

工學碩士 學位論文

유입식 변압기의
부분방전 진단에 관한 연구

A Study on the Partial Discharge Diagnosis
for Oil-immersed Transformers



2013年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

李 政 潤

本 論文을 李政潤의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 李 成 根 ㉠

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ㉠

委 員：工學博士 朱 良 翊 ㉠



2012年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

李 政 潤

목 차

목 차	i
그림 목차	iii
Abstract	v
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 내용	3
제 2 장 이 론	4
2.1 절연열화와 부분방전	4
2.1.1 절연열화	4
2.1.2 부분방전	5
2.2 절연진단기술	10
2.2.1 유중 가스 분석법	11
2.2.2 부분방전 검출법	13
제 3 장 설계 및 제작	19
3.1 결합전극계	19
3.2 모노폴 안테나	22

제 4 장 실험 및 분석	31
제 5 장 결 론	39
참 고 문 헌	41



그림 및 표 목차

【그림 목차】

그림 1.1	화재 사고 통계	1
그림 1.2	전력설비 고장 원인	2
그림 2.1	부분방전의 종류 및 등가회로	6
그림 2.2	교류전압에서의 PD 발생	8
그림 2.3	유중 가스 분석법	12
그림 2.4	전기적 검출법	14
그림 2.5	음향 검출법	15
그림 2.6	전자파 검출법	17
그림 2.7	전자파의 발생과 진행	17
그림 3.1	전극계의 구성	21
그림 3.2	실험계의 구성	22
그림 3.3	배경잡음의 주파수 스펙트럼	23
그림 3.4	유중 방사전자파의 주파수 스펙트럼	26
그림 3.5	시제작 모노폴 안테나	29
그림 3.6	시제작 모노폴 안테나의 반사손실	30
그림 4.1	실험계 구성	31
그림 4.2	배경잡음의 주파수 스펙트럼	32
그림 4.3	유중 방사전자파의 검출 (침-평판(프레스보드))	33
그림 4.4	유중 방사전자파의 검출 (침-평판)	34
그림 4.5	유중 방사전자파의 검출 (평판-평판(프레스보드))	35
그림 4.6	유중 방사전자파의 검출 (평판-평판)	36

그림 4.7 유중 방사전자파의 검출 (구-구)	37
그림 4.8 유중 방사전자파의 검출 (구-평판)	38

【표 목차】

표 2.1 유입식 변압기의 온라인 부분방전 진단 기술	11
표 2.2 유입식 변압기의 이상에 따른 발생가스	11
표 2.3 전자파의 특성	18
표 3.1 실험장치 사양	23
표 3.2 전극계에 따른 유중 방사전자파의 피크 주파수대역	27



A Study on the Partial Discharge Diagnosis for Oil-immersed Transformers

by Jung-Yoon Lee

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



Abstract

This thesis deals with the radiated electromagnetic wave detection of partial discharge(PD) in oil for insulation diagnostics of oil-immersed transformers.

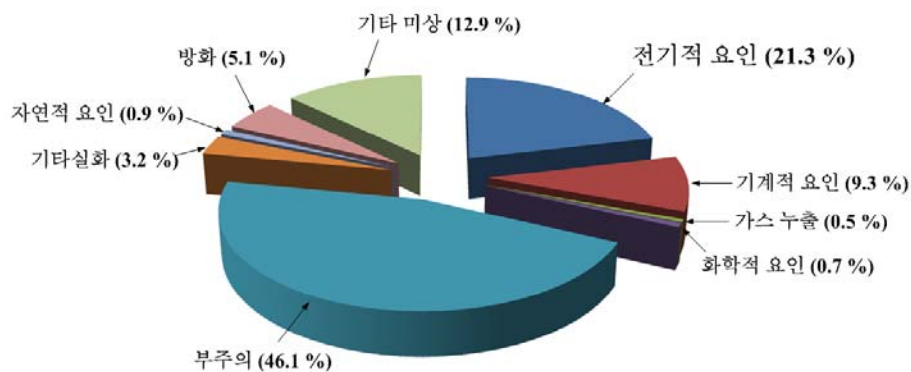
Partial discharge by insulation deterioration of power facilities can lead to failure if not detected earlier. So far, the two main insulation diagnostic techniques of the oil-immersed transformer were the dissolved gas analysis(DGA) method in insulation oil and the acoustic method. These two methods, however, accompany some problems in installment and sensitivity. Therefore, research on the detection methods of radiated electromagnetic waves caused by partial discharges in insulation oil is now being actively conducted. From

these backgrounds this thesis suggests the optimal detection method, analyzing frequency spectrum of radiated electromagnetic wave by partial discharge(PD) in oil. Electrode systems were fabricated to simulate the defects that might occur in oil-immersed transformers. Frequency spectrum of radiated electromagnetic wave in oil was analyzed by broad-band bi-conical antennas(300 MHz~2 GHz) and a spectrum analyzer(9 kHz~3 GHz). Frequency components for most defects showed high distribution at 500 MHz. From the result, a narrow-band monopole antenna with the center frequency at 500 MHz was made. The length of the antenna was 150 mm. The propagation characteristic of the monopole antenna was evaluated by the network analyzer(40 MHz~40 GHz). It was suitable to detect the signal of partial discharge in oil. The measurement system which consists of the prototype monopole antenna, LNA(Low Noise Amplifier), oscilloscope and spectrum analyzer was evaluated from the partial discharge in insulation oil. It could detect all defects used in the experiment.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

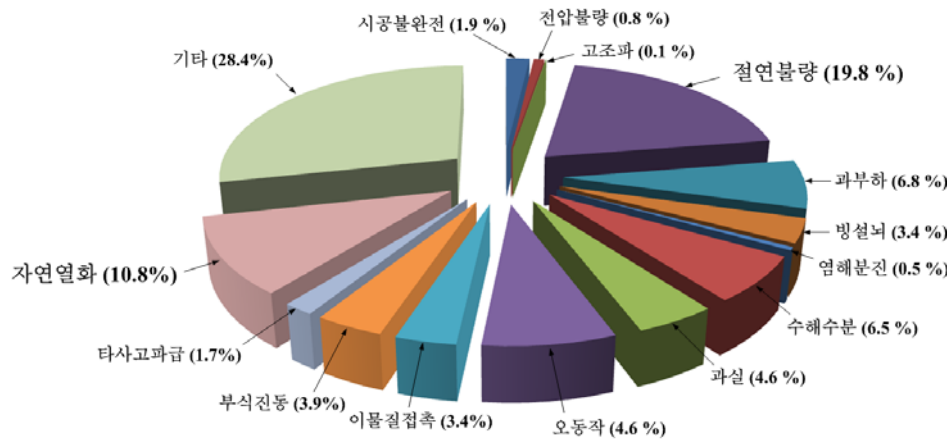
2012년 2월, 55년만의 기록적인 강추위에 대한 난방으로 최대전력수요가 역대 최대치를 경신하였으며, 같은 해 7~8월, 무더위로 인한 냉방시설 사용으로 최대치를 수차례 경신하였다. 이처럼 현대사회에 있어 전기에 대한 수요는 갈수록 증가하는 추세이며, 전기는 인류에게 없어서는 안 될 중요한 에너지 자원이 되었다. 하지만 지속적인 전기 수요의 증가로 크고 작은 사고들이 많이 발생하고 있다. 전기적 요인에 의한 사고는 과열과 스파크 등으로 인해 대부분이 화재로 이어지며, 그림 1.1은 2011년에 발생한 화재통계로써 화재발생율은 전기적 요인(21.3%)이 단순 부주의 사고 다음으로 가장 높았다. 전기적 요인 중에서도 전기설비의 사용이 증가하면서 발생하는 노후화에 따른 절연불량(19.8%) 및 열화(10.8%)가 높은 비중을 차지하였으며, 그림 1.2에 나타내었다^[1].



출처 : 한국전기안전공사 (2011)

그림 1.1 화재 사고 통계

Fig. 1.1 Statistics of fire accident



출처 : 한국전기안전공사 (2011)

그림 1.2 전력설비 고장 원인

Fig. 1.2 Cause of power facility fault

전기설비 중 유입식 변압기는 현재 전력계통을 구성하는 가장 중요한 설비중 하나로써 송배전 및 발변전소 같은 대용량 전력설비에 많이 설치되어 있다. 이러한 유입식 변압기에서 사고가 발생하면 피해범위가 광범위하기 때문에 수리나 교체에 막대한 비용과 인력이 소요되는 등 기술적, 경제적 손실이 발생하며 전력공급의 중단은 물론 전기화재 및 인명사고와 같은 2차 사고를 발생시키므로 안정적인 전력공급과 신뢰성 있는 운전을 위해 주기적인 상시 진단과 유지 보수가 이루어져야 한다.

절연은 변압기뿐만 아니라 전력설비의 수명과 성능에 밀접한 관련이 있으며, 절연물의 열화가 진전되어 절연파괴로 인한 사고가 발생한다. 부분방전은 절연파괴로 진전하기 전에 수반되는 현상이며, 절연상태를 진단 및 감시하기 위하여 부분방전 검출에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 유입식 변압기의 절연진단기술로 유중 가스분석법이나 음향 검출법이 주류를 이루고 있으나 설치 및 감도 등의 문제로 최근에는 유중 부분방전에 의해 발생하는 방사전자와 검출법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

전력계통에 사용되는 설비, 특히 유입식 변압기 진단기술의 흐름은 종래의 시간기준정비(Time Based Maintenance, TBM)에서 상태기준정비(Condition Based Maintenance, CBM)의 개념으로 바뀌고 있으며, 시간기준정비는 사용기기의 변천과 전력수요의 증가로 인하여 종래의 기준을 적용하는 것은 경제적·신뢰성 측면에서 바람직하지 못하다^{[2]~[5]}. 이 흐름에 맞춰 상태기준정비를 위한 온라인 진단방식이 연구되고 있으며, UHF 대역의 방사전자파를 측정하는 전자파 측정법은 높은 감도와 외부 잡음에 대한 영향이 적고 온라인 측정이 가능하다. 최근에는 변압기 외함에 UHF 센서를 직접 설치하거나 드레인 밸브를 통하여 장착하는 등 다양한 형태의 연구가 활발히 진행되고 있다.

1.2 연구목적 및 내용

선행 연구 결과들에서 유증 부분방전에 의한 방사전자파를 검출하는 방법은 제시되어 있지만 최적의 검출 주파수 대역에 대한 내용이 정확하게 제시되어 있지 않은 실정이다. 본 논문에서는 전자파 측정법의 최적의 감도를 갖는 검출 주파수 대역을 선정하고, 그 결과로 협대역 모노폴 안테나를 제작하여 부분방전 측정시스템을 구성하기 위한 연구를 수행하였다. 결함별 유증 부분방전의 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 분석하였고, 이 결과로부터 모노폴 안테나를 제작하였다. 모노폴 안테나로 모의 유입식 변압기에서 부분방전신호를 측정 및 분석함으로써 전자파 측정법에 있어 효율적인 유입식 변압기의 절연진단기술을 위한 기초 연구를 수행하였다.

제 2 장 이 론

2.1 절연열화와 부분방전

2.1.1 절연열화

전기기기에 사용되는 각종 고분자 절연재료는 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 요인 등에 의한 스트레스 하에 장기간 노출되면 초기의 물성값을 유지하지 못하고 변질되어 절연재료의 수명이 단축되거나 심해지는 경우 파괴로 이어지는데 이러한 현상을 절연열화라고 한다^[6]. 열화의 발생과 진전기구는 절연방식, 절연재료, 전력설비 등의 종류 및 용량에 따라 달라진다. 따라서 전력설비들의 전기절연은 일반적으로 다양한 구조체에서 전기적, 기계적, 열적, 그리고 환경적으로 발생하는 스트레스를 견딜 수 있게 만들어져야하며, 전력설비에 필요한 유지보수의 수준은 절연재료의 자체 절연강도와 서비스 환경에 대한 물리적 지원의 효과에 따라 달라진다. 그러므로 절연재료의 수명은 각 개별요소의 배치상태, 다른 요소와의 상호작용, 시스템의 전기 및 기계적 무결성, 그리고 전력설비의 제조공정에 의해 결정된다^{[7],[8]}.

유입식 변압기에서는 이러한 이유들에 의해 절연유 내부에 기포나 가스가 발생하며, 절연지를 구성하는 분자들의 중합도가 저하되는 등 본래의 절연성능을 악화시켜 절연열화가 진행된다^{[9],[10]}. 유입식 변압기를 구성하고 있는 각 재료들은 전기적, 기계적 스트레스를 받으면 초기의 성능이 저하되는 열화현상을 일으킨다. 유입식 변압기의 주요 열화요인으로는 운전 중 기기의 온도 상승에 따른 열적 열화, 과도한 진동 및 급격한 부하 변동에 따른 기계적 열화, 절연재료의 절연내력이 이상전압으로 인하여 약화되는 전기적 열화, 제조시 결함이나 사용 환경에 따른 수분이나 먼지

등에 의한 환경적 열화로 크게 4가지로 분류된다. 이러한 열화요인이 복합적으로 작용하여 유입식 변압기의 성능과 수명이 저하되어 기계적 강도 저하, 유중 가스발생, 진동 및 소음증가, 그리고 부분방전 발생 등으로 인한 절연파괴로 이어진다^{[11],[12]}. 특히 절연유, 절연지, 프레스보드 등의 경우에는 복합적인 절연구성을 형성하고 있어 절연열화와 재료의 종류에 의해 각각 다르게 나타나며, 그 결과 변압기 수명에 큰 폭의 차이가 생긴다. 유입식 변압기에서 절연열화에 따른 사고에는 이상전압에 따른 절연재료의 절연내력이 약화되어 스파크를 동반한 부분방전이 발생하며, 이로 인하여 절연유나 절연지로부터 가연성 가스가 발생한다^[13].

2.1.2 부분방전

절연체 내부에 보이드와 같은 결함이 존재할 때 인가전압을 서서히 증가시키면 보이드 부분에 전계가 집중되고 공기의 절연내력 이상이 되면 부분방전(Partial Discharge, PD)이 발생한다. 부분방전이 발생하면 방전에 따른 전하의 이동에 의해 펄스형태의 전압·전류변화가 발생하면서 전자파나 초음파가 발생한다. 또한 강한 빛과 열을 동반하므로 절연물 등의 산화에 의한 가스나 오존을 발생시킬 수 있다. 따라서 부분방전은 절연파괴의 초기현상이라고 볼 수 있으며, 부분방전을 검출함으로써 경미한 상태의 절연열화를 미연에 진단하여 절연파괴로 이어지는 것을 방지할 수 있다^[14].

부분방전은 발생 이후 크기가 증가하고 최종적으로 절연을 파괴하기 때문에 절연체 내부의 방전발생원 추정과 열화정도를 진단하기 위해서는 정확한 부분방전 펄스를 측정해야 한다. 그러나 부분방전 펄스는 매우 복잡하고 다양한 형태로 발생하기 때문에 측정된 방전펄스를 절연재료의 내부 방전펄스와 외부방전펄스로 구분하고, 부분방전 발생 메커니즘 및 특성을

파악하여 그것을 기본으로 유입식 변압기에서 발생하는 부분방전에 대하여 검토하여야 한다. 절연체에서 발생하는 부분방전은 전력설비의 금구류 및 연결부위에서의 코로나방전과 절연체 표면에서 발생하는 연면방전, 그리고 절연체 내부에서 발생하는 내부방전으로 구분된다^[15].

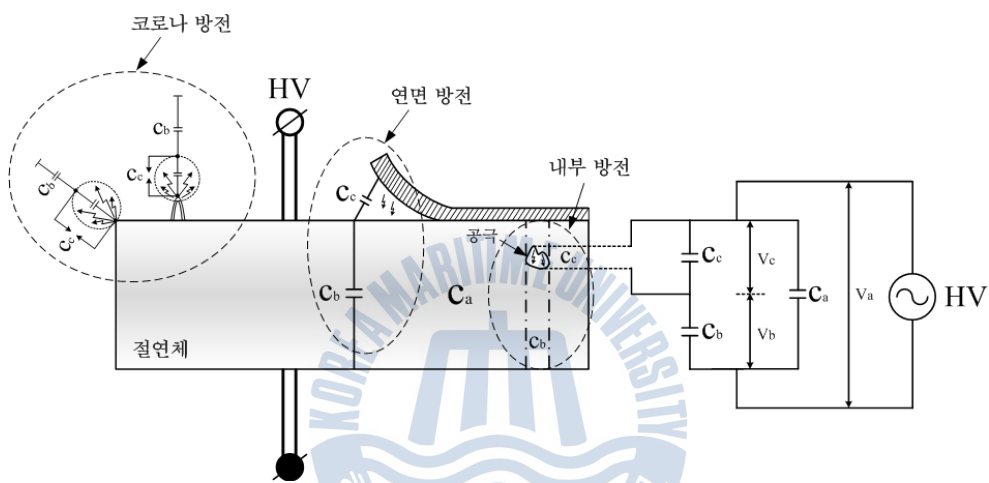


그림 2.1 절연결합의 종류와 등가회로
Fig. 2.1 Type and equivalent circuit of partial discharge

코로나 방전은 그림 2.1과 같이 첨예한 침전극의 주위에 불균일한 전계가 집중되어 발생하는 국부방전이다. 코로나 방전은 절연체의 표면에 이온빔이나 화학반응 등으로 인하여 열화를 발생시키지만 절연체의 절연 성능에 미치는 영향은 미비하여 비교적 위험하지 않다. 실제 코로나 방전은 전력기기 외부의 충전부나 측정금구류 등에서 발생하는 것으로 PD펄스와는 구분되어야 하는데 대부분의 경우 구분이 쉽지 않기 때문에 PD로 오인하는 경우가 있다^[16]. 연면 방전이란 그림 2.1에 나타낸 바와 같이 부적절한 절연설계에 의한 누설거리의 부족이나 절연체 표면의 오손에 기인한 유효 누설거리 감소로 인하여 발생하는 방전현상을 말한다. 연면 방전은

절연체 표면에 열화를 발생 및 촉진하기 때문에 초기에는 절연체 자체에 많은 영향을 미치지 않는다. 그러나 연면 방전에 의한 고주파 진동전압이 교류전압에 중첩되면 설비의 절연물에 과도한 전기적 스트레스를 가하게 되므로 고체절연체에 손상을 준다. 또한 장기간 지속될 경우 열화과정을 거쳐 절연체 표면의 결함부위에 열화가 집중되고 침식이나 부식이 발생되어 절연체의 전기적·기계적 성능을 저하시킨다. 더욱 열화가 진행되면 연면 방전으로 인한 발열과 오손이 촉진되고 탄화도전로가 형성되어 절연이 파괴되는 경우도 있다. 연면 방전의 장기적인 열화에 의한 절연파괴는 전원용량의 차이에 따라 다르지만, 일반적으로 글로우 방전(Glow Discharge)의 형식으로 이루어지며 아크 방전(Arc Discharge)으로 진전되기도 한다. 아크방전은 강한 빛과 열, 자외선 등을 동반하기 때문에 절연재료가 심각하게 손상될 수 있다^[17]. 그림 2.1에 표현한 내부방전의 형태는 고체절연체 내부에 공극이 존재하는 경우, 이곳에 고전압이 인가되면 보이드 내부의 유전율이 절연재료에 비하여 작으므로 전계가 집중되며, 기체의 절연내력은 고체에 비하여 상당히 낮으므로 보이드 내부에서 기체 방전이 발생된다. 이러한 기체방전에 의해 보이드의 열화가 촉진되어 그 크기가 증가됨에 따라 고체 절연체의 유효 절연성능을 감소시킨다.

위 방전의 형태들은 그림 2.1의 등가회로를 통하여 부분방전의 발생 메커니즘을 설명할 수 있는데 C_c 는 결함부분의 정전용량, C_b 는 결함과 직렬로 접속되는 부분의 정전용량이며 C_a 는 정상적인 부분의 정전용량 값을 나타낸다^{[18],[19]}. 그림 2.2는 대칭형 공극이 존재하는 절연에서 교류인가전압 한 주기 동안의 PD 발생 패턴을 나타낸 것이다. 일반적인 PD 펄스의 형태는 인가전압이 상승하는 부분에서 일정 시점에 도달할 때 방전펄스가 발생되며 전압이 감소하면 사라지는 형태를 가지게 된다. 운전전압이 서서히 증가하면 전압 U 의 범위에서 공극 내에 방전이 발생하고, 다시 감

소하는 시점에서 인가전압이 V 이하로 되면 방전이 소멸한다. 이와 같이 방전이 발생하는 전압 U 를 방전개시전압(Discharge Inception Voltage, DIV)이라 하고, 방전이 소멸되는 시점의 전압 V 를 방전소멸전압(Discharge Extinction Voltage, DEV)이라고 한다^[20].

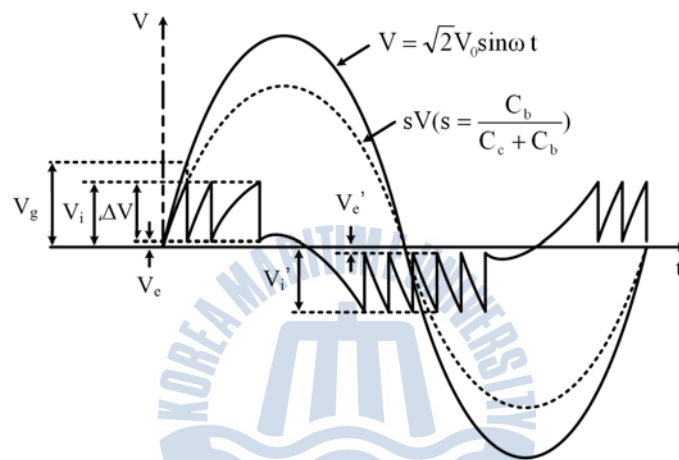


그림 2.2 교류전압에서의 PD 발생

Fig. 2.2 Occurrence of partial discharges in AC voltage

그림 2.2와 같은 방전 파형에서 공극 내에 발생하는 방전전하량 q_l 은 식 (2.1)과 같이 표현된다.

$$q_l \simeq (C_b + C_c) \Delta V \quad (2.1)$$

여기서, $\Delta V = U - V$ 로 공극 내의 전압강하 성분이다. 그러나 q_l 은 직접 검출이 불가능한 값이므로 PD 발생시 리드선을 통해 흐르는 겉보기 전하 q 는

$$q = C_b \Delta V \quad (2.2)$$

와 같이 표현할 수 있다. 실제 시료에서의 전압강하는 $\frac{C_b \Delta V}{C_a + C_b}$ 이고, 방전 검출기에서는 q 의 값이 측정된다. 방전전하량 q 가 존재할 때, 이때의 방전 에너지는

$$P = \frac{1}{2} C_c (U^2 - V^2) = \frac{1}{2} C_c \times \Delta V \times (U + V) \quad (2.3)$$

가 되는데, 여기서 V 는 U 의 크기에 대해 약 10 % 정도로 작으므로 식 (2.3)은 다음과 같이 표현하는 것이 가능하다.

$$P = \frac{1}{2} C_c \times \Delta V \times U \quad (2.4)$$

그리고 방전개시전압은 $U = \frac{C_b}{(C_b + C_c)} V_i$ 와 같이 표현되며, 이때 V_i 는 시료에서 방전이 발생하는 외부방전의 개시전압이다. 따라서 식 (2.4)는 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} C_c \times \Delta V \times \frac{C_b}{(C_b + C_c)} V_i \quad (2.5)$$

식 (2.5)에서 b 는 c 에 비해 무시될 수 있을 만큼 작으므로

$$P = \frac{1}{2} C_c \times \Delta V \times V_i = \frac{1}{2} q V_i \quad (2.6)$$

과 같다.

2.2 절연진단기술

위에서 언급한 것과 같이 PD는 절연파괴의 전구현상이라 할 수 있으며, 따라서 경미한 상태의 절연 열화는 PD를 측정함으로써 사고를 예방할 수 있다. 전력 수요의 증가에 따라 초고압·대용량화 되었고 유입식 변압기는 전력 시스템에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있어 그 정전범위가 넓고 막대한 경제적 손실이 발생하는 등 전력계통에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 변압기 내부에 이상이 발생하거나 발생할 가능성이 있을 경우 즉시 경보할 수 있는 감시 및 제어체계가 요구되고 있다. 이를 위해 국제적으로도 IEC를 중심으로 전기관련 전 분야에 규격화가 이루어지고 있으며, 고품질의 전력을 무중단으로 공급하기 위해서 전력설비의 절연진단기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

절연진단기술은 큰 범주로 오프라인(off-line) 진단기술과 온라인(on-line) 진단기술로 구분할 수 있다. 대표적인 오프라인 기술로는 주파수응답분석(Frequency Response Analysis, FRA), 절연저항 측정, 누설전류 측정, 유전정접($\tan\delta$) 측정법이 있다. 오프라인 진단기술은 절연상태의 정밀한 진단이 가능하지만 진단에 필요한 요소들을 측정하기 위하여 전력설비의 운전을 중단시켜야 하는 단점이 있어 절연상태의 상시진단의 실현이 어렵다^[21]. 반면 온라인 진단기술은 전력공급의 중단 없이 현장에서 측정이 가능하여 시간적, 경제적으로 유리하고 운전 중 기기의 상태를 확인할 수 있기 때문에 최근에는 유입식 변압기 뿐만 아니라 전력설비 대부분에 적용되고 있다. 유입식 변압기에 적용되는 대표적인 온라인 진단방법에는 유중 가스 분석법(Dissolved Gas Analysis, DGA)과 부분방전 측정법이 있으며 부분방전 측정법은 전기적 검출법, 음향신호 검출법 및 전자파 검출법으로 세분화 할 수 있다. 표 2.1은 대표적인 유입식 변압기의 부분방전 진단 기술과 간략한 개요를 나타낸 것이다.

표 2.1 유입식 변압기의 온라인 부분방전 진단 기술

Table 2.1 Diagnostic technique of partial discharge of oil-immersed transformer

진단 기술	개 요
유중 가스 분석법	변압기 내부의 부분방전에 의해 발생하는 가스를 분석하여 절연유 및 기기의 열화 상태를 진단
전기적 검출법	부분방전에 의해 발생하는 펄스성 방전전류를 변류기, 커플링콘덴서 등의 전기적 장치로 검출
음향 검출법	유중에서 발생하는 부분방전에 의한 음향신호를 센서를 이용하여 전기적 신호로 변환하여 검출
전자파 검출법	변압기 내부에서 발생하는 300 MHz~3 GHz의 주파수 범위의 UHF 대역의 방사전자파를 검출

2.2.1 유중 가스 분석법

유입식 변압기 운전시 내부에서 부분방전이 발생하면 국부적인 과열현상으로 발열을 동반한다. 변압기 내부의 절연유, 프레스보드 등의 절연재료들은 이러한 과열이나 방전에 의해 열화 및 분해되면서 표 2.2와 같이 5가지 분자 요소들로 구성된 10가지 유형의 가스가 발생한다.

표 2.2 유입식 변압기의 이상에 따른 발생가스

Table 2.2 Generated gases according to defects of oil-immersed transformer

가스 구성 분자 요소	주요 발생 가스
H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂	H ₂ -CH ₄ , H ₂ -C ₂ H ₄ , H ₂ -C ₂ H ₆ H ₂ -C ₂ H ₂ , CH ₄ -C ₂ H ₆ , CH ₄ -C ₂ H ₄ , CH ₄ -C ₂ H ₂ , C ₂ H ₆ -C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ -C ₂ H ₂ C ₂ H ₄ -C ₂ H ₂

변압기에서 채취한 절연유에 용존 되어있는 가스를 분석하여 변압기 내부의 이상 유무 및 열화 상태를 진단하는 방법을 유중 가스 분석법이라 한다. 분해된 가스는 대부분 절연유에 용해되어 있기 때문에 그림 2.3과 같이 절연유 샘플을 채취하여 변압기를 진단할 수 있다.

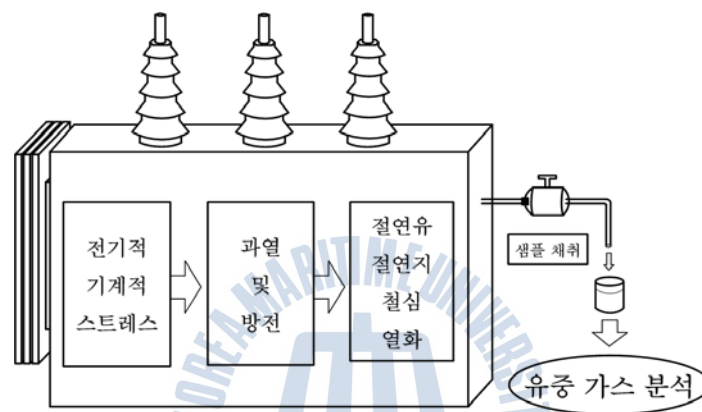


그림 2.3 유중 가스 분석법

Fig 2.3 Method of gas analysis in oil

정기적으로 절연유를 샘플링해서 용해되어 있는 유중 가스의 성분, 함유량을 분석함으로써 절연이상 및 열화의 정도를 판단할 수 있다. 가스분석에 의한 방법은 대형 유입식 변압기에서 정기적으로 소량의 절연유를 채취하여 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography)를 이용해 발생 가스 성분을 분석하였으나 이를 상시 감시할 수 있도록 온라인 진단기술이 개발되었다. 이 기술은 가스 투과막과 가스 센서를 사용하여 수소(H_2), 일산화탄소(CO), 아세틸렌(C_2H_2), 에틸렌(C_2H_4)과 같은 특정 가스 성분을 측정하는 것과 가스 크로마토그래피를 구비하여 모든 가스 성분을 측정하는 방법이다^{[22],[23]}. 유중 가스 분석법은 상용화되어 사용된 기간이 길고 절연 진단을 위한 자료가 충분히 확립되어 있기 때문에 절연상태를 판단하기

편리하다. 하지만 운전 중 실시간 측정이 불가능하며 가스분석을 위한 시간 및 비용이 많이 소요된다. 또한 부분방전의 발생을 실시간으로 측정할 수 없기 때문에 다른 진단법과 같이 병행해야하는 단점이 있다^[24].

2.2.2 부분방전 검출법

부분방전이 발생하게 되면 방전에 따른 전하의 이동으로 인해 전류형태의 펄스가 발생함과 동시에 초음파 영역의 음향신호나 전자파가 발생한다. 따라서 부분방전 측정법으로써 커패시터나 고주파 변류기로 펄스 상태의 전류를 검출하는 ‘전기적 검출법’, AE 센서 등을 통한 초음파 신호를 검출하는 ‘음향 검출법’, UHF 대역의 방사전자파를 안테나와 같은 센서를 통해 검출하는 ‘전자파 검출법’이 사용되고 있다.

(1) 전기적 검출법

유입식 변압기 내부에서 부분방전이 발생하면 펄스성 전류가 발생한다. 변압기의 중성점이 직접 접지되어 있는 경우, 부분방전 펄스는 접지선을 통하여 흐르게 되고, 이를 검출함으로써 부분방전의 크기를 검출할 수 있다. 부분방전 펄스는 그림 2.4에 나타낸 것과 같이 커패시터와 검출 임피던스 또는 접지선에 취부한 관통형 고주파 변류기 등을 이용하여 검출한다. 커패시터와 검출 임피던스를 이용한 방법은 감도가 좋지만 설치 현장에서 발생하는 전자계 노이즈의 영향을 받기 쉽고, 결합의 위치를 파악하기 힘들다는 단점이 있다^{[25],[26]}. 특히 초고압의 경우 운전 중 결합회로망의 설치가 불가능하고 장시간 설치하여 사용할 경우 커패시터 자체의 절연이 저하될 수도 있기 때문에 현장에서 적용하기가 매우 힘든 실정이다. 또한 고주파 변류기를 이용한 방법은 변압기가 설치된 현장에서 접지선으로 흐르는 고주파 잡음에 의한 영향으로 부분방전

펄스의 검출이 힘들기 때문에 전자파 검출이나 음향신호 검출법이 현장에서 적용되고 있다.

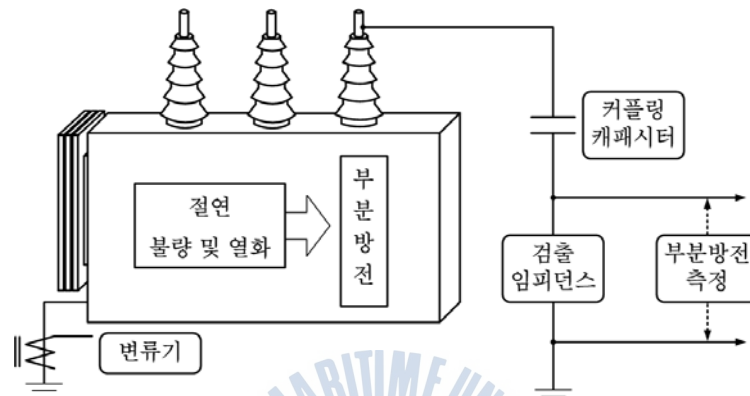


그림 2.4 전기적 검출법
Fig. 2.4 Method of electrical detection

(2) 음향 검출법

변압기 내부에서 부분방전이 발생할 경우, 그 부위에는 국부적인 발열을 동반하고, 그 발열에 의해 주변의 절연유가 급격한 압축을 받아 충격파로 유충을 전달하는 펄스형태의 음파와 초음파가 발생한다. 이 음향신호는 변압기 내 매질을 통해 탄성진동파로 변압기 내벽에 전파되어 기계적 진동으로 변환되고, 변압기 외부에 설치된 음향센서에 의해 검출된다. 대표적인 음향센서로 AE센서는 센서 내부에 장착되어 있는 압전 진동자를 이용하여 기계적 진동을 전기적 신호로 변환시키며, 이를 증폭시켜 변압기 부분방전 발생여부를 확인할 수 있다.

음향신호를 이용한 변압기 진단은 센서를 변압기 외함에 자석을 이용하여 부착하기 때문에 측정이 간편하고 변압기 전체를 대지에서 띄우거나 결합 콘텐츠를 준비할 필요가 없다. 이와 같은 음향신호를 측정하기 위해

서는 부분방전 시 발생하는 음향신호 대역의 분석이 필요하며, 이에 적합한 음향센서의 선택이 중요하다^{[27],[28]}.

음향신호의 측정시스템은 그림 2.5와 같이 구성된다. 일반적으로 검출된 음향신호는 매우 미소하기 때문에 증폭기 및 필터를 사용하여 미소한 신호를 증폭하여 센서의 감도를 개선하고 원하는 신호만을 검출한다.

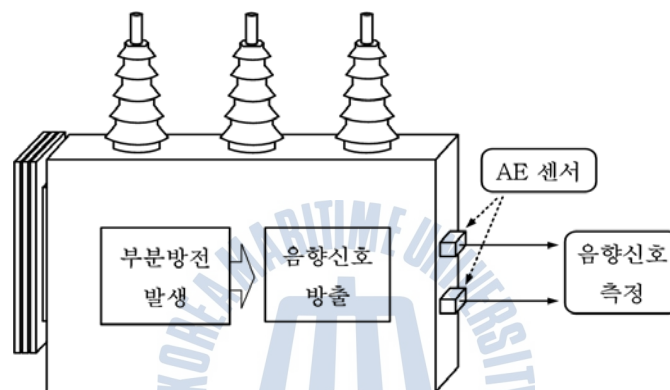


그림 2.5 음향 검출법

Fig. 2.5 Method of acoustic signal detection

특히 음향측정법은 다수의 센서를 설치하여 음향신호의 도달시간차를 측정하면 부분방전, 즉 결함의 위치를 추정할 수 있고, 현장에서 측정시 전기적 노이즈의 영향이 별로 없기 때문에 신뢰성이 좋다는 장점이 있다. 그러나 음향측정법은 감도가 낮고 음향 신호만으로는 부분방전 전하량을 검출할 수 없기 때문에 신뢰도가 확립되어 있지 않은 단점이 있다.

(3) 전자파 검출법

수 ns정도의 매우 짧은 상승시간을 가지며, 방전펄스에 의한 수 백 kHz~수 GHz 이상의 주파수 대역을 갖는 전자파를 방출한다. 이때 발생하는 방사전자파를 UHF 센서와 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정함으로써 유

입식 변압기 내부의 부분방전에 의한 전기적 이상유무를 판정하는 방법이다.

전자파 측정법은 전력설비나 기기에서 발생하는 UHF 대역(300 MHz~3 GHz)의 전자파 방사전자파를 비접촉센서인 UHF 센서로 검출하는 방법이며 부분방전의 검출감도가 좋고, 검출 범위가 넓으며 하나의 센서로 광범위한 진단이 가능하므로 센서의 수를 작게 할 수 있어서 경제적인 효과 등의 많은 이점이 있다^[29]. 이 방법은 가스절연개폐기(Gas Insulated Switchgear, GIS)에 적용하기 위하여 주로 연구되어 왔으며, 최근에는 그림 2.6과 같이 유입식 변압기의 부싱(Bushing)에 부착하는 형태나 드레인 밸브(Drain Valve)에 삽입하는 구조로 변압기 내부에서 발생하는 부분방전을 검출하는 연구가 진행되고 있다^{[30],[31]}.

전자파 측정법에 대한 여러 선행 연구 결과에서 UHF 대역에서 부분방전을 검출하는 방법은 제시되어 있지만 최적의 검출 주파수대역에 대한 내용은 정확하게 제시되어 있지 않은 실정이다.

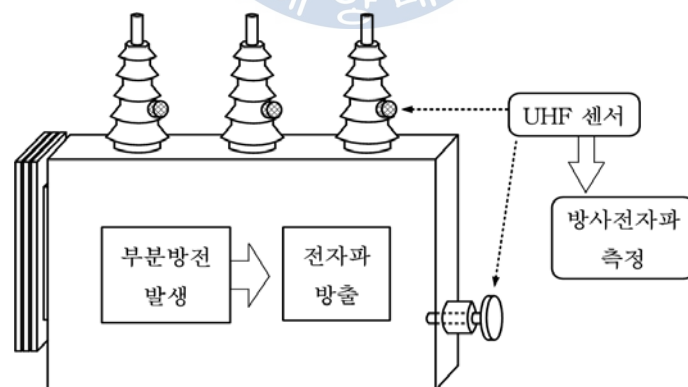


그림 2.6 전자파 검출법

Fig. 2.6 Method of electromagnetic wave signal detection

1) 전자파의 발생

전력기기의 절연이 열화 되어 부분방전이 발생하면 고주파 성분의 펄스형 전류가 흐르고 그림 2.7 (a)와 같이 그 전류에 의하여 주위에 자기장이 형성된다. 이때 그림 2.7 (b)에 나타내었듯이 전기장과 자기장이 수직방향으로 동반하여 파가 진행하는 방향에 대해 수직으로 진동하는 전기적 횡파가 생성되어 진행하는데, 이를 전자파라고 한다.

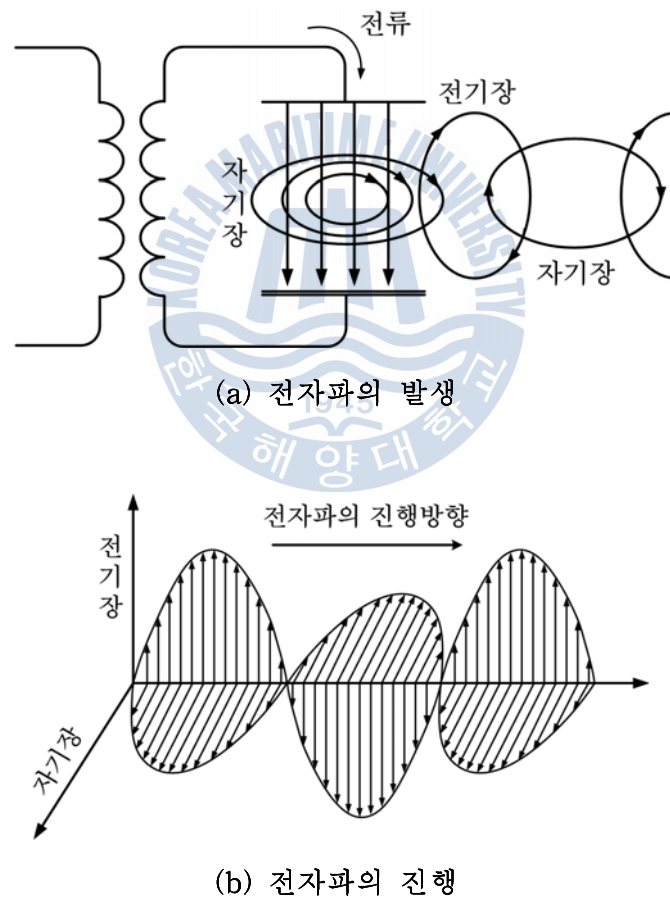


그림 2.7 전자파의 발생과 진행

Fig. 2.7 Occurrence and propagation of electromagnetic wave

2) 전자파의 특성

전자파는 대표적으로 성질은 반사, 산란, 회절, 굴절의 특성을 가지고 있으며, 표 2.3에 간략한 개요를 나타내었다.

표 2.3 전자파의 특성

Table 2.3 Characteristic of electromagnetic wave

성 질	개 요
반사	전자파는 금속을 만나면 완전반사를 한다. 이 성질을 이용하여 금속을 통해 전자파를 차폐하거나 반사판으로 특정 방향으로 보내는 것이 가능하다. 전자파는 서로 다른 매질을 만났을 때 일정량이 반사되는데 이 때의 입사각과 반사각은 같으며 이를 스넬의 법칙(snell's law)이라 한다.
산란	전자파가 어떤 물질을 만나면 그 물질 표면의 구조특성에 따라 사방으로 흩어지는 현상이다.
회절	전자파가 장애물을 마주쳤을 때, 옆으로 돌아서 진행하는 현상으로 저주파일수록 회절성이 강하고 고주파에선 전자파의 직진성이 강해져 회절성이 약하다.
굴절	물리적 성분이 다른 재질에 전자파가 입사했을 때, 그 재질차이에 의해 진행방향이 변화하는 현상이다.

전자파가 진행하다가 금속도체를 만날 경우, 전자파의 성질에 의하여 거의 모든 에너지가 전류로 변화하여 도체에 도통하게 된다. 따라서 금속도체로 이루어진 안테나 및 UHF 센서 등으로 전자파를 수신하여 오실로스코프 및 스펙트럼 분석기로 측정을 할 수 있다.

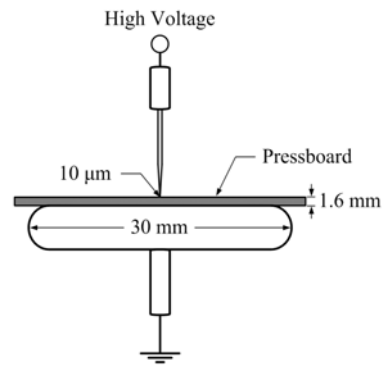
제 3 장 설계 및 제작

본 장에서는 유입식 변압기 내부에서 발생 할 수 있는 유중 부분방전의 발생 모의를 위한 결합전극계를 설계 및 제작하였고, 유중에 위치시켜 광대역 바이코니칼 안테나와 스펙트럼 분석기로 부분방전 측정시스템을 구성하여 방사전자파를 측정하였다. 결합별 유중 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 분석하였으며, 실험 결과를 바탕으로 검출 감도가 높은 대역을 중심 주파수로 선정하여 유입식 변압기의 부분방전 진단장치로 적용하기 위한 협대역 모노폴 안테나를 제작하였다.

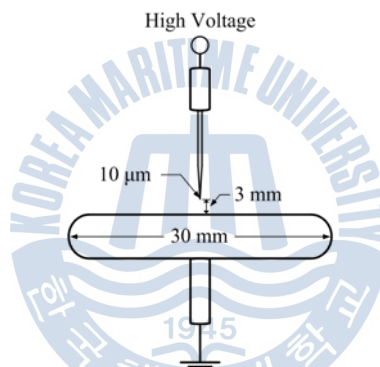
3.1 결합전극계

유입식 변압기 내부에서 코일이나 철심과 같은 구조물이 운전 중에 발생하는 진동과 충격 등의 기계적 스트레스에 의해 절연이 파괴되어 부분방전이 발생된다. 부분방전은 절연물 및 결합의 종류에 따라 고유의 방전 특성을 가진다. 따라서 유입식 변압기 내부에서 발생 가능한 결합을 모의하기 위하여 침-평판, 평판-평판, 구-구 등 총 6가지 전극계를 제작하였으며, 구성은 그림 3.1과 같다.

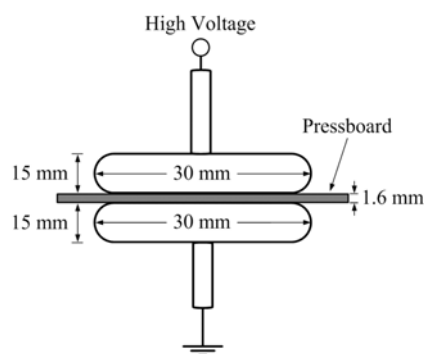
평판전극은 직경 30 mm, 두께 15 mm로 가장자리를 둥글게 처리하여 전계 집중이 발생하지 않도록 설계하였으며, 구 전극은 지름 30 mm, 침전극의 곡률반경은 약 10 μm 이다. 또한 전극사이에 실제 유입식 변압기에서 사용하는 프레즈보드를 삽입하였고 두께는 1.6 mm이다.



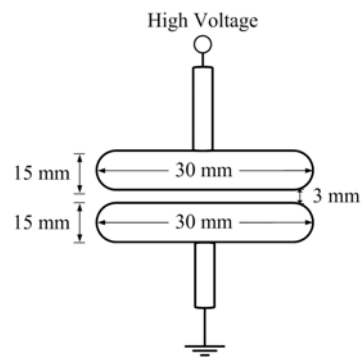
(a) 침-평판 (프레스보드 삽입)



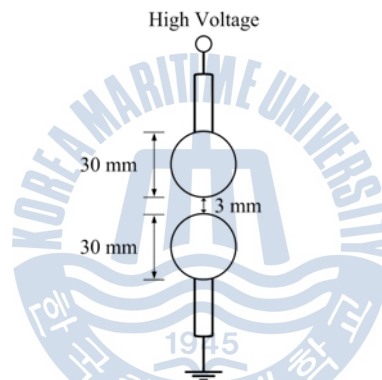
(b) 침-평판



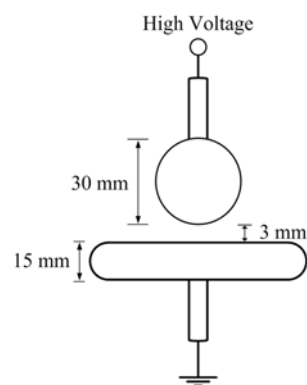
(c) 평판-평판 (프레스보드 삽입)



(d) 평판-평판



(e) 구-구



(f) 구-평판

그림 3.1 전극계의 구성
Fig. 3.1 Configuration of electrode systems

3.2 모노폴 안테나

모노폴 안테나는 협대역 주파수를 갖는 안테나로 길이를 조절하여 대역을 설정할 수 있다. 구조가 간단하고 소형으로 설계할 수 있으며 무지향성인 장점이 있기 때문에 최적의 검출감도를 갖는 대역의 모노폴 안테나는 효율적인 유입식 변압기의 부분방전 진단시스템에 적용 가능하다.

유중 부분방전의 방사전자파 측정시스템에 적용할 모노폴 안테나의 중심 주파수를 선정하기 위하여 각 결합전극별 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 분석하였다. 유중 방사전자파의 발생과 검출을 위하여 그림 3.2와 같이 실험계를 구성하였다.

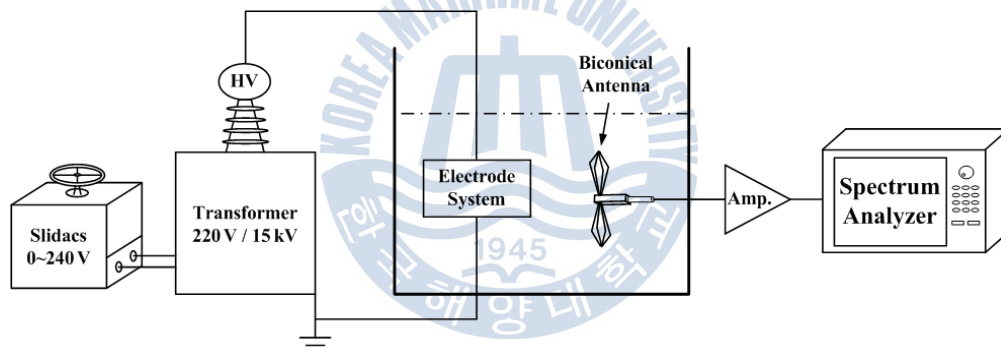


그림 3.2 실험계의 구성

Fig. 3.2 Configuration of experiment systems

금속제외함(740 mm × 740 mm × 1000 mm)에 절연유를 채웠고 실험에 사용된 절연유는 유입식 변압기에서 사용되고 있는 천연광유 1종 2호의 절연유이다. 전극계와 광대역 바이코니칼 안테나를 유중에 설치하였고, 전압조정기와 고압변압기로 부분방전을 발생시켜 스펙트럼 분석기로 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 분석하였다. 실험에 사용한 주요 장치들의 사양은 표 3.1과 같다.

표 3.1 실험장치 사양

Table 3.1 Specification of the experimental apparatus

실험장치	장치명	사 양
전압조정기	Slidacs	AC 0~240 V
입력전원	Transformer	220 V / 15 kV
스펙트럼 분석기	GSP 830	9 kHz~3 GHz
광대역 안테나	Biconical Ant.	300 MHz~2 GHz
전치증폭기	GAP-802	9 kHz~3 GHz, 20 dB

방사전자파의 신호와 배경잡음 신호를 분리하기 위하여 부분방전이 발생하지 않는 상태에서 배경잡음 신호를 먼저 측정하였으며, 주파수 스펙트럼은 그림 3.3과 같다. 배경잡음 신호의 주파수 스펙트럼을 분석한 결과 대표적인 주파수 대역은 약 880 MHz, 1800~1900 MHz로 나타났다.

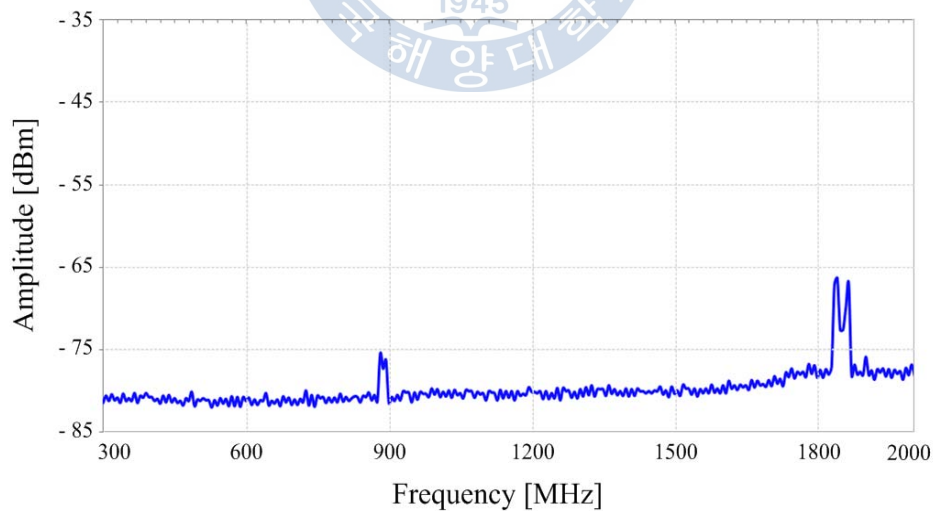
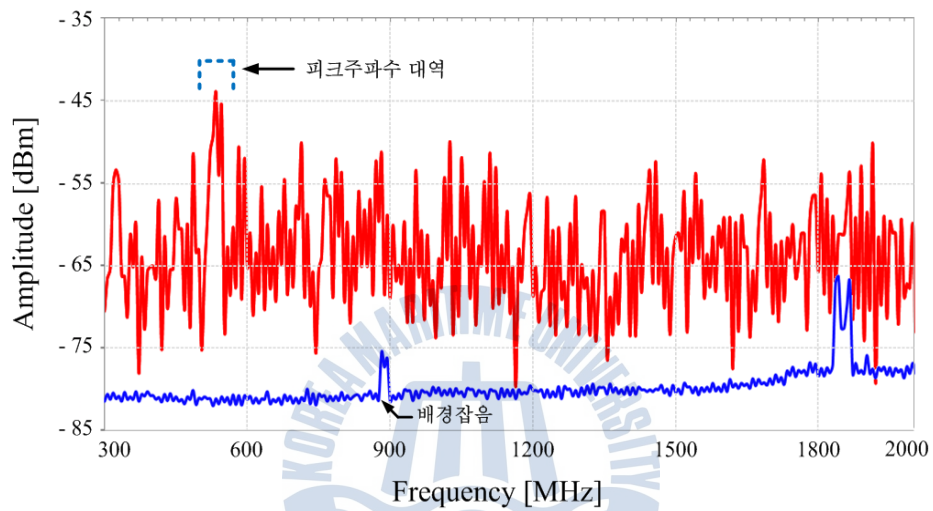


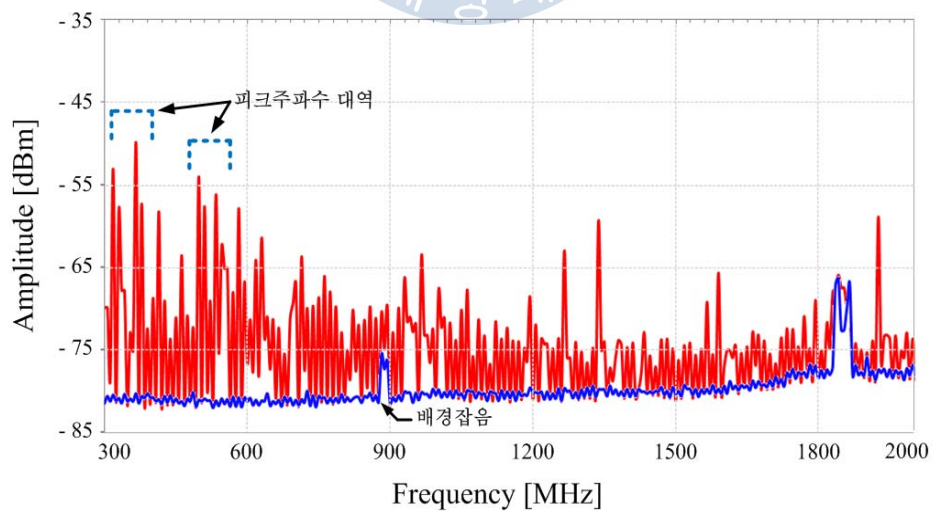
그림 3.3 배경잡음의 주파수 스펙트럼

Fig. 3.3 Frequency spectrum of background noise

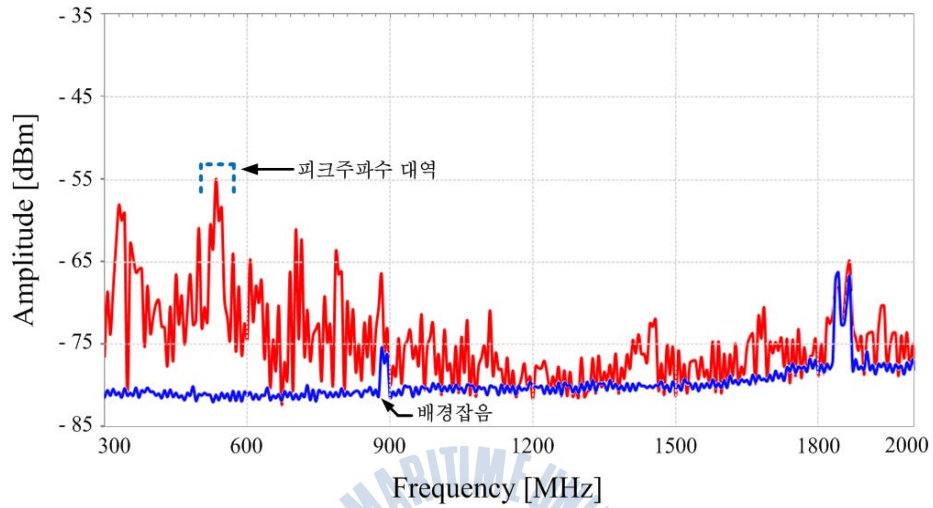
배경잡음 신호를 측정한 상태에서 각각의 결합별 방사전자파 신호를 측정한 결과를 그림 3.4에 나타내었고, 배경잡음 신호와 비교하여 주파수 스펙트럼을 분석하였다.



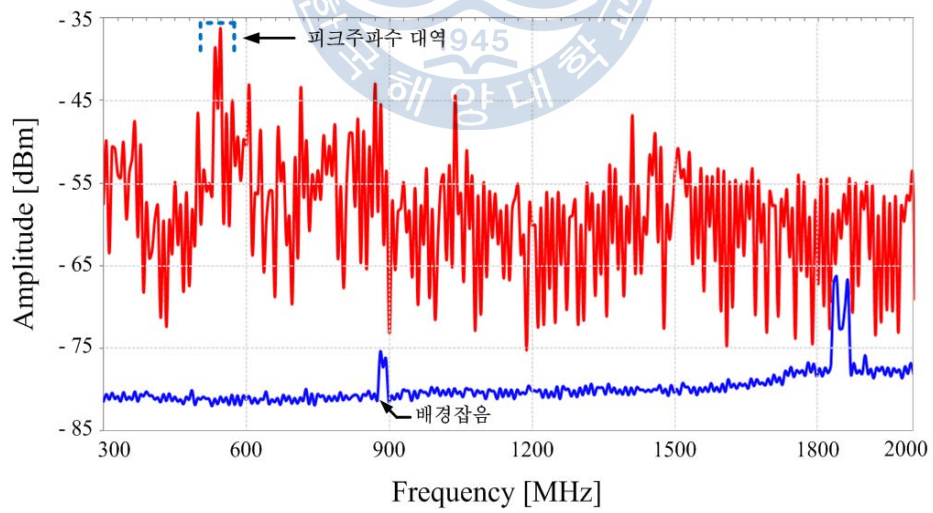
(a) 칩-평균 (프레스보드)



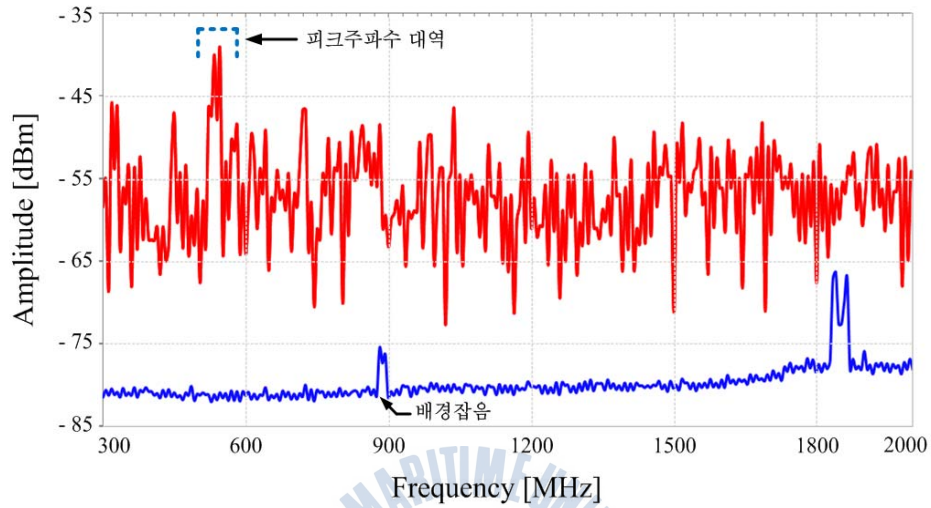
(b) 칩-평균



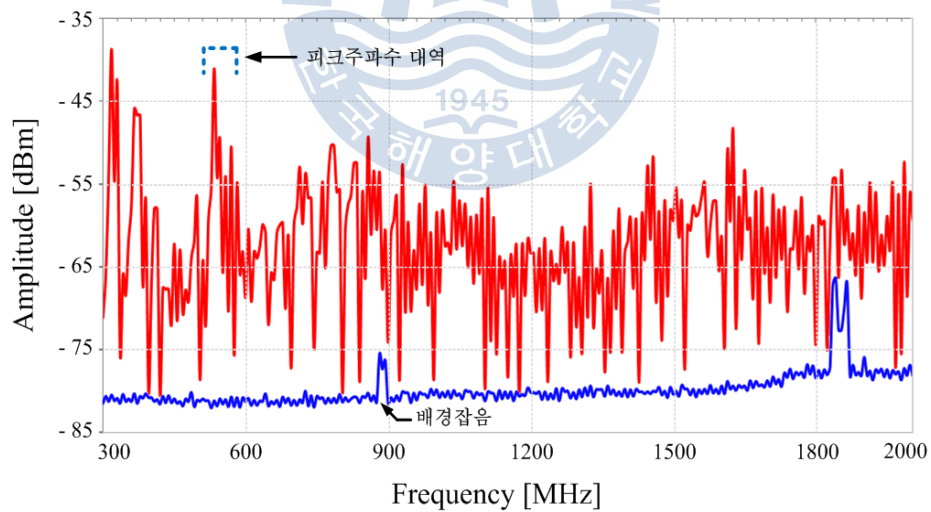
(c) 평판-평판(프레스보드)



(d) 평판-평판



(e) 구-구



(f) 구-평균

그림 3.4 유중 방사전자파의 주파수 스펙트럼

Fig. 3.4 Frequency spectrum of radiated electromagnetic wave in insulation oil

배경잡음 신호와 중복되는 부분은 침-평판 및 평판-평판(프레스보드 삽입) 전극계의 1800~1900 MHz 대역이었기 때문에 모든 주파수 스펙트럼의 이 대역을 제외하였다. 유중 방사전자파의 주파수 대역은 거의 전대역에 걸쳐 분포하였고, 각 결합에 대한 방사전자파의 피크 주파수대역을 표 3.2에 나타내었다.

표 3.2 전극계에 따른 피크 주파수대역
Table 3.2 Peak frequency range on electrode system

전극계	피크 주파수대역
침-평판 (프레스보드)	500 MHz~540 MHz
침-평판	380 MHz, 480 MHz~530 MHz
평판-평판 (프레스보드)	520 MHz~540 MHz
평판-평판	500 MHz~520 MHz
구-구	520 MHz~550 MHz
구-평판	320 MHz~340 MHz, 520 MHz

침-평판 전극과 구-평판 전극을 제외하고 약 500 MHz 대역에서 가장 높은 신호를 나타내었으며, 침-평판 전극과 구-평판 전극 전극에서도 최대 피크값 다음으로 500 MHz 부근에서 높은값을 나타내었다. 따라서 최적의 감도를 갖는 주파수 대역을 500 MHz로 선정하고 유입식 변압기의 부분방전 측정시스템을 구성하기 위하여 중심주파수가 500 MHz인 모노폴 안테나를 설계 및 제작하였다.

모노폴 안테나는 식 3.1로부터 길이를 설정할 수 있다.

$$c = \lambda \cdot f \quad (3.1)$$

여기서,

c = 광속 [m/s]

λ = 파장 [m]

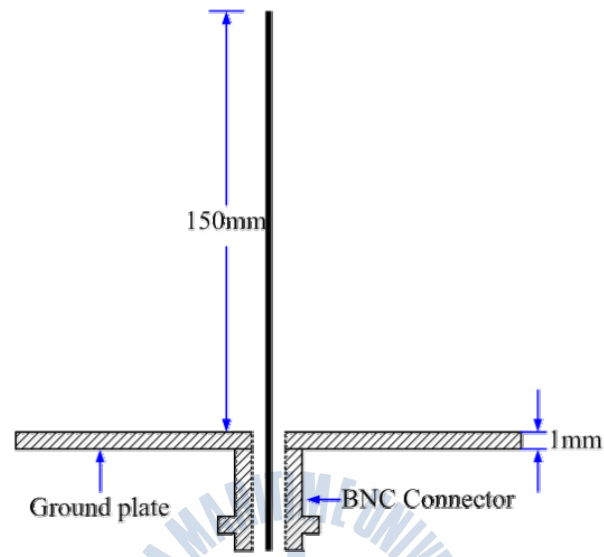
f = 주파수 [Hz]

모노폴 안테나의 길이는 파장 λ 의 1/4이 되면 되기 때문에 길이에 대하여 식을 정리하면 식 3.2와 같다.

$$\ell = \frac{c}{4 \cdot f} \quad (3.2)$$

ℓ = 안테나의 길이 [m]

따라서 중심주파수가 500 MHz인 모노폴 안테나의 길이는 150 mm가 되므로 그림 3.5와 같이 모노폴 안테나를 제작하였다. 안테나의 접지전극은 두께 1 mm인 동판을 사용하였고 BNC 단자를 설치하여 계측기와의 상호 연결이 가능하다.



(a) 구성도



(b) 사진

그림 3.5 시제작 모노폴 안테나

Fig. 3.5 Prototype monopole antenna

안테나는 하나의 입력단만을 가진 소자이므로 입력 반사계수를 의미하는 S11만 존재하며, 특정 주파수에서 S11이 낮으면 송·수신 효율이 높아지므로, 이를 측정하면 최대 감도의 주파수 대역을 알 수 있다. 따라서 제작된 모노폴 안테나의 전파특성을 평가하기 위하여 측정 주파수대역이 40 MHz~40 GHz인 네트워크 분석기(Anritsu 37369D)를 사용하여 입력 반사계수인 S11을 측정하였으며, 그림 3.6에 나타난 것과 같이 500 MHz에서 최대 감도를 갖는 것으로 나타났다.

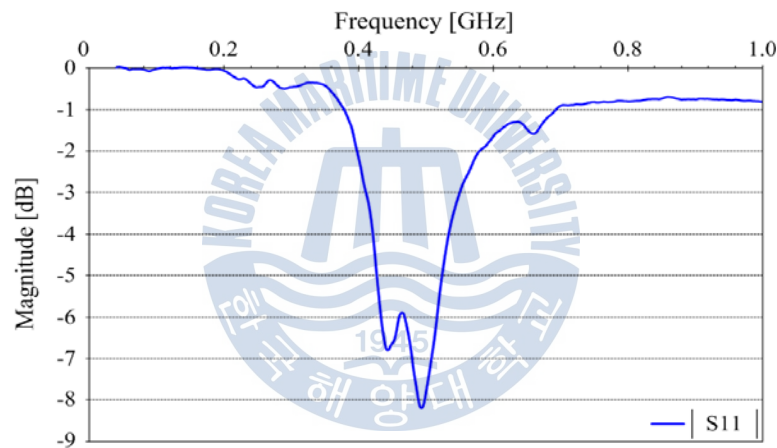


그림 3.6 시제작 모노폴 안테나의 반사손실

Fig. 3.6 Return loss of prototype monopole antenna

제 4 장 실험 및 분석

제작된 모노폴 안테나의 방사전자파 검출 성능을 평가하기 위한 측정시스템을 그림 4.1과 같이 구성하였다.

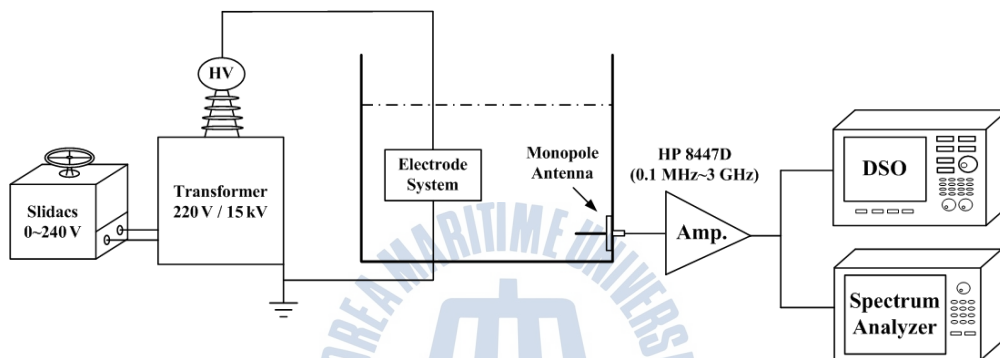


그림 4.1 실험계의 구성

Fig. 4.1 Configuration of experiment systems

시제작 모노폴 안테나와 전극계를 유중에 설치하여 고압변압기로 부분 방전을 발생시켰으며, 그 때 발생하는 방사전자파를 모노폴 안테나로 검출하였다. 실험에 사용된 저잡음 증폭기는 HP 8447D이며 주파수 대역은 0.1 MHz~3 GHz, 증폭비는 25 dB이다. 검출된 방사전자파의 신호는 오실로스코프에 의해 파형이 측정되고, 스펙트럼 분석기로 주파수 스펙트럼을 확인할 수 있다. 모노폴 안테나로 측정한 배경잡음의 주파수 스펙트럼을 그림 4.2에 나타내었으며, 중심주파수를 500 MHz로 설정한 주파수 스펙트럼에서 배경잡음은 거의 나타나지 않았다.

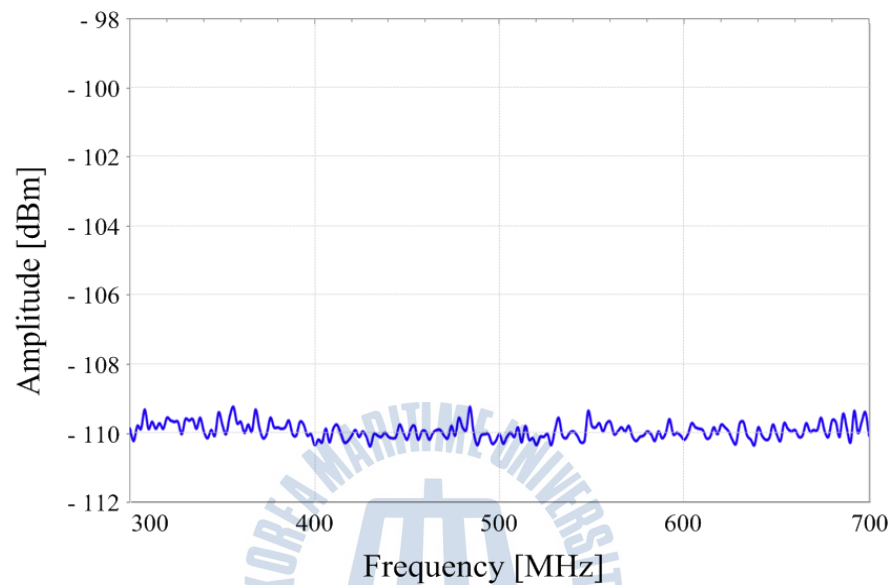
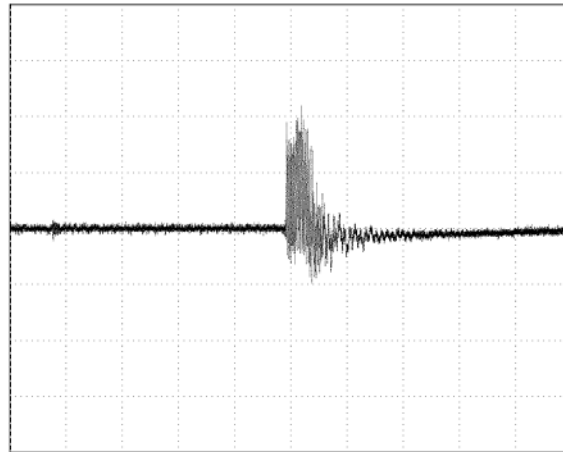


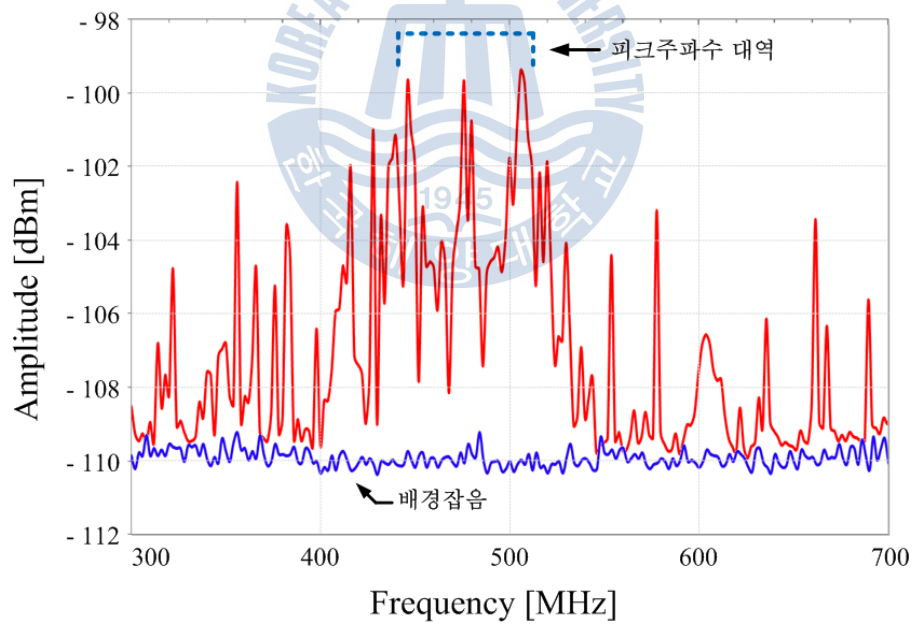
그림 4.2 배경잡음의 주파수 스펙트럼
Fig. 4.2 Frequency spectrum of background noise

배경잡음 신호를 측정한 상태에서 결함별 방사전자파 신호를 측정하였으며, 검출 파형과 주파수 스펙트럼의 측정 결과를 그림 4.3~4.8에 나타내었다. 유중 부분방전 발생시 모든 결함에서 방사전자파의 신호가 검출되었으며, 스펙트럼 분석기로 검출된 결과는 500 MHz 부근에서 높게 나타났다.



[1 V/div, 500 ns/div]

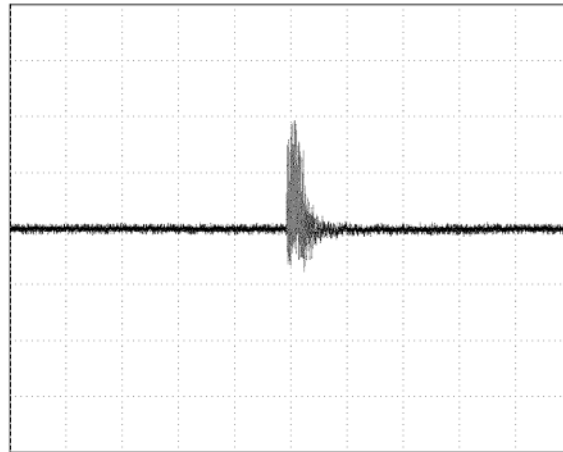
(a) 검출 파형



(b) 주파수 스펙트럼

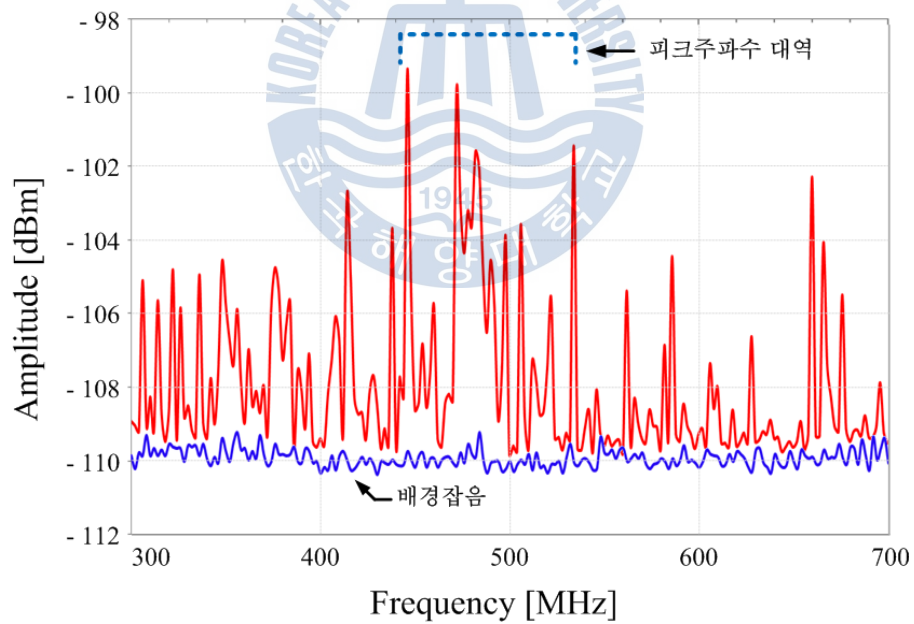
그림 4.3 유중 방사전자파의 검출 (침-평판(프레스보드))

Fig. 4.3 Detection of radiated electromagnetic wave in insulation oil (needle-plane(pressboard))



[1 V/div, 500 ns/div]

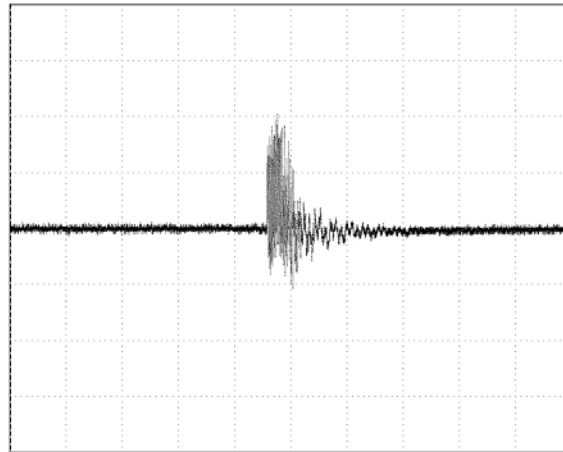
(a) 검출 파형



(b) 주파수 스펙트럼

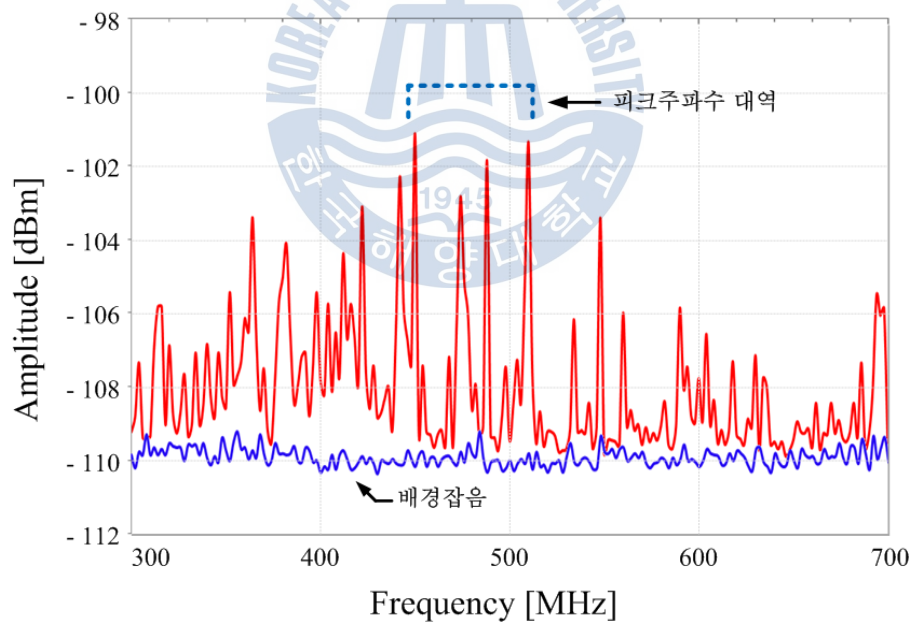
그림 4.4 유중 방사전자파의 검출 (침-평판)

Fig. 4.4 Detection of radiated electromagnetic wave in insulation oil (needle-plane)



[1 V/div, 500 ns/div]

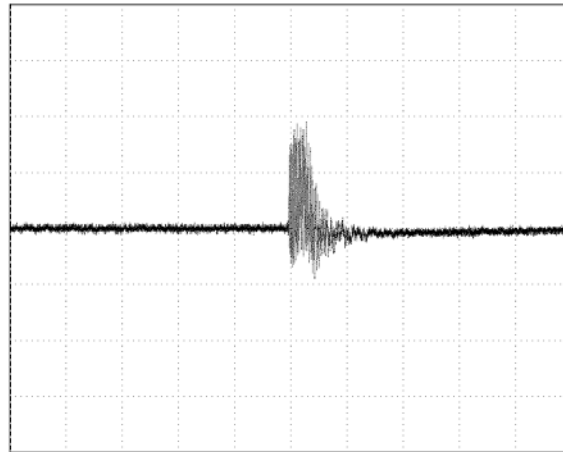
(a) 검출 파형



(b) 주파수 스펙트럼

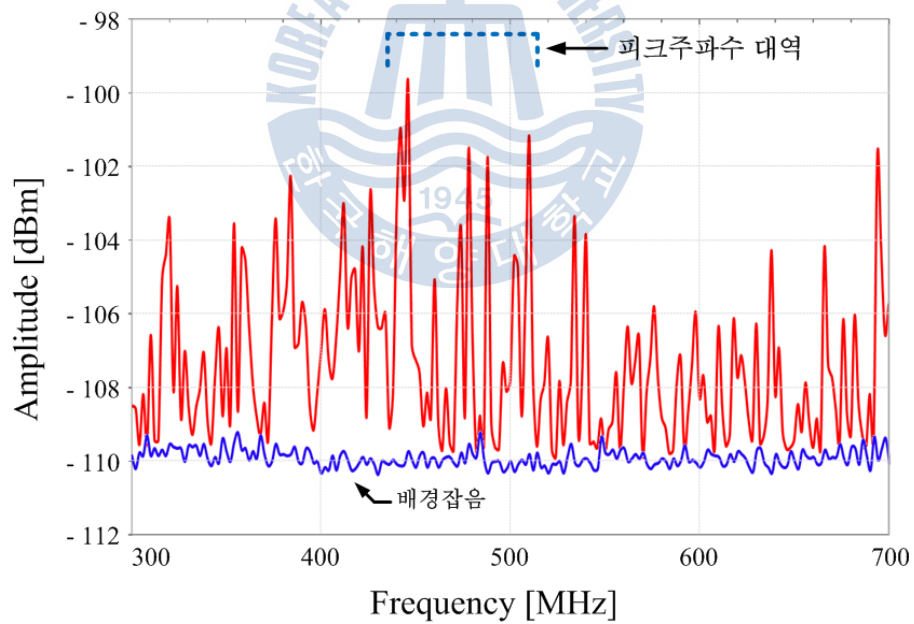
그림 4.5 유중 방사전자파의 검출 (평판-평판(프레스보드))

Fig. 4.5 Detection of radiated electromagnetic wave in insulation oil (plane-plane(pressboard))



[1 V/div, 500 ns/div]

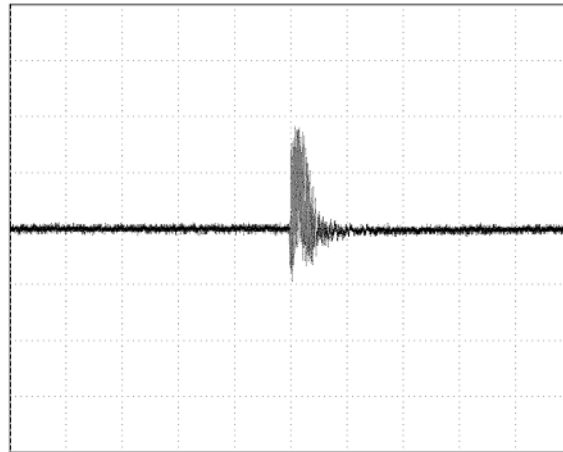
(a) 검출 파형



(b) 주파수 스펙트럼

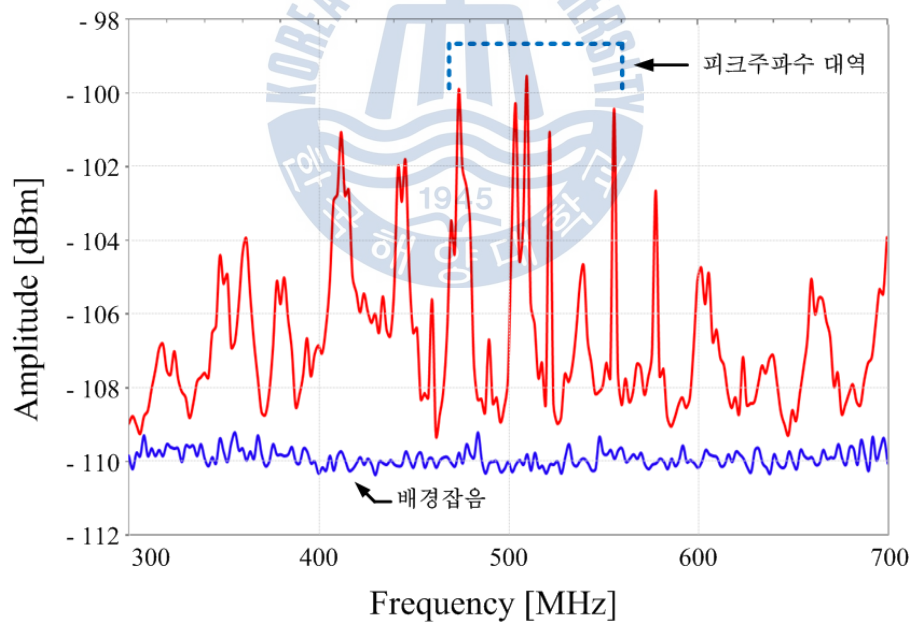
그림 4.6 유중 방사전자파의 검출 (평판-평판)

Fig. 4.6 Detection of radiated electromagnetic wave in insulation oil (plane-plane)



[1 V/div, 500 ns/div]

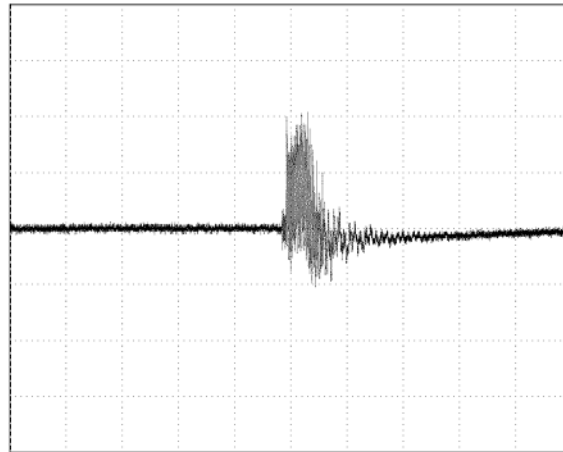
(a) 검출 파형



(b) 주파수 스펙트럼

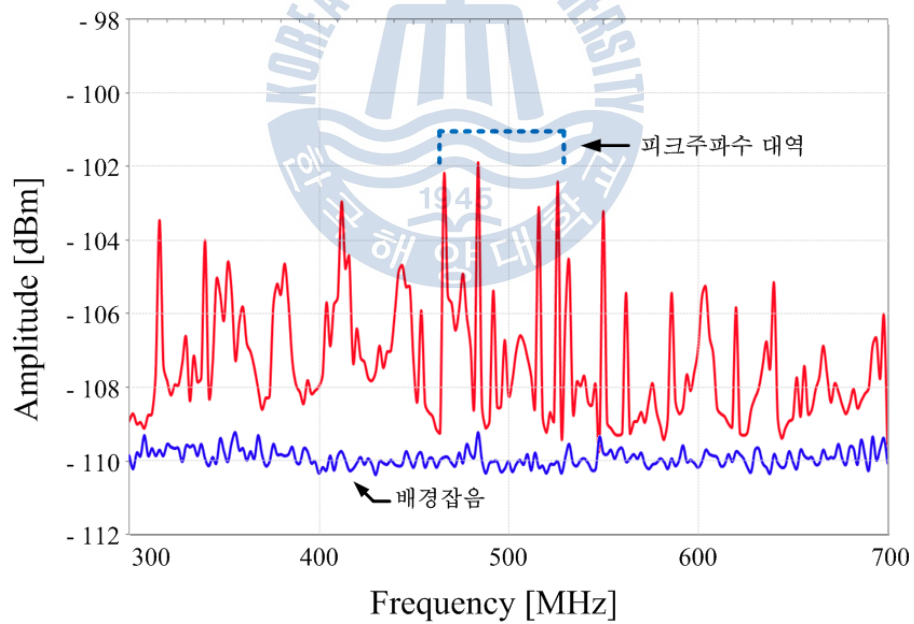
그림 4.7 유중 방사전자파의 검출 (구-구)

Fig. 4.7 Detection of radiated electromagnetic wave in insulation oil (sphere-sphere)



[1 V/div, 500 ns/div]

(a) 검출 파형



(b) 주파수 스펙트럼

그림 4.8 유중 방사전자파의 검출 (구-평판)

Fig. 4.8 Detection of radiated electromagnetic wave in insulation oil (sphere-plane)

제 5 장 결 론

본 논문에서는 유입식 변압기의 절연진단기술로 유중 부분방전에 의해 발생하는 방사전자파의 검출 방법에 관한 연구를 수행하였다. 유중 부분방전의 주파수 스펙트럼을 분석하여 최적 검출 감도를 갖는 협대역 모노폴 안테나를 제작하였으며, 제작된 모노폴 안테나로 부분방전 측정시스템을 구성하여 방사전자파의 검출 성능을 평가하였다. 연구 수행 내용은 다음과 같다.

1. 변압기의 절연시스템에서 발생할 수 있는 결함들을 모의하기 위하여 침, 평판, 구 및 프레스보드로 총 6개의 결함전극계를 제작하였다.
2. 결함에 따른 유중 부분방전의 발생을 모의하여 방사전자파를 검출하였으며, 각각의 주파수 스펙트럼을 분석하였다.
3. 유중 방사전자파의 주파수 스펙트럼은 거의 전대역에 걸쳐 발생하였으나 배경잡음과 중복되는 대역을 제외하고 500 MHz에서 높게 나타났다. 이 결과로 유중 부분방전에 의한 방사전자파의 측정시스템에 적용하기 위한 중심주파수가 500 MHz인 모노폴 안테나를 설계 및 제작하였다.
4. 안테나이론으로부터 중심주파수가 500 MHz인 모노폴 안테나의 길이는 150 mm이며, 네트워크 분석기로 평가한 전파특성은 유중 부분방전의 신호 검출에 적합하였다.

5. 제작된 모노폴 안테나와 저잡음 증폭기, 오실로스코프 및 스펙트럼 분석기로 구성된 측정시스템으로 유중 부분방전의 검출성능을 평가한 결과, 실험에 사용된 모든 결함을 검출할 수 있었으며 주파수 스펙트럼은 약 500 MHz 대역 부근에서 높게 나타났다.

이상의 결과로부터 검출감도가 높은 협대역 방사전자파 측정시스템을 유입식 변압기의 부분방전 진단기술에 적용할 경우 효과적인 절연진단이 가능할 것으로 판단된다.



참 고 문 헌

- [1] 한국전기안전공사, “2012년 전기재해통계보고서 - 전기재해통계분석”, 2012.
- [2] 전력연구원, “변전설비 진단기술 개발 연구”, pp.32~33, 1998.
- [3] T. K. Saha, “Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, no. 5, pp.903~917, October 2003.
- [4] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, “Electrical Degradation and Breakdown in Polymers”, Redwood Press, pp.242~262, 1992.
- [5] 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, - 86 - pp.474~486, 1994.
- [6] S. A. Boggs, “Partial Discharge - Part III : Cavity-Induced PD in Solid Dielectric”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 6, No. 6, pp.11-20, 1990.
- [7] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, High Voltage Engineering - Fundamentals 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [8] 이철호, “고분자 절연재료의 특성 및 평가 <II>”, Journal of the Electrical World Magazine, pp.46-49, August, 2011.
- [9] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, “Electrical Degradation and Breakdown in Polymers”, Redwood Press, pp.242~262, 1992.

- [10] D. Templeton, H. Q. Li, K. F. Lee, J. Pearson, R. Brinzer A. Reid and M. Judd, "Sensitivity testing of a UHF power transformer monitoring system", Proc. 15th ISH, Ljubljana, Slovenia, Paper T7-617, 2007.
- [11] E. Gulski, "Digital Analysis of Partial Discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.822~837, 1995.
- [12] G. Stone, "Importance of Bandwidth in PD Measurement in Operating Motors and Generators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp.6~11, 2000.
- [13] M Kaufhold, "Failure Mechanism of the Inter-turn Insulation of low Voltage Electric Machines Fed by Pulse-Controlled Inverters", Vol.12. No.5, pp.9~16, 1996.
- [14] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworth, 1989.
- [15] F. Gutfleisch and L. Niemeyer, "Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids", IEEE Trans. DEIS, pp.729-743, Vol.2, No.5, 1995.
- [16] Th. Aschwanden, M. Hässig, V. Der Houhanessian, W. Zaengl, J. Fuhr, P. Lorin, A. Schenk, P. Zweiacker, A. Piras, J. Dutoit, "Development and Application of New Condition Assessment Methods for Power Transformers", CIGRE, Paris, Paper 12-207, 1998.
- [17] H. Ogihara, "Detection and location of coronas in oil immersed transformer with corona detector", Electrical Engineering in Japan, Vol. 84, No. 9, pp.12-21, 1984.

- [18] 송재용, "저압용 전기전자기기의 절연성능 평가를 위한 부분방전시험에 관한 연구", 박사학위논문, p.24, 2003.
- [19] IEC Publication 60-1, "Medical electrical equipment-Part 1 : General requirements for safety", 1995.
- [20] IEC Publication 60950-1, "Information technology equipment-Safety- Part 1: General requirements", 2001.
- [21] T. Leibfried, K. Feser, "Off-line- and on-line-monitoring of power transformers using the transfer function method", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Que., Canada, Jun. 1996.
- [22] M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers", IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 18, No. 3, pp.8~17, May/Jun. 2002.
- [23] N. A. Muhamad, B. T. Phung, T. R. Blackburn, and K. X. Lai, "Comparative study and analysis of DGA methods for transformer mineral oil", Proc. of Power Tech, pp.45~50, 2007.
- [24] 권동진, "초음파 경향분석에 의한 전력용 변압기의 예방진단에 관한 연구", 박사학위논문, 숭실대학교 대학원, 1995.
- [25] C. S. Chang, J. Jin, S. Kumar, Q. Su, T. Hoshino, M. Hanai, and N. Kobayashi, "Denoising of partial discharge signals in wavelet packets domain", Proc. Inst. Elect. Eng., Sci. Measure. Techn., Vol. 152, No. 3, pp.129~140, 2005.
- [26] IEC 60270, "Partial Discharge Measurements, International Standard, Ed.3", 2001.
- [27] 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.

- [28] T. Bengtsson M. Leijon, L. Ming and B. Jonsson, "Directivity of acoustic signals from partial discharge in Oil", IEE proceeding-Science, Measurement and Technology, Vol. 142, Issue. 1, pp.85-88, 1995.
- [29] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, and T. Strehl, "Sensitivity of UHF PD measurements in power transformers", IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insul., Vol. 15, No. 6, pp.1553~1558, Dec. 2008.
- [30] C. S. Chang, J. Jin, S. Kumar, Q. Su, T. Hoshino, M. Hanai, and N. Kobayashi, "Denoising of partial discharge signals in wavelet packets domain", Proc. Inst. Elect. Eng., Sci. Measure. Techn., Vol. 152, No. 3, pp.129~140, 2005.
- [31] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, and T. Strehl, "Sensitivity of UHF PD measurements in power transformers", IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insul., Vol. 15, No. 6, pp.1553~1558, Dec. 2008.