

뇌서지전류와 Ageing에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 미세구조변화

이복희, 강성만\*  
인하대학교 전기공학과

Change of the Microstructure of ZnO Arrester block  
by Lightning Surge Current and Ageing test

Bok-Hee Lee, Sung-Man Kang\*,  
Dept. of Electrical Engineering, Inha University

**Abstract** - This paper deals with the change of the micro-structure of ZnO associated with lightning surge current and ageing test.

In this work, a surge current generator which can produce 8/20 [ $\mu$ s], 6 [kA] impulse current is designed and fabricated to simulate the lightning impulse current. The residual voltage and leakage current flowing to ZnO blocks are observed. Also a compensation circuit was used in resistive current measurement. The micro-structures of ZnO arrester block were significantly changed by lightning surge current and accelerated temperature ageing test

1. 서 론

피뢰기(Lightning Arrester)는 전력계통에 침입하는 뇌서지, 개폐서지, 일시적 과전압 등의 전기적 에너지 대지로의 방출을 통하여 전송선로 및 발·변전기를 보호하는 역할을 한다. 1980년대 중반 이후부터 우수한 차단특성과 높은 서지 흡수능력을 가진 ZnO 피뢰기가 연구·개발되어 발·변전소 및 송전선로에 광범위하게 설치되고 있다. 그러나 ZnO 피뢰기에서 직렬갭의 제거는 전력계통의 운전전압이 직접 ZnO 소자에 인가되고 상시 미소 누설전류가 흐르게 된다. 이들 과정에서 피뢰기는 열화가 진행된다. 이렇게 열화된 피뢰기가 전력계통에 계속 설치되어 있으면 상용주파수 교류전압에서 과열 또는 그후 계속되는 보호동작으로 피뢰기가 폭발이나 지락사고로 진전하여 2차적인 경제적, 기술적 사고를 유발시킨다. 따라서 건전한 전력계통의 효과적인 보호를 위해서는 고장을 미연에 예측할 수 있는 피뢰기 열화진단기술의 확립이 필수적이다. 본 연구에서는 ZnO 소자의 열화 진단기구를 규명하기 위해 ZnO 피뢰기의 주된 열화원인이 되는 뇌서지 전류를 인가시켜 뇌 서지 전류에 의한 ZnO 소자의 미세구조의 변화를 비교·분석하였고, 또한 가속열화시험을 통해 ZnO 소자의 저항성 누설전류의 변화와 미세구조의 변화를 측정·분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

배전용 피뢰기로 사용되는 ZnO 소자의 열화의 정도를 제시하기 위해서는 뇌서지전류에 의한 특성변화와 가속열화시험에 의한 특성변화의 측정과 분석이 요구된다. 본 연구에서는 상용주파수 교류고전압 발생장치와 8/20 [ $\mu$ s]의 뇌서지전류 발생장치를 설계·제작하였으며, 누설전류의 측정과 분석을 위해 보상회로를 이용한 누설전류 측정계를 구성하였다. 또한 ZnO 소자의 기본특성과 약 후에 뇌서지전류 및 가속열화시험 후에 미세구조의 변화를 통한 소자의 특성변화를 측정하였다.

2-1. 보상형 누설전류 검출장치

산화아연(ZnO) 피뢰기에 흐르는 전체 누설전류는 저항성 누설전류와 용량성 누설전류의 합으로 이루어져 있어 열화의 정도를 평가하기 위해서는 순수한 저항성 전류만의 측정이 필요하다. 상용주파수의 교류전압 인가장치는 부하의 변동에 따른 변화가 적은 양질의 전원공급을 위하여 L-C 필터를 사용하였고, 온도오차가  $\pm 2(^{\circ}\text{C})$  미만인 항온조를 사용하였다.

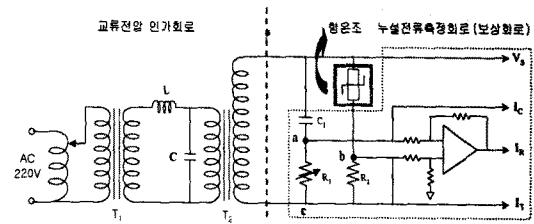


그림 1 저항성 전류를 측정하기 위한 보상회로

Fig. 1 A compensation circuit used in resistive current measurement

그림 1은 보상용 커패시터와 연산증폭기를 이용하여 전체 누설전류에서 저항성 및 용량성 누설전류성분을 분리측정이 가능한 보상회로의 개략도를 나타내었다. 이 회로 분석은 다음과 같은 회로방정식으로 표현할 수 있다.<sup>(1), (2)</sup>

$$I_T = \frac{V_{bc}}{R_2}, I_R = \frac{V_{bc}}{R_2}, I_C = \frac{V_{ac}}{R_2} \quad (1)$$

2.2 뇌서지전류 발생장치

ZnO 소자의 뇌서지전류에 의한 열화특성에 관한 연구를 수행하기 위하여 그림 3과 같은 실험장치 및 측정계를 구성하였다. 뇌서지전류 발생장치 및 측정회로로 구성하였으며, 뇌서지전류 발생장치는 최대 8/20 [ $\mu$ s] 6 [kA]를 발생시킬 수 있다. ZnO에 흐르는 방전전류는 로고우스키코일을 이용하여 측정하였고, ZnO의 제한전압은 고전압 Probe(Tek P6015A)를 사용하였다.

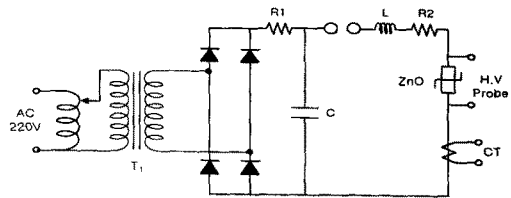


그림 2 뇌서지전류 발생장치 및 측정계의 구성

Fig. 2 Configuration of the lightning surge current generator and measurement system

### 2.3 실험방법

실험은 ZnO 소자의 누설전류와 뇌서지전류와 과전열 화시험에 따른 ZnO 소자의 미세구조를 통한 특성변화를 비교·분석하는 순서로 하였다. 기본 특성실험으로는 온도 변화에 따른 실험과 인가전압에 따른 누설전류변화를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

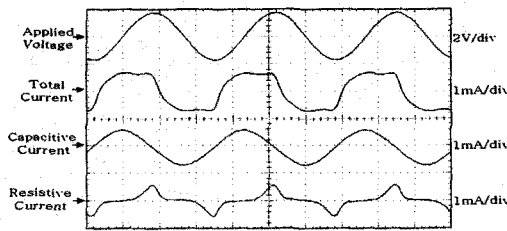
본 연구에서 사용한 ZnO 소자의 특성은 표 1과 같으며, 배전용 피뢰기(에관내에 ZnO 소자 6개로 구성)에 사용되는 block이며, 22.9[kV-y] 특고압 배전선로의 정상 운전조건에서 ZnO 소자 1개에 인가되는 전압은 2.2(kV<sub>rms</sub>)이다.

표 1 ZnO 소자의 특성

Table 1 Specifications of the ZnO block

직경	33[mm]
두께	29[mm]
정격전압	3(kV <sub>rms</sub> )
공칭방전전류	5[ka]

그림 3에 배전용 피뢰기로 사용하는 ZnO 소자에 4.5(kV<sub>p</sub>) 인 상용과전압을 인가하였을 때 흐르는 누설전류를 보상검출 장치를 통해 분리 측정된 인가전압, 전체전류, 용량성전류, 저항성전류의 파형을 나타내었다. 전체 누설전류에서 인가전압 보다 위상이 반주기 앞선 용량성 전류를 제거하였을 때 저항성 전류를 정확하게 검출할 수 있음을 알 수 있다.



(b) V<sub>s</sub> : 4.5(kV<sub>p</sub>) M5.00ms

It : 300[μA<sub>p</sub>], Ic : 300[μA<sub>p</sub>], Ir : 300[μA<sub>p</sub>]

그림 3 누설전류의 저항성과 용량성 성분

Fig. 3 The resistive and capacitive components of the leakage current

### 3.1 기본특성 실험

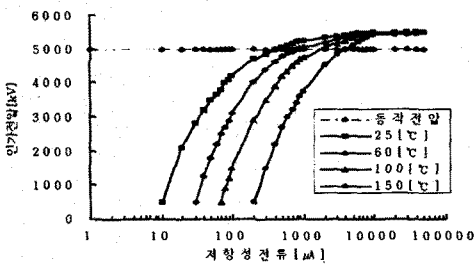


그림 4 온도에 따른 저항성 누설전류의 특성

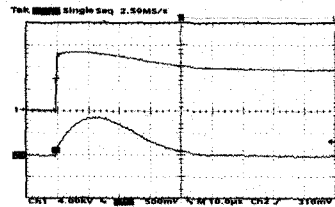
Fig. 4 Characteristics of resistive leakage current with temperature

그림 4는 보상검출장치를 이용하여 누설전류 영역에서의 저항성 전류의 온도 의존성을 semi log 그래프로

나타내었다. 데이터는 일정 온도의 항온조에 ZnO block를 60분 동안 유지시킨 후 각 전압에서 1분 동안 측정된 저항성 누설전류의 파크치로 나타내었다.

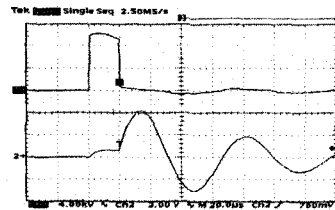
### 3.2 뇌서지전류 인가 실험

공칭방전전류의 약 1.2배 크기를 가지는 뇌서지전류(6(kA))를 ZnO 소자에 인가하였다. 그림 5(a)에는 뇌서지전류 인가시 정상상태인 ZnO 소자에 흐르는 방전전류와 소자 양단에서 측정된 제한전압과 과열의 예를 나타내었고, 그림 7(a)에는 이의 미세구조를 SEM형상으로 나타내었다. 전압-전류파형 모두 정상으로 나타났고, 미세구조는 약 10[μm] 크기의 ZnO Grain과 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 입체층에 의해 비교적 균일한 분포를 보이고 있다. 그림 5(b)는 ZnO 소자가 표면설파과피 될 때의 전압 전류 파형의 예이다. 설파과피시 흐르는 전류는 뇌서지전류 발생장치의 충전용 콘덴서와 과두조절용 인덕터 사이에 진동하는 단락전류의 형태로 나타나고, 이 단락전류에 의해 표면이 심하게 탄화된 흔적을 발견할 수 있었다. 그림 5(c)는 판통과피의 경우 전압-전류 파형을 나타내고, 이에 대한 미세구조의 형상을 그림 7(b)에 나타내었다. 제한전압과 방전전류의 크기가 표면설파과피시 보다 작게 나타났고, ZnO 소자의 미세구조는 전반적으로 정상상태보다 구멍(hole)이 크게 다수가 발생하였다.



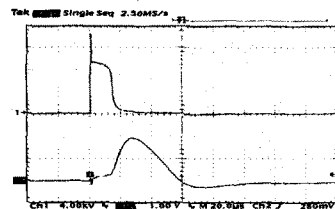
상 : 제한전압 [4.0kV/div]  
하 : 방전전류 [3.5ka/div]

(a) 정상상태



상 : 제한전압 [4.0kV/div]  
하 : 방전전류 [14ka/div]

(b) 표면설파시



상 : 제한전압 [4.0kV/div]  
하 : 방전전류 [7.0ka/div]

(c) 판통과피시

그림 5 뇌서지전류 인가시 전압-전류파형 예  
Fig. 5 Typical voltage and current waveforms as the lightning current is applied.

### 3.3 과전온도열화에 의한 실험

ZnO 소자의 발열과 직접적인 관계가 있는 저항성 전류는 일정한 전압 및 온도에서 식(2)과 같이 시간의 증가와 더불어 변화하는 것으로 알려져 있다.<sup>16)</sup>

$$i_r = i_0 + h * t^{1/2} \quad (2)$$

여기에서  $i_r$ 는 시간  $t$ 에서의 저항성 전류이며,  $i_0$ 는 초기 저항성 전류이고,  $h$ 는 비례상수이며, 온도에 의존한다.

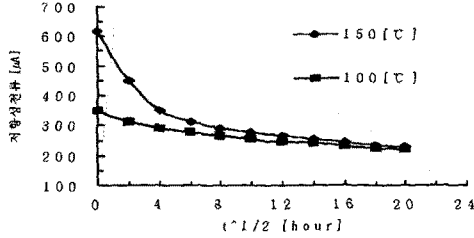
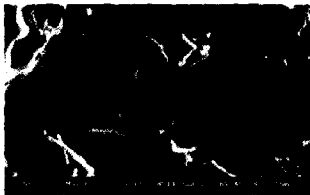


그림 6 과전온도열화 시간에 따른 저항성 전류의 특성  
Fig. 6 Changes of resistive current with time of temperature ageing

인가전압은 IEC에서 규정한 동작개시전압의 80% (0.8E<sub>0.3</sub>)인 3(kV)의 전압을 온도 150(°C), 100(°C)를 일정하게 유지하면서 시간의 경과에 따른 저항성 전류 크기의 변화를 그림6에 나타내었다. 일반적으로 높은 온도, 높은 전압에서의 가속열화실험을 통해 수명평가를 하게 되면, 일반적으로 ZnO 소자는 식(2)과 같이 비가역 화학반응의 일종인 Arrhenius 법칙을 따르는 것으로 알려져 있다. 그러나 ZnO 소자의 장기간 누설전류 특성과 열화특성은 물질의 조성비, 제조공정에 크게 의존성을 가진다.



(a) 정상시료



(b) 관통파괴시료



(c) 가속열화시료

그림 7 시험조건에 따른 ZnO 소자의 미세구조 형상  
Fig. 7 Microstructures of ZnO block according to the test condition

ZnO 소자의 물리적인 변화를 비교하기 위해 그림 7(a)는 정상시료, 7(c)는 가속열화시료의 SEM형상을 나타내었다. 본 실험에 사용한 ZnO 소자는 그림 6에서 보는 바와 같이 식(2)와는 다른 경향을 나타내었다. 이는 ZnO와 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 각각 1970(°C)와 825(°C)의 용융 점을 갖고 있지만 150(°C)의 온도와 교류전원이 동시에 인가될 경우에 ZnO에 존재하는 결합인 이온과 Zn 중간 격자의 전자작용, 그리고 열보조확산으로 ZnO 소자의 누설전류 전도기구에서 지배적인 영역인 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 입계층이 정상시료에 비해 공간적으로 보다 안정되게 채워진 것을 알 수 있다.

### 3. 결론

ZnO 입계층에 이온과 전자가 이동하여 축적됨으로서 열화가 진행되는 것으로 보는 관측이 지배적이다. 이러한 현상을 물리 화학적인 접근 뿐만 아니라 실제 적용 실험을 통해 연구되어지고 있으나, 아직 명확한 이론이나 전도기구는 설명되지 않는다. 그러나 이론적 측면보다도 고가전력설비의 보호라는 파괴기의 경제적 책임 때문에 새로운 파괴기의 개발과 더불어 파괴기의 수명평가는 반드시 이루어져야 한다.

본 논문에서는 전력계통에서의 뇌서지전류에 의한 ZnO 소자의 열화특성 및 가속열화시험에 의한 열화특성을 미세구조의 변화에 대한 분석실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 온도가 증가함에 따라 ZnO 소자에 흐르는 저항성 누설전류는 증가하였다.
- (2) ZnO 소자의 장기간 누설전류 특성과 열화특성은 물질의 조성비, 제조공정에 크게 의존하고, 본 실험에 사용한 시료의 경우 150(°C), 동작개시전압의 80% (0.8E<sub>0.3</sub>)을 400시간 동안 인가한 가속열화시험 결과 ZnO 입계층의 재소결에 의해 치밀하게 채워지는 것을 알 수 있었다.
- (3) 뇌서지전류에 의해 파괴되는 ZnO 소자는 관통파괴보다도 소자의 옆면을 통한 섬락파괴가 많이 발생하였고, 관통파괴된 소자의 미세구조는 정상상태 보다 구멍(hole)이 크게 다수가 발생하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] S. Tominaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki, T. Nitta, "Stability and long term degradation of Metal Oxide surge arrester", IEEE Trans. on power Apparatus and System, Vol. PAS-99, No. 4 July/Aug 1980
- [2] S. Shirakawa, F. Endo, H. Kitajima, S. Kobayashi, K. Kurita and K. Goto, M. Sakai, "Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No 3, July 1988
- [3] J. Lundquist, L. Stensrom and A. Schei, B. Hansen, "New method for measurement of resistive leakage currents of Metal-Oxide surge arrester in service", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5, No 4, November 1990
- [5] M. V. Lat "Thermal properties of metal oxide surge arresters", IEEE Transaction on Power Apparatus and system, Vol. PAS-102, No. 7, July 1983
- [6] W. G. carlson, Dr. T. K. Gupta, A. Sweetana "A procedure for estimating the life time of gapless metal oxide surge arresters for AC application", IEEE Transaction on Power systems, Vol. PWRD-1, No. 2, April 1986