

## (Pr, Co, Cr)-doped ZnO 바리스터의 가속열화특성에 테르비아 첨가효과

### Terbia Addition Effects on Accelerated aging Characteristics of (Pr, Co, Cr)-doped ZnO Varistors

남춘우<sup>1,a</sup>

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

#### Abstract

The electrical properties and stability of ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-CoO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based varistors were investigated for different Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> amounts in the range of 0~1.0 mol%. As the Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> amount increased, the sintered density increased in the range of 99.1~101.1% of theoretical density and the average grain size decreased in the range of 7.7~4.8 μm. The varistor voltage increased in the range of 280.9~715.8 V/mm and the nonlinear coefficient increased in the range of 26.4~44.4 with the increased of Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> amount. The 0.25 mol% Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>-doped varistors exhibited the high electrical stability, with -0.1% in variation rate of varistor voltage, -0.7% in variation rate of nonlinear coefficient, and +17.4% in variation rate of leakage current for specified dc accelerated aging stress of 0.95V<sub>1mA</sub>/150°C/24h.

**Key Words** : Electrical properties, DC accelerated aging stress, Stability, Varistors

#### 1. 서 론

ZnO는 N형 산화물 반도체로서 바리스터는 주성분인 ZnO에 소량의 바리스터 형성산화물과 특성개선용 산화물을 혼합하여 만들어진 반도체 세라믹스 소자이다. 미세구조적으로 ZnO 바리스터의 내부는 비선형성을 나타내는 최소 단위인 마이크로 바리스터(ZnO 결정립-입간층-ZnO 결정립의 구조)가 3차원적으로 구성되어 있다. 이러한 반도체-절연체-반도체(SIS) 구조하에서 비선형적인 전압-전류 특성 뿐만 아니라 우수한 에너지 흡수성이 나타난다. 따라서 ZnO 바리스터는 고전압에서 저전압에 이르기까지 다양하게 응용되고 있다. 대개 디스크 소자는 썬지 전류를 방전시키는 소자로서 피보호 소자나 기기의 전단부 및 전원부에 병렬로 연결되어 썬지 침입시 순간적으로 접지로 썬지를

방전시키게 된다[1-3]. 반면에 칩소자는 ESD(Electrostatic Discharge)용으로서 휴대용 정보기에 순간적으로 침입하는 정전기를 흡수하는데 사용된다.

바리스터와 관련된 연구는 썬지전류용이나, 썬지전압용이나, 고압용이나, 저압용이나에 따라 ZnO계, SnO<sub>2</sub>계[4]나 WO<sub>3</sub>계[5]와 같은 새로운 바리스터 소재, ZnO계에 있어서 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>[6], V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>[7]와 같은 새로운 바리스터 형성산화물, 기존의 ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계 바리스터 재료에 대한 비선형성 및 안정성을 개선시키기 위한 연구가 주류를 이루고 있다. 바리스터는 전도특성에서 비선형성이 가장 본질적인 요소가 되며, 다른 세라믹스 소자와는 달리 높은 에너지를 처리해야하기 때문에 안정성과 관련된 신뢰성이 대단히 중요하다.

그렇기 때문에 현재까지도 첨가물 역할에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다[8-14].

본 연구에서는 소결시간에 따른 ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-CoO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계 바리스터의 전기적 성질 및 안정성에 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가가 미치는 영향을 실험을 통하여 고찰하였다.

1. 동의대학교 전기공학과

(부산시 부산진구 엄광로 995)

a. Corresponding Author : cwnahm@deu.ac.kr

접수일자 : 2007. 5. 7

1차 심사 : 2007. 5. 16

심사완료 : 2007. 5. 23

## 2. 실험 방법

### 2.1 시편 제작

(98.0-x) mol% ZnO, 0.5 mol% Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>, 1.0 mol% CoO, 0.5 mol% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, x mol% Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> (x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0) 조성식에 따라 순도 99.9% 시료를 10 μg의 오차범위까지 칭량한 다음, 지르코니아 불과 분산매 의 아세톤이 든 폴리프로 필렌 용기에 넣어 24시간동안 혼합하였다. 120℃에서 12시간동안 건조시킨 후, 750℃에서 2시간 하소 시켰다. 마노유발을 이용하여 재분쇄한 다음, 성형 조제 PVA 수용액을 시료무게의 2 wt% 첨가시켜 균일하게 혼합하여 200 mesh 체로 조립하였다. 800 kg/cm<sup>2</sup> 압력 하에서 직경이 10 mm, 두께가 1.8 mm가 되게 원판형으로 성형한 후, 1330℃에서 1시간 소결하였다. 소결된 시편을 1.0 mm 두께로 연마하여 초음파 세척 후, 직경이 5 mm되게 양면에 은 전극을 도포한 다음, 600℃에서 10분간 열처리하여 오염성 접촉이 되게 하였다.

### 2.2 미세구조 관찰

시편의 한 면을 거울연마한 다음, 1100℃에서 20분간 열적 에칭한 후, 표면을 SEM(S2400, Hitachi)으로 미세구조를 관찰하였다. 평균 결정립 크기(d)는 선형교차기법에 의한 식,  $d=1.56C_{eff}/M_{N_{eff}}$  ( $C_{eff}$ 는 test-line의 유효길이, M은 SEM의 배율,  $N_{eff}$ 은 입계와 test-line과의 유효교차수)로 결정되었다[15]. 소결밀도( $\rho$ )는 밀도측정용 소프트웨어가 장착된 전자저울을 이용하여, 아르키메데스 원리에 의한 식,  $\rho = W\rho_0/(W-W_0)$  ( $\rho_0$ 는 물의 밀도, W는 공기속에서 시편의 무게,  $W_0$ 는 물속에서 시편의 무게)로 구하였다.

### 2.3 전기적 특성 측정

전압(V)-전류(I) 특성은 High Voltage Source-Measure Unit(Keithely 237)을 사용하여 전류밀도 50 mA/cm<sup>2</sup>까지 측정하였다. 바리스터 전압( $V_{1mA}$ )은 전류밀도가 1 mA/cm<sup>2</sup>일 때의 전압으로, 누설 전류( $I_L$ )는 0.80  $V_{1mA}$ 에서 전류로 측정되었으며, 비직선 지수( $\alpha$ )는  $\alpha = 1/\log(V_{10mA}/V_{1mA})$ 의 관계식으로부터 구하였다. 여기서  $V_{1mA}$ 와  $V_{10mA}$ 는 전류밀도 1 mA/cm<sup>2</sup>와 10 mA/cm<sup>2</sup>에 각각 대응되는 전압이다.

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

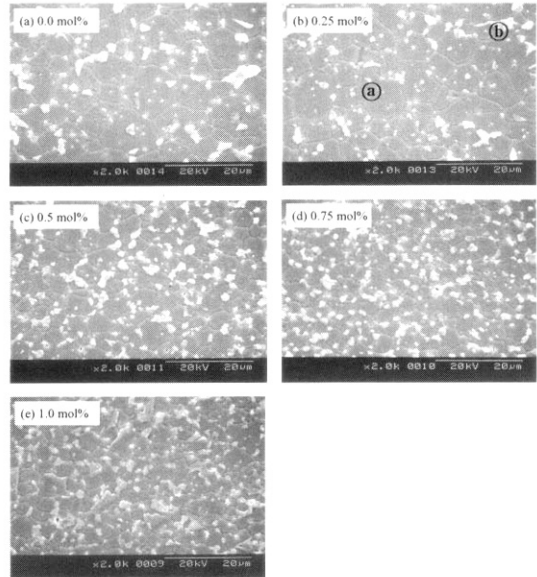


그림 1. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량에 따른 바리스터 세라믹스의 미세구조.

Fig. 1. SEM micrographs of the varistor ceramics for different Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> amounts.

1차 스트레스-0.85V<sub>1mA</sub>/115℃/24h

2차 스트레스-0.90V<sub>1mA</sub>/120℃/24h

3차 스트레스-0.95V<sub>1mA</sub>/125℃/24h

4차 스트레스-0.95V<sub>1mA</sub>/150℃/24h

1차 DC 스트레스가 완료된 다음, 전기적 특성을 측정하였으며, 계속해서 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  $I_L = I_{L0} + K_T \cdot \sqrt{t}$  ( $I_L$ 은 시간 t에서 누설전류,  $I_{L0}$ 는 t = 0에서  $I_L$ )로 계산하였다[16].

## 3. 결과 및 고찰

그림 1은 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량에 따른 바리스터 세라믹스의 표면 미세구조 사진이다. 표면상에는 외견상 ZnO 결정립과 제2상만이 존재하는 것으로 보인다. 제2상은 그림 2에 나타난 회절분석결과 Zn보다 이온반경이 큰 Pr 산화물과 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>이 입계로 편석되어 상을 이룬 것이다. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량이 증가함에 따라 ZnO 결정립은 작아지고, 제2상은 점점 증가하는 것으로 나타났다. 소결밀도는 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨

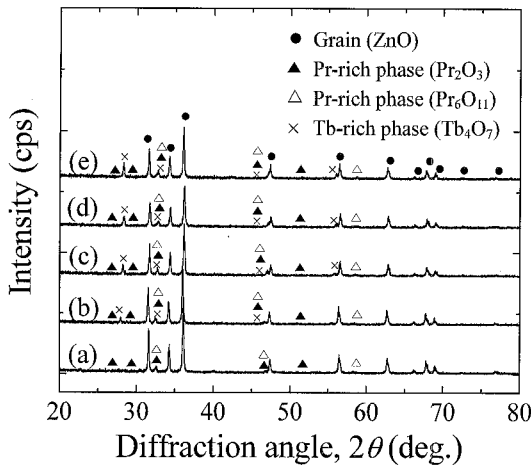


그림 2. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량에 따른 바리스터 세라믹스의 회절분석; (a) 0.0 mol%, (b) 0.25 mol%, (c) 0.5 mol%, (d) 0.75 mol%, (e) 1.0 mol%.

Fig. 2. XRD patterns of the varistor ceramics for different Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> amounts; (a) 0.0 mol%, (b) 0.25 mol%, (c) 0.5 mol%, (d) 0.75 mol%, (e) 1.0 mol%.

표 1. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량에 따른 바리스터의 미세구조 및 V-I 특성 파라미터.

Table 1. Microstructure and V-I characteristic parameters of the varistors for different Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> amounts.

Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub> amount (mol%)	d (μm)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>1mA</sub> (V/mm)	α	I <sub>L</sub> (μA)
0.0	7.7	5.73	280.9	26.4	1.5
0.25	6.8	5.75	368.6	30.0	2.3
0.5	5.8	5.78	512.0	37.4	1.0
0.75	5.0	5.81	641.1	43.5	1.4
1.0	4.8	5.84	715.8	44.4	3.6

가량에 따라 5.73~5.84 g/cm<sup>3</sup>로 증가하였다. 순수 ZnO의 밀도는 5.78 g/cm<sup>3</sup>과 비교하면 소결성이 매우 좋음을 알 수 있다. 평균 결정립 크기(d)는 7.7~4.8 μm 범위로 감소하였다. 전반적으로 기공이 거의 없는 치밀한 미세구조를 나타내었다. 자세한 미세구조 파라미터를 표 1에 요약하였다.

그림 3은 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량에 따른 바리스터의 전계(E)-전류밀도(J) 특성을 나타낸 것이다. 바리스터

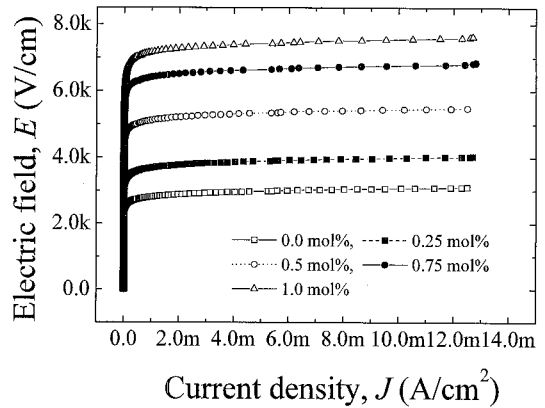


그림 3. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량에 따른 바리스터의 E-J 특성.

Fig. 3. E-J characteristics of the varistors for different Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> amounts.

의 전도특성은 크게 두 영역으로 특성이 나누어짐을 알 수 있다. 두 영역은 바리스터 두 단자에 전압을 인가하면 항복전압 이전까지는 전류가 거의 흐르지 않는 차단영역과 더욱더 전압을 증가시키면 전류가 갑자기 급격히 증가하는 소위 항복영역으로 나타나는데 이 영역이 두드러지게 나타나는 경우가 일차적으로 우수한 바리스터라고 할 수 있다. 선형눈금으로 나타낸 바리스터 특성은 비교적 좋은 특성을 나타내는 것으로 보인다. 상세한 전도특성의 파라미터를 표 1에 나타내었다. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량이 증가함에 따라 항복전압 280.9~715.8 V/mm로 크게 증가하였다. 두께의존성 파라미터인 바리스터 전압이 증가하는 것은 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량의 증가로 평균 결정립 크기가 감소하여 단위 두께에 존재하는 유효입계수가 증가하였기 때문이다. 0.5 mol% 이상 첨가시 1 mm 두께당 500 V를 초과하는 높은 동작전압을 나타내었다. 밀도가 높은 상태에서 바리스터 전압이 높은 것을 얻기란 쉽지 않다. 비선형 계수(α)는 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량이 증가함에 따라 26.4에서 44.4까지 점점 증가하는 경향을 나타내었다. 0.25 mol% 첨가시에는 α가 약하게 증가하였으나 0.5 mol% 첨가시에는 37.4로 10정도 증가하였다. 0.75 mol% 이상 첨가시에는 그 증가율이 둔화되는 것으로 나타났다. 따라서 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>도 다른 희토류 산화물과 같이 비선형성을 향상시키는 첨가제인 것으로 나타났다. 누설전류(I<sub>L</sub>)는 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량이 증가함에 따라 0.0~0.5 mol%까지는 증가와 감소를 순차적으로 하다가 0.5 mol% 이상 첨

표 2. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량에 따른 바리스터의 dc 가속열화 스트레스동안의 누설전류 변화.

Table 2. Leakage current during dc accelerated aging stress of the varistors for different Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> amounts.

Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub> amount (mol%)	Stress state	K <sub>T</sub> (μA·h <sup>-1/2</sup> )	V <sub>1mA</sub> (Vmm <sup>-1</sup> )	%ΔV <sub>1mA</sub>	α	%Δα	I <sub>L</sub> (μA)	%ΔI <sub>L</sub>
0.0	Before	-	280.9	0	26.4	0	1.5	0
	1st	0.4	321.8	14.6	21.0	-20.5	24.8	1553.3
	2nd	0.3	318.2	13.3	18.8	-28.8	20.9	1293.3
	3rd	0.4	318.3	13.3	19.6	-25.8	22.4	1393.3
	4th	-3.0	318.9	13.5	21.0	-20.5	24.7	1546.7
0.25	Before	-	368.6	0	30.0	0	2.3	0
	1st	-0.3	368.7	0.1	29.8	-0.7	2.3	0
	2nd	-1.0	368.6	0	30.2	0.7	2.5	-8.0
	3rd	-4.2	368.0	-0.2	29.7	-1.1	2.7	17.4
	4th	-47.4	368.3	-0.1	29.8	-0.7	2.7	17.4
0.5	Before	-	512.0	0	37.4	0	1.0	0
	1st	-0.5	512.1	0.1	37.2	-0.5	1.1	10.0
	2nd	-1.2	512.0	0	37.1	-0.8	1.2	20.0
	3rd	-6.9	512.1	0.1	37.0	-1.1	1.3	30.0
	4th	Thermal runaway						
0.75	Before	-	641.1	0	43.5	0	1.4	0
	1st	-1.5	641.2	0.1	43.5	0	1.5	7.1
	2nd	-2.6	641.0	-0.1	43.4	-0.2	1.6	14.3
	3rd	Thermal runaway						
1.0	Before	-	715.8	0	44.4	0	3.6	0
	1st	-3.4	716.6	0.1	44.9	1.13	3.1	-14.3
	2nd	Thermal runaway						

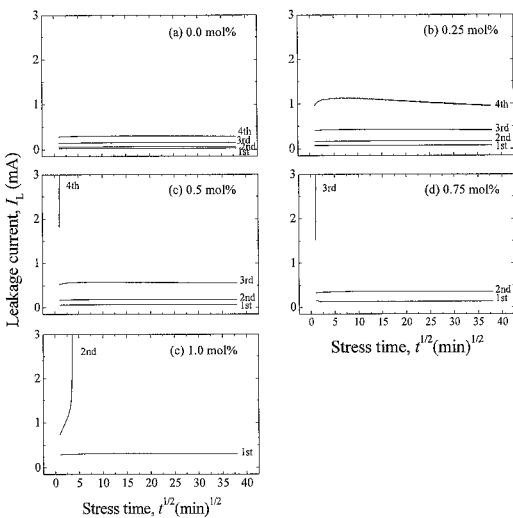


그림 4. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량에 따른 바리스터의 dc 가속열화 스트레스동안의 누설전류 변화.

Fig. 4. Leakage current during dc accelerated aging stress of the varistors for different Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> amounts.

가에서는 점점 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 비선형 계수가 증가하면 누설전류는 감소하나 이 경우에는 반대 결과를 나타내었다. 비선형 계수가 증가하면 누설전류가 감소하는 경우는 전도 메카니즘에서 하나의 장벽에 대해서 열전자 방출 전류에 준하는 것이다. 전류 흐름에서 입계에서 재결합 전류가 증가하면 비선형 계수가 크다고 하더라도 누설전류가 증가할 수 있다. 이러한 현상은 종종 나타나기도 한다.

그림 4는 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량에 따른 바리스터의 DC 가속열화 스트레스 동안의 누설전류를 나타낸 것이다. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>이 첨가되지 않은 바리스터의 경우 1차에서 4차까지 스트레스 시간에 따라 거의 일정하게 전류가 흐름을 알 수 있다. 이와 같은 경우는 스트레스 내성이 강하거나, 아니면 마치 노화가 진행되어 비선형성이 다소 떨어지는 경우인데 어느 경우인지는 스트레스 후에 특성의 변화를 통해서 알 수 있다. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>이 0.25 mol% 첨가된 바리스터는 3차 스트레스까지는 누설전류가 거의 일정하다가 4차 스트레스에서는 스트레스 시간에 따라 누설전류가 감소하는 현저한 네거티브 크리프 특성

표 3. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량에 따른 바리스터의 유전 손실.

Table 3. Dissipation factor(tanδ) of the varistors for different Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> amounts.

	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub> amount (mol%)				
	0.0	0.25	0.5	0.75	1.0
tanδ	0.0854	0.0710	0.0740	0.0951	0.1301

( $K_T = -47.4 \mu A \cdot h^{-1/2}$ )을 나타내었다. 네거티브 크리프 현상은 어떤 조건에서 전류의 발진현상이 과도하게 일어나다가 안정화되어 가는 과정에서 일어나는 것으로 바리스터 조성과 스트레스 조건에 따라 일어날 수가 있다. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>이 0.5 mol% 첨가된 바리스터는 4차 스트레스에서, 0.75 mol% 첨가된 경우는 3차 스트레스에서, 1.0 mol% 첨가된 경우는 2차 스트레스에서 열폭주(thermal runaway) 현상을 나타내었다. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>첨가량이 증가함에 따라 보다 가혹한 스트레스에서 안정성이 점점 떨어짐을 알 수 있다. 안정성에 영향을 주는 인자는 여러 가지 있을 수 있겠지만 그 중에서도 소결밀도, 누설전류가 크게 영향을 미치며, 다음으로 유전손실, 제2상의 분포 등을 들 수가 있다. 소결밀도가 높을수록, 누설전류가 작을수록 안정성은 높아진다. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>가 0.5 mol% 이상 첨가된 바리스터에서 알 수 있는 바와 같이 전반적으로 소결밀도가 이론밀도 이상이고, 누설전류도 낮아 높은 안정성을 보일 것으로 예상되었지만 결과는 다르게 나타났다. 그렇다면 미세구조의 제2상과 유전손실이 안정성이 영향을 미친 것으로 판단된다. 앞에서 언급한 바와 같이 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>의 첨가량이 증가함에 따라 제2상이 증가하였다. 이것은 전류가 흐를 수 있는 입계의 유효면적을 감소시킴으로서 입계의 단위면적당 전류를 증가시켜 안정성이 점점 낮아지는 것으로 판단된다. 또 한가지 가능성은 표 3에 나타낸 바와 같이 유전손실(tanδ)과의 관계이다. tanδ는 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>가 0.25 mol%일 때 최소치를 나타내고 첨가량이 증가함으로써 점점 증가하였다. 이렇게 볼 때 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>의 첨가량이 증가함에 따라 바리스터의 안정성이 떨어지는 원인은 제2상의 증가와 tanδ의 증가 때문인 것으로 사료된다. 스트레스 후의 전기적 특성 파라미터의 변화를 표 3에 요약하여 나타내었다.

Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>가 첨가되지 않은 바리스터는 4차 스트레스 후의 바리스터 전압 변화율(%ΔV<sub>1mA</sub>)은 +13.5%, 비선형 계수의 변화율(%Δα)은 -20.5%, 누설전류 변화율(%ΔI<sub>L</sub>)은 +1546.7%로서 그 변화 정도는 매우 큰 것으로 나타났다. 그러나 1차 스트레스 이후부터 바리스터가 안정화되어 1차 스트레스부터 4차 스트레스까지의 파라미터 변화율을 보면 1차 스트레스 후의 파라미터 변화율이 그대로 4차 스트레스 후까지 이어 졌으며, 스트레스 후의 누설전류가 거의 20 μA인 것으로 보아 1차 스트레스 후에 이미 노화가 어느 정도 진행된 바리스터가 아닌가 판단된다. 0.5~1.0 mol% 범위에서는 열폭주가 일어나기 전까지의 파라미터 변화율은 대체로 낮게 나타났으며, 열폭주가 일어나기 전까지는 모두 네거티브 크리프 현상을 나타내었다. 0.5 mol%의 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>이 첨가된 바리스터도 3차까지는 높은 안정성을 보였다. 3차에 해당하는 스트레스 조건이 결코 약한 것이 아니라는 사실에 주목해야 할 것이다. 한편 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>가 0.25 mol% 첨가된 바리스터는 %ΔV<sub>1mA</sub>이 -0.1%, %Δα는 -0.7%, %ΔI<sub>L</sub>은 +17.4%로 아주 높은 안정성을 나타내었다. 따라서 높은 비선형성과 안정성을 갖는 바리스터를 제조하기 위해서는 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 첨가량이 근사적으로 0.25~0.5 mol% 범위에서 찾을 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-CoO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계로 구성된 바리스터의 전기적 성질 및 안정성에 Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>가 미치는 영향을 조사하였다. Tb<sub>4</sub>O<sub>11</sub>의 첨가량이 증가함에 따라 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소결밀도는 5.73~5.84 g/cm<sup>3</sup> 범위로 증가하였으며, 평균 결정립 크기는 7.7~4.8 범위로 감소하였다.
2. 평균 결정립 크기는 7.7~4.8 μm 범위로 감소하였다.
3. 바리스터 전압은 280.9~715.8 V/mm범위로 증가하였다.
4. 비선형 계수는 26.4~44.4 범위로 증가하였다.
5. 안정성은 0.25 mol%를 기준으로 감소하였다.
6. 비선형성이 가장 우수한 0.25 mol% 첨가된 바리스터는 소정의 DC 가속열화 시험(0.95V<sub>1mA</sub>/15 0°C/24h)에서 바리스터 전압 변화율이 -0.1%, 비선형 계수 변화율이 -0.7%, 누설전류 변화율이 +17.4%로 높은 안정성을 나타내었다.

## 참고 문헌

- [1] L. M. Levinson and H. R. Pilipp, "Zinc oxide varistor-A review", Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 65, No. 4, p. 639, 1986.
- [2] T. K. Gupta, "Application of zinc oxide varistor", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, No. 7, p. 1817, 1990.
- [3] D. R. Clarke, "Varistors ceramics", J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 82, No. 3, p. 485, 1999.
- [4] M. S. Castro and C. M. Aldao, "Characterization of SnO<sub>2</sub>-varistors with different additives", J. Europ. Ceram. Soc., Vol. 18, No. 14, p. 2233, 1998.
- [5] V. O. Makarov and M. Trontelj, "Sintering and electrical conductivity of doped WO<sub>3</sub>", J. Europ. Ceram. Soc., Vol. 16, No. 7, p. 791, 1996.
- [6] K. Mukae, K. Tsuda, and I. Nagasawa, "Nonohmic properties of ZnO-rare earth metal oxide Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 16, No. 8, p. 1361, 1977.
- [7] J.-K. Tsai and T.-B. Wu, "Non-ohmic characteristics of ZnO-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ceramics", J. Mater. Sci., J. Appl. Phys., Vol. 76, No. 8, p. 4817, 1994.
- [8] C.-W. Nahm, "ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-CoO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based-ceramic varistors with high stability of nonlinear properties", J. Mater. Sci. Lett., Vol. 21, No. 3, p. 201, 2002.
- [9] 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.
- [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, 류정선, 김향숙, 정영철, "Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>계 ZnO 바리스터의 DC 가속열화특성", 전기전자재료학회논문지, 14권, 10호, p. 808, 2001.
- [12] 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.
- [13] C.-W. Nahm and B.-C. Shin, "Effect of sintering time on electrical properties and stability against DC accelerated aging of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped ZnO-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-based varistor ceramics", Ceram. Internation., Vol. 30, No. 1, p. 9, 2004.
- [14] C.-W. Nahm and B.-C. Shin, "Effect of sintering time on electrical characteristics and DC accelerated aging behaviors of Zn-Pr-Co-Cr-Dy oxide-based varistors", J. Mater. Sci.: Mater. Electron., Vol. 16, No. 11, 2005.
- [15] J. C. Wurst and J. A. Nelson, "Lineal intercept technique for measuring grain size in two-phase polycrystalline ceramics", J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 97, No. 12, p. 109, 1972.
- [16] J. Fan and R. Freer, "Deep level transient spectroscopy of zinc oxide varistors doped with aluminum oxide and/or silver oxide", J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 77, No. 10, p. 2663, 1994.