

工學博士 學位論文

전력용 피뢰기의 열화진단기술
개발에 관한 연구

A Study on the Development of Deterioration Diagnostic Techniques
for Lightning Arresters

指導教授 吉 曠 碩

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 韓 柱 燮

工學博士 學位論文

전력용 피뢰기의 열화진단기술
개발에 관한 연구

A Study on the Development of Deterioration Diagnostic Techniques
for Lightning Arresters

指導教授 吉 曠 碩

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 韓 柱 燮

本 論文을 韓柱燮의 工學博士 學位論文으로 認准함.

委員長：金 潤 植 (印)

委 員：吉 暻 碩 (印)

委 員：李 成 根 (印)

委 員：司 空 鍵 (印)

委 員：趙 漢 九 (印)

2002年 12月 日

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 韓 柱 燮

목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	iii
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적 및 내용	6
제 2 장 이 론	9
2.1 피뢰기의 특성	9
2.2 열화진전기구	15
2.3 열화진단기술	26
2.3.1 전체 누설전류에 의한 열화진단기술	28
2.3.2 저항분 누설전류에 의한 열화진단기술	29
제 3 장 뇌충격전류에 의한 가속열화 실험	34
3.1 실험장치 및 측정계	35
3.2 실험방법	50

제 4 장 열화진단기술 개발	52
4.1 열화진단기술	53
4.1.1 누설전류 파고분포 분석	53
4.1.2 저항분 누설전류 분석	56
4.2 열화진단장치의 설계 및 제작	58
4.2.1 파고분포를 이용한 열화진단장치	58
4.2.2 저항분 누설전류를 이용한 열화진단시스템	66
제 5 장 실험 결과 및 고찰	76
5.1 가속열화 실험	76
5.1.1 기본특성 실험	76
5.1.2 뇌충격전류 실험	79
5.2 열화진단기술	88
5.2.1 누설전류의 파고분포에 의한 열화진단	88
5.2.2 저항분 누설전류에 의한 열화진단	97
5.3 전원고조파에 의한 영향 고찰	99
제 6 장 결 론	107
[참고문헌]	110

그림 및 표 목차

<그림 목차>

그림 1.1	피뢰기 시험기준 비교	5
그림 1.2	뇌방전의 진전과정	6
그림 2.1	ZnO 피뢰기의 구조	10
그림 2.2	전류밀도-전계강도 특성	10
그림 2.3	ZnO 소자의 미세구조	13
그림 2.4	ZnO 소자의 전기적 등가모델	15
그림 2.5	누설전류 파형 예	15
그림 2.6	입계층을 가진 이중쇼트키장벽모델의 에너지 밴드	19
그림 2.7	원자결함모델의 구조	24
그림 2.8	피뢰기의 열화요인과 열화현상	26
그림 2.9	인가전압과 누설전류와의 벡터 선도	27
그림 2.10	자기소거법의 원리	30
그림 2.11	동기정류법의 원리	31
그림 2.12	전압과 전류 파형	32
그림 2.13	제 3조파 누설전류 측정	33
그림 3.1	실험장치 및 측정계의 구성	36
그림 3.2	누설전류 측정계의 구성	36
그림 3.3	대역통과필터 회로	37
그림 3.4	대역통과필터의 주파수 응답	38
그림 3.5	대역통과필터의 입·출력 특성	39
그림 3.6	전체 누설전류와 제 3조파 누설전류	39
그림 3.7	저항분 누설전류의 측정 원리	40
그림 3.8	전체 누설전류와 저항분 누설전류	41

그림 3.9	누설전류 측정장치의 사진	42
그림 3.10	누설전류 측정장치의 회로	43
그림 3.11	뇌충격전류 발생장치의 등가회로	44
그림 3.12	충격전류 파형	46
그림 3.13	다중 뇌충격전류 발생장치의 사진	47
그림 3.14	시뮬레이션 결과	48
그림 3.15	다중 뇌충격전류 발생장치에 의해 발생한 파형	49
그림 4.1	누설전류 파형과 파고분포	54
그림 4.2	누설전류 파형과 파고분포	55
그림 4.3	저항분 누설전류의 측정원리	57
그림 4.4	열화진단장치의 구성	59
그림 4.5	누설전류 검출장치의 회로	60
그림 4.6	누설전류 검출장치의 특성	61
그림 4.7	신호처리 계통도	62
그림 4.8	누설전류 측정 알고리즘	64
그림 4.9	파고분포 분석 알고리즘	65
그림 4.10	저항분 누설전류에 의한 열화진단시스템	68
그림 4.11	저항분 누설전류 분석 알고리즘	73
그림 4.12	출력 화면 예	75
그림 5.1	교류전압에서 누설전류	77
그림 5.2	직류전압에서 누설전류	78
그림 5.3	주위온도에 따른 누설전류	79
그림 5.4	인가횟수에 따른 동작개시전압	80
그림 5.5	ZnO 소자가 파괴될 때의 제한전압과 방전전류 파형	81
그림 5.6	인가횟수에 따른 ZnO 소자의 표면온도	82
그림 5.7	누설전류 파형	83
그림 5.8	인가횟수에 따른 ZnO 소자의 누설전류	85

그림 5.9 ZnO 소자의 미세구조	88
그림 5.10 전체 누설전류 파형과 파괴분포(ZnO 소자)	90
그림 5.11 주위온도에 따른 전체 누설전류의 파괴분포	92
그림 5.12 전체 누설전류 파형과 파괴분포(피뢰기)	93
그림 5.13 170[kV]급 GIS용 피뢰설비	94
그림 5.14 전체 누설전류 파형과 파괴분포(GIS)	96
그림 5.15 인가전압과 누설전류 파형	97
그림 5.16 누설전류 분석 결과	98
그림 5.17 시뮬레이션 회로도	101
그림 5.18 인가전압과 누설전류 파형(순수 정현파전압)	102
그림 5.19 인가전압과 누설전류 파형(제 3조파 전압 중첩)	104
그림 5.20 고조파 전압에 따른 소자 모델의 누설전류	106

<표 목차>

표 1.1 배전선로의 주요사고 원인 통계	3
표 2.1 ZnO 바리스터의 전도기구에 관한 연구	17
표 3.1 ZnO 소자의 전기적 특성	34
표 3.2 다중 뇌충격전류 발생장치의 사양	47
표 4.1 마이크로프로세서의 사양	74
표 5.1 누설전류의 측정	99

Abstract

In this dissertation, the changes of electrical properties and new diagnostic techniques for lightning arresters have been studied. Generally, lightning arresters deteriorate as the result of a repetitive application of AC over-voltages or lightning impulse currents. The resistive leakage current of arresters increases as the deterioration of the arrester progresses, showing an increase in the 3rd harmonic component of the leakage current. The deteriorated lightning arrester is brought to a thermal runaway, where it can cause a line-to-earth fault. It is, therefore, important to estimate the change of electrical properties and the expected lifetime of lightning arresters.

To study the change of electrical properties in lightning arresters, a multiple-lightning impulse generator which can produce a quadruple with impulse current of 8/20[μ s] 5[kA] at an interval of 30~120[ms] has been designed and fabricated. The generator generates almost same thing as natural lightning ground flash. The total energy applied to the arrester at each pulse is about 1,200[J]. In the experiment, various parameters such as leakage current, reference voltage, and temperature were measured with the number of applied impulse currents. Also, micro-structures of the ZnO blocks were investigated 200 times after applying the single- and the multiple-lightning impulse currents.

The experimental results indicated that the arrester blocks are more

vulnerable to deterioration or damage from the multiple-lightning impulse currents. Therefore, it is necessary for lightning arresters used in power systems to be tested by applying not only a single-impulse current but also a multiple-impulse current. Also, to deduce the parameters necessary for diagnosing arrester deterioration, the accelerated deterioration tests were carried out.

In the test, leakage current components were measured, and the wave height distributions of leakage current were analyzed according to the progress of deterioration in the arrester.

The wave height distributions of the leakage current showed conspicuous differences even though the deterioration of arrester was progressed a little. Consequently, the use of wave height distributions in the leakage current for a deterioration diagnostic technique is valuable because it makes a more accurate diagnosis than the conventional method of using only a leakage current value.

The expert system for diagnosing the deterioration of arresters has been designed, and the system can diagnose lightning arresters by measuring the leakage current magnitude and its wave height distribution.

Today, arrester diagnostic techniques based on total leakage current and/or the 3rd harmonic leakage current as a reference parameter of deterioration are widely used. The technique, however, includes an error due to the harmonics of power system voltage. Therefore, the influence of the harmonics on arrester diagnostics should be considered.

In this dissertation, an arrester model was designed to simulate the

influence of the voltage harmonics described above. A pure sinusoidal voltage and its the 3rd harmonic voltage were applied to the model, and the leakage current components were analyzed.

From the simulation results, it was confirmed that the peak value of resistive leakage current depends not only on the phase of the 3rd harmonic voltage but also on the magnitude of it. Consequently, the errors caused by the harmonic voltage could be minimized by correcting the magnitude of leakage current upon analyzing the harmonics.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

최근 산업구조가 거대화, 복잡·다단화됨에 따라 산업사회 전반에 걸친 전력수요는 해마다 증가하고 있으며, 이에 따라 전력공급의 높은 신뢰성과 안정성이 절실히 요구되고 있다. 고효율, 고신뢰성의 전력공급을 위하여 전력계통의 새로운 보호협조와 절연협조 기술들이 사용되고 있으며, 기술적·경제적으로 우수한 대책들이 연구개발되어 왔다. 전력계통의 사고 발생은 선로 및 기기의 열화나 과전압에 의한 절연파괴로 지락, 단락 과전류가 주된 요인이며, 사고 유형별로 보호대책과 장치가 개발되어 사용됨으로써 전력공급의 신뢰성은 많이 향상되었다. 과전압에 의한 절연파괴는 다양한 형태의 사고를 발생시키며 외부로부터의 직격뢰와 유도뢰에 의한 뇌써-지, 개폐기 동작에 의한 과전압이 빈번하게 발생하고, 이는 정상 운전전압보다 최대 십 수배에 달하므로 변압기, 차단기 등과 같은 중전기기의 절연을 위협하고 있다. 이에 대한 대책으로 1900년대부터 현재의 피뢰기와 유사한 보호장치가 사용되어 왔으며, 정상운전상태에서의 개폐 과전압 및 뇌과전압 등에 대한 방호 대책으로 사용되고 있다^{[1]~[6]}.

최초의 피뢰기는 단순히 대기 중에 전극만을 선로에 설치하여 이상전압이 침입하면 전극간에 아-크 방전(arc discharge)을 발생시켜 아-크 방전영역에서 동작시킴으로서 이상전압을 억제하는 것으로, 동작개시전압이 일정하지 않고 응답속도가 느리며 속류(follow current)가 발생하는 문제점이 있다. 세라믹 바리스터의 상용화는 1930년대 탄화규소(SiC)를 주성분으로 하는 SiC 소자가 개발되면서 시작되었으며, SiC 소자를 이용한 전

전력용 피뢰기는 이상전압에 대한 제한전압을 일정 범위 내에서 제어할 수 있으므로 단순한 전극구조의 보호장치보다 우수한 성능을 가지고 있다. 그러나 이 또한 속류에 대한 문제점 때문에 공극(air gap)이 필요하며, 제조상의 불균일성과 방전시 공극에서의 특성변화로 응답특성이 일정치 않고 수명이 극히 짧은 문제점이 있다.

그 후 많은 연구와 반복적인 실험을 통하여 1970년대에 Matsuoka^[7] 등에 의하여 산화아연(ZnO)을 주성분으로 하는 ZnO 소자가 개발되었고, 현재 사용되는 대부분의 전력용 피뢰기는 ZnO 소자를 이용하고 있다.

ZnO 소자를 이용한 전력용 피뢰기는 전압-전류의 비선형 저항계수가 25~100 정도로 특성이 우수하고 속류에 대한 문제점이 제거되면서 피뢰기의 무공극(gapless)화를 가능하게 하여, 직렬갭(series gap)을 사용한 SiC 피뢰기와 비교할 때 응답시간이 빠르고 방전내량이 증가하고 내오손 성능 및 비선형 저항특성이 우수하다^{[7]~[11]}. 이와 같이 ZnO 피뢰기는 우수한 전기적 특성을 가지고 있지만, 전력계통의 절연 협조상의 중요성 면에서 적절한 유지·보수를 통하여 만일의 사고를 미연에 방지할 필요성이 요구되고 있다.

전력계통에서는 선로와 부하설비의 광범위한 분포로 인한 이상전압의 발생빈도가 증가하여 이 과정에서 피뢰기의 열화가 진전된다^{[12]~[15]}. 열화가 진전된 피뢰기가 전력계통에 계속 설치되어 사용될 경우 정상운전전압에서 피뢰기의 과열 또는 외부이상전압 침입시 보호동작에서 소자의 파괴가 발생하게 되어 전력공급의 중단, 기기의 손상과 같은 심각한 문제를 일으키게 되므로 피뢰기의 열화를 진단하고 수명을 예측하는 것이 필요하다.

표 1.1은 전력계통의 사고 원인 통계의 일례를 나타낸 것이다. 피뢰기의 사고 원인 중에서 외부적 접촉이나 자연의 영향으로 인한 피뢰기 사고

보다 자연열화로 인한 사고가 전체 피뢰기 사고의 50[%]가 넘는 것을 보여준다. 이와 같은 배경에서 피뢰기의 초기성능은 물론 경년에 따른 전기적·물성적 특성 파라미터를 관측·분석하여 피뢰기의 성능향상과 수명에 대한 많은 연구가 발표되고 있다^{[15]~[17]}.

표 1.1 배전선로의 주요사고 원인 통계

Table 1.1 Statistical reports on major failure causes in a power distribution line

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

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

피뢰기의 성능은 피뢰기 소자의 특성, 제조기술, 설치조건에 따라 달라지고, 피뢰기의 열화로 인한 성능저하는 흡습 등의 주위환경 요소와 상용주파수 과전압이나 뇌과전압과 같은 이상전압 등에 의해 피뢰기가 보호동작을 할 때 크게 진전된다. 현재 국내 전력계통의 전압은 안정적으로 운용되고 있기 때문에 열화의 주된 요인은 뇌과전압에 의한 것이라고 할 수 있다.

피뢰기 시험평가는 국내·외 규격(KS C 4609, ES 153-261, ANSI/IEEE C62.41, IEC 60099-4, JEC217)이 적용되며, 임펄스 시험과 동작책무 시험에는 4/10[μ s] 및 8/20[μ s] 단일 뇌충격전류를 일정시간 간격($\leq 50 \sim 60$ [sec])으로 인가하는 방법이 채택되고 있다^{[18]~[23]}. 국내 기술 표준원에서 제정한 자기재 피뢰기의 신뢰성 평가 기준(RS C 0016)에 의한 동작책무시험에서 다중 뇌충격시험을 적용하고 있다^[24]. 그림 1.1은 피뢰기 시험 평가에 대한 국제규격을 나타낸 것으로 모두 단일 뇌충격전류에 대한 평가를 시행하고 있다. 그러나 자연현상에서 발생하는 낙뢰는 그림 1.2에 나타낸 진전과정으로 1회의 방전에 최대 26회(평균 4회)의 다중 뇌격이 발생하므로 전력계통에서 낙뢰에 의한 이상전압 대책으로 적용되는 피뢰기 평가방법도 수정되어야 할 것이다^{[2], [25], [26]}.

뇌방전의 진전과정은 뇌운의 부극성 전하와 정극성 전하가 만나 절연 파괴가 발생하여 대기의 절연파괴강도(약 30[kV/cm])를 넘어서면 초기 방전이 시작되어 계단상으로 진전(보통 50[μ s]에 50[m]씩 진전)되는 계단상 리더(steped leader)가 발생하며 정전하를 가진 계단상 리더가 대지 근처에 도달하면 높은 부전위가 형성되고 대지의 불평등 전장 중 강한 부분이 뇌운으로 방전을 시작하여 채널(channel)을 형성하는 부착과정(attachment process)이 끝나면 채널을 통한 귀환뇌격(return stroke current, 약 70[μ s])이 발생한다. 그 후에 뇌운에 전하가 잔류하게 되면 후속 리더가 형성되어 대지로 진전하게 되는데, 이를 다투리더(dart leader)라 하며 제 2, 제 3의 귀환뇌격이 발생하게 된다. 하나의 귀환뇌격이 발생하는데 소요되는 시간은 대략 40 ~ 80[ms]정도이며 평균 30 ~ 40[ms]의 뇌격 시간 간격으로 3 ~ 4회 발생한다.

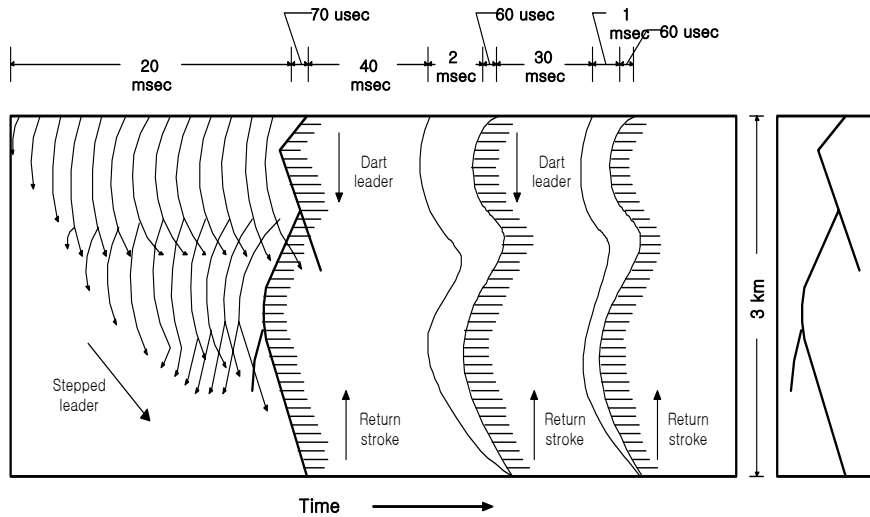


그림 1.2 뇌방전의 진전과정

Fig. 1.2 Lightning discharge progress

그러므로 피뢰기의 성능 분석과 열화진단, 수명예측 등에 단일 뇌충격전류는 물론, 자연현상의 낙뢰와 같은 다중 뇌충격전류를 인가하여 평가하는 것이 필요하다고 판단되며, 국내·외의 피뢰기 시험·평가방법을 신뢰성 평가 기준과 같이 단일 뇌충격전류와 함께 다중 뇌충격전류에 대한 평가가 실시되어야 할 것이다^{[18]~[29]}.

1.2 연구 목적 및 내용

본 논문은 전력계통에서 이상전압에 대한 보호장치로 사용되는 피뢰기의 열화진단기술 개발을 목적으로 열화진전기구의 이론적 해석, 기본특성과 뇌충격전류에 의한 가속열화 실험을 수행하였다.

피뢰기의 열화진단기술에는 피뢰기의 제한전압, 방전전류, 손실전력,

누설전류, 정전용량 및 절연저항 등을 측정하는 방법이 있으며, 정전용량과 절연저항을 측정하는 방법은 피뢰기를 전력계통에서 분리해야만 측정할 수 있는 단점이 있다. 그리고 제한전압과 방전전류를 측정하는 방법은 피뢰기에 뇌충격전류가 인가된 상태에서 측정해야한다. 그러나 누설전류를 이용하는 방법은 운전 중인 상태에서 전력계통에 설치되어 있는 피뢰기의 누설전류를 측정하여 열화상태를 분석할 수 있기 때문에 열화진단기술 중에서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 전체 누설전류를 기준으로 열화를 진단하는 방법은 단순히 전체 누설전류 또는 전체 누설전류의 제3조파 성분의 실효값을 측정하는 것으로 열화진단에 필요한 정보를 충분히 제공하지 못하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 전력계통의 정상운전상태에서 피뢰기 열화진전에 따른 전기적 특성 변화를 파악하기 위하여 뇌충격전류 인가에 의한 가속열화실험을 수행하였다. 배전용 피뢰기에 사용되는 ZnO 피뢰기 소자(6[kV], 5[kA])에 단일 뇌충격전류(8/20[μ s], 5[kA])와 30 ~ 80[ms]의 시간간격을 가지는 4회의 다중 뇌충격전류(8/20[μ s], 5[kA] \times 4)를 각각 1분마다 인가하고 전체 누설전류, 제 3조파 누설전류, 저항분 누설전류와 동작개시전압 및 ZnO 소자의 표면 온도를 측정하였으며, 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 열화된 소자의 미세구조를 관찰하였다.

전력용 피뢰기에 사용되는 여러 가지 ZnO 피뢰기 소자의 기본적인 특성과 열화진전에 따른 피뢰기의 전기적 특성변화를 온라인 상태에서 상시 감시·분석 가능한 열화진단장치 개발하였다. 피뢰기의 열화진전에 따른 전기적 특성 변화 즉, 저항분 누설전류의 증가에 의한 전체 누설전류의 변화 및 파괴분포의 이동, 피뢰기의 온도 상승에 따른 누설전류의 변화를 온라인 상태에서 열화진단 시스템을 이용하여 분석하였다. 또한 간단한 방법으로 저항분 누설전류를 측정할 수 있는 장치를 개발하였으며, 저항

분 누설전류를 분석하여 피뢰기의 열화진단기술에 적용하였다.

한편, 저항분 누설전류와 제 3조파 누설전류의 크기는 전원전압에 포함된 고조파 성분에 의해서 변화하므로 전원 고조파에 의한 누설전류의 영향을 고찰하였다. ZnO 피뢰기 소자의 모델을 설계하고, 시뮬레이션으로부터 전원 전압에 포함된 고조파 전압의 크기와 위상에 따라 ZnO 소자를 흐르는 전체 누설전류, 저항분 누설전류의 크기가 변화하는 것을 확인하였다.

따라서 본 논문에서는 기존의 열화진단기술을 분석하고 가속열화실험으로부터 피뢰기의 열화진전기구를 규명하였으며, 전체 누설전류 파고분포와 저항분 누설전류의 분석으로부터 피뢰기의 열화를 정밀 진단할 수 있는 새로운 열화진단기술을 제안하였다. 본 논문의 결과는 피뢰기의 고속응답, 대용량화 개발 및 전력계통의 신뢰성 향상을 위한 측정 및 분석 기술에도 광범위하게 활용될 것으로 기대한다.

제 2 장 이 론

2.1 피뢰기의 특성

전력용 피뢰기는 단자전압이 이상전압의 침입으로 동작개시전압 이상이 되면 수[μ s]이내에 이상전압을 피보호기기의 절연내력 이하로 억제시키고, 이 과정에서 발생한 충격전류는 ZnO 소자를 통하여 대지로 방출된다. 그 후 피뢰기는 이상전압이 소멸하면 즉시 원래의 상태로 회복되며, 배전선로의 정상운전전압에서도 속류가 흐르지 않고 소자의 누설저항에 의한 수 백[μ A]정도의 누설전류만이 흐르게 된다^{[6],[11],[12]}. 과거의 SiC 피뢰기는 보호동작을 수행하는 특성요소와 직렬갭으로 구성되었으나, 현재 사용되는 전력용 피뢰기는 특성요소로 I-V의 비선형 저항특성이 우수한 ZnO 소자를 사용함으로써 직렬갭이 없는 형태로 구성되어 있다.

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

ZnO 소자의 비선형 저항 특성은 그림 2.2와 같이 3개의 영역으로 구분하여 설명할 수 있다^{[8],[16],[30]}. 저전계 영역(prebreakdown region, 예비항복 영역)에서 ZnO 소자는 단순히 커패시터와 같은 역할만을 수행하는 영역으로 직렬갭이 없기 때문에 정상운전전압이 직접 ZnO 소자에 가해져 미소한 누설전류만 흐른다. ZnO 소자가 열화되면 비선형 저항특성에서 저항이 감소하여 저항분 누설전류가 증가하지만 용량분 누설전류의 변화는 거의 나타나지 않는다.

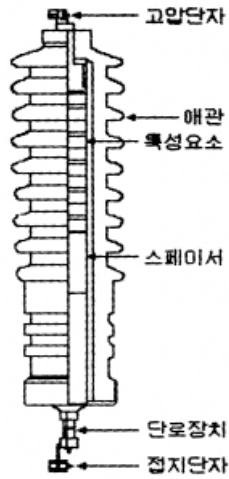


그림 2.1 ZnO피뢰기의 구조

Fig. 2.1 Structure of ZnO lightning arresters

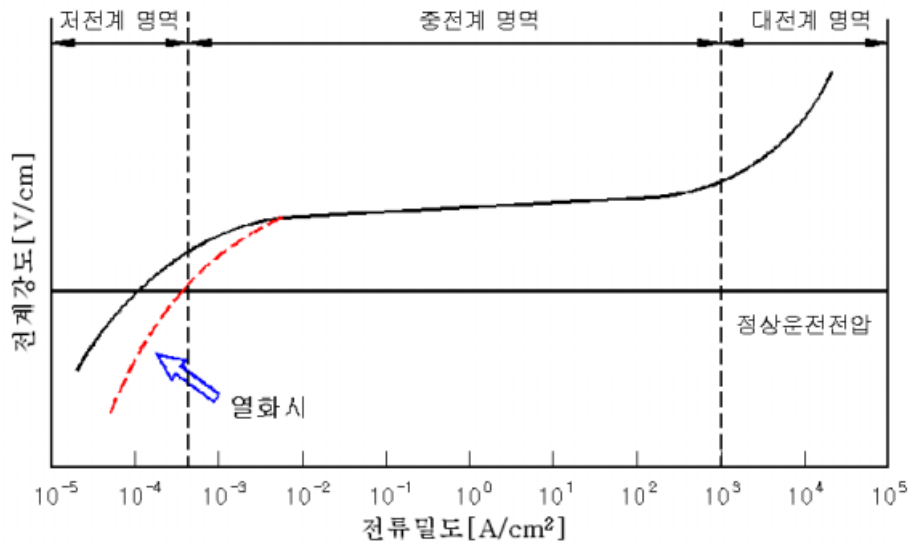


그림 2.2 전류밀도-전계강도 특성

Fig. 2.2 Characteristics of current density vs. electric field intensity

따라서 동일한 운전전압에서 열화되면 저항분 누설전류의 증가로 인하여 전체 누설전류는 증가한다. 이 영역에서 전류밀도 J 는 식 (2.1)과 같이 표현되며, 온도에 대한 영향이 크고 부의 온도계수를 가진다.

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

여기서 ϕ = 전위 장벽, E = 전계강도, K = 볼츠만 상수, T = 절대온도, e = 전하, ϵ_0 = 진공의 유전율, ϵ_s = 입계층의 비유전율이다.

중전계 영역(breakdown region, 항복 영역)은 비선형 저항영역으로 전류밀도 J 와 전계강도 E 의 관계는 식 (2.3)과 같이 나타내어진다. 여기서 a 는 비선형 계수를 나타내는 값으로 식 (2.2)와 같다.

$$a = \frac{\log\left(\frac{J_1}{J_2}\right)}{\log\left(\frac{E_1}{E_2}\right)} \quad (2.2)$$

여기서 a 의 값이 1일 때는 단순한 저항과 같고, ZnO 소자의 경우 25~100 정도의 값을 가진다^[30].

$$J = \left(\frac{E}{C}\right)^a [\mu\text{A}/\text{cm}^2] \quad (2.3)$$

여기서 E 는 전계강도, C 는 전류밀도가 1[mA/cm²]일 때 전계강도이고 a 는 비선형 계수이다.

대전계 영역(upturn region, 벌크 영역)은 ZnO 소자에 인가되는 전압이 중전계 영역보다 대단히 큰 경우에 나타나는 영역으로, ZnO grain의 벌크 저항에 의해 비선형 저항 특성이 식 (2.4)와 같이 상수 a 에 비례하

여 선형적이다. ZnO grain의 고유저항이 지배적으로 나타나는 영역으로 전류밀도-전계강도 특성이 비례적으로 나타나며, 피뢰기에 있어 대전류가 흐르는 경우 이 영역의 저항값을 작게 만드는 것이 중요하다.

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

ZnO 소자는 그림 2.3 (a)에서 나타낸 것과 같이 세라믹의 다결정체로 ZnO grain, 입계층(intergranular layer)에 존재하는 다양한 상들로 구성되며, 이들 상들은 첨가성분에 따라 차이가 있지만 Bi-rich 상, 스피넬 (spinel) 상, 피로클로르(pyrochlore) 상 등으로 구성된다^{[30],[31]}. ZnO 소자의 주성분인 ZnO grain은 10~20[μm]정도의 균일한 크기이며, 순수한 ZnO와는 달리 쌍으로 이룬 구조로 n형의 반도체성을 가지고 있다. 스피넬과 피로클로르 상은 ZnO grain과 grain사이에 존재하고 ZnO grain의 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^[30]. Bi-rich 상은 ZnO grain을 둘러싸고 있고 ZnO 소자의 비선형 저항특성에 크게 영향을 미치며, 소자의 열화시 가장 큰 변화를 나타낸다. ZnO grain의 크기는 소자의 비선형 저항에 의한 보호동작 중 전압 제한 특성인 항복전압을 결정하게 된다.

ZnO 피뢰기의 복합 미세구조는 그림 2.3 (b)와 같이 비선형 특성이 대칭인 미세 비선형 저항소자가 직·병렬로 복잡하게 연결된 다중접속 구조를 가지고 있다^{[30]~[32]}. 주어진 ZnO 소자에 있어서 grain의 크기가 작을수록 입계의 수가 많아지므로 큰 전압에서 항복이 일어나게 된다.

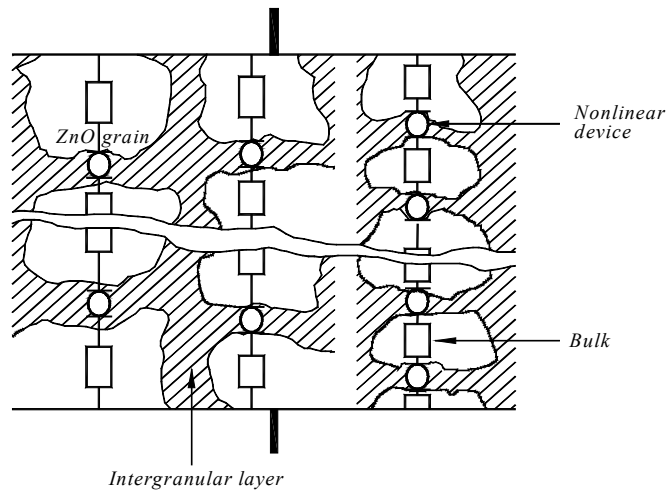
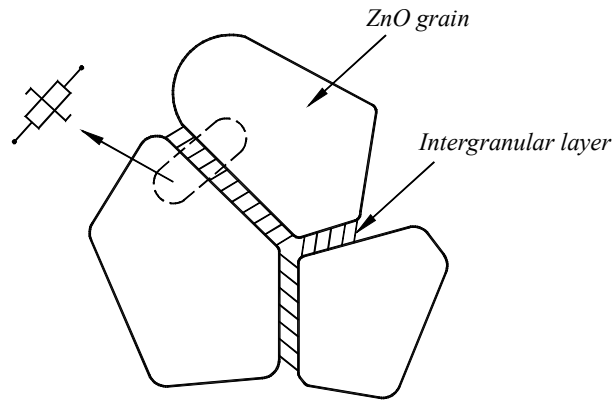


그림 2.3 ZnO 소자의 미세구조

Fig. 2.3 Micro-structure of a ZnO block

ZnO 소자의 항복전압은 ZnO grain의 직렬 연결수에 의해 결정되며, 식 (2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 V_b 는 ZnO 소자의 항복전압, n 은 직렬로 연결된 입계의 개수를 나타내고 v_b 는 입계층의 항복전압이다. ZnO 소자의 에너지내량은 입계의 병렬 연결 수에 의해 결정되며, 소자의 단면적이 증가하면 병렬 연결수가 증가하므로 에너지내량도 증가하게 된다. 그림 2.3 (b)에서 하나의 입계층은 3~4[V]의 항복전압을 가진다^{[32]~[34]}.

ZnO 소자의 전기적 등가모델은 그림 2.4와 같으며, R_{gb} 는 입계층의 전위장벽에 생기는 비선형 저항이며, C_g 는 ZnO grain과 grain 사이의 정용량을 나타낸 것이며, 식 (2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 ϵ_0 는 진공의 유전율, ϵ_s 는 입계층의 비유전율, A 는 전극의 면적이고, d 는 입계층의 두께이다.

그림 2.5는 교류전압 V_S 을 ZnO 소자 양단에 인가하였을 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 등가 회로로 표현되고 저항분 누설전류와 용량분 누설전류가 흐르게 된다. 또한 ZnO 소자의 열화가 진행되면서 누설전류가 증가하는데, 이러한 현상은 ZnO 소자 입계층의 변화에 의해 저항분 누설전류가 증가하기 때문이다^{[35],[36]}.

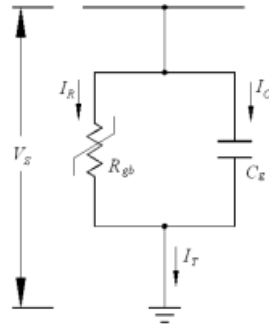


그림 2.4 ZnO 소자의 전기적 등가모델

Fig. 2.4 Electrical equivalent circuit of ZnO blocks

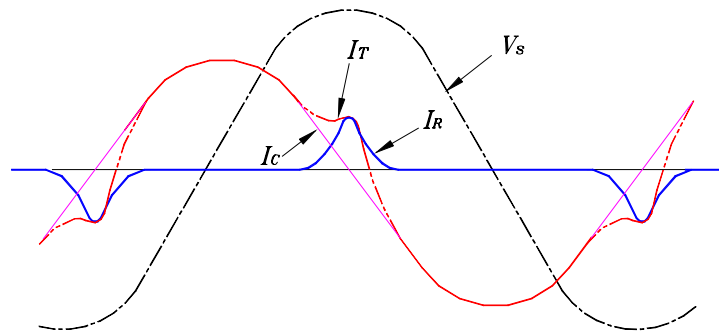


그림 2.5 누설전류 파형 예

Fig. 2.5 Typical waveforms of leakage current component

2.2 열화진전기구

ZnO 바리스터의 열화현상에 대한 연구들은 지금까지 많이 수행되었지만, 완전하게 설명할 수 있는 결과는 아직 없다^{[7],[37]~[58]}. 열화진전기구는 전도이론과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 ZnO 바리스터의 전도기구를 이해할 필요가 있다. 현재까지 연구된 ZnO 바리스터의 전도기구

이론을 표 2.1에 나타내었으며, 전도기구는 전위 장벽모델로부터 입계층의 존재유무와 존재하는 입계층의 두께에 의하여 입계 장벽모델과 이중쇼트키 장벽모델, 입계층을 가진 이중쇼트키 장벽모델의 3가지로 구분할 수 있다^{[30],[33],[34]}.

Matsuoka^[7]는 최초로 ZnO 바리스터의 비선형성을 설명하는 Bi-rich 입계층을 발견하였으며, 주사전자현미경으로 ZnO 바리스터의 표면을 관찰하여 ZnO grain은 1[μm] 정도의 두께를 가진 입계층에 둘러싸여 있다고 설명하였다. Wong^[37] 등은 투과전자현미경으로 박막의 입계상을 관찰하여 입계층은 비정질이며 Bi₂O₃-rich 피로클로르와 유사한 조성을 갖는다고 주장하였다. Inada^[38]는 Bi-rich 입계층이 β -Bi₂O₃상과 δ -Bi₂O₃상이 혼합된 결정질이며 이 층의 최소 두께는 약 500[\AA] 정도라고 발표하였다. 이러한 결과를 근거로 제안된 모델이 입계 장벽모델이다. 전자 현미경 등을 이용한 연구들에 의하여 Bi-rich 입계층을 새롭게 해석하였으며, Morris^[39]는 오이거 전자분광기로 ZnO-ZnO 입계를 분석하여 따로 분리된 상이 존재하지 않고 약 50[\AA] 정도의 BiO⁺ 흡착층이 존재한다고 주장하였다. Clarke^[40]는 격자 무늬 상을 이용하여 ZnO grain에는 Bi-rich 입계층이 존재하지 않음을 확인하였으며, 이런 결과를 바탕으로 이중쇼트키 장벽모델이 제안되었다. Kingery^[41] 등은 주사투과 현미경으로 입계면을 분석하여 입계면에는 어떠한 상도 존재하지 않으며 단지 Bi 분리층이 존재한다고 설명하였고, Clarke^[42]는 박막 X-선 분광기로 이 층의 두께를 측정된 결과에서 Bi 분리층은 입계에서 ZnO grain에 약 20[\AA] 정도의 폭을 갖는다고 발표하였다. Santhanam^[43] 등은 입계면의 폭이 25[\AA] 이하이므로 전위 장벽은 입계면에 존재하지 않으며 입계부근의 ZnO grain 내부에 존재한다고 주장하였다. 이러한 연구로부터 Bi-rich 입계층이 존재하는 이중쇼트키 장벽모델이 제안되었다. 이상과 같은 미세구조 관찰

결과가 변화함에 따라 그에 대응되는 전위장벽모델이 제안되었으며, 그에 대한 해석 방법도 모델에 따라 여러 가지가 제안되었다.

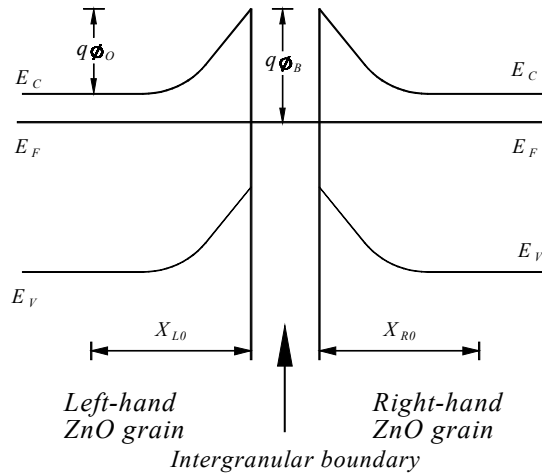
표 2.1 ZnO 바리스터의 전도기구에 관한 연구

Table 2.1 Researches on the conduction mechanism of ZnO varistors

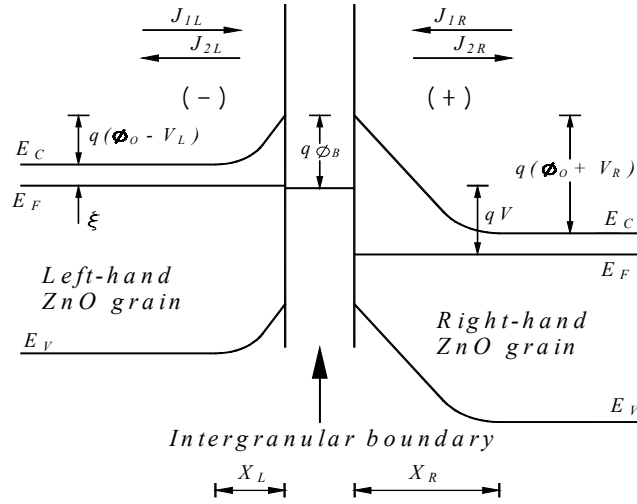
Year	Model
1971	Space charge limited current (Matsuoka)
1975	Tunneling through a thin layer (Levinson and Philipp) Tunneling through Schottky barriers (Levine)
1976	Tunneling through Schottky barriers (Morris, Bernascone et al.)
1977	Tunneling through Schottky barriers with heterojunctions (Emtage)
1978	Tunneling through Schottky barriers with heterojunctions (Eda) Tunneling through homojunctions (Einzinger)
1979	Tunneling through Schottky barriers (Hower and Gupta) Hole-assisted tunneling through Schottky barriers (Mahan, Levinson and Philipp)
1982	Bypass effect at heterojunctions (Eda)
1984	Hole-induced breakdown (Pike)
1986	Bypass effect at heterojunctions (Levinson and Philipp) Hole-induced breakdown (Blatter and Greuter)
1987	Space charge induced current (Suzuoki et al.)

3가지의 장벽모델 중에서 입계층을 갖는 이중쇼트키 장벽모델은 그림 2.6에 나타낸 것과 같이 “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. Emtage^[51]가 최초로 제안하였으며 비교적 많은 연구자들이 이 모델을 이용하여 ZnO 바리스터의 전도기구를 해석하였으며^{[53]~[57]}, 특히 Mahan^[53]에 의해 제안된 전도기구이론이 지금까지 제안된 다른 전도기구에 비하여 ZnO 바리스터의 전기적 특성을 보다 많이 설명할 수 있다.

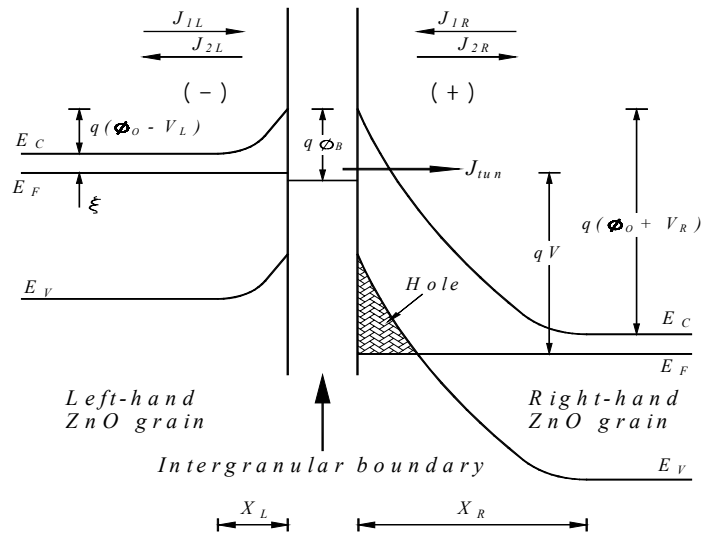
그림 2.6 (a)는 입계층이 존재하는 이중쇼트키 장벽모델의 외부전압이 존재하지 않은 평형상태에서의 에너지 밴드 구조를 보여주고 있다. 두 개의 쇼트키장벽 중간에 입계층이 존재하고 두 개의 쇼트키장벽의 높이와 폭은 입계층 내의 트랩 밀도와 입계에서의 도우너 밀도에 의해 의존하는 입계층에 의하여 전기적 특성이 결정된다.



(a) 전압을 인가하지 않았을 경우



(b) 낮은 전압을 인가한 경우



(c) 항복 전압 이상을 인가한 경우

그림 2.6 입계층을 가진 이중쇼트키장벽모델의 에너지 밴드

Fig. 2.6 Energy band diagram of a double schottky barrier model with grain boundary

ϕ_0 는 전위장벽의 높이를 나타내고, $q\phi_B$ 는 쇼트키장벽의 높이에 대한 에너지의 크기를 의미하며, 그림 2.6 (b)는 외부에서 전압 $V (= V_L + V_R)$ 를 인가한 초기 동작 영역에 대한 에너지 밴드 구조를 나타낸 것이다. 입계층에서의 전자의 이동이 자유롭기 때문에 ZnO 바리스터에 전압을 인가하게 되면 입계층에는 전압이 인가되지 않고 좌·우측 쇼트키장벽에 V_L 과 V_R 만큼 인가된다고 가정하면 ZnO 바리스터의 에너지 밴드 구조는 그림 2.6 (b)와 같이 될 것이다. 초기동작 영역의 경우, ZnO 바리스터의 입계층을 통해 흐르는 전류는 4개의 성분이 존재하게 된다.

- ① 좌측 ZnO grain에서 입계층으로 흐르는 전류 : J_{1L}
- ② 우측 ZnO grain에서 입계층으로 흐르는 전류 : J_{1R}
- ③ 입계층에서 좌측 ZnO grain으로 흐르는 전류 : J_{2L}
- ④ 입계층에서 우측 ZnO grain으로 흐르는 전류 : J_{2R}

ZnO grain에서 입계층으로 흐르는 전류 J_{1L} 과 J_{1R} 는 열적 여기에 의하여 활성화된 전자들 중에서 전위 장벽을 넘는 전자들의 수에 의해 결정되므로 식 (2.7), (2.8)과 같이 ZnO grain 내의 도우너 밀도와 전위 장벽의 높이에 의해 결정되어 진다.

$$J_{1L} = J_0 \exp \left\{ - \frac{q(\phi_0 - V_L)}{kT} \right\} \quad (2.7)$$

$$J_{1R} = J_0 \exp \left\{ - \frac{q(\phi_0 + V_R)}{kT} \right\} \quad (2.8)$$

여기서 $J_0 = n_0 q v$ 이고, n_0 는 ZnO grain 내의 도우너 밀도, q 는 전자의

전하량, v 는 전자의 열속도이다.

한편, 입계층 내에 존재하는 트랩의 밀도가 비교적 높아서 입계층에 존재하는 전자의 수와 관계없이 입계층의 페르미 준위가 일정하다고 가정하면 입계층에서 ZnO grain으로 흐르는 전류 J_{2L} 과 J_{2R} 은 입계층에 존재하는 전자의 수 σ 와 전위장벽의 높이 ϕ_B 에 의존한다.

$$J_{2L} = A_{con}\sigma \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.9)$$

$$J_{2R} = A_{con}\sigma \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.10)$$

여기서 A_{con} 는 비례상수이다.

인가전압 $V=0$ 일 경우 $J_{1L} = J_{2L} = J_{1R} = J_{2R}$ 가 성립해야 하므로 식 (2.7)과 (2.9)로부터

$$A_{con} = \frac{J_0}{\sigma_0} \exp\left\{-\frac{q(\phi_B - \phi_0)}{kT}\right\} \quad (2.11)$$

을 구할 수 있으며, σ_0 는 인가전압 $V=0$ 인 경우 입계층에 존재하는 전자의 개수이다. 식(2.11)을 식 (2.9), (2.10)에 대입하면

$$J_{2L} = J_{2R} = J_0 \frac{\sigma}{\sigma_0} \exp\left(-\frac{q\phi_0}{kT}\right) \quad (2.12)$$

을 얻을 수 있다. 한편 정상상태에서는 입계층에 존재하는 전자의 수가 일정해야 하므로 입계층으로 들어오는 전류의 양과 입계층에서 나가는 전류의 양이 같다. 그러므로 식 (2.13)과 (2.14)를 얻을 수 있다.

$$J_{1L} + J_{1R} = J_{2L} + J_{2R} \quad (2.13)$$

$$\exp\left\{-\frac{q(\phi_0 - V_L)}{kT}\right\} + \exp\left\{-\frac{q(\phi_0 - V_R)}{kT}\right\} = \frac{2\sigma}{\sigma_0} \exp\left(-\frac{q\phi_0}{kT}\right) \quad (2.14)$$

입계층과 공핍층의 전하 평형상태로부터

$$\sigma = n_0(x_R + x_L) = \left(\frac{2\varepsilon_s n_0}{q} \right)^{1/2} \{ (\phi_0 + V_R)^{1/2} + (\phi_0 - V_L)^{1/2} \} \quad (2.15)$$

이 성립할 것이다. 그림 2.6(c)는 외부의 큰 전압이 인가된 항복영역에서의 에너지 밴드 구조를 보여준다. 그림 2.6(b)와 마찬가지로 공핍층의 두께는 인가전압 V 가 증가함에 따라 역방향으로 인가되는 쇼트키장벽의 두께 x_R 이 크게 증가하고, 순방향으로 인가되는 쇼트키장벽의 두께 x_L 은 큰 변화를 보이지 않게 된다. 순방향 쇼트키장벽에 인가되는 전압 V_L 의 변화는 미미한 반면, 역방향 쇼트키장벽에 인가되는 전압 V_R 의 변화는 매우 크다는 사실을 알 수 있다. 따라서 인가전압이 점차 증가함으로써 우측 ZnO grain의 페르미 준위가 입계층 부근의 가전자대의 최대 에너지 준위 E_V 아래로 이동하게 되면, 역방향으로 인가되는 쇼트키장벽 공핍층의 가전자대에 정공이 발생하게 된다. 이러한 정공이 입계층을 통해 순방향 쇼트키장벽 공핍층으로 이동하지 않고 역방향 쇼트키장벽 공핍층에만 존재하여 정공에 의한 전류는 발생하지 않는다. 그러나 이들 정공은 전류 형성에는 기여하지 않지만 역방향 쇼트키장벽 공핍층의 두께 x_R 는 감소시켜 입계층에 존재하는 전자가 역방향 쇼트키장벽을 터널링으로 통과할 확률이 높아지게 될 것이다. 따라서 인가전압이 어느 입계전압 이상이 되면 그림 2.6(c)에서 나타낸 터널링 전류 J_{tun} 의 값이 증가하여 결과적으로 ZnO 바리스터에 흐르는 전류가 급격히 증가하게 된다.

인가전압이 점차 증가하여 역방향 쇼트키장벽의 가전자대에 정공이 생기면 입계층과 공핍층의 전하 평형상태인 식 (2.15)는 식(2.16)과 같이 변경된다.

$$\sigma = \sigma_L + \sigma_R \quad (2.16)$$

여기서

$$\sigma_L = n_0 x_L = \left\{ \frac{2\epsilon_s n_0}{q} (\phi_0 - V_L) \right\}^{1/2} \quad (2.17)$$

$$\sigma_R = n_0 x_R + P_{hole} = \int_0^{x_R} \{n_0 + p(x)\} dx \quad (2.18)$$

즉, 식 (2.9)에서 나타낸 것과 같이 순방향 쇼트키장벽의 공핍층에 존재하는 정(+) 전하량 σ_L 은 변화가 없지만, 역방향 쇼트키장벽의 공핍층에 존재하는 부(-) 전하량 σ_R 은 식 (2.12)와 같이 역방향 쇼트키장벽의 공핍층에 존재하는 도우너의 수와 정공의 수를 합한 것과 같으므로 입계층에 존재하는 전자의 수 σ 를 구하기 위해서는 역방향 쇼트키장벽의 공핍층에 존재하는 정공의 수 P_{hole} 을 구해야 할 것이다. Bi_2O_3 가 주성분인 입계층이 존재하는 이중쇼트키 장벽모델은 ZnO 바리스터의 비선형 전류-전압 특성이 잘 일치한다. 특히, 항복영역에서의 급격한 전류의 증가와 DC 열화현상에 대한 비선형적인 특성의 해석도 잘 설명되어져 지금까지 모델이 많이 이용된다.

ZnO 소자가 열화되는 원인으로는 상용주파수 교류과전압과 뇌충격전류와 주위환경 등으로 구분할 수 있다. 상용주파수 교류과전압에 의한 열화는 ZnO 소자에 교류전압을 인가함에 따라 소자에 누설전류가 흐르게 되고, 주울열이 발생하게 된다. 이때 흐르는 용량분 누설전류는 소자의 온도 상승과는 거의 관계가 없으나, 저항분 누설전류는 소자 내의 분자운동을 촉진시키기 때문에 소자의 온도를 상승시키게 된다. 일정한 전압에서 온도가 증가하면 저항분 누설전류의 값은 증가하게 된다.

저항분 누설전류가 흐르는 원인은 ZnO 소자에 전계가 가해지면 열적으로 활성화된 이온의 확산이 일어나고, 이 이온이 입계층을 넘어가 입계

의 저항이 작아지기 때문이다. 즉, 열화는 전위장벽의 변형에 의하여 발생함을 나타내고 있으며 일반적으로 동일한 소자에 대해 높은 온도 및 대전류가 흐르는 동안 열화가 진전되어 저항분 누설전류가 증가하고, 전체 누설전류의 크기가 어떤 임계값을 넘어서면 열 발생이 커져서 짧은 시간 내에 소자는 열폭주에 도달한다. 이러한 내용을 이론적으로 설명한 모델이 Gupta^[30]의 원자결함모델(atomic defect model)이며, 그림 2.7에 나타내었다^{[30],[59]~[61]}. 원자결함모델은 입계층이 존재하는 이중쇼트키 장벽모델에서 장벽을 구성하는 양의 이온과 입계층에 존재하는 음의 이온인 유사 역셉터 이온(V'_{zn}, V''_{zn})으로 되어 있다. 여기에서 양의 이온은 격자간 Zn 이온인 유사 도우너 이온(Zn'_i, Zn''_i)과 산소 공격자 이온(V_o^+, V_o^-)들로 나누어지며, 미량의 Zn 격자와 치환된 도우너 불순물 이온($D'_{zn}(D=Bi, Sb)$) 등이 있다. 그러나 격자간 Zn 이온은 다른 양이온들에 비해 확산속도가 크기 때문에 실제로 열화현상은 격자간 Zn 이온의 이동에 따른 쇼트키장벽 높이의 저하에 따른 것으로 알려져 있다.

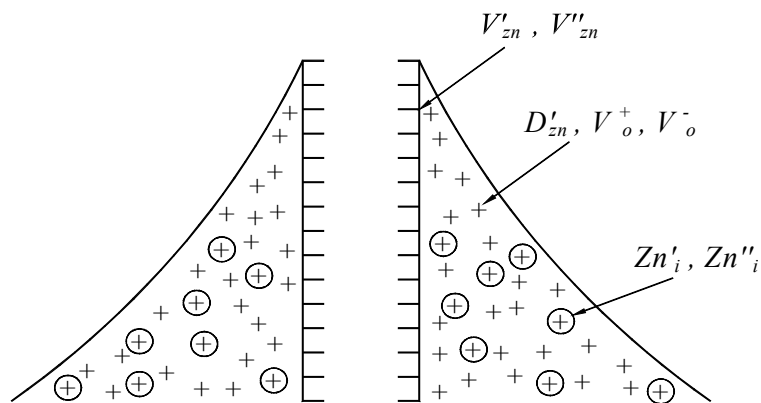


그림 2.7 원자결함모델의 구조

Fig. 2.7 Diagram of the atomic defect model

뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 열화는 상용주파수 교류과전압에 의한 열화기구와는 다르다^[62]. 뇌충격전류는 ZnO 소자의 비선형 저항특성을 저하시켜 보호성능에 크게 영향을 주며, 뇌충격전류의 경우 상용주파수 교류과전압에 비해 ZnO 소자의 입계층에 가해지는 전계의 강도가 정상상태보다 대단히 크기 때문에 ZnO 소자의 보호동작시 더 많은 열이 발생하고 이 때문에 입계층의 변형이 쉽게 일어나기 때문이다. 만일 ZnO 소자가 불균일한 구조적 결함을 포함하고 있다면, 그 부분에 열이 집중되고 이로 인해 ZnO 소자는 용융과정을 통한 재소결이 일어난다. 이와 같은 과정에서 ZnO grain이 성장하고 비선형 저항특성을 나타내는 입계층이 감소하고 소자에 흐르는 전체 누설전류가 증가하며, 증가된 전체 누설전류로 인하여 정상운전전압에서도 쉽게 가열되고 열폭주에 도달하며, 결국에는 ZnO 소자가 파괴될 수 있다.

그림 2.8은 ZnO 소자의 열화요인과 열화시 나타나는 현상을 나타낸 것이다. 열화요인으로 과전스트레스인 상용주파수 교류과전압과 썬-지 스트레스인 뇌썬-지, 가스절연개폐장치(GIS)의 부하 개폐시 발생하는 개폐 썬-지와 주위환경(온도, 습습) 등으로 나타낼 수 있다. 이러한 열화요인으로 인하여 ZnO 소자의 열화가 진전되며, 저항분 누설전류가 증가하게 된다. 따라서 피뢰기의 열화현상으로는 전체 누설전류 증가, 소자의 온도 상승의 동작이 반복되어 나타난다. 전기적인 스트레스 외에도 온도, 습도 등의 주위 환경의 영향에 의하여 ZnO 소자가 열화되며, 이들 요소로 피뢰기의 절연저항이 저하하여 소자와 애관 등에 흐르는 누설전류를 증가시켜 결국 열폭주, 지락사고 등에 도달하게 된다.

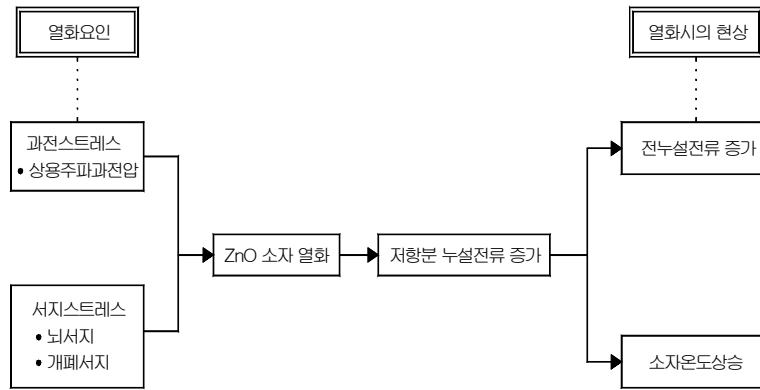


그림 2.8 피뢰기의 열화요인과 열화현상

Fig. 2.8 Deterioration factors and phenomena of lightning arresters

2.3 열화진단기술

피뢰기의 열화진전 상태를 파악하기 위해서는 정상운전전압에서 피뢰기의 누설전류를 검출하는 것이 중요하다. ZnO 소자가 열화되면 저항분 누설전류는 증가하지만 용량분 누설전류는 거의 증가하지 않기 때문에 소자의 열화에 영향을 거의 미치지 않는다^{[35],[63]~[66]}. 결국 저항분 누설전류가 증가하여 ZnO 소자의 온도를 상승시키고, 온도 상승은 누설전류를 증가시켜 최종적으로 피뢰기 소자의 열폭주, 지락사고 등을 일으키는 요인이 된다. 따라서 저항분 누설전류의 증가를 검출하는 것이 중요하며, 이를 통해 열화진전상태를 확인하여 교체 시기를 결정하는 것이 열화로 인한 전력계통의 사고를 미연에 방지할 수 있는 중요한 요소가 된다.

한편 ZnO 피뢰기의 부속장치에 대한 열화에 대해서는 충분히 검토되어 있다. 이들의 부적합 상태는 직접 절연저항을 저하시켜 피뢰기의 누설전류를 증가시키는 경우와 ZnO 소자의 열화에 영향을 미치는 저항분 누

설전류를 증가시키는 것이 있다. 특히 피압막 주변의 부품은 기능상 열화를 일으키기 쉽다. 예를 들어 Packing 등의 고무류가 열화되면 기밀불량, 흡혼 등을 일으켜 ZnO 소자의 측면과 절연부하 등의 절연저항을 저하시켜 누설전류가 증가하게 된다. 그러므로 부속장치의 열화는 절연저항을 절연저항계를 이용하여 쉽게 측정할 수 있으나, 통상 피뢰기를 전력계통에서 분리하여 측정해야 하는 단점이 있다.

그림 2.9는 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 θ 라 하면 식 (2.19)로 표현할 수 있다^[67].

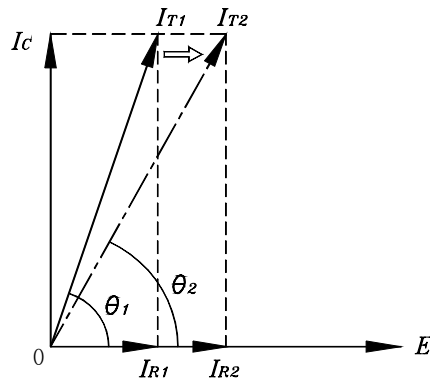


그림 2.9 인가전압과 누설전류와의 벡터 선도

Fig. 2.9 Vector diagram between applied voltage and leakage current

그림 2.9에서 초기의 전체 누설전류 I_{T1} 에서 열화진전으로 저항분 누설전류가 증가하면 전체 누설전류는 I_{T1} 에서 I_{T2} 로 변화하며, 그에 따라 인가전압과 전체 누설전류의 위상차 θ_1 은 θ_2 로 변화한다.

$$\begin{aligned}
|I_T| &= \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \\
\theta &= \tan^{-1} \frac{I_C}{I_R} \\
I_R &= I_T \cdot \cos \theta \\
I_C &= I_T \cdot \sin \theta
\end{aligned} \tag{2.19}$$

열화진전의 파라미터인 저항분 누설전류의 증가를 검출하는 것이 중요하다. 그렇지만 저항분 누설전류는 전체 누설전류 중에 포함되어 있고 그 크기도 매우 작기 때문에 직접적인 측정이 어려우므로 전체 누설전류를 측정하고, 그 중에서 저항분 누설전류를 분석하는 방법이 이용되고 있다.

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

2.3.1 전체 누설전류에 의한 열화진단기술

전력계통에 설치되어 있는 ZnO 피뢰기의 접지측 단자에 고감도 관통형 변류기를 설치하여 계통으로부터 접지선을 분리하지 않고, 정상운전전압에서 저항분 누설전류와 용량분 누설전류의 합으로 구성된 전체 누설전류를 측정하는 방법이다. ZnO 소자의 열화진전에 따라 전체 누설전류는 어느 정도 열화가 진전되기 전까지는 저항분 누설전류가 미소하게 증가하

기 때문에 초기의 열화상태를 진단하는데는 어려운 단점이 있다. 그러나 간단하게 측정 가능한 장점이 있어 피뢰기의 열화를 진단하는 방법으로 폭 넓게 사용되고 있다^{[35],[36]}.

2.3.2 저항분 누설전류에 의한 열화진단기술

저항분 누설전류의 경우 ZnO 소자 열화시 초기 값에 비해 큰 증가폭을 나타내므로 소자의 열화 초기뿐만 아니라 운전 중에 열화진전상태를 진단할 수 있는 장점이 있다. 하지만 소자에 흐르는 누설전류 중 저항분 누설전류를 측정하기 위해서는 고감도 변류기, 차동증폭기 등의 부가적인 장치를 이용하여 전체 누설전류로부터 검출하여야한다. 이러한 저항분 누설전류를 검출하는 대표적인 방법에는 『자기소거법, 동기정류법, 제 3조파 분석법, 와트로스 측정법』 등이 있다.

① 자기소거법

ZnO 소자의 전체 누설전류로부터 용량분 누설전류와 크기가 같은 소거파를 만들어 전체 누설전류에서 제거하여 저항분 누설전류만을 검출하는 방법이다. 변류기에 의하여 미소한 전체 누설전류를 검출하고, 그 신호를 임의의 크기의 신호로 증폭한다. 증폭된 신호로부터 소거파를 만들기 위하여 신호의 영점을 검출할 수 있는 전자회로 즉, 슈미트 트리거 회로(schumit trigger circuit)를 이용하여 영점에서 반전된 구형파신호를 발생시키고, 생성된 신호는 60[Hz]성분을 검출할 수 있는 저역통과필터를 통과하여 소거파의 기본이 되는 신호를 만든다. 그러나 이 신호는 그림 2.5에 나타낸 누설전류 파형 예에서 확인할 수 있듯이 저항분 누설전류에 의한 위상차를 가진 신호이기 때문에 전체 누설전류로부터 위상차를 보정하는 별도의 회로가 필요하다. 이렇게 위상차가 보정된 신호는 전체 누설

전류와는 π 의 위상차를 가지고 있기 때문에 자동이득조절장치에 전체 누설전류와 같이 입력되어 출력값이 작아지도록 조절된다. 전체 누설전류와의 합에 의해 검출된 신호를 마이크로프로세서에서 소정의 알고리즘으로 처리하여 이상유무를 진단한다. 그림 2.10은 자기소거법에 의한 측정 원리를 나타내었으며, 계기용 변압기(PT/PD) 등의 보조신호가 필요하지 않고, 또 검출 센서로서 변류기를 사용하고 있기 때문에 전력계통으로부터 안정성을 확보할 수 있고, 내서지성이 우수한 것 등의 장점이 있다. 그러나 이 방법은 전체 누설전류에 포함된 고조파의 크기가 크거나 선로에 연결된 기기들에 의하여 위상의 지연이 발생한다면 저항분 누설전류를 검출하지 못하고 영점을 검출하는 슈미트 트리거 회로의 정도에 의하여 오차를 포함하는 단점이 있다^[68].

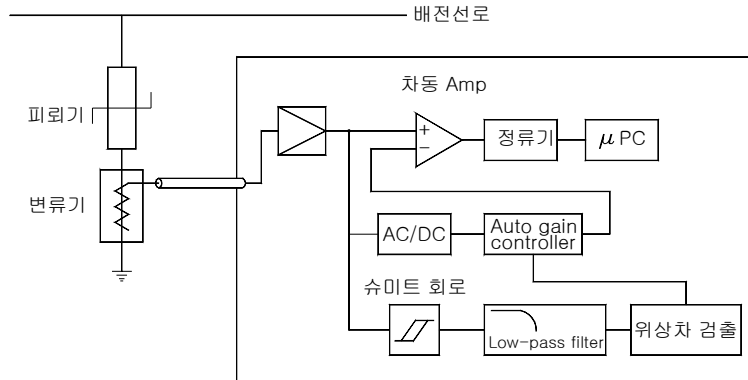


그림 2.10 자기소거법의 원리

Fig. 2.10 Principle of the self-cancel method

② 동기정류법

ZnO 피뢰기에 흐르는 전체 누설전류를 검출저항을 이용하여 검출하며 대역통과필터를 통해 60[Hz]의 기본파 성분을 추출한 후, 이를 계기용

변압기에서 얻은 전압신호로 동기정류하여 직류로 변환·증폭해 저항분 누설전류를 검출하는 방법이다. 그림 2.11, 2.12에 동기정류법에 의한 저항분 누설전류의 개략도 및 검출 원리를 나타내고 있다^{[69],[70]}.

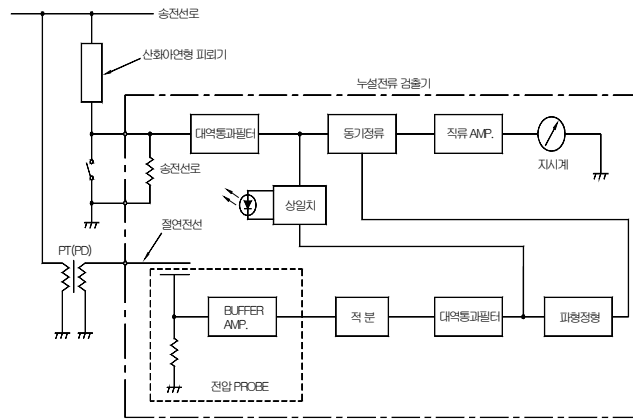


그림 2.11 동기정류법의 원리

Fig. 2.11 Principle of the synchronous rectification method

그림 2.12 (a)는 각각의 누설전류들의 나타낸 것이며 그림 2.12 (b)는 전체 누설전류를 대역통과필터를 통하여 60[Hz]의 기본파 성분을 검출한다. 그림 2.12 (c)에 나타낸 인가전압 파형의 영점인 A, B 사이에서 용량분 누설전류 I_a 를 정류하면, 그림 2.12 (b)에 나타내고 있는 것과 같은 사선부분이 소거되어 저항분 누설전류의 기본파성분 최대값 I_a 에 대응한 DC 출력 I_b 가 그림 2.12 (d)와 같이 나타난다. DC 출력 I_b 는 그림 2.11의 측정과정을 통하여 저항분 누설전류의 최대값 I_{RP} 을 얻는 방식이다.

이 방법은 전력계통의 고주파의 영향을 거의 받지 않으며 누설전류 측정오차가 작은 등의 장점이 있다. 그러나 이 방식을 사용하기 위해서는 계기용 변압기를 이용하여 전압신호를 검출할 수 있는 곳에서만 사용할 수 있으며,

전류신호는 피뢰기와 접지선에 사이에 연결된 저항을 이용하여 검출하고 전압신호도 계기용 변압기의 2차측으로부터 직접 검출해야 하기 때문에 절연 문제에 특히 유의해야한다.

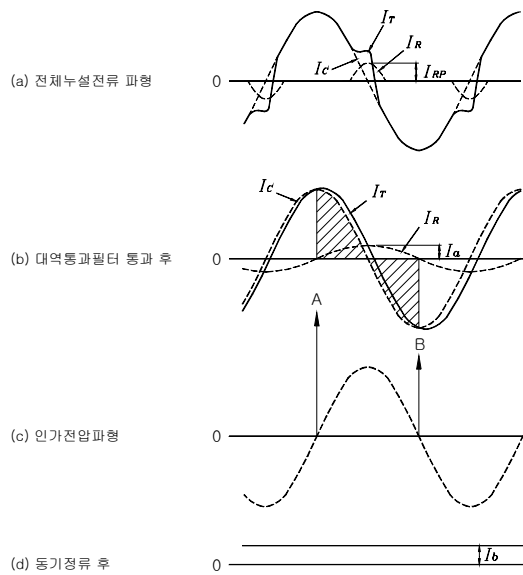


그림 2.12 전압과 전류 파형

Fig. 2.12 Voltage and current waveforms

③ 제 3조파 분석법

전력계통에 설치된 피뢰기의 누설전류는 접지선을 통하여 대지로 흐르므로 피뢰기가 연결된 접지선에 관통형 변류기를 설치하여 전체 누설전류를 검출하고, 전체 누설전류 중에서 대역통과필터를 이용하여 제 3조파 성분을 검출하는 방법이며, 그림 2.13은 그 예를 나타낸 것이다. 저항분 누설전류는 전원전압과 동상이며, 제 3조파 누설전류 성분이 저항분 누설전류의 경향을 나타내기 때문에 제 3조파 누설전류의 크기를 분석하여 열화를 진단한다^{[12],[13],[35],[36]}.

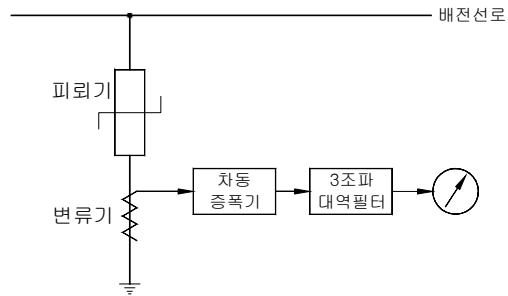


그림 2.13 제 3조파 누설전류 측정

Fig. 2.13 Measurement of the 3rd harmonic leakage current

특히 전체 누설전류 성분 중 저항분 누설전류의 변화가 제 3조파 누설전류 성분의 변화로 현저히 나타나므로, 제 3조파 성분을 분석하여 누설전류의 증가분에 대한 정보를 얻을 수 있어 피뢰기의 누설전류를 측정하는 일반적인 방법으로 사용되고 있다. 이 방법은 누설전류를 피뢰기의 정상 운전상태에서 측정이 가능하고, 취급이 간단하여 지시계기에 의한 측정과 관측장치에 의한 파형 관측이 가능한 특징이 있다.

제 3 장 뇌충격전류에 의한 가속열화 실험

전력계통에 설치된 피뢰기는 뇌충격전류에 의하여 주로 열화되며 전력계통에 설치되어 있었던 피뢰기의 누설전류 측정으로부터 열화판단의 기준을 예측할 수 있다. 그러나 계통에서 분리된 피뢰기들의 대부분은 설치기간은 알 수 있지만, 침입한 뇌충격전류의 크기와 횟수는 알 수 없고 주위환경에 의한 영향도 무시할 수 없기 때문에 정량적인 분석은 어렵다. 그리고 자연현상에서 발생하는 낙뢰는 1회만 발생하는 것이 아니고 일정시간(30~80[ms]) 간격으로 평균 4회 정도가 발생하기 때문에 실험에서는 단일 뇌충격전류 뿐만아니라 4회의 다중 뇌충격전류도 인가하여 그 결과를 비교하였다. 단일 및 다중 뇌충격전류를 인가한 ZnO 소자는 점차 열화되고, 전기적 특성의 변화를 분석하기 위하여 동작개시전압, 누설전류 및 ZnO 소자의 표면온도 등을 관측할 수 있는 실험장치와 측정계를 구성하였으며, 초기 특성과 뇌충격전류 인가에 따른 특성 변화를 비교 분석하였다^{[67],[71],[72]}. 실험에는 국내 배전계통의 피뢰기(18[kV], 5[kA])에 사용되는 ZnO 소자를 적용하였으며, 전기적 특성은 표 3.1과 같다.

표 3.1 ZnO 소자의 전기적 특성

Table 3.1 Electrical properties of the ZnO block

정격전압	6[kV] rms
정격전류	5[kA] rms
동작개시전압	AC 7.2 ~ 8.64[kV] rms (1[mA])
	DC 8.6 ~ 10.12[kV] (1[m]A)

3.1 실험장치 및 측정계

ZnO 소자의 단일 및 다중 뇌충격전류에 의한 전기적 특성변화에 관한 연구를 수행하기 위해 그림 3.1과 같이 실험장치 및 측정계를 구성하였다. 단일 및 다중 뇌충격전류에 대한 비교 실험을 하기 위한 장치로서 다중 뇌충격전류 발생장치는 에너지 축전형 콘덴서에 고전압을 인가할 수 있는 직류 고전압 발생장치(130[kV], 2.1[mA]), 4개의 충전용 콘덴서(100[kV], 0.5[μ F]) बैंक 및 황동 재질인 8개의 방전구갯(100[mm])으로 구성·제작하였다. 콘덴서에 충전되는 전압은 고저항(500[M Ω])과 직류전류계(0 ~ 3,000[μ A])를 사용하여 측정하였으며 ZnO 소자에 흐르는 방전전류는 고주파 변류기(Stangenes. CT 3-0.01, 50[kA]_{max})를 사용하여 측정하였다. 또한, ZnO 소자 양단의 제한전압은 1,000:1 고전압 프로브(Tek. P6015A, 75[MHz], 40[kV]_{max})를 이용하여 관측하였으며 뇌충격전류 인가에 의하여 ZnO 소자는 온도가 상승하며 적외선 온도계(Ray. MT-4, -18~275[$^{\circ}$ C])를 이용하여 측정하였다.

그림 3.2는 뇌충격전류의 인가 후 ZnO 소자에 흐르는 누설전류의 변화와 동작개시전압을 관측하기 위해 구성된 누설전류 측정계로서 고전압 공급장치(HV P.S.), 멀티미터(Fluke 45) 및 고주파 변류기(CT)를 이용한 누설전류 측정장치로 구성하였다. 고전압 공급장치를 이용하여 정상운전전압을 인가하고 멀티미터에서 전체 누설전류를 측정하고, 제작한 누설전류 측정장치를 이용하여 전체 누설전류와 저항분 누설전류의 변화에 따라 동일한 경향을 나타내는 제 3조파 누설전류를 측정하였다.

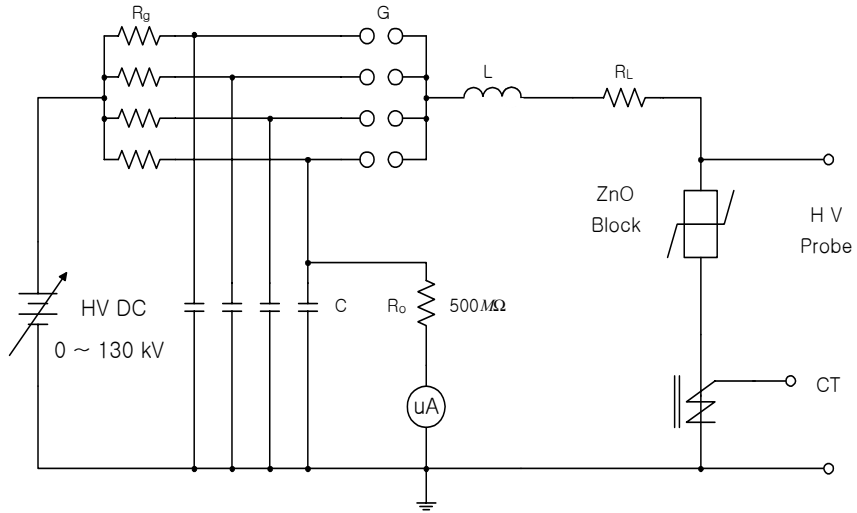


그림 3.1 실험장치 및 측정계의 구성

Fig. 3.1 Configuration of the experimental apparatus and measurement system

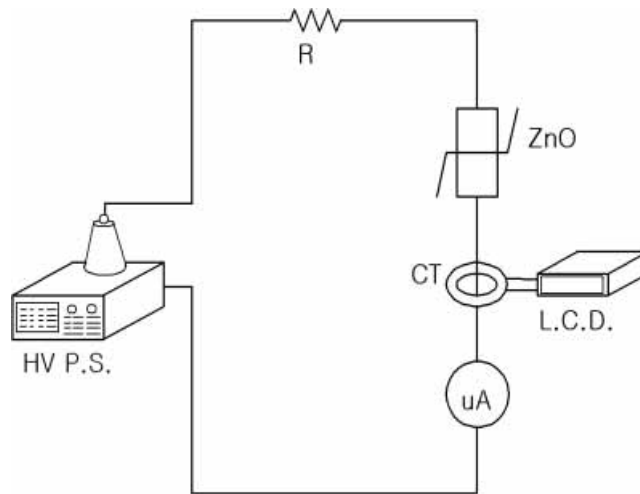


그림 3.2 누설전류 측정계의 구성

Fig. 3.2 Configuration of the leakage current measuring system

대역통과필터는 그림 3.3과 같이 구성하였으며, 대역통과필터의 중심 주파수 f_0 는 상용주파수 교류전압의 3조파인 180[Hz]로 정하였으며, 이득 G_0 는 1.32, Q 는 10, 커패시터 C 는 0.1[μ F]이다. 여기서 Q 는 공진의 첨예도로 Q 를 크게 하면 중심주파수에서 특성곡선은 좁아지고 예리하게 된다. 그림 3.3의 회로에서 저항 R_1, R_2, R_3 과 Q, f_0, C 및 G_0 의 관계는 식 (3.1)과 (3.2)로 표현된다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{1}{R_3} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}} \quad (3.1)$$

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{Q}{2\pi f_0 G_0 C} \\ R_2 &= \frac{Q}{2\pi f_0 C (2Q^2 - G_0)} \\ R_3 &= \frac{Q}{\pi f_0 C} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

식(3.1)과 (3.2)를 이용하여 $R_1 \approx 67[\text{k}\Omega]$, $R_2 \approx 59[\Omega]$, $R_3 \approx 233.5[\text{k}\Omega]$ 으로 설정하였다.

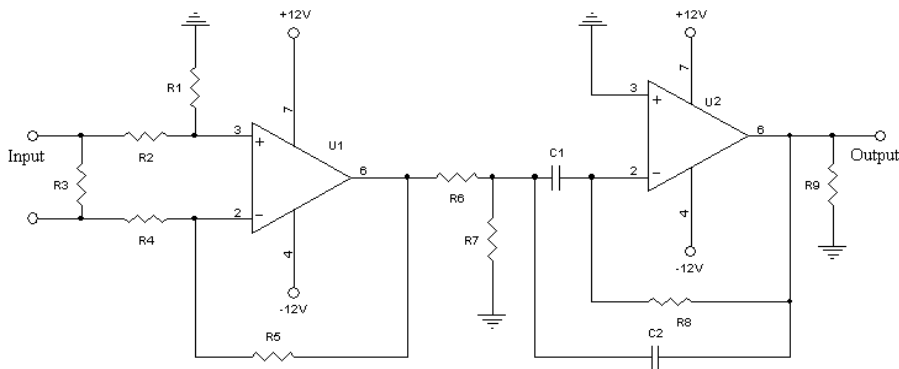


그림 3.3 대역통과필터 회로

Fig. 3.3 Circuit of the band pass filter

그림 3.4는 대역통과필터의 주파수 응답 특성을 정규화하여 나타낸 것으로 중심주파수 f_0 는 180[Hz]이며, 실제 배전선로의 고조파 성분이 기수 고조파임을 고려할 때, 본 대역통과필터는 제 3조파 성분만의 검출에 충분한 특성이다.

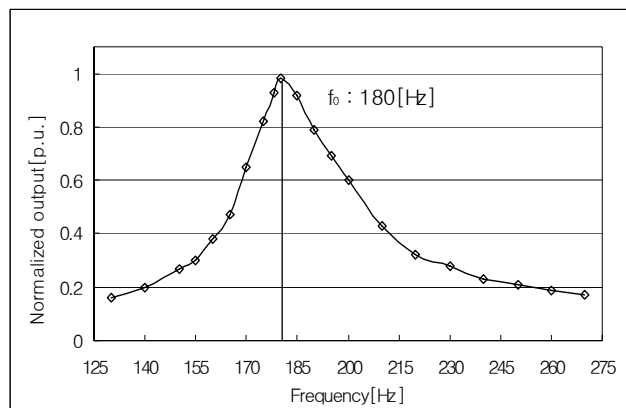


그림 3.4 대역통과필터의 주파수 응답

Fig. 3.4 Frequency response of the band pass filter

그림 3.5는 대역통과필터의 입·출력 특성을 나타낸 것으로, 전류를 5[μ A]에서 1[mA]까지 증가시키면서 출력전압을 측정하였으며 측정범위에서 선형적으로 증가하는 특성을 보여주었다. 신품 ZnO 소자의 경우 전체 누설전류는 수 백[μ A]이며, 그 중에서 제 3조파 성분은 더욱 작기 때문에 본 대역통과필터의 입력전류-출력전압 특성은 ZnO 소자의 제 3조파 누설전류 검출이 가능하다.

그림 3.6에는 누설전류 측정장치에 의해 검출한 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류 파형의 예를 나타내었다.

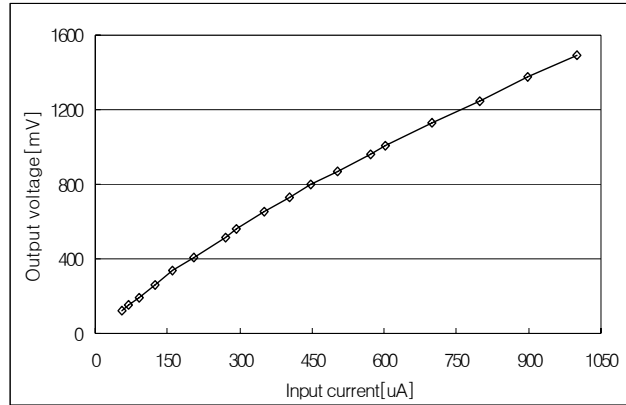


그림 3.5 대역통과필터의 입·출력 특성

Fig. 3.5 Input-output characteristics of the band pass filter

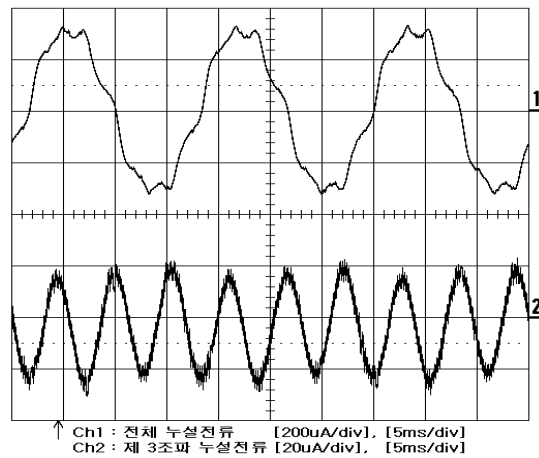


그림 3.6 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류

Fig. 3.6 Total leakage current and its 3rd harmonic leakage current

저항분 누설전류는 ZnO 소자의 접지측 단자에서 용량분 누설전류와 중첩되어 나타나므로 단순한 방법으로 측정할 수 없고, 전체 누설전류 중에서 용량분 누설전류를 제거하였으며, 그 측정원리를 그림 3.7에 나타내었다^[73]. 식 (3.3)에서와 같이 소자를 흐르는 전체 누설전류 중에서 용량분 누설전류를 제거하여 저항분 누설전류를 측정하는 방법으로, 소자 양단에 커패시터를 병렬로 연결하고 동일한 교류전압을 인가하여 소자의 용량분 누설전류와 동상의 용량분 전류를 발생시켜 차동회로에서 소거시키면 저항분 누설전류만이 남게 된다.

$$I_t = I_c + I_r [\mu A] \quad (3.3)$$

$$I_r = I_t - I_c [\mu A]$$

용량분 누설전류는 소자에 인가되는 전압의 기본파 성분을 $E_m \sin \omega t$, ZnO 소자의 정전용량을 C 라고 하면 식 (3.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_c = 2\pi f C E_m \cos \omega t [\mu A] \quad (3.4)$$

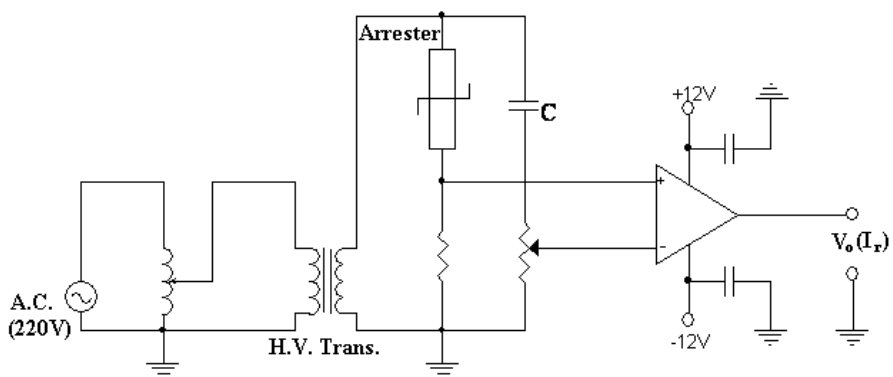


그림 3.7 저항분 누설전류의 측정 원리

Fig. 3.7 Principle of the resistive leakage current measurement

실제 검출방법에 있어서는 피뢰기 양단에 커패시터를 병렬로 연결하고 동일한 교류전압을 인가하여 피뢰기의 용량분 누설전류와 동상의 용량분 전류를 발생시켜 연산증폭기를 이용한 차동회로에서 소거시키면 저항분 누설전류만 남게된다. 또한 피뢰기의 종류에 따라 용량분 누설전류의 크기에 다소 차이가 있으므로 측정시 외부에서 인가하는 용량분 누설전류의 조정이 필요하며, 그림 3.8에는 전체 누설전류 중 저항분 누설전류의 예를 나타내었다.

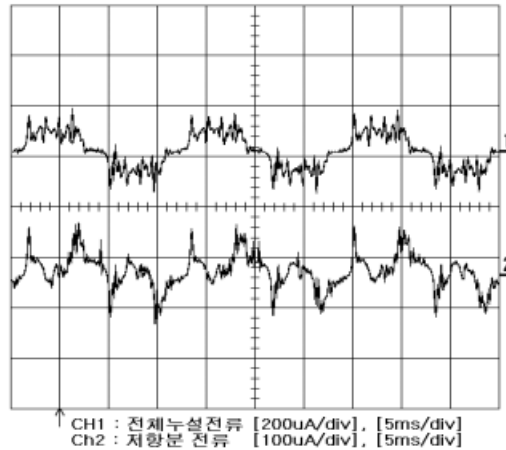


그림 3.8 전체 누설전류와 저항분 누설전류

Fig. 3.8 Total leakage current and its resistive current

제 3조파 누설전류 및 저항분 누설전류 검출회로를 적용하여 저항분 누설전류 측정장치를 제작하였으며, 그림 3.9와 3.10에 나타내었다. ZnO 소자의 정상 운전전압과 정격전압에서의 전체 누설전류, 제 3조파 누설전류 및 저항분 누설전류를 측정할 수 있으며, 본 장치에 의해 소자의 전압-전류 특성도 분석할 수 있다. 회로 구성은 그림 3.10과 같이 저항 R_1 과 직렬로 전체 누설전류를 검출하기 위하여 교류전류계를 연결하였으며, 커

패시터 C_1 과 저항을 연결한 부분에서 저항 R_7 를 변경시켜 용량분 누설전류를 검출할 수 있다. 검출한 두 신호를 차동증폭기의 입력으로 인가하여 두 신호의 동상성분이 제거된 신호를 차동증폭기의 출력저항 R_{16} 에서 얻을 수 있으며, 출력저항 R_{16} 과 직렬로 연결된 교류전류계로 표시한다. 또한 회로의 A점에서 대역통과필터를 접속하여 저항분 누설전류와 관계된 제 3조파 누설전류를 검출할 수 있도록 하였다. 차동증폭기의 이득은 저항 R_9 와 R_{15} 를 변화시켜 이용하여 조절할 수 있으며, 입력과 출력의 비율을 1:1이 되게 설정하였다 즉, 저항분 누설전류의 입력이 $1[\mu A]$ 이면 디지털 전류계의 출력도 $1[\mu A]$ 가 되게 교정하여 저항분 누설전류의 값을 표시할 수 있게 하였다. 저항분 누설전류의 측정은 외부에서 인가하는 용량분 누설전류의 값을 변화시켜 차동증폭기의 출력신호가 가장 작은 값 즉, 소자의 용량분 누설전류와 외부에서 인가하는 용량분 전류가 같아지는 점에서 저항분 누설전류만을 검출할 수 있다.



그림 3.9 누설전류 측정장치의 사진

Fig. 3.9 Photograph of the leakage current measuring device

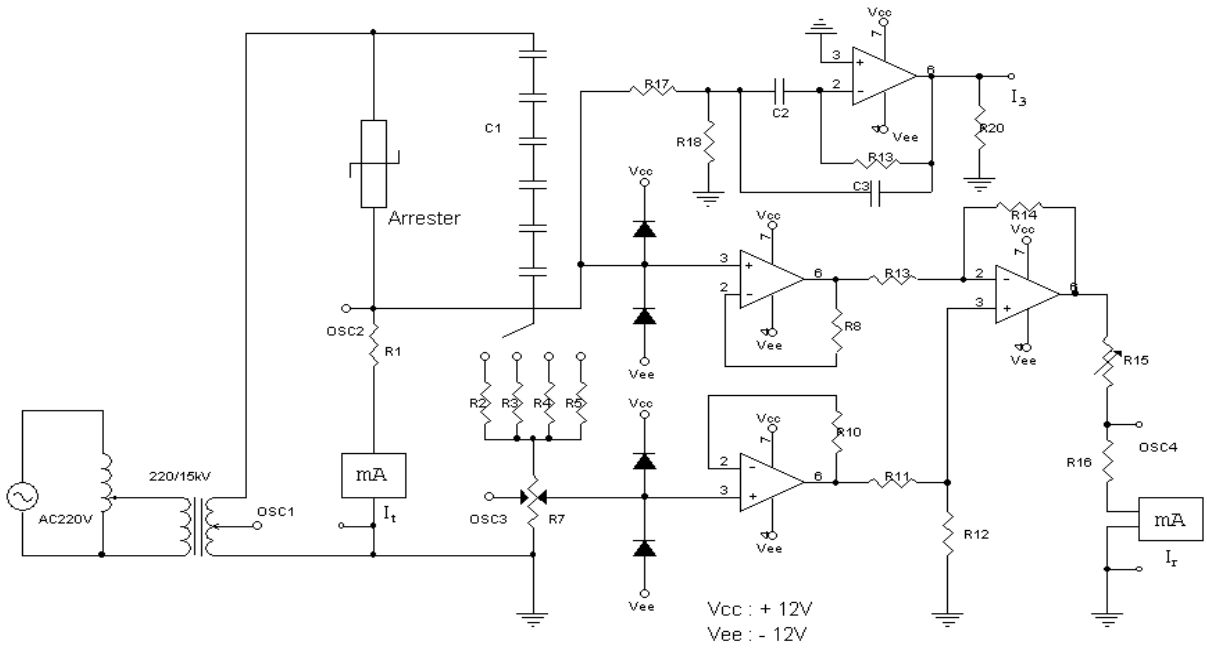


그림 3.10 누설전류 측정장치의 회로

Fig. 3.10 Circuit of the leakage current measuring device

또한 본 논문에서는 뇌충격전류에 의한 전기적 특성 변화를 관찰하기 위하여 R, L, C 를 이용하여 뇌충격전류 발생장치를 제작하였으며, 등가회로는 그림 3.11과 같다. 직류 고전압 발생장치(130[kV], 2.1[mA])에서 인가되는 직류 고전압은 충전용 저항 R_g 를 통하여 4개의 에너지 축적형 콘덴서 C 에 충전시키고 설정된 전압 E 까지 충전되면, 4개의 방전구갯 G 를 통하여 $L \cdot R_L + R_{OUT}$ 에 콘덴서 C 의 전하를 각각 방전시켜 저항 R_{OUT} 양단에 충격전압이 발생하게 된다^{[74]~[76]}.

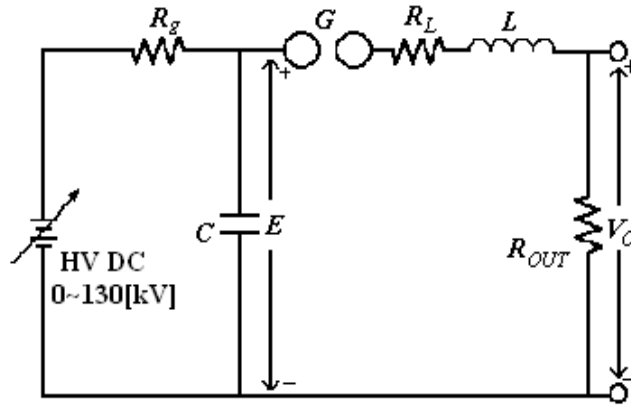


그림 3.11 뇌충격전류 발생장치의 등가회로

Fig. 3.11 Equivalent circuit of the lightning impulse current generator

그림 3.11의 등가회로에서 방전구갯 G 의 방전저항을 무시하면 식 (3.5)의 회로방정식이 성립한다.

$$L \frac{di}{dt} + (R_L + R_{OUT})i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = E \quad (3.5)$$

식 (3.5)에 $R_L + R_{OUT} = R$ 이라 하고, 초기조건 $t=0$ 에서 $i=0$ 을 대입하여

계산하면,

① $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 일 때

$$i = \frac{E}{R} \cdot \frac{\alpha}{\beta} \{ \varepsilon^{-(\alpha-\beta)t} - \varepsilon^{-(\alpha+\beta)t} \} \quad (3.6)$$

② $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 일 때

$$i = \frac{E}{R} \cdot 2\alpha t \cdot \varepsilon^{-\alpha t} \quad (3.7)$$

③ $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 일 때

$$i = \frac{E}{R} \cdot \frac{2\alpha}{\omega} \cdot \varepsilon^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (3.8)$$

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

각 조건에서 발생하는 파형은 PSpice에서 시뮬레이션하여 전류 파형을 그림 3.12에 나타내었다. ①의 조건에서 발생하는 파형은 과제동되어 서서히 파도가 증가하여 최대값에 도달한 후 천천히 감소하며, ②의 조건에서는 최대값에 도달한 후 임계값까지 감소하고, ③의 조건에서는 파도가 급준하고 진동성분을 포함한 감쇠파형이 발생한다. 시뮬레이션에서는 초기 충전전압은 67[kV], 콘덴서 C 는 1[μ F], 인덕터 L 은 49[μ H]로 선정하고 각 조건에 맞는 파형을 발생시키기 위하여 저항 R 은 4[Ω], 14[Ω], 26[Ω]으로 수행하였다. 본 논문에서는 ②의 조건에서 발생하는 형태의 뇌 충격전류 파형(8/20[μ s])이 요구되며, 파두장은 R_L 과 L 로, 파미장은 R_{OUT} 과 L 로 조정된다.

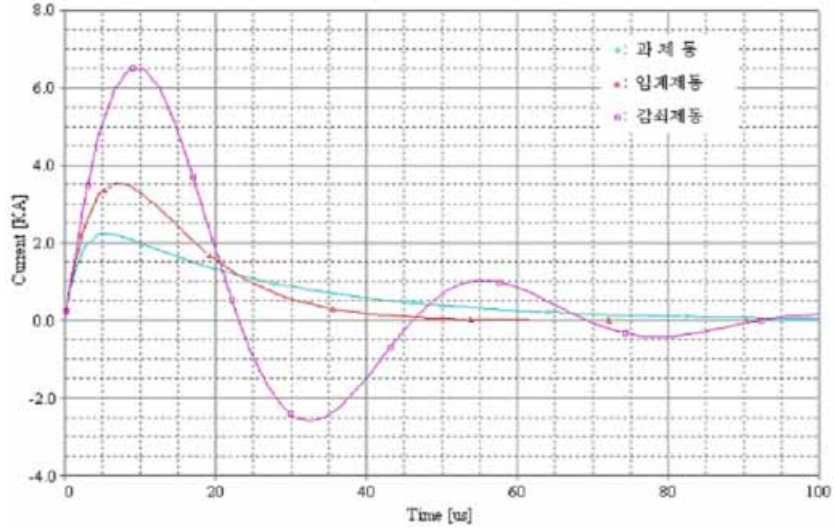


그림 3.12 충격전류 파형

Fig. 3.12 Waveforms of impulse currents

그림 3.13은 본 논문에서 제작한 실험장치의 사진을 나타내었으며 표 3.2에는 다중 뇌충격전류 발생장치의 사양을 나타내었다. 다중 뇌충격전류 발생장치는 충전전압 70[kV]에서 표준 뇌충격전류 8/20[μs], 5[kA]를 발생시킬 수 있으며, 뇌충격전류의 크기는 콘덴서에 충전되는 전압으로 조정할 수 있다.



그림 3.13 다중 뇌충격전류 발생장치의 사진

Fig. 3.13 Photograph of the multiple-lightning impulse current generator

표 3.2 다중 뇌충격전류 발생장치의 사양

Table 3.2 Specification of the multiple-lightning impulse current generator

항 목	사 양	항 목	사 양
충전용저항 (R_g)	물저항형	방전전류 측정용 (CT)	t_r : 100[ns] Max : 50[kA _{peak}]
방전용 갭 (G)	황동재질 직경 100[mm]	충전전류 측정용 (R_0)	무유도 권선저항 500[MΩ]
파형조정용 (L)	공심단층원통형 4~32[μH]	축적형 콘덴서 (C)	100[kV], 0.5[μF]
파형조정용 (R_L)	무유도 권선저항 10[Ω]	고전압 인가장치 (HV DC)	130[kV], 2.1[mA]

그림 3.14는 설계한 뇌충격전류 발생장치의 등가회로에 대한 PSpice 시뮬레이션 결과를 나타내었으며, 표준뇌충격전류 파형인 8/20[μ s](과두장(7~9[μ s]), 과미장(18~22[μ s]))를 만족함을 알 수 있다^{[67],[71],[72]}.

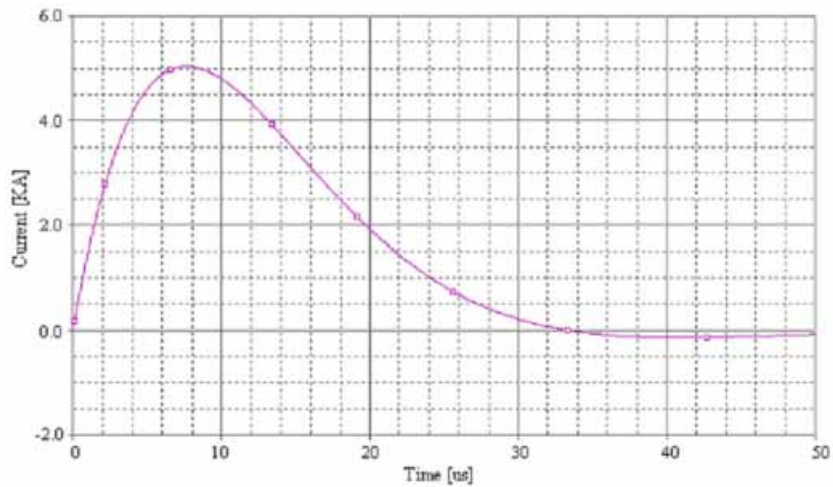
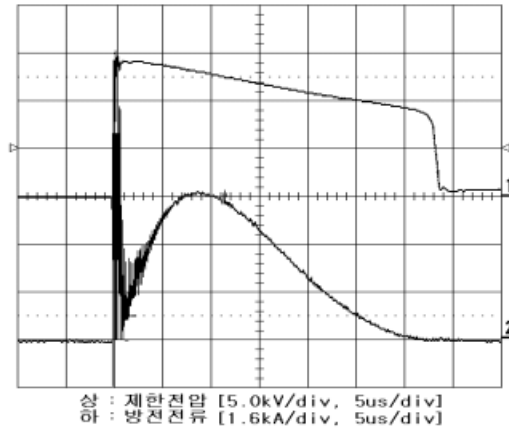


그림 3.14 시뮬레이션 결과

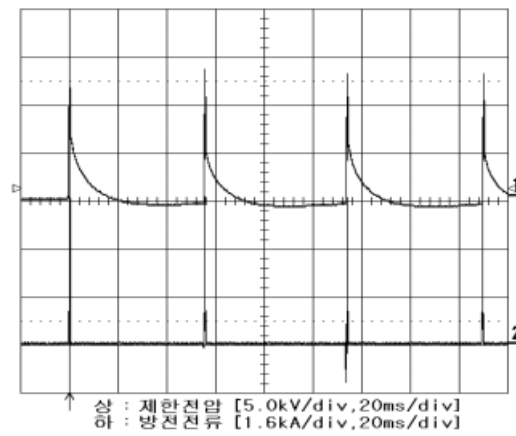
Fig. 3.14 Simulation result

그림 3.15 (a)와 (b)는 본 논문에서 제작한 뇌충격전류 발생장치에 의해 다중 뇌충격전류를 ZnO 소자에 인가할 때 소자에 흐르는 방전전류와 소자 양단의 제한전압 및 뇌충격전류의 시간 간격을 나타낸 것이다. 그림 3.15 (a)는 수평축 시간 간격을 5[μ s]로 하여 4 개의 다중뇌격이 발생할 때, 그 중 하나의 방전전류와 제한전압을 나타낸 것으로 매 회마다 ZnO 소자에 인가되는 파형의 특성을 정확히 알 수 있으며 그림 3.15 (a)의 방전전류파형이 본 논문에서 요구되는 8/20[μ s] 표준 뇌충격전류와 일치함을 확인할 수 있다. 그림 3.15 (b)는 수평축 시간 간격을 20[ms]로 설정하여 1 회의 방전에 발생하는 4종의 뇌충격전류의 시간 간격을 나타낸 것

으로 약 55[ms]마다 뇌충격전류가 ZnO 소자에 인가됨을 알 수 있다.



(a) 방전전류 및 제한전압



(b) 다중 뇌충격전류의 발생

그림 3.15 다중 뇌충격전류 발생장치에 의해 발생된 파형

Fig. 3.15 Typical waveforms produced by the multiple-lightning impulse current generator

3.2 실험방법

단일 및 다중 뇌충격전압·전류 인가실험을 병행하면서 ZnO 소자의 특성변화를 비교·분석하였다. 뇌충격전압·전류의 인가는 단일 뇌충격전류 인가실험의 경우, 1분 간격으로 40회를 군단위로 하여 인가하고 1시간 이상 실온에서 충분히 냉각하였으며 다중 뇌충격전류 인가 실험에서는 뇌격시간의 간격을 40 ~ 120[ms]가 되도록 하여 4중의 뇌충격전류를 단일과 동일한 시간 간격으로 10회를 인가한 후 1시간 이상 실온에서 충분히 냉각시켰다.

본 논문에서 행한 ZnO 소자에 대한 단일 및 다중 뇌충격전류 인가방법은 측정시점에서 소자에 동일한 에너지가 인가되도록 한 것이며 뇌충격전압 및 전류가 ZnO 소자에 인가되어 흡수되는 에너지는 식 (3.9)와 같이 시간에 대한 적분함수로 나타낼 수 있다.

$$w = \int vi dt \text{ [J]} \quad (3.9)$$

여기서 v 는 단자전압, i 는 방전전류, w 는 인가 에너지량이다. 8/20[μ s], 5[kA] 단일의 뇌충격전류로 ZnO 소자에 인가되는 에너지는 식 (3.9)와 같이 산출할 수 있으며, 본 실험 파형의 경우 1,200[J] 정도의 에너지가 인가된다.

단일 및 다중 뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 전기적 특성변화를 측정하기 위하여 상기의 조건으로 총 200회(다중의 경우 50회)를 반복하여 인가하였다. 단일과 다중의 군단위 실험이 행하여 질 때마다 뇌충격전류 발생장치로부터 소자를 분리하여 소자 양단에 직류 및 교류 전압을 인가하고 정상운전전압(4.4[kV])과 정격전압(6[kV])에서 전체 누설전류의 최대

값과 실효값의 변화와 소자에 흐르는 누설전류가 1[mA]로 되었을 때의 동작개시전압을 비교·분석하였다.

최종 단계에는 단일 및 다중 뇌충격전류의 인가에 의하여 ZnO 소자들의 미세구조가 초기상태에서 어떤 변화가 생겼는지를 확인하기 위해 주사전자현미경에 의한 분석을 수행하였다.

제 4 장 열화진단기술 개발

뇌충격전류에 의한 가속 열화실험으로부터 ZnO 소자는 열화진전에 따라 전체 누설전류와 저항분 누설전류 및 제 3조파 누설전류가 증가하는 것을 확인하였다. 전력계통에 설치되어 있는 피뢰기를 계통에서 분리하여 성능을 평가하여 양호한 성능을 가지고 있다고 하더라도 전력계통에 다시 설치할 수 없기 때문에 운전 중인 상태에서 열화정도를 확인할 수 있는 진단기술은 반드시 필요할 것이다. 따라서 본 논문에서는 열화진전에 따른 파라미터로 누설전류를 선정하고 누설전류를 이용한 열화진단기술을 개발하였다^{[77],[78]}.

전체 누설전류를 이용하는 열화진단기술은 단순히 전체 누설전류 또는 제 3조파 누설전류의 크기를 비교하는 것으로 실효값과 최대값을 이용하는 방식이다. 그러나 전체 누설전류의 실효값은 초기 열화 상태를 파악하기 힘들고, 최대값은 주위환경(온도, 습도 등), 전원전압의 변화 등의 영향으로 값의 변화가 크기 때문에 전체 누설전류의 파고값들의 분포를 이용하는 새로운 방식을 이용하였다. 이 기술은 신품 ZnO 소자와 뇌충격전류에 의하여 가속열화 실험을 실시한 시료들의 파고분포 변화를 비교·분석하는 방법이다. 또한 전체 누설전류의 증가는 저항분 누설전류의 증가로 나타나는 것이며, 전체 누설전류의 크기에 비하여 초기상태에서는 대부분 10[%]이하의 작은 값이지만 초기 저항분 누설전류에 비해서는 그 증가분의 값은 크다. 전체 누설전류에서는 증가한 저항분 누설전류의 값을 검출하는 것이 어렵기 때문에 값의 변화가 거의 없는 용량분 누설전류를 이용하여 저항분 누설전류만을 검출하는 열화진단기술을 제안하였다.

이 방법은 전체 누설전류를 검출하고 마이크로프로세서를 이용하여 용량 분 누설전류를 제거하여 저항분 누설전류만을 나타내는 방법으로 자기소거법에 의한 열화진단기술의 개선된 방법이라고 할 수 있다. 이들 두 가지 방법을 이용한 열화진단장치를 설계·제작하여 ZnO 소자, 전력용 피뢰기, GIS용 피뢰설비 등의 시료들을 대상으로 성능을 평가하였다.

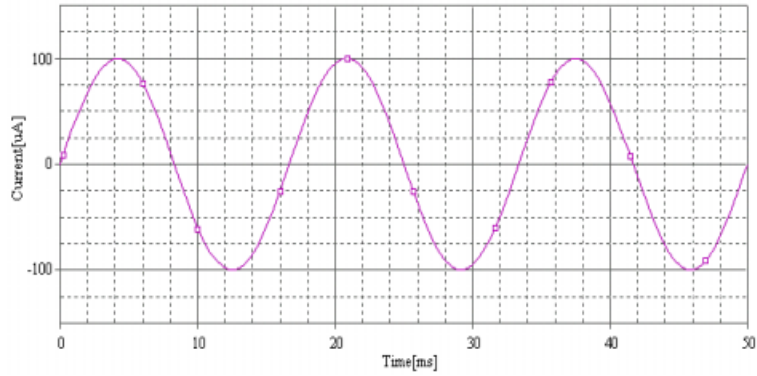
4.1 열화진단기술

4.1.1 누설전류 파고분포 분석

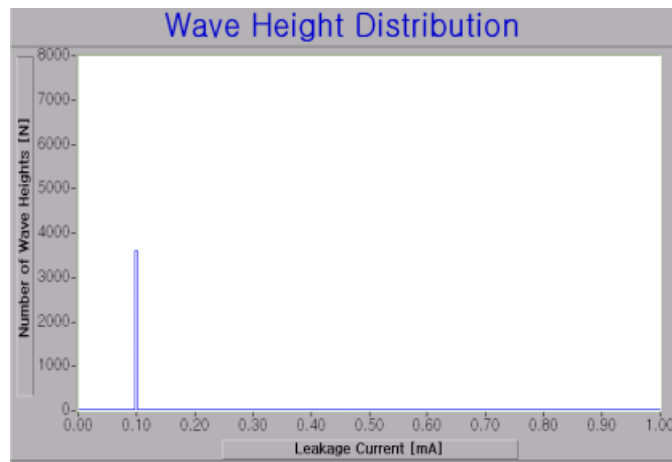
전체 누설전류의 파고분포를 이용하는 방법을 기술하면 다음과 같다. 파고라고 정의하는 기준은 과형을 검출하여 검출된 값의 부호가 양(+)이고, 검출된 값의 기울기의 부호가 양(+)에서 0으로, 0에서 음(-)으로 변하는 부분을 말한다.

그림 4.1과 4.2에 누설전류와 파고분포의 관계를 나타내었다. 그림 4.1은 파고값 0.1을 갖는 완전한 정현파인 경우의 누설전류 파형과 파고분포이고, 그림 4.2는 파고값 0.1을 갖는 정현파와 기본파의 20[%]의 크기를 갖는 제 3고조파 성분과 제 5고조파를 고려한 전체 전류의 파형과 파고분포를 나타내었으며, 측정시간은 1분으로 설정하였다. 주파수는 인가전원을 고려하여 60[Hz]로 설정하였으며, 완전한 정현파 신호의 경우는 16.67[ms]의 주기마다 하나씩의 파고를 검출하여 최대값인 크기 0.1[mA]인 3,600개의 파고가 검출되었다. 고조파가 포함되어 있는 경우는 3고조파와 5고조파의 최대값이 같기 때문에 합성된 전체 전류의 최대값은 기본파의 최대값만이 나타나고 최대값의 좌우에서 기본파와 3고조파, 5고조파의 영향으로 0.082[mA]의 파고가 분포하였다. 피뢰기의 누설전류는 열화진전에 따라 증가하기 때문에 신품의 경우와 전력계통에서 운전 중인 피뢰기들과 비교한다면 열화진전에 따른 변화를 관찰할 수 있을

것이다. 이러한 원리로부터 누설전류의 파고분포를 이용하는 새로운 열화 진단기술을 개발하였다.



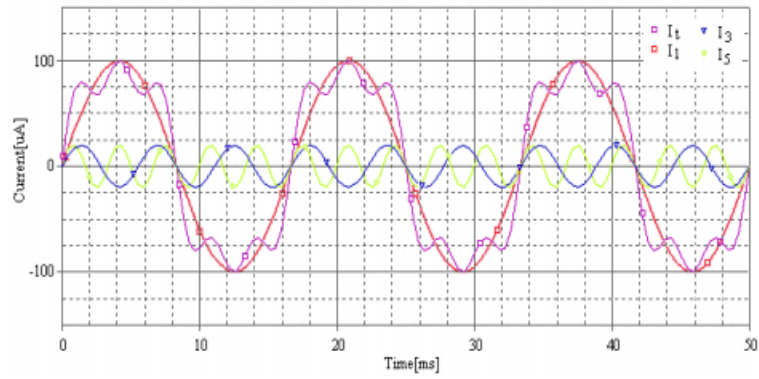
(a) 누설전류 파형



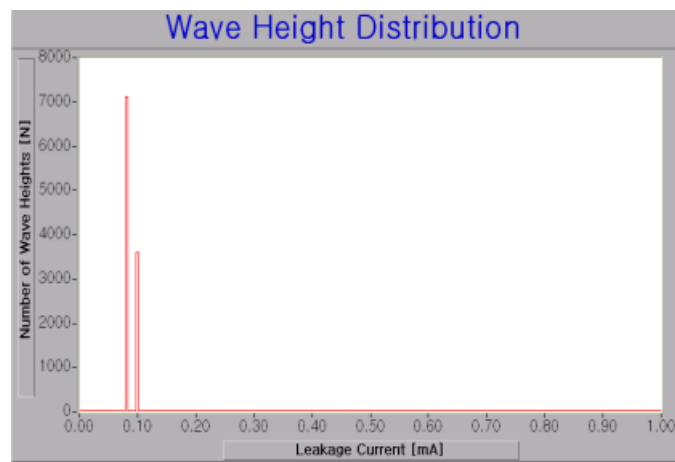
(b) 파고분포

그림 4.1 누설전류 파형과 파고분포

Fig. 4.1 Leakage current waveform and its wave height distributions



(a) 누설전류 파형



(b) 파고분포

그림 4.2 누설전류 파형과 파고분포

Fig. 4.2 Leakage current waveforms and its wave height distributions

ZnO 소자는 ZnO grain이 입계층에 직·병렬로 연결된 구조로 grain의 크기와 입계층의 두께가 모두 동일한 것은 아니므로 ZnO 소자에 뇌충격 전류가 인가될 때 입계층에 가해지는 전계의 세기도 다르다. 따라서 grain을 통해 흐르는 에너지량도 각각 차이가 있으며 전기적 스트레스는 소자 전체에 걸쳐 다르게 나타나 일부 grain 또는 입계만 변형이 발생한다. 이와 같이 열화가 진전되는 과정에서 직·병렬로 연결된 일부 grain과 입계층만이 변형되었다면 정상운전전압에서 입계에 가해지는 전계가 grain 사이의 비선형 특성으로 어떤 전계 이상에서만 비선형 특성을 나타내면서 최대값, 즉 누설전류의 파고값만 증가하고 실효값에는 인지할 만한 변화가 관측되지 않는다. 따라서 ZnO 소자는 열화진전에 따라 누설전류의 파고값이 증가함은 물론 파고분포에 현저한 변화를 나타낸다.

피뢰기의 열화를 진단하는 방법으로 가장 널리 이용하는 전체 누설전류의 크기를 비교하는 것은 실효값 또는 최대값이 증가하는 경향을 비교하는 것으로, 변동의 범위가 크기 때문에 정확한 진단이 어려웠다. 그러나 제안한 전체 누설전류의 파고분포를 이용한 피뢰기의 열화진단은 미소한 열화진전에서도 파고분포의 현저한 차이를 확인할 수 있으므로 측정이 간편하고 열화진전 정도를 쉽게 판단할 수 있다.

4.1.2 저항분 누설전류 분석

저항분 누설전류를 이용하는 방법 중에서 자기소거법은 슈미트트리거 회로와 저역통과필터 등을 이용하여 용량분 누설전류를 발생시켜 전체 누설전류와의 차동회로를 통하여 저항분 누설전류를 검출하는 방법이다. 그러나 전체 누설전류에 포함된 고조파가 크거나 선로에 연결된 기기들에 의하여 위상 지연이 발생한다거나, 슈미트 트리거 회로의 정도에 의하여 저항분 누설전류를 검출하지 못하거나 오차를 포함하는 단점이 있다. 따

라서 본 논문에서는 마이크로 프로세서를 사용하여 슈미트 트리거 회로와 용량분 누설전류를 발생하는 부분을 대신하는 알고리즘을 이용하는 새로운 열화진단기술을 제안하였다.

관통형 변류기를 이용하여 전체 누설전류를 측정하고 전체 누설전류의 최대값을 가지는 부분을 검출하고 그 부분을 최대값으로 가지는 60[Hz]의 순수 정현파를 생성하면 그 신호는 용량분 누설전류가 되며, 전체 누설전류와는 저항분 누설전류에 의한 위상차가 존재한다. 따라서 전체 누설전류와 용량분 누설전류(임의의 60[Hz])를 위상을 반전한 신호(소거파)와의 차동회로를 구성하면 저항분 누설전류만을 측정할 수 있으며, 그림 4.3에 그 관계를 나타내었다. 그림 4.3에서 전체 누설전류를 I_T , 저항분 누설전류를 I_R , 소거파는 용량분 누설전류와는 π 의 위상차가 있기 때문에 $-I_C$ 라고 표시하였다.

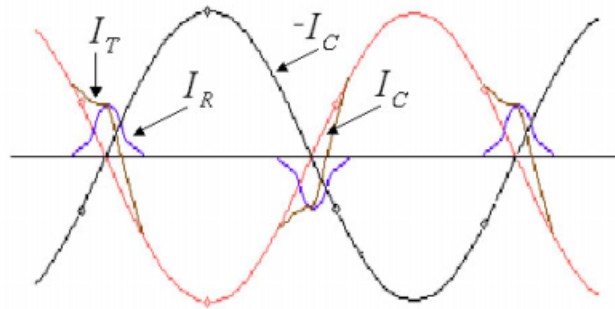


그림 4.3 저항분 누설전류의 측정원리

Fig. 4.3 Principle of resistive leakage current measurement

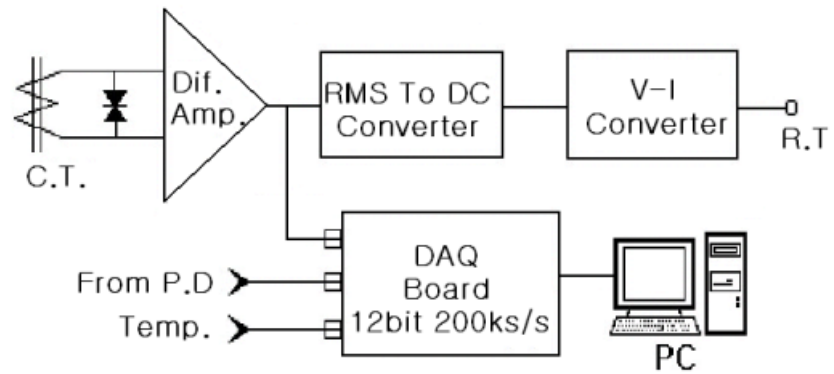
4.2 열화진단장치의 설계 및 제작

4.2.1 파고분포를 이용한 열화진단장치

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

열화진단장치에서 구성한 대역통과필터는 고역통과필터와 저역통과필터를 직렬로 연결하여 구성하였으며, 두 개의 필터는 Butterworth형의 필터로 차수는 각각 15로 설정하였다. 전체 누설전류에서 제 3조파인 180[Hz]의 신호를 검출하기 위한 필터의 저역 차단주파수는 175[Hz], 고역 차단주파수는 185[Hz]로 설정하였다. Butterworth형의 필터는 차단영역과 통과영역에서 리플(Ripple)이 없고, 차수가 높을수록 신호의 차단영역과 통과영역 사이의 출력이 변화하는 부분의 폭이 좁아지는 특성을 가지고 있다. 본 논문에서 설계한 전력용 피뢰기 열화진단 시스템은 그림 4.4, 4.5와 같이 고감도 변류기, 차동증폭기(가변이득 60[dB]), 신호변환회로, 입·출력장치(DAQ Board, 12bit, 200[ks/S], 8ch), 및 PC-base 분석 프로그램으로 구성되어 있다. 전력계통에는 고조파 포함되어 있으며, 이들에 의하여 누설전류가 변화하기 때문에 누설전류 측정장치의 주

파수 대역을 고려하여야 한다.



(a) 열화진단장치의 구성도



(b) 누설전류 검출장치

그림 4.4 열화진단장치의 구성

Fig. 4.4 Configuration of the deterioration diagnostic device

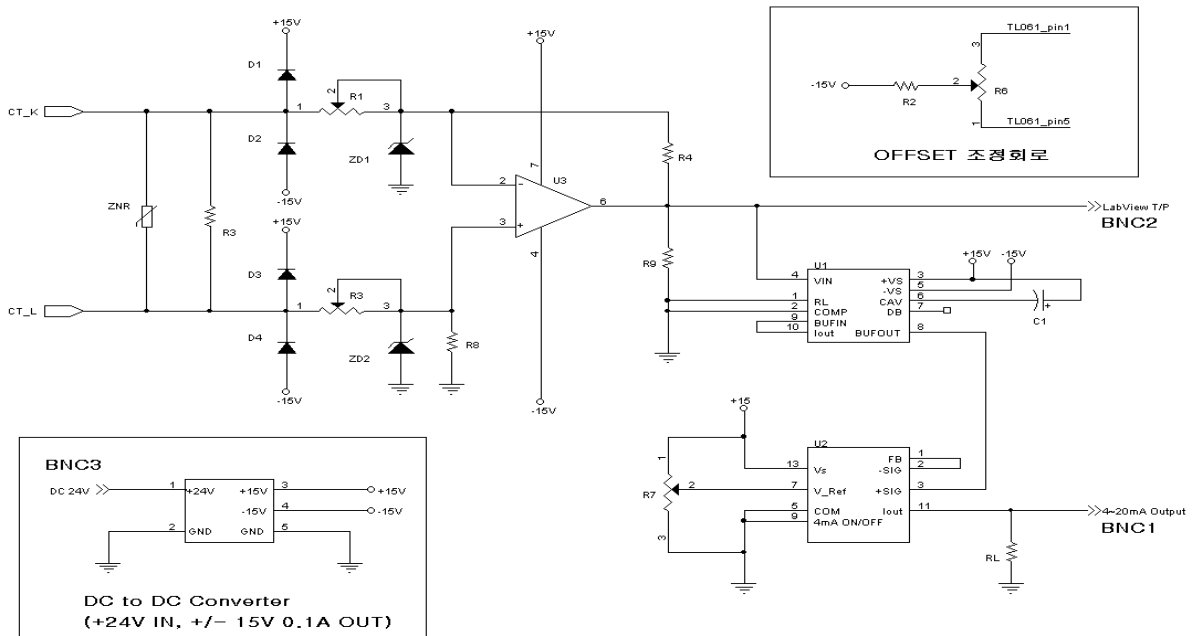
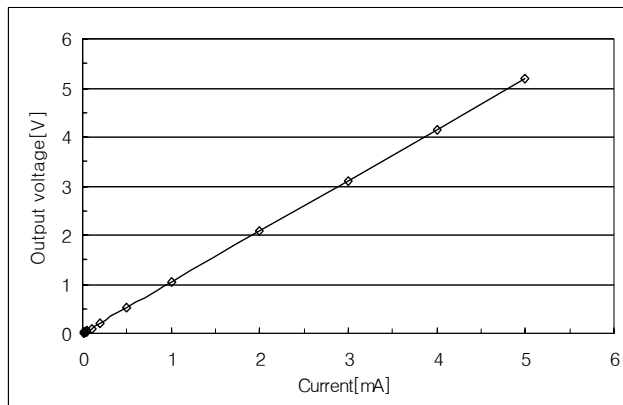


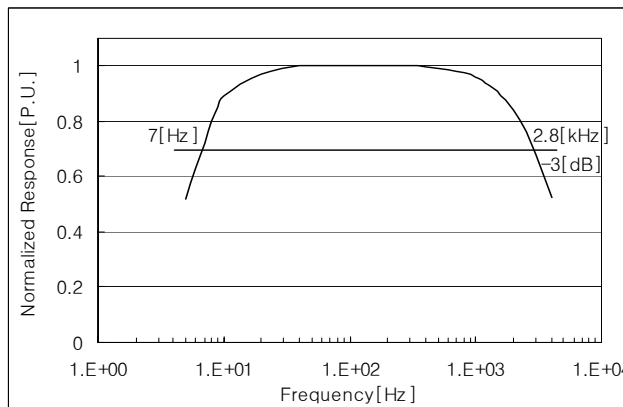
그림 4.5 누설전류 검출장치의 회로

Fig. 4.5 Circuit for the leakage current detection unit

신호발생기를 이용하여 입력 신호의 주파수를 5[Hz]~4[kHz]까지 가
변하면서 입력 신호에 대한 측정장치의 출력 전압의 선형성 및 주파수 응
답 특성을 분석하여 그림 4.6에 나타내었다.



(a) 입력전류-출력전압



(b) 주파수 응답

그림 4.6 누설전류 검출장치의 특성

Fig. 4.6 Characteristics of the leakage current detection unit

누설전류 측정장치는 10[μ A]~4[mA]까지 입·출력의 선형성이 유지되고 주파수 대역(-3[dB])은 7[Hz]~2.8[kHz]이었으며, 전체 누설전류의 제 7고조파 성분까지는 왜곡이나 감쇄없이 검출할 수 있다.

고감도 변류기를 이용하여 피뢰기의 접지측에 흐르는 누설전류를 검출하여 차동증폭기로 검출된 미소 누설전류를 증폭하고, 이 신호는 입·출력장치에 입력된다. 입·출력장치는 피뢰기에 인가되는 전압과 누설전류 및 주위온도를 동시에 측정할 수 있으며, 이들의 정보는 그림 4.7과 같이 처리된다.

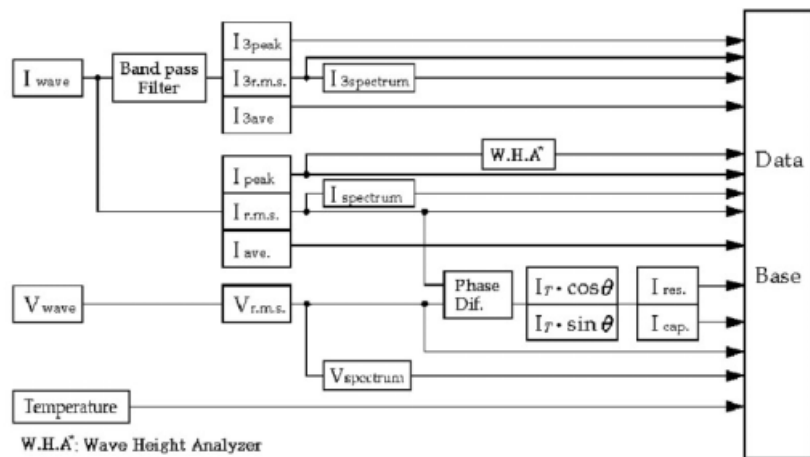


그림 4.7 신호처리 계통도

Fig. 4.7 Signal processing diagram

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

- 가. 전체 누설전류 및 제 3조파 누설전류의 주파수 스펙트럼, 실효값, 최대값, 평균값
- 나. 전원전압의 주파수 스펙트럼과 실효값
- 다. 전원전압과 전체 누설전류의 위상차
- 라. 전체 누설전류의 파고분포
- 마. 주위온도

누설전류 측정용 프로그램의 알고리즘은 그림 4.8에 나타내고 있으며, 파고분포 분석용 프로그램의 알고리즘은 그림 4.9에 나타내고 있다. 파고선별기는 전체 누설전류의 파형으로부터 파고값을 측정·검출하도록 연결하였으며, 파고는 60[sec] 동안 저장할 수 있도록 구성하고 5[μ A] 단위로 구분할 수 있게 설계하였다.

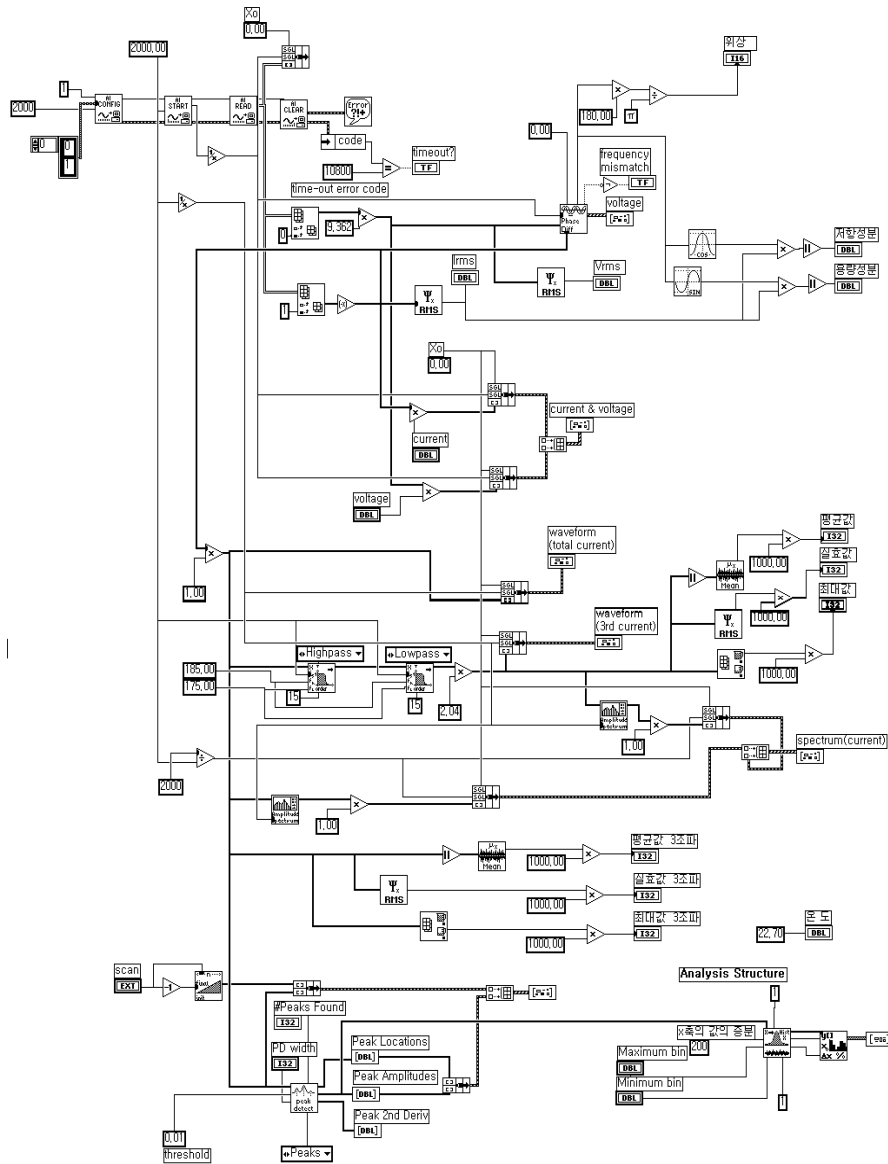


그림 4.8 누설전류 측정 알고리즘

Fig. 4.8 Algorithm for leakage current measurement

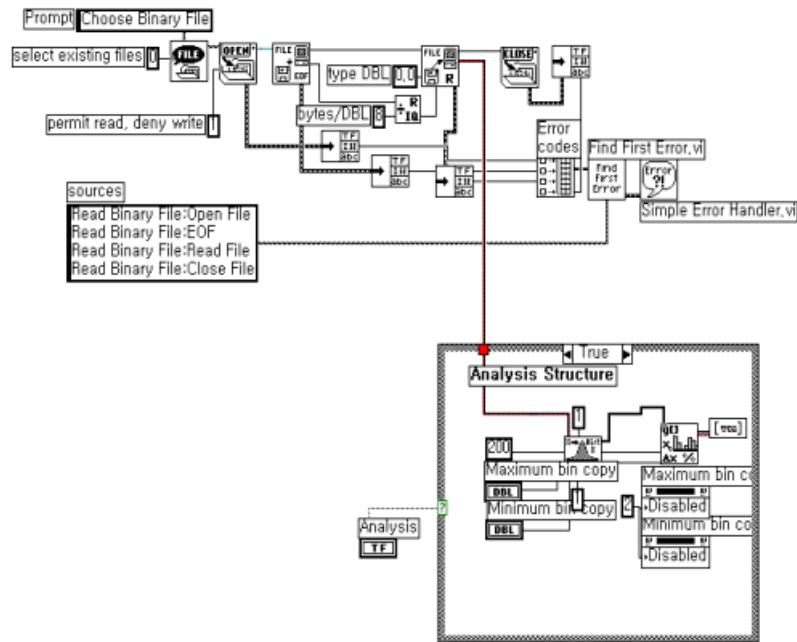


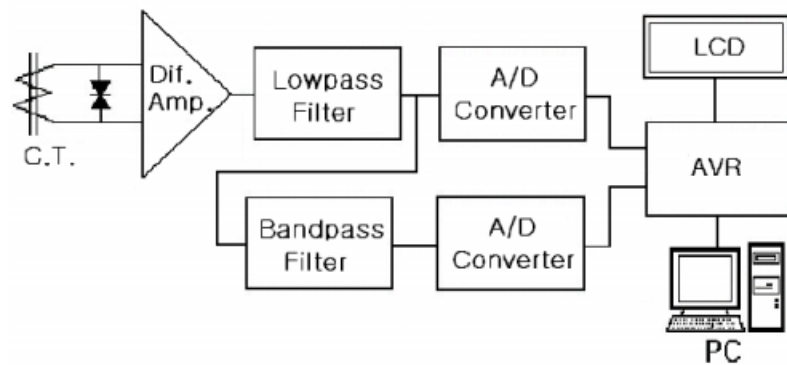
그림 4.9 파고분포 분석 알고리즘

Fig. 4.9 Analysis algorithm for the wave height distribution

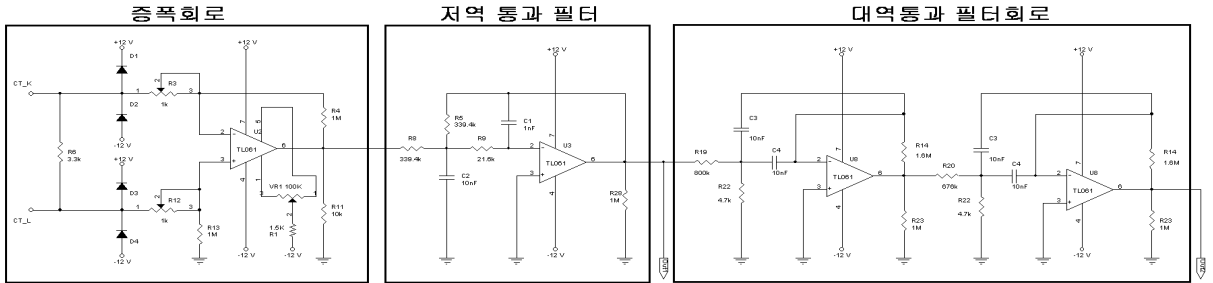
열화진단장치에 사용된 신호 입·출력장치는 200[ks/s]의 샘플링 속도를 가지고 입력으로 하나의 채널을 사용할 때 적용되며, 본 시스템은 입력으로 3개의 채널을 사용한다. 3개의 채널을 사용하는 경우의 샘플링 속도는 16.7[μ s]이며, 이 속도는 전력계통에서 발생하는 뇌충격전류를 측정하기는 어렵지만, 누설전류의 변화를 측정하기에는 문제가 없을 것으로 생각된다. 그리고 12[bit]의 분해능을 가지고 있으며, 입력으로는 $\pm 0.05[V] \sim \pm 10[V]$ 까지 측정할 수 있다. 전압은 분압기를 이용하여 배전선로의 정상운전전압을 측정하고, 누설전류는 관통형 변류기가 연결되어 있는 누설전류 측정장치를 사용하여 측정하였다.

4.2.2 저항분 누설전류를 이용한 열화진단시스템

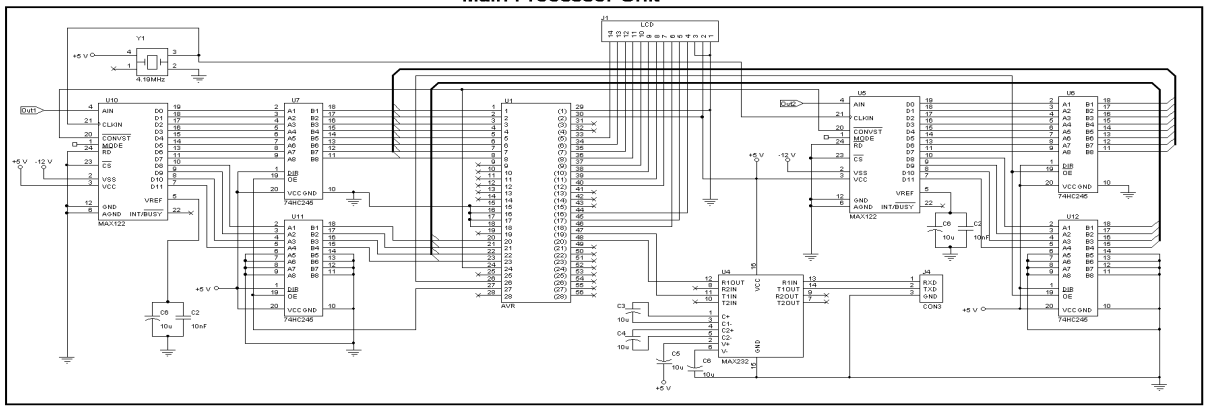
저항분 누설전류에 의한 열화진단시스템은 누설전류의 파고분포를 이용하는 진단장치에서 구성된 회로들을 사용하여 관통형 변류기, 증폭회로 및 필터와 A/D 컨버터로 구성된 신호입력부, 신호처리를 담당하는 마이크로프로세서부, PC와 데이터를 전달하는 데이터 통신부와 LCD 표시부 및 데이터저장 및 프로그램을 전송하는 PC로 구성하였다. 입력신호로는 전체 누설전류만을 사용하여 전압신호가 필요하지 않으며, 그림 4.10에는 본 시스템의 구성과 회로, 사진을 나타내었다.



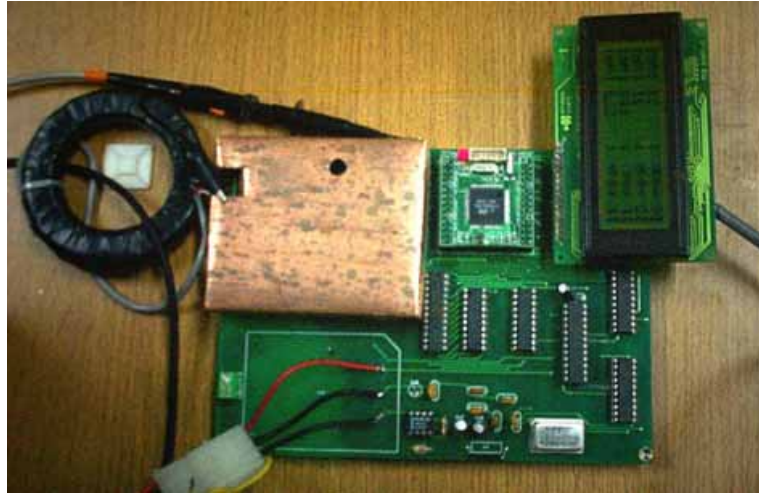
(a) 구성



Main Processor Unit



(b) 회로



(c) 사진

그림 4.10 저항분 누설전류에 의한 열화진단시스템

Fig. 4.10 Deterioration diagnostic system by resistive leakage current

소거파를 만드는 기준을 자기소거법과는 다르게 전체 누설전류에서 최대값을 가지는 시점으로 변경하였으며, 이것은 0과 만나는 지점(영점)을 선정하는 자기소거법의 경우에서 저항분에 의해 발생한 위상지연을 고려해야 하지만 최대값을 가지는 시점을 선택하면 위상지연을 고려하지 않아도 된다. 최대값을 가지는 시점에서 $\pm\pi/2$ 의 시점이 바로 용량분 누설전류에서의 0과의 교점이 되기 때문이다. 최대값을 가지는 시점을 기준으로 최대값을 검출하고 그 크기와 같고 위상이 π 만큼 차이나는 임의의 소거파를 만들어 전체 누설전류와 소거파의 합을 구하면 저항분 누설전류가 된다. 자기소거법에 의한 열화진단기술에서는 전체 누설전류에서 영점에 있어서 슈미트 트리거 회로 등의 하드웨어 장치를 이용하여 소거파를 받

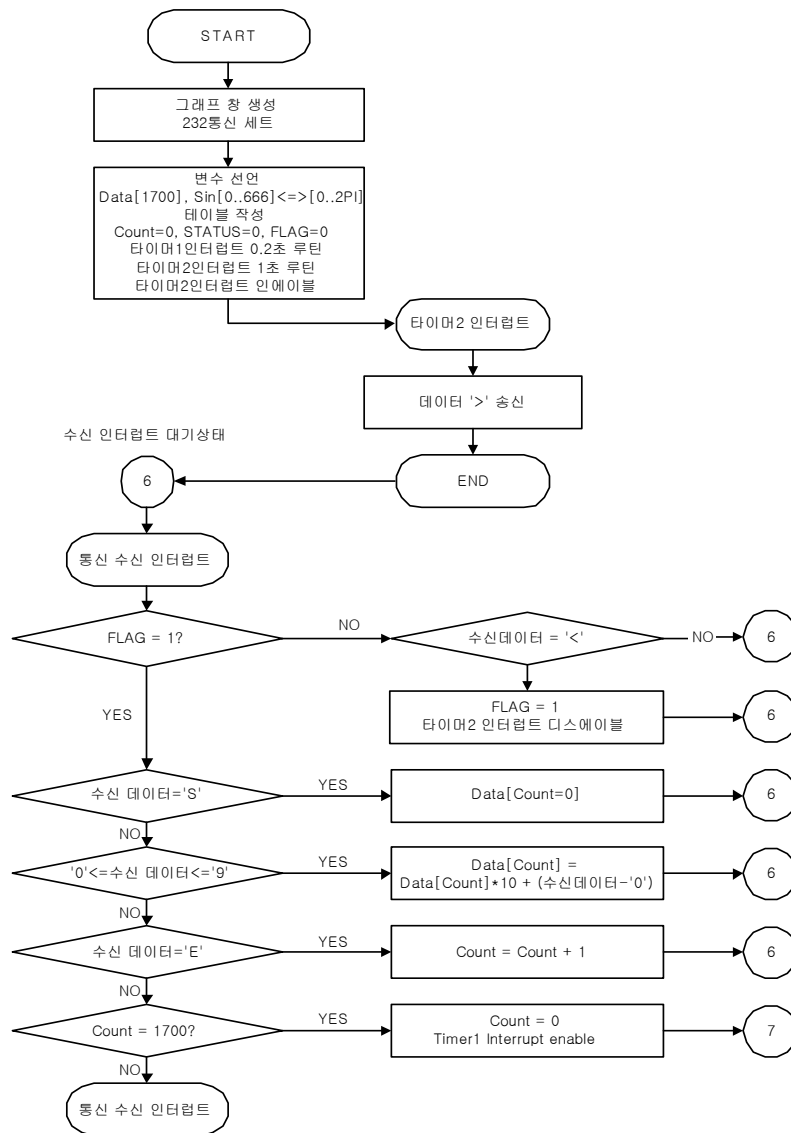
생하지만 이 방법은 마이크로프로세서를 이용하여 소거파를 발생하였다.

신호검출부는 누설전류의 파고분포에 의한 열화진단장치와 같이 운전 전압에서 피뢰기의 접지측을 전력계통에서 분리하지 않고 누설전류를 검출할 수 있도록 고감도의 관통형 변류기를 사용하였다. 미소한 누설전류를 증폭할 수 있도록 이득 60[dB]의 차동증폭기와 전체 누설전류에 포함되어 있는 고조파를 제거하기 위하여 차단주파수가 460[kHz]인 저역통과 필터 및 제 3조파 누설전류를 측정하기 위한 중심주파수가 180[Hz]인 대역통과필터를 설계·제작하였다.

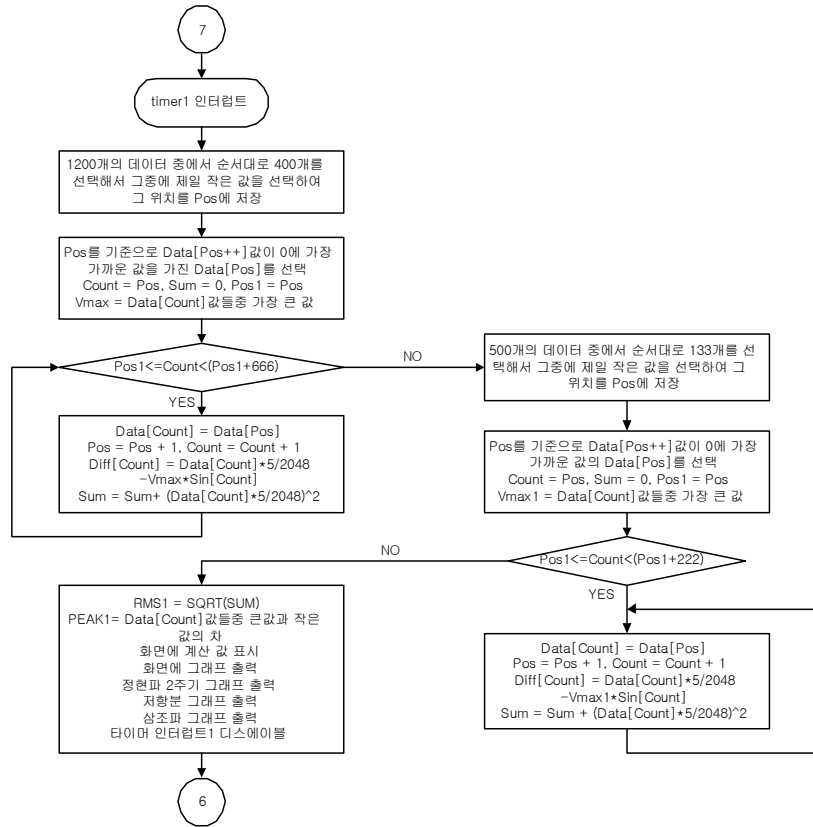
마이크로프로세서에는 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류를 입력할 수 있도록 A/D 변환기(Max122)를 연결하였으며, 데이터는 20[ks/s]의 속도로 받아들인다. 전체 누설전류는 소거파를 만들기 위하여 최대값을 갖는 시점과 그 시점에서의 크기를 알아야할 필요가 있다. 검출된 전체 누설전류는 그림 2.5에서와 같이 최대값의 위치는 저항분 누설전류가 용량분 누설전류보다 커지지 않는 이상 변하지 않지만, Zero-Crossing되는 지점은 저항분 누설전류 때문에 변하고 전원전압과의 위상차도 $\pi/2$ 보다 작게된다. 소거파는 전체 누설전류의 최대값을 갖는 지점보다 $\pi/2$ 만큼 빠른 지점부터 $\pi/2$ 만큼 느린 지점까지의 구간이 용량분 누설전류만을 나타내는 구간이며, 소거파의 크기는 전체 누설전류의 최대값과 같아야 한다. 이 부분을 하드웨어적인 검출장치(슈미트 트리거 회로, 필터, 이득조절장치 등)를 대신하는 알고리즘으로 구성하였다. 마이크로프로세서는 소거파를 생성하는 알고리즘 외에도 실효값을 계산하며 LCD를 통하여 누설전류를 나타내도록 C-언어를 이용하여 프로그램을 구성하였다. 또한 개인용 컴퓨터와 연결하여 A/D 변환기에서 입력된 값을 데이터 요청 신호에 의해서 전송하도록 구성하였으며, 개인용 컴퓨터에서는 데이터를 파형으로 표현하기 위해서 Delphi를 이용하여 RS-232통신을 할 수 있게 구성하였

다. 따라서 저항분 누설전류에 의한 진단시스템에는 2가지 프로그래밍 언어를 이용하여 그림 4.11에 나타낸 순서도에 따라 구성하였다.

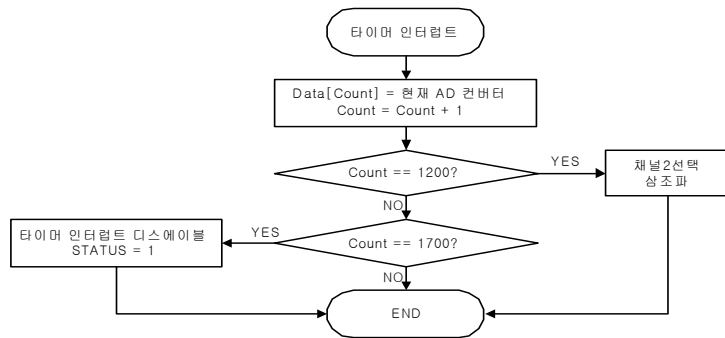
마이크로프로세서를 초기화하고 일정한 개수의 데이터를 받으며, 전체 누설전류는 저장된 데이터에서 최대값을 확인하고 그 최대값의 이전의 0에 가장 가까운 데이터에서 두 주기의 데이터를 가져오고, 최대값과 그 값을 갖는 시점을 중심으로 $\pm \pi/2$ 되는 지점에서 반전된 60[Hz]의 정현파를 생성하고 전체 누설전류와의 합을 계산하고 파형을 표시한다. 계산된 값은 저항분 누설전류의 값이 되고, 제 3조파 일정한 개수의 데이터를 받아 0에 가까운 값을 데이터에서부터 두 주기를 나타낸다. 실효값의 계산에는 간단한 직사각형 적분법을 적용하고, 오차를 줄이기 위하여 2주기의 값을 평균으로 계산하여 나타내었다^[79].



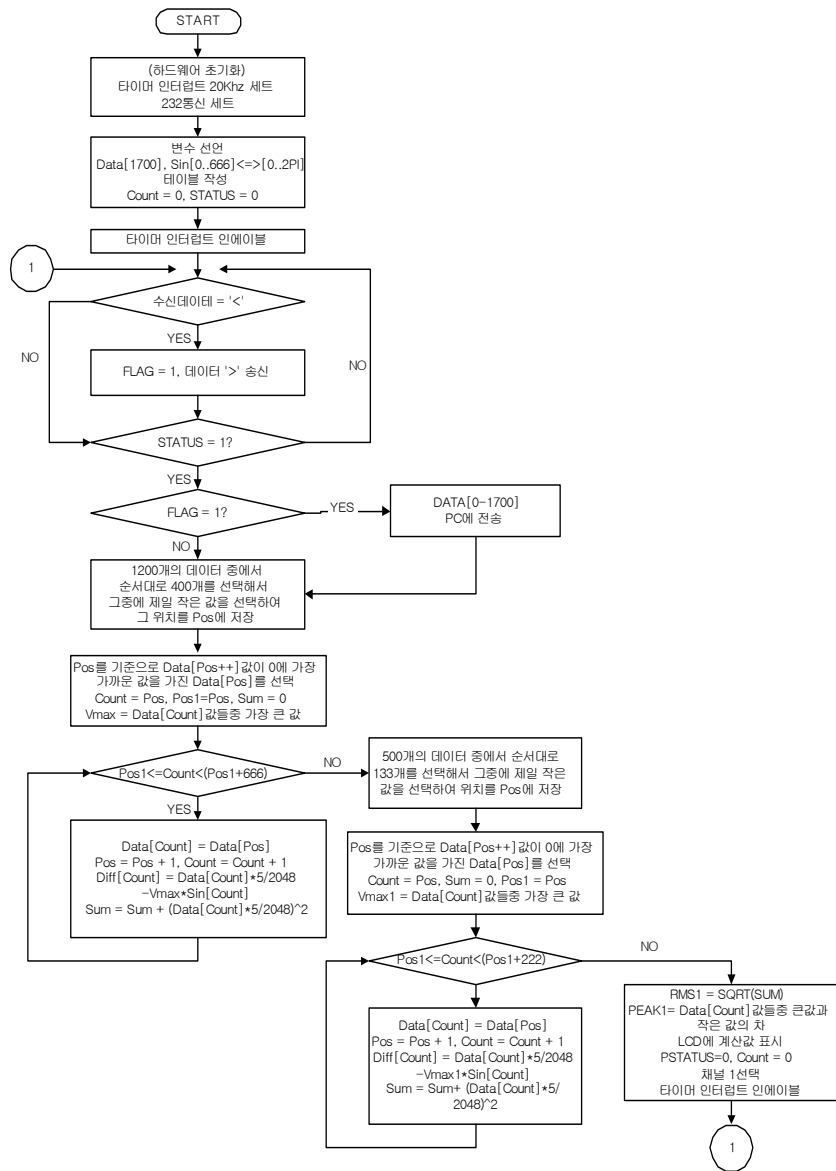
(a) 데이터 요청 알고리즘



(b) PC용 계산 알고리즘



(c) 타이머 인터럽트 알고리즘



(d) Unit용 계산 알고리즘

그림 4.11 저항분 누설전류의 분석 알고리즘

Fig. 4.11 Algorithm for analyzing the resistive leakage current

마이크로프로세서에서는 앞에서 설명한 알고리즘으로 소거파를 생성시켜, 전체 누설전류에서 제거하여 저항분 누설전류만을 나타내는 연산과정을 수행하여, LCD 표시부에 저항분 누설전류의 최대값을 표시하였다. 또한 LCD 표시부에는 전체 누설전류의 최대값과 실효값, 제 3조파 누설전류의 최대값을 나타내도록 구성하였다. 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류는 A/D 변환기(분해능 12[bit], 변환시간 2.6[μ s]) 2개를 이용하여 검출하며 마이크로프로세서에 데이터를 전송하며, 마이크로프로세서의 사양은 다음과 같다.

표 4.1 마이크로프로세서의 사양

Table 4.1 Specification of the microprocessor

마이크로프로세서의 사양
<ul style="list-style-type: none"> - ATMEL사의 ATMEGA103L - 128[KByte]의 플래시 롬 - 4[KByte]의 EEPROM - 4[KByte]의 SRAM - 1개의 직렬포트 - 1개의 ISP포트 - 48개의 입·출력 포트 - 4MIPS의 명령 수행(4[MHz]Clock 사용시)

마이크로프로세서에서는 RS-232C 통신모듈을 이용하여 데이터를 PC로 전송하고, PC에서는 각각의 누설전류를 화면에 표시하여 누설전류의 파형을 관측할 수 있게 구성하였으며, 마이크로프로세서를 제어하는 프로그램은 PC에서 구성하여 PC의 프린터포트를 통하여 프로그램을 전송 받

을 수 있게 구성하였다. PC에서 표시되는 전체 프로그램의 화면에는 그림 4.12와 같이 전체 누설전류, 저항분 누설전류 및 제 3조파 누설전류의 파형과 각각의 크기를 나타내었다. y축은 누설전류의 크기, x축에는 위상(전체 누설전류)과 데이터 개수(제 3조파 누설전류)로 표시하였으며, y축은 누설전류의 크기에 따라 변경 가능한 형태로 구성하였다.

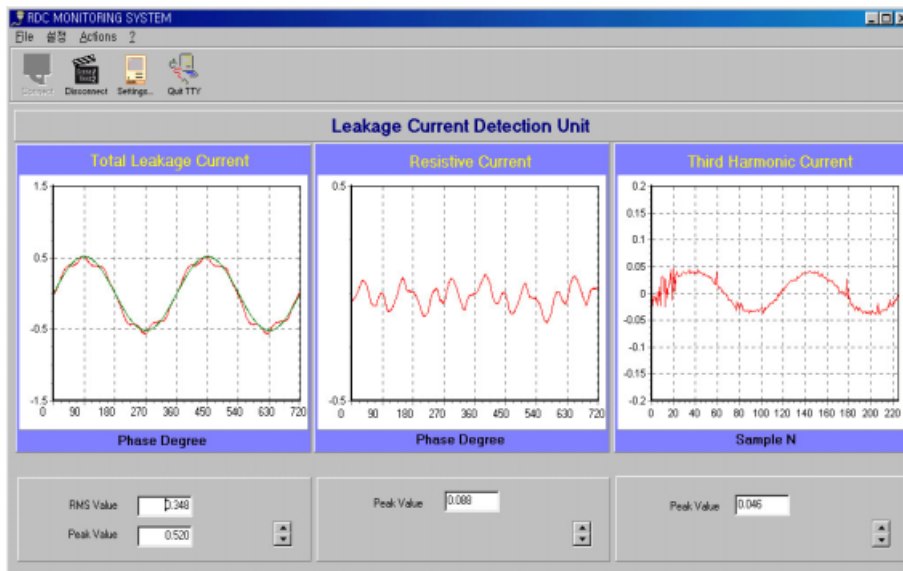


그림 4.12 출력 화면 예

Fig. 4.12 Example of the output display

제 5 장 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 뇌충격전류 발생장치를 설계하여 단일 및 다중 뇌충격 전류의 인가에 의한 가속열화실험으로부터 피뢰기의 열화진전에 따른 전기적 특성 변화와 ZnO 소자의 미세구조 변화를 분석하였다.

실험결과로부터 누설전류의 파고분포와 저항분 누설전류에 의한 열화 진단기술과 장치를 제안하였다. 성능평가를 위하여 ZnO 피뢰기 소자, 배전용 피뢰기 및 GIS용 피뢰설비에 적용한 결과 미소한 열화진전도 판단할 수 있는 충분한 성능을 확인하였다.

또한 누설전류에 의한 열화진단기술에 있어서 전원 전압에 포함된 고조파에 의해 누설전류의 크기가 변화하여 오차를 발생시키므로 이에 대한 영향을 고찰하였다.

5.1 가속열화 실험

5.1.1 기본특성 실험

본 실험에 적용한 ZnO 소자의 정격전압은 6[kV]이며, 여기에 상응하는 배전계통의 운전전압은 4.4[kV]이다. 따라서 IEC 규격에 의한 누설전류의 측정은 ZnO 소자의 정격전압에 대해 40[%], 60[%], 80[%], 100 [%]인 2.4[kV], 3.6[kV], 4.8[kV], 6[kV]와 정상운전상태 전압인 4.4[kV]에서 측정하였다. 전기적 특성이 동일한 A사와 B사의 ZnO 소자에 대하여 각각의 교류측정전압에서 ZnO 소자에 흐르는 전체 누설전류의 최대값과 실효값을 그림 5.1에 나타내었다. 인가전압이 증가함에 따라 누설전류도 함께 증가함을 알 수 있으며, 신품 ZnO 소자는 정상운전전압에

서 전체 누설전류의 최대값은 165~175[μ A]이었으며, 실효값은 150~155[μ A]정도로 나타났다. 누설전류는 인가전압의 증가에 따라 실효값의 증가보다 최대값이 현저하게 증가하며, 특히 인가 전압의 증가는 ZnO 소자내의 전도기구에서 전위장벽을 통과하는 전자의 양을 증가시키고 그 결과 저항분 누설전류의 증가에 의하여 전체 누설전류가 증가하는 것으로 생각된다.

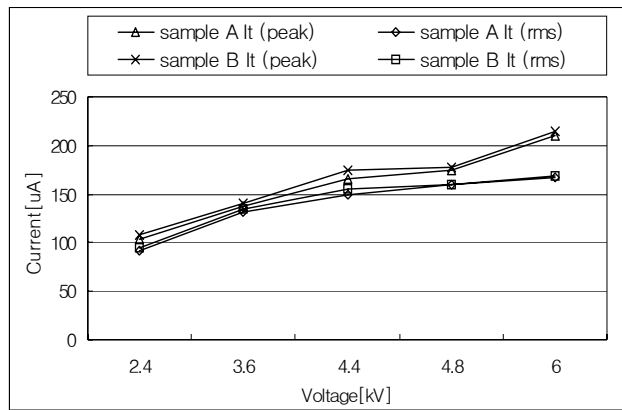


그림 5.1 교류전압에서 누설전류

Fig. 5.1 Leakage current in A.C. voltage

그림 5.2는 직류전압에서의 누설전류 특성을 나타낸 것으로 교류 실효값 정격전압을 최대값으로 환산된 직류전압에서 평가하였다. 이때의 누설전류는 상용주파수 교류전압을 인가하였을 때의 누설전류보다 대단히 적은 값으로 나타나며 그 이유는 ZnO 소자의 용량성분 전류는 흐르지 않고 누설저항에 의한 값만 나타나기 때문이다.

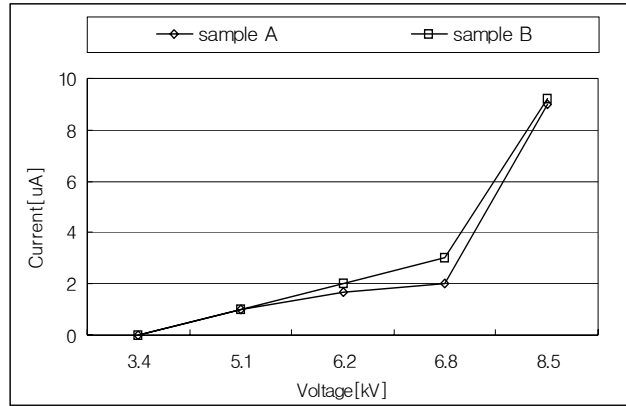


그림 5.2 직류전압에서 누설전류

Fig. 5.2 Leakage current in D.C. voltage

ZnO 소자는 배전선로의 운전전압이 가해진 상태에서도 계절에 따라 온도가 변화하므로, ZnO 소자의 온도변화에 대한 누설전류를 조사하였다. ZnO 소자를 가열장치 내에 설치하고 4.4[kV]의 상용주파수 교류전압을 인가한 다음, 설정온도 20[°C]부터 120[°C]까지 측정하였으며 각 온도마다 5분간 유지한 후 측정된 결과를 그림 5.3에 나타내었고 온도 증가에 따라 전체 누설전류의 최대값과 실효값이 증가하는 것을 알 수 있었다. 주위 온도의 증가는 ZnO 소자의 온도를 증가시키며 소자 내부의 열적 여기에 의한 전자들의 발생을 증가시키며 그 결과 저항분 누설전류의 증가로 나타나는 것으로 이해할 수 있다.

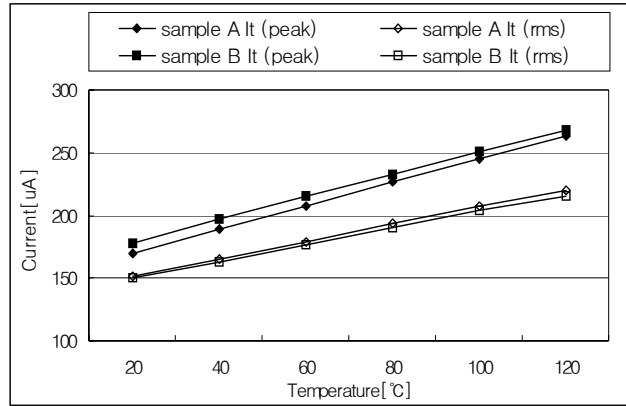


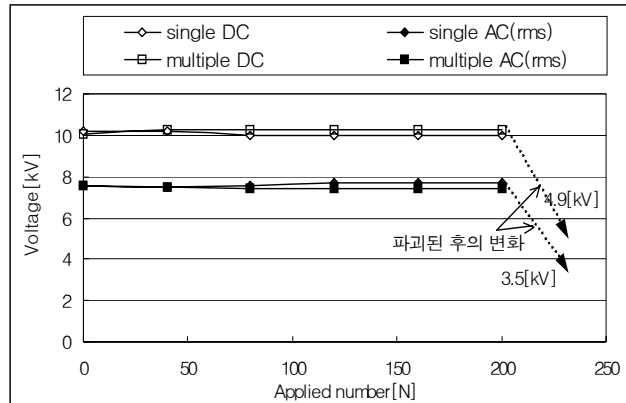
그림 5.3 주위온도에 따른 누설전류

Fig. 5.3 Leakage current as a function of ambient temperature

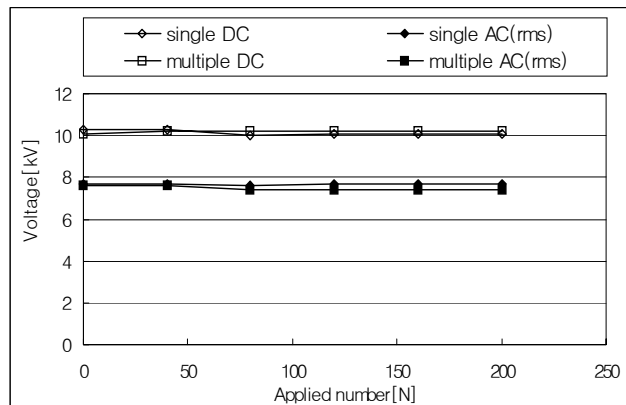
5.1.2 뇌충격전류 실험

전기적 특성이 동일한 A사와 B사의 ZnO 소자에 단일 뇌충격전류와 다중 뇌충격전류로 동일한 에너지를 인가한 후, 정상운전전압(4.4[kV])에서의 전체 누설전류 변화와 동작개시전압을 비교하였다. ZnO 소자에 대한 기본특성 실험에 있어서 단일 및 다중 뇌충격전압·전류를 총 200회(다중의 경우 50회) 인가한 후 AC, DC에 대한 동작개시전압은 그림 5.4 (a), (b)와 같이 A, B사 모두 인가전과 비교해서 변화가 거의 없었지만, A사의 경우 파괴될 때까지 뇌충격전류를 인가하여 동작개시전압을 측정할 결과 파괴된 이후에는 급격히 감소하였다. 동작개시전압은 이전의 여러 가지 실험을 통해서도 ZnO 소자의 심각한 국부적인 손상이나 파괴, 또는 뇌충격전류에 의한 핀-홀(pin-hole) 생성 등의 경우에는 그림 5.4 (a)의 점선과 같이 DC 전압은 4.88[kV], AC는 3.5[kV] 이하까지 하락하지만, ZnO 소자가 어느 정도 열화가 진행되어도 그 값의 변화는 거의 없었다. 그러므로 동작개시전압은 ZnO 소자의 열화가 현저하게 진행되었거

나 파괴된 경우에 급격하게 변화하기 때문에, 열화진단기술에 있어서 진단항목으로 사용하기에는 부적합할 것으로 생각된다.



(a) A 사



(b) B 사

그림 5.4 인가횟수에 따른 동작개시전압

Fig. 5.4 Reference voltages as a function of applied numbers

뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 파괴에 대해 고찰해 보면 전류의 파고 값이 크고 주기가 짧은 뇌충격전류가 ZnO 소자에 인가될 때 국부적인 급가열로 인하여 소자의 기능은 저하되고, 국부적인 열적 팽창에 의한 기계적 스트레스는 구조적 손상을 발생시키게 된다. 또한 뇌충격전류가 인가될 때, 소자의 도전율은 온도에 대하여 거의 독립적이지만, 상용주파수 정상운전전압이 인가된 상태인 저전계 영역에서의 누설전류는 온도에 대하여 강한 의존성을 나타내며 저전계 영역에서 누설전류가 크게 증가하면 일정 시간내에 소자는 열폭주에 도달하여 파괴된다. 그림 5.5는 뇌충격전류에 의하여 파괴되었을 때의 제한전압과 방전전류의 파형을 나타낸 것으로, 뇌충격전류가 흐르기 시작하여 약 6[μ s]에서 소자가 파괴됨을 알 수 있으며, 뇌충격전류를 인가할 때마다 소자 양단의 제한전압과 소자를 흐르는 방전전류를 관찰함으로써 소자의 상태를 판별할 수 있다.

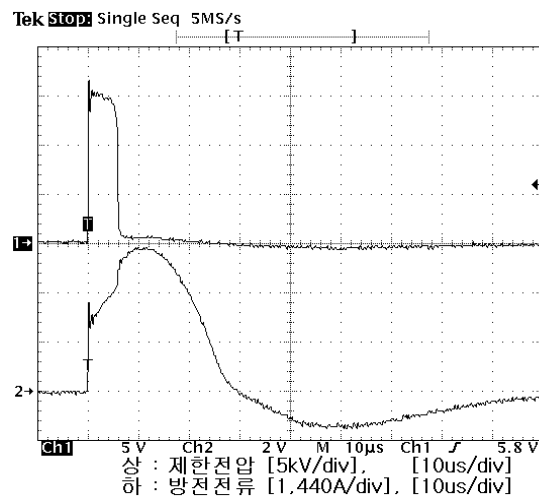


그림 5.5 ZnO 소자가 파괴될 때의 제한전압과 방전전류 파형

Fig. 5.5 Typical waveforms of residual voltage and discharge current at the moment of ZnO block damage

뇌충격전류에 대한 보호동작으로 소자가 국부적으로 가열되어 있는 상태에서는 뇌충격전류가 소멸한 뒤 소자 양단에 정상운전전압이 인가되어 있는 저전계 영역에 있더라도, 이 영역에서의 누설전류는 강한 온도 의존성으로 인한 급격한 증가상태로서 짧은 시간내에 열폭주에 도달한다. 따라서 소자의 뇌충격전류에 의한 온도변화를 비교할 필요가 있다.

그림 5.6은 ZnO 소자에 뇌충격전류를 인가하면서 소자의 표면온도를 측정하는 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 뇌충격전류의 인가에 의해 소자 표면의 온도는 급격히 상승하며 전체적인 추이는 점선과 같이 증가하는 경향을 보였다. 매 40회(단일)의 뇌충격전류를 인가한 후 소자를 주위 온도까지 충분히 냉각을 시켰기 때문에 군단위의 초기 온도는 최초 뇌충격전류 인가한 경우와 마찬가지로 주위온도(27[°C])를 나타낸다.

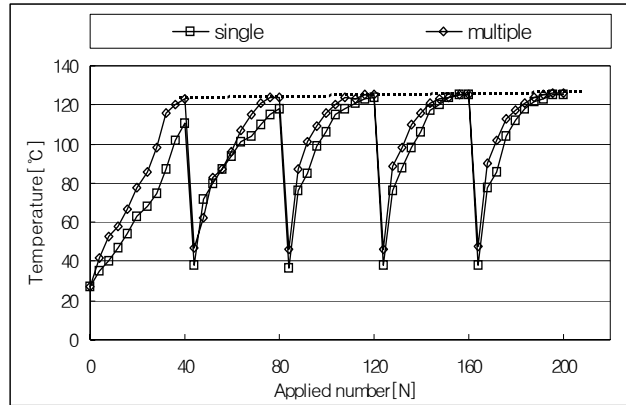


그림 5.6 인가횟수에 따른 ZnO 소자의 표면온도

Fig. 5.6 Surface temperature of ZnO blocks as a function of applied numbers

또한 ZnO 소자에 단일 뇌충격전류를 인가한 경우보다는 다중 뇌충격 전류를 인가하였을 때 소자의 표면온도가 더욱 급격하게 상승하는 것을 나타내었으며, 최종온도는 124 ~ 127[°C] 범위에서 더 이상 상승하지 않았다. 이는 ZnO 소자의 열적 포화 상태를 나타내며 더 큰 뇌충격전류를 인가하지 않는 한 소자의 표면온도는 변화가 거의 없을 것으로 예상된다. 군단위로 단일 및 다중 뇌충격전류를 인가하고 정상운전전압(4.4[kV])이 ZnO 소자 양단에 인가되었을 때, 소자에 흐르는 누설전류의 파형으로부터 측정하였다.

전체 누설전류는 그림 5.7에 나타낸 바와 같이 대부분이 용량분 누설 전류이므로 인가전압보다 위상이 85°정도 앞서는 것을 알 수 있으며 본 논문에서는 누설전류의 최대값과 실효값을 측정·분석하였다.

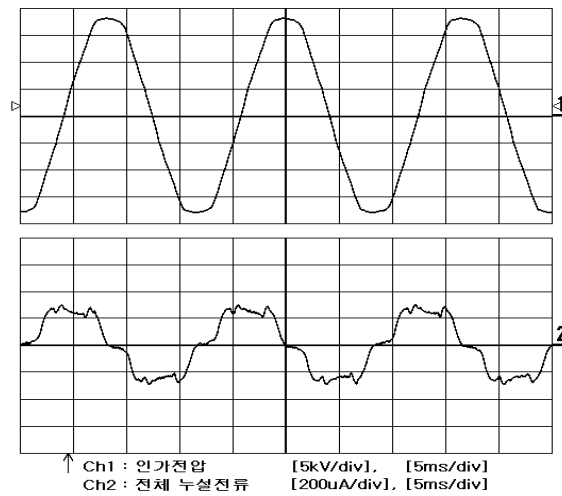
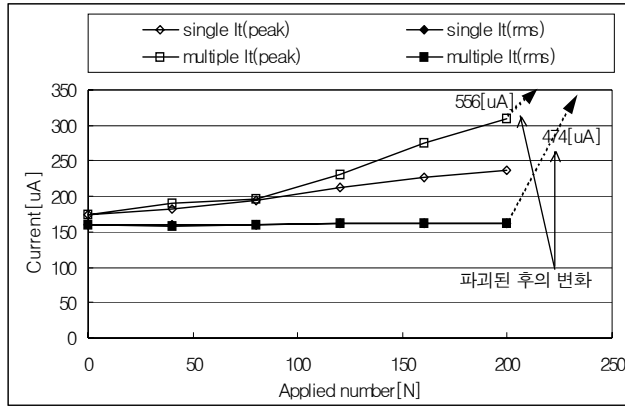


그림 5.7 누설전류 파형

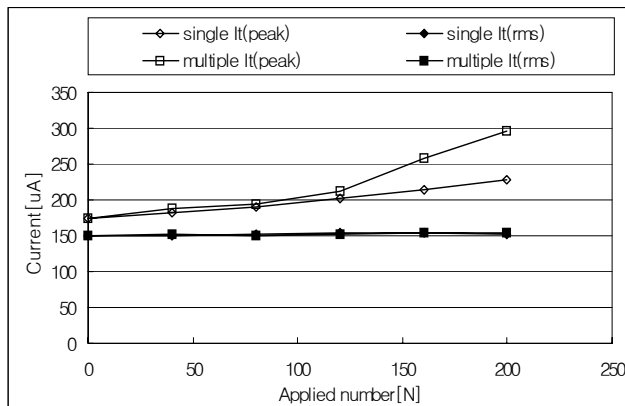
Fig. 5.7 Leakage current waveform

그림 5.8 (a)와 (b)는 A사와 B사의 ZnO 소자를 대상으로 단일 뇌충격 전류를 1분 간격으로 1회씩 200회를 인가한 경우와 4회의 다중 뇌충격 전류를 50회(단일과 비교하면 200회로 동일한 에너지량이 인가된 경우) 인가하였을 때, 누설전류를 측정하여 나타낸 것이다. 전기적 정격이 같은 두 회사의 ZnO 소자에 단일 및 다중 뇌충격전류를 인가하고 누설전류의 변화를 측정한 결과, 전체 누설전류의 실효값은 변화가 거의 없었으나, 최대값은 A사, B사 모두 초기의 누설전류에 비해 200회의 뇌충격전류 인가시 단일 뇌충격전류 인가실험에서와 마찬가지로 다중 뇌충격전류 인가 방법에서도 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 ZnO 소자가 뇌충격전류에 의해 외부적으로 손상을 입거나 파괴가 일어나면 그림 5.8 (a)의 점선과 같이 실효값에서도 현저한 증가를 나타낸다.

전체 누설전류 실효값의 변화가 거의 관측되지 않는 원인은 ZnO 소자의 미세구조는 그림 2.10처럼 ZnO grain과 입계층이 직·병렬로 연결된 구조로써 grain의 크기와 입계층의 두께가 모두 동일한 것은 아니며 ZnO 소자에 뇌충격전류가 인가될 때, 입계층에 가해지는 전계의 세기도 다르기 때문이다. 즉 grain을 통해 흐르는 에너지량도 각기 다르기 때문에 전기적 스트레스는 소자 전체에 걸쳐 다르게 나타나며 일부 grain 또는 입계만 변형이 일어나게 된다. 열화가 진전되는 과정에서 직·병렬로 연결된 일부 grain과 입계층만이 변형되었다면 정상운전전압에서 입계층에 가해지는 전계가 어떤 입계값 이상일 때 비선형 특성을 나타내면서 최대값, 즉 누설전류의 파고값이 관측될 것이며, 실효값은 정상운전전압의 1/2주기(8.33[ms])에서는 큰 변화로 나타나지 않는다. 이러한 이유로 본 실험에서 전체 누설전류의 최대값만이 증가하고 실효값에는 인지할 만한 변화가 관측되지 않은 것으로 생각된다.



(a) A 사



(b) B 사

그림 5.8 인가횟수에 따른 ZnO 소자의 누설전류

Fig. 5.8 Leakage current of ZnO blocks as a function of applied numbers

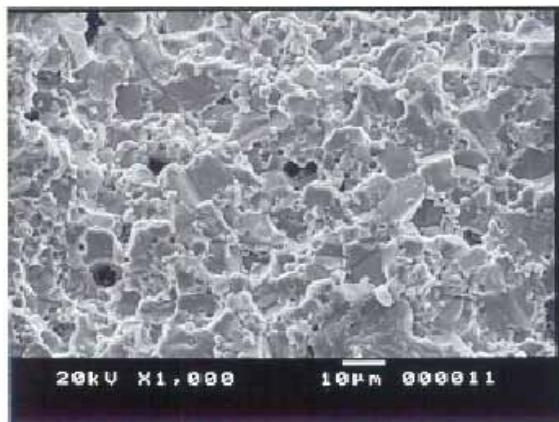
ZnO 소자에 단일 및 다중 뇌충격전류를 동일한 에너지로 인가하였지만, 다중 뇌충격전류를 인가한 경우에 더 빠른 누설전류의 변화를 나타내었다. 이것은 입계층 쇼트키장벽의 변형에 기인하는 것으로 동일한 소자

에 대해 높은 온도가 유지될 경우 열화가 가속화되며, 이로 인해 누설전류는 증가한다. 특히 다중 뇌충격전류 인가시는 충격전류에 의해 소자내의 ZnO grain은 국부적으로 가열된 상태에서 수 십[ms]이내에 계속되는 뇌충격전류의 인가로 입계층에 전계가 더욱 집중되고, 이에 따라 단일 뇌충격전류의 인가시보다 더 빠르게 열화가 진행되어 누설전류도 급격히 증가하는 것으로 생각된다.

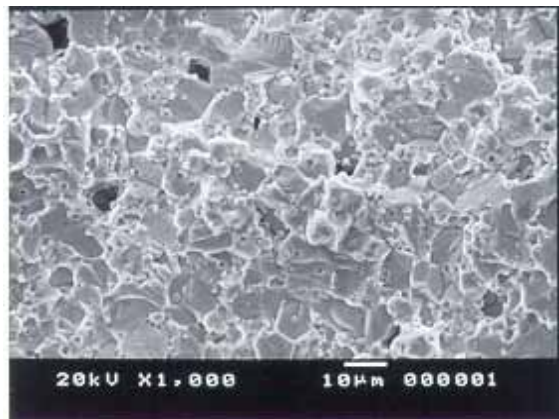
또한, 본 논문에서는 뇌충격전류 인가에 따른 ZnO 소자의 미세구조 변화를 분석하기 위하여 뇌충격전류를 단일 및 다중의 2가지 방법으로 200회 인가한 ZnO 소자를 기계적으로 파괴하여 얻은 시편에 대해 주사전자현미경(SEM)으로 관측하였다. 그리고 단일 및 다중 뇌충격전류를 인가한 ZnO 소자의 미세구조를 그림 5.9에 나타내었다. 신품의 미세구조는 일반적으로 ZnO grain의 크기가 10[μm] 정도로 균일하게 배열되어 있으나, 뇌충격전류로 인해 열화가 진전되면 입계층이 좁아지고 grain이 성장하게 된다.

그림 5.9 (a)와 (b)를 비교하면, 전체적으로 grain의 배열이 다소 불균일해지고 grain의 크기도 12 ~ 17[μm]정도로 성장한 것을 알 수 있다. 이것은 뇌충격전류의 흡수시 높은 전계와 열누적으로 인하여 입계층이 감소하고 ZnO grain이 성장한 것이다. 동일한 에너지량을 인가하였을 때 단일 뇌충격전류를 인가한 경우는 grain의 평균 직경이 12.7[μm]이지만, 다중 뇌충격전류를 인가의 경우에는 13.6[μm]로 grain의 크기가 조금 더 크게 성장한 것을 알 수 있었다. 또한 단일 및 다중 뇌충격전류에 의한 grain의 크기 변화를 비교하기 위하여 실제 뇌충격전류로 인해 파괴된 ZnO 소자의 미세구조를 그림 5.9 (c)에 나타내었다. 그림 5.9 (c)에 나타낸 ZnO 소자 grain의 평균 직경이 20[μm]이상이므로 단일 및 다중 뇌충격전류를 인가한 후에 측정된 미세구조에서보다 grain의 크기가 훨씬

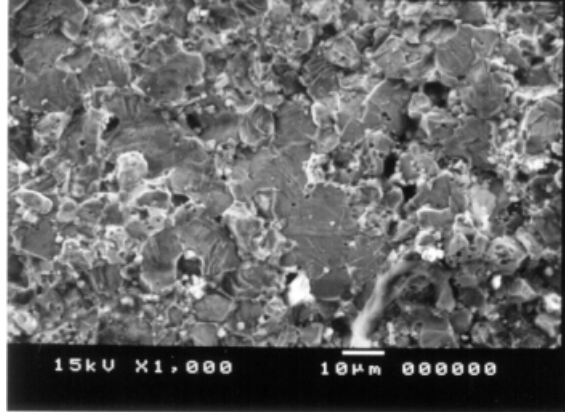
더 성장한 것을 알 수 있다. 이렇게 뇌충격전류에 의하여 ZnO grain이 성장하는 것은 입계층에 포함되어 있는 Bi_2O_3 등의 불순물 주위에 집중된 전기적 스트레스에 의하여 국부적인 용융·재소결 현상으로 입계층이 감소하고 ZnO grain이 성장된 것으로 생각된다.



(a) 단일 뇌충격전류 인가



(b) 다중 뇌충격전류 인가



(c) 파괴된 소자

그림 5.9 ZnO 소자의 미세구조

Fig. 5.9 Micro-structure of ZnO blocks

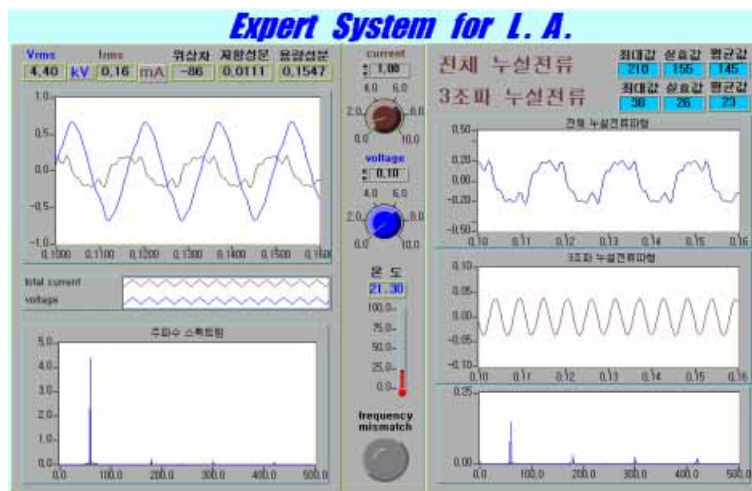
5.2 열화진단기술

5.2.1 누설전류의 파괴분포에 의한 열화진단

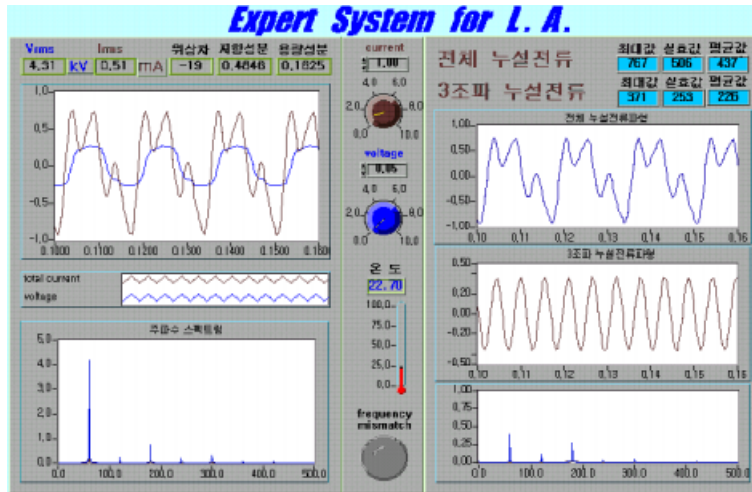
열화진단장치 시스템을 적용한 화면 구성은 온라인 상에서 실시간으로 누설전류와 전압 및 온도의 변화를 나타낼 수 있도록 구성하였으며, 전압과 누설전류 파형의 크기는 이득(0~10)을 조절하여 나타낼 수 있다. 전압 파형에 대한 누설전류 파형의 위상차를 나타내고, 이를 이용하여 전체 누설전류에서 저항분 누설전류와 용량분 누설전류를 분리하여 나타낸다. 화면의 오른쪽에는 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류에 대한 파형과 주파수 스펙트럼을 나타내도록 구성하였다.

그림 5.10은 6[kV], 5[kA] 정격의 ZnO 소자에 본 시스템을 적용하여 측정된 결과를 나타낸 것으로 온라인 상에서 실시간으로 ZnO 소자를 흐르는 누설전류 파형과 파괴분포를 나타내었다. 그림 5.10 (a)에서 11.1

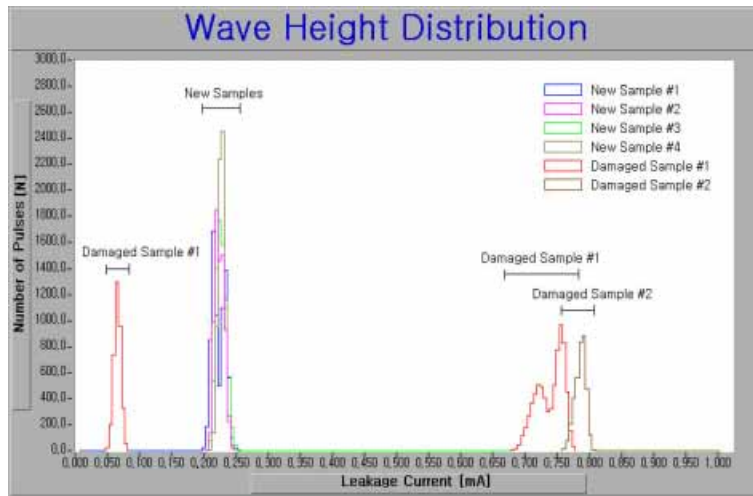
[μA]의 저항분 누설전류와 154.7[μA]의 용량분 누설전류를 나타내고 있다. 이 저항분 누설전류의 값은 전체 누설전류 크기에 비해 미소한 값으로 나타났으며, 전원 전압과의 위상차이도 90° 에 가까운 값을 나타내고 있다. 그러나 열화진전에 따라 위상의 차이와 크기의 차이는 현저하게 변화하며, 그림 5.10 (b)에서 확인할 수 있다. 그림 5.10 (b)는 핀-홀(pin-hole)이 발생한 소자를 측정 한 결과를 나타내었다. 4.31[kV]의 운전 전압에서 484.6[μA]의 저항분 누설전류와 162.5[μA]의 용량분 누설전류를 나타내고 있다. 누설전류 성분의 변화를 보면 신품 소자의 경우에는 저항분 누설전류는 용량분 누설전류의 10[%]보다 작은 값이며, 열화진전에 따라 점차 증가하여 핀-홀이나 소자 표면에 균열이 발생하는 치명적인 손상이 있는 경우에는 용량분 누설전류보다도 훨씬 큰 값을 가지게 된다. 또한 제 3조파 누설전류의 경우도 열화진전에 따라 초기의 값에 비하여 현저하게 증가하기 때문에 저항분 누설전류의 증가 경향과 유사한 특징을 나타내는 제 3조파 누설전류를 열화진단기술에서 이용할 수 있다.



(a) 누설전류 파형(신품소자)



(b) 누설전류 파형(손상된 소자)



(c) 전체 누설전류의 파고분포

그림 5.10 전체 누설전류 파형과 파고분포(ZnO 소자)

Fig. 5.10 Leakage current waveforms and wave height distributions of total leakage current(ZnO blocks)

그림 5.10 (c)는 ZnO 피뢰기 소자들(6[kV], 5[kA])의 정상운전전압에서 전체 누설전류의 파고분포를 비교하여 나타낸 것으로 x축은 파고값의 크기, y축은 파고의 개수를 나타낸 것이다. 실험에는 신품 소자 4개와 계속적으로 뇌충격전류를 인가하여 핀-홀이 발생한 2개의 시료를 대상으로 정상운전전압에서 전체 누설전류의 파고값을 1분 동안 측정된 것을 나타낸 것이다. 열화진전에 따라 파고값이 증가함은 물론 파고분포에 현저한 변화가 있음을 알 수 있다. 신품의 경우에는 약간의 차이는 있지만 파고의 중심은 225[μ A] 정도였으며, 200[μ A]에서 250[μ A]까지의 파고들이 분포하였다. 핀-홀이 발생한 소자의 경우 파고의 중심은 750[μ A]정도이고, 680[μ A]에서 800[μ A]까지의 파고들이 넓게 분포하였다. 또한, 50[μ A]에서 80[μ A]까지의 부분에서도 파고들이 나타나는데 이것은 핀-홀이 발생한 소자의 일부 grain 또는 입계만 변형이 발생하였기 때문에 변형이 발생하지 않은 균일한 부분의 파고가 나타난 것으로 생각된다.

피뢰기는 배전선로에 운전전압이 가해진 상태에서도 계절에 따라 온도가 변화하고, 특히 피뢰기의 보호동작횟수가 증가하게 되면 소자가 가열되어 온도가 상승하게 되므로 주위온도에 따른 누설전류특성을 조사하였다. ZnO 소자를 가열장치 내에 설치하고 4.4[kV]의 운전전압을 인가한 후 20[$^{\circ}$ C]에서 100[$^{\circ}$ C]까지 가열하여 설정온도에서 30분간 유지한 후 누설전류의 파고분포를 측정한 결과를 그림 5.11에 나타내었다. 온도가 상승함에 따라 ZnO 소자 내부에서 비선형 저항특성을 갖는 입계층의 저항이 감소하여 저항분 누설전류가 증가하며, 그에 대한 파고분포가 점차 오른쪽으로 이동하는 결과를 나타낸 것으로 생각된다.

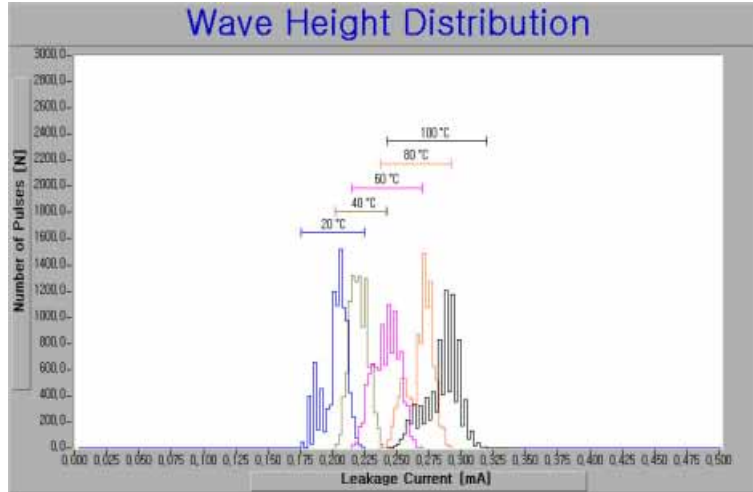
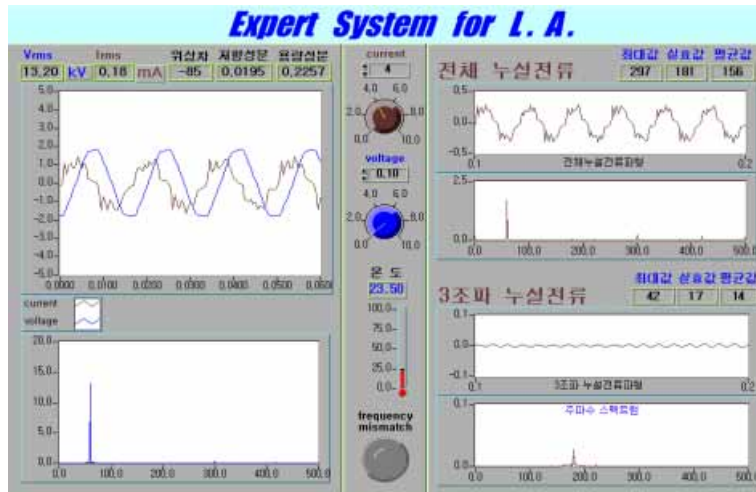


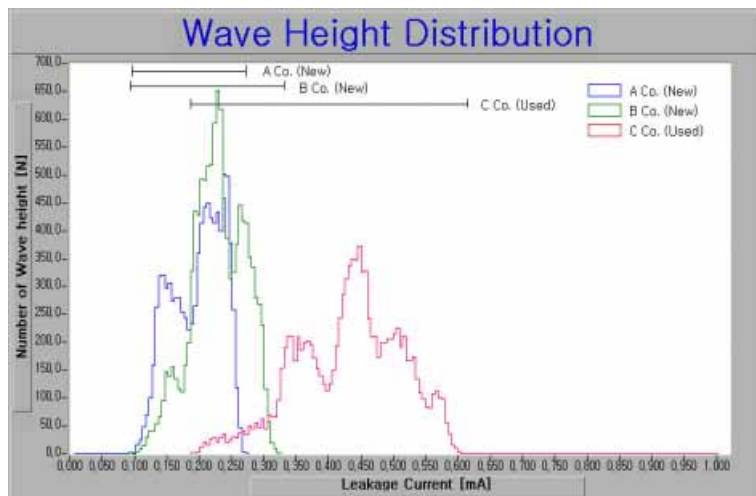
그림 5.11 주위온도에 따른 전체 누설전류의 파고분포

Fig. 5.11 Wave height distributions of total leakage current as a function of ambient temperature

그림 5.12는 18[kV]의 정격 전압을 갖는 전력용 피뢰기에 본 시스템을 적용하여 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그림 5.12 (a)에서는 19.5[μ A]의 저항분 누설전류와 180.2[μ A]의 용량분 누설전류를 나타내고 있다. 저항분 누설전류의 값은 전체 누설전류 크기의 10.8[%]에 해당하는 값으로, 전체 여러 연구 데이터에 의한 보고자료와 같이 전체 누설전류의 대부분은 용량분 누설전류의 값을 알 수 있다. 그림 5.16 (b)는 3가지 종류의 배전용 피뢰기(18[kV], 5[kA])를 대상으로 정상운전전압에서 전체 누설전류의 파고값을 1분 동안 측정된 것을 나타낸 것이다. A사 및 B사는 피뢰기 신품을, C사는 배전선로에서 1년 6개월 정도 사용한 피뢰기를 대상으로 측정된 것이다. C사의 제품은 A·B사와는 많은 차이를 가지고 있으며, 파고의 중심은 400[μ A]이고, 450[μ A] 주위의 파고들이 많고 200[μ A]에서 600[μ A]까지의 파고들이 넓게 분포하고 있다.



(a) 누설전류 파형



(b) 전체 누설전류의 파고분포

그림 5.12 전체 누설전류 파형과 파고분포(피뢰기)

Fig. 5.12 Leakage current waveform and its wave height distribution of total leakage current(lightning arresters)

ZnO 소자에서도 확인한 것처럼 열화진전에 따라 파괴값이 증가함은 물론 파괴분포에 현저한 변화가 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 ZnO 소자에 치명적인 손상이 없고 열화가 진전된 피뢰기에서의 전체 누설전류의 파괴분포는 C사의 경우처럼 초기 상태의 파괴분포가 점차적으로 오른쪽으로 파괴의 중심이 이동하고 파괴의 중심에서 상·하 폭의 변화는 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 핀-홀과 같은 치명적인 열화와 ZnO 소자 전반적인 열화의 경우를 전체 누설전류의 파괴분포를 이용하여 구분할 수 있을 것으로 생각된다.

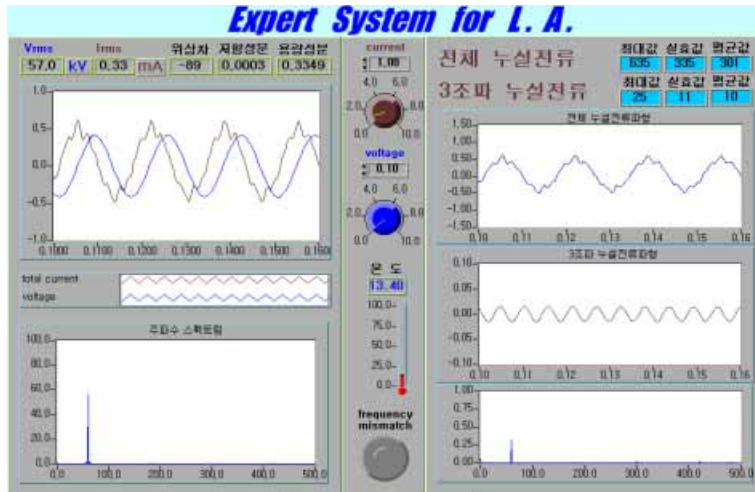
그림 5.13은 변전용으로 사용되는 GIS의 피뢰설비의 사진으로 연구개발용으로 사용하고 있기 때문에 다른 설비들과는 연결되어 있지 않다.



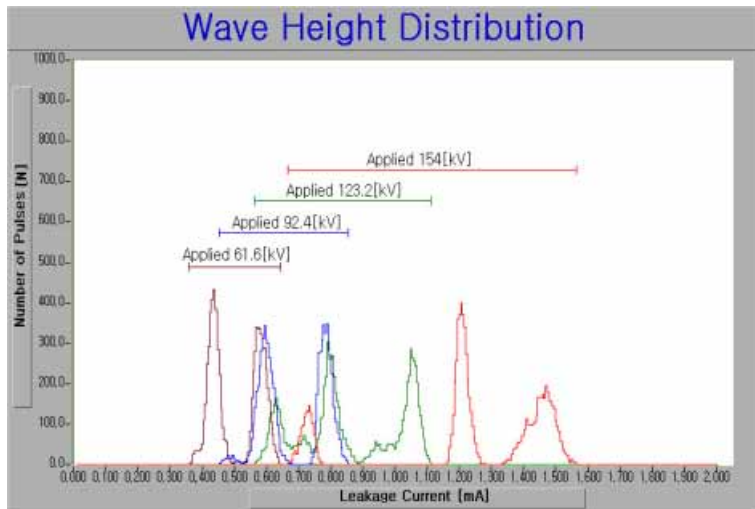
그림 5.13 170[kV]급 GIS용 피뢰설비

Fig. 5.13 Lightning arrester facilities for 170[kV] class GIS

그림 5.14에는 GIS용 피뢰설비에 본 진단장치를 적용하여 나타낸 것으로, 그림 5.14 (a)에는 정상운전전압의 40[%]인 57[kV]을 인가한 후 측정된 결과를 나타내었다. 저항분 누설전류의 값은 전체 누설전류 크기에 비해 미소한 크기이며 인가전압에 따라 전체 누설전류가 급격히 증가하고, 특히 저항분 누설전류의 변화가 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다. 그림 5.14 (b)는 GIS용 피뢰설비에서 전체 누설전류의 파고분포를 나타낸 것이다. 인가전압은 정상운전전압의 40[%], 60[%], 80[%], 100[%]으로 상승시키면서 누설전류의 파고분포를 분석한 것으로 인가전압에 따라 파고값이 증가함은 물론 파고분포의 현저한 변화가 있음을 알 수 있다. 운전전압의 40[%]에서 많은 파고는 430[μ A]와 580[μ A]이며, 60[%]에서는 600[μ A]와 780[μ A]로 나타났다. 또한 80[%]에서는 630[μ A]와 790[μ A] 및 1,050[μ A]이고, 정격운전전압에서는 730[μ A], 1,460[μ A]와 1,220[μ A]에서 나타났으며, 전체적으로 파고는 670[μ A]에서 1,560[μ A]까지 넓게 분포하였다. ZnO 소자에서 확인한 것처럼 운전전압을 인가함에 따라 누설전류의 파고값이 증가함은 물론 파고분포에 현저한 변화를 나타내고 있다.



(a) 출력 화면



(b) 전체 누설전류 파고분포

그림 5.14 전체 누설전류 파형과 파고분포(GIS)

Fig. 5.14 Leakage current waveforms and wave height distributions of total leakage current(GIS)

5.2.2 저항분 누설전류에 의한 열화진단

그림 5.15는 18[kV], 5[kA]의 정격을 가진 신품 피뢰기에 대하여 정상운전전압(13.2[kV])을 인가하고 본 논문에서 설계한 진단장치를 이용하여 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류를 측정하여 나타낸 것이다. 진단장치는 미소한 전체 누설전류(실효값 227[μ A])와 제 3조파 누설전류(최대값 23[μ A])를 검출할 수 있는 충분한 성능이 있음을 확인하였다.

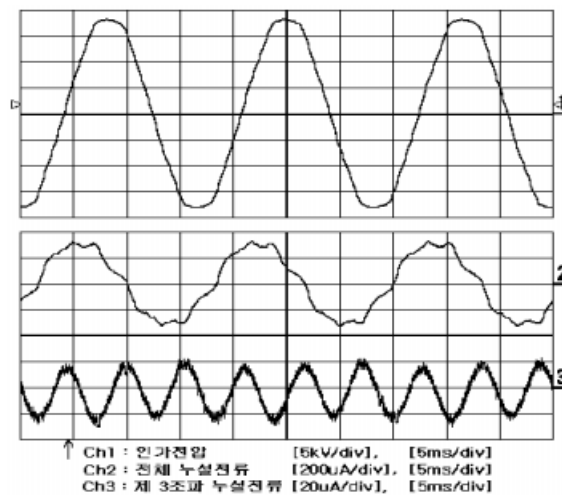
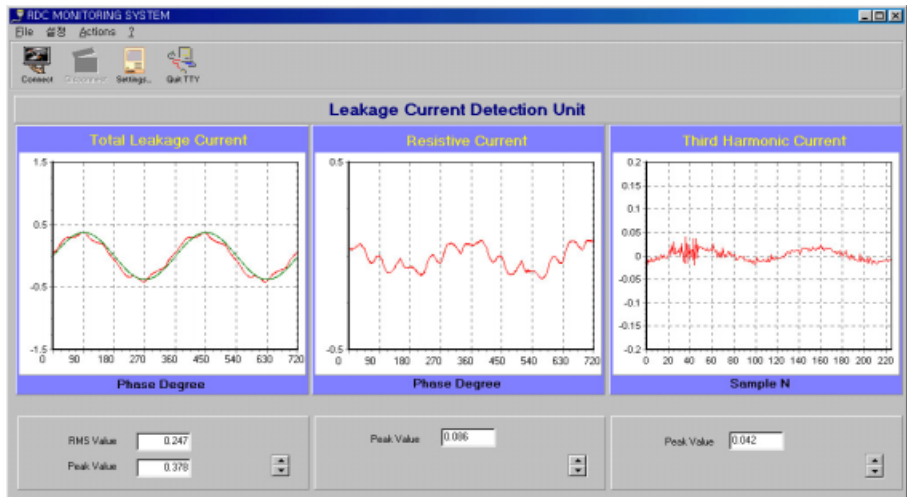


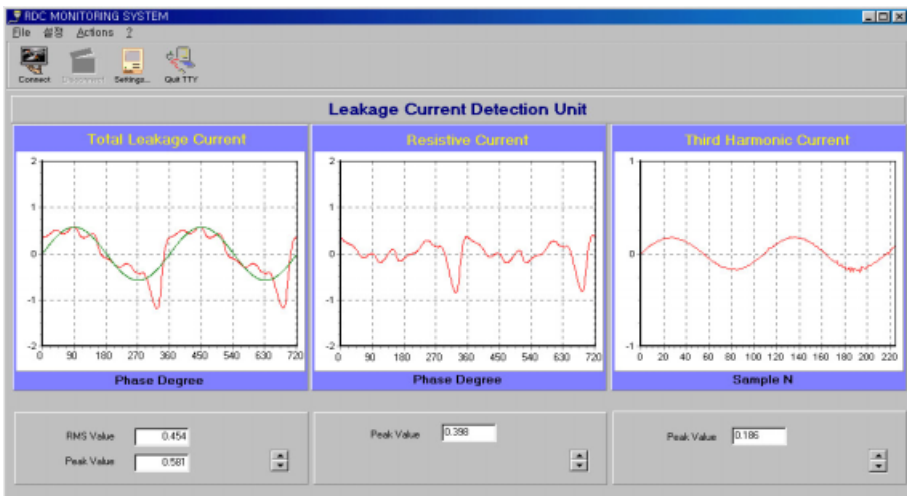
그림 5.15 인가전압과 누설전류 파형

Fig. 5.15 Typical waveforms an applied voltage and leakage currents

그림 5.16은 저항분 누설전류에 의한 열화진단시스템으로 분석한 전체 누설전류, 저항분 누설전류 및 제 3조파 누설전류의 파형을 나타낸 것이다. 그림 5.16 (a)는 전력용 피뢰기에서 측정된 일례를 나타내었다. 화면 좌측에는 전체 누설전류와 용량분 누설전류를, 중앙에는 계산된 저항분 누설전류를, 우측에는 대역통과필터로부터 출력되는 제 3조파 누설전류를 그대로 나타내었다.



(a) 신품 피뢰기



(b) 손상된 소자

그림 5.16 누설전류 분석 결과

Fig. 5.16 Analysis results of leakage currents

그림 5.16 (b)에는 핀-홀이 발생한 소자에 대하여 측정한 예를 나타내었다. 열화진전에 따른 열화진전에 따른 저항분 누설전류의 증가 및 저항분 누설전류의 증가 경향과 유사한 제 3조파 누설전류의 증가를 확인할 수 있다.

표 5.1에는 저항분 누설전류 분석시스템을 이용하여 여러 시료들에 대한 측정한 결과를 나타내었다. 누설전류는 측정한 시료와 정격 및 제조사에 따라 차이가 존재하지만, 일반적으로 신품의 경우와 열화된 경우를 분석하면 열화된 시료들의 저항분 및 제 3조파 누설전류가 신품의 경우보다 현저하게 증가된 것을 알 수 있다. 특히 핀-홀 발생 등의 치명적인 손상이 있는 경우는 물론 미소한 열화진전에도 충분한 성능을 가지고 있다.

표 5.1 누설전류의 측정

Table 5.1 Measurement of leakage currents

	I _l [μ A]		I ₃ [μ A]	I _r [μ A]
	실효값	최대값	최대값	최대값
신품 소자	143~192	218~289	12~31	19~51
열화된 소자	185~342	254~463	22~72	27~111
핀-홀 발생한 소자	443 이상	545 이상	183 이상	382 이상
신품 피뢰기	192~253	241~359	19~61	32~90
기사용 피뢰기	221~370	298~530	23~160	39~193

5.3 전원고조파에 의한 영향 고찰

본 논문에서는 누설전류의 열화진단기술에 있어 전원전압에 포함된 고조파 성분의 영향을 분석하기 위하여 정격 6[kV], 5[kA]인 ZnO 소자의

비선형 저항특성을 가진 PSpice 모델 식 (5.1)을 설계하였다^[80]. 여기에 전원전압으로 순수 정현파 및 기본파에 제 3조파 전압을 중첩시켜 전누설 전류와 저항분 누설전류의 크기를 PSpice Tool에 의해 시뮬레이션을 수행 하였다^[81].

$$\log(V) = a_0 + a_1 \log(i) + a_2 \exp\{-\log(i)\} + a_3 \exp\{\log(i)\} \quad (5.1)$$

여기서 $a_0 = 3.3297856$, $a_1 = 0.0241006$, $a_2 = 0.0000002$, $a_3 = 0.0027927$ 로 이 값들은 각 전류영역에서의 비선형 계수를 나타낸다.

피뢰기 누설전류는 피뢰기 양단에 정상운전전압이 인가된 상태에서 흐르는 누설전류의 크기를 측정하는 것으로, 전체 누설전류는 저항분 누설 전류와 용량분 누설전류로 구분된다. 전원전압 v_t 에 고조파성분이 포함되었다면 전원전압 v_t 는 식 (5.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_t = \sqrt{2} v_1 \sin \omega t + \sqrt{2} v_n \sin (n\omega t + \phi) \text{ [V]} \quad (5.2)$$

여기서, v_1 은 기본파 성분 전압의 실효값, v_n 은 고조파 성분 전압의 실효 값, n 은 고조파 성분의 차수, ϕ 는 각 고조파에서의 위상을 나타낸다.

식 (5.2)에서 포함되어 있는 고조파 성분이 제 3조파 성분만 존재한다고 가정하면 전원전압 v_t 은 식 (5.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_t = \sqrt{2} v_1 \sin \omega t + \sqrt{2} v_3 \sin (3\omega t + \phi) \text{ [V]} \quad (5.3)$$

이 때의 전체 누설전류 i_t 는 식 (5.4)와 같이 용량분 누설전류 i_c 와 저항 분 누설전류 i_r 의 합으로 표현할 수 있다.

$$i_t = i_c + i_r \text{ [\mu A]} \quad (5.4)$$

그리고 용량분 누설전류 i_c 는 식 (5.5)와 같이 기본파 성분에 의한 전류 i_{c1} 와 제 3조파 성분에 의한 전류 i_{c3} 의 합으로 표현할 수 있다.

$$i_c = i_{c1} + i_{c3} [\mu A] \quad (5.5)$$

저항분 누설전류 i_r 은 ZnO 소자 자체의 비선형특성에 의한 제 3조파 성분과, 인가전원의 제 3조파에 의한 제 3조파 성분을 포함하게 된다. 따라서 저항분 누설전류 i_r 은 식 (5.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_r = i_{r1} + i_{r3}' + i_{r3}'' [\mu A] \quad (5.6)$$

여기서, i_{r1} 는 기본파 성분의 저항분 누설전류, i_{r3}' 는 ZnO 소자의 비선형 특성에 의한 제 3조파 성분, i_{r3}'' 는 인가전압의 제 3조파 전압에 의한 제 3조파 성분이다. 따라서 저항분 누설전류는 ZnO 소자의 비선형 특성에 의한 저항분 누설전류 외에도 인가전압의 고조파 성분에 의한 저항분 누설전류가 포함되며, 인가전원의 고조파 성분에 의하여 측정값이 달라지게 된다.

그림 5.17에는 시뮬레이션의 이용한 전체 회로도를 나타내었다. 피뢰기 소자 모델링에 있어서는 인가전원의 고주파 함유율에 따른 저항분 누설전류의 변화를 분석하기 위하여 완전한 피뢰기 소자의 모델을 수정하였다.

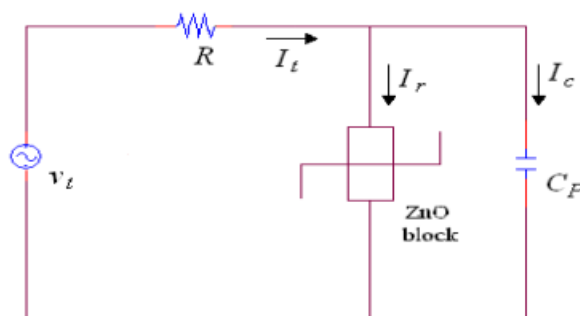


그림 5.17 시뮬레이션 회로도

Fig. 5.17 Circuit for the simulation

수정한 모델은 커패시터 성분을 제거하였으며, 이 모델과 병렬로 이에 상응하는 커패시터 C_p 를 연결하였다. 그러므로 피뢰기 소자 양단에 전원이 인가되면 피뢰기 소자에는 저항분 누설전류만이 흐르게 되고 커패시터에는 용량분 누설전류가 흐른다.

그림 5.18은 정상운전전압에서 피뢰기 소자의 전압과 누설전류 파형 및 저항분 누설전류의 고조파 분석결과를 나타낸 것이다. 전술한 것과 같이 전체 누설전류는 인가전압보다 90° 앞선 용량분 누설전류와 인가전압과 동상인 저항분 누설전류로 나타낼 수 있다. 또한 인가된 전원전압이 순수한 정현파라도 피뢰기 소자의 비선형 저항특성에 따라 저항분 누설전류에는 60[Hz]의 기본파 성분 이외에 제 3조파 이상의 누설전류 성분들이 존재하는 것을 알 수 있다.

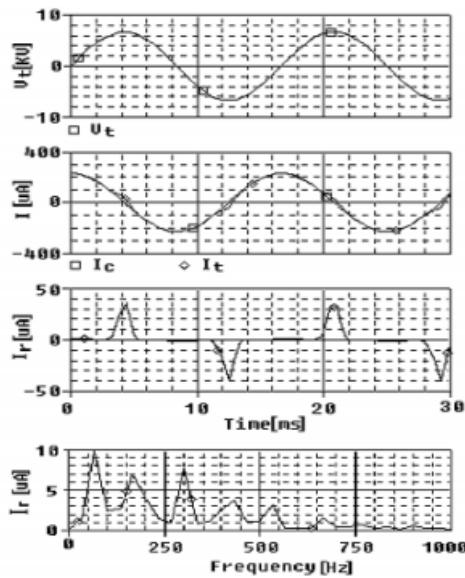
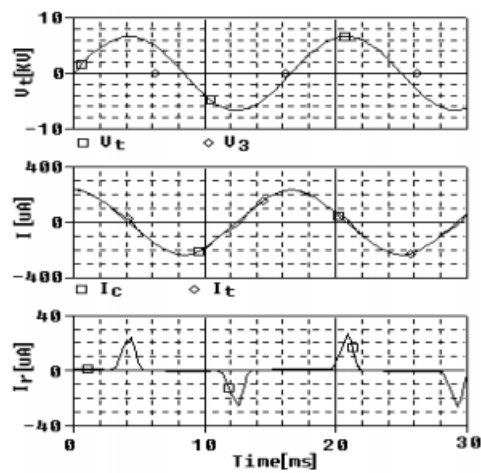


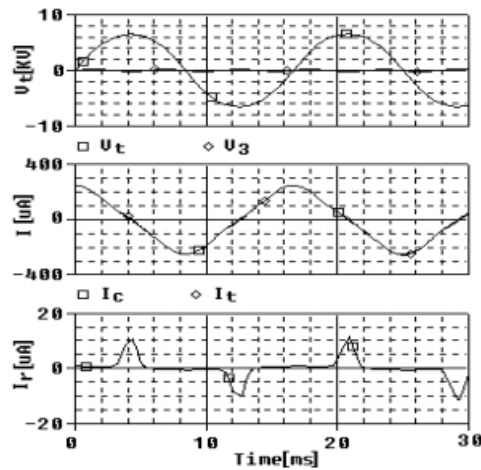
그림 5.18 인가전압과 누설전류 파형(순수 정현파전압)

Fig. 5.18 Typical waveforms of applied voltage and leakage current components(a pure sinusoidal voltage)

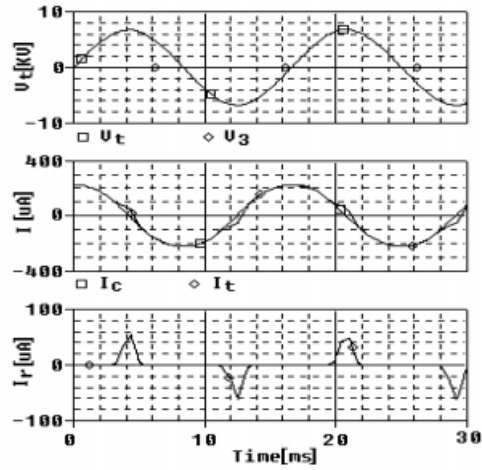
시뮬레이션의 조건은 전원전압에 포함된 제 3조파 전압의 크기를 0.5[%], 1[%], 2[%], 3[%]로 증가시키면서, 또한 기본파 전압에 제 3조파 전압을 위상 0° 와 180° 로 하였을 때, 누설전류의 변화를 분석하여 그림 5.19에 나타내었다.



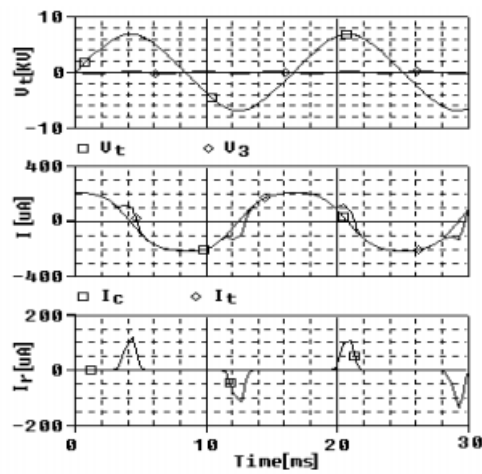
(a) (0° , 1%)



(b) (0° , 3%)



(c) (180°, 1%)



(d) (180°, 3%)

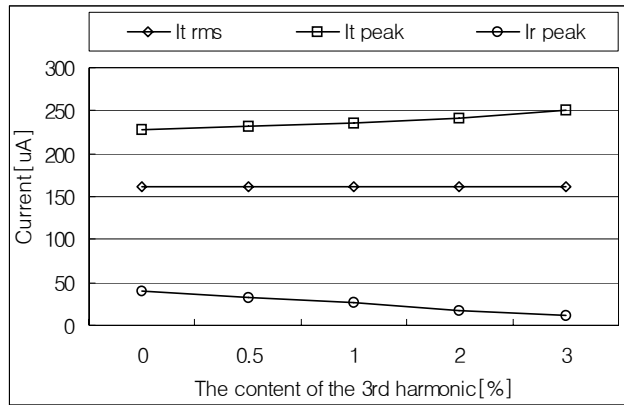
그림 5.19 인가전압과 누설전류 파형(제 3조파 전압 중첩)

Fig. 5.19 Typical waveforms of applied voltage and leakage current components(overlapping the 3rd harmonic voltage)

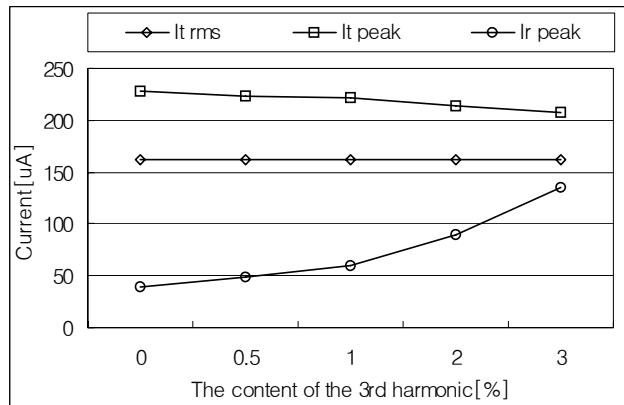
그림 5.19는 전원전압 v_i 에 포함된 제 3조파 v_3 의 크기를 기본파 v_1 의 위상 0° 및 180° 에서 중첩시켰을 때, 누설전류의 변화를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과로부터 그림 5.18의 순수 정현파만 포함되어 있을 때와는 다르게 누설전류의 크기가 차이가 나타남을 알 수 있다. 기본파 전압의 위상 0° 에서 제 3조파 전압을 중첩시키면 인가전압의 90° 에서는 제 3조파 전압성분의 중첩으로 최대값의 감소를 가져오게 된다. 그러나 이 경우의 전누설전류의 최대값은 제 3조파 전압성분 v_3 으로 인하여 점차 증가하지만, 저항분 누설전류의 최대값은 인가전압 v_i 의 최대값의 감소로 인하여 증가하지 않고 오히려 감소하게 되는 결과를 나타내게 된다. 또한 기본파 전압의 위상 180° 에서 제 3조파 전압을 중첩시킬 경우, 인가전압의 90° 에서는 제 3조파 전압성분의 중첩으로 최대값의 증가를 가져오게 되므로, 위상 0° 에서 제 3조파 전압을 중첩시킬 때와는 반대의 결과로 전체 누설전류의 최대값은 점차 감소하고, 저항분 누설전류의 최대값은 증가하게 된다.

그림 5.20은 기본파 전압에 제 3조파 전압의 크기를 증가시키면서 위상 0° 와 180° 에서 중첩시켰을 때 누설전류의 변화를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 기본파 전압의 위상 0° 에서 제 3조파 전압을 중첩시켰을 때, 제 3조파 전압의 증가에 따라 전체 누설전류의 최대값은 다소 증가함을 알 수 있다. 그러나 저항분 누설전류의 크기는 오히려 감소하는데, 이것은 저항분 누설전류가 인가전압에 동상으로 작용하기 때문에 기본파 전압 0° 에서 제 3조파를 중첩시키면 인가전압의 최대값이 감소하기 때문이다. 그림 5.20 (b)는 제 3조파를 기본파 전압 위상 180° 에서 중첩시킨 것으로 위상 0° 에서 중첩시켰을 때와는 반대의 경향이 나타나게 된다. ZnO 소자 모델을 이용하여 전원전압에 크기와 위상을 고려한 제 3조파

성분을 포함시켜 누설전류의 성분들의 크기에 영향을 주는 것을 확인하였으며, 열화진단기술에 있어서는 이에 대한 대책이 필요할 것으로 생각된다.



(a) 0°에서 제 3조파 전압 인가



(b) 180°에서 제 3조파 전압 인가

그림 5.20 고조파 전압에 따른 소자 모델의 누설전류

Fig. 5.20 Leakage current components of ZnO model as a function of the harmonic voltage

제 6 장 결 론

본 논문에서는 단일 및 다중 뇌충격전류에 의한 가속열화실험으로부터 피뢰기 열화진전에 따른 전기적 특성 변화를 분석하여 열화진전기구를 해석하고 새로운 열화진단기술과 장치를 제안하였으며, 연구과정으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피뢰기의 열화원인은 상용주파수 교류과전압과 뇌충격전류의 두 가지로 구분할 수 있다. 교류과전압에 의한 열화는 ZnO 피뢰기 소자 내부의 온도상승에 의한 분자운동의 활성화로 저항분 누설전류가 증가하며, 다시 온도가 상승하는 과정이 반복하여 발생하는 것이다. 뇌충격전류에 의한 열화는 비선형 특성을 담당하는 입계층에 높은 에너지가 인가되어 국부적으로 큰 열이 발생하여 용융·재소결 과정에서 입계층의 감소와 grain을 성장시키는 것을 확인하였다.

2. ZnO 피뢰기 소자는 뇌충격전류에 의하여 급속히 열화가 진전되며, 열화진전에 따라 전체 누설전류의 최대값과 제 3조파 누설전류의 현저한 증가를 나타내었다. 동작개시전압은 소자의 파괴 직전까지 변화가 없었으나 핀-홀 발생과 같은 국부적인 손상시 급격히 감소하는 경향을 보이므로, 열화진단의 지표로 동작개시전압의 적용은 불충분하며, 전체 누설전류 및 제 3조파 누설전류의 최대값 분석이 기본적으로 필요하다.

3. ZnO 피뢰기 소자는 단일 뇌충격전류보다 다중 뇌충격전류의 인가에 의해 더 빠른 열화진전과 누설전류의 증가를 나타내었다. 또한 소자의 미세구조 분석으로부터 다중 뇌충격전류를 인가한 소자는 단일 뇌충격전류의 인가시 보다 grain의 크기가 더 성장한 것을 확인할 수 있었다. 이것

은 뇌충격전류로 소자가 국부적으로 가열되어 있고, 계면에 전계가 집중되어 있는 상태에서 뇌충격전류가 연속적으로 인가되기 때문에 입계층에서 용융·재소결의 과정이 반복되어 나타나는 것으로 판단된다.

4. 뇌충격전류에 의한 가속열화실험으로부터 누설전류의 파괴분포에 의한 새로운 열화진단기술과 장치를 제안하였다. 피뢰기의 열화는 전반적인 열화와 국부적인 열화 및 핀-홀 발생 등의 치명적인 열화와 같은 다양한 형태가 존재하며, 그에 따른 누설전류의 파괴분포 형태가 현저한 차이가 나타남을 확인하였다. 열화진단장치는 고감도 변류기, 60[dB] 이득의 증폭회로 및 12[bit] 200[ks/s]의 데이터 취득장치로 구성되고 제어와 분석은 개인용 컴퓨터에서 운용되도록 설계하였다.

5. 본 논문에서 제안한 열화진단기술은 피뢰기 소자, 18[kV]급 배전용 피뢰기 및 170[kV]급 변전용 GIS 피뢰설비에 적용한 결과, 온라인 상태에서 피뢰기의 열화진단에 충분한 성능이 있음을 확인하였다.

6. 누설전류 분석에 기초한 열화진단기술은 피뢰기에 인가되는 전원전압에 고조파 전압을 포함하면 열화상태와는 무관하게 누설전류의 크기가 변화하여 진단결과에 오차를 함유하게 된다. 피뢰기 소자의 모델 설계로부터 전원 고조파와 누설전류의 관계를 이론적으로 해석한 결과, 전원전압의 위상 0. 에서 제 3고조파 전압을 중첩시키면 고조파 함유율 증가에 따라 전체 누설전류의 최대값은 점차 증가하고, 저항분 누설전류의 최대값은 감소한다. 그러나 전원전압의 위상 180. 에서 중첩시키면 함유율 증가에 따라 전체 누설전류의 최대값은 감소하고, 저항분 누설전류의 최대값은 증가함을 알 수 있었다. 따라서 누설전류 측정에 의한 열화진단시 전원고조파를 분석하고 측정된 누설전류의 크기를 보정하는 것에 의해 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

향후 과제로는 ZnO 바리스터의 명확한 전도기구 해석과 인가전원에 포함된 고조파 전압에 따른 누설전류의 보정 알고리즘의 연구·개발이 필요하며, 현재 운용중인 피뢰기의 지속적인 관찰로부터 열화를 분석하여 피뢰기의 열화판단기준을 제시하여야 할 것이다.

[참고문헌]

- [1] P.Chowdhuri, “Electromagnetic Transients in Power Systems”, Research Studies Press, 1987, pp.266~296
- [2] 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, 1995, pp.79~114
- [3] J.J.Burke, “Application of mov gapped arrester on non effectively grounded distribution systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, No.2, pp.794~800, 1991
- [4] 今井康友 外, “架空地線直撃雷に對する配電用避雷器の保護効果”, 日本電氣學會論文誌, B111卷, 6号, pp.619~627, 1991
- [5] 酸化亞鉛形避雷器の特性評価試験法調査專門委員會委員, “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
- [6] 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
- [7] M.Matsuoka, “Nonohmic properties of zinc ceramics”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.10, No.6, pp.736~746, 1971
- [8] 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
- [9] 中島昌俊, 向江和郎, 堤睦男, 金子英男, “新形GIS用避雷器の開発”, 日本電氣學會論文誌, B116卷, 10号, pp.1240~1245, 1996
- [10] K.Mukae et al., “Zinc Oxide-Praseodymium Oxide Elements for Surge Arresters”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.3, No.2,

1988

- [11] S.S.Kershaw et al., "Applying metal-oxide surge arresters on distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.1, pp.301~307, 1989
- [12] 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
- [13] 江藤伸夫 外, "酸化亜鉛形避雷器の漏れ電流検出方式の提案", 日本電気學會電力・エネルギー部門大會, pp.850~851, 1994
- [14] A.Haddad et al, "An Improved non-inductive impulse voltage measurement technique for ZnO surge arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.2, pp.778~785, 1995
- [15] W.G.Carlson et al., "A procedure for estimating the lifetime of gapless metal oxide surge arresters for AC application", IEEE Transactions on Power System, Vol.PWRD-1, No.2, pp.67~74, 1986
- [16] 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
- [17] O.Nigol, "Methods for Analyzing the Performance of Gapless Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.7, No.3, pp.1256~1262, 1992
- [18] 한국공업표준협회, "산화아연형 갭리스 피뢰기", KS C 4609, 1987
- [19] 한국전력공사, "전력용 피뢰기", ES 131-261, 1984
- [20] The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., "IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC power Circuits", ANSI/IEEE C62.11, 1993
- [21] International Electrotechnical Commission, Technical Committee No.37, "Surge Arresters, Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps for

AC system”, Geneva, Switzerland, 1988

[22] International Electrotechnical Commission, “Metal-oxide surge arresters without gaps for A.C. systems”, IEC 60099-4, 1998

[23] 電氣學會電氣規格調查會標準規格, “酸化亞鉛形避雷器”, JEC-217, 1984

[24] 기술표준원, “신뢰성평가 기준“, 자기재 피뢰기(2.5kA), RS C 0016, 2001

[25] M.A.Uman, “The Lightning Discharge”, Academic Press Inc., 1987, pp.1~36

[26] Mazen Abdel-Salam et al., “High-Voltage Engineering Theory and Practice”, Marcel Dekker Inc., 2000, pp.447~453

[27] Jinbo Kuang et al., “Temperature Distribution in a ZnO Arrester Subjected to Multiple Current Impulses”, Proceeding of the 1996 International Symposium on Electrical Insulation, pp.494~497, 1996

[28] M.Darveniza, D.R.Mercer, “Laboratory studies of the multipulse lightning currents on distribution surge arresters”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.8, No.3, pp.1035~1044, 1993

[29] R.A.Sargent et al., “Effects of Multiple Impulse Currents on the Microstructure and Electrical Properties of Metal-oxide Varistors”, IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.27, No.3, pp.586~592, 1992

[30] T.K.Gupta, “Application of zinc oxide varistors”, Journal of the American Ceramic Society, Vol.73, No.7, pp.1817~1840, 1990

[31] 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

- [32] 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
- [33] L.M.Levinson, H.R.Philipp, "Zinc oxide Varistors - A Review", Journal of Applied Physics, Vol.50, No.11, pp.6833~6637, 1979
- [34] J.Wong, "Barrier Voltage Measurement in Metal Oxide Varistors", Journal of Applied Physics, Vol.47, No.11, pp.4971~4974, 1976
- [35] 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
- [36] 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
- [37] 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
- [38] M.Inada, "Microstructure of Nonohmic Zinc Oxide Ceramics", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.17, No.4, pp.673~680, 1978
- [39] W.G.Morris, "Physical properties of the electrical barriers in varistors", J. Vac. Sci. Technol., Vol.13, No.4, pp.926~931, 1976
- [40] 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
- [41] W.D.Kingery et al., "A scanning transmission electron microscopy

investigation of grain-boundary segregation in a ZnO-Bi₂O₃ varistor”, Journal of the American Ceramic Society, Vol.62, No.3-4, pp.221~22, 1979

[42] D.R.Clarke, “Grain-boundary degradation in a commercial ZnO-based varistor”, Journal of Applied Physics, Vol.50, No.11, pp.6829~6832, 1979

[43] A.T.Santhanam et al., “Microstructural evaluation of multicomponent ZnO ceramics”, Journal of Applied Physics, Vol.50, No.2, pp.852~859, 1979

[44] L.M.Levinson, H.R.Philipp, “The physics of metal oxide varistors”, Journal of Applied Physics, Vol.46, No.3, pp.1332~1341, 1975

[45] 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

[46] 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

[47] G.E.Pike, “Semiconductor grain-boundary admittance: Theory”, Physical Review B, Vol.30, No.2, pp.795~802, 1984

[48] G.Blatter et al., “Carrier transport through grain boundaries in semiconductors”, Physical Review B, Vol.33, No.6, pp.3952~3966, 1986

[49] G.Blatter et al., “Electrical breakdown at semiconductor grain boundaries”, Physical Review B, Vol.34, No.12, pp.8555~8572, 1986

[50] K.Eda et al., “Degradation mechanism of non-ohmic zinc oxide ceramics”, Journal of Applied Physics, Vol.51, No.5, pp.2678~2684,

1980

- [51] P.R.Emtage, "The physics of zinc oxide varistors", *Journal of Applied Physics*, Vol.48, No.10, pp.4372~4384, 1977
- [52] K.Eda, "Conduction mechanism of non-ohmic zinc oxide ceramics", *Journal of Applied Physics*, Vol.49, No.5, pp.2964~2972, 1978
- [53] G.D.Mahan et al., "Theory of conduction in ZnO varistors", *Journal of Applied Physics*, Vol.50, No.4, pp.2799~2812, 1979
- [54] P.L.Hower et al., "A barrier model for ZnO varistors", *Journal of Applied Physics*, Vol.50, No.7, pp.4847~4855, 1979
- [55] 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
- [56] K.Eda, "Transient conduction phenomena in non-Ohmic zinc oxide ceramics", *Journal of Applied Physics*, Vol.50, No.6, pp.4436~4442, 1979
- [57] 김명식, "정공의 확산전류에 의한 ZnO 바리스터의 도전기구 해석", 한국과학기술원, 박사학위논문, 1991
- [58] K.Eda, "Zinc Oxide Varistors", *IEEE Transaction on Electrical Insulation Magazine*, Vol.5, No.6, pp.28~39, 1989
- [59] G.D.Mahan, "Intrinsic defects in ZnO varistors", *Journal of Applied Physics*, Vol.54, No.7, pp.3825~3832, 1983
- [60] W.L.Lee et al., "Defects and degradation in ZnO varistors", *Journal of Applied Physics Letters*, Vol.69, No.4, pp.526~531, 1996
- [61] 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

- [62] K.Eda, “Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents”, Journal of Applied Physics, Vol.56, No.10, pp.2948~2955, 1984
- [63] 小島宗次, 菅雅弘, 舩澤弘一, “酸化亜鉛避雷器の依存モデル”, 日本電気學會論文誌, B114卷, 3号, pp.310~316, 1994
- [64] 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
- [65] 馬場則男 外, “酸化亜鉛素子の雷インパルス電流印加による特性変化の検討”, 日本電気學會放電・高電壓合同研究會資料, ED-95-186, HV-95-57, pp.45~53, 1995
- [66] 大坪昌久 外, “配電用直列ギャップ付避雷器の繰返し動作による特性変化”, 日本電気學會論文誌, B113卷, 4号, pp.390~396, 1993
- [67] 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
- [68] 石崎義弘 外, “避雷器の外部診断技術”, OHM, Vol.74, No.4, pp.45~50, 1987
- [69] 石辺信治, “酸化亜鉛形避雷器の劣化診断テクニック”, 電気計算, Vol.44, No.3, pp.56~60, 1987
- [70] 宇治田克 外, “酸化亜鉛形避雷器用漏れ電流検出器”, 三菱電機技報, Vol.55, No.3, pp.228~231, 1981
- [71] 길경석, 한주섭, “다중뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성 변화”, 대한전기학회 논문지, Vol.49C, No.12, pp.685~690, 2000
- [72] Gyung-Suk Kil et al., “Electrical Characteristic Changes of ZnO

Blocks by a Lightning Impulse Current and an Expert System to Diagnose Deterioration of Lightning Arresters”, Proceedings of ICEE, No.2, pp.1281~1284, 2001

[73] 길경석 외, “피뢰기 누설전류 분석장치의 설계 및 제작”, 대한전기학회 방전 및 고전압 연구회 춘계학술대회 논문집, pp.65~68, 1999

[74] 宅間, 柳父, “高電壓大電流工學”, 日本電氣學會, 1988, pp.121~125

[75] 原雅則, 秋山秀典, “高電壓パルスパワー工學”, 森北出版株式會社, 1991, pp.139~163

[76] 岩崎晴光, 岡田昌治, 村井由宏, 川島化之, “避雷器のインパルス電流試験回路の解析”, 日本電氣學會 論文誌, B102卷, 3号, pp.169~176, 1982

[77] Gyung-Suk Kil et al., “New Method for Analyzing Deterioration of Lightning Arresters”, Proceedings of ICEE, pp.1555~1558, 2002

[78] 한주섭, 송재용, 길경석, 김정배, “누설전류의 파고분석에 의한 피뢰기 열화진단 기술”, 2002년도 대한전기학회 고전압 및 방전 응용기술 연구회, 전기재료 연구회 춘계 학술연구발표회 논문집, pp.65~68, 2002

[79] Robert J.Schilling, Sandra L.Harris, “Applied Numerical Methods for Engineers Using MATLAB and C”, BROOKS/COLE PUBLISHING COMPANY, 1999, pp.321~328

[80] 길경석, 송재용, 박진길, “가스튜-브와 산화아연 바리스터의 PSpice 모델” 한국박용기관학회지, Vol.23, No.2, pp.150~158, 1999

[81] Gyung-Suk Kil, Ju-Seop Han, Jong-Heuk Lee, “Influence of Harmonics in Power System Voltage on Arresters Deterioration Diagnostics”, Proceedings of 2002 Joint Conference of ACED & K-J Symposium on ED and HVE, pp.151~154, 2002

< 연구논문 발표실적 >

1. 국내전문학술지

- (1) 길경석, 한주섭, 송재용, “정보통신기기용 과도전압 차단장치의 개발에 관한 연구”, 한국박용기관학회지, 제23권, 제2호, pp.159~167, 1999. 3.
- (2) 길경석, 한주섭, 박영호, “뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성변화”, 대한전기학회 논문지, 제48권, 제7호, pp.550~555, 1999. 7.
- (3) 이종혁, 한주섭, 길경석, 권장우, 송동영, “뇌충격전류에 의한 저압용 산화아연형 바리스터의 전기적 특성변화”, 한국해양정보통신학회 논문지, 제4권, 제4호, pp.793~801, 2000. 11.
- (4) 길경석, 한주섭, “다중 뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 특성 변화”, 대한전기학회 논문지, 제49C권, 제12호, pp.685~690, 2000. 12.
- (5) 길경석, 송재용, 한주섭, 김일권, 손원진, “방사선 펄스의 고안정 계측 및 분석기술 개발”, 한국해양정보통신학회 논문지, 제5권, 제2호, pp.303~308, 2001. 7.
- (6) 길경석, 한주섭, 송재용, 김명진, 김정배, 조한구, “뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성과 피뢰기 열화진단 전문가 시스템”, 대한전기학회 논문지, 제51C권, 제4호, pp.152~157, 2002. 4.

2. 국제 학술회의 논문집

- (1) Gyung-Suk Kil, Joo-Sup Han, Jae-Yong Song, Jang-Woo Kwon, “Electrical Characteristic Changes of ZnO Blocks by a Lightning Impulse Current and an Expert System to Diagnose Deterioration of Lightning Arresters”, Proceedings of International Conference on Electrical Engineering, No.2 , pp.1281~1284, 2001. 7.
- (2) Gyung-Suk Kil, Joo-Sup Han, Jae-Yong Song, Jung-Bae Kim, Han-Gu Cho, “New Method for Analyzing Deterioration of Lightning Arresters”, Proceedings of International Conference on Electrical Engineering, pp.1555~1558, 2002. 7.
- (3) Gyung-Suk Kil, Ju-Seop Han, Jong-Heuk Lee, “Influence of Harmonics in Power System Voltage on Arresters Deterioration Diagnostics”, Proceedings of 2002 Joint Conference of ACED & K-J Symposium on ED and HVE, pp.555~559, 2002. 11.

3. 국내 학술회의 논문집

- (1) 길경석, 송재용, 한주섭, “특고압 배전선로에서 가스절연개폐기를 이용한 전압측정계”, 1998년도 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계학술발표회 논문집, pp.117~119, 1998. 5.
- (2) 한주섭, 송재용, 길경석, “산화아연형 피뢰기 소자의 뇌충격전류에 의한 특성 변화”, 1998년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.907~909, 1998. 11.
- (3) 한주섭, 길경석, “뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 특성 변화” 1998년도 대한전기학회 부산경남울산지부 추계학술발표회 논문집, pp.164~

166, 1998. 12.

(4) 길경석, 한주섭, 박영호, 송일근, “피뢰기 누설전류 분석장치의 설계 및 제작” 1999년도 대한전기학회 춘계학술연구발표회 논문집, pp.65~68, 1999. 5.

(5) 한주섭, 박영호, 길경석, 김찬영, “ZnO 피뢰기 소자의 뇌충격전류에 의한 전기적 특성 변화 비교”, 1999년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.1108~1110, 1999. 11.

(6) 한주섭, 박영호, 길경석, “ZnO 피뢰기 소자의 전기적 특성과 열화진단기술”, 1999년도 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, pp.123~126, 1999. 11.

(7) 한주섭, 김점식, 이종혁, 길경석, “배전용 피뢰기의 열화 진단 기술”, 2000년도 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계학술연구발표대회 논문집, pp.101~103, 2000. 5.

(8) 이종혁, 천상규, 김일권, 한주섭, 길경석, “다중 뇌충격전류에 의한 피뢰기 소자의 특성 변화”, 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, C권, pp.2035~2037, 2000. 7.

(9) 송재용, 한주섭, 천상규, 길경석, “방사선 펄스의 고안정 계측회로 설계”, 2000년도 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol.4, No.2, pp.577~580, 2000. 10.

(10) 길경석, 한주섭, 손원진, 김정배, “뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 특성변화와 피뢰기 열화진단 전문가 시스템”, 2001년도 대한전기학회 고전압 및 방전응용기술연구회 춘계학술대회 논문집, pp.83~85, 2001. 4.

(11) 손원진, 김일권, 한주섭, 송재용, 길경석, “방사선펄스의 고안정 계측 및 분석기술 개발”, 2001년도 한국해양정보통신학회 춘계종합학술

대회, Vol.5, No.1, pp.465 ~ 468, 2001. 5.

(12) 한주섭, 송재용, 길경석, 김정배, “누설전류의 파고분석에 의한 피뢰기 열화진단 기술”, 2002년도 대한전기학회 고전압 및 방전 응용기술 연구회, 전기재료 연구회 춘계학술연구발표회 논문집, pp.65~68, 2002.

4.

(13) 한주섭, 김명진, 길경석, 조한구, 이종혁 “폴리머 피뢰기의 열화진단기술”, 2002년도 대한전기학회 고전압 및 방전 응용기술 연구회, 전기재료 연구회 춘계학술연구발표회 논문집, pp.77~80, 2002. 4.

4. 연구 보고서

(1) “특고압 배전선로의 전압계측방법 개선에 관한 연구”, 기초전력공학 공동연구소, 1998. 9.

(2) “정보통신기기용 과도이상전압 차단장치의 설계 및 제작”, 한국학술진흥재단, 1999. 1.

(3) “배전용 피뢰기의 노화진단장치개발”, 한국과학재단, 1999. 4.

(4) “방사성 동위원소를 이용 포장시공 및 감리용 아스팔트 함량 측정기 개발”, 과학기술처, 1999. 5.

(5) “방사선 펄스의 고안정 계측에 관한 연구”, 과학기술부, 2001. 10.

(6) “가스절연개폐장치(GIS)용 피뢰기 누설전류 측정방법에 관한 연구”, (주) 효성, 2001. 11.

(7) “서지-/낙뢰 대책 관련 각종 시험기준 및 표준조사”, 한국전기연구원, 2001. 12.

(8) “폴리머 피뢰기의 열화진단기술 개발”, 한국전기연구원, 2002. 2.

(9) “전력설비 열화진단기술 개발”, 중소기업청, 2002. 4.

감사의 글

언제나 자식 잘되기만을 바라면 평생동안 희생하신 부모님의 크신 사랑에 비하면 너무 작지만, 하나의 결실을 맺어 부모님께 바칩니다.

대학원 생활의 시작에서부터 본 논문이 완성되기까지 공학을 하는 자세를 몸소 보여주시고, 많은 사랑을 주신 지도교수 길경석 박사님께 깊은 감사를 드리며 교수님께서 주신 사랑은 영원히 간직하고자 합니다. 바쁘신 와중에도 알찬 논문이 되도록 성심껏 심사해주신 김윤식 교수님, 이성근 교수님, 동아대학교의 사궁권 교수님 그리고 한국전기연구원의 조한구 박사님께 감사의 말씀을 올립니다. 대학원 과정에서 가르침을 주신 박관수 교수님, 전태인 교수님께도 감사드립니다.

언제나 따뜻한 관심으로 지켜봐 주신 부경대학교의 최연옥 교수님, 황용연 교수님, 이형기 교수님, 변기식 교수님, 김남호 교수님, 김만고 교수님께 감사드립니다. 멀리서 많은 관심을 가지고 지켜봐 주신 동명정보대학교의 권장우 교수님께도 감사드립니다.

고전압연구실이란 울타리 속에서 항상 같이 지내오면서 기쁨과 슬픔을 함께 해온 송재용님께 감사의 마음을 전하고, 김일권, 박대원님들께도 감사드립니다. 바쁜 직장생활 속에서도 도움을 준 김명진님께 감사의 마음을 전합니다. 고전압 연구실에서 함께 지낸 모든 분들께도 감사드리며, 뜻하신 모든 것을 이루시기 바랍니다. 항상 웃는 얼굴로 대해준 조성훈님과 늦은 시간까지 열화진단장치의 프로그램을 구성하면서 고생한 박상현님께도 감사드립니다. 이 한편의 논문을 완성할 수 있게 몰심양면으로 도와주신 많은 분들께 감사를 드립니다.

오빠 노릇 제대로 못한 저를 염려해 주고 격려해 준 두 동생에게 고맙다는 말을 전하고, 자식 앞에선 항상 웃음으로 대하여 주신 부모님께 엮드려 감사를 드리며, 저에게 많은 힘을 주신 친지 여러분들께도 감사드립니다.

2003년 1월 2일

한 주 섭 올림