

工學碩士 學位論文

전력용 피뢰기의 열화진단 전문가  
시스템 개발에 관한 연구

A Study on the Development of an Expert System to  
Diagnose Lightning Arrester Deterioration

指導教授 吉 暲 碩

2002年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 金 明 珍

本 論 文 을 金 明 珍 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 : 工 學 博 士 金 潤 植 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 吉 暻 碩 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 李 成 根 ㉠

2002年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 氣 工 學 科 金 明 珍

# 목 차

목 차 .....	i
그림 및 표 목차 .....	ii
Abstract .....	iv
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이 론 .....	5
2.1 피뢰기의 구조 및 특성 .....	5
2.2 열화진전기구 .....	12
2.3 열화진단기술 .....	14
제 3 장 뇌충격전류에 의한 가속열화시험 .....	23
3.1 실험장치 및 방법 .....	23
3.2 동작개시전압 및 누설전류의 변화 .....	30
3.3 열화진전에 따른 누설전류의 파고분포 .....	34
제 4 장 열화진단 전문가 시스템 및 적용 평가 .....	36
4.1 열화진단 전문가 시스템 .....	36
4.2 적용 실험 .....	44
제 5 장 결 론 .....	54
참 고 문 헌 .....	56

## 그림 및 표 목차

### <그림 목차>

그림 1.1	배전선로의 주요사고 원인 통계 .....	2
그림 2.1	ZnO 피뢰기의 구조 및 특성 .....	6
그림 2.2	ZnO 소자의 I-V 특성 .....	6
그림 2.3	ZnO 소자의 구조 .....	8
그림 2.4	ZnO 소자의 전기적 등가모델 .....	10
그림 2.5	ZnO 소자의 에너지대 모형 .....	11
그림 2.6	피뢰기의 열화요인과 열화현상 .....	13
그림 2.7	누설전류 파형의 예 .....	15
그림 2.8	전압과 누설전류와의 위상관계 .....	16
그림 2.9	자기소호방법에 의한 측정 .....	18
그림 2.10	동기정류방법에 의한 저항분 누설전류 측정 .....	19
그림 2.11	전압·전류 파형 .....	20
그림 2.12	제 3조파 누설전류 측정회로 .....	21
그림 3.1	뇌충격전류 발생장치의 등가회로 .....	23
그림 3.2	실험장치 및 측정계의 개략 구성 .....	26
그림 3.3	뇌충격전류 발생장치의 사진 .....	26
그림 3.4	PSpice에 의한 시뮬레이션 결과 .....	27
그림 3.5	4중 뇌충격전류 발생장치에 의해 발생된 파형 예 .....	28
그림 3.6	누설전류 파형 .....	29
그림 3.7	동작개시전압 변화 .....	31

그림 3.8	누설전류의 변화	32
그림 3.9	전체 누설전류의 파고분포	34
그림 4.1	전문가 시스템의 구성	37
그림 4.2	누설전류 검출회로	38
그림 4.3	누설전류 검출장치의 주파수 응답특성	39
그림 4.4	신호처리 계통도	40
그림 4.5	파고분포 분석 알고리즘	40
그림 4.6	누설전류 측정 알고리즘	41
그림 4.7	출력 화면의 예(신품 소자 적용)	44
그림 4.8	출력 화면의 예(손상된 소자 적용)	45
그림 4.9	출력 화면의 예(피뢰기 적용)	46
그림 4.10	온도에 의한 누설전류 변화	47
그림 4.11	온도에 의한 전체 누설전류의 파고분포(ZnO 소자)	48
그림 4.12	전체 누설전류의 파고분포(ZnO 소자)	50
그림 4.13	전체 누설전류의 파고분포(ZnO 피뢰기)	50
그림 4.14	170[kV]급 GIS용 피뢰기	51
그림 4.15	출력 화면의 예(GIS용 피뢰기)	52
그림 4.16	전체 누설전류의 파고분포(GIS용 피뢰기)	53

## <표 목차>

표 1.1	배전선로의 주요사고 원인 통계	2
-------	------------------	---

# A Study on the Development of an Expert System to Diagnose Lightning Arrester Deterioration

*by Kim, Myung-Jin*

Department of Electrical Engineering  
The Graduate School of Korea Maritime University  
Busan, Republic of Korea

## Abstract

This thesis deals with an effect of a single and a quadruple lightning impulse currents on electrical characteristics of ZnO blocks, and an expert system to diagnose deterioration of arresters.

Lightning arresters are the best protective device on electric power systems to transient overvoltages caused by lightning discharge and switching operation. Though there have been accomplished technical and economical renovations by the development of a ZnO block having excellent nonlinear I-V resistive characteristics, substantial parts of the power system failures are still occupied by deterioration of lightning arresters.

Electrical characteristics of ZnO blocks are deteriorated by repeated impulse current, and the deteriorated ZnO block is brought to a thermal runaway and finally destroyed. It is therefore important to estimate the change of electrical characteristics of ZnO blocks.

In this study, an accelerated deterioration test is carried out to deduce the parameters needed for diagnosing arrester deterioration, and leakage current components are measured. Also, wave height distribution of the leakage current with the progress of arrester deterioration is analyzed.

From the experimental results, the wave height distribution of the leakage current showed a conspicuous difference even in an immaterial leakage current increase. The use of wave height distribution of the leakage current in deterioration diagnostic technique makes more accurate diagnosis than the conventional method using only a leakage current value. Finally, the expert system based on the experimental results is developed, and the effectiveness of the system is estimated in a 18[kV] lightning arrester, a 72[kV] and a 170[kV] gas insulated switchgear system.

## 제 1 장 서 론

산업구조가 복잡 다변화해짐에 따라 전력설비의 급증으로 전력계통의 높은 신뢰성과 안정성이 절실히 요구되며, 전력계통설비의 신뢰성을 확보하기 위한 대책으로 이상유무를 사전에 예측할 수 있는 시스템의 도입이 필요하다.

현재 전력계통에 사용되는 전력설비의 안정성을 향상시키는 한가지 방안으로 전력용 피뢰기를 사용하고 있으며, 정상운전상태에서의 과도과 전압 및 뇌서지 등에 대한 방호 대책으로 사용되고 있다.<sup>[1]~[2]</sup> 최근 전력용 피뢰기는 비선형 저항특성이 우수하고 높은 신뢰성을 가진 ZnO 피뢰기가 주류를 이루고 있다. I-V 비선형 저항특성이 우수한 ZnO 소자를 사용한 ZnO 피뢰기는 갭레스(gapless)화를 가능하게 하여 직렬갭(series gap)을 사용한 재래식 피뢰기와 비교할 때 응답시간이 짧아 보호특성이 향상되고 서지 처리 능력 및 내오손 성능이 우수하다. 또한, 소형 경량화 등의 특징을 가지고 있어 현재 전력계통에 광범위하게 사용되고 있다. 이와 같이 ZnO 피뢰기는 우수한 보호특성을 가지고 있지만, 전력계통의 절연 협조상의 중요성 면에서 적절한 유지·보수를 하여 만일의 사고를 미연에 방지할 필요가 요구되고 있다.

특고압 배전선로와 같은 전력계통에서는 부하설비의 광범위한 분포로 인한 이상전압의 발생빈도가 증가하여 이 과정에서 피뢰기의 열화가 진전된다.<sup>[3]~[8]</sup> 열화가 진전된 피뢰기가 전력계통에 계속 설치되어 사용될 경우 정상운전전압에서 피뢰기의 과열 또는 외부이상전압 침입시 보호동작에서 소자의 파괴가 발생하게 되어 전력계통 전체에 심각한 문제를 일으키게 된다. 따라서 피뢰기의 열화를 진단하는 것이 무엇보다도 중요하다. 표 1.1 및 그림 1.1은 배전선로의 주요사고 원인 통계를 나타내고 있다.



표 1.1 배전선로의 주요사고 원인 통계

Table 1.1 Statistical reports on major failure causes in power distribution lines

구분	자연열화	외물접촉	자연현상	제작불량	일반인과실	기타	합계
피뢰기	42(50)	17(22)	19(43)	0(11)	0(0)	5(4)	83(130)
I/S	6	26	2	0	0	0	34
선로용 COS	9	14	4	1	1	1	30
G/S	7	8	6	11	0	1	33
R/C	5	4	4	1	5	0	19
기타	62	49	37	3	0	8	159
합계	131	118	72	16	6	15	358
점유율(%)	36.6 (32)	33.0 (26.8)	20.1 (25.7)	4.5 (7.9)	1.6 (2.1)	4.2 (5.5)	100

※ 1. 99년 개폐기류 고장의 36.6%가 자연열화이며, 32.1%가 피뢰기에서 발생  
 2. ( ) 내는 98년 통계자료

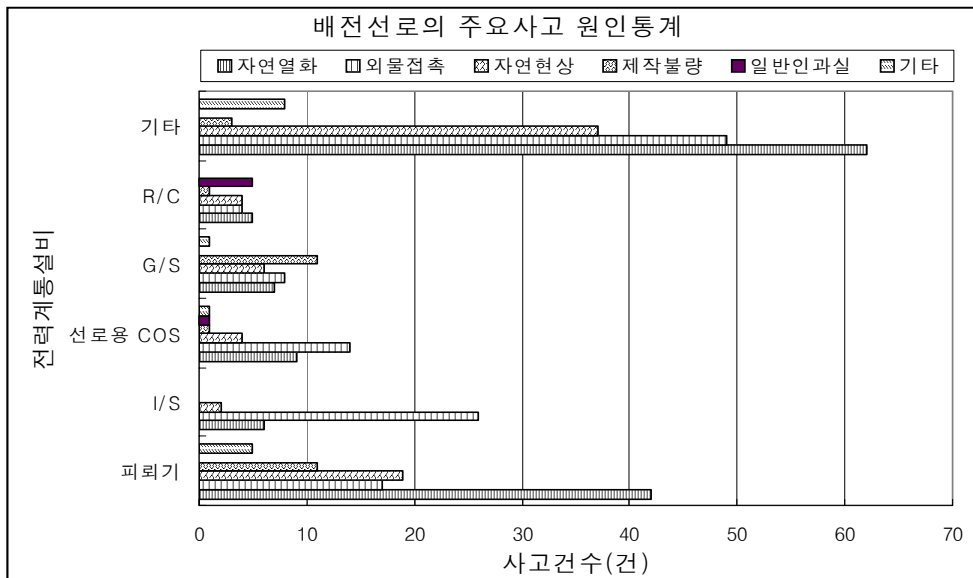


그림 1.1 배전선로의 주요사고 원인 통계

Fig. 1.1 Statistical reports on major failure causes in power distribution lines

또한, 전력계통에 설치된 피뢰기의 열화진단과 교체시기의 결정은 계통의 안정성 및 신뢰성을 확보하기 위해 필수적이며, 이를 위해 신뢰도가 높은 진단장치의 개발이 요구된다. 따라서 ZnO 피뢰기 소자의 열화에 의한 특성변화 및 열화진전에 따른 절연 능력 저하를 사전에 방지하기 위하여 높은 신뢰성을 갖는 열화진단기술에 대한 관심이 높아져 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>[9]~[12]</sup>

피뢰기의 열화진단기술에는 피뢰기의 제한전압, 방전전류, 손실전력, 누설전류, 정전용량 등을 측정하는 것이 있다. 특히 그 중에서 운전 중인 전력계통에 설치되어 있는 피뢰기의 누설전류를 측정하여 열화상태를 분석하는 방법이 주류를 이루고 있다. 그러나 누설전류를 기준으로 열화를 진단하는 방법은 단순히 전체 누설전류 또는 누설전류의 제 3조파 성분의 실효값을 측정하는 것으로 열화진단에 필요한 정보를 충분히 제공하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 전체 누설전류 파고분포의 변화를 분석하여 피뢰기의 열화진전 상태를 판단할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 전력용 피뢰기에 사용되는 여러 가지 ZnO 피뢰기 소자의 기본적인 특성과 열화진전에 따른 피뢰기의 전기적 특성변화를 온라인 상태에서 상시 감시·분석 가능한 열화진단 전문가 시스템의 개발에 관한 내용을 설명하였다.

전력계통에서 사용하는 ZnO 피뢰기 소자에 대하여 정격전압에서 기본 동작특성을 파악하고, 뇌충격전류에 의해 ZnO 소자를 인위적으로 가속 열화시켜 초기 특성과 비교하였다. 가속열화시험은 단기간내에 전력계통의 정상운전상태에서 열화된 피뢰기를 모의하기 위하여 수행하였으며, 실험에서는 ZnO 피뢰기에 관한 국내 시험규격(KSC 4609, ES131-261~283)과 국제 시험규격(IEC60099-4, JEC217)을 적용하였다.<sup>[13]~[15]</sup>

피뢰기의 열화진전에 따른 전기적 특성변화 즉, 저항분 누설전류의 증가에 의한 전체 누설전류의 변화 및 과고분포의 이동, 피뢰기의 온도 상승에 따른 누설전류의 변화를 온라인 상태에서 열화진단 전문가 시스템을 이용하여 분석하였다.

본 연구의 결과로부터 피뢰기의 열화진전에 관한 특성을 이해하고, 새로운 열화진단방법을 제안하여 피뢰기의 신뢰성 향상과 전력계통에서의 사고예방 및 열화진단 시스템 등의 개발에도 광범위하게 활용될 것으로 기대된다.

## 제 2 장 이 론

### 2.1 피뢰기의 구조 및 특성

전력용 피뢰기는 단자전압이 이상전압의 침입으로 동작개시전압 이상이 되면 수[ $\mu$ s]이내에 이상전압을 피보호기기의 절연내력 이하로 억제시키고, 이 과정에서 발생한 충격전류는 ZnO 소자를 통하여 대지로 방출된다. 그 후 피뢰기는 이상전압이 소멸하면 즉시 원래의 상태로 회복되며, 배전선로의 정격전압에서도 속류가 흐르지 않고 소자의 누설저항에 의한 수 백[ $\mu$ A]정도의 누설전류만이 흐르게 된다.

과거의 SiC 피뢰기는 보호동작을 수행하는 특성요소와 직렬갭으로 구성되었으나, 현재 사용되는 전력용 피뢰기는 특성요소로 I-V의 비선형 저항특성이 우수한 ZnO 소자를 사용함으로써 직렬갭이 없는 형태로 구성되어 있다. 그림 2.1은 ZnO 소자를 사용하는 피뢰기의 구조를 나타낸 것이다. 절연체인 애관내에 ZnO 소자가 직렬로 연결되어 있으며, 열화에 따른 특성변화를 파악하기 위해서는 이들 ZnO 소자의 기본특성과 특성변화 및 그 원인을 분석하는 것이 필요하다.

ZnO 소자의 I-V 특성은 그림 2.2와 같이 3개의 영역으로 구분하여 설명할 수 있다. 저전계 영역(prebreakdown region)에서 ZnO 소자는 단순히 커패시터와 같은 역할만을 수행하는 영역으로 직렬갭이 없기 때문에 정상운전전압이 직접 ZnO 소자에 가해져 미소한 누설전류만 흐른다. ZnO 소자가 열화되면 I-V 특성은 누설저항이 감소하여 저항분 누설전류가 증가하지만 용량분 누설전류의 변화는 거의 나타나지 않는다. 따라서 동일한 운전전압에서 열화되면 저항분 누설전류의 증가로 인하여 전체 누설전류는 증가한다.

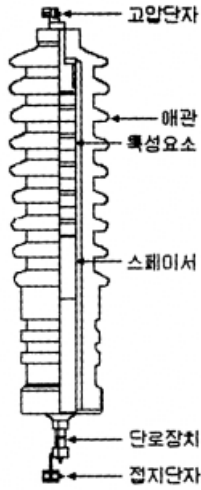


그림 2.1 ZnO 피뢰기의 구조

Fig. 2.1 Structure of a ZnO lightning arrester

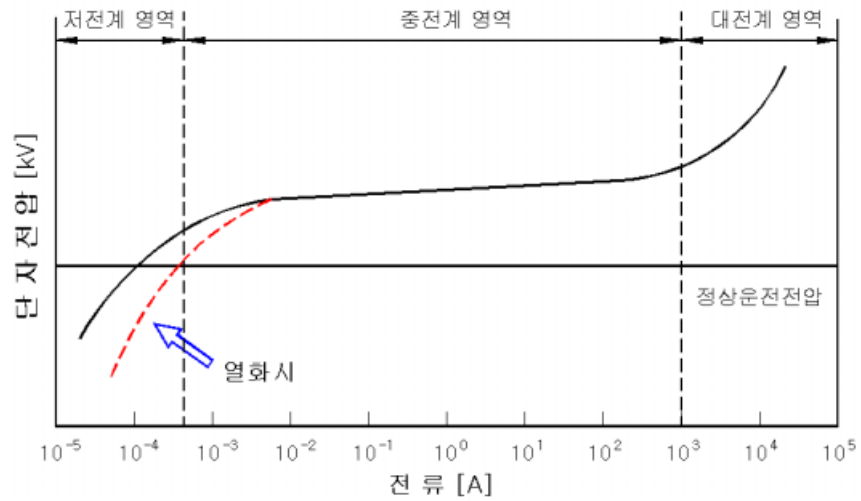


그림 2.2 ZnO 소자의 I-V 특성

Fig. 2.2 I-V Characteristics of a ZnO block

증전계 영역(breakdown region)에서는 전류가 전계의  $\alpha$ 승에 비례하고 I-V특성은 식 (2.1)로 나타난다.

$$I = AF_i^2 \exp(-\gamma/F_i) \quad (2.1)$$

여기서  $A = 4\pi m q (kT)^2 / h^3$

$F_i$  = 전계강도

$\gamma = 4 (2m)^{1/2} / 3h_e$

$m$  = 전자의 질량

$k$  = 볼츠만 상수

$q$  = 전하

$h$  = (플랑크 상수)/ $2\pi$

식 (2.1)을 간략화 하면, 식 (2.2)로 나타난다.

$$I = (V / C)^\alpha \quad (2.2)$$

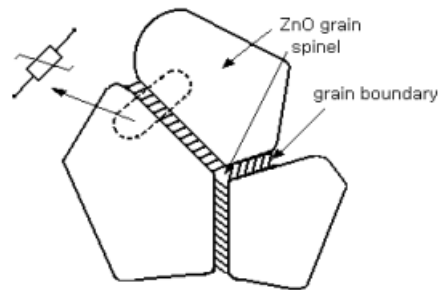
여기서  $V$  = 전압

$C$  = 정수

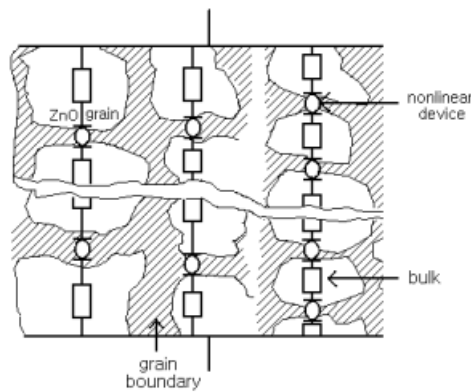
$\alpha$  = 비선형 저항상수

대전계 영역(upturn region)은 ZnO 입자의 고유저항이 지배적으로 나타나는 영역으로 I-V 특성이 비례적으로 나타난다. 파괴기에 있어 대전류가 흐르는 경우 이 영역의 저항치 저감이 중요하다.<sup>[37]</sup>

ZnO 소자는 그림 2.3 (a)에서 나타낸 것과 같이 세라믹의 다결정체로 ZnO 입자(grain), 입계층(grain boundary), 스피넬(spinel)의 3가지 결정상으로 구성되어 있다. ZnO 소자의 주성분인 ZnO 입자는 10~20[ $\mu\text{m}$ ] 정도의 균일한 크기이며, 순수한 ZnO와는 달리 쌍으로 이룬 구조로 n형의 반도체성을 가지고 있다.



(a) 단일구조



(b) 복합구조

그림 2.3 ZnO 소자의 구조

Fig. 2.3 Structure of a ZnO block

스피넬은 ZnO 입자와 입자사이에 존재하고 높은 저항을 가지고 있어 ZnO 입자의 성장을 제한하는 역할을 하지만, 전기적인 역할은 하지 않는다. ZnO 입자를 둘러싸고 있는 입계층은 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 중심의 첨가물으로써 ZnO 소자의 비선형 저항특성에 영향을 미치며, 소자의 열화시 가장 큰 변화를 나타낸다.<sup>[16]~[19]</sup> ZnO 입자의 크기는 소자의 비선형 저항에 의한 보호동작 중 전압 제한 특성인 항복전압을 결정하게 된다.

ZnO 피뢰기의 복합 미세구조는 그림 2.3 (b)와 같이 I-V 특성이 대칭인 미세 비선형 저항소자가 직·병렬로 연결된 다중접속 구조를 가지고 있다. 주어진 ZnO 소자에 있어서 입자의 크기가 작을수록 입계의 수가 많아지므로 큰 전압에서 항복이 일어나게 된다. ZnO 소자의 항복전압은 ZnO 입자의 직렬 연결수에 의해 결정되며, 식 (2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_b = mv_b [V] \quad (2.3)$$

여기서  $V_b$  = ZnO 소자의 항복전압

$n$  = 직렬로 연결된 입계의 수

$v_b$  = 입계층의 항복전압

ZnO 소자의 에너지량은 입계의 병렬 연결 수에 의해 결정되며, 소자의 단면적이 증가하면 병렬 연결수가 증가하므로 에너지내량도 증가하게 된다. 그림 2.3 (b)에서 하나의 입계층은 3~4[V]의 항복전압을 가진다.



전기적 특성을 갖는 ZnO 피뢰기 소자의 전기적 등가모델은 그림 2.4와 같으며,  $R_{gb}$ 는 입계층의 전위장벽에 생기는 비선형 저항이며,  $C_g$ 는 ZnO 입자와 입자 사이의 정전용량을 나타낸 것이다.

그림 2.4에서  $I_T$ ,  $I_R$ ,  $I_C$ 는 전체 누설전류, 저항분 누설전류, 용량분 누설전류를 나타낸 것으로, ZnO 소자의 양단에 교류전압을 인가하면 피뢰기의 등가회로에 의해 저항분 누설전류와 용량분 누설전류가 흐르게 된다. 또한 ZnO 소자의 열화가 진행되면서 누설전류가 증가하는데, 이러한 현상은 ZnO 소자 입계층의 변화에 의해 저항분 누설전류와 용량분 누설전류가 증가하기 때문이다.

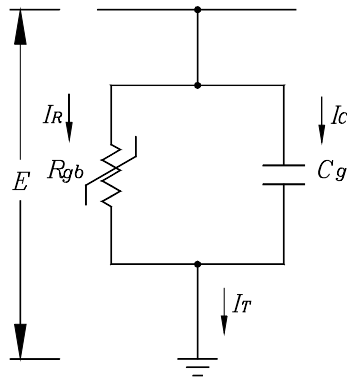
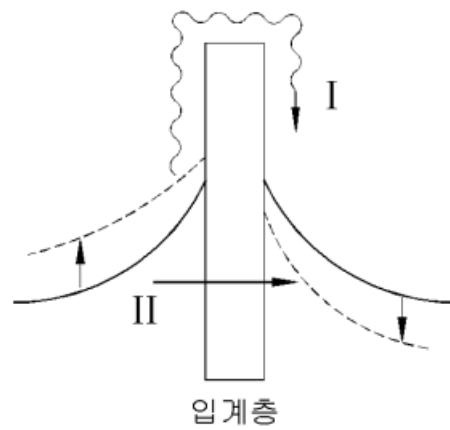


그림 2.4 ZnO 소자의 전기적 등가모델

Fig. 2.4 Electrical equivalent circuit of a ZnO block

배전선로의 대지전압정도인 저전계 영역에 있어서 ZnO 소자의 전도 기구는 ZnO 소자의 입계층에 2개의 쇼트키 베리어(schottky barrier)가 형성되어, 그림 2.5의 에너지대 모형으로 표현할 수 있으며, 역 bias측의 쇼트키 효과에 의하여 지배된다.<sup>[20]</sup> 입계층은 그림 2.5에 표시한 에너지

밴드 레벨로 표현하는 것이 가능하다. 입계층의 양측에 쇼트키 베리어가 형성되어 정상운전전압 정도의 저전류 영역에서는 이 베리어를 열전자가 뛰어넘어 미소한 저항분 누설전류가 흐른다.



- : 과전 전의 에너지 밴드
- ..... : 과전 후의 에너지 밴드
- I : 에너지 shot 현상
- II : 터널현상

그림 2.5 ZnO 소자의 에너지대 모형

Fig. 2.5 Energy-band model of a ZnO block

## 2.2 열화진전기구

ZnO 소자가 열화되는 원인으로서는 상용주파수 교류과전압과 뇌충격전류로 구분할 수 있다. 상용주파수 교류과전압에 의한 열화는 ZnO 소자에 교류전압을 인가함에 따라 소자에 누설전류가 흐르게 되고, 전류에 의해 열이 발생하게 된다. 이때 흐르는 용량분 누설전류는 소자의 온도상승과는 거의 관계가 없으나, 저항분 누설전류는 소자 내의 분자운동을 촉진시키기 때문에 소자의 온도를 상승시키게 된다. 일정한 전압에서 온도가 증가하면 저항분 누설전류의 값은 증가하게 된다.

ZnO 소자는 배전선로의 정상운전전압이 가해진 상태에서도 계절에 따라 온도가 변화하므로, ZnO 소자의 온도 상승에 따라 전체 누설전류의 최대값과 실효값이 증가한다.

저항분 누설전류  $I_R$ 이 흐르는 원인은 ZnO 소자에 전계가 가해지면 열적으로 활성화된 이온의 확산이 일어나고, 이 이온이 입계층을 넘어가 입계의 저항이 작아지기 때문이다. 즉, 열화는 전위장벽의 변형에 의하여 발생함을 나타내고 있으며 일반적으로 동일한 소자에 대해 높은 온도 및 대전류가 흐르는 동안 열화가 진전되어 저항분 누설전류가 증가하고, 전체 누설전류의 크기가 어떤 값을 넘어서면 열발생이 커져서 짧은 시간 내에 소자는 열폭주에 도달한다. 뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 열화는 상용주파수 교류과전압에 의한 열화기구와는 다르다. 뇌충격전류는 ZnO 소자의 비선형 저항특성을 저하시켜 보호성능에 크게 영향을 주며 이것은 뇌충격전류의 경우 상용주파수 교류과전압에 비해 ZnO 소자의 입계층에 가해지는 전계의 강도가 정상상태보다 대단히 크므로 소자의 보호동작시보다 큰 열이 발생하고 이 때문에 입계층의 변형이 쉽게 일어나기 때문이다. 만약 ZnO 소자가 불균일한 구조적 결함을 포함하고 있다면, 그 부분에 열이 집중되고 이로 인해 ZnO 소자는 용융과정을 통한 재소결이 일어

난다. 이와 같은 과정에서 ZnO 입자가 성장하고 입계층이 감소하면 소자는 정상운전전압에서도 쉽게 가열되어 열폭주가 발생하게 되고 결국에는 ZnO 소자가 파괴된다.

그림 2.6은 ZnO 소자의 열화요인과 열화시 나타나는 현상을 나타낸 것이다. 열화요인으로 과전스트레스인 상용주파수 교류과전압과 서지 스트레스인 뇌서지, 가스절연개폐장치(GIS)의 부하 개폐시 발생하는 개폐서지 등으로 나타낼 수 있다. 이러한 열화요인으로 인하여 ZnO 소자의 열화가 진전되며, 저항분 누설전류가 증가하게 된다. 따라서 파괴기의 열화현상으로는 전체 누설전류 증가, 소자의 온도상승의 동작이 반복되어 나타난다. 전기적인 스트레스 외에도 온도, 습도 등의 주위 환경의 영향에 의하여 ZnO 소자가 열화되며, 이들 요소로 파괴기의 절연저항이 저하하여 소자와 애관 등에 흐르는 누설전류를 증가시켜 결국 열폭주, 지락사고 등에 도달하게 된다.<sup>[21]</sup>

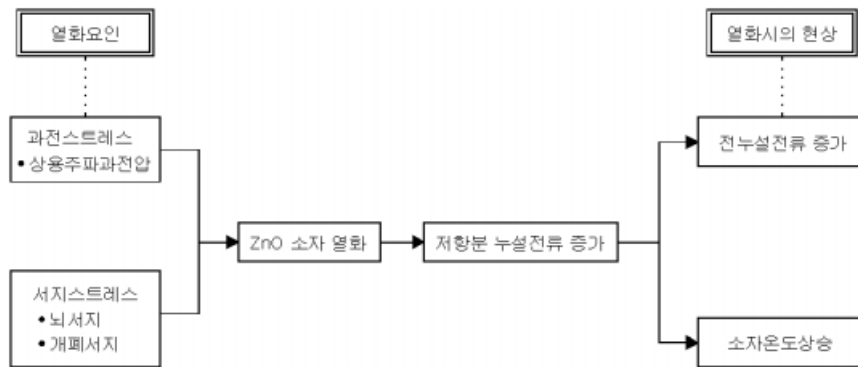


그림 2.6 파괴기의 열화요인과 열화현상

Fig. 2.6 Deterioration factor and phenomenon of lightning arresters

## 2.3 열화진단기술

열화상태를 파악하기 위해서는 정상운전전압에서 감시하여 피뢰기의 누설전류를 검출하는 것이 중요하다. ZnO 소자가 열화되면 I-V 특성은 저항분 누설전류는 증가하지만 용량분 누설전류는 거의 증가하지 않기 때문에 소자의 열화에 영향을 거의 미치지 않는다. 결국 저항분 누설전류가 증가하여 ZnO 소자를 발열시켜 최종적으로 피뢰기 소자의 열폭주, 지락사고 등을 일으키는 요인이 된다. 따라서 저항분 누설전류의 증가를 검출하는 것이 중요하며, 이를 통해 열화진전상태를 확인하여 교체 시기를 결정하는 것이 열화로 인한 전력계통의 사고를 미연에 방지할 수 있는 중요한 요소가 된다.

한편 ZnO 피뢰기의 부속장치에 대한 열화에 대해서는 충분히 검토되어 있다. 이들의 부적합 상태는 직접 절연저항을 저하시켜 피뢰기의 누설전류를 증가시키는 경우와 ZnO 소자의 열화에 영향을 미치는 저항분 누설전류를 증가시키는 것이 있다. 특히 피압막 주변의 부품은 기능상 열화를 일으키기 쉽다. 예를 들어 Packing 등의 고무류가 열화되면 기밀 불량, 흡흔 등을 일으켜 ZnO 소자의 측면과 절연부하 등의 절연저항을 저하시켜 누설전류가 증가하게 된다. 그러므로 부속장치의 열화는 절연저항계를 이용하여 쉽게 측정할 수 있으나, 보통은 상시 측정할 수 없으므로 피뢰기를 전력계통에서 분리하여 측정해야 하는 단점이 있다.

ZnO 소자에 흐르는 누설전류의 파형 예를 그림 2.7에 나타내었다. 전체 누설전류는 인가되는 전압과 동상인 저항분 누설전류와 위상이  $\pi/2$  앞선 용량분 누설전류의 합으로 나타나며, 용량분 누설전류가 저항분 누설전류에 비해 훨씬 크게 나타난다.<sup>[22]~[25]</sup>

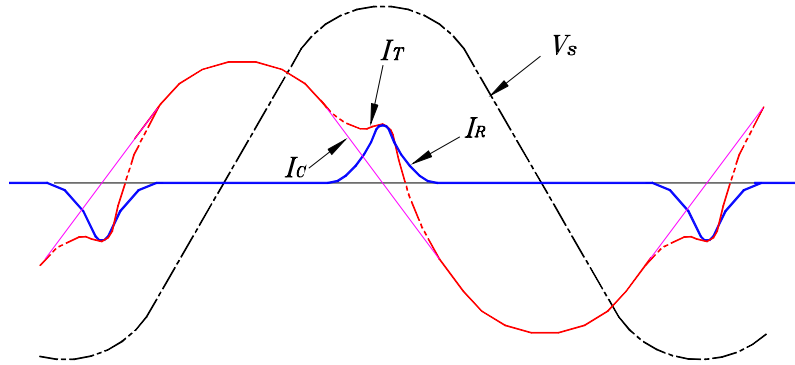


그림 2.7 누설전류 파형의 예

Fig. 2.7 Example of leakage current waveforms

그림 2.8은 전압과 누설전류와의 위상관계를 나타낸 것이다. 인가한 전압을  $E$ 라고 하면, 전체 누설전류  $I_T$ 를 용량분 누설전류  $I_C$ 와 저항분 누설전류  $I_R$ 의 합으로 나타낼 수 있으며, 인가전압과 전체 누설전류의 위상차를  $\theta$ 라 하면 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 |I_T| &= \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \\
 I_R &= I_T \cdot \cos \theta \\
 I_C &= I_T \cdot \sin \theta
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

그림 2.8에서 저항분 누설전류가 증가하여 열화되면 전체 누설전류는  $I_{T1}$ 에서  $I_{T2}$ 로 변화하며, 인가전압과 전체 누설전류의 위상차  $\theta_1$ 은 저항분 누설전류의 증가로 인하여  $\theta_2$ 로 변화한다.

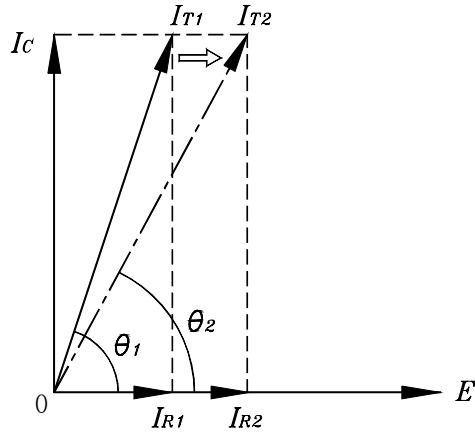


그림 2.8 인가전압과 누설전류와의 위상관계  
 Fig. 2.8 Phase relation between an applied voltage and leakage current

ZnO 소자의 열화진전에 따라 저항분 누설전류가 증가하며, 이것이 전체 누설전류의 증가로 나타난다. 이와 같이 저항분 누설전류의 증가는 열화가 진전되는 것으로 판단할 수 있으므로 저항분 누설전류를 검출하는 것이 중요하다. 그러나 저항분 누설전류는 매우 작기 때문에 직접적인 측정이 어려우므로 전체 누설전류를 측정하고, 그 중에서 저항분 누설전류를 분석하는 방법을 이용하고 있다.

누설전류에 의한 ZnO 소자의 열화진단방법은 다른 방법들과는 달리 ZnO 소자를 독립적인 상태나 전력계통에 연결된 상태에서 모두 열화진단을 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 ZnO 소자의 열화에 따른 전체 누설전류와 저항분 누설전류의 값은 아주 미소하기 때문에 정밀한 계측과 분석이 필요하다. ZnO 소자의 열화시 정전용량에 의한 용량분 누설전류는 거의 증가하지 않고, 누설저항에 의한 저항분 누설전류가 현저히 증가하는 성질을 이용하여 다음과 같은 피뢰기 열화진단기술 등이 제안되고 있다.

### 2.3.1 전체 누설전류에 의한 열화진단

전력계통에 설치되어 있는 ZnO 피뢰기의 접지측 단자에 고감도 관통형 변류기를 설치하여 계통으로부터 접지선을 분리하지 않고, 정상운전전압에서 저항분 누설전류와 용량분 누설전류의 합으로 구성된 전체 누설전류를 측정한다. ZnO 소자의 열화진전에 따라 전체 누설전류는 어느 정도 열화가 진전되기 전까지는 저항분 누설전류가 미소하게 증가하기 때문에 초기의 열화상태를 진단하는데 어려운 단점이 있다. 그러나 간단하게 측정 가능한 장점이 있어 피뢰기의 열화를 진단하는 방법으로 폭넓게 사용되고 있다.

### 2.3.2 저항분 누설전류에 의한 열화진단

ZnO 소자의 열화가 어느 정도 진행된 시점에서는 전체 누설전류의 성분 중 저항분 전류가 차지하는 비율이 크게 나타난다. 따라서 전체 누설전류를 측정하여 저항분 누설전류를 검출하여 쉽게 피뢰기의 열화 정도를 파악할 수 있다. 초기 ZnO의 소자 열화를 빠르게 검출하고, 피뢰기의 이상유무를 사전에 예측해 ZnO 소자의 열화를 진단하는 것으로 저항분 누설전류를 측정·감시하는 것이 매우 중요하다.

저항분 누설전류의 경우 ZnO 소자 열화시 초기 값에 비해 큰 증가폭을 나타내므로 소자의 열화 초기뿐만 아니라 운전 중에 열화진전상태를 진단할 수 있는 장점이 있다. 하지만 소자에 흐르는 누설전류 중 저항분 누설전류를 측정하기 위해서는 고감도 변류기, 차동증폭기 등의 부가적인 장치가 필요하다. 이러한 저항분 누설전류를 검출하는 대표적인 방법에는 자기소호방법, 동기정류방법, 제 3조파 검출방법, 와트로스를 측정하는 방법 등이 있다.



1) 자기 소호방법

ZnO 소자의 전체 누설전류에서 자동적으로 소호과를 만들어 전체 누설전류와의 차동을 주어 저항분 누설전류를 검출하는 방법이다. 변류기에 의해 검출된 미소한 전체 누설전류의 신호를 증폭하여 그 영점에 있어서 반전하는 구형파 신호를 슈미트회로(schumit trigger)에서 발생시켜 상용주파수성분을 검출하고, 용량분 누설전류의 지연을 위상차 검출로 보정한다. 전체 누설전류의 합에 얻어진 소호과를 전체 누설전류과에서 제거하여 저항분 누설전류를 검출하고, 얻어진 저항분 전류의 파고치를 마이크로 프로세서로 소정의 알고리즘에 기초해 이상진단을 실시한다. 이 방법은 계기용 변압기(PT/PD) 등에서의 보조신호가 불필요하고, 검출 센서로서 변류기를 사용하고 있기 때문에 전력계통으로부터 안정성을 확보할 수 있으며, 내서지성이 우수한 것 등의 장점이 있다. 그림 2.9는 자기소호방법에 의한 측정 원리를 나타내고 있다.<sup>[26]</sup>

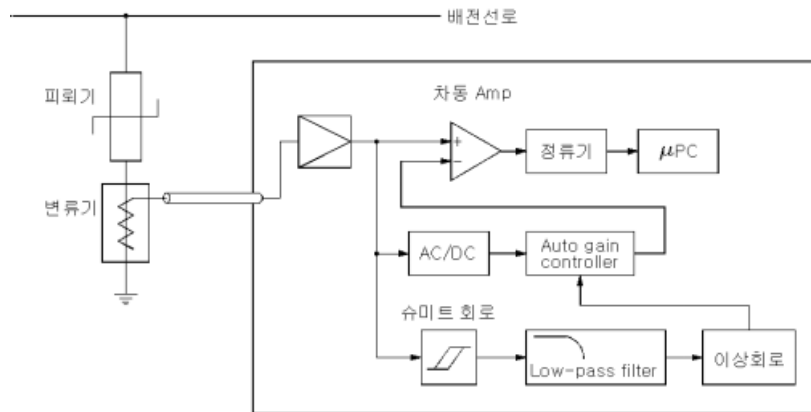


그림 2.9 자기소호방법에 의한 측정

Fig. 2.9 Measurement of resistive leakage current by a self-cancel method

## 2) 동기정류방법

ZnO 소자의 전체 누설전류를 저항으로 검출하여 대역통과필터를 통해 기본파 성분을 추출한 후, 이를 계기용 변압기에서 얻은 전압신호로 동기정류하여 직류로 변환 증폭해 저항분 누설전류를 검출하는 방법이다.

그림 2.10과 그림 2.11에 동기정류방법에 의한 저항분 누설전류 검출 원리를 나타내고 있다. 그림 2.11의 (a) 전체누설전류 파형을 (b)의 대역통과필터를 통해 기본파만을 추출하여, (c)에 나타낸 것과 같이 인가전압 파형의 영점 A, B 사이에서 정류한다. 그 결과 그림 2.11의 (b)에 나타내고 있는 것과 같이 사선부가 소호되어 저항분 전류의 기본파성분 파고치  $I_a$ 에 대응한 DC 출력  $I_b$ 가 그림 2.11의 (d)와 같이 나타난다. 이  $I_b$ 에서 그림 2.10의 측정과정을 통하여 저항분 누설전류의 파고치  $I_{RP}$ 를 얻는 방식이다. 이 방법은 전력계통의 고주파의 영향을 거의 받지 않으며 누설전류의 측정오차가 작은 등의 장점이 있다.<sup>[21],[27]</sup>

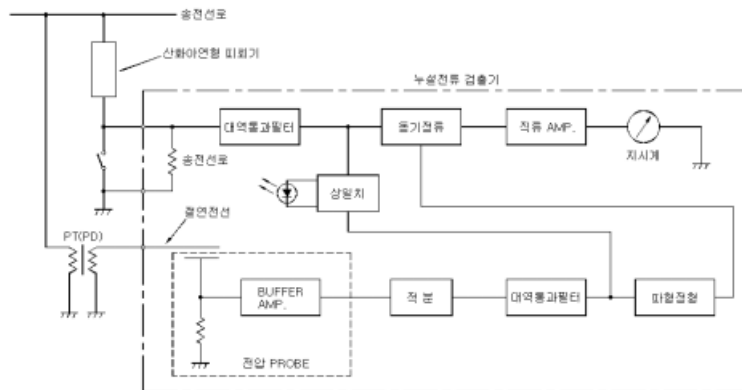


그림 2.10 동기정류방법에 의한 저항분 누설전류 측정

Fig. 2.10 Measurement of resistive leakage current by a synchronous rectification method

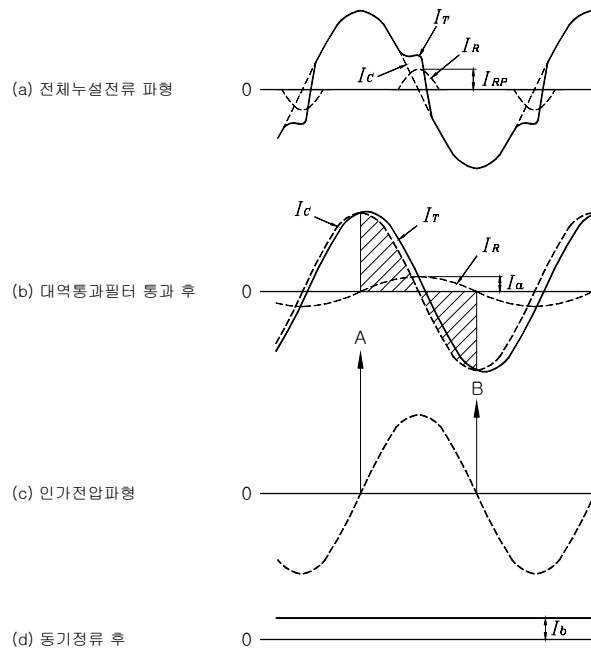


그림 2.11 전압·전류 파형

Fig. 2.11 Voltage and current waveforms

### 3) 제 3조파 검출방법

전력계통에 설치된 피뢰기의 누설전류는 접지선을 통하여 대지로 흐르므로 피뢰기가 연결된 접지선에 관통형 변류기를 설치하여 전체 누설전류를 검출한다. 검출된 전체 누설전류 중에서 대역통과필터를 이용하여 제 3조파 성분을 얻는다. 특히 전체 누설전류 성분 중 저항분 누설전류의 변화가 제 3조파 누설전류 성분의 변화로 현저히 나타나므로, 제 3조파 성분을 분석하여 누설전류의 증가분에 대한 정보를 얻을 수 있어 피뢰기의 누설전류를 측정하는 일반적인 방법으로 사용되고 있다. 이 방법은 누설전류를 피뢰기의 정상운전상태에서 측정이 가능하고, 취급이 간단하여 지시계기에 의한 측정과 관측장치에 의한 파형 관측이 가능한 특징이

있다. 그림 2.12는 제 3조파 성분을 측정하여 저항분 누설전류를 검출하는 예를 나타낸 것이다.

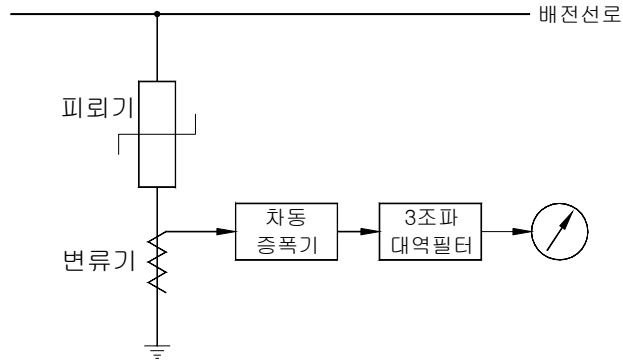


그림 2.12 제 3조파 누설전류 측정회로

Fig. 2.12 Measurement circuit for the third harmonic leakage current

### 2.3.3 전체 누설전류의 파고분석에 의한 열화진단

ZnO 소자는 ZnO 입자가 입계층에 직·병렬로 연결된 구조로 입자의 크기와 입계층의 두께가 모두 동일한 것은 아니므로 ZnO 소자에 뇌충격 전류가 인가될 때 입계층에 가해지는 전기적 세기도 달라진다. 따라서 입자를 통해 흐르는 에너지량도 각각 달라 전기적 스트레스는 소자 전체에 걸쳐 다르게 나타나 일부 입자 또는 입계만 변형이 발생한다. 이와 같이 열화가 진행되는 과정에서 직·병렬로 연결된 일부 입자와 입계층만이 변형되었다면 정상운전전압에서 입계에 가해지는 전기장이 입자 사이의 비선형 특성으로 어떤 전기장 이상에서만 비선형 특성을 나타내면서 최대값, 즉 누설전류의 파고값만 증가하고 실효값에는 인지할 만한 변화가

관측되지 않는다. 따라서 ZnO 소자는 열화진전에 따라 누설전류의 파괴값이 증가함은 물론 파괴분포에 현저한 변화를 나타낸다.

피뢰기의 열화를 진단하는 방법으로 가장 널리 이용하는 전체 누설전류의 크기를 비교하는 것은 실효값 또는 최대값이 증가하는 경향을 비교하는 것으로, 변동의 범위가 크기 때문에 정확한 진단이 어려웠다. 그러나 본 연구에서 제안한 전체 누설전류의 파괴 분석에 의한 피뢰기의 열화 진단은 미소한 열화진전에서도 파괴분포의 현저한 차이를 확인할 수 있으므로 측정이 간편하고 열화진전 정도를 쉽게 판단할 수 있다. [38]

## 제 3 장 뇌충격전류에 의한 가속열화시험

### 3.1 실험장치 및 방법

본 논문에서는 전력용 피뢰기의 열화진단에 필요한 전기적 정보를 도출하기 위하여 뇌충격전류에 의한 가속열화 실험을 수행하였다. 실험에는 피뢰기 특성시험에 사용되는 8/20 [ $\mu$ s] 뇌충격전류 발생장치를 이용하여 단일 및 4중의 군단위로 분리하여 적용하였으며, 정격전압 6[kV], 정격전류 5[kA]의 ZnO 소자를 사용하였다.<sup>[28]~[29]</sup>

본 논문에서 구성한 뇌충격전류 발생장치는 R, L, C 회로로 구성되며, 등가회로는 그림 3.1과 같다. 고전압 발생장치(최대 130[kV], 2.1[mA])에서 인가되는 고전압은 충전저항  $R_g$ 를 통하여 4개의 축적형 전해 콘덴서 C를 충전시키고 전해 콘덴서 C의 전압이 설정된 전압 E가 되었을 때, 4개의 방전구갯 G를 통하여  $L \cdot R_L + R_{OUT}$ 에 전해콘덴서 C의 전하를 각각 방전시키면 저항  $R_{OUT}$ 양단에 충격전압이 발생하게된다.<sup>[30]~[32]</sup>

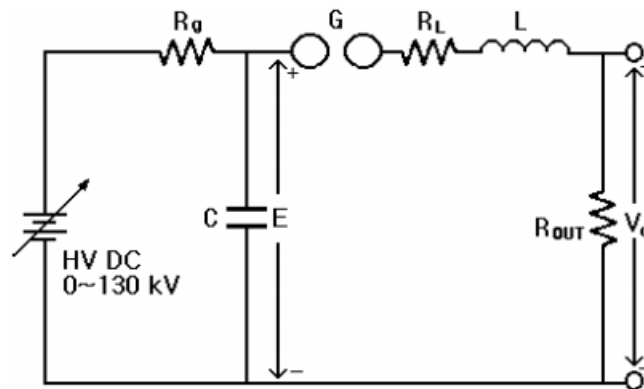


그림 3.1 뇌충격전류 발생장치의 등가회로

Fig. 3.1 Equivalent circuit of a lightning impulse current generator

그림 3.1의 등가회로에서 방전구갭 G의 방전저항을 무시하면 식 (3.1)의 회로방정식이 성립한다.

$$L \frac{di}{dt} + (R_L + R_{OUT})i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = E \quad (3.1)$$

초기조건  $t=0$ 일 때  $R_L + R_{OUT} = R$ 이라 하고,  $i=0$ 를 넣어 위 식을 풀면

①  $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  일 때

$$i = \frac{E}{R} \cdot \frac{\alpha}{\beta} \{ \epsilon^{-(\alpha-\beta)t} - \epsilon^{-(\alpha+\beta)t} \} \quad (3.2)$$

로 나타내며, 발생하는 파형은 과제동되어 파두가 급준하고, 최대값에 도달한 후 짧은 시간 내에 감소한다.

②  $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  일 때

$$i = \frac{E}{R} \cdot 2\alpha t \cdot \epsilon^{-\alpha t} \quad (3.3)$$

으로 나타내며, 발생하는 파형은 최대값에 도달한 후 임계값까지 서서히 감소한다.

③  $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  일 때

$$i = \frac{E}{R} \cdot \frac{2\alpha}{\omega} \cdot \epsilon^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (3.4)$$

으로 나타내며, 발생하는 파형은 진동성분을 포함한 감쇠파형이 발생한다. 여기서

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

이다.

그림 3.2와 그림 3.3에는 본 연구에서 구성한 실험장치 및 측정계를 나타내었다. 4중 뇌충격전류 발생장치는 4개의 충전용 콘덴서(100[kV] 0.5 [ $\mu$ F])뱅크와 8 개의 방전구갯 (100[mm])으로 구성하여 8/20[ $\mu$ s], 5[kA] 4회의 표준 뇌충격전류를 발생할 수 있다. 발생하는 충격전류의 크기는 콘덴서의 충전전압을 고저항(500[M $\Omega$ ])과 직류 전류계(0~3000[ $\mu$ A])의 조합으로 측정하면서 조절하였다.

4중 뇌충격전류 발생장치의 뇌격시간 간격은 방전갯의 위치를 조정하여 30[ms]~120[ms]가 되도록 하였으며, 1 분 간격으로 4 중의 뇌충격전류를 발생할 수 있도록 하였다. ZnO 소자의 방전전류는 고주파 변류기 (Stangenes. CT 3-0.01, 50[A]<sub>max</sub>)를 사용하여 측정하였다. 또한 소자 양단의 제한전압은 1000:1 고전압 프로브(Tek. 6015A, 70[MHz], 40[kV]<sub>max</sub>)를 이용하여 측정하였다.

4중 뇌충격전류의 실험결과와 비교하기 위한 단일 뇌충격전류 인가실험의 경우, ZnO 소자에 뇌충격전류를 1 분 간격으로 40 회 인가하고 1 시간 이상 충분히 냉각시키는 실험을 반복하였으며, 4중 뇌충격전류의 인가 실험에서는 4 중의 뇌충격전류를 10 회 인가하고 1 시간 이상 소자를 냉각시키는 방법을 적용함으로써, 측정시점에서는 단일 및 4중 뇌충격전류로 소자에 인가되는 에너지량이 동일하도록 하였다.



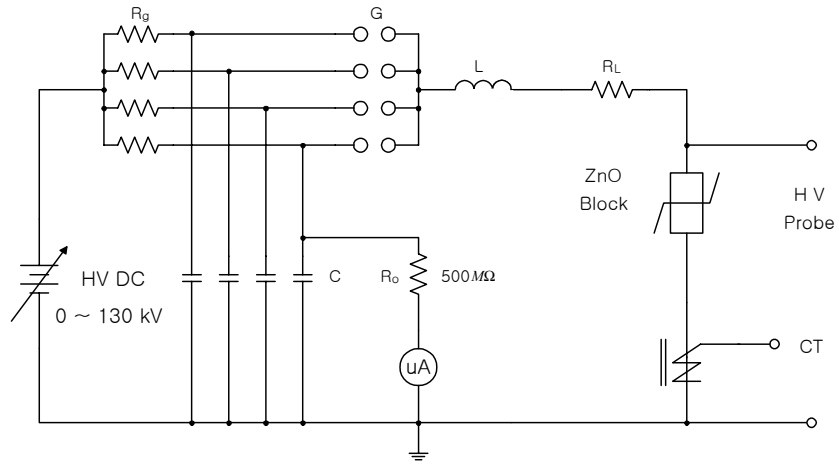


그림 3.2 실험장치 및 측정계의 개략 구성

Fig.3.2 Configuration of the experimental apparatus and the measurement system.



그림 3.3 뇌충격전류 발생장치의 사진

Fig. 3.3 Photograph of the quadruple-lightning impulse current generator

그림 3.4와 그림 3.5의 (a)에는 설계한 뇌충격전류 발생장치의 등가회로에 대한 PSpice 시뮬레이션 실행결과와 실제 발생된 파형을 나타내고 있다. 그림 3.5 (a)에서 발생된 파형을 보면 충격전류의 요구되는 파형인 8/20 [ $\mu\text{s}$ ]를 만족함을 알 수 있다.

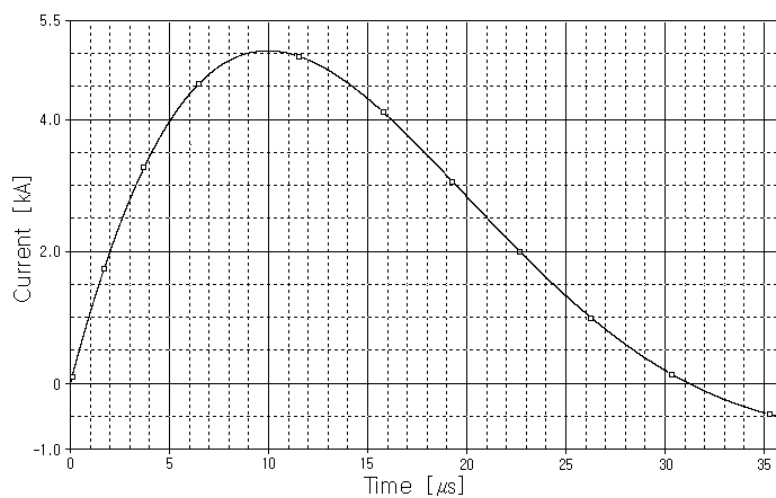
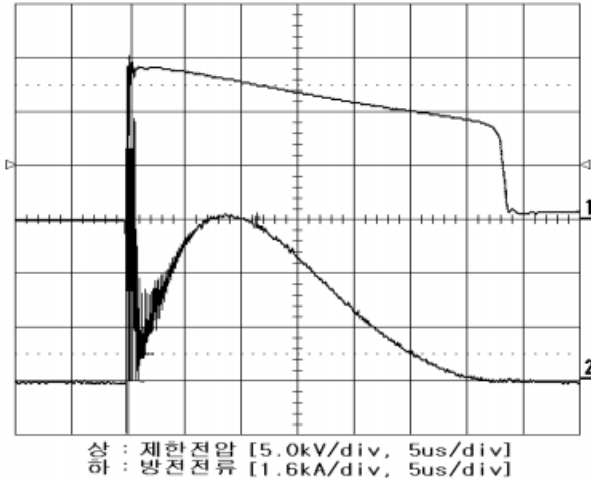


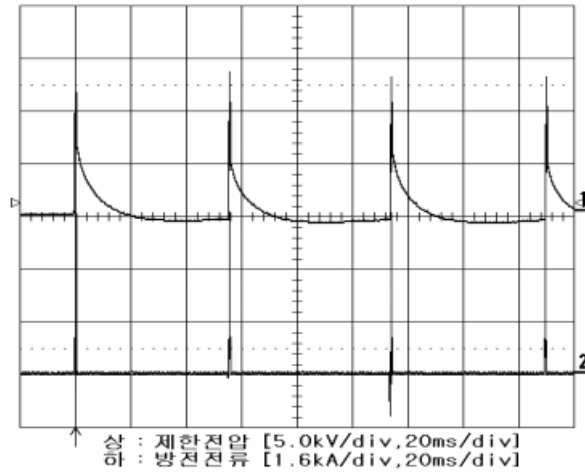
그림 3.4 PSpice에 의한 시뮬레이션 결과

Fig. 3.4 Simulation result by PSpice

그림 3.5는 4중 뇌충격전류를 소자에 인가할 때, 소자에 흐르는 방전전류와 소자 양단의 제한전압을 나타낸 것이다. 그림 3.5 (a)는 수평축 시간 간격을 5 [ $\mu\text{s}$ ]로 하여 4중의 뇌격이 발생할 때, 그 중 1개의 방전전류와 제한전압을 나타낸 것으로 매회 피뢰기 소자에 인가되는 파형의 특성을 알 수 있다.



(a) 방전전류 및 제한전압



(b) 4중 뇌충격전류의 발생

그림 3.5 4중 뇌충격전류 발생장치에 의해 발생된 파형 예

Fig. 3.5 Typical waveforms produced by the quadruple-lightning impulse current generator

8/20[ $\mu$ s], 5[kA] 단일의 뇌충격전류로 ZnO 소자에 인가되는 에너지는 식 (3.5)와 같이 산출할 수 있으며, 본 실험과형의 경우 1,217[J]의 에너지가 인가된다.<sup>[33]~[34]</sup>

$$w = \int vi dt [ J ] \quad (3.5)$$

그림 3.5 (b)는 수평축 시간 간격을 20[ms]로 설정하여 1회의 방전에 발생하는 4중 뇌충격전류의 시간 간격을 나타낸 것으로, 약 55[ms]마다 뇌충격전류가 ZnO 소자에 인가됨을 알 수 있다. 4중 뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 전기적 특성변화는 상기의 조건으로 실험을 반복하면서 정상운전전압에서 누설전류의 최대값 및 실효값과 동작개시전압을 측정하여 비교·분석하였다. 교류전압이 ZnO 소자 양단에 인가되었을 때, 소자에 흐르는 전체 누설전류는 저항분 누설전류와 용량분 전류의 합으로 나타나게 되며, 정상운전전압에서 측정한 누설전류의 파형 예를 그림 3.6에 나타내었다.

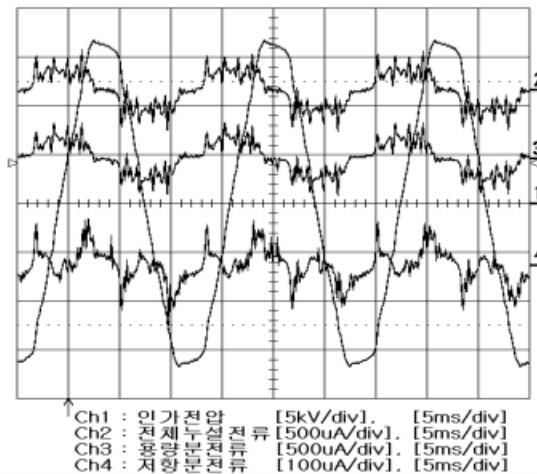


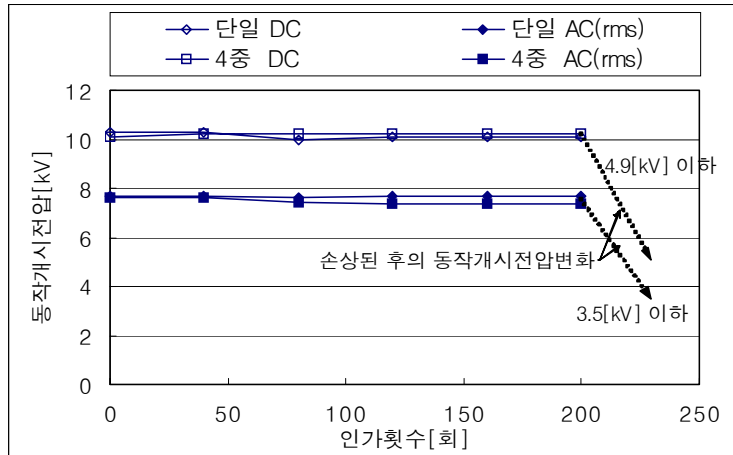
그림 3.6 누설전류 파형

Fig. 3.6 Leakage current waveforms

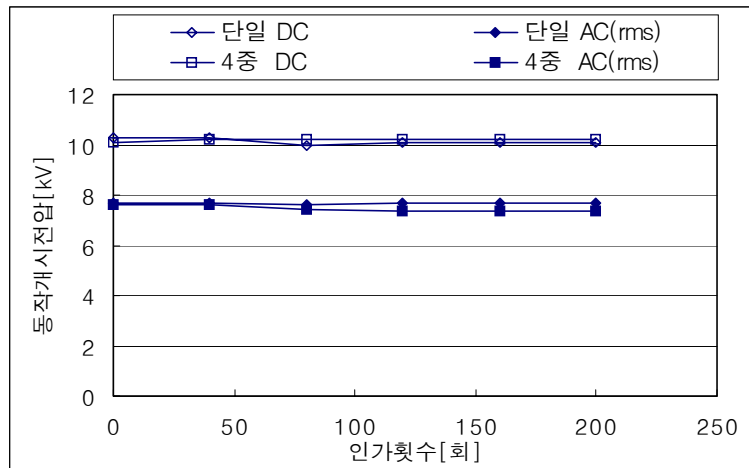
### 3.2 동작개시전압 및 누설전류의 변화

전기적 특성이 동일한 A사와 B사의 ZnO 소자에 단일 뇌충격전류와 4중 뇌충격전류로 동일한 에너지를 인가한 후, 정상운전전압(4.4[kV])에서의 동작개시전압과 누설전류 변화를 비교하였다. ZnO 소자에 대한 기본 특성 실험에 있어서 단일 및 4중 뇌충격전압·전류를 총 200회(4중의 경우 50회) 인가한 후 AC, DC에 대한 동작개시전압은 그림 3.7 (a), (b)와 같이 A, B사 모두 인가전과 비교해서 변화가 거의 없었다. 동작개시전압은 이전의 여러 가지 실험을 통해서도 ZnO 소자의 심각한 국부적인 손상이나 파괴, 또는 뇌충격전류에 의한 핀홀(pin-hole) 생성 등의 경우에는 그림 3.7 (a)의 점선과 같이 DC는 4.88[kV], AC는 3.5[kV]까지 허용되지만, ZnO 소자가 어느 정도 열화가 진행되어도 그 값의 변화는 거의 없었다.<sup>[35]</sup>

그림 3.8 (a)와 (b)는 A사와 B사의 ZnO 소자를 대상으로 단일 뇌충격전류를 1분 간격으로 1회씩 200회를 인가한 경우와 4중 뇌충격전류를 50회(단일과 비교하면 200회로 동일한 에너지량이 인가된 경우) 인가하였을 때 누설전류를 측정하여 나타낸 것이다. 전기적 정격이 같은 2개사의 ZnO 소자에 단일 및 4중 뇌충격전류를 인가하고, 누설전류의 변화를 측정한 결과, 전체 누설전류의 실효값은 변화가 거의 없었다. 최대값은 A사, B사 모두 초기의 누설전류에 비해 단일 및 4중 뇌충격전류 인가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 ZnO 소자가 뇌충격전류에 의해 외부적으로 손상을 입거나 파괴가 일어나면 그림 3.8 (a)의 점선과 같이 실효값에서도 현저한 증가를 나타낸다.



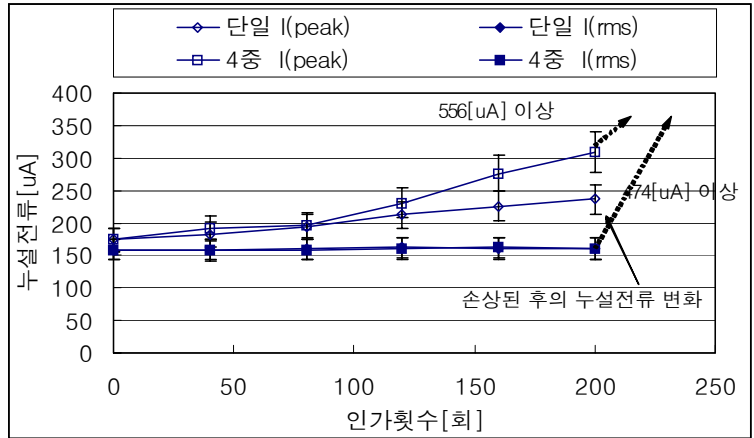
(a) A 사



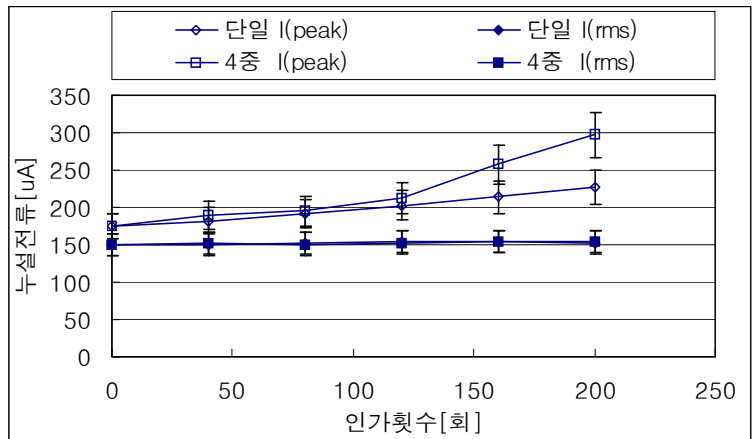
(b) B 사

그림 3.7 동작개시전압 변화

Fig. 3.7 Changes of reference voltage



(a) A 사



(b) B 사

그림 3.8 누설전류의 변화

Fig. 3.8 Change of leakage currents

전체 누설전류 실효값의 변화가 거의 관측되지 않는 것은 ZnO 소자가 ZnO 입자와 입계층이 직·병렬로 연결된 구조로써 입자의 크기와 입계층의 두께가 모두 동일한 것이 아니며, ZnO 소자에 뇌충격전류가 인가될 때, 입계층에 가해지는 전계의 세기도 다르다. 따라서 입자를 통해 흐르는 에너지량도 각기 다르기 때문에 전기적 스트레스는 소자 전체에 걸쳐 다르게 나타나며, 일부 입자 또는 입계만 변형이 일어나게 된다. 열화가 진행되는 과정에서 직·병렬로 연결된 일부 입자와 입계층만이 변형되었다면 정상운전전압에서 입계에 가해지는 전계가 어느 값 이상일 때 비선형 특성을 나타내면서 최대값, 즉 누설전류의 파고값이 관측될 것이며, 실효값은 전 정상운전전압의 1/2주기(8.33[ms])에서는 큰 변화로 나타나지 않는다. 이러한 이유로 본 실험에서는 전체 누설전류의 최대값만이 증가하고 실효값에는 현저한 변화가 관측되지 않은 것으로 생각된다.

또한 ZnO 소자에 단일 및 4중 뇌충격전류를 동일한 에너지로 인가하였지만, 4중 뇌충격전류를 인가한 경우에 누설전류의 급격한 증가가 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 입계층 쇼트키 장벽의 변형에 기인한 것으로 동일한 소자에 대해 높은 온도가 유지될 경우 열화가 가속화되며, 이로 인해 누설전류는 증가한다. 특히 4중 뇌충격전류 인가시에는 충격전류에 의해 소자 내의 ZnO 입자가 국부적으로 가열된 상태에서 수십 [ms] 이내에 계속되는 뇌충격전류의 인가로 계면에 전계가 더욱 집중되고, 이에 따라 단일 뇌충격전류의 인가시보다 더 빠르게 열화가 진행되어 누설전류도 급격히 증가하는 것으로 생각된다.<sup>[36]</sup>



### 3.3 열화진전에 따른 누설전류의 파고분포

ZnO 소자는 열화진전에 따라 누설전류가 증가하며, 특히 최대값의 증가가 현저하였다. 그러므로 이들 누설전류의 파고분포를 분석할 필요가 있으며, 누설전류와 파고분포의 변화는 피뢰기의 열화진단에 더 많은 정보를 제공할 것으로 판단한다.

그림 3.9는 ZnO 소자의 정상 운전전압에서 전체 누설전류의 파고 분포를 나타낸 것으로, x축은 파고값의 크기, y축은 파고의 개수를 나타낸 것이다. 실험에는 신품, 뇌충격전류를 200회 인가한 것과 계속적으로 뇌충격전류를 인가하여 편홀이 발생한 것의 3가지 시료에 대하여 측정하였다. 그림에 나타난 바와 같이 열화진전에 따라 파고값이 증가함은 물론 파고 분포에 현저한 변화가 있음을 알 수 있다.

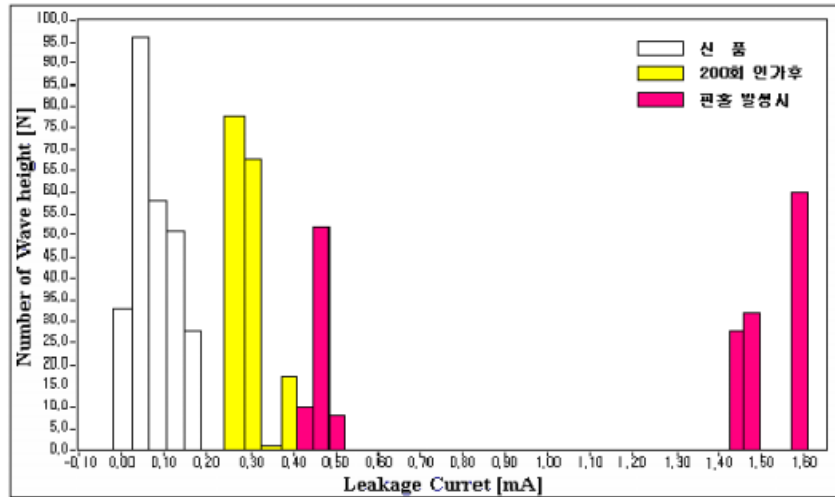


그림 3.9 전체 누설전류의 파고 분포

Fig. 3.9 Wave height distribution of the total leakage current

신품 소자의 경우, 누설전류의 최대값은 그림 3.9에서 180[ $\mu$ A] 정도로 나타났지만 파고분포에 있어서는 50[ $\mu$ A] 정도의 파고가 가장 많이 나타났으며, 뇌충격전류를 200회 인가한 소자의 경우에는 최대값이 300[ $\mu$ A] 정도이며 파고분포에 있어서는 250[ $\mu$ A]~300[ $\mu$ A]부근의 파고가 많은 것으로 나타났다.

그리고 핀홀이 발생한 소자의 경우에는 정상운전전압에서 전체 누설전류의 최대값은 1[mA]를 넘었으며, 실효값도 크게 증가하여 823[ $\mu$ A]로 나타났다. 파고분포에서도 신품과 200회 인가한 경우와는 다르게 450[ $\mu$ A], 1.50[mA] 정도에서 파고들이 분포하는 것을 볼 수 있다.

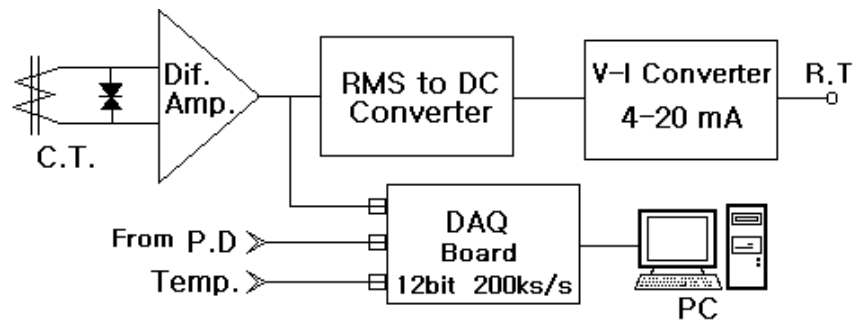
그림 3.9에 나타난 바와 같이 열화진전에 따라 파고값이 증가함은 물론 파고분포에 현저한 변화가 있음을 알 수 있다. 피뢰기 열화진단 방법으로 가장 널리 이용하는 누설전류의 크기를 비교하는 것은 실효값 또는 최대값이 증가하는 경향을 비교하는 것으로, 변동범위가 크기 때문에 정확한 진단이 어려웠다. 그러나 누설전류의 파고 분포에 의한 피뢰기 열화진단은 주기적인 측정에 의해 파고 분포의 현저한 차이를 확인할 수 있으므로 측정이 간편하고 열화진전 정도를 쉽게 판단할 수 있을 것으로 생각된다.

## 제 4 장 열화진단 전문가 시스템 및 적용 평가

### 4.1 열화진단 전문가 시스템

전력용 피뢰기 열화진단 전문가 시스템은 관통형 고감도 변류기를 사용하여 운전전압에서 피뢰기의 접지측을 전력계통에서 분리하지 않고 누설전류를 검출할 수 있도록 하였다. 또한 전력용 피뢰기의 미소한 누설전류를 증폭할 수 있도록 차동증폭기를 설계·제작하여 누설전류 신호를 증폭하였다. 정상운전전압에서 피뢰기의 누설전류 및 주위온도를 측정할 수 있도록 하여 운전전압의 변화에 따른 누설전류의 변화를 검출할 수 있도록 하였다. 입력된 신호(누설전류, 운전전압, 온도)로부터 피뢰기의 열화에 필요한 정보를 얻기 위해 PC-base 분석 프로그램으로 전체 누설전류 및 저항분 누설전류, 용량분 누설전류의 값을 검출하여 누설전류의 파고분포에 대한 데이터를 얻도록 구성하였다.

전문가 시스템에서 구성한 대역통과필터는 고역통과필터와 저역통과필터를 직렬로 연결하여 구성하였으며, 두 개의 필터는 Butterworth형의 필터로 차수는 각각 15로 설정하였다. 전체 누설전류에서 제 3조파인 180[Hz]의 신호를 검출하기 위한 필터의 저역 차단주파수는 175[Hz], 고역 차단주파수는 185[Hz]로 설정하였다. Butterworth형의 필터는 차단영역과 통과영역에서 리플(ripple)이 없고, 차수가 높을수록 신호의 차단영역과 통과영역 사이의 출력이 변화하는 부분의 폭이 좁아지는 특성을 가지고 있다. 본 논문에서 설계한 전력용 피뢰기 열화진단 전문가 시스템은 그림 4.1과 같이 고감도 변류기, 차동증폭기(가변이득 60[dB]), 신호변환회로, 입·출력장치(DAQ Board : 12bit, 200[ks/s], 8ch), 및 PC-base 분석 프로그램으로 구성되어 있다.



(a) 시스템의 구성도



(b) 누설전류 검출장치

그림 4.1 전문가 시스템의 구성

Fig. 4.1 Configuration of the expert system

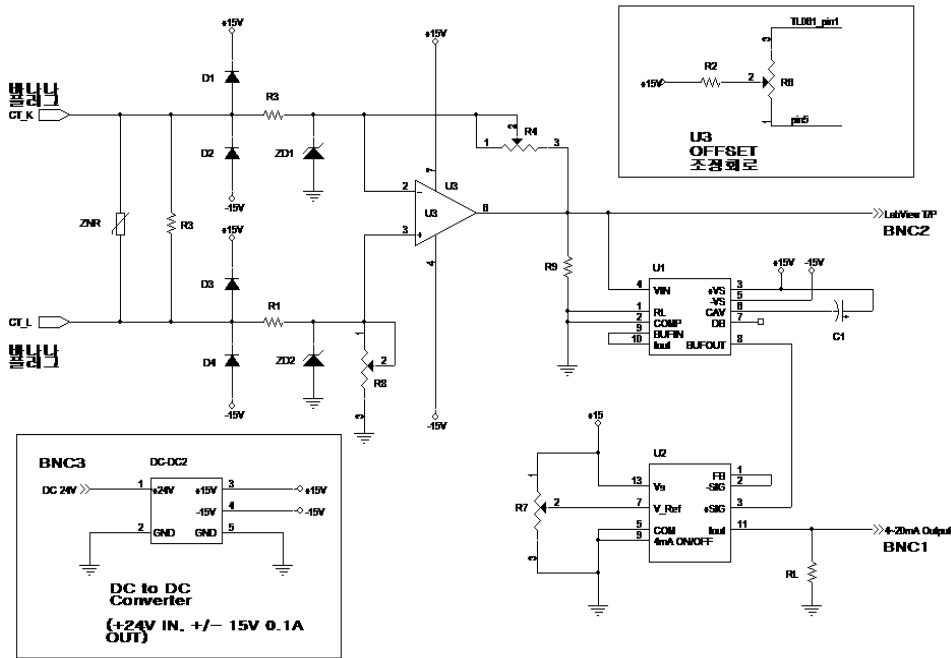


그림 4.2 누설전류 검출회로

Fig. 4.2 Detection circuit of leakage current

정상운전전압에서 피뢰기 또는 소자를 통해 흐르는 전체 누설전류는 100[ $\mu$ A]~수[mA] 정도로 관통형 변류기를 이용하여 검출하였다. 피뢰기가 설치된 주변의 높은 전기장 및 외부 잡음에 의한 측정의 정확도와 안정성을 향상시키기 위하여 관통형 변류기는 정전 차폐하였으며, 관통형 변류기로부터 검출된 신호의 증폭은 차동증폭회로(가변이득 60[dB])로 설계하였으며, 누설전류 검출장치의 응답감도는 1[V]/1[mA]로 교정하였다. 또한 본 누설전류 검출장치는 누설전류의 기본파 및 3고조파의 정확한 측정이 요구되므로 주파수 응답특성을 평가하였다. 관통형 변류기에 인가되는 전류의 주파수를 5[Hz]에서 4[kHz]까지 변경시키면서 누설전류 측정

장치의 출력전압을 측정하여 그림 4.3에 나타내었다. 실험 결과로부터 본 측정장치의 주파수 대역(-3dB)은 7[Hz]~2.8[kHz]로 누설전류의 기본파 성분인 60[Hz]는 물론 제 3 고조파 성분과 제 5고조파 성분을 전혀 감쇠 없이 검출이 가능한 특성이다.

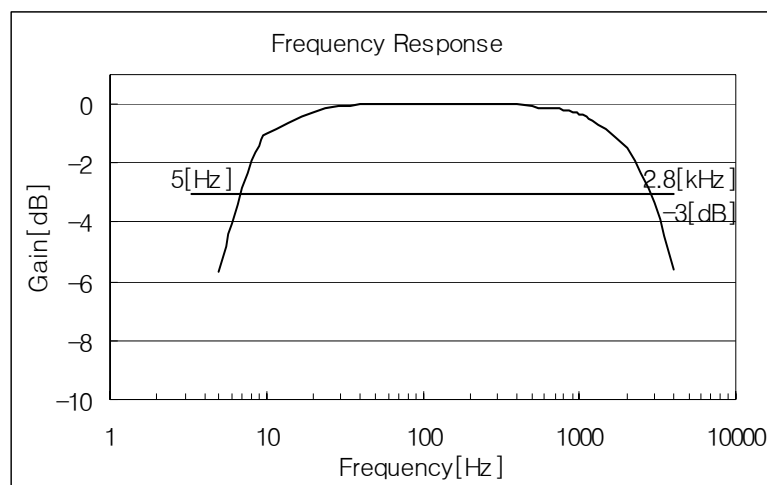


그림 4.3 누설전류 검출장치의 주파수 응답 특성

Fig. 4.3 Frequency response characteristics of leakage current detecting unit

검출된 누설전류는 A/D 변환기에 입력되어 데이터 취득장치를 통해 개인용 컴퓨터로 전달된다. 데이터 취득장치는 피뢰기에 인가되는 전압과 누설전류 및 주위 온도를 동시에 측정할 수 있으며, 이들의 정보는 본 연구의 실험과정에서 필요한 정보를 획득할 수 있도록 그림 4.4와 같이 처리된다.

파고분포 분석용 프로그램의 알고리즘은 그림 4.5에 나타내고 있으며, 누설전류 측정용 프로그램의 알고리즘은 그림 4.6에 나타내고 있다.

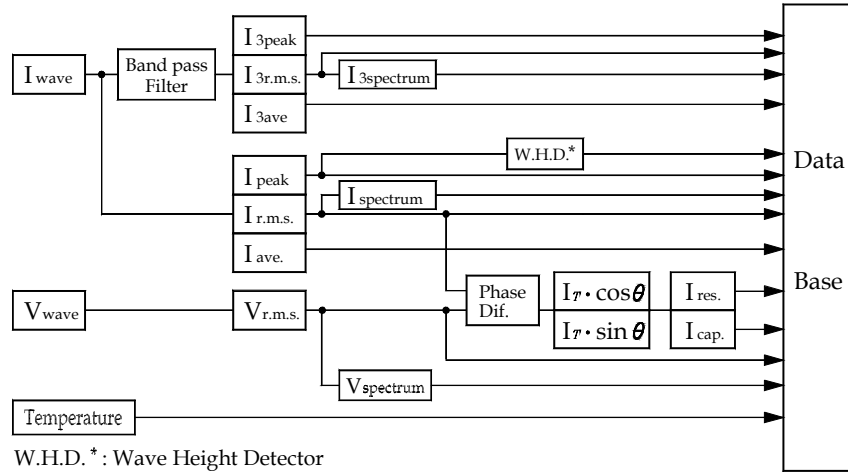


그림 4.4 신호처리 계통도

Fig. 4.4 Signal processing diagram

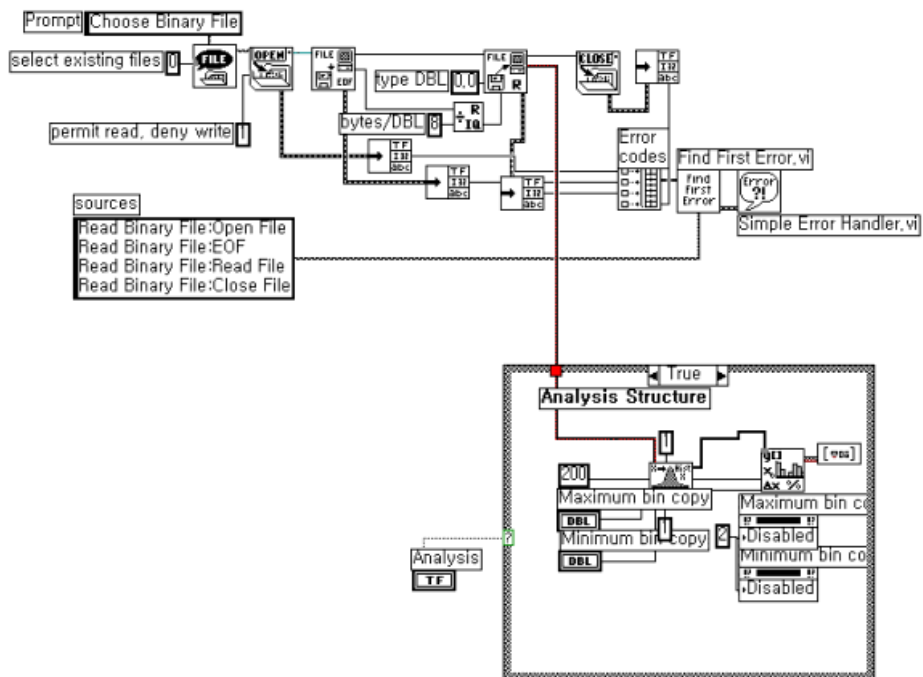


그림 4.5 파고분포 분석 알고리즘

Fig. 4.5 Wave height distribution analysis algorithm

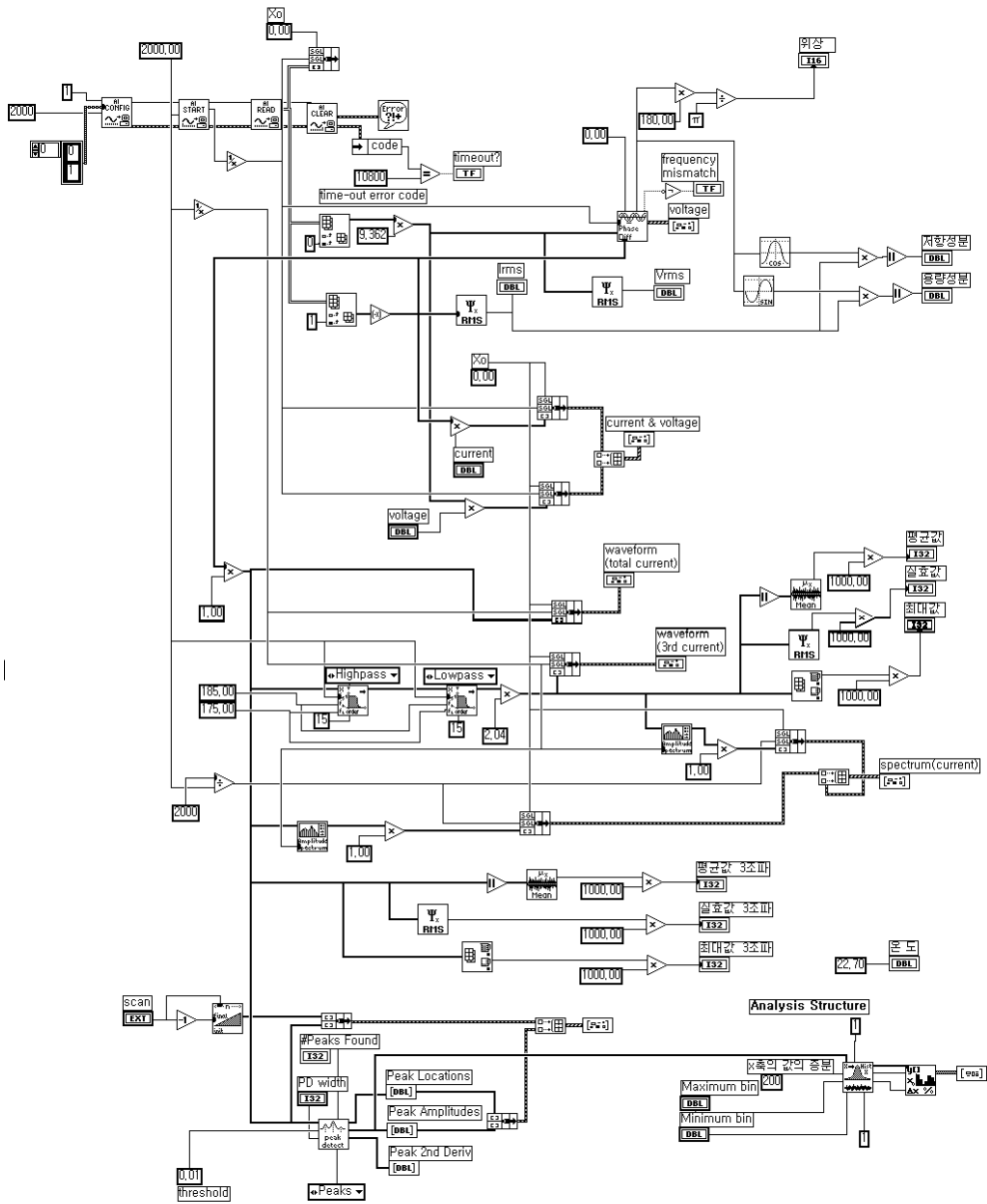


그림 4.6 누설전류 측정 알고리즘

Fig. 4.6 Leakage current measurement algorithm



열화진단 전문가 시스템은 각종의 알고리즘(고역통과필터, 저역통과필터, 주파수 스펙트럼 분석, 파고선별기)을 적용하여, 검출된 신호(누설전류, 운전전압, 주위온도)로부터 피뢰기 열화진단에 필요한 정보를 얻을 수 있도록 구성하였고, 세부사항은 다음과 같다.

- ①전체 누설전류 및 제 3조파 누설전류의 주파수 스펙트럼, 실효값, 최대값, 평균값
- ②전원전압의 주파수 스펙트럼과 실효값
- ③전원전압과 전체 누설전류의 위상차
- ④전체 누설전류의 파고분포
- ⑤주위온도

전문가 시스템에 사용된 입·출력장치(DAQ Board)는 200[ks/s]의 샘플링 속도를 가지고 입력으로 하나의 채널을 사용할 때 적용되며, 본 시스템은 입력으로 3개의 채널을 사용한다. 1개의 채널을 사용하면 5[ $\mu$ s]마다 데이터를 가져올 수 있지만, 3개의 채널을 사용하면 16.7[ $\mu$ s]마다 데이터를 가져온다. 이 속도는 전력선에서 발생하는 뇌충격전류를 측정하기는 어렵지만, 누설전류의 변화를 측정하기에는 문제가 없을 것으로 생각된다. 그리고 12bit의 해상도를 가지고 있으며, 입력으로는  $\pm 0.05[V] \sim \pm 10[V]$ 까지 측정할 수 있다. 전압은 분압기를 이용하여 배전선로의 정상 운전전압인 13.2[kV]를 측정하고, 누설전류는 변류기를 사용하여 측정하였다.

열화진단 전문가 시스템을 적용한 화면 구성은 온라인 상에서 실시간으로 누설전류와 전압 및 온도의 변화값을 나타낼 수 있도록 구성되어 있으며, 전압과 누설전류의 비율(0~10)을 조절하여 파형의 크기를 나타낼

수 있다. 그리고 전압파형에 대한 누설전류파형의 위상차를 나타내고, 이를 이용하여 전체 누설전류에서 저항분 누설전류와 용량분 누설전류를 분리하여 나타낼 수 있다. 화면의 오른쪽에는 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류에 대한 파형과 주파수 스펙트럼을 측정하여 나타내도록 구성하였다.

파고선별기는 전체 누설전류의 파형으로부터 파고값을 측정·검출하도록 연결되어 있으며, 파형에서 신호가 증가한 후 감소하는 부분을 파고로 인지·검출하여 파고들의 값을 60[sec] 동안 저장할 수 있도록 구성하고, 파고의 크기는 5[ $\mu$ A] 마다 구분할 수 있게 설계하였다.

## 4.2 적용 실험

### 4.2.1 정상운전전압에서의 누설전류 검출

그림 4.7은 6[kV], 5[kA] 정격의 ZnO 소자에 본 시스템을 적용하여 측정된 결과를 나타낸 것으로 온라인 상에서 실시간으로 ZnO 소자에 흐르는 누설전류와 전압 및 온도를 측정하였다. 그림 4.7에서 11.1[ $\mu$ A]의 저항분 누설전류와 154.7[ $\mu$ A]의 용량분 누설전류를 나타내고 있다. 이 저항분 누설전류의 값은 전체 누설전류 크기에 비해 미소한 값으로 나타나는 것을 알 수 있으므로 전체 누설전류의 대부분은 용량분 누설전류의 값을 확인할 수 있다. 화면의 오른쪽에 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류에 대한 파형과 주파수 스펙트럼을 측정하여 나타내었다.

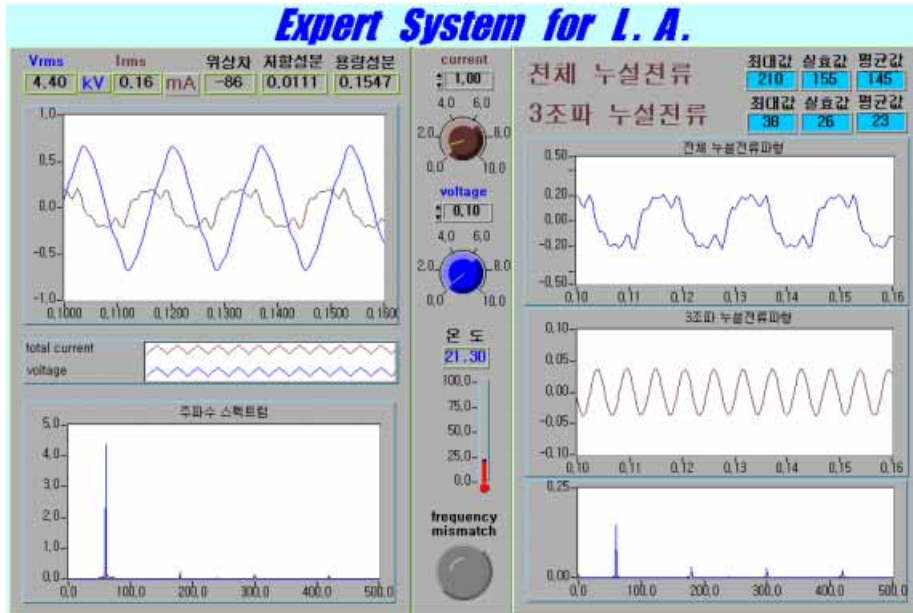


그림 4.7 출력 화면의 예 (신품 소자 적용)

Fig. 4.7 Example of an output display (New block)

그림 4.8은 편홀이 발생한 ZnO 소자(6[kV], 5[kA])에 본 시스템을 적용하여 측정된 결과를 나타낸 것이다. 4.31[kV]의 운전전압에서 484.6[ $\mu$ A]의 저항분 누설전류와 162.5[ $\mu$ A]의 용량분 누설전류를 나타내고 있다. 따라서 열화가 진행된 소자에 저항분 누설전류의 값이 용량분 누설전류에 비해 현저히 증가한 것을 알 수 있다.

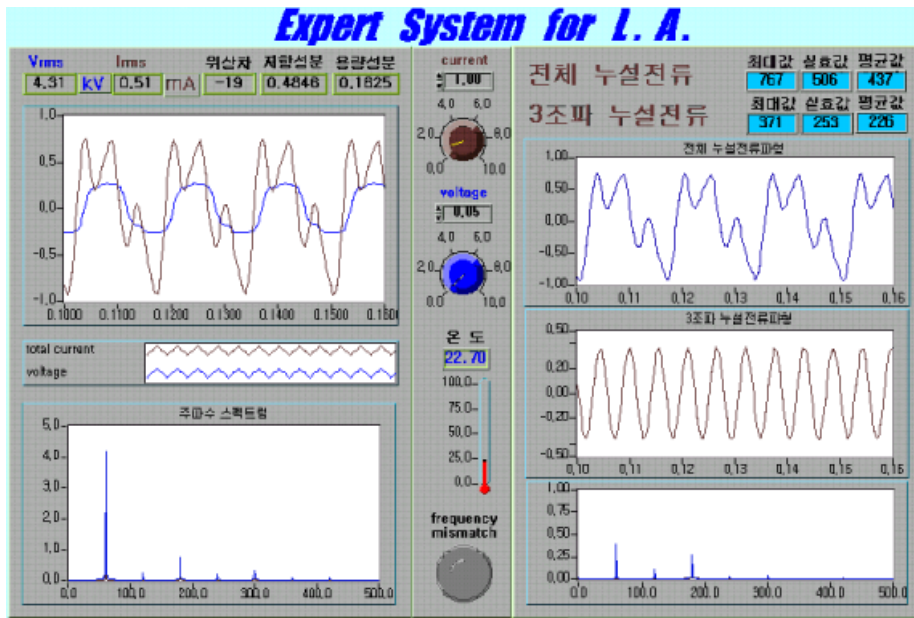


그림 4.8 출력 화면의 예 (손상된 소자 적용)

Fig. 4.8 Example of an output display (Damaged block)

그림 4.9는 18[kV], 5[kA] 정격의 전력용 피뢰기에 본 시스템을 적용하여 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 19.5[ $\mu$ A]의 저항분 누설전류와 225.7[ $\mu$ A]의 용량분 누설전류를 나타내고 있다. 저항분 누설전류의 값은 전체 누설전류 크기의 8.6[%]에 해당하는 값으로, 전체 여러 연구 데이터에 의한 보고자료와 같이 전체 누설전류의 대부분은 용량분 누설전류의 값을 알 수 있다. 화면의 오른쪽에 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류에 대한 파형과 주파수 스펙트럼을 측정하여 나타내었다.

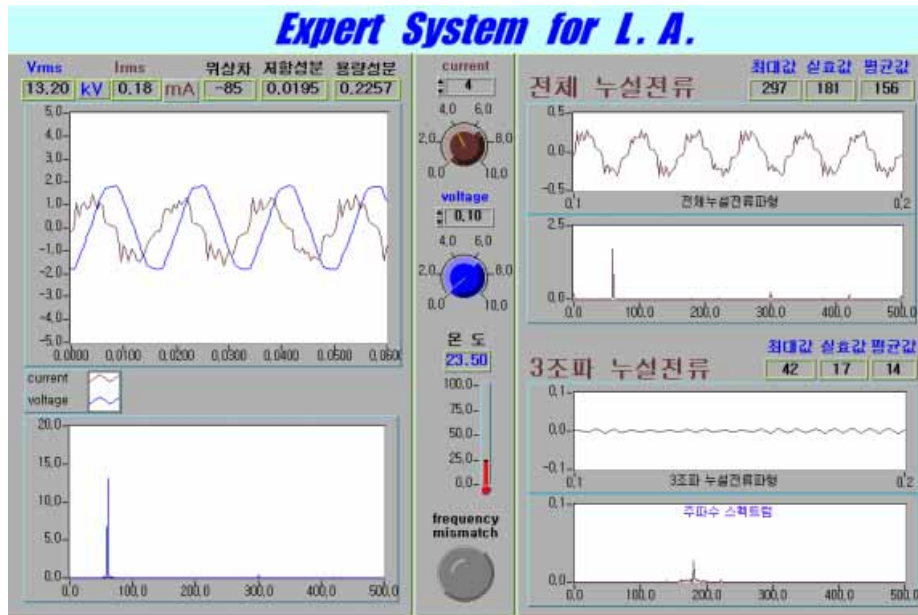


그림 4.9 출력 화면의 예 (피뢰기 적용)

Fig. 4.9 Example of an output display (LA)

#### 4.2.2 온도 변화에 따른 누설전류 측정

ZnO 소자는 배전선로에 운전전압이 가해진 상태에서도 계절에 따라 온도가 변화하고, 특히 피뢰기의 보호동작횟수가 증가하게 되면 소자가 가열되어 온도가 상승하게 되므로 온도변화에 대한 누설전류특성을 조사하였다. ZnO 소자를 가열장치 내에 설치하고 4.4[kV]의 운전전압을 인가한 후 20[°C]에서 100[°C]까지 가열하여 설정온도에서 30분간 유지한 후 누설전류를 측정하여 결과를 그림 4.10에 나타내었다. 온도 증가에 따라 전체 누설전류의 최대값과 실효값이 증가하는 것을 알 수 있었다.

그림 4.11은 주위 온도 상승에 의한 누설전류의 파고분포를 나타낸 것으로 온도가 상승함에 따라 파고값이 증가하고 파고분포의 변화가 있음을 알 수 있었다.

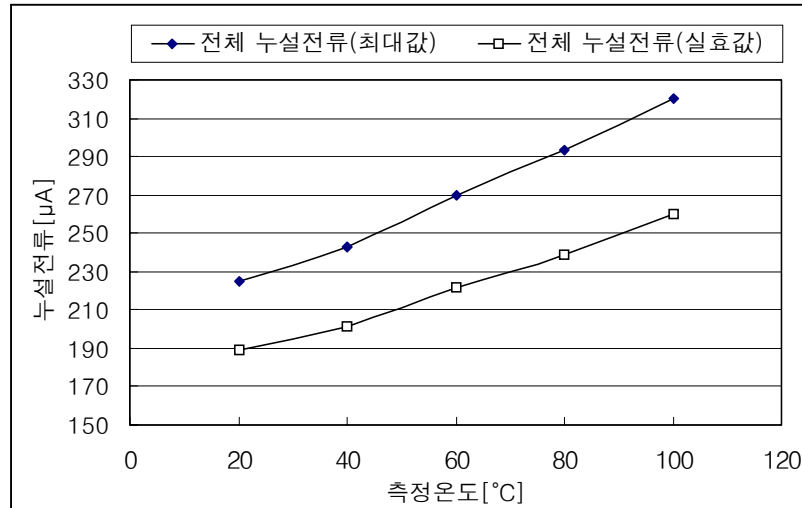


그림 4.10 온도에 의한 누설전류 변화

Fig. 4.10 Change of leakage current to ambient temperature

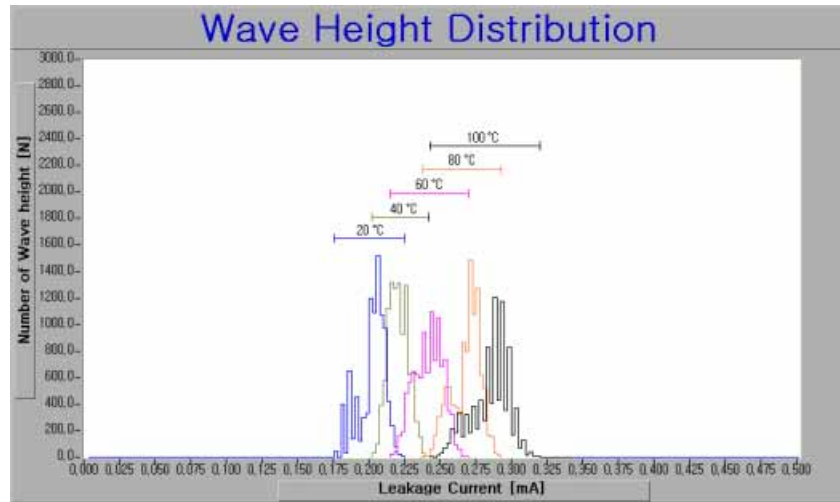


그림 4.11 온도에 의한 전체 누설전류의 파고분포

Fig. 4.11 Wave height distribution of the total leakage current to ambient temperature

#### 4.2.3 전체 누설전류의 파고분포 분석

그림 4.12는 ZnO 피뢰기 소자(6[kV], 5[kA])의 정상운전전압에서 전체 누설전류의 파고분포를 나타낸 것으로 x축은 파고값의 크기, y축은 파고의 개수를 나타낸 것이다. 실험에는 신품 소자와 계속적으로 뇌충격전류를 인가하여 핀홀(pin-hole)이 발생한 것의 2가지 시료를 대상으로 정상운전전압에서 전체 누설전류의 파고값을 1분 동안 측정된 것을 나타낸 것이다. 그림 4.12에 나타난 바와 같이 열화진전에 따라 파고값이 증가함은 물론 파고분포에 현저한 변화가 있음을 알 수 있다. 신품의 경우에는 약간의 차이는 있지만 파고의 중심은 225[ $\mu$ A] 정도였으며, 200[ $\mu$ A]에서 250[ $\mu$ A]까지의 파고들이 분포하였다. 핀홀이 발생한 소자의 경우 파고의 중심은 750[ $\mu$ A]정도이고, 680[ $\mu$ A]에서 800[ $\mu$ A]까지의 파고들이 넓게 분포하였다. 또한, 50[ $\mu$ A]에서 80[ $\mu$ A]까지의 부분에서도 파고들이 나타나는데, 이것은 핀홀이 발생한 소자의 일부 입자 또는 입계만 변형이 발생하였기 때문에 변형이 발생하지 않은 균일한 부분의 파고가 나타난 것으로 생각된다.

그림 4.13은 3가지 종류의 배전용 피뢰기(18[kV], 5[kA])를 대상으로 정상운전전압에서 전체 누설전류의 파고값을 1분 동안 측정된 것을 나타낸 것이다. A사 및 B사는 피뢰기 신품을 C사는 배전선로에서 1년 6개월 정도 사용한 피뢰기를 대상으로 측정된 것이다. C사의 제품은 A, B사와는 많은 차이를 가지고 있으며, 파고의 중심은 400[ $\mu$ A]이고, 450[ $\mu$ A] 주위의 파고들이 많고 200[ $\mu$ A]에서 600[ $\mu$ A]까지의 파고들이 넓게 분포하고 있다. ZnO 소자에서도 확인한 것처럼 열화진전에 따라 파고값이 증가함은 물론 파고분포에 현저한 변화가 있음을 알 수 있다.



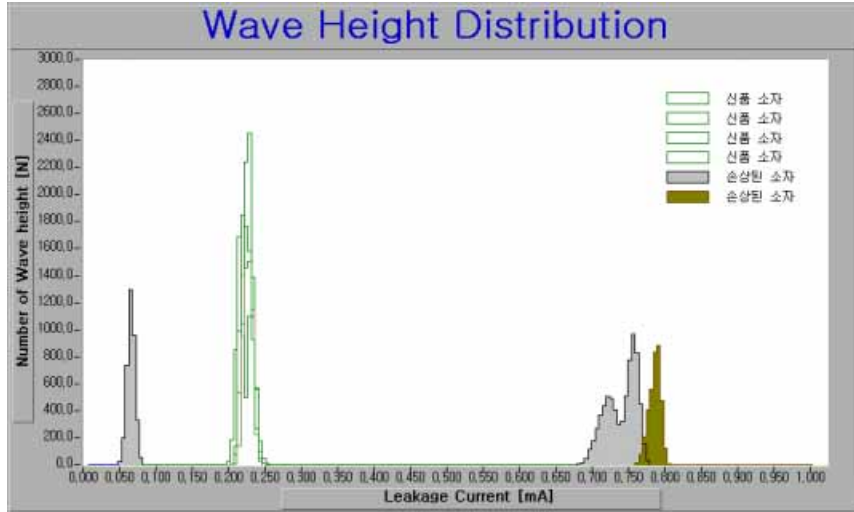


그림 4.12 전체 누설전류의 파고분포 (ZnO 소자)

Fig. 4.12 Wave height distribution of the total leakage current (ZnO blocks)

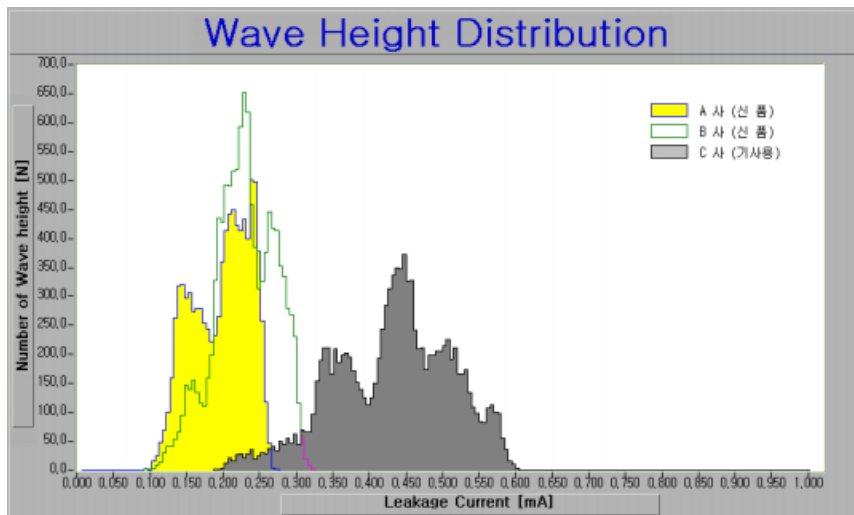


그림 4.13 전체 누설전류의 파고분포 (ZnO 피뢰기)

Fig. 4.13 Wave height distribution of the total leakage current (ZnO lightning arresters)

#### 4.2.4 170[kV]급 변전용 GIS 피뢰설비에 대한 적용 실험

피뢰기 열화진단 전문가 시스템에 대한 적용성 평가를 위해 그림 4.14에 나타내고 있는 바와 같이 170[kV]급 변전용 GIS 피뢰설비에 대하여 적용 실험을 수행하였다.



그림 4.14 GIS용 피뢰기 (170[kV] 급)

Fig. 4.14 Lightning arrester for GIS (170[kV] class)

그림 4.15는 GIS용 170[kV]급 피뢰기에 본 시스템을 적용하여 운전전압의 40[%]인 57[kV]을 인가한 후 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 저항분 누설전류의 값은 전체 누설전류 크기에 비해 미소한 값으로 나타났다. 인가전압을 상승시킴에 따라 전체 누설전류가 급격히 증가하고, 특히 저항분 누설전류의 변화가 현저하게 나타났다. 실험 대상인 피뢰기는 실험 특성상 운전전압의 40[%]에서 누설전류를 측정하였으며, 인가전압을 상승시킴에 따라 누설전류의 증가가 나타났다.

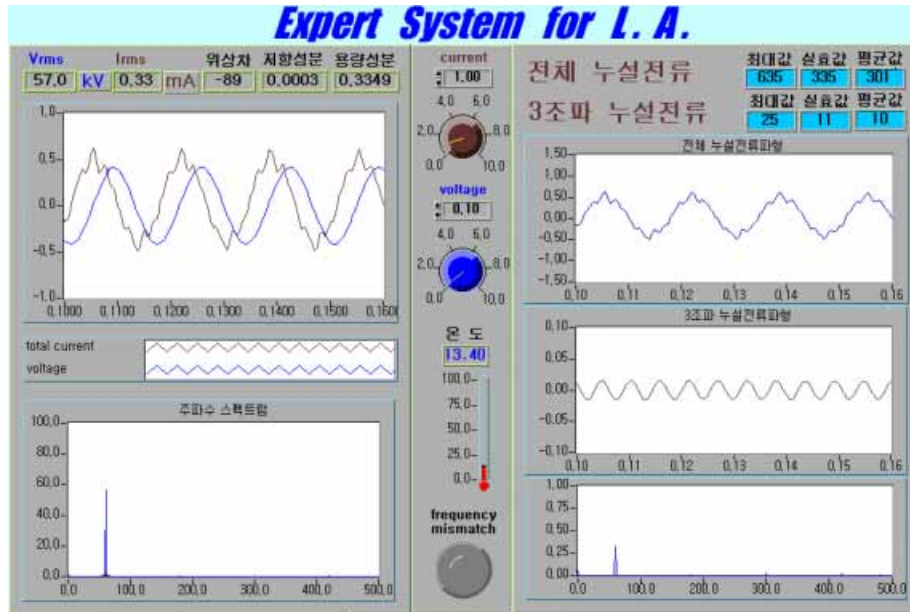


그림 4.15 출력 화면의 예(GIS용 피뢰기)

Fig. 4.15 Example of an output display(lightning arrester for GIS)

그림 4.16은 170[kV]급 GIS용 피뢰기에 인가전압을 변화시키면서 1분 동안 측정한 전체 누설전류의 파고분포를 나타낸 것이다. 그림에 나타나 있는 것과 같이 운전전압을 40[%], 60[%], 80[%], 100[%]까지 상승시키면서 누설전류의 파고분포를 분석한 것으로 인가전압에 따라 파고값이 증가함은 물론 파고분포의 현저한 변화가 있음을 알 수 있다.

운전전압의 40[%]에서 파고의 최대값은 430[ $\mu$ A]에서 나타났으며, 580[ $\mu$ A]에서도 높은 파고값이 나타났다. 파고분포는 360[ $\mu$ A]에서 640[ $\mu$ A]까지 파고들이 분포하였다. 운전전압의 60[%]에서는 600[ $\mu$ A]와 780[ $\mu$ A]에서 파고의 최대값이 나타났으며, 200[ $\mu$ A]에서 860[ $\mu$ A]까지 파고들이 분포하였다. 운전전압의 80[%]에서 파고의 최대값은 790[ $\mu$ A]에서 나타나고, 630[ $\mu$ A], 1,050[ $\mu$ A]에서도 높은 파고값이 나타났다. 파고분포는 560[ $\mu$ A]에서

1,110[ $\mu$ A]까지 넓게 파고들이 넓게 분포하였다. 운전전압의 100[%]에서는 파고의 최대값이 1,220[ $\mu$ A]에서 나타났으며, 730[ $\mu$ A], 1,460[ $\mu$ A]에서도 높은 파고값이 나타났다. 파고분포는 730[ $\mu$ A]에서 1,460[ $\mu$ A]까지 파고들이 넓게 분포하였다. ZnO 소자에서 확인한 것처럼 운전전압을 인가함에 따라 누설전류의 파고값이 증가함은 물론 파고분포에 현저한 변화가 있음을 알 수 있다.

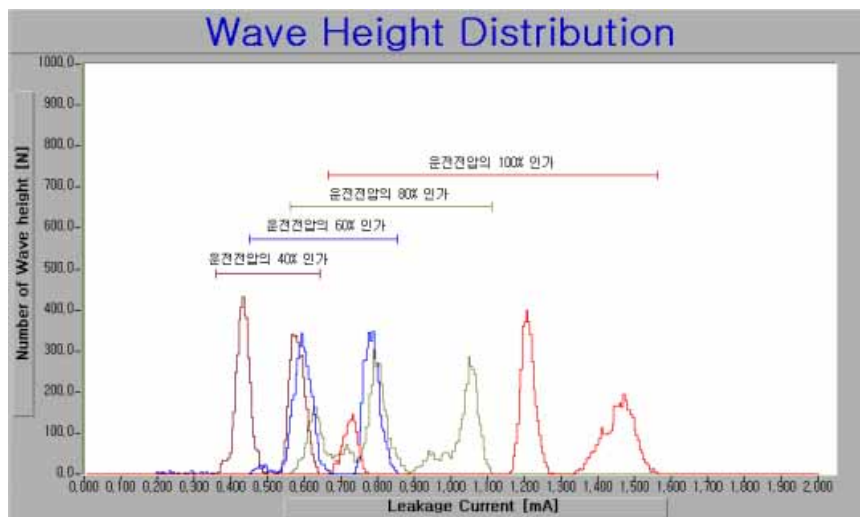


그림 4.16 전체 누설전류의 파고분포 (GIS용 피뢰기)

Fig. 4.16 Wave height distribution of the total leakage current (lightning arresters for GIS)

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 전력계통에서 과도전압 보호장치로 사용되는 ZnO 피뢰기의 열화진단 전문가 시스템 개발을 목적으로, 뇌충격전류에 의한 가속 열화 실험을 수행하고 ZnO 소자의 열화진전기구를 파악하였다. 실험결과로부터 누설전류의 파고분포가 열화판단에 중요한 파라미터임을 확인하고 이를 이용한 새로운 방식의 열화진단 전문가 시스템을 제안하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 열화진단에 필요한 전기적 정보를 도출하기 위하여 뇌충격전류에 의한 가속열화실험을 수행하고, 열화판단에 누설전류의 실효값, 최대값 및 파고분포가 중요한 파라미터임을 이론적 실험적으로 확인할 수 있었다.
2. ZnO 소자는 열화진전에 따라 누설전류의 실효값과 최대값이 증가하며, 특히 최대값의 증가가 현저하게 나타났다. 이들 누설전류의 파고를 분석함으로써 미소한 열화진전 상태도 분석하는 것이 가능하였다.
3. 실험결과로부터 새로운 방식의 피뢰기 열화진단 시스템을 개발하였으며, 본 시스템은 고감도 변류기, 60[dB] 이득의 증폭회로 및 12bit 200[ks/s]의 데이터 취득장치로 구성되며, 이들의 제어와 분석은 LabView 프로그램을 사용하여 개인용 컴퓨터에서 운용되도록 설계하였다.

4. 제안한 시스템은 전체누설전류의 실효값, 평균값, 최대값 및 이들의 파고분포, 인가전압과 전류의 위상차를 측정할 수 있으며, 전압 전류의 위상차로부터 저항분 누설전류의 분석도 가능하다.
  
5. 본 연구에서는 제안한 열화진단 전문가 시스템을 시제작하고 피뢰기 소자, 배전용 피뢰기 및 170[kV]급 변전용 GIS 피뢰설비에서 적용성을 평가하였으며, 현재는 72[kV]급 GIS 피뢰설비에 상용화되어 운전 중에 있다.

## [참고문헌]

- [1] P. Chowdhuri, *Electromagnetic Transients in Power Systems*, Research Studies Press, pp. 266~296, 1987.
- [2] 橋本信雄, “雷とサージ 発生のおくみから被害防止まで”, 電氣書院, pp. 79~114, 1995.
- [3] James J. Burke, “Application of mov gapped arrester on non effectively grounded distribution systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 2, pp.794~800, 1991.
- [4] 金方直弘, 齊藤宗敬, 大木秀人, 中井仁志, “避雷器の漏れ電流検出の開発”, 日本電氣学会電力・エネルギー部門大会, pp. 848~849, 1994.
- [5] 岡藤伸夫, 西岡陸一, 前川 洋, 祐木昭彦, “酸化亜鉛形避雷器の漏れ電流検出方式の提案”, 日本電氣学会電力・エネルギー部門大会, pp. 850~851, 1994.
- [6] A. Haddad et al, “An Improved non-inductive impulse voltage measurement technique for ZnO surge arresters”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, pp. 778~785, 1995.
- [7] S. S. Kershaw, G. L. Gaibrois, K. B. Stump, “Applying metal-oxide surge arresters on distribution systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, pp. 301~307, 1989.
- [8] W. G. Carlson, T. K. Gupta, A. Sweetana, “A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters for AC Application”, *IEEE Transactions on Power System*, Vol. PWRD-1, No. 2, pp. 67~74, 1986.

- [9] W. G. Carlson, T. K. Gupta, A. Sweetana, "A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters for AC Application", IEEE Transactions on Power System, Vol. PWRD-1, No. 2, pp. 67~74, 1986.
- [10] M. Bartkowiak et al., "Failure Modes and Energy Absorption Capability of ZnO Varistors", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp. 152~162, 1999.
- [11] O. Nigol, "Methods for Analyzing the Performance of Gapless Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1256~1262, 1992.
- [12] Jinbo Kuang et al., "Temperature Distribution in a ZnO Arrester Subjected to Multiple Current Impulses", Proceeding of the 1996 International Symp. on Electrical Insulation, pp. 494~497, 1996. 7
- [13] 한국공업표준협회, "산화아연형 갭리스 피뢰기", KSC 4609, 1987.
- [14] 한국전력공사, "전력용 피뢰기", ES 131-261, 1984.
- [15] The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., "IEEE Std. for Metal-Oxide Surge Arresters for AC power Circuits", ANSI/IEEE C62.11, 1987.
- [16] Lionel M. Levinson, Herbert R. Philip, "ZnO Varistors for Transient Protection", IEEE Transaction on Parts, Hybride and Packaging, vol. PHP-13, No.4. December 1977.
- [17] 中島昌俊, 向江和郎, 堤睦男, 金子英男, "新形GIS用避雷器の開発", 日本電気学会 論文誌, B116卷, 10号, pp. 1240~1245, 1996.
- [18] Kazuo Mukae, et al., "Zinc Oxide-Praseodymium Oxide Elements For Surge Arresters", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, April 1988.
- [19] S. S. Kershaw, G. L. Gaibrois, K. B. Stump, "Applying



- metal-oxide surge arresters on distribution systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 301~307, 1989.
- [20] Yoshihisa Yamashita, Sinzo Yoshikado, “Evaluation of factors in the degradation of ZnO varistor”, T. IEE Japan, Vol.119-B, No.6, 1999.
- [21] 石辺信治, “酸化亜鉛形避雷器の劣化診断テクニック”, 電気計算, pp56-60, 1987
- [22] 小島宗次, 菅雅弘, 舛沢弘一, “酸化亜鉛避雷器の依存モデル”, 日本電気学会 論文誌, B114巻, 3号, pp. 310~316, 1994.
- [23] Philip p. Barker et al, “Characteristics of Lightning Surge Measured at Metal Oxide Distribution Arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 301~310, 1993.
- [24] 馬場則男 外, “酸化亜鉛素子の雷インパルス電流印加による特性変化の検討”, 日本電気学会 放電・高電圧 合同 研究会資料, ED-95-186, HV-95-57, 1995.
- [25] 大坪昌久 外, “配電用直列ギャップ付避雷器の繰返し動作による特性変化”, 日本電気学会 論文誌, B113巻, 4号, pp. 390~396, 1993.
- [26] 石崎義弘 外, “避雷器の外部診断技術”, 電気設備の予測保全, pp. 45~50, 1987.
- [27] 宇治田克 外, “酸化亜鉛形避雷器用漏れ電流検出器”, 三菱電機技報 Vol.55, No.3, 1981.
- [28] 길경석 외, “다중 뇌충격전류에 의한 피뢰기 소자의 전기적 특성 변화”, 대한전기학회 하계종합학술대회 논문집, C권, pp. 2035~2037, 2000. 7.
- [29] 길경석 외, “피뢰기 누설전류 분석장치의 설계 및 제작”, 대한전기학회 방전 및 고전압 연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 65~68, 1999.

- [30] 宅間, 柳父, 高電圧大電流工学, 日本電気学会, pp. 121~125, 1988.
- [31] 原雅則, 秋山秀典, 高電圧パルスパワー工学, 森北出版株式会社, pp. 139~163, 1991.
- [32] 岩崎晴光, 岡田昌治, 村井由宏, 川島化之, “避雷器のインパルス電流試験回路の解析”, 日本電気学会 論文誌, B102巻, 3号, pp. 169~176, 1982.
- [33] M. Darveniza, D. R. Mercer, “Laboratory studies of the multi lightning currents on distribution surge arresters”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, NO. 3, July 1993.
- [34] R. A. Sargent et al. “Effects of Multiple Impulse Currents on the Microstructure and Electrical Properties of Metal-oxide Varistors”, IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 3, June 1992.
- [35] 길경석, 한주섭, 박영호, “뇌충격 전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성변화”, 대한전기학회 논문지, Vol.48, No.7, pp. 550-555, 1999.7
- [36] S. Tominaga, Y. Shibuya et al., “Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1548~1556, 1980.
- [37] 酸化亜鉛形避雷器の特性評価試験法調査専門委員会, 酸化亜鉛形避雷器の特性と価試験法, 電気学会, 第474号, pp10~14, 1993
- [38] Gyung-Suk Kil, et al., “Electrical Characteristic Changes of ZnO Blocks by a Lightning Impulse Current and an Expert System to Diagnose Deterioration of Lightning Arresters”, Proceedings of ICEE 2001, Vol.2, pp. 1281-1284, 2001. 7.