

Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 DC 가속열화특성

DC Accelerated Aging Characteristics of Pr₆O₁₁-Based ZnO Varistors

남춘우, 류정선, 김향숙, 정영철

(Choon-Woo Nahm, Jung-Sun Ryu, Hyang-Suk Kim, Young-Chul Jung)

Abstract

The electrical properties and stability of Pr₆O₁₁-based ZnO varistors, which are composed of ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Er₂O₃ based ceramics, were investigated in the Er₂O₃ content range of 0.5 to 2.0 mol%. As Er₂O₃ content is increased up to approximately 1.0 mol%, the nonlinearity was decreased. Increasing Er₂O₃ content further caused the nonlinearity to increase. The varistors with 2.0 mol% Er₂O₃ exhibited a high nonlinearity, in which the nonlinear exponent is 47.41 and the leakage current is 1.82 μA. Furthermore, they showed a very excellent stability, in which the variation rates of the varistor voltage, the nonlinear exponent, and leakage current are -0.52%, -4.09%, and 152.75%, respectively, under DC accelerated aging 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).

Key Words : Pr₆O₁₁-based ZnO varistors, nonlinearity, DC accelerated aging stress

1. 서론

오늘날 전기·전자·정보 시스템의 대부분이 외형적으로는 소형화, 경량화되고, 기능적으로는 반도체화로 다기능 및 고성능화되었지만 그에 따른 전자기기의 절연내력은 필연적으로 저하되고, 저전압 동작에 따른 내색지력이 저하하여 각종 써지로부터 보호 필요성이 한층 커졌다. 또한 전력 다소비 시대에 낙뢰에 의한 정전은 막대한 피해가 우려되므로 무정전을 위한 송배전 설비를 너로부터 보호하기 위해서는 피뢰기의 높은 신뢰성이 요구된다. 따라서 써지 흡수기나 피뢰기의 핵심 전자 세라믹 소자인 바리스터의 성능개선은 필수적이다.

최근에는 비직선 형성 산화물 Pr₆O₁₁를 첨가시킨 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터에 대한 연구가 국·내외적으로 활발히 진행되고 있고[1-18], 특히 국내에서 실용가능성 측면에서 보다 많은 연구가 이루어지고 있다[6-18]. 지금까지의 연구결과 ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃에 희토류 산화물 첨가시 그 특성은 우수한 것으로 보고되고 있다[9,16-18]. 그러나 세라믹스 공정에 있어서 흔히 실험되고 있는 조성물, 소결시간, 소결온도 등에 따라 특성이 상이하므로 본 연구에서는 ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Er₂O₃ 세라믹스로 구성되는 바리스터의 DC 가속열화특성이 지금까지 보고된 바리스터보다 우수하여 그 결과를 고찰하고, 제시하였다.

2. 실험 방법

순도가 99.9%인 시료를 (98.0-x) mol% ZnO+0.5 mol% Pr₆O₁₁+1.0 mol% CoO+0.5 mol% Cr₂O₃+x mol% Er₂O₃ (x = 0.5, 1.0, 2.0)의 조성식에 따라 10 μg의 오차범위까지 정확히 평량한 다음, 지르코니아 불

동의대학교 전기공학과
(부산광역시 부산진구 가야동 산24번지,
Fax : 051-890-1664
E-mail : cwnahm@dongeui.ac.kr)
2001년 8월 20일 접수, 2001년 9월 4일 1차심사완료
2001년 9월 15일 2차심사완료

과 아세톤이 든 폴리프로필렌 용기에 넣어 24시간동안 불밀하였다. 120℃에서 12시간동안 건조시킨 후, 750℃에서 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℃/min의 승온 및 하강율로 1345℃에서 2시간 소결하였다. 소결된 시편을 1.0 mm 두께로 연마하여 초음파 세척 후, 은전극을 실크스크린 기법으로 직경이 5 mm되게 양면에 도포한 다음, 600℃에서 10분간 열처리하여 오염성 접촉이 되게 하였다.

V-I 특성은 Keithley 237 V-I 일렉트로미터를 사용하여 가능한 한 주울열의 영향을 피하기 위해 전류밀도 50 mA/cm²까지 측정되었다. 바리스터 전압(V_{1mA})은 전류밀도가 1 mA/cm²일 때의 전압으로, 누설전류(I_l)는 0.80 V_{1mA}에서 전류로 측정되었으며, 비직선 지수(α)는 아래와 같은 식으로 계산하였다.

$$\alpha = (\log J_2 - \log J_1) / (\log E_2 - \log E_1) \quad (1)$$

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

안정성을 평가하기 위해서 스트레스 인가전의 V-I 특성을 측정한 시편에 남 등[7,8]에 의해서 제안된 다음과 같은 DC 가속열화 스트레스를 인가하였으며, 각 스트레스 인가시 동시에 1분 간격으로 전류가 측정, 기록되도록 하였다.

- 1차 스트레스-(0.80 V_{1mA}/90℃/12h)
- 2차 스트레스-(0.80 V_{1mA}/90℃/12h)+(0.85 V_{1mA}/115℃/12h).
- 3차 스트레스-(0.80 V_{1mA}/90℃/12h)+(0.85 V_{1mA}/115℃/12h)+(0.90 V_{1mA}/120℃/12h).

4차 스트레스-(0.80 V_{1mA}/90℃/12h)+(0.85 V_{1mA}/115℃/12h)+(0.90 V_{1mA}/120℃/12h)+(0.95 V_{1mA}/125℃/12h).

5차 스트레스-(0.80 V_{1mA}/90℃/12h)+(0.85 V_{1mA}/115℃/12h)+(0.90 V_{1mA}/120℃/12h)+(0.95 V_{1mA}/125℃/12h)+(0.95 V_{1mA}/150℃/12h).

1차 스트레스가 완료된 다음, 전기적 특성을 측정하였으며, 계속적으로 2, 3, 4, 5차 스트레스를 바리스터에 인가하여 1차 스트레스와 동일하게 전기적 특성을 측정하였다. 스트레스 인가동안 스트레스 시간에 따른 누설전류의 변화인 노화율 계수(K_T)는 다음과 같은 식으로 구하였다[19].

$$I_t = I_{t_0} + K_T t^{1/2} \quad (2)$$

여기서 I_t은 시간 t에서 누설전류, I_{t₀}는 t=0에서 I_t, K_T는 노화율 계수이다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터 세라믹스의 미세구조를 나타낸 SEM 사진이다. 미세구조 상은 희토류 산화물이 첨가된 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터 세라믹스에서 일반적으로 볼 수 있는 ZnO 그레인과 Pr 및 Er 산화물로 된 2차상 입간층으로 구성되어 있다. Er₂O₃ 첨가량이 증가함에 따라 그레인 크기는 14.07~8.46 μm 범위로 감소하였으며, 첨가량이 2배씩 증가할 때마다 그레인은 3 μm 씩 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 감소는 Er₂O₃ 고용한계를 넘은 Er₂O₃가 입계로 편석하여 그레인 성장이 억제되기 때문인 것으로 생각된다. 세라믹스의 밀도 5.5~5.6 g/cm³ 범위로서 1.0 mol%에서 5.5 g/cm³로 상대적으로 낮은 하나 모두 이론 밀도의 95% 이상이었다. 일반적으로 Er₂O₃가 첨가된 Pr₆O₁₁계 ZnO

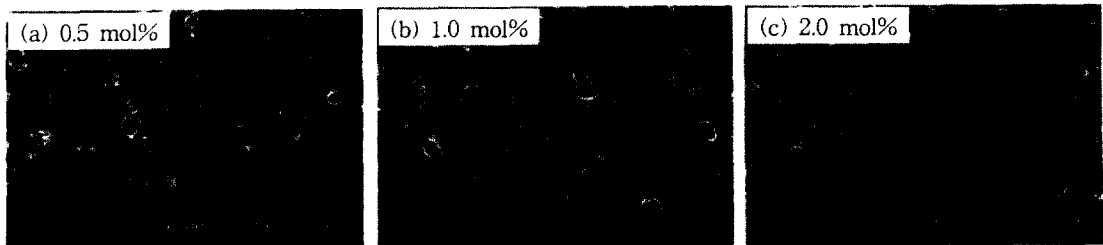


그림 1. Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터 세라믹스의 미세구조.

Fig. 1. SEM micrographs of Pr₆O₁₁-based ZnO varistor ceramics.

표 1. Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 V-I 특성 파라미터.

Table 1. V-I characteristic parameters of Pr₆O₁₁-based ZnO varistors.

Er ₂ O ₃ content (mol%)	V _{1mA} (V/mm)	V _{gb} (V/gb)	α	I _t (μ A)
0.5	153.15	2.14	39.10	1.84
1.0	177.12	1.96	28.02	3.88
2.0	298.57	2.53	47.41	1.82

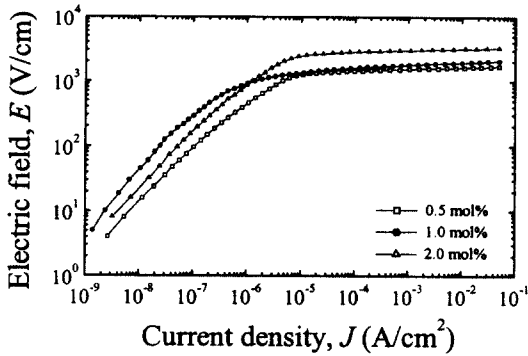


그림 2. Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 E-J 특성.

Fig. 2. E-J characteristics of Pr₆O₁₁-based ZnO varistors.

바리스터 세라믹스의 밀도는 Er₂O₃ 첨가량이 증가하면 감소하나 소결온도가 증가함에 따라 2.0 mol% 첨가시의 밀도가 0.5 mol% 첨가시의 것에 접근하는 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다[9,14].

그림 2는 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 전계(E)-전류밀도(J) 특성을 나타낸 것이다. 상세한 V-I 특성 파라미터를 표 1에 나타내었다. Er₂O₃ 첨가량의 증가에 따라 바리스터 전압 (V_{1mA})은 153.15~298.57 V/mm의 범위로 증가하였다. V_{1mA}는 시편 두께에 직렬로 걸쳐 있는 입계의 수 (n)와 입계의 장벽전압 (V_{gb})의 곱으로서 결정된다. 즉

$$V_{1mA} = n \cdot V_{gb} \quad (3)$$

식 (3)에서 불순물 도핑, 소결온도 및 시간에 따라 그레인 크기가 변하고, 그에 따라 n은 달라지므로 용도에 맞는 V_{1mA} 크기를 조절할 수 있다. 상기 식에서 V_{gb}는 다음과 같이 계산하여 결정된다.

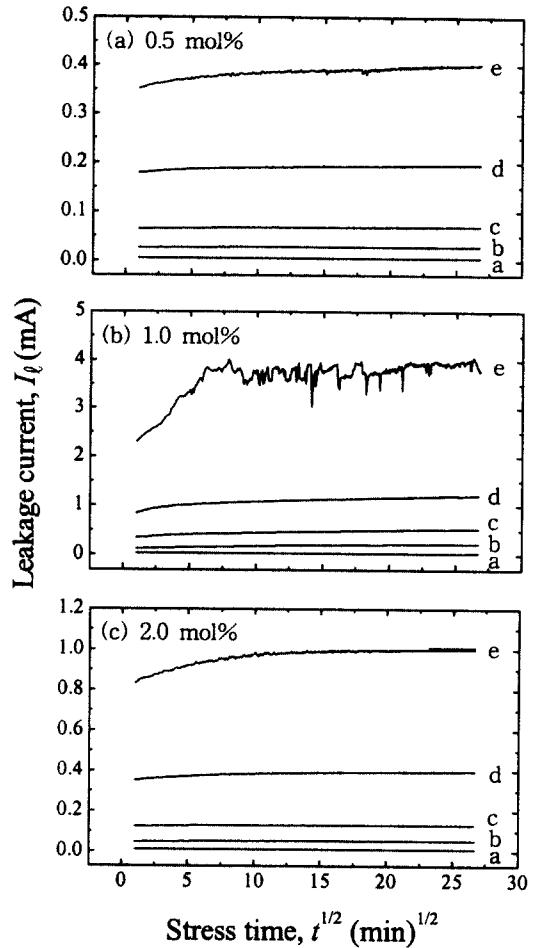


그림 3. DC 가속열화 스트레스동안 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 누설전류; a: 1차, b: 2차, c: 3차, d: 4차, e: 5차.

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

$$V_{gb} = V_{1mA}/n = (d/D)V_{1mA} \quad (4)$$

D는 시편 두께, d는 그레인 크기이다. Er₂O₃ 첨가량에 따른 V_{gb}는 1.96~2.53 V/gb 범위로서 입계의 접합상태가 정상적인 것으로 나타났다. 바리스터의 비직선 지수 (α)는 28.02~47.41의 범위로서 Er₂O₃ 첨가량이 증가함에 따라 1.0 mol%까지는 감소하다가 증가하는 경향을 나타내었으며, 2.0 mol% 첨가시에

47.41로서 높은 값을 나타내었다. 누설전류 (I_t)는 1.82~3.88 μA 의 범위로 α 특성과 반대의 경향을 나타내었으며, 2.0 mol% 첨가시 가장 낮은 1.82 μA 를 나타냄으로서 2.0 mol% Er_2O_3 가 첨가된 바리스터는 우수한 비직선성을 나타내는 것으로 확인되었다.

그림 3은 ZnO 바리스터의 DC 가속열화 스트레스 인가동안 누설전류의 변화추이를 나타낸 것이다. 0.5, 2.0 mol% Er_2O_3 가 첨가된 바리스터의 경우 스트레스 인가시간에 따른 누설전류는 3차 스트레스 동안은 외견상 거의 변화가 없는 매우 낮은 율로 증가하였으며, 스트레스 세기가 증가할수록 점점 큰 폭으로

증가하였다. 그리고 스트레스 세기에 따른 누설전류의 증가폭도 곡선간의 간격에서 알 수 있듯이 더욱 커짐을 알 수 있다. 한편 1.0 mol%의 경우 스트레스 시간에 따른 누설전류는 다소 높은율로 증가하였으며, 5차 스트레스에서 빈번한 외란현상이 관측됨으로서 매우 불안정한 특성을 나타낼 것으로 예측된다. 이것은 표 2에 나타낸 K_T 에서도 알 수 있듯이 상대적으로 매우 높은 것 (5차 스트레스 : $145 \mu\text{A} \cdot \text{h}^{-1/2}$)으로 나타났다.

그림 4는 ZnO 바리스터의 DC 가속열화 스트레스 전·후의 E - J 특성곡선의 변화추이를 나타낸 것이다. 스트레스에 따른 곡선의 변화로부터 각 바리스터가 어느 정도 안정한가를 추측할 수 있다. 1.0

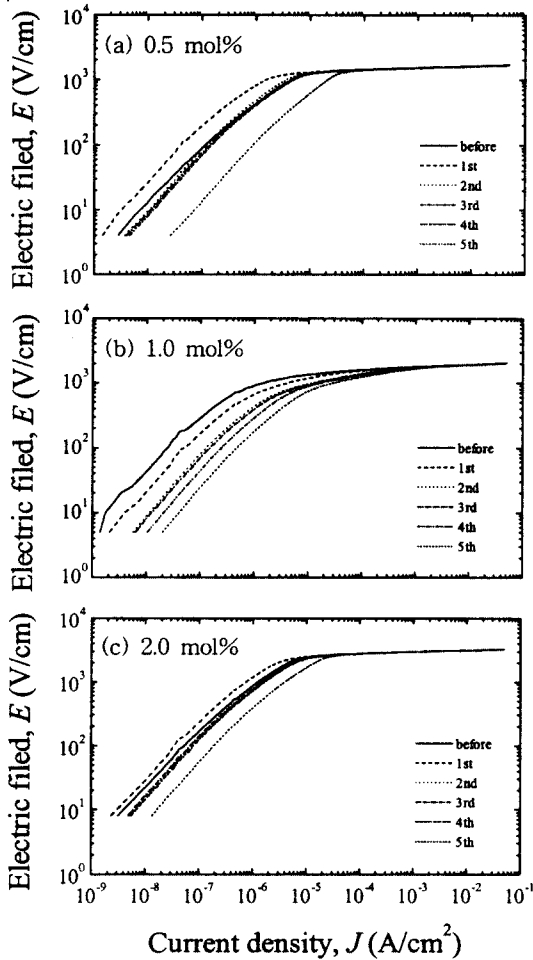


그림 4. DC 가속열화 스트레스 전·후의 Pr_6O_{11} 계 ZnO 바리스터의 E - J 특성.

Fig. 4. E - J characteristics of Pr_6O_{11} -based ZnO varistors before and after DC accelerated aging stress.

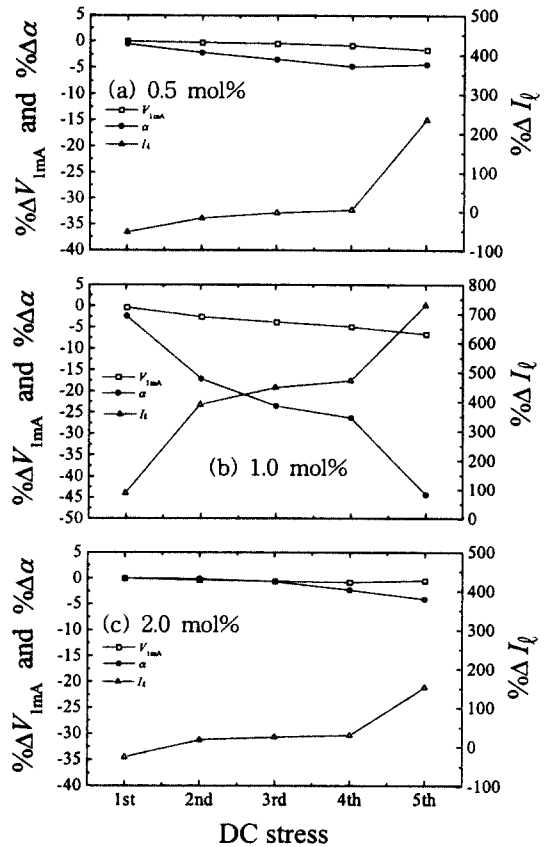


그림 5. DC 가속열화 스트레스에 따른 Pr_6O_{11} 계 ZnO 바리스터의 V - I 특성 파라미터 변화.

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

표 2. DC 가속열화 스트레스전·후의 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 V-I 특성 파라미터 변화.

Table 2. The variation of V-I characteristic parameters of Pr₆O₁₁-based ZnO varistors before and after DC accelerated aging stress.

Er ₂ O ₃ content (mol%)	Stress condition	K _T (μA·h ^{-1/2})	V _{1mA} (V/mm)	%ΔV _{1mA}	α	%Δα	I _l (μA)	%ΔI _l
0.5	before		153.15	0	39.10	0	1.84	0
	1st	0.07	153.07	-0.05	38.88	-0.56	0.88	-52.17
	2nd	0.28	152.70	-0.29	38.23	-2.23	1.54	-16.30
	3rd	0.79	152.34	-0.53	37.72	-3.53	1.79	-2.72
	4th	2.46	151.84	-0.86	37.22	-4.81	1.92	4.35
	5th	8.06	150.49	-1.74	37.35	-4.48	6.17	235.33
1.0	before		177.12	0	28.02	0	3.88	0
	1st	2.56	176.48	-0.36	27.34	-2.43	7.34	89.18
	2nd	21.38	172.56	-2.57	23.22	-17.13	19.03	390.46
	3rd	41.44	170.29	-3.86	21.43	-23.52	21.29	448.71
	4th	58.09	168.37	-4.94	20.63	-26.37	22.19	471.91
	5th	145.00	165.32	-6.66	15.58	-44.40	32.19	729.56
2.0	before		298.57	0	47.41	0	1.82	0
	1st	0.12	298.32	-0.08	47.40	-0.02	1.36	-25.27
	2nd	0.66	297.52	-0.35	47.34	-0.15	2.16	18.68
	3rd	1.04	296.88	-0.57	47.08	-0.70	2.28	25.27
	4th	5.09	296.11	-0.82	46.30	-2.34	2.36	29.67
	5th	12.47	297.03	-0.52	45.47	-4.09	4.60	152.75

mol% Er₂O₃ 첨가의 경우 항복영역에 이르기까지 초기 곡선에서 높은 전류쪽으로 스트레스에 따라 이동함으로써 상대적으로 안정성이 나쁘다는 사실을 알 수 있다. 이것은 상대적으로 낮은 밀도와 높은 누설 전류에 의한 것이다. 이에 반해서 0.5, 2.0 mol% Er₂O₃ 첨가의 경우 공통적으로 예비항복영역에서 1차 스트레스 후의 곡선이 스트레스 인가전보다 저전류쪽에 위치함으로써 안정화가 이루어졌음을 확인할 수 있다. 0.5 mol% Er₂O₃ 첨가는 항복영역에서는 3차 스트레스 후의 곡선까지도 초기곡선보다 저전류 쪽에 위치하는 높은 안정성을 보였으나 5차 스트레스 후에 큰 폭으로 곡선이 변함으로서 전체적으로 2.0 mol%의 경우보다는 안정성이 낮음을 알 수 있다. ZnO 바리스터의 Er₂O₃ 첨가별 DC 가속열화 스트레스에 따른 V-I 특성 파라미터 변화를 그림 5에 나타내었고, 구체적인 데이터를 표 2에 제시하였다. 0.5 mol% 첨가의 경우 4차 스트레스까지만 보면 특히 누설전류 변화율이 낮은 것이 주목되고 2.0 mol% Er₂O₃ 첨가의 경우와 비교시 오히려 안정성이 더 높은 것으로 나타났다. 그러나 5차 스트레스 후에 특히 누설전류가 크게 증가함으로써 상대적으로 안정성이 다소 떨어지긴 했으나 %ΔV_{1mA} = -1.74%, %Δα

= -4.48%, %ΔI_l = 235.33%로서 안정성이 높은 것으로 나타났다. 2.0 mol%의 경우 %ΔV_{1mA} = -0.52%, %Δα = -4.09%, %ΔI_l = 152.75%인 결과로 볼 때 0.5 mol% 첨가의 경우보다 높은 안정성을 나타내었으며, 특히 %ΔV_{1mA}는 1% 이하로 매우 낮게 나타났다. 지금까지 보고된 Er₂O₃가 첨가된 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터 가운데서 α ≥ 40인 바리스터의 안정성은 Er₂O₃가 0.5 mol% 첨가시 가장 높았던 사실과 비교할 때, 2.0 mol% Er₂O₃에서 안정성이 기존의 것보다 높은 것으로 나타난 것은 분명히 주목되는 결과이다. DC 스트레스에 대한 안정성은 치밀성과 누설전류에 크게 의존하는 것으로 세라믹스의 밀도가 높고, 누설전류가 낮은 경우에 안정성이 높았으며, 누설전류보다 밀도가 상대적으로 더 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

이러한 관점에서 밀도와 누설전류가 거의 같은 0.5, 2.0 mol% 첨가의 바리스터는 거의 같은 안정성을 나타낼 것으로 예상되었으나 노화율 계수 K_T가 0.5 mol%의 것(5차 스트레스 : 8.06 μA·h^{-1/2})이 상대적으로 낮게 나타남으로써 전체적으로 0.5 mol% 첨가의 바리스터가 더 안정할 것으로 예상되었다. 그러나 실험 결과는 오히려 2.0 mol% 첨가의 바리

스터가 더 높은 안정성을 갖는 것으로 나타났다. 이것은 공간적으로 준안정한 공핍층 내의 격자간 Zn (Zn_i)의 농도와 관련이 있는 것으로 추측된다. Zn_i 는 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다[20]. 안정성을 개선시키기 위한 방법 중의 하나는 Zn보다 이온 반경이 큰 불순물을 첨가시켜 Zn_i 자리에 위치함으로써 Zn_i 의 생성을 억제시키는 것이다. Er이 그 역할을 하는 것으로 가정하면 보다 많이 첨가된 2.0 mol%가 0.5 mol%보다 상대적으로 낮은 Zn_i 농도를 나타냄으로서 높은 안정성을 나타낸 것으로 사료된다.

4. 결론

ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Er₂O₃로 구성되는 Pr₆O₁₁계 ZnO 세라믹스 바리스터의 DC 가속열화 스트레스에 따른 안정성을 조사하여 그 실용가능성을 확인하였다. 1.0 mol% Er₂O₃가 첨가된 바리스터는 전기적 특성 및 안정성이 0.5, 2.0 mol% Er₂O₃ 첨가의 경우보다 상대적으로 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 0.5 mol% Er₂O₃ 첨가의 경우 비직선성이 우수하고, 높은 안정성을 나타냄으로서 실용가능성은 충분하지만 보다 더 높은 성능은 2.0 mol% Er₂O₃ 첨가에서 얻을 수 있었다. 이 경우 비직선 지수가 47.41, 누설전류가 1.82 μ A로 높은 비직선성을 나타내었으며, (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 $V_{1mA}/150^\circ C/12h$) 스트레스하에서 바리스터 전압 변화율이 -0.52 %, 비직선 지수 변화율이 -4.09%, 누설전류 변화율이 -152.75%로 매우 높은 안정성을 나타냄으로서 지금까지 연구된 Er₂O₃가 첨가된 5성분계 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터에서 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.

감사의 글

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

참고 문헌

[1] A. B. Alles and V. L. Burdick, "The Effect of Liquid-Phase Sintering on the Properties of

Pr₆O₁₁-Based ZnO Varistors," J. Appl. Phys., Vol. 70, pp. 6883-6890, 1991.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] K. Mukae, "Zinc Oxide Varistors with Praseodymium Oxide," Ceram. Bull., Vol. 66, pp. 1329-1331, 1987.
- [6] 남춘우, 정순철, 이외천, "Y₂O₃ 첨가에 따른 ZnO:Pr 바리스터의 미세구조 및 전기적 특성에 관한 연구," 전기전자재료학회논문지, 11권 1호, pp. 48-56, 1998.
- [7] 남춘우, 박춘현, "이트리아가 첨가된 프라세오디뮴계 산화아연 바리스터의 안정성에 관한 연구," 전기전자재료학회논문지, 11권 10호, pp. 842-848, 1998.
- [8] 남춘우, 윤한수, "Dy₂O₃가 첨가된 Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터의 전기적 성질 및 안정성," 전기전자재료학회논문지, 13권 5호, pp. 402-410, 2000.
- [9] 남춘우, 윤한수, 류정선, "ZPCCE계 바리스터의 미세구조와 전기적 성질 및 안정성," 전기전자재료학회논문지, 13권 9호, pp. 735-744, 2000.
- [10] C.-W. Nahm, C.-H. Park, and H.-S. Yoon, "Microstructure and Varistor Properties of ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Nd₂O₃ Based Ceramics," J. Mater. Sci. Lett., Vol. 19, pp. 271-274, 2000.
- [11] C.-W. Nahm, C.-H. Park, and H.-S. Yoon, "Highly Stable Nonohmic Characteristics of ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Dy₂O₃ Based Varistors," J. Mater. Sci. Lett., Vol. 19, pp. 725-727, 2000.
- [12] C.-W. Nahm and C.-H. Park, "Microstructure, Electrical Properties, Degradation Behavior of Praseodymium-Based Doped with Y₂O₃," J.

Mater. Sci., Vol. 35, pp. 3037-3042, 2000.

- [13] C.-W. Nahm, "The Electrical Properties and d.c. Degradation Characteristics of Dy₂O₃ Doped Pr₆O₁₁-Based ZnO Varistors," J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 21, pp. 445-453, 2001.
- [14] 남춘우, 류정선, "Zn-Pr-Co-Cr-Er 산화물계 바리스터의 전기적 성질," 전기전자재료학회논문지, 14권 5호, pp. 362-369, 2001.
- [15] 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, pp. 1671-1679, 2001.
- [16] C.-W. Nahm, "The Nonlinear Properties and Stability of ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Cr₂O₃-Er₂O₃ Ceramic Varistors," Mater. Lett., Vol. 47, pp. 182-187, 2001.
- [17] 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.
- [18] C.-W. Nahm and J.-S. Ryu, "Influence of Sintering Temperature on Varistors Characteristics of ZPCCE-Based Ceramics," Mater. Lett., accepted.
- [19] J. Fan and R. Freer, "The Role Played by Ag and Al Dopants in Controlling the Electrical Properties of ZnO Varistors," J. Appl. Phys., Vol. 77, pp. 4795-4800, 1995.
- [20] T. K. Gupta and W. G. Carlson, "A Grain Boundary Defect Model for Instability/Stability of a ZnO Varistor," J. Mater. Sci., Vol. 20, pp. 3487-3500, 1985.