

ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성 분석

(Analysis of Thermal and Electrical Characteristics of ZnO Arrester Blocks)

이수봉* · 이복희

(Su-Bong Lee · Bok-Hee Lee)

요 약

이 논문에는 교류전압에서 ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성을 기술하였다. ZnO 피뢰기 소자의 누설전류는 시간의 변화에 따라 측정하였다. ZnO 피뢰기 소자의 온도분포를 열화상카메라에 의해 관측하였다. ZnO 피뢰기 소자의 열화 및 열폭주 현상은 열발생과 열방산을 결정짓는 ZnO 피뢰기 소자의 온도한계와 밀접한 관계가 있다. ZnO 피뢰기 소자의 저항은 ZnO 피뢰기 소자의 온도와 누설전류에 의해 민감하게 변화한다. 결론적으로 ZnO 피뢰기 소자의 열화 및 열폭주 현상은 ZnO 피뢰기 소자의 온도와 소자를 통해 흐르는 누설전류에 상당히 의존적인 것으로 나타났다.

Abstract

This paper presents the thermal and electrical characteristics of ZnO arrester blocks under the AC voltages. The leakage currents of ZnO arrester blocks were measured as a function of the time. The temperature distributions of ZnO arrester blocks were observed by the thermal image infrared camera. The degradation and thermal runaway of ZnO arrester blocks were closely related to the temperature limit of ZnO arrester blocks which being decided heat generation and dissipation. The temperature and leakage current of ZnO arrester blocks were sensitively changed in a resistance of ZnO arrester blocks. As a result, the degradation and thermal runaway of ZnO arrester blocks depend on the temperature and leakage current of ZnO arrester blocks.

Key Words : ZnO arrester block, Temperature limit, Leakage current, Degradation, Thermal runaway

1. 서 론

산화아연(ZnO) 피뢰기는 우수한 서지보호 특성을 가지고 있어 급속도로 전력시스템에 적용되어 사용

되어 왔다. 산화아연 피뢰기는 우수한 비선형 저항 특성을 가지고 있기 때문에 직렬갭이 필요 없고 그에 따라 과도전압에 대한 응답시간지연이 매우 짧으며, 과도현상 및 속류가 거의 없다. 반면에 직렬갭의 제거는 뇌서지 및 스위칭서지에 의한 스트레스뿐만 아니라 산화아연 피뢰기 양단에 인가되는 상용주파 전압(AC전압)에 의한 스트레스를 받게 된다. 일반적으로 산화아연 피뢰기의 수명예측은 온도상승에 따

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822

E-mail : lsbong1@naver.com
접수일자 : 2007년 7월 9일
1차심사 : 2007년 7월 16일
심사완료 : 2007년 8월 7일

른 ZnO 피뢰기 소자의 내전압특성에 의해 평가되어 지고, 대개 수명이 끝나는 부분에서 열폭주가 일어나게 된다[1~3].

ZnO 피뢰기 소자의 비선형저항은 낮은 전류영역에서 온도에 크게 의존한다. 즉 ZnO 피뢰기 소자의 온도가 상승하면 저항값은 감소하게 된다. ZnO 피뢰기 소자의 온도가 서지에너지의 흡수에 의해 온도한계를 초과하게 되면 이후의 운전전압에 의한 지속적인 스트레스로 인해 누설전류의 증가로 열발생의 증가와 더불어 열화현상이 일어나게 된다. 이러한 열화현상은 열발생과 열손실 사이의 관계로 해석할 수 있으며, ZnO 수명을 예측하기 위한 열화기구의 해석은 매우 중요한 요소가 된다[4-5].

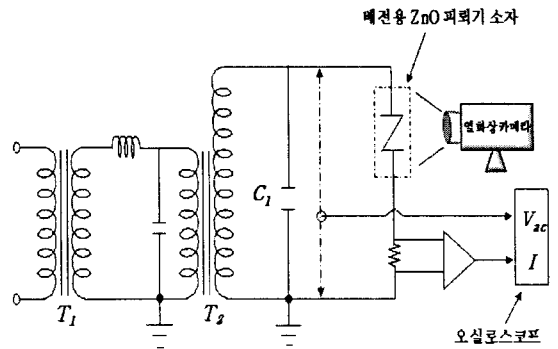
본 연구에서는 60[Hz] 교류전압에 대한 ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성을 파악하기 위해 시간에 따른 누설전류의 변화를 측정하였으며, 열화상카메라를 이용하여 ZnO 피뢰기 소자에서 나타나는 온도분포를 관측하였다. 특히 ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성의 상관성을 실험적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 ZnO 피뢰기 소자의 열발생 및 열방출에 의한 열화기구를 분석하였다.

2. 측정계의 구성 및 방법

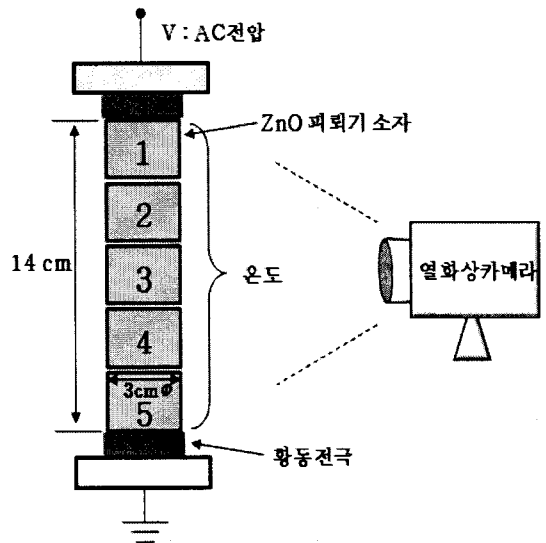
2.1 실험장치 및 측정계의 구성

시험용 시료는 정격전압과 공칭방전전류가 각각 18[kV], 2.5[kA]의 15년 동안 상시운전전압에서 사용된 배전용 피뢰기에서 채취하였다. 배전용 피뢰기 내부에 직렬로 접속된 5개의 ZnO 피뢰기 소자만을 배전용 피뢰기로부터 분리하여 ZnO 피뢰기 소자에서 나타나는 열적·전기적 특성을 분석하였다. 그림 1에 실험측정계의 구성도를 나타내었다. 그림 1(a)는 60[Hz]의 교류전압을 약 50[kV]까지 발생시킬 수 있는 교류전압발생장치이며, 전원측에서 침입하는 노이즈를 제거하기 위해서 변압기 T_1 과 T_2 사이에 LC저역통과필터를 접속하였다. 또한 T_2 변압기 출력측에 노이즈제거용으로 커패시터 C_1 을 병렬로 접속시켰으며, ZnO 피뢰기 소자를 통해 흐르는 미세한 누설전류는 검출용 저항 R 을 이용하여 검출하였다. ZnO 피뢰기 소자의 인가전압과 누설전류의 측정에

는 디지털 오실로스코프(BW 1[GHz], 5[Gs/s] 4채널), 수동성 고전압 프로브(BW 75[MHz], 감쇠율 1000X, 최대입력 DC 20[kV]), 능동성 FET 프로브(BW 1[MHz], 감쇠율 1/10, 최대전압 $\pm 15[V]$)를 사용하였다.



(a) 측정계의 개략도



(b) ZnO 피뢰기 소자의 배치도

그림 1. 실험계의 구성

Fig. 1. Configuration of the experimental setup

그림 1(b)에 ZnO 피뢰기 소자의 배치도를 나타내었다. 시험에 사용된 ZnO 피뢰기 소자는 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. 각각의 ZnO 피뢰

ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성 분석

기 소자에서 나타나는 열적 특성을 관찰하기 위해 열화상카메라(온도관측범위 $-40[^\circ\text{C}] \sim 1,200[^\circ\text{C}]$, 온도분해능 $0.03[^\circ\text{C}]$, 측정정밀도 $\pm 2[\%]$ 이하, 파장범위 $8 \sim 14[\mu\text{m}]$)를 사용하였으며, 시료 주변온도는 $18.3[^\circ\text{C}]$ 로 일정하게 유지하였다. 각각의 ZnO 피뢰기 소자에서의 온도분포는 평균값으로 열화상카메라의 메모리에 저장하였다.

2.2 실험방법

배전용 ZnO 피뢰기의 사용은 다양한 전력시스템에서 꾸준히 증가하고 있다. ZnO 피뢰기가 전력시스템에 연결되어 사용될 때 피뢰기를 통하여 $1[\text{mA}]$ 이하의 저항성 누설전류가 흐른다. 그러나 전력시스템에 큰 서지에너지의 흡수가 발생될 때 ZnO 피뢰기 소자의 온도는 상승하고 저항은 감소하게 된다. 그 결과 누설전류가 증가하게 되고 ZnO 피뢰기 소자 내부의 열발생이 급격히 증가하게 된다. 그림 2에 ZnO 피뢰기 소자의 열적 특성변화 곡선을 나타내었다. 그림 2에서 온도 한계 이하(t_1)에서 ZnO 피뢰기 소자의 열발생(발열)은 열손실(방열)보다 작아 B곡선에서 볼 수 있듯이 ZnO 피뢰기 소자의 온도는 점차 감소하게 되어 안정한 상태가 된다. 반면에 어떤 온도한계를 초과(t_2)하게 되면 ZnO 피뢰기 소자의 열발생은 열손실보다 커서 A곡선과 같이 끝부분에서 열화가 발생하고 결국에는 열폭주에 이르게 된다[4].

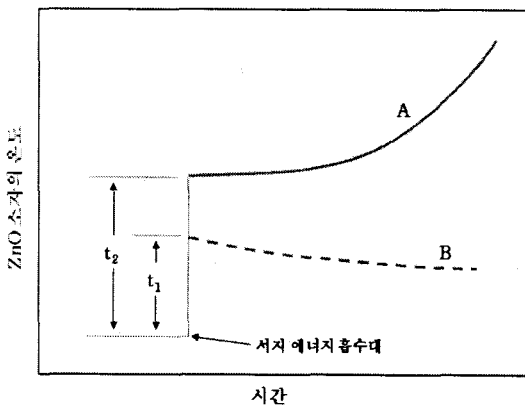


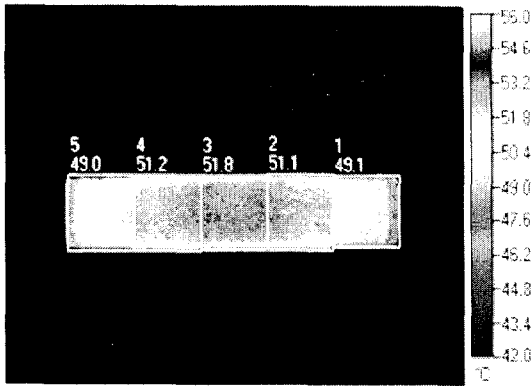
그림 2. ZnO 피뢰기 소자의 열적 특성곡선
Fig. 2. Thermal characteristic curves of ZnO arrester blocks

따라서 본 연구에서는 이러한 ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성의 상호 연관성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 온도한계의 조건으로 $0.5[\text{mA}]$, $0.7[\text{mA}]$, $1[\text{mA}]$ 의 누설전류를 ZnO 피뢰기 소자에 일정하게 흘려주고 온도한계를 초과할 때까지 $60[\text{Hz}]$ 교류전압을 최소 1시간에서 최대 6시간 동안 인가하였다. 이 때 ZnO 피뢰기 소자에 나타나는 열적 특성을 관찰하였고, 누설전류 및 저항과 같은 ZnO 피뢰기 소자에서의 전기적 특성과 열적 특성 사이의 상관성에 대해 검토하였다.

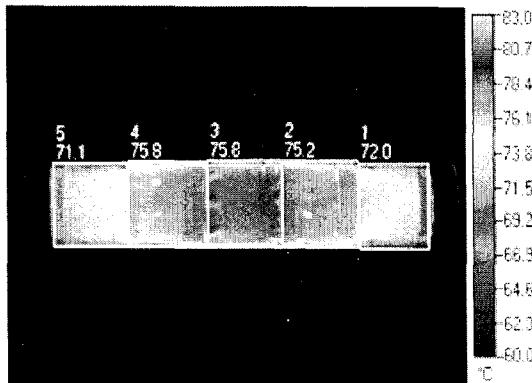
3. 결과 및 고찰

3.1 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포

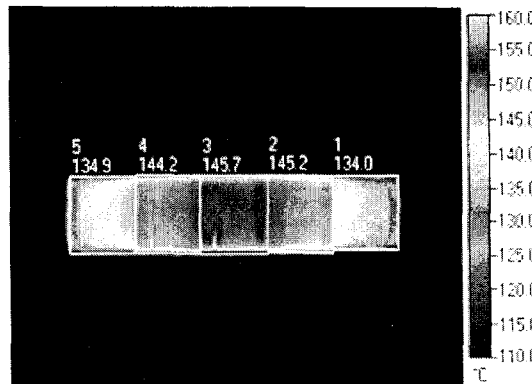
두 전극 사이에 ZnO 피뢰기 소자 5개를 직렬로 배열하고 최소 1시간에서 최대 6시간 동안 각각의 소자에서 나타나는 온도분포를 조사하였다. 그림 3은 누설전류의 크기에 따라 1시간 경과 후 열화상 카메라에 의해 측정된 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포를 나타내었다. ZnO 피뢰기 소자에 교류전압을 인가했을 때 ZnO 피뢰기 소자를 통해 저항성 누설전류가 흐르기 시작하는 시작점의 크기가 $0.5[\text{mA}]$, $0.7[\text{mA}]$, $1[\text{mA}]$ 일 경우에 대해 모의하였다. 동일하게 1시간동안 교류전압을 인가한 경우 각각의 ZnO 피뢰기 소자에서 측정된 온도는 시작점 누설전류가 $0.5[\text{mA}]$ 인 경우에 비해 시작점 누설전류가 $1[\text{mA}]$ 일 때 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 각각의 ZnO 피뢰기 소자는 다양한 온도분포를 보이며, 특히 1번과 5번 ZnO 피뢰기 소자의 온도가 가장 낮게 나타나고 중앙에 배치된 3번 ZnO 피뢰기 소자의 온도가 가장 높게 나타났다. 이러한 현상은 지그의 양 끝부분에 금속전극이 설치되어 있어 대부분의 열손실이 열전도성이 우수한 금속전극에 집중되어 열전달이 더욱더 잘 이루어지기 때문이다. 이에 반해 직렬로 배치된 ZnO 피뢰기 소자의 중앙부분에는 ZnO 피뢰기 소자가 서로 접촉하고 있어 열전달이 거의 이루어지지 않고, 열발생이 중앙의 ZnO 피뢰기 소자에 집중되기 때문에 다른 소자에 비해 높은 온도를 나타내는 것으로 판단된다.



(a) 0.5(mA), 1시간 경과



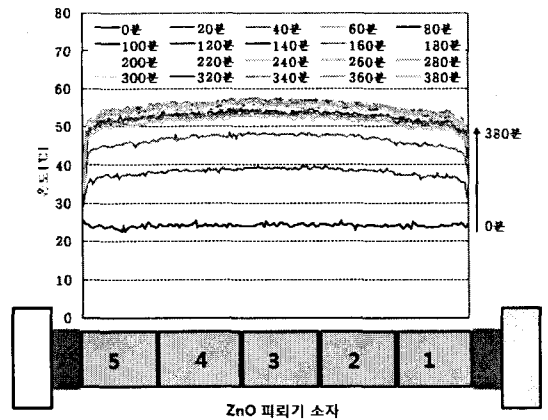
(b) 0.7(mA), 1시간 경과



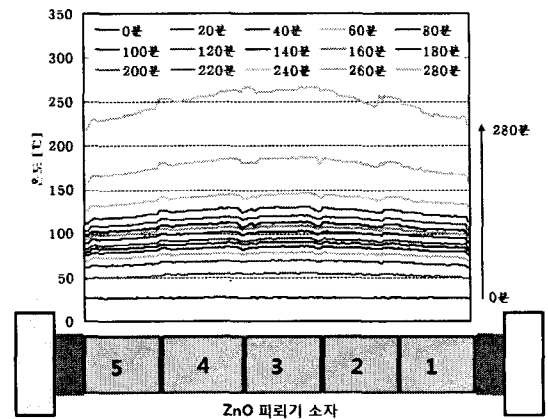
(c) 1(mA), 1시간 경과

그림 3. 누설전류의 크기에 따른 열화상카메라에 의해 측정된 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포

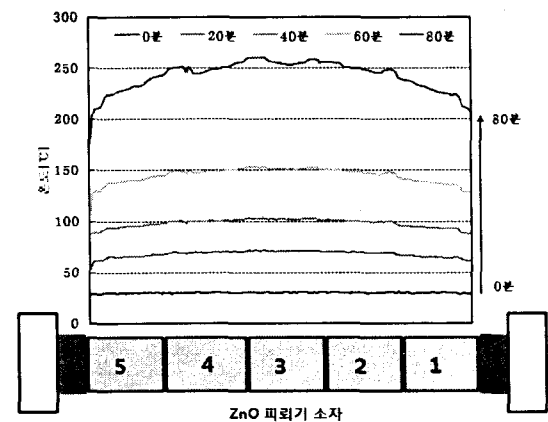
Fig. 3. Temperature distributions of ZnO surge blocks measured by the thermal image infrared camera as an amplitude of the leakage current



(a) 0.5(mA)



(b) 0.7(mA)



(c) 1(mA)

그림 4. 시간에 따른 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포
Fig. 4. Temperature distribution of ZnO surge blocks as a function of the time

ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성 분석

그림 4에 시간의 변화에 따른 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포를 나타내었다. 시작점 누설전류가 0.5[mA]의 경우 실험을 시작한지 60분까지는 약 56[°C]까지 온도가 약간 상승하였지만, 80분 이후에서는 일정하게 유지되다가 240분이 지나는 시점에서는 ZnO 피뢰기 소자의 평균온도가 서서히 감소하는 것을 보인다. 이러한 현상은 그림 2에서 설명한 것과 같이 ZnO 피뢰기 소자의 온도가 일정하게 상승하다가 온도한계 이하점에 도달하게 되면 온도는 안정하게 유지되고, ZnO 피뢰기 소자는 열발생과 열손실이 평형을 이루는 열평형 상태에 도달하게 되는 것이다.

이에 반해 시작점 누설전류가 1[mA]의 경우 40분만에 ZnO 피뢰기 소자의 온도는 약 100[°C]를 나타내었고, 80분만에 온도는 250[°C]를 초과하였다. 이는 ZnO 피뢰기 소자가 온도한계를 초과하여 열손실보다 열발생이 커지게 되는 열불평형 상태에 놓이게 되고, 결국 ZnO 피뢰기 소자는 열폭주로 이어지게 된다.

시작점 누설전류가 0.7[mA]의 경우 온도의 상승을 3구간으로 나눌 수 있다. 먼저 실험을 시작한지 40분까지는 약 60[°C]까지 온도가 약간 상승하였지만, 60분에서 220분까지는 20분에 약 5[°C] 정도로 일정하게 상승하는 경향을 나타내었다. 이후 240분이 지나는 시점에서는 ZnO 피뢰기 소자의 평균온도가 급격히 상승하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 열손실과 열발생의 과도적 변화특성을 단적으로 보여주고 있다. 최초로 열발생이 급격하게 커졌다가 온도한계점에 도달하게 되면 서서히 열손실과 열발생이 평형을 이루는 상태를 거쳐 최후에는 열발생이 급격하게 증가하게 되는 것이다. 결과적으로 열화기구의 해석을 통해 알아본 ZnO 피뢰기 소자의 열화 및 열폭주 현상은 열손실과 열발생을 결정짓는 ZnO 피뢰기 소자의 온도한계와 밀접한 관계가 있는 것을 확인할 수 있었다. 즉 ZnO 피뢰기 소자의 열화는 누설전류와 ZnO 피뢰기 소자의 온도에 상당히 의존적인 것으로 판단된다.

3.2 ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성

일반적으로 ZnO 피뢰기 소자에 60[Hz]의 교류전압을 인가하게 되면 ZnO 피뢰기 소자를 통해 흐르

는 누설전류는 저항성 누설전류와 용량성 누설전류로 나눌 수 있다. 이 때 용량성 전류는 ZnO 피뢰기 소자의 온도상승과는 관계가 적고 소자의 전압분포에만 기여하지만, 저항성 누설전류는 주열열을 발생시켜 ZnO 피뢰기 소자 내의 분자운동을 촉진시키고, 온도상승을 가져오게 되어 ZnO 피뢰기 소자의 수명을 단축시킨다.

ZnO소자의 온도상승은 전류의 증가를 가져오고 전류의 증가는 결국 저항의 감소를 가져오게 된다. 그림 5는 시작점 0.7[mA]에서 나타나는 ZnO 피뢰기 소자의 인가전압과 누설전류의 대표적인 파형을 나타내었다. 누설전류의 경우 대부분이 저항성 누설전류이며, 이러한 저항성 누설전류를 ZnO 피뢰기 소자에 일정하게 흘려줌으로서 ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성의 평가가 가능하다.

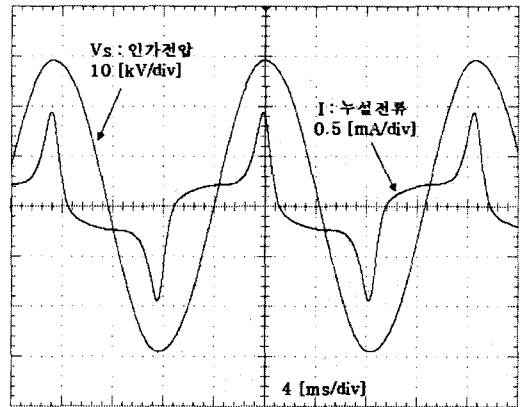


그림 5. 시작점 0.7[mA]에서 ZnO 피뢰기 소자의 인가전압과 누설전류의 파형

Fig. 5. Waveforms of applied voltage and leakage current of ZnO arrester block at the start point of 0.7[mA]

전압의 인가 시간에 따른 ZnO 피뢰기 소자의 각 부분에서 나타나는 온도분포와 누설전류의 특성을 그림 6에 나타내었다. 누설전류의 시작점에 따라 다양한 특성을 나타내고 있다. 시작점 누설전류가 1[mA]의 경우 1시간만에 온도는 급상승하게 되고 누설전류 또한 온도의 증가와 함께 급격하게 상승하여 ZnO 피뢰기 소자가 열폭주(열손실<열발생)에 이르는 것을 보여주고 있다. 그에 반해 시작점 누설전

류가 0.5[mA]의 경우 1시간가량 온도가 상승하다가 점차적으로 안정하게 유지되는 경향(열손실>열발생)을 보이며, 누설전류 또한 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 또한 시작점 누설전류가 0.7[mA]의 경우 시간의 진행에 따라 ZnO 피뢰기 소자의 각 부분에 있어서 온도와 누설전류가 서서히 증가함을 보여주고 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 열폭주 시간은 짧아진다. 이러한 열폭주 현상은 대류나 전도에 의한 열손실보다 열발생이 클 경우에 발생하게 된다. 또한 그림 6에서 ZnO 피뢰기 소자의 중심보다는 상하부의 온도가 약간 낮은 것은 ZnO 피뢰기 소자의 양쪽 금속전극의 열전도성이 우수하여 양쪽 금속전극으로 열전달이 더욱 잘 이루어지기 때문이다.

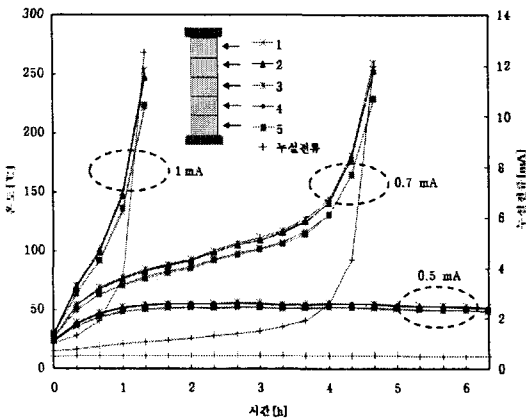


그림 6. ZnO 피뢰기 소자의 온도분포와 누설전류 사이의 관계

Fig. 6. Relationship between temperature distribution and leakage current of ZnO arrester blocks

그림 7은 시간에 따른 ZnO 피뢰기 소자에서 나타나는 저항 분포 곡선을 나타내었다. 앞에서 설명한 것과 같이 ZnO 피뢰기 소자의 온도상승은 누설전류의 증가를 가져오고 전류의 증가로 인해 온도는 더욱더 상승하게 된다. 즉, 온도상승에 의한 주열의 발생은 ZnO 피뢰기 소자의 저항값을 변화시킨다[1].

누설전류 시작점이 1[mA]의 경우 그림 6에서 볼 수 있는 것과 같이 ZnO 피뢰기 소자의 온도와 누설전류가 급격하게 상승함으로 인해 저항은 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 이에 반해 시작점 누설전류가 0.5[mA]의 경우는 약 40[MΩ] 정도의 저항을 유지하는 것을 볼 수 있다. 0.7[mA]의 누설전류 시작점에서 시간이 지남에 따라 저항은 서서히 감소하는 특성을 보이고 있다. 결과적으로 ZnO 피뢰기 소자의 저항은 ZnO 피뢰기 소자 내부의 온도 변화에 따라 민감하게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

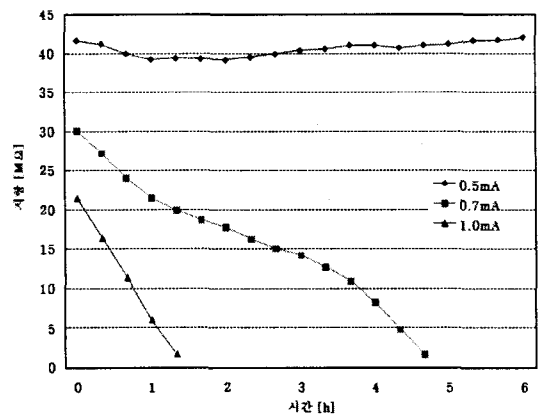


그림 7. 시간에 따른 ZnO 피뢰기 소자의 저항 분포
Fig. 7. Resistance distribution of ZnO arrester blocks as a function of the time

4. 결 론

ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성의 상관성을 실험적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 ZnO 피뢰기 소자의 열화기구를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

ZnO 피뢰기 소자의 열화 및 열폭주 현상은 열손실과 열발생을 결정짓는 ZnO 피뢰기 소자의 온도한계와 밀접한 관계가 있다. 온도한계를 초과하는 경우(열발생>열손실) ZnO 피뢰기 소자는 열화되며 최후에는 열폭주에 도달하게 되지만, 온도한계 이하(열발생<열손실)에서는 ZnO 피뢰기 소자 내부가 열평형상태가 되어 안정하게 된다. 즉 ZnO 피뢰기 소자의 열화는 누설전류와 ZnO 피뢰기 소자의 온도에

ZnO 피뢰기 소자의 열적·전기적 특성 분석

상당히 의존적이다. 또한 ZnO 피뢰기 소자의 저항은 ZnO 피뢰기 소자 내부의 온도변화에 따라 민감하게 변화하는 것이 확인되었다.

References

- [1] S. Tominaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki and T. Nitta, "Stability and long term degradation of metal oxide surge arresters", IEEE Trans., 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 Trans., Vol. PAS-96, No. 2, pp. 647-656, 1977.
- [3] 이복희, 강성만, 박건영, "직류와 60[Hz] 교류가 중첩된 전압에 대한 산화아연 피뢰기 소자의 누설전류 특성", KIEE Trans., Vol. 54C, No. 1, pp. 23-29, 2005.
- [4] S. Nishiwaki, H. Kimura, T. Sato, H. Mizoguchi, S. Yanabu, "Study of thermal runaway/equivalent prorated model of ZnO surge arrester", IEEE Trans., Vol. PAS-103, No. 2, pp. 413-419, 1984.
- [5] 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 Trans., Vol. PAS-97, No. 4, pp. 1149-1158, 1978.

◇ 저자소개 ◇

이수봉 (李守偉)

1979년 4월 13일생. 2002년 2월 경남대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사수료.
Tel : (032) 860-7398
Fax : (032) 863-5822
E-mail : lsbong1@naver.com

이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수. 본 학회 부회장.
Tel : (032) 860-7398
Fax : (032) 863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr