

**산화아연 피뢰기 소자의 열적 특성 분석**

이복희, 이수봉, 이승주, 전병욱, 김동성, 정동철  
인하대학교

**Analysis of thermal characteristics of the ZnO arrester block**

Bok-Hee Lee, Su-Bong Lee, Seung-Ju Lee, Byung-Wook Jeon, Dong-Sung Kim, Dong-Cheol Jung  
Inha University

**Abstract** - This paper presents the thermal characteristics of ZnO arrester blocks under the AC voltage. The leakage currents of ZnO arrester blocks were measured as a function of time. The temperature distribution of ZnO arrester blocks were observed by the forward looking infrared camera. The degradation and thermal runaway of ZnO arrester blocks were related to the temperature of ZnO arrester blocks which depended on heat generation and dissipation. As a result, the degradation and thermal runaway of ZnO arrester blocks are associated with the temperature and leakage current of ZnO arrester blocks.

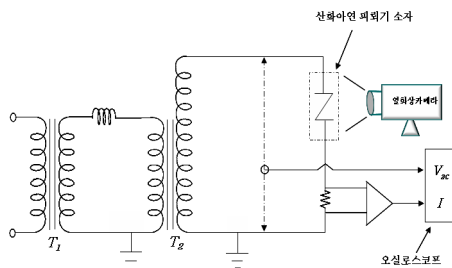
**1. 서 론**

산화아연(ZnO) 피뢰기 소자는 우수한 서지에 대한 보호특성을 가지고 있어 송배전시스템을 보호하고 절연레벨의 저감을 위해 사용되고 있다. 일반적으로 ZnO피뢰기 소자의 수명예측은 ZnO피뢰기 소자의 온도상승에 따른 내전압특성에 의해 평가되고, 수명이 끝나는 영역에서 열폭주가 일어나게 된다.[1][2] ZnO피뢰기 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.[3][4] 본 연구에서는 60 [Hz] 교류전압에 대한 ZnO피뢰기 소자의 열적 특성을 파악하기 위해서 누설전류의 변화를 측정하고, 열화상카메라를 이용하여 ZnO피뢰기 소자에 나타나는 온도분포를 관측하였다. 그리고 구리와 알루미늄, 스테인리스 전극을 ZnO피뢰기 소자에 추가로 설치함으로써 그에 따르는 특성을 실험적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 ZnO피뢰기 소자의 열발생 및 열방출에 의한 열화기구를 검토하였다.

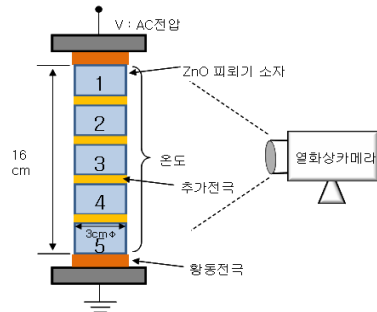
**2. 실험측정계의 구성 및 실험방법**

**2.1 실험장치 및 측정계의 구성**

실험용 시료는 정격전압과 공칭방전전류가 각각 18 [kV], 2.5 [kA]의 15년 동안 상시운전전압에서 스트레스를 받은 배전용 피뢰기에서 채취하였다. 배전용 피뢰기 내부에 직렬로 접속된 5개의 ZnO피뢰기 소자만을 배전용 피뢰기로부터 분리하여 ZnO피뢰기 소자에서 나타나는 열적특성을 분석하였다. 그림 1에 실험측정계의 구성도를 나타내었다. 그림 1은 60 Hz의 교류전압을 약 50 [kV]까지 발생시킬 수 있는 교류전압 발생장치이다. ZnO피뢰기 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.



(a) 60 [Hz] AC전압 발생장치의 개략도



(b) ZnO 피뢰기 소자의 전극 배치도

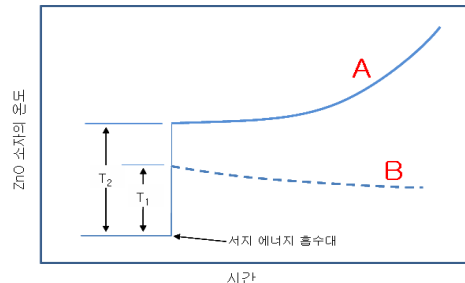
**그림 1 실험 측정계의 구성**

**Fig.1. Circuit diagram of the direct and 60 Hz alternating, mixed voltage generator**

본 실험에 사용된 ZnO피뢰기 소자의 정격전압과 공칭방전전류가 각각 3.6 [kV], 2.5[kA]이며, 직경이 30 [mm], 두께가 28 [mm]인 ZnO피뢰기 소자 5개를 직렬로 시험용 지그에 설치하였다. 또한 직경 30 [mm], 두께 5[mm]로 절삭한 구리, 알루미늄, 스테인리스 전극을 ZnO소자 사이에 설치하여 실험을 수행하였다. 각각의 ZnO피뢰기 소자에서 나타나는 열적특성을 관찰하기 위하여 열화상카메라(100,000 [fps] 이상의 컬러 디지털 이미지 촬영, 4[GB] 이상의 메모리)를 사용하였으며, 실험실 내부 온도는 18.3 [°C]로 일정하게 유지하였다. 각각의 ZnO피뢰기 소자에서의 온도분포는 평균값으로 열화상카메라의 메모리에 저장하였다.

**2.2 측정방법**

전력시스템에 큰 서지에너지가 인가되면 ZnO피뢰기는 그 서지에너지를 흡수한다. 그 결과로 ZnO피뢰기 소자의 온도는 상승하고 저항은 감소하게 되어 누설전류가 증가하게 된다. 그림 2에 ZnO피뢰기 소자의 열적 특성변화 곡선을 나타내었다. 그림에서 어떤 온도 한계 이하(T1)에서 ZnO피뢰기 소자의 열발생(발열)은 열방출(방열)보다 작아 B곡선에서 볼 수 있듯이 ZnO피뢰기 소자의 온도는 점차 감소하게 되어 안정한 상태가 된다. 반면에 어떤 온도 한계를 초과(T2)하게 되면 ZnO피뢰기 소자의 열발생은 열방출보다 커져 A곡선과 같이 끝부분에서 열화가 발생되고 결국에는 열폭주에 이르게 된다.[3]



**그림 2 ZnO 피뢰기 소자의 열적 특성곡선**

**Fig.2. Thermal characteristic curve of ZnO arrester blocks**

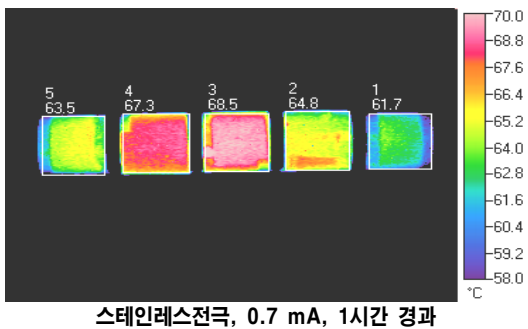
따라서 본 연구에서는 이러한 ZnO피뢰기 소자 사이에 다른 금속의 전극을 추가로 설치하여 그에 따른 ZnO피뢰기 소자의 열적특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 누설전류의 조건으로 0.5 [mA], 0.7 [mA], 1.0 [mA]의 누설전류가 흐를 때의 인가전압을 ZnO피뢰기 소자에 일정하게 인가하고, 온도한계를 초과하여 온도가 급격하게 상승할 때까지 60 Hz 교류전압을 최소 1시간에서 최대 6시간 동안 인가하였다. 이 때 ZnO피뢰기 소자에 나타나는 열적 특성을 관찰하였다. 그리고 구리, 알

루미늄, 스테인리스 전극을 ZnO피뢰기 소자 사이마다 설치하여 실험하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 ZnO피뢰기 소자의 열적 특성

두 전극 사이에 ZnO피뢰기 소자 5개를 직렬로 연결하고 최소 1시간에서 최대 6시간 동안 각각의 소자에서 나타나는 온도분포를 실험적으로 분석하였다. 그 후 자연방열을 한 다음 구리, 알루미늄, 스테인리스 전극을 ZnO피뢰기 소자 사이마다 설치하여 동일 조건하에 온도분포를 실험적으로 분석하였다. 그림 3은 스테인리스 전극을 추가로 설치하였을 때 1시간 경과 후 열화상 카메라에 의해 측정된 ZnO피뢰기 소자의 온도분포를 나타내었다. 시험용 ZnO피뢰기 소자에 교류전압을 인가했을 때 저항성 누설전류가 흐르기 시작하는 시작점의 크기가 0.7 [mA]일 경우에 대해 모의하였다. 시작점 누설전류가 0.7 [mA] 인 경우 온도는 시작한 지 80분까지는 약 70 [°C]까지 상승하였다. 이후에는 일정하게 유지되다가 180분이 지나는 시점부터 ZnO피뢰기 소자의 평균온도가 서서히 감소하는 특성을 보인다. 이러한 현상은 그림 2에서 설명한 것과 같이 ZnO피뢰기 소자의 온도가 일정하게 상승하다가 온도한계를 초과하지 못하면 ZnO피뢰기 소자는 열발생과 열방출이 평형을 이루는 열평형 상태에 이르게 되는 것이다.



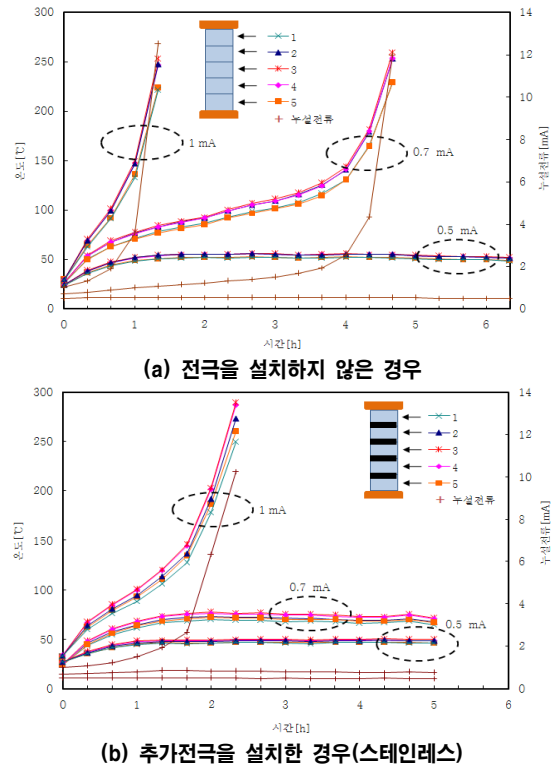
스테인리스전극, 0.7 mA, 1시간 경과

그림 3 열화상카메라에 의해 관측된 ZnO피뢰기 소자의 온도분포  
Fig.3. Temperature distribution of ZnO arrester blocks measured by forward looking infrared camera

#### 3.2 ZnO피뢰기 소자의 누설전류에 따른 온도-시간 특성

그림 4에 시간에 따른 ZnO피뢰기 소자의 각 부분에서 나타나는 온도분포와 누설전류의 특성을 나타내었다. 누설전류의 시작점에 따라 다양한 특성을 나타내고 있다. 추가전극이 설치되지 않았을 때 시작점 누설전류가 1 [mA]의 경우 1시간만에 온도는 급상승하게 되고 누설전류 또한 온도의 증가와 함께 급격하게 상승하여 ZnO피뢰기 소자가 열폭주(열방출<열발생)에 이르는 것을 보여주고 있다. 그에 반해 스테인레스 전극이 설치된 경우는 열폭주에 이르는 시간이 다소 길어지는 것을 알 수 있다. 시작점 누설전류가 0.5 [mA]에서 전극이 설치된 경우 1시간가량 온도가 상승하다가 점차적으로 안정하게 유지되는 경향(열방출>열발생)을 보이며, 누설전류 또한 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 이는 스테인레스 전극이 설치된 경우도 비슷한 양상을 보이지만 전극이 설치되지 않은 경우에 비해 ZnO피뢰기 소자에서의 온도는 다소 낮게 나타났다. 마지막으로 시작점 누설전류가 0.7 [mA]에서 전극이 설치되지 않은 경우 시간의 진행에 따라 ZnO피뢰기 소자의 각 부분에 있어서 온도와 누설전류가 서서히 증가함을 보여주고 있다. 여기서도 시작점 누설전류가 1 [mA]와 마찬가지로 그래프의 끝 부분에서 폭전이 급속히 상승하는 것은 열폭주가 일어나고 있다는 것을 보여준다. 시작점 누설전류가 클수록, 즉 인가전압이 높을수록 열폭주 시간은 짧아진다. 이러한 열폭주 현상은 대류나 전도에 의한 열방출보다 열발생이 클 경우에 발생하게 되는데, 열방출에 영향을 미치는 가장 큰 요소로서는 실험이 진행되고 있는 곳의 대기에 의해서이다. 그러나 스테인레스 전극이 설치된 경우는 전극이 설치되지 않은 경우에 비해 전극에서 나타나는 온도와 누설전류는 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 ZnO피뢰기 소자의 접촉부에 스테인레스와 같이 열전도성과 온도전도성이 우수한 금속전극을 설치함으로써 급속전류 양쪽으로 열전달이 더욱 잘 이루어지기 때문에 온도와 누설전류가 낮게 나타나는 것으로 사료된다. 시작점 누설전류가 0.7 [mA]인 경우 구리와 알루미늄 전극을 추가하였을 때에는 온도가 안정되지 않고 오히려 전극이 설치되지 않은 경우보다 더 빠른 시간에 열폭주 현상이 나타났다. 하지만 1 [mA]의 누설전류에서는 구리, 알루미늄, 스테인리스 전극을 설치한 경우 모두 비슷한 특성을 보이며 기존의 전극을 설치하지 않은 경우 보다 늦은 시간에 열폭주 현상을 보인다. 이는 높은 누설전류에서 온도가 급격하게 올라가게 되고 그 때 추가전극에서 열방출이 잘 이루어지기 때문에 ZnO피뢰기

소자의 온도를 낮추는 효과가 크게 나타나기 때문으로 생각된다. 하지만 낮은 전류에서는 추가전극의 효과가 그다지 크게 나타나지는 않았다.



(a) 전극을 설치하지 않은 경우

(b) 추가전극을 설치한 경우(스테인레스)

그림 4 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포와 누설전류 사이의 관계  
Fig. 4. Relationship between temperature distribution and leakage current of ZnO arrester blocks

### 4. 결 론

구리, 알루미늄, 스테인리스 전극을 추가로 설치하여 ZnO피뢰기 소자의 열적 특성을 분석하여 기존의 전극이 설치되지 않은 ZnO피뢰기 소자와 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. ZnO피뢰기 소자의 열화 및 열폭주 현상은 열방출과 열발생을 결정짓는 ZnO피뢰기 소자의 온도한계와 밀접한 관계가 있다. 온도한계를 초과하는 경우(열발생>열방출) ZnO피뢰기 소자는 열화가 발생하며 최후에는 열폭주에 도달하게 되지만, 온도한계 이하(열발생<열방출)에서는 ZnO 피뢰기 소자 내부가 열평형상태가 되어 안정하게 된다. 즉, ZnO피뢰기 소자의 열화는 누설전류와 ZnO피뢰기 소자의 온도에 상당히 의존적이다. 낮은 전류에서 ZnO피뢰기 소자에 추가 전극을 설치하여 온도를 낮추는 효과가 크게 나타나지는 않았지만, 높은 전류에서 추가 급속전극을 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, 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