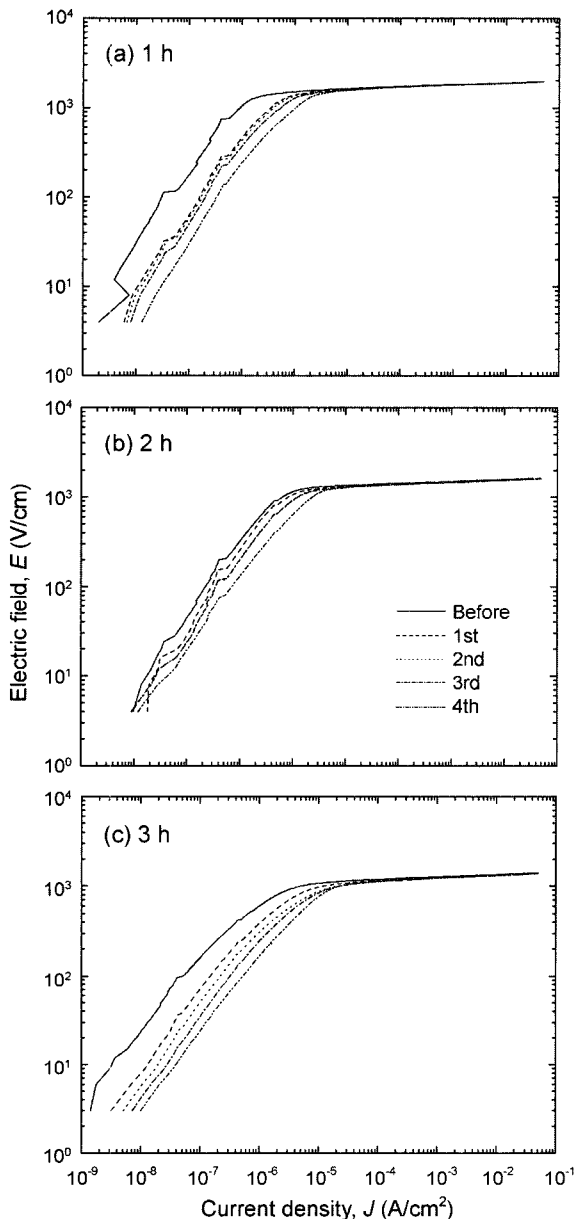


Fig. 5. Variation of E - J characteristics of ZPCCD system varistors before and after DC accelerated aging stress with various sintering time.

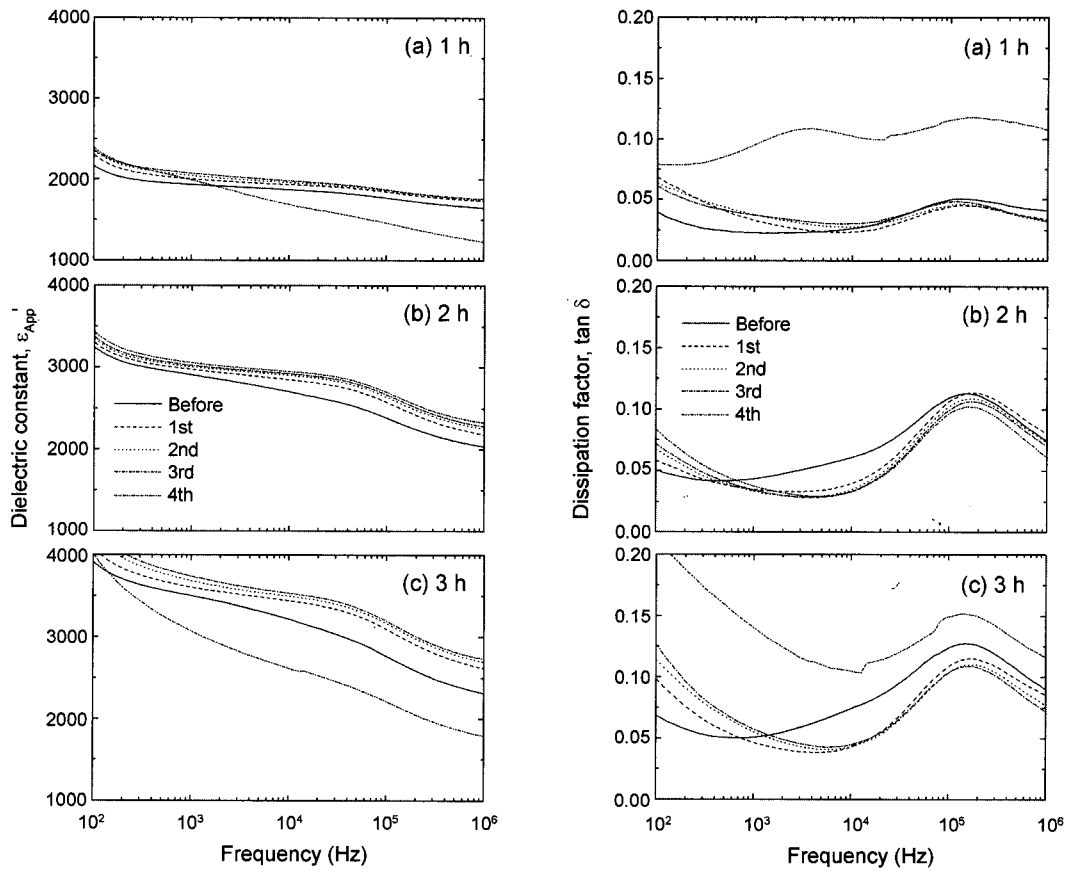


Fig. 6. Variation of dielectric characteristics of ZPCCD system varistors before and after DC accelerated aging stress with various sintering time.

Table 3. Variation of *V-I* and Dielectric Characteristic Parameters of ZPCCD System Varistors before and after DC Accelerated Aging Stress with Various Sintering Time

Sintering time	Stress condition	V_{1mA} (V/mm)	$\% \Delta V_{1mA}$	α	$\% \Delta \alpha$	I_L (μA)	$\% \Delta I_L$	ϵ_{APP}'	$\% \Delta \epsilon_{APP}'$	$\tan \delta$	$\% \Delta \tan \delta$
1 h	Before	181.9	0	55.3	0	0.1	0	1933.9	0	0.0228	0
	1st	180.1	-1.0	53.4	-3.4	0.3	200.0	2000.6	3.4	0.0332	45.6
	2nd	179.6	-1.3	52.9	-4.3	0.3	200.0	2043.2	5.7	0.0378	65.8
	3rd	179.0	-1.6	51.8	-6.3	0.4	300.0	2071.9	7.1	0.0374	64.0
	4th	180.4	-0.8	47.4	-14.3	0.7	600.0	1994.1	3.1	0.0947	315.4
2 h	Before	150.3	0	46.3	0	0.3	0	2908.4	0	0.0431	0
	1st	148.1	-1.5	43.6	-5.8	0.4	33.3	2973.1	2.2	0.0348	-19.3
	2nd	147.0	-2.2	43.3	-6.5	0.5	66.7	3004.3	3.3	0.0335	-22.3
	3rd	146.4	-2.6	43.0	-7.1	0.5	66.7	3023.5	4.0	0.0345	-20.0
	4th	145.8	-3.0	44.4	-4.1	0.8	166.7	3056.2	5.1	0.0377	-12.5
3 h	Before	126.7	0	38.2	0	1.1	0	3505.0	0	0.0505	0
	1st	123.4	-2.6	36.1	-5.5	2.2	100.0	3610.0	3.0	0.0467	-7.5
	2nd	122.4	-3.4	34.7	-9.2	3.5	218.2	3688.5	5.2	0.0560	10.9
	3rd	121.8	-3.9	34.0	-11.0	3.8	245.5	3744.0	6.8	0.0581	15.0
	4th	124.1	-2.1	34.6	-9.4	4.3	290.9	3083.0	-12.0	0.1413	179.8

4. 결 론

DC 가속열화 시험으로부터 ZPCCD계 바리스터의 전기적 특성 및 안정성을 1350°C에서 소결시간에 따라 조사하였다. 소결시간의 증가로 바리스터의 미세구조적 치밀성은 향상되었으나 비직선성은 저하되었다. 1시간 소결된 바리스터는 비직선 지수 55.3, 누설전류 0.1 μ A로 우수한 비직선성을 나타낸 반면 낮은 밀도로 인하여 전도경로가 더욱 제한되었기 때문에 상대적으로 나쁜 안정성을 나타내었다. 2시간 소결된 바리스터는 비직선 지수, 누설전류, 유전손실계수가 각각 46.3, 0.3 μ A, 0.0431로 상대적으로 높은 비직선성을 나타내었을 뿐만아니라 4차 DC 스트레스 후의 $\% \Delta V_{1mA} = -3.0$, $\% \Delta \alpha = -4.1$, $\% \Delta I_L = +3056.2$, $\% \Delta \epsilon_{APP} = +5.1$, $\% \Delta \tan \delta = -12.5$ 로 우수한 전기적 안정성을 나타내었다. 상대적으로 낮은 비직선성을 나타내었던 3시간 소자는 안정성에서도 2시간보다 저하된 특성을 나타내었다. 결론적으로 2시간에서 소결된 ZPCCD계 바리스터가 비직선성과 안정성을 동시에 만족시킴으로서 실용화 가능성이 가장 높은 것으로 사료된다.

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. D. R. Clarke, "Varistors Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **82** [3] 485-502 (1999).
4. K. Mukae, K. Tsuda, and S. Shiga, "Development of Advanced Arresters for GIS with New Zinc-Oxide Elements," *IEEE Trans. Pow. Deliv.*, **3** [2] 591 (1988).
5. S. Shichimiya, M. Yamaguchi, N. Furuse, M. Kobayashi, and S. Ishibe, "Development of Advanced Arresters for GIS with New Zinc-Oxide Elements," *IEEE Trans. Pow. Deliv.*, **13** [2] 465 (1998).
6. 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).
7. 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** 2098-102 (1993).
8. 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).
9. H. H. Hng and K. M. Knowles, "Microstructure and Current-Voltage Characteristics of Praseodymium-Doped Zinc Oxide Varistors Containing MnO_2 , Sb_2O_3 , and Co_3O_4 ," *J. Mater. Sci.*, **37** [6] 1143-54 (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, and M.-J. Kim, "Microstructure and Electrical Properties of ZnO- Pr_6O_{11} -CoO- Cr_2O_3 - Dy_2O_3 -Based Varistor Ceramics," *J. Mater. Sci.*, **39** 307-09 (2004).
14. C.-W. Nahm, J.-A. Park, B.-C. Shin, and I.-S. Kim, "Electrical Properties and DC-Accelerated Aging Behavior of ZnO- Pr_6O_{11} -CoO- Cr_2O_3 - Dy_2O_3 -Based Varistor Ceramics," *Ceram. Int.*, **30** 1009-16 (2004).
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. C.-W. Nahm, S.-C. Jung, and W.-C. Lee, "A Study on the Microstructure and Electrical Properties of ZnO:Pr Varistor with Y_2O_3 Additive (in Korean)," *J. Kor. Inst. Elec. and Electron. Mater. Eng.*, **11** [1] 48-56 (1998).