

Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 전기적 안정성에 소결온도의 영향

Effect of Sintering Temperature on Electrical Stability of Pr₆O₁₁-Based ZnO Varistors

남춘우, 류정선
(Choon-Woo Nahm, Jung-Sun Ryu)

Abstract

The electrical stability for DC stress of Pr₆O₁₁-based ZnO varistors consisting of ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Er₂O₃-based ceramics were investigated with sintering temperature in the range of 1325~1345°C. As the sintering temperature is raised, the nonlinear exponent of varistors was decreased, whereas the stability was markedly improved. The density of ceramics was found to greatly affect the electrical stability for DC stress. The varistors sintered at 1325°C were completely degraded because of thermal runaway attributing to low density. The varistors sintered at 1335°C exhibited the highest nonlinearity, with a nonlinear exponent of 70.53 and a leakage current of 1.92 μ A, whereas they did not exhibit relatively high stability. On the contrary, the varistors sintered at >1340°C exhibited not only a high nonlinearity marking the nonlinear exponent above 50 and the leakage current below 3 μ A, but also a high stability marking the variation rate of the varistor voltage below 2%, even under DC stress such as (0.80 V_{1mA}/90°C/12h)+(0.85 V_{1mA}/115°C/12h)+(0.90 V_{1mA}/120°C/12h)+(0.95 V_{1mA}/125°C/12h)+(0.95 V_{1mA}/150°C/12h). In particular, it was found that the varistors sintered at 1340°C were more nonlinear and more stable, compared with that of 1345°C.

Key Words : Pr₆O₁₁-based ZnO varistors, Sintering temperature, Varistor voltage, Density, Nonlinear exponent, Leakage current, DC stress.

1. 서론

ZnO 바리스터는 높은 비직선성의 전류-전압 특성을 가지고 있을 뿐만 아니라 에너지 흡수능력이 우수하여 전자기기나 발·변·송·배전 및 전철 차량

용 전력설비를 각종 썬치로부터 보호하는 전기적 기능을 가지고 있다[1-3]. 다시 말해서, ZnO 바리스터는 보호되어야 할 소자 또는 회로에 병렬로 연결되어 상전압(normal voltage)이 인가시에는 미소의 누설전류만 흐르는 절연체로 동작하나 과도이상전압이나 썬치인가 동안은 매우 높은 도전성으로 스윗칭되어 높은 전류를 대지로 방전시킨다. 그리고 다시 정상상태로 스윗칭된다.

오늘날 시스템의 대부분이 외형적으로는 소형화, 경량화되고, 기능적으로는 반도체화로 고성능화되었지만, 그에 따른 전자기기나 설비의 절연내력은 필

동의대학교 전기공학과
(부산광역시 부산진구 가야동 산24번지,
Fax : 051-890-1664
E-mail: cwnahm@dongeui.ac.kr)
2001년 4월 24일 접수, 2001년 5월 17일 1차심사완료
2001년 5월 31일 2차심사완료

연적으로 저하되고, 저전압 동작에 따른 내색지력이 저하하여 써지로부터 보호 필요성이 한층 커졌다. 이런 이유로 전기적 특성이 우수하고 각종 스트레스에 대해 안정성이 우수한 바리스터를 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. ZnO 바리스터는 본질적으로 비직선성을 유발시키는 첨가제에 따라 크게 Bi₂O₃계와 Pr₆O₁₁계로 나눌 수 있다. 상용 바리스터의 대부분을 차지하고 있는 Bi₂O₃계는 Bi₂O₃에 의한 액상소결에서 오는 휘발성과 반응성에 기인하는 몇 가지 문제점 때문에 최근에는 Pr₆O₁₁로 대체된 소위 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터에 대한 연구가 활발하다 [4-18]. 그러나 본 저자들이 보고한 연구결과를 제외하고는 대부분의 경우 ZnO-Pr₆O₁₁-CoO로 구성되는 3성분계에 대한 연구가 주류를 이루고 있다[4-8]. 상기 3성분계에 희토류 산화물이 첨가될 때 비직선성이 크게 향상될 뿐만 아니라, DC 스트레스에 대한 안정성도 우수한 것으로 최근에 보고되었다[9-20]. 그러나 전기적 특성의 안정성에 대한 연구는 극히 미미하다. 차세대 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터를 개발함에 있어서 실험변수에 따른 다양한 기초연구가 절실히 요구된다.

따라서 본 연구에서는 ZnO, Pr₆O₁₁, CoO, Cr₂O₃, Er₂O₃로 구성되는 5 성분계의 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 소결온도를 변화시켜 DC 스트레스에 대한 전기적 안정성을 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 ZPCCE계 바리스터 제작

순도가 99.9%인 시료를 97.5 mol% ZnO+0.5 mol% Pr₆O₁₁+1.0 mol% CoO+0.5 mol% Cr₂O₃+0.5 mol% Er₂O₃의 조성식에 따라 10 μg의 오차범위까지 정확히 평량한 다음, 지르코니아 불과 아세톤이 든 폴리프로필렌 용기에 넣어 24시간동안 불밀하였다. 120°C에서 12시간동안 건조시킨 후, 750°C에서 2시간 하소시켰다. 시편양 만큼의 시료를 마노유발로 재분쇄한 다음, 성형조제 PVA를 시료무게의 2 wt% 첨가시켜 골고루 혼합하여 200 mesh 체로 조립하였다. 800 kg/cm² 압력하에서 직경이 10 mm, 두께가 2.0 mm가 되게 원판형으로 성형한 후, 같은 조성의 분위기 분말과 함께 도가니에 넣어 4°C/min의 승온 및 하강율로 1325~1345°C에서 1시간 소결하였다. 소결된 시편을 1.0 mm 두께로 연마하여 초음파 세척한 후, 은 전극을 실크스크린 기법으로 직경이 5 mm되게 양면

에 도포한 다음, 600°C에서 10분간 열처리하여 오염성 접촉이 되게 하였다.

2.2 전기적 특성 측정

전압-전류 ($V-I$) 특성은 실온에서 current/voltage source-measure unit (Keithley 237)를 사용하여 전류밀도 50 mA/cm²까지 측정하였다. 바리스터 전압 (V_{1mA})은 전류밀도가 1.0 mA/cm²일 때의 전압으로, 누설전류 (I_{ϵ})는 0.80 V_{1mA} 에서 전류로 측정되었으며, 비직선 지수 (α)는 $\alpha = 1/(\log E_2 - \log E_1)$ 의 관계식으로부터 구하였다. 여기서 E_1 과 E_2 는 $J_1 = 1.0$ mA/cm²와 $J_2 = 10$ mA/cm²에 대응되는 전계이다.

2.3 안정성 평가

안정성을 평가하기 위해서 스트레스 인가전의 $V-I$ 특성을 측정할 시편에 다음과 같은 각각의 연속적이고, 중첩의 DC 스트레스를 인가하였으며, 각 스트레스 인가시 1분 간격으로 전류가 측정과 동시에 기록 되도록 하였다.

1차 스트레스-0.80 $V_{1mA}/90^{\circ}\text{C}/12\text{h}$

2차 스트레스-(0.80 $V_{1mA}/90^{\circ}\text{C}/12\text{h}$)+(0.85 $V_{1mA}/115^{\circ}\text{C}/12\text{h}$).

3차 스트레스-(0.80 $V_{1mA}/90^{\circ}\text{C}/12\text{h}$)+(0.85 $V_{1mA}/115^{\circ}\text{C}/12\text{h}$)+(0.90 $V_{1mA}/120^{\circ}\text{C}/12\text{h}$).

4차 스트레스-(0.80 $V_{1mA}/90^{\circ}\text{C}/12\text{h}$)+(0.85 $V_{1mA}/115^{\circ}\text{C}/12\text{h}$)+(0.90 $V_{1mA}/120^{\circ}\text{C}/12\text{h}$)+(0.95 $V_{1mA}/125^{\circ}\text{C}/12\text{h}$).

5차 스트레스-(0.80 $V_{1mA}/90^{\circ}\text{C}/12\text{h}$)+(0.85 $V_{1mA}/115^{\circ}\text{C}/12\text{h}$)+(0.90 $V_{1mA}/120^{\circ}\text{C}/12\text{h}$)+(0.95 $V_{1mA}/125^{\circ}\text{C}/12\text{h}$)+(0.95 $V_{1mA}/150^{\circ}\text{C}/12\text{h}$).

1차 DC 스트레스가 완료된 다음, 전기적 특성을 측정하였으며, 계속적으로 2, 3, 4, 5차 스트레스를 바리스터에 인가하여 1차 스트레스와 동일하게 전기적 특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 소결온도에 따른 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 전계-전류밀도 ($E-J$) 특성곡선을 나타낸 것이다. 상세한 $V-I$ 특성 파라미터는 표 1에 나타내었다.

바리스터 전압 (V_{1mA})은 소결온도가 증가하면 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 표에 나타낸 바와 같이 마이크로 바리스터 전압이 2~4 V/gb인 것으로 보아

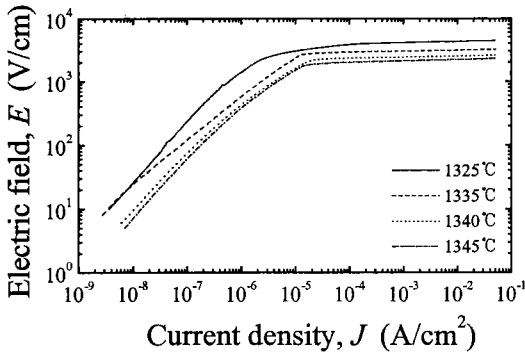


그림 1. 소결온도에 따른 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 E-J 특성.

Fig. 1. The E-J characteristics of Pr₆O₁₁-based ZnO varistors with sintering temperature.

입계에서 접합이 정상적이므로 전적으로 결정립 크기 증가에 기인한 것이다. 비직선 지수 (α)는 1335°C에서 소결된 바리스터에서 $\alpha = 70.53$ 의 최대정점으로 소결온도가 증가할수록 감소하는 결과를 나타내었다. 그러나 1345°C에서 소결된 바리스터에서 여전히 $\alpha = 50.18$ 정도의 높은 비직선성을 나타내었다. 누설 전류 (I_l)는 1335°C에서 소결된 바리스터에서 가장 낮은 $I_l = 1.92 \mu A$ 였으며, 소결온도가 증가할수록 증가하다가 다시 감소하는 결과를 나타내었다.

그림 2는 소결온도에 따른 DC 스트레스 인가동안 누설전류의 변화를 나타낸 것으로 1325°C에서 소결된 바리스터는 비교적 약한 1차 스트레스에서 조차 열폭주 (thermal runaway) 현상을 나타내었다. DC

표 1. 소결온도에 따른 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 V-I 특성 파라미터

Table 1. The V-I characteristic parameters of Pr₆O₁₁-based ZnO varistors with sintering temperature

Sintering temperature (°C)	V_{1mA} (V/mm)	V_{gb} (V/gb)	α	I_l (μA)
1325	414.97	2.12	61.09	4.12
1335	301.62	2.55	70.53	1.92
1340	242.41	2.35	61.23	2.82
1345	211.47	2.66	50.18	2.51

스트레스에 대한 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 2가지 인자는 전기적 파라미터인 누설전류와, 미세구조적 파라미터인 세라믹스 밀도이다. 1325°C에서 소

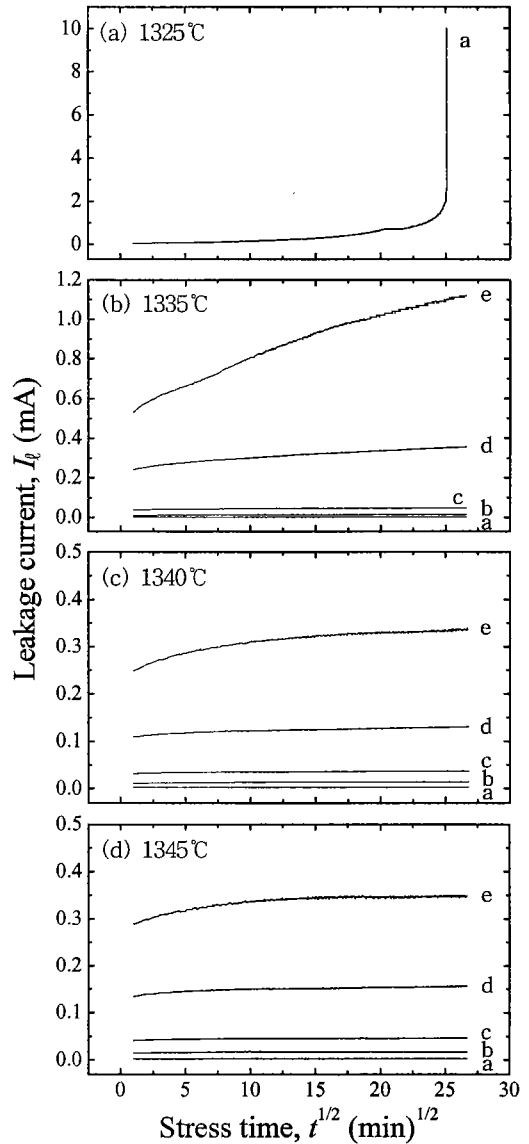


그림 2. 소결온도에 따른 DC 스트레스 인가동안 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 누설전류. a: 1차, b: 2차, c: 3차, d: 4차, e: 5차.

Fig. 2. The leakage current of Pr₆O₁₁-based ZnO varistors during DC stress with sintering temperature. a: 1st, b: 2nd, c: 3rd, d: 4th, and e: 5th.

결된 바리스터의 극히 나쁜 안정성은 직접적으로는 누설전류보다는 이론밀도 (TD, 5.78g/cm^3)의 90%에도 미치지 못하는 낮은 밀도에 기인한 것이다. 그림 3의 SEM 미세구조에서 알 수 있듯이 기공율이 15.7% 정도로 많은 기공을 갖고 있는 세라믹이다. 결과적으로 저밀도에 의한 유효 입계 수의 감소로 전류가 한정된 전도경로로 집중됨으로서 조기에 노화가 쉽게 일어난 것으로 생각된다. 실제로 $6\sim 7\mu\text{A}$ 의 누설전류에서도 밀도가 TD의 95% 이상이면 열폭주 현상은 일어나지 않는 것으로 보고된 바 있고, 1335°C 에서 소결된 바리스터에서도 알 수 있는 바와 같이 가장 낮은 누설전류를 나타내었지만 밀도가 TD의 91.7%이기 때문에 4차 스트레스에서부터 눈에 띄는 PCLC (positive creep of leakage current) 현상을 나타내면서 5차 스트레스에서는 열폭주 직전의 현저한 PCLC를 나타내었다. 1340°C 이상에서 소결된 바리스터는 누설전류는 비록 1335°C 의 경우보다 높지만 SEM 사진에서도 알 수 있듯이 상대적으로 치밀성 높기 때문에 5차 스트레스에서도 안정된 누설전류 특성을 나타내었다.

그림 4는 소결온도에 따른 Pr_6O_{11} 계 ZnO 바리스터의 스트레스전·후의 $E-J$ 특성곡선을 나타낸 것이다. 1325°C 에서 소결된 바리스터의 스트레스 전의

특성곡선만 나타낸 것은 열폭주 발생시 스트레스에 따른 실질적인 $V-I$ 데이터를 정확히 알 수 없기 때문에 열폭주가 일어나기 전까지의 곡선만 나타낸 것이다. 스트레스에 따른 특성곡선들 간의 변화폭은 안정성과 직접적으로 관계되며, 특히 누설전류영역에서 스트레스전의 특성곡선을 기준으로 누설전류 증가방향의 곡선간의 폭이 바로 노화와 관계된다. 1335°C 이상에서 소결된 바리스터는 공통적으로 항복영역 근방에서 1차 스트레스 후의 곡선이 스트레스 인가전보다 저전류쪽에 위치함으로써 안정화가 이루어 졌음을 확인 할 수 있다. 1335°C 에서 소결된 바리스터는 5차 스트레스 후의 곡선이 항복영역에서 노화가 상대적으로 크게 일어났음을 알 수 있다. 1345°C 에서 소결된 바리스터도 전체적으로 안정한 것으로 판단되지만 스트레스 후의 곡선의 변화폭이 1340°C 의 것보다 큼으로서 1340°C 에서 소결된 바리스터가 가장 안정성이 높을 것으로 추측된다.

Pr_6O_{11} 계 ZnO 바리스터의 소결온도별 DC 스트레스에 따른 $V-I$ 특성 파라미터 변화를 그림 5에 나타내었고 구체적인 데이터를 표 2에 제시하였다. $V-I$ 특성 파라미터 중에서 스트레스에 따른 V_{1mA} 변화율 ($\%\Delta V_{1mA}$)은 안정성에 가장 중요한 평가척도로 사용된다. 통상적으로 $0.85 V_{1mA}/85^\circ\text{C}/1000\text{h}$ 스

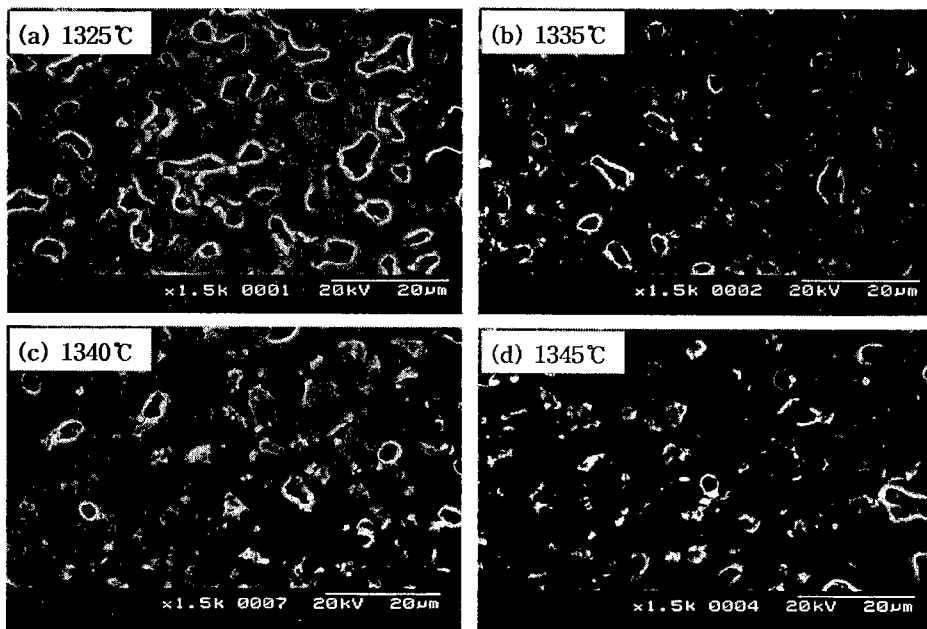


그림 3. 소결온도에 따른 Pr_6O_{11} 계 ZnO 세라믹스의 미세구조.

Fig. 3. SEM micrographs of Pr_6O_{11} -based ZnO ceramics with sintering temperature.

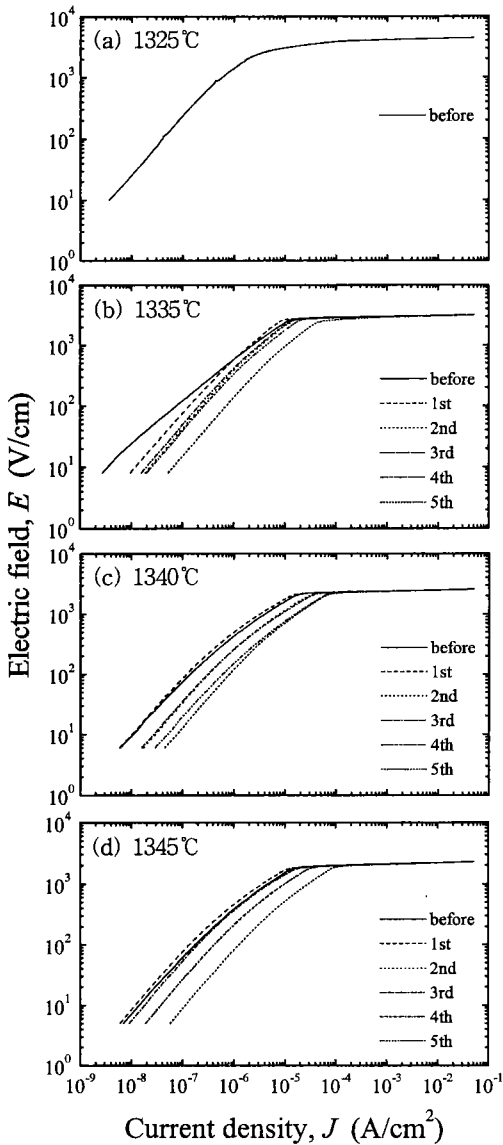


그림 4. 소결온도에 따른 DC 스트레션 후의 Pr_6O_{11} 계 ZnO 바리스터의 E-J 특성.

Fig. 4. The E-J characteristics of Pr_6O_{11} -based ZnO varistors before and after DC stress with sintering temperature.

트레스 조건에서 $\% \Delta V_{1mA} \leq 10\%$ 로 규정하고 있다. 스트레스에 따라 바리스터 전압의 감소는 바로 노화로 이어지기 때문에 가능한 한 $\% \Delta V_{1mA}$ 이 작은 것이 안정성이 좋은 바리스터라 할 수 있다. 1335°C에서 소결된 바리스터는 4차 스트레스에서 $\% \Delta V_{1mA}$ 가

1340°C 이상에서 소결된 바리스터의 5차 스트레스에서 $\% \Delta V_{1mA}$ 와 비슷하다. 5차 스트레스에서 비직선 지수 변화율 ($\% \Delta \alpha$) = -35.09%, 누설전류 변화율 ($\% \Delta I_\ell$) = 308.33%로 상대적으로 바리스터의 DC 스트레스에 대한 안정성이 떨어짐을 알 수 있다. 1340°C와 1345°C에서 소결된 바리스터의 안정성을 비교해 보자. 4차 스트레스까지는 1345°C에서 소결된 바리스터가 오히려 1340°C의 것보다 안정성이 높으나, 보다 가혹한 5차 스트레스에서는 그 상황이 반전되는 결과를 가져왔다. 특히 1340°C에서 소결된 바리스터의 $\% \Delta I_\ell$ 은 4차 스트레스에서 $\% \Delta I_\ell = 262.06\%$, 5차 스트레스에서 $\% \Delta I_\ell = 284.04\%$ 로 비슷한 크기인데 반해서 1345°C에서 소결된 바리스터의 $\% \Delta I_\ell$ 은

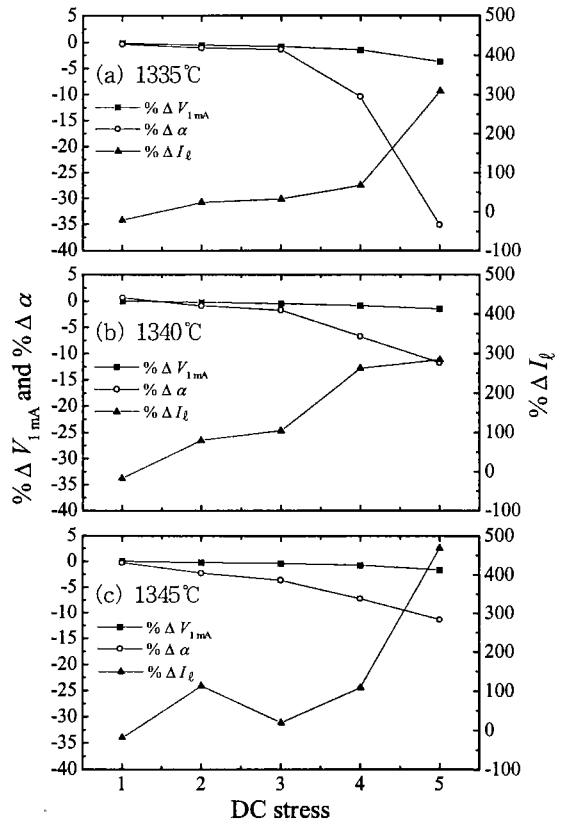


그림 5. 소결온도별 DC 스트레스에 따른 Pr_6O_{11} 계 ZnO 바리스터의 V-I 특성 파라미터 변화.

Fig. 5. The variation rate of V-I characteristic parameters of Pr_6O_{11} -based ZnO varistors as a function of DC stress with sintering temperature.

표 2. 소결온도에 따른 DC 스트레스전·후의 Pr_6O_{11} 계 ZnO 바리스터의 V - I 특성 파라미터 변화.

Table 2. The variation of V - I characteristic parameters of Pr_6O_{11} -based ZnO varistors before and after DC stress with sintering temperature.

Sintering temperature	Stress condition	V_{1mA} (V/mm)	$\% \Delta V_{1mA}$	α	$\% \Delta \alpha$	I_ℓ (μA)	$\% \Delta I_\ell$
1325°C	before	414.97	0	61.09	0	4.12	0
	1st	Thermal runaway					
1335°C	before	301.62	0	70.53	0	1.92	0
	1st	301.16	-0.15	70.25	-0.40	1.50	-21.88
	2nd	299.81	-0.60	69.74	-1.12	2.38	23.96
	3rd	299.03	-0.85	69.52	-1.43	2.54	32.14
	4th	297.05	-1.52	63.16	-10.45	3.21	67.19
	5th	290.24	-3.77	45.78	-35.09	7.84	308.33
1340°C	before	242.41	0	61.23	0	2.82	0
	1st	242.35	-0.03	61.60	0.60	2.32	-17.73
	2nd	241.68	-0.30	60.66	-0.93	5.06	79.43
	3rd	241.13	-0.53	60.15	-1.76	5.74	103.55
	4th	240.22	-0.90	57.07	-6.79	10.21	262.06
	5th	238.69	-1.53	53.99	-11.82	10.83	284.04
1345°C	before	211.47	0	50.18	0	2.51	0
	1st	211.45	-0.01	50.03	-0.30	2.05	-18.33
	2nd	210.91	-0.26	49.04	-2.27	5.34	112.75
	3rd	210.58	-0.42	48.36	-3.63	3.00	19.52
	4th	209.80	-0.79	46.54	-7.25	5.22	107.97
	5th	208.04	-1.62	44.49	-11.34	14.28	468.92

5차에서 $\% \Delta I_\ell = 468.92\%$ 로 4차 $\% \Delta I_\ell = 107.97\%$ 보다 4배 이상 증가함으로써 불안정성이 훨씬 가중되었다. 1345°C에서 소결된 바리스터가 1340°C의 것보다 누설전류가 낮고, 밀도가 높아서 안정성이 가장 우수할 것으로 예상되었으나 5차 스트레스의 결과는 전혀 달랐다. 아마도 이것은 1340°C에서 소결된 바리스터는 손실계수 $\tan \delta = 0.0382$, 유전손실 $\epsilon''_{APP} = 47.81$ 에 비해, 1345°C에서 소결된 바리스터의 $\tan \delta = 0.0456$, $\epsilon''_{APP} = 67.48$ 로서 유전손실이 다소 높는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

ZnO+0.5 mol% Pr_6O_{11} +1.0 mol% CoO+0.5 mol% Cr_2O_3 +0.5 mol% Er_2O_3 로 구성되는 Pr_6O_{11} 계 ZnO 바리스터의 1325~1345°C 범위의 소결온도에 따라 연속적이고 중첩의 DC 스트레스에 대한 안정성을 조

사하였다.

DC 스트레스에 대한 안정성은 세라믹스의 밀도와 누설전류에 크게 영향을 받는다. 누설전류가 낮고, 특히 치밀성이 높을수록 높은 안정성을 나타낸다. 소결온도가 증가할수록 비직선 지수는 반드시 감소하나 누설전류는 1335°C에서 최소정점으로 다시 증가하다 미미하게 감소하는 변화경향을 나타내었다. 1325°C에서 소결된 바리스터는 세라믹스 밀도가 이론밀도의 84.5%로 낮아 미세구조적으로 입계의 수가 감소함으로써 입계당 전류밀도가 높은 관계로 1차 스트레스 0.80 $V_{1mA}/90^\circ\text{C}/12\text{h}$ 에서 열폭주가 일어나는 매우 낮은 안정성을 나타내었다. 1335°C에서 소결된 바리스터도 가장 높은 비직선 지수 $\alpha = 70.53$, 가장 낮은 누설전류 $I_\ell = 1.92 \mu\text{A}$ 를 나타내었지만 여전히 이론밀도의 91.7%의 낮은 밀도로 4차 스트레스 이후에 높은 positive creep 현상을 나타내었다. 비록 높은 비직선성을 나타내더라도 안정성이 결여될 때에는 응용에 한계가 있다. 그러나 1340°C 이상으로 소결된 바리스터는 비직선성은 다소 감소하더라도 밀

도가 증가함으로 안정성이 크게 개선되었다. 5차 스트레스(0.80 $V_{1mA}/90^{\circ}C/12h$)+(0.85 $V_{1mA}/115^{\circ}C/12h$)+(0.90 $V_{1mA}/120^{\circ}C/12h$)+(0.95 $V_{1mA}/125^{\circ}C/12h$)+(0.95 $V_{1mA}/150^{\circ}C/12h$)에서 $\% \Delta V_{1mA} < 2\%$ 로 높은 안정성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 동의대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고 문헌

- [1] -ノ瀬 昇, “電子セラミクス,” 오ム社, pp. 90-93, 1985.
- [2] 뉴-케라스 시리즈 編集委員會, “半導체 세라믹스와 그 응용,” 學獻社, pp. 149-161, 1990.
- [3] 電氣學會, “酸化亞鉛避雷器의 특성과評價試驗法,” 電氣學會技術報告, 第474号, 1993.
- [4] A. B. Alles and V. L. Burdick, “The Effect of Liquid-Phase Sintering on the Properties of Pr_6O_{11} -Based ZnO Varistors,” J. Appl. Phys., Vol 70, pp. 6883-6890, 1991.
- [5] 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, pp. 2098-2102, 1993.
- [6] Y.-S. Lee, K.-S. Liao, and T.-Y. Tseng, “Micro Structure and Crystal Phases of Praseodymium in Zinc Oxide Varistor Ceramics,” J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 79, pp. 2379-2384, 1996.
- [7] S.-Y. Chun and N. Mizutani, “Mass Transport via Grain Boundary in Pr-based ZnO Varistors and Related Electrical Effects,” Mater. Sci., and Engin., B79, pp. 1-5, 2001.
- [8] K. Mukae, “Zinc Oxide Varistors with Praseodymium Oxide,” Ceram. Bull., Vol. 66, pp. 1329-1331, 1987.
- [9] 남춘우, 정순철, 이원천, “ Y_2O_3 첨가에 따른 ZnO:Pr 바리스터의 미세구조 및 전기적 특성에 관한 연구,” 전기전자재료학회논문지, 11권 1호, pp. 48-56, 1998.
- [10] 남춘우, 박춘현, “이트리아가 첨가된 프라세오디뮴계 산화아연 바리스터의 안정성에 관한 연구,” 전기전자재료학회논문지, 11권 10호, pp. 842-848, 1998.
- [11] 남춘우, 윤환수, 류정선, “ZPCCE계 바리스터의 미세구조와 전기적 성질 및 안정성,” 전기전자재료학회논문지, 13권 9호, pp. 735-744, 2000.
- [12] 남춘우, “ZnO- Pr_6O_{11} -CoO- Er_2O_3 계 바리스터의 안정성에 관한 연구,” 전기전자재료학회논문지, 13권 8호, pp. 667-674, 2000.
- [13] 남춘우, 박춘현, “ZnO- Pr_6O_{11} -CoO- Er_2O_3 계 바리스터의 미세구조 및 전기적 성질,” 전기전자재료학회논문지, 13권 6호, pp. 493-501, 2000.
- [14] C.-W. Nahm, C.-H. Park, and H.-S. Yoon, “Microstructure and Varistor Properties of ZnO- Pr_6O_{11} -CoO- Nd_2O_3 Based Ceramics,” J. Mater. Sci. Lett., Vol. 19, pp. 271-274, 2000.
- [15] C.-W. Nahm, C.-H. Park, and H.-S. Yoon, “Highly Stable Nonohmic Characteristics of ZnO- Pr_6O_{11} -CoO- Dy_2O_3 Based Varistors,” J. Mater. Sci. Lett., Vol. 19, pp. 725-727, 2000.
- [16] C.-W. Nahm and C.-H. Park, “Microstructure, Electrical Properties, Degradation Behavior of Praseodymium-Based Doped with Y_2O_3 ,” J. Mater. Sci., Vol. 35, pp. 3037-3042, 2000.
- [17] C.-W. Nahm, “The Nonlinear Properties and Stability of ZnO- Pr_6O_{11} -CoO- Cr_2O_3 - Er_2O_3 Ceramic Varistors,” Mater. Lett., Vol. 47, pp. 182-187, 2001.
- [18] C.-W. Nahm, “The Electrical Properties and d.c. Degradation Characteristics of Dy_2O_3 Doped Pr_6O_{11} -Based ZnO Varistors,” J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 21, pp. 445-453, 2001.
- [19] 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, pp. 393-395, 2001.
- [20] C.-W. Nahm and C.-H. Park, “Effect of Er_2O_3 Addition on the Microstructure, Electrical Properties, and Stability of Pr_6O_{11} -Based ZnO Ceramic Varistors,” J. Mater. Sci., Vol. 36, pp. 1671-1679, 2001.