



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

몰드변압기 절연진단을 위한 부분방전
측정 및 분석

Partial Discharge Measurement and Analysis
for Insulation Diagnosis of Cast-resin Transformers



2011年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

鄭 光 石

本 論文을 鄭光石의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 金 潤 植 ⑩

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ⑩

委 員：工學博士 徐 東 煥 ⑩



2010年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

鄭 光 石

목 차

목 차	i
그림 목차	ii
Abstract	iii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 필요성	1
1.2 연구목적	3
1.3 연구내용 및 활용방안	4
제 2 장 이 론	5
2.1 부분방전의 발생	5
2.2 부분방전의 검출원리	10
제 3 장 실험 및 방법	22
3.1 측정장치	23
3.2 실험방법	32
제 4 장 결과 및 분석	37
4.1 교정실험	37
4.2 위상분포와 파형	40
제 5 장 결 론	46
참 고 문 헌	47

그림 목차

그림 1.1	전력설비의 원인별 사고통계	2
그림 2.1	보이드 결함의 등가회로	6
그림 2.2	교류전압에서 부분방전의 발생	6
그림 2.3	IEC 60270에 의거한 방전 검출	10
그림 2.4	RC 회로에 대한 응답	12
그림 2.5	RLC 회로에 대한 응답	13
그림 2.6	용량성 프로브에 의한 부분방전 검출	14
그림 2.7	용량성 프로브의 원리도와 등가회로	15
그림 3.1	측정장치의 적용	23
그림 3.2	시제작 용량성 프로브	24
그림 3.3	용량성 프로브의 단면도	25
그림 3.4	결합회로망의 등가회로	26
그림 3.5	결합회로망의 주파수 응답	29
그림 3.6	저잡음 증폭기	30
그림 3.7	증폭기의 주파수 응답	31
그림 3.8	주파수 응답도 실험계	32
그림 3.9	감도평가 실험계	33
그림 3.10	IEC 60270에 의거한 실험계	34
그림 3.11	용량성 프로브에 의한 실험계	35
그림 3.12	평판-평판 전극계	36
그림 3.13	평판-침 (10 [μ m]) 전극계	36
그림 4.1	측정장치의 주파수 응답	37
그림 4.2	측정장치의 감도	38
그림 4.3	주입 전하량에 대한 응답파형	39
그림 4.4	평판-평판 전극계에서 위상분포	41
그림 4.5	평판-침 (10 [μ m]) 전극계에서 위상분포	42
그림 4.6	평판-평판 전극계에서 파형의 예	44
그림 4.7	평판-침 (10 [μ m]) 전극계에서 파형의 예	45

Partial Discharge Measurement and Analysis for Insulation Diagnosis of Cast-resin Transformers

by Kwang-Seok Jung

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



Abstract

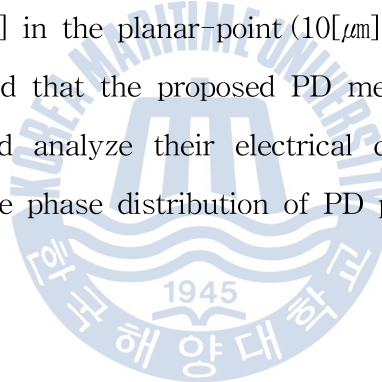
This thesis deals with the measurement and analysis of partial discharge (PD) for insulation diagnosis of cast-resin transformers. A PD measurement system which consists of a capacitive probe, a coupling network and an amplifier is set up to detect PD pulse.

The capacitive probe is proposed to detect PD pulses without connecting a high voltage conductor. The coupling network is designed to attenuate 60 [Hz] by 130 [dB], and its low cutoff frequency of -3

[dB] is 100 [kHz]. The amplifier with the gain of 40 [dB] is fabricated, and its frequency bandwidth is in ranges of 500 [Hz]~45 [MHz]. Sensitivity of the PD measurement system is 0.35 [mV/pC] for positive and 0.45 [mV/pC] for negative polarity, respectively.

A planar-planar and a planar-point (10[μ m]) electrode are fabricated to simulate insulation defects in cast-resin transformers. In the experiment, the rise-time of PD pulses is about 11 [ns] in the defects, and the phase distribution of PD pulses is in ranges of 8 [°]~90 [°] and 192 [°]~277 [°] in the planar-planar electrode, and of 345 [°]~128 [°] and 165 [°]~295 [°] in the planar-point (10[μ m]) electrode.

The results showed that the proposed PD measurement system can detect PD pulses and analyze their electrical characteristics such as the magnitude and the phase distribution of PD pulses.



제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 필요성

전력수요의 증가와 고품질 전력공급의 요구로 전력설비가 초고압·대용량화 되면서 예방진단기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 절연은 전력설비의 성능과 수명에 직접적 관련이 있으며 전기적, 열적, 화학적 스트레스로 인해 열화가 진행된다^{[1],[2]}. 특히, 전력계통에서 큰 비중을 차지하는 전력용 변압기에서 사고가 발생하면 수리나 교체에 막대한 비용이 소요되는 등 기술적·경제적 손실이 발생하며 전력공급의 중단은 물론 전기화재 및 인명사고와 같은 2차 사고를 발생시키므로 안정적인 전력공급과 신뢰성 있는 운전을 위해 주기적인 정밀점검과 상시 진단이 필요하다^[3].

전력용 변압기가 가지는 절연내력은 변압기의 수명과 성능에 직접적인 관련이 있다. 최적의 변압기 절연설계가 이루어지고, 우수한 특성의 절연재료를 사용할지라도 운전 중에 발생하는 복합적 스트레스로 인해 절연열화는 진행되며, 설계단계에서 고려된 기대수명을 다하지 못하고 절연파괴에 이르게 된다. 전력용 변압기의 제조 시에 이물질, 불필요한 수분이 함유되거나 외부 충격, 진동에 의해 손상될 경우 절연물에 결함이 형성되며, 운전 시 주위 절연물에 비해 낮은 유전율을 가지는 결함부분에 전계가 집중되어 부분방전이 발생하게 된다. 부분방전 발생초기에는 방전전하량의 크기가 미소하여 절연물의 성능에 큰 영향을 미치지 못하지만, 장기간 지속될 경우 전기 트리(Electrical Tree)를 성장시키고, 방전전하량이 급속히 증가하여, 최종적으로 전력용 변압기가 가지는 절연내력을 파괴시켜

단락사고를 유발한다.

그림 1.1은 '07년도 한국전기안전공사에서 조사한 전력설비의 원인별 사고 통계자료로서 전기사고는 총 10,560건이 발생하였으며 이중 절연열화에 의한 사고가 전체의 30.9 [%]인 3,261건, 다음으로 미확인 단락으로 인한 사고가 2843건으로 26.9 [%]를 점유하였고, 접촉불량으로 1306건 (12.4 [%]), 과부하로 1280건(12.1 [%])이 발생하였다. 통계자료로부터 절연열화에 의한 사고의 심각성을 확인할 수 있으며, 이에 대한 방지대책이 필요함을 알 수 있다.

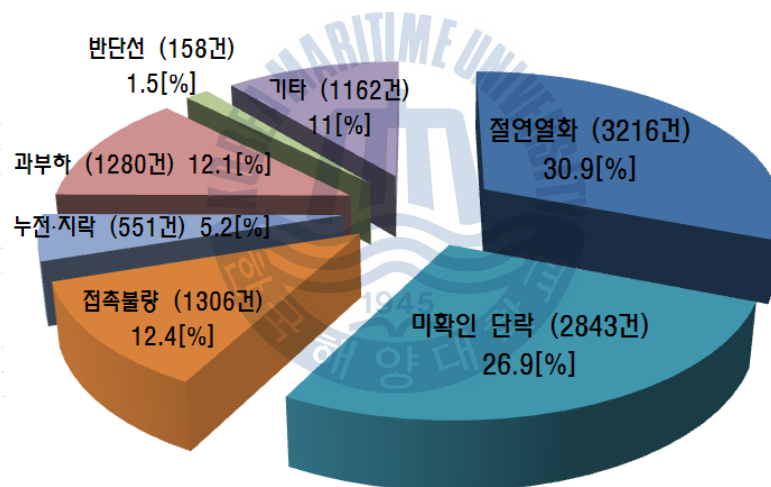


그림 1.1 전력설비의 원인별 사고통계

Fig. 1.1 Statistics of power facility accident by the main cause

대부분의 절연파괴는 부분방전으로부터 진전되므로 이의 검출을 통해 전력용 변압기의 절연상태를 진단할 수 있고 운전 중에도 지속적인 측정이 가능하므로, 전력설비의 절연진단을 위해 부분방전 신호의 측정 및 분

석에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 변압기 내부에서 부분방전이 발생하면 임펄스 형태의 미소 전류와 동반하여 초음파, VHF, UHF 대역의 방사전자파가 발생하므로 결합콘덴서, 로고스키 코일, 초음파센서, UHF 안테나 등을 이용하여 부분방전을 검출할 수 있다^{[4]~[10]}.

초고압 및 특고압에 사용되는 유입변압기의 경우 유중가스 분석법, 결합콘덴서를 이용한 방전펄스 측정법, 초음파센서를 이용한 음향신호 측정법, UHF 안테나를 이용한 전자파 측정법 등의 진단기술이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 반면, 특고압에 사용되는 몰드변압기는 결합콘덴서를 이용한 측정법이 적용되어 부분방전의 검출감도는 좋으나 고압의 콘덴서를 변압기 외부의 각 상에 설치하는 방식이므로 기설의 몰드변압기에서 설치가 어려울 뿐만 아니라 고압 환경에 따른 결합콘덴서의 특성변화로 인해 지속적인 유지보수가 필요하다는 단점이 있다.

운전 중인 몰드변압기의 절연진단을 위한 부분방전 측정장치는 고전압 환경 하에서의 절연문제, 온도특성을 고려해야 될 뿐만 아니라 기설 및 신설 변압기에서의 설치와 유지보수가 용이하여야 하며, 방전신호의 분석을 위해 충분한 검출감도와 주파수 특성을 가져야한다. 신뢰성 있는 절연진단을 위해서는 몰드변압기에서 발생하는 결합에 대한 정량적인 평가와 분석을 통하여 절연열화 상태를 파악하여야한다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 현재 몰드변압기의 절연평가에 적용되고 있는 부분방전 측정법에 있어 기존 방식은 고압도체와의 직접 접촉 방식임에 따라 센서의 자연열화가 발생하고 운전 중 변압기에 적용이 어려운 단점이 있으므로, 이를 해결할 수 있는 대책기술에 대해 연구하였다.

1.3 연구내용 및 활용방안

본 연구에서는 몰드변압기의 절연진단을 위해 온라인 부분방전 검출이 가능한 측정장치를 이론적 해석으로부터 설계·제작하였다. 몰드변압기를 구성하는 에폭시 고체 절연물에서 발생하는 부분방전 펄스를 분석하고, 그 결과로부터 용량성 프로브, 결합회로망 및 저잡음 증폭기로 구성되는 검출감도 20 [pC]의 부분방전 측정장치를 구성하였다.

몰드변압기에서 발생하는 부분방전 펄스의 측정은 변압기 표면에 설치된 용량성 프로브에 의해 이루어지고 증폭기와 관측장치로 전송되는데, 용량성 프로브와 전송케이블의 접속문제와 임피던스 특성을 고려해야 한다. 특히, 부분방전 측정장치의 주파수 대역에 직접적인 영향을 미치는 증폭회로의 입력임피던스에 대한 고찰이 이루어져야하며, 본 논문에서는 전송선로의 특성임피던스인 50 [Ω]으로 회로를 결합함으로써 부분방전 펄스의 왜곡 없는 측정이 가능하도록 하였다. 용량성 프로브는 변압기 표면에서 광대역 전계 프로브로 동작하므로 상용주파수 성분과 부분방전 펄스를 분리하기 위한 고역통과필터특성의 결합회로망과 미소 신호의 고감도 검출을 위한 증폭기를 설계·제작하였다. 결합회로망은 -3 [dB]의 저역차단주파수가 100 [kHz]로서 용량성 프로브에서 증폭기로 전달되는 상용주파수 성분을 130 [dB] 이상 감쇄시키며, 증폭기는 -3 [dB]에서의 주파수 대역이 500 [Hz]~45 [MHz], 이득을 40 [dB]로 설계하여 충분히 부분방전을 측정할 수 있도록 하였다.

최종적으로 몰드변압기에서 발생 가능한 결함을 모의하여 부분방전 위상분포와 파형을 분석하였고, 실험결과로부터 본 연구에서 제작한 측정장치는 몰드변압기에서 발생하는 부분방전을 측정 및 분석함에 있어 충분한 성능을 가지는 것으로 나타났으며, 향후 몰드변압기의 상시 절연진단에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

제 2 장 이 론

2.1 부분방전의 발생

부분방전은 절연물의 내부 또는 표면에서 국부적인 전계의 집중으로 인하여 발생하며 대부분 소리, 빛, 열 그리고 화학적 반응 등을 수반한다. 일반적으로, 방전은 펄스형태이고 $1[\mu s]$ 보다 짧게 나타나지만 기체 유전체에서는 수 $[\mu s]$ 이상의 연속적인 방전이 발생할 수 있다. 코로나는 부분방전의 일종으로써 고체 또는 액체로 절연되지 않은 도전체의 주위가 기체로 이루어졌을 경우 발생한다^[11].

고체절연물 내부에 보이드, 크랙, 도전체와 절연물사이에 갭이 있으면 부분방전이 발생하기 쉬운데, 그 이유는 다음과 같다.

- (a) 기체는 고체보다 유전율이 낮으므로 전계의 집중이 크다.
- (b) 일반적으로 기체의 절연내력이 고체보다 작다.

고체절연물 내부에서의 기체방전으로 인해 결함부분은 열적, 화학적 열화가 촉진되어 절연물의 유효 절연성능은 저하되며, 결과적으로 기기의 수명이 단축된다. 부분방전 초기에는 결함의 크기가 증대되어 방전이 발생하지 않는 기간이 존재하는데, 이는 절연성을 회복한 것이 아니므로 차후에 큰 방전을 발생시켜 기기의 운전에 위험을 초래한다.

고체절연물에서의 결함은 그림 2.1과 같이 정전용량 C_a , C_b , C_c 를 이용한 등가회로로 나타낼 수 있다. 영역 I_1 은 절연물의 정상부분, 영역 I_2 는 결함부분이다. C_a 는 정상적인 고체절연물 부분, C_b 는 보이드와 직렬로 접속되는 고체절연물 부분, C_c 는 절연파괴의 통로로 작용하는 보이드 부분의 정전용량 값을 나타낸다.

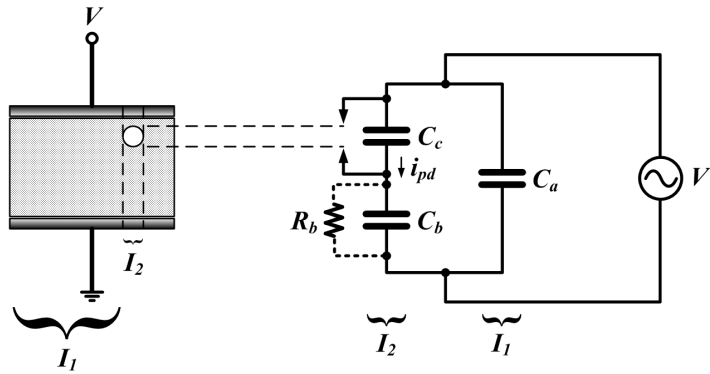


그림 2.1 보이드 결함의 등가회로

Fig. 2.1 Equivalent circuit of a void defect

교류전압 V 가 인가되는 동안 방전이 발생하지 않으면, 보이드 C_c 에 가해지는 전압은 그림 2.2의 점선 sV 와 같다.

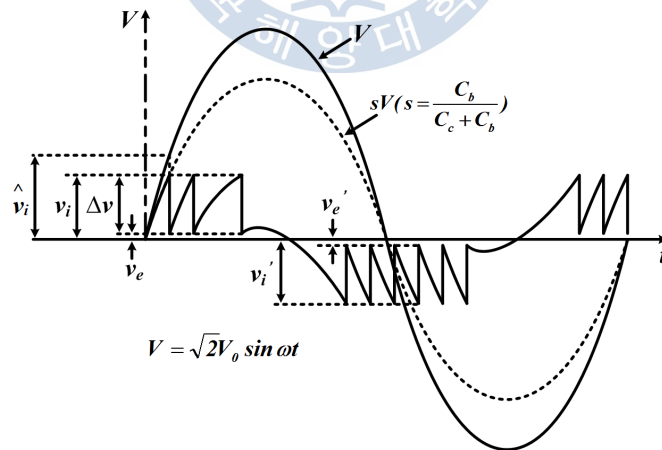


그림 2.2 교류전압에서 부분방전의 발생

Fig. 2.2 Occurrence of partial discharges in AC voltage

전압 sV 가 v_i 에 도달하면 보이드 C_c 에서 정극성의 방전이 발생하며, 수 [ns]~수십 [ns]의 방전지속시간 후 전압 sV 는 v_e 까지 저하한다. 보이드 C_c 와 직렬로 접속되는 고체절연물의 R_b 와 C_b 로 인하여 절연파괴현상은 지속적으로 발생하지 않으며 전압 sV 가 v_i 또는 v_i' 에 도달하면 재차 방전이 발생한다. 전압 sV 가 과고치에 도달된 후 전압이 감소하여 방전개시전압 v_i' 에 도달하면 부극성의 방전이 발생하며, 이와 같은 부분방전과정은 인가전압에 의해 연속적으로 반복된다.

방전개시전압 v_i 와 v_i' 는 결함의 상태와 위치에 따라 크기가 결정되므로 같은 값을 가지지는 않으며 방전이 발생하는 전압 v_i 를 방전개시전압 (DIV, Discharge Inception Voltage)이라하고 방전이 사라지는 전압 v_e 를 방전소멸전압(DEV, Discharge Extinction Voltage)이라 한다.

고체절연물 전체의 정전용량이 보이드의 정전용량 C_c 를 무시할 수 있을 만큼 클 때, 방전전하량 Q_c 와 방전에너지 W_c 는

$$Q_c \simeq (C_c + \frac{C_b C_a}{C_b + C_a})(v_i - v_e), \quad W_c \simeq \frac{1}{2}(C_c + \frac{C_b C_a}{C_b + C_a})(v_i^2 - v_e^2) \quad (2.1)$$

으로 표현된다. 하지만 보이드의 정전용량 C_c 는 측정이 불가능하므로 실제 적용이 불가능하다. 따라서 보이드와 직렬로 접속되는 고체절연물 C_b 를 이용하여 방전전하량 Q 와 방전에너지 W 를 나타내며, 이때의 방전전하량 Q 를 결보기 전하량이라 하고 다음과 같이

$$Q = C_b(v_i - v_e) \quad (2.2)$$

정의한다. Q 에 의해 고체절연물 전체에서 발생하는 전압강하는

$$v_{drop} = \frac{C_b}{C_a + C_b}(v_i - v_e) \quad (2.3)$$

와 같으며, 이때의 방전에너지 W 는

$$W = \frac{1}{2} C_c (v_i^2 - v_e^2) = \frac{1}{2} C_c \times \nabla v \times (v_i + v_e) \quad (2.4)$$

가 된다. 상기 식 (2.4)에서 v_e 를 무시한다면

$$W = \frac{1}{2} C_c \times \nabla v \times v_i \quad (2.5)$$

로 표현되며, 방전개시전압과 동일한 시점에서의 인가전압을 $\hat{v}_i$ 라고 했을 경우 v_i 는

$$v_i = \frac{C_b}{C_b + C_c} \times \hat{v}_i \quad (2.6)$$

로 표현되므로, 식 (2.5)는 다음과 같이

$$W = \frac{1}{2} C_c \times \nabla v \times \frac{C_b}{C_b + C_c} \times \hat{v}_i \quad (2.7)$$

나타낼 수 있다. 이때에 고체절연물에서는 $C_a \gg C_c \gg C_b$ 가 성립함에 따라 식 (2.7)에서 분모에 위치한 C_b 를 무시하면 방전에너지 W 는

$$W = \frac{1}{2} C_b \times \Delta v \times \hat{v}_i = \frac{1}{2} \times Q \times \hat{v}_i \quad (2.8)$$

와 같이 나타낼 수 있다

반면, 직류전압이 인가될 때는 전압이 상승하는 동안에는 교류와 동일하게 부분방전이 발생하지만, 전압이 일정해진 후에는 그림 2.1의 보이드 C_c 와 직렬로 접속되는 고체절연물의 누설저항 R_b 와 C_b 로 인하여 부분방전은 더 이상 발생하지 않는다.



2.2 부분방전 검출원리

부분방전의 크기는 일반적으로 미소하지만, 기기의 절연열화를 가속화시켜 손상을 발생시키므로 절연상태를 상시 점검하여 초기에 부분방전을 검출할 필요가 있다^{[12],[13]}.

본 절에서는 부분방전 검출에 있어 일반적으로 적용되고 있는 국제 표준 규격 (IEC 60270)에 의거한 방전 검출법과 본 논문에서 제안한 용량성 프로브에 의한 방전 검출법의 원리를 다루었다.

2.2.1 IEC 60270

IEC 60270에 의거하여 부분방전을 검출하는 기본적인 다이어그램은 그림 2.3과 같이 나타낼 수 있으며, 시료의 절연열화로 인해 발생된 부분방전 펄스를 결합콘덴서와 검출임피던스를 이용하여 측정하는 방법이다^[14].

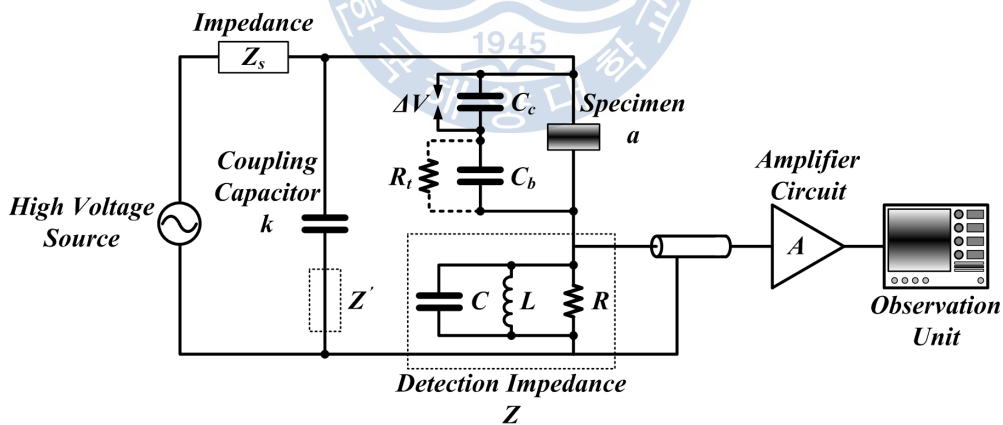


그림 2.3 IEC 60270에 의거한 방전 검출

Fig. 2.3 Discharge detection by the IEC 60270

측정장치로는 시료에 시험전압 인가를 위한 고전압 발생원, 전류펄스를 전압펄스로 변환하는 검출임피던스, 부분방전에 의한 펄스가 검출임피던스에 유효하게 전달되도록 폐회로를 형성하기 위한 결합콘덴서, 미소펄스를 정확히 측정하기 위한 증폭기와 관측장치로 구성된다.

검출임피던스의 접속위치는 시료의 열화정도에 따라 Z' 와 같이 결합콘덴서 k 와 직렬 또는 Z 와 같이 시료 a 와 직렬로 연결될 수 있다. 고전압 발생원의 내부 임피던스가 크다고 가정했을 경우, 검출임피던스에는 접속위치와 무관하게 동일한 전압이 인가되므로 두 가지 방법은 전기적으로 동등한 역할을 수행한다. 그러나 실제 적용에서는 결합콘덴서와 직렬로 검출임피던스를 접속하는 방법이 사용되는데 이는 시료에서 큰 방전이 발생할 경우 측정장치에 과도전류가 흘러서 회로를 소손시킬 수 있기 때문이다^[15].

결합콘덴서 k 와 검출임피던스 Z 의 임피던스결합을 통해 부분방전을 검출하기 위해서는 실험에 사용되는 고전압 발생원과 결합콘덴서 k 에서 자체적인 방전이 발생되지 않아야 하며, 시료 a 에서만 방전이 발생하여야 한다. 또한, 고전압 발생원과 시료 사이에는 외부로부터의 전도성 잡음 유입이나, 부분방전에 의한 펄스가 전원으로 유출되는 것을 방지하기 위해 저항 및 인덕터를 이용하여 폐회로를 구성하여야 한다.

검출회로의 적용에 있어서는 그림 2.4 및 2.5와 같이 표류정전용량이 병렬 접속된 RC 적분회로와 RLC 동조회로를 이용한 두 가지 방법이 있다. 그림 2.4와 같은 RC 회로에서 펄스는

$$V = \frac{Q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \times \exp(-\frac{t}{R \times m}) \quad (2.9)$$

와 같이 발생하며, 여기서 Q 는 방전의 크기로 $Q = C_b \times \Delta V$ 이며, a 는 시료의 정전용량, C 는 검출저항 R 의 표류정전용량 그리고 k 는 결합콘덴서의 정전용량을 나타낸다.

또한, 회로의 합성정전용량 m 은

$$m = \frac{ak}{a+k} + C \quad (2.10)$$

와 같이 구할 수 있다^[16].

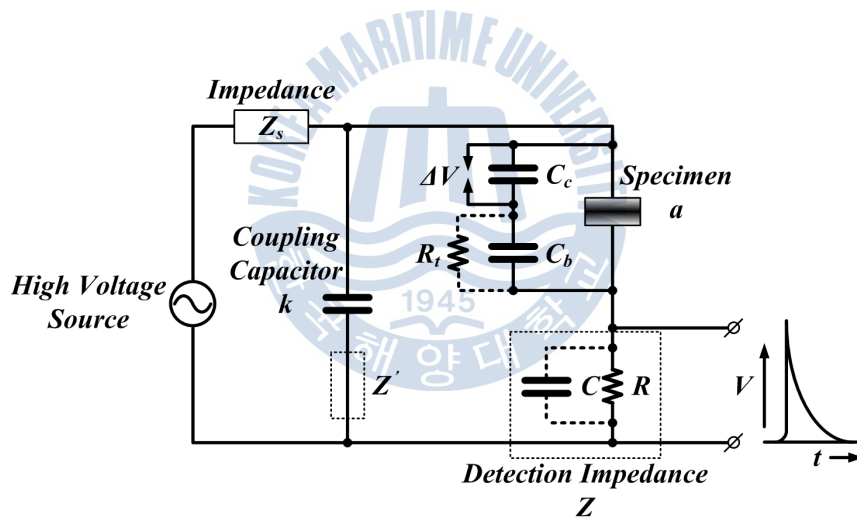


그림 2.4 RC 회로에 대한 응답

Fig. 2.4 Response to a RC circuit

그림 2.5의 RLC 회로에서 펄스는 RC 회로와 같은 파고치로부터 감쇄 진동하게 되고 출력전압은 다음과 같이 주어진다.

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \times \exp(-\frac{t}{2}) \times \cos \omega t \quad (2.11)$$

여기서, $\omega = \sqrt{\frac{1}{L \times m} - \frac{1}{4R^2 \times m^2}}$ 이고, m 은 회로의 합성정전용량으로 식 (2.10)과 같은 값을 갖는다.

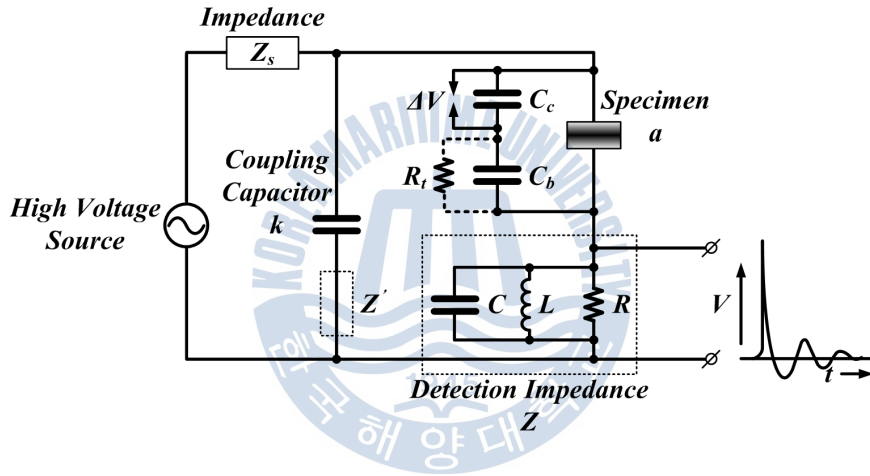


그림 2.5 RLC 회로에 대한 응답

Fig. 2.5 Response to a RLC circuit

식 (2.9) 및 (2.11)에서와 같이 검출임피던스 양단에 유기되는 펄스의 크기는 방전전하량 q 와 결합콘덴서 k 에 비례하지만, 저항 R 과는 무관하게 응답된다. 그러나 R 이 작아지면, 시정수 $R \times m$ 도 작아지므로 펄스의 파미장이 짧아져 관측장치가 검출을 못하는 경우도 생긴다. 따라서 부분 방전으로 인한 펄스를 충분히 검출할 수 있도록 R 을 선정해야한다.

2.2.2 용량성 프로브

용량성 프로브를 이용하여 부분방전을 검출하는 기본적인 다이어그램은 그림 2.6과 같이 나타낼 수 있으며, 동작원리는 부분방전 발생에 의해 측정대상 표면의 법선방향으로 형성되는 전계를 용량성 프로브를 이용하여 검출하는 것이다^[17]. 부분방전에 의한 펄스의 크기는 프로브의 단면적과 입사변위전류밀도에 비례하며, 주파수 응답은 검출임피던스 Z 와 증폭기의 입력임피던스 Z' 에 의하여 결정된다^{[18],[19]}.

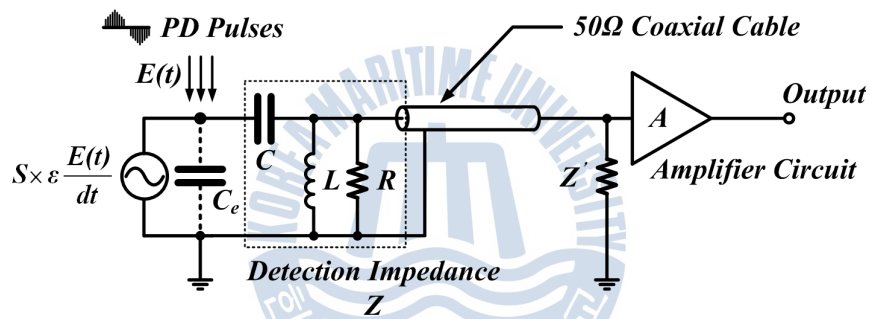


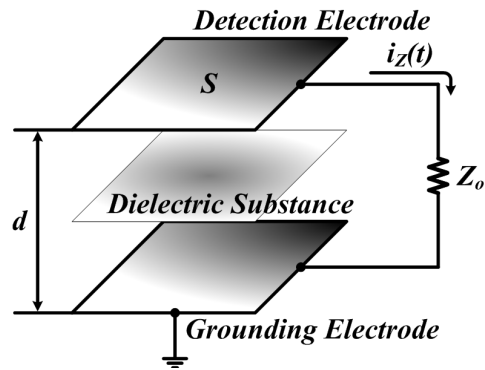
그림 2.6 용량성 프로브에 의한 부분방전 검출

Fig. 2.6 Partial discharge detection by a capacitive probe

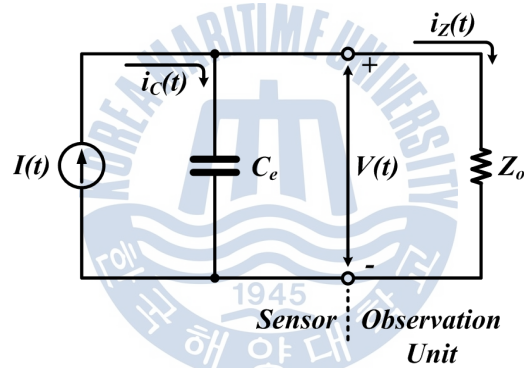
용량성 프로브의 원리는 Ampere의 주회법칙의 미분형태인 Maxwell의 제 2방정식

$$\nabla \times H = J + J_d \quad (2.12)$$

를 기초로 하며, 이의 원리도와 등가회로를 그림 2.7에 나타내었다.



(a) 원리도



(b) Norton의 등가회로

그림 2.7 용량성 프로브의 원리도와 등가회로

Fig. 2.7 The principle diagram and the equivalent circuit of the capacitive probe

식 (2.12)에서 우변항의 첫째항인 J 는 순 전하밀도가 0인 영역에서 전하의 이동에 의한 전도전류밀도로

$$J = \sigma E \quad (2.13)$$

이며, 둘째항인 J_d 는 유전체에 존재하는 변위전류밀도로서

$$J_d = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.14)$$

로 표현할 수 있고, 전도전류밀도에 비해 항상 90° 앞선다^[20].

식 (2.12)를 용량성 프로브의 입사면적 S 에 대해 적분하여 전계가 시간적인 변화를 가질 때의 Ampere의 주회법칙을 구하면

$$\int_S (\nabla \times H) \cdot dS = \int_S J \cdot dS + \int_S \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS \quad (2.15)$$

가 되고, $I = \int_S J \cdot dS$, $I_d = \int_S \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS$ 이므로 다음과 같이

$$\int_S (\nabla \times H) \cdot dS = I + I_d = I + \int_S \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \cdot dS \quad (2.16)$$

로 표현할 수 있다.

위의 식 (2.16)에 Stokes의 정리를 적용하면

$$\oint H \cdot dL = I + I_d = I + \int_S \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \cdot dS \quad (2.17)$$

로 구해진다.

용량성 프로브의 검출전극과 접지전극 사이의 유전체에 의한 정전용량 C_e 과 입사전계의 의해 형성되는 전압 $V(t)$ 는 충전전류 $I(t)$ 를

$$I(t) = C_e \frac{dV(t)}{dt} \quad (2.18)$$

발생시키며, 식 (2.18)을 $V(t)$ 에 관하여 나타내면

$$V(t) = \frac{1}{C_e} \int_t I(t) \cdot dt \quad (2.19)$$

로 표현이 된다. 이때의 용량성 프로브의 충전전하량 Q_e 은

$$Q_e = C_e V(t) = \int_S D \cdot dS = \int_S \epsilon E \cdot dS \quad (2.20)$$

와 같으므로, 입사 전기의 세기 E 는

$$E = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial C_e V(t)}{\partial S} \quad (2.21)$$

로 구해진다.

입사전계가 용량성 프로브에 도달하는 동안 매질에 의한 손실이 없다고 가정하면, 식 (2.17)과 식 (2.18)에 의해

$$I(t) = C_e \frac{dV(t)}{dt} = I + \int_S \varepsilon \frac{dE}{dt} \cdot dS \quad (2.22)$$

로 표현할 수 있다.

식 (2.21)을 식 (2.22)에 대입하여 프로브의 충전전류 $I(t)$ 을 구하면

$$I(t) = I + V(t) \frac{dC_e}{dt} + C_e \frac{dV(t)}{dt} \quad (2.23)$$

가 된다. 따라서 식 (2.23)을 식 (2.19)에 대입하여 입사전계의 의해 용량성 프로브에 형성되는 전압 $V(t)$ 을 구하면

$$V(t) = \frac{1}{C_e} \left(\int_t I \cdot dt + V(t) dC_e + C_e dV(t) \right) \quad (2.24)$$

가 된다.

그림 2.7(a)에 나타난 것과 같이 검출전극과 접지전극 사이에는 유전체가 존재하므로 전도전류밀도 $J = \sigma E = 0$ 이 되기 때문에 $\int_t I \cdot dt = 0$ 이 되고 식 (2.23)과 식 (2.24)는 다음과 같이

$$I(t) = V(t) \frac{dC_e}{dt} + C_e \frac{dV(t)}{dt} \quad (2.25)$$

$$V(t) = \frac{1}{C_e} (V(t) dC_e + C_e dV(t)) \quad (2.26)$$

로 표현된다.

또한, 측정장치의 입력임피던스를 고려하였을 경우 그림 2.7(b)에 Norton의 등가회로로부터 전전류 $I(t)$ 는

$$I(t) = i_C(t) + i_Z(t) \quad (2.27)$$

로 표현된다.

$I(t)$ 는 용량성 프로브에 입사되는 변위전류밀도 J_d 와 단면적 S 의 곱으로 표현될 수 있으므로 다음과 같이

$$\varepsilon \frac{dE(t)}{dt} \cdot S = C_e \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{Z_o} \quad (2.28)$$

로 구해진다.

따라서 전전류 $I(t)$ 는 용량성 프로브를 구성하는 유전체의 유전율 ε 과 관측장치의 입력임피던스 Z_o 의 크기에 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 관측장치의 입력임피던스와 출력전압의 관계는 다음과 같다.

(a) 측정장치의 입력임피던스가 클($1 \text{ [M}\Omega\text{]}$ 또는 $10 \text{ [M}\Omega\text{]}$) 경우

식 (2.28)에서 우변항의 둘째항 $\frac{V(t)}{Z_o}$ 가 무시되므로

$$\varepsilon \frac{dE(t)}{dt} \cdot S = C_e \frac{dV(t)}{dt} \quad (2.29)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (2.29)의 $C_e = \varepsilon \frac{S}{d}$ 이므로 입사전계의 의해 용량성 프로브에 형성되는 전압 $V(t)$ 는

$$V(t) = d \times E(t) \quad (2.30)$$

로 되어 $V(t)$ 의 크기는 입사전계의 세기와 프로브의 두께 d 에 비례하게 된다. 이와 같이 검출전압이 입사전계에 의해 결정되는 센서를 E-dot 센서라고 한다^[21].

(b) 측정장치의 입력임피던스가 작을($50[\Omega]$) 경우

식 (2.28)에서 우변항의 첫째항 $C_e \frac{dV(t)}{dt}$ 가 무시되므로

$$S \times \varepsilon \frac{dE(t)}{dt} = \frac{V(t)}{Z_o} \quad (2.31)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (2.31)를 입사전계의 의해 용량성 프로브에 형성되는 전압 $V(t)$ 로 나타내면

$$V(t) = S \times Z_o \times \varepsilon \frac{dE(t)}{dt} = S \times Z_o \times \frac{dD(t)}{dt} \quad (2.32)$$

로 되어 $V(t)$ 의 크기는 입사변위전류밀도와 용량성 프로브의 단면적 S 에 비례하게 된다. 이와 같이 검출전압이 입사변위전류밀도 즉, 전속밀도의 시간적 변화율에 의해 결정되는 센서를 D-dot 센서라고 한다^[22].

본 논문에서의 측정 대상은 10~20 [ns]의 상승시간을 갖는 부분방전 신호이므로 1 [M Ω] 이상의 입력임피던스를 갖는 관측장치를 사용할 경우 시정수에 의한 영향으로 파형의 왜곡이 발생하므로 정확한 부분방전 신호의 측정을 위해 식 (2.32)에 따라 측정장치를 설계·제작 하였다.



제 3 장 실험 및 방법

몰드변압기의 상시 절연진단을 위한 부분방전 측정장치는 기·신설 변압기에 대한 적용성 및 안전성을 확보하고 변압기의 전기적 성능을 저하시키지 않는 구조이어야 하며 부분방전 신호의 정확한 측정은 물론 상용 주파수 전원성분 및 변압기 주위환경에 의한 잡음의 제거도 가능한 것이어야 한다.

IEC 60270에 의거한 부분방전 검출법은 변압기의 각 상에 결합콘덴서를 설치하여 고전압 도체와 직접 접촉한 콘덴서 분압방식으로서 설치상의 문제, 온·습도 등 주위환경의 영향, 직접 접촉방식에 따른 결합콘덴서의 자연열화 등의 이유로 몰드변압기의 상시 절연진단에 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 IEC 60270에 의거한 부분방전 검출법의 단점을 개선할 목적으로 몰드변압기의 부분방전 검출 시 고전압 도체와 비접촉 방식으로 사용가능한 용량성 프로브를 제작하였으며, 이를 이용하여 부분방전 측정장치를 구성하였다.

3.1 측정장치

본 연구에서 제안한 부분방전 측정장치는 그림 3.1과 같이 용량성 프로브, 결합회로망, 저잡음 증폭기로 구성되며 원통형의 몰드변압기에 기구적 적용이 가능하도록 프로브를 제작하였다.

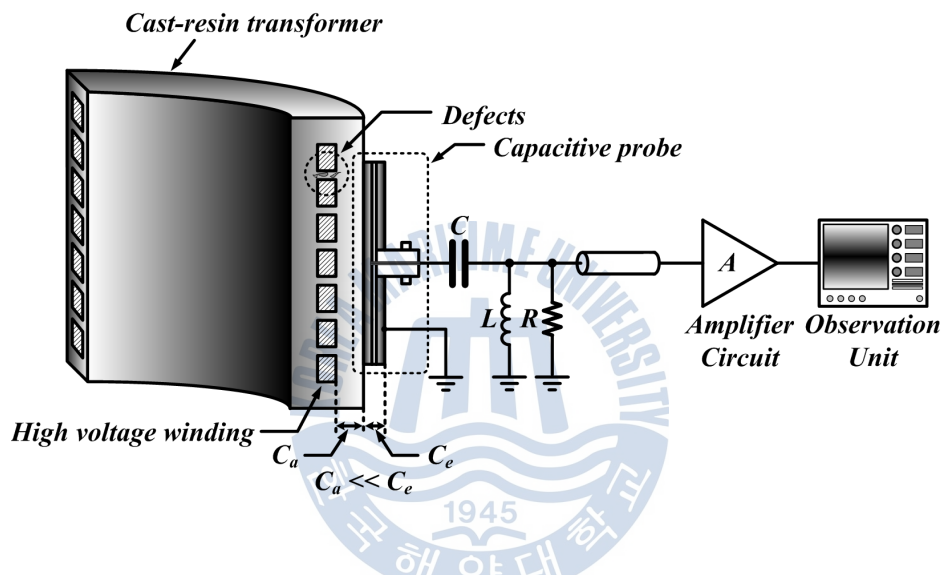


그림 3.1 측정장치의 적용

Fig. 3.1 Application of the measuring device

용량성 프로브와 증폭기 사이는 특성임피던스 50[Ω]의 동축케이블을 사용하였으며 증폭기의 입력임피던스를 50[Ω]으로 하여 매질에 의한 신호왜곡의 발생을 제거하였다.

3.1.1 용량성 프로브

자유공간에 존재하는 전계의 수직성분을 측정할 때에는 평판형 프로브가 가장 감도가 좋으므로 상용주파수 성분과 같은 정재파를 정확하게 측정할 수 있다. 그러나 급준성 과도전압이나 방전펄스와 같은 고주파 성분을 포함하는 전압은 진행파로써 작용하므로, 이의 정확한 측정을 위해서는 피측정 전압의 성분에 적합하게 설계된 프로브가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 검출전극이 몰드변압기 표면에 대하여 평행으로 놓일 수 있는 평판형태의 용량성 프로브를 설계·제작하였으며 이를 그림 3.2에 나타내었다.

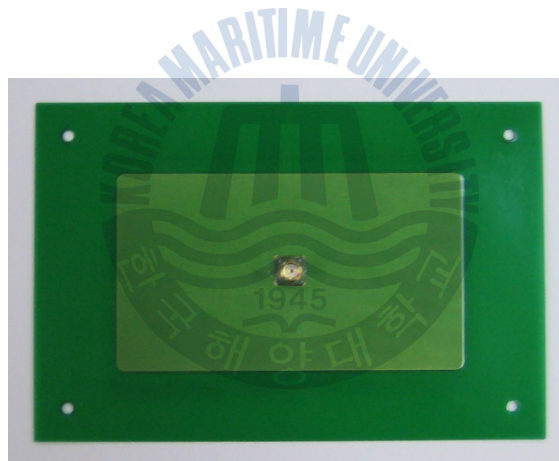


그림 3.2 시제작 용량성 프로브

Fig. 3.2 Prototype of the capacitive probe

용량성 프로브를 구성하는 재료로는 전극으로서 두께가 0.07 [mm], 면적 56.5 [cm²]의 동판과 유전체로서 두께 0.2 [mm], 비유전율 4, 면적 150 [cm²]의 난연성 에폭시 글라스 적층판(Flame retardant epoxy glass laminate)을 사용하였으며, 이의 단면도를 그림 3.3에 나타내었다.

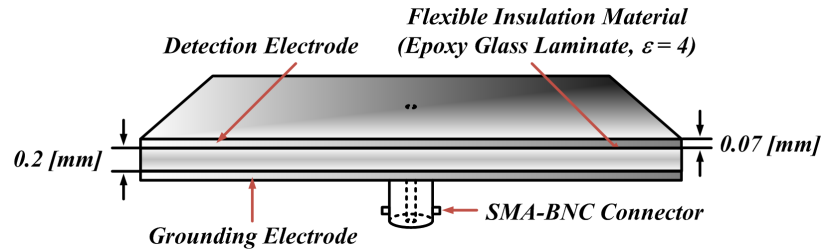


그림 3.3 용량성 프로브의 단면도

Fig. 3.3 Cross section of the capacitive probe

검출신호의 전송을 위해 고주파 특성이 우수하고 특성임피던스가 50 $[\Omega]$ 인 동축케이블(RG-58G/AU)을 사용하였으며 이와의 접속을 위해 SMA-BNC 커넥터를 접지전극 면에 부착하였다. 동축케이블의 절연체와 외부도체에 의한 정전용량(90~100 $[\text{pF}/\text{m}]$)은 전송신호의 왜곡을 발생시키므로, 이의 영향을 제거하기 위해 동축케이블의 특성임피던스와 같은 50 $[\Omega]$ 의 정합저항 R_m 과 보상저항 R_i 를 그림 3.4와 같이 연결하였다^{[23],[24]}. 프로브에 의해 검출되는 신호는 시도함수로 나타나기 때문에 별도의 적분 회로가 필요 없다.

3.1.2 결합회로망

물드변압기에서 부분방전은 10~20 [ns]의 상승시간을 갖는 고주파 전류펄스 형태로 발생하므로 검출임피던스와 증폭기의 입력임피던스로 구성되는 결합회로망 A_v 가 필요하며, 여기에 사용되는 RLC 소자는 시험전압 범위에서 소손이나 방전이 발생하지 않는 안정적인 소자를 사용해야 한다. 시험전압 범위에서 소자에 의한 방전이 발생하면 피시험체에서 발생하는 부분방전 펄스와 구분이 되지 않기 때문에 정확한 측정이 곤란하다.

그림 3.4의 등가회로는 결합회로망의 출력전압 $V(t)$ 와 시간에 따라 변화하는 입사전계의 세기 $\frac{dE(t)}{dt}$ 의 관계를 나타낸다.

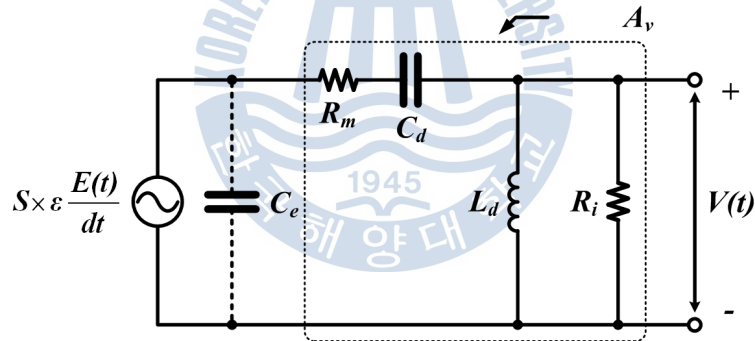


그림 3.4 결합회로망의 등가회로

Fig. 3.4 Equivalent circuit of the coupling network

프로브의 정전용량을 C_e [F], 유효 검출면적을 S [m²], 검출임피던스 R_m [Ω], C_d [F], L_d [H]와 증폭기의 입력임피던스 R_i [Ω]의 결합에 의한 합성임피던스를 A_v 라고 하면, 식 (2.32)에 의해 출력전압 $V(t)$ 는

$$V(t) = S \times Z_o \times \varepsilon \frac{dE(t)}{dt} = S \times A_v \times \varepsilon \frac{dE(t)}{dt} \quad (3.1)$$

로 구해진다. L_d 와 R_i 의 합성임피던스 Z_s 는

$$Z_s = \frac{L_d \times R_i}{L_d + R_i} = \frac{2\pi f L_d R_i}{2\pi f L_d + R_i} \quad (3.2)$$

로 구해지므로, 검출임피던스와 증폭기의 입력임피던스로 이루어진 합성 임피던스 A_v 는

$$A_v = \frac{Z_s}{R_m + Z_s - jX_c} = Z_s \left(\frac{1}{R_m + Z_s - jX_c} \right) \quad (3.3)$$

이 되고, 위 식을 $R_m + Z_s$ 로 분자, 분모를 나누면

$$A_v = \frac{Z_s}{R_m + Z_s} \left(\frac{1}{1 - j \frac{X_c}{R_m + Z_s}} \right) \quad (3.4)$$

가 된다. 여기서 $-j \frac{X_c}{R_m + Z_s}$ 는

$$-j \frac{X_c}{R_m + Z_s} = - \frac{1}{\omega(R_m + Z_s)C_d} = -j \frac{1}{2\pi f(R_m + Z_s)C_d} \quad (3.5)$$

로 나타낼 수 있다.

$$R_{Th} = R_m + Z_s \text{ 일 때, 차단주파수 } f_c = \frac{1}{2\pi R_{Th} C_d} \text{ 이므로}$$

$$-j \frac{X_c}{R_m + Z_s} = -j \frac{f_c}{f} \quad (3.6)$$

가 성립한다. 따라서 식 (3.4)는 다음과 같이

$$A_v = \frac{Z_s}{R_m + Z_s} \left\{ \frac{1}{1 - j(f_c/f)} \right\} \quad (3.7)$$

로 구해지므로, 용량성 프로브의 출력전압 $V(t)$ 는

$$V(t) = S \times \frac{Z_s}{R_m + Z_s} \left\{ \frac{1}{1 - j(f_c/f)} \right\} \times \varepsilon \frac{dE(t)}{dt} \quad (3.8)$$

로 정리할 수 있다.

상기 식 (3.7)로부터 합성임피던스로 표현된 A_v 는 검출임피던스와 증폭기의 입력임피던스로 이루어진 결합회로망으로써 상용주파수 성분을 차단하고 고주파 성분의 부분방전 펄스만을 검출하기 위한 일종의 고역통과 필터로 동작함을 알 수 있으며, 이의 일반화된 주파수 응답을 그림 3.5에 나타내었다.

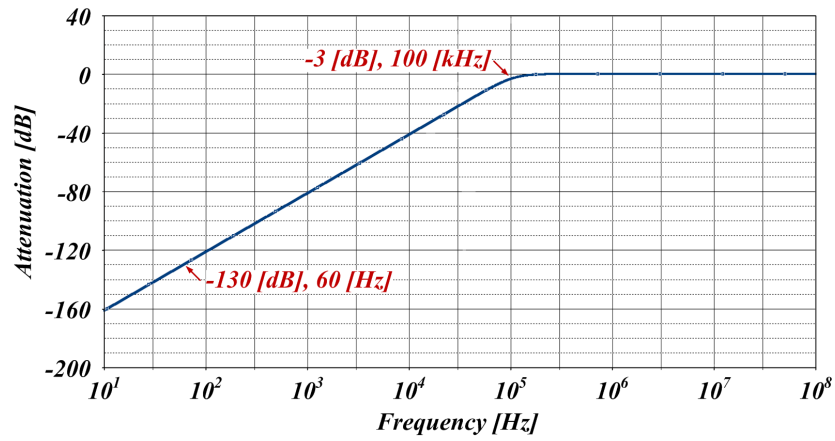


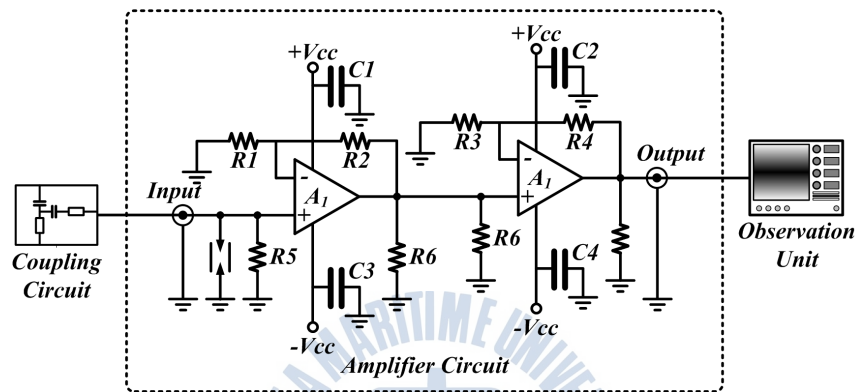
그림 3.5 결합회로망의 주파수 응답

Fig. 3.5 Frequency response of the coupling network

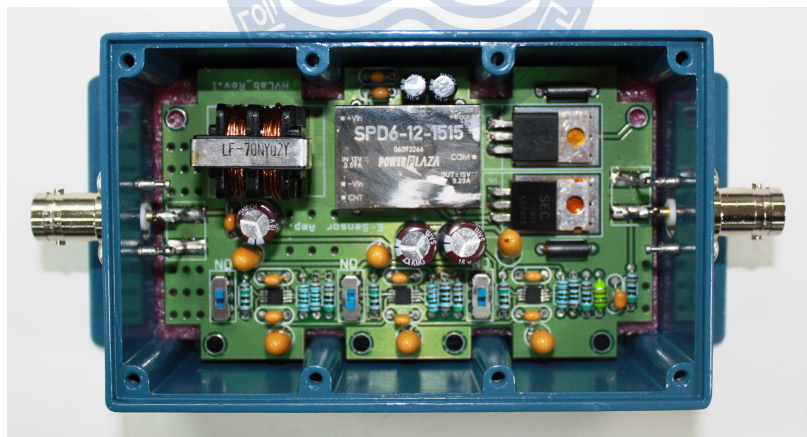
그림 3.5에서 나타난 것과 같이 결합회로망 A_v 는 변압기에서 발생하는 부분방전 펄스의 성분을 고려하여 -3 [dB]가 되는 차단주파수를 100 [kHz]로 선정함으로써 부분방전 펄스를 충분히 검출할 수 있도록 하였고, 부분방전 시험전압인 60 [Hz]의 상용주파수 성분을 130 [dB] 이상 감쇄시켜 차단하였다.

3.1.3 저잡음 증폭기

용량성 프로브에 의해 검출되는 부분방전 펄스는 매우 미소하므로 그림 3.6과 같은 저잡음 특성의 증폭기가 필요하다.



(a) 회로도



(b) 사진

그림 3.6 저잡음 증폭기

Fig. 3.6 Low noise amplifier

부분방전 펄스를 검출할 수 있는 주파수 대역을 가지며 낮은 잡음특성을 갖는 증폭기의 제작을 위해 그림 3.6와 같이 입력 off-set 전압이 3 [mV]인 증폭기를 2단으로 구성하였으며, 이득은 40 [dB]로 설계하였다.

함수발생기를 이용하여 정현파 입력에 대한 출력전압의 비로 주파수 응답을 평가하였으며 이를 그림 3.7에 나타내었다. -3 [dB]에서 주파수 대역이 500 [Hz]~45 [MHz]이므로 10~20 [ns]의 상승시간을 갖는 부분방전 펄스의 검출에 적합함을 확인하였다.

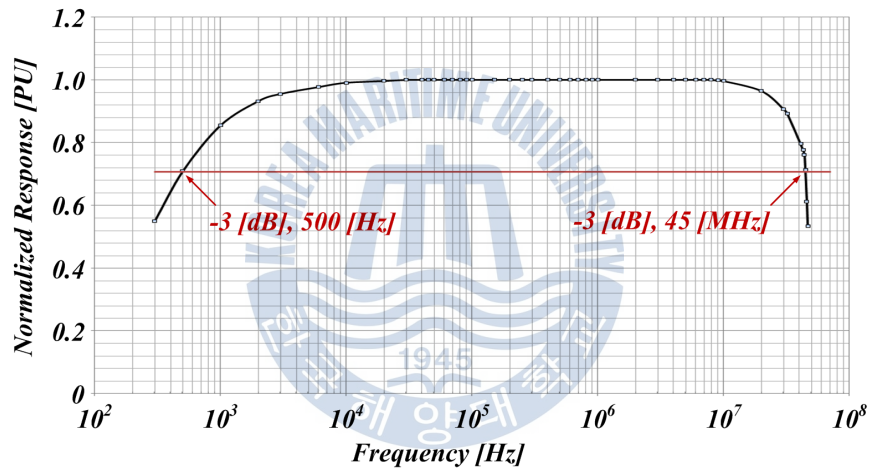


그림 3.7 증폭기의 주파수 응답

Fig. 3.7 Frequency response of the amplifier

3.2 실험방법

3.2.1 교정실험

본 연구에서 설계·제작한 부분방전 측정장치의 성능평가를 위해서는 주파수응답과 검출감도의 교정실험이 필요하므로 각각의 실험계를 구성하여 주파수에 따른 응답도와 주입전하량에 대한 출력전압의 비를 평가하였다.

부분방전 측정장치의 성능평가를 위해서는 주파수에 따른 응답도의 측정이 필요하므로 그림 3.8과 같이 실험계를 모의하였다.

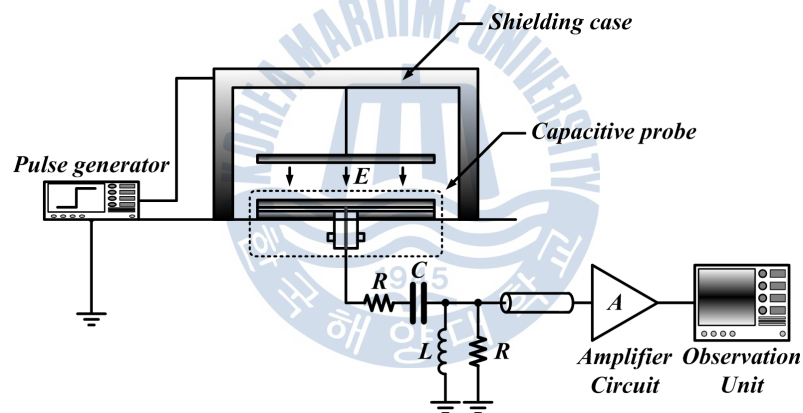


그림 3.8 주파수 응답도 실험계

Fig. 3.8 Experimental set up for frequency response

측정장치의 정확한 평가를 위해 외부노이즈에 의한 전계의 왜곡이 발생하지 않도록 그림 3.8과 같이 차폐함 내부에서 평가실험을 수행하였다. 전계 발생원으로는 주파수 대역이 1 [Hz]~100 [MHz]이고, 최대 출력전압이 20 [V]인 펄스발생기(JUNGJIN, JSG1101B)를 사용하였으며, 입력전압과

측정장치의 응답파형 관측에는 1 [GHz]의 대역폭을 가지는 오실로스코프 (YOKOGAWA, DL9140)를 사용하였다.

부분방전 측정장치의 검출감도 평가를 위해서는 교정 펄스발생기를 이용한 주입전하량에 대한 출력전압의 측정이 필요하므로 그림 3.9와 같이 실험계를 구성하였다.

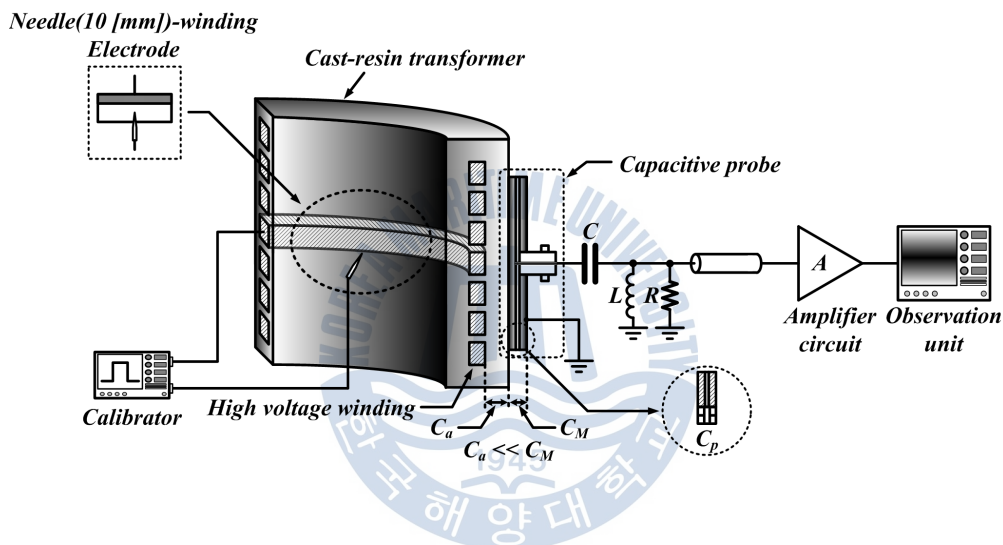


그림 3.9 감도평가 실험계

Fig. 3.9 Experimental set up for sensitivity evaluation

물드변압기 내부에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위해 곡률반경 10 [μm]의 침전극과 평판전극을 사용하여 간격 3 [mm]와 5 [mm]를 가진 평판-평판, 평판-침 전극계를 제작하였으며, IEC 60270 규격을 만족하는 표준 교정펄스발생기(Power Diagnostix, CAL1A)를 사용하여 전극계에 20~100 [pC]의 정극성 및 부극성의 교정펄스를 주입하였다.

3.2.2 위상분포와 파형

몰드변압기에서 발생 가능한 부분방전의 검출을 위해 IEC 60270에 의거한 검출법과 용량성 프로브에 의한 검출법을 동시에 적용하여 부분방전에 의한 펄스와 위상분포를 비교·분석하였다. 고전압 발생원으로서 자체방전이 발생하지 않고, 최대 5 [kV_{rms}]까지 조정 가능한 부분방전 시험용 전원장치와 AC 8 [kV]까지 방전이 발생하지 않는 결합콘덴서(Morgan, Ceramic capacitor type 07761 1 [nF])를 사용하였다.

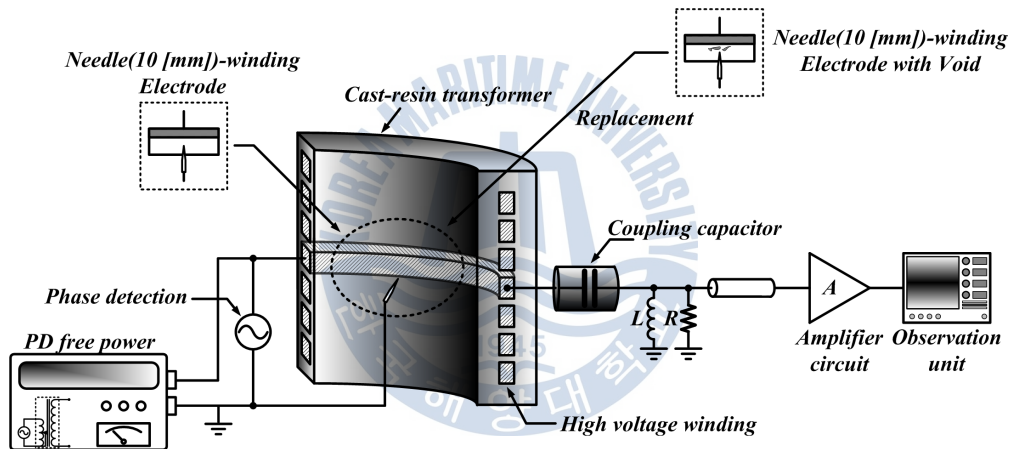


그림 3.10 IEC 60270에 의거한 실험계

Fig. 3.10 Experimental set up by the IEC 60270

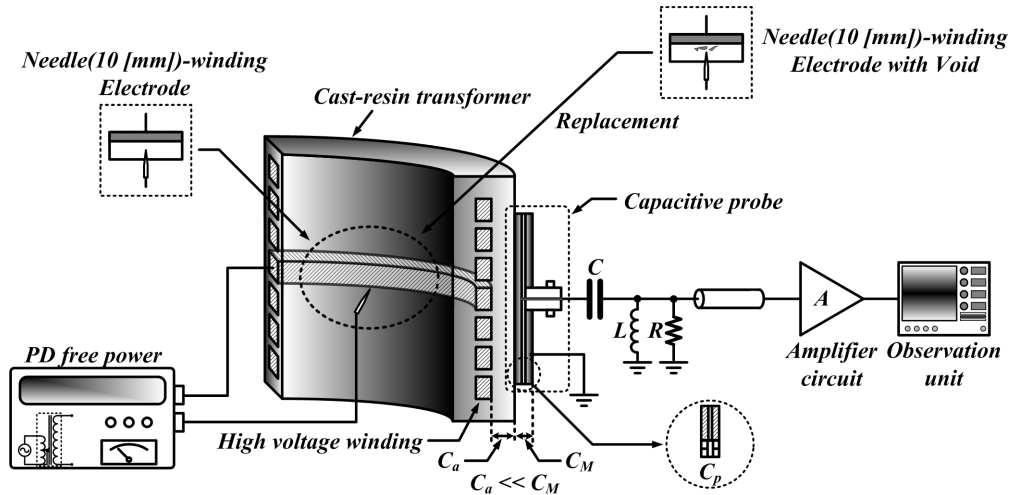


그림 3.11 용량성 프로브에 의한 실험계

Fig. 3.11 Experimental set up by the capacitive probe

3.2.3 전극계

몰드변압기의 절연열화 감시를 위해서는 결함에 따른 부분방전 특성분석이 필요하며, 이를 위해 몰드변압기의 절연물로 사용되는 난연성 에폭시 글라스 적층판(Flame retardant epoxy glass laminate)을 사용하여 그림 3.12과 3.13와 같이 평판-평판, 평판-침 전극계를 제작하였다.

그림 3.12의 (a)와 (b)같이 고압이 인가되는 전극을 다르게 함으로써, 동일 전극계에서 전압의 인가방향에 따른 부분방전 위상분포와 파형을 측정하였다. 10 [μm]의 곡률반경을 가진 침전극을 사용하여 높은 전계의 집중을 유도하였으며, 몰드변압기 내부에 있는 권선전극을 모의하기 위해 평판전극을 사용하였다.

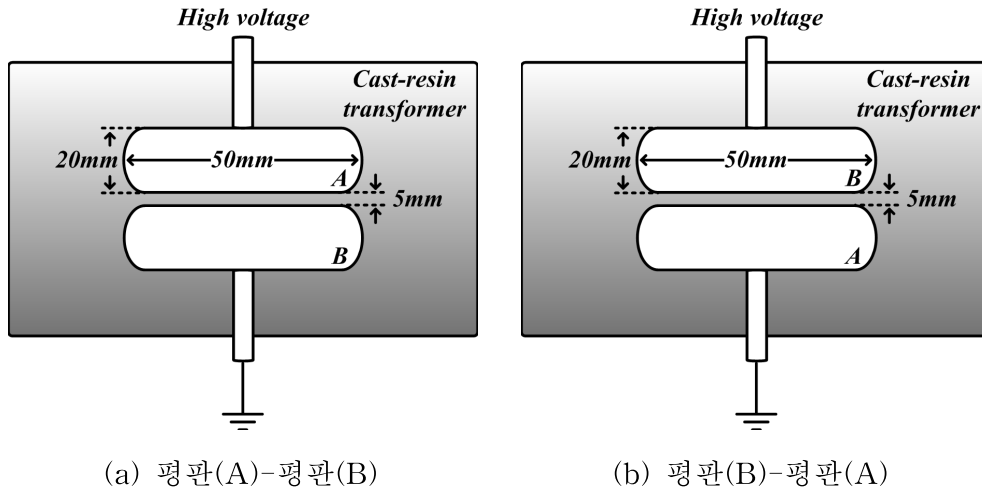


그림 3.12 평판-평판 전극계

Fig. 3.12 Planar-planar electrode

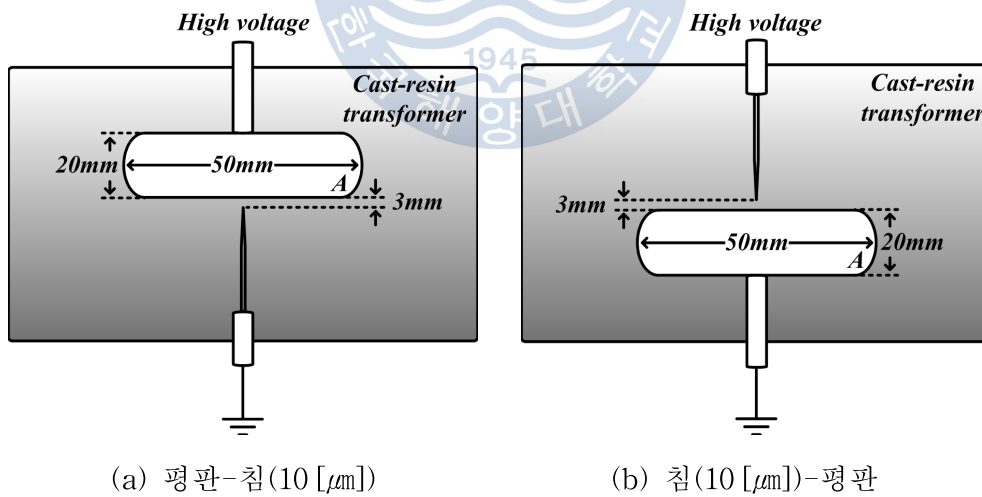


그림 3.13 평판-침(10 [μm]) 전극계

Fig. 3.13 Planar-Point(10 [μm]) electrode

제 4 장 결과 및 분석

4.1 교정실험

본 연구에서 제작한 부분방전 측정장치의 기본특성을 평가하기 위하여 펄스발생기에 의한 정현파 펄스전계를 용량성 프로브에 주입시켜 측정장치의 주파수 응답을 조사하였으며, 이를 그림 4.1에 나타내었다. 측정장치는 -3 [dB]에서의 주파수 대역이 100 [kHz]~ 45 [MHz]로서 $10\sim 20$ [ns]의 상승시간을 갖는 부분방전 펄스의 검출에 적합함을 확인하였다.

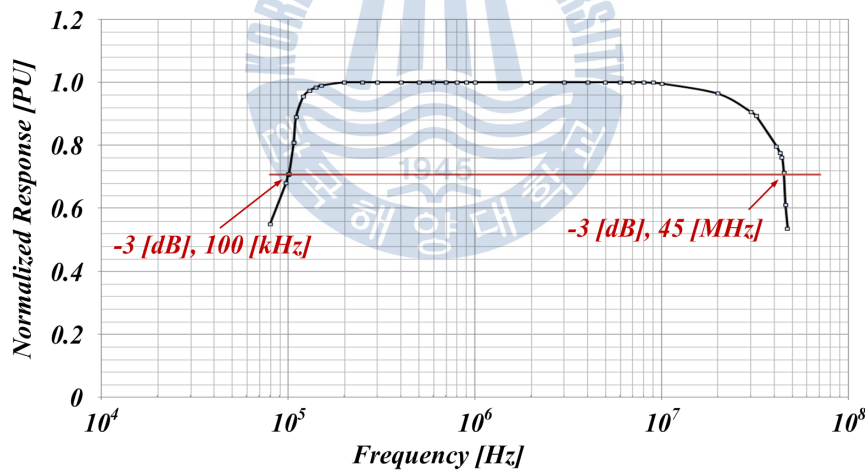
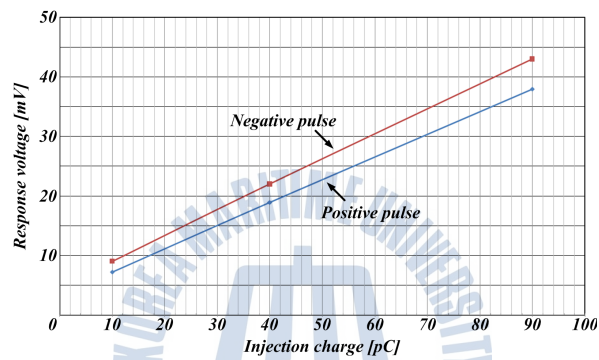


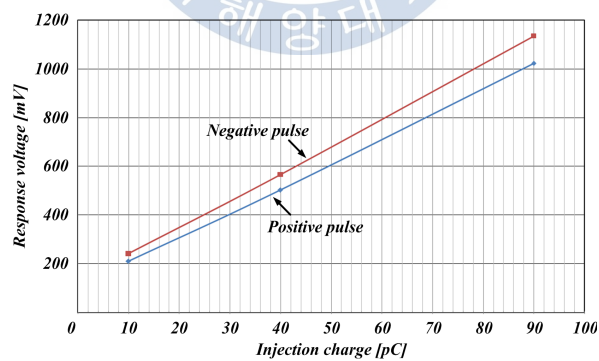
그림 4.1 측정장치의 주파수 응답

Fig. 4.1 Frequency response of the measurement device

부분방전 측정장치의 검출감도 평가를 위해서 교정 펄스발생기를 이용한 주입전하량에 대한 출력전압의 비를 측정하고, 이를 그림 4.2에 나타내었다. 몰드변압기에서 발생 가능한 결함을 모의한 전극계에 20 [pC]~100 [pC]의 정극성 및 부극성 교정펄스를 인가하여 평가하였으며, 각 각의 부분방전 측정법은 선형적인 검출감도를 나타내었다.



(a) 용량성 프로브



(a) IEC 60270

그림 4.2 측정장치의 감도

Fig. 4.2 Sensitivity of the measurement device

용량성 프로브에 의한 검출에서는 정극성에서 0.35 [mV/pC], 부극성에서 0.45 [mV/pC]의 검출감도를 나타내었으며, IEC 60270에 의거한 검출에서는 정극성에서 10.5 [mV/pC], 부극성에서 12 [mV/pC]의 검출감도를 나타내었다. 50 [pC]의 정극성 및 부극성 교정펄스를 각각의 실험계에 주입하였을 때 검출된 파형의 예를 그림 4.3에 나타내었다.

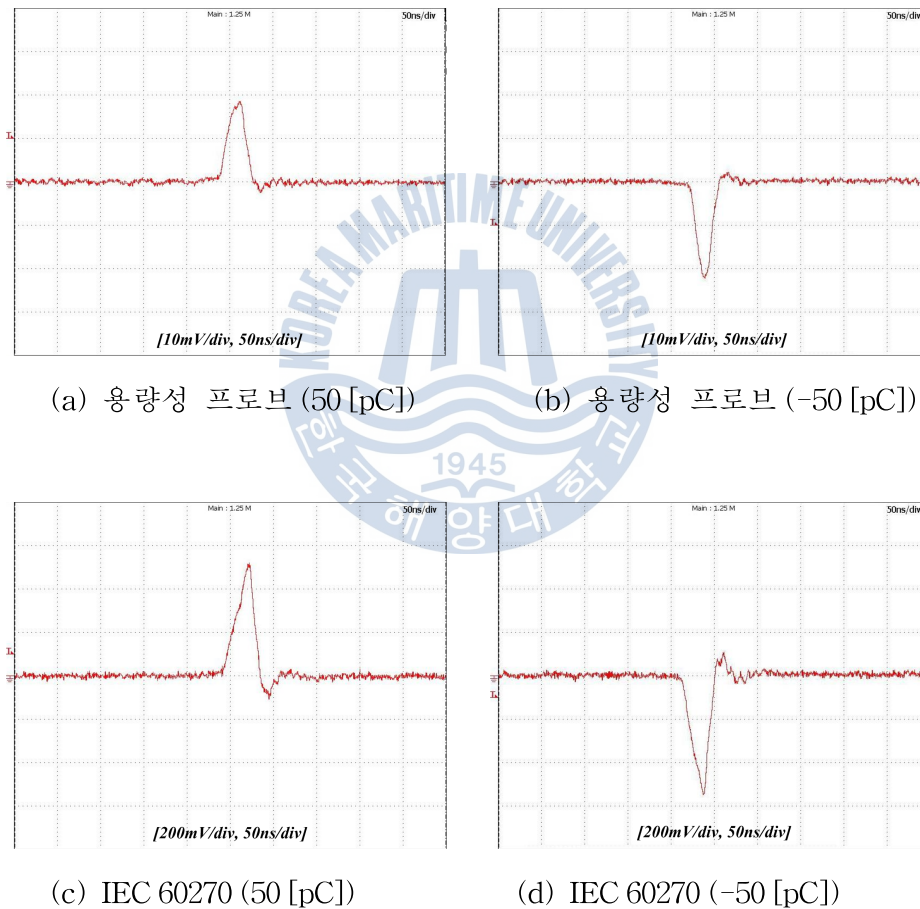


그림 4.3 주입 전하량에 대한 응답파형

Fig. 4.3 Response waveform to injection charges

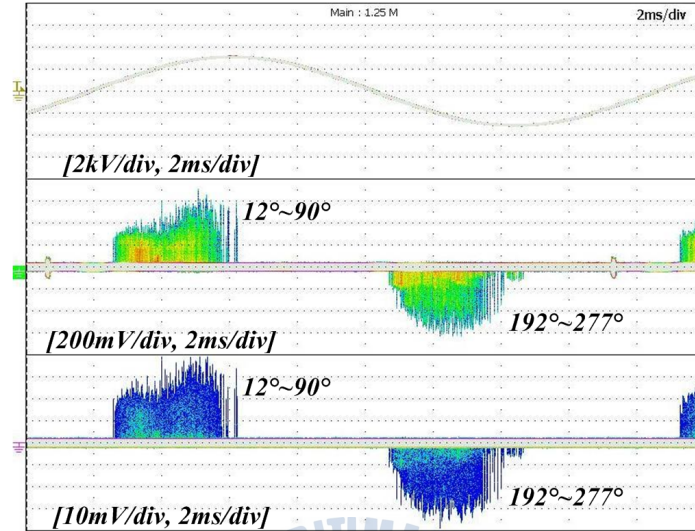
4.2 위상분포와 파형

결함형태에 따른 부분방전 펄스의 위상분포와 파형을 분석하기 위하여 그림 3.10과 그림 3.11의 실험계를 동일 결함을 대상으로 구성하였다. 실험은 동일온도 (20 [°C]), 습도 (30 [%])에서 수행하였고, 인가전원을 변화시켜가며 방전개시전압 및 방전소멸전압을 측정하였다. 각 전극계에서의 CH1은 인가전압, CH2는 IEC 60270에 의거한 검출법에서의 결과, CH3는 용량성 프로브에 의한 검출법에서의 결과를 나타낸다.

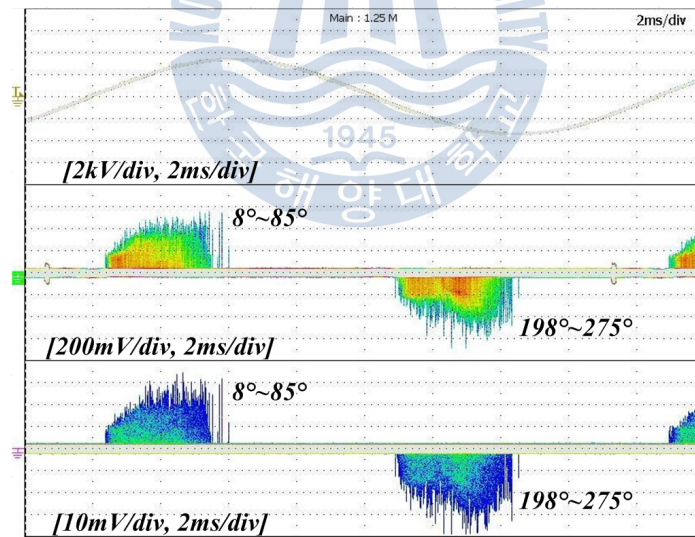
물드변압기의 절연열화를 판단함에 있어 부분방전 펄스의 위상분포는 결함의 형태를 파악할 수 있는 근거가 된다. 일반적으로 변압기의 제조과정에서 불순물이 함유되어 권선에 돌출부위나 보이드와 같은 결함이 형성되었을 경우, 결함에 대한 전계의 집중도가 높아져 낮은 인가전압에서도 방전이 쉽게 발생한다.

용량성 프로브를 이용하여 평판-평판 전극계와 평판-침 전극계에서 발생하는 부분방전을 측정하였으며, 이의 위상분포를 확인하였다. 동일 결함에 대해 IEC 60270에 의거하여 위상분포를 동시에 측정함으로써 용량성 프로브를 이용한 검출법의 부분방전 검출성능을 평가하였다.

평판-평판 전극계의 방전개시전압은 2.29 [kV], 방전소멸전압은 2.26 [kV]로 평가되었으며, 방전개시전압에서 부분방전 펄스의 위상분포를 검출하였다. 그림 3.12(a)와 같은 전극계에서는 $12^{\circ} \sim 90^{\circ}$, $192^{\circ} \sim 277^{\circ}$, 그림 3.12(b)와 같은 전극계에서는 $8^{\circ} \sim 85^{\circ}$, $198^{\circ} \sim 275^{\circ}$ 에서 부분방전이 발생하였다.



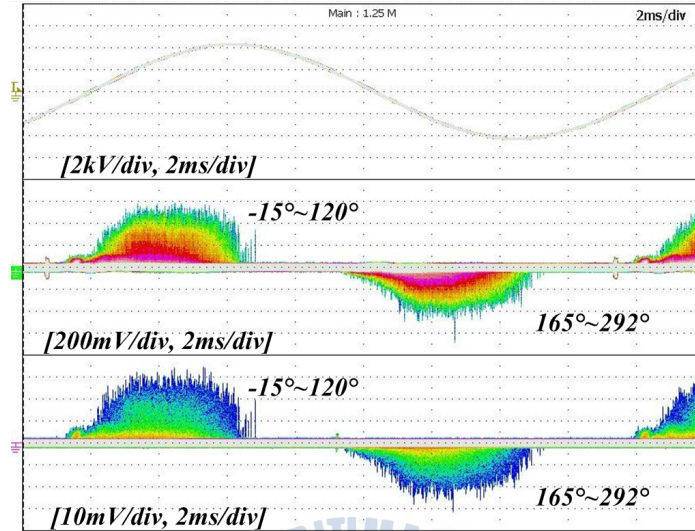
(a) 평판 (A)-평판 (B) 전극계



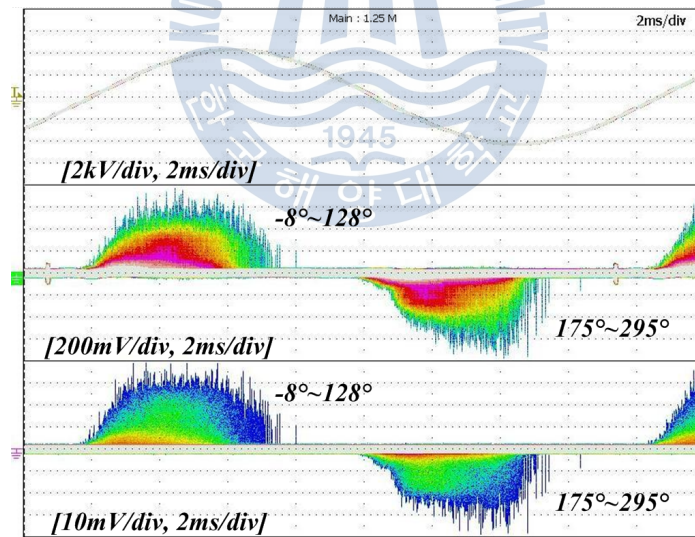
(b) 평판 (B)-평판 (A) 전극계

그림 4.4 평판-평판 전극계에서 위상분포

Fig. 4.4 Phase distribution in the planar-planar electrode



(a) 평판-침 ($10 [\mu\text{m}]$) 전극계



(b) 침 ($10 [\mu\text{m}]$)-평판 전극계

그림 4.5 평판-침 ($10 [\mu\text{m}]$) 전극계에서 위상분포

Fig. 4.5 Phase distribution in the planar-point ($10 [\mu\text{m}]$) electrode

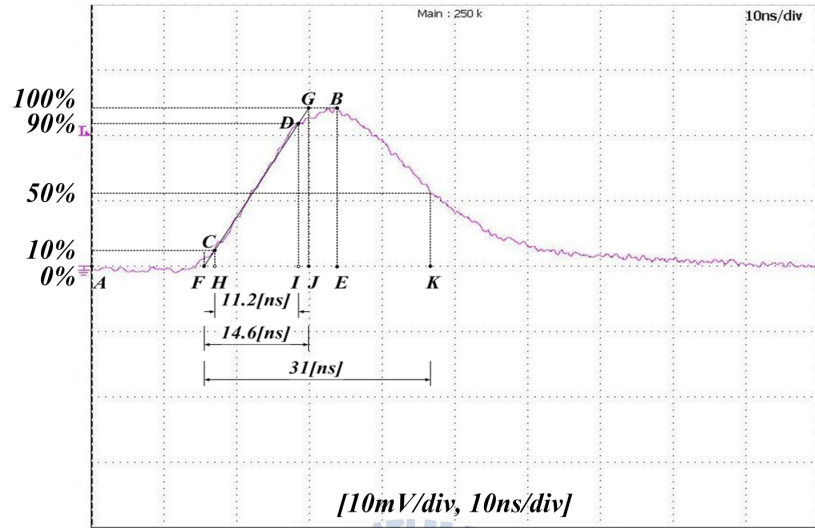
평판-침 전극계의 방전개시전압은 3.08 [kV], 방전소멸전압은 3.06 [kV]로 평가되었으며, 방전개시전압에서 부분방전의 위상분포를 검출하였다. 그림 3.13(a)와 같은 전극계에서는 $345^{\circ} \sim 120^{\circ}$, $165^{\circ} \sim 292^{\circ}$, 그림 3.13(b)와 같은 전극계에서는 $352^{\circ} \sim 128^{\circ}$, $175^{\circ} \sim 295^{\circ}$ 에서 부분방전이 발생하였다. 침($10\text{ }\mu\text{m}$)전극에 높은 전계가 집중됨에 따라 낮은 인가전압에서도 부분방전이 발생해 140° 이상의 넓은 구간에 부분방전이 분포하였다.

방전개시전압에서의 결함에 따른 부분방전 파형분석을 위해 그림 3.1과 같이 용량성 프로브를 이용한 부분방전 측정계를 구성하고 각각의 결함에 따른 방전파형을 분석하였다.

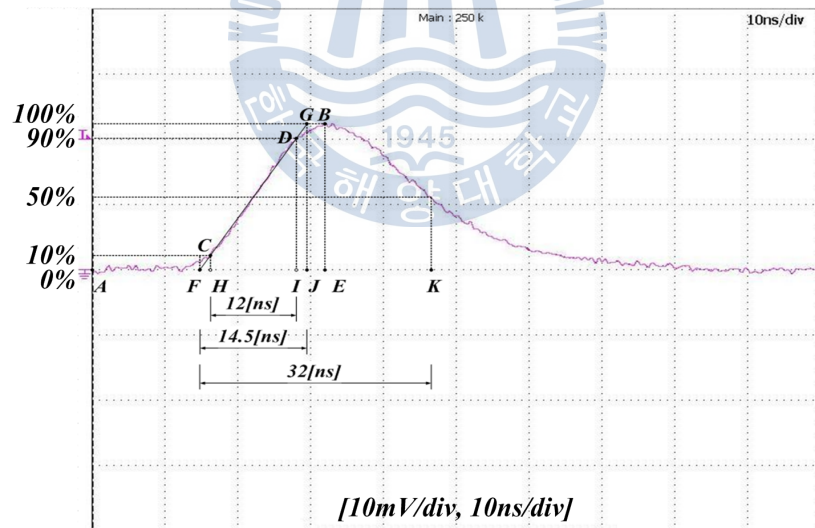
방전개시전압인 2.29 [kV]를 인가하였을 때 평판-평판 전극계에서 나타나는 부분방전 파형을 그림 4.6에 나타내었다. 그림 3.12(a)의 평판 (A)-평판 (B) 전극계에서는 파고치의 10 [%]에서부터 90 [%]까지의 상승시간이 11.2 [ns], 파두장이 14.6 [ns], 파미장이 31 [ns]로 나타났으며, 그림 3.12(b)의 평판 (B)-평판 (A) 전극계에서는 상승시간이 12 [ns], 파두장이 14.5 [ns], 파미장이 32 [ns]로 나타났다.

3.08 [kV]를 인가하였을 때 평판-침 ($10\text{ }\mu\text{m}$) 전극계에서 나타나는 부분방전 파형은 그림 4.7과 같으며, 그림 4.7(a)의 평판-침 ($10\text{ }\mu\text{m}$) 전극계에서는 파형의 상승시간이 10 [ns], 파두장이 13.5 [ns], 파미장이 27.8 [ns]로 나타났고, 그림 4.7(b)의 침 ($10\text{ }\mu\text{m}$)-평판 전극계에서는 파형의 상승시간이 11 [ns], 파두장이 14 [ns], 파미장이 27.8 [ns]로 나타났다.

파형분석을 통하여 평판-평판 전극계에서는 파미장이 30 [ns] 이상이 되고, 평판-침 ($10\text{ }\mu\text{m}$) 전극계에서는 파미장이 30 [ns] 이하로 됨을 알 수 있었다.



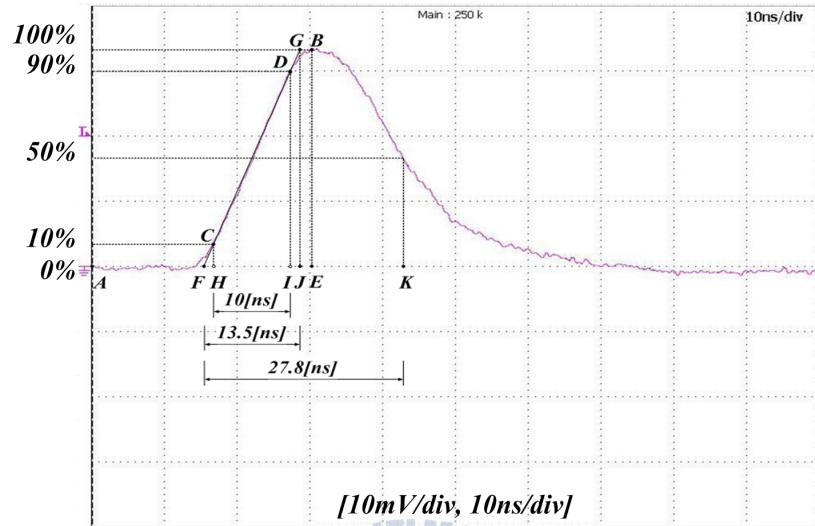
(a) 평판 (A)-평판 (B) 전극계



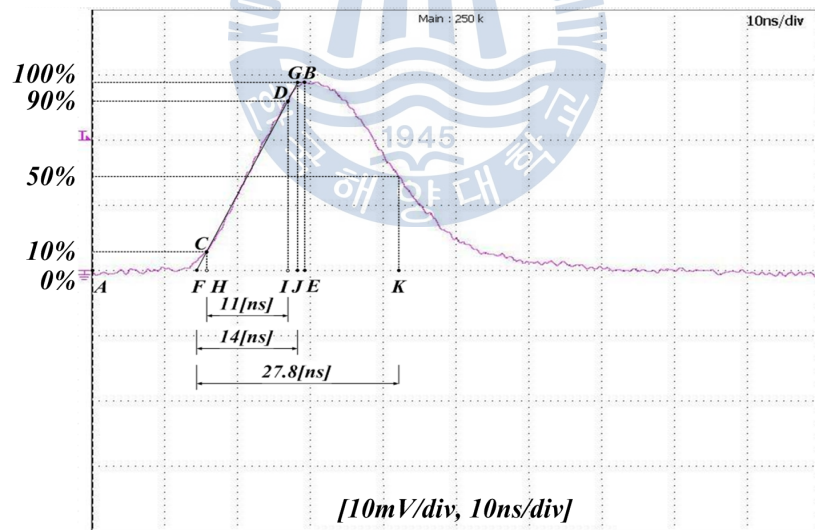
(b) 평판 (B)-평판 (A) 전극계

그림 4.6 평판-평판 전극계에서 파형의 예

Fig. 4.6 Typical waveform in the planar-planar electrode



(a) 평판-침 (10 [μm]) 전극계



(b) 침 (10 [μm])-평판 전극계

그림 4.7 평판-침 (10 [μm]) 전극계에서 파형의 예

Fig. 4.7 Typical waveform in the planar-point (10 [μm]) electrode

제 5 장 결 론

본 논문에서는 특고압 몰드변압기의 절연진단을 위한 비접촉 방식의 부분방전 측정장치에 대하여 연구하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 몰드변압기 표면에 설치할 수 있는 용량성 전계 프로브를 적용함으로써 고전압 도체와의 비접촉방식으로 변압기에서의 부분방전 검출이 가능하였다.
2. 제안한 부분방전 측정장치는 몰드변압기의 사용온도와 형태를 고려하여 제작됨에 따라 변압기에 구조 변경 없이 적용할 수 있고, 별도의 계측기를 필요로 하지 않으며, 비접촉식이므로 절연에 대한 문제가 없다.
3. 주파수 대역이 100 [kHz]~45 [MHz]인 광대역의 검출장치를 제작함에 따라 부분방전펄스를 정확하게 측정할 수 있도록 하였으며, 상용주파수 전원성분으로 인한 잡음의 영향을 제거하였다.
4. 교정실험에 의해 선형적 출력특성을 가지는 것을 확인하였고, IEC 60270에 의거한 검출법과의 비교를 통해 부분방전 측정장치로서의 충분한 성능을 확인하였다.

상기 결과들로부터 본 논문에서 제안한 부분방전 측정장치는 몰드변압기의 절연진단과 분석에 활용될 수 있을 것이라 사료되며, 향후 부분방전 측정의 안정성과 신뢰성 확보를 위하여 현장에서 발생할 수 있는 여러 가지 환경적 요인을 고려한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] S. Tenbohlen, D. Uhde, and J. Poittevin, CIGRE Session 2000 (CIGRE, Paris) paper 12-204, 2000.
- [2] P. Agoris, P. Cichecki, S. Meijer, E. Gulski, and J. J. Smit, Proc. 15th Int. Symp. High Volt. Eng. (ISH, Ljubljana, Slovenia) Paper T7-737, 2007.
- [3] T. Leibfried and K. Feser, IEEE Int. Symp. Electr. Insul. (IEEE, Montreal) p. 34, 1996.
- [4] G. C. Stone, "Partial Discharge - Part VII : Practical Techniques for Measuring PD in Operating Equipment", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, NO. 4, pp.9-19, 1991.
- [5] S. Tenbohlen, D. Uhde, and J. Poittevin, "Enhanced Diagnosis of Power Transformers using On- and Off-line Methods : Results, Examples and Future Trends", CIGRE Paris, No. 12-204, 2000.
- [6] T. Leibfried and K. Feser, "Off-line- and On-line-Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, pp.34-37, 1996.
- [7] J. P. van Bolhuis, E. Gulski, J. J. Smit, "On-line detection, requirements for practical use, Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7-10, 2002.
- [8] Martin D. Judd, Li Yang, Ian B. B. Hunter, Partial discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensor Part 1 :

Sensors and Signal Interpretation IEEE electrical Insulation Magazine, March/April Vol. 21, No. 2, 2005

- [9] G. J. Pukel, M. Muhr, W. Lick, "Transformer diagnostics : Common used and new methods", International Conference on condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2006, Changwon, Korea, April 2006.
- [10] Wang Caixiong, "Field Application of Partial Discharge Detection Technology Based on UHF and Broadband Pulse Current Method", CMD 2010, Tokyo, Japan, September 2010.
- [11] 李福熙, "高電壓大電流工學", 清文閣, pp91-94, 2003.
- [12] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment", Butterworth, pp.129-152, 1989.
- [13] T. Aschwanden, M. Hassig, J. Fuhr, et al., "Development and Application of New Condition Assessment Methods for Power Transformers", CIGRE Paris, No. 12-207, 1998.
- [14] STD. IEC 60270, "High-voltage test techniques-Partial discharge measurements", 2000.
- [15] M S Naidu, V Kamaraju, "High Voltage Engineering Fourth Edition", pp.1-181, 2009.
- [16] A. Schwab, and J. Pagel, "Precision Capacitive Voltage Divider for Impulse Voltage Measurement", IEEE Trans, PES Vol. 91, pp.2376-2382, 1972
- [17] 吉喆碩, "過渡過의 高精度 計測에 關한 研究", 1996.
- [18] V. Fister and H. J. Koster, "Condenser busings as capacitive high voltage dividers for measuring of overvoltages in 420 kV

- substation", 4th International Symposium on High Voltage Engineering(ISH), No. 61.01, 1983.
- [19] John D. Kraus, "Electromagnetics", McGraw-Hill International Editions, pp. 392-412, 612-715, 1988.
- [20] William H. Hayt, "Engineering Electromagnetics", pp.231-263, 1990.
- [21] R. H. Mcknight, "Measuring Fast-Rise Impulses by use of E-dot sensor" 5th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), No. 32.07, Aug. 1987.
- [22] R. Liao, et al., "Development of a Transient Voltage Measuring System". the 8th ISH No. 54.16, pp.141-144, Aug. 1993.
- [23] J. Meppelink, P. Hoper, "Design and Calibration of a High Voltage Divider for Measurement of Very Fast Transients in Gas Insulated Switchgear", the 5th ISH No. 71.08, pp.1-4, Aug. 1987.
- [24] Mazen Abdel-Salam, Hussein Anis, Ahdab EI-Morshedy, Roshdy Radwan, High-Voltage Engineering Theory and Practice Second Edition, pp. 235-280, 2000.