

工學博士 學位論文

가스절연변전소 피뢰설비의 열화진단  
기술 및 전문가시스템 개발

Development of Deterioration Diagnostic Techniques and an Expert System  
for Lightning Arrester Facilities in Gas Insulated Substations

指導教授 吉 暲 碩

2008年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

趙 泳 晉

## 목 차

목 차 .....	i
그림 및 표 목차 .....	iii
<i>Abstract</i> .....	vi
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구배경 및 필요성 .....	1
1.2 연구목적 및 내용 .....	3
제 2 장 이 론 .....	5
2.1 전기적 특성 .....	5
2.2 열화진전기구 해석 .....	12
2.3 열화진단기술 .....	15
2.3.1 전체 누설전류 측정 .....	18
2.3.2 제 3고조파 누설전류 측정 .....	19
2.3.3 저항분 누설전류 측정 .....	21

제 3 장 실험 및 분석 .....	26
3.1 누설전류와 온도 .....	26
3.1.1 계절적 온도변화에 따른 누설전류의 변화 .....	27
3.1.2 누설전류와 표면온도의 상관관계 .....	28
3.2 누설전류와 전원전압 .....	34
3.3 전원고조파의 영향 .....	37
3.4 저항분 누설전류 검출 알고리즘 .....	48
제 4 장 전문가 시스템의 설계 및 제작 .....	52
4.1 데이터 취득 모듈 .....	53
4.1.1 전체 누설전류 검출 .....	54
4.1.2 고조파 분석 .....	60
4.1.3 저항분 누설전류 검출 .....	63
4.1.4 누설전류 보정 알고리즘 .....	65
4.1.5 서지 카운터 .....	66
4.1.6 데이터 전송 .....	76
4.2 진단 모듈 .....	81
4.2.1 설계 및 구현 .....	89
4.2.2 평가 및 분석 .....	106
제 5 장 결 론 .....	113
참 고 문 헌 .....	115

## 그림 및 표 목차

### <그림 목차>

그림 2.1 ZnO 피뢰기의 구조 .....	5
그림 2.2 전류밀도-전계강도 .....	6
그림 2.3 ZnO 소자의 미세구조 .....	9
그림 2.4 ZnO 소자의 전기적 등가회로 .....	10
그림 2.5 누설전류 파형 예 .....	11
그림 2.6 피뢰기의 열화요인과 열화현상 .....	15
그림 2.7 인가전압과 누설전류와의 벡터 선도 .....	16
그림 2.8 전체 누설전류 측정회로 .....	18
그림 2.9 전체 누설전류 파형의 예 .....	19
그림 2.10 제 3고조파 누설전류 측정회로 .....	20
그림 2.11 제 3고조파 누설전류 파형의 예 .....	20
그림 2.12 자기소거법의 구성 .....	22
그림 2.13 자기소거법에 의한 저항분 누설전류 검출 예 .....	22
그림 2.14 동기정류법의 구성 .....	23
그림 2.15 동기정류법의 전압과 전류 파형 .....	24
그림 3.1 주위온도와 누설전류 .....	28
그림 3.2 누설전류와 표면온도 .....	29
그림 3.3 누설전류의 상대크기와 온도차 .....	30
그림 3.4 온도차와 상대누설전류 .....	30
그림 3.5 온도차를 이용한 누설전류 크기 추정 .....	32
그림 3.6 기사용 피뢰기의 누설전류와 표면온도의 관계 .....	33
그림 3.7 실험장치의 구성 .....	35
그림 3.8 전원전압에 따른 누설전류의 변화 .....	36
그림 3.9 인가전압과 누설전류 파형 .....	39

그림 3.10	제 3고조파 전압의 크기와 위상에 따른 파형의 예 .....	41
그림 3.11	제 3고조파 전압의 크기에 따른 누설전류의 변화 .....	42
그림 3.12	제 3고조파 전압의 위상에 따른 누설전류의 변화 .....	43
그림 3.13	누설전류의 보정계수 .....	47
그림 3.14	인가전압과 누설전류의 파형 .....	49
그림 4.1	전문가 시스템의 구성 .....	53
그림 4.2	누설전류 검출회로 .....	54
그림 4.3	영상변류기의 입출력 특성(서지 인가 전) .....	55
그림 4.4	영상변류기의 입출력 특성(서지 인가 후) .....	56
그림 4.5	누설전류 검출회로의 특성 .....	57
그림 4.6	누설전류에 대한 응답파형 예 .....	59
그림 4.7	누설전류 검출파형 .....	60
그림 4.8	고속 A/D 변환 회로 .....	61
그림 4.9	연속시간 신호에 대한 DFT 해석 과정 .....	62
그림 4.10	저항분 누설전류 검출회로의 구성 .....	64
그림 4.11	저항분 누설전류 검출파형의 예 .....	64
그림 4.12	누설전류 보정 알고리즘 .....	66
그림 4.13	서지 카운터의 사진 .....	67
그림 4.14	전류 구동형 서지 카운터의 구성 .....	68
그림 4.15	CT에 내장한 로고우스키 코일 .....	69
그림 4.16	서지 측정의 개략도 .....	69
그림 4.17	시간 흐름도 .....	70
그림 4.18	로고우스키 코일의 구성 .....	71
그림 4.19	로고우스키 코일의 특성 .....	73
그림 4.20	서지발생에 대한 시간 흐름도 .....	75
그림 4.21	측정 데이터의 예 .....	75
그림 4.22	데이터 취득 모듈의 통신 방법 .....	77

그림 4.23	시제작 데이터 취득 모듈 .....	79
그림 4.24	전문가 시스템의 구조 .....	84
그림 4.25	JESS의 동작원리 .....	86
그림 4.26	전문가 시스템의 모듈 구성 .....	90
그림 4.27	데이터 수신 알고리즘 .....	91
그림 4.28	데이터 프로토콜 분석 .....	93
그림 4.29	전체 데이터 출력 화면 .....	94
그림 4.30	상세 데이터 출력 화면 .....	96
그림 4.31	데이터베이스 처리 및 그래프 출력 화면 .....	98
그림 4.32	데이터베이스의 데이터 삭제의 예 .....	100
그림 4.33	데이터 변화량 그래프 출력 의사코드의 예 .....	101
그림 4.34	피뢰기의 열화진단 구조 .....	102
그림 4.35	규칙 1의 의사코드 .....	103
그림 4.36	규칙 3의 의사코드 .....	104
그림 4.37	피뢰기 측정 데이터 생성 프로그램 .....	106
그림 4.38	ZigBee 모듈 .....	107
그림 4.39	전체 데이터 출력 화면 .....	108
그림 4.40	상세 데이터 출력 화면 .....	109
그림 4.41	데이터베이스 저장 및 그래프 화면 .....	110
그림 4.42	피뢰기 열화 진단의 예 .....	111

### < 표 목차 >

표 3.1	시뮬레이션과 근사식의 적용 결과 비교(전체 누설전류) .....	45
표 3.2	시뮬레이션과 근사식의 적용 결과 비교(저항분 누설전류) .....	46
표 4.1	데이터 취득 모듈의 전기적 특성 .....	78
표 4.2	피뢰기 데이터베이스의 특징 .....	98
표 4.3	피뢰기의 열화진단 방법 .....	102

*Development of Deterioration Diagnostic Techniques  
and an Expert System for Lightning Arrester Facilities  
in Gas Insulated Substations*

*by Young-Jin, Cho*

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

*Abstract*

ZnO lightning arresters are the best device for protecting electrical power systems from transient overvoltages generated by lightning discharges and switching operations. However, ZnO lightning arresters deteriorate by repetitive use, absorption of environmental moisture, and manufacturing defects.

The deteriorated lightning arrester can cause to accidents such as a line-to-ground fault or an explosion that may occur even at the normal operating voltage. Therefore, it is necessary to perform online monitoring of lightning arresters, especially for GIS lightning arrester facilities, and promptly replace the deteriorated lightning arrester to ensure the reliability of the power supply.

Various diagnostic methods for ZnO arresters have been proposed mainly based on measurements of the leakage current, and those have been found to be difficult in the measurement of leakage current because of the power system voltage harmonics and the electromagnetic interferences. I have experimentally studied the leakage current vs. the surface temperature of an arrester and the ambient temperature vs. the leakage current of one to propose high reliable diagnostic techniques for lightning arresters.

Leakage currents are also influenced by the magnitude of the system voltage and its harmonic components, so these influences have been analyzed to improve the reliability of arrester diagnosis.

The resistive component of the leakage current flowing through arresters is an important indicator of deterioration, but the total leakage current and its harmonic analysis are widely used in diagnosing the soundness of arresters because of difficulties in measuring resistive leakage current.

In this dissertation, a new method of measuring resistive leakage current is proposed, which is quite different from conventional methods such as self-canceling and the synchronous rectification methods. To confirm the effectiveness of the resistive current detection algorithm, a leakage current detector and analysis program have been designed and fabricated. From the experimental results, it has been confirmed that the proposed algorithm does not need a complex circuitry and is easy to complete.

A conventional surge counter set in a grounding conductor of a

lightning arrester can perform a measurement only when a surge occurs and does not provide sufficient data on surge current. Information on surge current is important in evaluating arrester condition, and many parameters, like the amplitude, the polarity, and the time of surge current occurrence.

An intelligent surge counter that can record the date and time, polarity, and the amplitude of surge currents has been designed and fabricated utilizing microprocessor technology.

From the theoretical and experimental results, an expert system has been designed and implemented to monitor and diagnose lightning arresters in GIS substations. The expert system consists of a data acquisition module (DAM) based on microprocessor and diagnostic algorithms.

The DAM measures and analyzes several parameters necessary for the arrester diagnosis such as system voltages, leakage currents, surge currents and temperatures. All acquired data are transmitted to a remote computer by a low-rate wireless network specified in IEEE 802.15.4 to avoid electromagnetic interferences under high voltage and large current environments.

The decision-making of the arrester diagnosis is completed with a Java Expert System Shell(JESS), which is composed of a knowledge base, an inference engine and a graphic user interface(GUI).

In conclusion, it was verified that the proposed expert system could be very effective in monitoring and diagnosing lightning arresters in GIS substations.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 필요성

전력계통에는 외부로부터의 직격뢰나 유도뢰에 의한 서지와 각종 전력계통의 연계 및 차단기의 빈번한 개폐 동작에 의한 과도과전압(transient overvoltage)이 발생하며, 이는 정상 운전전압보다 최대 십 수배에 달하므로 과도과전압의 침입시 계통에 연계되어 있는 변압기, 차단기 등 각종 중전기기의 절연을 위협하게 된다. 이에 대해 경제적, 기술적으로 가장 효과적인 대책은 전력계통에 전압-전류의 비선형 저항 특성이 우수한 산화아연(ZnO)형 피뢰기(lightning arrester)를 기기 또는 선로에 병렬로 설치하는 것이다<sup>[1]~[5]</sup>.

그러나 피뢰기도 제조시의 결함이나 사용 환경에서의 흡습, 이상전압에 대한 반복되는 보호동작으로 열화가 진전되며, 열화된 피뢰기가 계통에 설치되어 있으면 정상운전전압에서도 누설전류에 의해 과열되거나 열폭주(thermal runaway) 및 지락사고로 진전되어 정전이나 화재 등 2차적인 인적·물적 사고를 유발시킬 수 있다<sup>[6]~[8]</sup>. 이와 같은 배경에서 피뢰기의 열화정도를 상시 관측하여 열화된 피뢰기를 사전에 제거함으로써 피뢰기로 인한 사고를 예방하고 전력공급의 신뢰성을 확보할 목적으로 다양한 방식의 피뢰기 열화진단기술이 개발되어 왔다.

1960년대부터 피뢰기의 특성평가와 열화진단에 대한 각종의 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 현재까지의 국내 연구개발 수준은 피뢰기의 열화진전 양상에 대한 실험실내의 연구가 대부분이고, 주로 배전용 피뢰기를 대상으로 수행되어 왔다. GIS용 피뢰설비에 대해서는 단순히 전체 누설전류의 검출과 서지 카운터만을 적용하여 열화진단 및 수명예측을 행하고

있으며, 현장에서 측정된 데이터의 전송에는 4~20 mA 전류루프(current loop)를 적용하고 있어 고전압 환경 하에서 전자계 간섭의 영향을 배제할 수 없다.

특히 피뢰설비의 열화상태를 판단할 수 있는 중요한 지표인 저항분 누설전류에 대한 측정기술 및 장치는 아직까지 개발되어 있지 못한 실정이며, 서지 카운터의 경우 일정 레벨 이상의 감도를 설정하여 단순히 피뢰기의 동작여부만을 계수하므로 서지전류의 발생일시, 크기 및 극성에 대한 평가는 이루어지지 못하고 있다.

일부에서 피뢰기의 전체 누설전류 및 고조파 누설전류의 분석이 가능한 장비가 개발되어 있으나 주로 배전용 피뢰기를 대상으로 한 것이며, 휴대용으로 제작되어 상시 관측이 어려운 단점이 있다.

국외의 연구개발 수준은 국내와 비슷한 수준이며, 국내와 같이 배전용 피뢰기 중심의 연구가 대부분이다. 피뢰설비에 대한 진단기술이나 장치도 배전용 피뢰기를 중심으로 한 휴대용 장비이거나, 학술적인 연구목적으로 실험실내에서 사용 가능한 것이 대부분이며 기능이나 측정의 정밀도 면에서는 국내의 기술이 보다 앞서 있다고 할 수 있다.

피뢰기의 열화진단기술에는 피뢰기의 제한전압, 방전전류, 손실전력, 누설전류, 정전용량 등을 측정하는 방법이 있으며, 특히 그 중에서 운전 중인 전력계통에 설치되어 있는 피뢰기의 누설전류를 측정하여 열화상태를 분석하는 방법이 주류를 이루고 있다<sup>[9]~[11]</sup>. 그러나 누설전류를 기준으로 열화를 진단하는 방법은 단순히 전체 누설전류 또는 누설전류의 제 3 고조파 성분의 실효값을 측정하거나 실험실내에서 복잡한 회로와 조작에 의해 저항분 누설전류를 측정하여 판단하는 것으로 측정 방법과 설치 환경에서의 오차를 포함하게 되어 열화진단에 필요한 정보를 충분히 제공하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 현재 사용중인 진단파라미터는 물론 연구되고 있는 새로운 기술을 개발·적용하여 운전중인 피뢰기의 상태를 상시 관측하고 열화진전에 의한 절연능력의 저하를 감시하며 교체 및 적절한 대책이 필요한 피뢰기를 관리자에게 통보할 수 있는 전문가 시스템을 구축함으로써 피뢰기로 인한 사고를 예방하여 전력공급의 신뢰성을 향상시키고 선로 및 기기의 동작 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

최근 전력공급의 무중단 운영과 신뢰성 확보 등의 문제는 2003년 8월의 미국과 캐나다의 대규모 정전사태와 같은 재난의 발생을 방지하기 위해 국가 차원에서 전기에너지에 대한 안보측면이 더욱 강조되고 있으며, 전력계통에서 피뢰기가 원인이 되어 발생하는 기술적, 경제적 손실이 크게 나타나고 있어 국내·외적으로 피뢰기의 특성 평가 및 신뢰성 평가기술, 진단기술 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 초고압 대용량 전력의 수송과 분배의 중심인 변전소 GIS 피뢰설비의 진단기술의 개발은 전력공급의 신뢰성 향상을 위한 필수적 요소라 할 수 있다.

## 1.2 연구목적 및 내용

본 연구는 GIS용 피뢰설비의 열화진단을 위한 데이터 취득 모듈의 개발과 이로부터 수집되는 데이터의 관리 및 진단을 위한 진단 모듈의 구현을 목적으로 한다.

이를 위하여 먼저 피뢰기의 온도와 누설전류, 전원전압과 누설전류, 전원고조파와 누설전류, 저항분 누설전류 검출 알고리즘 등에 관하여 연구를 수행하였다.

연구결과를 바탕으로 전체 누설전류, 저항분 누설전류, 고조파 누설전류, 전원전압, 피뢰기 주변온도와 표면온도, 서지전류(발생일시, 극성, 크기)를 측정하고 분석할 수 있는 데이터 취득 모듈을 설계·제작하였다.

데이터 취득 모듈에서 수집된 데이터는 진단 모듈이 설치되어 있는 중앙의 원격관리 시스템으로 전송되며, 데이터 전송방식으로는 기존의 RS-232 또는 RS-485의 직렬 통신방식에서 최근 각광받고 있는 전력 IT 기술의 발전에 맞추어 ZigBee 기반의 무선 통신방식을 적용하였다.

중앙의 원격 관리시스템은 피뢰기의 관리 및 진단에 필요한 지식베이스와 추론엔진, 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)로 구성된 JESS (Java Expert System Shell) 프로그램을 이용하여 진단 모듈을 구현하였다. 진단 모듈에서는 데이터 취득 모듈에서 제공되는 총 11개의 데이터를 기반으로 GIS용 피뢰설비에 대한 상시 감시와 관리 및 진단을 수행하게 된다. 데이터 취득 모듈과 진단 모듈을 적용함으로써 GIS용 피뢰설비의 정확한 상태 모니터링뿐만 아니라 위험 수준에 대한 경보 및 교체시기 알림 등의 기능 구현이 가능하였다.

현재 국내·외적으로 GIS용 피뢰설비에 대한 상시 모니터링 및 진단을 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있지만, 현장에서 적용 가능한 기술 및 장치는 아직까지 개발되어 있지 못한 실정이다. 따라서 본 연구를 통해 얻어진 결과와 시제품은 보다 효율적인 GIS용 피뢰설비의 관리 및 진단에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구를 통하여 기술적 우위 확보 및 시장 선점에 대한 효과가 클 것으로 기대된다.

## 제 2 장 이 론

### 2.1 전기적 특성

전력용 피뢰기는 낙뢰나 개폐서지 등의 침입으로 인해 단자전압이 동작개시전압 이상이 되면 수  $\mu\text{s}$  이내에 이상전압을 피보호기기의 절연내력 이하로 억제시키며, 이 과정에서 발생한 충격전류는 피뢰기를 통하여 대지로 방출한다. 그 후 피뢰기는 이상전압이 소멸하면 즉시 원래의 상태로 회복되며, 송배전선로의 정상운전전압에서도 속류가 흐르지 않고 소자의 누설저항에 의한 수백  $\mu\text{A}$  정도의 누설전류만이 흐르게 된다<sup>[12],[13]</sup>.

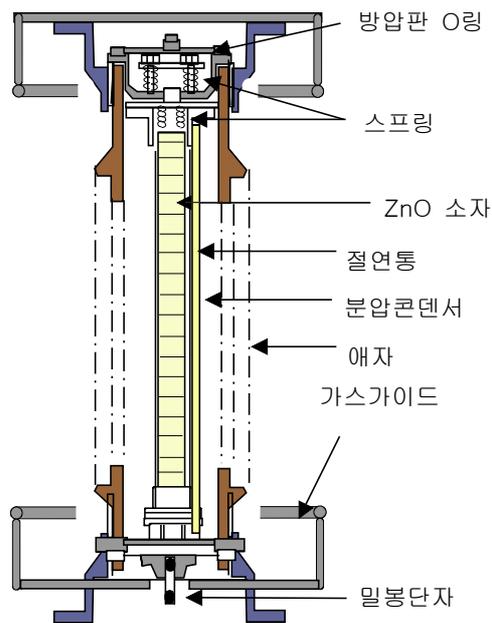


그림 2.1 ZnO 피뢰기의 구조

Fig. 2.1 Structure of ZnO lightning arresters

과거의 탄화규소(SiC)를 주성분으로 하는 SiC 피뢰기는 보호동작을 수행하는 특성요소와 직렬갭(series gap)으로 구성되었으나, 현재 사용되는 전

력용 피뢰기는 특성요소로 전압-전류의 비선형 저항 특성이 우수한 ZnO 소자를 사용함으로써 직렬갭이 없는 형태로 구성되어 있다.

그림 2.1은 ZnO 소자를 사용하는 피뢰기의 구조를 나타낸 것으로 절연체인 자기재 또는 폴리머의 하우징 내부에 ZnO 소자가 직렬로 연결되어 있으며, 열화에 따른 특성변화를 파악하기 위해서는 이들 ZnO 소자의 기본 특성과 특성변화 및 그 원인을 분석하는 것이 필요하다.

ZnO 피뢰기의 비선형 저항 특성은 그림 2.2와 같이 3개의 영역으로 구분하여 설명할 수 있다<sup>[14]~[16]</sup>.

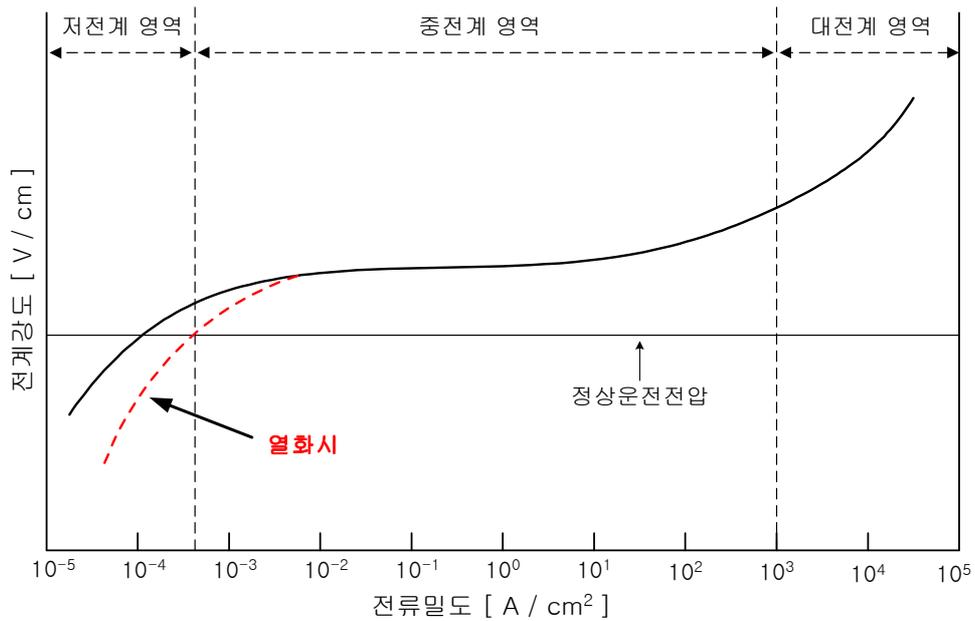


그림 2.2 전류밀도-전계강도

Fig. 2.2 Current density vs. electric field intensity

저전계 영역(prebreakdown region, 예비항복 영역)은 누설전류 영역이라고도 하며, 이 영역에서 피뢰기는 단순히 커패시터와 같은 역할만을 수행하고 직렬갭이 없기 때문에 정상운전전압이 직접 피뢰기에 가해져 미소

한 누설전류만 흐른다. 피뢰기가 열화되면 정상운전전압에서도 누설전류가 증가하게 되며 열화진단에 있어서 바로 이 저전계 영역에서의 누설전류의 증가를 검출하는 것이 핵심이라고 할 수 있다.

이 영역에서 전류밀도  $J$ 는 식 (2.1)과 같이 표현되며, 온도에 대한 영향이 크고 부의 온도계수를 가진다.

$$J = J_0 \exp \left( - \frac{\left( \phi - \sqrt{E e^3 / 4 \pi \epsilon_s \epsilon_0} \right)}{KT} \right) \quad [\mu\text{A}/\text{cm}^2] \quad (2.1)$$

여기서  $\phi$  = 전위 장벽,  $E$  = 전계강도,  $K$  = 볼츠만 상수,  $T$  = 절대온도,  $e$  = 전하,  $\epsilon_0$  = 진공의 유전율,  $\epsilon_s$  = 입계층의 비유전율이다.

중전계 영역(breakdown region, 항복 영역)은 보호동작이 발생하는 영역으로 전류의 큰 변화에 대해서 전압은 거의 변하지 않는 비선형 저항특성을 나타내는 영역이며, 전류밀도  $J$ 와 전계강도  $E$ 의 관계는 식 (2.2)와 같이 나타내어진다.

$$J = \left( \frac{E}{C} \right)^\alpha \quad [\mu\text{A}/\text{cm}^2] \quad (2.2)$$

여기서  $E$ 는 전계강도,  $C$ 는 전류밀도가  $1[\text{mA}/\text{cm}^2]$ 일 때 전계강도이고,  $\alpha$ 는 비선형 계수를 나타내는 값으로 식 (2.3)과 같다.

$$\alpha = \frac{\log \left( \frac{J_1}{J_2} \right)}{\log \left( \frac{E_1}{E_2} \right)} \quad (2.3)$$

여기서  $\alpha$ 의 값이 1일 때는 단순한 저항과 같고, ZnO 피뢰기의 경우 25 ~ 100 정도의 값을 갖는다<sup>[16]</sup>.

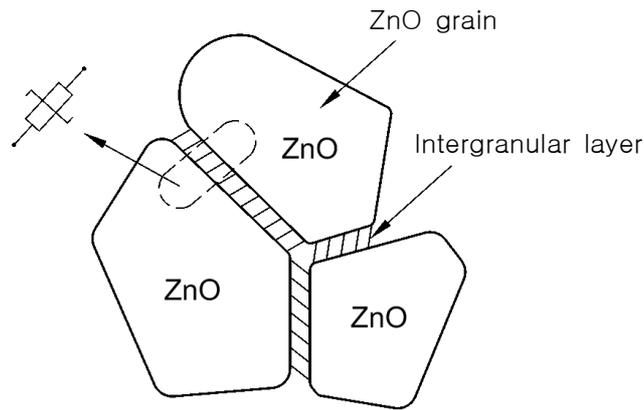
대전계 영역(upturn region, 벌크 영역)은 보호동작의 범위를 벗어난 영역으로 ZnO 입자(grain)의 벌크 특성에 의존하는 영역이며, ZnO 입자의 벌크 저항에 의해 비선형 저항 특성이 식 (2.4)와 같이 상수  $a$ 에 비례하여 선형적으로 나타난다. ZnO 입자의 고유저항이 지배적으로 나타나는 영역으로 전류밀도-전계강도 특성이 비례적으로 나타나며, 피뢰기에 있어 대전류가 흐르는 경우 이 영역의 저항값을 작게 만드는 것이 중요하다.

$$J = a \cdot E \quad [\mu\text{A}/\text{cm}^2] \quad (2.4)$$

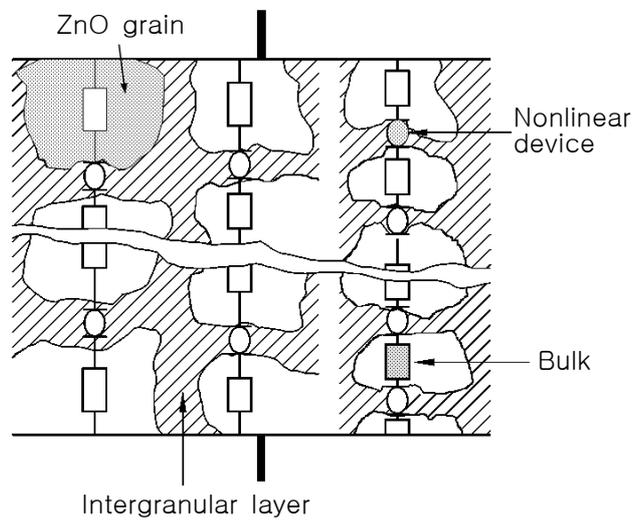
피뢰기는 그림 2.3 (a)에서 나타낸 것과 같이 세라믹의 다결정체로 ZnO 입자와 입계층(intergranular layer)에 존재하는 다양한 상들로 구성되며, 이들 상들은 첨가성분에 따라 차이가 있지만 비스머스-리치(Bi-rich)상, 스피넬(spinel)상, 피로클로르(pyrochlore)상 등으로 구성된다<sup>[16],[17]</sup>. ZnO 피뢰기의 주성분인 ZnO 입자는 10 ~ 20  $\mu\text{m}$  정도의 균일한 크기이며, 순수한 ZnO와는 달리 쌍으로 이루어진 구조로 n형의 반도체성을 가지고 있다. 스피넬과 피로클로르 상은 ZnO 입자와 입자 사이에 존재하고 ZnO 입자의 성장을 제한하는 역할을 하지만, 전기적인 역할은 하지 않는다. 피로클로르 상은 낮은 온도에서 안정하고 스피넬 상은 1100  $^{\circ}\text{C}$  이상의 높은 온도에서 안정한 것으로 알려져 있다. 비스머스-리치 상은 ZnO 입자를 둘러싸고 있고 피뢰기의 비선형 저항 특성에 크게 영향을 미치며, 소자의 열화시 가장 큰 변화를 나타낸다. ZnO 입자의 크기는 소자의 비선형 저항에 의한 보호동작 중 전압제한 특성인 항복전압을 결정하게 된다.

ZnO 피뢰기의 복합 미세구조는 그림 2.3 (b)와 같이 비선형 특성이 대

칭인 미세 비선형 저항소자가 직·병렬로 복잡하게 연결된 다중접속 구조를 가지고 있다<sup>[16]~[18]</sup>. ZnO 소자에 있어서 입자의 크기가 작을수록 입계의 수가 많아지므로 큰 전압에서 항복이 일어나게 된다.



(a) 단일구조



(b) 복합구조

그림 2.3 ZnO 소자의 미세구조  
Fig. 2.3 Micro-structure of a ZnO element

피뢰기의 항복전압은 ZnO 입자의 직렬연결 수에 의해 결정되며, 식 (2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_b = n v_b \text{ [V]} \quad (2.5)$$

여기서  $V_b$ 는 피뢰기의 항복전압,  $n$ 은 직렬로 연결된 ZnO 입계의 개수를 나타내고  $v_b$ 는 입계층의 항복전압을 나타낸다. 피뢰기의 에너지내량은 ZnO 입계의 병렬연결 수에 의해 결정되며, 소자의 단면적이 증가하면 병렬연결 개수가 증가하므로 에너지내량도 증가하게 된다. 그림 2.3 (b)에서 하나의 입계층은 3 ~ 4 V의 항복전압을 가진다<sup>[18]~[20]</sup>.

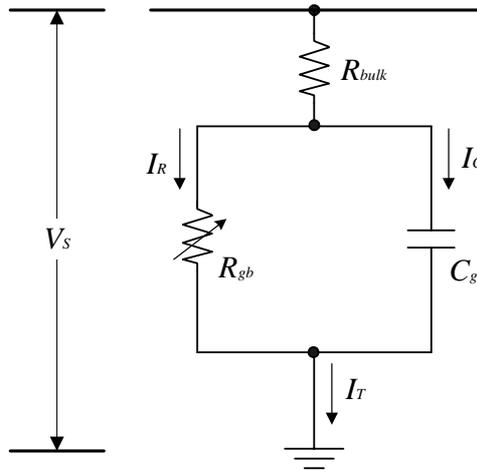


그림 2.4 ZnO 소자의 전기적 등가회로  
Fig. 2.4 Electrical equivalent circuit of a ZnO element

ZnO 소자의 전기적 등가모델은 그림 2.4와 같다.  $R_{gb}$ 는 입계층의 전위장벽에 생기는 비선형 저항,  $R_{bulk}$ 는 ZnO 입자 저항,  $C_g$ 는 ZnO 입자와

입자 사이의 입계층 정전용량이며 식 (2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_g = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{d} \quad [\mu\text{F}] \quad (2.6)$$

여기서  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전율,  $\epsilon_s$ 는 입계층의 비유전율,  $A$ 는 전극의 면적이  
며,  $d$ 는 입계층의 두께이다.

그림 2.5는 교류전압  $V_S$ 을 피뢰기 양단에 인가했을 경우의 전압과 누설전류들의 파형을 나타낸 것으로  $I_T$ ,  $I_R$ ,  $I_C$ 는 각각 전체 누설전류, 저항분 누설전류, 용량분 누설전류이며, 그림 2.4와 같은 전기적 등가회로로 표현된다.

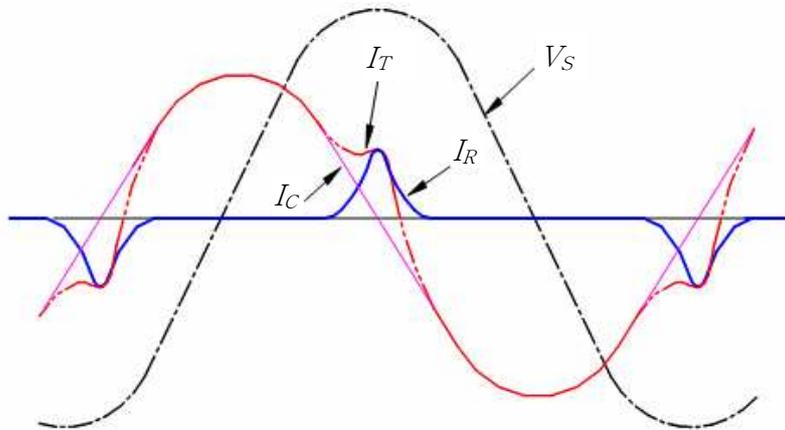


그림 2.5 누설전류 파형 예  
Fig. 2.5 Typical waveforms of leakage current

피뢰기의 열화가 진행되면 용량분 누설전류는 거의 변하지 않고 저항분 누설전류가 증가하여 전체 누설전류가 증가하게 되며, 저항분 누설전류가

증가하는 이유는 ZnO 소자의 입계층의 변화로 인해 입계층의 저항이 감소하기 때문이다<sup>[15],[16]</sup>. 또한, 피뢰기의 열화진단에 있어서도 그림 2.5에서와 같이 인가전압과 동상으로 나타나는 저항분 누설전류의 증가를 검출하는 것이 진단의 핵심기술이다.

## 2.2 열화진전기구 해석

ZnO 피뢰기의 열화현상에 대한 연구들은 지금까지 많이 수행되었지만, 완전하게 설명할 수 있는 결과는 아직 없다<sup>[21]~[43]</sup>. 열화진전기구는 전도이론과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 ZnO 피뢰기의 전도기구를 이해할 필요가 있다. ZnO 피뢰기의 전도기구는 전위 장벽모델로부터 입계층의 존재유무와 존재하는 입계층의 두께에 의하여 입계 장벽모델과 이중쇼트키 장벽모델, 입계층을 가진 이중쇼트키 장벽모델의 3가지로 구분할 수 있다<sup>[16],[19],[23]</sup>.

Matsuoka는 최초로 ZnO 피뢰기의 비선형성을 설명하는 비스머스-리치 입계층을 발견했으며, 주사전자현미경(SEM)으로 ZnO 소자의 표면을 관찰하여 ZnO 입자는 1  $\mu\text{m}$  정도의 두께를 가진 입계층에 둘러싸여 있다고 설명하였다<sup>[21]</sup>. Wong 등은 투과전자현미경(TEM)으로 박막의 입계상을 관찰하여 입계층은 비정질이며 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-rich 피로클로르와 유사한 조성을 갖는다고 주장하였다<sup>[22]</sup>. Inada는 비스머스-리치 입계층이  $\beta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 상과  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 상이 혼합된 결정질이며 최소 두께는 약 500 Å 정도라고 발표하였다<sup>[23]</sup>.

이러한 결과를 근거로 제안된 모델이 입계 장벽모델이다. 전자현미경 등을 이용한 연구를 통해 비스머스-리치 입계층을 새롭게 해석하였으며, Morris는 오제이 전자분광기(AES)로 ZnO-ZnO 입계를 분석하여 따로 분리된 상이 존재하지 않고 약 50 Å 정도의 BiO<sup>+</sup> 흡착층이 존재한다고 주장하였다<sup>[24]</sup>.

Clarke는 격자무늬 상을 이용하여 ZnO 입자에는 비스머스-리치 입계층이 존재하지 않음을 확인하였으며<sup>[25]</sup>, 이런 결과를 바탕으로 이중쇼트키 장벽 모델이 제안되었다. Kingery 등은 주사투과전자현미경(STEM)으로 입계면을 분석하여 입계면에는 어떠한 상도 존재하지 않으며 단지 Bi 분리층이 존재한다고 설명하였고<sup>[26]</sup>, Clarke는 박막 X-선 분광기로 측정한 결과 Bi 분리층은 입계에서 약 20 Å 이내의 폭을 갖는다고 발표하였다<sup>[27]</sup>.

Santhanam 등은 입계면의 폭이 25 Å 이하이므로 전위장벽은 입계면에 존재하지 않으며 입계부근의 ZnO 입자 내부에 존재한다고 주장하였다<sup>[28]</sup>.

이러한 연구로부터 비스머스-리치 입계층이 존재하는 이중쇼트키 장벽 모델이 제안되었다. 또한, 미세구조 관찰 결과의 변화에 따라 그에 대응되는 전위장벽모델이 제안되었으며, 그에 대한 해석 방법도 모델에 따라 여러 가지가 제안되었다.

3가지의 장벽모델 중에서 입계층을 갖는 이중쇼트키 장벽모델은 'ZnO grain-intergranular layer-ZnO grain'의 구조를 가지고 있으며, 입계층의 두께는 20 Å 이하로 매우 얇아서 터널링에 의해 입계층에서 전자의 이동이 자유롭다고 가정한 모델이다. 이 모델은 Emtage가 최초로 제안하였으며 비교적 많은 연구자들이 이 모델을 이용하여 ZnO 바리스터의 전도기구를 해석하였다<sup>[43]~[47]</sup>. 특히 Mahan에 의해 제안된 전도기구 이론은 지금까지 제안된 다른 전도기구에 비하여 ZnO 바리스터의 전기적 특성을 보다 많이 설명할 수 있다.

Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 주성분인 입계층이 존재하는 이중쇼트키 장벽모델은 피뢰기의 비선형 전류-전압 특성이 잘 일치하며 특히, 항복영역에서의 급격한 전류의 증가와 DC 열화현상에 대한 비선형적인 특성의 해석도 잘 설명되어져 지금까지 많이 이용되고 있는 모델이다.

ZnO 소자가 열화되는 원인으로는 상용주파수 교류과전압과 뇌충격전류,

주위환경 등으로 구분할 수 있다. 상용주파수 교류과전압에 의한 열화는 피뢰기에 교류전압을 인가함에 따라 소자에 저항분 누설전류가 흘러 주열 열이 발생하기 때문이며, 저항분 누설전류는 소자 내의 분자운동을 촉진시켜 소자의 온도를 상승시키게 된다. 저항분 누설전류가 흐르는 원인은 피뢰기에 전계가 가해지면 열적으로 활성화된 이온의 확산이 일어나고, 이 이온이 입계층을 넘어가 입계의 저항이 작아지기 때문이다. 즉, 열화는 전위장벽의 변형에 의하여 발생하며, 일반적으로 동일한 소자에 대해 높은 온도 및 대전류가 흐르는 동안 열화가 진전되어 저항분 누설전류가 증가한다. 이로 인해 전체 누설전류의 크기가 어떤 임계값을 넘어서면 발생하는 열이 커져서 짧은 시간 내에 소자는 과열되고 결국 열폭주에 도달하게 된다. 이러한 내용을 이론적으로 설명한 모델이 Gupta의 원자결함모델(atomic defect model)이다.

뇌충격전류에 의한 피뢰기의 열화는 상용주파수 교류과전압에 의한 열화기구와는 다르다<sup>[47]~[49]</sup>. 뇌충격전류는 피뢰기의 비선형 저항 특성을 저하시켜 보호성능에 크게 영향을 주며, 뇌충격전류의 경우 상용주파수 교류과전압에 비해 피뢰기의 입계층에 가해지는 전계의 강도가 정상상태보다 대단히 크기 때문에 피뢰기의 보호동작시 더 많은 열이 발생하고 이 때문에 입계층의 변형이 쉽게 일어난다. 만일 피뢰기가 불균일한 구조적 결함을 포함하고 있다면, 그 부분에 열이 집중되고 이로 인해 피뢰기는 용융과정을 통한 재소결이 일어난다. 이와 같은 과정에서 ZnO 입자가 성장하고 비선형 저항 특성을 나타내는 입계층이 감소하며, 소자에 흐르는 전체 누설전류가 증가하여 정상운전전압에서도 쉽게 과열되고 열폭주에 도달한다.

그럼 2.6은 피뢰기의 열화요인과 열화시 나타나는 현상을 나타낸 것이다. 열화요인으로는 과전압 스트레스인 상용주파수 교류과전압, 서지 스트레스인 뇌서지와 가스절연개폐장치(GIS) 등의 개폐시 발생하는 개폐서지,

그리고 주위환경 및 제조결함 등으로 분류할 수 있다. 이러한 열화요인으로 인해 ZnO 소자의 열화가 진전되어 저항분 누설전류가 증가하며, 피뢰기의 열화시 나타나는 현상으로는 전체 누설전류 및 고조파 누설전류의 증가와 소자의 온도상승 동작이 반복되어 나타난다.

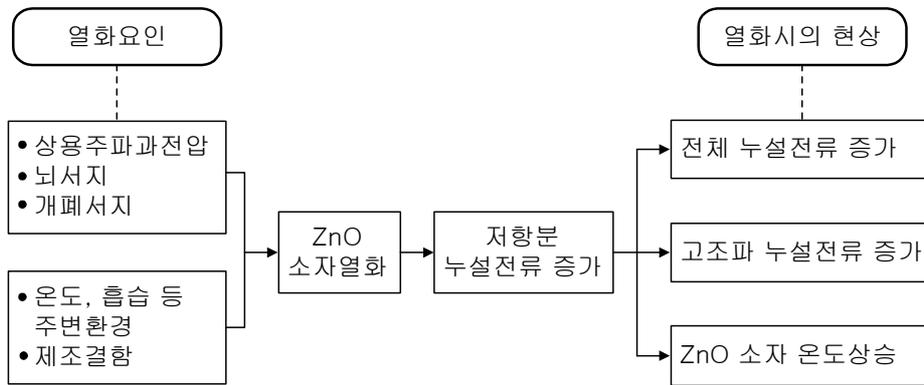


그림 2.6 피뢰기의 열화요인과 열화현상

Fig. 2.6 Deterioration factors and phenomena of lightning arresters

전기적인 스트레스 외에도 온도와 흡습 등의 주위 환경의 영향과 제조상의 결함 등으로 인해 피뢰기가 열화되며, 열화가 진전됨에 따라 피뢰기의 절연저항이 저하되어 소자와 애관 등에 흐르는 누설전류가 증가하면서 결국 과열 및 열폭주에 도달하게 된다.

### 2.3 열화진단기술

ZnO 피뢰기는 직렬갭이 없어 계통운전전압이 직접 피뢰기에 인가되어 상시 미소한 누설전류가 흐르기 때문에 피뢰기의 열화진전 상태를 파악하기 위해서는 정상운전전압에서 피뢰기의 누설전류를 검출하는 것이 중요하다. 피뢰기가 열화되면 저항분 누설전류가 증가하여 피뢰기의 온도를

상승시키고, 온도 상승은 다시 누설전류를 증가시켜 최종적으로 피뢰기의 열폭주나 지락사고 등을 일으키는 요인이 된다<sup>[50]~[53]</sup>.

따라서 저항분 누설전류의 증가를 검출하는 것이 중요하며, 이를 통해 열화진전 상태를 확인하여 교체시기를 결정하는 것이 열화로 인한 전력계통의 사고를 미연에 방지할 수 있는 중요한 요소가 된다.

한편 ZnO 피뢰기에서 부속장치의 열화에 대해서는 충분히 검토되어 있다. 이들의 부적합 상태는 절연저항을 저하시켜 피뢰기의 누설전류를 증가시키는 경우와 피뢰기의 열화에 영향을 미치는 저항분 누설전류를 증가시키는 것이 있다. 특히 피압막 주변의 부품은 기능상 열화를 일으키기 쉬우며, 예를 들어 패킹(packing) 등의 고무류가 열화되면 기밀불량, 흡습 등을 일으켜 피뢰기의 측면과 절연물의 절연저항을 저하시켜 누설전류가 증가하게 된다. 이러한 부속장치의 열화는 절연저항계를 이용하여 쉽게 측정할 수 있지만 피뢰기를 전력계통에서 분리하여 측정해야 하는 단점이 있다.

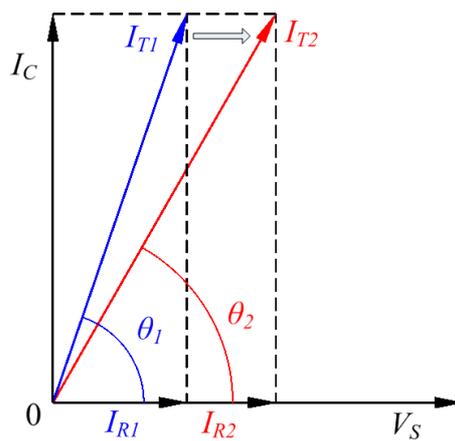


그림 2.7 인가전압과 누설전류와의 벡터 선도

Fig. 2.7 Vector diagram between applied voltage and leakage current

그림 2.7은 인가전압과 전체 누설전류와의 위상을 나타낸 것으로 인가한 전압을  $V_S$  라고 하면, 전체 누설전류  $I_T$ 는 용량분 누설전류  $I_C$ 와 저항분 누설전류  $I_R$ 의 합으로 나타낼 수 있으며, 인가전압과 전체 누설전류의 위상차를  $\theta$ 라 하면 식 (2.7)과 같이 표현할 수 있다<sup>[54]</sup>.

$$\begin{aligned}
 |I_T| &= \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \\
 \theta &= \tan^{-1} \frac{I_C}{I_R} \\
 I_R &= I_T \cdot \cos\theta \\
 I_C &= I_T \cdot \sin\theta
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

그림 2.7에서 ZnO 소자가 열화되어 저항분 누설전류가 증가하면 전체 누설전류는  $I_{T1}$ 에서  $I_{T2}$ 로 변화하며, 인가전압과 전체 누설전류의 위상차  $\theta_1$ 은 저항분 누설전류의 증가로 인하여  $\theta_2$ 로 변화한다.

열화진전의 파라미터인 저항분 누설전류의 증가를 검출하는 것이 중요하지만 저항분 누설전류는 전체 누설전류 중에 포함되어 있고 그 크기도 매우 작기 때문에 직접적인 측정이 어렵다. 그래서 전체 누설전류를 먼저 측정하고, 전체 누설전류 중에서 저항분 누설전류를 분리하여 분석하는 방법이 이용되고 있다.

누설전류에 의한 피뢰기의 열화진단방법은 다른 방법들과는 달리 피뢰기를 독립적인 상태나 전력계통에 연결된 온라인 상태에서 열화진단을 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 피뢰기의 열화에 따른 전체 누설전류와 저항분 누설전류의 값은 아주 미소하기 때문에 정밀한 측정과 분석이 필

요하다. 피뢰기의 열화시 정전용량에 의한 용량분 누설전류는 거의 증가하지 않고, 누설저항에 의한 저항분 누설전류가 현저히 증가하는 특성을 이용하여 다음과 같은 피뢰기 열화진단기술이 제안되고 있다.

### 2.3.1 전체 누설전류 측정

전력계통에 설치되어 있는 피뢰기의 접지측에 고감도 관통형 변류기를 설치하여 정상운전전압에서 저항분 누설전류와 용량분 누설전류의 합으로 표현되는 전체 누설전류를 측정하는 방법이다. 피뢰기의 열화진전에 따라 전체 누설전류는 어느 정도 열화가 진전되기 전까지는 저항분 누설전류가 미소하게 증가하기 때문에 초기의 열화상태를 진단하기가 어렵다는 단점이 있다.

그러나 ZnO 소자의 열화가 어느 정도 진행된 시점에서는 전체 누설전류 중에서 저항분 누설전류가 차지하는 비율이 커지므로 전체 누설전류를 측정함으로써 용이하게 피뢰기의 열화진단이 가능하다. 또한 간단하게 측정할 수 있는 장점이 있어 피뢰기의 열화를 진단하는 방법으로 폭넓게 사용되고 있다<sup>[6],[7]</sup>.

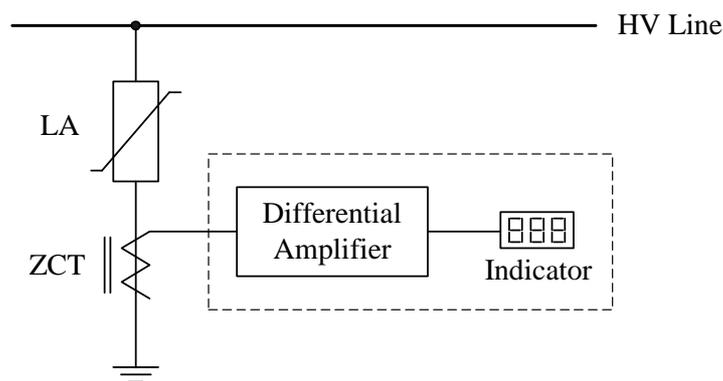


그림 2.8 전체 누설전류 측정회로

Fig. 2.8 Measurement circuit of total leakage current

그림 2.8은 피뢰기의 전체 누설전류를 측정하는 디지털 방식의 예이며, 그림 2.9는 전체 누설전류 검출 파형의 예이다. 아날로그 방식을 사용하면 마이크로암페어( $\mu\text{A}$ ) 미터를 이용하여 측정할 수도 있다.

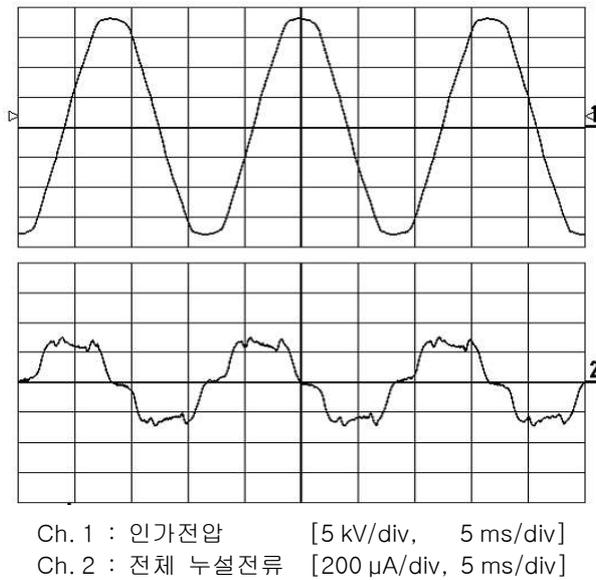


그림 2.9 전체 누설전류 파형의 예

Fig. 2.9 Typical waveform of total leakage current

### 2.3.2 제 3고조파 누설전류 측정

전체 누설전류 측정법과 같이 피뢰기가 연결된 접지선에 관통형 변류기를 설치하여 전체 누설전류를 검출하고, 전체 누설전류 중에서 대역통과필터를 이용하여 제 3고조파 성분만 분리하는 방법이다.

그림 2.10은 제 3고조파 누설전류 측정회로의 구성을 나타내며, 그림 2.11은 제 3고조파 누설전류 측정법을 통해 검출한 3고조파 파형의 예이다. 저항분 누설전류는 전원전압과 동상이며, 제 3고조파 누설전류 성분이 저항분 누설전류의 경향을 나타내기 때문에 제 3고조파 누설전류의 크기를

분석하여 열화를 진단한다<sup>[6],[21],[56],[57]</sup>.

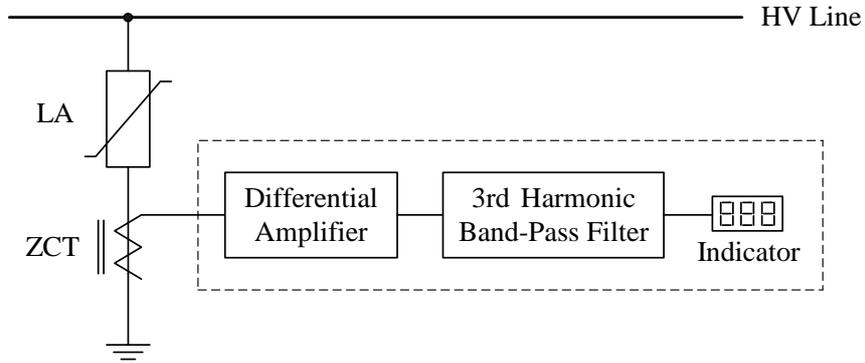
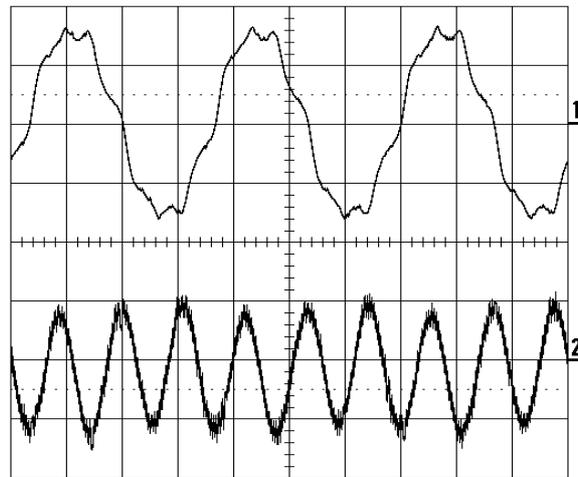


그림 2.10 제 3고조파 누설전류 측정회로

Fig. 2.10 Measurement circuit of the 3rd harmonic leakage current



Ch. 1 : 전체 누설전류 [200 μA/div, 5 ms/div]  
Ch. 2 : 제 3고조파 누설전류 [20 μA/div, 5 ms/div]

그림 2.11 제 3고조파 누설전류 파형의 예

Fig. 2.11 Example of the 3rd harmonic leakage current waveform

특히 전체 누설전류 성분 중 저항분 누설전류의 변화는 제 3고조파 누설전류 성분의 변화를 통해 현저히 나타나므로, 제 3고조파 성분을 분석하

여 누설전류의 증가분에 대한 정보를 얻을 수 있어 피뢰기의 누설전류를 측정하는 일반적인 방법으로 사용되고 있다.

### 2.3.3 저항분 누설전류 측정

저항분 누설전류의 경우 ZnO 소자 열화시 초기값에 비해 큰 증가폭을 나타내므로 열화 초기시의 진단이 어려운 전체 누설전류 측정법과는 달리 열화 초기상태를 진단할 수 있으며, 운전 중에 열화진전 상태를 진단할 수 있는 장점이 있다. 하지만 소자에 흐르는 누설전류 중 저항분 누설전류를 측정하기 위해서는 고감도 변류기, 차동증폭기 등의 부가적인 장치가 필요하며, 전체 누설전류를 먼저 측정한 후 이로부터 저항분 누설전류를 분리하는 방법을 사용해야 한다. 이러한 저항분 누설전류를 검출하는 대표적인 방법에는 자기소거법, 동기정류법, 손실전력 측정법 등이 있다.

#### (1) 자기소거법

피뢰기의 전체 누설전류로부터 용량분 누설전류와 크기가 같은 소거파를 만들어 전체 누설전류에서 용량분 누설전류를 제거함으로써 저항분 누설전류를 검출하는 방법이다. 먼저 변류기를 통해 전체 누설전류를 검출하고 증폭한다. 증폭된 신호로부터 영점을 검출할 수 있는 슈미트트리거 (schumit trigger) 회로를 이용하여 영점에서 반전된 구형파신호를 발생시킨 후 저역통과필터를 통과시켜 60 Hz의 기본파 성분을 추출한다. 그러나 이 신호는 저항분 누설전류에 의한 위상차를 가지고 있기 때문에 위상차를 보정하는 별도의 회로가 필요하다. 위상차가 보정된 신호는 자동이득 조절장치에서 전체 누설전류에 포함되어 있는 용량분 누설전류의 파고치와 같은 크기로 조정된 후 차동증폭기 회로에서 전체 누설전류와 함께 저항분 누설전류는 제거되고 저항분 누설전류의 최대값이 검출된다. 이렇

계 해서 얻어진 저항분 누설전류의 최대값은 마이크로프로세서에서 소정의 알고리즘을 이용하여 피뢰기의 열화 유무를 진단하는데 사용된다.

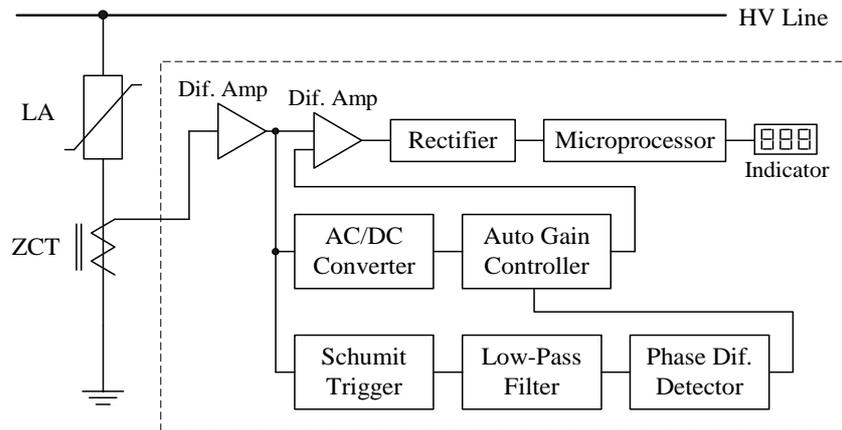
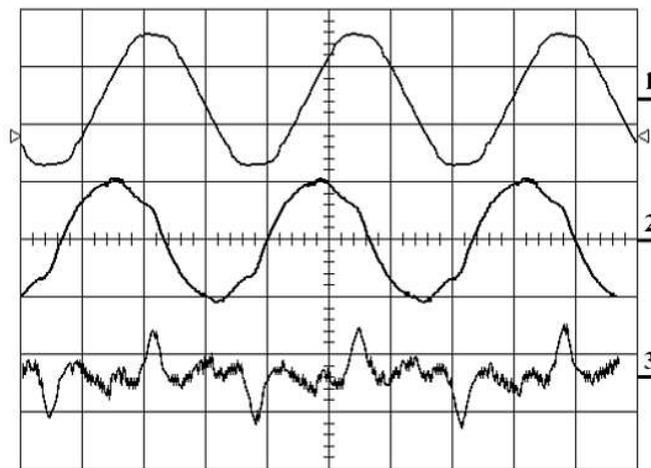


그림 2.12 자기소거법의 구성  
Fig. 2.12 Configuration of the self-canceling method



Ch. 1 : 인가전압 [5 kV/div, 5 ms/div]  
Ch. 2 : 전체 누설전류 [800  $\mu$ A/div, 5 ms/div]  
Ch. 3 : 저항분 누설전류 [500  $\mu$ A/div, 5 ms/div]

그림 2.13 자기소거법에 의한 저항분 누설전류 검출 예  
Fig. 2.13 Example of the resistive leakage current waveform by the self-canceling method

그림 2.12는 자기소거법에 의한 측정 원리를 나타내고 있으며, 그림 2.13은 자기소거법을 적용하여 저항분 누설전류를 검출한 파형의 예이다. 이 방법은 계기용 변압기 등의 보조장치가 불필요하고 센서로써 변류기를 사용하기 때문에 전력계통으로부터 안정성을 확보할 수 있고 내서지성이 우수한 장점이 있다. 그러나 이 방법은 전체 누설전류에 고조파가 많이 포함되어 있거나, 선로에 연결된 기기들에 의해서 위상 지연이 발생하거나, 슈미트트리거 회로의 정확도에 의하여 저항분 누설전류 검출시 큰 오차가 발생할 수 있는 단점이 있다<sup>[55]</sup>.

## (2) 동기정류법

ZnO 피뢰기에 흐르는 전체 누설전류를 관통형 변류기를 통해 검출하고 대역통과필터를 통과시켜 60 Hz의 기본파 성분만을 추출한 후, 이를 계기용 변압기에서 얻은 전압신호로 동기정류하여 용량분 누설전류를 제거한다. 이렇게 얻어진 저항분 누설전류를 직류로 변환하고 증폭하여 저항분 누설전류의 최대값을 검출하는 방법이다.

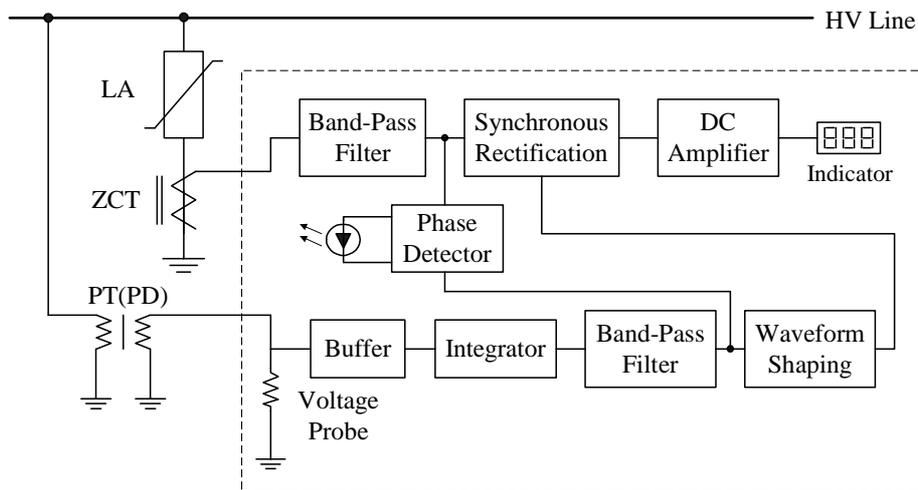


그림 2.14 동기정류법의 구성

Fig. 2.14 Configuration of the synchronous rectification method

그림 2.14와 2.15는 동기정류법에 의한 저항분 누설전류 검출의 개략도 및 검출 원리를 나타내고 있다<sup>[58],[59]</sup>.

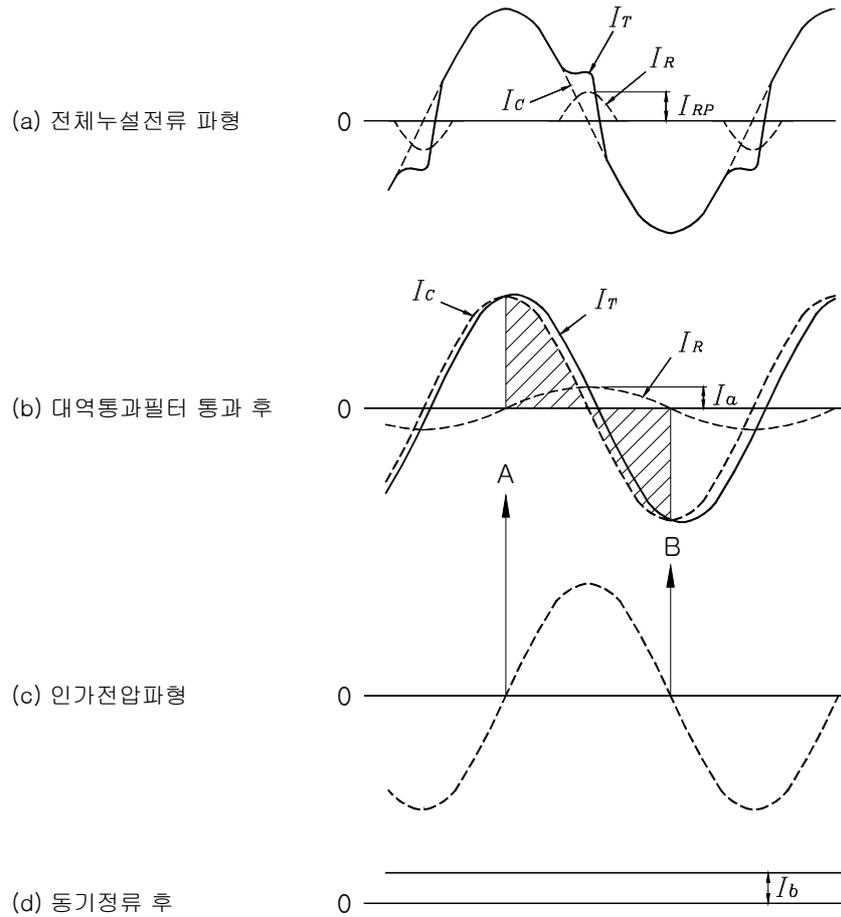


그림 2.15 동기정류법의 전압과 전류 파형

Fig. 2.15 Voltage and current waveforms of the synchronous rectification method

그림 2.15 (a)는 전체 누설전류 파형을 나타낸 것이며 그림 2.15 (b)는 전체 누설전류를 대역통과필터를 통과시켜 60 Hz의 기본파 성분만을 추출해 낸 파형을 나타낸 것이다. 그림 2.15 (c)에 나타낸 것처럼 인가전압 파형

의 영점인  $A, B$  사이에서 용량분 누설전류  $I_c$ 를 동기정류하면, 그림 2.15 (b)의 사선부분에 해당하는 용량분 누설전류  $I_c$ 가 소거되어 저항분 누설전류의 기본파 최대값인  $I_u$ 에 대응하는 DC 출력  $I_b$ 가 그림 2.15 (d)와 같이 나타난다. 마지막으로 이 DC 출력  $I_b$ 를 이용하여 저항분 누설전류의 최대값  $I_{RP}$ 를 얻는다.

이 방법은 용량분 누설전류를 제거하기 위한 소거파를 만들기 위해서 고조파가 많이 포함되는 전류를 이용하지 않고 전압신호를 사용하므로 자기소거법에 비해 위상일치 문제에 있어서 안정적이기 때문에 저항분 누설전류를 보다 정확하게 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방식은 계기용 변압기 등을 이용하여 전압신호를 검출해야 하기 때문에 절연문제에 특히 유의해야한다.

## 제 3 장 실험 및 분석

### 3.1 누설전류와 온도

누설전류의 증가는 피뢰기의 온도상승을 가져오기 때문에 피뢰기의 표면온도를 측정하는 것으로 누설전류의 크기를 추정할 수 있으며, 피뢰기의 표면온도와 주위온도를 측정하는 것으로도 피뢰기의 열화상태를 진단할 수 있다. 본 연구에서는 피뢰기의 주위온도를 상승시켜 계절적 온도변화에 대한 특성평가와 누설전류와 온도차의 상관관계를 실험적으로 평가하였으며, 실험결과로부터 열화가 진행되면 누설전류가 증가하고, 누설전류의 증가에 따라 피뢰기 표면의 온도가 높아지는 특성을 확인하였다. 따라서 피뢰기의 표면온도와 주위온도의 차이로부터 피뢰기의 열화상태를 진단할 수 있다<sup>[60]</sup>.

피뢰기의 열화에 기인한 누설전류와 온도의 상관관계를 분석하기 위한 실험에 사용된 피뢰기는 배전급 정격전압 18 kV, 공칭방전전류 5 kA의 플리머 하우스 캡리스 피뢰기이다. 피뢰기의 표면온도와 주위온도를 측정하기 위하여 10개의 열전형 온도센서를 내장한 전용의 온도측정 시스템(KEITHLEY, DAS-TC)을 이용하여 온도 실험장치를 구성하였다. 피뢰기에 인가되는 전압과 누설전류 측정을 위해 1000:1 고전압 프로브(Tektronix, P6015A)와 분해능 1  $\mu$ A의 디지털 멀티미터를 사용하였다.

실험은 항온항습기 내부에 피뢰기를 설치하고 실험조건에 따라 온도와 습도를 설정하여 2시간 이상 유지시킨 후, a) 계절적 온도변화에 따른 피뢰기 누설전류의 변화와 b) 누설전류와 표면온도의 관계를 분석하기 위한 2가지로 구분하여 수행하였다.

먼저, 계절적 온도변화에 따른 누설전류의 변화를 분석하기 위하여 항온항습기의 내부온도(주위온도)를 초기에 50℃로 설정하고 단계별로 5℃씩 낮추면서 -20℃까지 측정하였으며, 피뢰기의 누설전류와 표면온도의 관계를 분석하기 위한 실험에서는 1차적으로 항온항습기의 내부온도를 35℃에서 -15℃까지 10℃씩 변화시키고 정상운전전압(13.2kV)에서 누설전류의 크기를 측정하였다. 이후 피뢰기 양단의 인가전압을 증가시켜 정상운전전압에서의 누설전류 크기와 비교하여 100~500%까지 누설전류를 증가시키면서 이때 피뢰기 표면온도의 변화를 분석하였다.

또한 전력계통에서 사용한 후 교체된 기사용 피뢰기를 대상으로 신제품의 실험결과와 비교실험을 수행하였다. 실험에 사용된 신제품 및 기사용 피뢰기는 동종의 제품이며 기사용 피뢰기의 경우에는 상당 부분 열화가 진행된 것으로 판단되는 3개의 시료를 이용하였다.

실험방법으로는 누설전류 측정을 위한 실험장치를 구성하고, 실험실내의 온도(24~25℃)에서 피뢰기의 운전전압 13.2kV를 2시간 동안 인가한 후, 주위온도와 피뢰기 표면온도의 차이를 측정하였다.

정상운전전압에서 기사용 피뢰기의 누설전류는 각각 340  $\mu\text{A}_{\text{rms}}$ (시료 1, 신제품의 155%), 430  $\mu\text{A}_{\text{rms}}$ (시료 2, 신제품의 195%), 640  $\mu\text{A}_{\text{rms}}$ (시료 3, 신제품의 290%)로 신제품에 비해 누설전류가 더 많이 흐르는 것으로 측정되었다.

### 3.1.1 계절적 온도변화에 따른 누설전류의 변화

피뢰기의 누설전류는 주위온도에 따라 다소 변화하며, 계절에 따른 온도변화가 누설전류에 큰 차이를 나타낼 경우에는 이에 대한 영향을 고려해야 한다.

그림 3.1은 신제품 피뢰기에 정상운전전압을 인가하고 주위온도를 -20℃ ~

50 °C 까지 변화시켰을 때 전체 누설전류의 실효값의 변화를 나타낸 것이다.

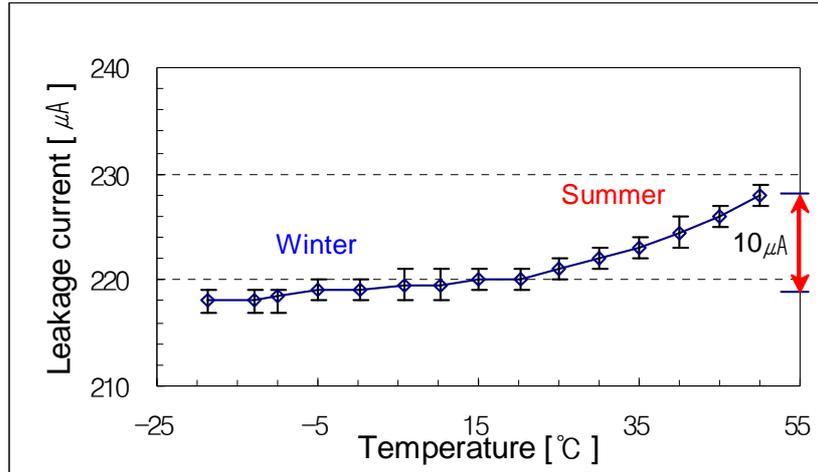


그림 3.1 주위온도와 누설전류  
Fig. 3.1 Ambient temperature vs. leakage current

실험 온도범위에서 전체 누설전류는 217 ~ 227  $\mu\text{A}$ 로 변화폭은 10  $\mu\text{A}$  이하로 측정되었으며, 우리나라의 계절적 온도변화 범위에 해당하는 -15 °C 에서 35 °C까지는 누설전류의 변화가 5  $\mu\text{A}$  이하이었다. 이는 피뢰기 특성에 따른 누설전류의 차이보다도 작은 값이므로, 피뢰기 진단시 계절적 온도 변화에 따른 전체 누설전류의 변화는 고려하지 않아도 될 것으로 생각된다.

### 3.1.2 누설전류와 표면온도의 상관관계

피뢰기는 열화진전에 따라 누설전류가 증가하며 누설전류의 증가로 인해 표면온도가 상승한다. 즉, 피뢰기의 표면온도는 주위온도와 누설전류에 의한 변수이므로 이들의 상관관계를 분석할 필요가 있다.

그림 3.2는 신품 피뢰기의 인가전압을 가변하여 전체 누설전류의 실효값의 크기를 정상운전전압에서 흐르는 값의 100 ~ 500 % 까지 증가시키면서 주위온도와 피뢰기 표면온도와의 관계를 나타낸 것이다. 정상운전전압 누설전류 값의 150 % 이상에서는 피뢰기의 표면온도가 급격히 상승하였으며, 각각의 주위온도에서 모두 유사한 경향을 나타내었다.

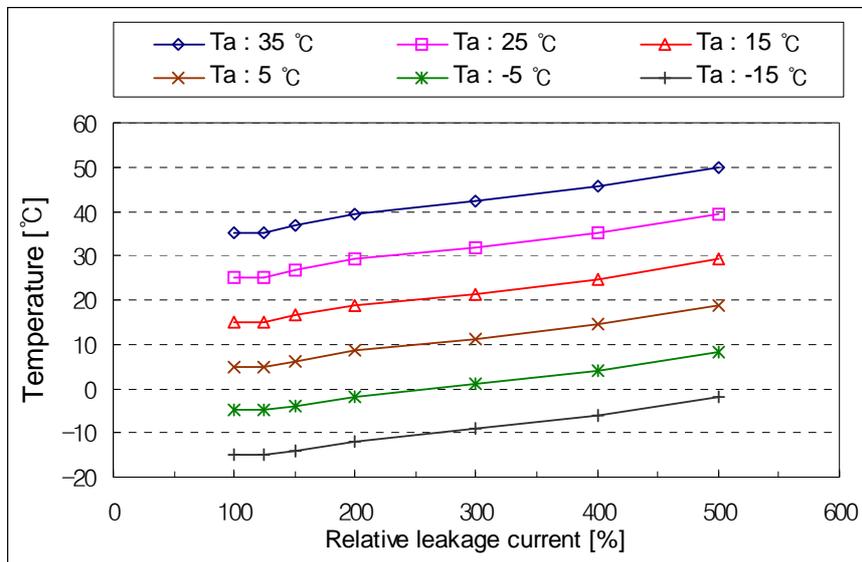


그림 3.2 누설전류와 표면온도

Fig. 3.2 Leakage current vs. surface temperature

그림 3.3과 그림 3.4는 그림 3.2의 결과를 피뢰기의 표면온도와 주위온도의 차이와 정상운전전류에 대한 상대크기의 관계를 나타낸 것이다.

피뢰기의 누설전류가 정상누설전류의 125 % 이하에서는 온도차가 나타나지 않았으며, 1 °C ~ 2 °C의 온도차에서 150 %, 3 °C ~ 5 °C에서 200 %, 6 °C ~ 7 °C에서 300 %, 9 °C ~ 11 °C에서 400 % 범위로 누설전류의 상대크기에 대한 온도차 범위가 벌어졌다.

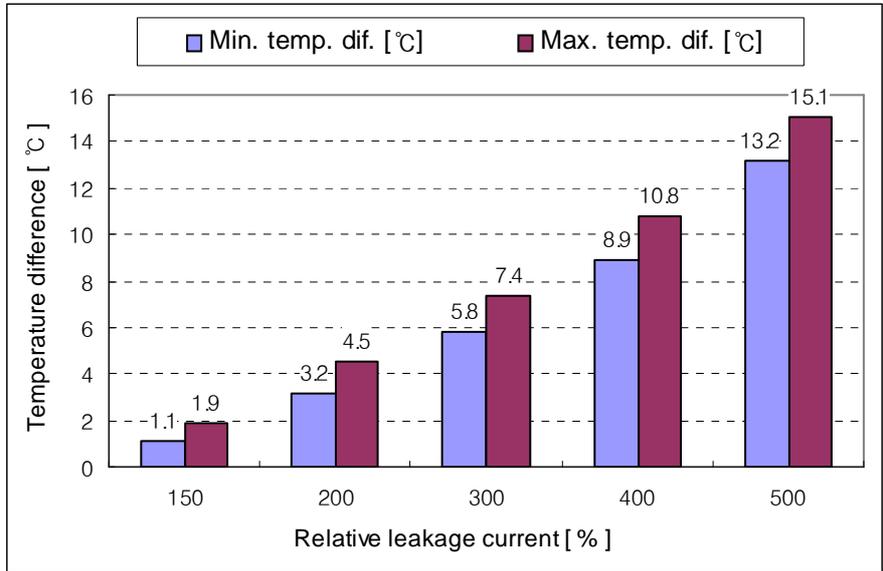


그림 3.3 누설전류의 상대크기와 온도차

Fig. 3.3 Relative leakage current vs. temperature difference

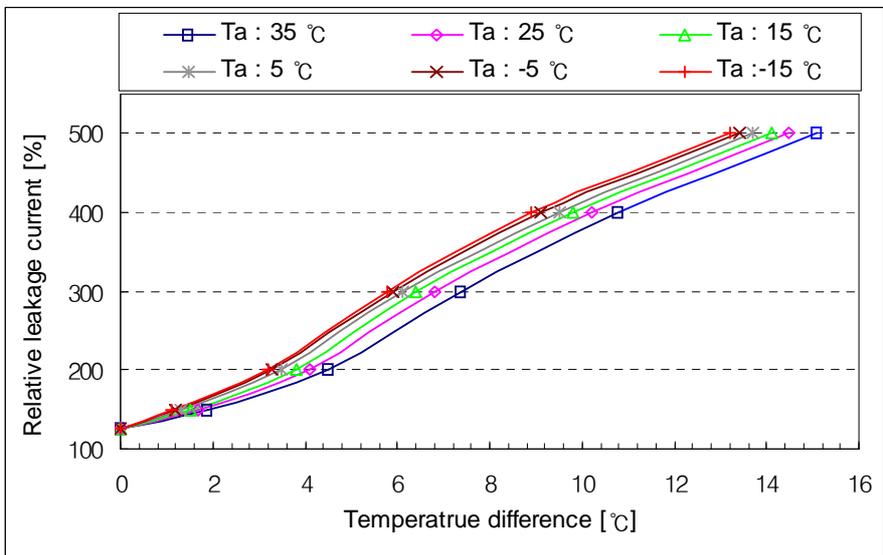


그림 3.4 온도차와 상대누설전류

Fig. 3.4 Temperature difference vs. relative leakage current

누설전류의 상대크기가 클수록 주위온도와 피뢰기 표면온도의 차이는 큰 폭의 증가를 나타내는데, 이는 누설전류가 증가하면 피뢰기의 표면온도도 함께 상승하는 경향이 있음을 보여준다. 따라서 주위온도와 피뢰기 표면온도의 차이를 분석하는 것으로 피뢰기의 열화상태를 진단할 수 있다. 이들 실험결과로부터 피뢰기의 표면온도와 주위온도의 온도차에 대한 정상 누설전류와의 상대크기는 주위온도에 따라 다음의 다항식 (3.1) 및 (3.2)와 같이 나타낼 수 있다.

주위온도가 0 °C 이상에서

$$y = -0.0015x^3 + 0.0338x^2 + 0.0862x + 1.2475 \quad (3.1)$$

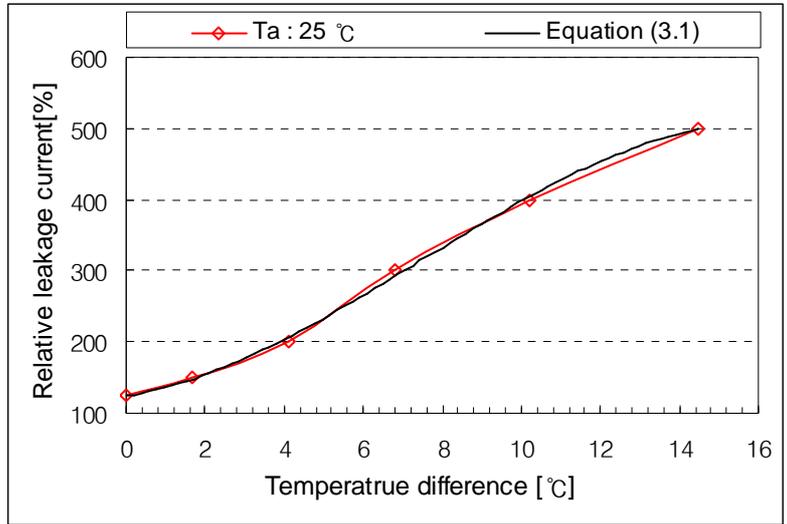
이며, 주위온도가 0 °C 미만에서

$$y = -0.0016x^3 + 0.0307x^2 + 0.1616x + 1.2482 \quad (3.2)$$

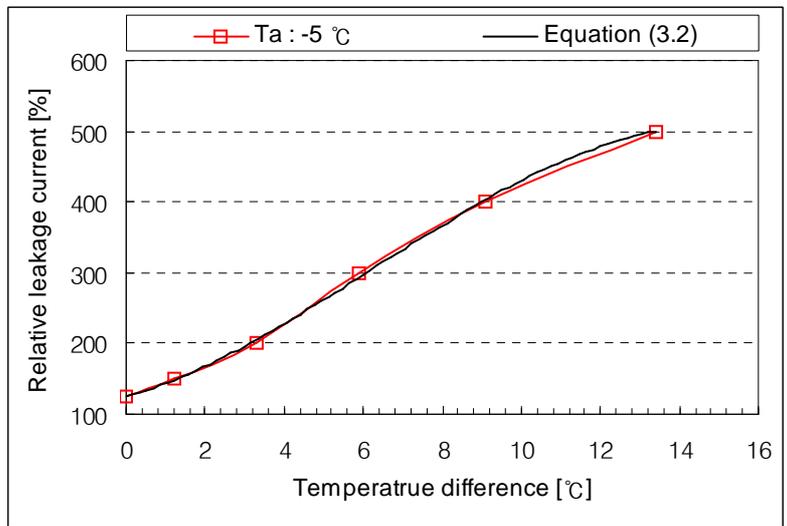
이다. 여기서  $y$  는 정상누설전류에 대한 상대크기이며,  $x$  는 피뢰기의 표면온도와 주위온도와의 차이이다.

그림 3.5는 온도차를 이용하여 누설전류의 크기를 추정한 것으로 실제 누설전류를 측정한 결과와 거의 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 그림 3.5 (a)는 주위온도가 25 °C일 때, 식 (3.1)을 이용하여 누설전류의 크기를 추정한 것이고, 그림 3.5 (b)는 주위온도가 -5 °C일 때, 식 (3.2)에 의해 누설전류의 크기를 추정한 것이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 실제 측정한 누설전류의 추이와 유사한 특성을 나타내었다.

따라서 피뢰기의 표면온도와 주위온도의 온도차로부터 누설전류의 상대크기를 산출할 수 있으며 누설전류를 직접 측정하지 않고도 피뢰기의 열화상태를 진단할 수 있다.



(a) 주위온도 25 °C



(b) 주위온도 -5 °C

그림 3.5 온도차를 이용한 누설전류 크기 추정

Fig. 3.5 Estimation of leakage current by temperature difference

전력계통에서 장기간 사용되어 반복되는 보호동작이나 흡습 등의 환경적 요인으로 열화가 진행된 기사용 피뢰기를 대상으로 주위온도 25℃에서 누설전류와 표면온도의 관계를 분석한 결과는 그림 3.6과 같다. 3개의 피뢰기에 대한 표면온도와 주위온도의 차이는 각각 시료 1에서 2℃, 시료 2에서 4℃, 시료 3에서 7℃의 온도차가 발생하였다. 이 온도차를 기준으로 식 (3.1)을 이용하여 누설전류의 상대크기를 추정하면 신제품 피뢰기의 정상운전전압에서의 누설전류에 비해 각각 155%, 195%, 290%의 값이 산출되며, 역으로 누설전류의 상대크기를 기준으로 온도차를 계산하면 그림 3.6의 결과가 얻어진다. 이는 기사용 피뢰기의 누설전류의 크기에 기인한 온도차이로 그림 3.4에서 신제품 피뢰기를 대상으로 항온항습기 내부에서 누설전류를 증가시킬 때 얻어진 실험결과와 동일하게 누설전류가 클수록 현저한 온도차이를 나타내는 것으로 평가되었다.

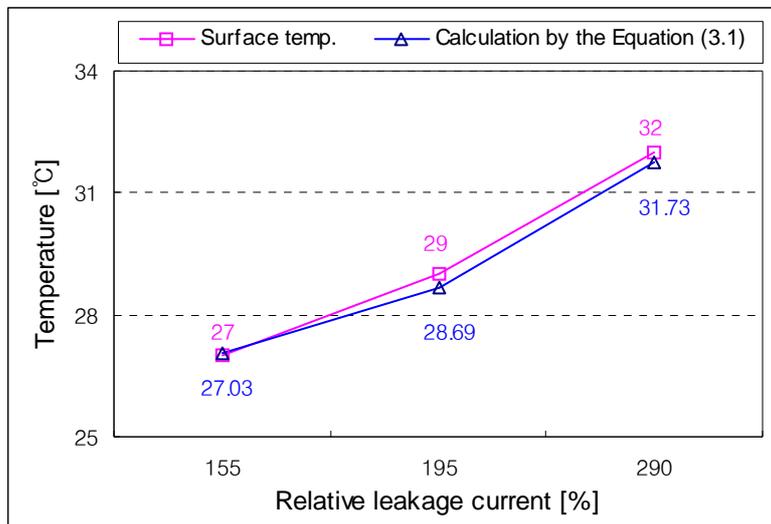


그림 3.6 기사용 피뢰기의 누설전류와 표면온도의 관계  
 Fig. 3.6 Relationship between leakage current and surface temperature for used arresters

이와 같이 피뢰기는 장기간 사용되면 흡습이나 서지에 대한 반복적인 보호동작으로 인해 열화가 진전되어 누설전류가 증가하므로 누설전류를 기준으로 하는 진단기술이 널리 사용되지만, 피뢰기는 고전자계 환경에 설치되어 있기 때문에 미소한 누설전류를 측정하는 데 있어 많은 오차가 발생한다.

이러한 오차 문제에 대한 해결책으로 본 연구에서와 같이 피뢰기의 표면온도와 주위온도와의 온도차를 측정하고, 이것으로부터 간접적으로 누설전류를 산출함으로써 직접 누설전류를 측정하지 않더라도 누설전류 측정에 의한 진단방법과 동일하게 피뢰기의 상태를 알 수 있다.

현재까지 피뢰기 진단시 수명예측이나 열화에 대한 누설전류의 기준이 없으며 일반적으로  $700\ \mu\text{A} \sim 1\ \text{mA}$ 의 누설전류가 검출되는 경우를 피뢰기의 교체시기로 하고 있다. 이런 상황을 고려할 때, 정상누설전류의 200% 이상부터는 피뢰기의 표면온도가 주위온도와 최소  $3\ ^\circ\text{C}$  이상의 차이가 발생하므로 피뢰기의 표면온도 측정에 의한 온도차를 이용하는 방법도 신뢰성 높은 진단방법이 될 수 있을 것이다. 또한 누설전류를 직접 측정하지 않더라도 온도차이의 측정만으로 누설전류의 산출이 가능하고, 측정방법이 간단하므로 피뢰기 열화진단에 광범위하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

특히, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 GIS용 피뢰기의 경우 밀폐된 용기(enclosure)안에 설치되어 있어서 습도, 풍량, 풍속 등에 의한 열방출이나 태양 복사열에 의한 영향 등을 고려하지 않고 연구결과를 그대로 적용할 수 있다.

### 3.2 누설전류와 전원전압

전력계통의 전압은 중부하시 감소하고 경부하시 증가하며, 154 kV 이상의 송변전 계통에서 전압변동률은 2 ~ 5% 범위이므로 계통전압의 변동으로 인해 피뢰기 열화와는 관계없이 누설전류의 변화가 발생할 수 있다. 그러므로 피뢰설비가 설치되는 전원계통에서의 전원전압 변동에 따른 누설전류의 변화 특성을 정확히 평가해야 하며, 이에 대한 영향을 보정해주어야 전원전압 변동에 따른 오차의 원인을 해결할 수 있다.

실험에는 정격전압 72 kV인 GIS용 피뢰기를 사용하였으며 피뢰기에 인가되는 전원전압을 변화시키기 위한 전압조정기, 피뢰기 양단의 전압 측정을 위한 용량성 분압기(potential divider), 그리고 피뢰기의 누설전류를 측정하기 위한 영상변류기를 그림 3.7과 같이 각각 설치하였다.

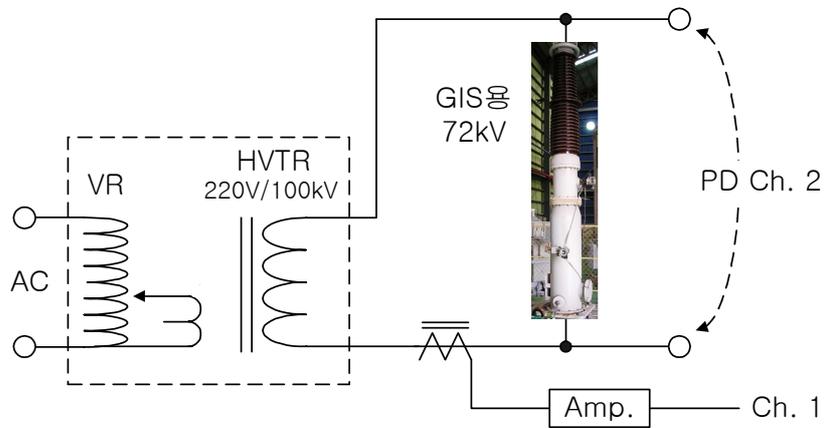


그림 3.7 실험장치의 구성

Fig. 3.7 Configuration of the experimental apparatus

전압변동은 정상운전전압인 66 kV에 대하여 -10%에서 +10% 범위로 하였으며, 각각의 설정된 전압에서 누설전류를 측정하였다. 피뢰기에 인가되는 전원전압을 정상운전전압의 90%에서 110%까지 변화시키면서 측정 한

누설전류의 변화는 그림 3.8과 같으며, 누설전류의 크기는 정상운전전압에서 누설전류의 크기인 220  $\mu\text{A}$ 에 대해 상대적인 크기로 표시하였다.

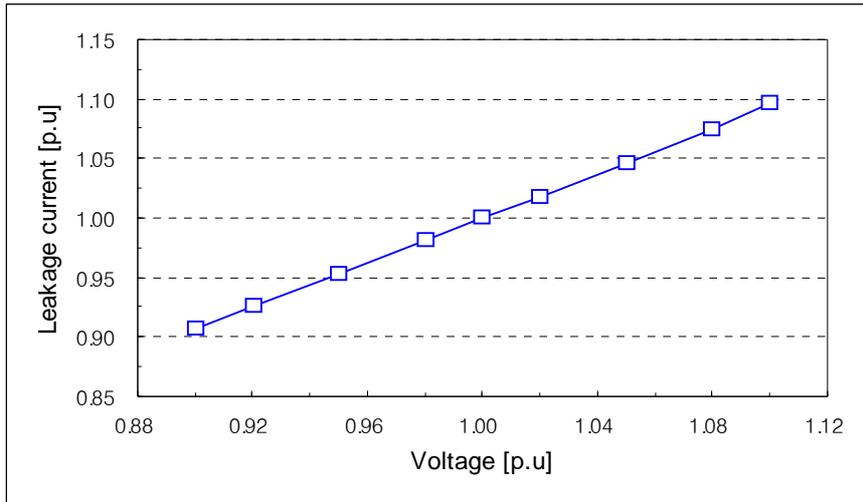


그림 3.8 전원전압에 따른 누설전류의 변화

Fig. 3.8 Changes of leakage current as a function of system voltage

전원전압이 정상운전전압의 90%에 해당하는 60 kV에서 누설전류는 약 200  $\mu\text{A}$  정도 측정되었으며, 이는 정상운전전압에서 누설전류의 크기와 비교할 때 10% 정도 감소한 수치이다. 한편, 전원전압을 95%로 하는 경우에는 누설전류의 크기가 5% 정도 감소되었으며, 반대로 전원전압을 정상운전전압 보다 5% 크게 하였을 경우에는 누설전류가 5% 정도 증가하였다. 전원전압을 10% 증가시킨 경우, 누설전류는 최대 244  $\mu\text{A}$ 까지 검출되었으며, 전원전압의 변동범위인  $\pm 10\%$  내에서 누설전류는 전압의 증감에 따라 선형적인 변화 경향을 나타내었다.

따라서 피뢰기 진단시 누설전류가 증가하였을 경우, 피뢰기의 열화로 인한 것인지, 아니면 전원전압의 상승에 의한 것인지 구별할 수 있어야 한다.

### 3.3 전원고조파의 영향

최근에는 피뢰기의 비선형 저항 특성에 기인하는 전체 누설전류의 제 3고조파 성분과 피뢰기 열화상태의 관계를 규명하여 진단 시스템의 구성을 단순화시키는 기술이 연구되고 있다. 그러나 피뢰기에 인가된 전원에 고조파 성분이 포함되면 열화와 무관한 누설전류의 증가 또는 감소가 나타나며, 이 때문에 피뢰기 상태를 정확히 진단하기가 어렵다.

따라서 전원에 포함된 고조파의 영향을 분석하고 이에 대한 누설전류와의 상관관계를 보정계수로 산출한다면 보다 정확한 피뢰기 열화진단이 가능할 것이다. 이를 위하여 전원에 포함된 제 3고조파 성분의 크기와 위상에 따른 누설전류의 변화를 분석하고 이에 대한 보정방법을 제시하였다<sup>[61]</sup>.

피뢰기에 60 Hz 순수 정현파 교류전압을 인가하면, 용량분 누설전류  $i_c$ 와 저항분 누설전류  $i_r$ 의 합으로 표현되는 전체 누설전류  $i_t$ 가 흐르게 된다. 이 때 용량분 누설전류  $i_c$ 는 기본 주파수 성분만 존재하지만, 저항분 누설전류  $i_r$ 은 비선형 저항 특성에 의하여 기본 주파수 이외에 다수의 기수 고조파 성분이 존재한다. 이 중에 제 3고조파 성분은 다른 고조파에 비하여 크기가 가장 우세하므로 열화를 진단하는 중요한 요소가 되며, 본 연구에서는 전원에 포함된 다양한 고조파 성분 중에 제 3고조파 성분에 대한 영향을 분석하였다.

피뢰기에 인가되는 교류전압이  $n$  차 고조파 성분인  $v_n$  을 포함하고 있다면 인가전압  $v_t$ 는 식 (3.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_t = \sqrt{2} v_1 \sin \omega t + \sqrt{2} v_n \sin(n\omega t + \phi_n) \text{ [V]} \quad (3.3)$$

여기서,  $n$ 은 3, 5, ...,  $\phi_n$ 은  $n$  차 고조파 전압의 위상이다. 이 때 전체 누

설전류  $i_t$ 는

$$i_t = i_c + i_r \quad [\mu\text{A}] \quad (3.4)$$

가 되고, 용량분 누설전류  $i_c$ 는 기본파와 고조파 성분으로 나눌 수 있으며, 이는 식 (3.5)와 같다.

$$i_c = i_{c1} + i_{cn} \quad [\mu\text{A}] \quad (3.5)$$

여기서,  $i_{cn}$ 은  $n$  차 고조파 성분이다. 저항분 누설전류  $i_r$ 은 3차를 초과한 고조파 성분을 무시한다면, 기본파 성분 이외에 피뢰기 소자 자체의 비선형 저항 특성에 의한 제 3고조파 누설전류 성분과 인가전원의 고조파 성분에 의한 제 3고조파 누설전류 성분으로 나눌 수 있으며, 이는 식 (3.6)과 같다.

$$i_r = i_{r1} + i_{r3} + i_{r3}' \quad [\mu\text{A}] \quad (3.6)$$

여기서,  $i_{r3}$ 는 피뢰기의 비선형 저항 특성에 의한,  $i_{r3}'$ 은 전원의 고조파 성분에 의한 저항분 누설전류의 제 3고조파 성분이다. 식 (3.6)에서와 같이 전원에 고조파 성분이 포함되면 그 크기에 따라 누설전류의 측정값이 달라지며, 이는 피뢰기의 열화와 무관한 누설전류의 증가 또는 감소의 요인이 된다. 따라서 전원에 포함된 고조파 성분의 크기 및 위상에 대하여 측정된 누설전류의 값을 보정할 필요가 있다.

본 연구에서는 누설전류를 열화진단의 지표로 이용하는 기술에 있어 전원에 포함된 제 3고조파 성분의 크기 및 위상의 변화가 측정값에 미치는

영향을 분석하고, 이에 대한 보정계수를 산출하기 위하여 ZnO 피뢰기의 특성 실험으로부터 자체 설계한 PSpice 모델 식 (3.7)을 적용하였다<sup>[62]</sup>.

$$\log(V_{var}) = a_0 + a_1 \log(i) + a_2 \exp^{-\log(i)} + a_3 \exp^{\log(i)} \quad (3.7)$$

여기서  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ 는 각 전류영역에서의 비선형 계수를 나타낸다. 식 (3.7)을 바탕으로 순수 정현파 전압에 제 3고조파 전압을 중첩시키고 제 3고조파 전압의 함유율 및 위상을 변화시키면서 각각의 시뮬레이션을 수행하였으며, 이때 전체 누설전류와 저항분 누설전류의 변화를 분석하였다.

그림 3.9는 피뢰기에 60 Hz 정현파 교류전압을 인가했을 때의 인가전압과 누설전류 파형을 나타낸 것이며, 각각의 전류값은 보정계수를 산출하기 위한 기준으로 사용하였다.

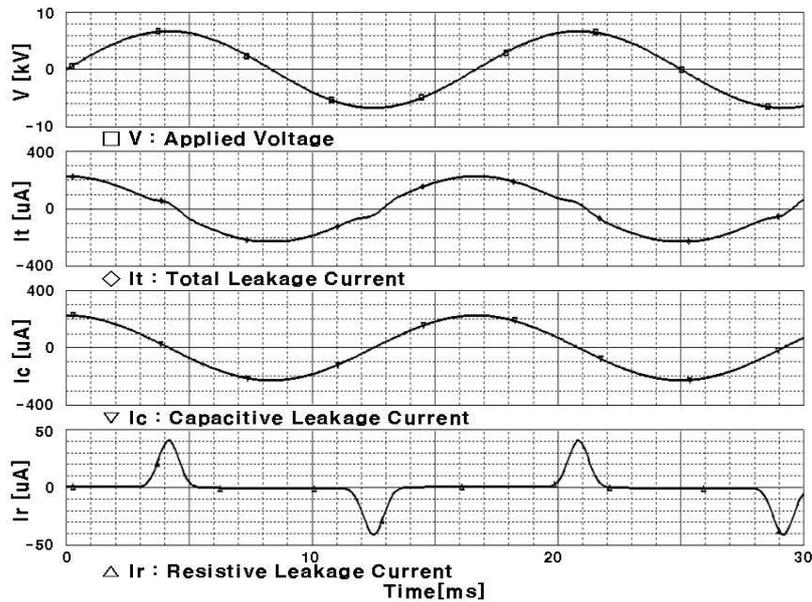
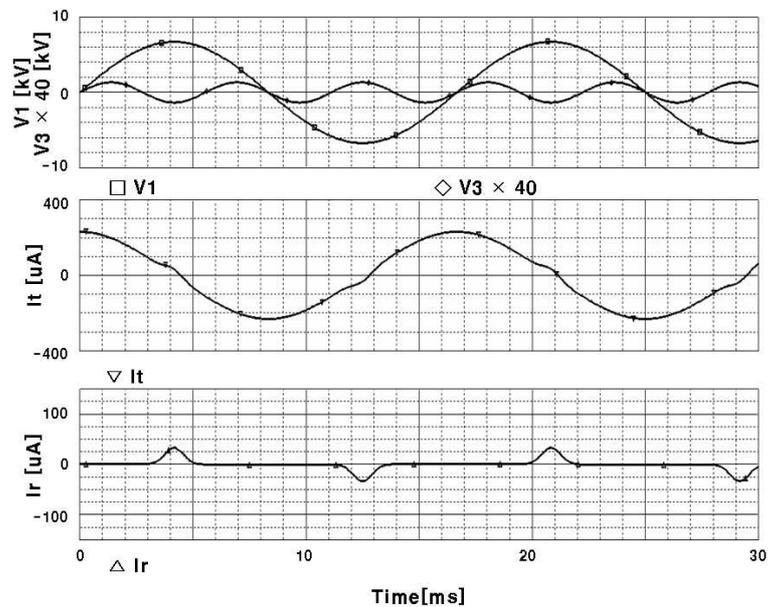


그림 3.9 인가전압과 누설전류 파형

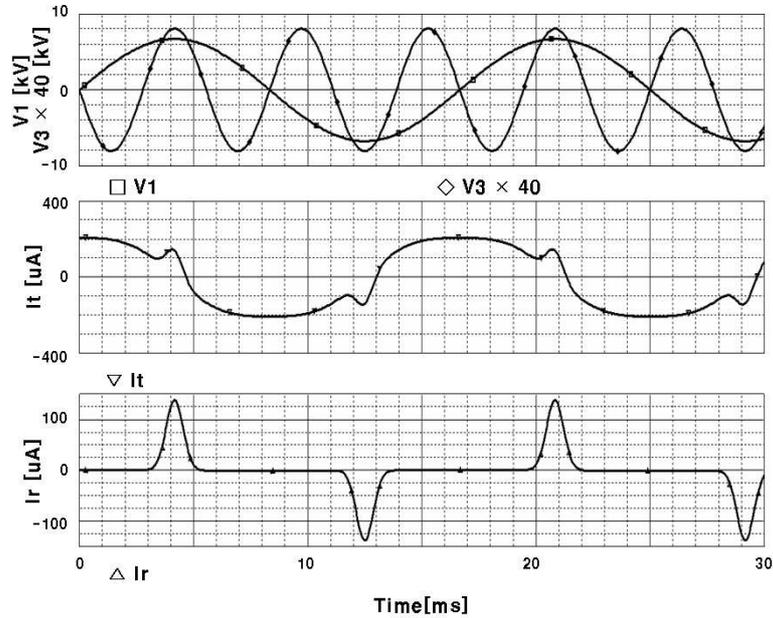
Fig. 3.9 Waveforms of applied voltage and leakage current

국내 전력공급에 있어 전원고조파 함유율에 대한 기준은 66 kV 이하 선로의 경우 3% 이내로 규정하고 있으며, 각 고조파 성분에 대한 기준은 규정되어 있지 않다. 또한 60 Hz 교류전원에 중첩되는 제 3고조파 전압의 위상에 대하여 전체 누설전류 및 저항분 누설전류 크기의 변화는 180°를 기준으로 대칭이 되므로 제 3고조파의 함유율 및 위상의 범위를 3% 이내, 180° 이하로 각각 설정하였다.

본 연구에서는 설계한 ZnO 피뢰기의 PSpice 모델을 이용하여 60 Hz 정현파 교류전압에 제 3고조파 전압을 중첩시킨 전원을 피뢰기에 인가하는 시뮬레이션을 수행하였으며, 기본파 전압에 대한 제 3고조파 전압의 함유율을 0 ~ 3%로, 위상을 0 ~ 180°로 증가시키면서, 고조파 성분에 대한 누설전류의 변화를 분석하였다. 그림 3.10은 제 3고조파 전압을 포함한 전원에 대한 누설전류 파형의 예이며, 저항분 누설전류의 최대값이 가장 작을 때와 클 때를 (a), (b)로 나누어 나타낸 것이다.



(a) (0.5%, 0°)



(b) (3%, 180°)

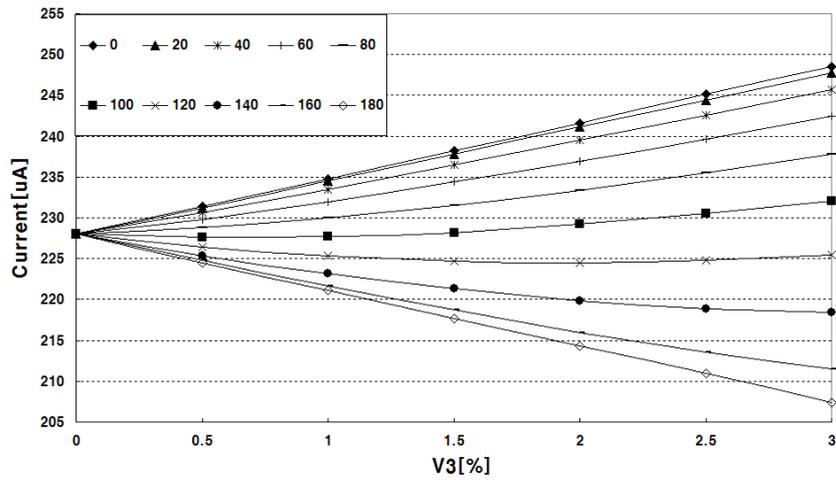
그림 3.10 제 3고조파 전압의 크기와 위상에 따른 파형의 예  
 Fig. 3.10 Example waveforms to magnitude and phase of the 3rd harmonic voltage

시뮬레이션 결과로부터, 그림 3.9의 순수 정현파 전압을 피뢰기에 인가했을 때와는 달리 전체 누설전류와 저항분 누설전류 최대값의 현저한 변화를 확인하였다.

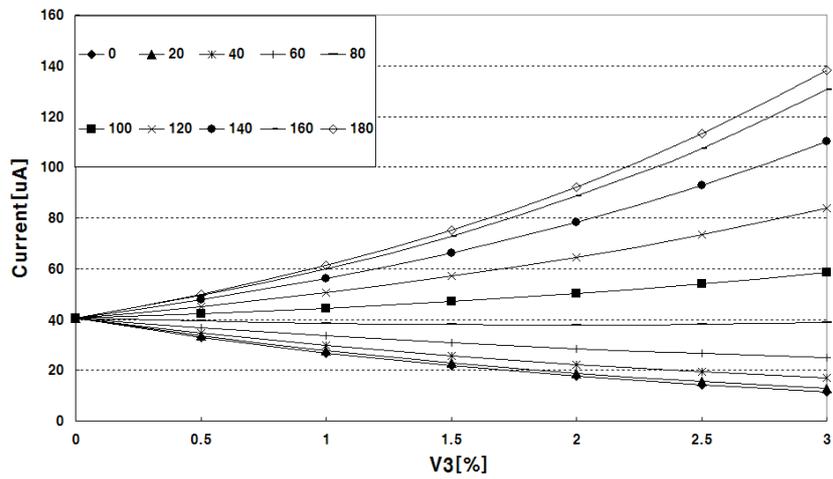
**(1) 전원고조파의 영향 분석**

그림 3.11은 제 3고조파 전압의 함유율에 대한 누설전류의 변화를 각 위상별로 나타낸 것이다. 위상이 0°인 경우, 전체 누설전류의 최대값은 제 3고조파 전압의 함유율이 0 ~ 3%로 변함에 따라 점차 증가하였으며, 이와 반대로 저항분 누설전류의 최대값은 감소하였다. 함유율 3%의 경

우, 순수 정현파 전압을 인가했을 때에 비해 전체 누설전류와 저항분 누설전류는 108.99%, 28.31%로, 위상이 180°인 경우에는 각각 90.96%, 340.26%로 누설전류의 변화를 나타내었다.

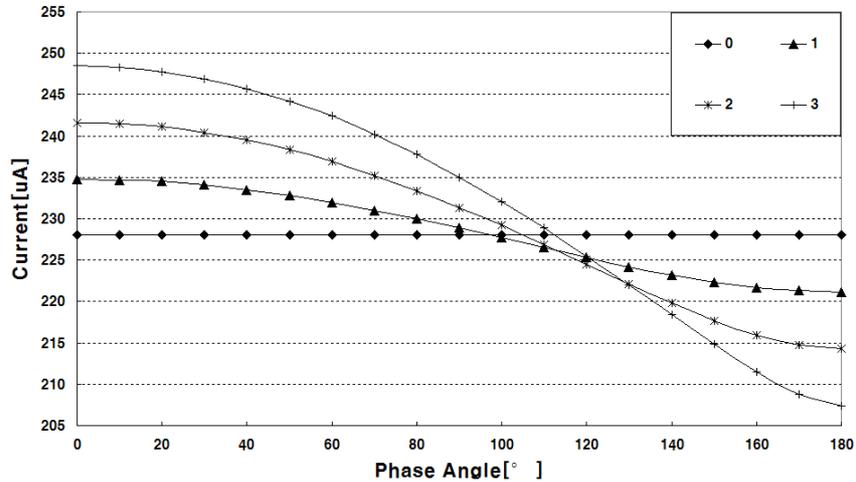


(a) 전체 누설전류

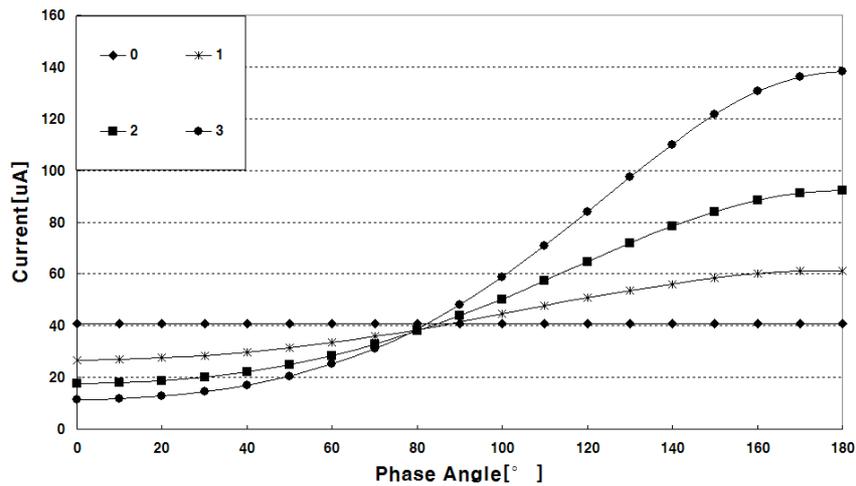


(b) 저항분 누설전류

그림 3.11 제 3고조파 전압의 크기에 따른 누설전류의 변화  
 Fig. 3.11 Variation of leakage current as a function of the magnitude of overlapped 3rd harmonic voltage



(a) 전체 누설전류



(b) 저항분 누설전류

그림 3.12 제 3고조파 전압의 위상에 따른 누설전류의 변화  
 Fig. 3.12 Variation of leakage current as a function of the phase of overlapped 3rd harmonic voltage

그림 3.12는 앞서 수행한 시뮬레이션 결과로부터 제 3고조파 전압의 위상에 대한 누설전류의 변화를 각 함유율에 따라 나타낸 것이다. 그림에

서와 같이 전체 누설전류의 경우 위상이  $0 \sim 180^\circ$ 로 변함에 따라 점차 감소하였으며 반대로 저항분 누설전류는 증가하였다. 또한 변화폭은 함유율에 대하여 비례적으로 증가하였다.

이와 같이 피뢰기를 통하여 흐르는 누설전류는 순수 정현파 전압을 인가하였을 때와는 달리 전원에 포함된 고조파의 함유율 및 위상에 대하여 열화와 무관한 증가 또는 감소가 발생했다. 또한 제 3고조파 전압의 위상이  $0^\circ$ 와  $180^\circ$ 부근에서 함유율이 증가할수록 누설전류의 변화폭이 크게 나타났다. 따라서 열화진단기술에 있어 피뢰기의 열화상태를 변화된 누설전류의 값으로 진단하는 방법은 고조파 성분에 의해 쉽게 왜곡될 수 있으며, 전원에 포함된 고조파 성분을 함유율 및 위상에 대하여 분석하고 이에 대해 측정된 누설전류의 값을 보정할 필요가 있음을 확인하였다.

## (2) 전원고조파에 대한 누설전류의 보정

그림 3.11과 3.12에 나타난 시뮬레이션 결과로부터 순수 정현파 전압을 인가했을 때와 고조파가 함유된 전원을 인가했을 때의 누설전류 비율을 계산하면 고조파 영향에 대한 보정계수를 산출할 수 있다. 그러나 이는 시뮬레이션을 수행한 각 함유율과 위상에 대한 경우만을 나타내므로, 실제 다양하게 변화하는 전원의 고조파 성분에 대하여 능동적인 보정계수 산출 및 적용은 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 전원에 포함된 다양한 고조파 성분에 대응하기 위해, 시뮬레이션으로부터 얻어진 보정계수를 바탕으로 함유율과 위상에 대한 함수로 근사시켜 전원에 포함된 고조파 성분에 대하여 보정계수를 산출하는 방법을 제안하였다. 보정계수는 고조파 전압의 함유율과 위상에 대하여 그림 3.11 및 3.12와 같이 동일한 비선형 곡선으로 나타나므로, 제안한 방법은 비선형 데이터에 대한 근사식의 오차를 최소화하기 위하여

최소 자승 근사법을 적용하였으며 근사식은 5차 다항식으로 계산하였다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 데이터로부터 최소 자승 근사법을 적용하여 보정계수 산출을 위한 수식은 식 (3.8)과 같다.

$$f(V_3)_{\phi_3} = a_{\phi_3} \cdot (V_3)^5 + b_{\phi_3} \cdot (V_3)^4 + c_{\phi_3} \cdot (V_3)^3 + d_{\phi_3} \cdot (V_3)^2 + e_{\phi_3} \cdot V_3 + 100 \quad (3.8)$$

여기서,  $V_3$ 는 제 3고조파 전압의 함유율 %이며,  $a_{\phi_3} \sim e_{\phi_3}$ 는 임의의 위상  $\phi_3$ 에 해당하는 계수이다.

제 3고조파 전압에 대한 근사식의 오차를 확인하기 위하여 임의의 위상에서 제 3고조파 전압의 함유율에 대해 식 (3.8)을 적용하여 계산한 누설전류의 값과 시뮬레이션을 수행한 누설전류의 값을 비교하였다. 표 3.1과 3.2는 이때의 전체 누설전류와 저항분 누설전류의 값을 나타낸 것이다. 두 표에서와 같이 시뮬레이션 결과와 근사식을 적용한 누설전류의 차이는 0.1  $\mu\text{A}$  이내로  $\pm 0.5\%$ 의 정확도를 갖는다.

표 3.1 시뮬레이션과 근사식의 적용 결과 비교(전체 누설전류)  
Table 3.1 Comparison of the simulation and the calculation results by the equation (3.8) (total leakage current)

(단위 :  $\mu\text{A}$ )

$\phi_3 \backslash V_3$	36°		72°		108°		144°	
	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.
0.3 %	229.60	229.69	228.70	228.67	227.40	227.41	226.30	226.32
1.2 %	234.98	234.96	231.58	231.53	226.70	226.70	221.90	221.94
2.7 %	244.30	244.34	238.20	238.18	228.70	228.74	217.30	217.31

표 3.2 시뮬레이션과 근사식의 적용 결과 비교(저항분 누설전류)  
 Table 3.2 Comparison of the simulation and the calculation results  
 by the equation (3.8) (resistive leakage current)

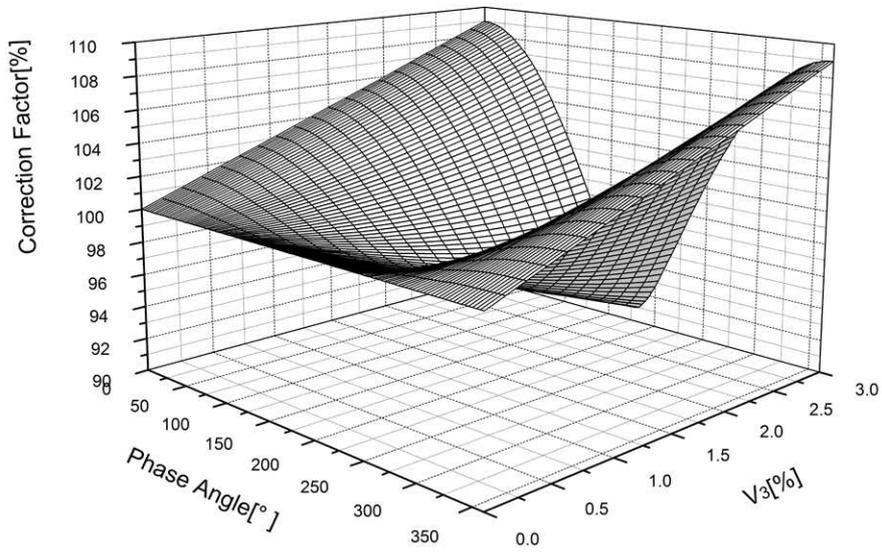
(단위 :  $\mu\text{A}$ )

$\phi_3$ $V_3$	36°		72°		108°		144°	
	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.
0.3 %	36.77	36.77	39.15	39.17	42.28	42.25	44.97	44.93
1.2 %	27.40	27.40	35.71	35.73	48.44	48.47	61.17	61.15
2.7 %	17.25	17.24	32.74	32.75	64.13	64.14	103.40	103.33

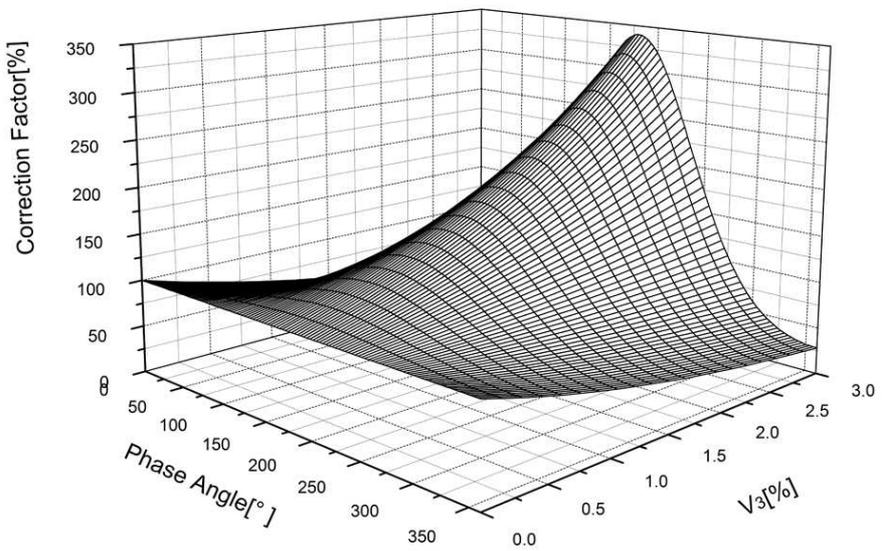
그림 3.13은 제안한 근사식을 이용하여 제 3고조파 전압의 함유율과 위상에 대한 전체 누설전류와 저항분 누설전류의 보정계수를 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 이와 같은 데이터를 열화진단 시스템에 적용한다면 피뢰기에 고조파를 포함한 전원이 인가된 상태라도 정확한 누설전류 측정이 가능함은 물론 열화진단의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

ZnO 피뢰기의 PSpice 모델을 적용한 시뮬레이션 결과, 제 3고조파 전압의 함유율에 대한 누설전류의 변화는 각 위상에 따라 증가 및 감소의 경향이 다르게 나타났다. 제 3고조파 전압의 위상에 대한 누설전류의 변화는 전체 누설전류의 경우 위상이 0 ~ 180°로 변화함에 따라 점차 감소하였으며, 반대로 저항분 누설전류는 점차 증가하였다.

또한 제 3고조파 전압의 위상이 0°와 180°부근에서, 그리고 함유율이 증가할수록 누설전류의 변화폭이 크게 나타났다. 즉, 피뢰기의 누설전류는 기본파 전압을 인가하였을 때와는 달리 전원전압에 포함된 고조파 전압의 크기 및 위상에 대하여 열화와 무관한 증가 또는 감소가 나타남을 확인하였다.



(a) 전체 누설전류



(b) 저항분 누설전류

그림 3.13 누설전류의 보정계수

Fig. 3.13 Correction factors of leakage currents

또한 다양하게 변화하는 전원의 고조파 성분에 대하여 능동적인 보정계수 산출 및 적용을 할 수 있도록 시뮬레이션 결과로부터 계산된 보정계수를 5차 다항식으로 근사하였으며, 임의의 함유율 및 위상에 대한 시뮬레이션 결과와 보정계수 근사식을 이용하여 계산한 누설전류 값은 오차가  $\pm 0.5\%$  이내였다. 따라서 본 연구에서 제안한 보정계수 산출방법을 피뢰기 열화 진단기술에 적용한다면 보다 정확한 진단이 가능할 것으로 기대한다.

### 3.4 저항분 누설전류 검출 알고리즘

피뢰기 열화진단에 있어 저항분 누설전류는 ZnO 소자의 열화시 초기 값에 비해 큰 증가폭을 나타내므로 초기 열화뿐만 아니라 운전중에 진행되고 있는 열화상태를 진단할 수 있는 최적의 파라미터이다. 하지만 소자에 흐르는 저항분 누설전류를 검출하기 위해서는 고정도의 측정기술 및 알고리즘이 필요하고 고감도 변류기, 차동증폭기 등의 부가적인 장치를 이용하여 전체 누설전류로부터 추출해야 한다. 전체 누설전류 중에서 저항분 누설전류를 검출하기 위한 방법으로는 자기소거법, 동기정류법 및 제 3고조파 누설전류 측정법 등 다양한 알고리즘이 사용되고 있다.

본 연구에서는 피뢰기 양단에 인가되는 전압과 전체 누설전류로부터 피뢰기 진단에 있어 중요한 파라미터인 저항분 누설전류를 계산하는 새로운 방식의 검출 알고리즘을 적용하였으며, 실험결과로부터 저항분 누설전류의 크기와 파형을 정확하게 분석할 수 있었고 하드웨어와 알고리즘이 간단하여 실적용도 용이할 것으로 기대된다<sup>[63]</sup>.

전체 누설전류 중에서 저항분 누설전류를 검출하는데 이용되고 있는 동기정류법과 자기소거법은 모두 용량분 누설전류와 같은 소거파를 생성시켜 전체 누설전류에서 용량분 누설전류를 제거함으로써 저항분 누설전류를 얻는다. 따라서 위상 검출에 약간의 오차가 있어도 저항분 누설전류

측정에 큰 오차를 포함하게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서 제안한 저항분 누설전류 검출 알고리즘은 그림 3.14를 통해 설명할 수 있다. 그림 3.14에서 피뢰기에 인가되는 전압의 크기가 같은 두 점( $i, j$ )에서는 용량분 누설전류와는 달리 저항분 누설전류의 크기 및 극성이 같기 때문에 등전위점에서의 저항분 누설전류를 검출할 수 있다는 원리를 이용한 것이며, 본 연구에서 ‘등전위 검출법’이라고 제안하였다.

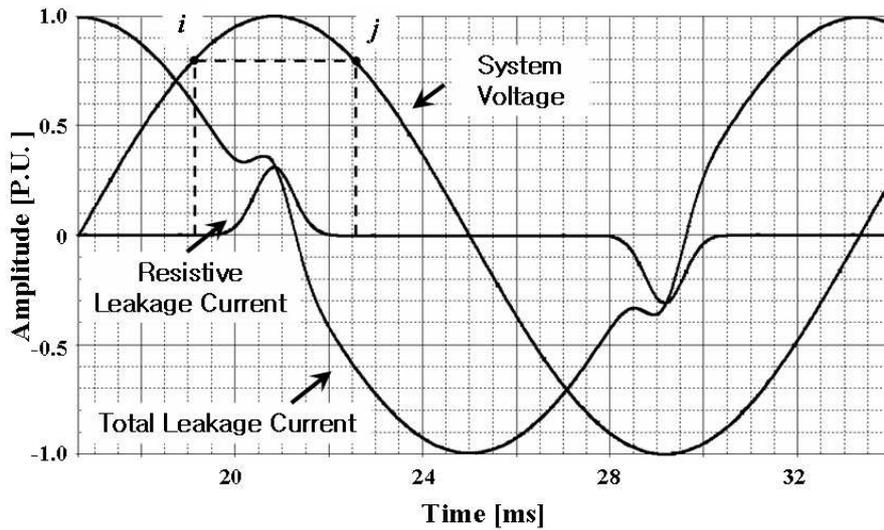


그림 3.14 인가전압과 누설전류의 파형

Fig. 3.14 Waveforms of applied voltage and leakage current

그림 3.14의 전체 누설전류 파형  $I(t)$ 중에 인가전압  $V(t)$ 의 크기가 같은 시간인  $i$ 와  $j$ 를 비교하면, 전체 누설전류의 값은 저항분 누설전류와 용량분 누설전류의 합이므로 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 I_r(i) + I_c(i) &= I_t(i) \quad [\mu\text{A}] \\
 I_r(j) + I_c(j) &= I_t(j) \quad [\mu\text{A}]
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

이 때  $i, j$ 에서

$$V(i) = V(j) \quad [V] \tag{3.10}$$

이면

$$\begin{aligned}
 I_r(i) &= I_r(j) = I_r \quad [\mu\text{A}] \\
 I_c(i) &= -I_c(j) \quad [\mu\text{A}]
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

가 되므로 식 (4.7)과 식(4.9)으로부터

$$I_r(i) + I_r(j) = I_t(i) + I_t(j) \quad [\mu\text{A}] \tag{3.12}$$

이며,

$$2I_r = I_t(i) + I_t(j) \quad [\mu\text{A}] \tag{3.13}$$

가 되어  $i$ 와  $j$ 점에서의 저항분 누설전류는 다음과 같이 계산된다.

$$I_r = \frac{I_t(i) + I_t(j)}{2} \quad [\mu\text{A}] \tag{3.14}$$

즉, 전압이 같은 두 점( $i, j$ )에 대응하는 전체 누설전류의 값으로부터 저항분 누설전류를 계산할 수 있으며, 각 점에서의 크기를 연속적으로 나타내면 저항분 누설전류의 파형을 나타낼 수 있다.

본 연구에서 제안한 등전위 검출법은 전압의 최대지점( $dv/dt=0$ )에서만 측정을 한다면 IEC 60099-5에서 제안한 저항분 누설전류 검출법과 동일하다. 그러나 인가전압의 각 점에 따라 연속적으로 나타내면 저항분 누설전류의 파형 및 이를 이용한 손실전력과 같은 진단 파라미터를 추가적으로 계산할 수 있는 장점이 있다.

## 제 4 장 전문가 시스템의 설계 및 제작

열화된 피뢰기가 계속 방치되면 누설전류가 점차 증가하여 결국에는 지락이나 열폭주에 의한 피뢰기 폭발사고를 유발하게 된다. 이는 전력기기 및 설비의 보호를 목적으로 설치한 피뢰기가 오히려 전력공급의 중단과 같은 대형사고를 초래하여 무중단 전력공급의 신뢰성에 악영향을 미치게 된다. 따라서 운전중인 피뢰기의 상태를 상시 관측하고 열화진전에 따른 절연능력의 저하를 감시하며 교체 및 적절한 대책이 필요한 피뢰기를 관리자에게 통보할 수 있는 지능적인 시스템이 요구된다. 더욱이 최근 전력 설비의 운용에 있어 무인 자동화 설비가 늘어나고 있기 때문에 소수의 인원으로 작업효율을 극대화하기 위해서는 비전문가도 쉽게 조작할 수 있고 진단기술에 있어 기기별 최적화된 전문가 시스템의 도입이 반드시 필요하다. 일반인이 피뢰기에서 검출한 데이터로부터 열화상태를 판단하기란 불가능하며, 전문가라고 하더라도 이상 징후 발생시 정확한 진단결과를 도출하기란 매우 어렵기 때문에 최근에는 주요설비의 유지, 관리를 위하여 전문가들의 풍부한 경험 및 지식을 데이터화 한 뒤, 이를 바탕으로 다양한 분석과 적절한 판단을 할 수 있는 전문가 시스템을 활용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 운전중인 변전소의 GIS용 피뢰기를 대상으로 누설전류 검출 방식을 적용하여 상태감시 및 열화진단을 할 수 있는 전문가 시스템을 설계·제작하였다<sup>[64]</sup>.

제안한 전문가 시스템은 그림 4.1과 같이 피뢰기로부터 진단 파라미터를 측정 및 분석하는 데이터 취득 모듈과 전송된 데이터를 수신받아 피뢰기의 상태감시 및 열화진단을 수행하는 진단 모듈로 구성된다. 데이터 취득 모듈은 피뢰기에 인가되는 전원전압과 전체 누설전류를 측정하고,

DFT(Discrete Fourier Transform)를 이용하여 각 고조파 성분(3 ~ 9차)을 분석하며 피뢰기 주변온도와 표면온도를 검출한다. 특히 전용의 알고리즘인 등전위 검출법을 이용하여 피뢰기 열화진단의 중요한 지표인 저항분 누설전류를 검출할 수 있으며 서지전류의 유입시각, 극성 및 크기를 측정할 수 있는 서지카운터를 내장하고 있다. 측정된 데이터는 무선 센서 네트워크의 일종인 ZigBee 모듈을 통해 원격 PC의 진단 모듈로 전송된다. 진단 모듈은 JESS를 기반으로 설계하였으며, If-Then 조합에 의한 전방향 추론방식을 적용하여 다양한 규칙에 따라 피뢰기의 열화상태를 진단할 수 있도록 구현하였다.



그림 4.1 전문가 시스템의 구성  
Fig. 4.1 Configuration of the expert system

#### 4.1 데이터 취득 모듈

피뢰기의 성능평가나 열화진단, 수명예측에는 전체 누설전류와 제 3고조파 누설전류의 크기 이외에 여러 가지 파라미터를 복합적으로 측정하고 분석해야 한다. 따라서 본 연구에서는 피뢰기 진단에 있어 주요 파라미터인 전체 누설전류, 제 3고조파 누설전류, 저항분 누설전류, 제 5 ~ 9고조파 누설전류, 인가전압, 주위온도, 표면온도 및 피뢰기에 유입된 서지의 횟수 등과 같은 다양한 데이터를 동시에 측정·분석하여 이를 진단 모듈로 전송할 수 있는 데이터 취득 모듈을 설계·제작하였다. 제안한 장치는 피뢰기 열화와 관계있는 여러 가지 파라미터에 대하여 측정 및 분석이 가

능하므로 단순히 누설전류의 크기만을 측정하는 기존의 진단방식에 비해 진단의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.1.1 전체 누설전류 검출

피뢰기는 외부에서 발생하는 낙뢰와 개폐서지 등의 이상전압으로부터 선로와 기기를 보호하기 때문에 피뢰기 접지선 측에 설치되는 영상변류기는 5kA 이상의 뇌충격전류가 인가된 후에도 그 전기적 특성을 유지해야 한다. 또한, 영상변류기는 취부가 용이한 구조이고 대전류에 의해 자화된 후 짧은 시간 내에 고유의 특성으로 복구하는 것을 선정해야 한다.

영상변류기의 선정에는 접지선의 굵기와 절연거리 확보를 고려하여 접지선이 관통되는 내부의 직경이 80 mm 인 것을 적용하였으며, 미소누설전류를 측정할 수 있도록 60 dB의 증폭율을 갖는 차동증폭회로를 설계하였다. 그림 4.2는 설계·제작한 전체 누설전류 검출회로의 세부 구성이다.

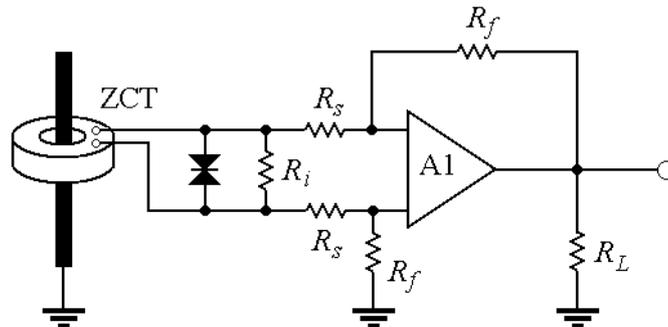


그림 4.2 누설전류 검출회로

Fig. 4.2 Detection circuit of leakage current

회로에서  $R_i$ 는 입력전류에 대한 출력전압의 특성 및 증폭회로의 잡음과 선형성에 중요하게 작용하므로 구체적인 실험적 검토를 수행하여 결정하였다.

그림 4.3은 그림 4.2의 회로에 대한 실험결과이다. 함수발생기를 이용하여 전류를 인가하고 주파수는 60 Hz로 고정한 뒤, 전류를 증가시키면서 출력전압을 측정하였으며 서지전류에 대한 자화특성을 평가하기 위하여 8/20  $\mu$ s, 20 kA의 표준 뇌충격전류를 10회씩 10회에 걸쳐 인가하였다.

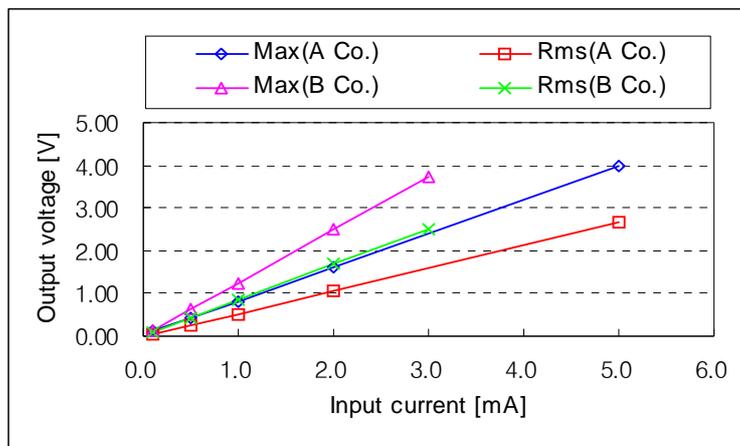
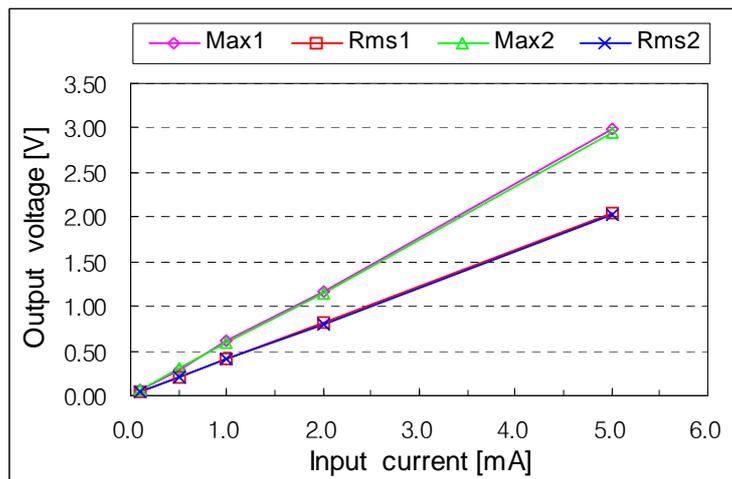
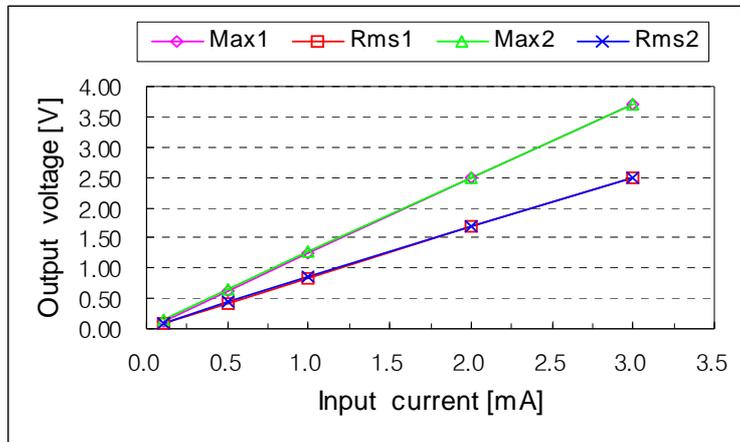


그림 4.3 영상변류기의 입출력 특성(서지 인가 전)  
Fig. 4.3 Input and output characteristics of ZCTs(before surge)



(a) A사



(b) B사

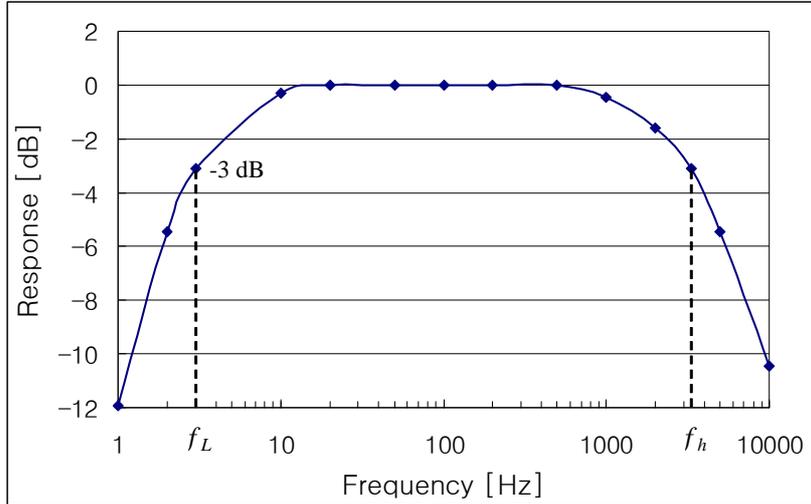
그림 4.4 영상변류기의 입출력 특성(서지 인가 후)

Fig. 4.4 Input and output characteristics of the ZCT(after surge)

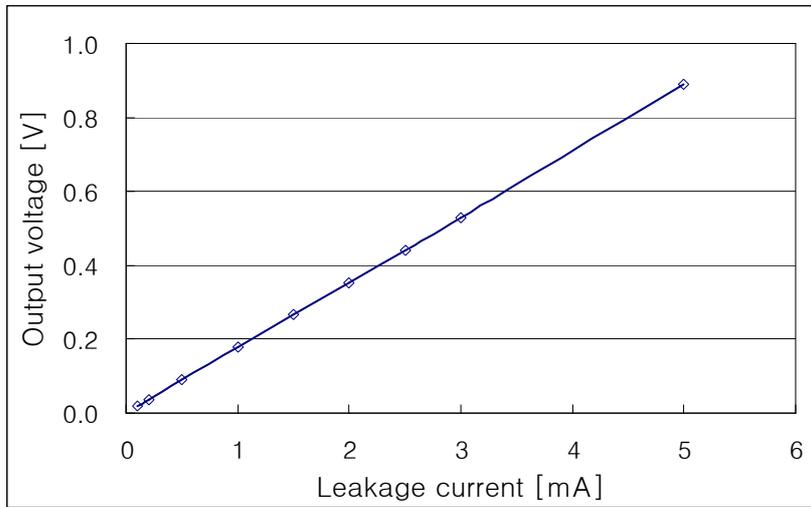
그림 4.4는 서지를 인가한 후의 입출력 특성을 나타낸다. 실험결과로부터 서지인가 전·후의 출력전압 크기에 변화가 없고, 입력전류에 대한 출력전압의 크기가 선형적으로 증가하는 제품을 선정하였다.

본 연구에서 설계 및 제작한 누설전류 검출회로의 성능을 평가하기 위해 함수발생기를 이용하여 주파수 대역 및 응답특성에 대한 평가를 하였으며 그 결과를 그림 4.5에 나타내었다. 그림 4.5 (a)에서 -3 dB가 되는 센서의 주파수 대역은 3 Hz ~ 3.3 kHz 이며, 감쇄가 전혀 발생하지 않는 0 dB의 주파수 범위는 20 Hz ~ 700 Hz 범위이다.

따라서 본 연구에서 피뢰기의 진단 파라미터로 사용하는 60 Hz 기본파 누설전류에서 540 Hz 제 9고조파 누설전류 까지의 측정에 있어서 전혀 감쇄를 일으키지 않는 것으로 확인되었다.



(a) 주파수 특성



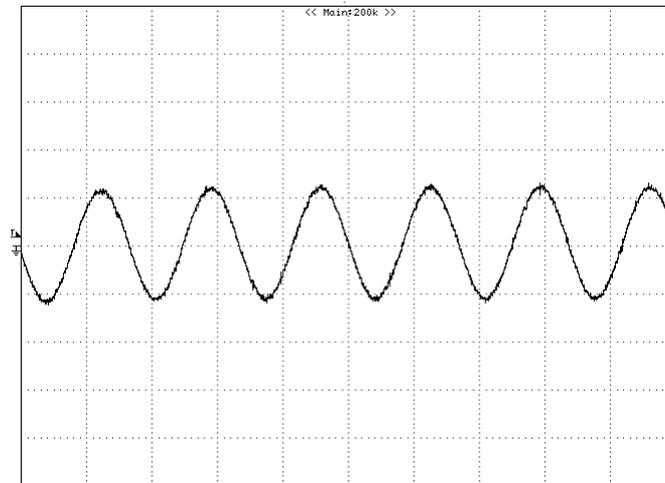
(b) 전압-전류 특성

그림 4.5 누설전류 검출회로의 특성  
 Fig. 4.5 Characteristics of the leakage current detection circuit

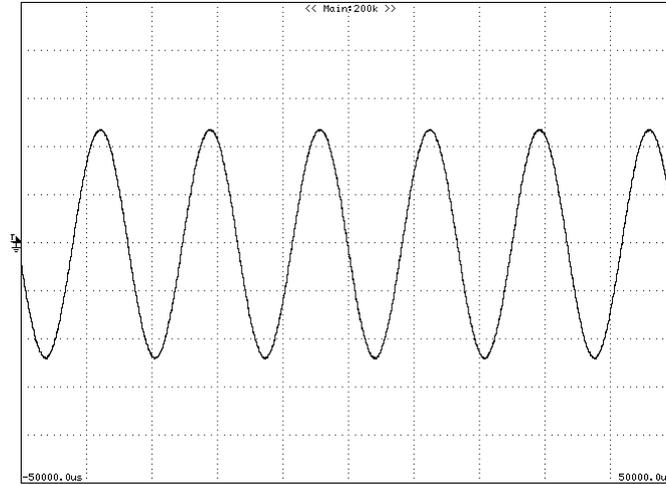
누설전류에 대한 센서의 출력특성은 그림 4.5 (b)와 같이 측정되었다. 증폭기의 잡음레벨과 공급전원을 고려할 때 안정적으로 검출할 수 있는 전류 범위는  $100\ \mu\text{A} \sim 5\ \text{mA}$ 이고, 측정 범위 안에서 센서의 응답특성은 전 구간에서 선형적인 특성을 보였으며, 검출 감도는  $180\ \text{mV}/\text{mA}$  이다. 이러한 특성은 GIS용 피뢰기의 경우 정상상태에서 전체 누설전류의 범위가  $200 \sim 500\ \mu\text{A}$  정도이고, 다소 위험 수준의 열화상태로 판단할 수 있는 누설전류의 크기가  $700\ \mu\text{A} \sim 1\ \text{mA}$  이상이므로 GIS용 피뢰기의 상태진단에 충분한 특성을 가지는 것으로 평가되었다.

또한 함수발생기를 이용하여 측정한 누설전류의 파형은 그림 4.6과 같으며,  $100\ \mu\text{A}$ 의 누설전류에 대해서도 외부 전자계 및 증폭회로 오프셋(off-set) 등의 영향을 받지 않고 안정적으로 측정할 수 있음을 확인하였다.

따라서 GIS용 피뢰기의 누설전류 검출에 충분히 적용될 수 있을 것으로 판단된다.



(a)  $100\ \mu\text{A}$



[100 mV/div, 10 ms/div]

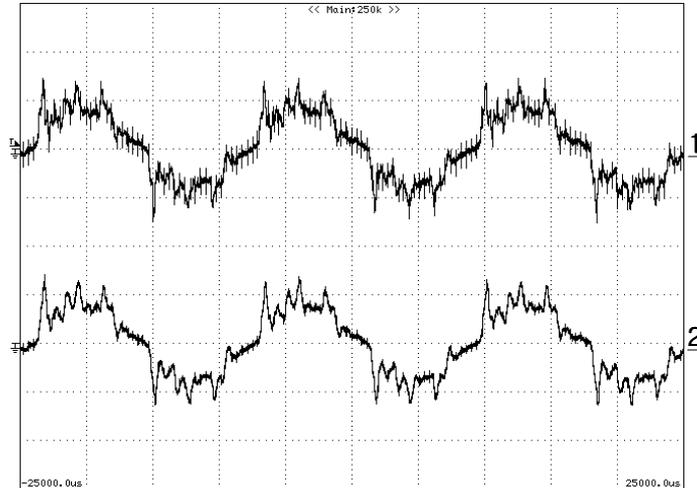
(b) 1 mA

그림 4.6 누설전류에 대한 응답 파형 예

Fig. 4.6 Typical response waveforms of leakage current

기본 특성평가 결과를 통해 누설전류 검출 회로가 피뢰기의 누설전류 검출에 충분한 성능이 있음을 확인한 후 실제 피뢰기를 대상으로 누설전류 검출 특성을 평가하였다. 실험에 사용된 피뢰기는 18 kV, 5 kA의 정격을 갖는 것으로 전력계통에서 일정기간 사용 후 일괄 교체시 수거된 것이며 초기상태와 비슷한 특성을 나타내었다.

정상운전 상태와 동일하게 피뢰기 양단에 13.2 kV를 인가하고 누설전류 검출 회로에서 누설전류를 측정된 결과, 그림 4.7에 나타낸 바와 같이 약 230  $\mu$ A의 누설전류가 측정되었다. 그림 4.7에서 채널 1의 파형은 증폭기 출력단에서 검출한 것으로 잡음이 많이 포함되어 있음을 알 수 있으며, 채널 2의 파형은 저역통과 필터회로를 거쳐 검출한 것으로 필터의 차단주파수 1 kHz 이상의 주파수 성분이 제거된 것이다.



Ch. 1 : 증폭기 출력 [300  $\mu$ A/div, 5 ms/div]  
 Ch. 2 : LPF 출력 [300  $\mu$ A/div, 5 ms/div]

그림 4.7 누설전류 검출 파형

Fig. 4.7 Typical waveforms of leakage current

누설전류 검출시 외부로부터 전달되는 잡음은 고조파 분석 및 저항분 누설전류의 계산에 영향을 주어 많은 오차를 유발하게 된다. 그러므로 외부 잡음에 대한 영향을 제거시킬 필요가 있으며, 그림 4.7의 결과로부터 본 연구에서 설계·제작한 전체 누설전류 검출 회로는 누설전류의 측정뿐만 아니라 이에 포함된 고조파 성분의 분석과 저항분 누설전류 검출에 있어서도 고정도 분석이 가능함을 알 수 있다.

#### 4.1.2 고조파 분석

피뢰기의 누설전류에 포함된 고조파 분석시 연산증폭기의 조합에 의한 능동성 필터회로를 하드웨어적으로 구성하여 적용하는 경우에는 연산증폭기와 같은 소자의 특성이나 온도, 습도 등의 주위환경 변화에 따라 오차

가 생기는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 아날로그 회로로 구성되는 필터회로를 배제하고, 그림 4.8과 같이 고속의 샘플링이 가능한 A/D 컨버터를 통해 누설전류를 측정하고, 고성능 원칩 마이크로프로세서에서 디지털 연산처리를 통해 고조파 분석이 이루어지도록 구성하였다. 여기에 적용한 디지털 신호처리 기법은 연속시간 신호의 주파수 분석에 유용한 이산 푸리에 변환(DFT)을 사용하였다.

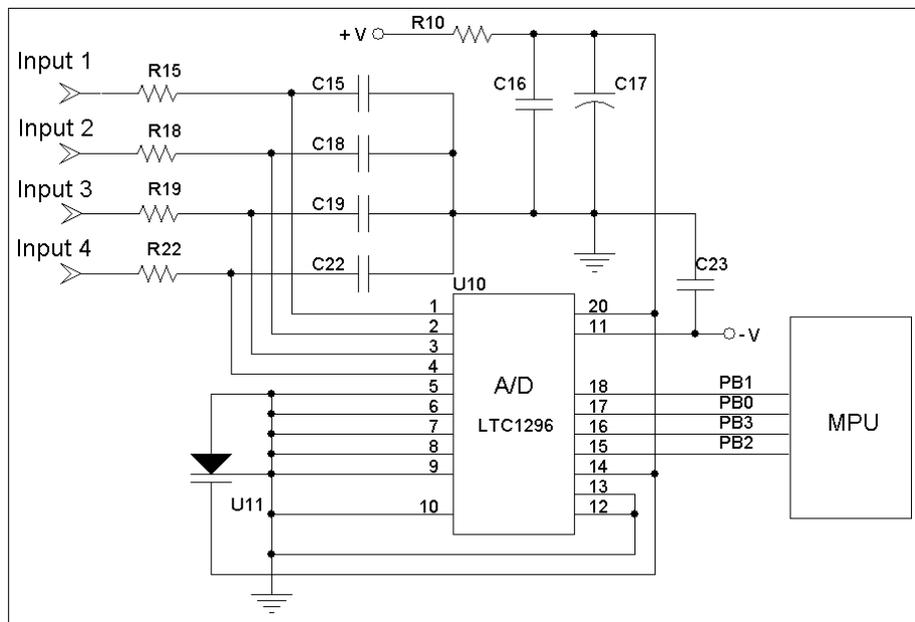


그림 4.8 고속 A/D 변환 회로

Fig. 4.8 Circuit of the high-speed A/D conversion

먼저 고속 샘플링을 위해 적용한 A/D 컨버터는 12 bit로 구성된 LTC 1296으로 입력되는 누설전류 파형에 대해 한주기당 160 포인트의 샘플링 작업이 이루어지므로 60 Hz 주파수를 갖는 누설전류 신호의 고조파 분석에 충분한 특성을 갖는다. A/D 컨버터에서 측정된 신호는 4-wire 직렬 인터페이스를 통해 MPU(Atmega 8L, Atmega 128)로 전달된다.

MPU에서는 DFT 알고리즘을 적용하여 제 3, 5, 7, 9고조파에 대한 분석을 수행하게 된다. 이 방식은 주위환경의 영향을 받지 않으므로 아날로그 회로로 구성된 필터회로를 사용할 때보다 정확한 분석이 가능하였다.

전체 누설전류 검출회로를 통해 측정된 누설전류는 그림 4.9와 같은 과정을 통해서 고조파 분석이 이루어진다. 누설전류 신호  $s_c(t)$ 에 대하여 중첩을 피하기 위한 사전 필터링(anti-aliasing)을 행하고, 연속시간 신호를 이산시간 신호로 변환한 후 최종적으로 DFT를 수행하게 된다.

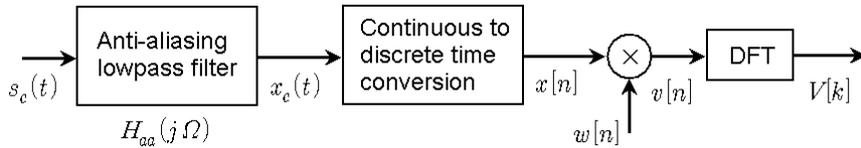


그림 4.9 연속시간 신호에 대한 DFT 해석 과정

Fig. 4.9 DFT analysis process for the continuous time signal

입력신호인 누설전류는 사인함수의 형태를 가지는 연속시간 신호이므로

$$s_c(t) = A_0 \cos(\Omega_0 t + \theta_0) + A_1 \cos(\Omega_1 t + \theta_1) \quad -\infty < t < \infty \quad (4.1)$$

와 같이 나타내고,  $s_c(t)$ 의 샘플링에서 중첩이나 양자화 오차가 없다고 가정하면 이산시간 변환  $x[n]$ 은 식 (4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x[n] = A_0 \cos(\omega_0 n + \theta_0) + A_1 \cos(\omega_1 n + \theta_1) \quad -\infty < n < \infty \quad (4.2)$$

여기서  $\omega_0 = \Omega_0 T$ ,  $\omega_{01} = \Omega_1 T$ 이고, 식 (4.2)에 창함수를 적용하면

$$v[n] = A_0 w[n] \cos(\omega_0 n + \theta_0) + A_1 w[n] \cos(\omega_1 n + \theta_1) \quad -\infty < n < \infty \quad (4.3)$$

이다.  $v[n]$ 의 푸리에 변환을 구하기 위하여 복소 지수항으로 전개하고, 주파수 변이 성질을 이용하면

$$v[n] = \frac{A_0}{2} w[n] e^{j\theta_0} e^{j\omega_0 n} + \frac{A_0}{2} w[n] e^{-j\theta_0} e^{-j\omega_0 n} + \frac{A_1}{2} w[n] e^{j\theta_1} e^{j\omega_1 n} + \frac{A_1}{2} w[n] e^{-j\theta_1} e^{-j\omega_1 n} \quad (4.4)$$

로 되고, 창함수를 적용한 푸리에 변환은

$$V(e^{j\omega}) = \frac{A_0}{2} e^{j\theta_0} W(e^{j(\omega-\omega_0)}) + \frac{A_0}{2} e^{-j\theta_0} W(e^{j(\omega+\omega_0)}) + \frac{A_1}{2} e^{j\theta_1} W(e^{j(\omega-\omega_1)}) + \frac{A_1}{2} e^{-j\theta_1} W(e^{j(\omega+\omega_1)}) \quad (4.5)$$

이다. 여기에 디지털 필터를 적용하면

$$H(j\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_1 < |\omega| < \omega_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.6)$$

로 되므로 원하는 고조파 주파수를 선정하면 DFT에 의해 고조파에 해당하는 주파수만이 통과하게 되어, 하드웨어적인 대역통과필터 없이도 고조파 분석이 가능하다.

#### 4.1.3 저항분 누설전류 검출

피뢰기 진단에 있어 가장 중요한 파라미터인 저항분 누설전류의 검출은 피뢰기 양단에 인가되는 전압과 전체 누설전류로부터 본 연구에서 제안한 새로운 방식의 검출 알고리즘인 등전위 검출법을 적용하여 계산한다.

그림 4.10은 저항분 누설전류를 검출하기 위한 회로의 구성을 나타내며, LPF를 통과한 인가전압과 전체 누설전류는 A/D 컨버터 및 마이크로프로세서에서 식 (3.14)를 통해 전압의 크기가 같은 두 점( $i, I_t(i)$ ), ( $j, I_t(j)$ )에서의 전체 누설전류 값으로부터 저항분 누설전류 값을 계산하게 된다.

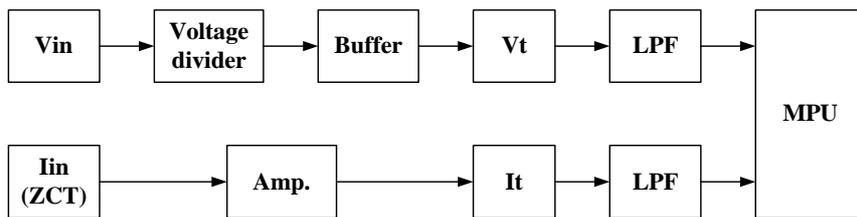


그림 4.10 저항분 누설전류 검출회로의 구성  
 Fig. 4.10 Configuration of the detection circuit for resistive leakage current

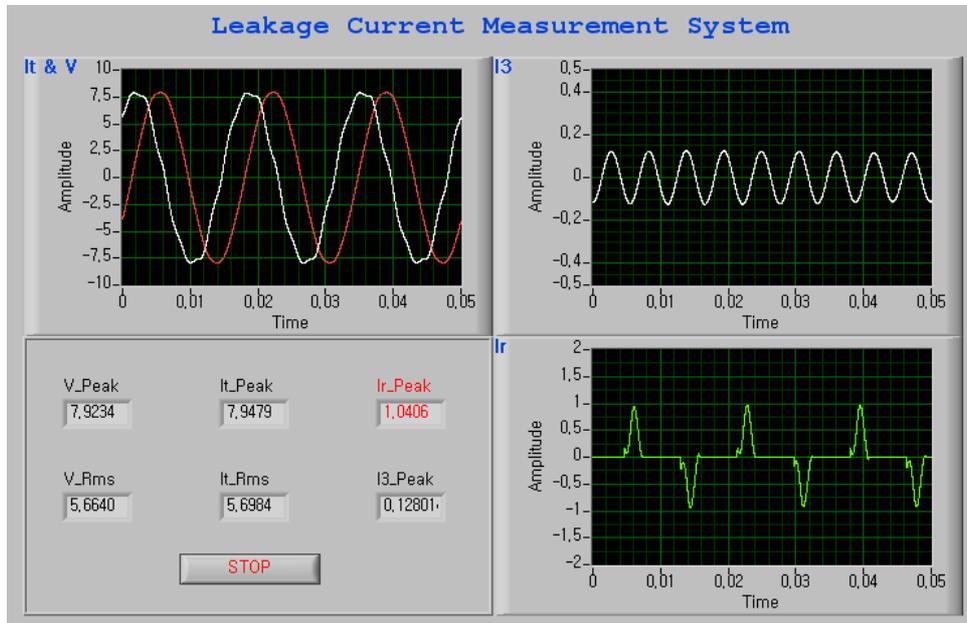


그림 4.11 저항분 누설전류 검출과형의 예  
 Fig. 4.11 Example of the analyzed resistive leakage current

그림 4.11은 저항분 누설전류 검출회로의 특성을 파악하기 위하여 마이크로프로세서 내부에서 연산되는 일련의 과정을 LabView 8.0 소프트웨어를 이용하여 PC에서 구현한 것이다. 그림에서와 같이 운전전압과 전체 누설전류로부터 저항분 누설전류  $I_r$ 의 파형과 측정값을 계산할 수 있으며, 이는 진단 모듈에서 중요한 열화진단 파라미터로 사용된다.

#### 4.1.4 누설전류 보정 알고리즘

관통형 영상변류기로부터 검출되는 전체 누설전류는 앞서 수행한 전원전압과 누설전류, 전원고조파와 누설전류에 대한 연구결과로부터 피뢰기에 인가되는 전원전압의 변화와 전원에 포함된 제 3고조파 전압의 크기 및 위상에 따라 피뢰기의 열화와 무관한 누설전류의 증·감이 발생함을 알 수 있었다.

따라서 전체 누설전류로부터 분석되는 진단 파라미터인 전체 누설전류 최대값과 실효값, 저항분 누설전류 최대값, 제 3, 5, 7, 9고조파 실효값은 그림 4.12와 같은 누설전류 보정 알고리즘을 통해 보정된 후 진단 모듈로 전송되어 피뢰기 열화진단에 사용된다.

전체 누설전류의 최대값과 실효값은 전원전압의 변동과 전원전압에 포함된 제 3고조파 전압에 대해서 각각 보정되어 진단 파라미터로서 사용되며, 제 3, 5, 7, 9고조파의 경우는 전원전압의 변동과 제 3고조파 전압에 대해서 보정된 전체 누설전류에 DFT 알고리즘을 적용하여 각각의 고조파 성분을 계산하게 된다.

저항분 누설전류의 경우에는 3번의 보정단계를 거치게 된다. 먼저 전원전압 변동에 대한 보정계수가 적용되어 전체 누설전류가 1차 보정되고, 다음에는 제 3고조파 전압에 대한 전체 누설전류 보정계수가 적용되어 1차 보정된 전체 누설전류가 2차 보정된다. 2차 보정이 끝난 전체 누설전

류는 본 연구에서 제안한 등전위 검출법을 통해서 저항분 누설전류 값이 계산되며, 마지막으로 3고조파 전압에 의한 저항분 누설전류 보정계수가 적용되어 진단 파라미터로서 사용되는 최종 단계의 저항분 누설전류 값이 산출된다.

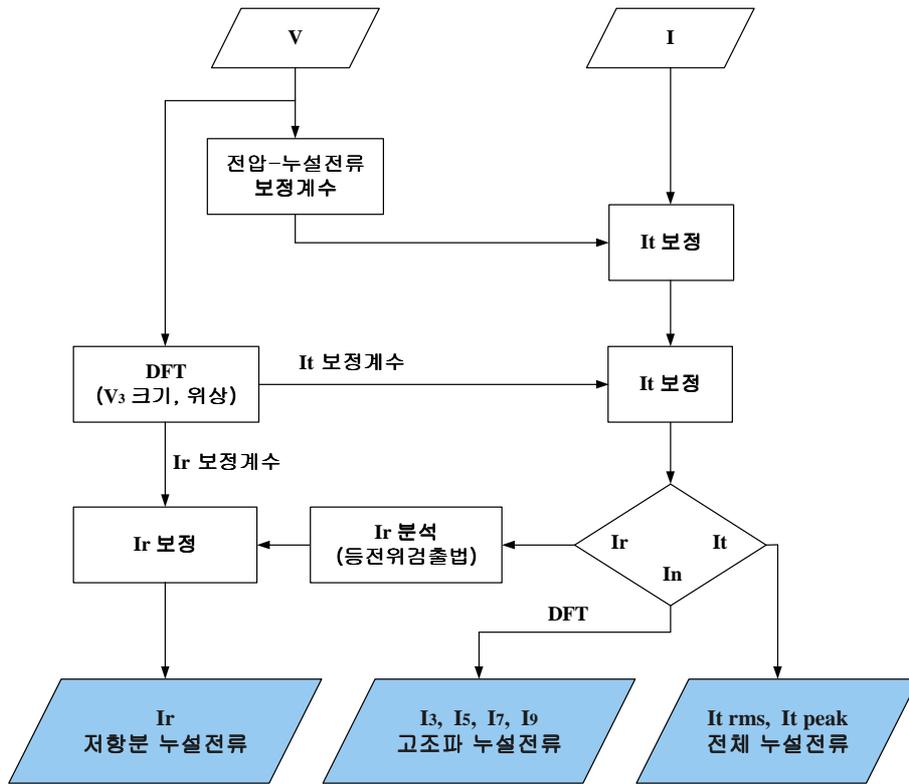


그림 4.12 누설전류 보정 알고리즘

Fig. 4.12 Correction algorithm for leakage currents

#### 4.1.5 서지 카운터

피뢰기는 전원 과전압에 대해서도 열화가 진행되지만, 전원 전압이 안정한 조건에서는 서지에 의한 방전전류의 크기와 빈도가 수명에 가장 큰 영향을 주므로 서지 카운터에서 제공하는 정보로 1차적 관리를 하고 있다.

서지 카운터는 낙뢰의 관측, 서지전류의 관측이 목적이므로 피뢰침, 전력계통 및 피뢰기 접지선에 설치하며, 이들 정보로부터 절연레벨의 협조, 기기의 뇌충격전류 내량 선정과 피뢰기의 상태를 진단하는데 이용한다.

### (1) 기존 방식

전력계통에서는 20여 년 전부터 그림 4.13과 같이 발·변전소의 피뢰기 접지선에 서지카운터를 설치하고 있으며, 모두 전류 구동형으로 미리 설정한 전류값 이상에서 동작하는 방식이다.



그림 4.13 서지 카운터의 사진  
Fig. 4.13 Photograph of a surge counter

전류 구동형 서지 카운터의 구성은 그림 4.14와 같으며, 접지선에 관통형 변류기 또는 막대형 자극을 설치하고 수십 ~ 수백 kHz 성분의 방전 전류가 피뢰기 접지선을 흐를 때 전자유도작용으로 서지 카운터의 검출코일에 전압을 만들어 이를 전자식 카운터의 구동전원으로 이용한다.

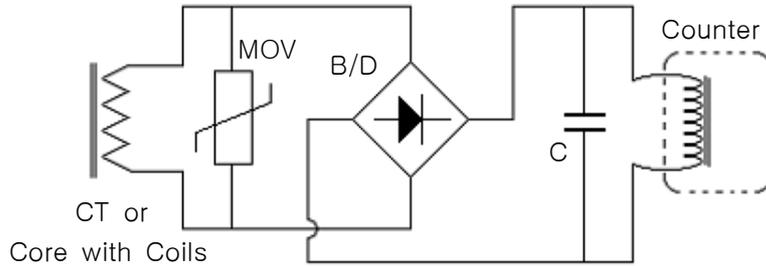


그림 4.14 전류 구동형 서지 카운터의 구성  
 Fig. 4.14 Configuration of a current-drive surge counter

서지전류에 대해 변류기에 유기되는 기전력  $e(t)$  는 다음의 식 (4.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e(t) = \mu_0 n A \frac{dI}{dt} \quad [V] \quad (4.7)$$

유기된 기전력  $e(t)$  의 크기는 정류회로에서 직류로 변환되어 카운터를 동작시킨다. 또한 유입되는 서지전류가 클 경우, 변류기 2차회로가 소손될 수 있으므로 변류기 2차측에 병렬로 산화아연형 바리스터(MOV)를 설치하여 회로를 보호한다. 이와 같이 전류구동형 서지 카운터는 전자유도작용에 의해 서지전류를 검출하고 카운터를 동작시키므로 피측정회로에 영향을 주지 않고 안정적으로 서지를 관측할 수 있다.

## (2) 제안 방식

현재 상용화 되어있는 서지 카운터는 일정 전류이상이 되면 동작 횟수만 기록하는 것으로 발생빈도만 알 수 있으며 발생일시와 극성, 크기에 대한 정보는 제공하지 못하기 때문에 피뢰기 관리에 충분한 정보를 제공하지 못한다. 본 연구에서는 피뢰기 진단관리의 효율성과 신뢰성을 향상시킬 목적으로 서지의 발생일시, 방전전류의 크기 및 극성, 동작 횟수를

계측할 수 있는 지능형 서지 카운터를 설계·제작하였다<sup>[65],[66]</sup>.



그림 4.15 CT에 내장한 로고우스키 코일  
Fig. 4.15 Rogowski coil inserted in CT

서지전류 검출을 위해 제작한 로고우스키 코일은 적용성을 고려하여 그림 4.15와 같이 전류측정용 영상변류기 내부에 내장하는 구조로 구성하였다.

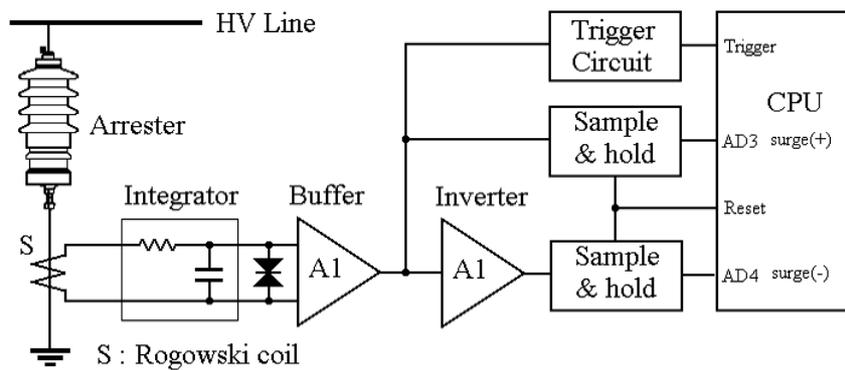


그림 4.16 서지 측정의 개략도  
Fig. 4.16 Schematic diagram of surge measurement

서지전류 측정을 위한 검출회로의 구성은 그림 4.16과 같다. 짧은 시간 동안 발생하는 서지전류를 측정하기 위하여 고속의 샘플/홀드(sample/hold) 회로를 설계하여 원칩 마이크로프로세서에 내장된 A/D 변환 기능으로 서지전류의 크기와 극성을 측정할 수 있도록 하였다.

서지전압·전류는 수 ~ 수십  $\mu\text{s}$  동안 발생하므로 이에 대한 정보를 획득하려면 10 MS/s 이상의 고속 샘플링 동작을 하는 고가의 A/D 변환기와 복잡한 주변회로가 요구되지만, 본 연구에서는 샘플/홀드 회로를 적용하여 저속의 A/D 컨버터로 서지 측정이 가능하도록 설계하였다.

서지 발생시 시간적 동작은 그림 4.17과 같다. 트리거 회로에서 서지전류 발생을 검출하여 마이크로프로세서에 전송하면 이와 동시에 샘플/홀드 회로에서는 서지전류에 대한 샘플링 동작을 수행하여 서지전류의 최대값을 검출하고 홀드상태를 유지한다. 홀드상태로 서지전류의 최대값이 유지되는 동안 마이크로프로세서에 내장된 A/D 컨버터에서 정확한 크기를 검출하게 되며, 서지전류 검출이 완료된 이후에는 마이크로프로세서에서 리셋 신호를 주어 샘플/홀드 회로를 다음 서지전류 측정을 위한 대기상태로 복귀시킨다.

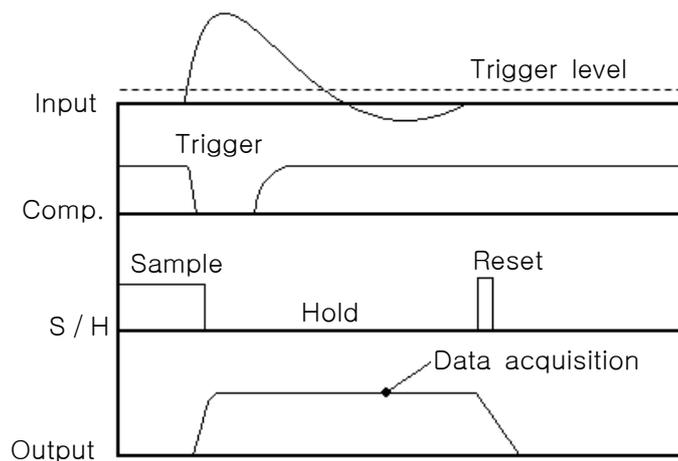


그림 4.17 시간 흐름도  
Fig. 4.17 Time chart

그림 4.18은 100 A ~ 10 kA의 측정범위를 갖는 로고우스키 코일의 구성을 나타내며, 로고우스키 코일의 관계식은 다음과 같이 얻어진다<sup>[67]~[69]</sup>.

$$M \frac{di_p}{dt} = L \frac{di_s}{dt} + (R_s + R_o) i_s \quad (4.8)$$

여기서,  $i_p$ 는 1차전류,  $i_s$ 는 2차전류,  $M$ 은 로고우스키 코일과 접지축 도선과의 상호 인덕턴스,  $L$ 과  $R_s$ 는 로고우스키 코일의 자체 인덕턴스와 저항을 나타내며,  $R_o$ 는 2차측 검출저항이다.

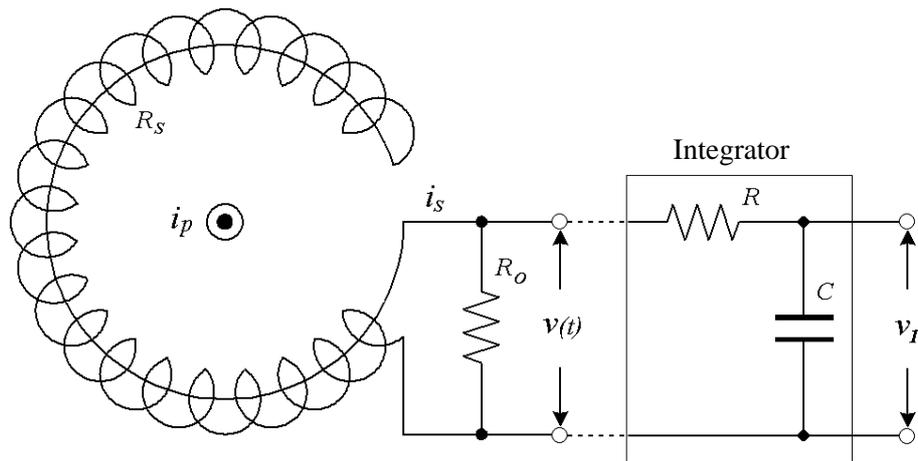


그림 4.18 로고우스키 코일의 구성  
Fig. 4.18 Configuration of a Rogowski coil

로고우스키 코일의 출력전압은 1차전류  $i_p$ 의 주파수에 따라 달라지는데, 임피던스 조건이  $\omega L \gg (R_s + R_o)$ 으로 되면,  $i_s = \frac{M}{L} i_p$ 가 되고, 이때 출력 전압은 식 (4.9)와 같이 얻어진다.

$$v(t) = \frac{M}{L} R_o i_p \quad [V] \quad (4.9)$$

식 (4.9)에서 출력전압은 1차전류에 비례하며, 상승시간은 1 ns 정도로 감쇄시정수가 작기 때문에 고속 단시간 펄스전류의 검출이 용이하며, 별도의 적분기를 필요로 하지 않는 자기적분형이 된다.

한편,  $\omega L \ll (R_s + R_o)$ 의 조건으로 되는 경우에는  $i_s = \frac{M}{R_s + R_o} \frac{di_p}{dt}$ 가 되고 이때 출력전압은

$$v(t) = \frac{MR_o}{R_s + R_o} \frac{di_p}{dt} \quad [V] \quad (4.10)$$

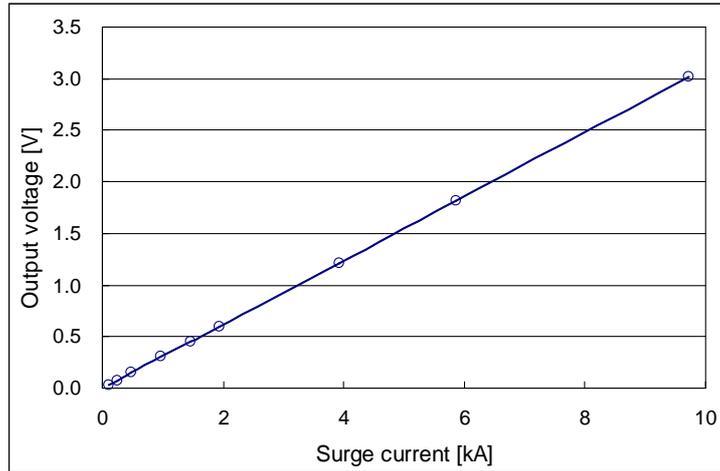
가 되어 1차전류의 미분값에 비례하는 특성을 갖는다. 따라서 원전류로 복원하기 위해서는 적분기가 필요하다. 그림 4.18에서와 같이 RC로 구성되는 수동형 적분기를 적용할 때  $R \gg \frac{1}{\omega_h C}$ 이고,  $R_o \gg R_s$ 로 하면, 출력전압은 식 (4.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_1 = \frac{1}{RC} \int v(t) dt = \frac{M}{RC} i_p \quad [V] \quad (4.11)$$

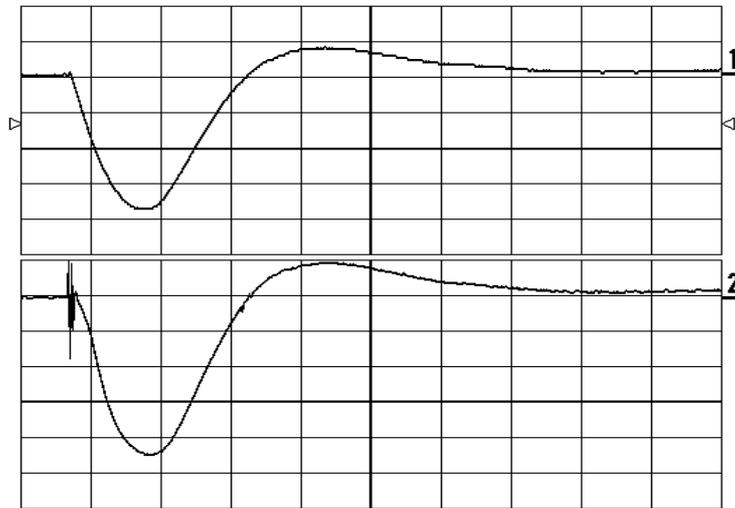
본 연구에서 시제작한 로고우스키 코일의 서지 전류에 대한 응답특성을 평가하기 위하여 8/20  $\mu$ s의 표준 뇌서지 전류를 100 A ~ 10 kA까지 인가하고 적분회로에서 응답특성을 평가하였으며, 그 결과는 그림 4.19와 같이 나타났다.

서지전류에 대한 응답특성은 그림 4.19 (a)에서와 같이 10 kA까지 선형적인 특성을 나타냈으며, 응답파형은 그림 4.19 (b)와 같이 인가된 서지전류

의 파형과 동일하게 측정되었다.



(a) 입출력 특성



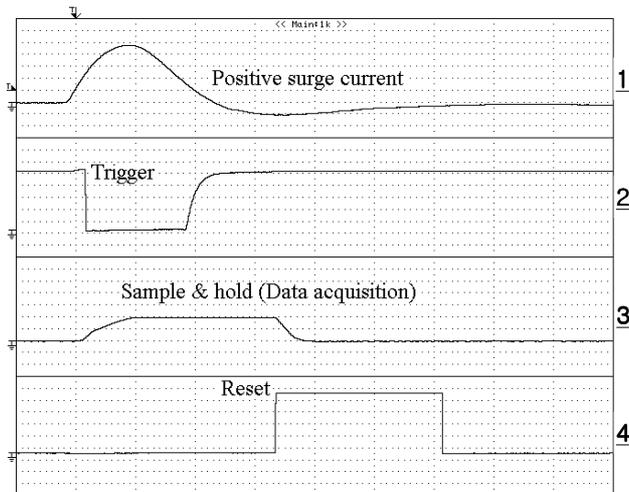
Ch. 1 : 서지전류 [500 A/div, 10 $\mu$ s/div]  
 Ch. 2 : 출력전압 [200 mV/div, 10 $\mu$ s/div]

(b) 응답파형 예

그림 4.19 로고우스키 코일의 특성  
 Fig. 4.19 Characteristics of a Rogowski coil

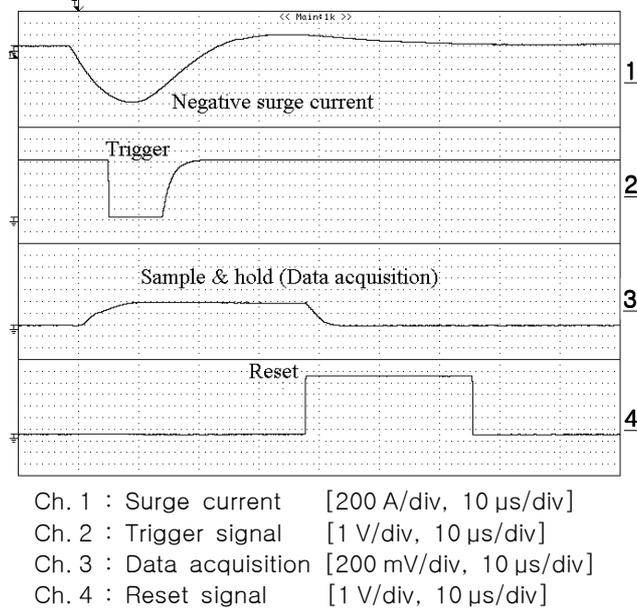
시제작한 서지카운터의 서지전류에 대한 검출특성을 평가하기 위하여  $8/20 \mu s$  정극성 및 부극성 뇌서지 전류를 로고우스키 코일이 내장되어 있는 관통형 변류기에 인가하고, 이 때 인가한 서지전류의 파형과 서지카운터의 동작을 분석하였다.

서지전류의 측정 범위는 변류기의 출력저항과 분압회로에 의해 조정 가능하며, 본 연구에서는  $100 A \sim 10 kA$ 로 설정하여 특성을 분석하였다. 그림 4.20은 정극성 및 부극성의 뇌서지 전류에 대한 서지카운터 각부에서 측정된 파형의 예를 나타낸다. 실험 결과로부터 뇌서지 전류의 입력시 설계된 프로그램에 의해 동작함을 확인하였으며, 샘플값(S/H 출력 또는 A/D 변환기 입력값)은  $10 kA$ 까지 선형적으로 나타났다.



Ch. 1 : Surge current [200 A/div, 10  $\mu s$ /div]  
 Ch. 2 : Trigger signal [1 V/div, 10  $\mu s$ /div]  
 Ch. 3 : Data acquisition [200 mV/div, 10  $\mu s$ /div]  
 Ch. 4 : Reset signal [1 V/div, 10  $\mu s$ /div]

(a) 정극성



(b) 부극성

그림 4.20 서지발생에 대한 시간 흐름도  
 Fig. 4.20 Time chart to a surge event

Date	Time	Pos.	Neg.
2006/03/12	17:36:40	43	- 197
2006/03/12	17:38:04	84	- 376
2006/03/12	17:38:45	23	- 0
2006/03/12	17:40:44	66	- 312
2006/03/12	17:41:07	89	- 364
2006/03/12	17:43:23	22	- 101
2006/03/12	17:43:52	46	- 208

그림 4.21 측정 데이터의 예  
 Fig. 4.21 Example of acquired data

그림 4.21은 서지카운터의 내장 메모리에 저장되어있는 측정 데이터를 ZigBee 무선통신으로 개인용 컴퓨터에 전송하여 출력한 예를 나타낸 것으로 발생시각과 서지전류의 크기 및 극성이 정확하게 출력되고 있음을 나타내고 있다.

이상의 결과로부터 제안한 서지카운터는 피뢰기를 통해 흐르는 서지전류의 크기 및 극성, 발생일시, 빈도 등을 계측하는데 충분한 성능이 있음을 확인하였다.

#### 4.1.6 데이터 전송

GIS용 피뢰기가 설치된 변전소에는 최소 66 kV 이상의 전압이 공급된다. 따라서 피뢰기 감시를 위한 측정데이터 전송시 RS-232 또는 RS-485 등의 직렬통신 방식을 적용하면 고전압 환경에서의 전자장 간섭으로 인해 많은 오차를 유발할 수 있으며, 감시장치가 손상될 수도 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 전자장 간섭의 영향이 없는 광통신 방식이나 무선통신 방식을 적용해야 하며, 본 연구에서는 저전력 저비용의 ZigBee 기반 무선통신 방식을 적용하여 안정적인 데이터 전송이 가능하도록 하였다.

전력 IT 기술의 발전으로 ZigBee 기반의 유비쿼터스 센서 네트워크(ubiquitous sensor network) 구성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 무선통신 네트워크 구성에 IEEE 802.15.4에서 정의하고 있는 ZigBee 통신방식이 사용되고 있다<sup>[70]~[72]</sup>.

2.4 GHz의 주파수를 사용하는 ZigBee 통신방식은 전송속도가 250 kbps로 저속이지만 확장이 용이하다는 점에서 근거리 네트워크 구성에 효율적인 것으로 알려져 있으며, 적용 가능한 통신거리는 대략 150 m ~ 1.5 km 범위이다.

그림 4.22는 GIS용 피뢰기에 설치되는 데이터 취득 모듈과 PC에 설치되는 진단 모듈 사이의 통신 방법을 간략하게 보여준다. 여러 대의 데이터 취득 모듈에서 측정한 피뢰기의 데이터는 진단 모듈이 설치된 원격의 PC에 무선으로 전송되며, 데이터 전송주기는 기본적으로 10초에 한 번씩으로 한다.

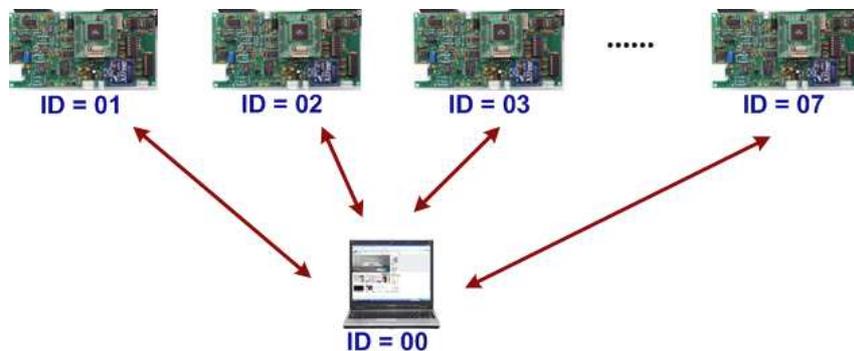


그림 4.22 데이터 취득 모듈의 통신 방법  
 Fig. 4.22 Communication method of the DAM

데이터 취득 모듈과 진단 모듈 사이의 무선통신에 사용되는 모듈이 IEEE 802.15.4 표준을 따르고 있는 ZigBee 모듈이며, MPU에서의 최종 데이터를 무선으로 전송해주는 역할을 수행한다.

진단 모듈이 설치되어 있는 PC에 연결된 ZigBee 모듈은 ID를 00으로 설정하여 FFD(Full Function Device)로써 동작하게 하고, 데이터 취득 모듈에 설치된 ZigBee 모듈의 ID는 01 ~ 99로 설정하여 RFD(Reduced Function Device)로 동작하도록 함으로써 통신 네트워크를 구성한다.

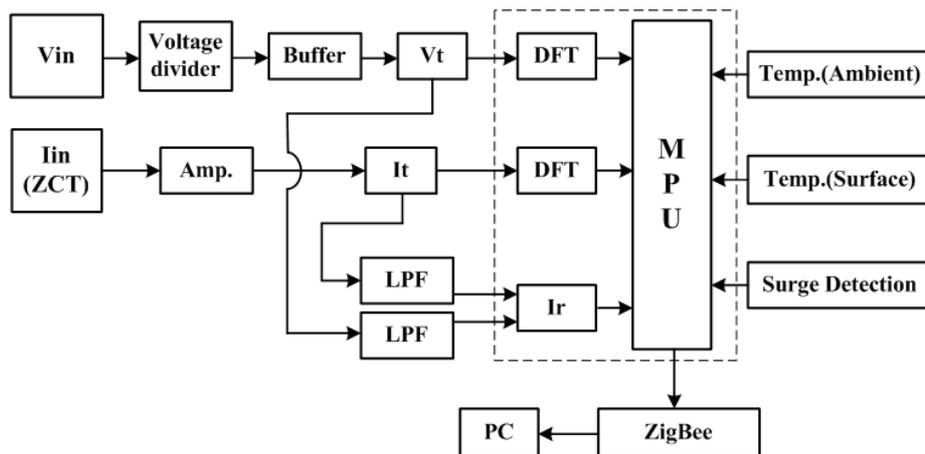
본 연구에서 대상으로 하고 있는 GIS용 피뢰기의 진단을 위하여 설계·제작한 데이터 취득 모듈의 전기적 특성은 표 4.1과 같으며, 구성 및 사진은 그림 4.23과 같다.

표 4.1 데이터 취득 모듈의 전기적 특성

Table 4.1 Electrical characteristics of the DAM

전체 누설전류 측정범위	100 $\mu$ A ~ 5 mA
차동 증폭회로	이득 60 dB, offset 1 mV 이하
저항분 누설전류 측정범위	30 $\mu$ A ~ 1 mA
제 3~9고조파 누설전류 측정범위	50 $\mu$ A ~ 1 mA
측정 주파수 대역	3 Hz ~ 3.3 kHz
서지 카운터	8/20 $\mu$ s, 10 kA <sub>max</sub>
피뢰기 주위온도	-20 ~ 50 $^{\circ}$ C
피뢰기 표면온도	-20 ~ 100 $^{\circ}$ C
무선(ZigBee) 전송속도	9600 bps

시제작한 데이터 취득 모듈은 인가전압과 전체 누설전류를 측정하기 위한 검출회로, 온도 측정회로, 서지 검출회로 및 ZigBee 기반의 무선 통신회로 등으로 구성되며, 다양한 분석 파라미터를 측정하기 위해 복잡한 아날로그 회로를 사용하지 않고 고속의 A/D 컨버터와 8 bit 마이크로프로세서를 적용하였다.



(a) 구성



(b) 측정부



(c) MPU



(d) 외형

그림 4.23 시제작 데이터 취득 모듈  
Fig. 4.23 The developed DAM

피뢰기에 인가되는 전압은 GIS내의 전압검출용 터미널과 분압기를 이용하여 측정하며, 분압기의 조정에 따른 임피던스 변화에 의해 출력전압이 변하지 않도록 버퍼회로를 추가하였다.

누설전류는 관통형 영상변류기를 접지선에 연결하여 측정하며 저항분 누설전류 검출 알고리즘, DFT 알고리즘, 누설전류 보정 알고리즘 등을 적용하여 저항분 누설전류, 제 3 ~ 9차 고조파 누설전류, 전체 누설전류로 구성되는 진단 파라미터들을 생성한다.

서지전류는 서지의 유입 횟수만을 측정하는 기존의 서지 카운터와는 달리 로고우스키 코일과 샘플/홀드 회로 등으로 구성되는 지능형 서지 카운터를 설계·제작하여 서지전류의 발생시각, 극성 및 크기에 대한 정보를 계측할 수 있다.

표면온도와 주위온도 차이에 의한 진단기법을 적용하기 위하여 모듈 내부에 온도센서(DS 1620)를 내장하였으며, 적외선 온도센서(Rayomatic 6)와 병용하여 표면온도와 주위온도를 측정할 수 있도록 구성하였다.

최종적으로 데이터 취득 모듈에서 측정된 총 11개(누설전류 관련 데이터 7개, 서지전류 관련 데이터 2개, 온도 데이터 2개)의 데이터와 시각정보는 신호전송시 고전자장에 의한 왜곡을 제거하기 위하여 ZigBee 모듈을 통해 무선으로 진단 모듈이 설치된 PC로 전송되며, 본 연구에서는 무선 모듈로써 MaxStream사의 'XBee'라는 제품을 사용하였다.

## 4.2 진단 모듈

전문가 시스템(expert system)이란 특정분야 전문가들의 경험 및 지식들을 수집·정리한 뒤, 주어진 특정영역에 관한 문제를 컴퓨터의 추론능력을 이용하여 해결하는 컴퓨터 자문시스템을 말한다. 최근에는 각종 장비의 고장 진단, 의사결정(decision making) 지원에 대한 응용, 인사관리, 물품 재고관리, 통신 네트워크 고장진단, 의료진단, 화학 분자식으로부터의 분자구조 추출, 지질정보를 이용한 광의 종류와 위치결정 등 많은 분야에서 전문가 시스템을 도입하고 있다<sup>[73]</sup>.

### (1) 전통적인 프로그램과 전문가 시스템

전문가 시스템과 전통적인 컴퓨터 프로그램의 차이는 전문가 시스템이 지식(knowledge)을 다루는 반면 전통적인 컴퓨터 프로그램은 데이터 처리를 다룬다는 점이다. 따라서 기존의 전통적인 프로그램에서는 데이터 처리를 위한 처리순서(processing procedure)를 완전하게 작성해 주지 않으면 안됐지만 전문가 시스템에서는 어떤 사실(Fact)이 들어오면 추론엔진(inference engine)이 필요한 지식을 추론규칙(inference rule)에 의해 선택하여 처리할 수가 있다. 전문가 시스템과 전통적인 컴퓨터 프로그램과의 차이점을 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

첫째, 전문가 시스템과 전통적 프로그램과의 차이는 업무처리가 이루어지는 순서에 있다. 즉 전통적인 프로그램은 IF-Then의 법칙이 업무처리 과정 속에서 정해진 순서에 의해 실행되지만 전문가 시스템에서는 반드시 그렇지 않다. 이러한 차이에서 프로그램 언어 선택의 문제가 발생하게 되고, 따라서 전문가 시스템은 기존의 BASIC, FORTRAN 등의 절차식 언어로는 부적당하며 새로운 언어의 필요성이 대두되었다.

둘째, 전문가 시스템에 의해 실행되는 업무는 지식베이스를 기초로 하

여 반드시 해당분야의 전문가에 의해 구현된다는 점이다. ‘전통적인 프로그램 = data + algorithm’ 이라면 전문가 시스템에서의 ‘지식베이스형 프로그램 = knowledge base + inference engine’ 으로 생각할 수 있다. 즉, 전통적인 프로그램에서는 처리순서가 중심이 되지만 전문가 시스템에서는 지식베이스와 추론엔진이 중심이 된다.

셋째, 전문가 시스템은 지식 전문가(knowledge engineer)라 불리는 전문가에 의해 유지, 관리되지만 전통적인 프로그램은 프로그래머에 의해 유지, 관리된다. 또한 전문가 시스템은 그 시스템의 일부분인 지식베이스를 사용자가 추가 및 삭제, 수정할 수 있는 반면 전통적인 프로그램에서는 프로그래머가 아닌 사용자에 의한 프로그램의 변경은 불가능하다.

전문가 시스템에서는 기호에 의한 처리(symbolic processing)가 주류를 이루지만 전통적인 프로그램의 대부분은 수치에 의한 처리(numerical processing) 위주로 이루어진다. 따라서 전문가 시스템은 기존의 프로그램 언어와는 달리 인공지능 도구(AI tools)나 기호에 의한 처리가 가능한 LISP 또는 PROLOG와 같은 언어를 사용하여 개발되고 있다.

이 외에도 전문가 시스템과 전통적인 프로그램은 시스템의 구조에 있어서도 차이점을 보이는데, 전통적인 프로그램은 대상이 되는 업무의 흐름을 쫓아가면서 답을 구하거나 결과를 출력시키지만 전문가 시스템은 지식베이스를 기초로 규칙과 추론엔진에 의한 접근방식을 택한다.

그러나 전문가 시스템도 전통적인 프로그램과 마찬가지로 컴퓨터 시스템에서 처리되고, 전문가 시스템의 개발을 목적으로 고안된 컴퓨터 언어(LISP, PROLOG)가 존재하지만 기존의 프로그램 언어(C, JAVA, BASIC)를 사용하여 전문가 시스템을 개발할 수도 있기 때문에 전문가 시스템을 문제 해결을 위한 진보된 개념의 프로그래밍 기법으로 볼 수는 있어도 전통적 컴퓨터 프로그램과 전혀 다른 차원의 컴퓨터 응용분야로는 간주할 수 없다.

## (2) 전문가 시스템의 특징

전문가 시스템은 전문지식을 갖고 있지 않은 경우에도 프로그램에 의해 실시간 감시 데이터로부터 관리 및 추론, 진단 등이 가능하며, 구체적으로 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

첫째, 여러 전문가로부터 지식을 추출하여 사용할 수 있으므로 한사람의 전문가에 의한 판단능력보다 우수한 결과를 낼 수 있다.

둘째, 사람은 업무시간과 능력에 한계를 가진다. 24시간 쉬지 않고 근무할 수 없으며, 동시에 여러 곳에 존재할 수도 없다. 또한 전문가의 심리 상태에 따라 정확한 판단을 내리지 못할 수도 있다. 하지만 전문가 시스템은 한번 지식을 추출하여 지식베이스화 하면 이 지식은 영구 보존되고 시간과 장소에 구애받지 않고 활용할 수 있다.

셋째, 심리상담 전문가 시스템이나 개인교육 전문가 시스템처럼 사용자가 자신을 노출시키고 싶어 하지 않는 경우에도 활용이 가능하다.

넷째, 지식베이스는 필요한 경우 업데이트가 가능하므로 계속적으로 안정적인 시스템을 유지할 수 있다.

이 외에도 설치 및 유지, 보수에 의한 비용 절감과 사용자가 전문가를 찾아 다녀야 하는 시간 절약, 일의 처리속도 증가 등의 효과도 전문가 시스템의 특징이라고 할 수 있다.

## (3) 일반적인 전문가 시스템

그림 4.24는 일반적인 전문가 시스템의 구조를 나타낸 것으로 이러한 시스템은 지식베이스, 작업메모리, 추론엔진, 사용자 인터페이스, 지식획득 모듈 및 해석 모듈로 나뉜다.

사용자가 사용자 인터페이스를 통해 데이터를 입력하거나 질문을 하면 작업메모리에 저장되고, 전문가의 지식은 지식획득 모듈을 통해 수집, 수정,

정제되어 지식베이스에 저장된다. 작업메모리에 저장된 사용자의 데이터와 지식베이스에 저장된 지식은 추론엔진에서 추론과정을 거친 후 결과를 생성하여 사용자에게 전달하게 된다.

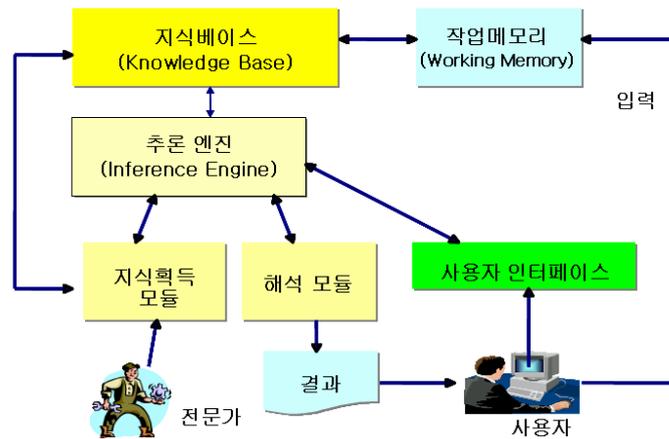


그림 4.24 전문가 시스템의 구조  
Fig. 4.24 Structure of an expert system

전문가 시스템의 각 모듈의 역할을 살펴보면 다음과 같다.

#### 가. 지식베이스(Knowledge Base)

지식베이스는 문제풀이의 규칙, 절차 그리고 문제영역과 관련된 고유한 사실 등의 자료로 구성된다. 본 연구에서 제안한 전문가 시스템에서는 사실로써 데이터 취득 모듈에서 측정하는 피뢰기의 진단 파라미터를 이용하며, 전문가의 지식은 JESS의 defrule 형식으로 규칙을 생성한다.

#### 나. 작업메모리(Working Memory)

작업메모리는 사용자가 해결 하고자 하는 문제 또는 진위여부를 검토하기 위한 자료 등을 저장하며, 추론엔진이 지식베이스에서 가져온 규칙

을 사용자가 입력한 자료에 적용하여 얻은 결과를 저장하기도 한다.

#### 다. 추론엔진(Inference Engine)

전문가 시스템의 핵심요소는 제어구조(control architecture) 또는 규칙 해석기(rule interpreter)로 알려진 추론엔진이며, 결론의 도출과 형성을 위한 방법론을 제공하는 컴퓨터 프로그램을 말한다. 이는 사용자 인터페이스를 통하여 사용자로부터 제공된 입력을 받아들이며, 의사결정이나 진단과 같은 문제해결안을 생성하기 위하여 지식베이스내의 지식을 결합한다. 본 연구에서 제안한 전문가 시스템에서는 RETE 알고리즘을 사용하는 JESS의 룰 엔진을 적용하였다.

#### 라. 지식 획득 모듈(Knowledge Acquisition Module)

전문가로부터 지식을 추출하여 이를 지식베이스에 저장할 수 있는 형태로 전화하기 위한 모듈이다. 지식의 삽입, 삭제, 수정이 용이할수록 시스템의 유연성과 안정성이 높아지게 된다.

#### 마. 해석 모듈(Explanation Module)

해석 모듈은 추론엔진이 지식베이스의 규칙을 적용한 과정을 역추적함으로써 결론에 이르게 된 배경결과를 보여주고, 왜 그런 데이터가 필요하고 어떻게 그런 결론에 도달하였는지 설명하는 모듈이다.

#### 바. 사용자 인터페이스(User Interface)

사용자와 전문가 시스템 간의 의사소통을 돕는 도구이며 사용자로부터 사실 또는 질의를 입력 받거나 추론결과를 출력하는 기능을 가진다. 본 연구에서는 전문가 시스템 구축을 위하여 JAVA 언어로 구현된 JESS를

사용하여 진단 시스템의 기본 틀을 구성하였다. SUN사에서는 SDK 1.3에서부터 JESS 기반의 API 함수들을 제공하고 있어서 별도의 프로그램 설치 없이 바로 사용 가능하다는 장점이 있다. 또한 셸(shell) 형태만을 제공하기 때문에 구현하고자 하는 시스템의 목적에 따라 쉽게 그 용도를 바꿀 수 있으며 모듈 형태로 셸을 구현함으로써 진단을 위한 지식을 쉽게 추가, 삭제, 수정 할 수 있다. 본 연구에서 제안한 전문가 시스템은 진단 모듈 부분을 JESS를 사용하여 구현함으로써 추후 추가 또는 수정 요소들의 발생시 능동적으로 대처할 수 있도록 하였다.

#### (4) JESS(Java Expert System Shell)

JESS는 JAVA 언어 기반의 전문가 시스템 개발을 도와주는 도구이며, 1990년 Sandia National 연구실에서 Friedman-Hill 박사에 의해서 개발되었다. JESS의 동작원리는 그림 4.25와 같다.

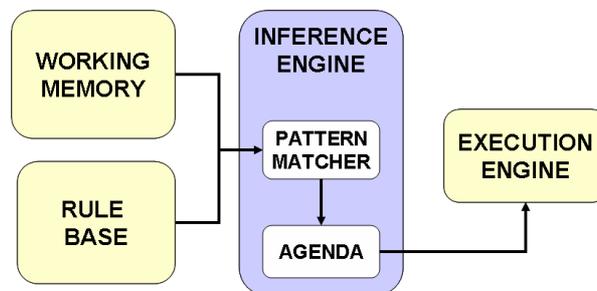


그림 4.25 JESS의 동작원리  
Fig. 4.25 Operating principle of the JESS

룰 베이스에 들어 있는 규칙들과 작업메모리에 들어있는 사실들을 RETE 알고리즘을 사용하는 PATTERN MATCHER를 통해서 추론하며 그 결과들이 AGENDA를 거쳐서 실행 가능한 규칙들을 찾아내고 수행한다.

JESS의 특징으로는 CLIPS와 같은 리스트 구조를 가진다. 따라서 LISP 언어에 익숙한 사람이면 쉽게 사용할 수 있다. 또한 JAVA 언어를 기본으로 하고 있어서 JAVA로 작성한 프로그램에서 이 규칙과 사실을 사용할 수도 있고, JESS에서 JAVA의 API나 응용 프로그램을 호출해서도 사용할 수 있다.

JESS의 응용 분야는 대표적으로 전문가 시스템이 있다. 또한 네트워크 침입 감지나 보안 허가, 기계적인 엔진 디자인을 도와주거나 통신을 위한 지능 네트워크 스위치, 게임 제작 등에서 사용되고 있다.

#### 가. 룰 엔진(Rule Engine)

룰 엔진은 미리 정의된 약속들을 기반으로 다양하게 입력되는 자료들을 분석하여 결과를 도출해 내는 시스템을 의미한다. 넓은 의미로 모든 컴퓨터 프로그램이 여기에 속하긴 하지만 특정한 지식영역이나 자료형에 국한되지 않고 룰 영역만을 전문적으로 개발하고 적용하는 시스템을 룰 기반 시스템이라 부르며, 다른 말로 룰 엔진이라고 한다.

룰 엔진을 적용한 시스템은 결과를 내기까지 적용되는 규칙이 복잡한 경우 일반 시스템보다 빠른 성능향상을 기대할 수 있고 규칙이 고정적이지 않고 자주 바뀌는 경우에도 유리하다. 예를 들어 무선 인터넷 시스템에서 인터넷 접속장애 발생시 진단을 수행하는 시스템이 있는데 여기에 룰 엔진이 쓰인다. 즉 장애의 원인이 단말(무선 랜카드)에 있는지 아니면 AP(무선 중계기)에 있는지 아니면 다른 원인인지 판단하는 부분에서 룰 엔진이 쓰일 수 있다. 장애의 원인을 판단하는 부분을 일반적인 프로그래밍으로 처리 할 수도 있으나 장애요인이 워낙 다양하고 장비에 따라서 체크하는 부분이 달라지기 때문에 룰 엔진을 쓰는 것이 유리하다.

### 나. RETE 매칭 알고리즘(RETE Matching Algorithm)

JESS의 핵심이라고 할 수 있는 룰 엔진에서는 RETE 매칭 알고리즘을 사용하고 있다. 전문가 시스템에서 룰 엔진의 기본적인 사이클은 비교(match), 선택(select), 수행(execute)이다.

#### ① 비교(Match)

사이클의 매칭시간 동안 지식베이스에서 규칙의 LHS(Left Hand Side) 조건은 작업메모리를 계속 결합시키는 것을 만족하는 LHS 조건을 갖는 규칙이 무엇인지를 결정하기 위해 작업메모리의 내용과 비교된다. 매치된 것으로 판명된 규칙들은 충돌집합에 넣는다.

#### ② 선택(Select)

충돌집합(conflict set)에서 규칙 중의 하나가 선택되어 실행된다. 이러한 선택 정책은 최신 사용법, 특정한 규칙, 그 외의 기준에 의해 결정된다.

#### ③ 수행(Execute)

충돌집합에서 선택된 규칙은 그 기능 또는 규칙의 결말부분 즉, 규칙의 RHS(Right Hand Side)를 수행함으로써 작업메모리에서의 조항을 제거하거나 교체하는 것 또는 단순 정지원인 및 입출력 연산, 덧셈과 같은 것들을 포함한다.

비교, 선택, 수행의 순환은 더 첨가될 규칙이 없거나 종결조건에 도달될 때까지 되풀이된다. 전형적인 지식베이스는 수백 또는 수천 가지 이상의 규칙을 포함하는데 각 규칙은 몇 가지(10여 가지 이상) 규칙들을 포함하며, 작업메모리 역시 전형적으로 수백 가지 이상의 조항들을 포함한다. 결과적으로 작업메모리에 대한 모든 규칙과 LHS 조건들을 소모적으로

매칭하는데 수만 번의 비교가 필요하며, 계산시간의 90% 정도가 매칭연산과 관련되어질 수 있다. 그러므로 각 사이클마다 매칭연산이 수천 번 수행되어지는 것을 제거할 수 있고, 이에 효과적인 매칭 알고리즘을 개발하게 되었는데 이를 RETE라고 부른다.

RETE는 초기에 프로그래밍 언어의 OPS 계열의 일부분으로 개발되었다. 이러한 알고리즘에는 연속적인 사이클에서 비교가 반복되는 것을 피할 방법을 포함한 몇 가지 새로운 특성을 나타낸다.

대부분의 전문가 시스템에서 작업메모리의 내용은 사이클과 사이클 사이에서는 거의 변화가 없다. 데이터에는 임시 중복이라고 알려진 지속성이 존재하며, 이것은 매 사이클마다 소모적 매칭을 불필요하게 만든다. 이로 인해 매칭 정보를 저장함으로써 작업메모리에의 변화를 사이클마다 비교하는 것만이 필요하게 된다.

게다가 RETE에서는 작업메모리에 대한 변화가 직접 충돌집합으로 전송·변환되는 것을 막는다. 그 후 충돌집합으로부터 한 규칙을 선택 실행할 때 그것은 집합에서 제거되고 남아있는 엔트리들은 다음 사이클을 위해서 저장된다. 즉, 작업메모리에 대한 규칙들이 반복적으로 비교되는 것을 피하게 된다. 더 나아가 그들의 LHS에 나타나는 조건 조항을 가지는 규칙을 색인화하여 작업메모리 교체에 매칭되는 규칙들만 조사할 필요가 있다. 이것은 각 사이클에 요구되는 비교의 횟수를 상당히 감소시킨다.

#### 4.2.1 설계 및 구현

본 연구에서 제안한 전문가 시스템은 그림 4.26과 같이 데이터 취득 모듈, ZigBee 모듈 및 진단 모듈로 구성되며, 진단 모듈은 다시 데이터 송수신부, 데이터 처리부, 데이터베이스 및 JESS 기반의 열화진단부로 구성된다<sup>[74]~[78]</sup>. 데이터 취득 모듈에서는 10초 마다 측정된 데이터를 무선

전송하며, 진단 모듈이 설치되어 있는 PC와 연결된 ZigBee 모듈에서는 무선으로 수신받은 데이터를 직렬 통신으로 진단 모듈에 전송함으로써 피뢰기의 상태감시 및 열화진단을 수행한다.

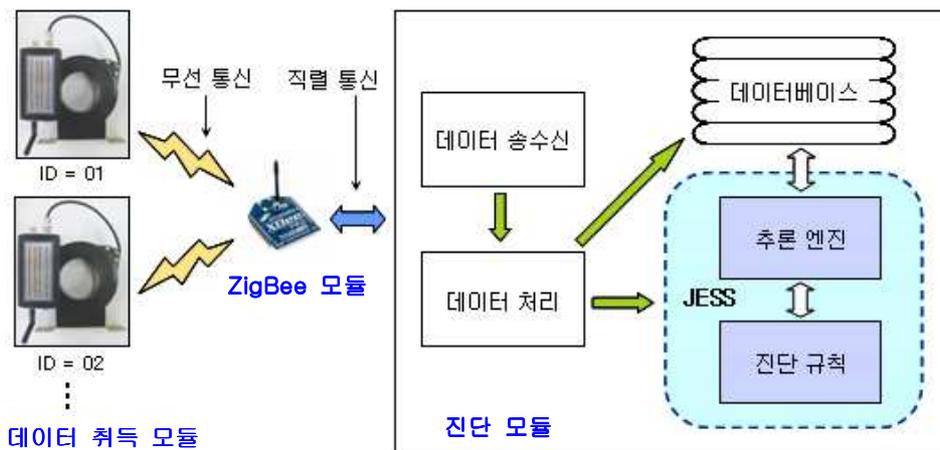


그림 4.26 전문가 시스템의 모듈 구성

Fig. 4.26 Module configuration of an expert system

### (1) 데이터 송수신

데이터 취득 모듈과의 송수신과 관련된 처리를 담당하는 데이터 송수신부는 데이터 수신부와 데이터 송신부로 구성된다.

#### 가. 데이터 수신

데이터 취득 모듈로부터 무선으로 수신받은 데이터는 ZigBee 모듈에 저장된 후, 다시 직렬 통신을 사용하여 진단 모듈의 송수신부로 전송된다. 데이터 수신부에서는 그림 4.27과 같은 알고리즘을 사용하여 ZigBee 모듈로부터 수신받은 데이터를 처리한다. 이 수신 알고리즘은 수신받은 데이터를 STX(Start of Text) 비트로 시작해서 ETX(End of Text) 비트로 끝나는 데이터 프로토콜 형태로 만들어 준다. 따라서 수신받은 데이터의 위치를

나타내는 변수 'pos'를 사용하여 수신받은 데이터가 STX 비트이고 'pos'가 0이면 임시 변수인 'tempBuff[0]'에 STX 비트 값을 넣어준다. 그 후 ETX 비트를 수신 받을 때까지 'tempBuff[]'에 수신받은 데이터를 차례로 저장하며 마지막으로 ETX 비트를 수신하면 'tempBuff[]'가 완성된다. 이 'tempBuff[]'는 데이터 처리부에서 모니터의 상태감시 화면으로

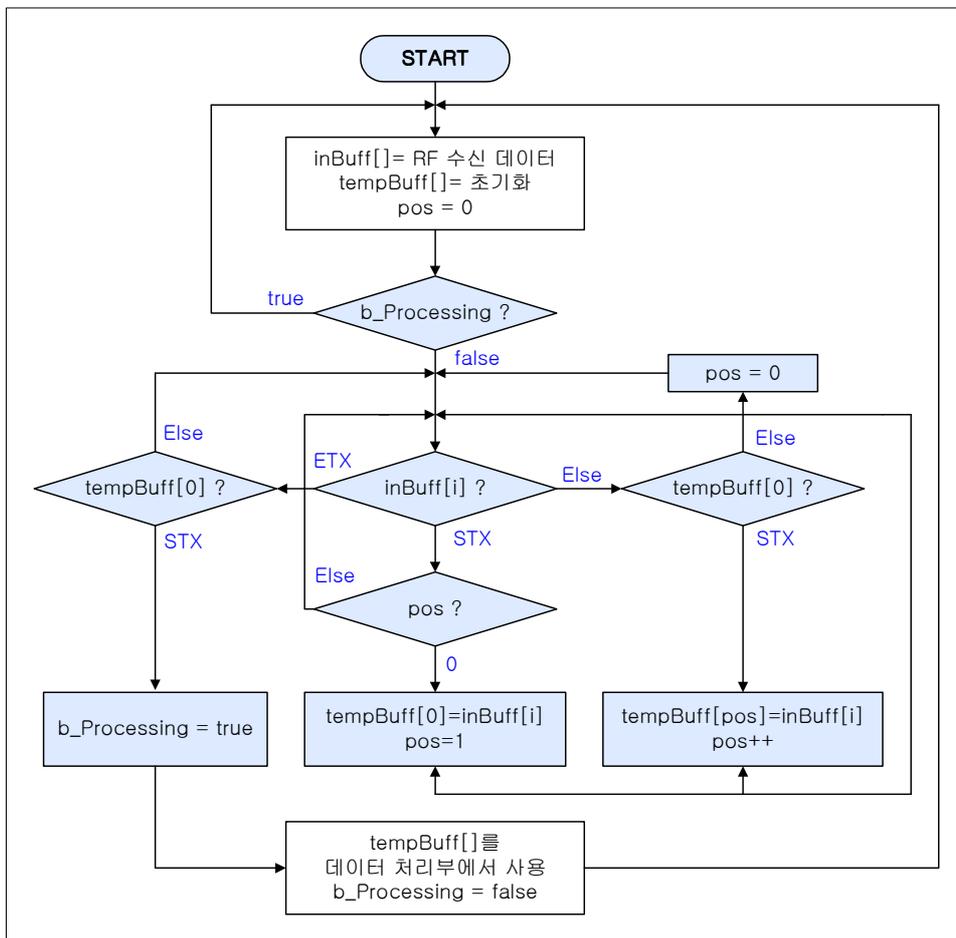


그림 4.27 데이터 수신 알고리즘  
Fig. 4.27 Data receiving algorithm

보여주거나 데이터베이스에 저장된다. 그림 4.27의 데이터 수신 알고리즘은 쓰레드를 사용하여 수신 데이터가 있는 경우 항상 동작하므로 데이터 수신중에 'tempBuff[]'를 데이터 처리부에서 사용하게 되면 'tempBuff[]'의 값이 변경될 수 있다. 따라서 'b\_Processing'이라는 변수를 사용함으로써 데이터 처리부가 동작 중일 때는 데이터를 수신하지 못하도록 한다.

#### 나. 데이터 송신

데이터 송신의 경우 데이터 수신시와는 달리 필요한 경우에만 동작하면서되며, 다음 두 가지 경우에 데이터 송신부가 동작한다.

##### ① 데이터 취득 모듈에 ID 값 부여

데이터 취득 모듈이 설치된 각각의 피뢰기 마다 고유의 ID 값을 부여할 때 필요하며, ID 프로토콜은 다음과 같다.

I	00 ~ 99	D
---	---------	---

##### ② 데이터 취득 모듈에 시간 값 부여

데이터 취득 모듈에는 시간회로가 있지만 전원이 공급되지 않는 동안에는 동작하지 않는다. 따라서 데이터 취득 모듈로부터 수신받은 데이터의 측정 시간이 잘못되어 있을 경우 수정해야 하며, 이 경우에 시간 값을 전송한다. 전송하는 시간 프로토콜은 다음과 같으며, 예를 들어 2007년 10월 18일 오후 5시 35분 25초의 시간을 전송할 경우, 'Y20071018173525E'를 데이터 취득 모듈로 전송한다.

Y	yyyymmddhhmmss	E
---	----------------	---

## (2) 데이터 처리

데이터 처리부에서는 그림 4.28과 같이 데이터 송수신부에서 수신받은 데이터를 처리하여 상태감시 화면에 보여주는 역할을 담당한다.

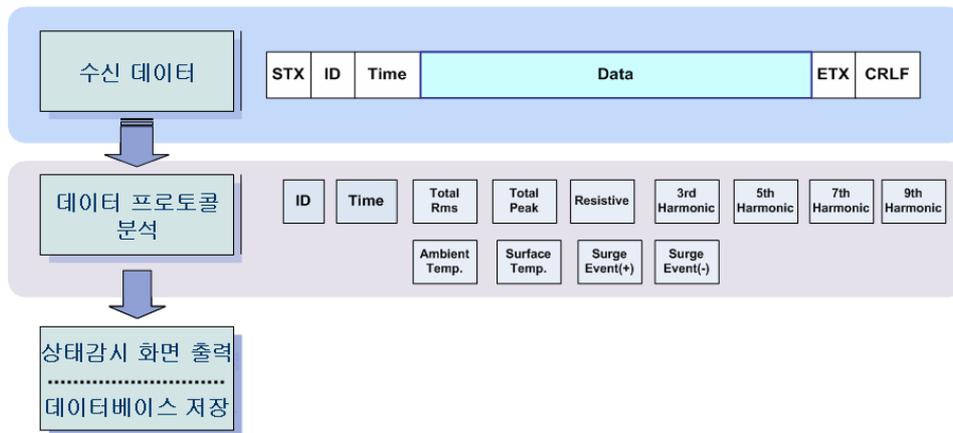


그림 4.28 데이터 프로토콜 분석  
Fig. 4.28 Data protocol analysis

우선, 수신받은 데이터는 콤마(',') 단위로 프레임을 구분하기 때문에 ',' 단위로 파싱(parsing)하여 처리한다. 파싱 후 남은 데이터는 피뢰기 ID(ID), 측정 시간(time), 전체 누설전류 실효값(total rms), 전체 누설전류 최대값(total peak), 저항분 누설전류 최대값(resistive), 제 3고조파 누설전류(3rd harmonic), 제 5고조파 누설전류(5th harmonic), 제 7고조파 누설전류(7th harmonic), 제 9고조파 누설전류(9th harmonic), 피뢰기 주위 온도(ambient temp), 피뢰기 표면온도(surface temp), 양극 서지 이벤트(surge event(+)), 음극 서지 이벤트(surge event(-))까지 총 13개의 데이터가 된다. 이 데이터들을 모니터의 상태감시 화면에 실시간으로 보여주고 필요한 경우 데이터베이스에 저장한다.

가. 상태감시 화면

상태감시 화면은 실시간으로 데이터 취득 모듈로부터 수신받은 값들을 보여준다. 기존의 전문가 시스템의 경우, 하나의 피뢰기로부터 값을 수신받기 때문에 하나의 피뢰기만을 고려하여 화면을 처리하였지만 본 연구의 전문가 시스템은 여러 대의 피뢰기로부터 수신받은 데이터를 처리해야 하기 때문에 그림 4.29와 같이 수신받은 데이터 전체를 보여주는 화면과 하나의 피뢰기에 대해 상세하게 보여주는 화면으로 나누어 구현하였다.

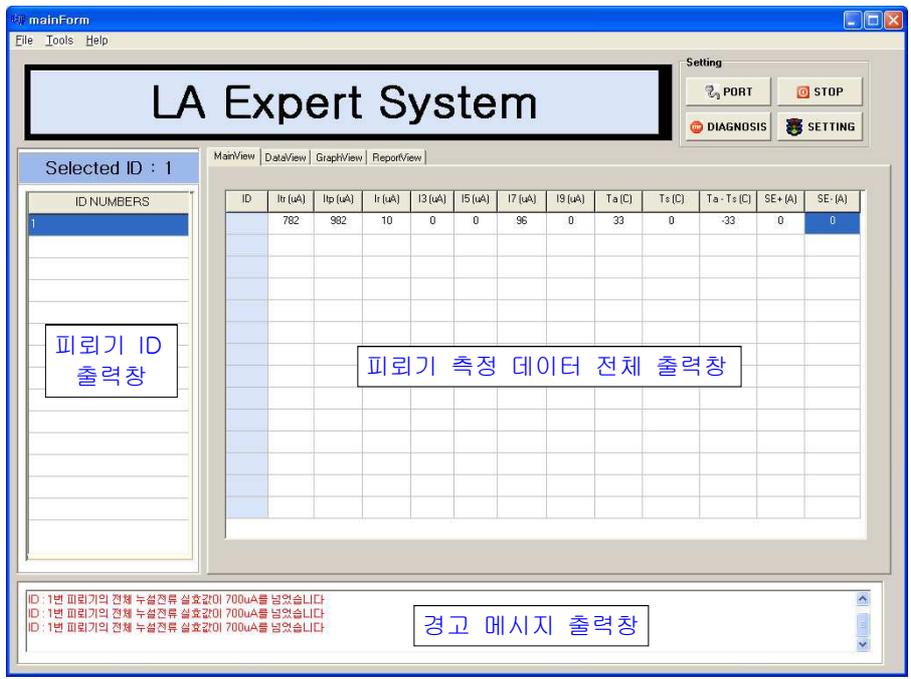


그림 4.29 전체 데이터 출력 화면  
Fig. 4.29 Output display of a whole data

그림 4.29에서 왼편의 ID 출력창에는 각각의 피뢰기에 설치되어 있는 데이터 취득 모듈의 ID가 출력되며, ID를 보여주는 방법은 미리 ID NUMBERS에 ID를 부여하는 방법을 사용하였다. ID NUMBERS의 리스

트에 위에서부터 차례대로 미리 ID를 할당하고, 분석한 수신 데이터에서 ID를 확인한 후 그 값에 맞는 위치에 ID를 출력해주기 때문에 ID 데이터가 없는 경우는 빈 공간으로 남게 된다.

따라서 화면 출력창에 ID가 비어있는 리스트가 발생하면 해당 ID의 데이터 취득 모듈이 제대로 동작하지 않음을 바로 확인할 수 있으며, ID 순서대로 데이터를 화면에 출력함으로써 원하는 피뢰기의 데이터를 쉽게 찾을 수 있는 장점이 있다.

그림 4.29의 오른쪽은 여러 대의 피뢰기 측정 장비로부터 수신 받은 데이터 전체를 출력하는 창이며, 그 특징은 다음과 같다.

- 정상적인 값인 경우에는 검은색으로 값을 출력한다.
- 비정상적인 값이 들어온 경우, 피뢰기 ID와 비정상적인 값 부분을 표시해주고 경고 메시지 출력창에 경고 메시지를 출력해준다.
- 피뢰기 ID 출력창에서 ID를 더블클릭하면 상세 데이터 출력 화면으로 전환한다.

그림 4.29의 아래 부분은 경고 메시지 등을 출력하는 창이며, 출력되는 메시지의 종류는 다음과 같다.

① 비정상적인 값이 발생한 경우

실시간으로 들어오는 데이터를 바탕으로 비정상적인 값이 발생한 경우 경고 메시지를 출력한다. 예를 들어 GIS용 피뢰기의 경우 전체 누설전류 실효값은 정상적인 경우  $200\ \mu\text{A} \sim 500\ \mu\text{A}$  범위이다. 하지만  $700\ \mu\text{A}$ 가 넘어가면 이상이 발생한 것으로 볼 수 있기 때문에 경고 메시지를 출력해준다.

② 열화진단 결과를 출력할 경우

데이터베이스에 저장된 측정 데이터를 이용하여 피뢰기의 열화를 진단한 후 진단 결과를 출력할 경우에도 메시지를 출력한다.

③ 데이터베이스 처리 결과를 출력할 경우

데이터베이스의 연결 유무, 데이터 삭제 유무, 저장 주기 유무 등 데이터베이스 처리와 관련된 메시지를 출력한다.

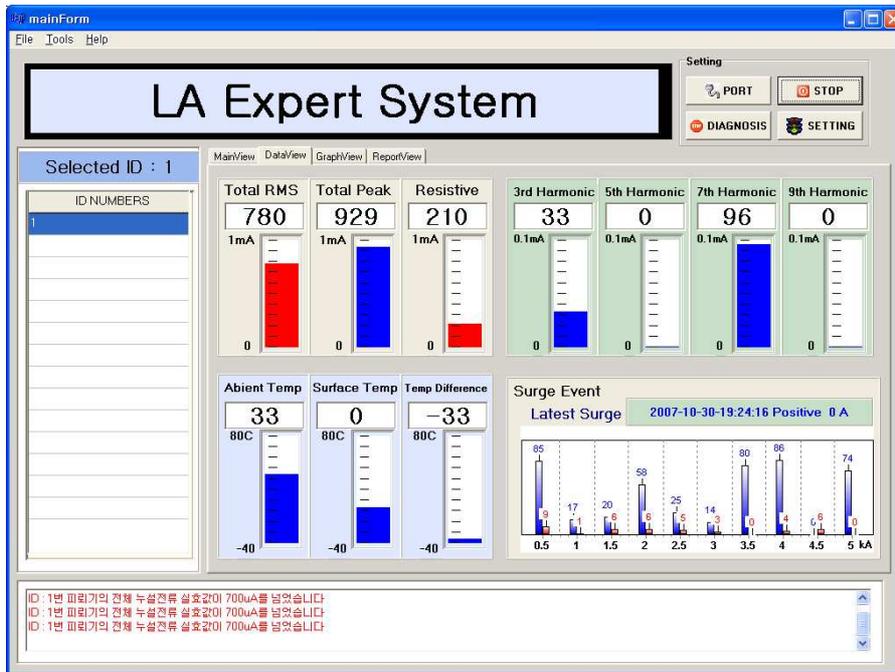


그림 4.30 상세 데이터 출력 화면  
Fig. 4.30 Output display of a detailed data

그림 4.30은 상세 데이터 출력 화면이다. 그림 4.29의 피뢰기 ID 출력창에 나타난 ID를 더블클릭하면 클릭한 ID의 피뢰기 측정 데이터를 상세하게 출력한다. 텍스트 위주로 출력되는 전체 데이터 화면과는 달리 상세 데이

터 화면은 히스토그램(histogram)을 사용하여 보기 편하게 구현하였으며, 그 특징은 다음과 같다.

- 히스토그램은 같은 범위의 값에 대해서는 단위가 함께 변하도록 한다. 예를 들어 total rms가 707  $\mu$ A이고 total peak가 1 mA가 되면 두 데이터의 히스토그램에 표시되는 단위를 0 ~ 2 mA로 바꿔서 값의 차이가 확연히 표시될 수 있도록 한다.
- 비정상적인 값이 발생한 경우, 히스토그램의 색깔을 정상적인 값과 구별 되도록 표현해서 이상이 발생했음을 알릴 수 있도록 한다.
- 서지 이벤트의 경우 0 ~ 5 kA 까지를 10단계로 나누어 각 단계마다 누적된 횟수를 출력하도록 한다. 또한 양극 서지 이벤트 값과 음극 서지 이벤트 값의 분포를 함께 볼 수 있도록 왼쪽의 히스토그램에는 양극 서지 이벤트 값, 오른쪽의 히스토그램에는 음극 서지 이벤트 값으로 표현한다.
- 가장 최근에 발생한 서지 이벤트는 발생시간, 극성, 크기를 보여준다.

### (3) 데이터베이스

데이터베이스에서는 데이터 취득 모듈로부터 수신받은 피뢰기 측정 데이터를 저장하거나 삭제하며, 측정 데이터의 변화량을 그래프로 출력해주는 역할을 한다. 본 연구에서는 MySQL 5.0 데이터베이스를 사용하였으며, 표 4.2는 데이터베이스에 저장되는 데이터와 컬럼 이름, 그리고 저장 형태를 보여준다. 그림 4.31은 데이터베이스의 처리 및 그래프 출력 화면을 나타낸다. 데이터베이스 부분은 크게 데이터베이스 연결, 데이터 저장, 데이터 삭제, 그래프 출력 부분으로 나누어지며, 각 부분에서 담당하는 역할은 다음과 같다.

표 4.2 피뢰기 데이터베이스의 특징

Table 4.2 Characteristics of the lightning arrester database

컬럼 이름	저장 데이터	저장 형태
time	현재 시간	text(300)
id	피뢰기 ID	int(10)
itr	전체 누설전류 실효값	int(10)
itp	전체 누설전류 최대값	int(10)
ir	저항분 누설전류 최대값	int(10)
i3	제 3고조파 누설전류	int(10)
i5	제 5고조파 누설전류	int(10)
i7	제 7고조파 누설전류	int(10)
i9	제 9고조파 누설전류	int(10)
ta	피뢰기 주위 온도	int(10)
ts	피뢰기 표면 온도	int(10)
sepos	양극 서지 이벤트	int(10)
seneg	음극 서지 이벤트	int(10)



그림 4.31 데이터베이스 처리 및 그래프 출력 화면

Fig. 4.31 Output display of the database processing and graph

#### 가. 데이터베이스 연결

MySQL 데이터베이스와 열화진단부를 연결해주며, 데이터를 입력하거나 삭제할 때 SQL 질의문(SQL query)을 사용하여야 하는데, 이와 관련된 초기화를 처리하는 부분이다.

#### 나. 데이터 저장

표 4.2에서 13개의 데이터는 SQL 질의문 중 'insert' 질의문을 사용하여 데이터베이스에 저장한다. 피뢰기 측정 장비인 데이터 취득 모듈로부터는 10초마다 한 번씩 데이터를 수신받게 되고, 피뢰기도 여러 대이기 때문에 수신되는 모든 데이터를 저장하려고 하면 데이터베이스의 크기가 엄청나게 늘어난다. 피뢰기의 수명이 10 ~ 15년 사이임을 감안할 때 모든 데이터를 저장할 필요성은 없다. 따라서 데이터는 기본적으로 10분마다 수신받은 피뢰기 측정 장비의 데이터를 데이터베이스에 저장한다. 그리고 저장주기는 10분, 30분, 1시간, 2시간, 3시간으로 사용자가 선택할 수 있도록 하였다. 또한 이상 값이 발생한 경우에는 자동적으로 데이터베이스에 저장되도록 구현하였다.

#### 다. 데이터 삭제

데이터베이스를 백업하거나 시스템을 초기화시킬 때와 같이 특별한 경우나 사용자의 필요에 의해서 데이터베이스에 저장되어 있는 데이터를 삭제할 경우가 발생한다. 따라서 1개월, 3개월, 6개월, 1년, 3년, 5년 이전의 자료를 사용자가 선택하여 삭제할 수 있도록 구현하였다.

데이터베이스의 데이터 삭제의 경우 'time' 컬럼을 이용하여 삭제한다. 현재시간이 2007년 10월 18일 17시 35분 22초일 경우, 데이터베이스에서 3개월 이전의 데이터를 삭제방법은 그림 4.32와 같다. 이 예를 실행하게

되면 2007년 10월, 2007년 9월, 그리고 2007년 8월이 아닌 모든 데이터를 삭제한다.

```
delete from 'ar_table' where 'time' NOT IN (select 'time' from 'ar_table'  
where 'time' like "200710%" and "200709%" and "200708%")
```

그림 4.32 데이터베이스의 데이터 삭제의 예

Fig. 4.32 Example of the data delete from database

라. 그래프 출력

그림 4.31의 아래 화면은 피뢰기의 측정 데이터들 중에서 선택한 데이터의 변화량에 대한 그래프가 출력되는 화면이다. 데이터베이스에 저장된 데이터를 1일, 1주일, 1달, 1년 단위로 그래프를 보여줌으로써 피뢰기의 상태 변화를 관찰할 수 있어 피뢰기의 열화를 판단하는데 도움을 준다. 각 단위별로 그래프를 출력하는 방법은 다음과 같다.

- 1일(day)인 경우 데이터베이스에서 하루 동안 저장된 값을 가져와 1시간 단위로 평균을 구하여 24개의 값을 구한 후 그래프로 나타낸다.
- 1주일(week)인 경우 데이터베이스에서 하루 단위로 평균을 구하여 7개의 값을 구한 후 그래프로 나타낸다.
- 1달(month)인 경우 데이터베이스에서 하루 단위로 평균을 구하여 30개의 값을 구한 후 그래프로 나타낸다.
- 1년(year)인 경우 데이터베이스에서 한 달 단위로 평균을 구하여 12개의 값을 구한 후 그래프로 나타낸다.

그림 4.33은 'id'가 1번인 피뢰기의 저항분 누설전류에 대해서 한 달 동안의 변화량을 그래프로 보여주기 위한 의사코드(pseudocode)이다.

```
현재시간 = 2007년 10월 23일
days = 0
while (days < 30) {
  x축 = 30 - days
  y축 = select avg('ir') from 'ar_table' where 'id=1' and
        time='(현재시간 - days)%'
  days = days + 1
}
```

그림 4.33 데이터 변화량 그래프 출력 의사코드의 예  
Fig. 4.33 Example of the pseudocode for data trend graph

x축이 1인 경우, y축은 'ar\_table'에서 'id'가 1번이고 'time'에 20071023이 들어 있는 데이터 중에서 'ir' 컬럼만을 선택하게 된다. 즉, 20071023의 데이터는 2007년 10월 23일의 데이터를 나타내므로 선택된 데이터의 평균을 구하면 하루 동안의 저항분 누설전류를 구할 수 있다. 이런 방법으로 30일 이전까지의 하루하루의 평균을 모두 구하여 그래프로 출력한다.

#### (4) 열화진단

진단 모듈에서 가장 핵심 요소인 열화진단부에서는 JESS를 이용하여 피뢰기에 대한 열화상태를 진단하고 그 결과를 출력한다.

그림 4.34는 피뢰기의 열화진단 구조를 나타내며, 우선 피뢰기의 열화와 관련된 진단 지식을 수집해야 하는데 피뢰기의 열화를 진단하는 방법은 피뢰기가 설치되는 장소, 환경, 보호하고자 하는 장비의 특성에 따라서 조금씩 달라진다.

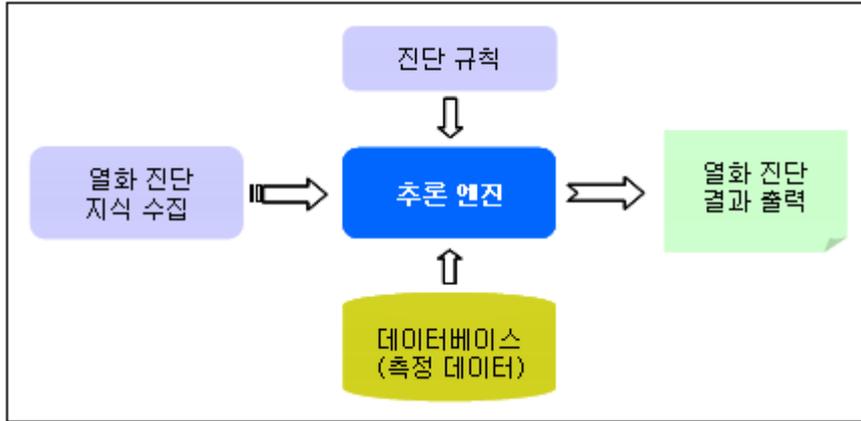


그림 4.34 피뢰기의 열화진단 구조  
 Fig. 4.34 Deterioration diagnostic structure of lightning arresters

JESS에서는 사실로서 데이터베이스에 저장된 11개의 진단 파라미터를 사용하며, 규칙으로는 피뢰기의 이상 여부를 판단할 수 있는 진단지식을 사용한다. 본 연구에서는 변전소의 GIS용 피뢰기를 대상으로 전문가 시스템을 구현하기 때문에 전문가로부터 변전소 GIS용 피뢰기의 열화를 진단하는 지식을 수집한다. 표 4.3은 5가지의 열화진단 지식을 나타낸다.

표 4.3 피뢰기의 열화진단 지식  
 Table 4.3 Deterioration diagnostic knowledge of lightning arresters

No	열화진단 지식
1	전체 누설전류가 증가했으면, 전체 누설전류의 실효값 또는 최대값을 확인한다
2	저항분 누설전류가 증가했으면, 저항분 누설전류 최대값을 확인한다
3	표면온도와 주위온도 차이가 3℃ 이상이면, 피뢰기 상태를 확인한다
4	고조파의 증가가 나타나면, 제 3고조파 누설전류 값을 확인한다
5	서지 발생 횟수가 증가하면 피뢰기 상태를 확인한다

이렇게 수집한 열화진단 지식을 바탕으로 열화진단 규칙을 만들고, 데이터베이스에 저장된 측정 데이터를 만들어진 규칙에 적용하여 열화진단 결과를 출력한다. 본 연구에서 사용한 열화진단 규칙은 총 5가지이며, 각 규칙은 다음과 같다.

가. 규칙 1 : 전체 누설전류 증가

전체 누설전류의 경우 실효값과 최대값으로 나누어진다. 전체 누설전류 실효값이 증가하면 최대값도 증가하므로 실효값만을 이용하여 열화 판단에 이용한다. GIS용 피뢰기의 경우 실효값이 평균 200  $\mu$ A ~ 500  $\mu$ A 정도이다. 따라서 전체 누설전류 실효값이 처음값의 2배 이상 증가할 경우 진단 메시지를 출력한다. 그림 4.35는 MySQL 문법으로 작성한 의사코드이다. 열화를 진단하기 위해 선택한 피뢰기의 전체 누설전류 실효값을 초기의 100개와 마지막 100개의 평균을 구하여 서로 비교한다.

```

s_id = 선택한 피뢰기 id 값
초기값 = select avg('itr') from 'ar_table' where 's_id' order by 'time'
asc limit 0,100
최근값 = select avg('itr') from 'ar_table' where 's_id' order by 'time'
desc limit 0,100
if ( 최근값 >= 초기값 * 2 )
    "전체 누설전류 증가폭이 크므로 피뢰기를 점검하라"
  
```

그림 4.35 규칙 1의 의사코드  
Fig. 4.35 Pseudocode of the rule 1

나. 규칙 2 : 저항분 누설전류 증가

정상 작동하고 있는 피뢰기의 저항분 누설전류의 최대값은 100  $\mu$ A 정

도이다. 규칙 1에서와 같이 저항분 누설전류 값이 처음값의 2배 이상으로 증가할 경우 진단 메시지를 출력한다.

다. 규칙 3 : 피뢰기 표면온도와 주위온도 차이 증가

피뢰기의 누설전류가 증가하면 표면온도도 함께 증가한다. 따라서 피뢰기의 표면온도와 주위온도의 차이가 3℃ 이상이 되면 진단 메시지를 출력한다.

```
s_id = 선택한 피뢰기 id 값
count = 0
while (100번) {
    표면온도 = select 'ts' from 'ar_table' where 's_id' order by 'time'
                desc limit 0,100
    주위온도 = select 'ta' from 'ar_table' where 's_id' order by 'time'
                desc limit 0,100
    if ( (표면온도 - 주위온도) >= 3) count++
}
if ( count >=50 ) "피뢰기의 표면온도가 증가했으므로 피뢰기를 점검하라"
```

그림 4.36 규칙 3의 의사코드

Fig. 4.36 Pseudocode of the rule 3

그림 4.36의 의사코드는 열화진단을 위해 선택한 피뢰기의 최근 100개의 데이터를 가져와 주위온도와 표면온도를 비교한다. 이때 온도차가 3℃ 이상인 경우가 50번 이상이면 진단 메시지를 출력하는 코드이다.

라. 규칙 4 : 제 3고조파 누설전류 증가

제 3고조파 누설전류는 저항분 누설전류와 파형 및 크기가 다르지만

동일한 변화 경향을 나타내므로, 제 3고조파 누설전류를 측정하여 간접적으로 저항분 누설전류의 증가를 검출할 수 있다. 정상 작동하고 있는 피뢰기의 경우 제 3고조파 누설전류는 100  $\mu$ A 미만이며, 제 3고조파 누설전류가 처음값의 2배 이상으로 증가할 경우 진단 메시지를 출력한다.

마. 규칙 5 : 서지 유입횟수 증가

피뢰기는 서지 유입횟수가 많을수록, 유입된 서지의 크기가 클수록 열화가 빨리 진행된다. 따라서 서지 유입횟수가 피뢰기의 정격 에너지내량 (예: 500 A  $\times$  200회)을 초과하면 진단 메시지를 출력한다.

위의 5가지 규칙 중 하나라도 적용되면 열화의 가능성이 있으므로 피뢰기를 점검하라는 메시지를 출력하도록 하였으며, 적용되는 규칙이 많을수록 열화의 가능성이 높다는 판단을 내릴 수 있다.

현재까지 피뢰기의 열화진단과 관련된 기준이 마련되어 있지 않아 본 연구에서는 그동안의 연구결과를 토대로 열화진단 지식 및 규칙을 적용하였다. 또한, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 GIS용 피뢰기의 설치 환경 및 진단 파라미터의 변화 등으로 인해 진단 조건이 달라질 수 있으므로 제안한 진단 모듈은 열화진단 지식과 규칙을 추후 추가 또는 수정 요소들의 발생시 능동적으로 대처할 수 있도록 설계하였다.

#### 4.2.2 평가 및 분석

실제 운전중인 변전소의 GIS용 피뢰기를 대상으로 하는 시험에 앞서 1개의 배전급 피뢰기를 대상으로 실험실내에서 데이터 취득 모듈과 ZigBee 모듈 및 진단 모듈이 정상적으로 작동하는지 여부에 대한 시험을 수행하였다. 시험 결과 데이터 취득 모듈에서 측정된 진단 파라미터들이 10초마다 한 번씩 PC의 진단 모듈에 전달되어 계속 업데이트 되었으며, 피뢰기 ID 출력, 전체 데이터 출력, 상세 데이터 출력, 경고 메시지 출력 등의 기능들이 설계한 대로 작동함을 확인할 수 있었다.

다음 단계로 여러 대의 피뢰기를 대상으로 하는 시험을 위해서 그림 4.37과 같은 측정 데이터 생성 프로그램을 이용하여 실제 현장의 피뢰기 측정 데이터와 같은 형식으로 데이터를 만들어 전송하도록 함으로써 실험실내에서 진단 모듈에 대한 모의시험을 수행하였다.

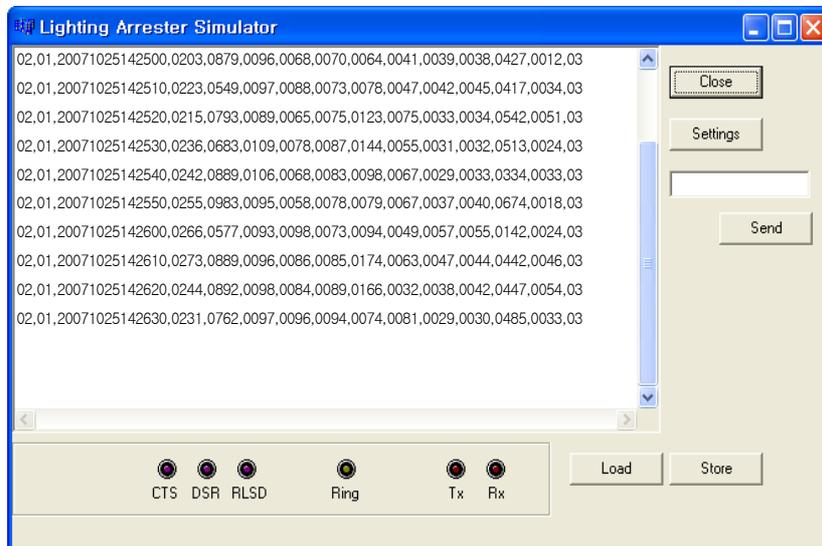


그림 4.37 피뢰기 측정 데이터 생성 프로그램

Fig. 4.37 Generating program of arrester measurement data

본 시험의 주목적은 진단 모듈의 정상 작동여부 확인에 있으므로, 측정 데이터 생성 프로그램에서 만들어 전송하는 데이터 값은 정해진 범위 안에서 임의의 수를 발생시키도록 하였다.

그림 4.37에서 첫 번째 컬럼은 STX, 두 번째는 피뢰기 ID, 세 번째는 측정 시간이며, 마지막 컬럼은 ETX를 나타낸다. 네 번째 컬럼에서부터 ETX 이전까지의 컬럼은 각각 전체 누설전류 실효값(200 ~ 1000), 전체 누설전류 최대값(500 ~ 1500), 저항분 누설전류 최대값(50 ~ 1000), 제 3고조파 누설전류 실효값(50 ~ 130), 제 5고조파 누설전류 실효값(50 ~ 110), 제 7고조파 누설전류 실효값(40 ~ 100), 제 9고조파 누설전류 실효값(40 ~ 90), 주변온도(20 ~ 40), 표면온도(20 ~ 80), 정극성 및 부극성 서지(0 ~ 1000)를 나타내며, 10초마다 임의의 수를 발생시켜 전송한다.

그림 4.38은 컴퓨터에 연결하여 사용할 수 있는 ZigBee 모듈이다. ZigBee 모듈에서는 측정 데이터 생성 프로그램에서 만들어주는 데이터를 진단 모듈이 설치된 원격의 PC로 무선 전송함으로써, 실제 피뢰기에 설치되는 데이터 취득 모듈과 같은 역할을 수행하도록 하였다.

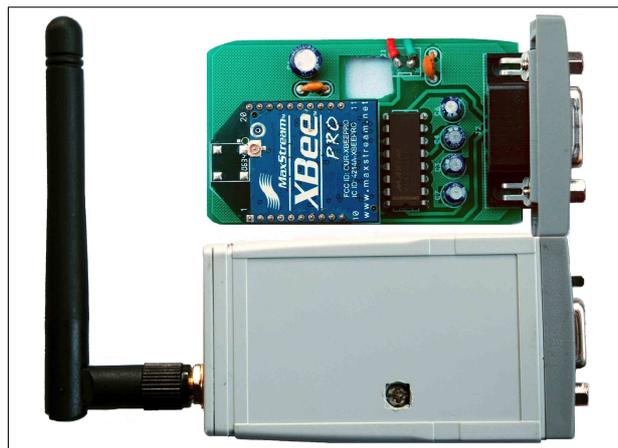


그림 4.38 ZigBee 모듈  
Fig. 4.38 The ZigBee module

그림 4.38과 같은 ZigBee 모듈 6개를 6대의 컴퓨터에 연결하였으며, 각 컴퓨터에 설치된 피뢰기 측정 데이터 생성 프로그램에서 ID 1, ID 2, ID 4, ID 5, ID 7, ID 10에 해당하는 측정 데이터를 만들면, ZigBee 모듈에서 10초마다 한 번씩 데이터를 전송하게 된다. 따라서 총 6개의 피뢰기에 설치된 데이터 취득 모듈로부터 데이터를 수신받는 환경을 구현하였다.

그림 4.39는 시뮬레이터 환경으로부터 데이터를 수신받아 출력한 전체 데이터 화면이다. 6개의 피뢰기 ID가 ID NUMBERS 리스트에 출력되고, 각각의 ID에 해당하는 측정 데이터 값들이 정상적으로 출력되며, 비정상적인 값이 발생할 경우 경고 메시지가 출력되고 있음을 확인할 수 있다.

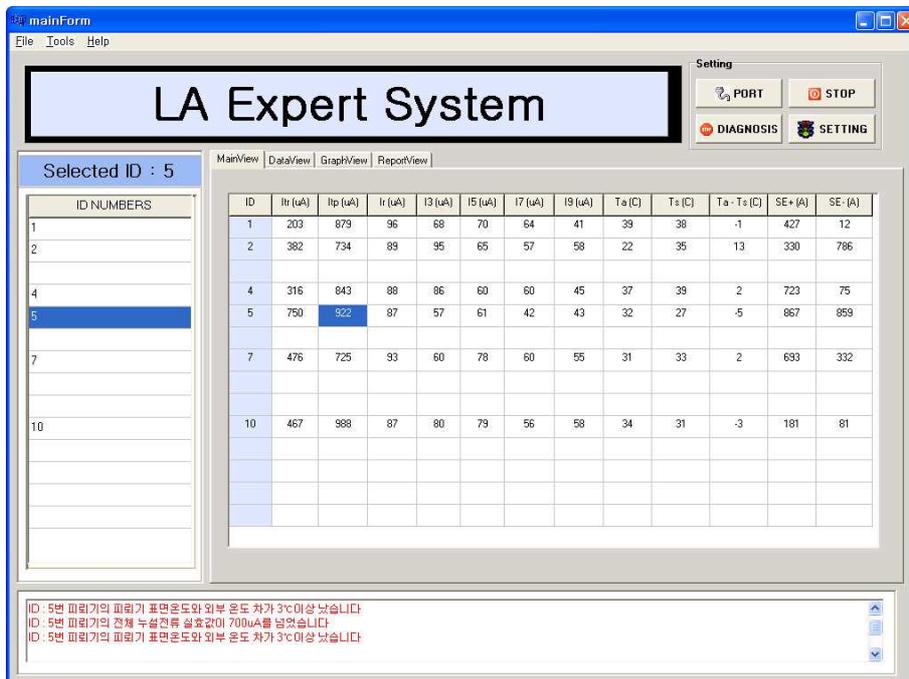


그림 4.39 전체 데이터 출력 화면  
Fig. 4.39 Output display of a whole data

그림 4.40은 그림 4.39의 ID NUMBERS에서 4번 피뢰기를 클릭하여 상세 데이터 화면으로 전환한 경우이며, 그림과 같이 4번 피뢰기에 대한 전체 누설전류 실효값에서 온도차까지의 데이터를 숫자와 히스토그램 형태로 출력하고 있다. 또한 서지 이벤트의 경우 단계별로 나누어 누적된 횟수를 계속 보여주며, 가장 최근에 유입된 서지에 대해서는 발생시간, 크기 및 극성이 함께 출력되고 있음을 확인할 수 있다.

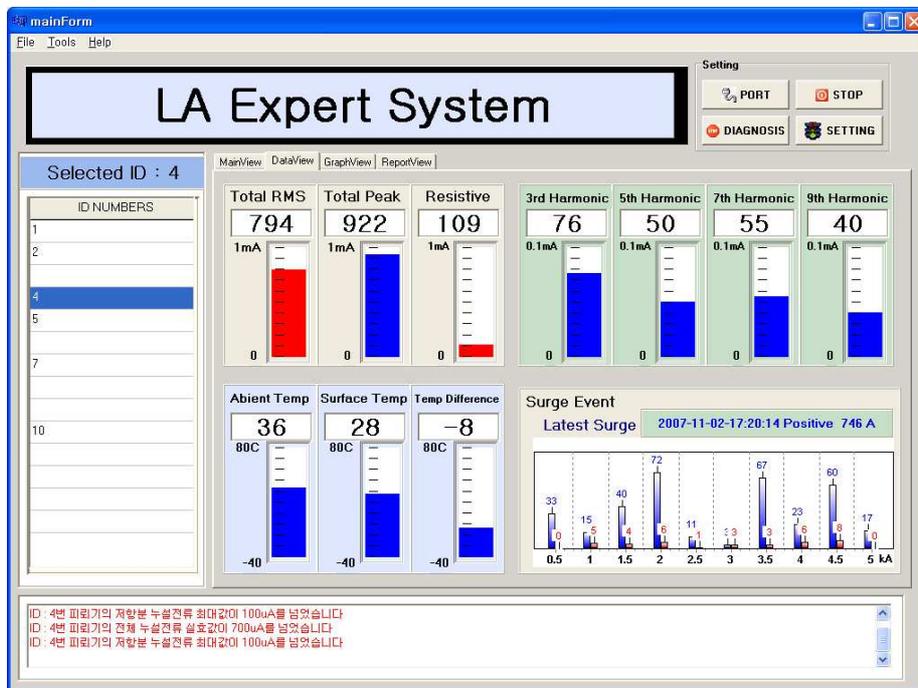


그림 4.40 상세 데이터 출력 화면  
Fig. 4.40 Output display of a detailed data

그림 4.41은 시뮬레이터 환경으로부터 수신받은 데이터를 데이터베이스에 저장한 후, 저장된 데이터 중 5번 피뢰기의 저항분 누설전류 최대값에 대한 하루 동안의 변화량을 그래프로 출력한 화면이다. 화면 위쪽의

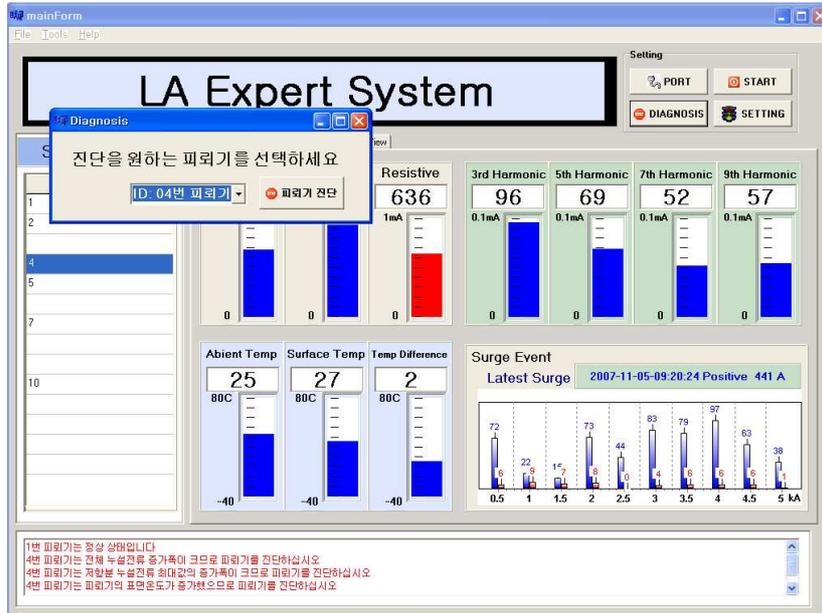
메모 상자에는 데이터베이스에 저장된 하루 동안의 저항분 누설전류 최대값에 대하여 1시간 단위로 계산한 24개의 평균값을 출력한다.

이와 같이 진단 파라미터 중 하나를 선택하여 그 변화량을 그래프로 출력함으로써, 피뢰기의 상태변화를 쉽게 관찰할 수 있어 열화 여부를 판단하는데 도움을 준다.



그림 4.41 데이터베이스 저장 및 그래프 화면  
Fig. 4.41 Display of the database save and graph

그림 4.42는 데이터베이스에 저장된 데이터를 이용하여 피뢰기의 열화를 진단하는 화면이다. 그림 4.42 (a)는 4번 피뢰기를 선택한 후 데이터베이스에 저장된 4번 피뢰기의 데이터들을 열화진단 규칙에 적용시켜 진단을 실행하는 화면이며, 그 결과를 화면 아래의 메시지 창에 출력한다.



(a) 진단 화면

```

Console Facts Rules Functions Defglobals Deftemplates Deffacts Settings
(reset)
TRUE
Jess> (batch "C:/Program Files/Protege_2.1/examples/arrester/facts.clp")
TRUE
Jess> (batch "C:/Program Files/Protege_2.1/examples/arrester/rules.clp")
TRUE
Jess> (assert (V 24.000) (Itr 12.000) (Itp 14.000) (Irp 12.000) (Ta 24) (Ts 27) (I3 7.000) (scount 1))
<Fact-8>
Jess> (assert (V 24.000) (Itr 13.000) (Itp 15.000) (Irp 14.000) (Ta 24) (Ts 28) (I3 7.000) (scount 3))
<Fact-13>
Jess> (assert (V 24.000) (Itr 15.000) (Itp 15.000) (Irp 14.000) (Ta 24) (Ts 28) (I3 8.000) (scount 4))
<Fact-16>
Jess> (assert (V 24.000) (Itr 16.000) (Itp 12.000) (Irp 11.000) (Ta 24) (Ts 28) (I3 8.000) (scount 4))
FALSE
Jess> (assert (V 24.000) (Itr 16.000) (Itp 12.000) (Irp 11.000) (Ta 24) (Ts 28) (I3 8.000) (scount 6))
<Fact-20>
Jess> (run)
열화!
열화!
2
Jess>

```

(b) 진단결과의 예

그림 4.42 피뢰기 열화 진단의 예  
 Fig. 4.42 Example of a diagnostic result

진단 모듈의 열화진단 결과를 모의하기 위해 임의로 열화된 피뢰기의 조건을 만족하는 사실과 규칙을 JESS와 연동시킨 Protege 2.1에서 실행시켜 보았다. 그림 4.42 (b)는 전체 누설전류가 점차 증가하여 정상상태를 넘어서고, 이에 따라 피뢰기 표면온도와 제 3고조파 누설전류의 값이 증가하는 조건을 임의로 구현한 것이다. JESS의 룰 엔진을 실행시켜본 결과, 열화진단 규칙이 제대로 적용되어 진단 결과를 도출하고 있음을 알 수 있다.

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 가스절연변전소용 피뢰설비의 열화진단기술 및 전문가 시스템 개발에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ZnO 피뢰기의 계절적 온도변화에 따른 전체누설전류의 변화는 10  $\mu$ A 이하이며, 이는 피뢰기에 따라 나타나는 특성 차이보다도 작은 값이므로 피뢰기 진단시 계절적인 온도변화에 따른 영향은 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

또한 피뢰기의 열화는 누설전류의 증가로 나타나며 정상누설전류 값의 200% 이상에서는 피뢰기의 표면온도가 상승하여 주위온도와 표면온도에 현저한 차이가 발생하므로, 표면온도의 측정만으로 누설전류의 산출이 가능하여 온도차도 피뢰기의 진단 파라미터가 될 수 있다.

2. 피뢰기에 인가되는 전원전압의 변동으로 인해 열화와 무관한 누설전류의 변화가 발생하므로, 피뢰기 진단시 전원전압의 변동에 따른 누설전류의 크기를 보정해 줄 수 있어야 한다.
3. 피뢰기의 누설전류는 전원전압에 포함된 제 3고조파 전압의 크기 및 위상에 따라 열화와 무관한 증감이 나타남을 이론적으로 해석하였다. 시뮬레이션 결과로부터 제 3고조파 성분의 크기와 위상에 따른 능동적인 보정계수를 산출하였으며, 제안한 보정계수 산출방법을 진단기술에 적용함으로써 보다 정확한 진단이 가능하였다.
4. 피뢰기의 열화진단에 있어서 중요한 파라미터인 저항분 누설전류를 검출할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 전압의 크기가 같은 두점에서 저항분 누설전류의 크기 및 극성이 같다는 원리로, 인가전압과 누

설전류를 측정하여 마이크로프로세서에서 계산한다. 저항분 누설전류의 크기와 파형을 정확하게 분석할 수 있으며, 손실전력과 같은 진단 파라미터를 계산할 수 있는 장점이 있다.

5. 피뢰기의 수명에 영향을 미치는 서지전류의 크기 및 발생횟수뿐 아니라 발생일시 및 극성까지 측정할 수 있는 지능형 서지 카운터를 제안하였다. 축적된 데이터로부터 피뢰기의 잔여수명 예측과 진단, 선정과 관리, 계통의 절연협조 자료 등으로 활용할 수 있다.
6. 전원전압 측정회로, 누설전류 측정회로, 온도 측정회로, 서지 측정회로 및 무선 전송회로 등이 내장된 마이크로프로세서 기반의 데이터 취득 모듈을 설계 및 제작하였다. 시제작 모듈은 피뢰기로부터 진단 파라미터들을 측정·분석하여 진단 모듈이 설치된 원격의 PC로 데이터를 전송한다.
7. 데이터 취득 모듈로부터 전송되는 데이터를 수신받아 원격으로 실시간 피뢰기의 상태진단 및 열화진단을 할 수 있는 JESS 기반의 진단 모듈을 설계 및 구현하였다. 제안한 진단 모듈은 지식베이스와 추론엔진, 그래픽 사용자 인터페이스 등으로 구성되며, If-Then 조합에 의한 전방향 추론방식을 채택하여, 변전소용 피뢰설비 진단에 적용 가능성을 확인하였다.

결론적으로 본 연구를 통해 얻어진 결과를 적용하여 보다 효율적인 GIS용 피뢰설비의 관리 및 진단이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 열화상태 상시관측, 교체시기 알림, 수명 예측 등의 기능을 통해서 변전설비에서 피뢰기로 인한 사고발생을 극소화하여, 전력공급의 신뢰성 향상 및 무중단 운영에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## 참 고 문 헌

- [1] P.Chowdhuri, "Electromagnetic Transients in Power Systems", Research Studies Press, pp.266~296, 1987
- [2] 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
- [3] 橋本信雄, "雷とサージ發生のしくみから被害防止まで", 電氣書院, pp. 79~114, 1995
- [4] 酸化亞鉛形避雷器の特性評価試験法調査専門委員會委員, "酸化亞鉛形避雷器の特性評価試験法調", 日本電氣學會技術報告 第474号, 1993
- [5] J.R.Ribeiro, M.E.McCallum, "An application of metal oxide arresters in the elimination of need for closing resistors in EHV breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.1, pp.282~291, 1989
- [6] 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
- [7] 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.1811~1822, 1990
- [8] S. Shichimiya, et al., "Development of advanced arresters for GIS with new Zinc-oxide Elements", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.13, No.2, pp.465~471, 1998
- [9] 岡藤伸夫 外, "酸化亞鉛形避雷器の漏れ電流檢出方式の提案", 日本電氣學會電力・エネルギー部門大會, pp.850~851, 1994
- [10] 石崎義弘 外, "避雷器の外部診斷技術", OHM, Vol.74, No.4, pp.45~50, 1987
- [11] 石辺信治, "酸化亞鉛形避雷器の劣化診斷テクニック", 電氣計算, Vol. 55, No.3, pp.56~60, 1987
- [12] S.S.Kershaw et al., "Applying metal-oxide surge arresters on distri

- bution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.1, pp.301~307, 1989
- [13] 金方直弘 外, "避雷器の漏れ電流検出器の開発", 日本電気學會電力・エネルギー部門大會, pp.848~849, 1994
- [14] S.Tominaga et al., "Reliability and application of metal oxide surge arresters for power systems", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.3, pp.805~813, 1979
- [15] M.Bartkowiak et al., "Failure Modes and Energy Absorption Capability of ZnO Varistors", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, No.1, pp.152~162, 1999
- [16] T.K.Gupta, "Application of zinc oxide varistors", Journal of the American Ceramic Society, Vol.73, No.7, pp.1817~1840, 1990
- [17] Yih-Shing Lee et al., "Phase Identification and Electrical Properties in ZnO-Class Varistors", Journal of the American Ceramic Society, Vol.75, No.6, pp.1636~1640, 1992
- [18] A.Mizukoshi et al., "Influence of Uniformity on Energy Absorption Capabilities of Zinc Oxide Element as Applied in Arresters", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-102, No.5, pp.1284~1390, 1983
- [19] L.M.Levinson, H.R.Philipp, "Zinc oxide Varistors - A Review", Journal of Applied Physics, Vol.50, No.11, pp.6633~6637, 1979
- [20] J.Wong, "Barrier Voltage Measurement in Metal Oxide Varistors", Journal of Applied Physics, Vol.47, No.11, pp.4971~4974, 1976
- [21] M.Matsuoka, "Nonohmic properties of zinc ceramics", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.10, No.6, pp.736~746, 1971
- [22] J.Wong et al., "Nature of an intergranular thin-film phase in a highly non-ohmic metal oxide varistor", Journal of Applied Physics, Vol.46, No.4, pp.1827~1834, 1975
- [23] M.Inada, "Microstructure of Nonohmic Zinc Oxide Ceramics", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.17, No.4, pp.673~680, 1978
- [24] W.G.Morris, "Physical properties of the electrical barriers in

- varistors", J. Vac. Sci. Technol., Vol.13, No.4, pp.926~931, 1976
- [25] D.R.Clarke, "The microstructural location of the intergranular metal oxide phase in a zinc oxide varistor", Journal of Applied Physics, Vol.49, No.4, pp.2407~2411, 1978
- [26] W.D.Kingery et al., "A scanning transmission electron microscopy investigation of grain-boundary segregation in a ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> varistor", Journal of the American Ceramic Society, Vol.62, No.3-4, pp.221~222, 1979
- [27] D.R.Clarke, "Grain-boundary segregation in a commercial ZnO - based varistor", Journal of Applied Physics, Vol.50, No.11, pp.6829~6832, 1979
- [28] A.T.Santhanam et al., "Microstructural evaluation of multicomponent ZnO ceramics", Journal of Applied Physics, Vol.50, No.2, pp.852~859, 1979
- [29] L.M.Levinson, H.R.Philipp, "The physics of metal oxide varistors", Journal of Applied Physics, Vol.46, No.3, pp.1332~1341, 1975
- [30] H.R.Philipp, L.M.Levinson, "Tunneling of photoexcited carriers in metal oxide varistors", Journal of Applied Physics, Vol.46, No.7, pp.3206~3207, 1975
- [31] G.E.Pike et al., "Electroluminescences in ZnO varistors: evidence for hole contributions to the breakdown mechanism", Journal of Applied Physics, Vol.57, No.12, pp.5512~5518, 1985
- [32] G.E.Pike, "Semiconductor grain-boundary admittance: Theory", Physical Review B, Vol.30, No.2, pp.795~802, 1984
- [33] G.Blatter et al., "Carrier transport through grain boundaries in semiconductors", Physical Review B, Vol.33, No.6, pp.3952~3966, 1986
- [34] G.Blatter et al., "Electrical breakdown at semiconductor grain boundaries", Physical Review B, Vol.34, No.12, pp.8555~8572, 1986
- [35] K.Eda, A.Iga, M.Matsuoka, "Degradation mechanism of non-ohmic zinc oxide ceramics", Journal of Applied Physics, Vol.51, No.5, pp.2678~2684, 1980

- [36] P.R.Emtage, "The physics of zinc oxide varistors", Journal of Applied Physics, Vol.48, No.10, pp.4372~4384, 1977
- [37] K.Eda, "Conduction mechanism of non-ohmic zinc oxide ceramics", Journal of Applied Physics, Vol.49, No.5, pp.2964~2972, 1978
- [38] G. D. Mahan et al., "Theory of conduction in ZnO varistors", Journal of Applied Physics, Vol.50, No.4, pp.2799~2812, 1979
- [39] P.L.Hower et al., "A barrier model for ZnO varistors", Journal of Applied Physics, Vol.50, No.7, pp.4847~4855, 1979
- [40] H.R.Philipp et al., "Low-temperature ac properties of metal-oxide varistors-A clue to conduction mechanism", Journal of Applied Physics, Vol.48, No.4, pp.1621~1628, 1977
- [41] K.Eda, "Transient conduction phenomena in non-Ohmic zinc oxide ceramics", Journal of Applied Physics, Vol.50, No.6, pp.4436~4442, 1979
- [42] 김명식, "정공의 확산전류에 의한 ZnO 바리스터의 도전기구 해석", 한국과학기술원, 박사학위논문, 1991
- [43] K.Eda, "Zinc Oxide Varistors", IEEE Transaction on Electrical Insulation Magazine, Vol.5, No.6, pp.28~39, 1989
- [44] G.D.Mahan, "Intrinsic defects in ZnO varistors", Journal of Applied Physics, Vol.54, No.7, pp.3825~3832, 1983
- [45] W.L.Lee et al., "Defects and degradation in ZnO varistors", Journal of Applied Physics Letters, Vol.69, No.4, pp.526~531, 1996
- [46] K.Eda et al., "Grain growth control in ZnO varistors using seed grains", Journal of Applied Physics, Vol.54, No.2, pp.1095~1099, 1983
- [47] K.Eda, "Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents", Journal of Applied Physics, Vol.56, No.10, pp.2948~2955, 1984
- [48] Y. Fugiwara, Y. Shibuya, M. Imataki, "Evaluation surge degradation of metal oxide surge arrester", IEEE Transaction, Vol.PAS-101, No.4, pp.978~985, 1982
- [49] A. M. Plata, M. A. Ponce, "Degradation of ZnO based surge arresters under field conditions", IEE Proc. Vol.143, No.5, pp.291~297, 1996
- [50] 小島宗次, 菅雅弘, 舛澤弘一, "酸化亞鉛避雷器の依存モデル", 日本電氣

- 學會 論文誌, B114卷, 3号, pp.310~316, 1994
- [51] P.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
- [52] 馬場則男 外, "酸化亞鉛素子の雷インパルス電流印加による特性変化の検討", 日本電氣學會放電・高電壓合同研究會資料, ED-95-186, HV-95-57, pp.45~53, 1995
- [53] 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", 日本電氣學會 論文誌, B113卷, 4号, pp.390~396, 1993
- [54] 길경석, 한주섭, 송재용, 김명진, 김정배, 조한구, "뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성과 피뢰기 열화진단 전문가 시스템", 대한전기학회 논문지, Vol.51C, No.4, pp.152~157, 2002
- [55] 石崎義弘 外, "避雷器の外部診断技術", OHM, No.4, pp.45~50, 1987
- [56] 金方直弘 外, "避雷器の漏れ電流検出器の開発", 日本電氣學會電力・エネルギー部門大會, pp.848~849, 1994
- [57] 江藤伸夫 外, "酸化亞鉛形避雷器の漏れ電流検出方式の提案", 日本電氣學會電力・エネルギー部門大會, pp.850~851, 1994
- [58] 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
- [59] 宇治田克 外, "酸化亞鉛形避雷器用漏れ電流検出器", 三菱電機技報, Vol.55, No.3, pp.228~231, 1981
- [60] 길경석, 한주섭, 송재용, 서황동, 문승보, 박태곤, "온도측정에 의한 산화아연형 피뢰기 진단", 대한전기학회 논문지, Vol.54C, No.8, pp.361~364, 2005
- [61] 김일권, 송재용, 한주섭, 길경석, 류길수, 조한구, "피뢰기 열화진단에 있어 전원고조파의 영향과 보정에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol.54C, No.11, pp.493~497, 2005
- [62] 길경석, 송재용, 박진길, "가스 튜브와 산화아연 바리스터의 PSpice 모델", 한국박용기관학회지, Vol.23, pp.150~158, 1999
- [63] 길경석, 한주섭, 송재용, 박대원, 서황동, "피뢰기 진단을 위한 저항분누설전류의 새로운 측정기법", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회

- (방전 · 플라즈마 분과), pp.73~75, 2004
- [64] 길경석, 송재용, 김일권, 문승보, 권장우, “GIS 피뢰설비 관리를 위한 전문가 시스템 구현”, 한국조명 · 전기설비학회 논문지, Vol.21, No.1, pp.75~81, 2007
- [65] 송재용, 김일권, 문승보, 차명수, 길경석, “GIS Arrester용 서지카운터의 설계 및 제작”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.39~41, 2006
- [66] 길경석, 송재용, 김일권, 문승보, 차명수, “피뢰기 관리를 위한 서지카운터의 설계 및 제작”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.156(1~5), 2006
- [67] Ray W.F. and Davis R.M., “Developments in Rogowski current transducers”, EPE Conf. Proc., Trondheim, Vol.3, pp.308~312, 1997
- [68] Ray W. F. and Davis R. M., “Wide bandwidth Rogowski current transducers : Part 1 - The Rogowski coil”, EPC Journal, Vol.3, No.1, pp.51~59, 1993
- [69] Ray W. F., “Wide bandwidth Rogowski current transducers : Part 2 - The integrator”, EPE Journal, Vol.3, No.2, pp.116~122, 1993
- [70] IEEE Std. 802.11-1999, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications”, LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, Nov. 1999
- [71] J. Zheng and M. J. Lee., “A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4”, in IEEE Press, 2004
- [72] 서창수, 정환수, “유비쿼터스 센서 네트워크의 기술 동향”, 한백전자 R&D 개발부서, 2005
- [73] 이재규 외 2인 공저, “전문가 시스템의 응용과 사례분석”, 법영사, 1995
- [74] Stephen Prata, 역자 윤성일, “C++ 기초플러스 개정 4판”, 성안당, 2005
- [75] “C++ Builder 개발자 안내서”, 볼랜드 코리아 주식회사, 2001
- [76] 김호, “MYSQL로 배우는 데이터베이스 프로그래밍”, 영진닷컴, 2003
- [77] 김성인 외 3명, “그림에 의한 심리진단 전문가 시스템의 지식 체계”, 한국지능정보시스템학회 논문지, 제11권, 제1호, pp.65~93, 2005
- [78] Raggad, B.G. “Expert System Quality Control”, Information Processing & Management, Vol.32, pp.171~183, 1996

## 연구논문 발표실적

### ◎ 국내전문 학술지

- (1) “차량의 실내 폭발에 관한 연구”, 한국법과학회지, Vol.5, No.1, pp.59~63, 2004
- (2) “부하전류 모니터링 및 과형분석을 통한 1-2차 용흔 구별 방법”, 한국법과학회지, Vol.5, No.1, pp.47~58, 2004
- (3) “교통 신호등주 누전에 의한 감전”, 한국법과학회지, Vol.5, No.2, pp.135~142, 2004
- (4) “과전류 및 외열에 의해 용단된 전선의 내부조직 변화에 대한 연구”, 한국법과학회지, Vol.5, No.2, pp.121~130, 2004
- (5) “배선용 전선의 다양한 재결정 과정의 내부 조직변화에 대한 연구”, 한국법과학회지, Vol.5, No.4, pp.213~219, 2004
- (6) “타원해석법에 의한 먼지 두께 측정”, 한국법과학회지, Vol.5, No.4, pp.224~227, 2004
- (7) “저압용 전열수구에서 방전신호의 발생과 검출에 관한 연구”, 대한전기학회 논문지, Vol.54C, No.11, pp.498~502, 2005
- (8) “차량 방화의 흔적 식별에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.19, No.1, pp.59~69, 2005
- (9) “자동차 바퀴의 기계적 마찰에 의한 발화 연구”, 한국법과학회지, Vol.7, No.1, pp.63~69, 2006
- (10) “인버터 구동 유도전동기에서 과도전압의 측정과 분석”, 한국철도학회논문지, 제10권, 제6호, pp.650~654, 2007

### ◎ 국제학술회의 논문집

- (1) “The melting characteristics of a fuse in TV fire”, 12th Annual Meeting of Japanese Association of Forensic Science and Technology, Vol.11, p.108, 2006

◎ 국내학술회의 논문집

- (1) “전기적 발열체의 열적 특성”, 한국법과학회 법과학 심포지엄, 2000
- (2) “철도차량의 탈선 메커니즘에 대한 연구”, 한국법과학회 법과학 심포지엄, 2000
- (3) “등유의 연소 흔적에 관한 연구”, 제3회 한국법과학회 춘계학술대회, 2002
- (4) “Study on discrimination between primary short-circuit molten marks and secondary short-circuit molten marks on electric copper wires”, 제9회 한국법과학회 춘계학술대회, 2004
- (5) “전기적 접화원에 의한 탱크로리 폭발사고 사례”, 제11회 한국법과학회 춘계학술대회, 2005
- (6) “PTA(Purified Terephthalic Acid) 공정상 열매유 유출에 의한 화재 사례”, 제12회 한국법과학회 추계학술대회, 2005
- (7) “열화된 저압용 콘센트에서 방전신호의 발생과 검출”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, 제9권, 제2호, pp.200~203, 2005
- (8) “외부화염에 의한 154 kV OF케이블 소손 사례”, 제13회 한국법과학회 춘계학술대회, 2006
- (9) “차량의 진공배력장치가 제동력에 미치는 영향”, 제13회 한국법과학회 춘계학술대회, 2006
- (10) “아산화동 증식발열에 의한 화재사례 연구”, 제14회 한국법과학회 추계학술발표대회, 2006
- (11) “22.9kV 배전선로 지락에 의한 화재사례”, 제14회 한국법과학회 추계학술대회, 2006
- (12) “SIMS를 이용한 1-2차 용융흔 구별에 관한 연구”, 제14회 한국법과학회 추계학술대회, 2006
- (13) “프로그래밍 오류에 의한 스프링클러 미작동 사례”, 제15회 한국법과학회 춘계학술발표대회, 2007
- (14) “1차 용융흔 시료제작 방법의 개선에 관한 연구”, 제15회 한국법과학회 춘계학술발표대회, 2007

- (15) “옥내배선에서의 직렬아크 특성 분석”, 대한전기학회 송배전 설비연구회 및 고전압 및 방전응용기술 연구회 합동 춘계학술 발표회 논문집, 2-(31~34), 2007
- (16) “병렬아크에 대한 누전차단기의 트립특성 분석”, 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, pp.478~479, 2007
- (17) “부산항 골드웨이 보세창고의 화재원인 분석”, 한국화재소방학회 춘계학술논문발표회 논문집, pp.397~402, 2007

### ◎ 연구보고서

- (1) “발화기구의 정량적 해석을 위한 재현실험-전기화재 재현”, 2001, 국립과학수사연구소
- (2) “전기적 발열체의 열적 특성”, 2001, 국립과학수사연구소
- (3) “차량화재 연소형상과 발화원에 관한 연구”, 2003, 대구지방경찰청
- (4) “용융상태 배선용 전선의 재결정 과정 중 내부조직 변화에 대한 연구”, 2004, 국립과학수사연구소
- (5) “1차 및 2차 전기적 단락부의 내부조직 변화에 대한 연구”, 2005, 국립과학수사연구소
- (6) “1-2차 용혼의 발생 메커니즘에 따른 특성 변화에 관한 연구”, 2006, 국립과학수사연구소
- (7) “저압회로에서의 발화현상에 관한 연구(I) - TV에서의 발화현상을 중심으로”, 2006, 국립과학수사연구소
- (8) “저압회로에서의 발화현상에 관한 연구(II) - TV의 CPT 파손형상을 중심으로”, 2007, 국립과학수사연구소
- (9) “도체 접속부의 접촉 불량에 관한 연구”, 2007, 국립과학수사연구소

## 감사의 글

직장을 떠나 부산에 내려와 가정을 갖게 되었고, 이제 또 하나의 결실을 맺게 되었습니다. 그동안 도와주셨던 모든 분들께 감사의 말씀을 드립니다.

가정, 직장, 대학원 이 세가지를 병행하기가 무척 힘들다고 생각했던 제 자신이 부끄러울 정도로 늘 열심히 연구하는 모습, 진정한 학자의 모습을 몸소 보여주셨고, 논문이 완성되기 까지 하나하나 꼼꼼하게 지도해 주신 길경석 교수님께 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 좋은 논문이 될 수 있도록 성심성의껏 지도해주신 김윤식 교수님, 류길수 교수님, 박태곤 교수님, 조한구 박사님 감사합니다. 학위과정동안 많은 가르침을 주셨던 전태인 교수님, 이성근 교수님, 장낙원 교수님, 서동환 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

본 논문이 완성되기 까지 아낌없이 지원해 주신 국립과학수사연구소 남부 분소의 김윤희 소장님을 비롯한 실·과장님과 직원 여러분들께 감사드립니다. 특히 바쁜 일정에도 여러모로 배려해 주신 박종찬 과장님, 문병선 실장님, 박종진 연구사님, 서영일 연구사님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 멀리서 늘 격려해 주셨던 본소의 박남규 과장님, 김상현 과장님, 물리분석·교통공학과와 여러 실장님들과 연구사님들, 서부·중부·동부분소 이공학과(실)의 실·과장님 및 연구사님들께도 감사의 말씀을 드립니다. 좋은 인연으로 많이 격려해 주셨던 삼성방재연구소의 이의평 박사님께 감사드립니다.

항상 가족처럼 따뜻하게 대해 주었고 많이 도와 주셨던 연구실의 김일권님, 박대원님, 최수연님, 박찬용님, 김황국님, 지홍근님, 김성욱님, 차민재님께 감사의 말씀을 전합니다. 또한, 한주섭 박사님을 비롯한 고전압 응용 기술 연구실의 모든 가족께도 고마움을 전합니다.

늘 사랑을 베풀어 주시고 사시사철 애써 가꾸신 농산물을 보내주시는 부모님, 부모님 모시겠다고 고향 근처로 귀향한 큰형님 내외분, 작은형님 내외분, 누님 내외분, 동생 내외께 감사드리며, 이 기쁨을 함께하고 싶습니다.

결에 제시면서 뒷바라지 해주시고 아들 이상으로 대해 주시는 장인어른, 장모님께 감사드리며, 큰처제 내외, 작은처제, 처남께도 고마운 마음 전합니다.

끝으로 같이 직장생활 하면서 박사과정을 마칠 수 있도록 배려해 주고 늘 곁에서 따뜻하게 도와 준 아내 김영하님과 사랑하는 두아들 건희, 대희와 이 작은 결실의 기쁨을 함께 하고자 합니다.

2007년 12월 조 영 진 드림