

ZnO 바리스터의 핑치 현상에 대한 보로노이 시뮬레이션

이영중*, 황휘동, 한세원, 강형부
한양대학교 전기공학과

Voronoi Simulation on Puncture Phenomenon of ZnO Varistors

Young-Jong Lee, Hui-Dong Hwang, Se-Won Han, Hyung-Boo Kang
Dept. Electrical Eng., Hanyang Univ.

Abstract - ZnO Varistor is an electronic ceramic device for controlling the surge voltage from low level to high. In this study, the puncture mechanism occurring in ZnO varistor is investigated, and the simulation for restraining the puncture by formulating the relation between the applied voltage and the increase of the inside temperature of grain is applied. In order to simulate the cause of the current localization which is the primary factor causing the puncture, the localization phenomenon and the temperature distribution induced by the localized current, the Voronoi network is applied, which can realize the structure of the practical varistor better than the established simple network. Using the current through each grain and the voltage applied to the grain boundary obtained from that simulation, the Joule heating energy is calculated and the phenomenon that the puncture occurs can be analyzed quantitatively by simulating the electric and thermal characteristics according to the externally applied pulsed voltage.

1. 서 론

ZnO 바리스터는 높은 비선형 I-V 특성을 가지는 다결정 세라믹 반도체 소자이다. ZnO 바리스터는 ZnO 소자에 Bi₂O₃, CoO, MnO, Sb₂O₃ 등의 첨가물들을 혼합한 후, 소결하여 양단에 전극을 집합함으로써 만들어진다[1]. 이러한 ZnO 바리스터는 다른 바리스터보다 높은 비선형 특성을 나타내며, 에너지 흡수 능력도 우수하므로 피뢰기(arrester) 등 서지 흡수용 소자로써 많이 사용된다. ZnO 바리스터의 내부구조를 보면 매우 무질서한 입자 분포를 나타내고 있다. 따라서 바리스터의 특성을 해석하기 위해서는 기존의 방법들, 예를 들면, 입자들을 사각형 모양이라고 가정하여 해석한 모델이나, 내부구조가 저항과 콘덴서의 결합들로만 이루어졌다고 가정한 모델들보다 더 실질적이고 정확한 값을 얻는 보로노이 네트워크를 사용하였다.

전압 서지에 대하여 ZnO 바리스터는 두 가지 형태의 열화를 보인다. 즉 핑치(puncture)와 크랙(crack)이다[2]. 이 두 현상은 서지가 인가된 간격과 흐르는 전류의 크기에 따라 달리 발생된다. 본 연구에서는 두 현상중 핑치에 대하여 연구하였으며[3]. 핑치가 어떤 메커니즘에 의하여 발생하는지를 알아보고 전압과 온도 증가와의 관계, 펄스 시간과 핑치를 일으키기 위한 전류와의 관계, 전류밀도와 에너지 흡수능력(energy absorption capability)과의 관계[4] 등을 알아보고 이러한 관계를 통하여 ZnO 바리스터에서 핑치가 발생하지 않도록 바

리스터를 설계하는데 도움이 되고자 한다.

2. 본 론

2.1 보로노이 네트워크(Voronoi Network)

ZnO 바리스터의 미세구조는 다양한 형태와 크기를 가지는 n-type ZnO 입자와 그 입자를 다양한 두께의 첨가 물질들이 둘러싼 형태를 가진다[5]. 그렇게 복잡한 미세구조를 표현하는 가장 간단한 방법 중의 하나가 보로노이 네트워크이다. 보로노이 네트워크에서 각 입자는 다양한 형태와 크기의 다각형으로 표현되고 각 입자에 이웃한 입자의 수는 각각 다르다. 실제 바리스터 입체들의 특성은 거의 모든 입자에서 달리 나타난다. 그러나 본 연구에서는 실험 데이터를 기초로 그 중 대부분의 비율을 차지하고 있는 조건을 택하여 근사화시켜 보로노이 네트워크를 구성하였다. 즉 입체조건은 높은 비선형 특성을 나타내는 A형태, 낮은 비선형 특성을 나타내는 B형태, 선형적 특성을 나타내는 C형태가 각각 50%, 30%, 20%를 나타내고 있다고 가정하였다. 또한 내부구조의 nonuniform한 특성을 나타내는 파라미터인 무질서도는 여러 논문들을 통하여 실제와 거의 흡사한 정도를 나타내게하는 5로 하였다. 위의 내용을 바탕으로 키르히호프 법칙을 이용하여 시뮬레이션 하였다[6, 7, 8].

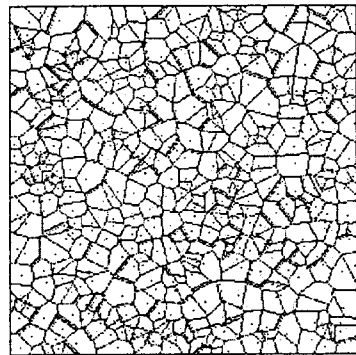


그림1 보로노이 네트워크
(무질서도 5, 입자수 480, 입체조건 50A-30B-20C)

그림2는 시뮬레이션에 의하여 무질서도가 5이고, 50% A형태, 30% B형태, 20% C형태로 내부 구조가 구성되어 나온 전류-전압 특성을 나타내며, 어떤 전압값 이상에서는 전류가 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 0~60V 정도까지를 항복전 영역(perbreakdown region), 60~100V까지를 항복 영역(breakdown region), 100V 이상을 업턴 영역(upturn region)으로 구분할 수 있다.

2.2 평처 메카니즘(Puncture Mechanism)

평처란 ZnO 바리스터에서 전류 집중화에 의하여 전류가 흐르는 영역에서 줄열(Joule Heating)이 발생하

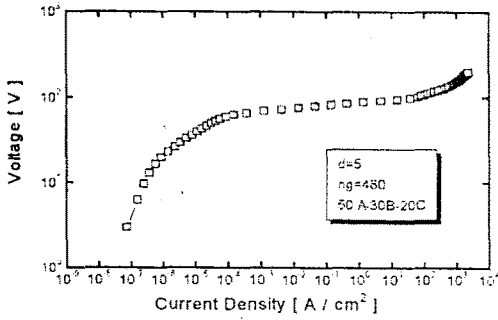


그림2 비선형 I-V 특성 곡선

고 이 열 때문에 입자와 입자사이에 있는 첨가물들이 용융되어 ZnO 바리스터의 비선형 I-V 특성을 더 이상 나타내지 못하는 현상을 말한다. 이러한 평처는 ZnO 바리스터를 제조하면 내부 구조가 무질서하여, 즉 내부 입자의 크기와 입계의 분포가 다르기 때문에 생긴다. 전류는 입자가 큰 고리로 연결된 부분이나 입계조건이 A 형태로 많이 연결된 곳을 찾아 흐르는 집중화 현상을 보이게 되어 전류가 흐르는 지역에서 흡수에너지에 의하여 줄열이 발생한다. 이 열에 의해 각 입자에서 온도가 증가하게 되고 외부 서지전압이 커짐에 따라 온도증가도 커진다. 온도 증가가 첨가물들의 용융점 이상으로 증가하게 되면 입자와 입자사이 층이 용융되어 더 이상의 비선형 전류-전압 특성을 가지지 못하게 되는 평처가 일어난다[2].

2.3 전류 집중화 (Current Localization)

ZnO 바리스터의 미세구조는 매우 무질서하고 입자와 입자 사이의 두께도 매우 다르다. 이러한 조건의 다양성 때문에 바리스터 양단에 항복 전압이 인가되면 전류는 전체적으로 흐르는 것이 아니라 패스(path)를 형성하여 몇 지역만으로 전류가 흐른다.

이런 전류의 집중화 현상은 내부구조가 무질서하여 입자들의 크기가 다양하기 때문에 생기고 또한 입계 조건이 달라 각 입계마다 저항이 다르기 때문에 전류가 가장 적은 저항을 나타내는 부분으로만 흐르려고 하기때문에 생긴다. 그림3은 shaded coding scheme 방법으로 전류흐름을 나타낸 것이다. 흰색은 전류가 흐르지 않는 입자, 검은색은 전체 전류의 100% 전류가 흐르는 입자

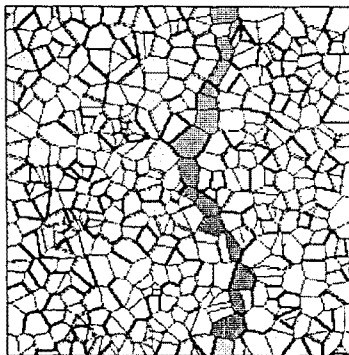


그림3 항복 전압에서 전류 분포

를 나타낸다.

2.4 줄열(Joule Heating)

바리스터에 인가된 전압 펄스에서 전기적 에너지의 대부분은 바리스터내에서 열로서 나타난다. 각 입자에 대한 전기적 에너지의 계산은 펄스의 시간에 대한 전압과 전류 곱의 적분으로 구한다[3].

$$E = \int_0^t V(t)I [V(t)] dt$$

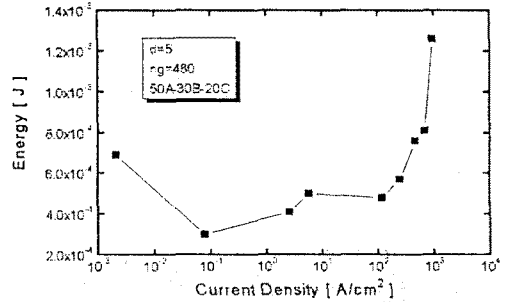


그림4 전류밀도와 흡수 에너지와의 관계

에너지의 개념에서 중요한 파라미터가 있는데 그것은 에너지 흡수능력이다. 이 값은 평처가 일어나기 전까지 바리스터내에 저장될 수 있는 총에너지를 나타낸 값으로서 그림4에서 볼 수 있는 것처럼 항복 영역에서 가장 적은 에너지를 나타내고 있음을 알 수 있다. 발생된 열은 온도 확산에 의해 전달되는데 한 입자에서 다른 입자로의 열 확산은 발생하지 않는다. 왜냐하면 온도전도에 의한 열전도(heat transfer)의 characteristic length L은 다음과 같다.

$$L^2 = \Delta t \frac{\kappa}{C_p \rho}$$

ZnO 입자에 대한 값을 대입하면 $L=20 [\mu\text{m}]$ 이며, 이 값은 ZnO 바리스터 입자의 평균 크기와 비슷하기 때문이다.

2.5 온도 증가 (Temperature Increase)

전류 집중화에 의하여 발생된 열이 다른 입자로 전달되지 않는다고 가정하면 각 입자에서의 온도 증가는 다음과 같다[3].

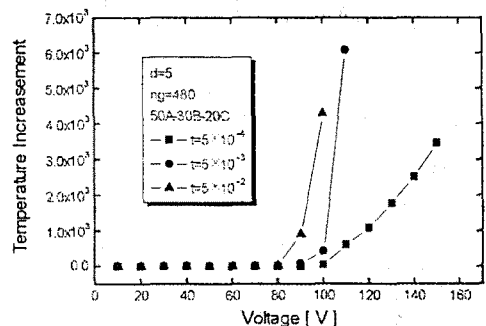
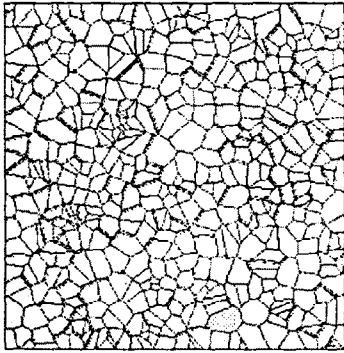


그림5 전압과 온도증가 곡선

$$\Delta T = \frac{E}{\pi \rho C_p R_0^2 L_0} = \frac{\int_0^t V(t) I[V(t)] dt}{\pi \rho C_p R_0^2 L_0}$$



(a) 전류 분포 (upturn region)



그림6 (b) 온도 분포(upturn region)

그림5는 온도증가를 여러 가지 서지 인가 간격에 대하여 나타낸 그림이다. 이 그림에서 볼 수 있는 것처럼 온도증가는 어떤 전압 이상이 되면 급속하게 증가됨을

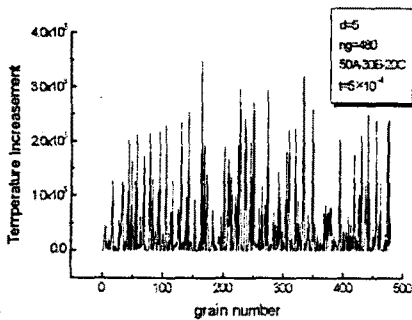


그림7 각 입자에서의 온도 분포(upturn region)

볼 수 있다. 또한 첨가물인 Bi₂O₃는 820℃에서 녹고, 입자 자체는 1700℃에서 녹으므로 평치가 일어날 수 있는 서지 전압값도 예상 할 수 있다. 그림6(a)는 업턴 영역(upturn region)에서의 전류 분포이며 전류 집중화 현상이 항복 영역보다 많이 약화되어 있다. 그림6(b)는 온도 분포를 나타내며 전류분포와 비슷한 경로를 따

라 온도 증가가 일어나고 있음을 보여주고 있다. 검은 색으로 나타낸 부분은 2000℃ 이상을 나타내며 입자 자체의 녹는점 이상으로 온도가 상승된 부분임을 나타낸다. 그림7은 입자 하나 하나에서의 온도 증가를 나타내고 있다. 이 그림에서 보는 것처럼 녹는점 이상으로 온도가 상승된 입자수가 많이 있음을 알 수 있다.

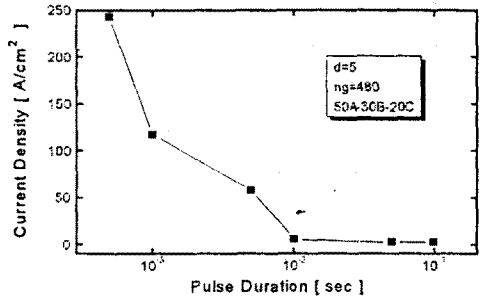


그림8 펄스 간격과 평치 전류밀도

그림8은 펄스 간격과 평치가 일어나기 시작하는 최소 전류밀도를 나타내고 있다.

3. 결 론

이상과 같은 수치해석을 통하여 몇가지 결론을 얻을 수 있었다. 바리스터 내 각 입자의 온도 증가는 일단 증가하기 시작하면 급속히 증가하며, 평치가 일어났을 때의 전압값은 업턴 영역 근처에서 주로 나타났다. 또한 전류 분포와 온도 증가 분포는 정확히 일치하지는 않지만 전류가 많이 흐르는 곳에서 온도도 크게 증가하였으며 평치도 패스(path)를 형성하여 발생하였다. 펄스 인가 시간에 따른 영향은 바리스터 온도 증가 뿐만 아니라 전류밀도에도 영향을 주었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Tapan K. Gupta, "Application of Zinc Oxide Varistors", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol.73(7), pp.1817, 1990
- [2] Kazuo Eda, "Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents", *J. Appl. Phys.*, Vol. 56(10), pp.2948, 1984
- [3] Agnes Vojta and David R. Clarke, "Microstructural origin of current localization and "puncture" failure in varistor ceramics", *J. Appl. Phys.*, Vol. 81(2), pp.985, 1997
- [4] M. Bartkowiak, G. D. Mahan, "Energy handling capability of ZnO varistors", *J. Appl. Phys.*, Vol. 79(11), pp.8629, 1996
- [5] T. K. Gupta and W. G. Carlson, "A grain-boundary defect model for instability/stability of a ZnO varistor", *J. Mater. Sci.*, Vol.20, pp.3487, 1985
- [6] M. Bartkowiak and G. D. Mahan, "Nonlinear current in voronoi networks", *J. Am. Phys. Soc.*, Vol.51, pp.10825, 1995
- [7] M. Bartkowiak, "Voronoi network model of ZnO Varistors with different types of grain boundaries", *J. Appl. Phys.*, Vol.80(11), pp.6516, 1996
- [8] 황희동, 한세원, 강형부, "보로노이 네트워크를 이용한 ZnO 바리스터의 실제 모델 구현과 전기적 특성 분석", *대한 전기 학회*, Vol.47(5), pp.607, 1998