

유한요소법에 의한 ZnO 바리스터 동작 시 발생하는 열폭주 현상 해석

장경욱 

가천대학교 전기공학과

Analysis of Thermal Runaway Phenomenon Caused by ZnO Varistor Operation Using Finite Element Method

Kyung-Uk Jang

Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

(Received April 6, 2022; Revised April 14, 2022; Accepted April 12, 2022)

Abstract: Since the ZnO varistor is a semiconductor device, the internal thermal distribution during the varistor operation is recognized as an important factor in the performance and deterioration of the varistor. For an optimal varistor structure design, the thermal runaway phenomenon during the varistor operation was interpreted using the Comsol 5.2 analysis program by a finite element analysis. The maximum temperature of the center measured in the cross section of the ZnO varistor was confirmed to increase as the temperature moved from the lower electrode to the center towards the upper electrode up to 572.6 K. The electrodes are thinned so that the influence of the Schottky barrier is not great. The heat gradient balance is determined to be improved when the electrode of the hybrid form is introduced. The thickness, density, pore distribution, impurity uniformity, and particle size of the ZnO varistor are required, and it is determined that the pyrolysis gradient will be improved regardless of the electrode thickness. When these results are applied to design the ZnO varistor, the optimal structure of the ZnO varistor can be obtained.

Keywords: ZnO varistor, Surge arrestor, Comsol, FEM, ZnO varistor design

1. 서론

최근, 전력기기와 전자기기 등 급증하는 고주파수화 및 대용량화에 따라서 이들 기기에 사용되는 전자회로 및 전자부품 등을 여러 서지 및 펄스성 노이즈 등의 이상전압으로부터 보호하는 것이 요구되고 있다.

현재까지 개발된 바리스터는 ZnO계, SnO₂계, SiC계 및 SrTiO₃계 등이 있으나, 이 중에서 ZnO계 바리스터가 전압

의 비직선성이 뛰어나고 정전기와 각종 서지로부터 기기를 보호하는 능력이 우수하여 정전기 대책 및 서지 보호용으로 많이 사용되고 있다. 특히, Bi-ZnO계 바리스터 조성물은 일반적으로 Bi₂O₃, Sb₂O₃, Mn, Co, Ni, Cr, Al, K 등을 기본 조성으로 한다. 그러나 Pr-ZnO계 바리스터는 Bi-ZnO계 바리스터에 비해서 정전내전압이 다소 높으나, 전압 비직선성이 낮고 누설전류가 크고 서지 내량이 다소 낮다는 단점이 있다 [1,2].

이러한 문제들을 해결하기 위하여, ZnO계 바리스터는 96 mol% ZnO, 1 mol% Bi₂O₃, 1 mol% Sb₂O₃, 0.5 mol% CoO, 0.5 mol%, MnO₂, 1 mol% TiO₂의 조성으로 하고, 조성된 ZnO 바리스터에 대해서 최적의 바리스터 구조 설계를 위하여 Comsol 5.2 프로그램에 의한 유한요소법을

✉ Kyung-Uk Jang; kujang@gachon.ac.kr

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이용하여 바리스터 동작 시 발생하는 열폭주 현상에 대해서 해석하였다. 특히, ZnO 바리스터는 반도체 소자이므로 바리스터 동작 시 내부의 열분포가 바리스터의 성능과 열화에 중요한 요소로 인식되고 있다.

2. 실험 방법

2.1 ZnO 계 바리스터의 모델링

본 실험에서는 비직선 소자인 ZnO계 바리스터를 모델링하기 위하여 96 mol% ZnO, 1 mol% Bi₂O₃, 1 mol% Sb₂O₃, 0.5 mol% CoO, 0.5 mol%, MnO₂, 1 mol% TiO₂의 조성으로 하였다. 그림 1은 바리스터의 일반 제조공정과 제작된 ZnO 바리스터를 보이고 있다 [3].

그림 2는 제작된 바리스터의 실물에 근사하도록 모델링된 ZnO 바리스터의 구조를 보이고 있으며, 그림 3에 보이는 바와 같이 바리스터가 동작 시 열폭주 현상을 해석하기 위하여 바리스터의 직경은 10 mm, 두께는 1 mm, 은전극의 직경은 8 mm, 전극 두께는 0.1 mm로 모델링하였다.

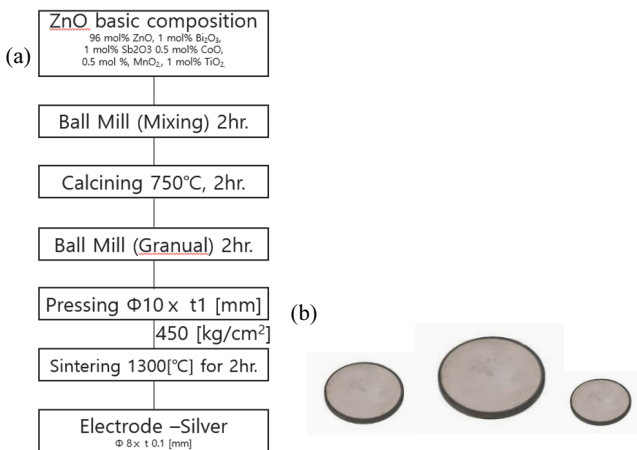


Fig. 1. Fabrication process of ZnO varistor (a) fabrication process and (b) fabricated ZnO varistor.

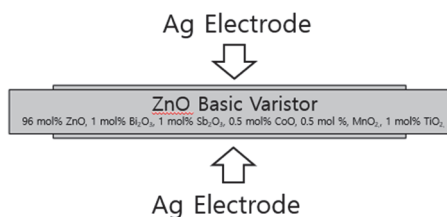


Fig. 2. Structure of ZnO varistor.

2.2 전압 전류 특성

다음 식 (1)은 ZnO 바리스터의 비직선특성을 나타내는 식이다. 여기서 I 는 바리스터 소자에 흐르는 전류이고, V 는 바리스터의 동작전압에 해당하며, k 는 형상계수이고, α 는 바리스터의 비직선계수를 나타내며, 100 정도의 값을 갖는다 [4,5].

$$I = kV^\alpha \tag{1}$$

바리스터의 전압전류 특성 곡선에서 바리스터가 동작할 때 100 Å 두께의 입계층에서 전계는 $10^7 \sim 10^8$ V/cm 정도이고, 이때의 바리스터의 순간 온도는 572 K 이상까지 이룬다고 알려져 있다 [6].

ZnO 바리스터의 입계층에 걸리는 전계가 1×10^8 V/cm 이상에서는 다음 식 (2)의 Fowler Nordheim Tunneling 전도식에 의하여 열폭주 전도 구간이 발생하여 바리스터에서 발열현상이 일어나는 원인이 된다 [6].

$$J_{FN} = \frac{q^2 E^2}{8\pi h \phi_{FN}} \exp\left(-\frac{4k\phi_{FN}}{3qE}\right) \tag{2}$$

$$\therefore k^2 = \frac{8\pi^2 m}{h^2}$$

여기서, J_{FN} 는 ZnO 바리스터가 동작 시 흐르는 전류밀도, q 는 전자의 전하량, m 은 전자의 질량, E 는 전계강도, h 는 프랑크 상수이고, ϕ_{FN} 는 ZnO 바리스터가 동작 시 터널링 장벽의 두께에 해당한다.

이때 주울열에 의하여 발생하는 열은 다음 식 (3)과 같으며, 발생하는 열이 300°C 이상까지 이르는 것으로 알려져 있다 [6].

$$H = 0.24i^2 Rt \text{ [cal]} \tag{3}$$

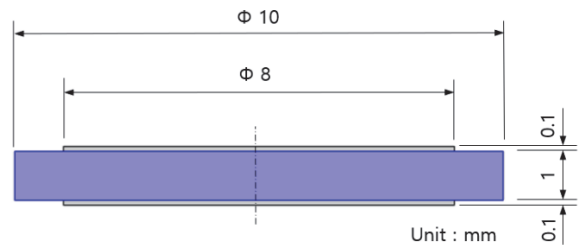


Fig. 3. Modeling size of ZnO varistors for comsol analysis.

2.3 ZnO 바리스터의 열전달 지배방정식

그림 3과 같이 모델링된 ZnO 바리스터에 대해서 전계 1×10^8 V/cm 이상의 전압을 인가하여 바리스터가 동작하는 상황에서 바리스터 내부의 열분포는 식 (4) 지배방정식을 이용하여 바리스터의 열분포 해석을 진행하였다 [7].

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + \alpha u = f$$

$$\therefore \nabla = \left[\frac{\partial}{\partial r}, \frac{\partial}{\partial z} \right] \tag{4}$$

여기서 u 는 원통 좌표계에서 독립변수 r, θ, z 및 t 의 종속함수, c 는 확산 계수이고, a 는 열흡수 계수, f 는 외부 입력 온도, e_a 는 물질특성 계수, d_a 는 감쇄특성 계수, α 는 물질의 보존 열대류 계수, β 는 물질의 열대류 계수, γ 는 물질의 보존열특성 계수를 나타낸다. 경계 조건은 Dirichlet를 사용하여 해석하였다 [7].

그림 3의 상부전극과 하부전극의 사이에 전압을 인가하여 발생하는 주울열이 바리스터 내부에서의 식 (4)의 지배방정식에 의한 발생열을 해석하기 위해서 유한 요소법을 이용하여 메시 해석을 하였다 [8,9].

3. 실험 결과 및 검토

최적의 바리스터 구조 설계를 위하여 유한요소 해석에 의한 바리스터 동작 시 발생하는 열폭주 현상에 대해서 Comsol 5.2 해석 프로그램을 이용하여 제시된 ZnO 바리스터의 구조에 대해서 식 (4)의 지배방정식을 이용하여 열전달 특성을 해석하였다.

그림 4에 상부전극과 하부전극 사이의 ZnO 바리스터 내부에서 Dirichlet에 의한 유한 요소법에 의한 메시해석 결과를 보이고 있다.

그림 5에는 ZnO 바리스터에 전압을 인가하여 바리스터가 동작하는 상황에서 발생하는 열분포현상을 보이고 있다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 중심전극 부근의 온도가 570 K 부근까지 상승하는 것을 확인할 수 있다. 중심전극에서 측면으로 멀어지면서 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이때 열분포가 진행하면서 바리스터 내부의 입도 균질도나 불순물의 분포 구배 및 결합분포의 균질도에 열확산 정도가 영향을 받을 것으로 예상된다.

그림 6(a)는 동작하는 ZnO 바리스터에서 열분포를 해석하기 위해서 하부전극 부근에서 절단한 단면의 위치를 나타낸다. 그림 6(b)는 그림 6(a) 단면에서의 열분포를 해석한 결과를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 중

심부에서는 572 k까지 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, 은전극과 ZnO 바리스터의 쇼트키 장벽 사이에서 온도 구배가 불규칙적으로 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 현상은 은전극과 ZnO 바리스터 쇼트키 장벽의 전위 구배가 급격하게 발생하는 전이구역에서 바리스터의 내부 온도분포에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 전극 설계 시 쇼트키 장벽의 전위 구배를 완만하게 하도록 주전극과 바리스터의 경계 부근에서 일함수가 다른 하이브리드 형태의 보조 전극의 사용이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

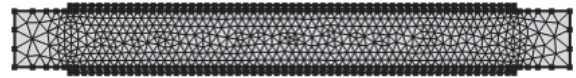


Fig. 4. Mesh analysis of ZnO varistor.

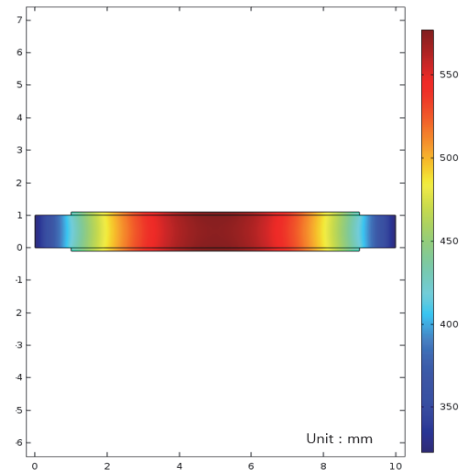


Fig. 5. Thermal distribution of ZnO varistor.

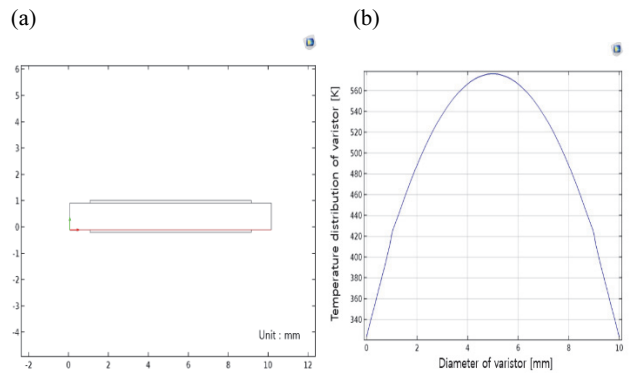


Fig. 6. Thermal distribution of varistor cross section (a) cross section and (b) thermal distribution.

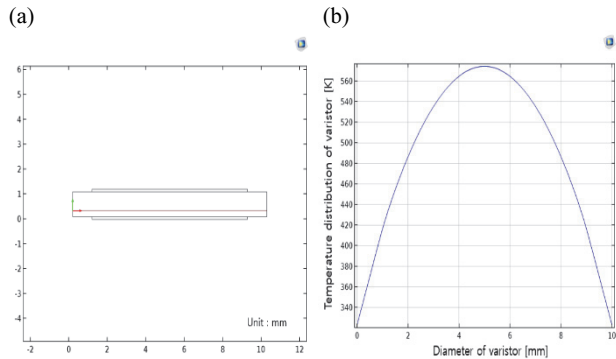


Fig. 7. Thermal distribution of varistor cross section (a) cross section and (b) thermal distribution.

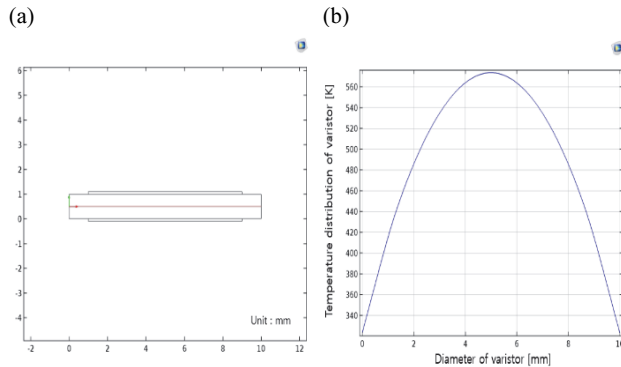


Fig. 8. Thermal distribution of varistor cross section (a) cross section and (b) thermal distribution.

그림 7(a)는 동작하는 ZnO 바리스터에서 열분포를 해석하기 위해서 하부전극에서 0.25 mm 높이 부근에서 절단한 단면의 위치를 나타낸다. 그림 7(b)는 그림 7(a) 단면에서의 열분포를 해석한 결과를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 중심부에서는 572.2 k까지 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, ZnO 바리스터 표면에서의 열분포와 달리 열분포 구배가 균일하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 은전극과 ZnO 바리스터의 쇼트키 장벽 사이에서 온도 구배의 영향이 없는 것으로 확인이 되었다.

그림 8(a)는 동작하는 ZnO 바리스터에서 열분포를 해석하기 위해서 ZnO 바리스터의 중심인 하부전극에서 0.5 mm의 높이 부근에서 절단한 단면의 위치를 나타낸다. 그림 8(b)는 그림 8(a) 단면에서의 열분포를 해석한 결과를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 중심부에서는 572.6 k까지 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있었으며,

Table 1. Maximum temperature of compute region.

Compute region	Max. Temperature [K]
Height 0 [mm]	572
Height 0.25 [mm]	572.2
Height 0.5 [mm]	572.6

ZnO 바리스터 표면에서의 열분포와 달리 열분포 구배가 더욱 균일하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 은전극과 ZnO 바리스터의 쇼트키 장벽 사이에서 온도 구배의 영향이 거의 없는 것으로 확인되었다. 이러한 결과로부터 ZnO 바리스터는 두께, 밀도, 기공분포, 불순물 및 입경 분포의 균일도가 필요하며, 전극 두께의 차이가 없어야 열분포 구배가 개선되는 것으로 판단된다.

표 1은 ZnO 바리스터의 단면에서 측정된 중심부의 최고온도는 572~572.6 K까지 하부전극에서 상부전극 쪽으로 중심부로 이동할수록 온도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 바리스터 외곽에서 중심부로 이동할수록 온도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 96 mol% ZnO, 1 mol% Bi₂O₃, 1 mol% Sb₂O₃, 0.5 mol% CoO, 0.5 mol%, MnO₂, 1 mol% TiO₂의 성분으로 조성된 ZnO 바리스터에 대해서 최적의 바리스터 구조 설계를 위하여 유한요소 해석에 의한 바리스터 동작 시 발생하는 열폭주 현상에 대해서 Comsol 5.2 프로그램을 이용하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ZnO 바리스터에서 전극과 바리스터 사이의 쇼트키 장벽의 영향이 크지 않도록 전극 두께를 얇게 하고, 하이브리드 형태의 전극의 도입하면 열구배 균형이 개선될 것으로 판단된다.
- 2) ZnO 바리스터는 두께, 밀도, 기공분포, 불순물 균일도 및 입경분포의 균일도가 필요하며, 전극 두께 차이가 없어야 열분포 구배가 개선되는 것으로 판단된다.

위의 결과를 ZnO 바리스터를 설계하는 데 적용하면 최적의 ZnO 바리스터의 구조를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

ORCID

Kyung-Uk Jang

<https://orcid.org/0000-0002-0599-8370>

REFERENCES

- [1] F. Rettig and R. Moos, *Solid State Ionics*, **179**, 2299 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2008.08.006>]
- [2] D.H.A. Besisa, E.M.M. Ewais, E. A. Mohamed, N.H.A. Besisa, and Y.M.Z. Ahmed, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **203**, 110160 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110160>]
- [3] Z. Li, X. Ren, X. Wang, W. You, M. Zhong, A. Kong, X. Lao, H. Jiang, W. Yu, L. Jin, Z. Yao, and L. Shi, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **133**, 105945 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.105945>]
- [4] X. Zhao, M. Guo, Z. Zhang, W. Shi, B. Zhang, X. Lyu, R. Wen, and Y. Li, *J. Alloys Compd.*, **894**, 162543 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162543>]
- [5] W. Preis, *J. Phys. Chem. Solids*, **99**, 43 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2016.08.005>]
- [6] B. Kaufmann, T. Billovits, and P. Supancic, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **41**, 1969 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.10.052>]
- [7] Altsoft, COMSOL Multiphysics Version 4.0, *Sealing Technol.*, **2010**, 1 (2010). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(10\)70335-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(10)70335-4)]
- [8] V. Vita and C. A. Christodoulou, *Electr. Power Syst. Res.*, **133**, 87 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.11.041>]
- [9] Z. Topcagic, T. Tsovilis, and D. Krizaj, *Electr. Power Syst. Res.*, **164**, 253 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.08.001>]