2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2003.7.21-23

ZnO 바리스터의 유전특성 및 등가회로

허진석*, 박상호**, 강대하*
*부경대, **울산기능대

Dielectric Properties and Equivalent Circuit of ZnO Varistor

J. S.* Her, S. H. Park**, D. H. Kang*
*Pkyong National University., **Ulsan Polytechnic College

Abstract - In this study capacitance and dielectric loss tanδwere measured with frequency changes for commercial ZnO varistors with pin-type leads and equivalent circuit simulation was proposed.

The leakage inductance in pin leads and the stray caoacitance could be seperated from the dielectric characteristics of ZnO varistors by the simulation of equivalent circuit. The equivalent circuit model considered semiconduction layer, dielectric layer and depletion layer as the grain boundary structure of varistor is well fitted to the observed data.

1. 서 론

ZnO 바리스터는 일본에서 최초로 개발된 이래[1] 현재에는 전기기기의 실용적 보호소자로서 확고한 지위를 확보하고 있다. ZnO 바리스터는 높은 비선형 V-I 특성을 가지는 소자이며 기능면에서 back-to-back 제너 다이오드와 유사하지만 훨씬 더 큰 전류용량과 에너지 조절능력을 가지는 전압제어 스위칭 소자라 할 수 있다. 이러한 특성을 가진 ZnO 바리스터는 얇은 절연성 산화물 장벽이 도전성 결정립을 둘러 싸고 있는 구조를 가지며 표준 소결기법에 의해 생산된다.

바리스터 작용의 발현을 설명하는 도전기구로서는 공간전하 제한전류설(space charge limitted current)[2], 터널링[4] 및 이중 쇼트키 장벽설[3,5,6]을 들 수 있다. 현재 널리 적용되고 있는 메카니즘은 이중 쇼트키 장벽설이며 반도체의 전기적 특성을 해석할 때 상용되는 에너지 밴드를 사용하여 바리스터의 비직선성을 설명하고 있다.

전자세라믹 재료로서 구성되어 있는 바리스터는 일종의 유전체로 볼 수 있다. 그러나 유전체 이론은 일반적으로 대부분 선형계에 대하여만 전개되어 있어서 항복영역에서의 금속-산화물 바리스터를 다루는 데에는 응용할 수 없다. 만약 항복전압 보다 훨씬 낮은 인가전압에 국한한다면 일차적 근사화에 대하여는 바리스터가 ohm성 이라 할 수 있다[7]. 이러한 전제조건을 고려하면 선형응답 이론[8]을 이용하여 금속-산화물 바리스터의 주파수 응답 및 유전손실 메카니즘을 분석할 수 있다. 이와 같은 유전이론을 바탕으로 바리스터의 등가회로[9]가 제안되었으며 현재에도 널리 이용되고 있다[10]. 그러나 이 등가회로를 구성하고 있는 소자들(저항 및 정전용량)은 주파수 의존성이며, 이러한 소자의 값을 결정하는 데에는 일반적인 유전이론 만으로는 설명할 수 없다. 한편 시판되고 있는 상용 ZnO 바리스터는 핀형 리드부 바리스터가 많으며 이를 대상으로 정전용량 및 유전손실(tanδ)을 측정할 경우 리드(lead)의 인덕턴스가 포함되어 바리스터의 유전특성 분석에 장애를 준다.

본 연구에서는 핀형 리드의 인덕턴스를 분리하는 방법을 포함하여 반도전층, 유전층 및 공핍층을 고려한 등가회로를 제안하여 시뮬레이션을 행하고 그 결과를 분석하였다.

2. 바리스터의 유전특성에 대한 등가회로 시뮬레이션

2.1 시뮬레시션

바리스터의 미세구조는 결정립과 이것을 둘러싸고 있는 입계의 메트릭스로 되어있다. 바리스터의 주 구성요소인 결정립은 도전율이 높으므로 소 신호응답의 경우에는 인가전압의 대부분이 입계에 걸리게 된다. 바리스터 재료는 세라믹스로서 그 유전율은 매우 크다. 또한, 2-1절의 밴드모델에서 설명한 바와 같이 반도전성 결정립과 입계로 구성되어 있는 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 바리스터를 하나의 등가회로로 취급할 경우는 저저항의 결정립, 입계의 반도전성, 유전성 및 고저항의 공핍층을 고려대상으로 해야한다. 그러므로 본 연구에서는 이들 고려사항을 다음과 같이 소자화 하였다.

(1) 결정립 : 저저항 R_g로서 입계와 직렬로 연결됨

(2) 반도전층 : 저저항 R_S 및 정전용량 C_S의 병렬로 간주함

(3) 유전층 : 콘덕턴스 G_D 및 정전용량 C_D의 병렬로 간주함

(4) 공핍층 : 고저항 R_B 및 정전용량 C_B의 병렬로 간주함

여기서, R_g, R_S, C_S, R_B, C_B는 주파수 의존성이 없으나 G_D와 C_D는 유전완화현상에 의하여 다음과 같은 주파수 의존성을 갖는다. 유전층의 정전용량 C_D^*는 유전율 ε^*에 대하여 식(2-1)과 같은 관계식을 갖는다.

$$C_D^* = \frac{S}{t} \cdot \varepsilon^* \quad \text{.....(2-1)}$$

단, S : 전극면적 t : 유전체의 두께

따라서, C_D^*를 복소유전율과 관련시켜 나타내면 식(2-2)와 같이 쓸 수 있다.

$$C_D^* = \frac{S}{t} \cdot \frac{\Delta\varepsilon}{1+(j\omega\tau)^{\beta}} = \frac{\Delta C}{1+(j\omega\tau)^{\beta}} = C' - jC'' \quad \text{.....(2-2)}$$

단, $\Delta C = \frac{S}{t} \cdot \Delta\varepsilon$

C' : C_D^*의 실수부

C'' : C_D^*의 허수부

등가회로를 위하여 C_D^*를 어드미턴스 Y_D로 변환하면,

$$Y_D = j\omega C_D^* = \omega C'' + j\omega C' = G_D + j\omega C_D \quad \cdots\cdots(2\text{-}3)$$

단, $\omega = 2\pi f$, f: 주파수

$$G_D = \omega C'', \quad C_D = C'$$

로 주어진다. 이 식은 콘덕턴스 G_D 와 정전용량 C_D가 병렬로 연결됨을 의미하며, 주파수 의존성이다. 또한 유전층의 유전손실은 식(2-4)로 표현된다.

$$\tan\delta_D = \frac{G_D}{\omega C_D} \quad \cdots\cdots(2\text{-}4)$$

이상과 같이 소자화된 요소들을 조합하여 등가회로를 구성하였다. 이 때, 정전용량 및 유전손실은 서로 종속적인 관계이므로 동일주파수에 대하여 동시조사가 필요하다.

바리스터를 반도전층, 유전층, 공핍층 및 결정립의 직렬조합으로 가정하면 합성 어드미턴스 및 유전손실은 식(2-5) 및 식(2-6)이 된다.

$$Y_{DSB} = \frac{1}{\frac{2}{\frac{1}{R_S}+j\omega C_S} + \frac{2}{G_D+j\omega C_D} + \frac{2}{\frac{1}{R_B}+j\omega C_B} + R_E} = G_{DSB} + j\omega C_{DSB} \quad \cdots\cdots(2\text{-}5)$$

$$\tan\delta_{DSB} = \frac{G_{DSB}}{\omega C_{DSB}} \quad \cdots\cdots(2\text{-}6)$$

식(2-5)의 정전용량 C_{DSB} 및 식(2-6)의 $\tan\delta_{DSB}$는 순수한 바리스터 물질의 유전특성을 나타낸다.

실제로는 핀형 리드부의 인덕턴스 L_0 및 두전극 사이의 표유정전용량(stray capacitance) C_0을 고려해야 하며, 이 L_0 및 C_0는 주파수에 의존하지 않는다.

따라서 이러한 L_0 및 C_0을 고려하면 식(2-5) 및 식(2-6)은 식(2-7) 및 식(2-8)로 된다.

$$Y_m = \frac{1}{\frac{1}{Y_{DSB}+j\omega C_0} + j\omega L_0} = G_m + j\omega C_m \quad \cdots\cdots(2\text{-}7)$$

$$\tan\delta_m = \frac{G_m}{\omega C_m} \quad \cdots\cdots(2\text{-}8)$$

여기서 G_m 및 C_m은 식(2-9) 및 식(2-10)으로 주어진다.

$$G_m = \frac{G_{DSB}}{1-\omega^2 L_0\{\omega^2 L_0(C_{DSB}+C_0)^2 + 2(C_{DSB}+C_0) + L_0 G_{DSB}^2\}} \quad \cdots\cdots(2\text{-}9)$$

$$C_m = \frac{(C_{DSB}+C_0)\{1-\omega^2 L_0(C_{DSB}+C_0)\} - L_0 G_{DSB}^2}{1-\omega^2 L_0\{\omega^2 L_0(C_{DSB}+C_0)^2 + 2(C_{DSB}+C_0) + L_0 G_{DSB}^2\}} \quad \cdots\cdots(2\text{-}10)$$

따라서, 측정장치에 의해 측정되는 바리스터의 정전용량 및 유전손실은 C_m 및 $\tan\delta_m$이다. 그림2-1은 이상의 모든 사항을 고려하여 나타낸 핀형 리드부 바리스터의 등가회로이다.

그림2-2 및 그림2-3은 이상에서 고려한 식들에 의한 시뮬레이션 결과의 일례로서 바리스터전압 22[V]의 바리스터에 대한 것이다. tanδ 및 정전용량의 실험 데이터와 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 알 수 있으며 리드의 인덕턴스를 분리한 유전특성이 전형적인 바리스터의 유전특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 핀형 리드부 ZnO 바리스터의 정전용량 및 유전손실 $\tan\delta$를 주파수 변화로 측정하여 이들의 데이터를 바탕으로 바리스터의 등가회로 모델에 대한 시뮬레이션을 행하였다. 등가회로 모델은 바리스터의 유전특성과 이 특성의 분석에 장애가 되는 리드부의 인덕턴스 L_0와 두 전극 사이의 표유정전용량 C_0를 고려하여 등가회로를 제안함으로써 바리스터의 유전특성으로부터 L_0 및 C_0을 분리하는 방법을 제시하였다.

바리스터의 입계층 구조로서 반도전층, 유전층, 공핍층을 고려한 등가회로 모델이 실제의 유전특성 데이터와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

[참 고 문 헌]

[1] M.Matsuoka, et al, Suppl. J. Jpn. Soc. Appl. Phys, Vol. 39, pp. 94 (1970)

[2] M. Matsuoka, "Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics". Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 10, pp. 736~746 1971

[3] 向江和郎, "ZnO バリスタの 導電機構", シクトロニク・セラミクス、 1989. 5月号 バリスタ特集, pp. 19~25 ,1989

[4] G. D. Mahan, Lionel. M. Levinson and H. R. Philipp, "Theory of conduction in ZnO varisters", J. Appl. Phys. Vol. 50(4), pp. 2799~2812, April 1979

[5] P. L. Hower and T. K Gupta, "A barrier model for ZnO varistors", J. Appl. Phys. Vol. 50(7). pp. 4847~4855. July 1979

[6] David. R. Clake, "Varistors Ceramics", J. Am. Ceram. Soc.Vol. 82(3), pp. 485~502 (1999)

[7] Lionel. M. Levinson and H. R. Philipp, "The Physics of metal oxide varistors", J. Appl. Phys, Vol. 46(2), pp. 1332~1340, March 1975

[8] August Chelkowski, Dielectric. Physics, Elsevier. Scientific. Publishing. Company, Amsterdam, 1980

[9] Lionel. M. Levinson and H. R. Philipp, "AC properties of metal-oxide varistors", J. Appl. Phys. Vol. 47(3). pp. 1117~1122, March 1976

[10] S. A. Pinaro. et al, "Effect of Cr_2O_3 on the electrical properties of multicomponent ZnO varistors at the pre-breakdown region", J. Mater. Sci, Vol. 30, pp. 133~141 (1995)

[11] G. E. Pike, "Semiconducting Polycrystalline Ceramics", Materials Science and Technology. Vol. 11, pp. 731~754 , 1994

[12] 日本電氣學會, 電氣物性と誘電体論, pp. 138~139,昭和52年
[13] Hsin Wang. et al, "Averaging effect on current-voltage charcteristics of ZnO varistors", Jpn. J. Appl. phys, Vol. 34, pp. 2352~2358, Part. 1, No. 5A, May 1995.
[14] 김석수 외, "피뢰기용 ZnO 바리스터 소자의 미세구조 및 전기적 특성에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 2001년도 하계학술대회 논문집, pp. 489~494
[15] 황희동 외, "보로노이 네트워크를 이용한 ZnO 바리스터의 전기적 특성 연구", 한국전기전자재료학회 1997년도 추계학술대회 논문집, pp. 85~89

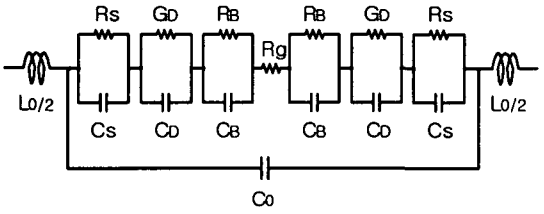

그림2-1 ZnO 바리스터의 등가회로

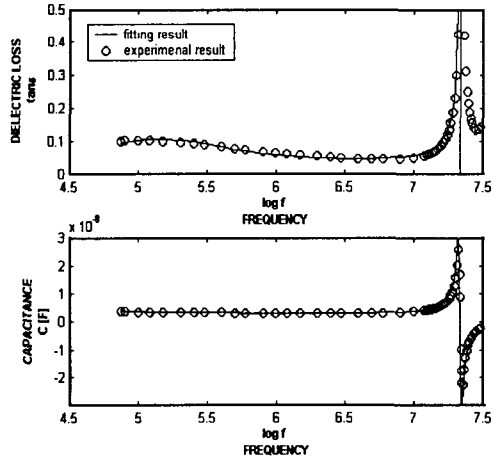

그림2-2 시료 SVR220D10B의정전용량 및 tanδ의
주파수특성에 대한 시뮬레이션 결과

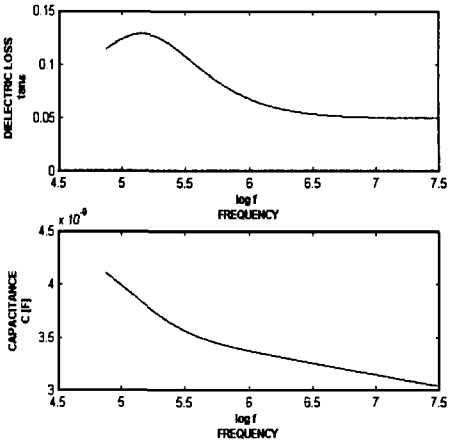

그림 2-3 시료 SVR220D10B이 순수한 유전특성