

## $\alpha$ -Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가에 의한 Zinc Oxide 바리스터의 전기적 특성

김경남 · 한상목  
강원대학교 재료공학과  
(1994년 8월 22일 접수)

### Electrical Properties of Zinc Oxide Varistor with $\alpha$ -Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>

Kyung-Nam Kim and Sang-Mok Han

Dept. of Materials Engineering, Kangwon National Univ.

(Received August 22, 1994)

#### 요 약

본 연구는 ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CoO-Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>계에서 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량(0.1~2 mol%)에 따른 전기적 특성을 조사하였다. 소결동안 ZnO 입자성장은 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 양의 증가와 함께 억제되었으며, ZnO 입자크기 분포의 폭은 좁은 분포를 보였다. 임계전압(V<sub>b</sub>)은 1 mol% Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가한 시편에서 급격히 증가하였으며, 이는 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가에 따른 입자 성장과 관련이 있었다. 비직선 전류-전압 특성은 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량(또는 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 몰비)에 많은 영향을 받았으며, 0.5 mol% Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가한 조성에서 가장 높은 비직선지수 값인 43을 얻었다. 임계전압 이하의 누수전류는 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량의 증가와 함께 감소하였다.

#### ABSTRACT

Electrical properties in the ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CoO-Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> system were investigated with Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> content (0.1~2 mol%). The increase of the Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> content inhibited the grain growth of ZnO, which showed a narrow grain size distribution of ZnO. The breakdown voltage (V<sub>b</sub>) increased markedly with 1 mol% Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> addition due to the grain growth control behaviour of the Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>. The nonlinear I-V characteristic was significantly influenced by the Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> content (or Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> ratio). Addition of 0.5 mol% Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> showed the highest nonlinear coefficient ( $\alpha$ ) of 43. The leakage current in prebreakdown region was decreased with increasing Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> content.

#### 1. 서 론

ZnO 바리스터는 서지(surge) 내량이 커 주로 전압 안정화, 이상 과도 전압에 대한 회로보호 소자 및 피뢰기 소자로서 응용되고 있다<sup>1)</sup>. 이것은 ZnO에 미량의 각종 산화물(Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CoO, MnO, Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등)을 첨가하여 소결함으로써 높은 비직선 전류-전압특성을 나타내는 다결정의 반도체 소자이다<sup>2)</sup>.

현재, ZnO 바리스터로 실용화되고 있는 소자의 미세구조는 ZnO입자, 입계상(Bi-풍부한 상) 및 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>(spinel상) 등으로 구성되어 있으며, 비직선 특성은 고온에서 Bi-풍부한 상이 액상으로된 후 냉각 과정에 의해 ZnO의 입계에 석출되어 전위 장벽을 형성함으로써 기인하는 것으로 보고되고 있다<sup>3)</sup>. 그러므로, 대부분의 연구는 입계

층을 형성하는 Bi-풍부한 상의 역할과 전위 장벽의 전도기구 등을 규명하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>1-3)</sup>.

그러나, ZnO 바리스터에서 나타나고 있는 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 상은 많은 양이 미세구조에서 관찰되고 있으나 그에 관한 보고는 극히 미약하다. Takemura 등<sup>4)</sup>은 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 ZnO와 다른 첨가 산화물들과 함께 소결의 초기단계에서는 분산되어 있으나 마지막 단계에서 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 상으로 된다고 하였으며, 또한 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 입자가 ZnO 입자들 사이에 위치하므로 입계의 계면응력이 변화하여 비직선 특성이 증가한다고 하였다. Asokan 등<sup>5)</sup>은 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 상의 미세구조 특성을 조사하여 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 상이 전기적 성질에 미칠 수 있다고 하였다. 그러므로 과거의 연구<sup>6)</sup>에서는 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>와 Bi-풍부한 상과의 반응에 따른 상 구성과정

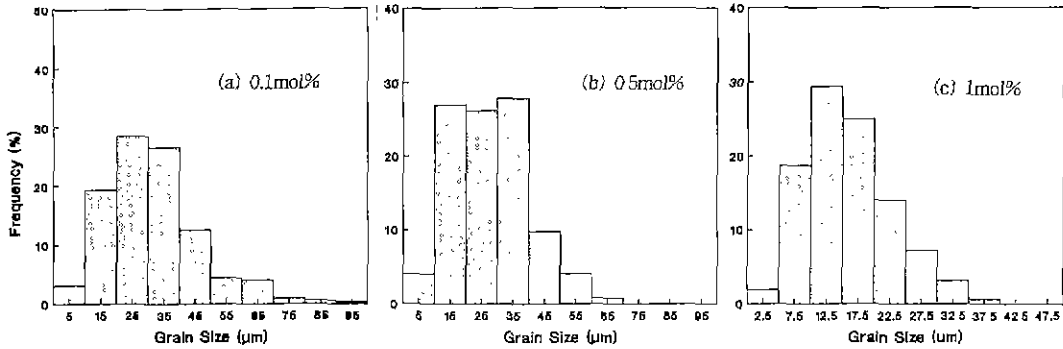


Fig. 1. Grain size distributions of the ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CoO-Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> system sintered at 1100°C with Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> content.

과 미세구조에 관해 보고하였다.

본 연구에서는  $\alpha$ -Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>상이 ZnO 바리스터의 ZnO 입자크기 분포와 전기적 특성에 미치는 영향을 다루기 위해 ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CoO-Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>계의 조성으로 하였다.

### 2. 실험방법

본 실험에서 사용된 출발조성은 (98.5-X)mol%ZnO-1 mol%Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0.5 mol%CoO-X mol%Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>으로 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>를 각각 X=0.1, 0.5, 1 및 2 mol%의 4가지 조성이며, 시편의 제조는 문헌상에 제시된 실험방법<sup>7)</sup>과 동일하게 행하였다. 분말의 균일혼합을 위하여 마노볼밀에서 10시간 동안 증류수와 함께 습식혼합 분쇄한 뒤 dry oven에서 80°C로 24시간 동안 충분히 건조한 후 500°C에서 1시간 동안 하소를 하였다. 하소한 분말의 유동성(flow characteristic)을 갖게 하기 위해 80 mesh의 체를 통과시켜 조립화(granulation)하여 출발물질로 하였다. 이 분말을 금속 몰드(직경 20 mm) 속에서 1000 kg/cm<sup>2</sup>의 일축가압 하에서 disk형태의 성형체를 만들어 1000~1300°C의 온도범위로 공기 중에서 소결하여 quenching하였다.

위와같이 제조한 시편의 미세구조를 주사전자현미경(SEM, ISI-SS 130)을 이용하여 관찰한 후, 입도분포를 화상분석(image analyze, Jocyce-Loebi, Magiscan 2)으로 행하였다. 화상분석시 ZnO입자들의 크기는 instrument stylus로 사진위의 각 입자들을 추적하여 측정하였으며 ZnO입자분포를 위해 300개 이상의 입자를 선택하였다.

그리고, 각 소결체의 전기적 특성을 조사하기 위하여 디스크상의 시편을 두께 1 mm가 되도록 #800, #1200의 SiC 연마지로 차례로 연마한 후 ion coater(Eiko IB 3)로 시편 양면의 중심부에 지름 10 mm가 되도록 Au를 코팅한 후 Ag 페이스트로 리이드선을 연결하였다. 이와

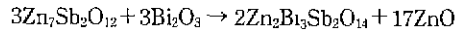
같이 만든 시편을 digital multimeter, electrometer(Keithley Model 617) 및 curve tracer(Kikusui Electro, Co. 5082)를 이용하여 직류 전압을 가하여 비직선 전류-전압 특성을 조사하였다. 임계전압(V<sub>b</sub>, breakdown voltage)은 시편에 1 mA/cm<sup>2</sup>의 전류가 흐를 때의 단위 길이당 전압(V<sub>1mA/mm</sub>)으로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. $\alpha$ -Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량이 입도분포에 미치는 영향

Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량에 따른 시편의 입도분포는 1100°C에서 2시간 동안 소결한 시편들을 이용하여 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량이 0.1 mol%, 0.5 mol%일 경우의 입도분포 곡선은 넓은 분포를 하고 있으나, 1 mol%에서는 좁은 입도분포를 하고 있다. 또한, 소결온도에 따른 결과는 보이지 않았으나 ZnO 입도분포 곡선의 최대빈도는 소결온도 증가와 함께 시편 모두 큰 입경쪽으로 이동하고 입도 분포곡선의 폭은 넓어진다. 이러한 입도분포의 변화는 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량이 적을수록 입도분포 곡선의 폭이 넓어지는 것으로 보였다. 이는 과거 연구<sup>7)</sup>에서 설명하였듯이 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가에 따른 상 구성과정에서 온도 증가, 냉각과 함께 다음 반응식



이 진행되므로 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>의 첨가가 0.1 mol%, 0.5 mol% 일 경우는 소결 초기단계에서 액상(Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)에 의한 물질 이동으로 ZnO 입자성장이 급격히 진행되어 소결온도 증가와 함께 넓은 입도 분포를 하게 된다. Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가가 1 mol%일 경우 ZnO 입도분포가 좁은 것은 낮은 온도에서 액상(Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 통한 물질 이동이 없고, 높은 온도

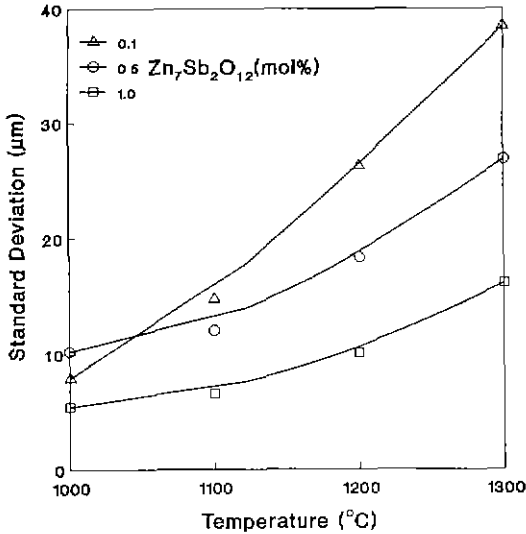


Fig. 2. Standard deviations of the average ZnO grain sizes as a function of sintering temperature.

에서는  $Zn_2Bi_3Sb_2O_{14}$ (pyrochlore상)이  $Zn_7Sb_2O_{12}$ (spinel상)과 액상( $Bi_2O_3$ )으로 전이되어도 spinel 입자가 ZnO 입자들의 입계에 고르게 분포하므로 pinning 효과나 drag 효과로 입계의 이동을 제어하므로 ZnO 입자성장이 느리게 되기 때문이다.

위에서 보인 ZnO 입자의 입도분포 정도를 정량적으로 나타내기 위해  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량과 소결온도에 따른 평균입경(Ref. 7, Fig. 10 참조)의 표준편차를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 모든 시편에서 소결온도에 따른 평균입경의 표준편차는 증가하고 있다.

평균입경에 대한 표준편차는  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 0.1 mol%일 때 평균입경에 대한 표준편차는 작게 나타내는데, 계에서 액상이 출현하므로 ZnO 입자의 성장은 소결온도 증가와 함께 ZnO의 작은 입자들이 액상에 용해되어 큰 입자들의 표면에 재석출되는 과정이 반복되면서 성장하기 때문인 것으로 생각된다. 또한  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 1 mol%일 때 평균입경에 대한 표준편차는 작게 나타내는데, 이는 소결초기 단계에서 ZnO 입성장이 액상을 통한 물질이동이 어려우므로 ZnO 입자성장이 느리게 되는 것으로 생각된다<sup>7)</sup>.

### 3.2. $\alpha$ - $Zn_7Sb_2O_{12}$ 첨가량이 전기적 특성에 미치는 영향

Fig. 3은 1100°C에서 소결하였을 때  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량에 따른 시편의 전류-전압특성을 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 많을수록 입계

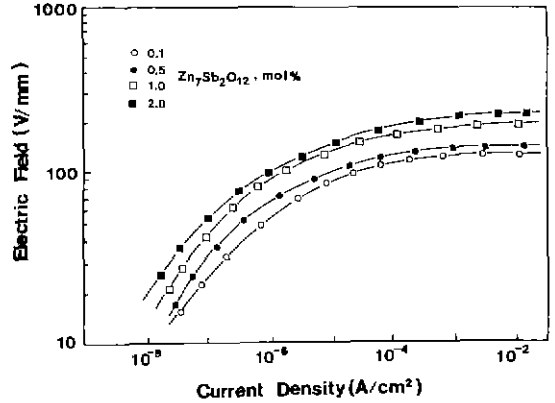


Fig. 3. Current density and electric field characteristics of ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CoO-Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> system sintered at 1100°C with Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> contents.

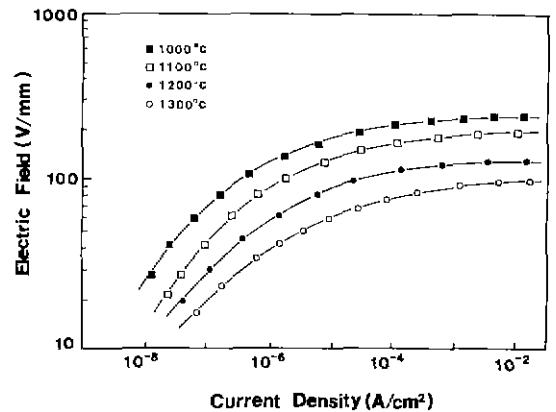


Fig. 4. Current density and electric field characteristics of ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CoO-1.0Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> system sintered at various temperatures for 2 hr.

전압은 증가하고 있으며, 누수전류(leakage current)는 감소하고 있는 것을 볼 수가 있다.

$Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 증가할수록 누수전류가 감소하는 것은 ZnO 입자크기와 관련이 있는 것으로 생각된다. 즉,  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 적을수록 동일 온도에서 ZnO 입자가 크므로 전극의 단위 두께당 전위장벽의 수가 적고, ZnO 입자가 크므로 도전면적이 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 이는 미세구조에서 볼 수 있듯이(Ref. 7, Fig. 11 참조) ZnO 입계는 Bi-풍부한 상으로 완전히 분리되어 있는 것이 아니라 ZnO 입자의 일부분과 직접 접하여 있기 때문이다. 그러므로, ZnO 입자가 클수록 ZnO 입자와 ZnO 입자 사이의 도전면적이 클 것으로 생각된다.

Fig. 4는 1.0 mol%  $Zn_7Sb_2O_{12}$ 을 첨가한 시편을 여러 온

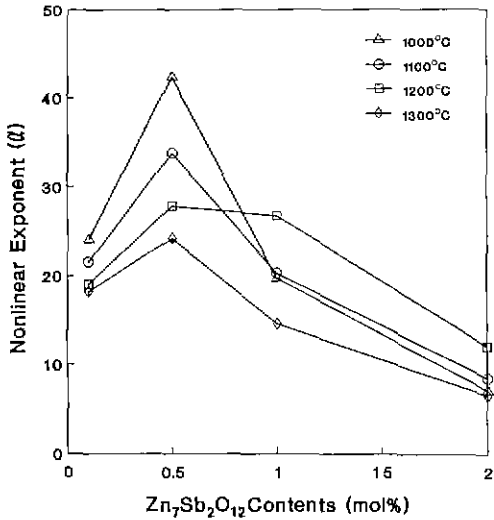


Fig. 5. Effect of Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> contents on the nonlinear exponent ( $\alpha$ ) of specimens sintered at various temperatures for 2 hr.

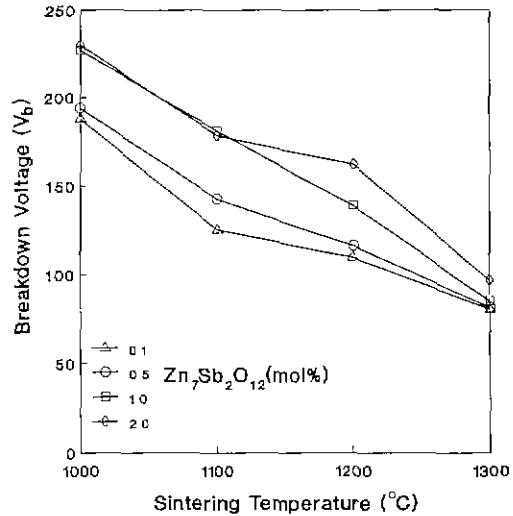


Fig. 6. Effect of Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> contents on the breakdown voltage ( $V_b$ ) of specimens sintered at various temperatures for 2 hr.

도에서 소결하였을 때의 전류-전압특성을 나타낸 것으로 소결온도 증가와 함께 임계전압은 감소하고 누수전류는 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 소결온도와 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량에 따른 시편들을 전류밀도 0.1 mA~1 mA의 전류범위에서 계산한 비직선지수( $\alpha$ )값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>의 첨가량에 의해 비직선성 지수( $\alpha$ )값이 크게 변하는 것을 볼 수가 있다. 비직선 지수( $\alpha$ )값은 0.5 mol% Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가시 가장 큰 것을 알 수가 있으며, Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량이 0.5 mol%보다 많은 1 mol%, 2 mol%에서는 비직선성 지수( $\alpha$ )값이 작아지는 것을 볼 수가 있다. 또한, 소결온도가 증가할수록 시편 모두 비직선값이 감소하는 것을 볼 수가 있으며, 1300°C에서의 급격한 감소는 ZnO 입자들의 입계에 존재하는 Bi-풍부한 상의 고온 휘발에 의한 영향으로 생각된다.

이상과 같은 결과를 과거 연구<sup>2)</sup>의 결과와 관련하여 고찰하여 보자. 비직선 전류-전압특성은 ZnO 입자들의 입계에 존재하는 액상(Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)과 관련이 있는 것으로 알려져 있다<sup>23)</sup>. 그러므로, 과거 연구결과에서 고찰하였듯이 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량이 1 mol%의 경우는 소결온도 증가와 함께 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 반응하여 pyrochlore상을 형성하고, pyrochlore상은 1100°C 이상에서 spinel상과 액상(Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)으로 분리된다. 그러나, Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량이 1 mol%보다 작은 경우는 1000°C 이하의 온도에서도 pyrochlore상 외에 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(액상)상이 존재하므로 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 용질 온도인 약 800

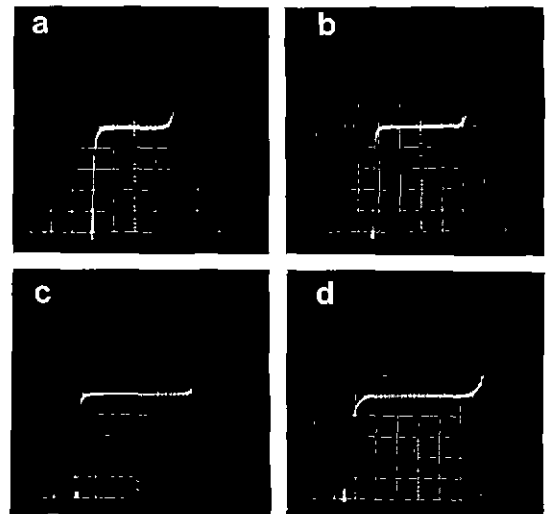


Fig. 7. I-V curve tracer (actual photo, x: 50 V/div, y: 2 mA/div) of ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CoO-Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> system sintered at 1200°C with Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> contents; (a) 0.1 mol%, (b) 0.5 mol%, (c) 1.0 mol%, (d) 2.0 mol%.

°C에서 이미 액상이 형성되어 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(액상)가 ZnO 입자들의 입계에 존재하게 된다. 따라서, Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량이 0.5 mol%인 경우는 낮은 소결온도에서도 비직선지수( $\alpha$ )값이 높은 것으로 생각된다.

또한,  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 0.5 mol%, 1.0 mol%인 경우 1200°C에서 비직선지수( $\alpha$ )값이 일정한 것은 pyrochlore 상이 이 온도에서 spinel상과 액상으로 분해되어 ZnO 입계에 액상이 존재하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 6은  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량에 따른 시편들을 여러 온도에서 각각 2시간 동안 소결한 시편의 임계전압(breakdown voltage)을 나타낸 것이다.

소결온도가 증가할수록 시편 모두 임계전압이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 동일 온도에서  $Zn_7Sb_2O_{12}$ 의 첨가량이 많을수록 임계전압이 높은 것을 볼 수가 있다. 또한, 임계전압은  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 1 mol% 이상에서 급격한 증가를 보이고 있으며, 이는  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량에 따른 ZnO 입자성장과 관련이 있다. 즉,  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 0.5 mol% 이상인 경우는 ZnO 입자성장이 매우 느리므로 동일온도에서는 ZnO 입자크기가 작아 양 전극 사이의 입계수가 많기 때문에 임계전압도 증가하게 된다.

Fig. 7은  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량에 따른 시편들을 1200°C에서 2시간 동안 소결한 후 측정된 실제 전류-전압특성이다. 그림에서 볼 수 있듯이  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 0.5 mol%, 1.0 mol%인 경우 비직선 특성이 우수한 것을 알 수가 있으며, 임계전압은  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 많을수록 증가하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CoO-Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>계에 Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub>를 각각 0.1 mol%, 0.5 mol%, 1.0 mol%, 2.0 mol% 첨가한 시편의 전기적 특성을 고찰한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. ZnO 입자의 입도분포 곡선은  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 0.1 mol%, 0.5 mol%일 경우 입도분포 곡선은 넓은 분포를 하고 있으나, 1 mol%에서는 좁은 입도분포를 하였다. 그러므로  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 적을수록 평균입계에 따른

표준편차는 크다.

2.  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 적을수록 임계전압은 작아졌으며, 누설전류밀도는 오히려 증가하였다. 이는 ZnO 입자크기의 증가에 따른 도전면적의 증가와 장벽전압 수의 감소에 의한 영향인 것으로 생각된다.

3. 비직선 전류-전압특성은  $Zn_7Sb_2O_{12}$  첨가량이 0.5 mol%일 때 가장 우수한 특성을 보였다. 이는 0.5 mol%의  $Zn_7Sb_2O_{12}$ 를 첨가할 경우 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 반응하여 pyrochlore 상으로 되고 일부 반응에 참여하지 않은 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 액상으로 ZnO 입계에 형성되므로서 높은 비직선 특성을 보이는 것으로 생각된다.

#### REFERENCES

1. L.M. Levinson, "Ceramic Transaction (Advance in Varistor Technology)," Vol. 3, American Ceramic Society, Westerville, Oh, 1989.
2. M. Matsuoka, "Non-ohmic Properties of ZnO Ceramics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **10**(6), 36-46 (1971).
3. E. Olsson and G.L. Dunlop, "The Effect of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Content on the Microstructure and Electrical Properties of ZnO Varistor Materials," *J. Appl. Phys.*, **66**(9), 4317-4324 (1989).
4. T. Takemura, M. Kobayashi, Y. Takada, and K. Sato, "Effects of Antimony Oxide in the Characteristics of ZnO Varistors," *J. Am. Ceram. Soc.*, **70**(4), 237-241 (1987).
5. T. Takemura, M. Kobayashi, Y. Takada, and K. Sato, "Effects of Bismuth Sesquioxide on the Characteristics of ZnO Varistors," *J. Am. Ceram. Soc.*, **69**(5), 430-436 (1989).
6. T. Asokan and R. Freer, "Characterization of Spinel Particles in Zinc Oxide Varistors," *J.M.S.*, **25**, 2447-2453 (1990).
7. 김경남, 한상목, "Zn<sub>7</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 첨가량이 ZnO 바리스터의 입자성장파 미세구조에 미치는 영향," *요업학회지*, **30**(11), 956-961 (1993).
8. M. Inada, "Formation Mechanism of Nonohmic Zinc Oxide Ceramics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**(3), 409-419 (1980).