

# 철도용 피뢰기의 열화진전에 관한 연구

## A Study on the Deterioration Progress of Railway Arresters

길경석\*                      한주섭\*\*                      한문섭\*\*\*  
Kil, Gyung-Suk              Han, Ju-Seop                  Han, Moon-Seob

### ABSTRACT

Arresters are the best protective device on electrical power systems against transient overvoltages generated by lightning and/or switching operation. Nonetheless, arresters will be deteriorated due to absorption of moisture in the environments of its use, repetition in the protective operation to overvoltages, and some defects at manufacturing. It is therefore important to estimate the electrical characteristic changes of ZnO blocks.

In this paper, an accelerated deterioration test by a standard lightning impulse current was carried out to extract parameters needed for diagnosing arrester deterioration, and leakage current components were measured. Total energy applied to the ZnO blocks at each time is 1,050[J] in 8/20[ $\mu$ s] impulse current.

From the experimental results, we proposed electrical parameters and leakage current level to diagnose arrester soundness.

### 1. 서 론

피뢰기는 낙뢰 또는 전력설비의 운전 조작에 의해 발생하는 이상전압을 전력계통에 설치된 변압기, 차단기 등과 같은 중전기기의 절연레벨 이하로 억제시켜 전력설비를 보호하는 역할을 한다. 현재 전압-전류의 비선형 저항특성이 우수한 산화아연(ZnO)형 피뢰기가 설치되고 있으며, ZnO 소자의 개발로 피뢰기의 보호능력이 현저하게 향상되었으나, 아직도 전력계통에서 피뢰기의 열화로 인한 사고는 많은 부분을 차지하고 있다. 특히, 전철용 변전소 및 급전계통에서는 부하설비들이 광범위하게 분포하여 피뢰기의 설치개수가 많아지고, 이것들의 연계로 인하여 이상전압의 발생 빈도가 높아져 피뢰기의 보호동작이 빈번해지며, 이들 과정에서 피뢰기는 많은 열화가 진전된다.

열화된 피뢰기가 설치되어 있으면 정상운전전압에서 과열 또는 반복되는 보호동작으로 피뢰기가 폭발이나 지락사고로 진전하여 2차적인 경제적, 기술적 사고를 유발시킨다. 따라서 전력계통에서 운전 중 피뢰기의 열화를 진단하고, 사고 유발 가능성이 있는 피뢰기를 전력계통에서 미리 제거함으로써 피뢰기에 의한 사고를 방지하는 것이 필요하며 이에 관한 연구가 국내·외적으로 활발히 진행되고 있다.

현재까지 ZnO 피뢰기의 열화진단에는 여러 가지 방법들이 제안되어 왔으며, 주로 동작전압, 제한전압, 최대연속 동작전압(MCOV)에서의 손실전력, 누설전류 등의 비교·측정과 독립적인 상태에서의 정전용량 측정에 의한 것들이다. 그 중에서도 누설전류를 이용하는 방법은 운전 중인 전력계통에서도 측정할 수 있어 많은 연구가 이 방법에 집중되고 있다.

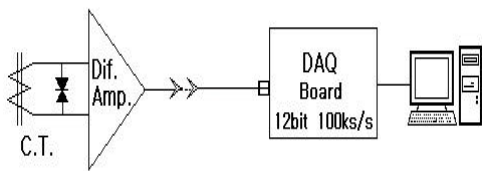
본 논문에서는 전철용 피뢰기의 주된 열화원인인 뇌충격전류를 인위적으로 인가시켜, 뇌충격전류의 반복인가에 의한 전철용 피뢰기 소자의 열화진전 특성을 연구하였다. 실험에서는 피뢰기에

\* 한국해양대학교 부교수, 정회원  
\*\* 한국해양대학교 Post-doc., 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

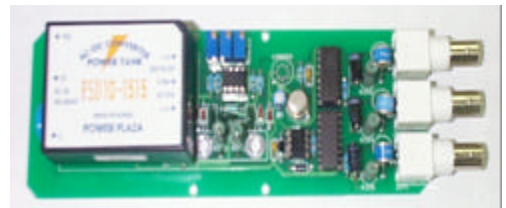
대한 국내·외 시험기준(IEC, IEEE)을 적용하였으며, 실험결과로부터 전철용 피뢰기의 열화진단에 요구되는 파라미터와 열화진단 기준을 제시하였다.

## 2. 누설전류 검출장치

정상운전전압에서 피뢰기의 누설전류를 측정하기 위하여 그림 1과 같이 클램프형 변류기, 최대 이득 60[dB]의 차동증폭기로 구성되는 누설전류 검출장치를 제작하였다. 누설전류 검출장치의 감도는  $1[\text{mV}/\mu\text{A}]$ 로 최소  $8[\mu\text{A}]$ 부터 최대  $5[\text{mA}]$ 의 전류를 측정할 수 있으며, 피측정대상인 피뢰기의 정격에 따라 차동증폭기의 2단계 이득조절로 감도조정이 가능하다. 송·변전용 및 배전용 피뢰기의 누설전류는 제조사에 따라 차이가 있지만 신품의 경우  $150 \sim 300[\mu\text{A}]$ , 열화가 진전함에 따라  $600[\mu\text{A}] \sim 2[\text{mA}]$  정도임을 고려하면 피뢰기 열화진단에 충분한 감도와 측정범위를 갖는다. 또한 전력계통전압에는 다수의 고조파가 함유되어 있으며, 이들 고조파 전압의 함유율에 따라 피뢰기의 누설전류도 변화하기 때문에 누설전류 검출장치의 주파수 대역이 검토되어야 한다. 본 논문에서는 고감도 영상변류기에 접지선을 관통시키고 함수발생기에 의해 일정전류가 흐르도록 설정한 상태에서 인가전원의 주파수를 5[Hz]에서 5[kHz]까지 가변하면서 차동증폭기 출력전압의 측정으로부터 선형성과 주파수 특성을 분석하였다.



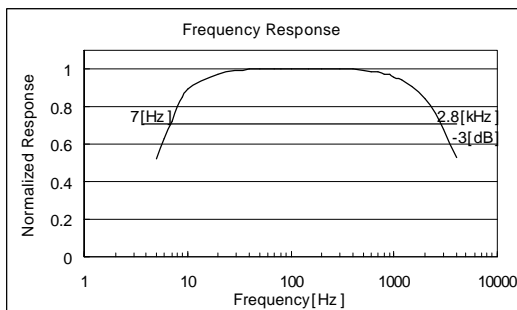
(a) 구성



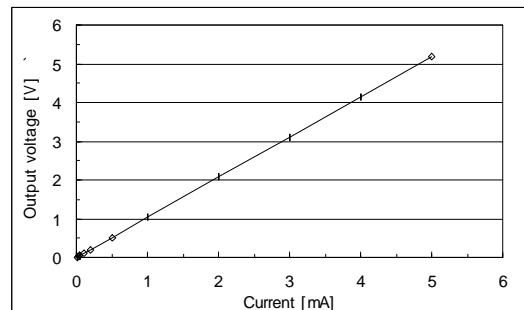
(b) 사진

그림 1. 누설전류 검출장치

그림 2에 나타낸 바와 같이 본 누설전류 검출장치의  $-3[\text{dB}]$ 의 주파수 대역은  $7[\text{Hz}] \sim 2.8[\text{kHz}]$ 이었으며,  $8[\mu\text{A}] \sim 5[\text{mA}]$ 까지 입출력의 선형성이 유지되므로 피뢰기의 정상운전전압에서 피뢰기의 누설전류를 제 7조파 성분까지 왜곡이나 감쇄없이 검출할 수 있는 특성이다.



(a) 주파수 특성



(b) 입력-출력 특성

그림 2. 누설전류 검출장치 특성

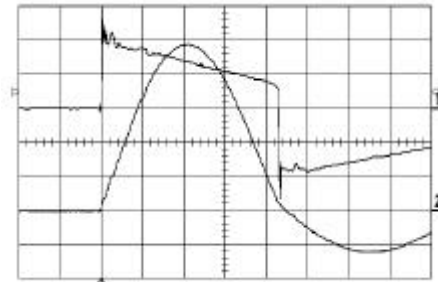
### 3. 실험 장치 및 방법

전철용 피뢰기에 사용되는 ZnO 소자에 대해 뇌충격전류에 의한 전기적 특성변화와 열화진단 기준을 제안하기 위해 뇌충격전류 발생장치를 설계·제작하였으며, 실험에는 국내 전철의 급전계 통용 피뢰기(42[kV], 10[kA])에 사용되는 ZnO 소자를 적용하였다.

그림 3은 제작한 뇌충격전류 발생장치의 사진과 ZnO 소자에 인가한 방전전류와 제한전압의 파형을 나타내었다. 뇌충격전류 발생장치는 충전전압 34[kV]에서 표준 뇌충격전류 8/20[μs], 10[kA]를 발생시킬 수 있으며, 뇌충격전류의 크기는 콘덴서에 충전되는 전압으로 조절할 수 있다.



(a) 뇌충격전류 발생장치의 사진



Upper : Residual voltage(6kV/div, 5μs/div)  
Lower : Discharge current(2kA/div, 5μs/div)

(b) 뇌충격전류 발생장치에서 발생된 파형

그림 3. 뇌충격전류 발생장치의 사진과 파형 예

기본 특성실험과 가속 열화실험으로 구분하였으며, 기본 특성실험에서는 급전계통에서 기사용된 피뢰기와 신품 피뢰기의 특성을 비교·분석하였다. 가속 열화실험에서는 ZnO 소자에 뇌충격전류를 1분 간격으로 30회씩 군단위로 인가하고 1시간 이상 실온에서 자연 냉각시킨 후 소자의 특성 변화를 분석하였다.

뇌충격전압·전류가 ZnO 소자에 인가되었을 때, 소자에 흡수되는 에너지는 다음 식과 같이 시간에 대한 적분함수로 나타낼 수 있으며,  $v$ 는 단자전압,  $i$ 는 방전전류,  $W$ 는 인가 에너지량이다. 8/20[μs], 5[kA]의 뇌충격전류를 인가한 경우 ZnO 소자에 가해지는 에너지는 1,050[J] 정도이다.

$$W = \int vi dt [J]$$

그림 4에 본 연구에서 설계한 누설전류 측정장치에 의해 정상운전전압에서 피뢰기를 흐르는 전체 누설전류의 측정 예를 나타내었다.

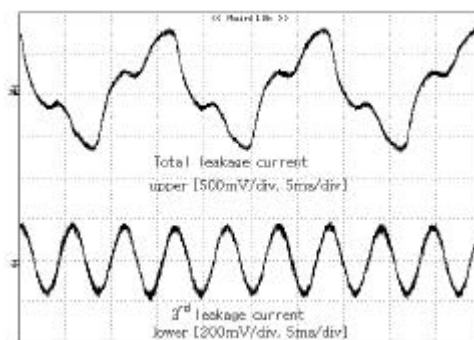


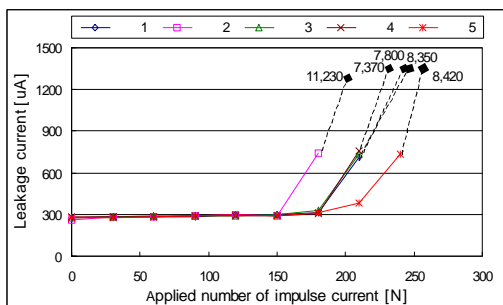
그림 4. 누설전류의 파형 예

사용된 피뢰기는 전력계통에서 1년 6개월 정도 설치되어 있어 열화가 진전된 것으로 누설전류의 실효값은  $460[\mu\text{A}]$ , 최대값은  $740[\mu\text{A}]$ 이었으며, 제 3조파 누설전류의 최대값은  $200[\mu\text{A}]$ 이었다.

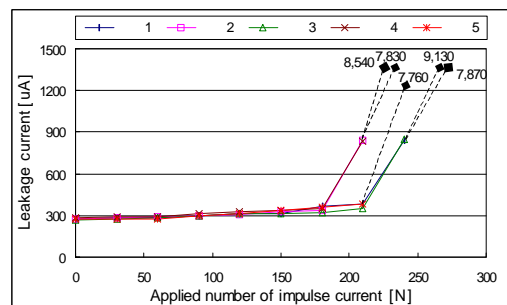
#### 4. 실험 및 고찰

가속열화 실험은 전술한 바와 같이 뇌충격전류( $8/20[\mu\text{s}]$ ,  $10[\text{kA}]$ )를 30회의 군단위로 ZnO 소자에 변화(pin-hole, puncture, crack 등)가 발생할 때까지 인가하였다. 뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 손상에 대하여 고찰해 보면 전류의 파고값이 크고 주기가 짧은 뇌충격전류가 ZnO 소자에 인가될 때 국부적인 급가열로 인하여 소자의 기능은 저하되고, 국부적인 열적 팽창에 의한 기계적 스트레스는 구조적 손상을 발생시키게 된다. 또한 뇌충격전류가 인가될 때, 소자의 도전율은 온도에 대하여 거의 독립적이지만, 상용주파수 정상운전전압이 인가된 상태인 저전계 영역에서의 누설전류는 온도에 대하여 강한 의존성을 나타내며 저전계 영역에서 누설전류가 크게 증가하면 일정 시간 내에 소자는 열폭주에 도달하여 파괴된다.

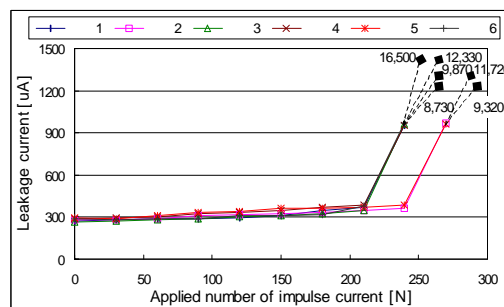
그림 5는 뇌충격전류에 의하여 손상된 ZnO 소자에 정상운전전압( $1.96[\text{kV}]$ )을 인가하였을 때의 누설전류를 나타낸 것이다. ZnO 소자 27개에 대하여 뇌충격전류를 이용한 가속열화 실험결과, 소자의 정상운전전압( $1.96[\text{kV}]$ )에서 18.5%(5개/27개)의 소자는 전체 누설전류의 실효값이  $710 \sim 760[\mu\text{A}]$ , 제 3조파 누설전류가  $52 \sim 64[\mu\text{A}]$  호를 때, 59.3%(16개/27개)의 소자는 전체 누설전류  $830 \sim 850[\mu\text{A}]$ , 제 3조파 누설전류가  $69 \sim 83[\mu\text{A}]$  호를 때, 22.2%(6개/27개)의 소자는 전체 누설전류  $950[\mu\text{A}]$ , 제 3조파 누설전류  $103[\mu\text{A}]$  이상 호를 때,  $8/20[\mu\text{s}]$   $10[\text{kA}]$ 의 뇌충격전류 인가에 의하여 손상 또는 큰 변화를 나타내었다. 이러한 차이는 ZnO 소자를 이루고 있는 미세구조가 균일한 형태의 구조를 이루고 있지 않고 ZnO 입자들의 크기에 따른 영향으로 생각된다. 파괴된 후에는 소자마다 차이는 있지만 누설전류가 현저하게 증가하여 정상운전전압에서  $7 \sim 17[\text{mA}]$ 까지 흐르는 것을 실험으로부터 확인하였다.



(a) 전체 누설전류 ( $710 \sim 760[\mu\text{A}]$ )



(b) 전체 누설전류 ( $830 \sim 860[\mu\text{A}]$ )



(c) 전체 누설전류 ( $950[\mu\text{A}]$  이상)

그림 5. 인가횟수에 따른 ZnO 소자의 누설전류 변화

본 결과로부터 실험에 사용된 소자와 동일한 피뢰기는 선로에 연결되어 운전전압에서 700[ $\mu$ A]이상의 누설전류가 흐르고 있을 때, 외부로부터 8/20[ $\mu$ s] 10[kA]이상의 충격전류가 인가될 경우, 피뢰기가 파괴되면서 일선지락사고를 유발시킬 가능성이 있다. 또한 950[ $\mu$ A] 이상의 전류가 흐르고 있을 때, 외부로부터 8/20[ $\mu$ s] 10[kA]이상의 충격전류가 인가될 경우, 피뢰기는 모두 파괴될 수 있음을 의미한다. 그러나 실제 급전계통에 나타나는 과도전압 및 전류의 크기는 일률적이지 않고 발생 빈도도 설치위치에 따라 다르므로 전술한 누설전류의 크기 이상으로 흐르고 있어도 적은 양의 충격전류가 인가되거나 인가되지 않을 경우는 장기간 연결되어 있어도 손상이 나타나지 않을 수 있다. 전력계통에 연결되어 있는 피뢰기가 운전전압에서 열화진전에 따른 누설전류로 열폭주현상이 발생하여 자체 손상이 발생할 수 있는 기준을 설정하기 위해서는 지속적으로 피뢰기 누설전류를 관측하는 것이 필요하다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 급전선로에서 사용된 전철용 피뢰기 및 소자와 신품 ZnO 소자에 대하여 누설전류를 측정하고, 가속열화 실험으로부터 피뢰기 열화진전에 따른 누설전류의 특성변화를 분석하였다. 실험결과로부터 전철용 피뢰기의 수명예측의 지표로 적용 가능한 전체 누설전류의 적용 기준을 제안하였으며, 세부적인 결론은 다음과 같다.

1. 정상운전전압에서 피뢰기를 흐르는 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류 성분의 크기는 피뢰기가 열화됨에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 전체 누설전류의 크기는 용량분 누설전류와 열화진전에 따라 증가하는 저항분 누설전류의 합으로 나타나므로 미소한 열화진전은 판단하기 어렵다. 그러나 피뢰기가 급격히 열화되거나 손상되기 직전에는 전체 누설전류가 현저히 증가하므로 전체 누설전류의 주기적인 관측으로 피뢰기의 열화진단과 잔여수명의 예측이 가능하다.

2. 신품 피뢰기 및 ZnO 소자에 대한 전체 누설전류의 실효값은 260 ~ 300[ $\mu$ A], 급전선로에서 사용된 피뢰기 및 소자에 대하여는 350 ~ 380[ $\mu$ A]로 나타났다. ZnO 소자 27개에 대하여 8/20[ $\mu$ s] 10[kA]의 뇌충격전류에 의한 가속열화 실험결과, ZnO 소자의 정상운전전압(1.96[kV])에서 18.5[%]의 ZnO 소자는 실효값 누설전류 710 ~ 760[ $\mu$ A]가 흐를 때, 59.3[%]는 830 ~ 850[ $\mu$ A]가 흐를 때, 22.2 [%]는 950[ $\mu$ A]이상 흐를 때 연속되는 뇌충격전류 인가로 손상되거나 누설전류가 10[mA]이상으로 급증하는 현상을 나타내었다.

본 논문에서 제시한 피뢰기 열화진단을 위한 누설전류 기준은 실험실 환경에서의 결과이며, 진단의 신뢰성 향상을 위하여 피뢰기가 설치되어 있는 장소에서의 주기적인 측정과 분석이 필요하다.

## 감사의 글

본 논문은 한국철도기술연구원 주관 철도기술연구개발사업에 의하여 수행되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. S.Shirakawa et al., "Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3.No.3, pp.998-1003, 1988
2. J.Lundquist et al., "New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arrester in service", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.5.No.4,pp.1811-822, 1990
3. 길경석, 한주섭, 송재용, 조한구, 한문섭, "누설전류 파괴분포 분석에 의한 새로운 피뢰기 진단기술 및 장치", 대한전기학회 논문지, 52C권12호, pp.562-567, 2003
4. 石崎義弘 外, "避雷器の外部診断技術", OHM, Vol.74,No.4, pp.45-50, 1987
5. 石辺信治, "酸化亞鉛形避雷器の劣化診断テクニック", 電氣計算, Vol.44,No.3, pp.56-60, 1987