



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

서지보호기의 열화와 온라인
진단장치에 관한 연구

A Study on the Deterioration and On-line Diagnosis Equipment
for Surge Protective Devices



2016年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朴 景 守

本 論文을 朴景守의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 金 潤 植 ①

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ①

委 員：工學博士 張 樂 元 ①



2016年 6月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朴 景 守

목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	iii
Abstract	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 관련 이론	3
2.1 서지의 발생 및 보호	3
2.2 산화아연형 바리스터	7
2.3 열화진단기술	11
제 3 장 가속열화 실험	14
3.1 서지발생장치	14
3.2 실험계	20
3.3 전기적 특성 변화	22
제 4 장 서지보호기 진단장치	30
4.1 회로 설계	30
4.2 진단장치 제작	36
4.3 적용 실험	38

제 5 장 결 론 42

참 고 문 헌 43



그림 및 표 목차

<그림 목차>

그림 1.1	서지보호소자	2
그림 2.1	서지의 종류	3
그림 2.2	뇌 방전의 종류	4
그림 2.3	뇌 서지의 발생	5
그림 2.4	서지 차단 원리	6
그림 2.5	ZnO 소자의 미세구조	9
그림 2.6	등가회로	9
그림 2.7	V - I 특성	10
그림 2.8	산화아연형 바리스터의 열화 원인과 현상	11
그림 2.9	열화 진전에 따른 누설전류의 변화	12
그림 2.10	열화 진전에 따른 기준전압의 변화	13
그림 3.1	서지발생장치의 등가회로	14
그림 3.2	제동 조건	16
그림 3.3	시뮬레이션 결과	17
그림 3.4	서지발생장치의 흐름도	18
그림 3.5	서지발생장치	19
그림 3.6	실험계	21
그림 3.7	누설전류의 변화	23
그림 3.8	기준전압의 변화	26
그림 3.9	제한전압의 변화	29
그림 4.1	누설전류 측정회로	31
그림 4.2	교정	32

그림 4.3	출력전압 - 누설전류	32
그림 4.4	기준전압 측정회로	33
그림 4.5	제한전압 측정회로	35
그림 4.6	서지보호기 진단장치	37
그림 4.7	누설전류	39
그림 4.8	기준전압	40
그림 4.9	제한전압	41

<표 목차>

표 2.1	서지보호소자	7
표 3.1	제동 조건	17
표 3.2	바리스터의 사양	20
표 3.3	바리스터 A의 누설전류	24
표 3.4	바리스터 B의 누설전류	25
표 3.5	기준전압	27
표 4.1	측정 파라미터	30
표 4.2	입력전압에 따른 출력전압의 변화	34
표 4.3	적용 실험 결과	38

A Study on the Deterioration and On-line Diagnosis Equipment for Surge Protective Devices

by Kyoung-Soo Park

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



Abstract

This thesis dealt with the deterioration and an on-line diagnosis equipment for surge protective device (SPD). An accelerated aging test was carried out using a $8/20 \mu\text{s}$ standard lightning impulse current to analyze the changes of electrical characteristics and to propose the diagnostic parameters and the criterion for deterioration of metal oxide varistor (MOV) which is the core component of SPDs.

The leakage current of MOV increased whereas the reference voltage decreased with the aging process. When they changed more than 10% compared with the initial values, the deterioration was accelerated. On the other hand, since there was little change in the

clamping voltage, it could not be used to evaluate the deterioration but its waveform could be applied to verify the operation of varistor. In addition, the criterion of soundness MOV was proposed.

Based on the experimental results, an on-line diagnosis equipment for SPD was fabricated, which can measure total leakage current, reference and clamping voltage. The leakage current measurement circuit is composed of a low-noise amplifier and a clamp type zero-phase current transformer(ZCT). A linear controller, a data acquisition module, and a HVDC supply were used in the measurement of reference voltage. The clamping voltage measurement circuit consists of a surge generator and a coupling circuit.

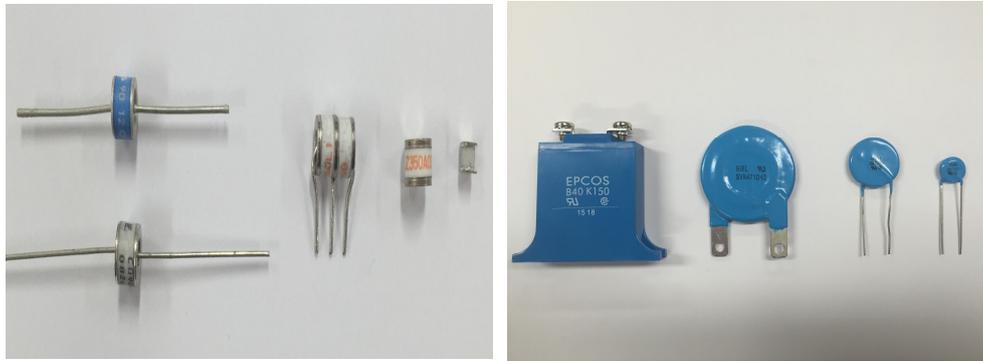
In a calibration process, measurement error of the prototype equipment was less than 3%. From the experimental results, it was confirmed that the proposed equipment is available to diagnose the SPD condition in operation.

제 1 장 서 론

전력 계통 및 기기는 서지 및 과전압(Overvoltage)의 영향을 받는다. 2015년 4월 서울 지하철 4호선에서 낙뢰로 인하여 변전소가 파손되어 지하철 운행이 1시간 40분 동안 중단되었다. 또한 충북의 어린이집에서 낙뢰로 인한 화재가 발생하였다. 이처럼 임펄스전압의 발생으로 인적 피해 및 경제적 손실을 초래한다.

임펄스전압으로부터 전력 계통 및 기기를 보호하기 위해서 서지보호기(Surge protective device, SPD)를 설치한다. 서지보호기는 피보호기기와의 직·병렬로 설치되며, 이상전압을 절연 내력 이하로 낮춰주는 역할을 한다. 동작 형태에 따라 이상전압 발생 시 임피던스가 증가하는 Isolator와 서지 전류의 흐름을 접지측으로 우회시키는 크로바형(Crowbar type) 및 전압 상승을 억제하는 클램프형(Clamp type) 소자로 분류할 수 있다^[1]. 그 중 비선형 저항특성 및 에너지 흡수 능력이 우수한 클램프형의 산화아연 바리스터(Zinc oxide varistor)를 사용한다.

반복적인 보호동작과 환경적 요인으로 바리스터의 열화가 진전된다. 열화된 바리스터는 누설전류의 증가로 정상운전전압에서 과열되며, 열폭주(Thermal runaway)로 선로의 단락이 발생한다. 이로 인하여 전력공급 중단 및 화재 등의 2차 사고를 유발한다^{[2]~[5]}. 전력 설비의 안정적인 운영 및 대규모 정보·통신 설비, 서버 및 빅데이터 저장 시스템의 신뢰성 향상을 위하여 진단기술 및 장치에 관한 연구가 진행 중이다^{[6]~[10]}.



(a) 가스 튜브(크로바형)

(b) 바리스터(클램프형)

그림 1.1 서지보호소자

Fig. 1.1 Surge protective devices

기존 진단장치는 Off-line 상태에서 사용한다. 즉 바리스터를 진단하기 위해 전원을 차단해야 하므로 주기적인 측정이 불가능하다. 또한 기준전압에 대한 정보만 제공하기 때문에 정확한 상태를 판단하기 어렵다. 이를 보완하기 위해 활선 상태에서 진단할 수 있는 On-line 진단장치의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 서지보호기의 열화 및 On-line 상태 진단장치의 설계 및 제작에 관하여 기술하였다. 산화아연형 바리스터의 전기적 특성 변화 및 건전성 기준을 제시하기 위하여 가속열화 실험을 수행하였다. 측정 결과를 분석하여 진단장치의 파라미터를 선정 한 후, 적용 실험을 통하여 신뢰성을 평가하였다.

제 2 장 관련 이론

2.1 서지의 발생 및 보호

서지(Surge)란 전력 계통 및 통신 설비에 발생하는 고전압·대전류의 임펄스를 지칭한다. 유도, 방사 및 전도의 형태로 설비에 유입되며 최종적으로 전도의 형태로 전달된다.

서지의 특성을 결정하는 주요한 파라미터는 상승시간(Rise time), 지속시간(Duration time) 및 진폭(Amplitude) 등이 있다. 상승시간과 지속시간은 수 ns에서 수 ms로 짧은 시간동안 변하기 때문에 전력 계통에 치명적인 영향을 준다. 서지는 그림 2.1과 같이 잡음(Noise)과 다르게 분류되며, 발생 원인은 뇌 방전 현상에 의해 발생하는 뇌서지, 개폐기의 조작에 의해 발생하는 개폐서지로 구분된다. 또한 EMP(Electro magnetic pulse), ESD(Electro static discharge) 등 급격한 전·자기 변화에 의해 발생하기도 한다^[11].

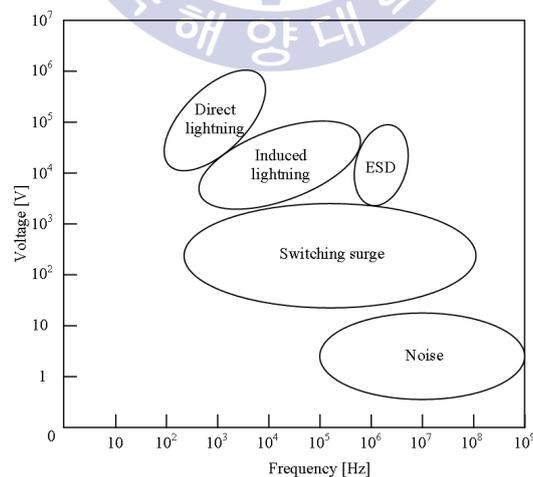


그림 2.1 서지의 종류

Fig. 2.1 Types of surges

뇌 방전(Lightning discharge)은 뇌운에 의해 형성된 전계의 세기가 대기의 절연과괴강도를 초과할 때 발생하는 방전현상이다. 방전경로인 공기가 팽창하여 천둥소리 및 번갯불을 동반하며, 급격한 전계의 변화로 주변에 전자파 장애를 유발한다. 이러한 뇌 방전의 성질을 이용하여 발생위치를 탐지하는 연구도 활발히 진행 중이다^[11].

뇌 방전의 종류는 그림 2.2와 같이 뇌운의 형상 및 방전의 발생 위치에 따라 다양하게 나타난다. 동일한 뇌운 내부에서 발생하는 운내 방전(Intra-cloud discharge)과 다른 뇌운 간에 발생하는 운간 방전(Inter-cloud discharge), 뇌운의 전하와 인근 대기간에 발생하는 대기 방전(Air discharge) 및 뇌운과 대지 사이의 방전인 낙뢰(Lightning)로 구분된다.

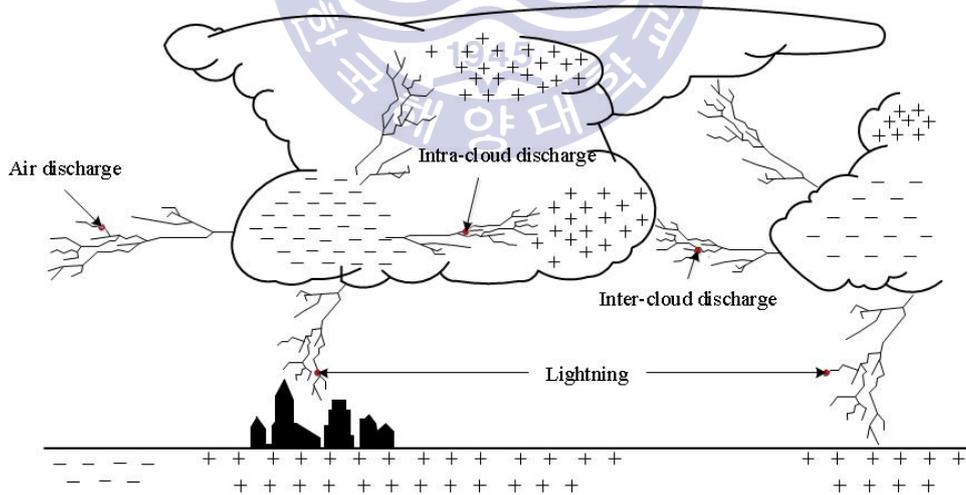


그림 2.2 뇌 방전의 종류

Fig. 2.2 Types of lightning discharges

낙뢰는 뇌운 속에 존재하는 전하가 방전에 의해 지면으로 흘러 들어오는 현상이며, 수만 볼트의 전압과 수만 암페어의 전류를 동반한다. 낙뢰에 의하여 인명 피해, 화재 및 전기·전자·통신 기기의 고장 등의 경제적 손실이 발생한다.

낙뢰에 의해 전력 계통에서 발생하는 뇌 서지는 그림 2.3과 같이 지상의 건축물 및 전기설비에 직접적으로 뇌격하는 직격뢰(Direct lightning)와 송전선로, 통신선로 및 전기설비 주변에서 뇌격하여 전계, 자계의 급격한 변화에 의해 발생하는 유도뢰(Induced lightning)가 있다. 직격뢰의 경우, 물리적 손상 및 화재를 일으키고, 유도뢰는 방송, 통신 장비 및 기타 전자 기기 등의 파손을 초래한다.

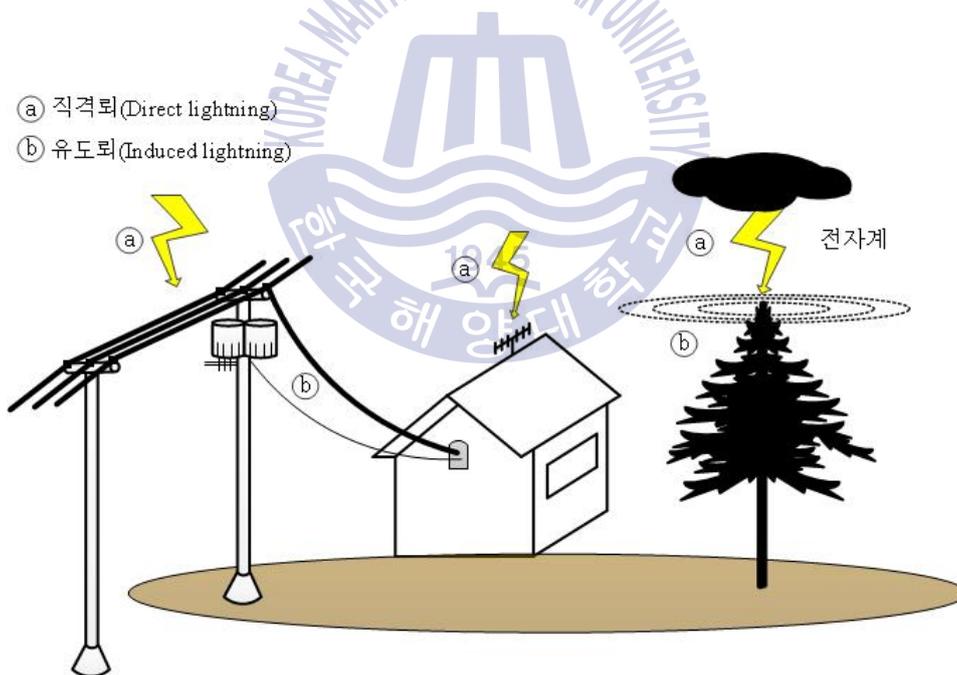


그림 2.3 뇌 서지의 발생

Fig. 2.3 Occurrence of lightning surges

개폐서지(Switching surge)는 전력계통에서 개폐기의 개방 및 단락, 부하의 개폐, 퓨즈 및 차단기의 동작으로 발생하는 서지이다. 뇌 서지와 비교하여 지속시간은 수 ms로 길고, 크기는 작지만 지속적으로 노출되면 전기·전자 기기 및 선로에 사고가 발생한다.

서지로부터 피보호기기를 보호하기 위해 그림 2.4와 같이 병렬로 보호 성능이 우수한 서지보호기를 설치한다. 정상전압에서 서지보호기의 임피던스는 무한대이고, 서지 및 과전압이 침입할 때 매우 작은 임피던스를 갖기 때문에 정상운전에 영향을 주지 않는다. 서지보호소자의 종류는 전류의 흐름을 전환시키는 가스튜브(Gas-tube)와 SCR(Silicon controlled rectifier)이 있으며, 전압 상승을 억제하는 소자는 바리스터(Varistor) 및 아발란치 다이오드(Avalanche diode) 등이 있다^[12].

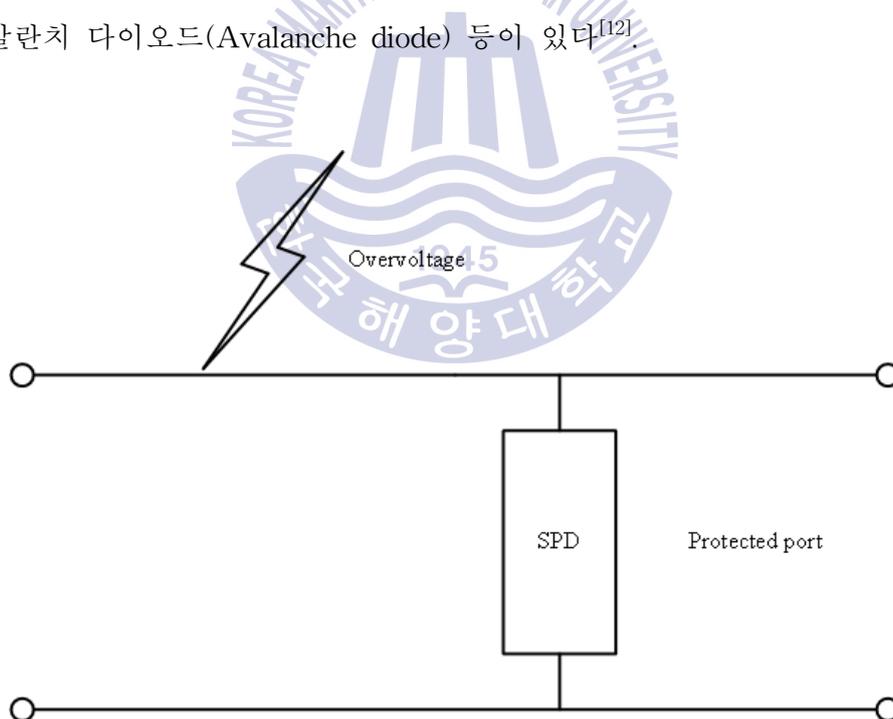


그림 2.4 서지 차단 원리

Fig. 2.4 Principle of surge suppression

2.2 산화아연형 바리스터

서지로부터 전력 계통 및 통신 설비를 보호하기 위하여 표 2.1과 같은 보호소자를 사용한다. 가스 튜브는 방전 전류가 크며, 기생 캐패시턴스가 작기 때문에 신호용 회로를 보호하기 위해 사용한다. 하지만 응답 속도가 느리고, 속류(Follow current)가 발생한다는 단점이 있다. 아발란치 다이오드는 응답 속도가 빠르며, 제한 전압이 작기 때문에 저전압 회로에 주로 사용된다. 산화아연형 바리스터는 양방향 소자로 교류용 회로에 사용된다. 또한 에너지 흡수량이 크기 때문에 전력 계통의 보호회로에 이용된다.

산화아연형 바리스터는 비선형 저항특성이 우수하다. 이상전압의 침입으로 선로의 전압이 동작개시전압 이상으로 증가하면, 소자의 저항이 급격히 감소하여 수 ns 이내에 보호단자의 절연내력 이하로 억제시킨다. 소자의 특성상 표류 정전용량이 매우 크기 때문에 전원회로나 저주파회로의 보호 용도로 사용된다^[13].

표 2.1 서지보호소자

Table 2.1 Surge protective devices

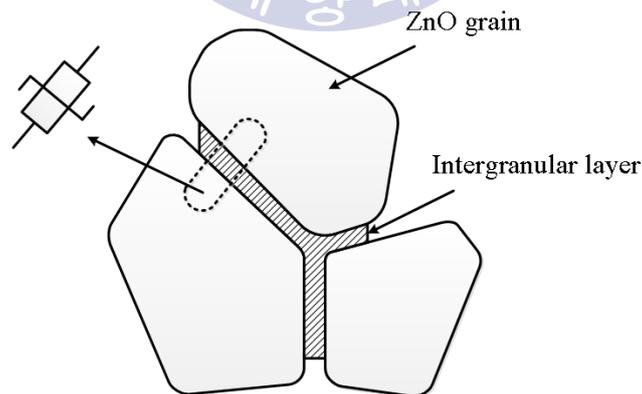
	동작 방식	응답 속도	캐패시턴스	방전 전류	비 고
Gas tube	Crowbar	Slow (1 ~ 2 μ s)	< 2 pF	5 ~ 20 kA (10 μ s)	Follow current
ZnO Varistor	Clamp	Fast (< 0.5 ns)	1 to 10 nF	1 kA (20 μ s)	Large energy absorption
Avalanche diode	Clamp	Fast (< 0.1 ns)	1 to 3 nF	100 A (100 μ s)	Small clamping voltage (6.8 ~ 200 V)

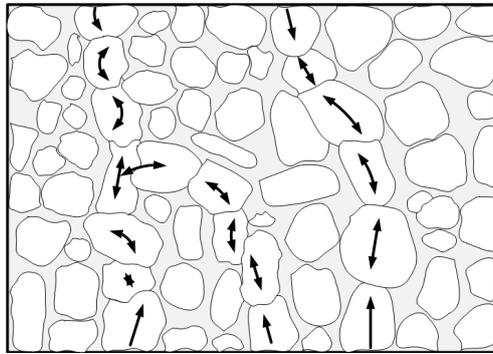
구조는 그림 2.5와 같이 결정입자(ZnO grain) 및 입계층(Intergranular layer)이 직·병렬로 연결된 형태이다. 결정입자는 전기전도도가 높은 물질로 구성된다. 저항은 약 1Ω 정도로 매우 낮고, 면적은 10 ~ 100 μm 이다. 입계층은 약 1 GΩ의 저항이 높은 물질로 구성되며 동작개시전압(약 3.5 V) 이상에서 도통되는 특성을 갖는다. 결정입자와 입계층의 구조적인 특성으로 우수한 V-I 비선형성을 갖는다^[14].

제한전압(Clamping voltage)은 결정입자의 직렬로 연결된 수에 의해 결정되며, 식 2.1과 같이 나타낼 수 있다. V_b 는 제한전압, n 은 직렬로 연결된 결정입자의 개수, v_b 는 입계층의 제한전압을 나타낸다.

$$V_b = nv_b \quad (2.1)$$

에너지 내량은 결정입자의 병렬로 연결된 수에 의해 결정되며, 소자의 단면적이 증가하면 병렬 연결수가 증가하므로 에너지 내량도 증가한다.





(b) 복합 구조

그림 2.5 ZnO 소자의 미세구조

Fig. 2.5 Micro-structure of a ZnO element

바리스터의 등가회로는 그림 2.6과 같이 나타낼 수 있다. 전류가 매우 작을 때, 바리스터는 누설저항(R_{leak})의 역할을 하며 이는 입계층의 저항을 의미한다. 반대로 전류가 많이 흐를 때, 바리스터는 ZnO 결정입자의 고유 저항인 벌크저항(R_{bulk})의 역할을 한다. 캐패시터(C)는 입계층의 유전체로 인하여 나타나며, 인덕터(L)는 바리스터의 리드선으로 인하여 생성된다^[15].

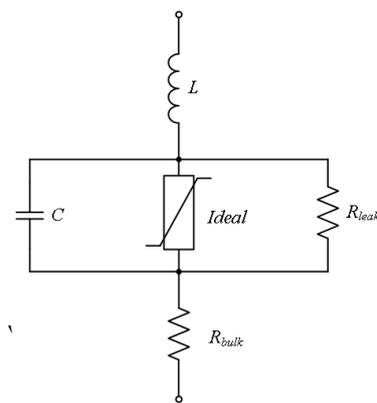


그림 2.6 등가회로

Fig. 2.6 Equivalent circuit

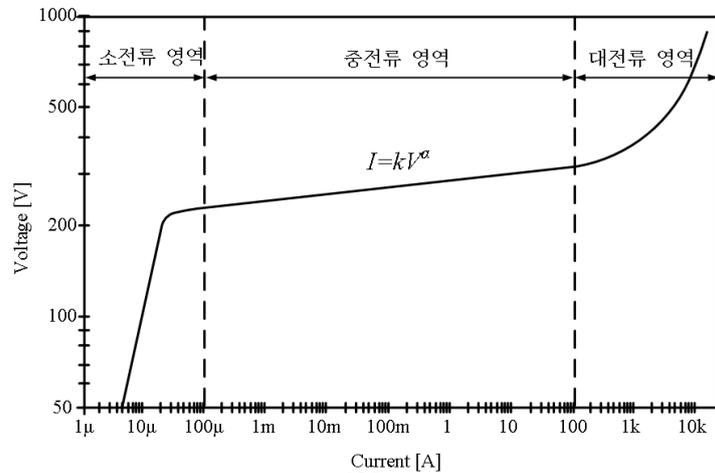


그림 2.7 V - I 특성
Fig. 2.7 V - I characteristic

바리스터의 동작 특성은 그림 2.7과 같이 3가지 영역으로 구분할 수 있다. 소전류 영역(Prebreakdown region)은 바리스터의 동작개시전압 이하의 영역으로 미소한 전류(<0.1 mA)가 흐른다. C 및 R_{leak} 에 의해 정상운전전압에서 누설전류가 발생한다.

중전류 영역(Breakdown region)은 비선형 저항특성이 나타나는 영역으로 바리스터가 보호동작을 수행하는 구간이다. 전류는 전압과 독립적으로 급격히 증가하게 되며 식 2.2처럼 나타낼 수 있다.

$$I = kV^\alpha \quad (2.2)$$

α 는 비선형계수로 비선형 저항특성을 결정한다. 비선형계수는 식 2.3으로 산출할 수 있다. 중전류 영역에서 전압 V_1 은 0.1 mA (I_1)가 흐를 때, 전압 V_2 는 1 mA (I_2)일 때를 의미한다. 일반 저항의 비선형계수는 1이고,

산화아연형 바리스터의 비선형계수의 값은 25 ~ 100정도이다. 값이 클수록 비선형 특성이 우수하게 나타난다.

$$\alpha = \frac{\log(I_1/I_2)}{\log(V_1/V_2)} \quad (2.3)$$

대전류 영역(Upturn region)은 100 A 이상의 대전류가 흐를 때 동작하는 영역으로, 결정입자의 고유저항이 지배적으로 나타나기 때문에 전압과 전류는 선형적으로 증가한다.

2.3 열화진단기술

열화 요인은 그림 2.8과 같이 과전압, 서지 및 환경적 요인으로 분류할 수 있다. 열화가 진전되면 미세 구조의 변형으로 누설전류, 기준전압 등 전기적 특성이 변한다^{[16],[17]}. 열화된 소자를 장기간 사용하면 열폭주로 파괴되어 계통에 사고를 유발시킨다.



그림 2.8 산화아연형 바리스터의 열화 원인과 현상

Fig. 2.8 Deterioration causes and phenomena of a ZnO varistor

2.3.1 누설전류 측정법

소자의 구조적인 특성 때문에 정상운전전압에서 누설전류가 발생한다. 누설전류는 전체 누설전류(I_T), 용량분 누설전류(I_C) 및 저항분 누설전류(I_R)로 분류되며 식 2.4와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (2.4)$$

용량분 누설전류는 열화 정도에 관계없이 일정한 값을 유지한다. 하지만 저항분 누설전류는 그림 2.9와 같이 열화 진전에 따라 증가한다^[18]. 이는 바리스터의 미세 구조가 변형되어 입계층의 저항이 감소하기 때문이다. 용량분 누설전류 대비 저항분 누설전류가 매우 작기 때문에 전체 누설전류는 미소하게 증가한다.

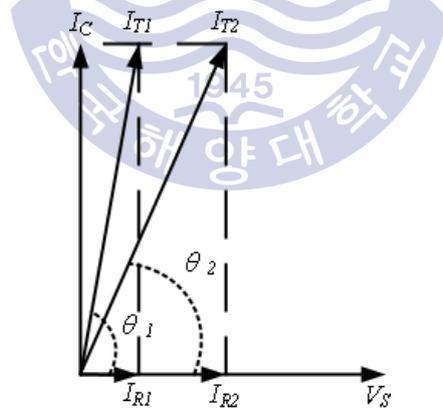


그림 2.9 열화 진전에 따른 누설전류의 변화

Fig. 2.9 Change of leakage current by the aging process

누설전류 측정법은 전체 누설전류 및 저항분 누설전류 측정법이 있다. 전체 누설전류 측정법은 측정방법이 간단하여 바리스터를 진단하는데 폭

넓게 사용되고 있지만, 열화 초기 누설전류의 변화가 거의 없기 때문에 열화 상태를 판단하기 위해 주기적인 측정이 필요하다. 저항분 누설전류 검출법은 열화 진전에 따라 변화가 뚜렷하기 때문에 정확한 상태 진단이 가능하다. 하지만 소자에 흐르는 저항분 누설전류를 측정하기 위해서는 대역 통과 필터, 차동증폭기 등의 부가적인 장비가 필요하다. 저항분 누설전류검출법의 대표적인 방법은 자기소거법, 동기정류법, 제3조파 분석법, 와트로스 측정법 등이 있다^{[19],[20]}.

2.3.2 기준전압 측정법

기준전압은 저항분 누설전류 1mA가 흐를 때, 바리스터 양단에 인가되는 전압이다. 열화가 진전되면 그림 2.10처럼 감소되는 경향이 있다^[21]. 초기값 대비 10%이상 변화가 발생하면 급격한 누설전류의 증가로 열폭주의 위험이 있으므로, 교체가 필요하다. 열화 상태를 정확하게 파악할 수 있지만 On-line 진단은 불가능하다.

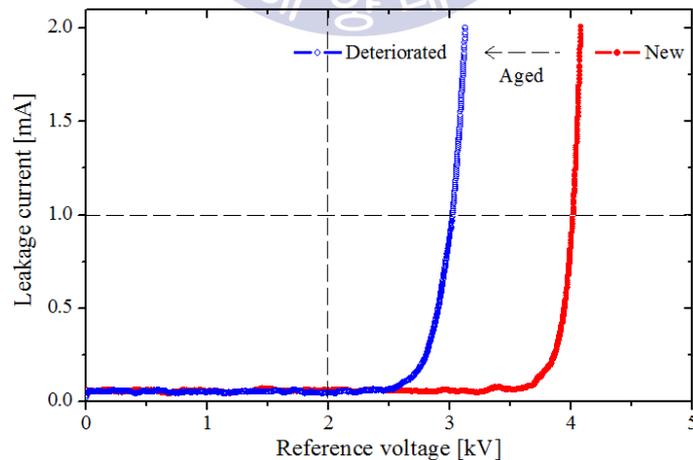


그림 2.10 열화 진전에 따른 기준전압의 변화

Fig. 2.10 Change of reference voltage by the aging process

제 3 장 가속열화 실험

표준 뇌 충격전류(8/20 μ s)의 인가에 따른 전기적 특성 변화와 측정 파라미터 도출 및 건전성 기준을 제시하기 위하여 가속열화 실험을 수행하였다^{[22],[23]}.

3.1 서지발생장치

표준 뇌 충격전류를 인가하기 위하여 서지발생장치를 구성하였다. 서지발생장치의 등가회로는 그림 3.1과 같으며 직류 고전압 발생장치, 충전용 저항(R_c), 충전용 캐패시터(C_c), 방전 전극(G) 및 인덕터(L)로 구성된다. 발생 원리는 직류 고전압 발생장치에서 충전용 캐패시터를 설정전압(E)만큼 충전시킨다. 캐패시터가 충전되었을 때, 전극을 통해 방전시킨다. R_o 에 방전전압(V_o)과 충격전류(I_d)가 발생한다. 충격전류의 크기는 E 로 조절이 가능하고 파형의 모양은 C_c 와 L 로 조절할 수 있다^[24].

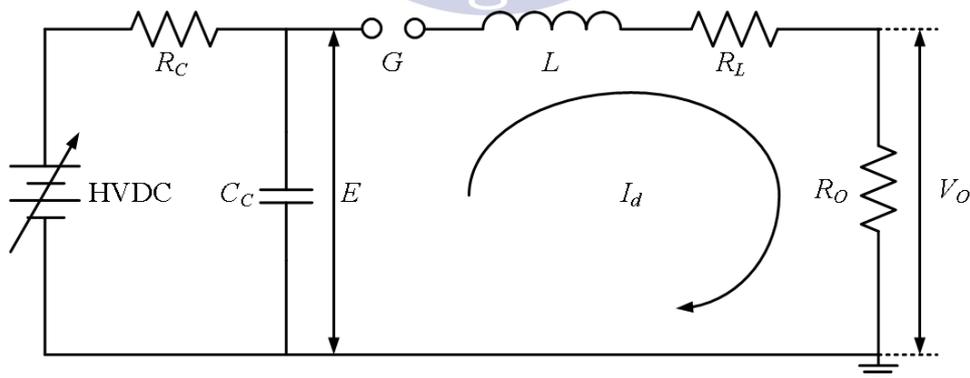


그림 3.1 서지발생장치의 등가회로

Fig. 3.1 Equivalent circuit of a surge generator

방전 전극의 저항을 무시하면 다음의 식 3.1의 회로방정식이 성립한다.

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

$R_L + R_O = R$ 이라 하고, 초기 조건 $t=0$ 일 때 $i=0$ 을 대입하여 정리하면

① $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 일 때,

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

② $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 일 때,

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

③ $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 일 때,

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

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

①의 조건은 파도가 급격히 증가하고, 파미가 서서히 감소하는 과제동 (Over damping)의 조건이다. ②의 조건은 파고치 도달 후 임계값까지 서서히 감소하는 임계제동(Critical damping)의 조건이다. 마지막으로 ③의 조건은 진동성분을 갖는 부족제동(Under damping)의 조건이다. 각 조건의 파형은 그림 3.2와 같다. 전형적인 서지 파형은 ①과 같이 파고치까지 도달 시간이 짧고, 파미가 서서히 감소하는 과제동 조건이다.

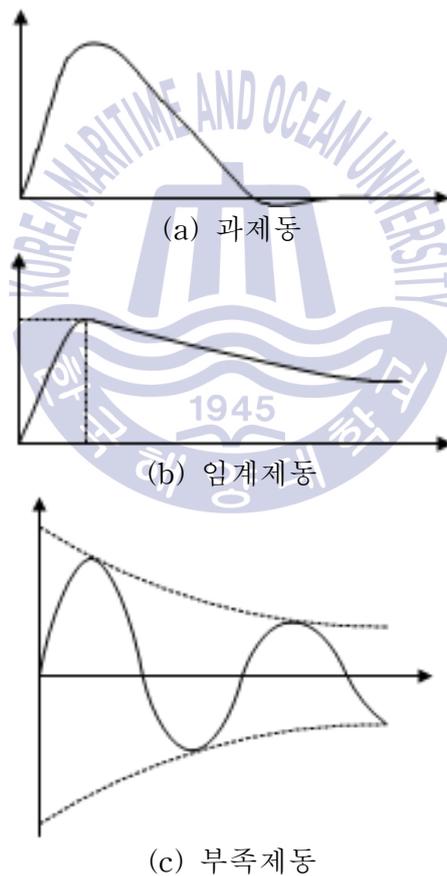


그림 3.2 제동 조건
Fig. 3.2 Damping condition

표 3.1 제동 조건

Table 3.1 Damping condition

	과제동	임계제동	부족제동
제동 조건	$\frac{1}{LC} < \frac{R^2}{4L^2}$	$\frac{1}{LC} = \frac{R^2}{4L^2}$	$\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2}$
전 류	$\frac{V_0}{wL} U \cdot \sinh(wt)$	$\frac{V_0}{wL} U \cdot t$	$\frac{V_0}{wL} U \cdot \sinh(wt)$
상승 시간	$\frac{1}{w} (\ln \sqrt{l + \frac{w}{a}} - \ln \sqrt{l - \frac{w}{a}})$	$\frac{1}{a}$	$\frac{1}{w} \cdot \tan^{-1}(\frac{w}{a})$
비 고	$U = \exp(-at), w = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, a = \frac{R}{2L}$		

과제동의 표준 뇌 충격전류를 발생시키기 위하여 표 3.1의 조건을 충족하는 R, L, C값을 선정하였다. 충전용 콘덴서는 30 μF, 인덕터는 2.14 μH, 저항은 0.26 Ω일 경우 제동 조건을 만족하였으며, PSpice로 출력 파형을 검증하였다.

시뮬레이션 결과, 그림 3.3과 같은 파형이 나타났다. 국제 규격 IEC 61000-4-5에서 제시한 편차는 과두장은 ±20%, 과미장은 ±20%로 이를 만족해야한다. 시뮬레이션 파형의 과두장은 7.5 μs, 과미장은 20.04 μs로 제시한 조건을 만족하였다^[25].

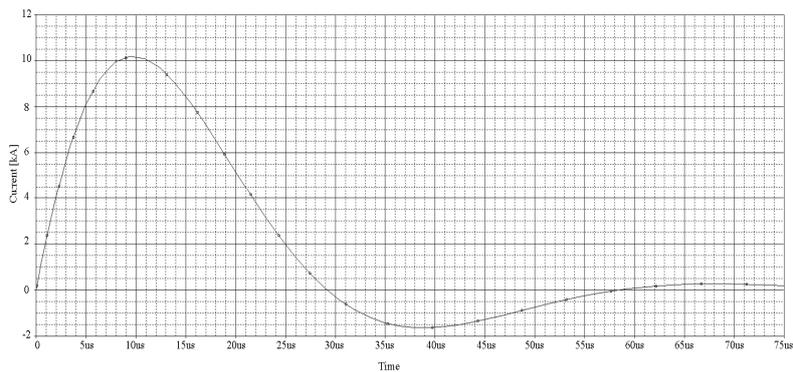


그림 3.3 시뮬레이션 결과

Fig. 3.3 Result of simulation

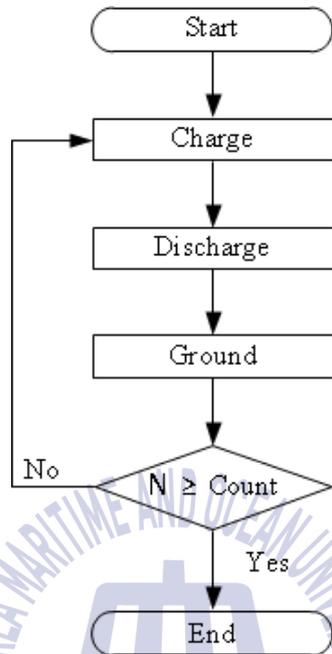


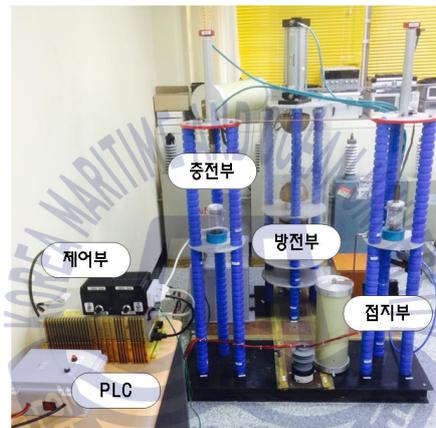
그림 3.4 서지발생장치의 흐름도
 Fig. 3.4 Flowchart of a surge generator

서지발생장치를 제어하기 위하여 그림 3.4와 같이 PLC logic을 설계하였다. 시정수에 따라 충전시간을 설정할 수 있고, 설정 횟수만큼 반복 동작한다. 충전이 완료되면 방전 전극을 통해 전하가 방전된다. 캐패시터의 잔여 전하는 접지로 흘러가도록 하였다.

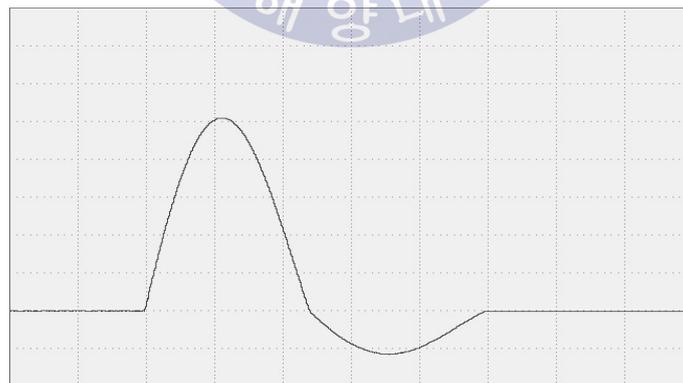
시뮬레이션 결과 및 PLC logic을 근거로 하여 그림 3.5(a)와 같이 서지 발생장치를 구성하였다. 제어부(직류 고전압 발생장치, 40 kV 5 mA), 충전부, 방전부, 접지부 및 PLC로 구성되며, 발생한 충격전류 파형은 그림 3.5(b)와 같다.

뇌 충격전류(10 kA) 1회 인가 시, 소자에 흡수되는 에너지는 식 3.5와 같이 시간에 대한 적분함수로 나타낼 수 있다. v 는 단자전압, i 는 방전전류, W 는 흡수되는 에너지량이다. 소자에 흡수되는 에너지는 165.31 J이다.

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



(a) 사진



(b) 뇌 충격전류 [2 kA/div, 10μs/div]

그림 3.5 서지발생장치

Fig. 3.5 Surge generator

3.2 실험계

열화 진전에 따른 전기적 특성 변화를 분석하기 위하여 가속열화 실험을 수행하였다^{[26],[27]}. 바리스터가 열화될 때까지 뇌 충격전류(8/20 μ s, 10 kA)를 군단위로 공급하였다. 열화 초기에는 진전 속도가 느리기 때문에 50회, 30회, 20회 순서로 인가하였다. 실온에서 30분 동안 자연 냉각시킨 후, 누설전류, 기준전압 및 제한전압을 측정하였다. 동일한 사양의 바리스터(Varistor A, Varistor B)로 2회 반복하여 진행하였고, 사양은 표 3.2와 같다.

표 3.2 바리스터의 사양
Table 3.2 Specification of a varistor

항 목	사 양	비 고
최대 사용 전압	275 V _{AC} , 350 V _{DC}	-
서지 전류 내량	40 kA	8/20 μ s
에너지	550 J	-
기준 전압	430 V	-
오차율	$\pm 10\%$	-

열화 파라미터를 측정하기 위하여 그림 3.6과 같은 실험계를 구성하였다. 저항분 누설전류는 220 V_{DC}를 인가하고, 전원 인가 직후 충전전류가 흐르기 때문에 20초 후에 측정하였다. 전체 누설전류는 220 V_{AC}를 인가하고, 전원 인가 직후 최댓값을 측정하였다. 기준전압은 직류고전압발생장치(5 kV)로 저항분 누설전류 1 mA가 흐를 때까지 증가시켜 소자의 양단 전압을 측정하였다^[28]. 제한전압은 서지발생장치로 뇌 충격전류(0.5 kA)를 인

가하여 바리스터 양단 전압을 측정하였다. 전압을 측정하기 위하여 1,000 : 1 고전압프로브(20 kV_{DC}, 75 MHz)와 오실로스코프(10 MS/s, 3 MHz)를 사용하였다.

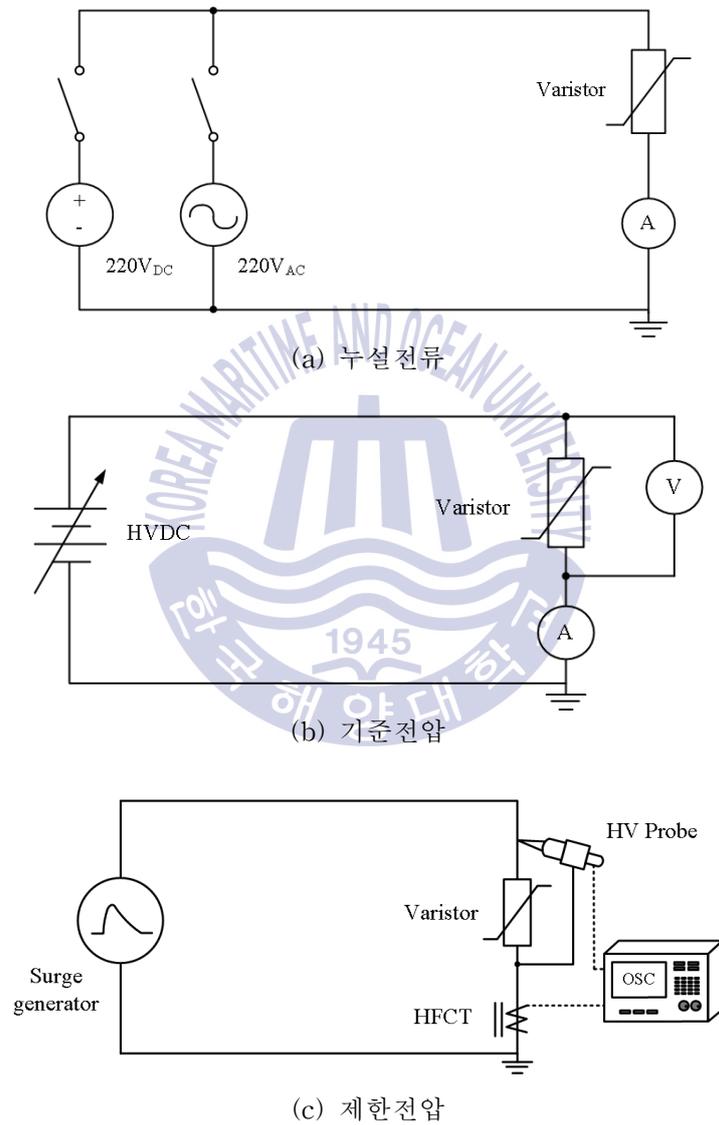


그림 3.6 실험계
Fig. 3.6 Experimental system

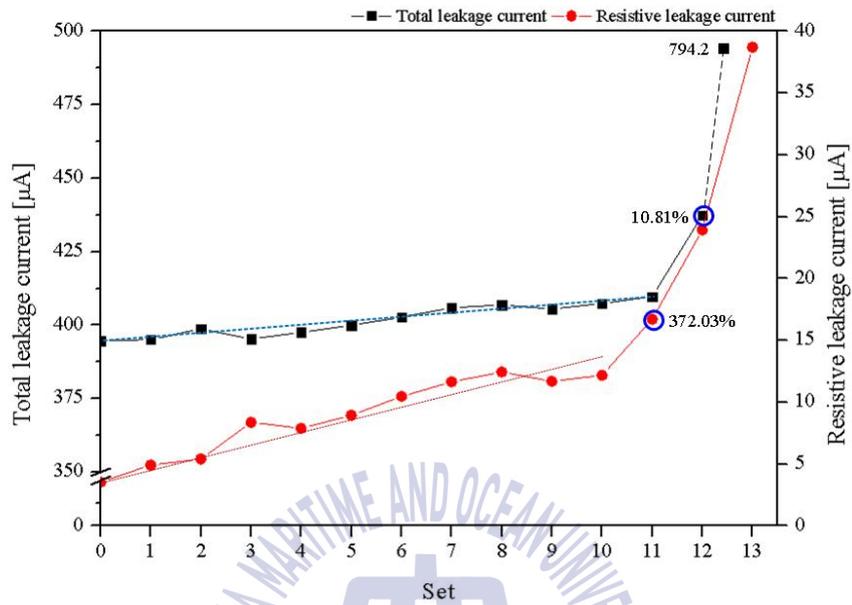
3.3 전기적 특성 변화

3.3.1 누설전류

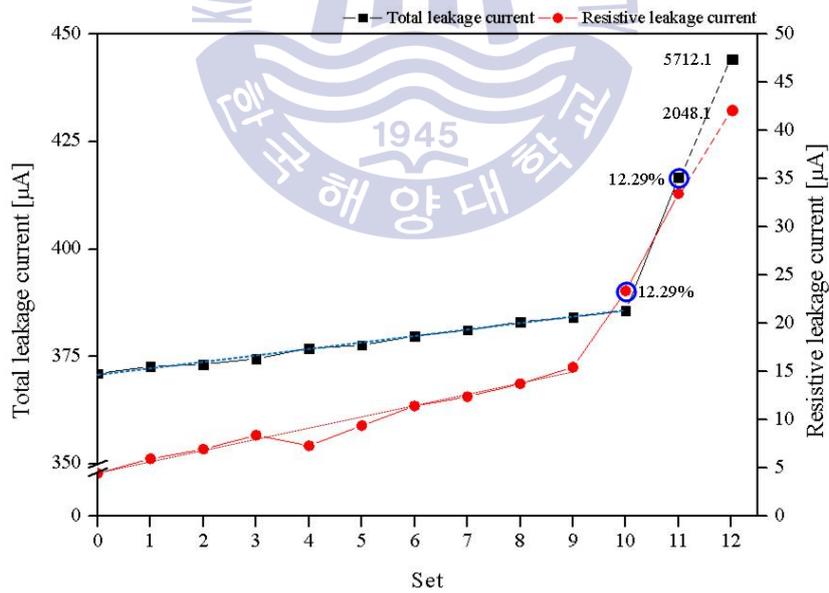
인가 횟수에 따른 누설전류의 추이를 그림 3.7, 표 3.3 및 표 3.4에 나타내었다. 저항분 누설전류는 열화 진전에 따라 변화율이 컸다. 열화 초기 바리스터 A는 240회, 바리스터 B는 220회까지 선형적으로 증가하였다. 각각 260회, 240회부터 초기값 대비 약 350% 이상 지수함수적으로 급격히 증가하였고, 동일한 조건의 뇌 충격전류를 인가하였을 때 열화가 가속화되었다. 고장 직전 누설전류는 초기값과 비교하여 10배 이상의 차이가 발생했다.

전체 누설전류의 경우, 저항분 누설전류와 달리 열화 초기에는 약 4% 미만으로 변화가 거의 없었다. 각각 280회, 260회부터 10% 이상 급격히 증가하였다. 저항분 누설전류와 동일하게 전류가 큰 폭으로 변화한 시점부터 추가적인 보호동작으로 열화가 급격히 진전되었다.

소자 특성상 열화 특성에 약간의 차이는 존재하지만 저항분 누설전류의 증가로 전체 누설전류의 변화가 발생한다. 초기값 대비 급격하게 증가한다면 잔여 수명이 짧아지며, 추가적인 보호 동작으로 급격히 열화되었다. 누설전류가 10% 이상 증가한 경우, 바리스터는 보호소자로서 기능을 상실하거나 열폭주로 폭발 위험이 있으므로 교체가 필요하다.



(a) 바리스터 A



(b) 바리스터 B

그림 3.7 누설전류의 변화

Fig. 3.7 Change of leakage current

표 3.3 바리스터 A의 누설전류

Table 3.3 Leakage current of varistor A

횟수	전체 누설전류		저항분 누설전류	
	측정값 [μ A]	증가율 [%]	측정값 [μ A]	증가율 [%]
신 품	394.7	-	3.54	-
1 (50회)	395.1	0.11	4.91	38.7
2 (80회)	398.74	1.02	5.41	52.82
3(100회)	395.3	0.15	8.37	100 초과
4(120회)	397.58	0.72	7.88	
5(140회)	399.93	1.33	8.94	
6(160회)	402.76	2.04	10.47	
7(180회)	405.92	2.54	11.64	
8(200회)	406.9	3.09	12.44	
9(220회)	405.5	2.74	11.69	
10(240회)	407.4	3.32	12.17	
11(260회)	409.7	3.81	16.71	
12(280회)	437.4	10.81	24.93	
13(300회)	794.2	100 초과	38.71	

표 3.4 바리스터 B의 누설전류

Table 3.4 Leakage current of varistor B

횟수	전체 누설전류		저항분 누설전류	
	측정값 [μ A]	증가율 [%]	측정값 [μ A]	증가율 [%]
신 품	371.08	-	4.46	-
1 (50회)	372.7	0.44	5.98	38.71
2 (80회)	373.19	0.57	6.98	52.82
3(100회)	374.52	0.93	8.41	100 초과
4(120회)	376.94	1.58	7.33	
5(140회)	377.64	1.77	9.41	
6(160회)	379.8	2.35	11.46	
7(180회)	381.17	2.72	12.41	
8(200회)	383.09	3.24	13.77	
9(220회)	384.18	3.53	15.47	
10(240회)	385.7	3.94	23.4	
11(260회)	416.7	12.29	33.47	
12(280회)	5712.1	100 초과	2048.1	

3.3.2 기준전압

기준전압은 누설전류와 반대로 열화 진전에 따라 점점 감소했다. 그림 3.8 및 표 3.5와 같이 바리스터 A는 240회, 바리스터 B는 260회까지 초기 값 대비 감소율은 2.05%미만으로 차이가 없었다. 각각 260회, 240회부터 감소율이 5% 이상으로 변화하였고, 그 이후 동일한 조건에서 서지를 인가하면 전압이 급격히 감소하였다.

국제 규격에서 산화아연형 바리스터의 기준전압이 $\pm 10\%$ 이상 변화할 경우, 보호 소자로서 수명이 다했다고 명시되어있다. 실험결과 기준전압이 10% 이상 증가한 경우, 저항분 누설전류의 증가로 열화가 급격히 진전되며 비선형 저항특성도 저하되었다. 산화아연형 바리스터의 열화 상태를 판단하기 위하여 규격에서 제시한 기준에 따라 교체 시기의 결정이 가능하다.

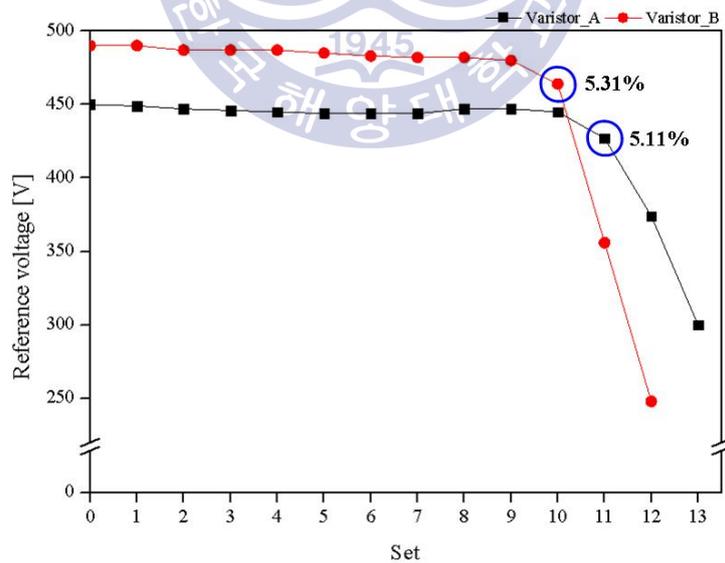


그림 3.8 기준전압의 변화

Fig. 3.8 Change of reference voltage

표 3.5 기준전압

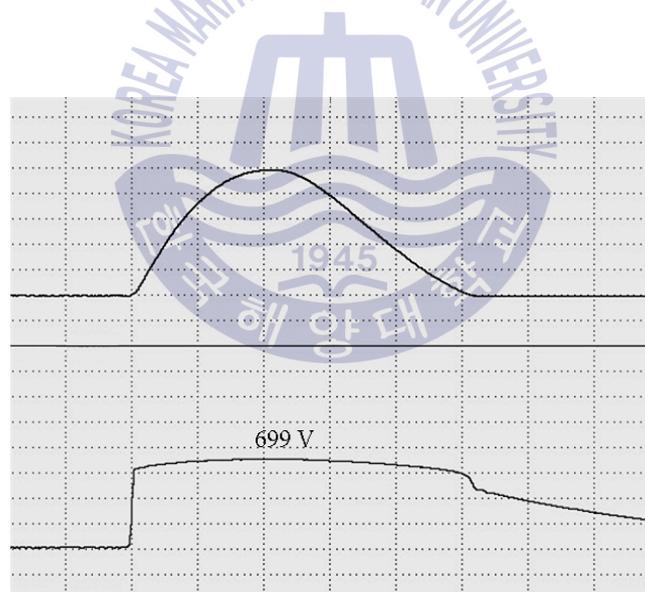
Table 3.5 Reference voltage

횟수	바리스터 A		바리스터 B	
	측정값 [V]	감소율 [%]	측정값 [V]	감소율 [%]
신 품	450	-	490	-
1 (50회)	449	0.22	490	-
2 (80회)	447	0.67	487	0.61
3(100회)	446	0.89	487	
4(120회)	445	1.11	487	
5(140회)	444		485	1.02
6(160회)	444	1.33	483	1.42
7(180회)	444		482	1.63
8(200회)	447	0.67	482	
9(220회)	447		480	2.04
10(240회)	445	1.11	464	5.31
11(260회)	427	5.11	356	27.34
12(280회)	374	16.89	248	49.39
13(300회)	300	33.33		

3.3.3 제한전압

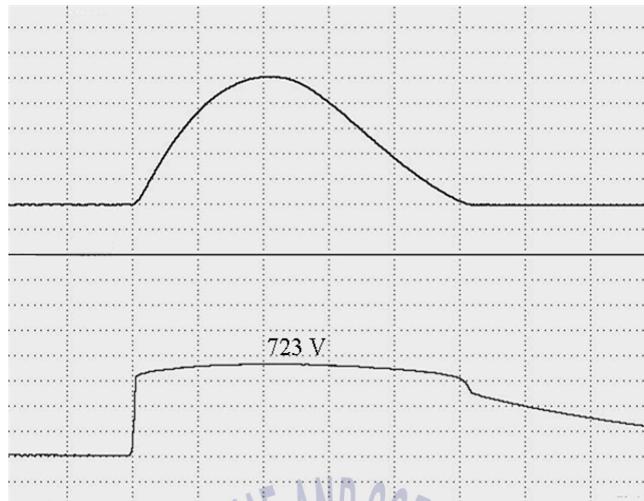
열화 진전에 따라 제한전압은 그림 3.9와 같이 변화가 거의 없었다. 신품 및 열화된 바리스터의 제한전압은 각각 699 V, 755 V로 약 8% 증가하였다. 다른 파라미터에 비해 변화폭이 미소하기 때문에 변화율로 상태 진단 및 수명 예측이 불가능하다.

하지만 열폭주로 소자가 소손될 경우, 그림 3.9(c)와 같이 제한전압의 파형이 변형되었다. 보호 동작은 수행하지만 누설전류 및 기준전압이 10% 이상 변화했고, 절연 내력이 감소하여 서지 인가 시 불꽃이 발생하였다. 이처럼 파형의 형태를 정기적으로 분석함으로써, 바리스터의 상태를 진단할 수 있다.



上 : 충격전류 [100 A/div, 5 μ s/div]
下 : 제한전압 [200 V/div, 5 μ s/div]

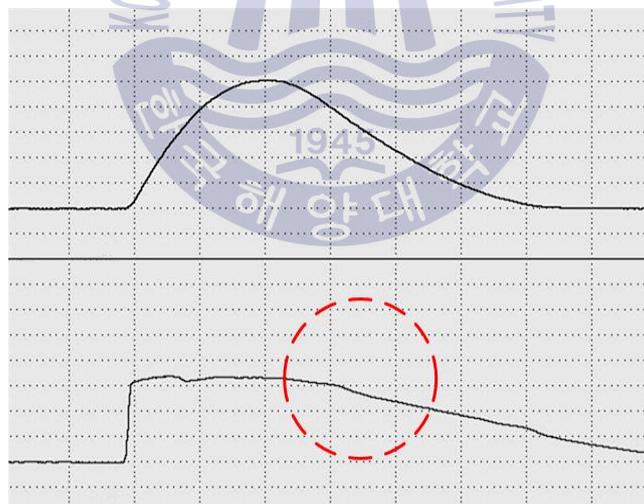
(a) 신품



上 : 충격전류 [100 A/div, 5 μ s/div]

下 : 제한전압 [200 V/div, 5 μ s/div]

(b) 열화 후



上 : 충격전류 [100 A/div, 5 μ s/div]

下 : 제한전압 [200 V/div, 5 μ s/div]

(c) 소손

그림 3.9 제한전압의 변화

Fig. 3.9 Change of clamping voltage

제 4 장 서지보호기 진단장치

4.1 회로 설계

가속열화 실험을 바탕으로 전체 누설전류, 기준전압 및 제한전압을 측정 파라미터로 선정하였다. 저항분 누설전류는 열화 정도에 따른 정확한 진단이 가능하지만, 증폭기 및 필터 등 부가적인 소자가 필요하다. 그러나 전체 누설전류 측정은 초기 변화율이 작지만, 장치 구성도가 간단하며, 측정방법이 기존 대비 쉽기 때문에 휴대용 진단장치에 적합하다. 기준전압은 On-line 진단은 불가능하지만 다른 파라미터에 비해 정확한 진단이 가능하며, 제한전압은 과형의 형태를 통해 바리스터의 상태를 알 수 있기 때문에 본 논문에 적용하였다^[29].

표 4.1 측정 파라미터

Table 4.1 Diagnostic parameters

파라미터	진단 방법	변화율	측정 방법	비 고	적용 여부
저항분 누설전류	On-line	높음	부수적 장치 필요	-	미적용
전체 누설전류	On-line	열화 초기 낮음	간단	주기적 측정	적 용
기준전압	Off-line	높음	간단	-	적 용
제한전압	On-line	낮음	간단	과형 형태	적 용

4.1.1 누설전류 측정회로

누설전류를 검출할 수 있는 측정회로를 제작하였다. 누설전류의 크기가 미소하고, 고조파로 인한 노이즈가 발생하므로 저잡음 증폭회로(Low noise amplifier)를 그림 4.1과 같이 설계하였다. 고감도 연산증폭기(DC ~ 1 kHz)를 사용하여 최대 60 dB까지 증폭이 가능하다.

운전 중 접지선에 흐르는 누설전류를 검출하기 위하여 클램프형 영상변류기(0.01 mA ~ 20 A)를 사용하였다. 가속열화 실험을 통해 열화 진전에 따른 누설전류의 추이를 분석한 결과, 신포م 바리스터는 100 ~ 400 μ A, 교체가 필요한 바리스터는 700 ~ 1,000 μ A 이상 누설전류가 흘렀다. 측정전류의 범위는 100 ~ 1,000 μ A로 설정하였다. 측정된 데이터는 데이터 수집 모듈(Data acquisition module)에서 전류 신호를 취득하고, 측정된 값을 산출하여 Display module에 정보를 출력하도록 하였다.

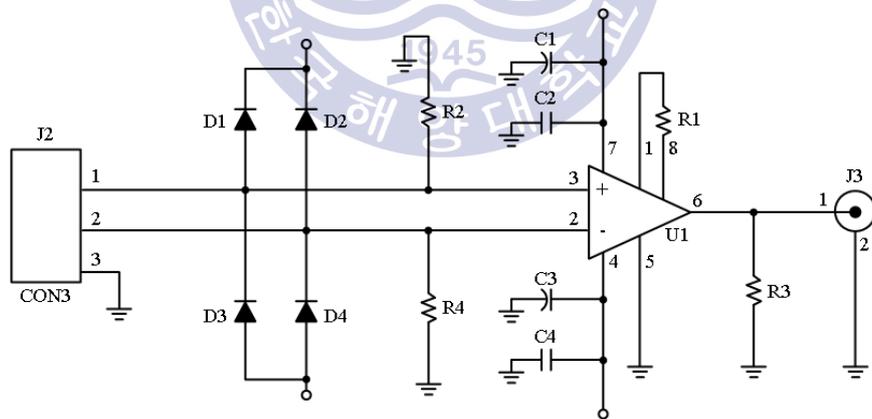


그림 4.1 누설전류 측정회로

Fig. 4.1 Leakage current measurement circuit

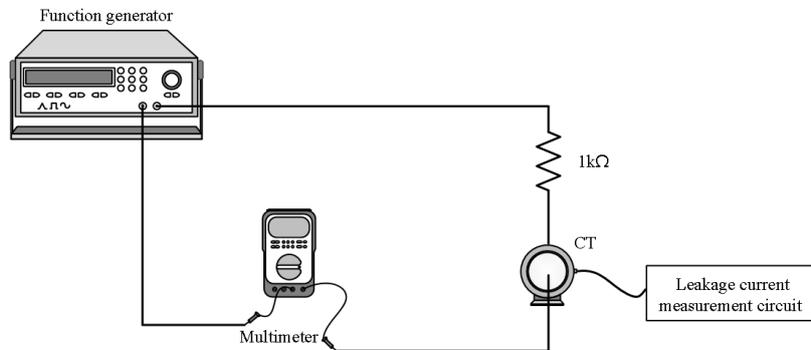


그림 4.2 교정

Fig. 4.2 Calibration

측정회로의 출력전압 - 누설전류의 관계를 파악하기 위해서 그림 4.2와 같이 교정(Calibration) 실험을 수행하였다. 함수발생기(Function generator)로 60 Hz의 일정한 전원을 공급하고 전류의 크기를 100 μ A ~ 1,000 μ A까지 변화시켰다. 회로에 흐르는 전류는 디지털멀티미터로 측정하였다. 결과는 그림 4.3과 같으며 선형적인 출력 특성이 나타났다.

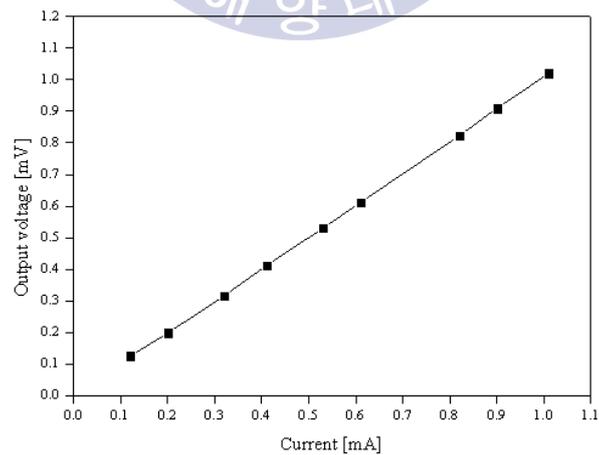
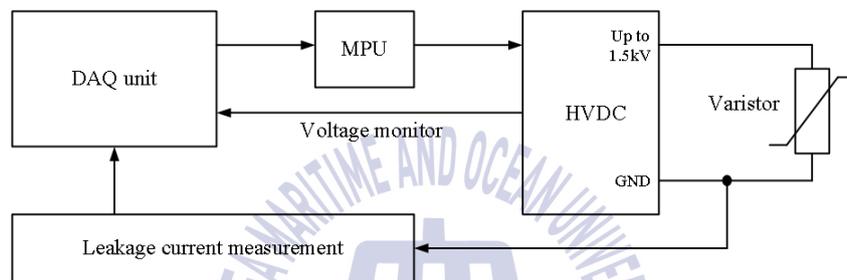


그림 4.3 출력전압 - 누설전류

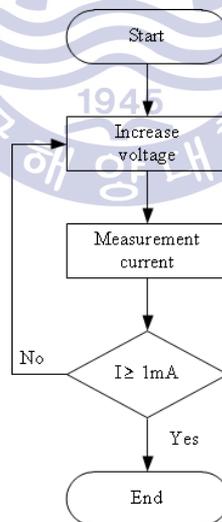
Fig. 4.3 Output voltage - leakage current

4.1.2 기준전압 측정회로

기준전압 측정회로는 그림 4.4(a)와 같이 연산부(DAQ unit), 선형제어부(Micro processing unit, MPU), 직류 고전압 발생부 및 누설전류 측정부로 구성된다. 4.4(b)와 같이 연산부에 의해서 측정회로의 동작을 결정한다. 직류 전압을 증가시켜 저항분 누설전류 1 mA 흐를 때 바리스터 양단 전압을 측정하도록 설정하였다.



(a) 구성도



(b) 흐름도

그림 4.4 기준전압 측정회로

Fig. 4.4 Reference voltage measurement circuit

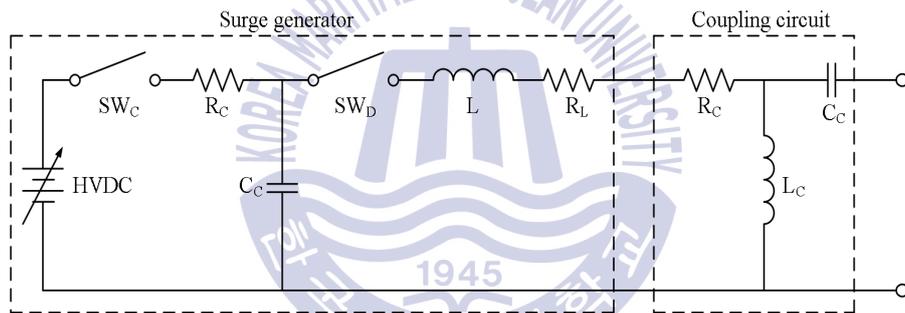
선형제어부는 직류 고전압 발생장치의 출력전압을 조절하는 부분이다. MPU에서 PWM(Pulse width modulation) 제어에 따라 아날로그 신호를 고전압발생장치의 전압제어 단자에 인가하여 출력전압을 조절하였다. Duty ratio를 0 ~ 255 범위에서 제어했고, 전압제어 단자의 입력전압은 0 ~ 4 V까지 변화하였다. 이에 따라 출력전압은 최대 1.5 kV까지 출력할 수 있도록 하였다. 전압제어 단자의 입력전압과 고전압 발생장치의 출력전압을 표 4.2에 나타내었다.

표 4.2 입력 전압에 따른 출력전압의 변화
Table 4.2 Chage of output voltage by input voltage

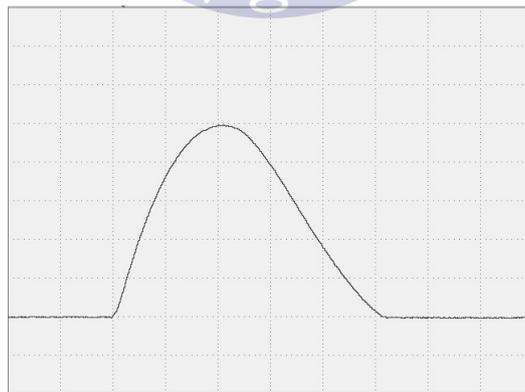
입력 전압 [V]	출력 전압 [V]
0.508	200.52
1.013	400.36
1.522	601.29
2.026	800.02
2.535	1,000.33
3.042	1,200.46
3.561	1,403.75
3.819	1,502.94

4.1.3 제한전압 측정회로

제한전압 측정회로는 그림 4.5(a)처럼 서지발생장치 및 커플링회로(Coupling circuit)로 구성된다. 서지발생장치의 원리 및 회로 구성은 3장과 같으며, 그림 4.5(b)와 같은 표준 뇌 충격전류($8/20\ \mu\text{s}$, $0.5\ \text{kA}$)를 발생되도록 설계하였다. 전력 계통에 설치된 바리스터를 측정할 때, 전원전압이 장비에 인가되어 소손될 위험이 있다. 장비를 보호하기 위하여 고역통과필터(High-pass filter)로 커플링회로를 설계하였다. 주파수가 낮은 AC 전원전압은 감쇠되어 진단장치 부분으로 인가되지 않도록 하였고, 주파수가 높은 서지는 커플링회로를 통과하여 바리스터에 주입하였다.



(a) 구성도



(b) 뇌 충격전류 [100 A/div, $5\ \mu\text{s}/\text{div}$]

그림 4.5 제한전압 측정회로

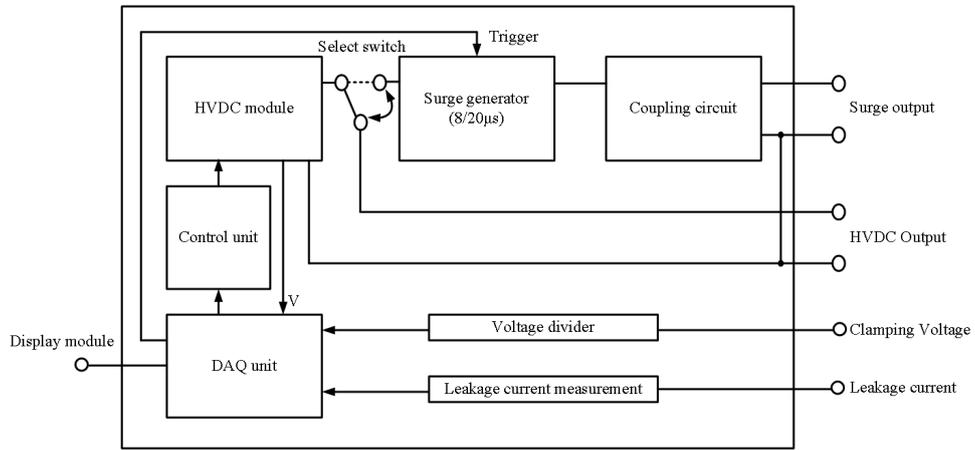
Fig. 4.5 Clamping voltage measurement circuit

4.2 진단장치 제작

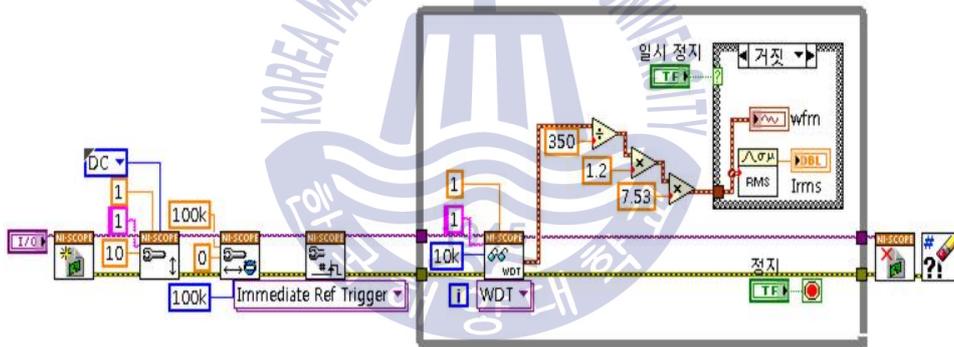
측정회로 및 알고리즘을 적용하여 그림 4.6과 같이 서지보호기용 On-line 진단장치를 제작하였다. 진단장치의 Front panel은 서지 발생부, 직류 고전압 발생부, Surge operation switch, Touch 형 Display module, 전압 전류 측정 포트 및 Select switch로 구성된다. Select switch로 동작 모드를 설정할 수 있고, Display module을 통해 제어 및 측정이 가능하도록 하였다. 전압 및 전류 포트에 측정된 데이터는 DAQ(수직분해능 8bit)를 통해 아날로그-디지털 정밀 변환을 하여 Display module로 전송된다. 그래픽기반의 프로그램인 LabVIEW에 의해서 제어되며, 측정 프로그램은 그림 4.6(c)와 같이 대기, 누설전류, 기준전압 및 제한전압의 Sub VI로 구성된다. 표준상태머신(Standard state machine) 구조로 측정 모드에 따라 동작하도록 설계하였다.



(a) 시제품



(b) 구성도



(c) 측정 알고리즘

그림 4.6 서지보호기 진단장치

Fig. 4.6 Diagnosis equipment for SPD

4.3 적용 실험

진단장치의 성능을 검증하기 위하여 적용 실험을 수행하였다. 신품 및 열화된 바리스터로 독립 실험계와 제작한 진단장치에서 누설전류, 기준전압 및 제한전압의 측정값을 비교하였다. 또한 측정값을 근거하여 바리스터의 상태를 진단하였다. 독립 실험계는 3장의 가속열화 실험과 동일한 방법이다. 측정 결과는 표 4.3 및 그림 4.7 ~ 4.9와 같다.

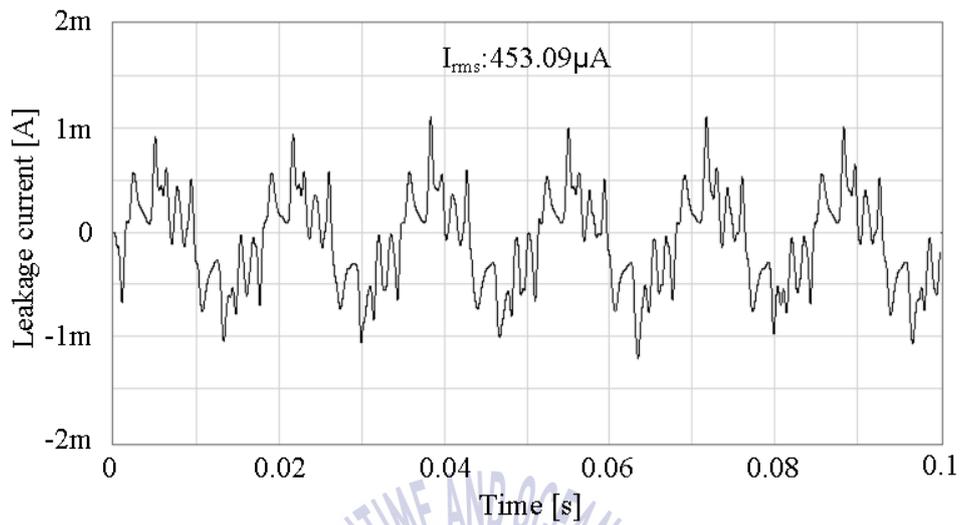
실험 결과, 독립 실험계와 비교하여 누설전류는 20 ~ 50 μA , 기준전압은 -1 ~ -2V, 제한전압은 -7V로 3% 미만의 차이가 발생하였다. 기준전압은 측정값이 거의 일치했지만, 누설전류 및 제한전압에서 차이가 발생한 것으로 보아 전원 품질에 의해 발생된 오차율로 판단된다.

신품의 경우, 누설전류가 453.09 μA , 기준전압은 438.05 V, 제한전압은 583.08 V로 측정되었다. 열화된 바리스터의 경우, 누설전류는 1.52 mA, 기준전압은 283.54 V, 제한전압은 606.71 V로 측정되었다. 제한전압의 과형이 측정되었으므로 서지에 대한 보호 동작은 가능하지만, 누설전류 및 기준전압이 초기값 대비 10%이상 변화하였으므로 향후 열폭주에 의한 사고가 발생할 수 있다.

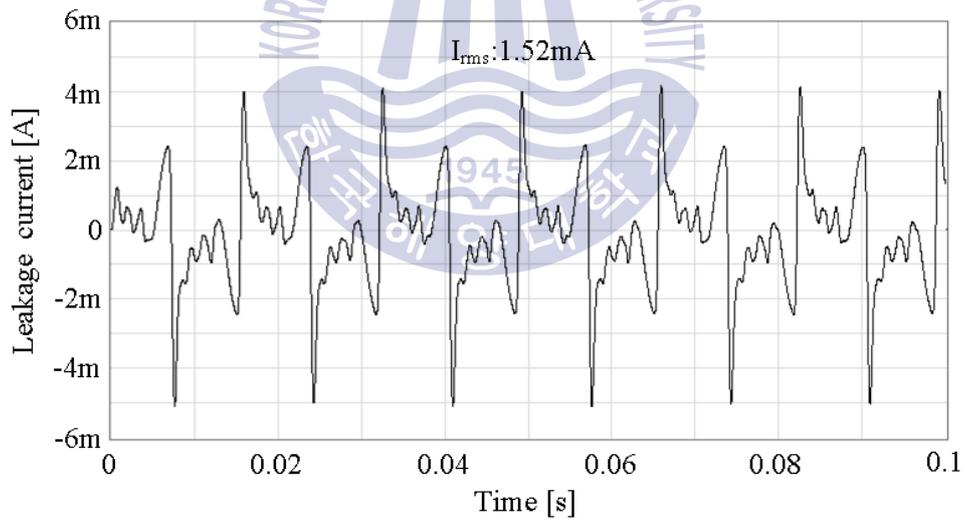
표 4.3 적용 실험 결과

Table 4.3 Results of application test

	기존 측정법			진단장치			비고
	누설전류 [μA]	기준전압 [V]	제한전압 [V]	누설전류 [μA]	기준전압 [V]	제한전압 [V]	
신품	437	439	590	453.09	438.05	583.08	정상
열화	1,471	285	612	1,520	283.54	606.71	불량



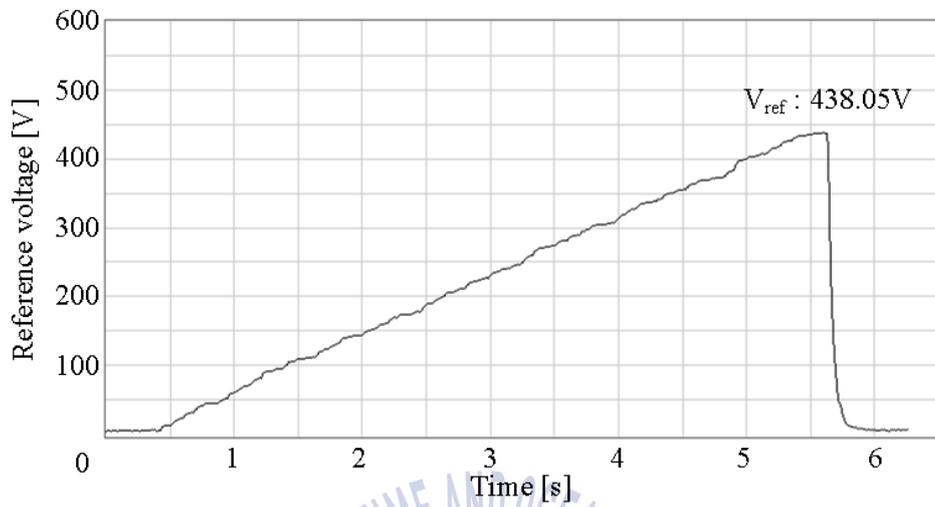
(a) 신품



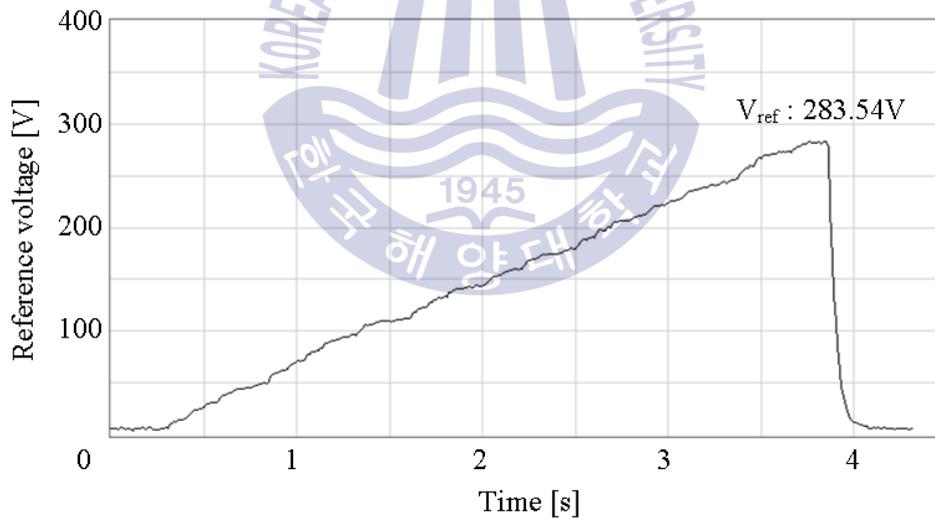
(b) 열화

그림 4.7 누설전류

Fig. 4.7 Leakage current



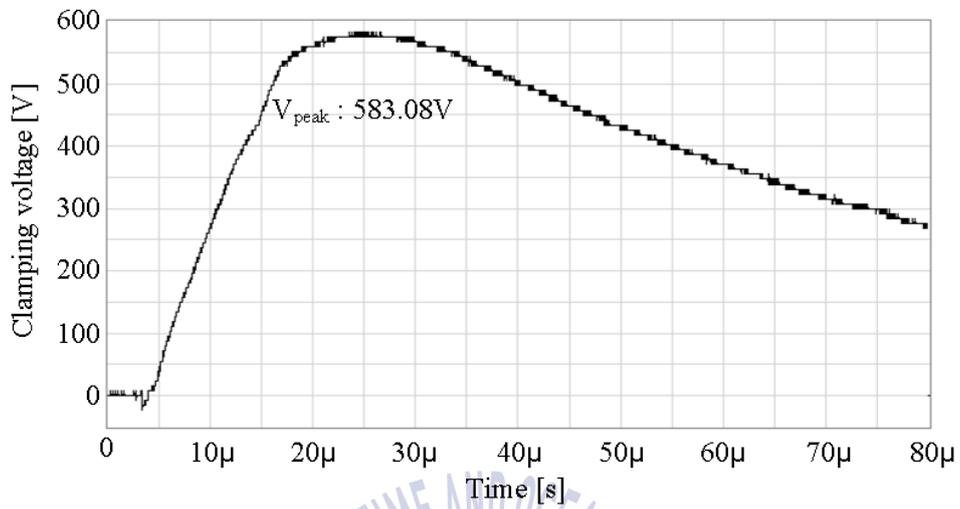
(a) 신포



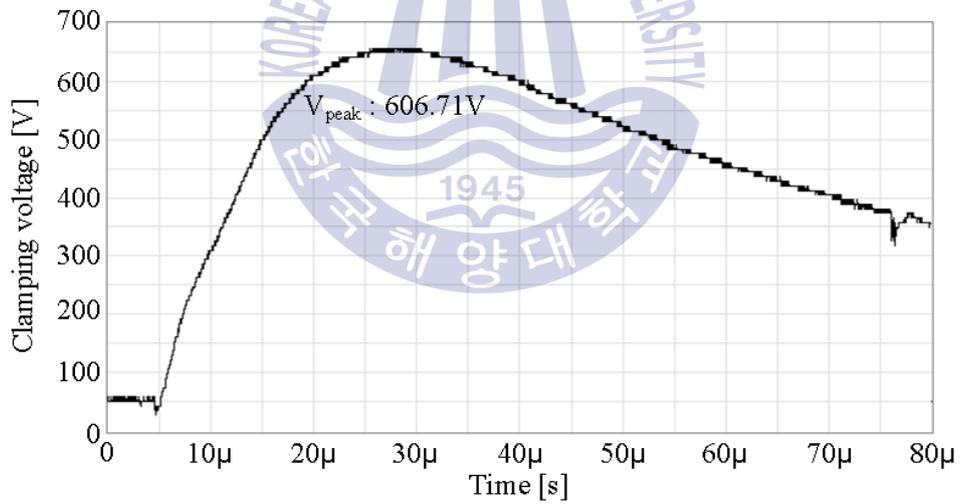
(b) 열화

그림 4.8 기준전압

Fig. 4.8 Reference voltage



(a) 신품



(b) 열화

그림 4.9 제한전압

Fig. 4.9 Clamping voltage

제 5 장 결 론

본 논문에서는 서지보호기의 열화 및 On-line 진단장치에 관하여 기술하였다. 전기적 특성 변화와 건전성 기준을 제시하기 위하여 가속열화 실험을 수행하였다. 또한 실험 결과를 근거하여 측정 파라미터를 선정하고, 진단장치를 시제작하였다.

열화 진전에 따라 전체 누설전류는 초기의 증가율은 4% 미만으로 변화가 거의 없었고, 열화가 진전될 때 10% 이상 증가하였다. 기준전압은 열화 초기 감소율은 2.1% 미만으로 일정한 값을 유지하였고, 열화가 진전될 때 5% 이상 감소하였다. 각각 10% 이상 변화 시, 열화는 지수 함수적으로 급격히 진행되고, 보호 기능을 상실하거나 열폭주로 파괴되므로 교체가 필요하다. 제한전압은 열화에 따른 변화가 작아서 변화율로 상태 진단은 불가능하다. 하지만 소손 발생 시점에서 왜곡이 발생하기 때문에 파형의 형상으로 진단이 가능하다.

열화진단을 위한 파라미터는 전체 누설전류, 기준전압 및 제한전압이며, 이를 측정하기 위한 회로를 설계하였다. 시제작 진단장치의 성능을 검증하기 위하여 적용실험을 수행하였으며, 기준값과의 비교 오차는 3% 미만이었다. On-line 상태에서 신포와 열화된 바리스터의 누설전류 및 기준전압은 각각 $453.09 \mu\text{A}$, 438.05 V , 1.52 mA , 283.54 V 로 측정되었고, 제한전압 파형의 왜곡은 발생하지 않았다. 이들 결과로부터 On-line 상태에서 서지보호기의 상태 진단에 충분히 활용될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] Ronald B. Standler, "Protection of Electronic Circuits from Overvoltages", Dover, pp.109-138, 1989.
- [2] S.Vitet, A.Schet, L.Stenstrom, J.Lundquist, "Thermal Stress on ZnO Surge Arresters in Polluted Conditions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No.4, pp.2023-2036, 1992.
- [3] Credson de Salles, Mannuel L.B. Martinez, Alvaro Antonio Alencar de Queiroz, "Ageing of Metal Oxide Varistors due to Surges", International Symposium on Lightning Protection, pp.171-176, 2011.
- [4] Credson de Salles, Manuel L.B. Martinez, Alvaro A.A. de Queiroz, "Surge Ageing of Metal Oxide Varistors", 2015 Electrical Insulation Conference, pp.137-140, 2015.
- [5] Y. Miyakawa, T. Sakoda, M. Otsubo, M. Ikuta, "Influence of Temperature Variation on Characteristics of ZnO Elements", Proceeding of 2008 International Symposium on Electrical Insulating, pp.119-122, 2008.
- [6] Kari Lahti, Kari Kannus, Kirsi Nousiainen, "Diagnostic Methodes in Revealing Internal Moisture in Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No.4, pp.951-956, 2002.
- [7] E.T. Wanderley Neto, E.G. da Costa, T.V. Ferreira, M.J.A. Maia, "Failure Analysis in ZnO Arresters Using Thermal Images", IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition:Latin America, pp.1-5, 2006.
- [8] S. B. Lee, S. J. Lee, B. H. Lee, "Analysis of Thermal and Electrical Properties of ZnO Arrester Block", Current Applied Physics, Vol.10, pp.176-180, 2010.

- [9] 길경석, 한주섭, 송재용, 김명진, 김정배, 조한구, “뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성과 피뢰기 열화진단 전문가 시스템”, 대한전기학회 논문지, p.152-157, 2002.
- [10] 길경석, 송재용, 김일권, 문승보, 신광철, “직류전동차용 피뢰기 진단 기술”, 한국철도학회 논문집, Vol.9, No.4, pp.357-361, 2006.
- [11] 이시이 마사루, “알기 쉬운 뇌대책의 기본 및 기술”, 한국오토와전기 주식회사, pp.6-41, 2013.
- [12] 박대원, “국제규격 대응 컴퓨터 네트워크용 서지방호장치에 관한 연구”, 석사학위논문, 한국해양대학교대학원, 2005.
- [13] Ronald B. Standler, “Protection of Electronic Circuits from Overvoltages”, Dover, pp.133-145, 1989.
- [14] J. D. Harnden Jr, F. D. Martzloff, W. G. Morris and F. B. Golden, “Metal Oxide Varistor a New Way to Suppress Transients”, Electronics, pp.91-95, 1972.
- [15] A. Haddad, D.F. Warne, “Advances in High Voltage Engineering”, The Institution of Engineering and Technology, 2007.
- [16] Julio C. Montenegro, Jorge L. Ramirez, “ Degradation of Zinc Oxide Varistors”, Proceeding of the 1995 First IEEE International Caracas Conference, pp.352-354, 1995.
- [17] Alain Vicaud, “AC Voltage Ageing of Zinc Oxide Ceramics”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.1 , No.2, pp.49-58, 1985.
- [18] 한주섭, “전력용 피뢰기의 열화진단기술 개발에 관한 연구”, 박사학위논문, 한국해양대학교대학원, 2002.
- [19] V.S. Brito, G.R.S. Lira, E.G. Costa, “Methodology for Decomposition of the Leakage Current in Metal Oxide Surge Arresters”, 18th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.2156-2161, 2013.

- [20] Xianglian Yan, Yuanfang Wen, Xiaoyu Yi, “Study on the Resistive Leakage Current Characteristic of MOV Surge Arresters”, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 : Asis Pacific, pp.683-687, 2002.
- [21] Y.S. Kim, “Failure Prediction of Metal Oxide Varistor Using Nonlinear Surge Look-up Table based on Experimental Data”, Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol.16, No.6, pp.317-322, 2015.
- [22] KS C IEC 62305-1, 피뢰시스템-제1부:일반원칙, 국가기술표준원, 2012.
- [23] IEEE Standard for Metal Oxide Surge Arrester for AC Power Circuit(> 1 kV), IEEE Power Engineering Society, 2008.
- [24] 길경석, 김윤식, “선박전기설비 시험용 조합형 써지발생장치의 제작과 특성”, 한국마린엔지니어링학회지, Vol.21, No.4, pp.387-392, 1997.
- [25] KS C IEC 61000-4-5, 전기자기적합성(EMC)-제4-5부:시험 및 측정 기술- 서지 내성시험, 국가기술표준원, 2014.
- [26] 이한규, 김재중, 장석원, 광계달, “산화아연 바리스터의 가속수명시험”, 대한기계학회 춘추학술대회, pp.11-18, 2006.
- [27] N.Tsukamoto, M. Ishii, “Repetitive Impulse Withstand Performance of Metal Oxide Varistors”, IEEE Transaction on Power Delivery, pp.1-7, 2016.
- [28] 정기우, 김선재, 길경석, 박희철, “LabVIEW 기반 피뢰기 I-V특성 분석장치”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.465-469, 2013.
- [29] 서재석, 박대원, 이정운, 길경석, 김선재, 박경수, 박서준, “KS C IEC 62305 기반 휴대용 서지보호기(SPD) 진단장치 개발”, 중소기업 기술개발사업 최종 보고서, pp.22-36, 2016.

연구논문 발표실적

◎ 국내전문학술지

- [1] 조향은, 왕국명, 김선재, 박경수, 길경석, “SF₆-N₂ 혼합가스 중 돌출 결함의 부분방전 특성”, 한국전기전자재료학회 논문지, 제29권, 제1호, pp.44-49, 2016.
- [2] 윤민영, 박경수, 왕국명, 김선재, 길경석, “음향신호의 유증 전파특성 분석”, 한국전기전자재료학회 논문지, 제29권, 제2호, pp.114-119, 2016.
- [3] 박서준, 변성환, 김선재, 박경수, 길경석, “선박용 LED 등기구의 적용에 따른 경제성 분석”, 한국마린엔지니어링학회 논문지, 제40권, 제4호, pp.342-347, 2016.

◎ 국내학술회의 논문집

- [1] 왕국명, 김선재, 하희주, 박경수, 길경석, “극저온에서 LED 밸브의 동작특성”, 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회논문집, p.125, 2014.
- [2] 박경수, 김태성, 박서준, 길경석, “LabVIEW 기반 레일 진단 시스템”, 2015년도 한국철도학회 추계학술대회논문집, p.193, 2015.
- [3] 박경수, 김선재, 왕국명, 황성철, 길경석, “철도 차량용 피뢰기의 뇌 충격전류에 의한 열화 특성”, 2016년도 한국철도학회 춘계학술대회논문집, p.147, 2016.
- [4] 박경수, 김선재, 왕국명, 길경석, “가스절연개폐장치에서 결함별 부분방전의 특성”, 2016년도 한국철도학회 춘계학술대회논문집, p.148, 2016.
- [5] 왕국명, 김선재, 박경수, 길경석, “직류 피뢰기용 단로장치의 제작 및 특성”, 2016년도 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, p.74, 2016.

© 국제학술회의 논문집

- [1] M.Y. Yun, J.W. Kim, K.S. Park, G.S. Kil, “A Pilot Study on an Ultraviolet LED Searchlight”, The International Conference on Electrical Engineering(ICEE), July 5-9. 2015.
- [2] K.S. Park, G. Wang, S.J. Kim, G.S. Kil, “Design and Fabrication of an LED Searchlight”, The International Conference on Electrical Engineering(ICEE), July 4-7. 2016.



감사의 글

2년간의 석사생활을 정리하려고 하니 감회가 새롭습니다. 석사 생활동안 도움을 주신 분들께 감사의 글로 마음을 표현하고자 합니다.

먼저 부족한 저를 제자로 받아 주신 길경석 교수님께 고개 숙여 감사의 말씀 올립니다. 2년 동안 학술적인 가르침과 참된 인간으로 성장할 수 있도록 지도해주신 교수님의 가르침을 잊지 않겠습니다. 이 지면으로 감사의 말을 전하기 부족하지만, 교수님의 은혜 잊지않고 청출어람하는 제자가 되도록 노력하겠습니다.

아울러 바쁘신 와중에도 논문의 부족한 부분을 채워주시고 심사해 주신 김윤식 교수님, 장낙원 교수님께도 감사의 말씀 올립니다. 또한 학부생부터 석사까지 학문적으로 지도해 주신 이성근 교수님, 전태인 교수님, 서동환 교수님, 주양익 교수님께 감사드립니다.

고전압 연구실의 3대 랩장이었던 선재형님. 실험실 선배처럼 또는 친형처럼 많은 조언과 격려 감사합니다. 형님의 진심어린 충고 덕분에 2년동안 난관을 잘 극복할 수 있었습니다. 그리고 선재 형님의 뒤를 이어 4대 방장을 하고 있는 국명이. 부족한 후배 많이 알려줘서 고맙고 앞으로 고전압 연구실 잘 이끌어 주길 바란다. 동생보다 늦게 들어와서 고생하고 있는 서준이형. 가끔 버릇없게 대하기도 하고 많이 놀리기도 했지만 다 받아주고 힘들 때 많이 도와줘서 고맙습니다. 마지막으로 실험실 막내로 들어온 성철이. 적응하느라 많이 힘들텐데 초심 잃지 말고 끝까지 파이팅 해라.

언제나 실험실 후배들 챙겨주는 이엠아이테크 선배님들. 실험실 오셔서 열심히 하라고 격려해 주시는 서재석 사장님, 힘든일 있을 때 고민상담 해주시는 대원이형님, 정윤이형님, 태성이형님, 기우형. 정말 감사드립니다.

석사 생활동안 격려와 조언 주셨던 성욱이형님, 홍근이형님, 조규룡 연구원님에게도 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 그리고 항상 학과사무실에서 실험실 후배들 챙겨주는 회주누나. 같이 연구실 생활한 진욱이형, 민영이형. 지면에 이름을 남기지 못했지만 사회에 나가서 고전압 연구실의 명성을 드높이고 있는 선배님들 정말 감사합니다.

자주 못보지만 멀리에서 응원해준 목포 친구들. 건국이, 용국이, 성우, 진오. 힘들 때 징징거리고 격려해줘서 고맙다. 우리 우정 죽을 때 까지 영원했으면 좋겠다.

마지막으로 여기까지 올 수 있도록 지원해주고, 끝까지 믿어준 부모님. 항상 고맙고 사랑합니다. 그리고 내년에 결혼하는 누나. 철부지 어린애처럼 사고치지 말고 자형이랑 행복하게 잘 살아라.

감사드릴 분들이 많지만 언급하지 못한점 죄송하고, 많은 도움 주신거 감사합니다. 사회에 나가서 고전압 연구실의 일원으로 명성을 드높이도록 노력하겠습니다.

