

보로노이 네트워크를 이용한 ZnO 바리스터의 미세구조와 전기적 전도특성의 시뮬레이션 연구

황희동, 한세원, 강형부
한양대학교 전기공학과

The simulation of electrical characteristic and the microstructure of ZnO varistor with Voronoi network

Hui-dong Hwang, Se-won Han, Hyung-boo Kang
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - A microstructure of realistic ZnO varistor is constructed by Voronoi network and studied via computer simulation. In this network, the grain boundary condition is fitted from the experimental data. The effect of the variation of the uniformity of the varistor on the electrical characteristic of the varistor is simulated by using this boundary condition.

1. 서 론

Zinc Oxide 바리스터는 높은 비선형 J-E 특성을 가지는 multi-component 세라믹 반도체 소자이다. 이러한 바리스터는 ZnO에 Bi₂O₃나 MnO₂, Co₃O₄ 등을 소결하여 얻어낼 수 있다. 실험적으로 밝혀진 바에 따르면 바리스터는 항복(breakdown) 영역에서 $I = kV^{\alpha}$ (여기서 α 는 비선형계수)인 관계를 가지며, 여기서 α 는 소자의 비선형 정도를 나타낸다. α 의 값은 인가 전압에 따라 다르지만 보통 50이상으로 알려져있다.

전기, 전자 회로들은 번개나 정전기등 여러 가지 이유에 의해 발생한 임펄스 서지에 의해 손실을 입을 수 있다. ZnO 바리스터는 전류, 에너지 흡수성이 매우 크므로 저압과 고압에서 surge arrester로 폭 넓게 사용되고 있다[1].

바리스터의 항복전압은 실제적인 이용 면에서 아주 중요한 파라미터이다. 바리스터는 다결정 세라믹 소자이고, 항복 전압은 이 입자계면의 장벽과 관계가 있다. 바리스터의 첨가물들은 입계에 이중 back-to-back Schottky 장벽을 형성하고 이 때문에 바리스터의 비선형적인 특성이 나타난다[2]. 그러나 계면의 미세구조는 불균일하고 각 계면의 전기적 성질 또한 동일하지 않다. Bulk 타입 바리스터는 선형적인 접합과 비선형적인 접합이 임의의 네트워크로 직·병렬 연결된 다양한 접합으로 이루어진다.

어진다.

각각 다른 형태의 미세접합이 bulk타입의 바리스터에 미치는 기하학적인 영향은 매우 중요하다. 그러나 단지 각각의 입계의 성질을 일률적으로 평균하여 바리스터의 특성을 묘사하는 것은 적절하지 못하다. 한편 바리스터 내의 각 입자들을 하나의 정사각형 모양의 block으로 표현하는 block모델을 이용한 시뮬레이션이 행해져 왔다[3]. 그러나 이 모델은 바리스터 특성의 정량적 해석에는 도움이 되지만 실제 소자의 불규칙한 미세구조와는 상당한 차이가 있다. 최근에 이러한 실제소자에 근접하는 통계적인 모델이 소개되었다[4]. 이 모델은 불규칙하게 배열된 2차원 보로노이 네트워크(Voronoi network)로 구성하여 실제 바리스터에 아주 근접한 형상을 실현한 것이다.

본 연구에서는 보로노이 네트워크를 이용하여 실제에 가까운 바리스터의 미세구조를 구현하고, 이를 이용한 시뮬레이션을 통해 바리스터의 전기적 특성을 정량적으로 해석하였다.

2. 모델링

2.1 보로노이 네트워크

보로노이 네트워크에서 각 입자는 다양한 형태와 크기의 다각형으로 표현되고, 각 입자에 이웃한 입자의 수는 각각 다르다. 실제 바리스터의 입계들의 특성은 거의 모든 입자에서 달리 나타난다[1][2]. 그러나 본 연구에서는 실험 데이터를 기초로 그중 대부분의 비율을 차지하고 있는 조건을 택하여 근사화시켜 보로노이 네트워크를 구성하였다. 이때 이네트워크에서 이루어지는 전기적 전도특성은 키르히호프의 법칙을 적용하여 시뮬레이션 하였다.

본 연구에서 사용된 2차원 보로노이 네트워크를 구성하려면 먼저, 완전히 무작위이거나, 어느 정도 연관을 가지는 중심점들을 임의로 정의한다. 각 중심에는 하나의 다각형 모양 cell이 할당된다. 이러한 보로노이 다각형은 이웃한 중심점들을 연결한 직선의 수직 이등분선을 교차시킴으로써 만들 수

있다(5).

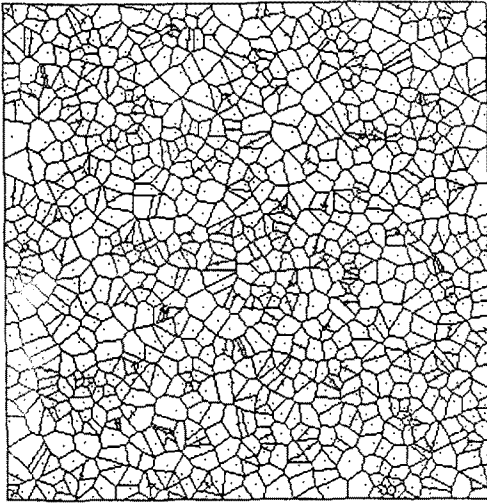


그림 1. 보로노이 네트워크
($d=5.0$, 986개의 중심점)

물리적으로 보로노이 네트워크는 각각의 중심점에서 동시에 시작하는 2차원 성장 과정으로 생각할 수 있다. 이 성장은 같은 속도로 계속되다가 두 성장면이 서로 만날 때 멈추게 된다. 그러므로 보로노이 네트워크의 기하학적 의미는 임의의 중심점으로부터의 입자 성장과 매우 흡사하다.

규칙적인 삼각격자로 구성된 중심점들로 이루어진 육각형모양의 cell 구조는 무질서도(d)가 증가하면서 점점 불규칙한 보로노이 네트워크를 구성한다. 각각의 중심점들을 그 점들이 원래 있던 위치를 중심으로 그린 반지름 d 만큼의 원판 내에서 임의의 크기와 방향으로 이동시킴으로써 무질서도가 결정된다. 그림 1은 $d=5.0$ 의 값으로 구성되는 보로노이 네트워크의 한 형태로 실제 ZnO 바리스터 미세구조와 유사하다.

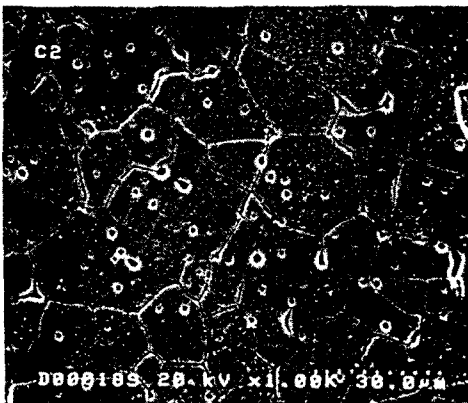


그림 2. ZnO 바리스터의 SEM조직사진

그림 2는 1200°C로 2시간 소결시켜 제조된 $B_{12}O_3$ 계 ZnO 바리스터의 SEM 조직사진이다. 이 조건에서는 약 10 μ m크기의 ZnO 입자와 B_1 절연층이 입계를 구성하고 있다. 실제적으로 ZnO 입자의 크기는 소결온도, 시간 그리고 첨가물의 종류에 따라 변화하고, 상업용으로는 주로 10~30 μ m크기의 ZnO 입자를 만들어 바리스터를 제조한다.

ZnO 바리스터의 비선형성은 입계의 비선형적인 성질에 의해 결정된다. 본 연구에서는 항복 전영역과 항복영역에서 다음과 같은 특성을 가진 미세접합을 이용하였다.

$$J(V) = \begin{cases} \frac{V}{R_g} \left(1 + \frac{V^{50}}{(V_B)^{50}} \right) & , V \leq V_{0g} \\ \frac{V}{R_g} \left(1 + \frac{(V_{0g})^{50}}{(V_B)^{50}} \right)^{7/2} \left(1 + \frac{(V_{0g})^{70}}{(V_B)^{50} V^{20}} \right)^{-5/2} & , V > V_{0g} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $J(V)$ 는 2차원 전류밀도이고, V 는 계면에 걸리는 전압이다. 또한 R_g 는 입계의 단위 면적당 누설저항을 나타내고, 그 값은 10⁹으로 하였다. V_B 는 접합의 항복전압으로 3(V)의 값을 갖는다. V_B 는 비선형계수가 그 최대 값의 반에 이를 때의 전압이다. 식 (1)은 특성곡선의 항복 전영역과 항복영역을 나타낸다. 변수 V_{0g} 에서 두 영역이 연결되고, 그 값은 약 3.467(V)정도이다. 이러한 변수들에 의해 비선형계수의 최대값 α_{max} 는 51로 정해진다.

외부 전압은 네트워크의 양쪽 가장자리를 가로질러서 인가된다. 바닥에서는 0, 제일 위에는 V 의 고정된 전압을 각각 인가한다.

각 cell들의 퍼텐셜 V_i 는 키르히호프의 법칙을 이용해서 구할 수 있다.

$$\sum_j I_{ij} J(V_i - V_j) = 0 \quad (2)$$

식(2)에서 j 는 입자 i 와 이웃한 모든 입자들을 나타내고, I_{ij} 는 입자 i 와 j 가 맞는 변의 길이이다. 그리고 전류밀도 $J(V_i - V_j)$ 는 식(1)에서 계산된 값이다.

3. 결과 및 고찰

네트워크를 통한 전류의 전도 현상을 더 심도있게 고려하기 위해 cell 구조의 전류분포를 계산하였다. 그림 3에 그 결과를 보였는데, 이는 그림 1의 네트워크에서 상부에는 100V, 하부에는 0V의 전압을 인가한 경우이다. 그림에서 각 입자의 전류밀도는 흰색에서 검은색까지의 스펙트럼으로 구별한 것으로 흰색은 전류가 흐르지 않고, 검은색일

때 최대전류가 흐르고 있음을 나타낸다.

그림 3에서 네트워크의 양 끝을 연결하는 집중된 전류 밀도의 경로가 형성된다. 이 경로를 이루는 입자에는 모두 항복전압보다 높은 전압이 인가되어 있다. 따라서 네트워크가 항복영역에 들어가면 한 경로를 통하여 거의 모든 전류가 흐름을 알 수 있다. 즉, 전류의 분포가 국부적으로 집중된다. 이 사실은 바리스터의 열화에서 puncture가 나타나는 현상을 잘 설명해 준다.

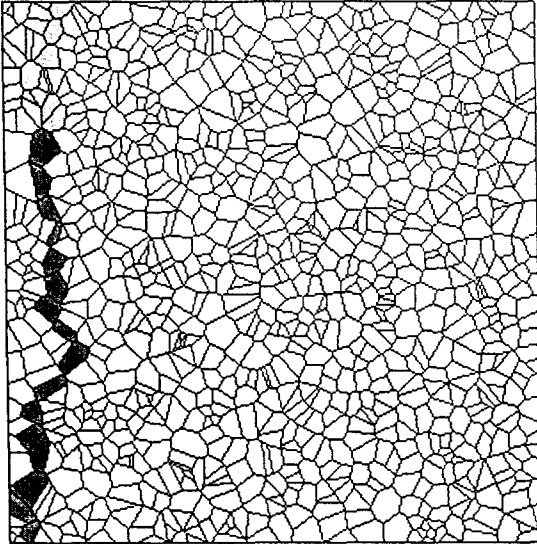


그림 3. $V=100[V]$ 일 때 네트워크에 분포된 전류($d=5.0$, 986개의 중심점)

그림 4는 무질서도를 5.0으로 고정시키고, cell의 수를 증가시켰을 때 J-E 곡선을 로그-로그 스케일로 나타낸 것으로 가로축은 인가된 전압이고 세로축은 전류밀도이다. (a)는 cell의 수를 90으로, (b)는 240, (c)는 480, (d)는 986으로 설정한 J-E 곡선을 나타낸다.

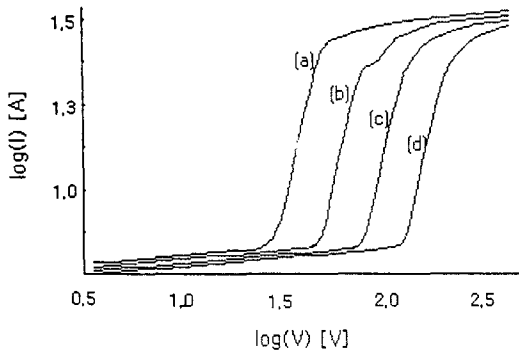


그림 4. cell수의 변화에 따른 J-E 곡선 (a)는 90개, (b)는 240개, (c)는 480개, (d)는 986개의 cell을 가진 네트워크의 J-E곡선.

그러므로 입자 하나의 크기를 약 $30\mu m$ 라 하면 (a)는 두께가 약 0.3mm인 샘플, (b)는 두께가 약 0.5mm인 샘플, (c)는 두께가 약 0.7mm인 샘플, (d)는 두께가 약 1mm인 샘플에 대한 J-E 특성 곡선으로 볼 수 있다. 한편 cell의 수가 적어질수록 항복전압 역시 작아지지만 비선형계수는 입자의 수와는 거의 무관하게 변화한다. 이 곡선의 형태는 식(1)에서 사용한 입계조건과 유사한 형태이다. 따라서 비선형계수의 값 또한 식(1)의 비선형계수와 같은 최대값 51을 가진다.

하지만, 실제 바리스터 소자의 입계조건은 일정하지 않고 각각 다른 값을 가지므로 하나의 조건만으로 표현하기에는 어려움이 따른다. 그러므로 앞으로 이런 다양한 입계의 조건을 구현하기 위해 더 많은 입계조건을 고려해야 할 필요가 있다. 또한, 기하학적인 무질서도와 입자의 크기와 형태가 바리스터의 전도특성에 미치는 영향 등에 대한 정량적인 검토가 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kazuo Eda, "Zinc Oxide Varistors", IEEE Electrical Insulation Magazine, 5(6), 28, 1989
- [2] G. D. Mahan, L. M. Levinson, and H. R. Philipp, "Theory of conduction in ZnO varistors", J. Appl. Phys. 50(4), 2799, 1979
- [3] T. K. Gupta, "Application of Zinc Oxide Varistors", J. Am. Ceram. Soc. 73(7), 1817, 1990
- [4] M. Bartkowiak, G. D. Mahan, F. A. Modine, M. A. Alim, "Influence of ohmic grain boundaries in ZnO varistors", J. Appl. Phys. 79(1), 273, 1996
- [5] D. Weaire, N. Rivier, "Soap, Cells and Statistics-Random Patterns in Two Dimensions", Contemp. Phys. 25(1), 59, 1984