

Pr-첨가 ZnO 바리스터의 전기적 특성

곽민환 · 이상기 · 조성걸

경상대학교 공과대학 전자재료공학과, 첨단소재연구소
(1997년 11월 4일 접수)

Electrical Properties of Pr-doped ZnO Varistors

Min Hwan Kwak, Sang Ki Lee and Sung Gurl Cho

Dept. of Electronic Materials Eng. and Advanced Materials Research Institute,
Gyeongsang National University
(Received November 4, 1997)

요 약

ZnO-Co₃O₄-Pr₆O₁₁계 ZnO 바리스터에서 Co₃O₄의 첨가량을 5.0 원자%로 고정하고 Pr₆O₁₁의 첨가량을 0.1 원자%에서 1.0 원자%로 증가시키며 1300°C와 1350°C에서 시편을 소결 하였다. Pr 첨가량의 변화와 소결온도의 차이에 따른 I-V 특성을 조사하였으며, 이로부터 비선형계수를 구하여 비교하였다. 일반적으로 1300°C에서 소결한 시편이 1350°C에서 소결한 시편보다 좋은 바리스터 특성을 보였으며, 이는 소성온도에서 액상의 형성과 관련이 있는 것으로 생각된다. C-V 특성으로부터 구한 전위장벽의 높이는 0.29-1.36 eV로 저전압영역에서 저항률-온도 곡선으로부터 구한 값(0.69-0.95 eV)과 차이를 보이고 있으나, Pr 첨가량의 변화 및 입체당 항복전압에 대하여 일관적인 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 실험에서 준비한 시편의 경우 C-V 특성으로부터 전위장벽을 구하는 것이 적절하다고 판단되며, 이를 이용하여 구한 전하운반자의 밀도는 $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이었다.

ABSTRACT

ZnO varistors containing 5.0 at% Co₃O₄ and Pr₆O₁₁, ranging from 0.1 to 1.0 at%, were sintered at 1300°C and 1350°C. The I-V characteristics and nonlinear coefficients of the specimens were investigated with respect to Pr addition and sintering temperature. In general the specimens sintered at 1300°C showed better varistor characteristic than those fired at 1350°C, which seemed to be related with the liquid phase formation during sintering. The barrier heights obtained from C-V relations, 0.29-1.36 eV, were different from those acquired using resistivity-temperature plots measured at low voltage range, 0.69-0.95 eV. However, a consistent trend was observed with respect to Pr addition and breakdown voltage per grain boundary. Therefore the estimation of potential barrier heights using C-V relations is better suited for the specimens prepared in this study. The carrier densities obtained using C-V relations were $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Key words : Pr, ZnO, Varistor, Electrical properties, Potential barrier height

1. 서 론

ZnO 바리스터는 다결정질 세라믹으로 ZnO에 소량의 Bi₂O₃, Pr₆O₁₁, Sb₂O₃, Co₃O₄, Cr₂O₃ 등의 산화물을 첨가하여 제조된다. ZnO 바리스터는 n형 반도체 ZnO결정립과 높은 저항을 가진 입계에서 나타나는 이중 Schottky 장벽에 의한 비선형적 전류-전압 성질을 이용한 소자이다. ZnO 바리스터는 첨가물의 조성과 제조 방법에 따라 작은 용량의 회로 보호용에서 피뢰기에 이르기까지 넓은 범위에서 surge 흡수 소자로 이용되고 있다.^{1,5)}

ZnO 바리스터가 발표된 이후 지금까지 많은 연구자

들에 의해 미세구조, 전도기구, 첨가물들의 역할 등이 연구되어 왔으나 이는 대부분 산화비스머스를 첨가물로 함유하고 있는 바리스터에 편중되어 있다. 산화비스머스 외에 ZnO가 바리스터 특성을 가지게 하는 물질로 희토류 금속 산화물들을 들 수가 있는데 그 중에서 프라세오디미움은 비스머스에 버금가는 좋은 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. Bi-ZnO 바리스터는 ZnO 입자, intergranular layer, spinel입자 등으로 된 복잡한 미세구조를 가지고 있으나 Pr-ZnO 바리스터는 ZnO 입자와 intergranular layer의 2가지 상으로 이루어져 있다. Bi-ZnO 바리스터는 복잡한 미세구조와 전기적인

특성에 영향을 미치지 못하는 높은 전기저항의 spinel을 함유하고 있는 반면, Pr-ZnO 바리스터는 미세구조가 간단하여 Bi-ZnO 바리스터보다 효율성과 안정성에서 좋은 특성을 가지고 있다.^{6,7)} 그럼에도 불구하고 Pr-ZnO 바리스터에 대한 연구는 미미한 상태이고 발표되는 연구들도 미세구조나 소결 특성에 관한 것이 대부분이다.

본 연구에서는 Co_3O_4 첨가량을 5.0 원자%로 고정하고 Pr 첨가량을 조절한 $\text{ZnO-Co}_3\text{O}_4\text{-Pr}_6\text{O}_{11}$ 시편을 제조하여, Pr첨가량이 바리스터의 전류-전압 특성, 전위장벽 및 전하운반자의 밀도에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 소결 온도의 변화에 따른 미세구조와 전기적 특성의 변화를 액상형성 전후의 온도를 선정하여 비교 분석하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 준비한 시편의 화학 조성은 ZnO에 Co_3O_4 양을 5.0 원자%로 고정하여 첨가하고 Pr_6O_{11} 을 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 및 1.0 원자% 첨가한 것이다. 94.0 원자% 이상을 차지하는 ZnO 양의 변화는 특성에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단하여 조성을 결정하였고, 결과 해석에서도 ZnO 양에 의한 효과는 무시하였다.

미국 Aldrich사의 A.C.S급 시약을 정해진 조성에 따라 칭량한 후 플라스틱 병에 메탄올과 지르코니아 불을 넣어 24시간 불밀을 행하였고, 110°C 에서 12시간 건조하였다. 건조된 분말을 막자사발을 이용하여 분쇄 후 750°C 에서 2시간 하소하였다. 하소한 분말을 메탄올과

지르코니아 불을 사용하여 24시간 불밀하고 325번 체로 걸러서 건조한 다음, 분말을 지름 14 mm, 두께 1 mm의 디스크 형태로 가압성형하고 소결하였다. 소결은 1300°C 와 1350°C 에서 1시간 행하였으며, 승온속도는 650°C 까지 분당 3°C , 소결온도까지는 분당 5°C 로 하였고 650°C 에서 1시간 유지하여 바인더를 소각하였다.

소결 시편의 치밀화를 조사하기 위하여 아르키메데스 법으로 밀도를 측정하였고, 연마한 시편의 과단면을 열에 칭한 다음 주사전자현미경(JEOL JSM-6400, 동경, 일본)을 이용하여 미세구조를 관찰하였다. 결정상은 XRD분석(Rigaku Miniflex, 동경, 일본)으로 확인하였으며, 시편의 평균 입자크기는 linear intercept법을 이용하여 측정하였다. 전기적 특성조사를 위하여 시편의 양면을 연마하고 In-Ga 합금을 문질러 전극을 형성하였다. 전류-전압 특성은 I-V meter(237 Source Measure Unit, Keithley Instruments, Inc., Cleveland, USA)를 이용하여 측정하였고, C-V 특성은 LCR meter(Video Bridge 2150, Electro Scientific Industries, Inc., Portland, USA)와 온도챔버(Delta 9023, Delta Design, San Diego, USA)를 이용하여 $40\text{-}150^\circ\text{C}$ 온도범위에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

소결 시편의 밀도를 측정된 결과는 $5.60\text{-}5.62\text{ g/cm}^3$ 으로 준비한 모든 시편들에서 치밀한 소결이 이루어졌다. 1300°C 와 1350°C 에서 소결한 시편의 미세구조는 각각 Fig. 1, Fig. 2와 같다. ZnO 결정립의 크기는 1300°C

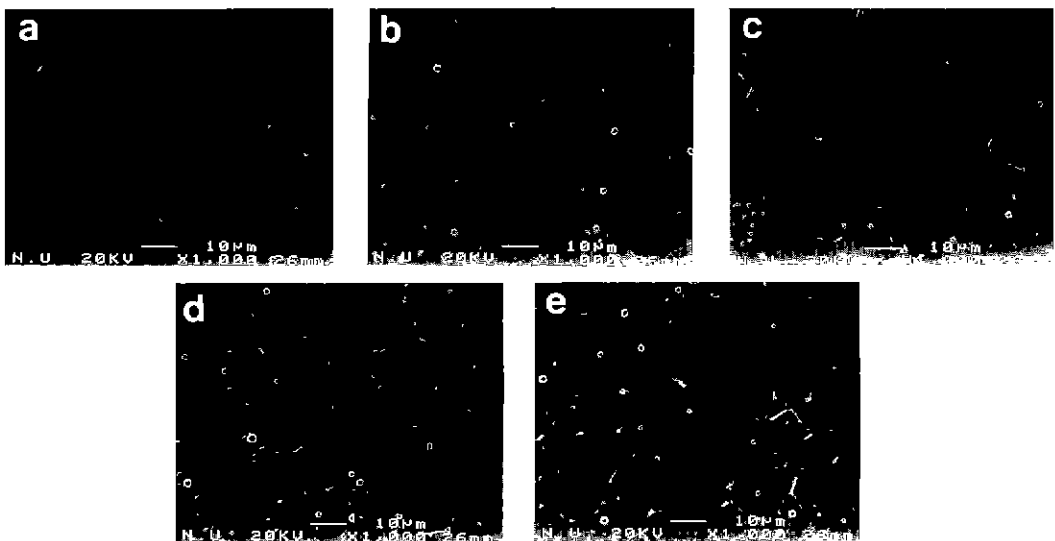


Fig. 1. SEM micrographs of ZnO specimens sintered at 1300°C for 1h which contain 5at% Co_3O_4 and (a) 0.1at% Pr_6O_{11} , (b) 0.3at% Pr_6O_{11} , (c) 0.5at% Pr_6O_{11} , (d) 0.7at% Pr_6O_{11} and (e) 1.0at% Pr_6O_{11} .

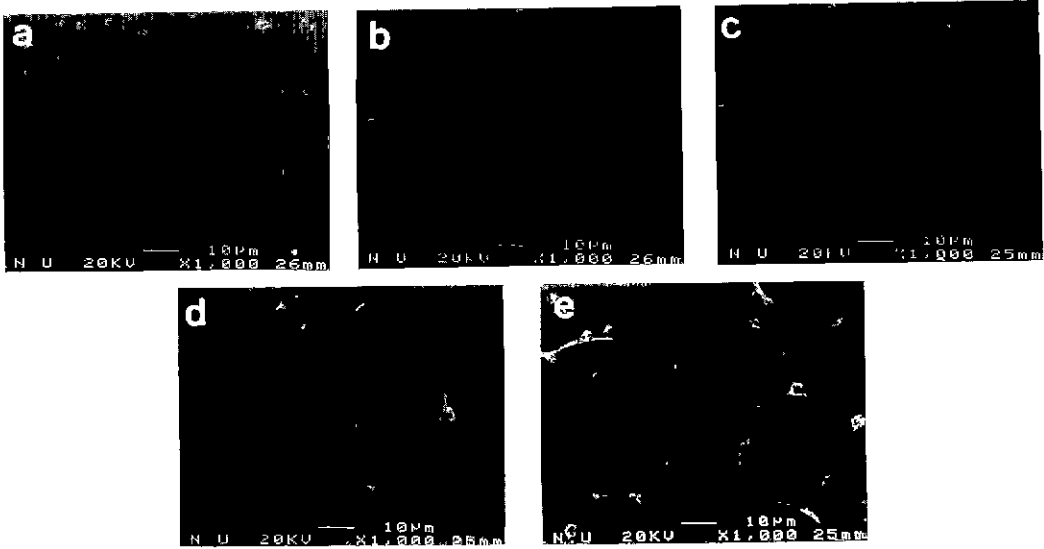


Fig. 2. SEM micrographs of ZnO specimens sintered at 1350°C for 1h which contain 5at% Co_3O_4 and (a) 0.1at% Pr_6O_{11} , (b) 0.3at% Pr_6O_{11} , (c) 0.5at% Pr_6O_{11} , (d) 0.7at% Pr_6O_{11} and (e) 1.0at% Pr_6O_{11} .

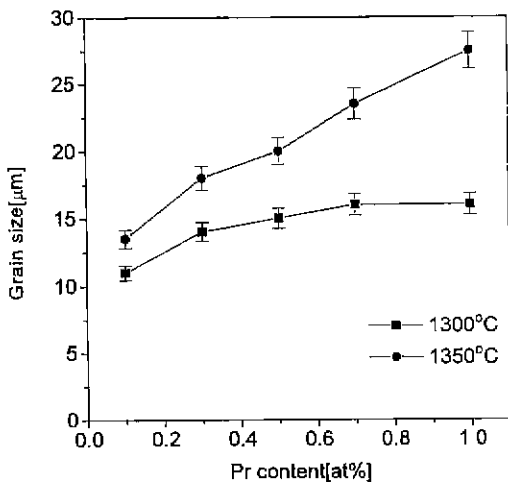


Fig. 3. Average grain size of ZnO specimens with 5.0 at% Co_3O_4 as a function of Pr_6O_{11} content.

에서 소결한 경우 11-16 μm 로 Pr의 함량의 증가에 따라 ZnO 결정립의 크기가 미미하게 증가하였고, 1350°C 소결 시편은 14~28 μm 로 Pr의 함량에 따라 결정립 크기의 증가가 두드러지게 나타났다(Fig. 3 참조).

Alles 등⁹⁾에 의하면 $\text{ZnO-Co}_3\text{O}_4\text{-Pr}_6\text{O}_{11}$ 조성에서 액상 형성온도는 Co_3O_4 와 Pr_6O_{11} 의 첨가 비율이 1/50에서는 1280°C에서 액상이 형성되고, 1/20일 때는 1320°C, 1/4이상에서는 1350°C에서 액상이 형성된다고 보고하였다. 본 실험에서는 Pr_6O_{11} 과 Co_3O_4 가 각각 1/50, 1/17, 1/10, 1/7, 1/5의 비로 첨가되었으므로, Pr 0.1원자% 첨

가 시편(1/50) 이외의 모든 시편들은 1300°C이상의 액상형성 온도를 갖는 조성비율이다. 그러나 본 실험에서 준비한 1300°C 소결 시편 모두에서 액상형성의 흔적을 발견할 수 없었고 결정립의 크기 변화도 크지 않은 것으로 미루어 1300°C에서는 고상소결만이 일어난 것으로 판단된다. 1350°C에서는 액상 형성이 상당히 활발함을 보이고 이것이 결정 성장에 영향을 미쳐 결정립의 크기가 증가한다고 알려져 있다. 본 실험에서도 Fig. 2에서 보는 바와 같이 1350°C에서는 활발한 액상형성이 이루어 졌으며, Pr첨가량의 증가에 따라 결정립의 성장이 관찰되었다.

1300°C와 1350°C에서 소결한 시편의 전류-전압 특성을 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 약 10^3A/cm^2 부터 항복영역이 되면서 높은 비선형 특성이 나타났다. ZnO 바리스터의 중요한 전기적 특성은 전류-전압의 비선형성인데 이는 결정립의 전도전자의 농도와 입계에서의 전위 장벽에 의해 큰 영향을 받는다. 비선형성은 전류-전압 곡선에서 다음과 같은 근사식으로 구할 수 있다.

$$I = (V/C)^\alpha \quad (1)$$

여기서 α 는 비선형 계수, C는 재료의 상수, I는 전류, V는 전압이다. 주어진 근사식에 의해서 계산한 비선형 계수를 Table 1에 나타내었다. 저전류 선형영역에서는 소결온도, 첨가물의 양에 상관없이 ohmic 특성을 보이고 있고, 저전류 선형영역부터 항복전압 이전인 10^5A/cm^2 에서 10^3A/cm^2 의 영역에서는 서서히 바리스터 특성이 나타난다. 실제 바리스터 동작영역인 10^3A/cm^2 (항복전

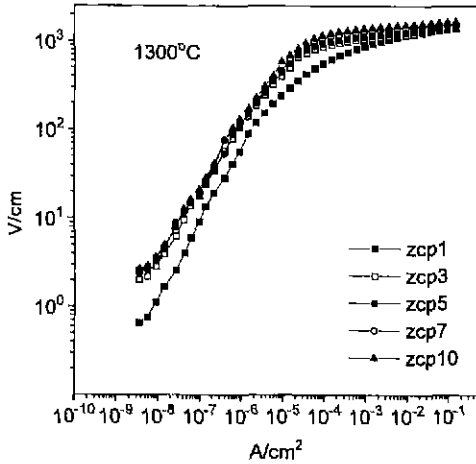


Fig. 4. I-V curves of ZnO specimens sintered at 1300°C for 1h that contain 5at% Co₃O₄ and Pr₆O₁₁ varying from 0.1at% to 1.0at%.

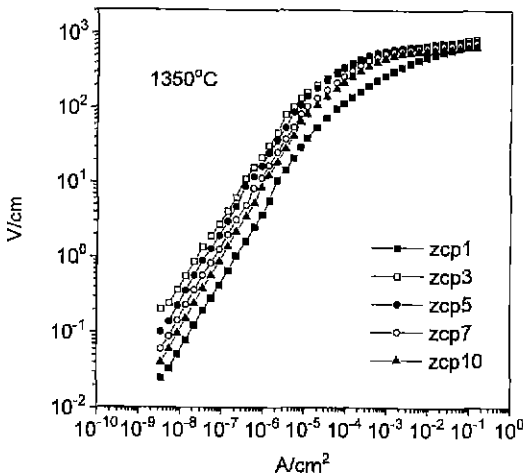


Fig. 5. I-V curves of ZnO specimens sintered at 1350°C for 1h that contain 5at% Co₃O₄ and Pr₆O₁₁ varying from 0.1at% to 1.0at%.

압) 이상의 전류가 흐르는 영역에서 1300°C 소결 시편은 Pr의 첨가량에 따라 비선형 특성이 13.1부터 28.8까지 점차로 증가함을 보이고 있으나, 1350°C 소결 시편에서는 이와 달리 0.5원자%의 Pr을 첨가한 시편이 가장 높은 22의 비선형계수를 보이고 있다. 이는 소결온도에 따른 액상의 형성이 비선형 특성을 낮추는 결과를 가지고 온 것으로 판단된다. 전체적으로는 1300°C 소결 시편들이 1350°C 소결 시편에 비해 좋은 바리스터 특성을 가지고 있는 것으로 나타났는데 이는 다른 연구자⁷⁾의 연구결과와도 일치한다.

10⁻³A/cm²의 전류밀도에서 측정된 전압을 평균 결정립의 크기로 나누어 계산한 시편의 입계당 항복전압을

Table 1. Nonlinear Coefficients and Breakdown Voltage per Grain Boundary for ZnO Varistors

Samples	1300°C		1350°C	
	α*	E _b ** (V)	α*	E _b ** (V)
ZCP1	13.1	0.97	6.6	0.37
ZCP3	17.7	1.49	14.8	1.02
ZCP5	22.0	1.71	22.0	1.16
ZCP6	26.5	2.00	19.9	1.27
ZCP10	28.8	2.24	21.5	1.26

*Nonlinear coefficient (α): Measured at 10⁻³~10⁻¹A/cm².

**Breakdown voltage per grain boundary (E_b): Measured at 10⁻³A/cm².

Table 1에 기록하였다. 고상소결만이 일어난 1300°C 시편의 경우 항복전압은 Pr량의 증가에 따라 0.97V부터 2.24V까지 증가하였다. 액상소결이 일어난 1350°C 시편에서도 대체로 Pr량의 증가에 따라 항복전압이 증가함을 보이고 있다. 이 결과는 Bi₂O₃ 첨가 ZnO와 달리 Pr 첨가 ZnO의 경우 입계당 항복전압이 조성에 상당히 의존하고 있음을 보여주고 있다. 또한 Table 1의 결과에서 보는 것처럼 지금까지 여러 연구자들에 의해 보고된 ZnO-Bi₂O₃에 Sb₂O₃, CoO, 또는 MnO등의 산화물을 첨가한 3성분계 바리스터의 비선형 특성과 비교할 때 ZnO-Pr₆O₁₁-Co₃O₄계가 더 나은 바리스터 특성을 보임을 알 수 있다.^{3,10)}

Mukae 등¹¹⁾은 금속-반도체 접합에서의 C-V 관계를 이용하여 전위장벽과 도너의 농도를 구하는 식에서 이중 Schottky장벽의 순방향 바이어스 되는 쪽의 C-V 관계를 고려한 식 (2)와 (3)을 이용하여 전위장벽과 도너 농도를 구하였다.

$$\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{2C_0} \right)^2 = \frac{2}{qeN_d} (\phi_b + V) \tag{2}$$

$$\frac{1}{C_0} = 2 \left(2 \frac{\phi_b}{qeN_d} \right)^{1/2} \tag{3}$$

여기서 C는 입계의 면적당 정전용량, C₀는 V=0 때의 정전용량, q는 전자의 전하량, ε는 ZnO의 유전율 (8.5ε₀), N_d는 ZnO 결정립의 도너농도, φ_b는 전위장벽, V는 인가 전압이다. 그런데 상기 식은 금속-반도체의 접합에 대하여 유도된 식으로 반도체의 도너준위가 상온에서 모두 이온화된다는 가정을 두고 있다. 그러나 ZnO 바리스터의 경우 얇은 도너 말고도 깊은 도너준위들이 존재하고 있으므로 N_d를 전하운반자의 밀도로 표현하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 전압에 따른 정전용량을 측정하

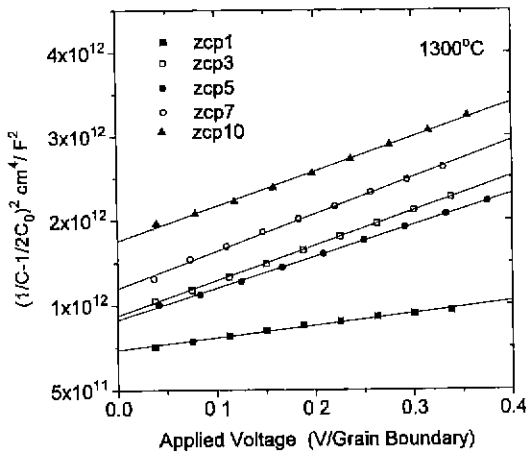


Fig. 6. $(1/C-1/2C_0)^2$ vs applied voltage curves for ZnO specimens sintered at 1300°C for 1h that contain 5at% Co_3O_4 and Pr_6O_{11} varying from 0.1 at% to 1.0at%.

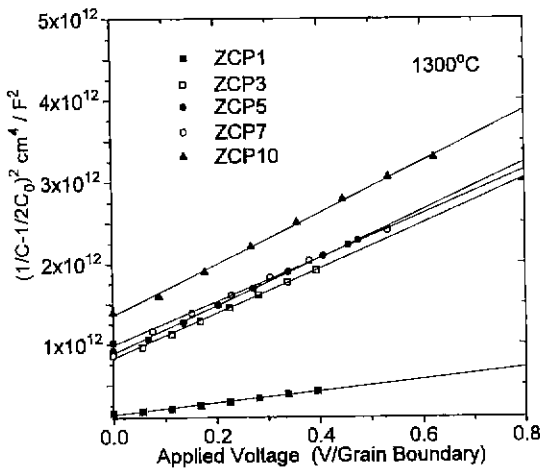


Fig. 7. $(1/C-1/2C_0)^2$ vs applied voltage curves for ZnO specimens sintered at 1350°C for 1h that contain 5at% Co_3O_4 and Pr_6O_{11} varying from 0.1at% to 1.0at%.

고 식 (2)를 이용하여 $(1/C-1/2C_0)^2$ 과 인가전압 사이의 그래프를 Fig. 6(1300°C 소결시편) 및 Fig. 7(1350°C 소결시편)과 같이 구하였다. 이 그래프에서 기울기인 $2/qeN_d$ 의 값으로부터 도너의 농도를 구하고 여기에서 구한 값을 식 (3)에 대입하여 전위장벽의 높이를 계산하여 Table 2에 나타내었다. 도너의 농도는 $\sim 10^{18}$ 정도로 나타났는데 이는 다른 연구자들의 결과^{7,12)}와 일치하고 있다. 1300°C 소결 시편에서는 전위장벽의 높이가 0.67 eV부터 1.36 eV의 범위를 보이는데 Pr첨가량이 0.1원자%인 시편을 제외하고는 Pr의 첨가량의 증가에 따라 전위장벽의

Table 2. Carrier Densities and Barrier Heights of ZnO Varistors Estimated from C-V Plots.

Sample	1300°C		1350°C	
	Carrier density (cm^{-3})	Barrier height (eV)	Carrier density (cm^{-3})	Barrier height (eV)
ZCP1	1.16×10^{19}	1.36	2.09×10^{18}	0.29
ZCP3	4.05×10^{18}	0.67	5.69×10^{18}	0.55
ZCP5	4.48×10^{18}	0.72	5.53×10^{18}	0.58
ZCP7	3.80×10^{18}	0.78	5.72×10^{18}	0.67
ZCP10	4.04×10^{18}	1.09	4.96×10^{18}	0.78

높이가 점차로 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 Table 1에 나와있는 입계당 항복전압의 경향과도 잘 일치하고 있다. 1350°C 소결 시편에서는 전위장벽의 높이가 0.29 eV부터 0.78 eV까지 Pr량의 증가에 따라 증가하고 있으며 Table 1의 입계당 항복전압과도 비교적 일치하고 있다. 따라서 상기 결과들을 종합하면 같은 조성을 가진 경우 고상소결만이 이루어진 시편들은 액상소결이 이루어진 시편들에 비해 높은 전위장벽과 입계당 항복전압을 가지며 비선형 특성도 나타났다. 전도전자의 밀도는 계산과정에서 유입되는 오차를 고려할 때 차이가 없는 것으로 판단된다. 또한 고상소결에 의한 시편들은 Pr 첨가량의 증가에 따라 전위장벽이 높아지고 입계당 항복전압이 커지며 비선형 특성이 향상되는 경향을 보였고, 액상소결에 의한 시편들에서는 전위장벽과 입계당 항복전압은 유사한 경향을 보이거나 비선형 특성과의 연관성은 높지 않았다. Pr 첨가량이 0.1 원자%인 시편은 1300°C 소결의 경우 가장 높은 전위장벽(1.36 eV)이 얻어졌고, 1350°C 소결의 경우 가장 작은 전위장벽(0.29 eV)이 얻어졌으며, 전류-전압 특성도 다른 시편들과 매우 특이한 경향을 보이고 있다. 본 저자들은 적절한 원인을 현재 파악하지 못하고 있으나, 여러 번의 시편준비를 통해 확인된 결과로 실험적 오류에 의해 나타난 결과는 아니다.

ZnO 바리스터의 전류-전압 특성은 저전류 선형영역($\sim 10^{-3}$ A/cm²), 비선형 영역(10^{-3} ~1 A/cm²), 고전류 upturn 영역으로 나누어지며, 저전류 선형 영역에서는 ohmic 특성을 가지는데 이때 흐르는 전류는 hopping 전도기구를 따르므로 Miyoshi 등¹³⁾은 식 (4)를 이용하여 전위장벽을 계산하였다.

$$\rho = \rho_0 \exp(\phi_b/kT) \quad (4)$$

여기서 ρ 는 시편의 저항률, ρ_0 는 상수, ϕ_b 는 전위장벽 높이, k 는 Boltzmann 상수, T 는 절대온도이다. Miyoshi 등¹³⁾은 이렇게 계산한 ϕ_b 에 저항률은 시편에 InA의 전류를 흘릴 때 시편에 걸리는 전압을 측정하여 구하였고, 식 (3)을 이용하여 저항률의 log 값과 온도의 역수

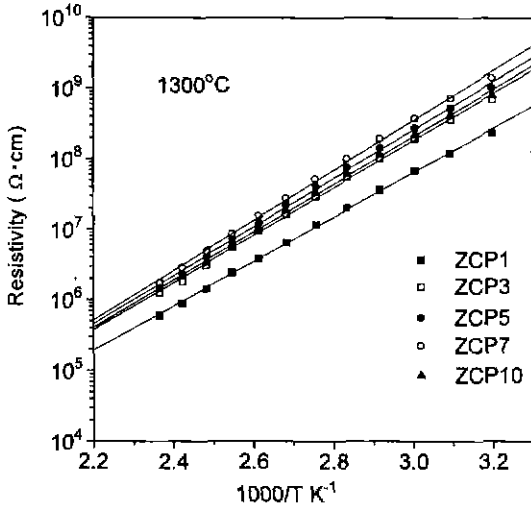


Fig. 8. Resistivity vs 1000/T curves for ZnO specimens sintered at 1300°C for 1h that contain 5at% Co_3O_4 and Pr_6O_{11} varying from 0.1at% to 1.0at%.

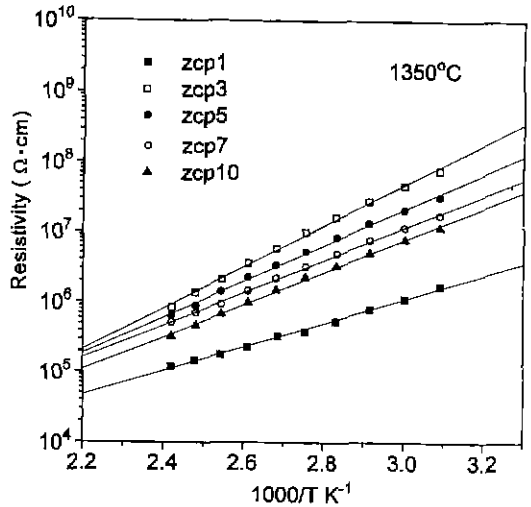


Fig. 9. Resistivity vs 1000/T curves for ZnO specimens sintered at 1350°C for 1h that contain 5at% Co_3O_4 and Pr_6O_{11} varying from 0.1at% to 1.0at%.

그래프를 Fig. 8(1300°C 소결시편) 및 Fig. 9(1350°C 소결시편)에 나타내었다. 이 그래프에서 $\log(\text{저항률})$ 과 온도의 역수는 직선성을 보이고 있으며, 저전류 선형영역에서 이 시편이 (3)의 식을 만족함을 보여준다. 이 그래프에서 전위장벽의 높이는 기울기에 비례한다. Table 3에 나타난 것처럼 1300°C 소결 시편은 0.87-0.95 eV, 1350°C 소결 시편은 0.58-0.82 eV의 전위장벽이 구해졌

Table 3. Barrier Heights of ZnO Varistors Estimated from p-T Plots.

Samples	1300°C (eV)	1350°C (eV)
ZCP1	0.87	0.58
ZCP3	0.91	0.82
ZCP5	0.93	0.74
ZCP7	0.65	0.69
ZCP10	0.92	0.69

다. 비선형 특성이 보다 나은 1300°C 소결 시편의 경우 Pr 첨가량에 따라 전위장벽이 증가하는 경향을 보이나, 바리스터 특성이 가장 좋은 Pr 함량 1.0원자%의 시편에서는 Pr 첨가량 증가에 대해 오히려 낮은 0.92 eV의 값을 보이고 있다. 1350°C 소결 시편에서는 Pr 함량 0.3원자%부터는 전위장벽이 오히려 낮아지는 특성을 보였다. 저항률과 온도의 관계에서 구한 바리스터의 전위장벽의 높이는 정전용량-인가전압의 그래프에서 구한 전위장벽의 높이와 상당한 차이가 있으며, 시편의 전류-전압 특성 및 입계당 항복전압 등과 첨가물의 함량등 실험적인 변화 조건과의 관련성을 발견할 수 없었다.

4. 결 론

ZnO- Co_3O_4 - Pr_6O_{11} 계 ZnO 바리스터에서 Co_3O_4 의 첨가량을 5.0 원자%로 고정하고 Pr_6O_{11} 의 첨가량을 0.1 원자%에서 1.0 원자%로 증가시키며, 1300°C 및 1350°C에서 시편을 소결 하였다. 1350°C에서는 액상소결이 일어났으며, Pr의 첨가량이 증가함에 따라 결정립의 크기도 증가하였다. 고상소결만이 이루어진 시편에서는 Pr 첨가량의 증가에 따라 전위장벽이 높아지고(0.67-1.09 eV), 입계당 항복전압이 커지며(1.49-2.24 V), 비선형계수가 증가하는(18-29) 결과를 얻었다. 액상소결이 이루어진 시편에서도 Pr 첨가량 증가에 따라 전위장벽이 높아졌고 (0.55-0.78 eV), 입계당 항복전압이 증가하였으나(1.02-1.26 V), 전위장벽과 비선형 특성은 정확히 일치하지 않았다. Pr 첨가량이 0.1원자%인 조성을 제외하면, 같은 조성에서 고상소결만이 이루어진 시편이 액상소결이 이루어진 시편에 비해 높은 전위장벽과 입계당 항복전압을 가지며 비선형 특성도 우수하게 나타났다. 온도에 따른 저항률의 변화를 이용하여 계산한 전위장벽의 높이는 정전용량과 인가전압의 관계에서 구한 전위장벽의 높이와 상당한 차이를 보이며, 전류-전압 특성 및 입계당 항복전압 등과 첨가물의 함량등 실험적인 변화 조건과의 관련성을 발견할 수 없었다. 따라서 본 실험에서 준비한 시편의 경우 C-V 관계로부터 전위장벽을 구하는 것이 적절하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 교육부 신소재분야 연구지원 (Ministry of Education Research Fund for Advanced Materials in 1996)에 의해 이루어졌음.

REFERENCES

1. K. Eda, "Zinc Oxide Varistors," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **5**(6), 28-41 (1989)
2. T. K. Gupta, "Application of Zinc Oxide Varistors," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(7), 1817-40 (1990).
3. M. Matsuoka, "Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics," *Jpn J. Appl. Phys.*, **10**, 736-746 (1970).
4. 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).
5. L. M. Levinson and H. R. Philipp, "Zinc Oxide Varistors-A Review," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **65**(4), 639-646 (1986).
6. K. Mukae, "Zinc Oxide Varistors with Praseodymium Oxide," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **66**(9), 1329-1331 (1987).
7. K. Mukae, K. Tsuda and I. Nagasawa, "Non-Ohmic Properties of ZnO-Rare Earth Metal Oxide-Co₃O₄ Ceramics," *J. Appl. Phys.*, **16**(8), 1361-1368 (1977).
8. I. Willot, F. Delannay, J. rapaille, "Grain Growth Phenomena in a ZnO Varistor doped with cobalt and Praseodymium Oxides," *Silicates Industries*, 5-6, 181-185 (1994)
9. A. B. Alles and V. L. Burdick, "Compositional Effects on the Liquid-Phase Sintering of Praseodymium Oxide-Based Zinc Oxide Varistors," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**(8), 2098-102 (1993).
10. S. G. Cho, H. Lee and H. S. Kim, "Effect of Chromium on the Phase Evolution and Microstructure of ZnO doped with Bismuth and Antimony," *J. Mater. Sci.*, **32**, 4283-87 (1997).
11. K. Mukae, K. Tsuda and I. Nagasawa, "Capacitance-vs-Voltage Characteristics of ZnO Varistors," *J. Appl. Phys.*, **50**(6), 4475-76 (1979).
12. A. B. Alles and V. L. Burdick, "The Effect of Liquid-Phase Sintering on the Properties of Pr₆O₁₁-Based ZnO Varistors," *J. Appl. Phys.*, **70**(11), 6883-90 (1991).
13. T. Miyoshi, K. Maeda, K. Takahashi and T. Yamazaki, "Effect of dopants on the characteristics of ZnO varistors," pp. 309-315 in *Advances in Ceramics*, Vol. 1, *Grain Boundary Phenomena in Electronic Ceramics*. Edited by L. M. Levinson and D. C. Hill, The American Ceramic Soc., Westerville, OH, 1981.