

3-성분 종입자법으로 제조한 저전압 ZnO 바리스터의 전도특성 (Electrical Conduction Mechanism of the Low-Voltage ZnO Varistor Fabricated with 3-Composition Seed Grain)

이준웅*, 장경옥**
(Joon-Ung Lee, Kyung-Uk Jang)

요 약

ZnO 바리스터는 전기전자 장치에 비이상적인 썬어지 혹은 잠음신호가 침입하는 것을 막기위 해서 폭넓게 사용되고 있다. 많은 연구자들은 저전압 바리스터를 제조하기 위해서 여러가지 방법을 제시하였다. 그렇지만, 그러한 방법들은 6V이하의 동작 전압을 갖는 바리스터를 제조하기 는 어렵다.

본 연구에서는 새로운 3-성분 종입자법으로 제조한 바리스터의 전도특성을 보고 하고자 한 다.

온도범위 20-150°C 및 전류 범위 $10^{-8} \sim 10^{-1} \text{ A/cm}^2$ 에서 관찰된 바리스터의 전도특성은 측정전 류가 증가함에 따라서 다른 기구를 갖는 3개의 영역으로 구분 되었다. 측정전류가 10^{-3} A/cm^2 이하인 경우에 오옴전도 혹은 누설전류 영역으로 해석 할 수 있었다. 측정 전류가 10^{-3} A/cm^2 부근에서는 이중 쇼트키 장벽에 의한 전도로 해석할 수 있었으며, 또한 10^{-3} A/cm^2 이상의 전 류 영역에서는 터널 전도 전류로 해석 할 수 있었다.

이상의 결과로 부터 3-성분 종입자법으로 저전압 바리스터를 제조하는 방법은 지금까지 보고 된 어느 다른 방법 보다도 우수하며, 그 전도기구를 제시하였다.

Abstract

The ZnO varistors are widely used to protect electrical/electronic circuits from a abnormal surge and/or noise signal. Some workers reported various methods for making the low voltage varistors. Those may be difficulty to make varistors having knee voltage below 6V. This study presents the electrical conduction properties of the varistor fabricated by a new method of three-composition seed grain.

The conduction properties of varistor observed in the temperature range of 20~150°C and at the current range of $10^{-8} \sim 10^{-1} \text{ A/cm}^2$ was divided into the three region having different mechanism as the current increased: The region below 10^{-3} A/cm^2 was showed by the ohmic conduction. The region 2 near the 10^{-3} A/cm^2 can be explained by the double schottky barrier, and the region 3 above 10^{-3} A/cm^2 was dominated by the tunneling effect.

It is concluded that the method by three-composition seed grain may be better than any methods, to make varistors having knee voltage below 6V.

* : 광운대학교 공대 전기공학과 교수

** : 광운대학교 공대 전기공학과

표 1. 시편의 Seed grain 혼합비
Table 1 Mixture ratio of seed in sample

TiO ₂ mol%	0					0.5				
SG wt%	0	5	10	20	40	0	5	10	20	40
Sample-No	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	/	# 7	# 8	# 9	# 10
TiO ₂ mol%	1					2				
SG wt%	0	5	10	20	40	0	5	10	20	40
Sample-No	/	#12	#13	#14	#15	/	#17	#18	#19	#20

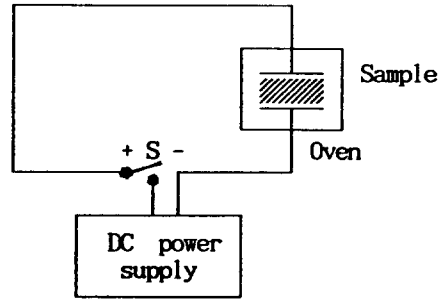


그림 2. 전압-전류 측정장치
Fig. 2 Block diagram for V-I measuring device

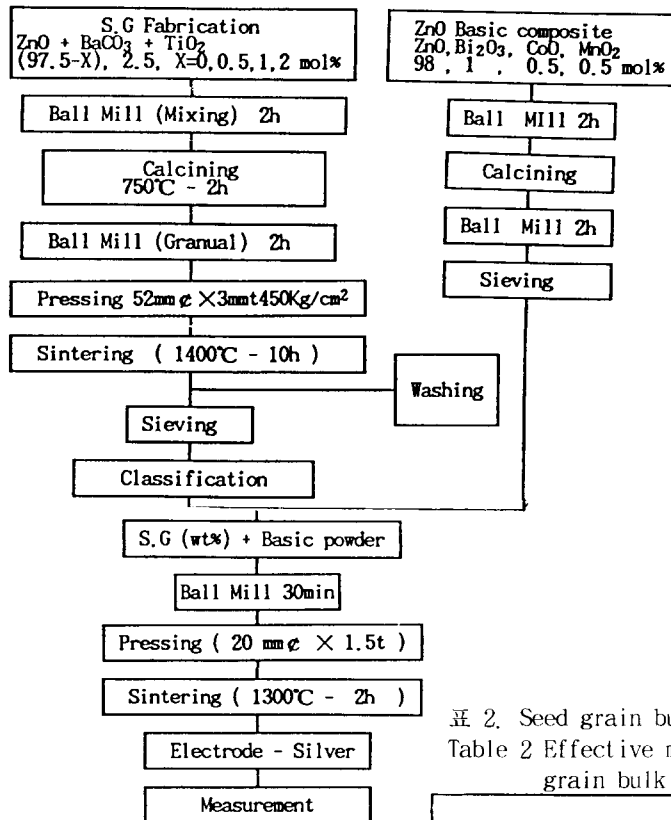


그림 1. 종입자와 시편제작 과정
Fig. 1 Fabrication procedure of seed grains and samples

표 2. Seed grain bulk의 평균입자크기
Table 2 Effective mean grain in seed grain bulk

Seed Grain	평균 입자 크기 [μm]
S. G. BULK NO1	13.51
S. G. BULK NO2	17.85
S. G. BULK NO3	22.73
S. G. BULK NO4	27.78

1. 서론

반도체 소자는 기기의 소형, 경량화 및 다기능화와 고신뢰화를 목적으로 통신부품 및 전력기기 등에 사용되고 있다. 그러나 반도체 소자는 surge 전압 또는 noise 전압에 대하여 민감하게 반응하여 오동작을 일으키고 파괴에 이르는 경우도 있다. 이 때문에 이들 소자를 surge 전압과 noise로부터 보호하기 위한¹⁾ 저전압 surge absorber를 개발할 필요성이 있다.^{2), 3)}

지금까지 저전압 surge absorber로 사용된 Zener 다이오드는 surge 내량이 낮기 때문에 surge 내량이 높은 저전압 ZnO 바리스터에 대한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다.³⁾

일반적으로 고용량 저전압 ZnO 바리스터는 성분 변화, 소결조건 변화 2-성분 중입자법에 의한 제작 방법이 보고 되어 있다. 그러나, 성분 변화와 소결조건 변화에 의한 저전압 ZnO 바리스터의 개발은 저전압화가 어렵고, 2-성분 중입자에 의한 방법은 저전압화를 이루는 데는 좋지만 바리스터의 신뢰도를 나타내는 비직선계수가 떨어진다는 보고가 있다.²⁾

따라서 본 연구에서는 비직선계수를 향상시키고 동작 전압을 저전압화 하기 위해서 3-성분 중입자법으로 제조된 저전압용 ZnO 바리스터를 온도범위 20~150°C에서 전도특성을 보고하고자 한다.

2. 시편제조 및 측정방법

2.1 Seed Grain 제조와 시편제조

본 실험에서는 4종류의 3성분 중입자를 얻기 위해서 ZnO(97.5 - x mol%), BaCO₃ (2.5 mol%), TiO₂ (x=0, 0.5, 1, 2 mol%)의 조성을 성형한 후 1400°C에서 10시간 동안 소결하였다. 이 소결체를 증류수로 분해시켜 4종류의 중입자를 얻었다. 또한, 바리스터 시편은 ZnO(98mol%), Bi₂O₃(1mol%), CoO(0.5mol%), MnO₂(0.5mol%)의 조성에 4종류의 중입자를 각각 0.5, 10, 20 및 40 wt% 혼합하여 그림 1과 같은 공정으로 제조하였다. 여기서 제조된 시편의 크기는 직경 20mm, 두께 1mm로 제조하였다. 제조된 시편의 양쪽면에 은 전극을 프린트 방법으로 직경 16mm로 하였다.

표 1은 TiO₂ mol% 변화로 조성된 중입자 바리스터 기본조성과 wt%로 변화시켜 제조한 시편의 중입자 혼합비를 나타낸다.

2.2 미세구조 관측

제조된 seed grain bulk 내의 결정립 성장 및 시편의 미세구조를 관측하기 위해 bulk를 열적 예칭한후 Industrial Microscope Opti-photo (Nicon Co, Japan)를 이용하여 미세구조를 관찰하였다. 이때 각 시편의 열적 예칭 조건은 1100°C에서 25분간 하였다.

2.3 전압 전류 측정

온도범위 25~120°C에서 전압-전류 측정을 위해 DC power supply (Kotronix Co, KOREA)와 Electrometer (Keithley Co, 617 Programable Electrometer)를 그림 2와 같이 구성하였다. 또한, 전압-전류 측정시 시편에서 발생하는 주울열의 영향을 억제하기 위해 전류범위를 100 mA로 제한하였다.

3 실험결과 및 고찰

3.1 미세구조 관측

3.1.1 Seed grain bulk 와 중입자의 미세구조 관측

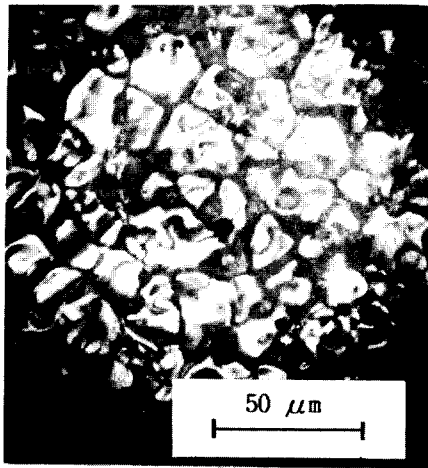
사진 1은 제조된 seed grain bulk의 미세구조를 관측한 결과이다. 사진에서 관찰할 수 있는 바와 같이 TiO₂ 함량이 증가함에 따라 seed grain bulk 내의 결정립이 성장하였다. 이는 이미 보고된 바있는 ZnO입자 내부로 TiO₂의 치환반응에 의해 결정립이 성장하는 것으로 사료된다.⁶⁾

표 2는 사진에서 Jefferies법에 의해 구한 결정립의 평균크기를 나타내고 있다. TiO₂가 첨가되지 않은 중입자의 평균크기는 13.51 μm였고, TiO₂가 2 mol%첨가된 중입자의 평균크기는 27.78 μm였다.

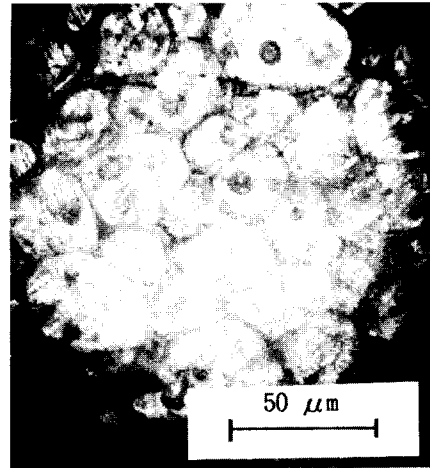
또한, 사진 2는 제조된 seed grain bulk를 끓는 물로 분해시켜 얻은 중입자를 나타내고 있다. 사진 2에서 볼수 있는 바와 같이 중입자의 입자크기는 TiO₂의 첨가 함량이 증가함에 따라 증가하는 양상을 보이지만, seed grain bulk를 물분해 시켜 얻은 중입자의 크기는 TiO₂의 첨가량이 0.5 mol%에서 포화되는 현상을 보였다.

즉, 표 3에 나타낸 바와 같이 TiO₂의 첨가량이 0.5 mol% 이상이 되면 seed grain bulk 내에서 입자는 불규칙 하게 성장하여 증류수로 분해시 BaO가 분해되면서 ZnO와 TiO₂의 치환반응 고용체를 분해시켜 오히려 TiO₂ 첨가량을 증가 시키더라도 크게 성장된 grain을 얻을 수 없었다.

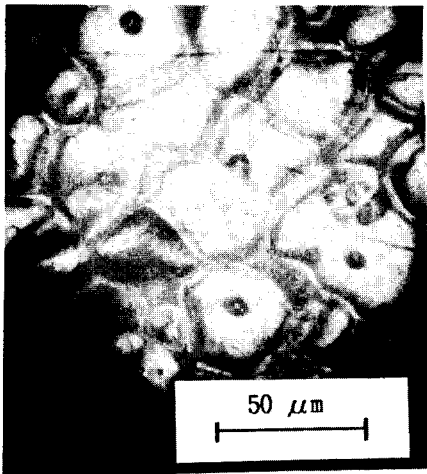
3-성분 종입자법으로 제조한 저전압 ZnO 바리스터의 전도특성



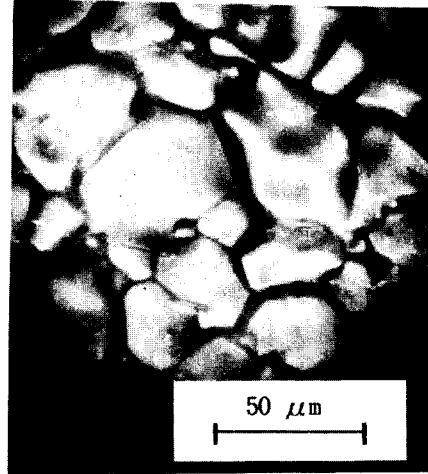
a)



b)



c)



d)

사진 1. Seed grain bulk 내의 미세구조

- a) TiO_2 0 mol% 첨가된 S.G.B. b) TiO_2 0.5 mol% 첨가된 S.G.B.
 c) TiO_2 1 mol% 첨가된 S.G.B. d) TiO_2 2 mol% 첨가된 S.G.B.

Photo 1. Microstructure of seed grain bulks

- a) S.G.B. with TiO_2 0 mol% b) S.G.B. with TiO_2 0.5 mol%
 c) S.G.B. with TiO_2 1 mol% d) S.G.B. with TiO_2 2 mol%

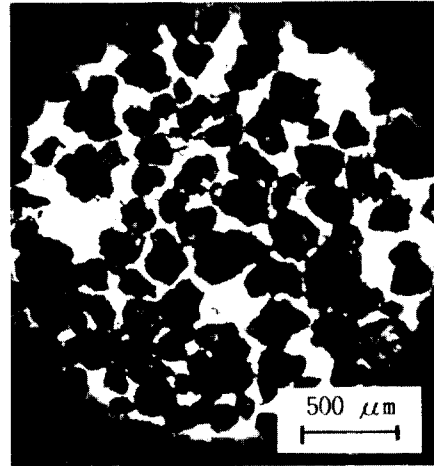
3.1.2 종입자 제조시 첨가된 TiO_2 mol% 변화에 따른 시편의 미세구조

사진 3은 시편제조시 첨가된 종입자의 TiO_2 mol% 변화에 따른 시편 #1, 2, 7, 12 및 17에 대한 미세구조를 보여주고 있다. 사진에서 관찰 할 수 있는 바와 같이 종입자 제조시 TiO_2

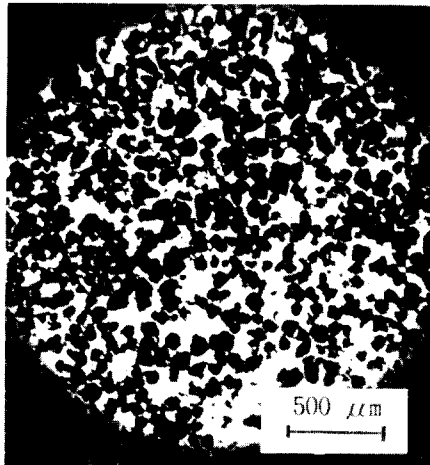
첨가량을 증가시키에 따라 시편의 입자는 종입자를 첨가하지 않은 시편의 유효 평균입자 크기보다 증가하는 것을 알 수 있지만, 종입자 제조시 첨가된 TiO_2 양에 비례하여 시편의 평균입자크기는 증가하지 않았다. 이는 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 시편내의 유효 평

표 3. Seed grain의 평균입자크기
Table 3. Effective mean grain size in seed grain

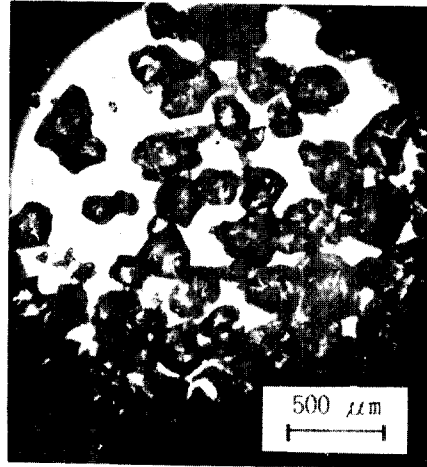
Seed Grain	평균 입자 크기 [μm]
S.G. Powder NO1	117.64
S.G. Powder NO2	133.33
S.G. Powder NO3	166.66
S.G. Powder NO4	181.82



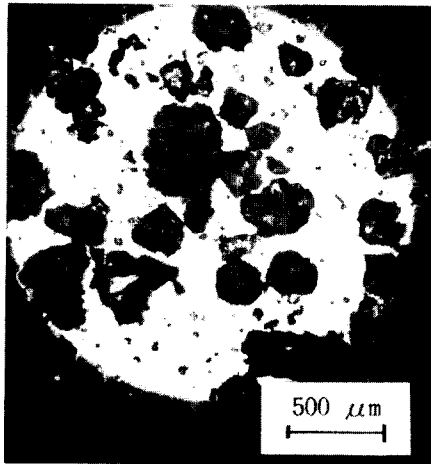
c)



a)



d)



b)

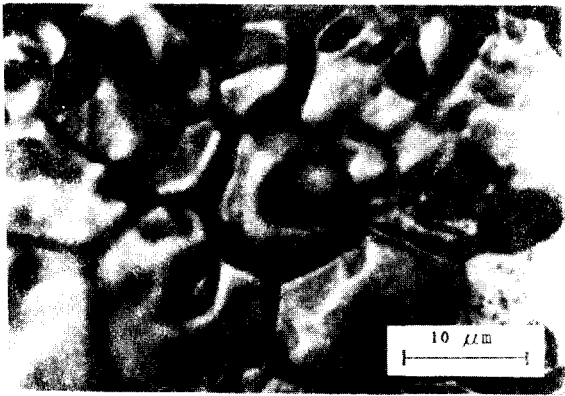
사진 2. Seed grain 분말의 미세구조

- a) TiO_2 0 mol% 첨가된 S.G.
- b) TiO_2 0.5 mol% 첨가된 S.G.
- c) TiO_2 1 mol% 첨가된 S.G.
- d) TiO_2 2 mol% 첨가된 S.G.

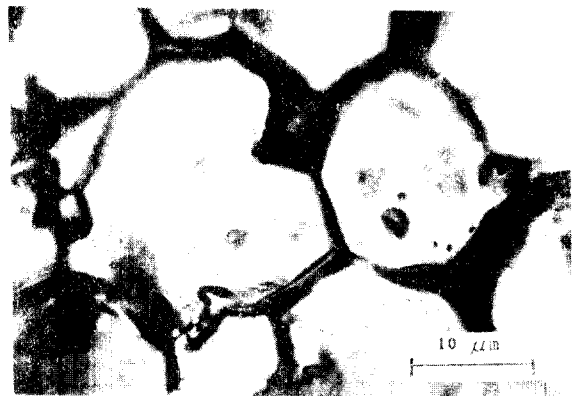
Photo 2. Microstructure of seed grain powder

- a) S.G. with TiO_2 0 mol%
- b) S.G. B. with TiO_2 0.5 mol%
- c) S.G. with TiO_2 1 mol%
- d) S.G. B. with TiO_2 2 mol%

3-성분 중입자법으로 제조한 저전압 ZnO 바리스터의 전도특성



a)



d)



b)



e)



c)

사진 3. 시편 #1, 2, 7, 12, 17의 미세구조

- a) 시편 # 1 b) 시편 # 2
c) 시편 # 3 d) 시편 # 12
e) 시편 # 17

Photo 3. Microstructure for the sample # 1, 2, 7, 12, 17

- a) Sample # 1 b) Sample # 2
c) Sample # 3 d) Sample # 12
e) Sample # 17

표 4. 시편 #1, 2, 7, 12, 17에 대한 평균입자 크기

Table 4. Mean grain size for the sample #1, 2, 7, 12, 17

Sample No.	평균 입자 크기 [μm]
Sample No. # 1	5.62
Sample No. # 2	8.18
Sample No. # 7	10
Sample No. # 12	9
Sample No. # 17	7.5

균 입자크기가 0.5 mol%에서 포화하고, 그 이상에서는 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 표 4 및 시편의 미세구조로부터 시편의 입자성장은 첨가된 중입자의 계면확산, 표면확산의 작용으로 이루어지며, TiO₂ 첨가량이 0.5 mol%



사진 4. 시편 # 1, 2, 7, 12, 17의 미세구조
 a) 시편 # 7 b) 시편 # 8
 c) 시편 # 9 d) 시편 # 10

Photo 4. Microstructure for the sample
 # 7, 8, 9, 10
 a) Sample # 7 b) Sample # 8
 c) Sample # 9 d) Sample # 10

이상이 되면 시편에 결함 및 이상 상을 증가시켜 입자성장을 억제하는 것으로 사료된다.

3.1.3 시편 제조시 혼합된 종입자의 wt% 변화에 따른 시편의 미세구조

사진 4는 시편 제조시 첨가된 종입자의 wt% 변화에 따른 시편 #7, 8, 9 및 10에 대한 미세구조를 보여주고 있다. 일반적으로, 시편에 첨가한 종입자는 원료분말과 소결과정중 1차 및 2차 입자 성장 과정을 통해 유효 평균 입자의 크기가 성장하는 것으로 사료된다. 사진에서 관찰할 수 있는 바와 같이 시편 제조시 첨가된 종입자의 wt%가 증가함에 따라서 유효 평균입자의 크기는 10 wt% 에서 11.25 μm로 커졌지만 10 wt% 이상 종입자를 첨가하였을 때는 시편에 결함이 생겨 평균 입자크기를 증가시키지 못하고 기공 생성율이 증가하는 것을

표 5 시편 # 7, 8, 9, 10에 대한 평균입자크기
 Table 5. Mean grain size for the sample # 7, 8, 9, 10

Sample No.	평균 입자 크기 [μm]
Sample No. # 7	10
Sample No. # 8	11.25
Sample No. # 9	9
Sample No. # 10	9

알 수 있다. 표 5는 시편 제조시 첨가된 종입자의 wt% 변화에 따른 시편내의 유효평균입자

3-성분 종입자법으로 제조한 저전압 ZnO 바리스터의 전도특성

크기를 보여주고 있다. 표 5에서 알 수 있는 바와 같이 시편에 첨가된 100 μ m이상의 종입자가 불규칙적으로 분포하므로 유효평균입자를 크게 증가시키지 못하는 것으로 사료된다.

3.2 전압-전류 측정

3.2.1 ZnO Varistor에 혼합한 종입자의 TiO₂ mol% 의존성

그림 3은 ZnO 바리스터 제조시 첨가된 종입자를 5 wt% 첨가한 전압-전류 곡선이다. 그림 3은 종입자 조성시 첨가된 TiO₂ mol%에 따른 바리스터의 동작전압을 나타낸다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 동작전압은 TiO₂ 첨가량이 0.5 mol%일 때 최소동작전압 값을 나타내고 있다. 이는 종입자 제조시 첨가된 TiO₂의 첨가량이 0.5 mol%일때 가장 큰 종입자를 얻은 사실과 잘 일치한다. 즉, TiO₂의 첨가량이 0.5 mol% 이상 되면 입자의 크기가 불규칙하게 성장하여 물 분해시 작은 입자로 되고 입자의 표면에 작은 곡률반경이 생겨 종입자를 핵으로 하여 시편의 유효평균입자의 크기를 크게 증가시키지 못하여 동작전압을 저하시키지 못하는 것으로 사료된다.

3.2.2 시편에 첨가된 종입자의 wt% 의존성

그림 5는 TiO₂와 종입자를 변화시켜 제조한 시편의 전압-전류 곡선이다. 그림 5로부터 시편의 동작전압은 TiO₂를 함유한 종입자 첨가량이 5wt% 까지 감소하나, 그 이상 첨가량을 증가시키면 동작전압은 높아진다. 이러한 현상은 시편에 첨가된 종입자가 5 wt%일때 유효평균입자의 크기가 가장 커지고, 시편에 첨가된 종입자의 곡률반경과 원료분말의 곡률반경 사이에 최적의 계면확산을 일으켜 시편의 동작전압을 저하시키는 것으로 사료된다.

3.2.3 전도기구 및 온도의존성

그림 4는 표 1과 같은 조성으로 제조된 시편중 #7에 대한 전압-전류 특성을 나타낸다. L. M. Levinson et al. 에 의하면 일반적으로 바리스터의 동작전압 V_b 는 미세구조로부터 바리스터의 입자크기가 d 이고, 입계당 파괴전압 V_g 을 2~3 V라고 하면 다음과 같다.^{7,8)}

$$V_b = V_g \times (\text{시편의 두께} / \text{입자의 직경}) = V_g \times N$$

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 바리스터의 동작전압은 입계의 수 및 입계의 파괴전압

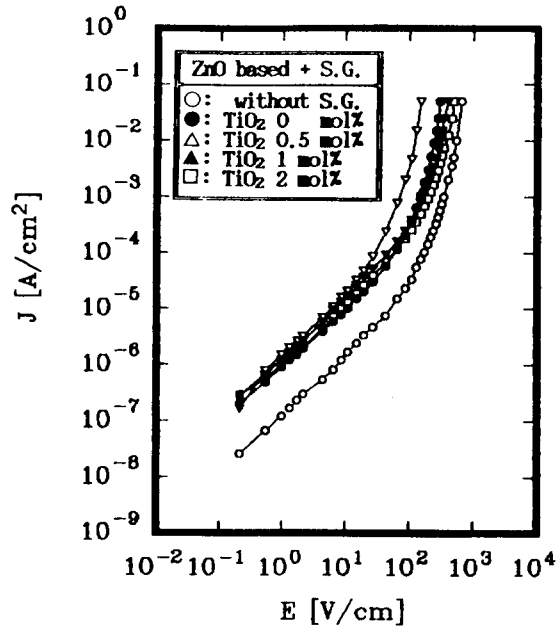


그림 3. 종입자가 5wt% 첨가된 시편의 전압-전류특성

Fig. 3 V-I characteristic of samples with the seed grain of 5 wt%

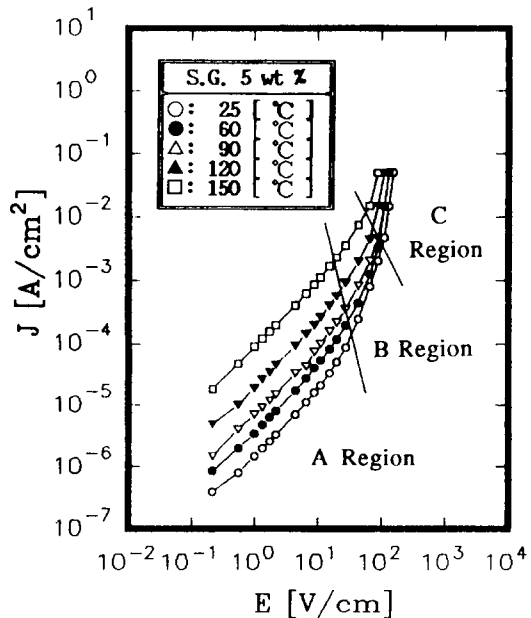


그림 4. 제조된 시편의 동작전압

Fig. 4 Knee Voltage of fabricated samples

에 의존한다. 그러나, 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 시편의 두께가 1mm이고, 유효평균 입자의 크기가 수십 μm 일때, 동작전압이 $5\text{V}(V_{1(\text{mA}/\text{cm}^2)})$ 가 되는 것을 설명 할 수 없다. 이러한 실험결과는 큰 종입자를 시편에 첨가하면 종입자가 시편내에 불규칙적으로 분포하여, 동작전압이 유효평균입자의 크기에 의존하지 않고, 시편 두께에 직렬로 연결된 종입자의 영향을 받게된다. 또한, 종입자를 첨가하여 소결할 경우 시편의 미세구조 사진에서 확인 할 수 있는 바와 같이 큰 종입자와 원료 분말사이의 곡률반경 차이로 인한 종입자의 2차 입자 성장으로 입자의 크기가 성장하여 바리스터의 동작전압을 낮추는 것으로 사료된다

표 6에는 이들 시편에 대한 동작전압을 나타냈는데, 특히 종입자 조성시 TiO_2 도핑량이 0.5 mol%인 시편에서 동작전압 $5V_{1(\text{mA}/\text{cm}^2)}$ 이었다. 또한 그림 4은 시편 #7에 대한 전압-전류의 온도 의존성을 나타내고 있으며, 이를 전도 양상에 따라 세 개의 영역으로 나눌 수 있었다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 저전계 영역에서는 측정온도에 크게 의존하여 전류가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 전계의 증가에 따라서 전류밀도의 증가비율이 선형적으로 비례하는 것을 확인 할 수 있었다.

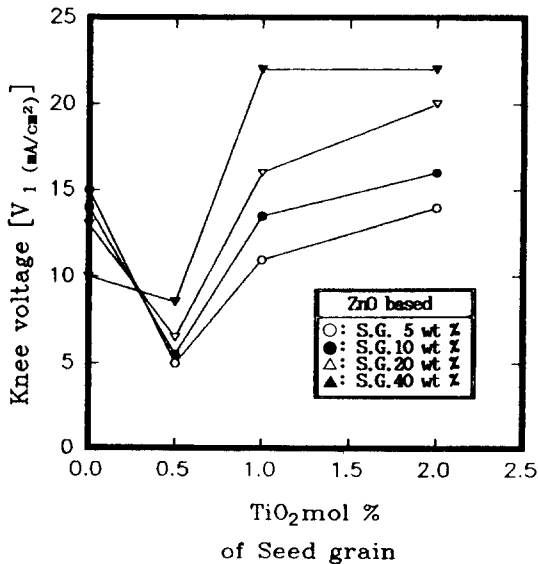


그림 5. 종입자의 양을 변화시켜 첨가한 시편의 전압-전류특성
Fig. 5 V-I characteristic of samples with the various seed grain

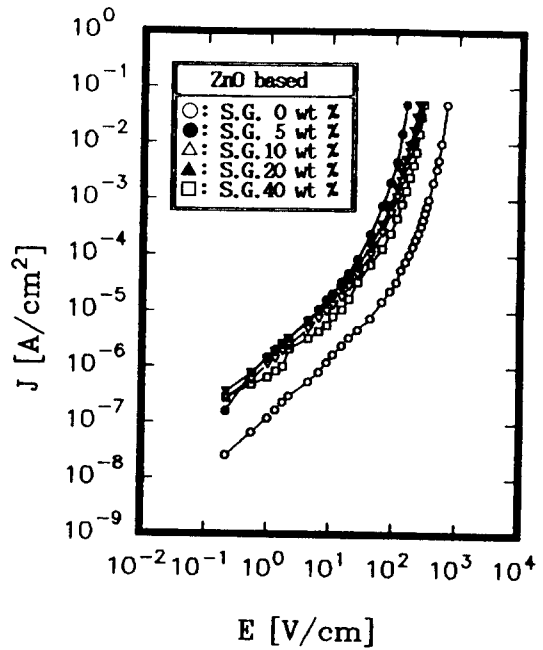


그림 6. 시편 # 7에 대한 전압-전류 특성의 온도 의존성
Fig. 6 Temperature dependence of voltage-current for the sample # 7

표 6 시편의 동작 전압 $V_{1(\text{mA}/\text{cm}^2)}$
Table 6. Knee Voltage of fabricated samples

Sample No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
V_1 (mA/cm ²)	50V	15V	14V	13V	10V
Sample No.	# 7	# 8	# 9	# 10	
V_1 (mA/cm ²)		5V	5.5V	6.5V	8.5V
Sample No.	# 12	# 13	# 14	# 15	
V_1 (mA/cm ²)		11V	13.5V	16V	22V
Sample No.	# 17	# 18	# 19	# 20	
V_1 (mA/cm ²)		14V	16V	20V	22V

저전계영역을 지나고 난후 전이영역에서는 온도와 인가 전계에 따라서 전류밀도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 전극에서 시편으로 전자가 주입되어 온도상승에 따라 주입된 전자의 활성화에 의해서 전류밀도가 증가하는 것으로 사료된다. 다음에 측정온도에 거의 영향을 받지않고, 작은 전계의 변화에 따라서

3-성분 중입자법으로 제조한 저전압 ZnO 바리스터의 전도특성

급격히 전류밀도가 증가하는 영역을 확인 할 수 있다. 이상의 관찰 결과로 부터 3-성분 중입자를 첨가한 바리스터의 전도기구를 제시하고자 전도 양상에 따라 세 개의 영역으로 나눌 수 있었다. ; 먼저 저전류 오옴 영역 A를 지나고 난 후, 비선형 전도영역 B를 거쳐 바리스터 동작전류영역 C가 나타난다. 이들 영역을 구분하여 설명하면

A) 저전류 오옴영역 : A 영역
인가 전계에 의존하지 않는 오옴영역 A는 다음의 열적 이온 전도식으로 해석할 수 있다.⁴⁾

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

J: 누설 전류 밀도
k: 볼츠만정수 (1.38×10^{-23} J/deg)
U: 활성화 에너지

B) 비선형 전도영역 : B 영역
비선형 전도영역 B에 대해서 많은 연구가 진행되어 왔지만,^{4), 5)} 본 실험에서는 다음의 이중 Schottky 모델을 적용하여 제 물리정수를 구하였다.⁵⁾

$$J = J_0 \exp(-\Phi_D/2kT) \quad (2)$$

$-\Phi_D$: Trap level

C) 동작전류영역 : C 영역
C영역은 바리스터의 동작전압을 결정하는 영역으로서, 이 영역에 대한 해석은 열적요인에 주로 영향을 받기 때문에 Fowler-Nordheim의 터널 이론식으로 설명 할 수 있다.⁷⁾

$$J = J_0 \exp(-\gamma/E) \quad (3)$$

여기서, $\gamma = 8\pi(2m)^{1/2}/3he$ 이다. 특히, 이 영역에서 온도의 영향을 약간 받는 것은 미세구조 사진에서 확인 할 수 있는 바와 같이 시편에 중입자를 첨가함으로써 미반응 불순물에 의한 영향과 큰 중입자와 원료 분말 사이에 2차 재결정화를 이루면서 생긴 기공의 영향 때문이라고 사료된다.⁶⁾ 더욱, 첨가된 중입자와 중입자 사이에 생긴 넥형태의 약한 절연층이 존재하여 온도의 영향을 약간 받는 것이라고 사료된다.

이상을 종합하여 각 시편에 대한 물리정수를 표 7에 나타냈다. 표 6과 표 7로 부터 중입자

표 7. 시편의 활성화 에너지 및 Trap준위
Table 7. Activation energy and trap level in samples

	누설 전류 영역의 활성화 에너지 [eV]	비선형 전도 영역에서의 Trap 준위 [eV]	동작 전류 영역에서의 전장벽 [eV]
# 1	0.360	0.600	0.613
# 2	0.260	0.446	0.457
# 3	0.287	0.595	0.601
# 4	0.300	0.693	0.700
# 5	0.304	0.548	0.620
# 7	0.367	0.815	0.820
# 8	0.130	0.526	0.538
# 9	0.270	0.374	0.470
#10	0.214	0.363	0.451
#12	0.294	0.411	0.552
#13	0.312	0.600	0.760
#14	0.224	0.928	0.900
#15	0.357	0.708	0.754
#17	0.450	0.620	0.653
#18	0.342	0.486	0.500
#19	0.336	0.556	0.610
#20	0.245	0.417	0.428

첨가에 따른 시편의 동작전압, 활성화 에너지 및 입계층의 트랩준위 관계를 알 수 있다; 즉 중입자 조성시 TiO₂의 도핑양이 0.5 mol% 일때 저전계에서는 누설전류의 온도의존성을 낮추고 고전계에서는 동작전압을 급격히 저하 시킴을 알 수 있었다.

4. 결 론

3성분 중입자법으로 제작된 저전압용 ZnO 바리스터의 온도변화에 따른 전도 특성을 분석한 결과 다음과 같다.

- 1) 중입자 조성시 TiO₂ 첨가량이 0.5 mol%일때 시편의 최저 동작전압을 나타냈다.
- 2) 시편에 중입자의 첨가량이 5 wt %일때 최저 동작전압을 나타냈다.
- 3) 동작전압의 감소는 입계층의 trap level 저하로 이해 할 수 있었다.

참고 문헌

1. Michio Matsuoka "Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics", J. Appl. Phys. 10(6).

- pp. 736-746, June 1971.
2. Kazuo Eda, Masanori Inada, Michio Matsuoka, "Grain Growth Control in ZnO Varistors Using Seed Grains", J. Appl. Phys, 54 (2), pp. 1095-1099, Feb. 1983.
 3. Deltlev F. K. Hennings, Ruediger Hartung, Piet J. L. Reijnen, "Grain Size Control in Low-Voltage Varistors", J. Am. Ceram. Soc., 73(3) pp. 645-648, Mar. 1990.
 4. G. D. Mahan, "Intrinsic Defects in ZnO Varistors", J. Appl. Phys, 54(7), pp. 3825-3832, Jul. 1983.
 5. T. K. Gupta, W. G. Carlson, "Barrier Voltage and Its Effect on Ability of ZnO Varistor", J. Appl. Phys, 53(11), pp. 7401-7409 Nov. 1982.
 6. J. C. Simpson, J. F. Cordaro, "Characterization of Deep Levels in Zinc Oxide", J. Appl. Phys, 63(5), pp. 1781-1783, Mar. 1988.
 7. H. R. Philipp and Lionel M. Levinson, "High-temperature Behavior of ZnO-based Ceramic Varistor", J. Appl. Phys, 50(1), pp. 383-389, Jan. 1979.
 8. Lionel M. Levinson and H. R. Philipp, "ZnO Varistors for Transient Protection", General Electric Technical Information Series, Report No. 77CRD110, pp. 1-8, May. 1977. (1992년 9월 21일 접수)



이준웅

1940년 10월 24일생. 1964년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1970년 2월 한양대 전기공학과 석사. 1979년 3월 France국립 Montpellier 전기공학과(공박). 1990년 1~12월 미국 미시시피 주립대 교환 교수. 1992년 현재 광운대 전기공학과 교수.



장경욱

1963년 8월 27일생. 1986년 2월 광운대 전기공학과 졸업. 1988년 9월 광운대 전기공학과 석사. 1992년 현재 광운대 전기공학과 박사과정 수료.