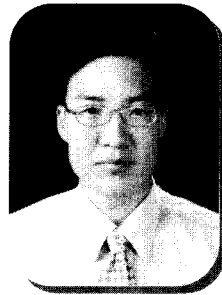


보로노이 네트워크를 이용한 ZnO 바리스터의 시뮬레이션 기술



• 한세원 •
한국전기연구원
신소재응용연구그룹 선임연구원

1. 서론

Zinc Oxide 바리스터는 높은 비선형 I-V 특성을 가지는 multi-component 세라믹 반도체 소자이다. 이러한 바리스터는 ZnO에 Bi₂O₃나 MnO₂, Co₃O₄ 등을 소결하여 제작된다. 실험적으로 밝혀진 바에 따르면 바리스터의 I-V 특성 곡선은 항복전(pre-breakdown), 항복(breakdown) 그리고, upturn 등 세 가지 영역을 나타낸다. 그 중 항복영역에서 $I = kV^\alpha$ (여기서 α 는 비선형계수)인 관계를 가지며, α 는 소자의 비선형 정도를 나타낸다. α 의 값은 인가 전압에 따라 다르지만 보통 50 이상으로 알려져 있다. ZnO 바리스터의 비선형성은 입계에 의한 특성이다. 바리스터 첨가물들의 작용으로 입계에 이중 쇼트키 장벽을 형성되고 장벽의 항복을 가져오는 입계 지역에서 소수 캐리어의 발생으로 인해 결국 매우 큰 전기적 비선형성이 얻어진다. 입자의 미세조직은 매우 불규칙하고 입계 미세 접합점의 전기적 특성도 동일하지 않다. 결국 바리스터 입계는 불규칙한 네트워크를 이루며 다양한 요소로 구성된다. 각각 다른 입자형태가 바리스터의 전기적 특성에 미치는 기하학적인 영향은 매우 중요하다. 그러나 단지 각각의 입자와 입계의 성질을 일률적으로 평균하여 바리스터의 특성을 묘사하는

방법은 한계를 가지게 된다. 한편 바리스터 내의 각 입자들을 하나의 정사각형 모양의 블록(block)으로 가정한 블록모델의 시뮬레이션이 많이 적용되어 왔다 [3]. 이 모델은 바리스터 특성의 개념적 해석에는 도움이 되지만 실제 소자의 불규칙한 미세구조를 다루는데는 상당한 오차가 있다.

최근에 이러한 실제 미세구조에 근접하는 통계적인 모델이 소개되었다 [4]. 이 모델은 불규칙하게 배열된 2차원 보로노이 네트워크(Voronoi network)를 사용하여 실제 바리스터에 아주 근접한 입자의 형상과 불규칙 요소(disorder parameters)를 실현할 수 있다. 최근 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 그와 같은 구조의 이론적 고찰에 많은 관심이 모아지고 있다. 1개 입계에 대한 미세 접합 구조 실험에서 동일한 시편에서 다른 미세 접합부의 전기적 특성이 서로 다른 결과를 보여주고 있다. 다결정상 ZnO 바리스터의 전기적 특성의 통계적 모델이 최근에 제시되었다. 이 모델에서 다결정상 구조는 불규칙한 2차원 보로노이 네트워크로 이루어진다. 입자는 주위에 여러개의 입자를 가진 다른 크기와 형상의 공간이 채워진 보로노이 polygon으로 표현된다. 일반적으로 벌크 다결정상 바리스터와 미세 접합부의 측정에서 단위 접합부에 나타

나는 항복 전압과 비선형계수 모두 벌크와 비교하여 대체로 크다. 더욱이 선형 영역에서 항복 영역으로의 전환(*switching*)은 주로 벌크 바리스터 보다 단위 미세 접합점에서 가파르게 이루어진다.

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(3). 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.

각기 다른 형태의 미세 접합과 입자가 bulk 타입의 바리스터에 미치는 기하학적인 영향은 매우 중요하다. 그러나 단지 각각 입계의 성질을 일률적으로 평균하여 바리스터의 특성을 묘사하는 것은 적절하지 못하다. 여기에 주목하여 전류의 경로가 입자의 불규칙적인 분포에 의해 영향을 받는다고 생각하였다(4). 즉, 계면을 가장 작게 포함하는 짧은 경로(긴 입자의 사슬)를 통해 전류가 흐른다고 가정하여 항복전압에 따른 평균크기를 구하였다. 그리고 바리스터 내의 각 입자들을 하나의 정사각형 모양의 block으로 표현하여 각 입계 조건들을 변화시킨 block 모델도 제안되었다(5). 이러한 모델들은 실제 소자의 불규칙한 미세구조나 다양한 입계 조건을 고려하지 못했다. 최근에 실제소자에 근접하는 통계적인 모델이 소개되었다(6). 이 모델은 불규칙한 모양의 다각형을 임의로 배열한 2차원 보로노이 네트워크(Voronoi network)로 구성하여 실제 바리스터에 아주 근접한 형상을 구현할 수 있다.

본고에서는 보로노이 네트워크를 이용하여 실제에 가까운 바리스터의 미세구조를 구현하여 각종 미세구조적, 전기적 파라미터의 변화를 추정할 수 있는 시뮬레이션 적용 기법을 소개하고자 한다. 네트워크에 적용되는 입계조건을 세 종류 *good*, *bad* 및 *ohmic* 입계로 나누어 바리스터 입계의 불균일성을 반영하였다. 이렇게 구성된 네트워크를 이용한 시뮬레이션을 통해 다양한 조건에 따른 바리스터의 전기적 특성을 정량적으로 해석하는 방법과 사례를 제시하였다.

2. 모델링

2.1 보로노이 네트워크 모델

ZnO 바리스터의 미세구조는 다양한 형태와 크기를 가지는 *n*-type ZnO 입자와 그 입자를 다양한 두께의 *intergranular* 물질들이 둘러싼 형태를 가진다. 이와 같이 복잡한 미세구조를 표현하는 가장 간단한 방법중의 하나가 보로노이 네트워크이다. 보로노이 네트워크에서 각 입자는 다양한 형태와 크기의 다각형으로 표현되

고, 각 입자에 이웃한 입자의 수는 각각 다르다. 실제 바리스터의 입계들의 특성은 거의 모든 입자에서 달리 나타난다(1) (3). 일반적인 방법으로 실험 데이터를 기초로 그중 대부분의 비율을 차지하고 있는 조건을 택하여 근사화시켜 보로노이 네트워크를 구성한 후 키르히호프의 법칙을 이용하여 시뮬레이션 하게된다.

2차원 보로노이 네트워크를 구성하려면 먼저, 완전히 무작위이거나, 어느 정도 연관을 가지는 중심점들을 임의로 정의하여 이웃하는 중심점들을 연결한 직선의 수직이등분선들을 교차시키면 된다(7). 물리적으로 보로노이 네트워크는 각각의 중심점에서 동시에 시작하는 2차원 성장 과정으로 생각할 수 있다. 이 성장은 같은 속도로 계속되다가 두 성장 면이 서로 만날 때 멈추게 된다. 일반적으로 네 번의 길이가 $L=1$ 인 사각형 내부에 각 cell의 중심점들이 위치하도록 하여 총 480개의 다각형을 가지는 보로노이 네트워크를 생성시킨다. 각 cell은 ZnO 입자를 나타내고 그 cell의 모서리는 입계를 의미한다. 그리고 모서리의 길이 l_{ij} 는 이웃하는 두 cell i 와 j 가 접하는 입계의 길이를 의미한다. 그림 1은 무질서도에 따른 보로노이 네트워크의 기본 구성을 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 중심점들이 완전히 규칙적인 삼각격자를 이루어 모든 다각형이 6각형 모양을 나타낸다. 그리고 각각의 중심점들을 그 점들이 원래 있던 위치를 중심으로 그린 반지름 d 만큼의 원판 내에서 임의의 크기($\leq d$)와 방향으로 이동시키므로써 무질서도(d)가 결정된다. 즉, 무질서도는 원판의 반지름 d 를 의미하고 d 는 규칙적인 6각형 구조에서 이웃한 중심점들의 거리를 1로 두었을 때의 상

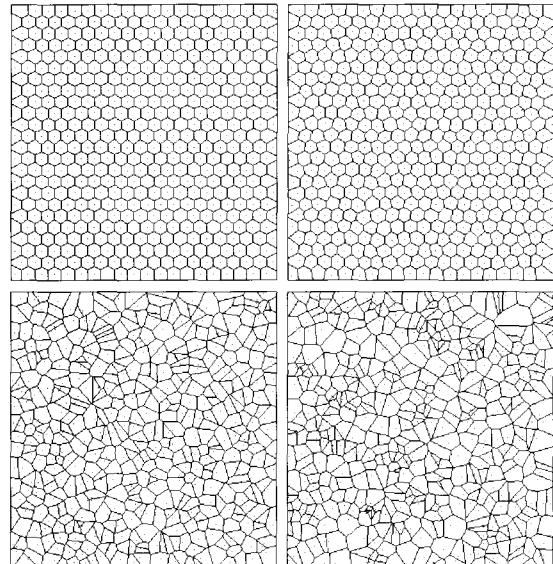


그림 1. 무질서도(d)에 따른 보로노이 네트워크 구조.
(a) $d=0$ (규칙적인 6각형 구조), (b) $d=0.18$ (6각형 구조가 무너짐)
(c) $d=1.0$, (d) $d=5.0$ (완전히 무질서한 것으로 추정)

대적 크기이다. 그림 1(b)를 보면 d 가 조금만 증가해도 규칙적인 6각형 구조는 변형되는데 d 가 0.18이 될 때 그림 1(c)에서 보는 바와 같이 격자는 위상적으로 무질서하게 변하기 시작한다[8]. 그러나 어떤 경우에도 coordination number를 평균하면 항상 6이 된다. 그림 1(d)는 $d=5.0$ 일 때의 보로노이 네트워크의 형태로 그림 2의 실제 ZnO 바리스터 미세구조와 비교하면 매우 유사한 구조이다.

그림 2는 1200°C로 2시간 소결시켜 제조된 Bi₂O₃계 ZnO 바리스터의 SEM 조직사진이다. 이 조건에서는 약 10 μ m 크기의 ZnO 입자와 Bi 절연층이 입계를 구성하게 된다. 실제적으로 ZnO 입자의 크기는 소결 온도, 시간 그리고 첨가물의 종류에 따라 변화하고, 상업용으로는 주로 10~30 μ m 크기의 ZnO 입자를 만들어 바리스터를 제조한다.

2.2 입계 조건

ZnO 바리스터의 비선형성은 입계의 비선형적인 성질에 기인한다. 미세 접촉 측정에 따르면 실제 바리스터의 입계 특성은 아주 다양하다. 그럼에도 불구하고 각 입계조건은 good, bad 및 ohmic 형의 세 가지 형태로 분류할 수 있음을 여러 실험데이터로부터 알 수 있다[9][10]. good 조건이라 불리는 입계는 누설 저항과 비선형계수($\alpha \geq 30$)가 높고 그 비율은 15%에서 60%까지 걸쳐 있다. bad 입계는 좋은 입계보다 누설저항이 10²⁻³ 정도 작고 약 30%~35% 정도의 입계가 이와 같은 성질을 보인다. 그리고 good 입계와 bad 입계의 항복전압은 3(V)로 동일하게 설정하였다. ohmic 입계는 good 입계보다 10²⁻⁵ 정도 낮은 누설저항을 가지고 그 비율이 5%와 20%이다[9][10].

good 입계의 특성은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[11].

$$J(V) = \begin{cases} \frac{V}{R_v} \left(1 + \frac{V^{50}}{(V_b)^{50}} \right), & \text{for } V \leq V_{tk} \\ \frac{V}{R_v} \left(1 + \frac{(V_{tk})^{50}}{(V_b)^{50}} \right)^{7.2} \left(1 + \frac{(V_{tk})^{70}}{(V_b)^{50} V^{20}} \right)^{-5.2} & \text{for } V > V_{tk} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $J(V)$ 는 2차원 전류밀도이고, V 는 계면에 걸리는 전압이다. 또한 R_v 는 입계의 단위 면적당 누설저항을 나타내고, 그 값은 10⁹으로 하였다. V_b 는 비선형계수가 그 최대 값의 반에 이를 때의 전압, 즉 입계의 항복전압으로 3(V)의 값을 갖는다. 식(1)은 특성곡선의 항복전 영역과 항복 영역 그리고 upturn 영역을 나타낸다. V_{tk} 에서 두 부분이 연결되고, 그 값은 약 3.467(V) 정도이다. 이러한 변수들의 값에 의해 비선형계수의 최대값 α_{max} 는 51로 정해지고, 그 특성곡선은 항복영역에서 급격한 변화를 보인다.

bad 입계 역시 비슷한 식에 의해 그 특성이 다음식과 같이 모델

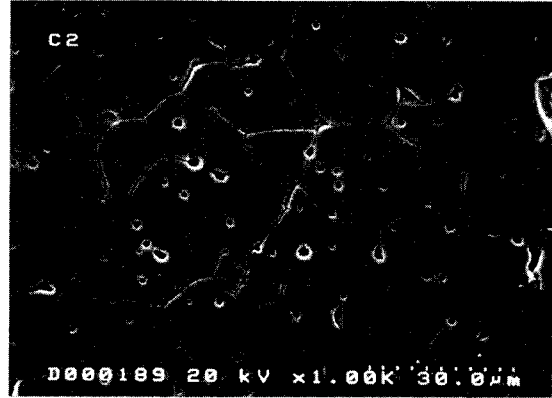


그림 2. ZnO 바리스터 실제 조직 사진.

링된다[11].

$$J(V) = \begin{cases} \frac{V}{R_b} \left(1 + \frac{V^{50}}{(V_b)^{50}} \right)^{15}, & \text{for } V \leq V_{tk} \\ \frac{V}{R_b} \left(1 + \frac{(V_{tk})^{50}}{(V_b)^{50}} \right)^{15} \left(1 + \frac{(V_b)^{50}}{(V_b)^{50} V^{50}} \right)^2 & \text{for } V > V_{tk} \end{cases} \quad (2)$$

R_b 는 bad 입계의 단위 면적당 누설저항을 나타내고, 그 값은 10으로 good 입계보다 100배 정도 작다. 그리고 V_b 는 good 입계와 같은 의미와 크기를 가지도록 설정하였고, 두 부분이 연결되는 V_{tk} 의 값은 3.622(V)로 두었다. 이에 의해 결정되는 비선형계수의 최대값 α_{max} 는 11이 된다. 그리고 그 특성곡선은 항복영역에서 완만하게 변화한다.

마지막으로 ohmic 입계는 선형적인 특성을 가진다.

$$J(V) = \frac{V}{R_o} \quad (3)$$

R_o 는 입계의 단위면적당 저항으로 여기서는 $\text{m}^2 \times 10^9$ 으로 하여 계산한다.

2.3 시뮬레이션 방법

먼저 앞에서 구성한 보로노이 네트워크에서 각 입자의 크기와 표준편차를 구한다. 그리고 네트워크의 각 입계 조건은 앞에서 설명한 세 가지 입계를 원하는 비율에 따라 네트워크에 임의로 분포시킴으로써 알 수 있다. 이때 네트워크의 양쪽 가장자리에 일정한 전압을 인가하여 전기적인 특성을 계산한다. 즉, 네트워크의 아래는 0, 제일 위는 V 로 고정된 전위가 되고 각 cell들의 전위 V_i 는 키

르히호프의 법칙을 이용해서 구할 수 있다.

$$\sum_j I_{ij} J(V_i - V_j) = 0 \quad (4)$$

식(4)에서 j 는 입자 i 와 이웃한 모든 입자들을 나타내고, I_{ij} 는 입자 i 와 j 가 맞닿는 변의 길이이다. 전류밀도 $J(V_i - V_j)$ 는 위에서 임의로 분포시켰던 입계 조건 중 계산에 이용되는 입계의 종류를 결정하여 식(1)~(3)중에서 선택한다. 그 결과 식(4)에서 많은 연립 방정식이 세워지고 이 방정식을 반복법을 이용하여 풀면 각 cell에서의 전위를 알 수 있다. 더불어 인가전압에 따른 전체 전류도 구할 수 있다. 그러므로 인가전압 V 를 원하는 범위만큼 변화시키면서 그에 따른 전류를 구하면 네트워크의 I - V 곡선이 얻어진다. 이상과 같은 시뮬레이션 절차는 그림 3의 순서도와 같다.

실험적으로 항복전압은 전류밀도가 $1\text{mm}[\text{mA}/\text{cm}^2]$ 일 때의 전압으로 정의하므로 이를 그대로 적용하여 입자의 전류가 $10^{-3}[\text{A}]$ 일 때 항복 영역이 시작된다고 가정하여 특정한 전압에서 각 cell의 전위를 알 수 있으므로 이때 네트워크의 전류분포 또한 구할 수 있다. 이렇게 구한 전류분포는 colored(shaded) coding scheme에 의해 표시되고 이 전류분포를 통해 전류경로를 볼 수 있다.

3. 모델링 결과

3.1 입자의 분포 특성

바리스터에서 입자 크기 분포는 소자의 전기적 특성과 밀접한 관계를 가지는 것으로 알려져 있다(4). 그러나 입자의 크기를 정

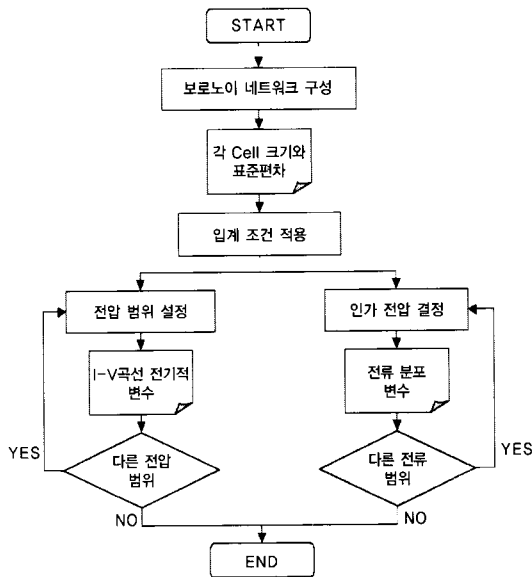


그림 3. 보로노이 시뮬레이션 순서도.

확하게 측정할 수 없기 때문에 주로 반복적인 방법을 이용해 근사적으로 구하여 왔다. 그 중 2차원 구조에 주로 사용되는 방법이 linear intercept method이다. 이러한 방법을 이용하면 같은 샘플이라도 측정하는 방법에 따라 상당한 오차가 생긴다. 그러나 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션에서는 입자의 면적을 정확히 구할 수 있으므로 다음과 같은 방법으로 입자의 크기를 계산할 수 있다(13).

그림 4의 6각형은 네트워크의 다각형을 나타낸다. 이 다각형의 면적을 구하여 그 면적과 같은 값을 가지는 원을 가정하였다. 그러므로 원은 한 개 입자를 의미하고 원의 지름은 입자의 크기이다(12). 이렇게 해서 구한 입자 크기의 평균값이 1이 되도록 수정하여 분포를 구하게 된다. 입자의 평균 크기(\bar{D})를 구하는 식은 식(5)이고 표준편차(s)는 식(6)을 통해 연산이 가능하다.

$$\bar{D} = \frac{\sum n_i D_i}{N} \quad (5)$$

$$s = \left(\frac{\sum n_i D_i^2 - N \bar{D}^2}{N} \right)^{1/2} \quad (6)$$

여기서 D_i 는 i 번째 입자의 크기이고 n_i 는 크기가 D_i 인 i 번째 입자의 개수이다. 그리고 N 은 전체입자의 개수를 나타낸다.

그림 5(a)는 충분히 무질서하게 분포된 중심점($d=5.0$)들에 의해 생성된 보로노이 네트워크의 입자 크기 분포이다. 이 결과는 실제 실험에서 linear intercept method를 이용해서 구한 분포와 일치하고 있다(9). 그림 1(a)의 규칙적인 6각형 구조에서 입자의 크기는 모두 일정한 값을 가진다. 그러나 무질서도가 조금만 증가해도 그 크기는 각각 조금씩 달라지고 변수 d 가 더 커지면 다양한 분포를 가지게 된다. 보로노이 네트워크의 무질서도는 변수 d 를 변화시킴으로써 조절할 수 있다. 중심점들의 이동이 임의의 크기와 방향을 가지므로 입자의 크기 분포와 표준편차 역시 임의의 값을 가지게 된다. 그림 5(b)는 무질서도를 변화시켰을 때 네트워크의 표준편차를 구한 그래프이다. 표준편차는 d 가 3.0보다 커지면 일정한 범위 내에서 변한다는 것을 알 수 있다. 결국 d 가 5.0정도가 되면 중심점들은 충분히 무질서하게 분포되고 이때의 네트워크는 실제 바리스터의 구조와 가장 유사하게 모델링된 것으로 볼 수 있다.

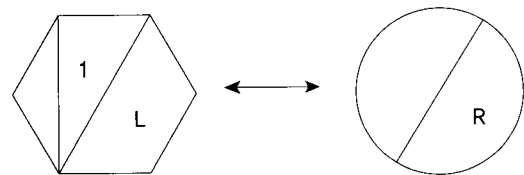


그림 4. 입자 크기 연산.

3.2 전기적인 특성

그림 6은 무질서도가 5.0인 네트워크에서 각 입계조건에의 비율을 변화시켰을 때의 $I-V$ 곡선이다. 이는 입계가 바리스터의 특성에 미치는 영향을 고려하기 위한 것으로 각 입계의 특성은 앞에서 설명하였다. 그림 6에서 실선은 100%의 입계가 모두 good 입계 조건을 가질 때이고 파선은 50%의 good 입계와 50%의 bad 입계가 임의로 분포된 네트워크의 $I-V$ 곡선이다. 그리고 50% good 입계, 30% bad 입계, 20% ohmic 입계인 분포를 가지는 네트워크의 $I-V$ 곡선을 점선으로 나타내었다. 이때 세 번째 분포는 실제 바리스터에서 측정된 입계 분포중 ohmic 입계의 비율이 가장 큰 값을 택하였다(10,13). 이는 실제 소자에서 선형 입계의 영향을 최대한 고려하기 위해서이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 모두 good 입계일 때 곡선은 비선형 구간에서 아주 급격한 변화를 보이고 bad 입계나 ohmic 입계가 첨가되면 완만하게 변한다. 이는 good 입계가 많은 경우 전체 특성도 좋은 입계와 같은 형태를 나타냄을 보

이고 있다. 한편 bad 입계가 첨가되면 전류의 경로에 bad 입계가 포함되므로 전체 특성은 bad 입계에 가까워 지게고 항복전압도 44.9(V)에서 67.0(V)로 증가하게 된다. 그러나 ohmic 입계는 항복 영역에서 제일 큰 저항을 가지므로 그 비율이 작은 경우 전류 경로에 포함되지 않으므로 항복전압에 크게 영향을 주지 않는다. 그림 6에서 실선의 항복전압은 약 68.7(V) 정도가 된다. 하지만 ohmic 입계의 비율이 증가할수록 네트워크의 $I-V$ 곡선에서 비선형 구간은 점점 완만하게 된다(6).

시뮬레이션 중 실제에 가장 가까운 모델은 good 입계와 bad 입계, ohmic 입계의 비율이 50%, 30%, 20%인 것이다(10). 그림 7에 이런 입계조건을 가진 네트워크를 무질서도의 변화에 따라 시뮬레이션한 결과이다. 이는 실제 바리스터에서 입자의 크기 효과를 보기 위한 것으로 점선은 d 가 0.18일 때의 $I-V$ 곡선이고 파선은 $d=1.0$ 일 때, 그리고 d 가 실제에 가까운 5.0일 때의 곡선을 실선으로 나타내었다. 그림을 보면 곡선의 모양은 크게 차이가 나지

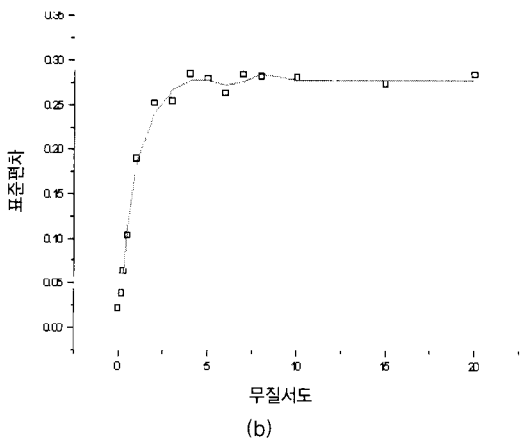
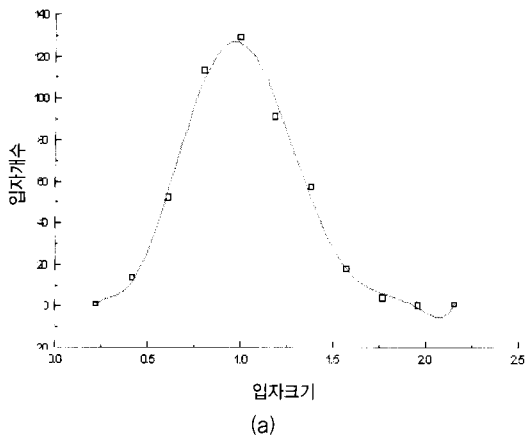


그림 5. 입자 크기 분포($d=5.0$)와 무질서도에 따른 표준편차.

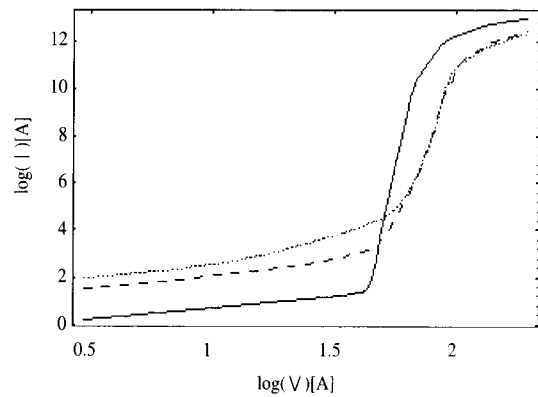


그림 6. $d=5.0$ 일 때 입계 조건에 따른 $I-V$ 곡선(100% good 입계(실선), 50%-50%(파선), 50%-30%-20%(점선)).

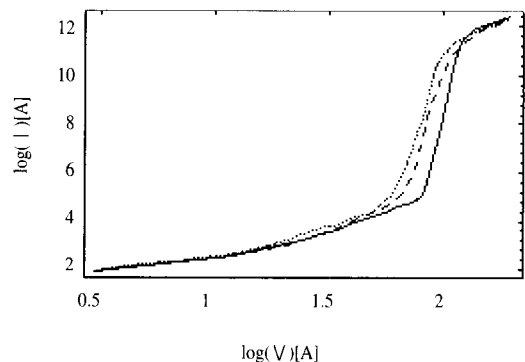


그림 7. 실제와 가까운 입계 구성(50%-30%-20%)에서 무질서도 변화에 따른 $I-V$ 곡선, 점선은 $d=0.18$, 파선은 $d=1.0$, 실선은 $d=5.0$.

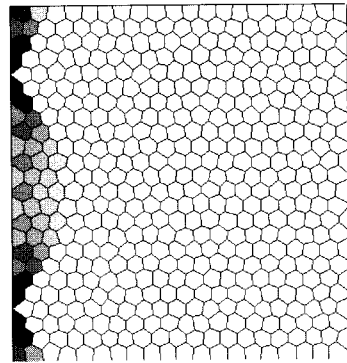
않는다. 그러므로 무질서도가 네트워크 I - V 곡선의 모양에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 그 항복전압은 무질서도가 증가할수록 감소한다. 각 네트워크의 항복전압은 d 값이 0.18에서 5.0으로 변함에 따라 각각 83.2(V), 69.3(V), 68.7(V)로 나타난다. 즉 d 값이 0.18일 때 항복전압과 1.0일 때 항복전압의 차이는 크기만 1.0과 5.0은 큰 차이가 없다. 여기서 알 수 있듯이 d 값이 매우 작을 때는 d 의 변화가 네트워크의 전기적 특성에 큰 영향을 미치지 않지만 d 값이 충분히 커지면 d 의 변화는 네트워크에 크게 영향을 미치지 못한다. 그 이유는 앞에서 기술했던 긴 입자의 사슬에 의한 것으로 전류의 경로는 같은 조건에서는 입계를 가장 작게 포함하는 경로를 택하기 때문이다(9). 그러므로 무질서도가 매우 작을 때는 입자의 크기가 별로 차이가 없기 때문에 전류 경로는 규칙적인 6각형 구조일 때와 유사한 약 23개의 입계를 가지게 되고 d 값이 충분히 커지면 긴 입자의 사슬을 형성하므로 이보다 더 작은 수의 입계를 가져서 항복전압은 감소하게 된다. 결국 네트워크의 무질서도가 낮을 때는 입자들의 크기가 비슷하므로 입자의 크기 효과를 기대할 수가 없고 오히려 입계조건에 의해 전류의 경로가 결정된다. 그러나 중심점들이 충분히 무질서하게 분포되면 입자의 크기는 다양하게 분포하므로 긴 사슬의 형성이 가능하게 되고 입자의 크기가 어떻게 분포하는가에 따라 네트워크의 전기적 특성이 달라진다. 물론 입계 조건 또한 중요한 요소임은 부정할 수 없다.

3.3 전류의 집중경로

실제 소자에 시행할 수 있는 여러 가지 측정법은 각 입자의 전류 분포를 구할 수 없기 때문에 바리스터에 나타나는 전기적 기계적 현상을 해석하는데 어려움이 있다. 따라서 네트워크를 통한 전류의 전도 현상을 더 심도있게 고려하기 위해서는 cell 구조의 전류 분포를 계산하여 shaded coding scheme으로 나타내어 구현한다. shaded coding scheme이란 각각의 cell에 흐르는 전류를 전체 전류로 표준화해서 상대적 값으로 나타내는 것이다. 즉 흰색에서 검은색으로 명도에 따라 구분한다. 흰색은 cell을 통해서 흐르는 전류가 없음을 나타내고 완전히 검은 색은 전체 전류의 100%가 흐름을 의미한다.

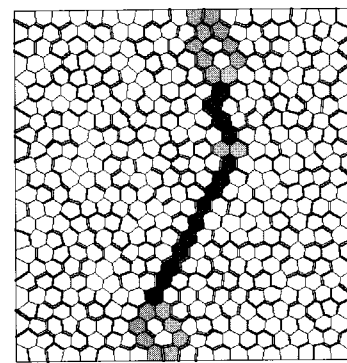
항복전 영역에서 전류가 전체적으로 균일하게 흐르고 항복 영역이 되면 전류가 하나의 경로로 집중되는 현상이 나타나는 것은 잘 알려져 있다(6). 각 입계의 조건이 동일(예를 들면 100% good 입계)하고 d 가 0.0일 때는 항복 영역이라도 전류의 분포는 균일하다. 입자의 크기 분포가 네트워크에 미치는 영향을 고려하기 위해 그림 8(a)에 d 가 0.18이고 good 입계 100% 조건일 때 항복 영역에서의 전류분포의 해석 예를 보였다. 네트워크가 기하학적으로 무질서해지기 시작하면 전류는 입계 조건에 관계없이 항복 영역에서 하나의 경로를 통해 흐르는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 전류는 입계가 가장 적은 경로를 택하게 된다. 이 사실을 통해 입자의

$v=90$, $Log[jj]=18.64$, $cc=0.01847$, $mc=83.2$



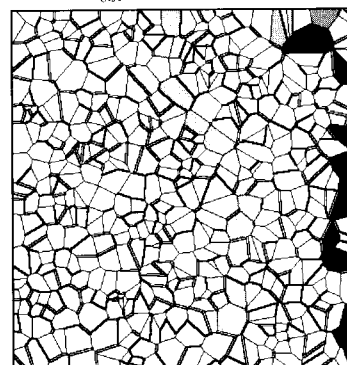
(a)

$v=100$, $Log[jj]=19.35$, $cc=0.01516$, $mc=64.9$



(b)

$v=70$, $Log[jj]=14.74$, $cc=0.01747$, $mc=78.3$



(c)

그림 8. (a) $d=0.18$, 100% good 입계, (b) $d=0.18$ 50%-30%-20%, (c) $d=5.0$, 50%-30%-20%일 때 항복영역에서의 전류 분포.

크기 분포가 전류의 집중에 미치는 영향을 알 수 있다. 그림 8(b)와 (c)는 입계 조건을 실제로 가깝게 설정(50% good 입계, 30% bad 입계, 20% ohmic 입계)하고 무질서도를 달리 했을 때 항복 영역에서의 전류분포이다. 단 그림 8(b)는 d 값이 0.18인 네트워크를 나타내고 그림 8(c)는 중심점들을 충분히 무질서하게 분포시킨 네트워크이다. 이 때 역시 전류가 집중되는 현상을 볼 수 있다. 그러나 그림 8(b)와 (c)를 보면 전류가 단순히 가장 짧은 경로를 통해 흐르는 않음을 알 수 있다. 왜냐 하면 항복 영역에서 good 입계는 bad 입계보다 낮은 저항성을 가지고 bad 입계는 ohmic 입계보다 낮은 저항성을 가지기 때문에 전류 경로는 이 입계들을 포함하지 않으면서 가장 짧은 쪽으로 형성된다. 따라서 단순히 같은 무질서도를 가지거나 같은 입계 조건을 가진다고 해서 같은 경로로 전류가 흐르지 않는다. 즉, 입계 조건과 무질서도는 모두 전류경로의 형성에 영향을 미친다.

4. 결론

입계 조건을 임의로 분포시킨 2차원 보로노이 네트워크를 이용하여 실제 ZnO 바리스터의 미세 구조를 구현하고 입자의 크기 분포를 구해 통계적인 접근 방법과 전기적인 특성 모델에 대한 시뮬레이션 기법을 소개하였다. 이 모델링 방법은 비교적 간단하지만 바리스터의 비선형적인 특성을 잘 나타내고 있고 각 입계가 전체 특성에 미치는 영향을 잘 설명해 준다. 네트워크의 무질서도를 증가시켜서 일정한 값 이상이 되면 표준 편차는 실제와 비슷한 분포를 보이고 무질서도를 충분히 크게 하여 발생시킨 네트워크의 입자 크기 분포는 실험에서 얻어진 분포와 유사한 모양을 나타낸다. 이 점에서 역시 보로노이 네트워크의 신뢰성을 확인할 수 있다.

충분히 무질서하게 분포된 중심점($d=5.0$)들에 의해 생성된 보로노이 네트워크의 입자 크기 분포 모델링에서 실제 실험에서 linear intercept method를 이용해서 구한 분포와 일치하고 있다. 규칙적인 6각형 구조에서 입자의 크기는 모두 일정한 값을 가진다. 무질서도가 조금만 증가해도 그 크기는 각각 조금씩 달라지고 변수 d 가 더 커지면 다양한 분포를 가지게 된다. 보로노이 네트워크의 무질서도는 변수 d 를 변화시킴으로써 조절할 수 있다. 중심점들의 이동이 임의의 크기와 방향을 가지므로 입자의 크기 분포와 표준편차 역시 임의의 값을 가지게 된다. 무질서도를 변화시켰을 때 네트워크의 표준편차를 계산할 수 있다. 표준편차는 d 가 3.0보다 커지면 일정한 범위 내에서 변한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 d 가 5.0정도가 되면 중심점들은 충분히 무질서하게 분포되었고 이때의 네트워크는 실제 모델을 구현하였다고 볼 수 있다.

시뮬레이션 중 실제에 가장 가까운 모델은 good 입계와 bad 입계, ohmic 입계의 비율이 50%, 30%, 20%인 것이다. 입계조건을 가진 네트워크를 무질서도의 변화에 따라 시뮬레이션한 결과에

서 실제 바리스터에서 입자의 크기 효과를 실제적으로 확인할 수 있었다. 한편 무질서도가 네트워크 $I-V$ 곡선의 모양에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 그 항복전압은 무질서도가 증가할수록 감소한다. 각 네트워크의 항복전압은 d 값이 0.18에서 5.0으로 변함에 따라 각각 83.2(V), 69.3(V), 68.7(V)로 나타난다. 즉 d 값이 0.18일 때 항복전압과 1.0일 때 항복전압의 차이는 크지만 1.0과 5.0은 큰 차이가 없다. 여기서 알 수 있듯이 d 값이 매우 작을 때는 d 의 변화가 네트워크의 전기적 특성에 큰 영향을 미치지 않지만 d 값이 충분히 커지면 d 의 변화는 네트워크에 크게 영향을 미치지 못한다. 그러므로 무질서도가 매우 작을 때는 입자의 크기가 별로 차이가 없기 때문에 전류 경로는 규칙적인 6각형 구조일 때와 유사한 약 23개의 입계를 가지게 되고 d 값이 충분히 커지면 긴 입자의 사슬을 형성하므로 이보다 더 작은 수의 입계를 가져서 항복전압은 감소하게 된다. 결국 네트워크의 무질서도가 낮을 때는 입자들의 크기가 비슷하므로 입자의 크기 효과를 기대할 수가 없고 오히려 입계조건에 의해 전류의 경로가 결정된다. 그러나 중심점들이 충분히 무질서하게 분포되면 입자의 크기는 다양하게 분포하므로 긴 사슬의 형성이 가능하게 되고 입자의 크기가 어떻게 분포하는가에 따라 네트워크의 전기적 특성이 달라진다.

참고 문헌

- [1] Kazuo Eda, "Zinc Oxide Varistors", IEEE Electrical Insulation Magazine., Vol. 5, No. 6, pp. 28-41, 1989.
- [2] T. K. Gupta, "Application of Zinc Oxide Varistors", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, No. 7, pp. 1817-1840, 1990.
- [3] G. D. Mahan, L. M. Levinson, and H. R. Philipp, "Theory of conduction in ZnO varistors", J. Appl. Phys., Vol. 50, No. 4, pp. 2799-2812, 1979.
- [4] G. Y. Sung, C. H. Kim, M. H. Oh, "Effect of Grain-Size Distribution on the Barrier Voltage of ZnO Varistors", Adv. Ceram. Mater., Vol. 2, No. 4, pp. 841-847, 1987.
- [5] H. T. Sun, L. Y. Zhang, X. Yao, "Electrical Nonuniformity of Grain Boundaries within ZnO Varistors", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 76, No. 5, pp. 1150-1155, 1993.
- [6] M. Bartkowiak, G. D. Mahan, F. A. Modine, M. A. Alim, "Influence of ohmic grain boundaries in ZnO varistors", J. Appl. Phys., Vol. 79, No. 1, pp. 273-281, 1996.
- [7] D. Weaire, N. Rivier, "Soap, Cells and Statistics-Random Patterns in Two Dimensions", Contemp. Phys., Vol. 25, No. 1, pp. 59-99, 1984.
- [8] A. Priolo, A. J. Dammers, S. Radelaar, "Conductance of two-dimensional disordered Voronoi networks", Phys. Rev., Vol.

B46, No. 22, pp. 14889-14892, 1992.

[9] Ze-Chun Cao, Ru-Jun Wu and Run-Sheng Song, "Ineffective grain boundaries and breakdown threshold of zinc oxide varistors", Mater. Sci. Eng., Vol. B22, 261-266, 1994.

[10] H. Wang, W. Li, and J. F. Cordaro, "Single Junctions in ZnO Varistors Studied by Current-Voltage Characteristics and Deep Level Transient Spectroscopy", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34, No. 4A, pp. 1765-1771, 1995.

[11] M. Bartkowiak, G. D. Mahan, F. A. Modine, M. A. Alim, R. Lauf and A. McMillan, "Voronoi network model of ZnO varistors with different types of grain boundaries", J. Appl. Phys., Vol. 80, No. 11, pp. 6516-6522, 1996.

[12] C. W. Nan, D. R. Clarke, "Effect of Variations in Grain Size and Grain Boundary Barrier Heights on the Current-Voltage Characteristics of ZnO Varistors", J. Am. C. Soc., Vol. 79, No. 12, pp. 3185-3192, 1996.

[13] 황취동, 한세원, 강형부, "보로노이 네트워크를 이용한 ZnO 바리스터의 실제 모델 구현과 전기적 특성 분석", 전기학회논문지, 제47권, 제5호, pp. 607-613, 1998.

저 사 약 령

성명 : 한 세 원

❖ 학 령

- 1984년 2월 한양대 전기공학과 학사
- 1986년 2월 한양대 대학원 전기공학과 석사
- 1999년 2월 한양대 대학원 전기공학과 박사

❖ 경 령

- 1986년 2월 - 1991년 8월
한국전기연구소 연구원
- 1991년 9월 - 현재
한국전기연구원 선임연구원

❖ 주 관 심 분 야

- 전력용 절연물
- 전력용 피뢰기 기술
- 고효율 Flat 변압기 기술

