

## 디스프로시아가 첨가된 ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>계 바리스터 전기적 성질, 제한전압특성 및 안정성

### Electrical Properties, Clamping Voltage Characteristics, and Stability of Dysprosia-doped ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-Based Varistors

남춘우<sup>1,a</sup>  
(Choon-Woo Nahm<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

The electrical properties, clamping voltage characteristics, and stability of dysprosia-doped ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-based varistors were investigated with different dysprosia contents from 0 to 2.0 mol%. The incorporation of dysprosia in varistor ceramics greatly increased the varistor voltage from 50 to 481.0 V/mm. It was found that the dysprosia is good additive improving a nonlinearity, in which the nonlinear exponent is above or near 50, and the leakage current is below 1.0 μA. The dysprosia-doped varistors exhibited superior clamping voltage characteristics, in which clamping voltage ratio is above or near 2 at surge current of 50 A. The 0.5 mol% dysprosia doped varistors only exhibited high stability, with the rate of varistor voltage of -0.9%, under DC accelerated aging stress, 0.95 V<sub>mA</sub>/150°C/24 h.

**Key Words** : Varistor, Nonlinearity, Clamping voltage, Stability

#### 1. 서론

반도체 기술의 급속한 발전으로 새로운 반도체 소자가 등장하고, 성능이 향상됨에 따라 정보산업의 발전은 하루가 다르게 점점 가속화되고 있다. 모든 시스템의 전기적 환경이 시시각각으로 변함으로서 시스템의 내환경 개선도 무시할 수가 없게 되었다. 수년전의 첨단이라면 외형적 측면보다는 기능성에 더 무게를 둔 반면 오늘날에는 기능적으로도 업그레이드되어 점점 복합화 및 고주파화가 뚜렷하며, 외형적으로도 더욱더 소형화 및 경량화로 발전하고 있다. 한편 시스템은 항상 정상적으로

작동하는 것이 무엇보다 중요하지만 때에 따라 원 인불명의 이상전압이 침입할 수 있는 환경에 놓여 있다. 즉 시스템이 다양한 써지에 오동작하거나 파괴될 수 있는 가능성을 가지고 있다.

바리스터는 시스템에 유입하는 원하지 않는 써지를 접지를 통해서 방전시키는 하나의 안전장치이다[1-4]. 단결정의 반도체로 만들어진 소자는 소형화 측면에서는 유리하지만 단일접합에서 오는 구조적인 문제로 써지 내량 및 에너지 내량이 적다는 것이 큰 결함이다[1]. 오늘날 대부분의 바리스터는 세라믹스로 만들어지며, 써지 및 에너지 내량도 우수하고 침화할 수 있을 정도의 소형화도 이루어 지는 등 크게 발전이 이루어진 산화아연 바리스터이다[1]. 그러나 여전히 저전압형 고비선형성, 고전압형 고비선형성, 각종 스트레스에 대한 안정성 등이 개선점으로 남아 있다. 이러한 것들은 조성물의 선택과 공정변수를 통해서 개선 가능지만 많은 변수를 가지고 있다는 것을 알아야 할 것

1. 동의대학교 전기공학과  
(부산시 부산진구 엄광로 995)  
a. Corresponding Author : cwnahm@deu.ac.kr  
접수일자 : 2004. 10. 4  
1차 심사 : 2004. 11. 9  
2차 심사 : 2004. 12. 7

이다. 최근에는 이러한 관점에서  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ 을 사용한 ZnO 바리스터에 대해 연구가 이루어 지고 있다 [5-11].

본 논문에서는 희토류 산화물계 산화아연 바리스터에 디스프로시아( $\text{Dy}_2\text{O}_3$ )를 첨가하여 비직선성, 소정의 씨지에 대한 제한전압특성, 안정성을 탐색하여 응용 가능성을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시편 준비

ZnO,  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ , CoO,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  등으로 구성된 세라믹스에 디스프로시아를 0.0, 0.5, 1.0, 2.0 mol%까지 변화시켜 칭량하였다. 칭량된 시료를 24시간 불민을 이용하여 혼합한 후 12시간 건조시켜 750 °C에서 2시간 하소하였다. 하소된 시료에 길함체로서 5 wt% 폴리비닐알콜 수용액을 시료무게의 2wt% 첨가하여 균일하게 혼합한 후에 직경 10 mm 원통형 몰드로 80 MPa 압력으로 성형하였다. 성형체를 1350 °C에서 1시간 소결한 후 연마기를 사용하여 1 mm 두께로 가공하였다. 가공체를 직경 5 mm 원형의 진자를 도포하여 600 °C에서 10분간 열처리하여 리드선을 부착한 후 에폭시 분말도료를 사용하여 패키징하였다.

### 2.2 전기적 측정

초기측정을 하기 전에 소자의 안정화를 위해서 곡선 추적기를 사용하여 항복이 일어나도록 전압을 인가하였다. 12~24시간 경과한 후에 Keithley 237을 사용하여 V-I 데이터를 얻었다. 바리스터 전압( $V_{1mA}$ )은 단위면적당 1 mA의 전류가 흐를 때로 정의하였으며, 비직선 지수( $\alpha$ )는  $\alpha = 1/\log(V_{10mA}/V_{1mA})$ (여기서  $V_{1mA}$ 와  $V_{10mA}$ 는 단위면적당 1 mA와 10 mA가 흐를 때의 전압)와 같이 정의되는 식을 사용하여 계산하였다. 누설전류는 바리스터 전압의 80%의 전압인가에 따라 흐르는 전류로 정의하였다. 유전특성은 QuadTech 7600을 사용하여 100 Hz에서 2 MHz 범위에서 측정하였다. 제한전압특성은 씨지 발생기(태양에너지니어링)를 사용하여 소정의 씨지 전류를 인가하여 제한전압을 오실로스코프로 측정하였으며, 제한전압비(K)는 제한전압과 바리스터 전압비로 계산하였다.

### 2.3 DC 가속열화특성

DC 스트레스 전압/스트레스 온도/스트레스 시간으로 구성되는 DC 가속열화스트레스를 4차에

걸쳐서 바리스터에 가함으로서 바리스터의 저항력을 시험하였다. 1차 스트레스는 0.85V1mA/115°C/24h, 2차 스트레스는 0.90V1mA/120°C/24h, 3차 스트레스는 0.95V1mA/120°C/24h, 4차 스트레스는 0.95V1mA/150°C/24h였다.

### 2.4 미세구조 분석

시편의 한면을 경면가공하여 1150 °C에서 30분간 열적에칭하여 SEM(S2400, Hitachi)으로서 표면형상을 관찰하였으며, 사진으로부터 평균결정립크기(d)를 선형교차기법으로 결정하였다[12]. 세라믹스의 밀도( $\rho$ )는 밀도측정용 소프트웨어가 장착된 전자천평기를 이용하여, 아르키메데스법으로 결정하였다. 상(phase)은 X-선회절분석으로 통해서 분석되었다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 1은 바리스터의 미세구조를 나타낸 SEM 사진이다. 디스프로시아가 0.5 mol%을 기준으로 첨가량이 증가할수록 기공이 증가함으로서 밀도가 5.45, 5.49, 5.16, 4.64 g/cm<sup>3</sup>까지 감소하는 것으로 나타났다. 이것은  $\text{Y}_2\text{O}_3$  첨가의 경우[9]와 유사한 것으로 이온반경이 Zn보다 큼으로서 ZnO 결정립에 고용되지 못하고 입계로 석출됨으로서 나타나는 결과이다. 평균 결정립 크기도 디스프로시아가 입계로 석출하여 결정립 성장을 억제함으로써 첨가량이 증가함에 따라 18.2, 14.5, 8.4, 4.6  $\mu\text{m}$ 로 감소하였다. 이러한 변화는 전기적 특성, 특히 바리스터 전압에 큰 영향을 미친다.

그림 2는 바리스터의 규준화된 V-I 특성을 나타낸 것이다. 곡선의 형태로부터 바리스터는 전기적으로 비선형 특성을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 직전압에서는 거의 선형에 가까운 즉 용성특성을 나타내지만 점점 전압이 증가함에 따라 전류는 선형에서 벗어나고, 어떤 임계전압에서는 전류가 급격히 증가하는 특성을 보이고 있다. 바리스터는 용성특성에서 비용성 특성으로의 전환되는 정도에 따라서 바리스터 특성의 핵심인 비선형성의 양부가 결정된다. 이 점에 비추어 볼 때 분명한 것은 디스프로시아가 첨가되지 않은 것은 특성이 나쁘다는 것을 쉽게 파악할 수 있으며, 디스프로시아 첨가가 바리스터에 미치는 영향이 적지 않음을 알 수 있다.

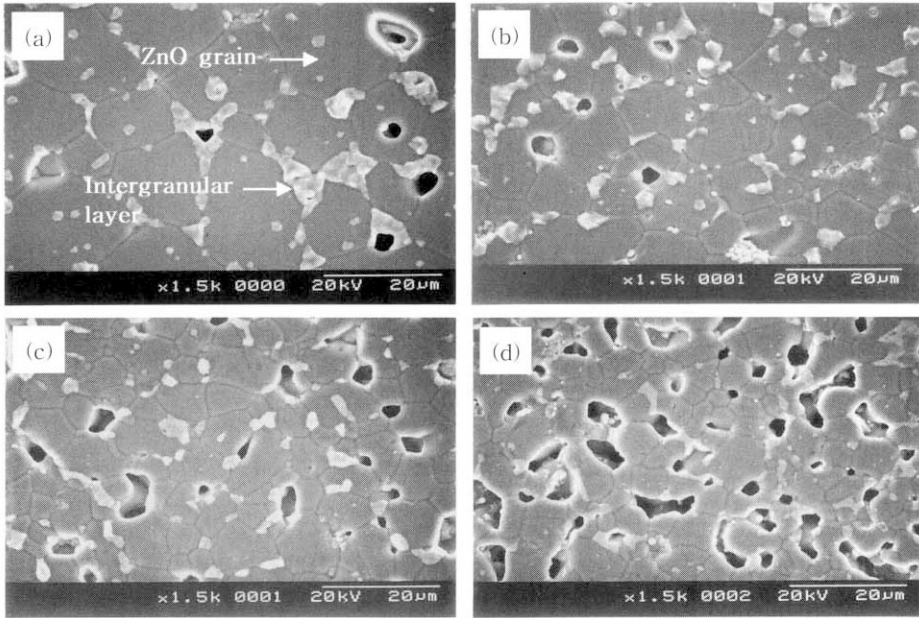


그림 1. 바리스터의 미세구조에  $Dy_2O_3$  첨가(mol%)의 영향; (a) 0.0, (b) 0.5, (c) 1.0, (d) 2.0.  
 Fig. 1. Micrograph of varistors with different  $Dy_2O_3$  contents(mol%); (a) 0.0, (b) 0.5, (c) 1.0, and (d) 2.0.

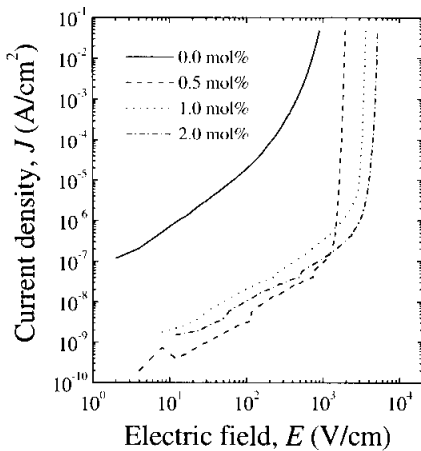


그림 2. 바리스터의 V-I 특성에  $Dy_2O_3$  첨가의 영향.  
 Fig. 2. V-I characteristic of varistors with different  $Dy_2O_3$  contents.

그림 3은 바리스터의 디스프로시아가 바리스터 전압에 미치는 영향을 조사한 것이다. 바리스터 전압은 미세구조에서 언급한 결정립 크기와는 상호 간에는 역비례하는 관계를 가지고 있다. 결정립

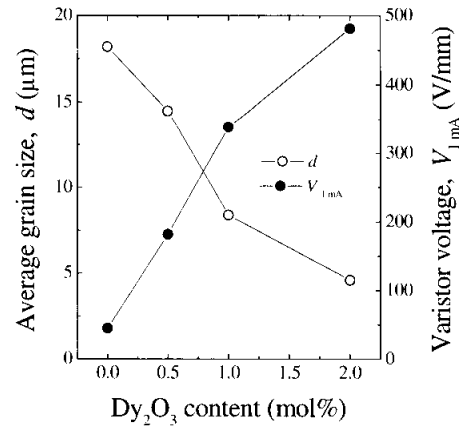


그림 3. 평균결정립 크기 및 바리스터의 바리스터 전압에  $Dy_2O_3$  첨가의 영향.  
 Fig. 3. Average grain size and varistor voltage of varistors with different  $Dy_2O_3$ .

크기가 증가할수록 바리스터 전압은 감소하게 된다. 바리스터 전압은 소정의 시편 두께에 대해 항복이 일어날 때 입계마다 걸리는 전압의 합으로

입계의 수가 많으면 당연히 높아지게 된다. 디스프로시아가 첨가되지 않은 바리스터의 바리스터 전압( $V_{1mA}$ )은 45 V/mm에 불과하지만 디스프로시아가 첨가되면 180 V/mm 이상으로 증가된다.

그림 4는 바리스터의 비직선성에 디스프로시아가 미치는 영향을 나타낸 것이다. 디스프로시아가 첨가되지 않을 경우에는 비직선 지수가 5에 불과하지만 첨가시에는 50에 가깝거나 그 이상으로 증가했음을 알 수 있다. 누설전류도 0.1~1.1  $\mu$ A로 크게 감소됨으로서 바리스터 특성 개선에 디스프로시아의 영향이 크다는 사실을 알 수 있다. 디스프로시아가 첨가함으로써 비직선성이 개선되는 원인은 크게 두가지로 해석된다. 그 하나는 입계부위에 디스프로시아가 석출되어 ZnO 결정립의 크기를 작아지게 함으로서 전류 흐름에 대한 저항도가 증가하기 때문이다. 기본적으로 입계의 수가 적은 경우, 예컨대 50 V 이하의 약진 바리스터는 입계 수가 불과 17~25개에 불과하다. 입계의 수가 적은 것만큼 저항도가 떨어지기 때문에 큰 비직선 지수를 얻는다는 것은 어려운 과제이다. 또 하나의 비직선성 향상의 원인은 디스프로시아의 첨가에

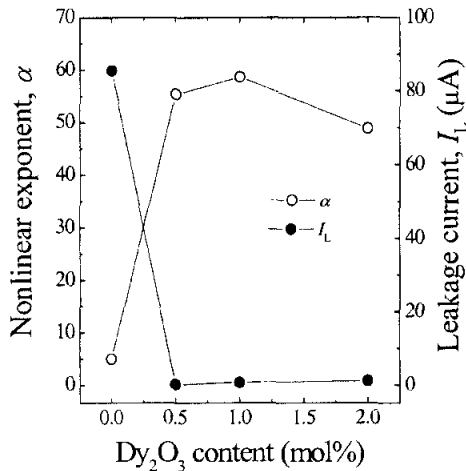


그림 4. 바리스터의 비직선 지수 및 누설전류에 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가의 영향.

Fig. 4. Nonlinear exponent and leakage current of varistors with different Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents.

의해 ZnO 결정립의 농도의 큰 감소에 있다고 가정할 수 있다. ZnO 농도의 감소는 입계부위의 공핍층의 폭을 증가시켜, 장벽높이의 증가시킴으로써

비직선성이 향상되었을 것으로 판단된다. 가장 높은 비직선 지수는 1.0 mol% 디스프로시아, 가장 낮은 누설전류는 0.5 mol% 디스프로시아 첨가로부터 얻어진다.

그림 5는 유전특성에 디스프로시아가 미치는 영향을 나타낸 것이다. 일반적으로 세라믹스는 다결정체로서 입계의 특성, 비유전상수( $\epsilon_{APF}$ )는  $\epsilon_{APF} = \epsilon_s \cdot d/t$  ( $\epsilon_s$ 는 벌크상 비유전상수,  $d$ 는 결정립 크기,  $t$ 는 공핍층 폭)와 같은 관계로 인해  $\epsilon_{APF}$ 는 세라믹 벌크상 물질보다 커지게 된다. 마찬가지로 본 바리스터에서도 ZnO 자체의 비유전 상수(8.5)보다는 훨씬 크다. 디스프로시아가 첨가되지 않은 바리스터는 결정립의 크기가 크고 입계의 수가 적기 때문에 상대적으로 큰  $\epsilon_{APF}$  값을 나타낸다. 반면에 디스프로시아가 첨가된 경우에는 그 첨가량에 따라 결정립의 크기가 크게 달라지게 됨으로서 그림에 나타난 바와 같이 순차적으로 감소하게 된다.

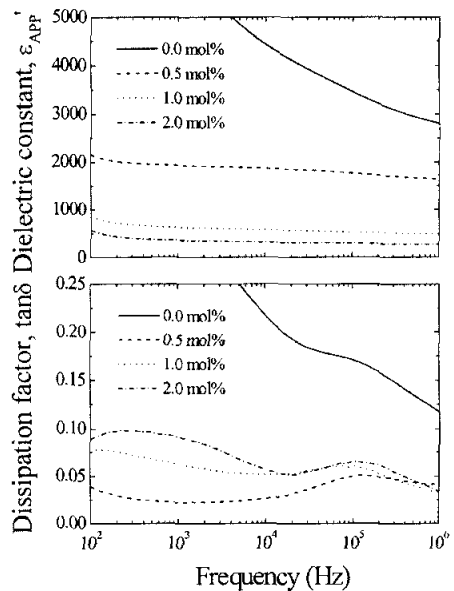


그림 5. 바리스터의 유전특성에 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가의 영향.

Fig. 5. Dielectric characteristics of varistors with different Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents.

유전손실계수( $\tan\delta$ )는 유전특성 가운데서 다소 복잡한 관계를 가지고 있다. 이것은 교류전계인가시 유전체 내의 다양한 쌍극자의 운동에 관계가 있기 때문이다. 손실계수는 비유전을 특성에서 유전분산

현상이 일어나는 주파수 영역에서 손실피크가 일어난다. 이것은 유전분산 영역에서 교류전계인가시 주파수에 따른 쌍극자 회전이 가장 무전서함으로서 상대적으로 손실이 증가하기 때문이다. 그런데 이러한 현상은 사실과 다르게 나타나는 경우가 종종 있다. 바리스터와 같이 임계효과를 이용한 소자는 임계가 활성화가 잘 이루어 지지 않으면, 즉 뚜렷한 장벽이 형성되지 않으면 상기에서 언급한 것과는 다른 손실특성을 나타내게 된다. 디스프로시아 등이 첨가되지 않은 바리스터는 전 주파수 영역에서 손실이 크다. 이것은 쌍극자에 의한 것이라기 보다 초기 누설전류가 크기 때문에 음성 손실로 보는 것이 옳을 것이다. 디스프로시아가 첨가된 바리스터에서도 첨가량이 증가할수록 따라 손실계수도 누설전류 크기에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 디스프로시아가 첨가된 바리스터는 200 kHz 부근에서 분명한 피크를 볼 수 있고, 100 Hz 부근에서도 첨가량이 증가함에 따라 피크가 고주파 쪽으로 점점 이동하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 주파수 부근에서 유전분산이 일어난다는 것도 유추 가능하다.

그림 6은 바리스터의 제한전압특성에 디스프로시아가 미치는 영향을 나타낸 것이다. 제한전압은 써지 침입시에 바리스터가 얼마나 효과적으로 써지를 억제시키는가를 나타내는 것으로 일반적으로 소정의 임펄스성의 전류를 바리스터에 흘렸을 때 바리스터 양단의 전압으로 정의한다. 이 전압은 바리스터 전압보다 높은데, 바리스터 전압에 가까울수록 써지 억제력이 우수하다고 할 수 있다. 여러 가지 써지 전류를 흘렸을 때의 제한전압과 그 비율 표 1에 나타내었다. 써지 전류가 증가함에 따라 제한전압도 증가하고, 그에 따라 제한전압비도 증가한다. 디스프로시아가 첨가되지 않은 바리스터는 제한전압비가 3이상으로 써지 억제력이 저하된다는 것을 알 수 있다. 반면에 디스프로시아가 첨가된 바리스터는 상대적으로 써지 억제력이 많이 향상되었음을 알 수 있다. 그 중에서도 1.0 mol% 첨가시 50 A의 전류를 흘렸을 때도 제한전압비가 2이하를 나타내었으며, 100 A 인가시에도 2정도로 가장 제한전압특성이 우수한 것으로 나타났다. 2.0mol% 첨가시에는 50 A의 써지 전류 인가시에는 우수한 제한전압특성을 보였다. 100 A 인가시

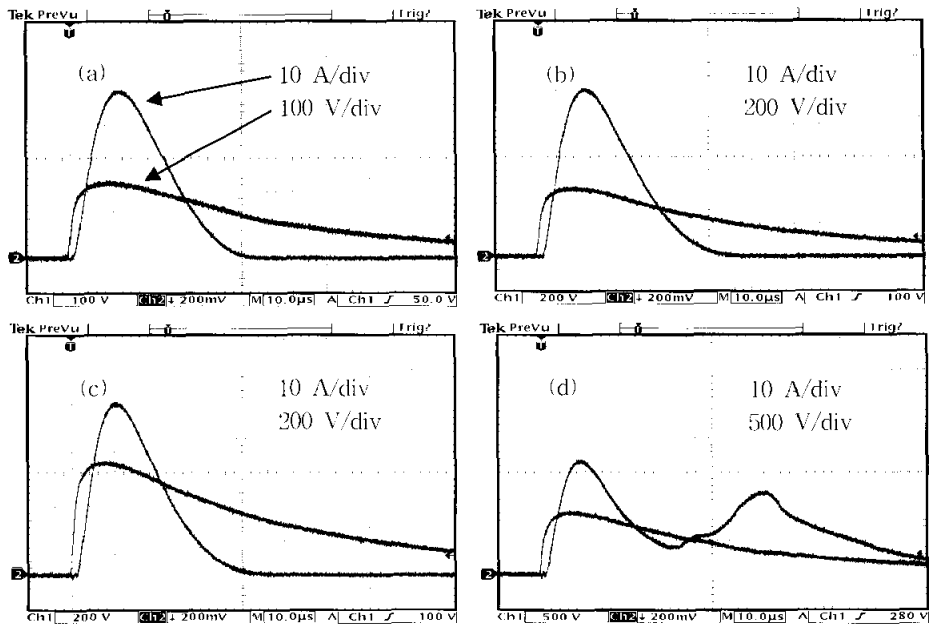


그림 6. 바리스터의 제한전압특성에  $Dy_2O_3$  첨가(mol%)의 영향: (a) 0.0, (b) 0.5, (c) 1.0, (d) 2.0.  
 Fig. 6. Clamping voltage characteristics of varistors with different  $Dy_2O_3$  (mol%) contents: (a) 0.0, (b) 0.5, (c) 1.0, and (d) 2.0.

표 1. 바리스터의 제한전압과 제한전압비.

Table 1. Clamping voltage and its ratio with different Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents.

Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content(mol%)	V <sub>1mA</sub> (V/mm)	I <sub>p</sub> (A)	V <sub>c</sub> (V)	K
0.0	48	5	156	3.25
		10	168	3.50
		50	206	4.29
		100	224	4.67
0.5	187	5	310	1.66
		10	326	1.74
		50	380	2.03
1.0	321	5	508	1.58
		10	532	1.66
		50	612	1.91
2.0	458	50	652	2.03
		5	716	1.56
		10	760	1.66
		50	890	1.94
		100	-	-

소자가 파손되는 현상을 보였다. 이것은 밀도가 낮아 입계당 전류밀도의 급격한 증가에 따른 것으로 판단된다.

표 2. 바리스터의 DC 가속연화 스트레스에 대한 전기적 특성 파라미터의 변화.

Table 2. Variation of electrical characteristic parameters against DC accelerated aging stress of varistors with different Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents.

Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content (mol%)	Stress states	V <sub>1mA</sub> (V/mm)	%ΔV <sub>1mA</sub>	α	%Δα	I <sub>L</sub> (μA)	%ΔI <sub>L</sub>	ε <sub>APP'</sub>	%Δε <sub>APP'</sub>	tanδ	%Δtanδ
0.0	before	50.0	0	5.0	0	85.6	0	6361.05	0	0.3429	0
	1st	33.4	25.8	3.8	23.2	100.0	17.0	7686.81	20.84	0.4388	27.97
	2nd	32.2	28.5	3.7	24.8	100.0	17.0	7870.75	23.73	0.4456	29.95
	3rd	32.1	28.7	3.7	24.8	100.0	17.0	7875.10	23.80	0.4405	28.46
0.5	4th	37.2	17.3	4.2	-15.5	93.8	9.8	6493.30	2.08	0.4451	29.80
	before	181.9	0	55.3	0	0.1	0	1933.85	0	0.0228	0
	1st	180.1	-1.0	53.4	-3.5	0.3	150.0	2000.58	3.45	0.0332	45.61
	2nd	179.6	-1.3	52.9	-4.4	0.3	183.3	2043.16	5.65	0.0378	65.79
1.0	3rd	179.0	-1.6	51.8	-6.5	0.4	250.0	2071.91	7.14	0.0374	64.04
	4th	180.4	0.9	47.4	-14.4	0.7	483.3	1994.11	3.12	0.0947	315.35
	before	338.3	0	58.6	0	0.7	0	625.36	0	0.0626	0
	1st	Thermal runaway									
2.0	before	481.0	0	48.8	0	1.1	0	358.64	0	0.0916	0
	1st	Thermal runaway									

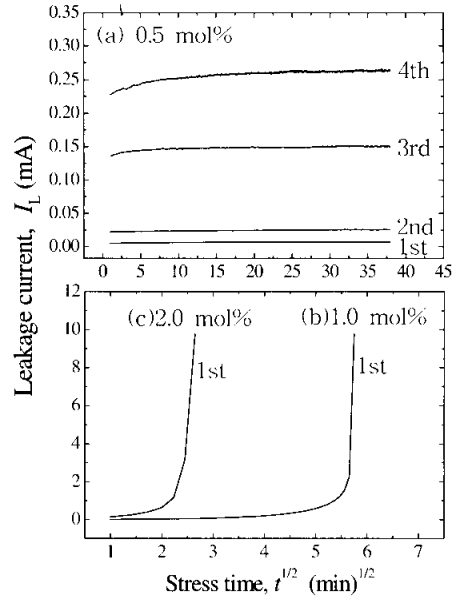


그림 7. 바리스터의 DC 가속연화 스트레스동안 누설전류에 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가(mol%)의 영향.

Fig. 7. Leakage current of varistors with different Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents(mol%) during DC accelerated aging stress.

그림 7은 바리스터의 DC 가속열화에 따른 누설 전류에 디스프로시아가 미치는 영향을 나타낸 것이다. 디스프로시아가 첨가되지 않은 바리스터는 비직선성이 나쁘기 때문에 안정성 조사에서 제외시켰다. 디스프로시아가 첨가된 바리스터는 첨가량에 따라 안정성에 현저한 차이를 나타내었다. 1.0 mol%가 첨가된 바리스터는 비직선성도 우수하고, 제한전압특성도 좋지만 1차 스트레스에서 초기에 열폭주가 일어남으로서 안정성에 있어서는 문제가 심각하다는 것을 알 수 있다. 2.0 mol%도 마찬가지이다. 안정성은 미세구조에서 나타낸 바와 같이 밀도와 관계가 깊다. 밀도가 낮게 되면 상대적으로 입계당 전류밀도가 높아지게 되고 장시간 전류가 계속 흐르면 주윤열에 의한 전류가 발생하여 점점 전류가 증가하게 됨으로 결국에는 열폭주 현상이 일어나게 된다. 반면에 0.5 mol% 첨가된 바리스터는 4차 스트레스까지 열폭주가 일어나지 않고 안정됨으로 우수한 안정성을 보이고 있다. 표 2에 나타낸 바와 같이 바리스터 전압 변화율( $\% \Delta V_{1mA}$ )은 1%에도 채 미치지 못하는 적은 변화를 나타내었다. 누설전류 변화율( $\% \Delta I_L$ )은 꽤 높지만 실제 4차 스트레스 후의 누설전류는 여전히 1  $\mu A$ 이하로 낮다. 또한 비유전율 변화율( $\% \Delta \epsilon_{NP}$ )도 +3%에 불과할 정도로 안정성이 높은 것으로 나타났다. 비직선 지수 변화율( $\% \Delta \alpha$ )과 손실계수 변화율( $\% \Delta \tan \delta$ )은 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>계 바리스터에 디스프로시아를 첨가함으로써 전기적 특성, 제한전압특성, 안정성에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 바리스터 전압을 180 V/mm 이상으로 증가시켰다.
2. 비직선성을 크게 향상시켰으며, 1.0 mol% 첨가시에 가장 높은 비직선 지수(58.6)가 얻어졌다.
3. 제한전압특성을 크게 향상시켰으며, 1.0 mol% 첨가시에 가장 높은 썬지 억제력을 나타내었다.
4. 안정성은 0.5 mol% 첨가시 가장 우수하였으며, DC 가속열화 스트레스 조건 0.95V<sub>1mA</sub> /150℃ /24h에서 바리스터 전압 변화율이 -0.9였다.

#### 참고 문헌

- [1] 뉴-테라스 시리즈 編集委員會, “半導体セラミクスとその應用”, 學獻社, p. 149, 1990.
- [2] 電氣學會, “酸化亜鉛避雷器の特性と評價試験法”, 電氣學會技術報告, 第474号, p. 4, 1993.
- [3] L. M. Levinson and H. R. Pilipp, “Zinc oxide varistor—a review”, Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 65, No. 4, p. 639, 1986.
- [4] T. K. Gupta, “Application of zinc oxide varistor”, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, No. 7, p. 1817, 1990.
- [5] C.-W. Nahm and H.-S. Kim, “Influence of cooling rate on stability of nonlinear properties of ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-based varistor ceramics”, Mater. Lett., Vol. 57, No. 9-10, p. 1544, 2003.
- [6] C.-W. Nahm and B.-C. Shin, “Highly stable electrical properties of ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-CoO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based varistor ceramics”, Mater. Lett., Vol. 57, No. 7, p. 1322, 2003.
- [7] C.-W. Nahm, “Microstructure and electrical properties of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-based varistor”, Mater. Lett., Vol. 57, No. 7, p. 1317, 2003.
- [8] 남춘우, 김향숙, “ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-CoO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계 바리스터 세라믹스의 전기적 특성”, 전기전자재료학회논문지, 15권, 8호, p. 664, 2002.
- [9] 남춘우, 박종아, 김명준, “ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-CoO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계 세라믹스의 미세구조 및 바리스터 특성”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 10호, p. 897, 2003.
- [10] 남춘우, 박종아, 김명준, “Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 첨가된 ZPCCD계 바리스터의 DC 가속열화 특성”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 12호, p. 1071, 2003.
- [11] 남춘우, 박종아, 김명준, 유대훈, “소결온도에 따른 ZPCCE계 바리스터의 제한전압특성”, 전기전자재료학회논문지, 17권, 8호, p. 835, 2004.
- [12] 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.