

工學碩士 學位論文

저압용 유도전동기에서 미소부분방전
측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of Small Partial Discharges
in Low-voltage Induction Motors

指導教授 吉 暻 碩

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

徐 煌 東

本 論 文 을 徐 煌 東 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 李 成 根 ㉠

委 員 : 吉 暻 碩 ㉠

委 員 : 徐 東 煥 ㉠

2005年 12月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 氣 電 子 工 學 科

徐 煌 東

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	2
제 2 장 이 론	4
2.1 절연열화기구 및 평가기술	4
2.2 부분방전의 발생	6
2.3 부분방전의 검출	12
제 3 장 설계 및 제작	17
3.1 검출회로	17
3.1.1 결합회로망	18
3.1.2 증폭회로	20
3.2 잡음 대책	22
3.3 측정시스템 구성	26

제 4 장 실험 및 고찰	28
4.1 측정시스템 평가	28
4.2 유도전동기에서 부분방전 측정	33
제 5 장 결 론	51
참 고 문 헌	53

그림 목차

그림 2.1	부분방전의 등가회로	7
그림 2.2	연면방전의 발생	7
그림 2.3	부분방전의 반복발생	8
그림 2.4	방전개시전압 이하에서의 방전 발생	10
그림 2.5	비대칭 보이드에서 부분방전의 발생	11
그림 2.6	부분방전검출의 기본회로	12
그림 2.7	직접검출	14
그림 2.8	평형검출	15
그림 3.1	부분방전 검출회로	17
그림 3.2	결합회로망의 구성	19
그림 3.3	결합회로망의 주파수 응답	20
그림 3.4	증폭회로	21
그림 3.5	검출회로의 주파수 특성	22
그림 3.6	전원공급부의 구성	23
그림 3.7	고전압 필터의 주파수 응답	24
그림 3.8	차폐함의 개략도	25
그림 3.9	부분방전 측정시스템	27
그림 4.1	잡음 레벨 평가	30
그림 4.2	외부방전의 측정	31
그림 4.3	교정펄스-응답전압의 관계(1 ϕ 0.5 HP)	34
그림 4.4	교정펄스에 대한 응답 파형(1 ϕ 0.5 HP)	35
그림 4.5	부분방전 파형과 FFT 분석(1 ϕ 0.5 HP)	36

그림 4.6	부분방전 파형의 예(1 ϕ 0.5 HP)	37
그림 4.7	교정펄스-응답전압의 관계(3 ϕ 0.5 HP)	38
그림 4.8	교정펄스에 대한 응답 파형(3 ϕ 0.5 HP)	39
그림 4.9	부분방전 파형과 FFT 분석(3 ϕ 0.5 HP)	40
그림 4.10	부분방전 파형의 예(3 ϕ 0.5 HP)	41
그림 4.11	교정펄스-응답전압의 관계(3 ϕ 1 HP)	42
그림 4.12	교정펄스에 대한 응답 파형(3 ϕ 1 HP)	43
그림 4.13	부분방전 파형과 FFT 분석(3 ϕ 1 HP)	44
그림 4.14	부분방전 파형의 예(3 ϕ 1 HP)	45
그림 4.15	교정펄스-응답전압의 관계(3 ϕ 5 HP)	46
그림 4.16	교정펄스에 대한 응답 파형(3 ϕ 5 HP)	47
그림 4.17	부분방전 파형과 FFT 분석(3 ϕ 5 HP)	48
그림 4.18	부분방전 파형의 예(3 ϕ 5 HP)	49
그림 4.19	교정실험결과	50

A Study on the Measurement of Small Partial Discharges in Low-voltage Induction Motors

by Hwang-Dong, Seo

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

Abstract

This thesis deals with a partial discharge (PD) measurement techniques to apply a PD test to low-voltage induction motors as a part of quality assurance. The objective of this study is to develop a PD measurement system, which can detect charge below 1 PC, to prevent insulation degradation of the test sample from the test voltage.

PD pulses are obtained by a straight detection principle considering the wide use in fields. The fabricated PD measurement system is composed of a coupling network with a discharge free capacitor and a

detection impedance, a low-noise amplifier, and an associated electronics. The low cutoff frequency of the detection circuit is set at 1 MHz(-3 dB) to attenuate AC voltage by 270 dB and to pass discharge pulses only without any distortion.

A shielding enclosure of Ni-Cu double structure and a high voltage filter having a high cutoff frequency of 3.5 kHz were designed to get a better measurement condition against radiation and conduction noises from outside. The PD measurement system was tested to noise interference and the peak noise level appeared $3 \text{ mV}_{\text{p-p}}$.

Calibrations of the PD measurement system were carried out according to the IEC 60270 and the calculated sensitivities by a standard calibrator on low-voltage induction motors were 22.3 mV/pC for 1ϕ 0.5 HP and 11.4 mV/pC for 3ϕ 5 HP, respectively. Also, the sensitivity to the positive and negative polarity pulses were same in ranges from 1 pC to 50 pC.

In the PD test on the motors, it was confirmed that the polarity of PD pulses changes depending on the shape of a void or a interface, and an apparent charge of 0.7 pC was measured at AC $664 \text{ V}_{\text{peak}}$.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

유도전동기는 전기적 에너지를 효과적으로 물리적 에너지로 변환하는 장치로서 산업설비 중 동력원으로 가장 많이 사용되고 있다. 현재 일반적으로 사용되는 유도전동기는 사용 전압에 따라 600 V급 이하의 저압용 유도전동기와 3,300 V급 이상의 고압용 유도전동기로 분류되며 이 중에서 600 V급 이하의 저압용 유도전동기는 엘리베이터, 주차설비, 반도체 제조설비 및 의료기기 등 인명에 대한 절대적인 안정성과 고신뢰성 보장이 요구되는 핵심 산업전기설비로서 매우 중요한 대상이라 할 수 있다^{[1],[2]}.

현재는 마이크로프로세서와 디지털제어기법의 도입, 전력용 반도체 소자의 진보에 따른 전력전자 기술의 발전으로 각종 산업설비에 유도전동기가 변속 제어시스템의 응용분야가 크게 확대되고 있다. 그러나 유도전동기의 가변속 구동용 인버터는 FET(Field Effect Transistor)와 IGBT(Insulated Gate Bi-polar Transistor)등 빠른 스위칭 속도를 가진 소자를 사용함에 따라 μs 당 최고 수 천 V의 과도전압을 발생한다. 저압용 유도전동기에서 과도전압은 절연재료의 조기열화를 초래하고 전동기의 권선에 불규칙한 전압분포를 야기시켜 절연파괴 사고를 발생하게 되어 사회적·경제적으로 큰 손실을 유발하게 된다. 이러한 절연파괴 사고를 방지하고, 최적의 유지·보수에 의한 경제적 전기설비의 운용을 위해서는 저압용 유도전동기에 대한 정확한 절연진단이 수행되어야 하며, 초기 생산단계에서부터 절연성능 평가가 이루어져야 한다^{[3]~[6]}.

그러나 지금까지 유도전동기에 대한 절연진단, 평가기술 및 절연파괴사

고에 대한 대책은 주로 고압용 유도전동기를 대상으로 한 것이 대부분이다. 특히 절연파괴사고 대책으로는 절연물을 대체 보강하거나 스위칭 서지를 저감시키는 필터의 설치가 필수적으로 인식되고 있다. 하지만 추가적인 비용이 요구되는 이러한 대책보다는 생산단계 초기에 품질관리를 강화하여 불량품의 출고를 차단하는 방식이 선호되고 있다. 그러나 품질관리 측면에서 적용하고 있는 절연파괴 시험이나, 내전압 시험 등은 유도전동기의 절연상태에 직접적인 영향을 주는 충격시험법으로서 보다 신뢰성 있는 절연 및 수명 평가가 요구된다^{[7]~[10]}.

이러한 이유에서 부분방전측정 기술은 비파괴 시험으로서 저압용 유도전동기의 절연성능에 영향을 주지 않으면서도 효과적인 품질관리가 가능하다. 부분방전은 일반적으로 절연체 내부의 미소결함 또는 절연체 표면에서 스위칭 서지나 과도전압과 같은 전기적 스트레스에 의해 전계가 집중되는 곳에서 발생하여 절연체에 치명적인 절연고장을 유발한다. 부분방전은 수 ns 이하의 상승시간을 갖는 방전펄스가 발생하는 현상이기 때문에 펄스가 경유하는 매질, 절연시스템, 유도전동기의 구조, 계측기 및 측정회로 특성과 주변잡음에 의해 영향을 받기 쉬우며, 방전펄스파형의 왜곡 등으로 복잡하게 나타난다^{[10]~[14]}. 따라서 이들에 대해 충분히 고려하여 부분방전 측정시스템을 설계·제작하였으며, 저압용 유도전동기에서 발생하는 미소 부분방전을 측정·분석하였다.

1.2 연구목적 및 내용

본 연구의 목적은 1 pC이하의 미소부분방전 측정기법 개발로서 부분방전발생 메커니즘 및 특성을 분석하고 시험대상 시료에 영향을 주지 않는 측정시스템을 설계·제작하여 저압용 유도전동기에서 발생하는 부분방전펄스를 측정하고자 한다.

제안한 부분방전 측정시스템은 결합콘덴서와 검출임피던스의 조합으로 광대역 주파수 범위를 갖는 결합회로망과 저잡음 증폭회로로 구성되며, 부분방전 측정시 외부 잡음에 대한 영향을 최소화하기 위해 모든 회로는 차폐함내에 설치하였다.

정확한 부분방전 신호 검출을 위해서는 잡음 신호에 대한 평가가 선행되어야 하는데 이를 위하여 잡음 발생 및 원인에 대한 분석을 수행하고, 잡음신호에 대한 크기 및 주파수 분포에 대한 평가를 통해 잡음의 영향을 최소화 하였다.

최종적으로 구성된 부분방전 측정시스템에 대한 기본특성을 평가하였으며, 단상 0.5마력 및 3상 0.5마력, 1마력, 5마력의 저압용 유도전동기를 대상으로 적용실험을 수행하였다. 각 유도전동기에 대한 교정실험 결과로부터 얻어진 검출감도는 단상 0.5 마력 유도전동기에서 22.3 mV/pC, 3상 5마력 유도전동기에서는 11.4 mV/pC이었으며, 1~50 pC의 교정펄스에 대해서는 전 구간에서 선형적으로 나타났다. 교류 시험전압을 인가하는 부분방전 시험에서는 3상 5 마력 유도전동기의 경우 664 V_{peak}에서 0.7 pC을 검출하였으며, 다른 유도전동기에 대해서도 1 pC 이하의 미소부분방전을 측정하였다. 본 연구에서 제안한 부분방전 측정시스템은 잡음레벨을 고려할 경우 최소 0.5 pC의 미소부분방전 측정이 가능하다.

제 2 장 이 론

2.1 절연열화기구 및 평가기술

(1) 절연열화기구

유도전동기는 각종 스트레스에 의해 절연체 내부에서 유기질 성분의 분자구조가 변하고 절연층 자체에 기포나 균열이 발생하는 등 본래의 절연 성능을 저하시키는 절연열화 현상이 발생한다. 유도전동기는 사용조건이나 사용환경 및 절연의 구성이 다양해서, 열화특성 및 발생에 대한 복잡한 특성을 가진다. 그 중에서도 유도전동기의 코일절연은 열화에 의해 수명이 한정되며 축수와 아울러 손상부위의 대표적인 부분이다.

유도전동기의 코일절연을 구성하고 있는 각각의 재료는 물리적, 화학적 스트레스를 받으면 초기의 성능이 시간의 흐름에 따라 저하되는 소위 열화현상을 일으킨다. 코일절연의 경우는 복합적인 절연구성을 형성하고 있어 절연열화와 구성재료의 종류에 의해 각각 다르게 나타나며 그 결과 코일절연의 수명에 큰 폭의 차이가 생긴다. 유도전동기에서 절연열화에 따른 사고의 대부분은 고정자 권선 및 대지절연의 손상과 지락에 의해 발생한다. 내부권선이나 코일 말단부에 있어서 층간절연이 손상되고 이어서 대지절연파괴로 파급되어 지락사고로 발생하는 경우가 대부분이며, 또한 고정재의 열화에 의해 코일이 기계적 진동을 받아 지락된다.

유도전동기의 절연열화 현상은 다양하지만 열화 요인을 분류하면 운전 중 권선의 발열에 의한 열적 열화, 절연재료의 절연내력이 정격전압 혹은 과도전압에 의해 약화되는 전기적 열화, 유도전동기 운전중 과도한

진동 및 급격한 부하변동에 인한 기계적 열화, 사용 환경에 따른 수분이나 먼지 등에 의한 환경적 열화 등으로 분류할 수 있으며 열화는 이러한 요인이 복합적으로 작용한다^{[15]~[20]}.

(2) 평가기술

유도전동기의 절연을 평가할 경우에 측정치만으로 판정을 내리는 것은 곤란하며, 구조, 재료, 처리법 등에 대해서도 이해가 필요하다. 전동기의 절연은 전압 측면에서 층간절연, 상간절연, 대지절연으로 구분할 수 있으며, 구조적 측면에서 보편 슬롯부절연, 코일말단부절연, 접속부 및 리드절연으로 나눈다. 이들 중 어느 한 부분의 절연 기능이 상실되면 전동기의 절연과괴사고로 직결되는 점에서는 똑같이 중요하다.

현재까지 알려진 유도전동기 절연평가기술에는 절연저항 측정값으로 절연물의 흡습이나 오손상태를 파악하는 절연저항시험, 절연물에 전압을 인가하여 전류-시간 특성으로부터 절연물의 상태를 판정하는 직류전류시험과 교류전류시험이 있으며, 누설전류 측정에 의한 $\tan\delta$ 로부터 절연 상태 및 열화정도를 추정하는 유전정접시험과 품질관리 측면에서 적용하고 있는 절연과괴시험이나 내전압시험 및 절연 시스템 내부의 보이드, 전기트리, 표면에서 발생하는 부분방전을 측정하는 부분방전시험 등을 통해 유도전동기의 절연 진단 및 평가를 실시하고 있다.

이 중에서 부분방전 시험법은 열화에 의한 크랙이나 박리등의 공극이 발생되거나 진진 상황을 파악하여 열화의 진행과 열화원인으로서 부분방전의 정도를 파악하며 수명에 미치는 영향을 추정한다. 또한 비과괴 시험으로서 시험시료의 절연성능에 아무런 영향을 주지 않아 효과적인 절연평가가 가능하다^{[21]~[23]}.

2.2 부분방전의 발생

부분방전 시험법은 방전펄스를 직접 계측하기 때문에 신뢰성 있는 정확한 측정 및 국부적인 방전의 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 부분방전 펄스는 매우 복잡하고 다양한 형태로 발생하기 때문에 부분방전 발생 메커니즘 및 특성을 파악하고 그것을 기본으로 유도전동기에서 발생하는 부분방전에 대하여 검토하여야 한다.

유도전동기의 절연은 기본적으로 필름이나 섬유제품으로 보강한 마야기를 여러겹으로 감고 필요한 내열성이나 기계적 특성 등을 갖춘 바니쉬로 처리한 다음 가열 경화시켜 구성된다. 그러나 절연층에 공극이나 미소 결함이 존재하면 부분방전이 발생하게 된다. 부분방전은 절연재료 내부의 보이드 및 전계가 집중되기 쉬운 도체 주위에서 발생하며, 열화진전이 빠른 유기물질, 결합재, 합성어나멜 등에서 시작하여 마이카와 석면 같은 무기재료로 진전되어 결국 절연파괴에 이른다^{[24]~[26]}.

이러한 부분방전의 발생 메커니즘은 그림 2.1의 a-b-c 회로를 사용하여 설명할 수 있다. 그림 2.1에서 영역 I은 절연체에 결함이 존재하는 부분이며, II 영역은 절연체의 전체부분으로 나타낼 수 있다. 결함부분에서 보이드의 정전용량은 c 로 표현되며 이것은 절연파괴 통로로써 작용하게 된다. b 는 보이드와 직렬로 접속되는 나머지 부분의 정전용량이고, a 는 정상적인 부분의 정전용량 값을 나타낸다.

그림 2.2는 연면방전(surface discharge)의 예를 나타낸 것으로 동일하게 표현되며, 표면에서 발생하는 방전은 전극의 정전용량 c 와 절연체를 통한 정전용량 b 로 되어있다. 그리고 절연체의 나머지 부분은 정전용량 a 로 표현된다. 그림 2.1과 같이 전극간의 절연물내에 보이드와 같은 결함이 존재하면, 인가전압의 상승과 더불어 보이드 양단 사이의 전압도 상승하고 보이드의 정전용량 c 에 전계가 집중적으로 가해져 공기의 절연내력 이상이 되면 보이드에서 방전이 발생한다.

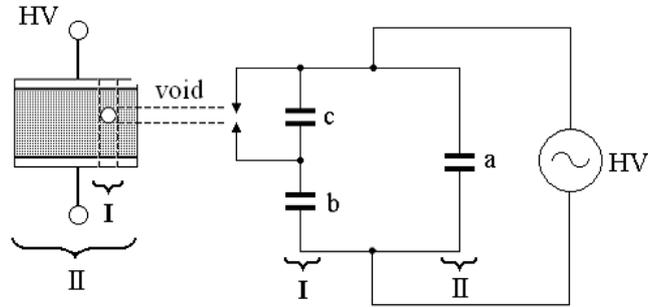


그림 2.1 부분방전의 등가회로
 Fig. 2.1 Equivalent circuit of a partial discharge in a void.

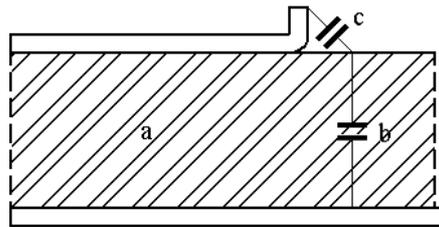


그림 2.2 연면방전의 발생
 Fig. 2.2 Occurrence of a surface discharge.

일반적으로 알려진 부분방전 펄스의 형태는 그림 2.3과 같이 반복적으로 발생하게 된다. 인가전압이 상승하는 부분에서 일정 시점에 도달할 때 방전 펄스가 발생되며 전압이 감소하면 사라지는 형태를 가지게 된다. 여기서 V_a 는 절연체 양단에 인가된 전압이며, V_c 는 보이드 양단의 전압이다. 보이드에서 방전은 V_c 가 절연과피전압 U^* 에 도달했을 때 발생하게 되고 방전은 시료 리드선에서 전류 임펄스를 초래하게 된다. 방전 발생후 보이드의 전압은 다시 증가하게 되고, 보이드의 전압이 다시 U^* 에 도달했을 때, 새로운 방전이 발생하게 되는 이러한 과정을 반복하게 된다.

이러한 반복 과정에서, 새로운 방전 발생전에 V_a 가 감소하면 V_c 는 U^- 로 떨어지게 된다.

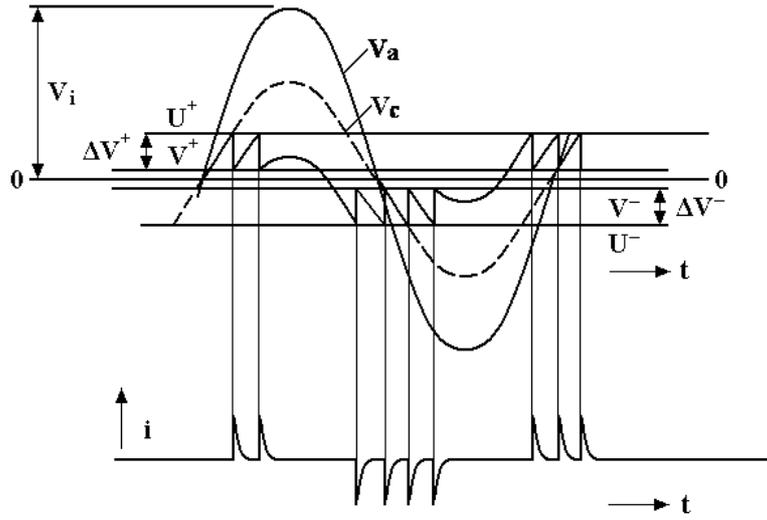


그림 2.3 부분방전의 반복발생
Fig. 2.3 Recurrence of partial discharges

그림 2.3과 같은 방전 파형에서 방전전하량과 방전에너지의 관계에 대하여 살펴보면, 보이드 내에서 발생하는 방전전하량 q_i 은 식 (2.1)과 같이 표현된다.

$$q_i \approx (b + c) \Delta V \quad (2.1)$$

여기서, $\Delta V = U - V$ 로 보이드내의 전압강하분이다.

그러나 q_i 은 직접 검출이 불가능한 값이므로 방전 발생시 리드선을 통해 흐르는 방전전하를 측정함으로써 방전의 크기를 정의한다.

이때 방전전하량 q 는

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

와 같이 표현할 수 있다.

실제 시료에서의 전압강하는 $(b\Delta V)/(a+b)$ 이고, 방전 검출기에서는 q 의 값이 측정된다. 방전전하량 q 가 존재할 때, 이때의 방전 에너지는

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} c(U^2 - V^2) \\ &= \frac{1}{2} c \times \Delta V \times (U + V) \end{aligned} \quad (2.3)$$

가 되는데, 여기서 V 는 U 에 비하여 약 10% 정도로 작기 때문에 식 (2.3)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

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

그리고, 방전개시전압은 $U = \frac{b}{(b+c)} V_i$ 와 같이 표현되는데 여기서, V_i 는 시료에서 방전이 발생하는 외부 방전개시전압이다. 그러므로 식 (2.4)는 아래와 같이 다시 정리할 수 있다.

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

식 (2.5)에서 b 는 c 와 비교하여 아주 작은 값이므로

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

와 같이 정리된다.

절연체의 보이드나 결함부분에서 일단 방전 발생이 시작되면, 보이드에 인가된 전압이 방전개시전압보다 낮은 전압에서 방전이 존속될 수 있는데 이를 그림 2.4에 나타내었다. 이론적으로 방전개시전압의 절반이하의 낮은 전압에서 방전을 초래할 수 있다.

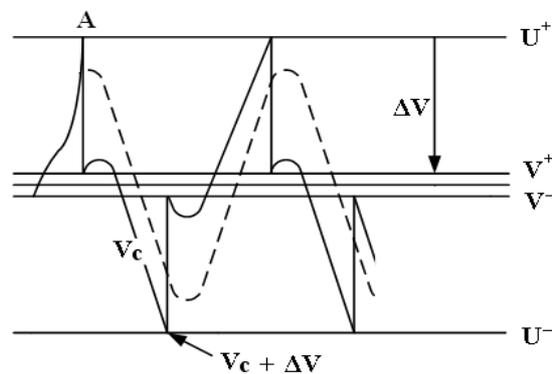


그림 2.4 방전개시전압 이하에서의 방전 발생
Fig. 2.4 Occurrence of discharges below the inception voltage

첫 번째 방전이 A점에서 스위칭 서지나 과도전압에 의해 발생하였을 경우, 보이드 양단의 전압 V_c 는 방전 진행 후 남아 있는 표면전하 (surface charge)에 기인하여 다음 반주기동안 방전이 발생하게 되는 전압에 도달하게 된다. 보이드에 인가된 전압과 잔여전하에 의해 방전 발생 전압은 거의 방전개시전압 절반의 전압에서 존속할 수 있다.

유도전동기의 경우 가변속 구동용 인버터를 사용함에 따라 빠른 스위칭 속도를 가진 소자에 의해 수 천 V의 과도전압을 발생시킨다. 이러한 과도 전압이나 스위칭 서지에 의해 부분방전이 발생하게 되면, 방전은 상용 운전전압에서 지속적으로 발생하게 된다. 그러므로 유도전동기에서 미소 부분방전 및 방전개시전압을 측정하는 것이 매우 중요하다.

부분방전과형은 정극성 및 부극성 펄스에 대하여 다양한 형태로 발생하게 되는데 이를 그림 2.5에 나타내었다. 만약 보이드가 비대칭이라면 절연파괴전압 U^+ , U^- 가 동일하지 않게 된다. 보이드 양단의 전압 V_c 가 A점에서 절연파괴전압 U^+ 에 도달하게 되면 이는 방전을 초래하고 방전 후 잔존하는 표면전하와 V_c 에 의해 다시 B점에서 방전이 발생한다. 다음 방전은 C점에서 발생하는데 이는 A점에서 보다 빠른 주기에서 발생하게 된다. 그러면 다음 반주기에서 전압은 U^- 값에 도달하지 못하게 되어 방전은 발생하지 않는다. 그러나 만약 V_c 가 U^- 를 초과하면 방전은 일정하게 발생하게 된다^[27].

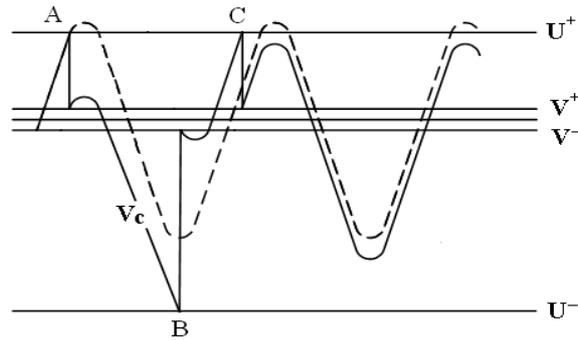


그림 2.5 비대칭 보이드에서 부분방전의 발생
 Fig. 2.5 Occurrence of PDs in an asymmetrical void

2.3 부분방전의 검출

방전은 시료에서 전류 임펄스 형태로 발생하며, 다양한 검출회로가 이용되고 있지만 그림 2.6과 같이 간략화 할 수 있다. 시료 a에서 발생된 부분방전 신호 검출을 위하여 결합회로를 구성하고 피시힘기기와 페루프를 형성하게 함으로서 검출임피던스에 의해 부분방전신호를 검출할 수 있다.

이 기본회로에서의 고전압 발생원 및 결합콘덴서(coupling capacitor) k는 어떠한 방전도 발생하지 않아야 하며, 방전은 시료 a에 의해서만 검출되어야 한다. 검출 임피던스 Z양단에는 시료내의 방전임펄스에 의해 전압 임펄스를 발생시키며 증폭기를 통해 관측된다. 검출 임피던스 Z는 시료에 직접 연결하는 방법과 결합콘덴서 k와 직렬로 접속하는 두 가지 방법으로 접속할 수 있으며, 고전압 발생원의 임피던스가 충분히 크다면 전기적으로 같은 전압이 발생된다. 실제 사용에 있어 검출회로는 직접 검출회로(straight detection circuit)와 평형검출회로(balanced detection circuit) 두 가지 방법으로 적용된다^[27].

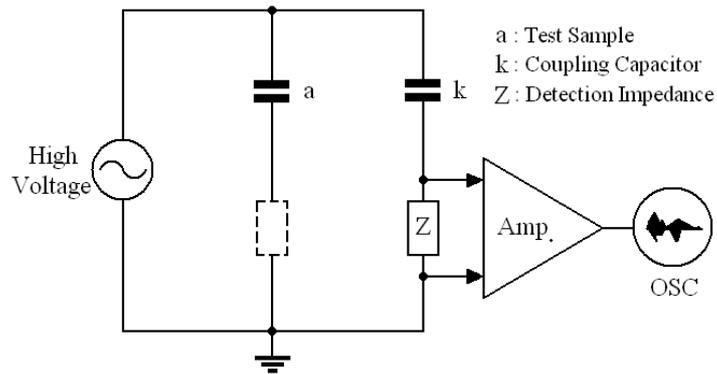


그림 2.6 부분방전검출의 기본회로
Fig. 2.6 Basic circuit for PD detection

(1) 직접검출회로

직접검출회로는 그림 2.7과 같이 검출저항 R에 표류정전용량이 병렬 접속된 RC 적분회로와 RLC 동조회로의 두 가지 방법이 있다.

그림 2.8(a)와 같은 RC 회로에서 임펄스 전압은

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{Rm}) \quad (2.7)$$

여기서, q : 방전의 크기, $q = b \cdot \Delta V$ 이고, 회로의 합성정전용량 m 은

$$m = \frac{ak}{a + k} + C \quad (2.8)$$

와 같이 표현된다.

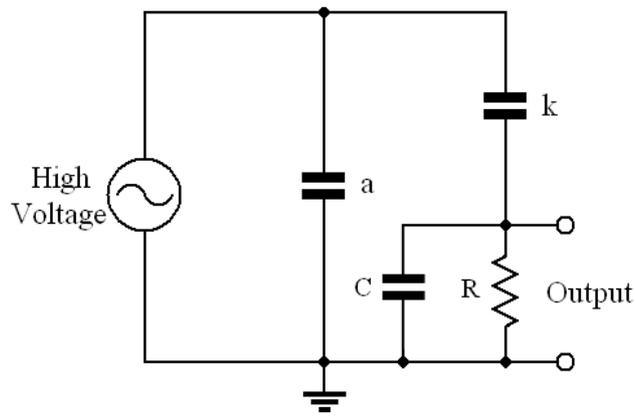
그림 2.7(b)의 RLC 회로에서 임펄스는 RC 회로와 같은 파고치로부터 감쇠 진동하게 되고 출력 전압은 다음과 같이 주어진다.

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{2Rm}) \cos \omega t \quad (2.9)$$

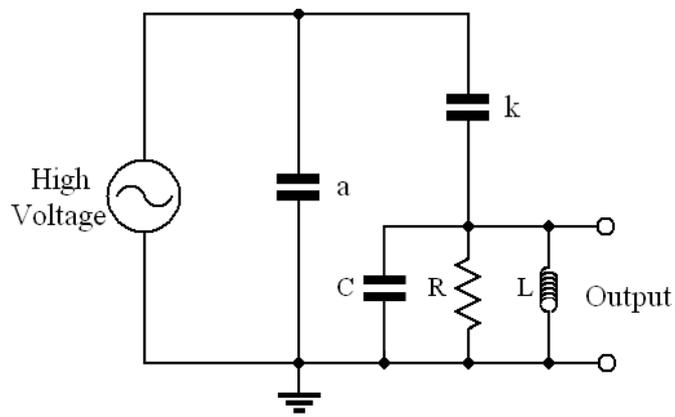
여기서, $\omega = \sqrt{\frac{1}{Lm} - \frac{1}{4R^2m^2}}$ 이고, m 은 회로의 합성정전용량으로 식 (2.8)과 같은 값을 갖는다. 식(2.7) 및 (2.9)에서와 같이 검출저항 양단의 출력 전압은 방전전하 q 와 결합 콘덴서 k 에 비례하며 이 출력전압 측정을 통해 방전전하의 크기를 구할 수 있다.

실제적용에 있어서는 검출대상에 따라 부분방전 신호의 주파수가 달라

지기 때문에 그림 2.7에 언급한 구성을 그대로 적용하는 것이 아니라 RLC 정수를 적절히 조합할 필요가 있다. 또한 외부 잡음에 의한 영향이 크기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다.



(a) RC 회로



(b) RLC 회로

그림 2.7 직접검출

Fig. 2.7 Straight detection

(2) 평형검출회로

평형검출회로 역시 기본회로를 동일하게 사용할 수 있으며 시료에서의 방전은 직접검출회로와 같은 원리로 검출되지만 시료 외부로부터의 방전 펄스 및 잡음 등은 평형회로에 의해 상쇄된다. 즉, 고전압 변압기 및 고전압 접속단자에서 발생하는 방전 또는 코로나 등과 같은 왜곡을 적절히 억제할 수 있다.

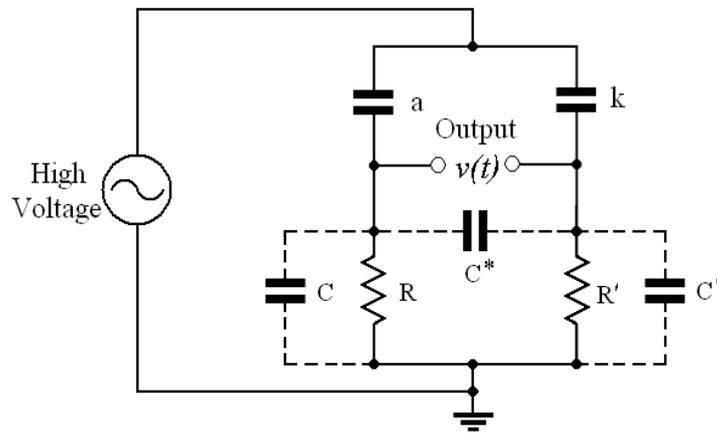


그림 2.8 평형검출
Fig. 2.8 Balanced detection

평형검출회로는 시료 a 및 결합콘덴서 k에 각각 총 2개의 검출임피던스를 설치하고 2개의 검출임피던스에서 검출된 신호는 차동 증폭기를 통해 측정된다. 시료와 결합콘덴서의 용량이 동일하고 검출임피던스가 같은 경우, 외부 잡음 신호는 서로 상쇄되고 부분방전 신호는 반대극성의 동일한 신호가 검출되므로 최종 출력은 방전신호의 두 배의 크기로 얻어진다.

실제 적용에 있어서는 회로 사이의 표류정전용량을 고려해야 하며, 이를 고려한 회로는 그림 2.8과 같이 나타낼 수 있다.

그림 2.8에서 검출임피던스 사이에 나타나는 부분방전 검출전압은

$$v(t) = \frac{q}{a + C + (n + 1) C^*} \times e^{-t/\tau} \quad (2.10)$$

와 같이 얻어진다. 여기서, C 및 C^* 는 회로 사이에 존재하는 표류정전용량이고, n 은 검출회로의 평형정도를 나타내는 값으로 식 (2.11)과 같이 표현되며, τ 는 회로의 시정수로 식 (2.12)와 같이 표현된다.

$$n = \frac{a}{k} = \frac{R'}{R} = \frac{C'}{C} \quad (2.11)$$

$$\tau = R \times [a + C + (n + 1) C^*] \quad (2.12)$$

평형검출회로는 직접검출회로에 비해 외부에서 발생하는 방전신호 및 전기적 잡음 신호 억제에 이점을 가지고 있다. 그러나 복잡한 회로 구성을 가지며 동일한 시험대상에 대하여 정전용량의 차이를 가지게 되면 신호의 왜곡이 발생하여 각 시험대상에 따라 결합콘덴서 및 검출임피던스를 다시 선정하여야 하고, 평형도를 맞추기 위한 절차가 필요하다^{[28],[29]}.

따라서 본 연구에서는 시험대상에 대하여 교정실험 만으로 검출감도 산출 및 부분방전 측정이 가능한 직접검출회로를 적용하여 측정시스템을 구성하였다.

제 3 장 설계 및 제작

부분방전 측정시 방전펄스는 경유하는 매질, 유도전동기의 구조, 계측기 및 검출회로의 특성, 주변잡음 등에 따라 방전펄스파형이 왜곡되고, 표류 정전용량, 시료의 정전용량 및 결합콘덴서의 정전용량에 따라 검출감도가 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 시험대상의 종류에 상관없이 광범위하게 적용이 가능한 직접검출회로를 기본으로 측정시스템을 구성하였으며, 직접검출회로의 문제점인 외부 잡음에 대한 문제를 최소화 하였다.

3.1 검출회로

부분방전 검출회로는 그림 3.1과 같이 표현되며, 시료에 고전압 인가를 위한 전원회로, 결합콘덴서 및 검출임피던스로 구성되는 결합회로망, 저잡음 고감도 증폭회로, 외부잡음 및 전원잡음을 제거하기 위한 필터회로로 구성된다.

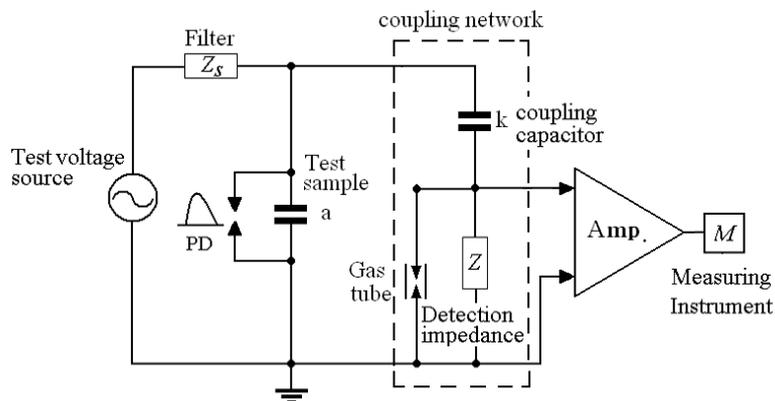


그림 3.1 부분방전 검출회로
Fig. 3.1 PD detection circuit

검출임피던스는 결합콘덴서와 직렬로 접속하는 방법을 사용하였는데 이는 시료에서 큰 방전이 발생할 경우 검출회로에 과도전류가 발생하여 회로를 손상시킬 수 있기 때문이다. 또한 2차 보호로서 검출회로의 입력 단에는 과도전류에 대한 보호대책으로 보호소자를 접속하였다.

3.1.1 결합회로망

일반적으로 부분방전 신호는 고주파 전류 펄스 형태로 주파수대역은 절연매체 및 절연시스템의 구성체계, 펄스의 전송경로, 결합의 종류 및 형태, 외부 잡음 등에 따라 수십 kHz에서 수 MHz에 걸쳐 다르게 나타난다.

부분방전 검출회로에서 응답펄스의 주파수스펙트럼은 주로 결합회로의 특성에 의해 결정된다. 따라서 결합회로의 구성은 부분방전 신호의 발생 주파수 범위를 고려하여 결합콘덴서 및 검출임피던스로 구성되는 결합회로망을 구성하여 유도전동기에서 발생하는 수 MHz이상의 범위를 갖도록 설계·제작하였다. 이것은 측정계의 교정에 필요한 교정 펄스의 주파수 범위와 실제 발생하는 부분방전 신호의 주파수 영역에서 평탄한 특성을 가지도록 구성한 것이다.

결합콘덴서는 부분방전시험 전압범위에서 내부방전이 발생하지 않는 콘덴서(discharge free capacitor)를 사용하여야 한다. 부분방전시험에 있어 결합콘덴서에서 부분방전이 발생하면 시험 대상 시료에서 발생하는 부분방전 신호와 구분되지 않기 때문에 정확한 측정이 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 교류전압 8kV까지 부분방전이 발생하지 않는 결합콘덴서(Ceramic Capacitor type 07761 1nF, Morgan)를 사용하였으며, 시료의 정전용량을 LCR 측정기(3531Z, HIOKI)로 측정하여 검출감도를 최대로 할 수 있는 용량을 선정하였다.

결합콘덴서의 용량이 결정되면 검출임피던스를 선정할 수 있는데 본 연구에서는 저압용 유도전동기에서의 부분방전 신호 특성을 고려하여 1 MHz 이상의 주파수 범위의 신호를 검출할 수 있도록 구성하였다. 이러한 주파수를 선정할 때 결합회로망은 RLC조합으로 그림 3.2와 같이 구성할 수 있다.

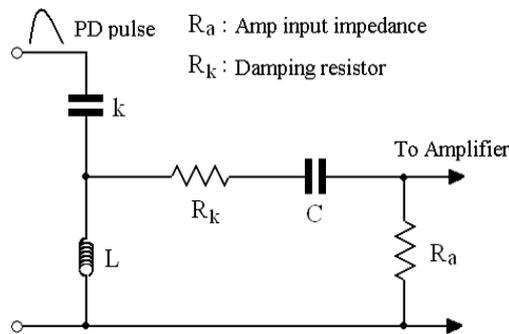


그림 3.2 결합회로망의 구성
Fig. 3.2 Configuration of the coupling network

결합회로망은 부분방전 시험전압인 60 Hz의 상용주파수 전압신호는 완전히 차단하고, 고주파 펄스형태의 부분방전 신호만을 통과시키는 고역 통과 필터의 특성을 가져야 한다. 이는 증폭기의 포화를 방지하고, 측정된 부분방전 파형이 60 Hz의 상용주파수와 중첩되면 정확한 방전 전하량을 평가할 수 없기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 그림 3.2와 같은 회로를 적용하여 최적 주파수대역을 갖도록 구성하였으며, 결합콘덴서 및 증폭기의 입력 임피던스를 포함한 결합회로의 주파수 응답특성에 대한 PSpice 시뮬레이션 결과는 그림 3.3과 같이 얻어진다.

이때 상용주파수 전압에 대한 감쇄특성은 -270 dB로 완전히 차단할 수 있으며, -3 dB가 되는 차단주파수는 1 MHz로 나타난다. 이는 측정계의 교

정에 필요한 교정 신호의 주파수 대역이 2 MHz 이상 이므로 부분방전 신호의 주파수 영역에서 평탄한 특성을 가지게 되어, 측정 주파수대역 내에서 정확한 방전진하량의 산출이 가능하다.

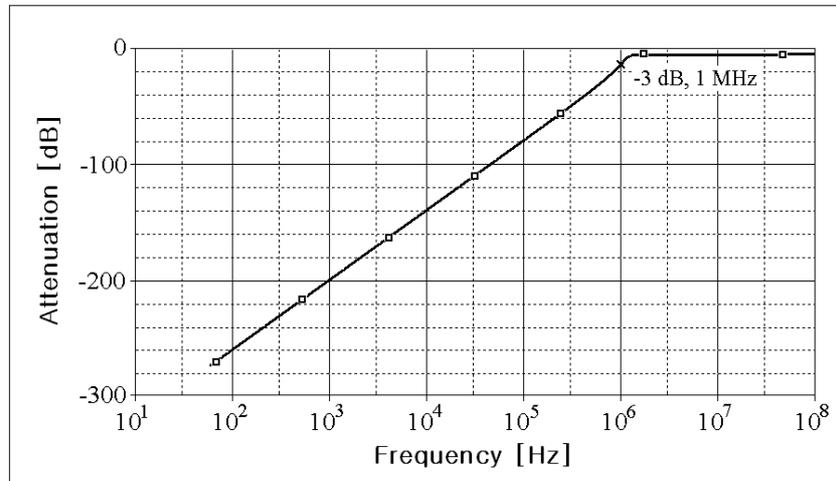


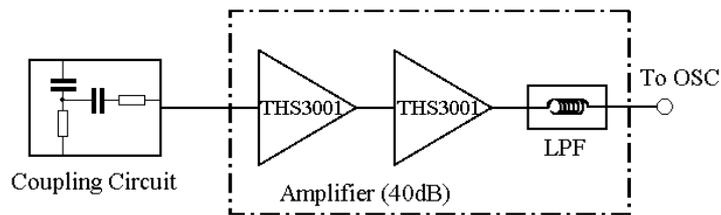
그림 3.3 결합회로망의 주파수 응답

Fig. 3.3 Frequency response of the coupling network

3.1.2 증폭회로

부분방전 펄스 신호의 크기는 대단히 작기 때문에 출력단에 증폭회로를 접속해야만 부분방전 신호를 검출할 수 있다. 증폭회로는 광대역 주파수 특성 및 낮은 잡음특성을 갖도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 충분한 증폭 특성을 얻기 위하여 그림 3.4와 같이 2단으로 구성되는 증폭회로를 설계·제작하였다. 부분방전 측정시스템 구성에 있어 내부잡음의 가장 큰 원인은 증폭회로에 의한 것으로 증폭기 선정에 있어 주파수대역 및 증폭도 등에 대한 것뿐만 아니라 잡음 레벨에 대한 충분한 고려가 있어야 한다. 본 연구에서 사용된 증폭기는 Texas Instruments의 THS 3001을 이용

하였으며 잡음 레벨은 최대 $1.6 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ 정도이다. 주파수 범위는 DC ~ 420 MHz로 부분방전 검출에 충분한 주파수 범위를 가지며, 입력 off-set 전압은 $3 \text{ mV}_{\text{max}}$ 로 대단히 낮은 잡음 레벨 특성을 갖는다.



(a) 구성도



(b) 사진

그림 3.4 증폭회로
Fig. 3.4 Prototype amplifier

증폭회로의 증폭도는 40 dB로 설계하였으며, 부분방전 신호의 발생 주파수 범위 및 외부 또는 내부의 방사잡음에 대한 영향을 고려하여 출력단에 10 MHz의 저역통과 필터회로를 삽입하였다. 증폭회로를 포함한 부분방전 검출회로의 주파수 범위는 그림 3.5와 같이 얻어진다.

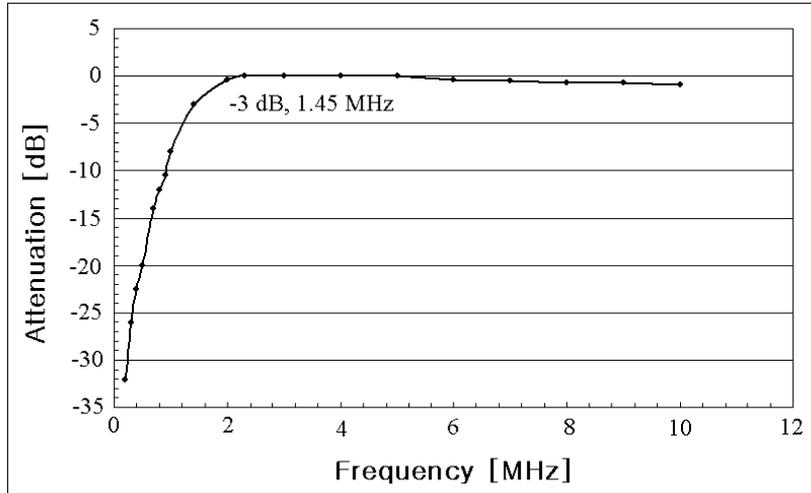


그림 3.5 검출회로의 주파수 특성

Fig. 3.5 Frequency characteristics of the detection circuit

3.2 잡음 대책

저압용 유도전동기의 절연평가 및 진단 정도를 향상시키기 위해서는 부분방전 측정감도를 크게 향상시켜 미소 부분방전신호를 검출하여야 한다. 미소 부분방전신호 검출을 위해서는 부분방전신호와 기기주변의 전자파에 의한 외부 잡음에 대한 영향을 평가하여 적절히 잡음을 억제하고, 높은 S/N비를 확보하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 잡음의 발생 원인을 분석하고 이에 대한 대책을 마련함으로써 부분방전 신호만을 측정할 수 있도록 하였다. 부분방전 측정시 외부잡음은 전원으로부터 유입되는 전도 잡음, 외부로부터의 방사 잡음, 접지를 통해 유입되는 접지 잡음의 3가지로 구분할 수 있다.

먼저 부분방전 측정을 위해 외부로부터 공급되는 입력전원에 의한 잡음으로 수십 ~ 수백 kHz 주파수 대역의 전도성 잡음이다. 입력전원으로부터

발생하는 전도 잡음 제거를 위해서는 정상적인 전원주파수 신호는 그대로 통과시키고, 수십 kHz 대역의 잡음 신호는 완전히 차단할 수 있는 구성이 필요하다. 따라서 그림 3.6과 같이 전원공급 인입단에 노이즈차단 변압기 (NCT : Noise Cut Transformer)를 설치하고, 시험용 변압기 출력단에 직렬 인덕터를 접속함으로써 시료 및 결합콘덴서의 정전용량을 이용하여 LC 필터회로를 구성하였다.

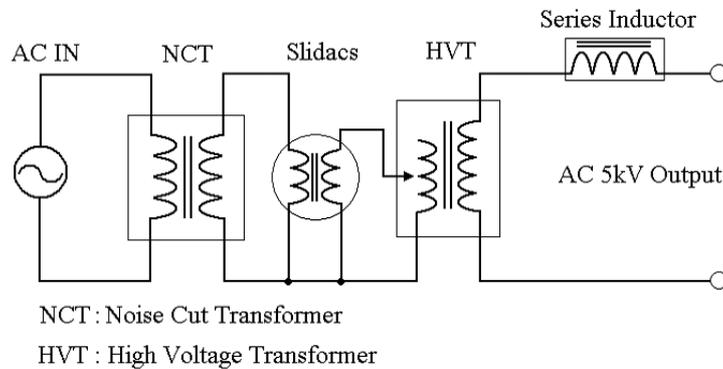


그림 3.6 전원공급부의 구성
Fig. 3.6 Configuration of the power supply

직렬 인덕터는 결합콘덴서의 정전용량이 비교적 작고 제한적으로 사용되기 때문에 충분한 감쇄비를 얻기 위하여 약 2.3 mH의 값을 가질 수 있도록 설계·제작하였다. 2.3 mH의 큰 인덕턴스를 얻기 위하여 적층구조의 철심 코어를 사용하였으며, 부가적으로 철심 코어와 전선사이의 부분방전을 억제하기 위하여 코어에 감아놓은 전선은 절연내력 40 kV의 실리콘 케이블을 사용하였다. 고전압 출력단에 구성된 LC 필터회로의 주파수 특성을 평가하기 위하여 PSpice 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 그림 3.7에 나타내었다. 시뮬레이션 결과로부터 전도성 잡음에 대한 차단주

파수는 3.5 kHz로 부분방전 검출을 위하여 시료에 인가되는 60 Hz 성분의 전압은 그대로 통과하고, 고전압 변압기에서 발생하는 외부 방전신호 및 3.5 kHz이상의 전도성 잡음신호에 대해서는 효과적인 차단이 가능하다. 부분방전 검출회로에서 결합회로를 고려하면 전원에 의한 전도 잡음은 부분방전 검출에 영향을 주지 않는 범위로 억제된다.

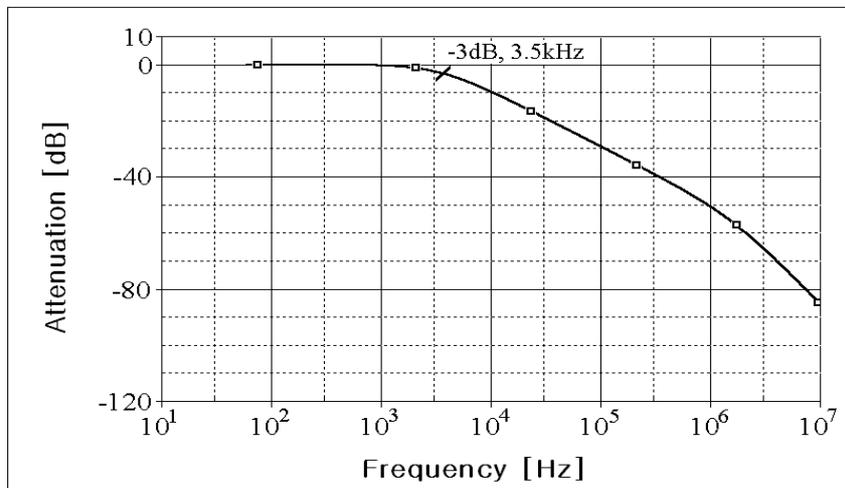


그림 3.7 고전압 필터의 주파수 응답

Fig. 3.7 Frequency response of the HV filter

두 번째로 방송국 등에서 송신되는 수십 MHz 대역의 고주파 통신신호 및 외부 전기전자기기로부터 발생하는 방사성 잡음이 있다. 방송용 반송파 등의 방사 잡음 제거를 위한 대책으로는 공급전원의 인입선 결합회로에 사용되는 결합 콘덴서 및 검출회로부 등에 방송주파수 및 통신신호가 감지되지 않도록 구리 및 알루미늄과 같이 도전율이 높은 금속으로 차폐시키는 것이 가장 효과적이다. 부분방전 측정과 관련된 모든 부분을 차폐구조로 하면 외부로부터 감지된 방사 신호는 접지를 통해 제거된다. 이때 차폐함의 접지방법으로는 차폐함을 직접 접지함으로서 차폐함에 감지된 통신잡음과 접지잡음을 동시에 제거할 수 있다.

차폐기법은 크게 두 가지로 잡음원을 차폐시키는 기법과 잡음원으로부터 회로 및 기기를 차폐시키는 기법으로 구분된다. 잡음의 원인이 기기 등의 일정부분으로 구성되는 경우에는 잡음원을 차폐시키는 것이 효과적이지만, 부분방전 검출 기법에서는 검출회로 등에 의한 내부 잡음 발생원 뿐만 아니라 외부에서 유입되는 잡음에 대한 차폐가 필요하므로 잡음원에 대하여 검출회로를 차폐시키는 구조가 필요하다. 차폐함의 차폐효과는 금속의 재료적인 특성에 큰 영향을 받기 때문에 가능한 도전율과 투자율이 높은 재질을 사용해야 한다. 본 연구에서는 차폐함의 구조를 그림 3.8과 같이 이중차폐구조로 구성하였으며, 외부에는 투자율이 높은 강자성 재료(니켈합금)를 사용하고 내부 차폐는 도전율이 높은 재료(구리)를 사용함으로써 차폐효과를 극대화 하였다. 또한 이중차폐구조에서 외부 차폐구조와 내부 차폐구조에 재질을 달리하고 일정 공간을 제공하여 자기장에 대한 임피던스 변곡점을 만들어줌으로서 전기장에 대한 영향뿐만 아니라 자기장에 대한 차폐도 효과적으로 이루어질 수 있도록 하였다.

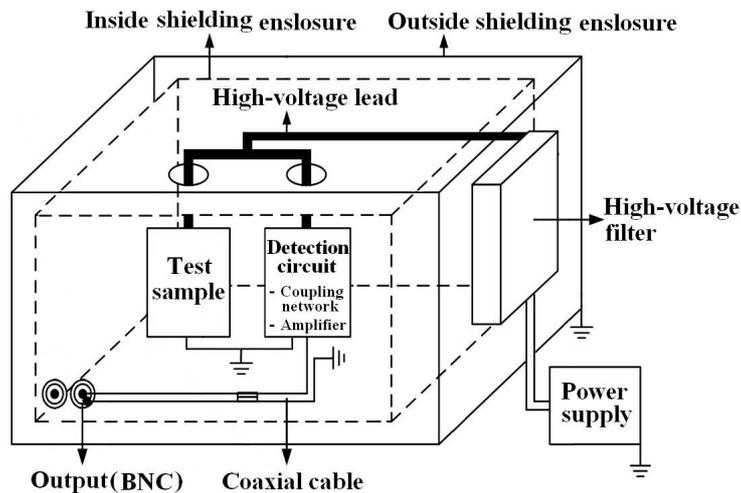


그림 3.8 차폐함의 개략도

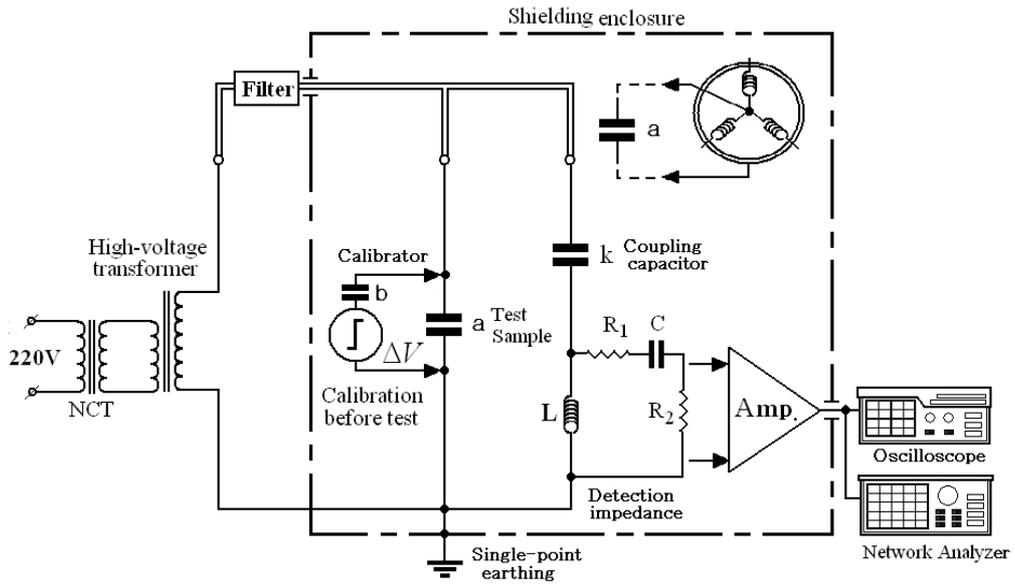
Fig. 3.8 Schematic diagram of shielding enclosure

세 번째 잡음은 접지시스템의 불안정에 의해 발생하는 접지잡음으로 주로 생산공정과 같이 각종의 전기전자기기를 사용할 때 발생하는 고주파 잡음이 대부분이며, 일반적으로 접지잡음은 수 ~ 수십 kHz 대역에서 발생한다. 이를 위한 대책으로는 단일접지 방식의 적용이나 접지필터를 설치하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 접지시스템이 양호한 실험실 내부에서 평가가 이루어지므로 측정시스템의 접지에 단일접지방식을 적용하여 접지 잡음을 최소화하였다^[30].

3.3 측정시스템의 구성

최종 구성된 부분방전 측정시스템 그림 3.9와 같이 교류 고전압 공급장치, 시험대상 시료, 결합콘덴서 및 결합회로로 구성되고, 부분방전 신호의 관측 및 분석에는 오실로스코프(DL9140, 1.5 GHz, Yokogawa)와 스펙트럼 분석기(4395A, 10 Hz ~ 500 MHz, Agilent)를 사용하였다.

시험전압 인가를 위한 교류 고전압 공급장치는 앞서 언급한대로 220 V 입력단에 NCT를 적용하여 입력전원에 의한 잡음을 차단하고, 고전압 출력부에 다시 LC 필터를 적용함으로써 전원의 전도 잡음을 완전히 차단한 구성이다. 고전압 인가를 위한 시험용 변압기는 방전이 발생하지 않는 형태로 제작하였으며, 진공상태에서 함침시켜 안정된 시험전압 공급이 가능하도록 하였다. 부분방전 검출을 위한 결합회로는 교류전압 8kV까지 방전이 발생하지 않는 1 nF의 결합콘덴서를 적용하고, RLC 조합으로 구성되는 결합회로를 접속하였다. 결합회로는 낮은 주파수 대역을 차단하는 저역차단필터의 기능을 수행하며, 1 MHz 이상의 고주파 부분방전 신호만이 검출되도록 구성하였다. 최종적으로 결합회로 출력에는 저잡음 고이득의 증폭기를 사용하였으며, 측정회로에서 검출된 부분방전 신호는 오실로스코프를 통해 분석된다.



(a) 개략도



(b) 사진

그림 3.9 부분방전 측정시스템
Fig. 3.9 Configuration of the PD measurement system

제 4 장 실험 및 고찰

부분방전 측정시 정확한 부분방전 신호 검출을 위해서는 측정시스템에 대한 잡음 및 외부잡음 신호에 대한 평가가 선행되어야 한다. 검출감도는 잡음의 발생 정도에 따라 달라지기 때문에 측정시스템에 대한 기본특성을 파악하고, 방전신호가 검출되었을 때 이것이 시료(전동기)에서 발생했는지 아니면 측정시스템에서 발생했는지의 기준을 확립하기 위한 평가가 이루어져야 한다. 적용실험에서는 각 시료에 대한 교정실험을 수행하고, 교정 실험 결과로부터 검출감도를 산출 후 교류시험전압을 인가하여 부분방전 신호를 측정한다.

4.1 측정시스템 평가

부분방전 측정을 위해서는 외부잡음을 적절히 차단하고, 내부잡음에 대한 평가를 수행하는 것이 필요하다. 외부잡음의 경우에는 앞서 언급한 바와 같이 전원공급부에 필터의 설치, 차폐함 및 단일 접지 시스템 적용 등의 방법으로 부분방전 신호 검출을 위한 충분한 대책을 마련하였다. 내부잡음의 경우에는 특별히 억제 또는 제거할 방법이 없기 때문에 잡음 레벨을 고려하여 잡음레벨 이상의 부분방전 신호만을 검출할 수 있다. 그러나 내부잡음은 결합회로에 안정적인 소자를 사용하고, 저잡음 증폭기의 적용, 접속부의 완전한 처리 등으로 최소화할 수 있다.

내부잡음의 발생원으로는 결합콘덴서, 결합회로, 증폭회로에 의한 것으로 구분된다. 특히 결합콘덴서의 경우에는 시험전압 범위에서 방전이 발생하는 경우가 있으며, 이로 인하여 시험 대상 시료에서 발생하는 부분방전 신호로 오인되기도 한다.

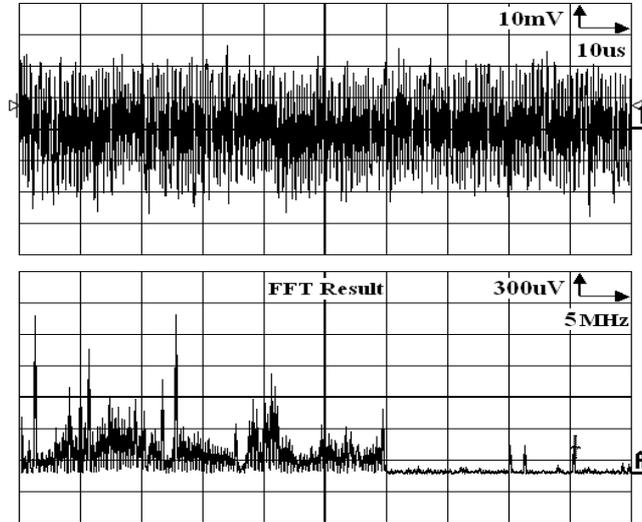
따라서 감도산출 및 적용실험 이전에 측정시스템의 기본특성 평가를 수행하였다. 잡음에 대한 평가는 전원공급부를 포함한 부분방전 검출회로 전반에 걸쳐 이루어져야한다. 실제 측정회로와 동일한 구성에서 발생하는 잡음신호의 크기 및 주파수 스펙트럼을 측정·분석하였다.

잡음 신호는 외부 및 내부 잡음을 모두 포함하기 때문에 차폐함의 차폐 효과도 검증할 수 있는데 잡음 측정시 차폐함의 개구부가 열렸을 때 및 완전히 닫혔을 때 잡음 레벨을 측정하여 비교·평가하였다.

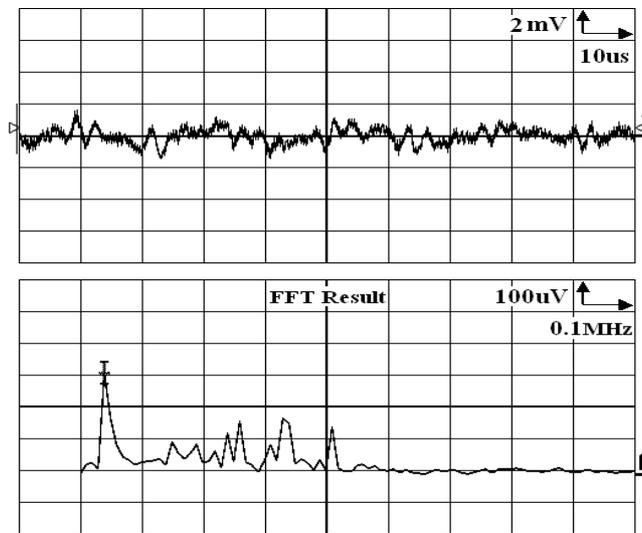
(1) 잡음 평가

먼저 잡음 신호의 크기를 측정하기 위하여 오실로스코프에서 측정되는 잡음 신호를 분석하였다. 측정된 잡음 신호는 그림 4.1과 같이 나타나는데 차폐함을 열었을 때 잡음 레벨은 대략 $50\text{ mV}_{\text{P-P}}$ 로 측정되며, 차폐함의 개구부를 완전히 닫았을 때에는 $3\text{ mV}_{\text{P-P}}$ 로 개구부에 의해서도 26 dB의 차폐효과가 있었으며, 검출 가능한 부분방전 신호레벨은 잡음레벨의 최고 2배 이상이어야 하므로 본 연구에서 제안한 측정시스템의 경우 최소 6 mV 이상의 부분방전 펄스 측정이 가능하다.

차폐함의 개폐 여부에 따른 잡음 주파수 성분은 개구부 열림시 30 MHz 까지 넓게 분포하지만 단힘시는 40 kHz에서 크게 나타나고 420 kHz 이상에서는 나타나지 않는다. 이는 차폐함의 특성으로 MHz 이상의 방사전자파는 완전 차폐되며, 420 kHz 이하의 주파수 성분은 접지로부터 전도되는 잡음으로 추정된다. 어떠한 경우에도 잡음 레벨이 $3.5\text{ mV}_{\text{P-P}}$ 이하로 측정되므로 부분방전 검출에 충분한 적용성을 갖는 것으로 판단된다. 또한 시험전압 인가시에도 잡음 레벨이 증가하지 않는 특성을 나타내는데 이는 전원공급부에 의한 잡음은 필터회로 등의 적용으로 완전히 차단되기 때문이다.



(a) 개구부 열림



(b) 개구부 닫힘

그림 4.1 잡음 레벨 평가

Fig. 4.1 Evaluation of noise levels

(2) 외부 방전 잡음 평가

부분방전 측정시 고전압 변압기, 고전압 접속선, 터미널 단자 및 결합콘덴서에서 방전 또는 코로나 등이 발생하게 되면 이는 실제 시료에서 발생하는 부분방전과 구별이 어려우며, 정확한 부분방전 측정이 불가능하다. 따라서 측정시스템에서 발생하는 외부 방전 잡음에 대한 평가가 필요하며, 이를 위해서 그림 4.2와 같은 평가회로를 구성하였다. 평가회로는 부분방전 검출회로에서 시험대상 시료를 제거하고 두 개의 결합콘덴서를 설치한다. 각각의 결합콘덴서에 증폭회로를 접속하여 외부 방전 잡음을 측정하게 된다. 결합콘덴서 앞단의 고전압 변압기를 포함한 전원장치 및 고전압 접속선 등에서 방전이 발생하면 동일한 극성의 방전 파형이 측정되며, 결합콘덴서에서 방전이 발생되면 반대 극성의 파형이 측정된다.

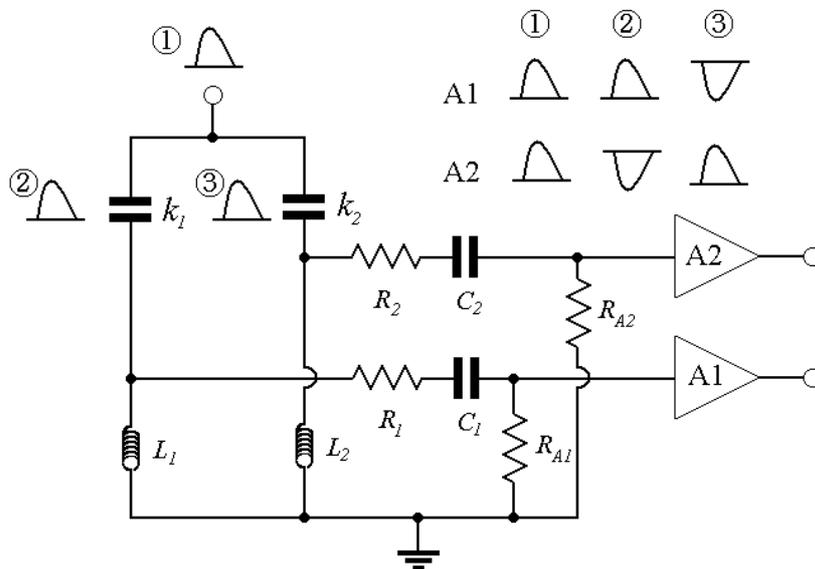


그림 4.2 외부방전의 측정

Fig. 4.2 Measurement of external discharges

시험전압을 상승시키면서 잡음 특성을 평가한 결과 교류전압 2kV의 범위까지는 검출회로에 의한 잡음 신호는 발생하지 않는 것으로 측정되었다. 따라서 본 연구에서 제작한 부분방전 검출시스템에서는 전원공급장치, 결합콘덴서 및 결합회로에서 어떠한 방전신호나 특정 크기 이상의 잡음 신호는 발생하지 않는 것으로 미소 부분방전 측정에 충분한 특성을 가지는 것으로 평가되었다.

본 연구에서 부분방전의 검출은 시험전압 2kV 이내로 하여 피시험 대상에 전기적인 스트레스를 최소화하여 적용하기 때문에 측정전압 범위내에서 안정적인 특성을 가지는 것으로 판단된다.

4.2 유도전동기에서 부분방전 측정

제안한 부분방전 측정시스템의 적용성 평가를 위하여 단상 0.5마력 및 3상 0.5마력, 1마력, 5마력의 저압용 유도전동기에서 발생하는 부분방전 신호를 측정하였다.

동일한 측정시스템에서 시험대상 시료가 변경될 경우, 시료의 정전용량의 변화에 의해 검출회로에서 검출되는 부분방전의 검출감도가 달라지기 때문에 부분방전 측정에 앞서 각각의 유도전동기에 대하여 교정실험을 수행하였다. 교정 실험은 부분방전 측정시스템에 대한 출력전압 특성평가 및 실제 방전신호와 검출회로 출력 사이의 특성을 설정하기 위한 것으로서 이미 알고 있는 크기의 방전전하량을 시료측에 주입하여 이때 측정된 파형의 크기값으로 검출감도를 산출한다^[31].

본 연구에서는 국제규격 IEC 60270을 만족하는 전용의 교정기(GmBH, CAL1A)를 이용하여 교정실험을 수행하였다. 교정기는 1 ~ 100 pC의 방전 펄스 출력을 가지고 내부 정전용량은 1 pF 이하이다. 방전 펄스는 정극성 및 부극성의 펄스 발생이 가능하며 수 MHz의 주파수 특성을 가진다. 교정펄스 신호는 선로의 길이, 교정기의 설치위치, 각 유도전동기의 구조적 특성에 따라 펄스의 형태 및 교정값이 달라진다. 따라서 동일한 조건에서 교정실험을 수행하고, 교정실험결과로부터 검출감도 산출 후, 교류전압을 서서히 증가하면서 각 유도전동기에서 발생하는 부분방전 신호를 측정하였다.

(1) 단상 0.5마력 유도전동기

교정실험은 측정시스템에 교류시험전압을 인가하지 않은 상태에서 유도전동기의 고정자권선과 외함사이에 정·부극성 1 ~ 50 pC의 교정 펄스를 주입하여 검출감도를 산출하였다. 그림 4.3에는 전하량 1~ 50 pC 주입시 측정된 전압신호의 크기를 나타낸 것으로 각 전하량에 비례하여 전구간에서 선형적으로 나타났다. 그림 4.4에는 1 pC과 10 pC의 교정 전하 주입시 검출된 파형의 예를 나타낸 것으로 출력 전압은 각각 22.1 mV, 227 mV이었으며, 정극성 및 부극성에 대하여 동일하게 측정되었다.

검출감도는 관측장치인 오실로스코프의 수직 해상도와 잡음레벨을 고려하여 각 전하량에 대한 출력값의 평균값으로 산출하였다. 교정실험 결과로부터 검출감도는 22.3 mV/pC로 산출되었다.

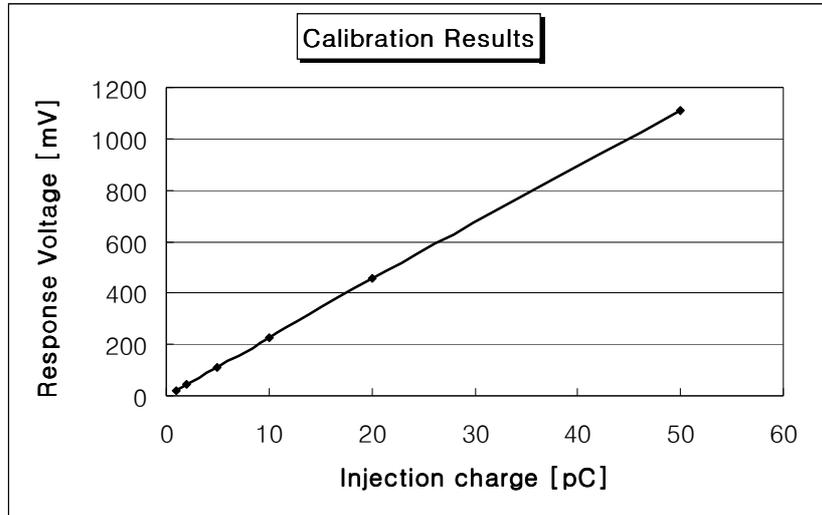
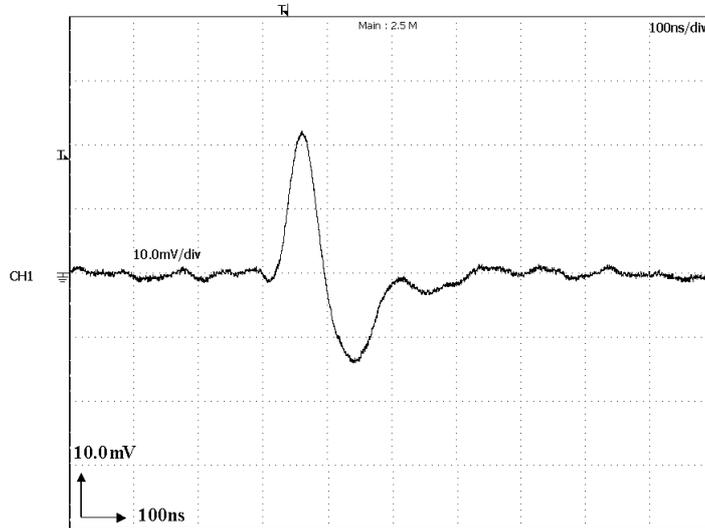
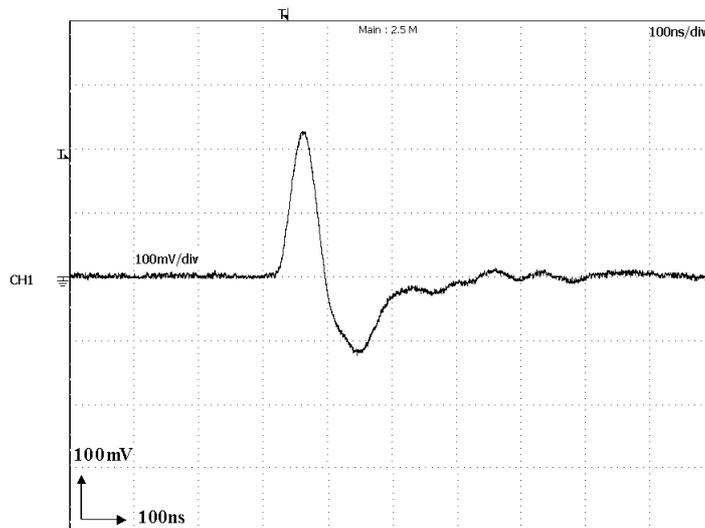


그림 4.3 교정펄스-응답전압의 관계(1 ϕ 0.5 HP)

Fig. 4.3 Relationship of calibration pulses-response voltages(1 ϕ 0.5 HP)



(a) 1 pC

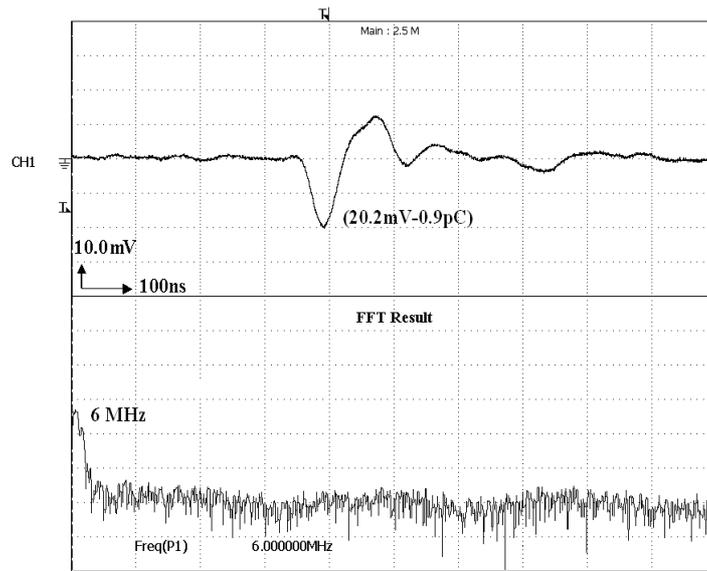


(b) 10 pC

그림 4.4 교정펄스에 대한 응답 파형(1 ϕ 0.5 HP)

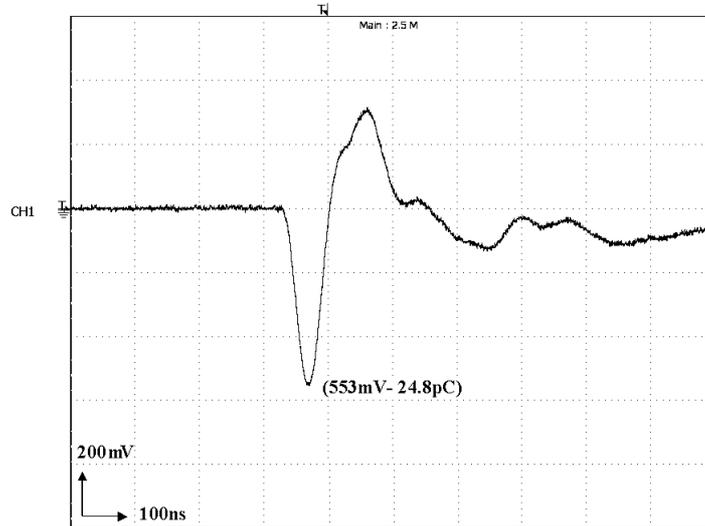
Fig. 4.4 Response waveforms to calibration pulses(1 ϕ 0.5 HP)

교정 실험에서 검출감도를 산출한 후, 교정기를 유도전동기로부터 분리하고 교류전압을 증가시키면서 부분방전 신호를 측정하였다. 최초로 검출된 파형은 교류전압의 최대값 1,440 V_{peak}에서 그림 4.5와 같이 20.2 mV로 측정되었으며 방전신호의 주요 주파수는 6 MHz으로 나타났다. 검출감도에 따라 방전전하량으로 환산하면 약 0.9 pC에 해당한다. 인가전압을 서서히 상승시키면서 부분방전 측정 결과 1,500 V_{peak}에서 그림 4.6과 같이 55.3 mV로 약 24.8 pC의 방전이 발생하였으며, 1,600 V_{peak}인가시 76.7 pC으로 방전의 크기 및 발생빈도가 크게 증가하였다.

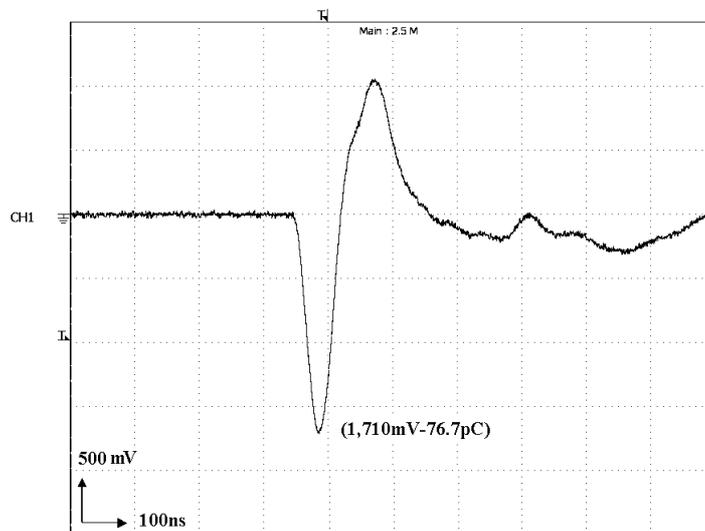


상 : 부분방전 파형
하 : FFT 분석

그림 4.5 부분방전 파형과 FFT 분석(1 φ 0.5 HP)
Fig. 4.5 PD waveform and its FFT analysis(1 φ 0.5 HP)



(a) 24.8 pC



(b) 76.7pC

그림 4.6 부분방전 파형의 예(1 ϕ 0.5 HP)
 Fig. 4.6 Typical PD waveforms(1 ϕ 0.5 HP)

(2) 3상 0.5마력 유도전동기

3상 유도전동기의 경우 교정실험과 부분방전실험은 유도전동기 Y 결선의 중성점과 외함 사이에서 실시한다. 이는 단상 유도전동기와는 다르게 한번의 실험으로 고정자권선 및 각 상에 대한 절연평가가 가능하기 때문이다.

1 ~ 50 pC의 교정펄스에 대한 교정실험결과를 그래프로 나타내면 그림 4.7과 같이 얻어지는데 전구간에서 선형적인 특성을 나타내며 검출감도는 16.0 mV/pC로 산출되었다. 정극성 및 부극성 교정펄스에 대해서는 동일하게 측정되었으며, 그림 4.8에는 1 pC과 10 pC에 대한 응답전압 파형의 예를 나타낸 것으로 각각 16.2 mV, 161 mV로 측정되었다.

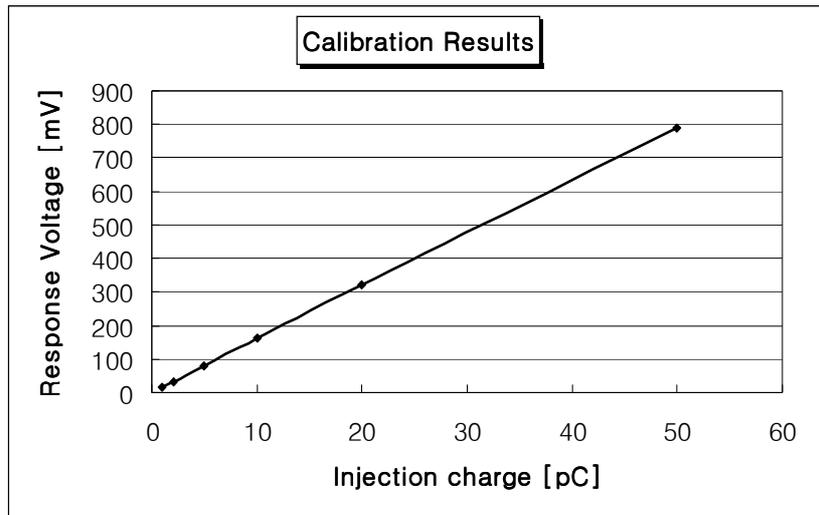
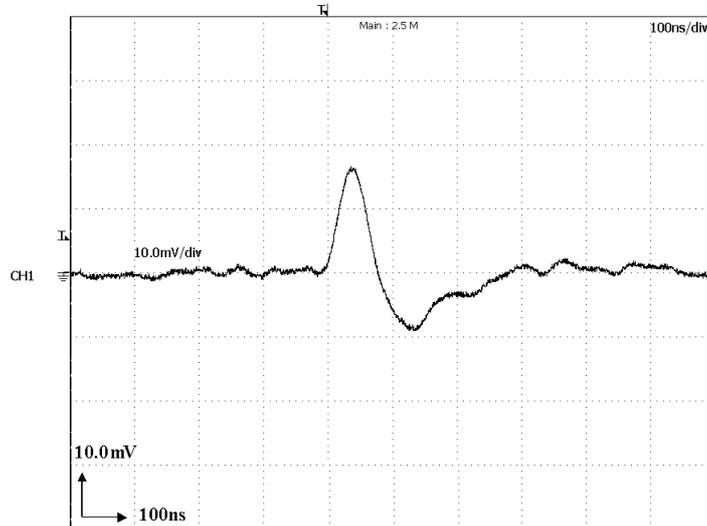
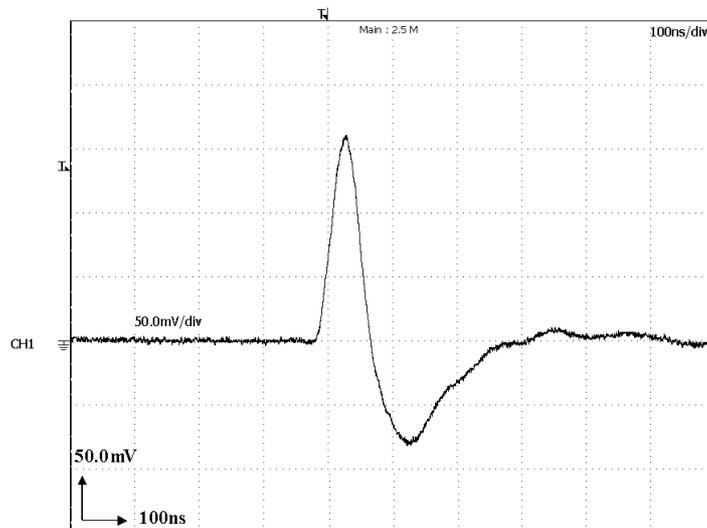


그림 4.7 교정펄스-응답전압의 관계(3 ϕ 0.5 HP)

Fig. 4.7 Relationship of calibration pulses-response voltages(3 ϕ 0.5 HP)



(a) 1 pC

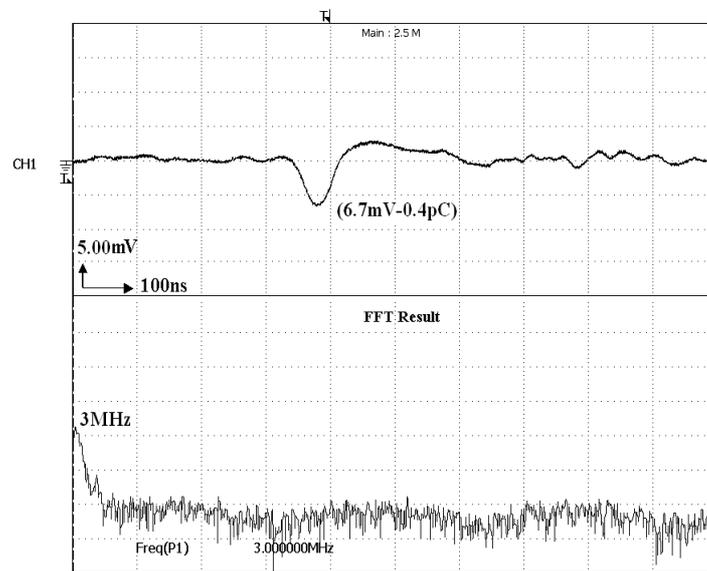


(b) 10 pC

그림 4.8 교정펄스에 대한 응답 파형(3 ϕ 0.5 HP)

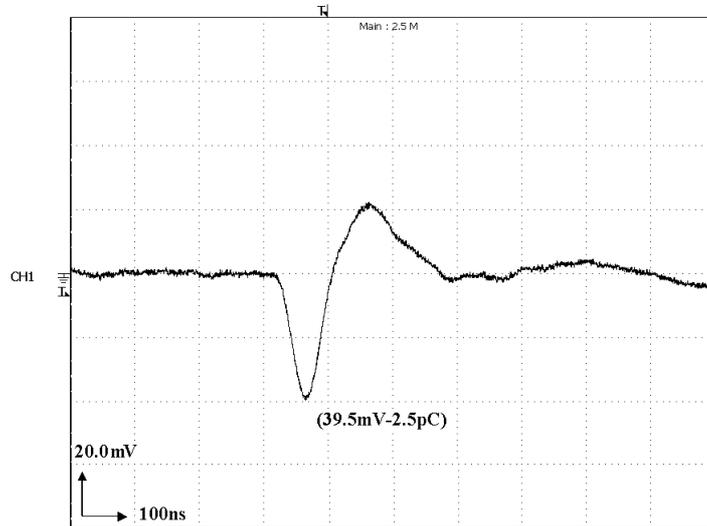
Fig. 4.8 Response waveforms to calibration pulses(3 ϕ 0.5 HP)

시험전압 인가시 최초 검출된 파형은 그림 4.9와 같이 1,180 V_{peak}에서 6.7 mV로 약 0.41 pC이 측정되었으며, 측정된 방전신호의 주요 주파수는 3 MHz로 나타났다. 인가전압을 서서히 상승시키면 1,300 V_{peak}에서 그림 4.10과 같이 약 2.5 pC이 검출되었으며, 1,500 V_{peak}에서는 107 pC으로 급격히 증가하는 경향을 나타내었다.

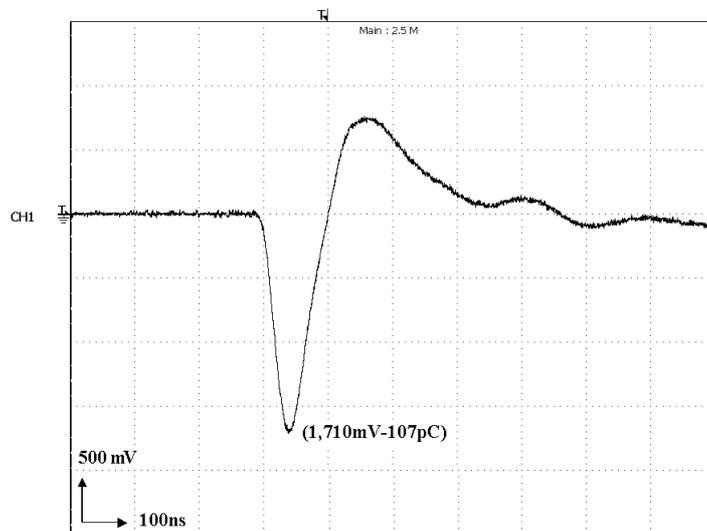


상 : 부분방전 파형
하 : FFT 분석

그림 4.9 부분방전 파형과 FFT 분석(3 ϕ 0.5 HP)
Fig. 4.9 PD waveform and its FFT analysis(3 ϕ 0.5 HP)



(a) 2.5 pC



(b) 107 pC

그림 4.10 부분방전 파형의 예(3 ϕ 0.5 HP)

Fig. 4.10 Typical PD waveforms(3 ϕ 0.5 HP)

(3) 3상 1마력 유도전동기

3상 1마력 유도전동기의 경우도 동일한 조건에서 교정실험 수행 후 교류시험전압을 인가하여 부분방전 신호를 측정하였다. 교정실험결과 검출감도는 15.1 mV/pC으로 얻어졌으며, 각 전하량에 대한 응답전압의 그래프는 그림 4.11과 같이 전구간에서 선형적으로 얻어진다. 1 pC, 10 pC에 대한 교정펄스는 그림 4.12와 같이 15.4 mV, 151 mV로 측정되었으며, 정극성 및 부극성에 대한 출력전압 역시 동일하게 나타났다. 3상 1마력 유도전동기의 경우도 검출감도는 전동기의 정전용량에 비례하여 감소하였다.

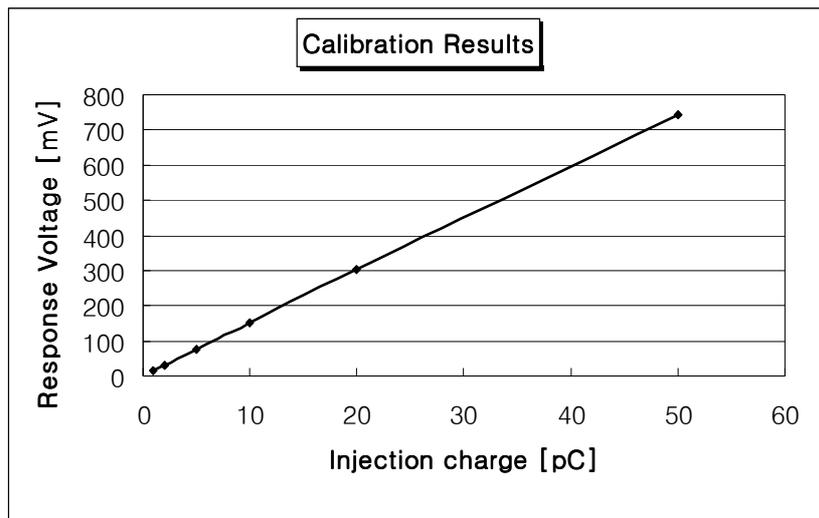
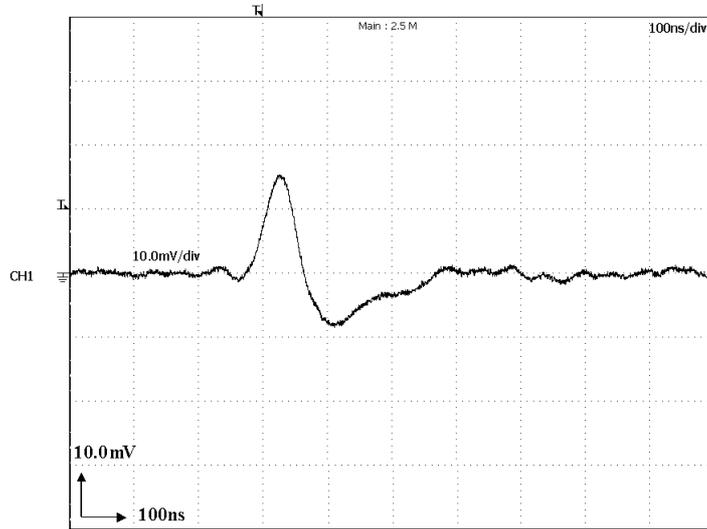
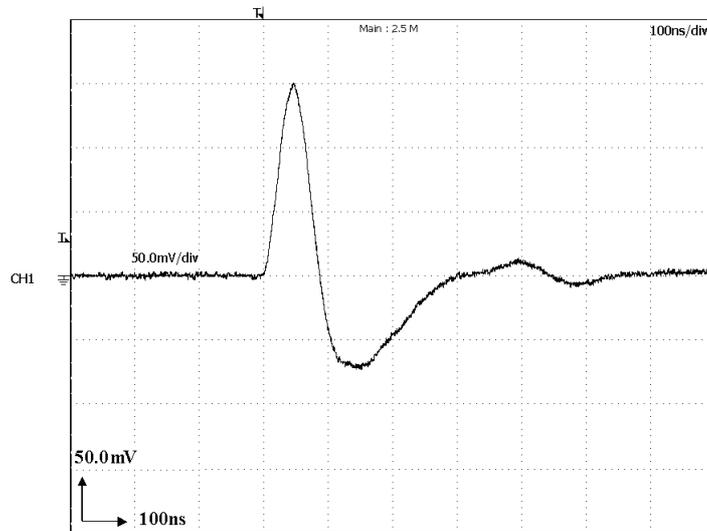


그림 4.11 교정펄스-응답전압의 관계(3 ϕ 1 HP)

Fig. 4.11 Relationship of calibration pulses-response voltages(3 ϕ 1 HP)



(a) 1 pC

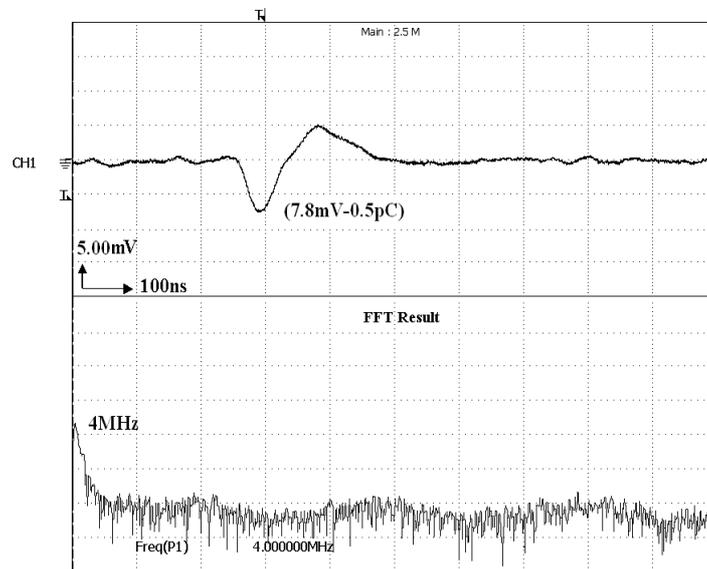


(c) 10 pC

그림 4.12 교정펄스에 대한 응답 파형(3 ϕ 1 HP)

Fig. 4.12 Response waveforms to calibration pulses(3 ϕ 1 HP)

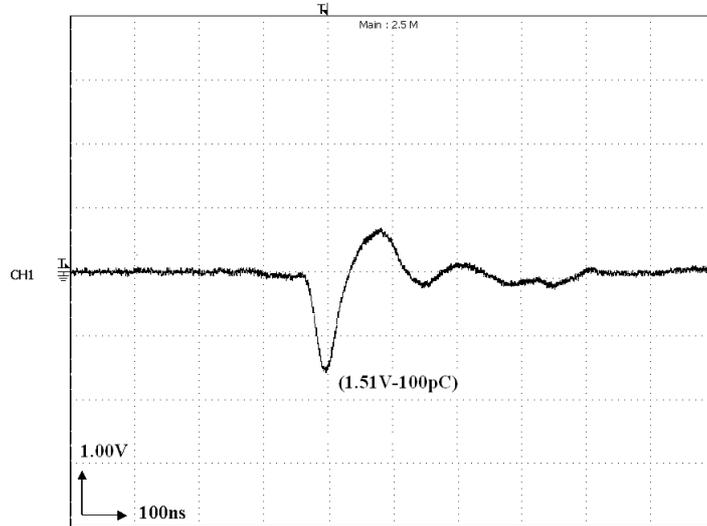
시험전압 인가시 최초 검출된 부분방전 파형은 1,200 V_{peak}에서 그림 4.13과 같이 7.8 mV로 0.52 pC이 검출되었다. 검출된 부분방전 신호의 주요 주파수는 4 MHz로 나타났다. 인가전압 상승시 1,400 V_{peak}에서 그림 4.14와 같이 100 pC으로 급격하게 증가하며 지속적으로 나타났다. 1,500 V_{peak} 인가시에는 170 pC의 방전펄스가 발생하였다.



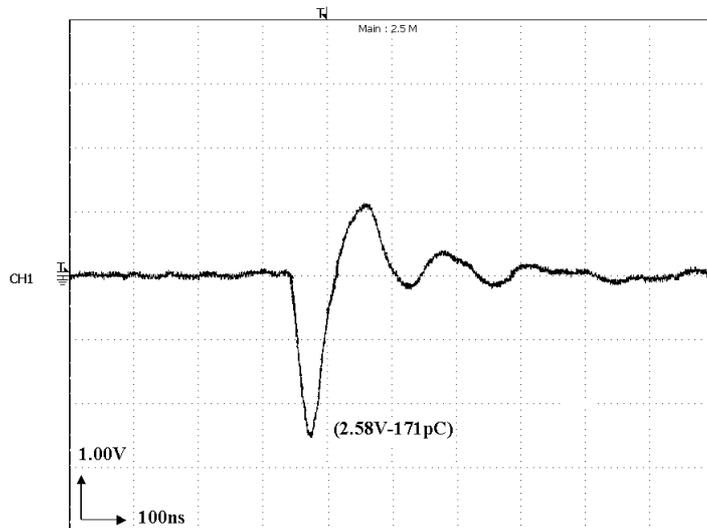
상 : 부분방전 파형
하 : FFT 분석

그림 4.13 부분방전 파형과 FFT 분석(3 ϕ 1 HP)

Fig. 4.13 PD waveform and its FFT analysis(3 ϕ 1 HP)



(a) 100 pC



(b) 171 pC

그림 4.14 부분방전 파형의 예(3 ϕ 1 HP)
 Fig. 4.14 Typical PD waveforms(3 ϕ 1 HP)

(4) 3상 5마력 유도전동기

교정실험결과는 그림 4.15와 같이 각 전하량에 대하여 선형적으로 나타나며, 검출감도는 11.4 mV/pC으로 단상 유도전동기와 비교하면 약 2배 정도 작게 나타난다. 그림 4.16에는 1 pC, 10 pC 교정전하 주입시 측정된 파형을 나타낸 것으로 출력전압 값은 각각 12 mV, 113 mV이었다.

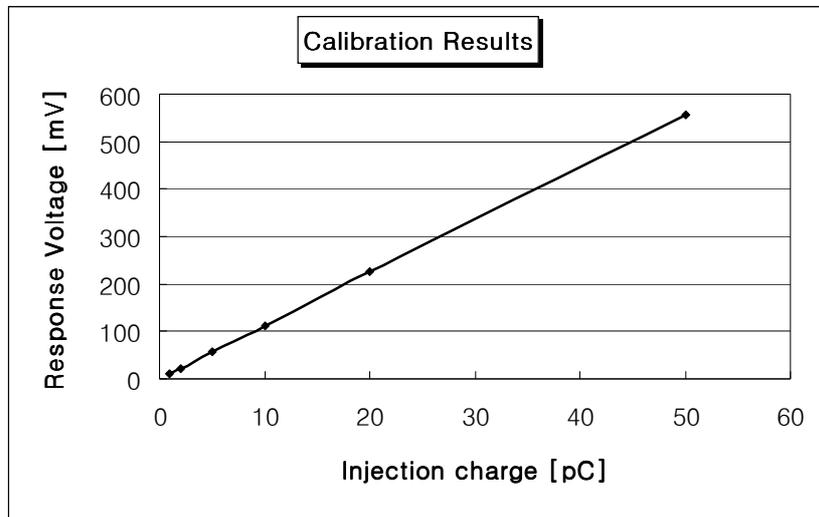
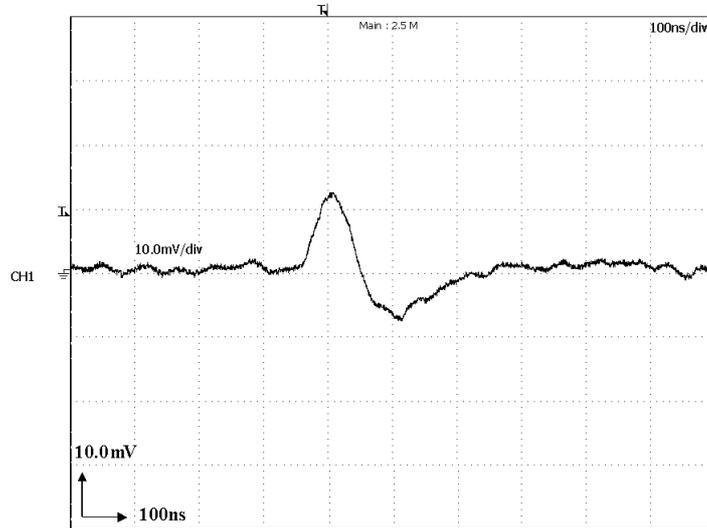
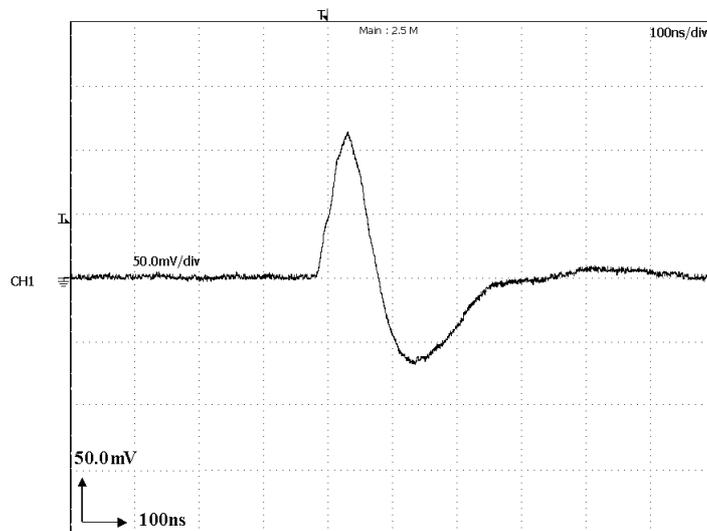


그림 4.15 교정펄스-응답전압의 관계(3 ϕ 5 HP)

Fig. 4.15 Relationship of calibration pulses-response voltages(3 ϕ 5 HP)



(a) 1 pC

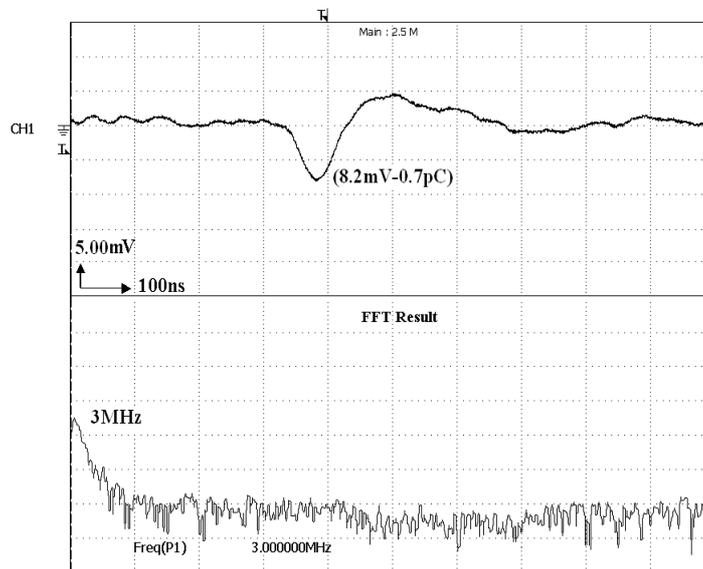


(b) 10 pC

그림 4.16 교정펄스에 대한 응답 파형(3 ϕ 5 HP)

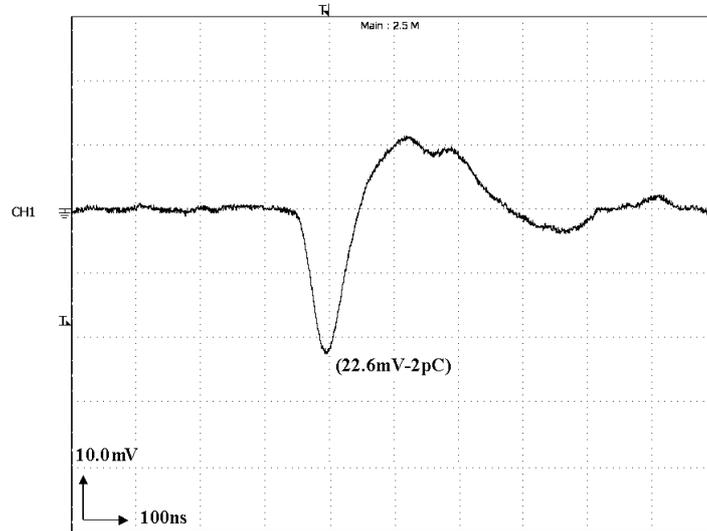
Fig. 4.16 Response waveforms to calibration pulses(3 ϕ 5 HP)

부분방전 측정결과 최초로 검출된 파형은 $664 V_{peak}$ 에서 그림 4.17과 같이 $0.7 pC$ 이 측정되었다. 검출된 부분방전 신호의 주요 주파수는 $3 MHz$ 로 나타났다. 인가전압을 서서히 상승시키면 $900 V_{peak}$ 에서 $22.6 mV$ 로 약 $2 pC$ 으로 산출되었고 $1,500 V_{peak}$ 이하에서는 약 $5 pC$ 으로 다소 증가하는 추세를 나타내었다. 인가전압을 $1,500 V_{peak}$ 까지 증가시키면 그림 4.18(b)와 같이 최대 $160 pC$ 정도로 대단히 큰 방전이 발생하였다.

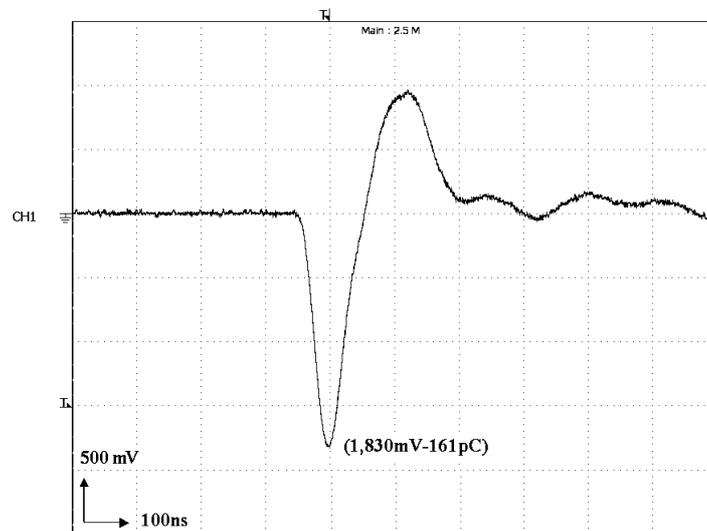


상 : 부분방전 파형
하 : FFT 분석

그림 4.17 부분방전 파형과 FFT 분석(3ϕ 5 HP)
Fig. 4.17 PD waveform and its FFT analysis(3ϕ 5 HP)



(a) 2 pC



(b) 160 pC

그림 4.18 부분방전 파형의 예(3 ϕ 5 HP)
 Fig. 4.18 Typical PD waveforms(3 ϕ 5 HP)

각 유도전동기에 대한 교정실험결과 검출감도는 그림 4.19와 같이 전동기의 정전용량에 반비례하여 3상 5마력 유도전동기에서 11.4 mV/pC으로 가장 작게 산출되었으며, 단상 0.5마력 유도전동기의 경우 22.3 mV/pC으로 가장 크게 산출되었다. 정극성 및 부극성의 교정펄스에 대해서는 동일하게 측정 되었으며, 1 ~ 50 pC의 교정펄스에 대해서는 전구간에서 선형적으로 나타났다. 교정실험에 의해 검출감도 산출 후, 시험전압을 인가하여 부분방전 측정결과 유도전동기에서 발생하는 부분방전 펄스의 주요 주파수는 3 ~ 6 MHz로 나타났으며, 3상 5마력 유도전동기의 경우 664 V_{peak}에서 0.7 pC이 측정되었다. 또한 각 유도전동기에 대해서도 1 pC이하의 미소부분방전을 측정하였다. 시험전압 증가시 1,300 V_{peak}이하에서는 다소 낮은 부분방전이 발생하였으나 1,400 ~ 1,600 V_{peak}에서는 100 pC 이상의 큰 방전이 지속적으로 나타났다. 즉, 일단 방전이 발생하면 전압 증가에 따라 방전전하량 및 발생빈도가 급격히 증가하여 단시간내에 절연파괴 사고로도달할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

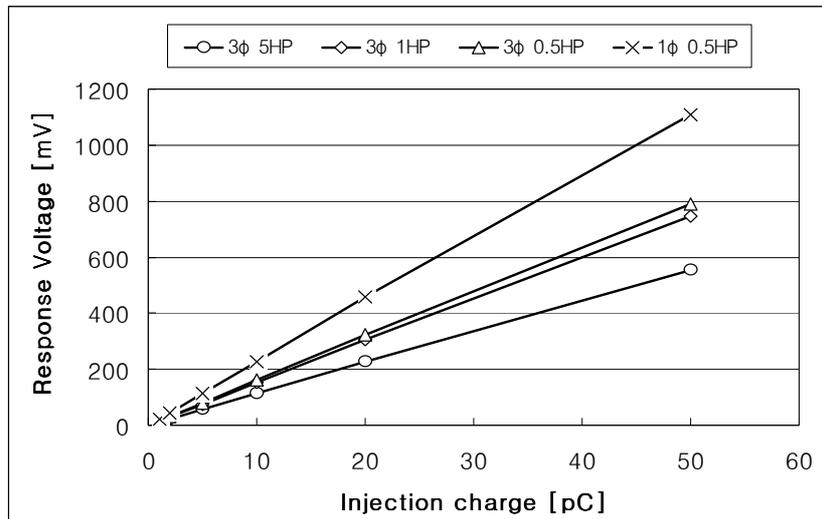


그림 4.19 교정실험결과
Fig. 4.19 Calibration test results

제 5 장 결 론

본 논문은 저압용 유도전동기에서 발생하는 미소부분방전의 측정기법에 관한 연구로, 1 pC 레벨의 방전펄스의 검출이 가능한 측정 시스템을 설계·제작하였으며, 세부적인 결론은 다음과 같다.

1. 부분방전 측정시스템은 교정펄스의 주파수, 인가전압의 크기 등을 고려하여 광대역 결합회로망과 저잡음 증폭회로로 구성되며, 잡음에 대한 영향을 최소화하기 위하여 모든 회로는 차폐함 내에 설치하였다.
2. 결합콘덴서 및 검출임피던스로 구성되는 결합회로망은 부분방전 시험전압인 60 Hz의 상용주파수 전압신호를 -270 dB로 완전히 차단하고, 저역측 차단주파수는 1 MHz로 측정 주파수대역 내에서 고주파 부분방전 신호만을 통과시키는 특성을 나타내었다.
3. 잡음에 대한 평가 결과, 잡음신호 레벨은 최대 3 mV_{p-p}로 전원필터 및 차폐함의 적용으로 외부잡음을 완전히 차단할 수 있었으며, 외부방전잡음의 경우 2 kV의 시험전압범위까지 측정시스템에서는 어떠한 방전도 발생하지 않았다.
4. 단상 및 3상 유도전동기를 대상으로 적용실험을 수행하였으며, 각 유도전동기에 대한 교정시험결과 검출감도는 3상 5마력 유도전동기에서 11.4 mV/pC, 단상 0.5마력 유도전동기의 경우 22.3 mV/pC으로 가장 크게 산출되었다. 1 ~ 50 pC의 교정펄스에 대해서는 전구간에서 선형적으로 나타났으며, 정·부극성 펄스에 대하여 동일하게 측정되었다.

5. 부분방전 실험결과 유도전동기에서 발생하는 부분방전 펄스의 주요 주파수는 3 ~ 6 MHz로 나타났으며, 3상 5마력 유도전동기의 경우 664 V_{peak}에서 0.7 pC의 부분방전펄스가 발생하였으며, 각 유도전동기에 대하여 1 pC이하의 미소부분방전을 측정하였다.

본 연구에서 제안한 미소부분방전 측정시스템은 잡음레벨을 고려할 경우 최소 0.5 pC 이하의 부분방전 검출 특성으로 가지므로 향후 저압용 유도전동기의 절연진단 및 품질관리를 위해 그 활용가치가 클 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] A. Mbaye, F. Grigorescu, T. Lebey and Bui Ai, "Existence of Partial Discharges in Low-voltage Induction Machines Supplied by PWM Drives" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 3, No. 4, pp. 554~560, 1996.
- [2] C. Hudon, N. Amyot, T. Lebey, P. Castelan and N. Kandev, "Testing of Low-voltage Motor Turn Insulation Intended for Pulse-Width Modulated Applications", IEE transactions dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, Issue. 6, pp.782~789, 2000.
- [3] M Kaufhold, "Failure mechanism of the interturn Insulation of low Voltage Electric Machines Fed by Pulse-Controlled Inverters" Vol. 12. No. 5, pp. 9~16, 1996.
- [4] Christopher J Melhorn and Le Tang, "Transient Effect of PWM Drives on Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, pp. 1065~1072, 1997.
- [5] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin and G. C. Montanari "Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part2: Identification of Defects in Solid Insulation Systems" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 3, pp. 527~538, 2003.
- [6] Martin Kaufhold, Herbert Auinger, Matthias Berth, Joachim Speck, and Martin Eberhardt, "Electrical Stress and Failure Mechanism of the Winding Insulation in PWM-Inverter-Fed Low-Voltage Induction Motors", IEEE Transactions on Insulation Electrical Vol. 47, No. 2, pp. 396~402, 2000.
- [7] R. M. Eichhorn, "Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insolation, Vol. E I-12, No. 1, pp. 2~18, 1976.
- [8] IEC Publication 60950-1, Information technology equipment-Safety- Part 1: General requirements, 2001.

- [9] IEC Publication 60664-1, Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 1 : Principles, requirements and tests, 2002.
- [10] T. Okamoto and T. Tanaka, "Novel Partial Discharge Measurement Computer-Aided Measurement System", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 21, pp. 1015~1019, 1986.
- [11] A. Kelen and M. G. Danikas, "Evidence and Presumption in PD Diagnostics", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp. 780~795, 1994.
- [12] L. A. Dissado, S. J. Dodd, J. V. Champion, P. I. Willians 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.
- [13] 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.
- [14] A. Wilson, R. j. Jackson and N. Wang, "Discharge Detection Techniques for Stator Windings", IEE Proceedings-B, Vol. 132-B, pp. 234~244, 1985.
- [15] B. K. Gupta, G. C. Stone, H. G. Sedding and G. J. Anders, "Techniques for Assessing the Condition of Stator Insulation", Ontario Hydro Research Review, No. 6, pp. 10~17, 1992.
- [16] J. A. Oliver, G.C. Stone, "Implications for the Application of Adjustable Speed Drive Electronics to Motor Stator Winding Insulation," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 4, pp. 32~36, 1995.
- [17] Hamid, Toliyat and Thomas A. Lipo, "Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, Rotor Bar and End Ring Faults", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, pp. 241~247, 1995.
- [18] Hiroshi Hata, Takashi Maeda and Naoto Tagawa, "Improvement of Insulation Tests for traction Motors" QR of RTRI, Vol. 38, No. 1, pp. 31~35, 1997.
- [19] Joseph A. Leoni, "Electrical Rotating Apparatus Testing", Baker Instrument Company, 2003.

- [20] A. Lapp and H. G. Kranz, "The Use of CIGRE Data Form at for PD Diagnosis Application", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp. 102~112, 2000.
- [21] W. Hutter, "Partial Discharge - Part XII : Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 4, pp. 25~31, 1992.
- [22] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin and G. C. Montanari "Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part2: Identification of Defects in Solid Insulation Systems" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 3, pp.527~538, 2003.
- [23] B. Fruth and L. Niemeyer, "The Importance of Statistical Characteristics of Partial Discharge", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 2, pp.59~70, 2000.
- [24] U. Bammert and M. Beyer, "Partial Discharges Measured with an Automated System in Epoxy Resin and Polyethylene", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 2, pp. 215~225, 2000.
- [25] 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.
- [26] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworth, pp. 15~104, 1989.
- [27] 송재용, 서황동, 길경석, 한문섭, 장동욱 "고압 CV케이블에서의 부분방전 측정과 위치검출에 관한 연구" 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, p. 190, 2005. 5.
- [28] 길경석, 송재용, 서황동, 황돈하, 강동식, 김용주 "저압 유도전동기에서 미소 부분방전 측정에 관한 연구" 전기전자재료학회 논문지 제18권 제10호, pp. 960~964, 2005.
- [29] 서황동, 송재용, 문승보, 길경석, 권장우, "극미소 부분방전 측정시스템의 설계 및 제작" 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 9, No. 2, pp. 208~221, 2005. 11.
- [30] IEC Publication 60270, High-voltage test techniques-Partial discharge measurement, 2000.

연구논문 발표실적

◎ 국내전문 학술지

- [1] “피뢰기 진단기술 및 장치 개발”, 대한전기학회 논문지, Vol. 53C, No. 11, pp. 572~576, 2004. 11
- [2] “변전소내 정보기기에서 서지의 측정과 분석”, 한국해양정보통신학회 논문지, Vol. 9, No. 2, pp. 289~294, 2005. 4.
- [3] “Measurement Method of the Resistive Leakage Current for Lightning Arrester Diagnosis”, Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 6, No. 2, pp. 63~66, 2005. 4.
- [4] “서지에 대한 누전차단기의 오동작 특성” 한국해양정보통신학회 논문지, Vol. 9, No. 3, pp. 570~575, 2005. 6.
- [5] “온도측정에 의한 산화아연형 피뢰기 진단”, 대한전기학회 논문지, Vol. 54C, No. 8, pp. 361~364, 2005. 8.
- [6] “저압 유도전동기에서 미소 부분방전 측정에 관한 연구”, 전기전자재료학회 논문지, Vol. 18, No. 10, pp. 960~964, 2005. 10.
- [7] “저압용 전열수구에서 방전신호의 발생과 검출에 관한 연구” 대한전기학회 논문지, Vol. 54C, No. 11, pp. 562~567, 2005. 11.

◎ 국내학술회의 논문집

- [1] “피뢰기 열화진단을 위한 저항분 누설전류의 새로운 검출기법” 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 73~75, 2004. 5.
- [2] “피뢰기 진단기술 및 장치 개발” 대한전기학회 부산울산경남지회 합동 춘계학술대회 논문집, pp. 215~217, 2004.5. 28
- [3] “변전소내 정보기기에서 서지의 측정과 분석”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 8, No. 2, pp. 147~150, 2004. 10.
- [4] “아발란치 다이오드의 서지응답 특성에 관한 연구”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 8, No. 2, pp. 156~159, 2004. 10.
- [5] “서지에 대한 누전차단기의 오동작 특성”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 8, No. 2, pp. 160~263, 2004. 10.

- [6] “고압 CV 케이블에서 부분방전 특성과 위치검출 방법에 관한 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, p. 190, 2005. 5.
- [7] “급전선로에 설치되어 있는 피뢰기의 누설전류 측정과 관리방안”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, p. 205~210, 2005. 5.
- [8] “저주파 구동형 집어등용 전자식 안정기 개발”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, 제9권, 제1호, pp. 273~276, 2005. 5
- [9] “국제규격 대응 컴퓨터 네트워크용 서지방호장치 개발에 관한 연구”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, Vol. 9, No. 1, pp. 277~280, 2005. 5.
- [10] “저압 유도전동기에서 발생하는 부분방전의 측정과 분석”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 165~167, 2005. 5.
- [11] “ZnO 피뢰기 소자의 누설전류-온도변화 분석”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 168~170, 2005. 5.
- [12] “전력선 통신기술을 이용한 조명제어 스위치의 개발”, 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, pp. 228~232, 2005. 6.
- [13] “선박 신호회로용 서지방호장치의 개발”, 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집 pp. 941~945, 2005. 6.
- [14] “선박 통신안테나용 뇌보호장치의 설계 및 제작”, 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, pp. 946~949, 2005. 6.
- [15] “열화된 저압용 콘센트에서 방전신호의 발생과 검출”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 9, No. 2, pp. 200~203, 2005. 11.
- [16] “극미소 부분방전 측정시스템의 설계 및 제작”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 9, No. 2, pp. 208~2211, 2005. 11.
- [17] “저압용 전기전자부품의 신뢰성 평가를 위한 부분방전 측정시스템에 관한 연구” 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 321~322, 2005. 11.
- [18] “전력케이블 진단을 위한 부분방전 검출장치의 설계 및 제작”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, p. 135, 2005. 11.

◎ 연구보고서

- [1] “저주파 구동형 집어등용전자식 안정기 개발”,
2004. 5~2005. 2, 산학연큰소사업
- [2] “정보시스템/기기용 국제 규격 대응 서지 방호장치 개발”,
2004. 6~2005. 6, 정보통신부
- [3] “초고속 Marx 발전기제작지원”,
2004. 8.~2004. 12, 태양엔지니어링
- [4] “전철용 피뢰기의 최적관리방안에 관한 연구”,
2004. 9~2004. 12, 한국철도기술연구원
- [5] “저압 인버터용 전동기 고정자 권선에서 미소부분방전 측정기법”,
2005. 1~2005. 10, 한국전기연구원
- [6] “철도용 고압배전 지중선로의 열화검출 적용방안 연구”,
2005. 3~2005. 11, 한국철도기술연구원
- [7] “GIS용 피뢰설비 열화감시시스템 개발”,
2005. 3~2007. 2, 산업자원부
- [8] “극미소 부분방전검출에 의한 전기전자기기의 신뢰성 평가 기술 개발”,
2005. 5~2008. 4, 산업기술재단

감사의 글

먼저 본 논문이 완성되기까지 학문에서뿐만 아니라 인생 전반에 걸쳐 아낌없는 지도와 조언으로 이끌어 주신 길경석 교수님께 머리 숙여 감사의 말씀을 올립니다. 그리고 보다 알찬 논문이 되도록 심사해주시고 지도해 주신 이성근 교수님, 서동환 교수님께 감사드리며, 학부 때부터 대학원 과정까지 많은 가르침을 주신 김윤식 교수님, 전태인 교수님, 장낙원 교수님께도 감사드립니다.

또한 본 연구는 한국산업기술재단 주관 지역혁신인력양성사업 지원으로 보다 나은 결과를 얻을 수 있었습니다. 이에 지면을 통해서나마 감사의 마음을 전합니다.

처음 연구실 식구가 되었을 때부터 지금까지 저를 이끌어 주고 도와주신 송재용 선배님, 언제나 따뜻한 관심과 배려를 보여주신 한주섭 박사님, 김일권 선배님께 감사드립니다. 바쁜 직장생활에도 불구하고 항상 격려해주신 천상규 선배님, 이종혁 선배님, 김명진 선배님, 먼저 사회에 첫발을 내딛은 학부 동기 원진이, 늘 함께 했던 대원이 그리고 문노형, 영진이형, 신광철 사장님, 한문섭 과장님께도 감사드리며, 연구실 막내로 굿은일 마다하지 않고 항상 열심히 생활하고 공부하고 있는 승보와 명수에게도 감사하는 마음을 전하고 싶습니다.

과제 수행 중에 많은 도움을 주셨던 신동아전기(주)의 배홍기 사장님을 비롯하여 홍경민 상무님, 이경수 차장님 그 외 모든 분들께 감사드립니다.

대학원 생활에서 희망과 꿈이라는 단어를 잊지 않도록 늘 저를 지탱해준 전기공학과 동기, 선후배님, 김미정 조교님을 비롯한 죽마고우 영호와 모든 친구들에게 고마움을 전합니다.

무엇보다 지금에 제가 있기까지 낳아주시고 길러주신 어머니와 언제나 든든한 버팀목이 되어주신 아버지의 헌신적인 희생으로 작으나마 오늘의 이러한 결실을 맺게 되어 깊은 감사를 드리며, 지속적인 관심과 응원을 보내준 동생 남동이와 윤옥이에게도 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로 항상 제 곁에서 묵묵히 지켜봐 주며 격려해 주고 힘이 되어준 은정이와 따뜻한 정으로 대해주신 어머니 외 그 가족 모두에게 감사드립니다.

감사합니다.

2005년 12월 서 황 동 드림