工學碩士 學位論文

다중 뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 전기적 특성 변화에 관한 연구

A Study on the Electrical Characteristics of ZnO Blocks by a Multiple-lightning Impulse Current

指導教授　吉　暻　碩

2001年　2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科

李　鐘　赫

本 論文을 李鍾赫의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長 : 工學博士 李 柄 雨 ㊞

委 員 : 工學博士 吉 暻 碩 ㊞

委 員 : 工學博士 沈 俊 煥 ㊞

2001年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 李 鍾 赫

목 차

그림 및 표 목차

<그림 목차>

<표 목차>

A Study on the Electrical Characteristics of ZnO Blocks by a Multiple-lightning Impulse Current

by Lee, Jong-Hyuk

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

Abstract

This thesis deals with the changes of the electrical characteristics of ZnO blocks by the application of a single and a multiple-lightning impulse current.

Lightning arresters are the best protective device on electrical power systems against transient overvoltages caused by lightning impulse current and switching operation. Until these days, lightning arresters are estimated only by a single-lightning impulse current in its performance test. However, a multiple-lightning impulse currents are a general feature of natural lightning-ground flashes. It is therefore necessary for lightning arresters to be estimated by applying not only a single-lightning impulse current but also a multiple -lightning impulse current.

In this study, ZnO blocks of 6 [kV], 5 [kA] used in power distribution system have been estimated repeatedly until 200 times by a single and a multiple-lightning impulse current of 8/20 [us], 5 [kA].

The multiple-lightning impulse current generator which can produce quadruple 8/20 [μs], 5 [kA] with discrete time between 30 120 [ms] is designed and fabricated. The total energy applied to the ZnO blocks at each pulse is about 1,200 [J].

In experiment, various parameters such as leakage current components, reference voltage, and surface temperature of ZnO blocks are measured with the number of applied impulse current. Also, micro-structure changes of ZnO blocks after applying the single and the multiple-lightning impulse current of 200 times are compared.

From the experimental results, the peak value of the leakage current and the surface temperature of ZnO blocks are increased continuously with the number of applied impulse current, but no significant changes in the RMS value of the leakage current and in the reference voltage are observed.

Also, it is confirmed that the type of ZnO blocks are more vulnerable in deterioration or damage to the multiple-lightning impulse current.

제 1 장 서 론

산업사회의 발달로 전력 수요가 급증함에 따라 송·배전계통 설비가 다단·복잡화되면서 전력공급에 대한 신뢰도가 한층 높게 요구되고 있다. 전력계통의 송·배전선로는 직격뢰와 유도뢰의 침입이나 개폐기 동작으로 인해 정상 운전전압보다 최대 수 십배에 달하는 이상전압이 빈번하게 발생하여, 전력계통설비에 연결된 변압기, 차단기 등과 같은 중전기기의 절연을 위협하고 있다. 특히 뇌(雷)에 의해 발생하는 이상전압은 개폐기 동작에 의해 발생하는 것보다 전압의 크기와 에너지량 면에서도 훨씬 크다. 이에 대한 대책으로 송·배전선로에는 뇌격이나 개폐기 동작에 의한 이상전압 보호장치로 피뢰기(Lightning Arrester)를 기기 또는 선로에 병렬로 설치하고 있다.[1] [6] 피뢰기는 전력계통에 발생한 이상전압을 피보호기기의 절연전압 이하로 억제시켜 기기를 안전하게 보호하는 장치로, 현재는 전압-전류의 비선형 저항특성이 우수한 산화아연(ZnO) 소자를 내장한 피뢰기가 주류를 이루고 있다.

초기의 피뢰기는 방전극 형태로서 단순히 대기 중에 전극을 설치하여 아크(arc) 방전에서의 낮은 전압으로 이상전압을 억제하였다. 이러한 형태의 피뢰기는 방전작용에 의하므로 동작이 불안정하고 응답속도가 너무 느리며 속류(follow current)에 대한 문제도 심각하였다. 그 후에 계속된 연구 개발로 1930년대에 탄화규소(SiC)가 주성분인 SiC 내장형 피뢰기가 개발되어 약 40년간 사용되어 왔으나 SiC 소자는 비선형 저항특성과 충격전류에 대한 안정도가 낮으며 속류를 방지하기 위해 갭(air gap)을 직렬로 연결을 해야하는 문제점이 있었다. 이에 대한 개선책으로 1970년대에 산화아연(ZnO)을 주성분으로 하는 ZnO 피뢰기 소자가 개발되었고, 국내에서는 1980년대부터 본격적으로 실용화가 되면서 현재까지 광범위하게

사용되고 있다.

ZnO 소자를 내장한 피뢰기는 과거 SiC 내장형 피뢰기보다 전기적 특성과 이상전압에 대한 보호성능이 우수하여 전력계통 설비의 기술적 · 경제적 발전을 이루었다. 그러나, 특고압 배전선로와 같은 전력계통에서는 부하설비의 광범위한 분포로 피뢰기의 설치개소가 많아지고, 복잡한 연계로 인해 이상전압의 발생빈도 또한 증가하여 피뢰기의 보호동작이 빈번하게 된다.[6] [11] 피뢰기의 보호동작은 이상전압을 ZnO 소자의 비선형 저항 특성에 의해 낮은 전압으로 억제시키고, 이 때 발생하는 방전전류는 대지로 방출시킨다. 일련의 보호동작 과정에서 피뢰기는 ZnO 소자의 상용주파수 동작개시전압과 제한전압의 감소, 누설전류의 증가, 절연저항의 감소 등의 전기적 특성변화와 같은 열화가 진전된다. 또한, 열화된 피뢰기가 전력계통에 계속하여 설치되어 있으면 정상운전전압에서의 과열과 계속되는 보호동작으로 피뢰기는 폭발을 일으키게되고 그 결과 지락사고와 같은 2차적인 사고를 유발시킨다.

국내 특고압 배전선로의 사고 통계를 분석해 보면 표 1과 같이 전체적인 사고 건수는 절연재료와 중전기기의 성능향상, 기기의 유지보수 기술향상 등으로 인해 전년도보다 감소하였으나, 배전선로와 피뢰기 설치개소의 증가로 인하여 개폐기 및 배전기기류들 중에서 피뢰기가 원인이 된 사고율은 98년 44.6 [%], 99년 23.2 [%]로서 상당한 비중을 차지하고 있다.

표 1. 배전선로의 주요사고 원인 통계

Table 1. Statistical reports on major failure causes in power distribution lines

(단위 : 건)

구 분	자연열화	외물접촉	자연현상	제작불량	일반인 과실	기 타	합 계
피 뢰 기	**42(50)**	17(22)	19(43)	0(11)	0(0)	5(4)	83(130)
I/S	6	26	2	0	0	0	34
선로용COS	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
기 타	62	49	37	3	0	8	159
합 계	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

특히 피뢰기의 사고 원인 통계 중에서 외부적 접촉이나 자연의 영향으로 인한 피뢰기 사고보다 자연열화로 인한 사고가 전체 피뢰기 사고의 50 [%]가 넘는다는 것을 알 수 있다. 따라서 이에 대한 정확한 분석과 대책 수립이 요구되고 있으며 피뢰기의 초기성능은 물론 사용에 따른 전기적·물성적 특성 파라미터를 관측·분석하여 피뢰기의 성능향상과 수명을 예측하는 것은 대단히 중요한 일이므로 이에 대한 많은 연구가 발표되고 있다.[11] [14]

피뢰기의 성능은 피뢰기 소자의 특성, 제조기술, 설치조건에 따라 달라지고, 열화로 인한 성능저하는 흡습, 상용주파수 과전압이나 뇌과전압과 같은 이상전압 등에 의해 피뢰기가 보호동작을 할 때 크게 진전된다. 현재 국내 전력계통의 전압은 안정적이므로 주로 뇌과전압이 주요인이 되고 있다.

피뢰기 시험평가에는 국내·외 규정 KSC 4609, ES 153-261, ANSI /IEEE C62.41, IEC 60099-4가 적용되며, 임펄스 시험과 동작책무 시험에는 4/10 [μs] 및 8/20 [μs] 단일 뇌충격전류를 일정시간 간격(≤ 50 60 [sec])으로 인가하는 방법이 적용되고 있다.[15] [17] 그림 1.1은 피뢰기 시험평가에 대한 국제규격을 나타낸 것으로 모두 단일 뇌충격전류에 대한 시험규정이다.[18]

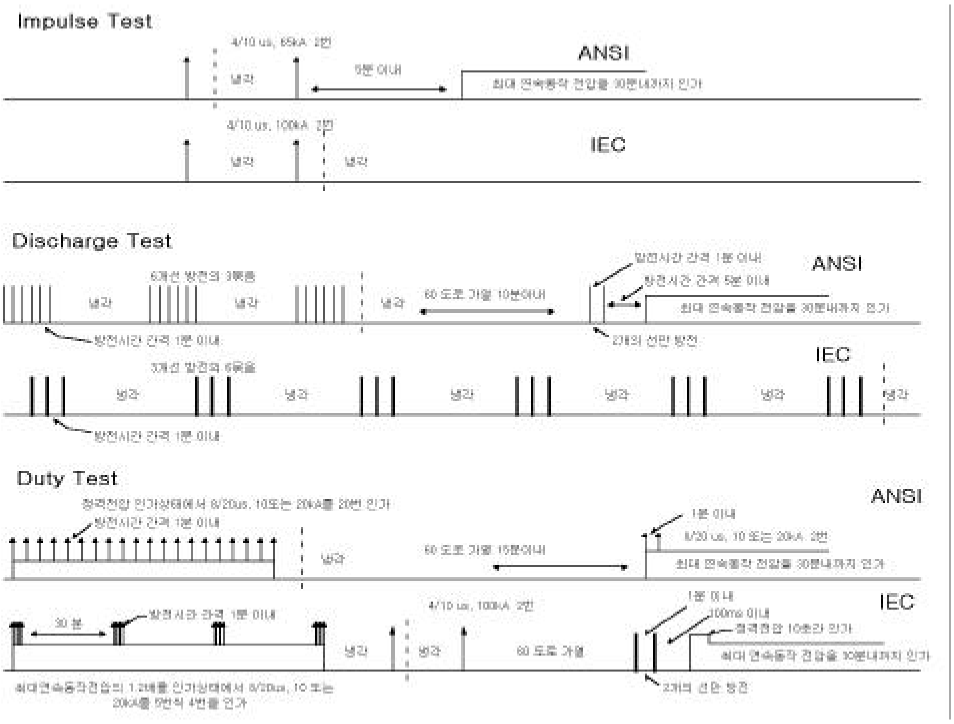


그림 1.1 피뢰기 시험기준 비교

Fig. 1.1 Comparison of the standards for lightning arrester test

그러나 자연현상에서 발생하는 낙뢰는 1회의 방전에 평균 4회, 최대 26회의 다중 뇌격이 발생하므로 전력계통에서 낙뢰에 의한 이상전압 대책으로 적용되는 피뢰기의 특성평가도 현재 사용되고 있는 단일 뇌충격전류 외에 다중 뇌격전류로 평가할 필요가 있다. 실제 낙뢰의 발생과정과 뇌방전 진전과정을 그림 1.2와 1.3에 나타내었다. 뇌방전의 진전과정은 뇌운의 부극성 전하와 정극성 전하가 만나 절연파괴가 발생하여 대기의 절연파괴 강도(약 30 [kV/cm])를 넘어서면 초기방전이 시작되어 계단상으로 진전(보통 50 [㎲]에 50 [m]씩 진전)되는 계단상리더(stepped leader)가 발생하며 정전하를 가진 계단상리더가 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 귀한뇌격(return stroke current, 약 70[㎲])이 발생한다. 그 후에 뇌운에 전하가 잔류하게 되면 후속 리더가 형성되어 대지로 진전하게 되는데, 이를 다트리더(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 뇌격시간 간격으로 3 4회 발생한다.[19]

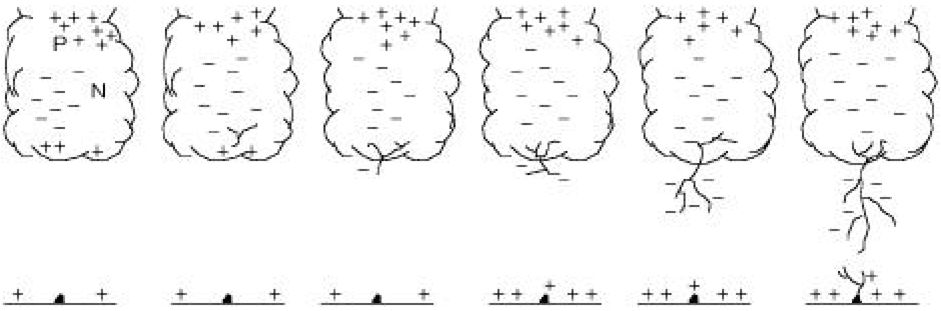


그림 1.2 낙뢰의 발생과정

Fig. 1.2 Growth progress of a return stroke

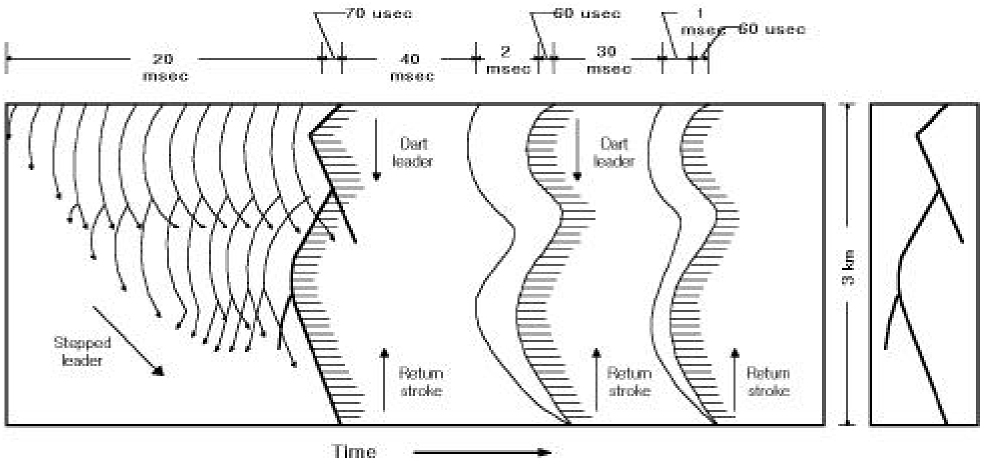


그림 1.3 **뇌방전의 진전과정**

Fig. 1.3 Progress of lightning discharge

그러므로 피뢰기의 성능 분석과 열화진단, 수명예측 등에 단일 뇌충격전류는 물론, 자연현상의 낙뢰와 같은 다중 뇌충격전류를 인가하여 평가하는 것이 필요하다고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 산화아연형 피뢰기 소자(18 [kV], 5 [kA])**에 단일 뇌충격전류**(8/20 [μs], 5 [kA])**와** 30 40 [ms]**의 시간간격을 가지는** 4**회의 다중 뇌충격전류**(8/20 [μs], 5 [kA] × 4)**를** 1**분마다 인가하고 전체 누설전류의 최대값과 실효값, 동작개시전압의 변화, 소자의 표면온도변화를 측정하였으며, 실험을 마친** ZnO **소자는 광학적 미세구조의 변화를 관찰하였다.**

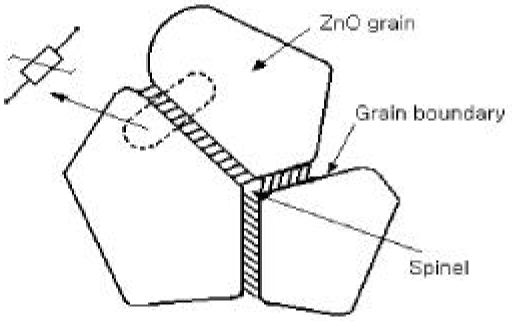
단일 및 다중 뇌충격전류에 의한 실험결과에서 ZnO 소자의 특성변화에 큰 차이가 있음을 확인하였으며 본 연구의 실험결과는 현재까지 이행되었던 피뢰기의 시험평가방법에 다중 뇌충격전류 시험방법의 필요성을 제시하였다.

제 2 장 이론

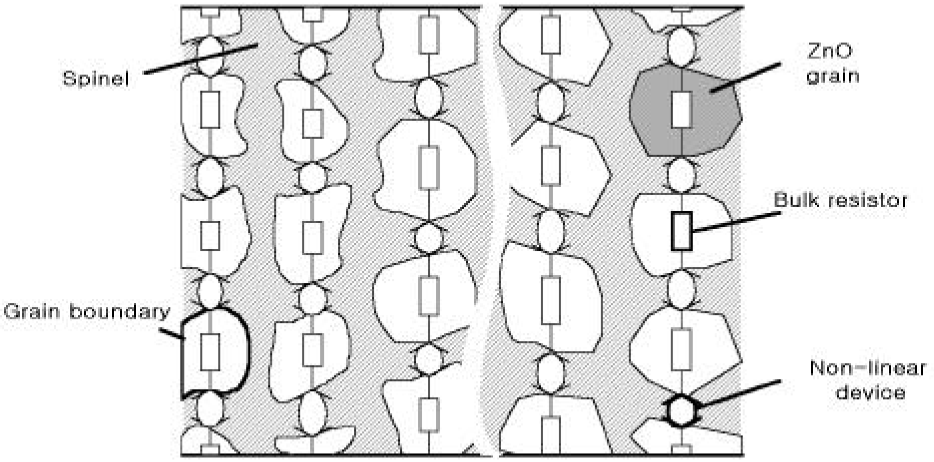
2.1 ZnO 소자의 구조 및 특성

피뢰기의 전기적 특성을 결정하는 ZnO 소자는 통상적인 세라믹 소자와 유사한 제조 과정을 거치게 되며, ZnO 분말에 여러 가지 화합물을 섞어 성형과 소결의 과정을 통해 제조되어 진다. 이러한 ZnO 분말에는 여러 종류의 산화물이 ppm단위로부터 수 [%]까지 첨가된다. 제조된 ZnO 소자는 zinc, bismuth, cadmium, boron, aluminum, antimony, cobalt, manganese, barium, titanium, silicon과 같은 화합물로 구성되고, 제조사마다 조합과 구성은 다르지만 모든 제품에 있어서 ZnO 성분이 거의 95 97 [%]정도를 차지하고 있다. 그리고 혼합분말의 순도, 미세도, 균일도가 ZnO 소자의 전기적 특성을 결정짓는 중요한 인자로 알려져 있다.

ZnO 소자의 미세구조는 세라믹 다결정체로 ZnO 입자(grain), 입계층(grain boundary), 스피넬(spinel)의 3가지 결정상으로 구성되며 그림 2.1 (a)와 (b)에 보여주고 있다. 일반적으로 ZnO 입자(grain)의 크기는 10 20 [㎛]정도의 균일한 크기로 쌍을 이루고 있으며 n형의 반도전성을 가지고 있다. 스피넬(spinel)은 ZnO 입자와 입자 사이에 존재하고 높은 저항성을 가지고 있으며 ZnO 입자의 성장을 제한하는 역할을 하지만, 소자 구성에 있어 특별한 전기적인 역할을 하지 않는다. ZnO 입자를 둘러싸고 있는 입계층(grain boundary)은 100 [Å]보다 작은 층을 이루고 있으며 주성분이 Bi_2O_3이고 ZnO 소자의 비선형 저항특성에 크게 영향을 주는 인자로 소자의 열화시 가장 큰 변화를 보인다.[20] [23]



(a) 단일 구조



(b) 복합 구조

그림 2.1 ZnO 소자의 구조

Fig. 2.1 Structure of a ZnO block

ZnO 소자를 구성하는 입자의 크기는 소자의 비선형 저항에 의한 보호 동작중 전압 제한특성인 항복전압을 결정한다. 그림 2.1 (b)와 같이 입계층의 직렬 연결 수에 따라 항복전압은 증가하며, 관계식은 식 (2.1)과 같이

나타낼 수 있다. 즉, 주어진 ZnO 소자에 있어서 입자의 크기가 작을수록 입계의 수가 많아지므로 큰 전압에서 항복이 일어나게 된다.

$$V_b = n v_b \quad [V] \qquad (2.1)$$

여기서 V_b = ZnO 소자의 항복전압
n = 직렬로 연결된 입계의 수
v_b = 입계층의 항복전압

이다.

ZnO 소자의 에너지 내량은 입계의 병렬 연결 수에 의해 결정되며, 소자의 단면적이 증가하면 입계의 병렬 연결수가 증가하므로 에너지 내량도 증가하게 된다. 그림 2.1 (a)에서 하나의 입계층은 3   4 [V]의 항복전압을 가지며, 하나의 ZnO 소자는 전압·전류특성이 대칭인 미세 비선형 저항 소자가 직·병렬로 연결된 다중접속 구조를 가지고 있다.

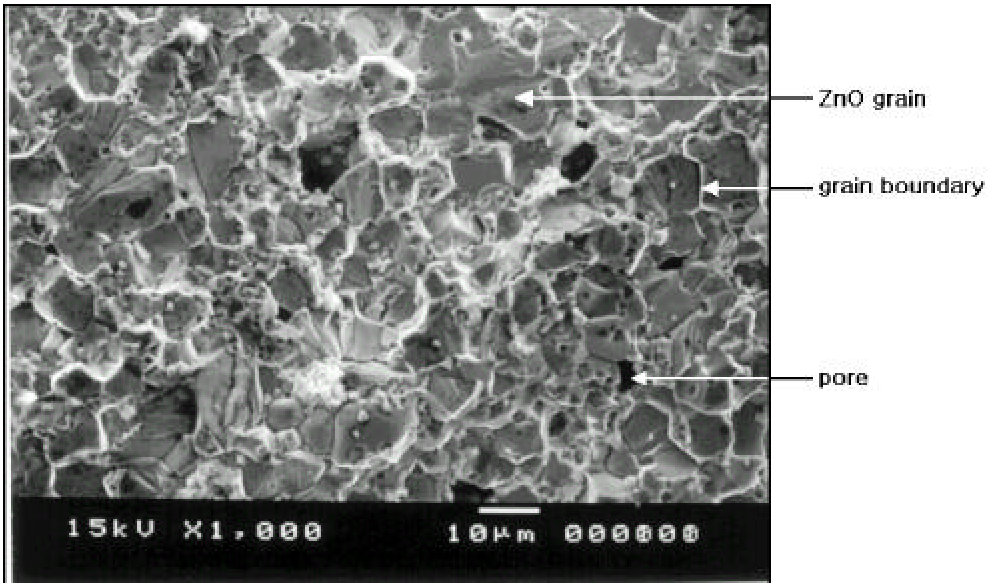


그림 2.2 ZnO 소자의 미세구조

Fig. 2.2 Micro-structure of a ZnO block

그림 2.2는 실제 ZnO 소자의 미세구조를 주사형 전자현미경(SEM)으로 촬영한 것이며 회색 부분은 ZnO 입자(grain)로서 소자 전반에 걸쳐 입자의 크기가 약 10 [㎛]정도로 균일하게 분포하고, 흰색 부분은 입계면(grain boundary)으로 ZnO 입자 사이에 걸쳐 존재하며, 검은 부분은 ZnO 소자의 제조과정에서 생성된 기공(pore)이다.

ZnO 소자와 같은 다결정상 반도체의 입계는 불순물의 편석 등에 의한 여러 가지 형태의 결함으로 인해 높은 에너지 상태를 갖게 되고 이를 낮추기 위해서 입계는 ZnO 입자로부터 전자를 빼앗아 음으로 대전된 상태가 된다. 반면 전자를 잃어버린 ZnO 입자는 전자가 부족하여 양으로 대전된 영역인 공핍층(depletion layer)이 형성된다.

이와 같이 계면에 포획된 전자와 공핍층이 양으로 이온화되어 형성된 격자 결함(ionized defects)은 에너지 밴드의 변형을 일으키면서 그림 2.3과 같이 입계를 중심으로 이중전위장벽(double schottky barrier)을 형성하고 역 bias측의 쇼트키 효과에 의하여 지배된다.[24]

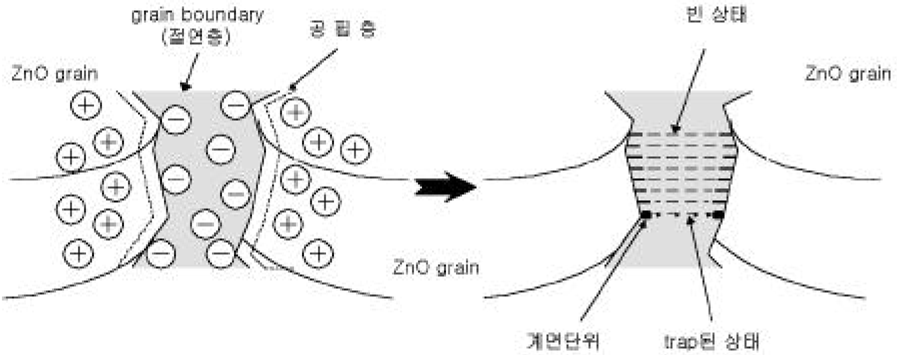


그림 2.3 ZnO 소자의 에너지대 모형

Fig. 2.3 Energy-band model of a ZnO block

그리고, ZnO 소자의 전계-전류밀도(E-J) 특성은 그림 2.4와 같이 세 개의 영역으로 구분하여 설명할 수 있다.

저전계 영역(Prebreakdown region)은 ZnO 소자가 단순한 캐패시터와 같은 역할을 하는 영역으로 정상 운전상태에서와 같이 보호동작은 하지 않고 미소한 누설전류만이 흐른다. 이 전류는 ZnO 입자와 입계층 사이의 이중전위장벽에 낮은 전위가 가해지면 열적으로 활성화된 전자가 전위장벽을 넘어감으로써 발생한다.

대전계 영역(Upturn region)은 ZnO 소자에 인가되는 전압이 중전계 영역보다 대단히 큰 경우에 나타나는 영역으로, ZnO 입자의 벌크 저항에 의한 특성이 나타나는 영역이다.

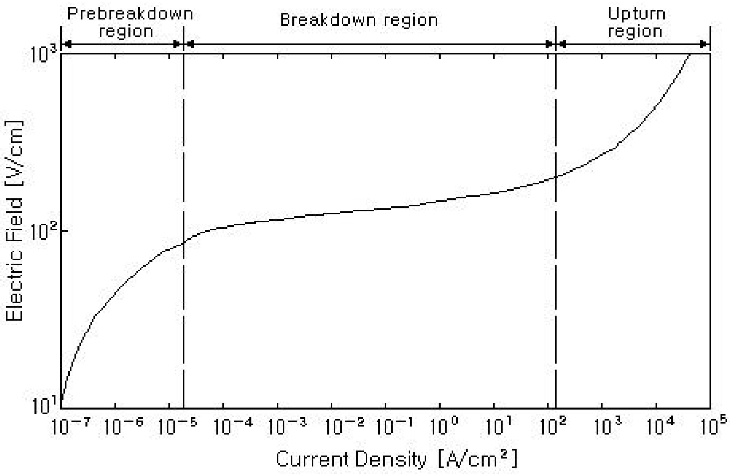


그림 2.4 ZnO **소자의 전계-전류밀도 특성**

Fig. 2.4 E-J characteristics of a ZnO block

ZnO **소자의 가장 중요한 특성을 나타내는 중전계 영역**(Breakdown region)**은 비선형 저항영역으로 약** 0.1 [mA] 100 [A] **정도의 영역을 말한다**. **소자에서의 전류밀도와 전계의 관계는 식** (2.2)**와 같이 나타낼 수 있으며** α**의 값이** 1**일 때는 단순한 저항과 같고**, ZnO **소자의 경우** 25 60 **정도의 값을 가진다**.

$$J = kE^{\alpha} \qquad [\mathrm{A/㎠}] \qquad (2.2)$$

여기서 J = ZnO **소자에 흐르는 전류밀도**

E = ZnO **소자 양단에 인가 전계강도**

k = 정수

α = 비선형 상수

이다.

이와 같은 전기적 특성을 갖는 ZnO 소자의 전기적 등가모델은 그림 2.5와 같으며 R_b는 ZnO 입자에 의한 물질의 고유저항인 벌크 저항이고, R_{gb}는 입계층의 전위장벽에 의해 생기는 비선형 저항이며 C_g는 ZnO 입자와 입자 사이에서 나타나는 정전용량을 나타낸 것이다.

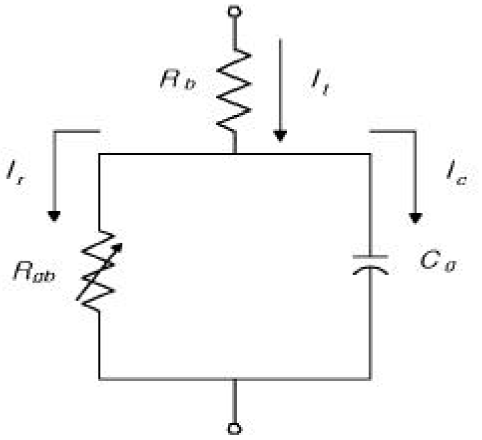


그림 2.5 ZnO 소자의 전기적 등가모델

Fig. 2.5 Electrical equivalent circuit of a ZnO block

그림 2.5에서 I_t, I_r, I_c는 전체 누설전류, 저항분 누설전류, 용량분 누설전류를 나타낸 것으로, ZnO 소자 양단에 교류전압을 인가하면 피뢰기의 등가회로에 의해 저항분 누설전류와 용량분 누설전류가 흐르게됨을 표시한 것이다.

ZnO 소자에 흐르는 누설전류의 파형 예를 그림 2.6에 나타내었다. 전체 누설전류는 인가되는 전압과 동상인 저항분 누설전류와 위상이 π/2 앞선 용량분 누설전류의 합으로 나타나며, 용량분 누설전류가 저항분 누설전류에 비해 훨씬 크게 나타난다.[25] [28]

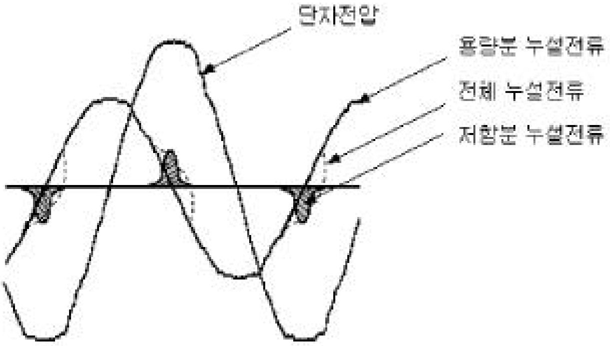


그림 2.6 누설전류 파형의 예

Fig. 2.6 Example of a leakage current waveform

2.2 열화 진전 기구

ZnO 소자가 열화되는 원인으로는 상용주파수 교류 과전압에 의한 것과 뇌충격 전류에 의한 것으로 구분할 수 있다.

상용주파수 교류 과전압에 의한 열화는 ZnO 소자에 교류전압을 인가함에 따라 소자에 누설전류가 흐르게 되고, 소자는 전류에 의해 열이 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 식 (2.3)과 같이 증가하게 된다.

$$I_r = A \exp\left(-\frac{Q}{KT}\right) \quad [\mathrm{A}] \qquad (2.3)$$

여기서 Q = 활성화 에너지

K = 볼쯔만 상수

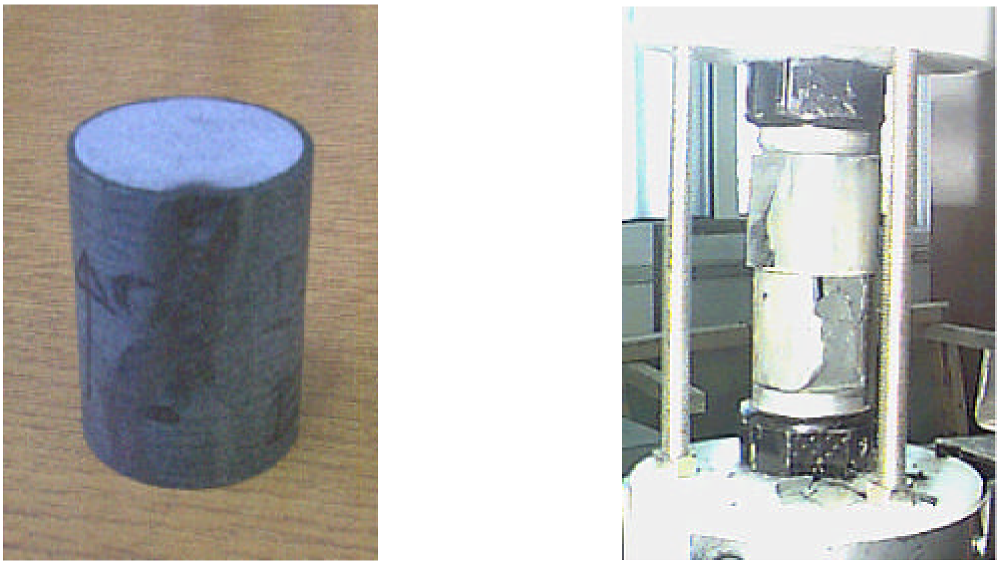
T = 절대온도

A = 정수

이다.

저항분 누설전류 I_r이 흐르는 원인은 ZnO 소자에 전계가 가해지면 열적으로 활성화된 이온의 확산이 일어나고, 이 이온이 입계층을 넘어감으로서 입계의 저항이 작아지기 때문이다. 즉, 열화는 전위장벽의 변형에 의하여 발생함을 나타내고 있으며 일반적으로 동일한 소자에 대해 높은 온도 및 대전류가 흐를 동안 열화가 진전되어 저항분 누설전류가 증가하고 저항분 누설전류의 크기가 어떤 값을 넘어서면 열발생이 커져서 짧은 시간내에 소자는 열폭주에 도달한다.

뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 열화는 상용주파수 교류 과전류에 의한 열화기구와는 다르다. 뇌충격전류는 ZnO 소자의 비선형 저항특성을 저하시켜 보호성능에 크게 영향을 주며 이것은 뇌충격전류의 경우 상용주파수 교류 과전압에 비해 ZnO 소자의 입계층에 가해지는 전계의 강도가 정상상태보다 대단히 크므로 소자의 보호동작시 보다 큰 열이 발생하고 이로 인해 입계층에 변형이 쉽게 일어나기 때문이다. 만약, ZnO 소자가 불균일한 구조적 결함을 포함하고 있다면, 그 부분에 열이 집중되고 이로 인해 ZnO 소자는 용융과정을 통한 재소결이 일어난다. 이와 같은 과정에서 ZnO 입자가 성장하고 입계층이 감소하면 소자는 정상상태의 운전전압에서도 쉽게 가열되어 열폭주가 발생하게되고 결국에는 ZnO 소자가 파괴된다.



(a) 측면 절연파괴　　　　　　　　(b) 관통파괴

그림 2.7　손상된 ZnO 소자의 사진

Fig. 2.7　Photograph of the damaged ZnO block

ZnO 소자의 파괴형태는 측면 절연파괴, 전극간 관통파괴 및 열적 충격에 의한 파괴로 구분되며 그림 2.7 (a)와 (b)에 나타내었다.

ZnO 소자의 측면 절연파괴는 뇌충격전류에 의해 소자 측면의 고저항층에서 발생하며, 전극간 관통파괴는 비교적 파두장이 긴 개폐충격전류나 교류 과전압의 큰 에너지가 흡수될 때 발생한다. 관통파괴는 소자에 핀홀(pin-hall)이 발생된 후 이 부분에 전류가 집중됨으로써 파괴된다고 생각되며, 인가된 에너지는 측면 절연파괴에서 보다 대단히 크게 된다.

열적 충격에 의한 파괴는 큰 에너지를 흡수한 경우 순간적인 온도상승에 의한 열충격으로 소자가 파괴된다고 알려져 있다. 이 경우는 소자 내부에서의 기계적 파

괴이므로 파괴단면에서는 절연파괴를 일으키지 않는다. 따라서 정상 운전전압에서는 소자의 기능에 문제가 없지만 뇌충격전류가 인가된다면 이 부분에서 전계가 집중되어 절연파괴가 발생한다.[5]

제 3 장 실험장치 및 방법

ZnO 소자의 단일 및 다중 뇌충격전류 인가에 의한 전기적 특성과 미세구조의 변화를 분석하기 위하여 동작개시전압, 누설전류, 소자의 표면온도 변화 등을 관측할 수 있도록 측정계를 구성하였으며, 실험에 필요한 뇌충격전류 발생장치를 설계 · 제작하였다.[29],[30]

실험에는 국내 배전계통의 피뢰기(18 [kV], 5 [kA])에 사용되는 ZnO 피뢰기 소자를 적용하였으며, 전기적 특성은 표 2와 같다.

표 2. ZnO 소자의 전기적 특성

Table 2. Electrical characteristics of the ZnO block

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

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 전해 콘덴서에 고전압을 인가할 수 있는 고전압 발생장치(최대 130 [kV], 2.1 [mA]), 4개의 전해 콘덴서(100 [kV], 0.5 [μF]) 뱅크 및 황동재질인 8개의 방전구갭(100 [mm])으로 구성 · 제작하였다.

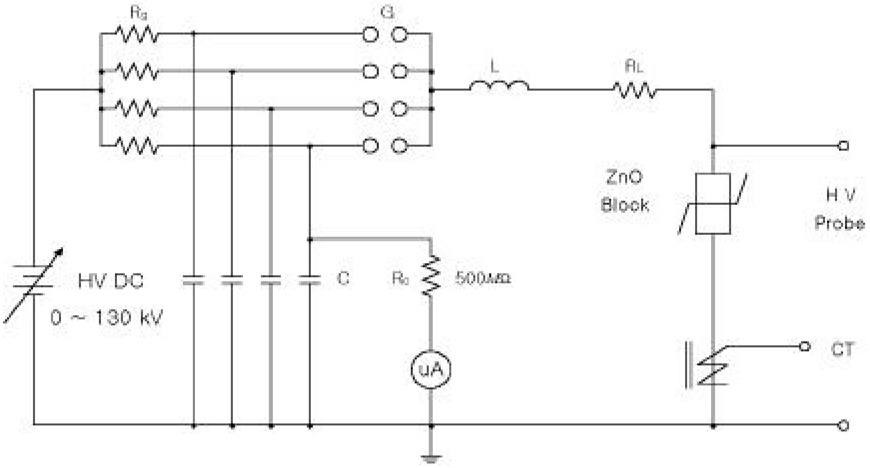


그림 3.1 실험장치 및 측정계의 구성

Fig. 3.1 Configuration of the experimental apparatus and measurement system

전해 콘덴서에 충전되는 전압은 고저항(500 [㏁])과 직류전류계(0 3000 [㎂])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 1000 : 1 고전압 프로브(Tek. P6015A, 75 [MHz], 40 [kV]$_{max}$)를 이용하여 관측하였다.

그림 3.2는 뇌충격전류의 인가 후 교류전압에서 ZnO 소자에 흐르는 누설전류의 변화를 관측하기 위해 구성한 누설전류 측정계로서 직류·교류 고전압 전원장치(HV PS DC/AC, 40 [kV] 5 [mA]), 전류 제한용 저항(R), 고주파 변류기(CT)와 전체 누설전류를 관측하기 위한 직류 전류계로 구성된다.

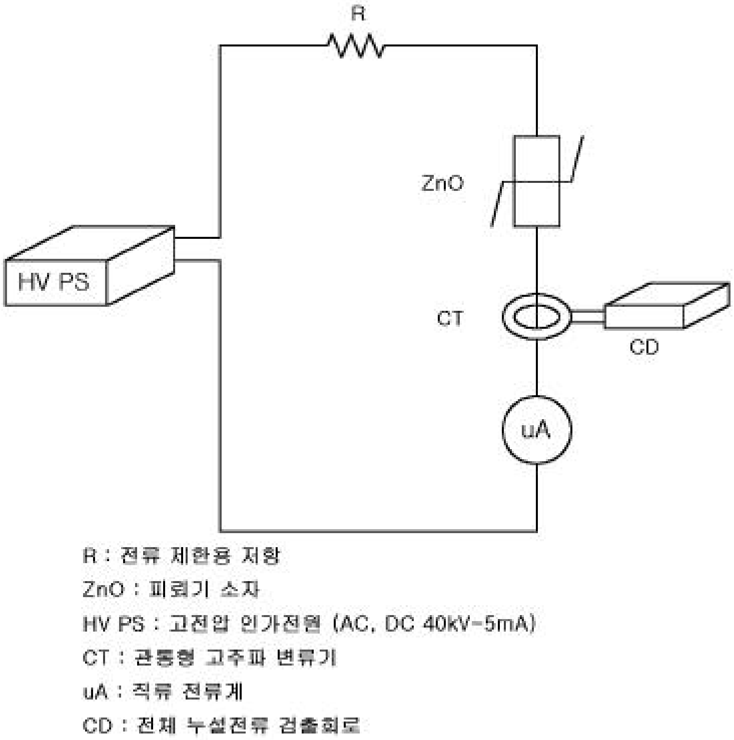


그림 3.2 **누설전류 측정계의 구성**

Fig. 3.2 Configuration of the measurement system for leakage currents

누설전류 검출회로는 증폭회로 및 마이크로 프로세서(PIC BASIC)로 구성하였으며 그림 3.3에 나타내었다. 관통형 변류기에서 입력된 신호는 증폭단을 통해 3조파 필터로 입력된 후 원신호와 비교되어 전체 누설전류 및 3조파 누설전류(저항분)의 평균값, 실효값, 최대값을 LCD를 통해 나타나도록 하였다.

3조파 필터는 중심주파수가 180 [Hz]인 대역 통과 필터로써 ZnO 소자의 전체 누설전류 중에서 3조파 누설전류 성분을 검출할 수 있도록 하였

고 또한 분해능이 0.7 [μA]로써 최대 2862 [μA]까지 전체 누설전류를 검출할 수 있도록 하였다.

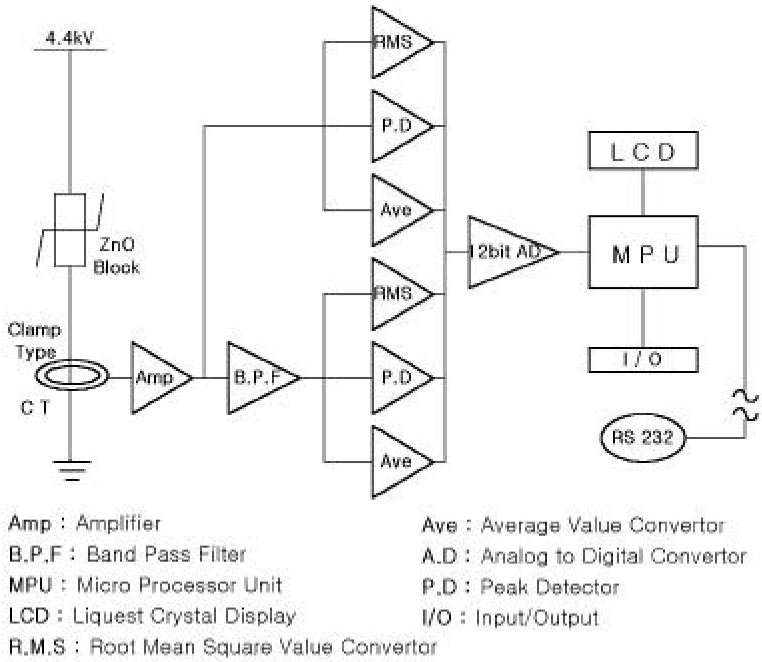


그림 3.3 **누설전류 측정회로**

Fig. 3.3 measurement circuit for leakage currents

3.2 뇌충격전류 발생장치

본 연구에서 구성한 뇌충격전류 발생장치는 R, L, C 회로로 구성되며, 등가회로는 그림 3.4와 같다. 고전압 발생장치(최대 130 [kV], 2.1 [mA])에서 인가되는 고전압은 충전저항 R_c를 통하여 4개의 축적형 전해 콘덴서 C를 충전시키고 전해 콘덴서 C의 전압이 설정된 전압 E가 되었을 때, 4개의 방전구갭 G를 통하여 L · R_s+R_o에 캐패시터의 C전하를 각각 방전시키면 저항 R_o양단에 충격전압이 발생하게된다.[31] [33]

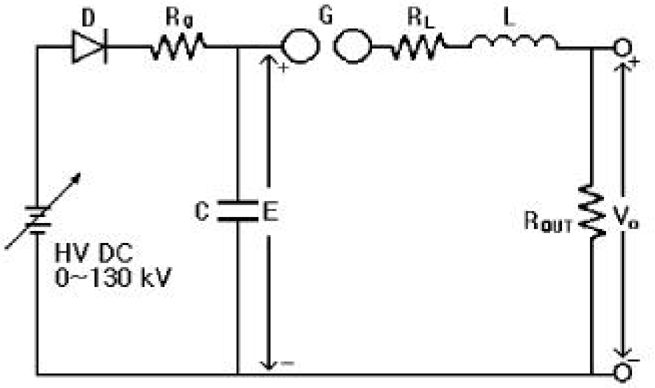


그림 3.4 뇌충격전류 발생장치의 등가회로

Fig. 3.4 Equivalent circuit of a lightning impulse current generator

그림 3.4의 등가회로에서 방전구갭 G의 방전저항을 무시하면 식 (3.1)의 회로방정식이 성립한다.

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

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

① $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 일 때

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

② $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ **일 때**

$$i = \frac{E}{R} \cdot 2\alpha t \cdot \varepsilon^{-\alpha t} \tag{3.3}$$

③ $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ **일 때**

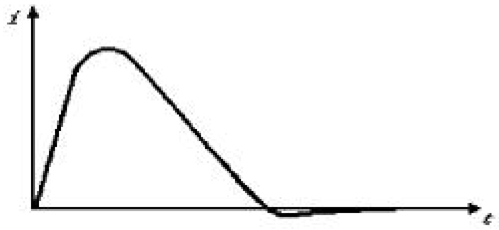
$$i = \frac{E}{R} \cdot \frac{2\alpha}{\omega} \cdot \varepsilon^{-\alpha t} \sin \omega t \tag{3.4}$$

여기서

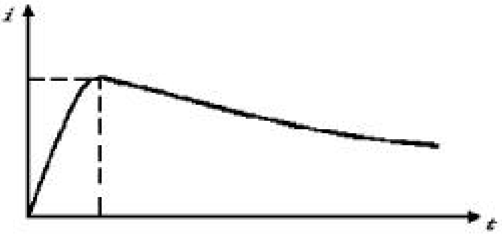
$$\alpha = \frac{R}{2L}, \qquad \beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}, \qquad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

이다.

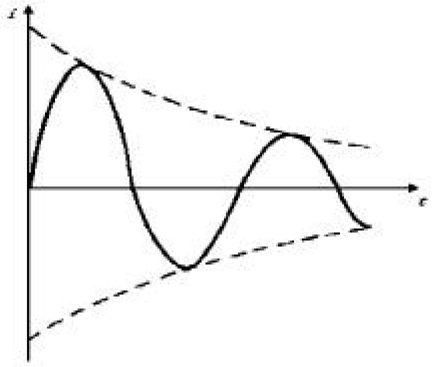
①**의 조건에서 발생되는 파형은 과제동되어 그림** 3.5 (a)**와 같이 파두가 급준하고 최대값에 도달한 후 짧은 시간 내에 감소하며**, ②**의 조건에서는 그림** 3.5 (b)**와 같이 최대값에 도달한 후 임계값까지 서서히 감소하고**, ③**의 조건에서는 그림** 3.5 (c)**와 같이 진동성분을 포함한 감쇠파형이 발생한다**.



(a) **과제동**



(b) **임계제동**



(c) **감쇠제동**

그림 3.5 **충격전류의 파형**

Fig. 3.5 Impulse current waveforms

본 연구에서는 ①의 조건에서 발생되는 형태의 뇌충격전류파형이 요구되며, 파두장은 R_L과 L로, 파미장은 R_{OUT}과 L로 조정된다.

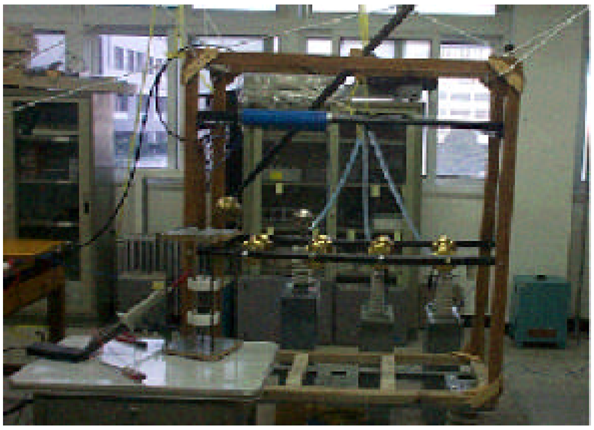


그림 3.6 다중 뇌충격전류 발생장치의 사진

Fig. 3.6 Photograph of the multiple-lightning impulse current generator

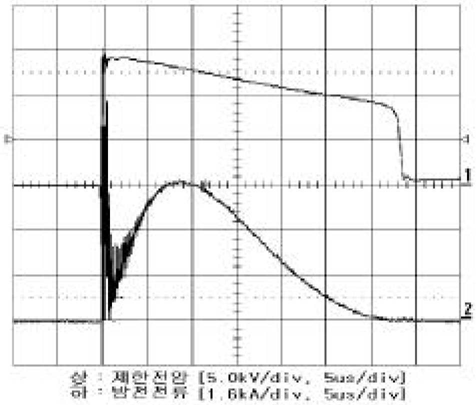
다중 뇌충격전류 발생장치는 최대 70 [kV]의 표준 뇌충격전압에서 8/20 [μs], 5 [kA]를 발생시킬 수 있으며, 뇌충격전류의 크기는 콘덴서에 충전되는 전압으로 조정할 수 있다. 그림 3.6은 본 연구에서 제작한 실험장치의 사진을 나타내었으며 표 3에는 다중 뇌충격전류 발생장치의 사양을 나타내었다.

표 3. 다중 뇌충격전류 발생장치의 사양

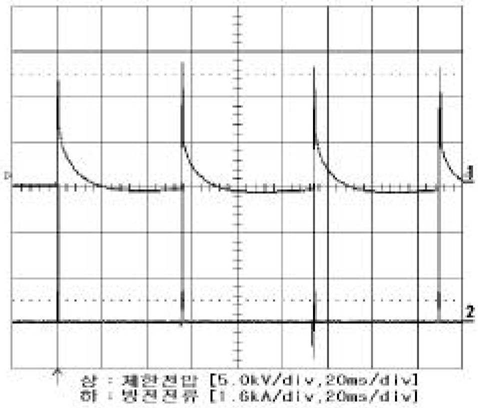
Table 3. Specification of the multiple-lightning impulse current generator

항 목	사 양	항 목	사 양
충전용저항 (R_g)	**물저항형**	**방전전류 측정용** (CT)	tr : 100[ns] Max : 50[kA] peak
방전용 스위치 (G)	**황동재질 직경** 100[mm]	**충전전류 측정용** (R_0)	**무유도 권선저항** 500[MΩ]
파형조정용 (L)	**공심단층원통형** 4 32[uH]	**축적형 콘덴서** (C)	100[kV], 0.5[μF]
파형조정용 (R_L)	**무유도 권선저항** 10[Ω]	**고전압 인가장치** ($HVDC$)	**최대** 130[kV], 2.1[mA]

그림 3.7 (a)와 (b)는 본 연구에서 제작한 뇌충격전류 발생장치에 의해 다중 뇌충격전류를 ZnO 소자에 인가할 때 소자에 흐르는 방전전류와 소자 양단의 제한전압 및 뇌충격전류의 시간 간격을 나타낸 것이다. 그림 3.7 (a)는 수평축 시간 간격을 5 [μs]로 하여 4개의 다중뇌격이 발생할 때, 그 중 1개의 방전전류와 제한전압을 나타낸 것으로 매 회마다 ZnO 소자에 인가되는 파형의 특성을 정확히 알 수 있으며 그림 3.7 (a)의 방전전류 파형이 본 연구에서 요구되는 8/20 [μs] 표준 뇌충격파형과 일치함을 확인할 수 있다. 그림 3.7 (b)는 수평축 시간 간격을 20 [ms]로 설정하여 1회의 방전에 발생하는 4중의 뇌충격전류의 시간 간격을 나타낸 것으로 약 55 [ms]마다 뇌충격전류가 ZnO 소자에 인가됨을 알 수 있다.



(a) 방전전류 및 제한전압



(b) 다중 뇌충격전류의 발생

그림 3.7 다중 뇌충격전류 발생장치에 의해 발생된 파형 예

Fig. 3.7 Typical waveforms produced by the multiple-lightning impulse current generator

3.3 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 30 [ms] 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·전류가 ZnO 소자에 인가되어 흡수되는 에너지는 식 (3.5)와 같이 시간에 대한 적분함수로 나타낼 수 있다.[34],[35]

$$E = \int v \; i \; dt \qquad [\mathrm{W}] \qquad (3.5)$$

여기서 v = 뇌충격전압 크기

i = 뇌충격전류 크기

이다.

위 식에 의하여 실험에 적용된 ZnO 소자에는 1회의 뇌충격전류로 약 1200 [J]의 에너지가 인가됨을 산출하였다.

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 인가

하고 상승시켜 가면서 정상운전전압(4.4 [kV])과 정격전압(6 [kV])에서 전체 누설전류의 최대값과 실효값의 변화와 소자에 흐르는 누설전류가 1 [㎃]로 되었을 때의 동작개시전압을 비교·분석하였다.

또한 ZnO 소자의 표면온도 변화를 관측하기 위해 소자의 절연부(glass coating) 표면에 열전대를 설치하여 군단위 실험 중 4회마다 온도를 측정하고 다중의 경우는 매 회마다 측정하였으며 군단위 실험이 끝나고 충분히 냉각시킨 후에 다시 측정하였다.

최종 단계에는 주사형 전자현미경(SEM)을 이용하여 단일 및 다중 뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 미세구조 변화를 관찰하였다.

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 기본특성 실험

본 실험에 적용한 ZnO 소자 1개의 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.

그림 4.1은 전기적 특성이 동일한 A사와 B사의 ZnO 소자에 대하여 각각의 교류측정전압에서 ZnO 소자에 흐르는 전체 누설전류의 최대값과 실효값을 나타낸 것이다.

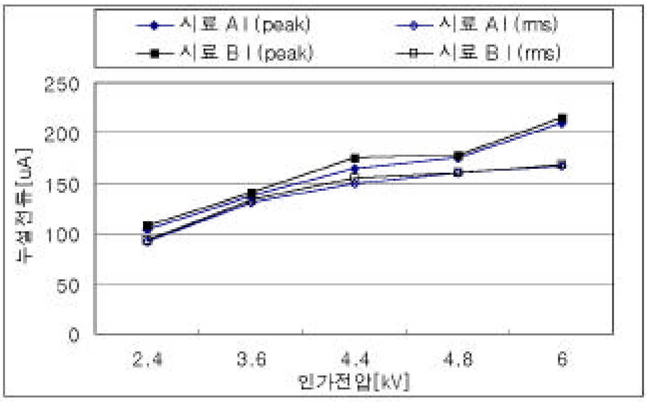


그림 4.1 교류전압에서의 누설전류 변화

Fig. 4.1 Changes of leakage current to A.C. applied voltage

그림 4.1에 나타낸 바와 같이 인가전압이 증가함에 따라 누설전류도 함께 증가함을 알 수 있었고, 신품 ZnO 소자는 운전전압 4.4 [kV]에서 전체누설전류의 최대값은 165 175 [μA]이었으며, 실효값은 150 155 [μA] 정도로 나타났다.

그림 4.2는 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.

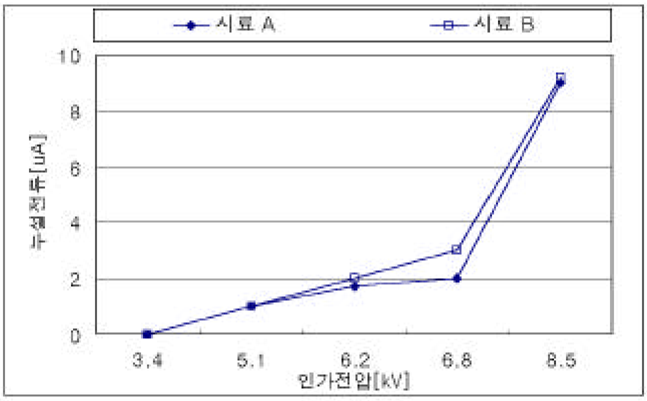


그림 4.2 직류전압에서의 누설전류 변화

Fig. 4.2 Changes of leakage current to D.C. applied voltage

ZnO 소자는 배전선로의 운전전압이 가해진 상태에서도 계절에 따라 온도가 변화하므로, ZnO 소자의 온도변화에 대한 누설전류특성을 조사하였다. ZnO 소자를 가열장치 내에 설치하고 4.4 [kV]의 상용주파수 교류전

압을 인가한 다음, 설정온도 20 [℃]부터 120 [℃]까지 측정하였으며 각 온도마다 5분간 유지한 후 측정한 결과를 그림 4.3에 나타내었고 온도 증가에 따라 전체 누설전류의 최대값과 실효값이 증가하는 것을 알 수 있었다.

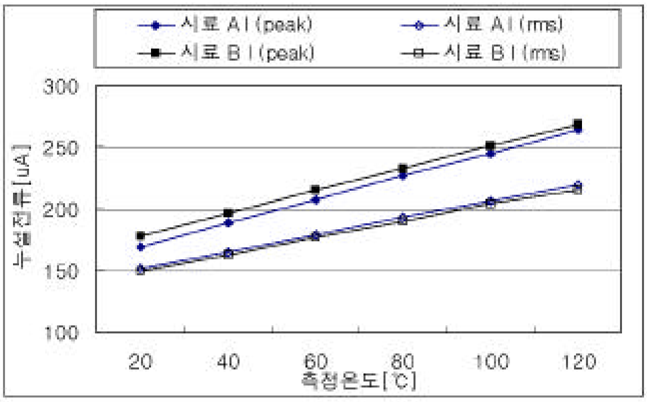


그림 4.3 온도에 의한 누설전류 변화

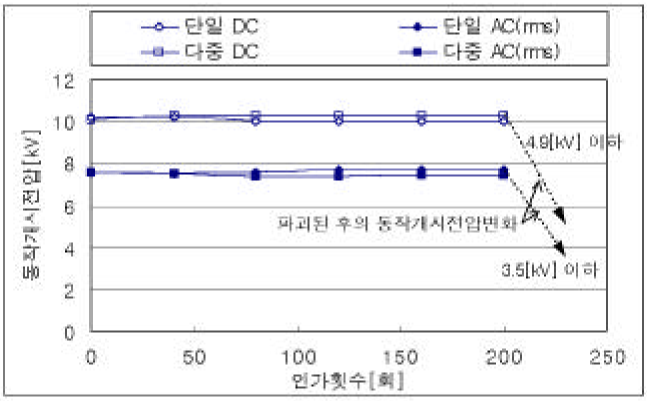
Fig. 4.3 Changes of leakage current to ambient temperatures

4.2 뇌충격전류에 의한 가속열화실험

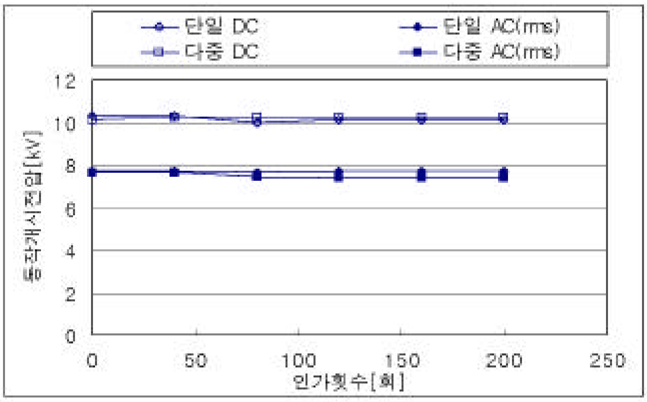
전기적 특성이 동일한 A사와 B사의 ZnO 소자에 단일 뇌충격전류와 다중 뇌충격전류로 동일한 에너지를 인가한 후, 정상운전전압(4.4 [kV])에서의 누설전류 변화와 동작개시전압을 비교하였다.

ZnO 소자에 대한 기본특성 실험에 있어서 단일 및 다중 뇌충격전압·전류를 총 200 회(다중의 경우 50 회) 인가한 후 AC, DC에 대한 동작개시전압은 그림 4.4 (a), (b)와 같이 A, B사 모두 인가전과 비교해서 변화가 거의 없었다. 동작개시전압은 이전의 여러 가지 실험을 통해서도 ZnO 소

자의 심각한 국부적인 손상이나 파괴, 또는 뇌충격전류에 의한 핀홀 (pin-hall) 생성 등의 경우에는 그림 4.4 (a)의 점선과 같이 DC는 4.88 [kV], AC는 3.5 [kV]까지 하락하지만, ZnO 소자가 어느 정도 열화가 진행되어도 그 값의 변화는 거의 없었다.[36]



(a) A 사



(b) B 사

그림 4.4 동작개시전압 변화

Fig. 4.4 Changes of reference voltages

뇌충격전압에 의한 ZnO 소자의 파괴에 대해 고찰해 보면 전류의 파고값이 크고 주기가 짧은 뇌충격전류가 ZnO 소자에 인가될 때 국부적인 급가열로 인하여 소자의 기능은 저하되고, 국부적인 열적 팽창에 의한 기계적 스트레스는 구조적 손상을 발생시키게 된다. 또한 뇌충격전류가 인가될 때, 소자의 도전율은 온도에 대하여 거의 독립적이지만, 상용주파수 정상운전전압이 인가된 상태인 저전계 영역에서의 누설전류는 온도에 대하여 강한 의존성을 나타내며 저전계 영역에서 누설전류가 크게 증가하면 일정 시간내에 소자는 열폭주에 도달하여 파괴된다.[14]

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 4.5는 ZnO 소자에 뇌충격전류를 인가하고, 그와 병행해서 소자의 표면온도를 측정하여 나타낸 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 주위온도까지 충분히 냉각을 시켰기 때문에 군단위의 초기 온도는 최초 뇌충격전류 인가시와 마찬가지로 주위온도(27 [℃])를 나타낸다.

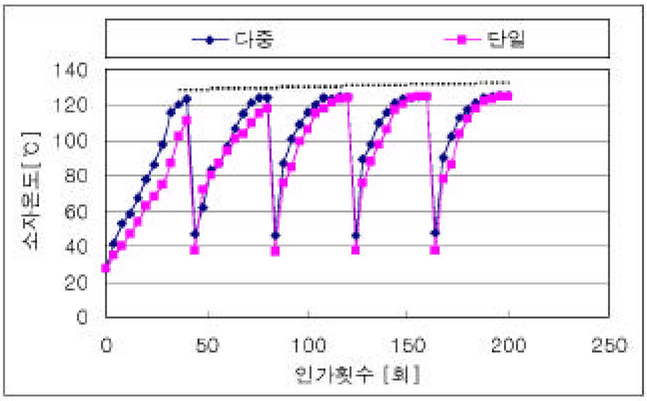


그림 4.5 ZnO 소자의 표면온도 변화

Fig 4.5 Changes of surface temperature of the ZnO blocks

또한 ZnO 소자에 단일 뇌충격전류를 인가한 경우보다는 다중 뇌충격전류를 인가하였을 때 소자의 표면온도가 더욱 급격하게 상승하는 것을 나타내었으며, 최종온도는 124 127 [℃] 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. ZnO 소자에 흐르는 누설전류는 그림 4.6에 나타낸 바와 같이 대부분이 용량성 전류이므로 인가전압보다 위상이 90° 앞서는 것을 알 수 있으며 본 연구에서는 누설전류의 최대값과 실효값을 측정·분석하였다.

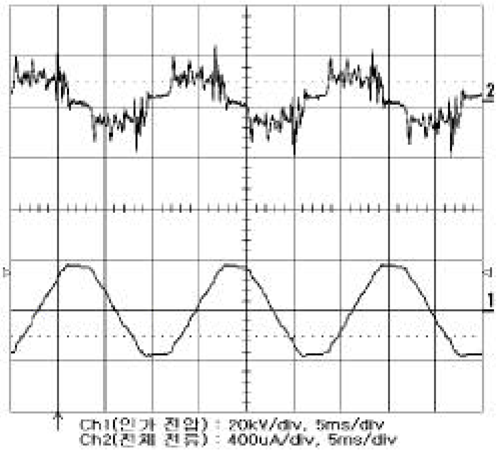
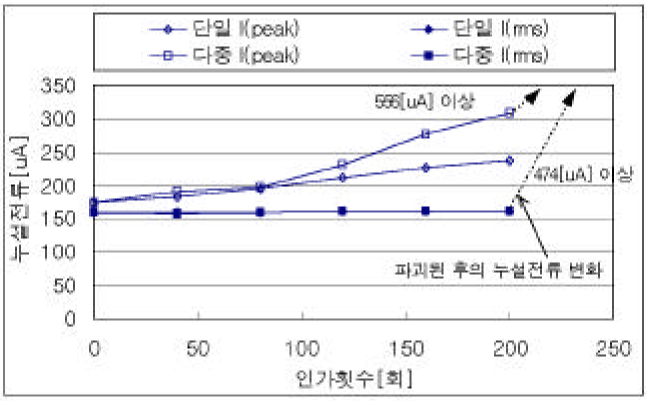


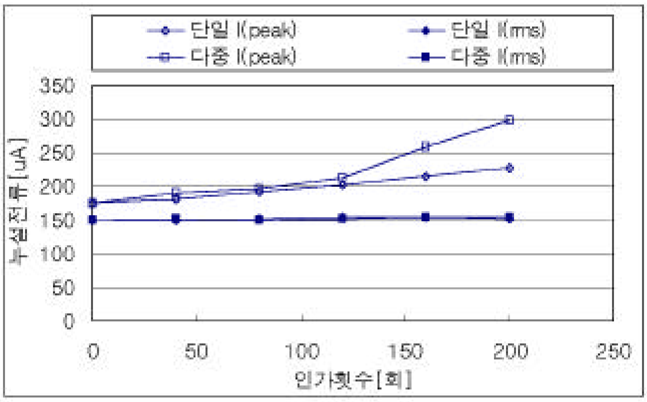
그림 4.6 **누설전류 파형 예**

Fig. 4.6 Typical waveform of a leakage current

그림 4.7 (a)**와** (b)**는** A**사와** B**사의** ZnO **소자를 대상으로 단일 뇌충격 전류를** 1**분 간격으로** 1**회씩** 200**회를 인가한 경우와** 4**회의 다중 뇌충격전류를** 50**회**(**단일과 비교하면** 200**회로 동일한 에너지량이 인가된 경우**) **인가하였을 때**, **누설전류를 측정하여 나타낸 것이다**.



(a) A 사



(b) B 사

그림 4.7 누설전류의 변화

Fig. 4.7 Changes of leakage currents

전기적 정격이 같은 2개사의 ZnO 소자에 단일 및 다중 뇌충격전류를 인가하고 누설전류의 변화를 측정한 결과, 전체 누설전류의 실효값은 변

화가 거의 없었으나, 최대값은 A사, B사 모두 초기의 누설전류에 비해 200회의 뇌충격전류 인가시 단일 뇌충격전류 인가실험에서와 마찬가지로 다중 뇌충격전류 인가방법에서도 증가하는 경향을 나타내었다.

그러나 ZnO 소자가 뇌충격전류에 의해 외부적으로 손상을 입거나 파괴가 일어나면 그림 4.7 (a)의 점선과 같이 실효값에서도 현저한 증가를 나타낸다.

전체 누설전류 실효값의 변화가 거의 관측되지 않는 것은 ZnO 소자가 그림 2.1 (b)처럼 ZnO 입자와 입계층이 직·병렬로 연결된 구조로써 입자의 크기와 입계층의 두께가 모두 동일한 것은 아니며 ZnO 소자에 뇌충격전류가 인가될 때, 입계층에 가해지는 전계의 세기도 다르다. 따라서, 입자를 통해 흐르는 에너지량도 각기 다르기 때문에 전기적 스트레스는 소자 전체에 걸쳐 다르게 나타나며 일부 입자 또는 입계만 변형이 일어나게 된다. 열화가 진전되는 과정에서 직·병렬로 연결된 일부 입자와 입계층만이 변형되었다면 정상운전전압에서 입계에 가해지는 전계가 어느 값 이상일 때 비선형 특성을 나타내면서 최대값, 즉 누설전류의 파고값이 관측될 것이며, 실효값은 전 정상운전전압의 1/2주기(8.33 [ms])에서는 큰 변화로 나타나지 않는다. 이러한 이유로 본 실험에서 전체 누설전류의 최대값만이 증가하고 실효값에는 인지할 만한 변화가 관측되지 않은 것으로 생각된다.

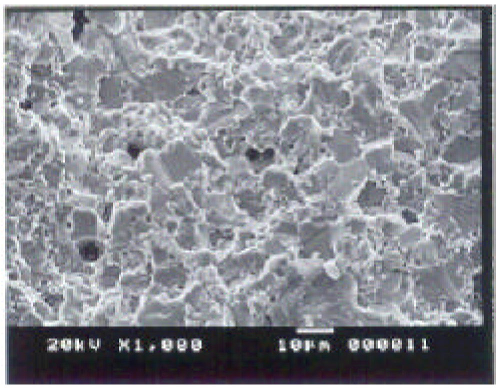
또한, ZnO 소자에 단일 및 다중 뇌충격전류를 동일한 에너지로 인가하였지만, 다중 뇌충격전류를 인가한 경우에 더 빠른 누설전류의 변화를 나타내었다. 이것은 입계층 쇼트키 장벽의 변형에 기인하는 것으로 동일한 소자에 대해 높은 온도가 유지될 경우 열화가 가속화되며, 이로 인해 누설전류는 증가한다. 특히 다중 뇌충격전류 인가시는 충격전류에 의해 소자내의 ZnO 입자가 국부적으로 가열된 상태에서 수 십 [ms]이내에 계

속되는 뇌충격전류의 인가로 계면에 전계가 더욱 집중되고, 이에 따라 단일 뇌충격전류의 인가시보다 더 빠르게 열화가 진행되어 누설전류도 급격히 증가하는 것으로 생각된다.[37]

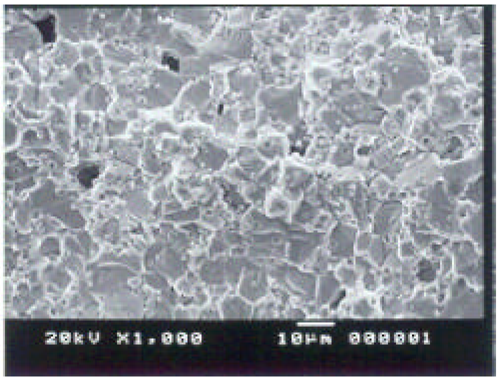
4.3 광학적 분석

본 연구에서는 뇌충격전류 인가에 따른 ZnO 소자의 미세구조 변화를 분석하기 위하여 뇌충격전류를 단일 및 다중의 2가지 방법으로 200회 인가한 ZnO 소자를 기계적으로 파괴하여 얻은 시편에 대해 주사형 전자현미경(SEM)으로 관측하였다.

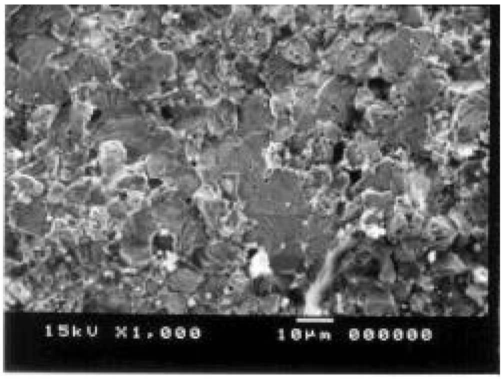
그리고 단일 및 다중 뇌충격전류를 인가한 ZnO 소자의 미세구조를 그림 4.8 (a)와 (b)에 나타내었다. 신품의 미세구조는 일반적으로 ZnO 입자의 크기가 10[㎛] 정도로 균일하게 배열되어 있으나, 뇌충격전류로 인해 열화가 진전되면 입계층이 좁아지고 입자가 성장하게 된다.



(a) 단일 뇌충격전류



(b) 다중 뇌충격전류



(c) 파괴된 소자

그림 4.8 ZnO 소자의 미세구조 변화

Fig. 4.8 Changes of a micro-structure of ZnO blocks

그림 4.8 (a) 와 (b)를 비교하면, 전체적으로 입자의 배열이 다소 불균일해지고 입자의 크기도 12 17 [㎛]정도로 성장한 것을 알 수 있다. 이것은 뇌충격전류의 흡수시 고전계와 열누적으로 인하여 입계층이 감소

하고 ZnO 입자가 성장한 것이다. 또한 동일한 에너지량을 인가하였을 때 단일 뇌충격전류를 인가한 경우의 평균 입자 직경이 12.7 [㎛]이지만, 다중 뇌충격전류를 인가한 경우의 평균 입자의 직경은 13.6 [㎛]로 입자의 크기가 조금 더 크게 성장한 것을 알 수 있었다.

또한 단일 및 다중 뇌충격전류에 의한 입자의 크기 변화를 비교하기 위하여 실제 뇌충격전류로 인해 파괴된 ZnO 소자의 미세구조를 그림 4.7 (c)에 나타내었다. 그림 4.8 (c)에 나타낸 ZnO 소자 입자의 평균 직경이 20 [㎛]이상으로 단일 및 다중 뇌충격전류를 인가한 후에 측정한 미세구조에서보다 입자의 크기가 훨씬 더 성장한 것을 알 수 있다.

제 5 장 결 론

자연현상에서 발생하는 낙뢰는 1회의 방전에 평균 4회의 뇌격을 포함하므로, 전력계통에서 이상전압에 대한 보호대책으로 사용되는 피뢰기의 특성도 다중 뇌충격전류에 의해 평가할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 ZnO 소자에 단일 뇌충격전류와 다중 뇌충격전류를 인가하여 소자를 가속열화시키고, 이에 대한 ZnO 소자의 전기적, 광학적 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ZnO 소자는 뇌충격전류의 인가로 열화가 진전되었으며 열화진전에 따라 ZnO 소자의 동작개시전압은 변화가 없었으나, 실효값 누설전류의 미소한 증가와 최대값 누설전류의 현저한 증가를 나타내었다.
2. 1분 간격으로 단일 뇌충격전류를 인가하는 방법과 4중의 다중 뇌충격전류를 인가하는 방법으로 ZnO 소자에 동일한 에너지를 가하였을 때, 다중 뇌충격전류를 인가한 경우가 누설전류의 최대값이 더 크게 증가하는 경향을 보였다. 이것은 다중 뇌충격전류 인가시 충격전류에 의해 ZnO 입자가 국부적으로 가열되어 있고, 계면에 전계가 집중되어 있는 상태에서 연속적인 충격전류가 인가되기 때문에 단일 뇌충격전류의 인가시보다 빠르게 열화가 진행되어 나타나는 현상으로 판단된다.
3. 상기 2가지 실험방법으로 뇌충격전류를 인가하였을 때, ZnO 소자의 미세구조는 다중 뇌충격전류의 경우가 단일 뇌충격전류의 경우보다 입자의 크기가 조금 더 크게 성장한 것이 확인되었다.

이와 같은 실험결과로부터 피뢰기 및 ZnO 소자의 방전내량과 제한전압 등의 보호성능은 현재 시행되고 있는 단일 뇌충격전류 인가에 의한 시험은 물론 다중 뇌충격전류에 의한 시험평가가 수행되어야 전력계통에서 피뢰기의 보호성능을 정확히 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

[참고문헌]

[1] E. Beck, Lightning Protection for Electric Systems, New York: McGraw-Hill, pp. 43 60, 1954.

[2] P. Chowdhuri, Electromagnetic Transients in Power Systems, Research Studies Press, pp. 266 296, 1987.

[3] 橋本信雄, “雷とサージ　發生のしくみから被害防止まで”, 電氣書院, pp. 79 114, 1995.

[4] 今井康友 外, “架空地線直擊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驗法調査專門委員會委員, “酸化亞鉛形避雷器の特性評価試驗法調” 日本電氣學會技術報告 第474号, 1993.

[6] James J. Burke, “Application of mov gapped arrester on non effectively grounded distribution systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, pp.794 800, 1991.

[7] 金方直弘, 齊藤宗敬, 大木秀人, 中井仁志, “避雷器の漏れ電流檢出の開發”, 日本電氣學會電力・エネルギー部門大會, pp. 848 849, 1994.

[8] 岡藤伸夫, 西岡陸一, 前川 洋, 祐木昭彦, “酸化亞鉛形避雷器の漏れ電流檢出方式の提案”, 日本電氣學會電力・エネルギー部門大會, pp. 850 851, 1994.

[9] 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.

[10] S. S. Kershaw, G. L. Gaibrois, K. B. Stump, “Applying metal-oxide surge arresters on distribution systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 301 307, 1989.

[11] W. G. Carlson, T. K. Gupta, A. Sweetana, “A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters for AC Application”, IEEE Transactions on Power System, Vol. PWRD-1, No. 2, pp. 67 74, 1986.

[12] M. Bartkowiak et al.,“Failure Modes and Energy Absorption Capability of ZnO Varistors”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp. 152 162, 1999.

[13] 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.

[14] Jinbo Kuang et al., “Temperature Distribution in a ZnO Arrester Subjected to Multiple Current Impulses”, Proceeding of the 1996 International Symp. on Electrical Insulation, pp. 494 497, 1996. 7

[15] 한국공업표준협회, “ 산화아연형 갭리스 피뢰기”, KSC 4609, 1987.

[16] 한국전력공사, “전력용 피뢰기”, ES 153-261, 1984.

[17] The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., “IEEE Std. for Metal-Oxide Surge Arresters for AC power Circuits”, ANSI/IEEE C62.11, 1987.

[18] Andre Hamel, Guy St-jean, “Comparison of ANSI, IEC and CSA standards' durability requirements on station-type oxide surge

arresters for EHV power systems”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1283 1298, July 1992.

[19] Martin A. Uman, The Lightning Discharge, Academic Press Inc., pp. 1 36, 1987.

[20] Lionel M. Levinson, Herbert R. Philip, “ZnO Varistors for Transient Protection”, IEEE Transaction on Parts, Hybride and Packaging, vol. PHP-13, No.4. December 1977.

[21] 中島昌俊, 向江和郎, 堤睦男, 金子英男, “新形GIS用避雷器の開發”, 日本電氣學會 論文誌, B116巻, 10号, pp. 1240 1245, 1996.

[22] Kazuo Mukae, et al,, “Zinc Oxide-Praseodymium Oxide Elements For Surge Arresters”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, April 1988.

[23] S. S. Kershaw, G. L. Gaibrois, K. B. Stump, “Applying metal-oxide surge arresters on distribution systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 301 307, 1989.

[24] Yoshihisa Yamashita, Sinzo Yoshikado, “Evaluation of factors in the degradation of ZnO varistor”, T. IEE Japan, Vol.119-B, No.6, 1999.

[25] 小島宗次, 菅雅弘, 舛澤弘一, “酸化亜鉛避雷器の依存モデル”, 日本電氣學會 論文誌, B114巻, 3号, pp. 310 316, 1994.

[26] Philip p. Barker et al, “Characteristics of Lightning Surge Measured at Metal Oxide Distribution Arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 301 310, 1993.

[27] 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

檢討", **日本電氣學會 放電・高電壓 合同 硏究會資料**, ED-95-186, HV-95-57, 1995.

[28] **大坪昌久 外**, "**配電用直列ギャップ付避雷器の**橾**返し動作による特性**変**化**", **日本電氣學會 論文誌**, B113**卷**, 4号, pp. 390 396, 1993.

[29] **길경석 외**, "**다중 뇌충격전류에 의한 피뢰기 소자의 전기적 특성 변화**", **대한전기학회 하계종합학술대회 논문집**, C**권**, pp. 2035 2037, 2000. 7.

[30] **길경석 외**, "**피뢰기 누설전류 분석장치의 설계 및 제작**", **대한전기학회 방전 및 고전압 연구회 춘계학술대회 논문집**, pp. 65 68, 1999.

[31] **宅間**, **柳父**, **高電壓大電流工學**, **日本電氣學會**, pp. 121 125, 1988.

[32] **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**, pp. 139 163, 1991.

[33] **岩崎晴光**, **岡田昌治**, **村井由宏**, **川島化之**, "**避雷器のインパル電流試驗回路の解析**", **日本電氣學會 論文誌**, B102**卷**, 3号, pp. 169 176, 1982.

[34] 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, July 1993.

[35] R. A. Sargent et al."Effects of Multiple Impulse Currents on the Microstructure and Electrical Properties of Metal-oxide Varistors", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 3, June 1992.

[36] **길경석**, **한주섭**, **박영호**, "**뇌충격 전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성변화**", **대한전기학회 논문지**, Vol.48, No.7, pp. 550-555, 1999.7

[37] S. Tominaga, Y. Shibuya et al., "Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1548 1556, 1980.

감사의 글

2년의 대학원생활을 통해 얻어낸 본 논문의 완성까지 아낌없는 격려와 질타를 해주시고 관심과 배려를 베풀어주신 길경석 지도교수님께 깊은 감사의 말씀을 올리며 부족한 저의 논문을 보완하도록 많은 지적과 관심을 베풀어주신 이병우 교수님, 심준환 교수님께 감사드립니다.

학부와 대학원생활을 통해 전공과 인생에 대해 수많은 가르침으로 일깨워주신 김윤식 교수님, 박관수 교수님, 이성근 교수님, 전태인 교수님께 감사드립니다.

동고동락하며 본 논문을 완성하는데 많은 도움을 주고 힘이 되주었던 천상규 학우와 김일권 학우, 손원진 후배에게 감사드리며 직장과 학업을 병행하며 힘들지만 웃음을 지었던 김점식 님, 김명진 후배와 바쁜 시간 속에서도 조언을 해주었던 한주섭 선배, 연구실 운영에 노력하는 송재용 선배에게도 감사를 드립니다. 그리고 대학원 생활의 틀에서 항상 웃으며 마음의 여유를 가지게 해주었던 전력전자연구실, 전기제어연구실, 전기기기연구실, 광공학연구실의 여러 학우와 후배 그리고 선배님들에게도 감사를 드립니다.

또한, 저를 지금까지 지켜보시며 보이지 않는 힘으로 저를 든든하게 지켜주셨던 부모님께 깊은 감사를 드리며 학교생활에 지칠 때마다 활력과 격려를 주었던 누님내외, 동생내외에게도 감사를 드립니다. 평생의 반려자로서 어려운 환경 속에서도 마음의 후원자 역할을 해주었던 아내에게도 감사를 드립니다.

교내에서 동문 선배로서 그리고 후배로서 많은 격려와 힘이 되어주신 전병설 선배님, 채양범 선배님, 최경식 선배님, 박관수 선배님과 부산중앙고 동문 여러분께 깊은 감사를 드리며 해양대학교 전기공학과 1기 동기들에게 감사를 드립니다.

끝으로 제가 본 논문을 쓸 수 있도록 관심과 격려를 보내주었던 모든 분들에게 감사를 드리며 하시는 일 모두 이루시고 건강함과 행복이 가득하기를 기원하며 글을 맺습니다.