

# 산화아연 피뢰기 소자의 열적 특성 향상을 위한 연구

(A study on the improvement of the thermal properties of ZnO arrester blocks)

김동성\* · 이수봉 · 이승주 · 김동규 · 양순만 · 이복희

(Dong-Seong Kim · Su-Bong Lee · Seung-Ju Lee · Dong-Kyu Kim · Soon-Man Yang · Bok-Hee Lee)  
인하대학교 IT공대 전기공학과

## Abstract

In this study, in order to investigate the thermal and electrical properties of ZnO arrester block against 60[Hz] AC voltage, the changes in leakage current were measured. The temperature distribution appearing on the ZnO arrester blocks was observed using a forward looking infrared camera. In particular, the correlation between the thermal and electrical properties of a ZnO arrester block was analyzed experimentally. From this analysis, the thermal phenomena resulting from the heat generation and dissipation of the ZnO arrester block were interpreted. The degradation and thermal runaway phenomena of ZnO arrester block are closely related to the temperature limit of the ZnO arrester block. The installation of an additional metal electrode has resulted in the decrease of the leakage current due to the heat dissipation.

## 1. 서론

산화아연(ZnO) 피뢰기 소자는 우수한 서지에 대한 보호특성을 가지고 있어 송배전시스템을 보호하고 절연 레벨의 저감을 위해 사용되고 있다. 일반적으로 ZnO 피뢰기 소자의 수명예측은 ZnO 피뢰기 소자의 온도상승에 따른 내전압특성에 의해 평가되고, 수명이 끝나는 영역에서 열폭주가 일어나게 된다. ZnO 피뢰기 소자의 온도가 서지에너지를 흡수하여 온도한계를 초과하면 이후의 AC전압의 지속적인 스트레스로 인한 누설전류의 증가로 열발생의 증가와 더불어 열화현상이 발생하게 된다. 이러한 열화현상은 열발생과 열방출 사이의 관계로 해석할 수 있으며, 이러한 열화기구의 해석은 피뢰기 수명의 예측에 매우 중요하다.

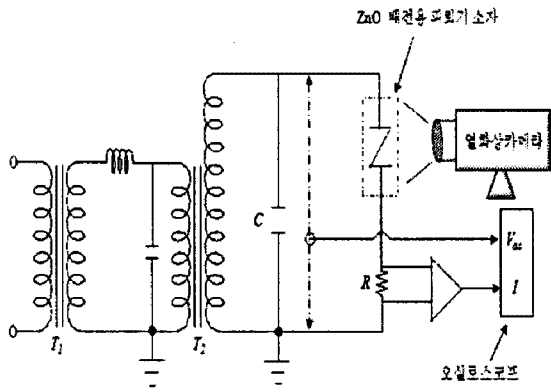
본 연구에서는 60 [Hz] 교류전압에 대한 ZnO 피뢰기 소자의 열적 특성을 파악하기 위해서 누설전류의 변화를 측정하고, 열화상카메라를 이용하여 ZnO 피뢰기 소자에 나타나는 온도분포를 관측하였다. 그리고 구리전극을 ZnO 피뢰기 소자에 추가로 설치함으로써 그에 따른 특성을 실험적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 ZnO 피뢰기 소자의 열발생 및 열방출에 의한 열화특성을 검토하였다.

## 2. 측정계의 구성 및 방법

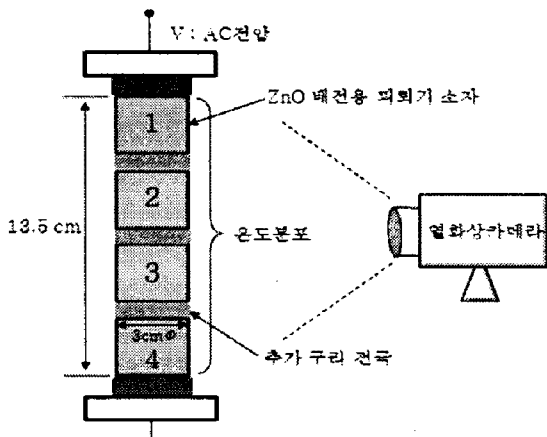
### 2.1 측정계의 구성

본 연구에서 사용된 ZnO 배전용 피뢰기 소자는 정격전압과 공칭방전전류가 각각 18 [kV], 25 [kA]인 피뢰기에서 채취하였다. 배전용 피뢰기 내부에 직렬로 접속된 4개의 ZnO 피뢰기 소자만을 배전용 피뢰기로부터 분리하여 ZnO 피뢰기 소자에서 나타나는 열적·전기적 특성을 분석하였다. 그림 1은 측정계의 구성도를 나타내었다. 그림 1(a)는 60 [Hz]의 교류전압을 약 50 [kV]까지 발생시킬 수 있는 교류전압 발생장치이다. ZnO 피뢰기 소자의 인가전압과 누설전류의 측정에는 디지털 오실로스코프(BW 1[GHz], 5[Gs/s] 4채널), 수동형 고전압 프로브(BW 75[MHz], 감쇠율 1000X, 최대입력 DC 20kV), 능동형 FET 프로브(BW 1 [MHz], 감쇠율 1/10, 최대전압 ±15 [V])를 사용하였다.

본 실험에 사용된 ZnO 피뢰기 소자의 정격전압과 공칭방전전류가 각각 3.6 [kV], 2.5[kA]이며, 직경이 30 [mm], 두께가 28 [mm]인 ZnO 피뢰기 소자 5개를 직렬로 시험용 지그에 설치하였다. 또한 직경 30 [mm], 두께 5[mm]로 절삭한 구리 전극을 ZnO 소자 사이마다 설치하여 실험을 수행하였다. 각각의 ZnO 피뢰기 소자에서 나타나는 열적특성을 관찰하기 위하여 열화상카메라(100,000 [fps] 이상의 컬러 디지털 이미지 촬영, 4[GB] 이상의 메모리)를 사용하였으며, 실험실 내부 온도는 20 [°C]로 일정하게 유지하였다. 각각의 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 온도분포는 20분 간격으로 측정하여 최대값 및 최소값, 평균값으로 열화상카메라의 메모리에 저장하였다.



(a) 측정회로



(b) ZnO 피뢰기 소자의 전극 배치도

그림 1 측정계의 구성  
Fig.1. Circuit diagram of the measuring system

## 2.2 측정방법

ZnO 배전용 피뢰기는 상용전원에 항상 노출되어 있기 때문에 장시간 사용하게 되면 누설전류가 점점 증가하게 되고 ZnO 피뢰기의 온도가 올라가게 되며 그에 따라 쇼트키형 장벽을 극복할 수 있는 열적으로 활성화된 전자수가 증가하게 된다. 즉, 열화는 전위장벽의 변형에 의하여 발생하며 일반적으로 동일한 소자에 대한 높은 온도 및 대전류가 흐르는 동안 열화가 진전되어 저항성 누설전류가 증가하고, 전체 피뢰기 온도가 ZnO 소자에 열발생이 피뢰기의 열을 외부로 발생시키는 열발산 보다 커져서 짧은 시간 내에 소자는 열폭주하게 된다.[3]

따라서 본 연구에서는 이러한 ZnO 피뢰기 소자 사이에 열적 특성의 향상을 위하여 금속 전극을 추가로 설치하여 그에 따른 ZnO 피뢰기 소자의 열적특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 0.5 [mA], 0.7 [mA], 1.0 [mA]의 ZnO 피뢰기 누설전류가 흐를 때의 인가전압을 ZnO 피뢰기 소자에 일정하게 인가하고, 온도한계를 초과하여 온도가 급격하게 상승할 때까지 60 [Hz] 교류전

압을 최소 1시간에서 최대 6시간 동안 인가하였다. 이때 ZnO 피뢰기 소자에 나타나는 열적 특성을 관찰하였다. 그리고 구리 전극을 ZnO 피뢰기 소자 사이마다 설치하여 실험을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 ZnO 피뢰기 소자의 열적 특성

실험용 지그 사이에 ZnO 배전용 피뢰기에서 추출한 피뢰기 소자 4개를 직렬로 배치하고 최소 1시간에서 최대 5시간 동안 각각의 소자에서 나타나는 온도분포를 열화상카메라를 이용하여 측정하고 분석하였다. 그 후 자연방열 시켜 온도를 낮춘 후 구리 전극을 ZnO 배전용 피뢰기 소자 사이마다 추가로 설치하여 동일 조건하에서 실험을 반복하였다. 그림 2는 인가시킨 누설전류의 크기에 따라 1시간 40분 경과 후 열화상 카메라에 의해 측정된 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 온도분포를 나타내었다. 그림 2(a)는 전극이 설치되어 있지 않고 소자만 실험용 지그에 설치된 경우이고 (b)는 구리 전극을 추가로 설치하여 온도분포를 측정한 결과이다. ZnO 배전용 피뢰기 소자에 AC 전압을 인가했을 때 ZnO 배전용 피뢰기 소자를 통해 저항성 누설전류가 흐르기 시작하는 시작점의 크기가 0.5 [mA] 이상이므로 0.5 [mA], 0.7 [mA], 1 [mA]의 조건에서 실험하였다.

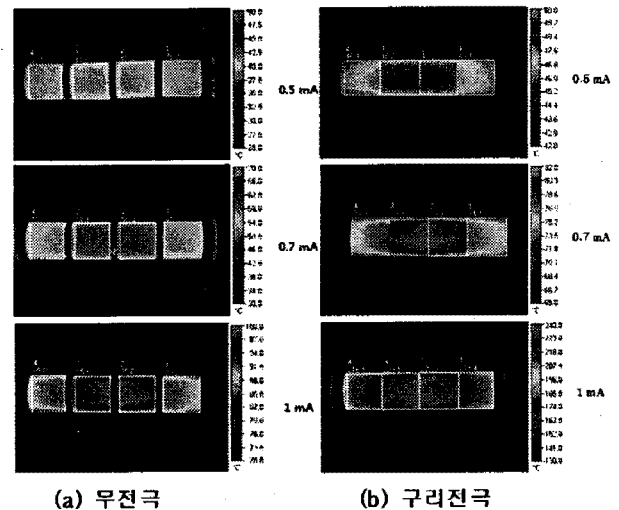


그림 2 열화상카메라에 의해 관측된 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포  
Fig. 2. Temperature distribution of ZnO arrester blocks observed ed by forward looking infrared camera

동일하게 1시간 40분 동안 AC 전압을 인가하였을 때 추가로 전극을 설치하지 않은 경우 각각의 ZnO 배전용 피뢰기 소자는 시작점 누설전류의 크기에 따라 다양한 온도분포를 보인다. 특히 1번과 4번 ZnO 배전용 피뢰기

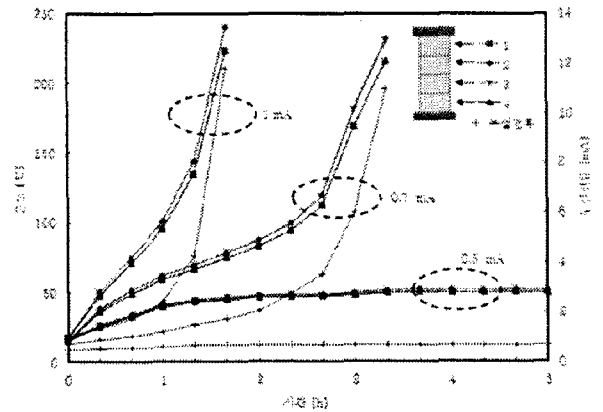
소자의 온도가 가장 낮게 나타났으며, 중앙에 배치된 2번과 3번 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 온도가 높게 나타났다. 이러한 현상은 ZnO 배전용 피뢰기와 유사하게 실험용 지그 양 끝부분에 금속전극이 설치되어 있어 대부분의 열방산이 ZnO 배전용 피뢰기 소자보다 열전도율이 높은 금속전극 부근에 집중되어 열전달이 더욱더 잘 이루어지기 때문이다. 하지만 직렬로 배치된 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 중앙부분에서는 ZnO 배전용 피뢰기 소자가 서로 접촉하고 있어 열전달이 거의 이루어지지 않고 열발생이 중앙의 ZnO 배전용 피뢰기 소자에 집중되기 때문에 다른 소자에 비해 높은 온도를 나타낸다. 이에 반해 추가로 금속 전극을 설치한 경우는 전극을 설치하지 않은 경우와 비교하여 전반적으로 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 온도는 낮게 나타났다. 이는 ZnO 배전용 피뢰기 소자 사이에 추가로 전극을 설치함으로써 열전달이 우수한 금속 전극에서 열방산이 잘 이루어져 온도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 특히, 시작점 누설전류가 1 [mA]인 경우는 전극의 설치로 인해 상당히 낮은 온도를 나타냈으며, 2번과 3번 ZnO 배전용 피뢰기 소자에 집중되었던 소자 사이의 금속 전극의 영향으로 온도분포도 다소 완화되는 것을 볼 수 있다. 또한 0.5 [mA]에서 1 [mA]로 시작점 누설전류가 증가할수록 동일한 시간에서 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 온도는 상당히 높아지는 것을 볼 수 있으며, 시작점 누설전류 1 [mA]에서는 추가전극이 설치되지 않은 경우 온도가 단 시간에 급속도로 증가하여 열폭주에 도달하는 것으로 나타났다. 구리전극을 설치한 경우 구리의 열전도율이 488 [W/m-K]로 열전도율이 높기 때문에 구리전극에서 열방산이 더욱 활발히 발생하여 ZnO 배전용 피뢰기의 온도가 낮아진 것으로 판단된다.

### 3.2 ZnO 피뢰기 소자의 전기적 특성

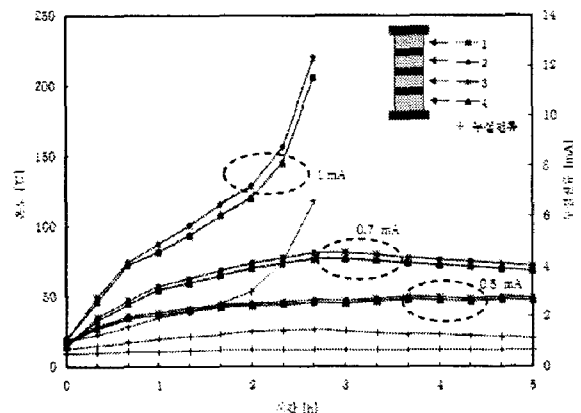
전압의 인가 시간에 따른 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 각 부분에서 나타나는 온도분포와 누설전류의 특성을 그림 3에 나타내었다. ZnO 배전용 피뢰기 소자는 누설전류의 시작점에 따라 다양한 특성을 나타내고 있다. 추가 금속전극을 설치하지 않았을 경우 시작점 누설전류가 1 [mA]에서 1시간 20분 만에 온도는 급상승하고 누설전류 또한 온도 증가에 비례하여 급격하게 상승하여 ZnO 배전용 피뢰기 소자가 열폭주(열발생>열방산)에 이르는 것을 보여주고 있다. 추가로 금속 전극을 설치한 경우도 유사한 특성을 보이고 있지만 열폭주에 이르는 시간이 구리 전극을 설치한 경우 2시간 20분으로 길어지는 것으로 나타났다.

또한 시작점 누설전류가 0.5 [mA]에서 추가전극이 설치되지 않은 경우 1시간가량 온도가 상승하다가 점차적

으로 안정하게 유지되는 경향을 보이며, 누설전류 또한 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 이는 구리 전극을 추가로 설치한 경우도 비슷한 양상을 보이며 금속 전극이 설치되지 않은 경우에 비해 ZnO 배전용 피뢰기 소자에서의 온도는 다소 낮게 나타났다.



(a) 전극을 설치하지 않은 경우



(b) 구리 전극 추가 설치

그림 3 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포와 누설전류 사이의 관계

Fig. 3. Relationship between the temperature distribution and leakage current of ZnO arrester blocks

마지막으로 시작점 누설전류가 0.7 [mA]에서는 추가로 전극이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우 확연한 차이를 보이고 있다. 추가전극이 설치되지 않은 경우 시간의 진행에 따라 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 각 부분에 있어서 온도와 누설전류가 서서히 증가함을 보여 주고 있다. 여기서도 시작점 누설전류가 1 [mA]와 마찬가지로 그래프의 끝 부분에서 곡선이 급속히 상승하는 것은 열폭주가 일어나고 있다는 것을 보여준다. 시작점 누설전류가 클수록 즉, 인가전압이 높을수록 열폭주에 도달하는 시간은 짧아진다. 이러한 열폭주 현상은 대류나 전도에 의한 열방산보다 열발생이 클 경우에 발생하게 되는데 열방산에 영향을 미치는 가장 큰 요소로는 실험이 진행되고 있는 곳의 대기의 온도와 상태에 의해서이다. 그러나 금속전극을 추가로 설치한 경우는 추가

금속전극이 설치되지 않은 경우에 비해 온도와 누설전류가 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 접촉부에 구리와 같이 열전도성과 온도전도성이 우수한 금속전극을 설치함으로써 구리전극 양쪽으로 열전달이 더욱 잘 이루어지기 때문에 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 온도가 전극이 설치되지 않았을 때보다 상대적으로 낮게 나타나고, 누설전류도 일정하게 유지되는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

구리전극을 추가로 설치하여 ZnO 피뢰기 소자의 열적 특성을 분석하여 기존의 전극이 설치되지 않은 ZnO 피뢰기 소자와 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

ZnO 피뢰기 소자의 열화 및 열폭주 현상은 열방출과 열발생을 결정짓는 ZnO 피뢰기 소자의 온도한계와 밀접한 관계가 있다. 온도한계를 초과하는 경우(열발생 > 열방출) ZnO 피뢰기 소자는 열화가 발생하며 최후에는 열폭주에 도달하게 되지만, 온도한계 이하(열발생 < 열방출)에서는 ZnO 피뢰기 소자 내부가 열평형상태가 되어 안정하게 된다. 즉, ZnO 피뢰기 소자의 열화는 누설전류와 ZnO 피뢰기 소자의 온도에 상당히 의존적이다. 미소한 누설전류에서 ZnO 피뢰기 소자에 추가 전극을 설치하여 온도를 낮추는 효과가 크게 나타나지는 않았지만, 큰 누설전류에서 추가 금속전극을 설치함으로써 누설전류를 감소시키고 열발생에 비해 열방출을 크게 하여 ZnO 피뢰기 소자의 온도를 낮추는 효과가 크게 나타났다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] S. Tominaga, Y. Shibuta, Y. Fujiwara, M. Imataki and T. Nitta, "Stability and long term degradation of metal oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-99, No. 4, pp.1548-1556, 1980
- [2] E. C. Sakushaug, J. S. Kresge, and S. A. Miske, Jr, "A new concept in station arrester design", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 2, pp. 647-656, 1977
- [3] S. Nishiwaki, H. Kimura, T. Satoh, H. Mizoguchi, S. Yanabu, "Study of thermal runaway/equivalent prorated model of ZnO surge arrester", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 2, 1984
- [4] K. Kobayashi, M. Mizuno, T. Aizawa, H. Hayashi, K. Mitani, "Development of zinc-oxide nonlinear resistors and their applications to gapless surge arresters ZnO surge arrester", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 4, pp. 1149-1158, 1978