

# ZnO 세라믹스의 소결온도가 전기적 특성에 미치는 영향

논문  
8-1-7

## The Effect of Sintering Temperature on the Electrical Properties of ZnO Ceramics

김용혁\*, 이덕출\*\*

(Yong-Hyuk Kim, Duck-Chool Lee)

### Abstract

Electrical properties of ZnO ceramics based on Bi oxide was investigated in relation to sintering temperature. In the temperature range 1150°C to 1350°C, the grain size increased from 9 $\mu$ m to 20 $\mu$ m when the sintering temperature was raised. The leakage current in the low voltage range increased as the potential barrier decreases, which is caused by increasing the grain size at high temperature. The dielectric characteristics of the ZnO ceramics was also affected by sintering temperature. Large dielectric constant was attributed to the grainboundary layer of polycrystalline ZnO ceramics and decreasing grainboundary width. The variation of breakdown voltage with sintering temperature was attributed to the change of the donor concentration in the ZnO grain and grain size. The results showed that breakdown voltage increased decreasing grain size and donor concentration. Nonohmic coefficient was associated with the lower breakdown voltage per grainboundary layer due to the grain growth and higher donor concentration.

**Key Words(중요용어)** : ZnO varistor(산화아연 바리스터), Grainboundary(결정입계), Nonohmic(비오姆성), Leakage current(누설전류).

### 1. 서 론

ZnO 세라믹스는 전압-전류 특성이 매우 우수한 비오姆성과 큰 에너지 흡수 능력 때문에 각종 전기, 전자 디바이스에 돌발적으로 유입하는 과도 이상 전압으로부터 회로를 보호하기 위해 사용되는 전압 안정화 회로용 소자나 전력계통에 유입하는 낙뢰 현상으로부터 전기 시설물을 안전하게 보호하기 위한 피뢰용 소자에 이르기까지 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있다.<sup>1,2)</sup> 이와같이 전기 기기의 실용적인 보호 소자로서의 가치 때문에 성능 개선을 위한 많은 연구들이 수행되고 있다.<sup>3,4)</sup>

일반적으로 ZnO 바리스터의 전기적 성질은 금속산화물 첨가에 의한 제 2상이 결정성장 과정에서

에 형성되는 미세결정구조에 의해 크게 좌우된다. 또한 비오姆적 성질은 전계의 증가에 의한 급격한 전류 증가로 특성화되며 절연과괴특성과 더불어 첨가제의 종류, 소결온도, 소결시간, 냉각속도등과 밀접한 관계를 갖고 있다.<sup>5)</sup> ZnO 세라믹스는 Zn 산화물을 주성분으로 하여 Bi, Co, Mn과 같은 미량의 금속 산화물을 첨가하여 고온 소결과정을 거치면서 반도체의 결정입과 절연성의 결정 입계구조를 갖는 다결정 세라믹스로 변화된다.

ZnO 세라믹스의 소결입자는 비직경이 1~10 $\Omega$ ·Cm인 반면 입계층의 비직경은 10<sup>10</sup> $\Omega$ ·Cm이상의 고저항층을 형성하기 때문에 인가된 전압의 대부분이 입계층에 집중됨으로서 현저한 비오姆적인 전압-전류 특성을 갖게 된다.<sup>7)</sup> 특히 결정의 입자 직경이 바리스터 전압이나 비오姆 계수와 같은 전기적 파라메타에 미치는 영향이 큰만큼 소결온도에 따른 세라믹스 결정구조의 변화나 입자직경 제어가 중요하다. 이와같이 소결조건이 ZnO 세라믹스의 전기적 특성에 미치는 중요한 요소임에도 불

\* : 경원전문대학 전기과

\*\* : 인하대학교 전기공학과

접수일자 : 1994년 4월 8일

심사완료 : 1994년 8월 13일

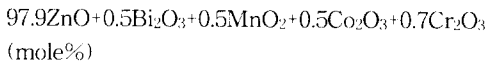
구하고 아직 이 분야에 대해 상세한 연구가 이루어지지 않고있다. 지금까지 ZnO 세라믹스의 전기적 특성에 관한 연구의 대부분은 비직선 전압-전류 특성, 전기전도기구, 열화현상등이며 소결온도 특성면에 있어서 검토된 보고는 거의없다.

따라서 본 연구에서는 결정성상과 결정입계의 성질을 중심으로 하여 ZnO 세라믹스의 전기적 특성에 미치는 소결 온도의 영향을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 시편준비

본 연구에서 사용한 ZnO계 바리스터 조성은 다음과 같다.



혼합체를 Ball mill방법으로 0.5w% PVA binder를 혼합하여 24시간 Ball milling한 후 건조하여 80 mesh sieve를 통해 조립화 하였다. 1000Kg/cm<sup>2</sup>의 압력을 가하여 성형한 후 SiC 전기로에서 1150°C에서 1350°C까지 50°C의 간격으로 실험 목적에 맞추어 소결하였다. 이때 소결온도의 승온 속도는 4°C/min.으로 그리고 유지 시간은 2시간으로 하였다. 소결시편의 표면을 연마한 후 Silver paste로 전극 처리하여 600°C에서 전극소결하였다. 측정용 시편은 두께 0.8mm, 직경 6mm의 원판형으로 하였다. 미세구조 관찰을 위해 Alumina slurry로 표면을 연마한후 10% HCl+HF 용액에 15초간 노출시켜 Chemical etching 하였다.

### 2-2. 전기적특성 측정

시편의 전압-전류 특성은 직류 고전압장치(1Kv, 30mA)와 Vibrating Reed Electrometer(TR8401)를 사용하여 상온에서 측정하였고, 교류 전압-전류 특성은 60Hz의 주파수에서 Modified Curve Tracer를 사용하여 측정하였다. C-V특성은 직류 0-35v 전압범위에서 Impedance Analyzer(HP4192A)와 저전압 직류 전원공급장치를 사용하여 1KHz에서 측정하였다. 화학 에칭한 시편의 미세구조는 전자주사현미경을 이용하여 관찰하였다. 비오姆계수  $\alpha$ 는 1mA/cm<sup>2</sup> 영역에서 다음식을 이용하여 구하였다.<sup>8)</sup>

$$\alpha = d \log(I) / d \log(V)$$

여기서 V는 시편 양단에 공급된 전압이고 I는 시편을 통해 흐르는 전류이다.

## 3. 실험결과 및 검토

### 3-1. 전압-전류 특성

그림 1은 소결 온도를 1150~1350°C로 변화시켰을때의 전압-전류 특성을 나타낸다. 저전계 영역에서는 소결 온도가 증가함에 따라 누설 전류가 증가하였으나 10<sup>3</sup>A/Cm<sup>2</sup> 이상의 전류가 흐르는 전계영역에서 발생하는 절연 파괴 전압은 소결 온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. ZnO 세라믹스의 누설 전류 특성은 소결온도나 유지시간등에 의해 변화되는 세라믹스 내부의 미세구조나 조성변화에 크게 의존되는 것으로 알려져 있다.<sup>9)</sup> 이들 변화에 의해 수반되는 누설전류는 ZnO 결정립내부에 생성되는 공핍층(depletion layer)과 공핍층을 형성하는 정전하밀도(positive charge density)에 의해 구성되는 이중 Schottky 장벽의 변화가 지배적인 전도기구도 작용하므로 오姆영역에서의 전류는 온도의존성이 매우 크다.<sup>10,11)</sup> 즉, 이중 전위 장벽의 양측에 전압이 가해지면 전자가 부 전극으로부터 주입되어 장벽을 넘게되고 이때 계면준위에 포획된다. 포획전자의 일부는 열여기에 의해 계면준위로부터 방출되어 전위장벽을 넘어 정전극으로 흐르게 된다. 이때 상대적 전류는 계면준위에 포획되는 전자와 계면준위로부터 방출되는 전자수의 차에 의해 흐르게된다. 또 열여기에 의한 전류때문에 전류의 온도계수는

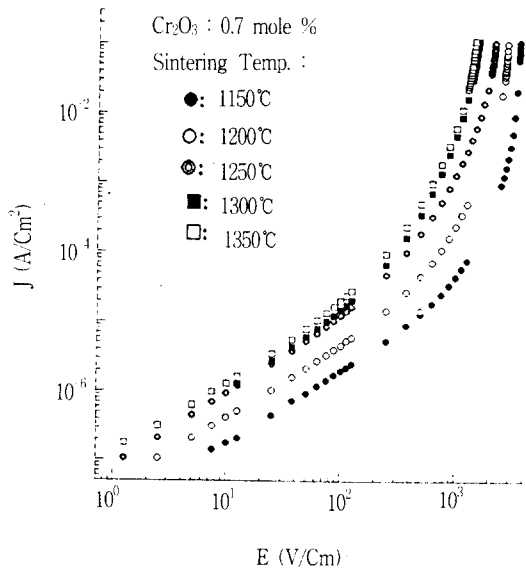


그림 1. 소결온도에 따른 전압-전류특성  
Fig. 1. Voltage-Current Characteristics Measured at Various Sintering Temperature.

정특성을 나타낸다.

G. D. Mahan<sup>12)</sup>은 누설전류는 오옴특성을 나타내는 저전계영역이기 때문에 터널링 과정은 불가능하고 단지 열여기에 의존하므로 이 영역에서의 전도과정은 활성화 에너지에 의한 전위장벽의 변화에 기인됨을 밝히고 있고, P. L. Hower<sup>13)</sup>도 전압-전류 특성의 전위장벽 의존성을 제시하고 있다.

저전계에서의 전류는 다음식으로 표시되는 온도의존성을 갖는다.

$$J = J_0 \exp(-\phi/kT) \quad (1)$$

여기서  $\phi$ 는 전위장벽높이,  $k$ 는 Boltzmann상수,  $T$ 는 절대온도이다. 열여기에 의한 전압-전류 특성을 조사하기 위해 25~140°C의 온도 범위에 걸쳐 측정된 전압-전류 특성을 그림 2에 나타내었다. 오옴영역에서의 전압-전류 특성은 온도의존성이 매우 현저하게 나타났으나 비오옴영역으로 이행됨에 따라 전압-전류의 온도의존성이 없어지는 경향을 보이고 있다. 이와같은 특성은 소결온도의 변화에 따라서 거의 일정한 경향을 보이고 있다. 이 결과로  $\ln J-1/T$ 의 Arrhenius식으로부터 계산한 전위장벽의 높이를 소결온도에 따라 그림 3에 나타내었다. 전위장벽은 소결온도가 증가됨에 따라 점차 감소하는 특성을 보이고 있다. Bhushan<sup>14)</sup>은 소결온도의 증가에 의해 계면의 Defect 밀도가 감소하기 때문에 ZnO 세라믹스의 Schottky장벽이 낮아지게 된다고 보고하였다. 이같은 결과를 검토해 볼때 소결온도의 증가는 결정입의 크기를 증가시키는등 세라믹스 내부의 미세구조를 변화시킴으로써 결정입계의 계면상태나 트랩준위의 변화를 수반하여 전위장벽을 낮추는 효과를 나타내기 때문에 오옴영역에서의 누설전류가 소결온도의 증가에 따라 증가되는 것으로 생각된다.

### 3-2. 유전특성

ZnO 세라믹스의 정전용량이 주로 ZnO 결정입 내부의 공핍층에 의해 형성되기 때문에 유전특성은 ZnO 세라믹스의 전도특성과 밀접한 관계를 갖고 있다.<sup>15)</sup> 그림 4(a)와 4(b)는 100Hz~100KHz 주파수에 걸쳐 측정된 유전상수와 유전손실의 소결온도 특성을 나타낸 것이다. 유전상수와 유전손실 모두 소결온도의 증가에 따라서 증가하는 경향을 나타내었고 주파수증가에 따라서는 감소하는 특성을 보이고 있다. 유전상수의 이같은 현상은 주파수가 높아질수록 전도 Carrier가 주파수변화에 대처

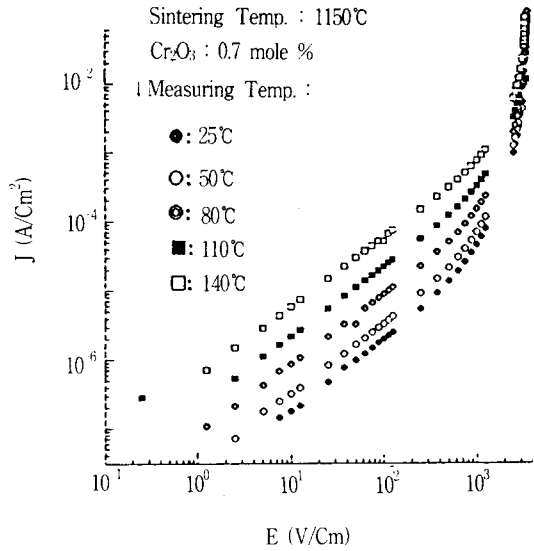


그림 2. 측정온도 변화에 따른 전압-전류 특성  
Fig. 2. Voltage-Current Characteristics Measured at Different Temperature.

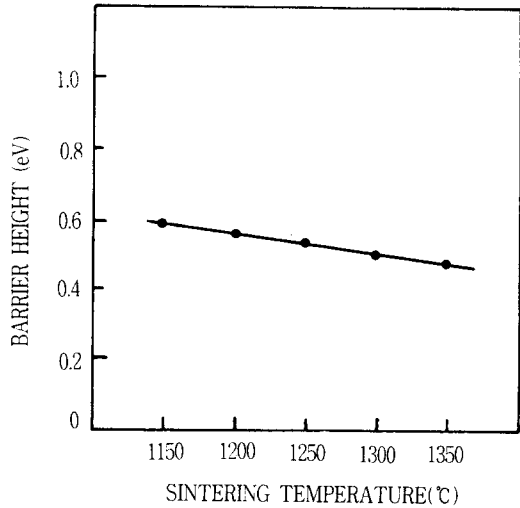


그림 3. 소결온도 변화에 따른 전위장벽  
Fig. 3. Barrier height as a Function of Sintering Temperature.

하지 못해서 나타나는 것으로 일종의 유전완화현상으로 볼수 있다. 소결온도 증가에 따른 유전율의 증가는 입계층 내부에 존재하는 정이온이 소결온도가 높아짐에 따라 입계면으로 이동하는 현상과 고온소결에 따른 결정입 성장으로 결정입계의 수가 감소된 결과로 생각된다. 저전계영역에서의 전도 특성이 Schottky 장벽에 의해 제어되기 때문에

저주파수 영역에서의 유전손실의 증가는 Schottky 장벽의 감소에 기인되는 것으로 보이며 이 결과는 그림 1의 전압-전류 특성과 잘 일치되고 있다. ZnO 세라믹스의 높은 정전용량은 순수한 ZnO 세라믹스의 유전상수값( $\epsilon=8.5$ )이 현저하게 낮기 때문에 주로 높은 저항율을 갖는 결정입계에 의해 형성되며 1KHz에서의 유전상수값이 소결온도에 따라 3200~2200정도에 이르고 있다. 특히 비오姆의 전류 특성은 결정입계가 형성되지 않은 순수한 ZnO 세라믹스에서는 나타나지 않기 때문에 비오姆적인 전압-전류 특성이 고저항성의 다결정 결정입계에 의존하고 있음을 알 수 있다.

3.3. 절연파괴전압 특성

ZnO 세라믹스의 절연파괴 현상은 고전계에 의해 결정 입계층이 전기전도를 이르킴으로서 발생되며 그 전도기구는 주로 입계층에서의 터널링 효과에 의한 전자전도가 지배적인 것으로 알려져 있다.<sup>16)</sup> 절연파괴 특성을 명확하게 조사하기 위하여 소결온도에 따른 전압-전류 Curve Trace를 그림 5에 나타내었다. 공급전압에 대하여 정, 부 대칭의 전류 특성을 보이고 있으며 이는 이중 다이오드와 동일한 전류특성을 갖는다. 이 그림으로 부터 시편의 절연파괴 전압이 소결온도에 명확하게 의존하고 있음을 알 수 있고, 절연파괴 전압은 소결온도의 증가에 따라 감소되는 경향을 나타내었다. ZnO 세라믹스의 절연파괴 전압에 미치는 요소로서 결정입의 크기, 결정입계, 도너빌도등이 검토되어 왔다.<sup>17)</sup> 시편의 절연파괴가 발생하는 시점의 전압인 소위 문턱전압(Threshold voltage)  $V_T$ 는 실험적으로 다음과 같이 나타낸다.<sup>11)</sup>

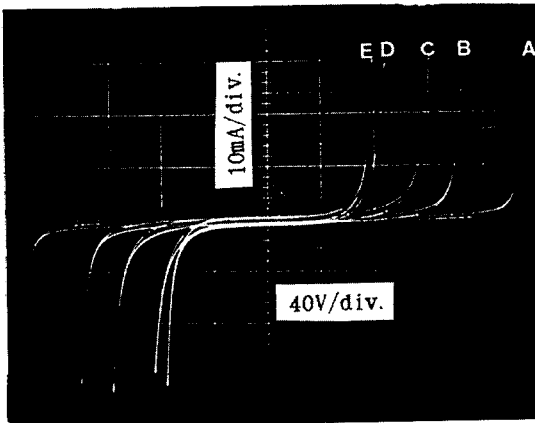


그림 5. 전압-전류 특성곡선  
Fig. 5. Voltage-Current Curve Trace.

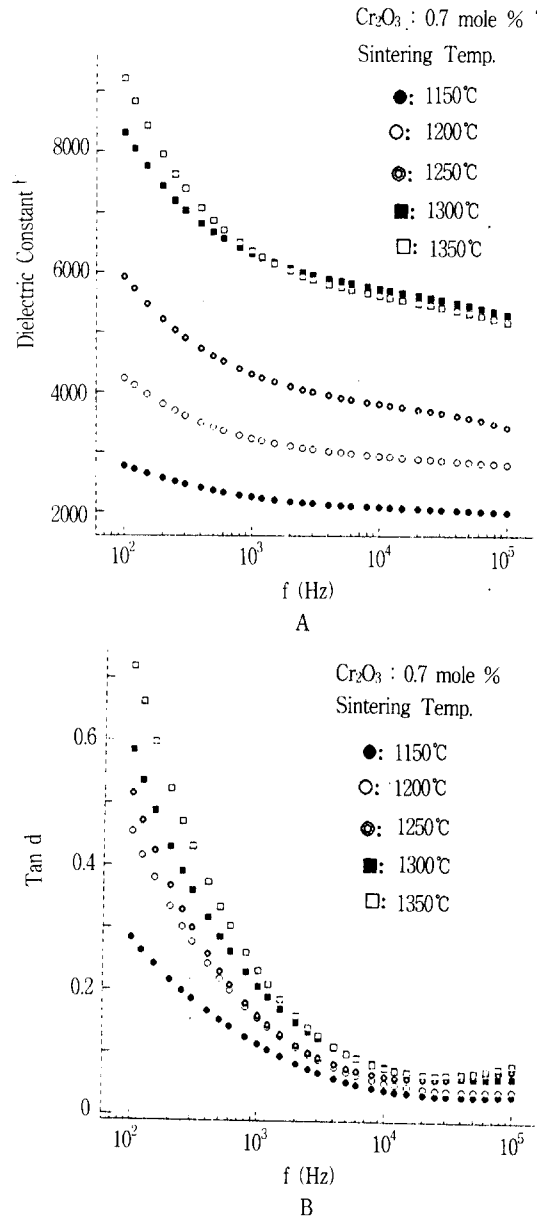


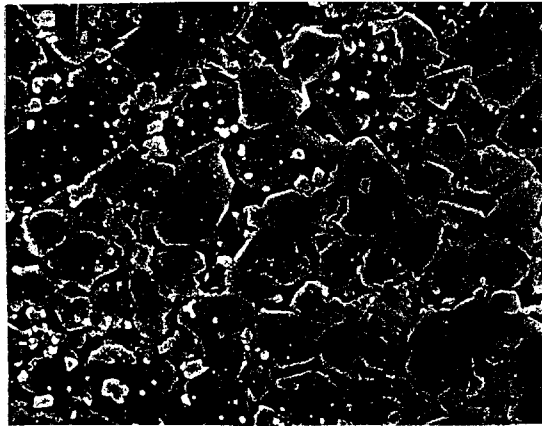
그림 4(a),(b). 소결온도에 따른 유전상수와 유전손실의 주파수 의존성.  
Fig. 4(a),(b). Frequency Dependency of Dielectric Constant and dissipation Factor for the Sintering Temperature.

$$V_T = D/d V_i = n V_i \tag{2}$$

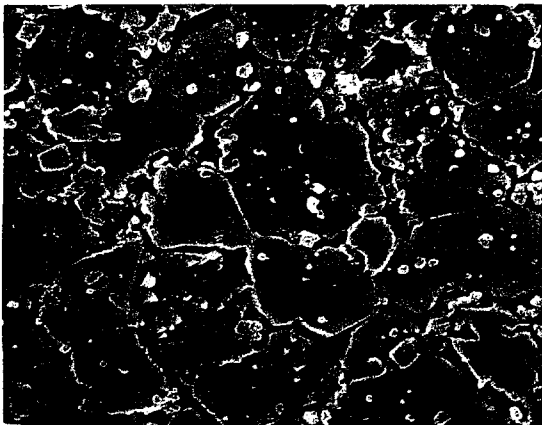
여기서 D는 시편의 두께, d는 결정입경, n는 전

극사이에 직렬로 연결된 결정입의 수  $V_L$ 는 결정입 계당의 절연과피 전압이다. 식(2)은  $V_T$ 가 ZnO 세라믹스의 미세구조에 의존하고 있음을 보여주고 있다.

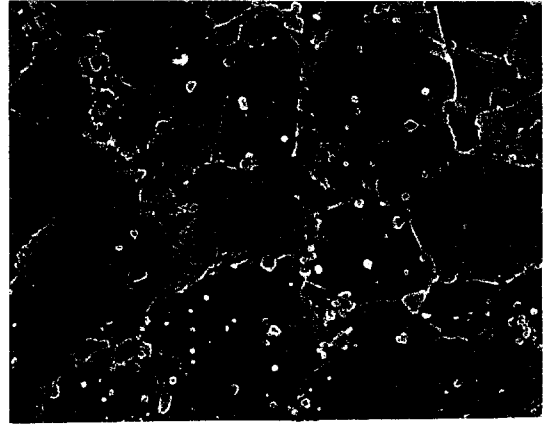
그림 6은 소결 온도에 따른 시편의 미세구조 사진을 나타낸 것이다. ZnO 세라믹스의 미세구조는 ZnO 결정입과 이것을 둘러싸고 있는 결정입계층으로 이루어져 있으나 그림에서 결정입 사이의 결정입계는 HCl + HF의 혼합용액에 의해 에칭되었기 때문에 확실하게 관찰되지 않고 있다. 그러나 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 고전계 영역에서의 비오염적인 전압 전류 현상은 결정입계에 의존하기 때문에 결정입계의 존재를 간접적으로 알 수 있다. 결정입의 크기는 소결온도가 증가함에 따라 매우 큰 폭으로 증가하였고 소결온도 1150~1350°C에서 9~20 $\mu\text{m}$ 로 성장하였다. ZnO 세라믹스에서 결정입계의 형성은 ZnO보다 이온반경이 큰 Bi 이온이 ZnO 격자속으로 쉽게 침입하지 못하고



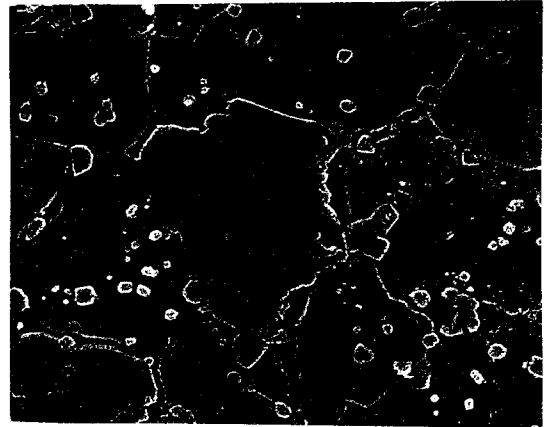
(A) 1150°C



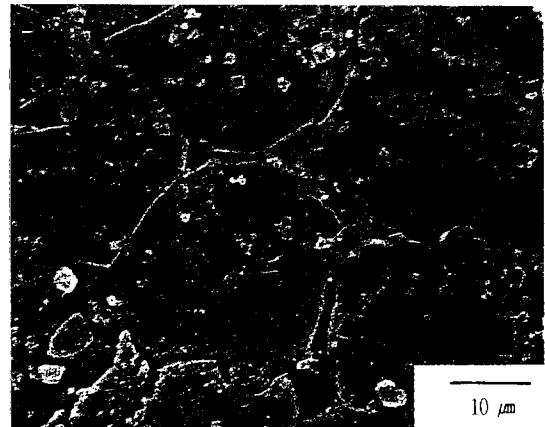
(B) 1200°C



(C) 1250°C



(D) 1300°C



(E) 1350°C

그림 6. 소결온도에 따른 미세구조

Fig. 6. SEM Microstructure as a Function of Sintering Temperature.

소결과정중에 임계로 밀려남으로서 임계에 머물게

되는 것에 기인되는 것으로 알려져 있다.<sup>18)</sup>

표 1에 소결 온도에 따른 결정입의 크기와 그림 1의 전압-전류 특성으로부터 구한 절연과피 전압  $V_T$ 와 결정입계당의 절연과피 전압  $V_i$ 를 소결온도에 따라 나타내었다.  $V_T$ 와  $V_i$  모두 결정입의 증가에 따라 감소되었다. 이같은 결과는 소결온도가 높아짐에 따라 결정입의 크기가 증가하게 되어 결정입계의 폭이 좁아진 결과로 인해  $V_i$ 가 낮아지게 되며,  $V_T$ 의 감소는  $V_i$ 효과와 더불어 결정입이 크기때문에 단위 두께당의 직렬연결된 입자의 수가 감소된 원인에 기인된 것으로 볼 수 있다. 그리고 결정입계에서의 전압강하인  $V_i$ 값이 소결온도에 따라서 일정하게 성립되지 않은 것은 다결정 세라믹스의 복잡한 내부구조에 기인되는 것으로서, 시편 내부의 전류흐름이 전극사이의 직렬적인 단순한 흐름이 아니라 3차원적인 전류 흐름체인을 형성하기 때문인 것으로 생각된다.

ZnO 결정입의 공핍층에 존재하는 도너밀도가 절연과피 전압에 강한 영향으로 작용하게됨이 K. Mukae등에 의해 보고된바 있다.<sup>19)</sup> 유전특성에서

표 1. 소결온도에 따른 결정입경 주선헌전류,  $V_T$ ,  $V_i$

Table 1. Grain Size, Leakage Current,  $V_T$  and  $V_i$  at Various Sintering Temperature.

Sintering Temperature(°C)	Grain size (μm)	Leakage Current (A/Cm <sup>2</sup> )	$V_T$ (v)	$V_i$ (v)
1150	9	$1.77 \times 10^{-7}$	205	2.05
1200	10	$4.25 \times 10^{-7}$	160	2.0
1250	13	$9.55 \times 10^{-7}$	76	1.22
1300	16	$1.05 \times 10^{-6}$	60	1.2
1350	20	$1.36 \times 10^{-6}$	55	1.17

고찰한 바와 같이 고저항층인 결정입계의 영향으로 유전율이 증가되는 동시에 대부분의 전계가 입계에 집중되어 절연과피 특성을 좌, 우 하게된다. C-V 특성으로부터 구한 공핍층내의 도너밀도를 소결온도에 따라 그림 7에 나타내었다. 소결온도가 증가됨에 따라 도너밀도가 큰폭으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 도너밀도의 변화는 공핍층에서의 정전용량이 전압의존성을 결정입계내의 공핍층 폭을 감소시킴으로서 정전용량의 증가는 물론 도너밀도의 증가를 야기시킨 원인으로 볼 수 있다.

### 3-4. 비오염계수

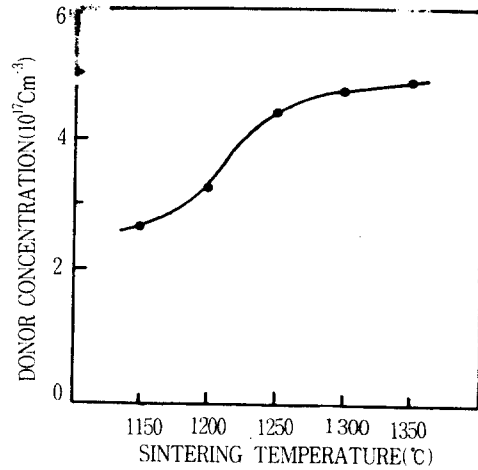


그림 7. 소결온도에 따른 도너밀도

Fig. 7. Donor Concentration as a Function of Sintering Temperature.

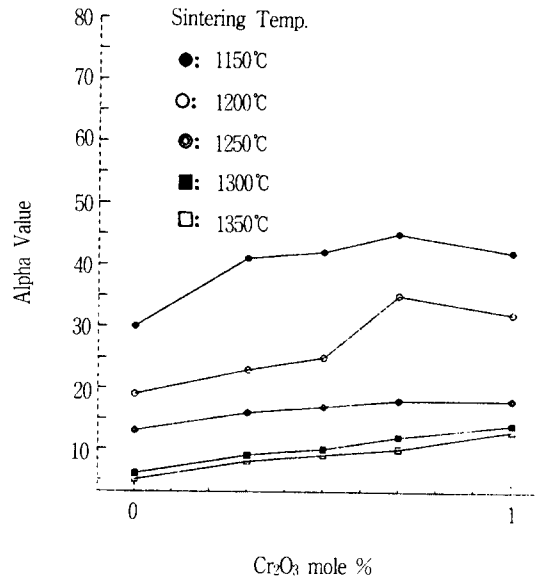


그림 8. 소결온도에 따른 비오염계수의 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 의존성

Fig. 8. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Dependency of Nonohmic Coefficient for the Sintering Temperature.

비오염계수는 금속산화물 침과효과 및 ZnO 세라믹스 미세구조에 의존되는 것으로 알려져 있으나 아직 정확한 기구해석은 되어있지 않고 다만 결정입계층이 지배적인 기구로 작용될 것이라는 추측에 그치고 있다.<sup>20)</sup> 그림 8은 그림 1의 10<sup>-1</sup>A/

$\text{Cm}^2$ 의 전류밀도에서 구한 비오姆계수의 소결온도의 의존성을  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  첨가제에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 비오姆계수  $\alpha$  값은  $1150^\circ\text{C}$  소결온도에서 가장 큰 값을 나타내었고 소결온도가 증가할수록 감소되는 경향을 보이고 있다. 이와같은 특성은  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 첨가 효과에 따라 정도의 차이를 나타냈지만 소결온도면에서 볼때 동일한 변화양상을 나타내고 있다.

따라서 비오姆계수는 ZnO 세라믹스 미세구조가 지배적인 요소로 작용된다고 볼 수 있다. 즉, 작은 결정립으로 인하여 공핍층내의 정전하 도너밀도가 감소됨으로서 절연과과 전압이 증가되고 이로 인하여 비오姆계수가 커지게 되는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ZnO 세라믹스의 소결온도가 전기적 특성에 미치는 영향을 세라믹스 미세구조면에서 조사하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 결정입은 소결온도의 증가와 함께  $9\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ 사이로 증가하며 이와함께 저전계 영역에서 누설전류는 증가하는 경향을 나타내었다. 이와같은 전기전도의 현상은 전위장벽의 저하에 의한 것으로 사료된다.
- (2) 유전상수와 유전손실은 소결온도의 증가와 함께 증가하는 경향을 나타내고, 이와같은 현상은 결정입계 형성에 기인된 것으로 보인다.
- (3) 절연과과 전압의 미세구조 의존성이 관찰되었으며 소결온도 증가에 의한 결정입 증가와 도너밀도의 증가에 의해 절연과과 전압이 낮아졌다.
- (4) 소결온도 증가에 따라서 비오姆계수값이 낮아진 것은 결정입의 성장에 의해 결정입계당의 절연과과 전압저하와 도너밀도 증가효과에 기인된 것으로 생각된다.

#### REFERENCES

- 1) L. M. Levinson and H. R. Philipp, "Zinc Oxide Varistor-A Review", *Ceram. Bull.*, 65, pp. 639-646, 1986.
- 2) 學藏社, "半導體セラミックスと その應用", p. 137, 1980.
- 3) B. S. Chiou and M. C. Chung, "Effect of Copper Additive on the Microstructure and Electrical Properties of Polycrystalline Zinc

- Oxide", *J. Am. Ceram. Soc.*, 75(12), pp. 3363-3368, 1992.
- 4) W. G. Carlson and T. K. Gupta, "Improved Varistor Nonlinearity via Donor Impurity Doping", *J. Appl. Phys.*, 53, 8, pp. 5746-5753, 1980.
- 5) G. D. Kim, C. H. Kim and M. H. Oh, "Role and Effect of  $\text{Co}_2\text{O}_3$  Additive on the Upturn Characteristics of ZnO Varistors", *J. Appl. Phys.*, 58, 15, pp. 3231-3235, 1985.
- 6) S. N. Bai and T. Y. Tseng, "Inference of Sintering Temperature on Electrical Properties of ZnO Varistor", *J. Appl. Phys.*, 74(1), pp. 695-703, 1993.
- 7) M. Matsuoka, "Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics", *Jap. J. Appl. Phys.*, 10, pp. 736-746, 1971.
- 8) J. Ericson and B. Reich, "The High Power Metal-Oxide Varistor as a Vehicular and Aircraft Transient Suppressor", *IEEE Trans. on Aero. and Elec. Sys.*, AES-12, 2, pp. 104-108, 1976.
- 9) K. Eda, "Conduction Mechanism of Non-ohmic Zinc Oxide Ceramics", *J. Appl. Phys.*, 49(5), pp. 2964-2972, 1978.
- 10) E. R. Leite, J. A. Varela and E. Long, "Barrier Voltage Deformation of ZnO Varistors by Current Pulse", *J. Appl. Phys.*, 72(1), pp. 147-152, 1992.
- 11) M. S. Castro, G. M. Nunez, D. E. Resasco and C. M. Alde, "Prebreakdown Conduction in ZnO Varistors", *J. Am. Ceram. Soc.*, 75(4), pp. 800-804, 1991.
- 12) G. D. Mahan, L. M. Levinson and H. R. Philipp, "Theory of Conduction in ZnO Varistors", *J. Appl. Phys.*, 50, pp. 2799-2812, 1979.
- 13) P. L. Hower and T. K. Gupta, "A Barrier Model for ZnO Varistors", *J. Appl. Phys.*, 50, pp. 4847-4855, 1979.
- 14) B. Bhushan, S. C. Kashyap and K. L. Chopra, "Dielectric Behaviour of ZnO-Based Ceramic Semiconductor", *Bull. Mat. Sci.*, 9, pp. 169-180, 1987.
- 15) L. M. Levinson and H. R. Philipp, "AC Properties of Metal Oxide Varistors", *J. Appl. Phys.*, 47, pp. 1117-1122, 1976.

- 16) L. M. Levinson and H. R. Philipp, "The Physics of Metal Oxide Varistors", J. Appl. Phys., 46, pp. 1332-1341, 1975.
- 17) P. R. Emtage, "Statistics and Grain Size in Zinc Oxide Varistors", J. Appl. Phys., 50(11), pp. 6833-6837, 1979.
- 18) J. P. Gambino, W. P. Kingery and G. E. Pike, "Grain Boundary Electronic States in Some Simple ZnO Varistors", J. Appl. Phys., 61(7), pp. 2571-2574, 1987.
- 19) K. Mukae and I. Nagasawa, "Effect of Proseodymium Oxide and Donor Concentration in the Grainboundary Region of ZnO Varistor", Adva. in Ceram. 1, pp. 331-342, 1981.
- 20) W. G. Morris, "Electrical Properties of ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics", J. Amer. Ceram. Soc., 56(7), pp. 360-364, 1973.

저자소개



김용혁

1952년 10월 24일생. 1979년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1983년 8월 인하대학교 전기공학과 석사. 1988년 8월 인하대학교 전기공학과 (공학). 1993년 4월 일본 명성대학 객원교수. 현재 경원전문대학 전기과 조교수.



이덕출

1939년 1월 22일생. 1963년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1966년 2월 인하대학교 전기공학과 석사. 1976년 9월 일본 나고야대학 전기공학과 (공학). 1981년 8월 일본 나고야대학 전기공학과 방문교수. 1994년 현재 인하대학교 전기공

학과 교수.