



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.

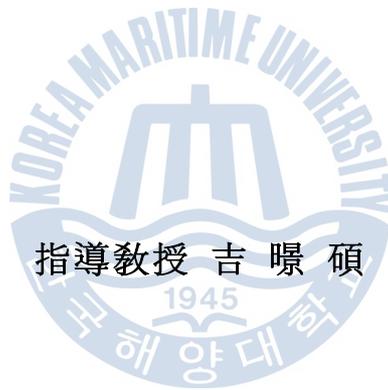
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

방사전자파 검출에 의한  
폐쇄배전반 상태진단에 관한 연구

A Study on the Condition Monitoring Diagnosis of a Closed-Switchboard  
by Detection of Radiated Electromagnetic Waves



2011年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 善 宰

本 論文을 金善宰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 徐 東 煥 ①



2010年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 善 宰

## 목 차

목 차 .....	i
그림 및 표 목차 .....	iii
Abstract .....	v
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이 론 .....	4
2.1 폐쇄배전반 .....	4
2.2 절연열화 .....	9
2.3 진단기법 .....	20
제 3 장 실험 및 방법 .....	22
3.1 실험계 .....	22
3.1.1 아크 발생장치 .....	23
3.1.2 코로나 전극계 .....	25
3.2 실험 방법 .....	28

제 4 장 결과 및 고찰 .....	29
4.1 아크 방전 .....	30
4.2 코로나 방전 .....	32
제 5 장 결 론 .....	37
참 고 문 헌 .....	39



## 그림 및 표 목차

### 『그림 목차』

그림 1.1	전력설비의 화재통계보고 .....	1
그림 1.2	전기화재의 발생원인 .....	2
그림 2.1	수변전설비의 단선결선도 .....	4
그림 2.2	계기용 변압·변류기 .....	6
그림 2.3	전력 퓨즈 .....	7
그림 2.4	진공차단기 .....	8
그림 2.5	아크 방전의 발생 .....	11
그림 2.6	아크 방전의 종류 .....	12
그림 2.7	직렬아크 방전의 전압파형 .....	13
그림 2.8	정상전류와 아크전류 .....	14
그림 2.9	아크 온도 및 압력 .....	14
그림 2.10	공간전하 분포 .....	15
그림 2.11	정극성 코로나에서의 전자사태 .....	17
그림 2.12	부극성 코로나에서의 전자사태 .....	18
그림 2.13	전위경도 .....	19
그림 3.1	실험계의 구성 .....	22
그림 3.2	아크 발생장치 .....	24
그림 3.3	아크 방전 전극계 .....	24
그림 3.4	코로나 방전의 실험계 .....	25
그림 3.5	전극계의 구성 .....	27
그림 4.1	안테나 특성 및 배경잡음 .....	30
그림 4.2	아크 방전의 주파수 스펙트럼 .....	31
그림 4.3	코로나 방전의 주파수 스펙트럼 .....	36

## 『표 목차』

표 2.1	고전압의 접근한계 .....	5
표 2.2	전력설비의 열화 원인 및 현상 .....	10
표 2.3	진단기법 .....	20
표 3.1	전자파 측정장비 .....	23
표 3.2	실험장치 사양 .....	26
표 3.3	실험조건 .....	28
표 4.1	절연지에서 전극계에 따른 주파수 스펙트럼 .....	32
표 4.2	공기중 전극계에 따른 주파수 스펙트럼 .....	33



# A Study on the Condition Monitoring Diagnosis of a Closed-Switchboard by Detection of Radiated Electromagnetic Waves

*by SUN-JAE KIM*

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



## Abstract

This thesis dealt with a basic study on the development of condition monitoring diagnostic technique for power facilities installed inside closed-switchboards. Major causes of accidents in a closed-switchboard are series arc discharge by incomplete connection and partial discharge by insulation degradation.

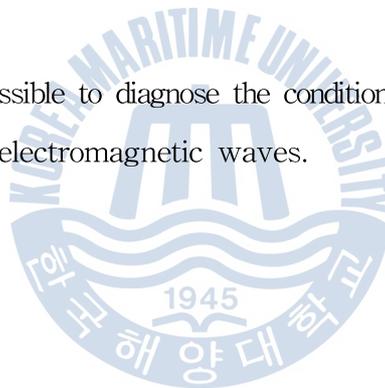
The series arc discharge was simulated using a terminal block and an electrode system of a stainless needle-carbon rod. The corona discharge was simulated in five types of electrode system which consist of a needle and a plane electrode. The experiment was carried out in an electromagnetic shielding room, and the measurement system was

composed of an Ultra log antenna of 30 MHz ~ 2 GHz and an EMI test receiver of 150 kHz ~ 2 GHz, and a spectrum analyzer.

Frequency spectrum of series arc discharge was distributed in ranges of 30 MHz ~ 200 MHz for the needle-carbon rod and of 30 MHz ~ 400 MHz for the terminal block. In corona discharge, frequency spectrum existed in ranges of 30 MHz ~ 2 GHz depending on types of electrode system.

The experimental results showed that frequency spectrum is different as abnormal condition varies, and the inner space of a closed-switchboard is not influenced by outer noise generated by electrical accident or broadcast wave.

Consequently, it is possible to diagnose the condition of closed-switchboards by detecting radiated electromagnetic waves.



## 제 1 장 서 론

송배전, 발·변전소 등에 기설치된 전력기기의 노후 및 절연열화로 인하여 사고가 발생되기 때문에 예방진단기술에 관한 연구가 필요하다. 또한 고도 정보화 시대의 첨단 기기의 사용으로 무중단 전력공급에 대한 중요성이 더욱 부각되고 있다. 이와 더불어 유비쿼터스 도시(U-City)로의 변화에 대응하기 위한 전력관리망(U-Power System)의 연구도 활발히 진행되면서 절연진단에 대한 관심이 크다.

그림 1.1은 2008년에 발생한 전력설비의 화재통계보고로써 폐쇄배전반의 화재 발생률이 45%로 가장 높았다<sup>[1],[2]</sup>.

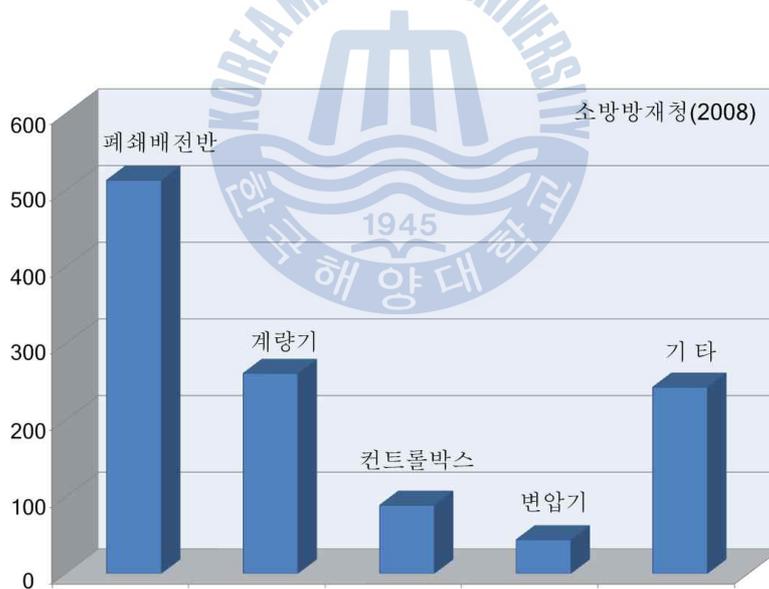


그림 1.1 전력설비의 화재통계보고

Fig. 1.1 Statistical report of fires in power facilities

폐쇄배전반은 계전기, 제어기, 계측기와 같은 감시제어용기기와 차단기, 단로기 및 고전압변압기 등의 전력기기로 구성되며, 각각의 기기는 지지대에

설치되어 있다. 전력기기의 노후로 인한 접촉점의 열화, 변압기 운전시 발생되는 진동이나 충격으로 인한 내부선로의 손상 등과 같이 접촉이 불완전한 환경은 아크 방전을 발생시켜 주위 절연물을 산화 및 열분해하여 탄화 도전로(Carbonized Path)를 형성시킨다. 탄화 도전로 주위는 전자의 이동에 의해 줄열이 발생됨에 따라 절연내력이 저하되어 전기화재나 감전 등의 사고가 발생하게 되며 전력공급의 중단으로 인해 경제적 손실 및 인명사고와 같은 2차 사고가 야기된다.

그림 1.2와 같이 전기화재의 발생원인 중 50% 이상이 아크를 동반한 단락 사고이다. 또한 절연물의 성능 저하에 따른 코로나 발생도 장기 열화를 통한 사고원인으로 보고되고 있다.

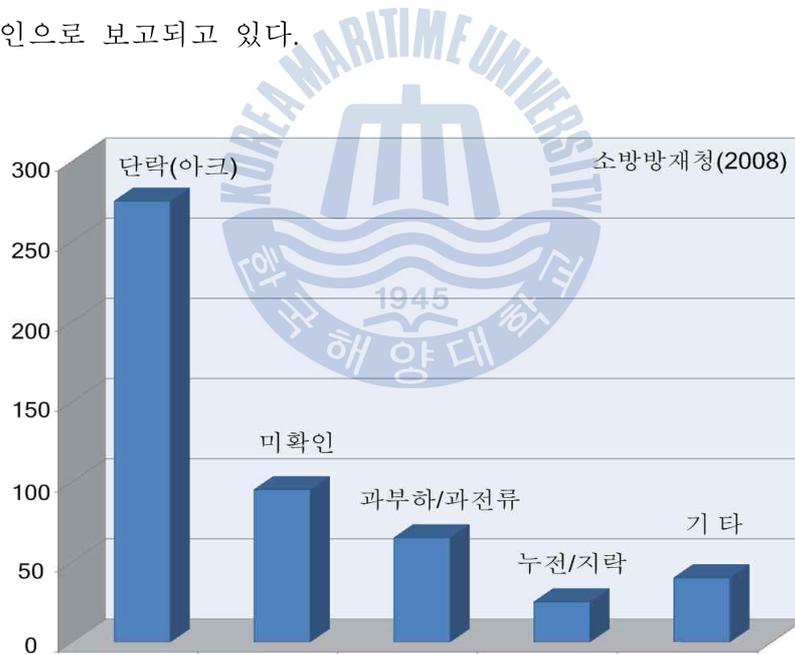


그림 1.2 전기화재의 발생원인  
Fig. 1.2 Causes of electrical fire

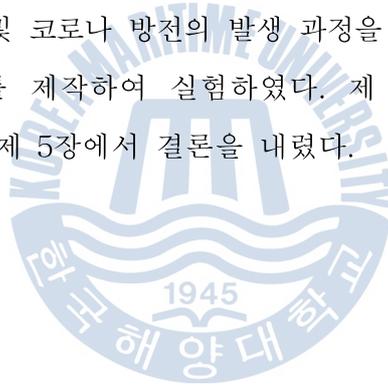
따라서 폐쇄배전반내의 절연파괴와 이상상태로 인해 발생하는 진동, 초음파, 방사전자파 등의 검출을 통해 사고를 미연에 방지하여 전력 공급의

안정성과 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 아크 방전은 전압·전류 측정법, 광 검출법, 초음파 측정법 및 전자파 측정이 가능하며 코로나 방전은 자외선, 초음파, 안테나 검출방법 등이 있다.

상기와 같은 검출방법중 전자파 측정법은 센서의 소형화 및 경량화가 가능하므로 전력기기가 밀집되어 있는 폐쇄배전반의 절연진단에 적합하며, 방전의 종류에 따라서 특징적인 주파수 스펙트럼을 나타내므로 결함의 판단도 가능하다.

본 논문에서는 폐쇄배전반에 설치되어 있는 전력기기의 온라인 상태진단 기술 개발을 위한 기초 연구로써 아크 및 코로나 방전에 의해 발생하는 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 분석하였다.

제 2장에서는 아크 및 코로나 방전의 발생 과정을 설명하고, 제 3장에서는 발생장치 및 전극계를 제작하여 실험하였다. 제 4장에서 방사전자파의 스펙트럼을 분석하여 제 5장에서 결론을 내렸다.



## 제 2 장 이 론

### 2.1 폐쇄배전반

전력계통에서 사용되는 폐쇄배전반은 그림 2.1과 같이 다양한 전력기기를 인체 보호가 가능한 폐쇄 외함에 감시 제어용 기기 및 주회로 차단기기 등으로 설치한 것이다. 사용자의 요구 조건에 따라 전력 계통 감시, 보호, 조작이 가능하도록 구성되며 기기의 정격, 안전 보호 등급, 적용 규격에 따라 제품의 종류 및 크기가 다양하다.

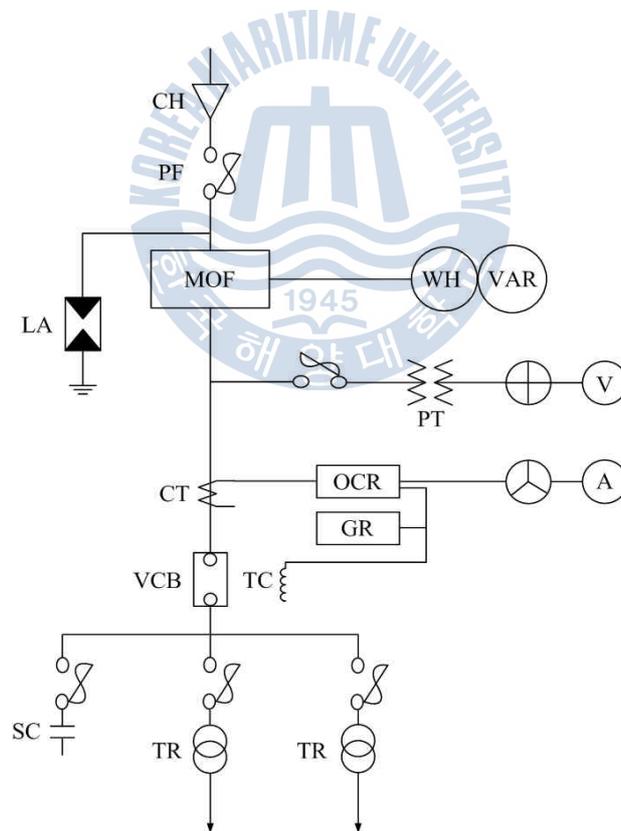


그림 2.1 수변전설비의 단선결선도

Fig. 2.1 Skeleton diagram of a incoming transfer facility

일반적으로 사용되는 큐비클은 보수 점검이 용이하고 신뢰성이 높으며, 설치 면적이 작고 기기의 구성이 간소하다. 큐비클식 고전압 수전설비는 설비용량이 1,000kVA 이하에 주로 사용되는 CB타입과 한류퓨즈(PF)와 교류부하개폐기(LBS)를 조합한 PF.S타입으로 구분된다. 큐비클의 두께는 옥내형은 1.6mm, 옥외형은 2.3mm 이상이며, 통전부와의 접근한계 거리는 표 2.1과 같다.

표 2.1 고전압의 접근한계

Table 2.1 Approach limitation of high voltages

전압[kV]	통전부와의 접근한계[cm]
22	20
33	30
66	50
154	140

폐쇄배전반 내부에는 MOF, PT, CT, PF, VCB, LA, COS, TR 등이 설치되어 있다.

그림 2.2는 계기용 변압·변류기(MOF)로써 전기사용량을 계측하기 위한 목적으로 사용된다. 가정용 저전압에서는 계량기를 별도의 기기없이 사용가능하다. 그러나 고전압에서는 절연열화로 인하여 감전 및 화재가 발생되기 때문에 계기용 변압·변류기가 필요하다.

내부구조는 계기용 변압기(Potential Transformer, PT)와 계기용 변류기(Current Transformer, CT)로 구성되며, 고전압·대전류를 저전압·소전류로 변환시킨다. 사용시 주로 나타나는 전력기기의 결함은 열화에 따른 사고와 연결 부위의 접촉불량에 의한 과열현상이 있다<sup>[3],[4]</sup>.

그 예로 그림 2.2에 타원으로 표시된 계기용 변압 변류기의 부상부분에서 먼지 및 주변 온도로 인하여 열화가 진전되어 코로나가 발생한다.

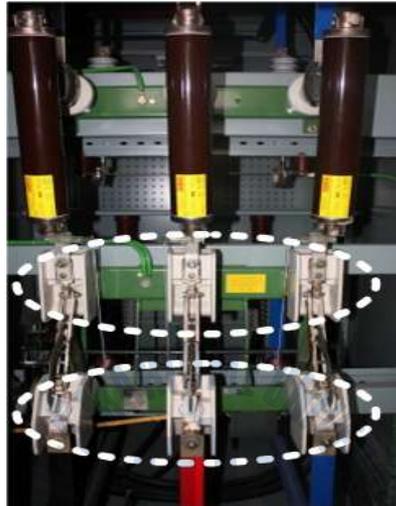


그림 2.2 계기용 변압·변류기  
Fig. 2.2 Photograph of metering out fit

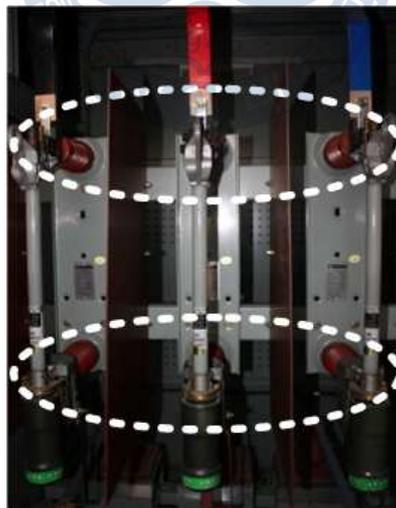
계기용 변압기(PT)는 고전압을 저전압으로 변환하여 전압계, 전력계, 역율계, 각종 계전기 표시 등으로 사용할 수 있다. 1차측은 전압에 따라 상이하지만 2차측 정격전압은 국제표준으로 110 V이다. 사고를 방지하기 위한 목적으로 1차측에 PT퓨즈를 시설하여 코일의 소손 등 고장전류를 차단하며, 고전압으로부터 분리시키는 역할을 한다. 진단 방법은 방전 및 공진에서 발생하는 소리와 기계적인 열화 등을 측정하는 것이다.

계기용 변류기(CT)는 고전압회로의 대전류를 소전류로 변환하기 위한 것으로 폐쇄배전반의 전류계, 전력계의 전류코일 및 과전류 계전기의 트립 코일 전원으로 사용된다. 2차측이 폐회로이면 1차측과 2차측 코일에서 발생하는 자속이 서로 쇄교되어 포화되지 않기 때문에 사고가 발생하지 않는다. 그러나 1차측 코일이 통전된 상태에서 2차측을 개방하면 1차측 자속이

2차측과 쇄교되지 못 한다. 이때 발생하는 댐돌이 자속으로 인해 포화 상태가 되면서 감전사고가 발생한다.



(a) 한류형



(b) 비한류형

그림 2.3 전력 퓨즈

Fig. 2.3 Photograph of a power fuse

그림 2.3은 전력 퓨즈로써 고전압 및 특고전압 기기의 단락보호용으로 사용되며, 소호방식에 따라 (a) 한류형과 (b) 비한류형으로 구분된다.

한류형 퓨즈는 아크저항을 통해 사고전류를 강제적으로 억제하는 것이다. 밀폐된 형태로 퓨즈 엘리먼트와 규소 등으로 구성되며 수변전설비에서 많이 사용된다. 비한류형은 한류형 이외의 것을 총칭하는 것으로 소호가스를 뿜어 전류 0점인 극간의 절연내력을 재기전압 이상으로 높여서 차단한다. 파워 퓨즈는 과전류 가운데 단락전류를 고속으로 차단하는 단락보호용으로 사용되며 과부하 발생률이 높은 곳에 설치된다. 차단기와 변성기의 역할을 하며, 동작특성이 우수하다. 부하전류가 흐를 때 개폐할 수 없으며 퓨즈가 끊어지면 전체를 교체해야 하는 단점이 있다. 그림 2.3에 타원으로 표시된 연결 부분에서 접촉불량으로 인하여 아크가 발생한다. 이러한 사고는 “노열화(원통 부분에서 용단된 것)”, “과부하(퓨즈 중간부분에서 용단)”, “단락사고(엘리먼트가 증발하여 원통이 변색된 것)” 등을 통해 예측할 수 있다.



그림 2.4 진공차단기

Fig. 2.4 Photograph of a vacuum circuit breaker

그림 2.4의 진공차단기는 진공밸브에서 접점을 ON/OFF하여 전로를 차단하는 방식으로 구조가 매우 간단하다. 또한 아크 소호능력을 이용하기 때문에 매우 높은 절연내력을 지니고 있어 화재 발생률이 낮다. 차단기의 외부 틈새 및 각 상별로 설치된 단락 방지판에서는 주로 코로나 발생이 야기되며, 이에 따른 안전 점검은 개폐표시기의 표시상태, 조작, 제어, 코일류의 소손, 진공밸브의 진공도 측정 등이 있다<sup>[5]~[7]</sup>.

## 2.2 절연열화

절연열화란 전력기기에 사용되는 절연재료가 열, 전기 및 환경적인 스트레스에 장기간 노출되어 초기의 물성 값이 변질되거나 파손 되는 현상을 의미한다. 열화의 발생과 진전기구는 절연방식, 절연재료, 전기기기 등의 종류 및 용량에 따라 달라진다.

표 2.2는 절연체의 열화 원인 및 현상에 관한 것으로 폐쇄배전반 내부의 기기사고는 장기간 사용에 따른 열화 및 과열 퓨즈, 컷아웃 스위치 등의 접촉불량과 과열현상 등으로 발생된다.

또한 폐쇄배전반 내부 및 외부의 온도, 습도, 먼지 등으로 인하여 열화가 촉진되며 절연체에서 발생하는 방전은 전력기기의 금구류 및 연결부위에서 아크 및 코로나 방전을 발생시킨다<sup>[8]~[10]</sup>.

절연물의 열화 상태를 진단하기 위한 방법은 정전 진단과 무정전 진단으로 구분된다. 정전 진단이란 전원을 완전히 차단한 상태에서 수행하는 것이고, 무정전 진단이란 운전 중인 상태에서 모니터링 하는 것을 의미한다.

본 논문에서는 아크 및 코로나 방전을 검출하기 위하여 활선상태에서도 진단이 가능한 안테나를 사용하였다.

표 2.2 전력설비의 열화 원인 및 현상

Table 2.2 Cause and phenomenon of power facility deterioration

열화요인		대 상	열화현상
스트레스성 열화	기계적	금속, 유기물	피로파괴 마 모
	열 적	금속, 유기물	열 피 로 느 슨 함
	전기적	절연물	부분방전
기 타 (온도, 습도, 먼지, 결로 등)		절연물	트 레 킹
			절연파괴
		접 점	접촉불량

### 가. 아크 방전

아크 방전은 절연열화로 인하여 연속적으로 빛을 내는 전기적 방전현상으로 고장전류의 경로에 따라 직렬아크와 병렬아크로 구분된다. 직렬아크는 노후된 전선 및 터미널 블록의 접촉불량에서 발생한다. 또한 금속성 물체에 전선이 찢겨지거나 변압기의 잣은 진동에 의해 전선의 일부가 절단된 경우와 같이 단일 도체의 불완전한 연결부위에서 검출된다.

그림 2.5는 전력기기의 불완전한 접촉부에서 아크 방전이 발생하여 열화되는 과정을 나타낸 것이다. 접촉부의 양단에서 저항이 증가하고 미소방전 및 온도상승에 의해 부분적으로 탄화가 발생하여 전류밀도가 증가한다. 이와 같은 과정이 반복되면서 아크 방전이 발생하고, 주위 절연물을 산화·열분해하여 탄화 도전로를 형성한다. 높은 임피던스에 의해 전계가 집중 되면서 병렬아크가 발생되어 전력기기가 파손된다. 병렬아크에 비해 에너지가 적은 직렬아크는 차단기의 동작영역 이하에서 발생되기 때문에, 선로 및 기기가 보호되지 못한 상태에서 지속적으로 방전이 발생하여 사고의 원인이 된다.

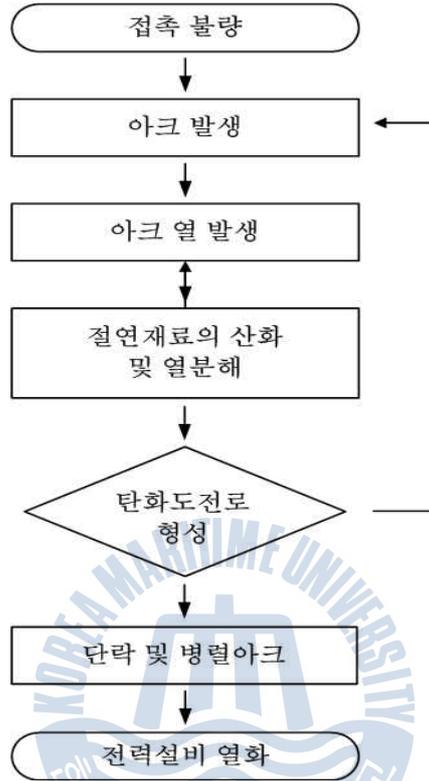


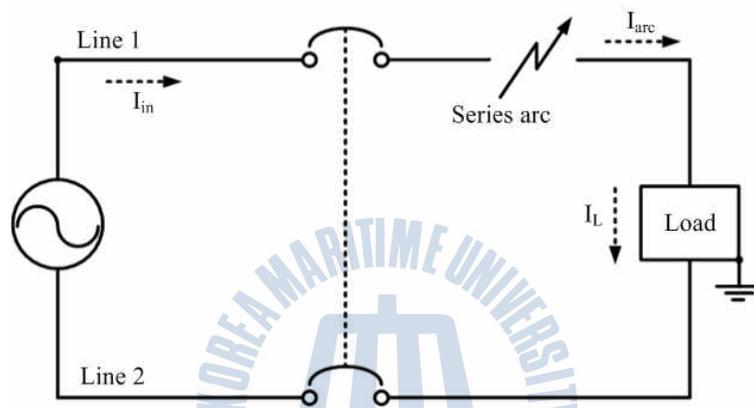
그림 2.5 아크 방전의 발생  
Fig. 2.5 Occurrence of arc discharge

그림 2.6(a)와 같이 직렬아크는 부하와 직렬로 연결되기 때문에 아크전류가 부하에 의해 제한되므로 병렬아크에 비해 에너지 레벨이 작다. 직렬아크 발생시 선로에 흐르는 전류는 식 (2.1)과 같이 부하전류와 동일하며, 기존 차단기의 동작범위 내에서 흐르기 때문에 일부 아크전류가 정상상태의 부하전류로 판별되어 신속한 차단이 어렵다.

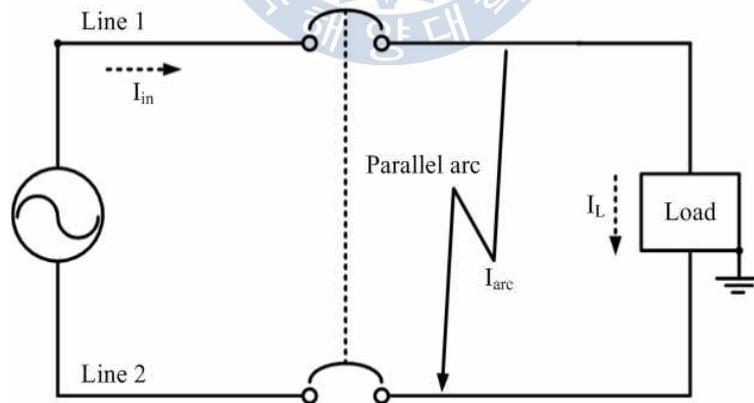
$$I_m = I_{arc} = \frac{V_{in} - V_{arc}}{Z} = I_L \quad (2.1)$$

$I_{arc}$ 는 아크전류,  $I_L$ 은 부하전류,  $V_{in}$ 은 입력전압,  $V_{arc}$ 는 아크전압,  $Z$ 는 회로의 임피던스이다.

그림 2.6(b)는 병렬아크를 나타낸 것으로 상도체와 중선선 (Line-to-Neutral)에 의도하지 않은 도전경로가 형성되었을 경우 발생한다. 이때 흐르는 전류는 선로 임피던스에 의해 결정되며 수 백 암페어의 대전류가 통전된다. 차단기가 동작하지 않는 짧은 순간에 강한 아크열을 발생시켜 화재 발생의 원인이 된다.



(a) 직렬아크



(b) 병렬아크

그림 2.6 아크 방전의 종류

Fig. 2.6 Types of arc discharge

그림 2.7은 저항성 부하에서 직렬아크 발생시 부하 및 아크양단의 전압 파형을 나타낸 것이다. 부하양단에서는 60 Hz 전원의 영점 부근에서 지연이 발생하며, 반파형태의 시작과 마지막지점에서 아크신호가 중첩되어 나타난다. 아크양단에서 측정된 전압파형은 임피던스의 급격한 변화로 수 ms 이내에 상승, 감소하는 구형파 형태로 순간적인 전압의 변화에 의해 고주파 성분이 발생한다.

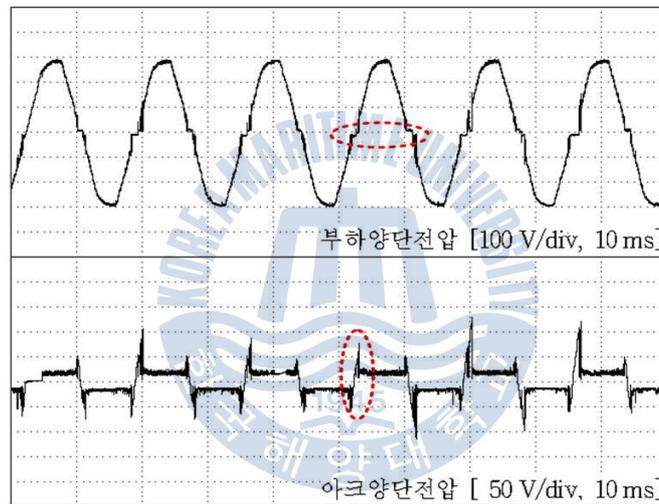


그림 2.7 직렬아크 방전의 전압파형

Fig. 2.7 Voltage waveform of series arc discharge

그림 2.8은 직렬아크 방전의 전류파형을 나타낸 것이다. 아크전류는 방전의 개시 및 소멸로 인하여 영점부근에서 약  $200\ \mu\text{s} \sim 300\ \mu\text{s}$ 의 영점지연이 발생하며, 전압강하에 의해 전류의 크기가 정상전류보다 작다. 이와 같이 낮은 레벨에서 아크가 발생하고 지속되기 때문에 차단기로는 전기화재의 징후를 예측하기 어렵다.

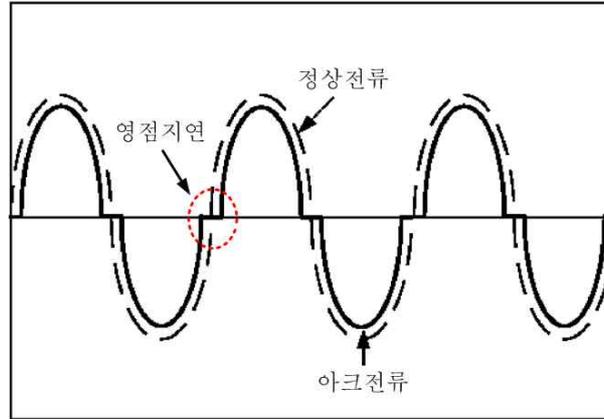


그림 2.8 정상전류와 아크전류  
Fig. 2.8 Normal and arc current

아크 방전으로 인하여 그림 2.9와 같이 10 ms ~ 15 ms 이내의 매우 짧은 시간에 온도 및 압력이 최대값으로 증가하며  $I^2t$ 에 비례하는 줄열로 인해 전력기기의 파손 및 인명피해가 야기된다<sup>[11]~[16]</sup>.

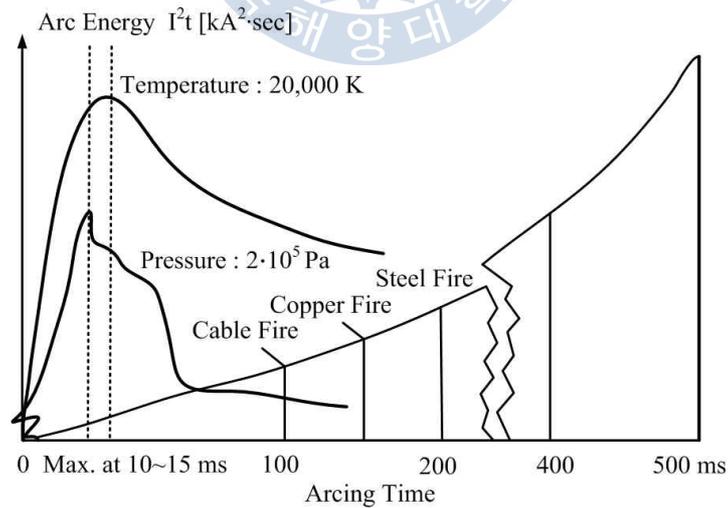
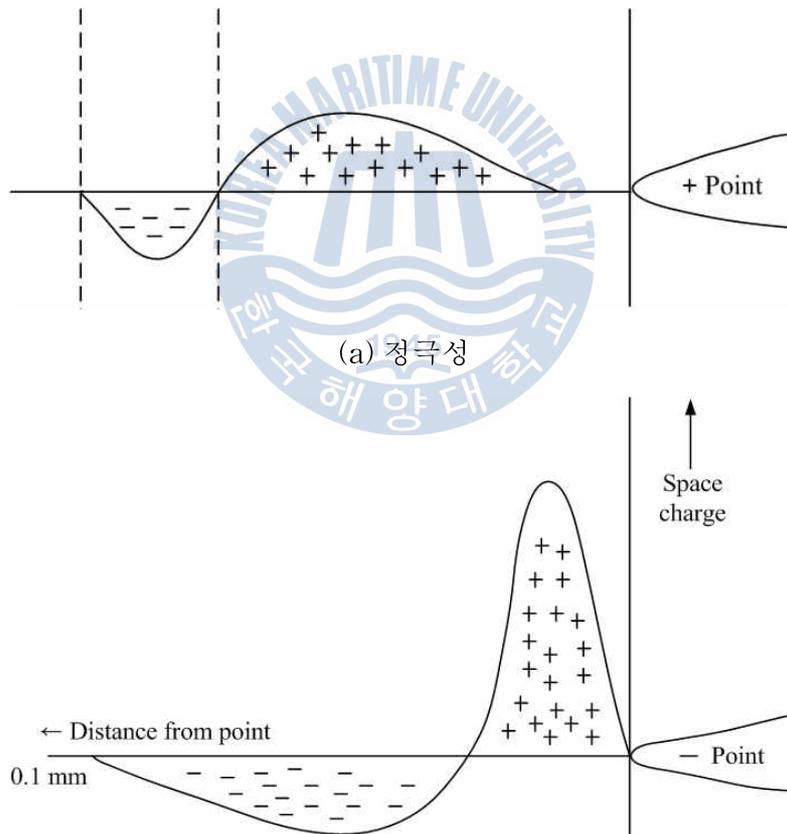


그림 2.9 아크 온도 및 압력  
Fig. 2.9 Arc temperature and pressure

나. 코로나 방전

코로나 방전은 첨예한 침전극의 주위에 불균일한 전계가 집중되어 발생되는 국부방전이다. 침전극 주변에 보이는 발광부위를 “코로나”라고 하며, 방전에 의한 전류는 수  $\mu\text{A}$  정도이다. 침전극의 전극과 전극 사이에 인가하는 전위차에 의해 상태가 변화하며, 그림 2.10(a)와 같이 양극에서 발생하는 것을 “정극성 코로나(Positive Corona)”라 하며 (b)와 같이 음극에서 발생하는 것을 “부극성 코로나(Negative Corona)”라고 한다<sup>[17]</sup>.



(a) 정극성

(b) 부극성

그림 2.10 공간전하 분포

Fig. 2.10 Distribution of space charge

침-평판 전극의 경우, 침전극에 양전압을 인가한 정극성 코로나는 전극간에 걸리는 전압증가에 따라 끝부분에 밀착된 글로우 코로나(Glow Corona)로부터 소음을 동반하는 브러시 코로나(Brush Corona)를 거쳐서 스트리머 코로나(Streamer Corona)로 진전된다. 스트리머 코로나가 맞은편 평판 전극에 도달하면 전로가 파괴되어 불꽃방전이 발생한다.

갭의 길이가 15 cm 이하의 경우 브러시 코로나는 형성되지 않고 곧바로 스트리머 코로나로 진행되며, 진전과정에 따라 세 가지 형태로 구분된다<sup>[18]~[20]</sup>.

#### ① 글로우 코로나

침-평판 전극에서 침에 양전압을 인가한 후 직류전압의 크기를 증가시켜 전압이 200 V 정도가 되면, 자주색의 빛이 발생하며 수  $\mu\text{A}$ 의 전류가 흐른다.

#### ② 브러시 코로나

침-평판 전극과의 갭이 수 cm 이상일 때 전압을 더욱 상승시키면 자주색 빛은 더욱 커지고, 침에서 코로나는 신장한다. 이 단계는 글로우 코로나와 같이 불안정하고, 소리를 내면서 발생된다.

#### ③ 스트리머 코로나

브러시 코로나에서 전압을 더욱 상승시키면 발광부와 전극간이 단락된 것 같이 방전이 형성된다. 글로우 코로나는 공기 중의 습도에 영향을 받지 않으며, 브러시 및 스트리머 코로나는 습도가 높아지면 발생이 저감된다.

코로나 개시전압 또는 약간 높은 양전압이 전극에 인가되면 그림 2.11과 같이 전계에 의한 자유전자가 양극으로 이동하여 전자사태가 발생하고 양극근처의 정이온이 양극 방향으로 확장한다. 이후 2차 발생된 정이온의 전자사태가 밀도를 증대시켜 스트리머의 발생환경을 만든다.

전압을 상승시키면 양극근처에서 음이온이 형성되고, 전류가 준지속적인 상태가 된다. 이 상태에서 전압을 더욱 상승시키면 양극 쪽에 있는 음이온이 안정성을 유지하지 못하여 불규칙한 펄스 전류를 발생 시키는데 이것을 Pre-breakdown 스트리머 현상이라고 하며, 이로 인하여 공기절연파괴가 발생된다.

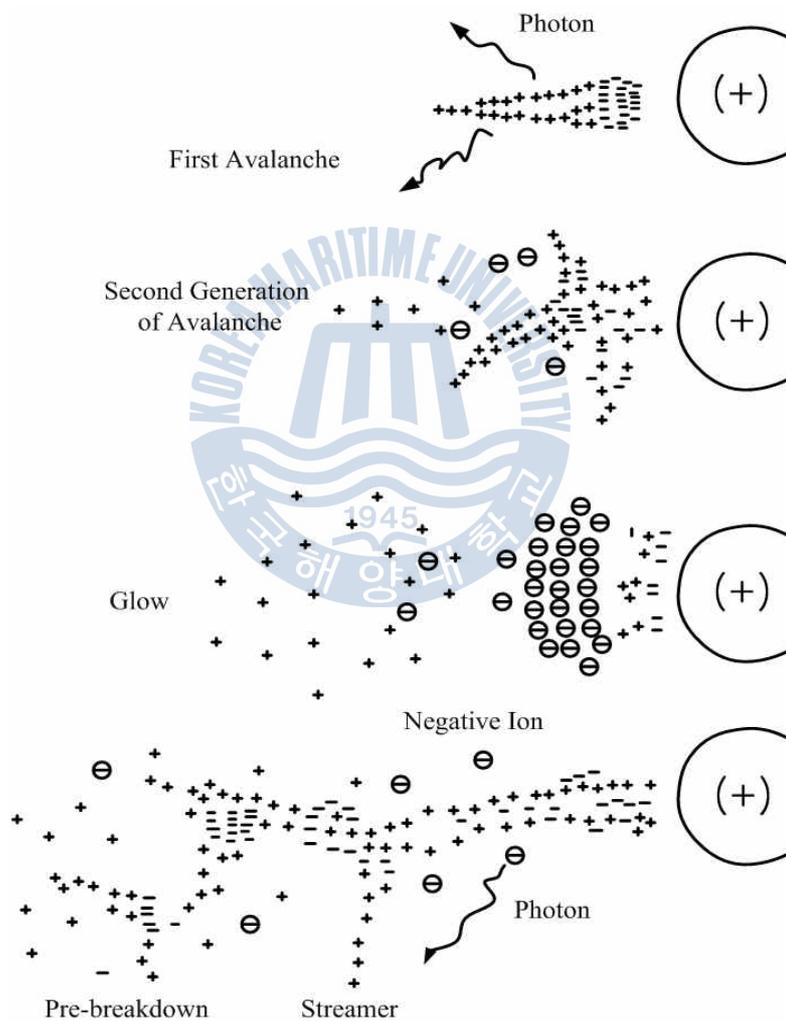


그림 2.11 정극성 코로나에서의 전자사태  
 Fig. 2.11 Electron avalanche at positive corona

부극성 코로나는 브러시 코로나와 유사하지만 정극성보다는 안정적이며 글로우 코로나와 유사한 특성을 나타낸다. 코로나 개시전압 또는 이보다 약간 높은 음극성 전압이 부극성에 인가되면 그림 2.12와 같이 매우 빠르고 지속적으로 맥동하는 트리첼(Trichel)펄스가 발생한다. 전리영역은 음극표면으로부터 바깥쪽으로 증대되고 충돌에 의한 전리가 약하게 되는 지점까지 확대된다. 이 영역 이상부터는 전자가 기체분자에 부착되어 음극으로부터 매우 천천히 멀어지는 음이온을 형성한다<sup>[21],[22]</sup>.

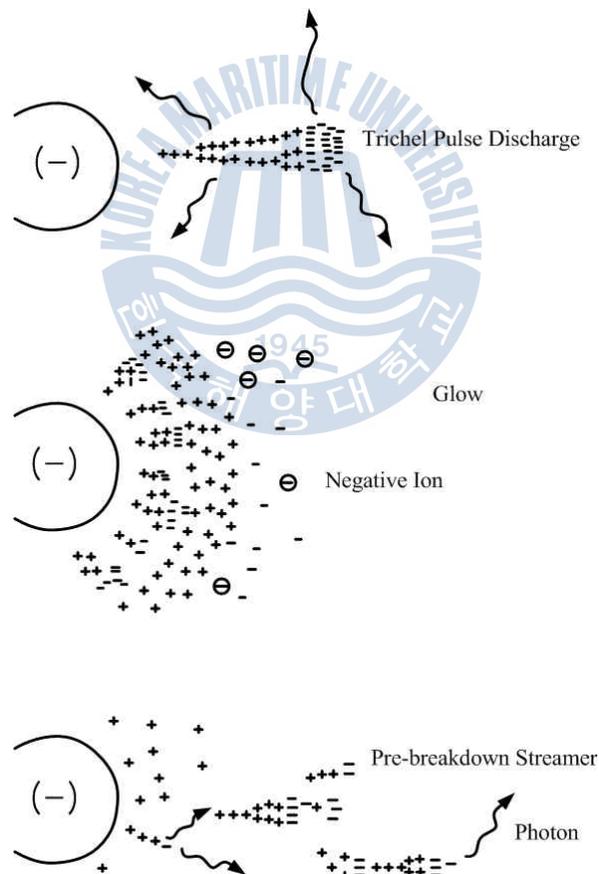


그림 2.12 부극성 코로나에서의 전자사태  
Fig. 2.12 Electron avalanche at negative corona

이와 같이 코로나 방전은 인접 공기중의 전기장이 임계값을 초과하여 국부적으로 나타나기 시작하는데, 이를 그림 2.13과 같이 코로나 발생의 임계전압 또는 파열극한 전위경도라 한다<sup>[23]</sup>.

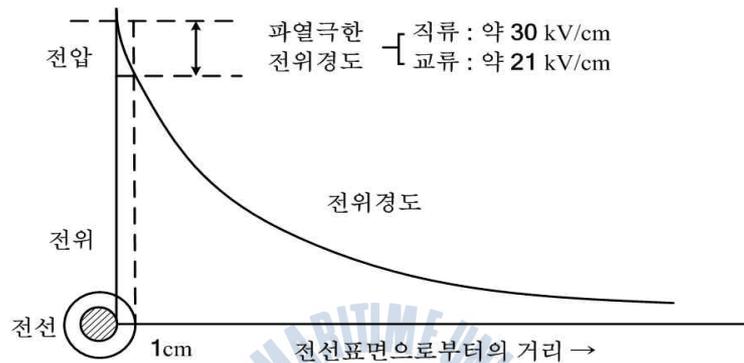


그림 2.13 전위경도

Fig. 2.13 The potential gradient

코로나발생의 임계전압  $E_0$ 의 수식은 다음과 같다.

$$E_0 = 24.3 \times m_0 \times m_1 \times \delta \times d \times \log_{10} \frac{D}{r} \quad (2.2)$$

$m_0$ : 전선표면계수

(매끈한 단선: 1, 거친 단선: 0.98 ~ 0.93, 7개 연선: 0.87 ~ 0.83, 19 ~ 61개 연선: 0.85 ~ 0.80)

$m_1$ : 일기에 관계하는 계수 (맑은 날: 1.0, 우천시: 0.8)

$d$ : 전선의 지름, cm

$D$ : 선간거리, cm

$\delta$ : 상대 공기 밀도

$$\delta = \frac{b}{760} \times \frac{273 + 20}{273 + t} = \frac{0.386 \times b}{273 + t} \quad (2.3)$$

$b$ : 기압, mmHg

$t$ : 기온, °C

식 (2.2)에서와 같이 임계전압( $E_0$ )이 높을수록 코로나 발생률이 낮으며 직접적인 영향을 미치는 요소는 대기압, 습도, 온도 등이다. 대기압이 낮으면 임계전압이 낮아져서 코로나 발생률이 증가하게 되며, 높은 습도와 온도 또한 코로나 방전을 지속적으로 유지시키게 된다.

### 2.3 진단기법

본 논문에서는 폐쇄배전반에 설치되어 있는 전력기기의 상태진단기술 개발을 위한 기초연구로써, 아크 방전과 코로나 방전에 의해 발생하는 방사 전자파의 주파수 스펙트럼을 분석하였다. 진단기법에는 전력기기에 센서를 직접 설치하는 접촉형과 부착하지 않는 비접촉형 방법이 있다.

표 2.3과 같이 접촉형 방식은 고전압 기기, 변압기, 개폐장치, 케이블 등의 전력기기의 열화를 조기에 진단하기 위한 것으로 초음파, 유중가스, 진동을 측정한다. 이러한 시험들은 대상 기기에 전압을 인가하고 센서를 직접 부착하여 진단하는 것이다.

표 2.3 진단기법

Table 2.3 Diagnostic technique

검출방법	특징
초음파	결함에서 발생하는 초음파를 측정하며, 위치추정 가능
유중가스	절연유의 변질과 열화에 따른 가스분석
진동	철심 등에 센서를 설치하여 이상진단
유전정접( $\tan\delta$ )	유전체 손실을 측정 및 분석하여 열화상태 진단
부분방전(PD)	펄스형태의 방전전류 등을 측정하여 PD의 크기 진단

기기의 열화가 진행되고 있는 상태에서 내전압 시험을 실시하면 그 진행을 가속시킬 가능성이 있기 때문에 비파괴로써 열화상태를 감시·진단 할 수 있는 방법을 개발해야 한다.

비접촉식 방식으로 안테나를 사용하면 기기 본체에 손상이 가지 않으므로 기존의 폐쇄배전반에 적용이 가능하며, 무정전으로 절연상태를 감시할 수 있다. 이와 같은 전자파 측정법은 센서의 소형화가 가능하기 때문에 전력기기가 밀집되어 있는 폐쇄배전반의 절연진단에 적합하며 방전의 종류에 따라 주파수 스펙트럼을 분석하여 결함판별이 가능하다<sup>[24],[25]</sup>.



## 제 3 장 실험 및 방법

### 3.1 실험계

기설치된 전력기기에서 발생 가능한 아크 및 코로나 방전을 모의하였다. 폐쇄배전반의 외함은 접지되어 있기 때문에 주변 전자파에 대한 차폐효과를 가짐으로써 그림 3.1과 같이 전파암실(15m × 28m × 10m)에서 실험하였다. 아크 발생장치 및 코로나 전극계를 제작하고, Ultra log antenna 및 EMI test receiver를 사용하여 방사전자파의 전계강도를 측정하였으며, 실험에 사용된 계측기의 특성을 표 3.1에 나타내었다.

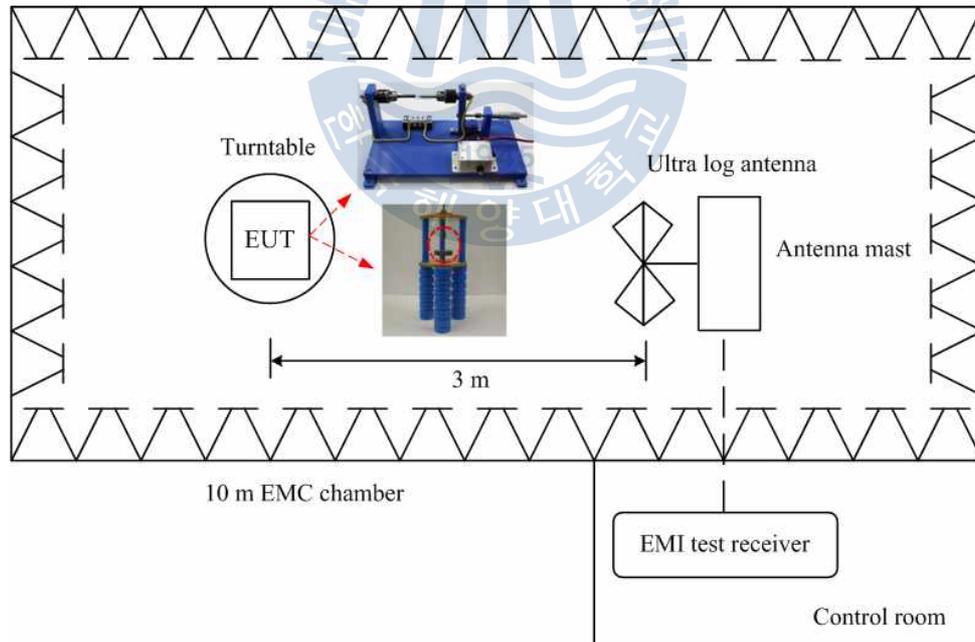


그림 3.1 실험계의 구성

Fig. 3.1 Configuration of the measurement system

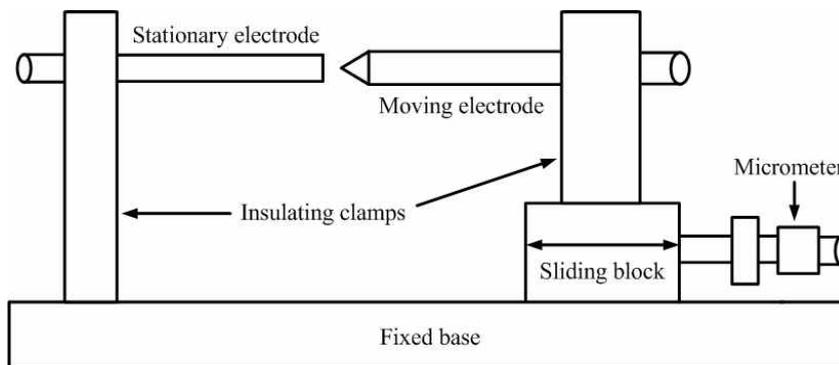
표 3.1 전자파 측정장비

Table 3.1 Electromagnetic measurement equipment

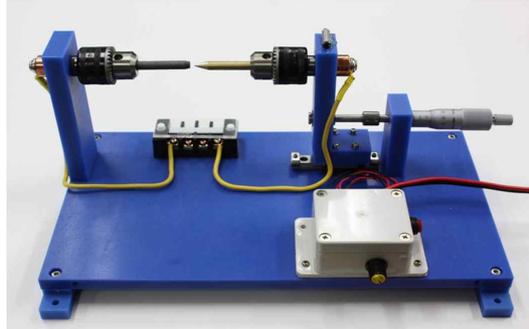
항 목	모델명 및 특성
Ultra log antenna	HL562 (30 MHz ~ 2 GHz)
EMI test receiver	ESCI (150 kHz ~ 2 GHz)

### 3.1.1 아크 발생장치

그림 3.2와 같이 UL1699에서 규정하는 아크 발생장치를 제작하여 노후된 케이블이나 열화된 터미널에서 발생하는 아크 방전을 모의하였다. 접촉부에 형성된 탄화 도전로(Carbonized Path)를 모의하기 위하여 그림 3.3(a)와 같이 탄소봉과 구리전극을 사용하였으며, 전력기기간의 절연열화를 실험하기 위하여 (b)와 같이 터미널 블록을 제작하였다. 아크발생장치는 이동전극에 연결된 마이크로미터를 조절하여 고정전극과 이동전극 사이에서 아크 방전을 발생시켰다. 또한 아크발생률을 높이기 위하여 모터와 컨트롤러를 설치하였다<sup>[26]</sup>.



(a) 구성



(b) 사 진

그림 3.2 아크 발생장치

Fig. 3.2 Arc generator



(a) 탄소봉-구리전극



(b) 터미널 블록

그림 3.3 아크 방전 전극계

Fig. 3.3 Electrode system for arc discharge

### 3.1.2 코로나 전극계

폐쇄배전반 내부에 설치된 MOF 및 변압기의 부상, VCB의 단락표지판, 지지애자 등 전력기기에서 발생하는 코로나 방전을 그림 3.4와 같이 모의하였다. 침과 평판으로 구성된 전극계의 형태와 간격을 달리하여 절연의 상태(절연자와 공기) 및 침전극의 곡률반경에 따른 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 측정하였다.

평판전극은 텅스텐과 구리의 합금 재질이며 가장자리를 둥글게 제작하여 전계의 집중이 발생하지 않도록 하였고 침전극에서의 방전을 모의하기 위하여 곡률반경을 최소화 하였다. 실험에 사용된 장비 및 사양을 표 3.2에 나타내었고 전극계를 그림 3.5와 같이 제작하였다<sup>[27]</sup>.

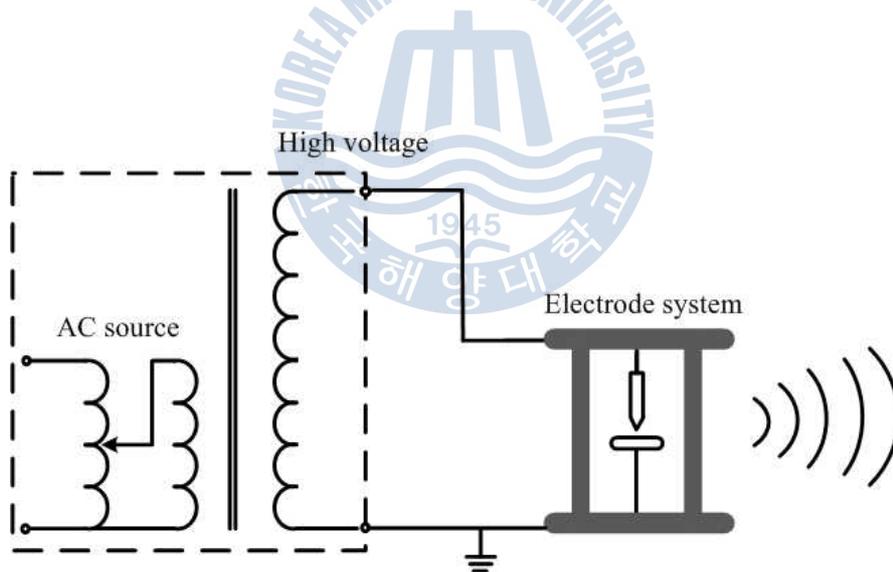


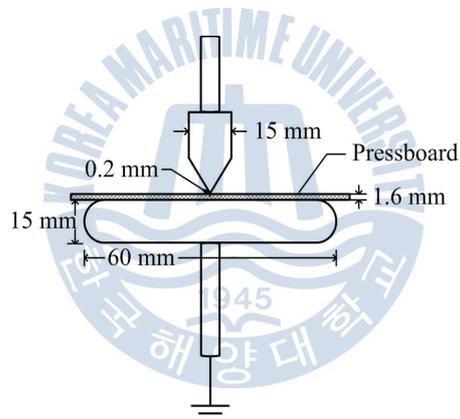
그림 3.4 코로나 방전의 실험계

Fig. 3.4 Measurement system for corona discharge

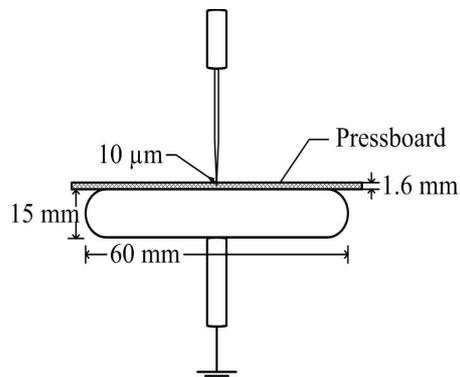
표 3.2 실험장치 사양

Table 3.2 Specification of the experimental apparatus

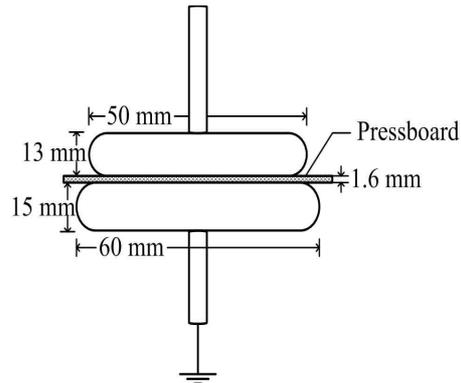
항 목	사 양	
전압조정기	0 ~ 240 V, 5 kVA	
변압기	220/15 kV	
전극계	침전극	0.2 mm
		10 $\mu$ m
	평판전극	50 mm
		60 mm



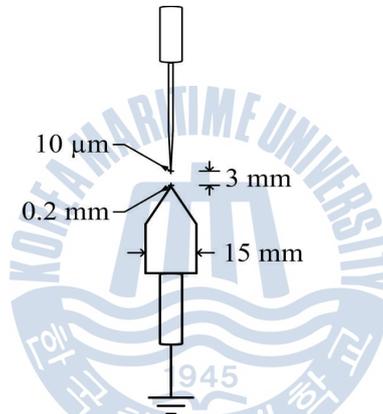
(a) 침(0.2 mm)-평판(60 mm)



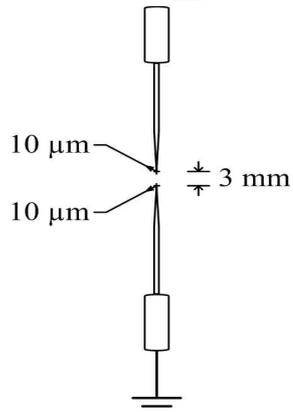
(b) 침(10  $\mu$ m)-평판(60 mm)



(c) 평판(50 mm)-평판(60 mm)



(d) 침(10 μm)-침(0.2 mm)



(e) 침(10 μm)-침(10 μm)

그림 3.5 전극계의 구성

Fig. 3.5 Configuration of electrode system

### 3.2 실험 방법

1 m 높이의 Turntable에 아크 및 코로나 발생장치를 설치하고 방사 전자파를 검출하였다. Ultra log antenna의 중심은 지표면 위에서 1 m에 설치하고, 실험대상과의 이격거리를 3 m로 하였다. 자세한 실험조건은 표 3.3과 같다.

표 3.3 실험조건

Table 3.3 Experimental conditions

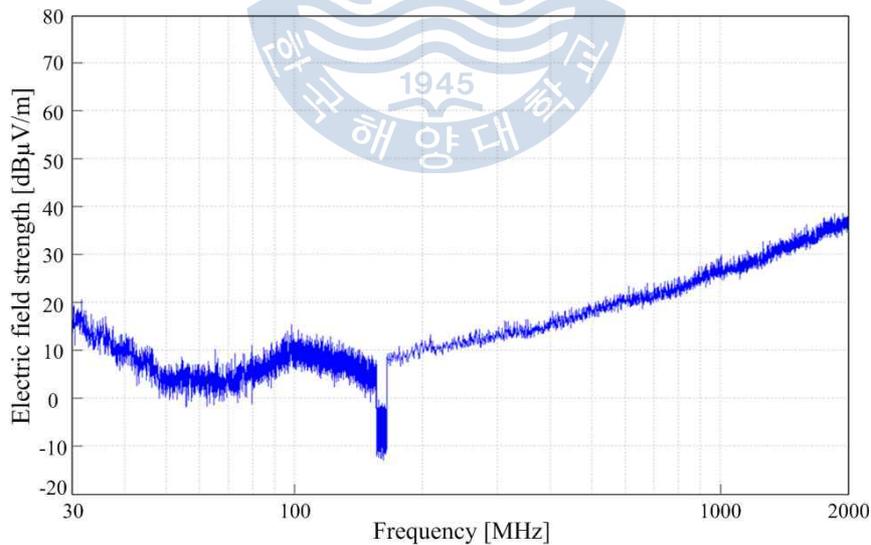
주파수대역폭	30 MHz ~ 2 GHz
분해능대역폭	120 kHz
비디오대역폭	300 kHz
측정거리	3 m
편 파	Vertical/Horizon
높 이	1 m

아크 발생장치의 마이크로미터를 조절하여 전극간에 지속적인 방전이 발생하도록 하였다. 전압조정기와 변압기를 이용하여 최소 3.5kV에서 최대 48kV의 고전압을 코로나 전극계에 인가하였다. 회전용 테이블 위에 각각의 발생장치를 설치하고, 안테나를 수평 및 수직으로 설정하여 방사전자파를 측정하였다.

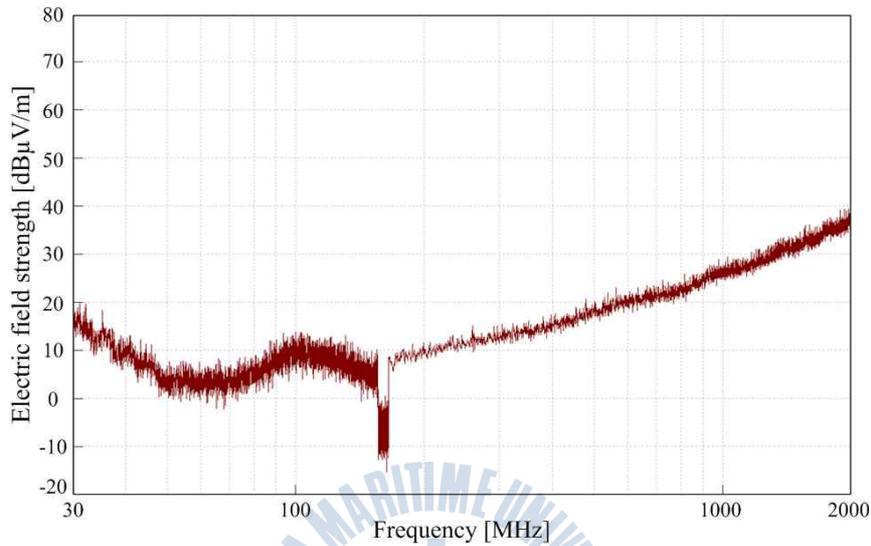
## 제 4 장 결과 및 고찰

안테나 특성과 배경잡음을 측정하여 실험기준으로 설정하고, 각각의 발생장치에서 모의한 전자파의 변화 특성을 그림 4.1에 나타내었다.

(a)와 같이 Ultra log antenna의 특성은 전대역(30 MHz ~ 2 GHz)에서 최소 -10 dB $\mu$ V/m, 최대 40 dB $\mu$ V/m의 전계강도가 측정되었다. 전파암실에 설치된 전압조정기, 변압기 등의 실험장비에서 발생할 수 있는 배경잡음 또한 (b)와 같이 안테나 특성과 동일하게 나타났다. 측정 결과로부터 실험 장비에서 전자파가 발생하지 않는 것을 확인하였으며 배경잡음을 기준으로 하여 아크 및 코로나 방전의 방사전자파를 분석하였다.



(a) 안테나 특성



(b) 배경잡음

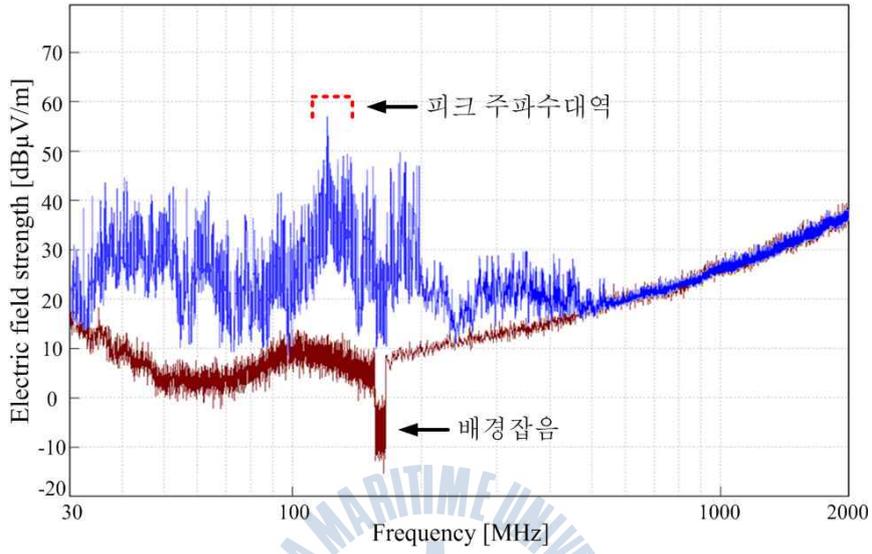
그림 4.1 안테나 특성 및 배경잡음

Fig. 4.1 Antenna factor and background noise

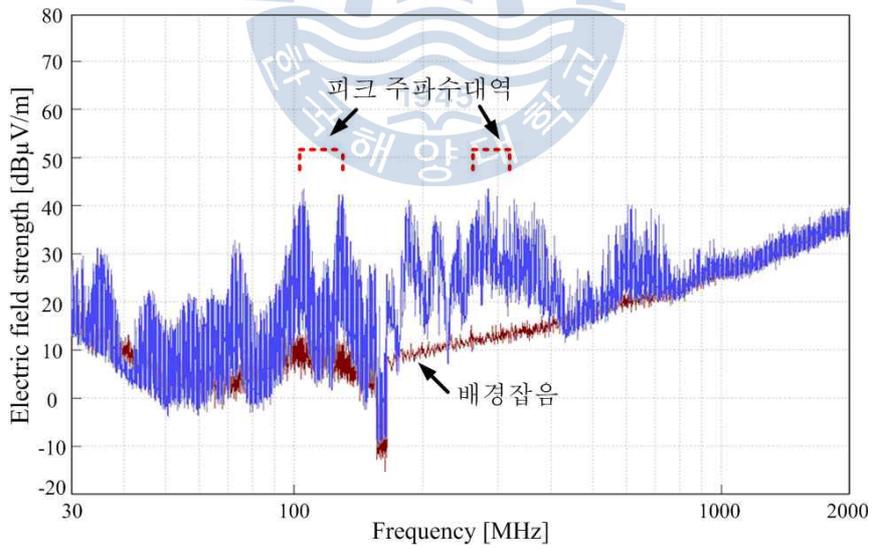
#### 4.1 아크 방전

폐쇄배전반 내부의 파워 퓨즈, 컷아웃스위치 등 전력기기에서 발생 가능한 아크 방전을 모의하였다. 그림 4.2(a)는 탄소봉-구리전극의 주파수 스펙트럼 분포를 나타낸 것이다. 전자파는 30 MHz ~ 200 MHz대역에 분포하였으며 120 MHz ~ 150 MHz에서 50 dBμV/m 이상의 높은 전계강도를 나타내었다.

그림 4.2(b)의 터미널 블록은 30 MHz ~ 400 MHz에서 분포하였으며 100 MHz ~ 150 MHz, 270 MHz ~ 300 MHz대역에서 40 dBμV/m로 전계강도가 가장 높았다. 상기와 같은 측정결과로부터 전극형태에 따라 주파수 스펙트럼의 분포가 상이 하였으나 가장 높은 전계강도를 나타내는 피크 주파수대역은 100 MHz ~ 150 MHz로 동일하게 분석되었다.



(a) 탄소봉-구리전극



(b) 터미널 블록

그림 4.2 아크 방전의 주파수 스펙트럼

Fig. 4.2 Frequency spectrum of series arc discharge

## 4.2 코로나 방전

절연열화로 인하여 발생하는 다양한 결함을 모의하기 위하여 폐쇄배전반 내부에 전극계를 설치하고 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 분석하였다.

최소 3.5kV, 최대 4.8kV의 고전압을 인가하여 절연의 상태(절연지와 공기) 및 침전극의 곡률반경에 따른 방사전자파를 비교·분석 하였다.

표 4.1 절연지에서 전극계에 따른 주파수 스펙트럼

Table 4.1 Frequency spectrum depending on electrode system in pressboard

전극계/인가전압	주파수대역	피크 주파수대역
침(0.2 mm)-평판 / 3.5 kV	30 MHz ~ 500 MHz	35 MHz ~ 45 MHz
침(10 μm)-평판 / 3.5 kV	30 MHz ~ 1 GHz	35 MHz ~ 45 MHz
평판-평판 / 3.5 kV	30 MHz ~ 200 MHz	50 MHz ~ 80 MHz

각각의 전극계에서 발생한 코로나 방전의 주파수 스펙트럼을 그림 4.3에 나타내었다. (a)와 같이 침(0.2 mm)-평판은 30 MHz ~ 500 MHz에서 방사전자파가 분포하였고, 피크 주파수대역(35 MHz ~ 45 MHz)에서 60 dB $\mu$ V/m의 전계강도가 측정되었다. (b)의 침(10 μm)-평판 전극계는 30 MHz ~ 1 GHz로 전대역에 분포하였으며 35 MHz ~ 45 MHz에서 피크 주파수대역이 분석되었다. (c)의 평판-평판의 주파수 스펙트럼은 30 MHz ~ 200 MHz에 분포하였고, 50 MHz ~ 80 MHz에서 피크 주파수대역을 나타내었다.

전계강도는 침-평판 전극계에서 발생된 전자파가 평판-평판 전극계에 비해 20 dB $\mu$ V/m 크게 측정되었다. 평판-평판의 평등 전극계에서는 200 MHz 이상의 주파수 성분이 검출되지 않았다. 그러나 (a),(b)와 같이 전계분포가 불평등인 침-평판 전극계에서는 200 MHz 이상 대역의 주파수 성분이 넓게 나타났다.

표 4.2 공기중 전극계에 따른 주파수 스펙트럼

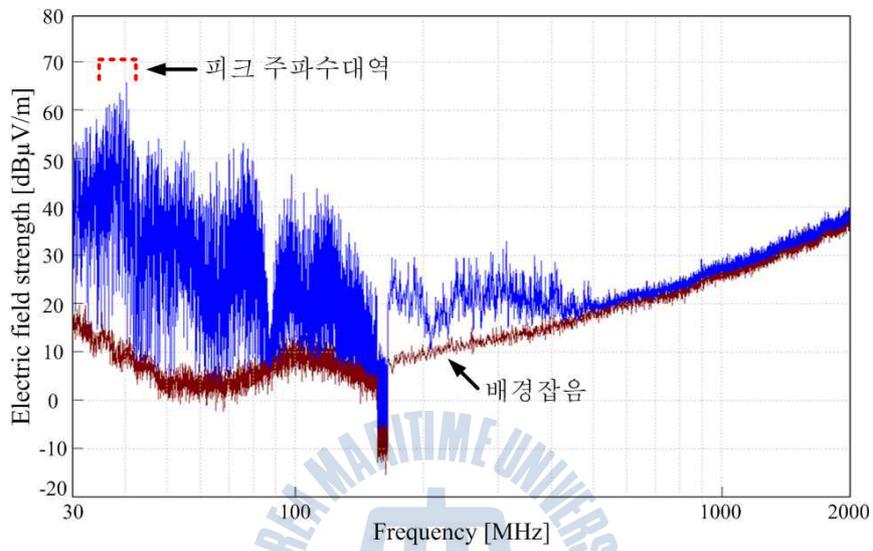
Table 4.2 Frequency spectrum depending on electrode system in air

전극계/인가전압	주파수대역	피크 주파수대역
침(10 $\mu$ m)-침(0.2 mm) / 4.8 kV	30 MHz ~ 350 MHz	100 MHz ~ 160 MHz
침(10 $\mu$ m)-침(10 $\mu$ m) / 4.8 kV	30 MHz ~ 2 GHz	110 MHz ~ 160 MHz

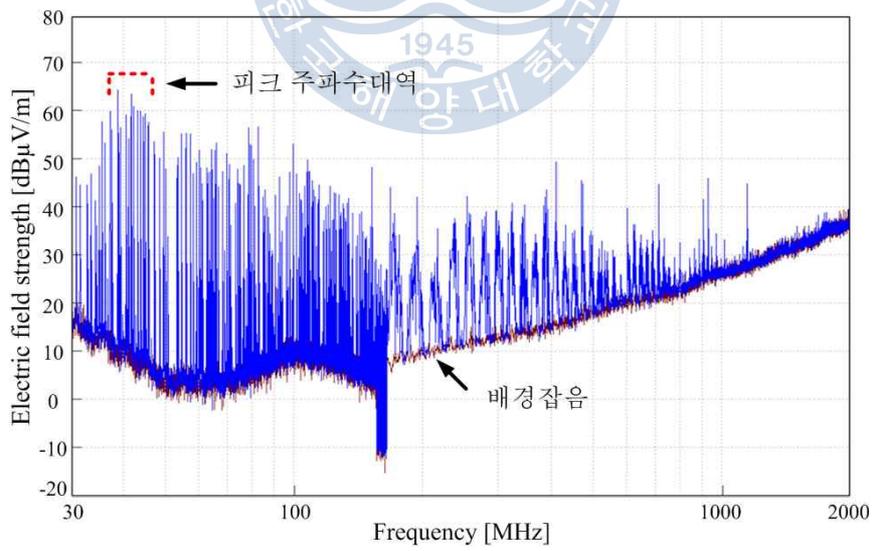
그림 (d)와 (e)는 기중에서의 코로나 방전을 모의한 것이며, 침(10  $\mu$ m)-침(0.2 mm) 전극계에서 발생한 방전신호의 주파수는 30 MHz ~ 350 MHz에 분포하였고, 100 MHz ~ 160 MHz에서 피크 주파수대역을 분석 하였다.

침(10  $\mu$ m)-침(10  $\mu$ m) 전극계에서 발생한 방전신호의 주파수는 30 MHz ~ 2 GHz로 전대역에서 분포하였고 110 MHz ~ 160 MHz에서 피크 주파수대역을 나타내었다. 유사한 전극 형태를 가진 (d)와 (e)의 경우 방전으로 인한 주파수 스펙트럼은 상이하나 피크 주파수는 동일한 대역임을 분석 하였다.

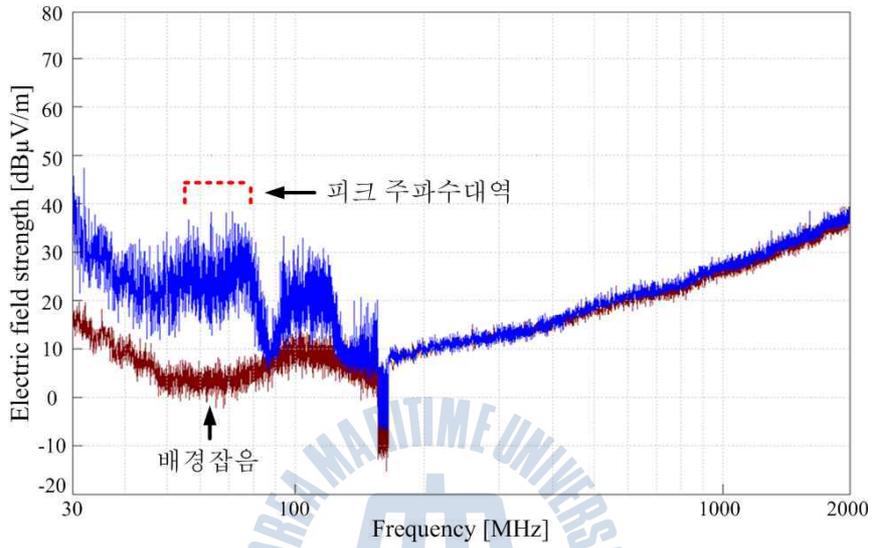
절연지를 삽입하여 실험을 진행한 침-평판의 유사한 전극 형태를 가진 (a)와 (b)의 전극계도 방전으로 인한 주파수대역은 상이하나 피크 주파수대역은 동일함을 확인하였다<sup>[28]</sup>.



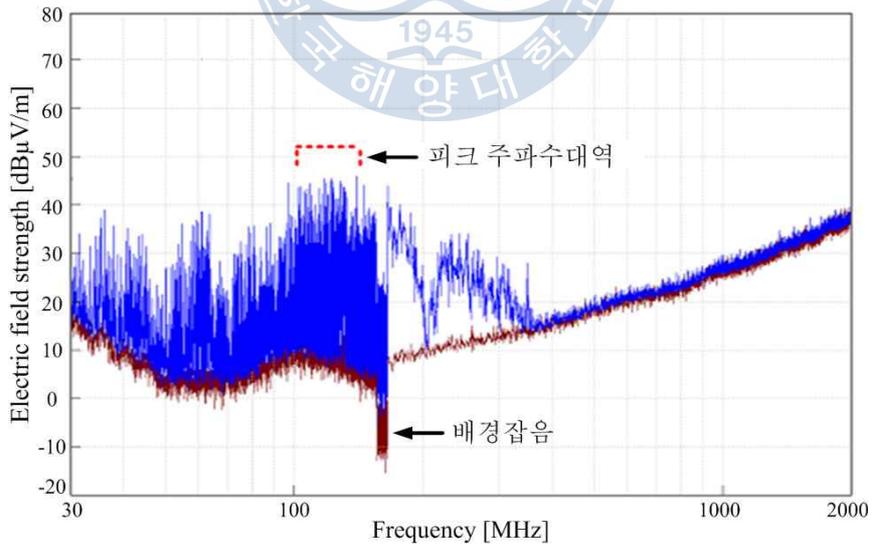
(a) 침(0.2 mm)-평판



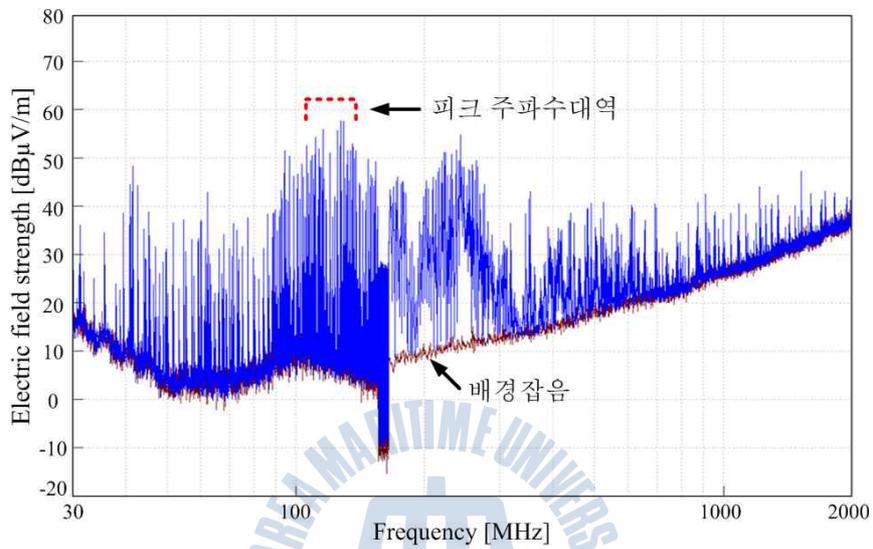
(b) 침(10 μm)-평판



(c) 평판(50 mm)-평판(60 mm)



(d) 칩(10 μm)-칩(0.2 mm)



(e) 침(10 μm)-침(10 μm)

그림 4.3 코로나 방전의 주파수 스펙트럼

Fig. 4.3 Frequency spectrum of corona discharge

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 폐쇄배전반 내부에 설치되어 있는 전력기기(MOF, 파워 퓨즈, 컷아웃스위치, 진공차단기 등)의 온라인 진단기술개발을 위한 기초연구로써 전과압실 내에서 Ultra log antenna(30 MHz ~ 2 GHz)와 EMI test receiver (150 kHz ~ 2 GHz)를 사용하여 실험하였다. 아크 방전과 코로나 방전의 방사 전자파를 측정·분석한 결과는 다음과 같다.

1. 전력기기의 불완전한 접촉부 등에서 발생할 수 있는 아크 방전을 탄소봉-구리전극, 터미널 블록에서 모의하였다. 탄소봉-구리전극에서 발생한 방사전자파는 30 MHz ~ 200 MHz에서 분포하였으며, 피크대역은 120 MHz ~ 150 MHz로 약 50 dB $\mu$ V/m의 전계강도를 나타내었다. 터미널 블록은 30 MHz ~ 400 MHz에서 발생하였으며, 피크대역은 100 MHz ~ 150 MHz, 270 MHz ~ 300 MHz로 40 dB $\mu$ V/m의 전계강도가 측정되었다.
2. 코로나 방전의 주파수 스펙트럼은 전극계의 형태에 따라 다소 차이가 있으나, 30 MHz ~ 2 GHz로 안테나의 전 범위에서 분포하였고 아크 방전과는 상이하게 피크 값이 35 MHz ~ 160 MHz대역에서 검출되었다.

세부적인 사항으로 침(0.2 mm)-평판 전극은 30 MHz ~ 500 MHz에서 발생하였으며 피크대역은 35 MHz ~ 45 MHz로 60 dB $\mu$ V/m의 전계값이 측정되었다. 침(10  $\mu$ m)-평판은 30 MHz ~ 1 GHz의 광대역 범위에서 분포하였으며, 피크 대역은 침(0.2 mm)-평판과 동일한 35 MHz ~ 45 MHz이다. 평판-평판의 주파수대역은 30 MHz ~ 200 MHz이고 피크대역은 50 MHz ~ 80 MHz이다. 상기 전극계는 전극사이에 절연지를 삽입한 경우로써 주파수대역은 상이 하였으나, 최대 전계강도가 측정된 주파수대역은 유사하였다.

기중에서 코로나 방전을 모의한 침(10  $\mu$ m)-침(0.2 mm)은 30 MHz ~ 350 MHz의 광대역에서 발생하였으며, 피크 주파수대역은 100 MHz ~ 160 MHz로 45 dB $\mu$ V/m의 전계강도가 측정되었다.

침(10  $\mu$ m)-침(10  $\mu$ m)전극계는 30 MHz ~ 2 GHz로 전대역에서 방사 전자파가 발생하였으며 피크 주파수대역은 110 MHz ~ 160 MHz로 절연지를 삽입한 경우 보다 25 MHz ~ 45 MHz 높은 대역에서 발생하였다.

따라서 아크와 코로나 방전의 상기와 같은 방사전자파 대역만을 검출하는 협대역 시스템을 폐쇄배전반 내부에 적용시 효과적인 상태진단이 가능할 것으로 판단된다.



## 참 고 문 헌

- [1] 소방방재청(2008), “2008년도 화재통계 연감”
- [2] 소방방재청(2008), “2008년 화재발생현황 분석”
- [3] 기초전력공학연구소, “전력설비의 사고예방 및 진단기술(1차년도 보고서)”, 1992.
- [4] 김재철, 광희로, 정찬수, 전희중, “전력설비의 사고예방 및 진단시스템 개발”, 1993.
- [5] 이해기, 이남재, 최종규, 장용해, 김영봉, 김성래, “신편 전기설비설계”, 태영문화사, pp.75~157, 2008.
- [6] 김정훈, “송변전공학”, 문운당, pp.350~414, 2010.
- [7] 송길영, “최신 송배전공학”, 동일출판사, pp.425~444, 2003.
- [8] 김재철, 서인철, 김영노, 전영재, “전자파 측정을 이용한 폐쇄 배전반의 사고예방진단 기법에 관한 연구”, 조명전기설비학회논문지, 제16권, 제5호, pp.29~37, 2002.
- [9] 大久保仁, “電力機器の診断技術の現状と今後の課題”, T.IEE Japan, Vol.119-B, No.4, pp.434~437, 1999.
- [10] 竹下信也 “電力設備の非接触計測・診断技術” J. IEE. Japan, Vol.112-3, pp.143~146, 1992.
- [11] H. Okubo, H. Yamashita, N. Hayakawa, T.ueda, M. Hikita, “Electromagnetic Spectrum Radiated from Gas Discharges and its Relation to Partial-Discharge Characteristics”, ETEP Vol.7, No.1, pp.57~63, January/February 1997.
- [12] 지홍근, “공기조화기에서 직렬아크방전 검출에 관한 연구”, 한국해양대학교 대학원, 석사학위논문, pp.5~12, 2010.
- [13] C.-S. Maroni, R. Cittadini, Y. Cadoux & M. Serpinet(2001), “Series arc detection in low voltage distribution switchboard using spectral analysis”, ISSPA, pp.473~476, 2001.
- [14] 길경석, 지홍근, 박대원, 김일권, 류길수, 송재용, “직렬아크신호의 검출 방법”, 한국철도학회논문집, 제11권 제5호, pp.477~481, 2008.
- [15] 김선재, 정광석, 박대원, 길경석, “직렬아크 방전의 주파수 스펙트럼 분석”, 한국전기전자재료학회, 춘계학술대회 및 산학연기술교류회 논문집, p.24, 2010.

- [16] Shea J. J., "Conditions for series arcing phenomena in PVC wiring", Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference of Electrical Contacts, pp.167~175, 2005.
- [17] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworths, pp.15~28, 1989.
- [18] J. C. Fothergill, L. A. Dissado and P. J. J. Sweeney, "A Discharge Avalanche Theory for the Propagation of Electrical Tree", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 2, pp.474~486, 1994.
- [19] L. A. Dissado, S. J. Dodd, J. V. Champion, P. I. Williams and J. M. Alison, "Propagation of Electrical Tree Structures in Solid Polymeric Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 3, pp.259~279, 1997.
- [20] 김정훈, "송변전공학", 문운당, pp.225~229, 2010.
- [21] 주문노, "HVDC 가공 송전선로의 최적 도체방식 선정을 위한 전기 환경 특성평가에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원, 박사학위논문, pp.15~23, 2007.
- [22] 정성계, 이덕출, "고전압 공학", 문운당, 1982.
- [23] 이춘모, "송배전공학", 태영문화사, pp.115~120, 2008.
- [24] 강대수, "폐쇄 배전반내의 이상 진단을 위한 방전 전자파 측정기의 개발(연구보고서)", 피에스디테크(주), 2000.
- [25] 한국전기안전공사, "차단기 무정전 점검기법 및 성능진단 연구(최종보고서)", 1993.
- [26] 지홍근, 박찬용, 길경석, 김일권, 조영진, "저압계통에서 직렬아크신호의 검출", 2008 한국철도학회 춘계 학술대회 논문집, pp.314~318, 2008.
- [27] 길경석, 정광석, 박대원, 김선재, 한주섭, "직렬아크 및 코로나 방전의 주파수 스펙트럼 분석", 전기전자재료학회논문지, 제23권, 제7호, pp.554~559, 2010.
- [28] 박대원, 김선재, 정광석, 길경석, 조은제, "방사전자파의 주파수분석에 의한 배전반 진단기술", 2010 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.62.1~62.5, 2010.