

工學博士 學位論文

저압용 전기전자기기의 절연성능 평가를
위한 부분방전시험에 관한 연구

A Study on the Partial Discharge Testing to Evaluate Insulation
Performance of Low-voltage Electrical and Electronic Devices

指導教授 吉 暲 碩

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

宋 在 鏞

목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	iii
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 내용	4
제 2 장 절연열화 및 평가기술	7
2.1 절연열화기구	7
2.2 절연평가기술	11
제 3 장 부분방전의 발생과 검출원리	22
3.1 부분방전의 발생	22
3.2 부분방전의 특성	31
3.3 부분방전의 검출원리	33

제 4 장	부분방전 측정시스템의 설계 및 제작	36
4.1	검출회로	37
4.2	차폐함	44
4.3	측정시스템의 평가	53
제 5 장	부분방전시험 및 분석	59
5.1	절연변압기	62
5.1.1	1차권선과 철심	62
5.1.2	1차권선과 2차권선	78
5.2	유도전동기	101
제 6 장	결 론	110
참 고 문 헌	113

그림 및 표 목차

<그림목차>

그림 2.1	직류전압에서 절연체의 I-t 특성	13
그림 2.2	교류전압에서 절연체의 I-V 특성	16
그림 2.3	절연체의 등가모델과 벡터도	18
그림 3.1	코로나 방전	23
그림 3.2	연면 방전	24
그림 3.3	내부 방전	25
그림 3.4	부분방전의 등가회로	26
그림 3.5	교류전압에서 부분방전 발생 패턴	27
그림 3.6	비대칭 보이드에서 부분방전의 발생	29
그림 3.7	보이드에서 방전 특성	31
그림 3.8	긴 공극과 경계면에서 방전 특성	32
그림 3.9	부분방전 검출의 개략도	33
그림 4.1	부분방전 측정시스템의 개략도	37
그림 4.2	부분방전 검출의 기본회로	38
그림 4.3	부분방전 검출회로	40
그림 4.4	결합회로망	42
그림 4.5	시제작 증폭회로	43
그림 4.6	외부 잡음의 종류	45
그림 4.7	차폐함의 개략도	47
그림 4.8	전원공급부의 구성	51
그림 4.9	고전압 필터	52
그림 4.10	부분방전 측정시스템의 사진	53
그림 4.11	결합콘덴서의 부분방전 평가	56
그림 4.12	결합회로망의 잡음 평가회로	56

그림 4.13	잡음레벨 평가	58
그림 5.1	교정방법	60
그림 5.2	1차권선과 철심사이에서 교정펄스에 대한 응답파형	63
그림 5.3	1차권선과 철심사이에서 교정펄스에 대한 응답전압	64
그림 5.4	내전압시험 전 1차권선과 철심사이에서 방전파형	65
그림 5.5	내전압시험 전 1차권선과 철심사이에서 방전전하량의 변화	67
그림 5.6	내전압시험 전 1차권선과 철심사이에서 방전전하량 분포	67
그림 5.7	내전압시험 후 1차권선과 철심사이에서 방전파형	69
그림 5.8	내전압시험 후 1차권선과 철심사이에서 방전전하량의 변화	70
그림 5.9	내전압시험 후 1차권선과 철심사이에서 방전전하량 분포	71
그림 5.10	1차권선과 철심사이에서 방전전하량 분포의 변화	72
그림 5.11	에이징 후 1차권선과 철심사이에서 방전파형	74
그림 5.12	1차권선과 철심사이에서 DIV와 DEV의 변화	75
그림 5.13	1차권선과 철심사이에서 부분방전 위상분포	76
그림 5.14	1차권선과 2차권선 사이에서 교정펄스에 대한 응답파형	78
그림 5.15	1차권선과 2차권선 사이에서 교정펄스에 대한 응답전압	79
그림 5.16	내전압시험 전 1차권선과 2차권선 사이에서 방전파형	81
그림 5.17	내전압시험 전 1차권선과 2차권선 사이에서 방전전하량의 변화	82
그림 5.18	내전압시험 전 1차권선과 2차권선 사이에서 방전전하량 분포	83
그림 5.19	내전압시험 후 1차권선과 2차권선 사이에서 방전파형	85
그림 5.20	내전압시험 후 1차권선과 2차권선 사이에서 방전전하량 분포	86
그림 5.21	1차권선과 2차권선 사이에서 방전전하량 분포의 변화	87
그림 5.22	1차권선과 2차권선 사이에서 DIV와 DEV의 변화	88
그림 5.23	에이징 후 1차권선과 2차권선 사이에서 방전파형	89
그림 5.24	내전압시험 후 1차권선과 2차권선 사이에서 부분방전 위상분포	91
그림 5.25	에이징 후 1차권선과 2차권선 사이에서 부분방전 위상분포	93
그림 5.26	방전개시전압과 방전전하량의 변화	96

그림 5.27	방전전하량의 변화	98
그림 5.28	에이징 후 방전전하량의 변화	100
그림 5.29	교정펄스에 대한 응답파형	102
그림 5.30	교정펄스에 대한 응답전압	103
그림 5.31	부분방전 파형의 예	104
그림 5.32	방전전하량의 변화	106

<표 목 차>

표 2.1	절연체의 열화	8
표 2.2	절연 시험법의 분류	12
표 3.1	방전펄스의 위상분포 패턴	30
표 4.1	결합콘덴서의 전기적 사양	41
표 5.1	교정기의 사양	60
표 5.2	내전압시험 전 1차권선과 철심사이에서 부분방전 시험결과	66
표 5.3	내전압시험 후 1차권선과 철심사이에서 부분방전 시험결과	70
표 5.4	내전압시험 전 1차권선과 2차권선 사이에서 부분방전 시험결과	82
표 5.5	부분방전 시험결과	105

**A Study on the Partial Discharge Testing to Evaluate Insulation
Performance of Low-voltage Electrical and Electronic Devices**

by Jae-Yong, Song

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

Abstract

This dissertation deals with the application of partial discharge (PD) test on low-voltage electrical and electronic devices, which is recently being accepted as a non-destructive and an effective dielectric test method. The withstand voltage test (WVT) on low-voltage electrical and electronic devices may cause degradation of insulation performance by applying the test voltage.

However, the PD test does not occur insulation degradation of the device under test because it is carried out at a relatively low AC voltage compare to that of WVT. The PD test also provides much more detailed information about the insulation such as proper fabrication of the insulation system, selection of materials, and precise manufacturing of any piece.

Occurrence and characteristics of PD were studied in solid insulation system, and a PD measurement system which can detect charges below 1 pC was fabricated. PD pulse detection was performed by a coupling network with a discharge free capacitor and a RLC detection impedance. The low cut-off frequency of the detection circuit was set at 1 MHz (-3 dB) to attenuate AC voltage by 270 dB and to pass discharge pulses without any distortion. A low noise wide-band amplifier having a gain of 40 dB was designed since the magnitude of PD pulse propagated to the detection circuit was as low as the order of μV .

A shielding enclosure of a Ni-Cu double structure and a HV filter with a high cut-off frequency of 3.5 kHz was designed to get a better measuring condition against radiation and conduction noises from the outside.

The PD measurement system was evaluated to noise interference because the maximum sensitivity of the system depends on noise level, and the peak noise level appeared $3 \text{ mV}_{\text{D-P}}$. Calibration to calculate the sensitivity of the PD measurement system was performed according to the IEC standard on low-voltage insulation transformers and induction motors. The sensitivities in them were 38.4 mV/pC and 11.4 mV/pC, respectively. The system is possible to measure apparent charge of 0.2 pC in the transformers and 0.5 pC in the motors considering the noise level.

Comparative experiment combined with the WVT was carried out on the transformers and the induction motors to propose a PD test

requirement for low-voltage electrical and electronic devices. Discharge inception voltage (DIV), discharge extinction voltage (DEV), apparent charge, and phase distribution of PD pulses were analyzed in the experiment.

The results showed a decrease in DIV, DEV and an increase in apparent charge, and demonstrated that degradation of insulation proceeded during the WVT and aging. Also, no changes in PD parameters appeared up to 70 % of the test voltage specified in the WVT. Therefore the PD test for the types of transformers can be completed under 70 % of the test voltage by measuring apparent charges below 1 pC.

As a replacement of the WVT for low-voltage electrical and electronic devices, the PD test requirement can be standardized through the same procedure proposed in this dissertation. However, the PD test should be performed in ranges from 30 % to 50 % of the test voltage not to make any degradation of insulation during the test.

The PD test that can measure apparent charges of 0.1 pC order is expected to be widely used electronic components with short dielectric distance such as photo-couplers, ICs, and PCBs.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

절연 시스템에 사용된 절연재료의 특성이 우수하고 최적의 절연 설계가 행해졌다고 하더라도 전기설비 및 전기기기의 운전 중에 나타나는 내적·외적 요인들에 의하여 절연열화가 진행되며, 설계단계에서 고려된 기대수명을 다하지 못하고 절연파괴에 이르게 된다^{[1]~[5]}. 이들 기기에 절연파괴가 발생하면 기능을 상실하여 사회적·경제적으로 큰 손실을 유발하게 된다. 이러한 사고를 방지하고 최적의 유지·보수에 의한 경제적 전기설비의 운용을 위해서는 생산초기단계부터 정확한 절연성능 평가가 이루어져야 한다^{[6]~[8]}.

현재까지 절연열화와 평가기술에 대한 연구는 주로 고전압 전력설비를 대상으로 한 것이 대부분이다. 특히 고압기기는 생산단계에서부터 절연저항의 측정, 유전정접시험, 부분방전시험, 직류누설전류시험 등 다양한 절연평가 기술이 적용되고 있으며, 이 중에는 온라인 상태에서 절연 진단이 가능한 평가기술도 있다. 그러나 저압용 전기전자기기의 경우에는 아직까지 절연파괴 과정의 규명작업이나 절연평가 기술 등에 대한 연구는 미진한 실정이며, 주로 고압 기기에서 사용되는 기법을 그대로 따르고 있다. 뿐만 아니라 생산단계에서는 단순한 절연저항시험이나 내전압시험 등 기기의 절연성능에 직접적인 영향을 주는 시험법을 적용하고 있다. 일부 규격에서 부분방전시험법에 대한 규정을 두고는 있지만 구체적인 시험방법 및 판단기준은 제시하지 못하고 있는 실정이다^{[9]~[12]}.

이와 더불어 최근 마이크로프로세서와 디지털 제어기법의 도입, 전력용 반도체 소자의 진보에 따라 유도전동기 등에 가변속 제어시스템의 응용분야가 크게 확대되고 있다. 특히 FET (Field Effect Transistor)와 IGBT (Insulated Gate Bi-polar Transistor) 등의 고속 스위칭 소자를 내장한 속도 제어기를 사용함에 따라 저압용 전기전자기기에서 μs 당 최고 수 천 V의 과도전압을 발생시킬 수 있다^{[13]~[15]}. 저압용 전기전자기기에서의 과도전압은 절연재료의 조기 열화와 불규칙한 전압분포를 야기시켜 국부적인 부분방전을 일으키고, 최종적으로 절연파괴에 이르게 된다^{[16]~[18]}.

저압용 전기전자기기의 절연열화를 유발하는 요인으로는 기계적, 전기적, 열적, 화학적 원인의 스트레스가 복합적으로 작용하는 것으로 알려져 있다^{[19]~[21]}. 특히 전기적 절연은 기기가 수명을 다하는 시점까지 안정적으로 유지되어야 하기 때문에 절연체의 두께를 0.4 ~ 2 mm로 규정하고 있다^{[22]~[24]}. 그러나 대부분의 경우, 기기의 소형화를 위하여 절연물의 두께를 최소화하는 방식으로 기기의 제작이 이루어지고 있기 때문에 절연물 내에 보이드가 존재하거나 비정상적인 전계분포가 형성되면 절연체의 역할을 수행하지 못하고 절연파괴에 이르는 경우가 많다. 유도전동기나 절연변압기 등은 철심 구조물에 권선을 감아놓은 형태로 절연물을 최대한 얇게 하면서 여러 단의 적층구조로 이루어진다. 이러한 경우에는 외부로부터의 기계적 진동 등에 의해 절연물에 손상이 발생하게 되며, 여기에 열적, 전기적 스트레스가 가해지면 절연파괴로 이어지는 경우가 빈번히 발생한다. 현재까지는 이러한 문제를 해결하기 위하여 절연물을 대체 보강하거나 외부의 스위칭 서지 및 노이즈 등을 저감시키기 위한 필터의 설치 연구되어 왔으며^{[25],[26]}, 최근에는 생산단계부터 품질관리의 강화로 불량품의 출고를 차단하는 방식으로 전환되고 있다.

고체절연체의 제조과정에서는 보이드와 같은 결함이 발생하게 되는데 보이드의 크기와 형상 등에 따라 절연 수명이 크게 달라진다. 절연체에 보이드와 같은 결함이 존재하면 정상상태에서 결함내에 전계가 집중되는 현상이 발생하고, 이때 결함내에서는 국부적인 불꽃방전이 발생한다. 이러한 국부적인 불꽃방전을 부분방전으로 정의하며, 결함의 상태에 따라 방전의 크기 및 발생빈도 등이 달라진다. 따라서 절연물의 상태를 평가하는 여러 가지 방법 중에서도 결함의 종류나 상태에 대한 구체적인 정보를 얻을 수 있는 부분방전시험법이 절연평가 기법으로 가장 선호되고 있는 추세이다^{[27]~[32]}. 그러나 부분방전시험법은 방전펄스가 대단히 작고, 외부로부터의 잡음 등에 대한 영향을 받기 쉬우므로 이에 대한 측정기술이 선행되어야 한다.

부분방전시험법은 시험방법에 따라 온라인 시험법과 오프라인 시험법이 있다. 온라인 시험법은 전력기기의 운전에 지장을 주지 않고 열화진단을 실시간으로 행할 수 있는 장점 등으로 인하여 현재 국내외에서 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 온라인 시험법에서는 주위 환경에 대한 영향이 크고 외부로부터 발생하는 잡음에 대한 제거가 쉽지 않기 때문에 잡음 억제 대책과 측정조건에 대한 충분한 자료가 필요하다.

오프라인 시험법은 부분방전의 측정을 위하여 기기의 운전을 중단하여야 하므로 정전시켜야 하는 가장 큰 단점이 있다. 그러나 적당한 시험전압을 피시험체에 인가함으로써 결함에서 발생하는 부분방전의 전압의존성이나 시간의존성 등을 고려할 수 있으므로 정밀진단이 가능하고, 실험실 수준의 시험이 가능하기 때문에 잡음제거가 용이하므로 부분방전시험법에 의한 결함의 식별이나 절연평가의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

특히 저압용 전기전자기기의 경우에는 기기 자체가 소형이고, 접속 단자 등을 기기 내부에 내장하고 있는 경우가 대부분이므로 온라인으로 부

분방전을 검출하기는 곤란하며, 주변 기기들의 영향에 대한 충분한 측정 자료가 없기 때문에 외부 잡음을 완전히 차단하는 방식으로 오프라인 시험법을 통해 초기 절연성능에 대한 정확한 평가를 수행하는 것이 바람직하다.

부분방전 검출에서는 외부 잡음에 대한 영향이 크기 때문에 잡음제거를 위한 적절한 대책이 필요하며, 저압용 전기전자기기에서 발생하는 방전신호는 고압 기기에 비해 미소한 크기로 나타나므로 저잡음 고감도의 증폭회로를 고려해야 한다. 또한 기존의 내전압시험과는 달리 절연체에 영향을 주지 않는 범위에서 부분방전시험을 수행하는 것이 필요하다.

1.2 연구목적 및 내용

본 연구의 목적은 저압용 전기전자기기의 절연성능 평가를 위한 부분방전시험의 적용에 관한 것으로, 이를 위하여 절연체의 절연열화 메커니즘을 분석하고, 절연성능 평가기술을 비교 검토하여 피시험체에 영향을 주지 않는 부분방전 측정시스템의 개발과 시험법을 제안하였다.

본 연구에서는 유도전동기, 절연변압기 등 저압용 전기전자기기를 대상으로 절연성능 평가에 부분방전시험법을 적용하였으며, 정확한 부분방전 측정을 위하여 외부 잡음 차단을 위한 잡음대책 연구, 미소 방전펄스 검출을 위한 결합회로망의 설계 및 제작, 검출된 방전펄스의 증폭을 위한 저잡음 증폭회로의 설계를 통하여 부분방전 측정시스템을 구성하였다. 검출회로는 임피던스 결합에 의한 전기적 측정방식을 적용하였으며, 정확한 방전펄스 검출을 위하여 외부 잡음에 대한 원인을 분석하고 효과적인 억제대책을 마련하였다.

최종적으로 구성된 부분방전 측정시스템을 이용하여 저압용 전기전자기기를 대상으로 부분방전시험을 수행하였으며, 시험 중 외부 잡음의 차

단을 위하여 차폐함을 제작하고, 검출회로를 차폐함내에 설치함으로써 외부로부터의 방사 잡음을 차단하였다. 여기에 전도잡음에 대한 대책으로 전원공급부 인입단에 NCT (Noise Cut Transformer), 출력측에 고전압필터를 적용함으로써 보다 효과적인 잡음 억제가 가능하였다. 교류시험전압을 인가하여 부분방전 펄스를 검출하였으며, 이때 방전개시전압과 방전소멸전압, 방전전하량에 대한 분석을 통해 피시험체의 절연성능에 대한 평가를 수행하였다. 저압용 전기전자기기에서 1차적으로 부분방전시험을 통하여 방전 파라미터를 얻어내고, 이후 국내외 규격을 근거로 내전압시험을 실시하였으며, 내전압시험 실시 후에는 다시 방전 파라미터를 측정하였다. 시험전후 방전 파라미터의 변화를 분석함으로써 내전압시험에 의한 절연성능 저하를 평가하였으며, 저압용 전기전자기기의 절연 평가에 적용할 수 있는 부분방전시험 적용 방안을 도출하였다.

본 연구에서 제시한 부분방전시험법은 시험대상 및 현장조건에 따라 달라질 수 있지만, 제시한 시험법을 그대로 적용하면 절연상태에 대한 충분한 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 정확한 부분방전펄스 검출을 위해서는 시료의 정전용량 값을 미리 측정하거나 시험대상이 바뀔 때마다 전용의 교정기로 정확한 교정평가를 수행해야 하며, 외부 잡음에 대한 효과적인 억제대책이 선행된다면 시험대상의 종류에 상관없이 광범위하게 적용하는 것이 가능하다.

본 연구를 통해 얻어진 실험결과로부터 저압용 전기전자기기에 부분방전시험법을 적용하기 위해서는 가능한 낮은 전압에서 1 pC 레벨의 방전전하량을 측정하는 것이 필수적이다. 부분방전시험에 의한 절연평가 기술은 피시험체의 절연 저하를 촉진시키지 않고 절연재료의 선정, 절연구조와 제조상 결함 등 다양한 정보를 얻을 수 있다. 이와 더불어 저압용 전기전자기기의 생산단계 초기에서부터 품질관리를 위한 측정시스템으로 활용

가능하며, 내전압시험과는 달리 시험대상의 절연성능에 영향을 주지 않으므로 불량률 저감의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 아직까지 저압용 전기전자기기를 대상으로 한 부분방전시험법에 대하여 명확하게 규정하고 있는 국내외 규격이 없으므로 본 연구의 결과는 저압용 전기전자기기에 부분방전시험법을 적용하기 위한 자료로 충분히 활용될 수 있을 것이다.

제 2 장 절연열화 및 평가기술

2.1 절연열화기구

절연체 내부에 보이드, 전기트리, 표면 오손 등의 결함이 존재하게 되면 전계가 집중되고 자체의 절연내력이 상대적으로 약화되어 결함에서 부분방전이 발생한다. 이러한 부분방전의 발생이 지속되면 절연성능이 더욱 약화되어 결과적으로 절연파괴를 초래하게 된다.

절연체의 절연열화 요인으로는 열적 요인, 전기적 요인, 기계적 요인 및 환경적 요인 등이 있으며, 이에 의한 열화발생과 진전기구는 절연방식, 절연재료, 전기기기 등의 종류 및 용량에 따라 달라진다.

변압기, 개폐기, 케이블 등은 과부하시 과전류에 의한 열적 열화와 이상전압 등에 의한 전기적 열화가 주된 절연열화 요인이지만, 발전기나 전동기 등 회전기의 절연열화는 기동 및 정지시의 전자력이나 운전시의 진동 등 기계적 스트레스에 의한 열화의 영향이 크다. 따라서 절연열화의 발생 및 진전기구를 명확하게 파악하기 위해서는 각각의 기기별로 운전 실적이나 사용 환경 및 절연시스템의 특성 등을 검토하여야 한다.

절연체의 절연열화는 위에서 언급한 각각의 열화요인이 단독적으로 작용하는 경우보다는 복합적으로 작용하여 열화가 진행되는 경우가 많기 때문에 복합적인 열화요인으로써 열화특성을 검토할 필요가 있다.

표 2.1에는 고체 절연체의 일반적인 열화요인과 열화현상을 개략적으로 나타내었다^{[33]~[37]}.

표 2.1 절연체의 열화

Table 2.1 Degradation of dielectric materials

열화요인		열화현상
열적 스트레스	연 속	화학적 변질
	주기적	박리, 균열, 마찰
전기적 스트레스	정격전압	부분방전, 침식, 트래킹
	이상전압	전기트리
기계적 스트레스	급 힘	박리, 균열
	진 동	마모
	충 격	박리, 균열
수 분	흡 습	누설전류 증대, 트래킹
	결 로	
	침 수	
오 손	도전물질	누설전류 증대, 트래킹,
	약 품	화학적 변질

절연체의 열적 열화는 운전 중에 발생하는 온도상승에 의한 경우가 대부분이며, 절연재료의 내열성이나 온도상승률 등에 의하여 열화 정도가 달라진다. 일시적인 과부하 등에 의한 급격한 온도상승은 열적 열화를 촉진하는 원인이 된다. 열적 열화에 의하여 절연체 내부에는 보이드의 생성, 부분방전의 발생, 기계적 강도의 저하 및 흡습 등 외부의 영향을 받기 쉽게 되어 다른 열화원인에 상당히 많은 영향을 주며, 절연층 내부 및 권선 단말부나 출력 케이블의 손상 등으로 나타나기도 한다. 온도상승은 화학적 반응을 촉진하여 열화의 속도를 증대시키며, 절연재료의 수명을 단축시키는 가장 일반적인 열화요인이다.

열적 열화는 전기설비의 온도상승 한계와 절연시스템에 사용된 절연체의 열적 특성 등에 의하여 결정되며, 열적 열화에 의한 물리적, 화학적 변화가 생기고, 전기적, 기계적 열화를 야기하여 궁극적으로 절연성을 저하시킨다. 절연체에 외부로부터 전계가 인가되면 다음과 같은 각종 열화가 발생하게 된다.

- (1) 전도전류 : Joule 열에 의해 열적 열화의 원인이 되며 이외에 이온성 전도는 전기화학적 열화를 유발한다.
- (2) 유전체손 : 교류전계에서 발생하며, 열적 열화의 원인이 된다.
- (3) 전자력/정전력 : 단락 대전류 혹은 고전압에 의하여 발생하는 힘에 의해 기계적 열화를 유발한다.
- (4) 부분방전 : 고전계에서 절연재료에 부분방전이 발생하면 열적작용, 입자충격작용, 여기분자 혹은 이온에 의한 화학작용을 유발한다.

일반적으로 운전 중인 전력설비의 절연재료 내부에 보이드 방전이 발생하면, 보이드 표면은 침식된다. 부분방전에 의한 침식은 보이드의 확대 혹은 보이드 간의 교락이 발생하여 큰 방전으로 이행된다. 부분방전에 의한 절연 손상은 전계가 집중하기 쉬운 도체 근방에서 시작하는 경우가 많다. 예를 들면, 고압 회전기기의 절연재료 내부에 보이드가 존재하거나 박리가 발생할 경우 절연열화는 부분방전 열화로 진전된다. 그러나 열화를 촉진하는 유해한 부분방전의 크기와 수명간의 관계는 아직까지 명확하게 해석되지 못한 실정이다.

기계적 열화는 회전기에서 주로 발생하며, 열화 요인으로는 기동·정지시의 전자력, 운전 중의 진동, 열사이클에 의한 응력 등이 있다. 기동·정지시의 전자력에 의하여 권선 단말부 또는 권선의 고정부 등에 굽힘 응력이 집중하여 발생하고, 이러한 현상이 반복되면 균열이 발생한다. 운전

중의 전자진동은 절연층에 균열을 유발하며, 코일의 고정상태가 느슨할 경우 코일의 진동에 의하여 철심사이에서 마찰열화가 발생한다. 이들 현상은 권선 말단에 손상을 주기 때문에 육안에 의하여 관측되는 경우가 많다. 급속한 부하변동이나 기동·정지시의 냉열 사이클에 의한 열응력의 반복에 의해 열화가 발생하는데, 도체의 온도상승시의 신축에 의한 응력과 열 발생은 절연층의 박리나 보이드 발생을 촉진한다. 기계적 열화는 절연층의 박리, 균열, 마모에 의한 손상으로 나타나며, 그 결과 전기적인 열화로 촉진되어 절연파괴에 도달한다. 또한 권선 말단에서의 손상은 흡습·오손 등의 환경적 조건에 의한 열화가 촉진되어 절연저항의 저하나 절연파괴의 원인이 된다.

환경에 의한 열화는 화학약품, 기름, 먼지에 의한 오손 및 습기에 의한 것이다. 화학약품에 의한 열화는 부식, 용해로 나타나며, 기계용 기름 등의 사용에 의한 열화는 절연재료의 팽창에 의한 박리나 용해와 같은 현상으로 나타난다. 또한 절연물 표면에 기름이 있으면 먼지의 부착이 용이해지므로 연면 절연저항의 저하를 발생시켜 2차적인 열화로 진전되는 경우가 많다. 먼지에 의한 오손은 탄소분, 철분 등의 도전성 물질의 부착으로 인하여 연면 절연저항이 저하되며, 흡습에 의하여 절연저항은 더욱 저하된다. 결로는 절연파괴의 직접적인 원인이 되기도 하며, 흡습상태에서 운전하게 되면 열에 의한 가수분해가 촉진된다. 또한 연면저항이 저하한 상태에서 고전압이 인가되면 누설전류와 미소방전에 의하여 트래킹 열화가 발생한다. 트래킹 열화는 탄화도전로를 형성하기 때문에 연면 절연파괴를 유발하기도 한다. 그러나 환경 열화 현상은 일반적인 경우에 절연층 표면에 나타나므로 절연재료의 직접적인 수명에는 지장이 없고, 대부분 세정에 의하여 절연성능을 회복할 수 있으며, 육안으로도 열화정도를 추정하는 것이 가능한 경우가 많다.

2.2 절연평가기술

전기전자기기의 절연재료가 열화되면 절연성능이 상당히 저하되고 예상된 수명을 갖지 못하므로 기기의 신뢰성이 저하된다. 또한 절연열화에 기인되는 전기사고에 의한 피해는 날로 증가하는 추세에 있기 때문에 기기의 절연열화를 진단하는 것은 대단히 중요하다. 절연평가기법은 일본, 유럽, 미국 등지에서 이미 오래전부터 연구가 진행되어 왔으며, 현재는 실제 적용되고 있는 방법도 있다.

가장 유효한 절연성능 평가를 위해서는 각각의 기기에 대한 정확한 열화기구를 이해하고, 각각의 열화 상황에 가장 적합한 절연 평가방법을 선별하여 적용해야 한다. 장기간의 실제 경험을 거쳐 절연열화 정도와 실험 결과의 상관성을 연구 검토하여야 정확한 평가가 가능하고, 잔여 수명예측 및 절연성능 평가가 가능해진다.

현재까지 행하여지고 있는 절연체의 시험법은 표 2.2와 같이 절연저항 시험, 직류전류시험, 교류전류시험, 유전정접시험, 부분방전시험 등을 실시하고, 종합적인 분석에 의해 평가하고 있다^{[38]~[41]}.

절연저항의 측정은 다른 절연특성 시험의 실행에 앞서 흡습, 오손 등의 결함에 의한 절연저항 저하의 유무를 진단하고, 장기적인 절연저항의 변화를 기록함으로써 흡습, 오손의 축적 및 진행의 경향을 분석하여 절연상태를 추정하기 위하여 행한다. 절연저항 시험은 절연저항계를 이용하여 비교적 용이하게 할 수 있으며, 시험전압이 낮고 측정기가 간단하기 때문에 일반적으로 이용되고 있다. 절연저항 시험기는 직류전원을 내장한 간편한 절연저항계가 이용되고 있으며, 일반적으로 사용되고 있는 절연저항계의 정격전압은 500 ~ 2,000 V 이며, 절연저항의 측정범위는 20 ~ 5,000 MΩ이다. 최근에는 정격전압 1,000 V에서 10^{14} Ω 이상의 절연저항을 측정할 수 있는 절연저항계도 있다. 절연저항은 공시물의 절연구조, 형상, 치수,

흡습, 오손 및 시험전압 등에 영향을 받으며, 특히 습도 및 주위 온도의 영향을 받기 쉽기 때문에 측정시 주변의 환경조건을 명기해야 한다. 또한 절연저항의 측정값으로 절연성능을 판단하기에는 곤란하며, 정기적으로 절연저항을 측정하여 경시적인 변화를 관측하는 것으로부터 절연 평가가 가능하다.

표 2.2 절연 시험법의 분류
Table 2.2 Classification of dielectric testing

분류	시험법	대 상	특성값	비 고
전기적 측정	절연저항	전반적인 열화	절연저항값	전반적 열화현상 검출
	직류누설전류	오손, 흡습	성극지수 PI 전류의 절대값 kick 현상	표면열화와의 분리 필요
	교류누설전류	미소공극, 오손, 흡습	전류증가율 ΔI	
	유전정접	열적 열화, 오손, 흡습	정전용량 $\tan \delta$ $\Delta \tan \delta$ 정전용량 변화율	
	부분방전	보이드, 전기트리	방전전하량 발생빈도 방전전류	잡음제거가 중요
	내전압시험	절연내력	절연파괴 유무	절연손상에 주의
비전기적 측정	시각점검	각종 열화에 의한 표면이상	크랙 유무 변색 유무	표면적인 이상 추정
	X선 검사	매입물의 위치이상 보이드, 이물 등	X 선상	위치표정 가능
	초음파 진단	부분방전 절연두께 등	초음파	

직류전류 시험을 위하여 절연체에 직류 고전압을 인가하면 전류는 그림 2.1과 같이 시간이 흐름에 따라 감소하다가 일정한 값을 유지하게 된다. 이 전류는 순시 충전전류 $I_c(t)$, 흡수전류 $I_a(t)$, 누설전류 I_r 로 구성되어 있으며, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$I(t) = I_c(t) + I_a(t) + I_r \quad (2.1)$$

순시 충전전류는 유전체의 전자분극, 원자분극 등에 의해 발생하는 전류로써 순시적으로 감소한다. 흡수전류는 쌍극자 분극과 공간전하 분극에 기인한 전류로 상당히 긴 시간에 걸쳐 시간에 따라 감소한다.

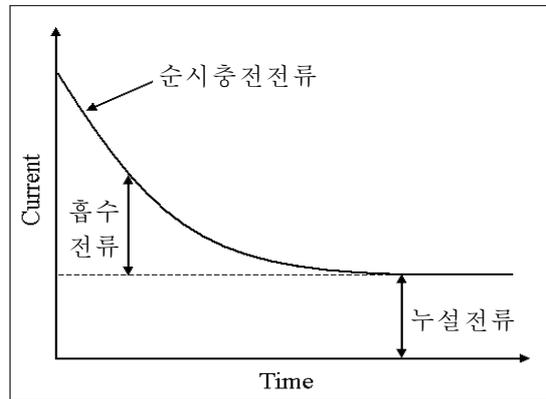


그림 2.1 직류전압에서 절연체의 I-t 특성

Fig. 2.1 I-t characteristics of dielectric materials in DC voltage

흡수전류는 시간 t에 대한 함수로 다음과 같은 실험식이 이용된다.

$$I_a(t) = At^{-n} \quad (2.2)$$

여기서 A는 기하학적 정전용량, 인가전압, 온도 등에 의하여 결정되는 정

수로 식 (2.2)에 의해 전류-시간 특성을 보면 흡수전류가 큰 시간대에서는 기울기 n 의 직선으로 나타나지만, 시간이 지남에 따라 누설전류의 영향을 받으므로 직선에서 벗어난다.

직류전류시험에서는 전류-시간 특성, 절연저항-온도특성, km당 누설전류, 절연저항, 성극지수, 불평형율, 절연저항-전압특성 등으로부터 절연재료의 특성을 판단한다. 시험장치는 직류고전압 발생장치, 전압계 및 전류계로 구성되는데, 직류고전압 발생장치는 전압변동이 작아야 한다. 이는 전압변동에 의하여 시험물의 충전전류가 측정전류에 중첩되어 오차를 발생시키기 때문이다. 전류계는 측정전류가 작으므로 직류증폭기를 부착한 미소전류계가 사용된다.

직류전류법은 전원이 소용량이고, 측정이 비교적 간단하며, 전류값, 흡수전류의 형태, kick 현상(부분방전 등에 의하여 펄스성 전류가 발생하는 현상), 전압특성 등 정보가 풍부하며, 현장 적용성이 우수하다. 또한 측정감도가 높으며, 흡습, 수트리, 부분방전의 검출에 유효하다. 그러나 누설전류의 크기는 시료의 형태와 크기에 따라 변화하기 때문에 단편적인 전류의 크기만으로 절연상태를 판단할 수 없다. 고체절연체가 건전한 상태에서는 누설전류가 극히 작기 때문에 전류는 시간과 더불어 직선적으로 저하하고, 누설전류의 영향이 나타나기 때문에 경사가 완만한 곡선으로 된다. 그러나 절연물이 열화되거나 흡습 혹은 오손된 경우에는 누설전류가 증가하고, 결국 전류-시간 특성곡선에서는 누설전류의 상승으로 전류의 감쇄율이 낮아지게 된다. 이러한 특성을 이용하여 전류의 시간 변화를 나타내는 지표로서 식 (2.3)의 성극지수(PI : Polarization Index)에 의해 절연물의 흡습과 오손을 판정한다.

$$\text{성극지수} = \frac{\text{전압인가 1분 후의 전류}}{\text{전압인가 10분 후의 전류}} \quad (2.3)$$

수지계의 절연에서는 절연저항이 상당히 높고, 누설전류는 작기 때문에 절연물이 흡습하거나 오손에 의해 표면저항이 저하되지 않으면 성극지수의 값은 상당히 크게 된다. 성극지수에 의한 절연열화 판정기준은 1.5로써 성극지수가 1.5 이하이면 절연상태 불량으로, 그 이상이면 양호로 판정한다.

절연체에 교류전압 V 를 인가할 때 흐르는 전류 I 는 절연물의 정전용량을 C 라고 하면

$$I \doteq \omega CV \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \delta \right) \quad (2.4)$$

로 된다. 즉, 절연물에 흐르는 전류는 인가전압과 주파수에 의하여 결정되며, 절연재료의 비유전율과 $\tan \delta$ 의 값에 의해 변화한다. 교류전류시험법은 전압과 전류의 관계로부터 절연물의 열화 정도를 추정하는 것이다. 절연재료가 흡습하면 비유전율이 증대되고, 부분방전이 발생하면 $\tan \delta$ 가 증가하므로 전류의 측정에 의하여 절연특성을 추정하는 것이 가능하다. 교류전류시험에서 그림 2.2와 같이 전류-전압 특성을 측정하는 경우, 전압의 상승에 비례하여 전류가 증가하지만 부분방전이 발생하면 전류가 급격히 증가하게 된다. 이 전류가 급증하는 전압을 전류급증전압이라고 하고, 최초에 나타나는 급증전압을 제1전류급증전압, p_{i1} 다음으로 급증하는 전압을 제2전류급증전압, p_{i2} 라고 한다. p_{i1} 은 부분방전 개시전압에 상당하는 전압으로 $\tan \delta$ 가 증가하는 전압이고, p_{i2} 는 절연파괴전압과

상관관계가 있기 때문에 파괴전압의 추정방법으로서 검토될 수 있지만 수치계열의 절연재료를 사용한 코일 등에서는 p_{i2} 가 명확하게 나타나지 않을 때가 많다. 또한 전류의 증가 경향의 지표로서 전류 증가율 ΔI 가 정의된다.

$$\Delta I = \frac{I - I_o}{I_o} \times 100 \text{ [%]} \quad (2.5)$$

여기서, I 는 임의의 전압에서의 전류이고, I_o 는 전압에 비례하여 전류가 직선적으로 증가하지 않는 전압에서의 전류이며, 전류증가율 ΔI 는 근사적으로

$$\Delta I = \frac{(C - C_o)}{C_o} + \frac{1}{2} \tan^2 \delta \quad (2.6)$$

로 되고, 여기서 C_o 는 p_{i2} 이하의 전압에서의 정전용량이다.

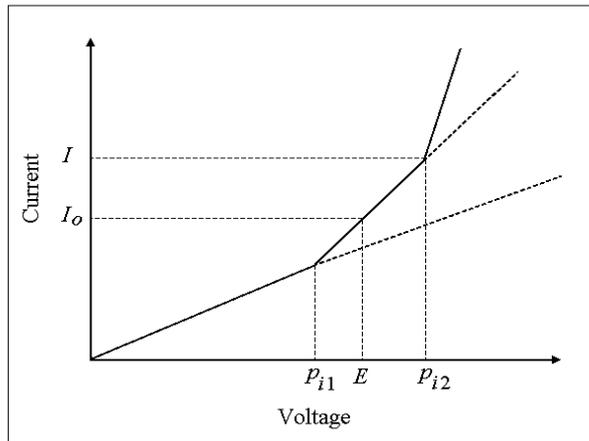


그림 2.2 교류전압에서 절연체의 I-V 특성

Fig. 2.2 I-V characteristics of dielectric materials in AC voltage

회전기의 경우에는 일반적으로 고정자 권선의 각 상별로 전동기 단자와 대지간에 정격 상전압의 1.25배($1.25 \times E\sqrt{3}$ V)까지의 교류전압을 인가하여 ΔI 를 측정한다. ΔI 의 값이 8.5% 미만이면 절연재료의 절연능력이 양호하다고 판단하고 있다. 교류전류시험 장치는 시험용 변압기와 전류계로 구성되며, 시험용 변압기는 전압과형의 왜형이 작은 것을 사용한다. 전류계는 종래의 교류용 전류계로 전류를 직독하는 방법이 사용되어 왔지만, 근래에는 자동 절연특성 해석 장치의 개발에 의하여 교류전류 시험이 자동화 되고 있는 추세이다. ΔI 를 개량한 방법으로 절연물 중에 보이드 함유율의 개념을 도입한 것으로써 파라미터 I 는

$$I = \tan \delta + \gamma \quad (2.7)$$

로 정의되며, 미분 부분방전을 γ 는

$$\gamma = \frac{1}{2C_o} \cdot \frac{\Delta \Sigma nq}{\Delta V_m} \quad (2.8)$$

여기에서 $\Delta \Sigma nq$ 는 인가전압의 증가분 ΔV_m 에 대한 총 방전전하량(반사이클 당의 평균 방전전하량)이다. γ 는 부분방전에 관계하는 파라미터이며, 절연물의 비유전율 ϵ 로 나눈 γ/ϵ 의 값은 그 전압에서 방전하고 있는 보이드의 체적비를 나타낸다. I 의 값은 웨링브릿지에 의한 $\tan \delta$ 및 $\Delta C/C_o$ 의 값보다 감도가 높다.

절연재료에 교류전압을 인가하면 손실이 발생하는데 이 손실은 누설전류에 의한 손실, 유전분극에 기인한 손실 및 부분방전에 기인한 손실로 분류된다. 이러한 손실 때문에 그림 2.3에 나타난 것과 같이 전전류 I_t 는

충전전류 성분 I_c 보다 뒤지게 되고, 이 위상각은 유전손실각, 유전정접이라고 한다. 절연물내에서 소비되는 유전손실 W 는

$$W = \omega C V^2 \tan \delta \quad (2.9)$$

와 같이 된다.

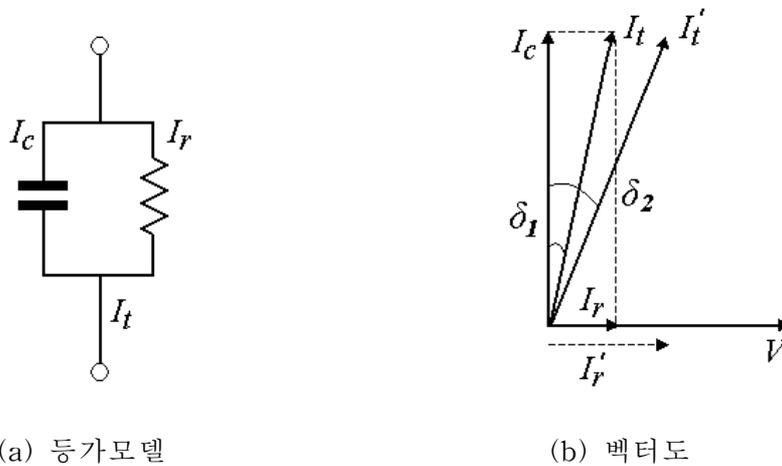


그림 2.3 절연체의 등가모델과 벡터도
 Fig. 2.3 Equivalent model and vector diagram of a dielectric material

$\tan \delta$ 의 값은 절연물 고유의 것이기 때문에 그것의 특성을 표시하는데 이용되지만, 이 값은 시험물의 국부적인 특성을 나타내고 있는 것은 아니며, 평균화된 특성을 표시하는 것이다. 또한 절연물의 특성, 불순물의 잔류, 보이드 등의 결함에서 부분방전에 의해 고유값이 달라지기 때문에 절연물의 품질관리나 절연성능 평가에 널리 이용되고 있다.

$\tan \delta$ 의 시험장치는 시험용 전원, 표준콘덴서, 측정 회로부 및 검출부로 구성된다. 시험전원은 고주파 성분을 포함하지 않는 정현전압에 근사

한 전원으로 시험전압까지 부분방전을 발생하지 않아야 한다. 표준 콘덴서는 정전용량이 정확하게 교정되어 무손실이거나 손실을 알고 있는 것이라야 한다. 전원전압 파형의 왜형은 $\tan \delta$ 값에 상당한 오차를 주기 때문에 가능한 정현파 전압의 전원을 사용하여야 한다. 전원전압에 고조파 성분이 포함되면 부분방전 발생위상이 달라지기 때문에 전압 파형의 왜형률이 10% 이상인 경우에는 특히 주의 하여야 한다. 절연물 내부의 $\tan \delta$ 를 측정하는 경우에는 반드시 가드 전극을 설치하고, 표면누설전류, 표류용량의 영향을 제거해야 한다. 회전기의 권선에서는 일반적으로 가드 전극의 설치가 곤란하기 때문에 시험결과의 고찰에 주의하여야 한다. 특히, 권선 단말부 표면의 오손이나 흡습이 현저한 경우에는 측정된 값에 큰 영향을 준다. 또한 권선 단말부의 연면방전 방지에 전압 비선형성 저항을 이용하는 경우에는 겉보기 $\tan \delta$ 가 크게 나타나는데 이것은 철심의 길이가 짧을수록 영향이 커진다.

절연물이 기계적, 열적으로 열화되면 절연물 내부에 미소한 크랙, 박리, 보이드 등이 발생하고 이들 결합 부분에서 부분방전이 발생한다. 이때문에 권선절연의 경년열화는 부분방전 개시전압이 저하하고 $\Delta \tan \delta$ 가 증가하는 경향이 나타난다. $\Delta \tan \delta$ 는 정격 선간전압에서의 측정값과 정격 상전압의 25%에서 측정값 사이의 차이로 얻을 수 있으며, 측정결과에 대한 판정기준은 6.5% 미만이면 양호한 것으로 판단한다. 그러나 이와 같이 결합 부분이 흡습하면 $\tan \delta$ 의 증대, 부분방전 개시전압의 증가 및 $\Delta \tan \delta$ 의 감소 등이 있기 때문에 경년열화의 정량적인 판단을 위해서는 $\tan \delta$ 의 측정시 측정조건을 일정하게 하는 것이 필요하다.

쉐링브릿지로 $\tan \delta$ 를 측정할 때 동시에 정전용량을 측정하는 것이 일반적이다. 부분방전이 발생하지 않는 전압에서의 정전용량 C_0 와 정격

전압에서의 정전용량 C_E 의 차와 C_o 의 비 즉, 정전용량의 증가비 $\Delta C / C_o$ 는

$$\Delta C / C_o = (C_E - C_o) / C_o \quad (2.10)$$

로 정의되며, 일반적으로 $\Delta \tan \delta$ 보다 정밀도가 높기 때문에 경년열화 진단에 많이 이용된다.

절연물이 열화하면 일반적으로 $\tan \delta$ 가 증가하고, 이때 절연저항은 작아지는 경향이 있다. 또한 열적 열화가 진행되는 경우 일반적으로 절연물이 흡습하기 쉽게 되며, 흡습한 경우 $\tan \delta$, 절연저항의 변화가 매우 크게 나타난다. 따라서 $\tan \delta$, 절연저항을 측정하는 것에 의해 절연열화와 흡습의 정도를 진단하는 것이 가능하다. 측정결과와 평가시 $\tan \delta$, 절연저항은 절연물의 종류와 구성에 따라 값이 달라질 수 있기 때문에 절대 값에 의한 평가는 불가하며, 초기의 값과 비교하여 경시적인 변화로부터 종합적으로 판단해야 한다.

부분방전은 절연재료 내부의 보이드, 전기트리 또는 표면에서 부분적으로 발생하는 것으로 절연물의 열화에 크게 영향을 미친다. 전극간의 절연물 중에 보이드가 존재하면 인가전압의 상승과 더불어 보이드에 걸리는 전압도 상승하고 이 전압이 보이드의 불꽃전압에 도달하면 보이드내에서 불꽃 방전이 발생한다. 방전에 의하여 보이드에 가해지는 전압은 잔류전압까지 급격히 저하되지만 전극간 인가전압의 상승과 더불어 다시 보이드에 가해지는 전압이 상승하고 불꽃 방전이 재차 발생하게 된다. 따라서 전극간의 인가전압이 높게 되면 반주기에서 발생하는 방전의 빈도는 증가하게 된다. 실제 전기설비의 절연재료 중에는 크기가 다른 보이드가 다수

존재하기 때문에 부분방전의 발생빈도수는 많아지게 된다. 이와 같은 부분방전의 발생은 절연물의 열화에 큰 영향을 주기 때문에 절연열화와의 관계에 대하여 수많은 연구가 수행되어 왔다.

부분방전 발생시 펄스의 검출에는 일반적으로 전기적인 회로가 이용되는데, 시험회로는 고전압 발생장치, 결합회로, 검출부 및 측정부로 구성된다. 고전압 발생장치는 일반적으로 시험용 변압기가 이용되고 부분방전을 발생하지 않아야 하며, 전압과형의 왜형이 작은 전원을 이용한다. 또한 전원으로부터의 잡음이 검출회로에 침입하는 것을 방지하고, 부분방전 펄스 전류가 전원측으로 유출되는 것을 방지하기 위하여 필터를 설치한다. 부분방전 펄스의 검출부에는 저항, 커패시터 및 인덕턴스를 조합한 검출 임피던스가 이용된다. 결합콘덴서는 잔류 인덕턴스가 작고, 부분방전을 발생하지 않는 것이어야 하며, 검출회로는 공시물의 종류, 측정항목 등에 대하여 최적의 것을 선택할 필요가 있다. 부분방전시험법은 부분방전개시전압과 방전소멸전압, 최대 방전전하량, 발생빈도 등을 측정하여 절연열화 또는 불량에 의한 결함의 존재 및 열화상태를 추정한다.

이제까지 저압용 전기전자기기에서는 단순히 절연저항의 측정이나 내전압 시험에 의한 절연성능 평가를 수행해오고 있다. 내전압시험은 별도의 고정실험이나 특별한 장치를 필요로 하지 않으므로 저압용 전기전자기기의 절연평가기법으로 사용되고 있지만 피시험 기기의 절연성능에 영향을 주는 방법이므로 저압용 전기전자기기에서도 절연성능에 영향을 주지 않는 부분방전시험법을 통한 평가가 이루어져야 한다.

제 3 장 부분방전의 발생과 검출원리

부분방전시험법은 방전펄스를 직접 계측하기 때문에 상세한 데이터의 정확한 측정, 국부적인 방전의 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 부분방전 기법은 다른 평가방법에 비해 현장적용 역사가 짧으며, 외부 잡음으로 인하여 신뢰성 있는 결과를 도출하는 것이 어려우므로 이에 대한 충분한 고려가 있어야 한다.

저압용 전기전자기기에 적용되고 있는 부분방전 검출에 의한 절연성능 평가기법은 규정전압에서 일정 크기 이하의 방전량이 측정되는 경우를 양호한 상태로 판정하고 있으며, 방전발생원의 식별 및 특성분석 등은 실용화되지 않은 실정이다.

3.1 부분방전의 발생

부분방전시험법에 의한 고체절연체 내부의 방전발생원 추정과 열화정도를 진단하기 위해서는 정확한 부분방전 펄스를 측정하여야 하며, 측정된 방전펄스를 절연재료 내부에서의 부분방전 펄스와 외부에서의 방전펄스로 구분하여야 한다. 실제 절연체에서 발생하는 방전은 전력설비의 금구류 및 연결부위에서의 코로나방전, 절연체 표면을 통해 방전이 발생하는 연면방전, 절연체 내부의 내부방전으로 구분된다.

코로나 방전은 그림 3.1과 같이 절연체의 표면에 이온빔이나 화학반응 등으로 인하여 열화를 발생시키지만 절연체의 절연성능에 미치는 영향은 그다지 크지 않으므로 비교적 위험하지 않다. 실제 코로나 방전은 전력기기 외부의 충전부나 측정금구류 등에서 발생하는 것으로 부분방전 펄스와

는 구분되어야 하는데 많은 경우 코로나 방전은 부분방전과 구분이 쉽지 않기 때문에 부분방전 펄스로 오인하는 경우가 발생한다.

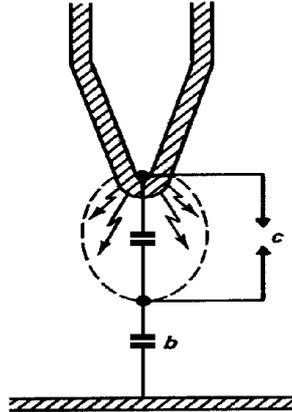


그림 3.1 코로나 방전
Fig. 3.1 Corona discharges

연면방전은 그림 3.2와 같이 부적절한 절연설계에 의한 누설거리의 부족이나 절연체 표면의 오손에 기인한 유효 누설거리 감소로 인하여 발생한다. 절연체 표면에서 열화를 발생시키고 축진하기 때문에 연면방전이 초기에는 절연체 자체에 많은 영향을 미치지 않을 수도 있다. 그러나 연면방전에 의한 고주파 진동전압이 교류전압에 중첩되어 전기설비의 절연물에 과도한 전기적 스트레스를 가하게 되므로 고체절연체에 손상을 준다. 또한 장기간 연면방전이 발생하면 열화과정을 거쳐 절연체 표면의 결함부위에 열화가 집중되고 침식이나 부식이 발생되므로 절연체의 전기적 특성이나 기계적 특성을 저하시킨다. 더욱 열화가 진행되면 연면방전으로 인한 발열과 오손이 축진되고 탄화도전로가 형성되어 절연파괴를 유발하기도 한다. 연면방전의 장기적인 열화에 의한 절연파괴는 전원용량의 차이에 따라 다르지만, 일반적으로 글로우 방전의 형식으로 이루어지며 아

크방전으로 진전하기도 한다. 이 경우는 열에 의하여 절연재료가 심각하게 손상된다.

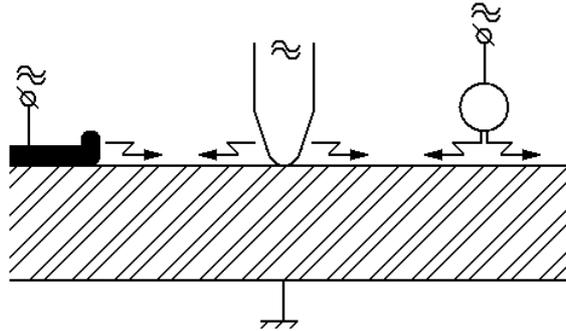


그림 3.2 연면 방전
Fig. 3.2 Surface discharges

측정된 부분방전이 잡음, 코로나방전, 연면방전이 아닌 것으로 판명되면 절연체의 내부에서 발생한 부분방전이다. 절연체 내부에서 발생한 부분방전은 절연재료의 열화를 발생시키고, 열화를 가속시키므로 부분방전 발생의 방전전하량, 발생빈도 등을 측정함으로써 열화의 종류와 열화원인을 알아낼 수 있으며, 절연재료의 열화상태를 추정할 수 있다.

절연재료에서의 내부방전은 보이드 방전 및 전기트리 방전으로 나누어 볼 수 있으며, 초기 보이드 방전이 진전되면 절연재료내에 수지상의 전기트리가 발생하고 최종적으로 절연파괴에 이른다.

절연시스템의 설계 및 제작시 절연체 내부에는 보이드가 존재하지 않아야 하며, 미세한 보이드까지 완전히 제거하는 것은 불가능한 일이라 하더라도 이는 절연특성에 큰 영향을 미치지 못한다. 그러나 전기설비 및 전력기기의 운전이력에 따라 전기적 열화, 열적 열화, 기계적 열화, 환경적 열화 등의 각종 열화가 진행되면 절연재료 전체에서 미세한 보이드가 열화되어 크기가 커질 뿐만 아니라 다수의 보이드가 생성된다.

보이드의 발생은 고체절연체의 절연특성을 상당히 저하시키며, 결과적으로 기기의 수명을 저하시킨다. 그림 3.3과 같이 고체절연체 내부에 보이드가 존재하는 경우, 이곳에 고전압이 인가되면 보이드 내부의 유전율이 절연재료에 비하여 작으므로 전계가 집중되며, 기체의 절연내력은 고체에 비하여 상당히 낮으므로 보이드 내부에서 기체방전이 발생된다. 기체방전에 의하여 보이드는 열적, 화학적 열화가 촉진되어 보이드의 크기가 점차 증가되며 보이드 크기의 증가로 인하여 고체절연체의 유효 절연성능이 점차 감소하게 된다.

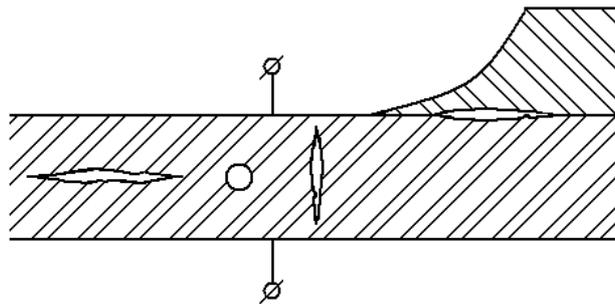
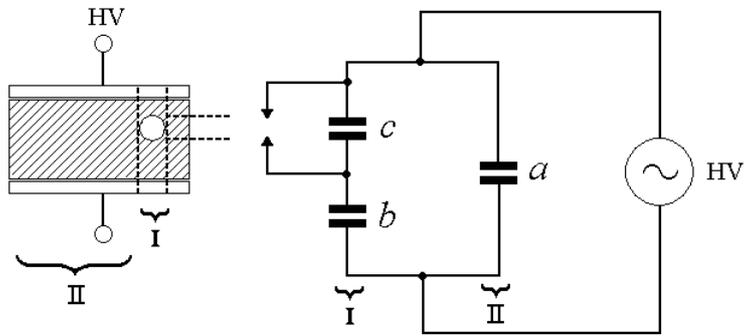


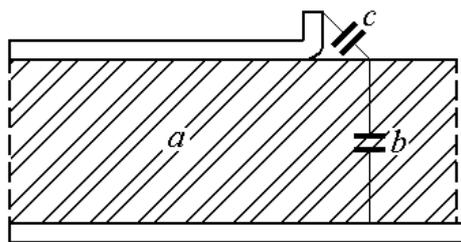
그림 3.3 내부 방전
Fig. 3.3 Internal discharges

부분방전의 발생 메커니즘은 그림 3.4의 a-b-c 회로를 사용하여 설명할 수 있다^{[25],[33]}. (a)에서 영역 I은 절연체에 결함이 존재하는 부분이며, II 영역은 절연체의 전체부분으로 나타낼 수 있다. 결함부분에서 보이드의 정전용량은 c로 이것은 절연과피 통로로서 작용하게 되며, b는 보이드와 직렬로 접속되는 나머지 부분의 정전용량이고, a는 정상적인 부분의 정전용량 값을 나타낸다. (b)에는 연면 방전의 예를 나타낸 것으로 (a)와 동일하게 표현되며, 표면에서 발생하는 방전은 전극의 정전용량 c와 절연체를

통한 정전용량 b , 그리고 절연체의 나머지 부분은 정전용량 a 로 표현된다. 절연체에 보이드 또는 결함이 존재하는 경우 교류 운전전압이 인가되면 결함내의 정전용량 c 에 전계가 집중적으로 가해지고 공기의 절연내력 이상으로 되면 보이드내에서는 불꽃방전의 형태로 부분방전 현상이 발생한다.



(a) 보이드 방전



(b) 연면 방전

그림 3.4 부분방전의 등가회로

Fig. 3.4 Equivalent circuit of partial discharge

일반적으로 알려진 부분방전 펄스의 형태는 그림 3.5와 같이 인가전압이 상승하는 부분에서 일정 시점에 도달할 때 방전 펄스가 발생되며 전압이 감소하면 사라지는 형태를 가지게 된다. 운전전압이 서서히 증가하면 전압 U 의 범위에서 보이드내에 방전이 발생하고, 다시 감소하는 시점에서 인가전압이 V 이하로 되면 방전이 소멸한다. 이와 같이 방전이 발생하는 전압 U 를 보이드내 방전개시전압(DIV ; Discharge Inception Voltage)이라 하고, 방전이 소멸되는 시점의 전압 V 를 방전소멸전압(DEV ; Discharge Extinction Voltage)이라고 한다.

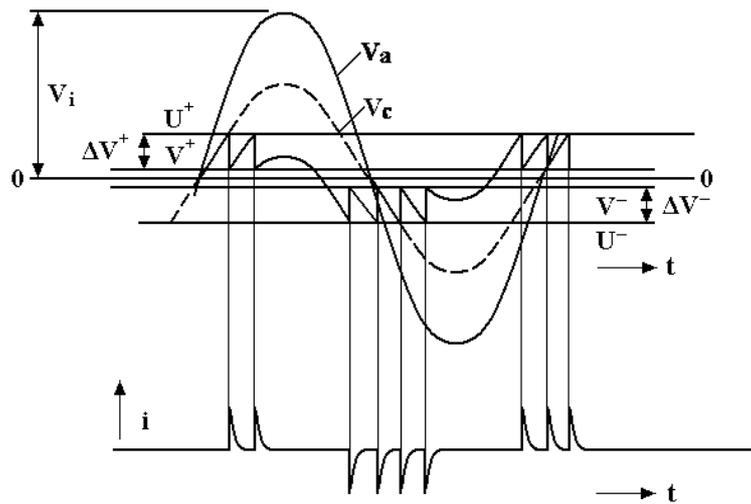


그림 3.5 교류전압에서 부분방전 발생 패턴
Fig. 3.5 Typical PD patterns in AC voltage

그림 3.5와 같은 방전 파형에서 보이드내에서 발생하는 방전전하량 q_l 은 식 (3.1)과 같이 표현된다.

$$q_l \approx (b + c) \Delta V \quad (3.1)$$

여기서, $\Delta V = U - V$ 로 보이드내의 전압강하분이다. 그러나 q_i 은 직접 검출이 불가능한 값이므로 방전발생시 리드선을 통해 흐르는 걸보기 전하를 측정함으로써 방전의 크기를 정의한다. 걸보기 방전전하량 q 는

$$q = b\Delta V \quad (3.2)$$

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

$$P = \frac{1}{2} c(U^2 - V^2) = \frac{1}{2} c \times \Delta V \times (U + V) \quad (3.3)$$

가 되는데, 여기서 V 는 U 에 비하여 약 10% 정도로 작다면 식 (3.3)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} c \times \Delta V \times U \quad (3.4)$$

그리고 방전개시전압은 $U = \frac{b}{(b + c)} V_i$ 와 같이 표현되는데 여기서, V_i 는 시료에서 방전이 발생하는 외부 방전개시전압이다. 그러므로 식 (3.4)는 아래와 같이 다시 정리할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} c \times \Delta V \times \frac{b}{(b + c)} V_i \quad (3.5)$$

식 (3.5)에서 b 는 c 에 비교하면 무시될 수 있는 값이므로

$$P \simeq \frac{1}{2} b \Delta V V_i = \frac{1}{2} q V_i \quad (3.6)$$

과 같다.

부분방전 파형은 정극성 및 부극성 펄스에 대하여 다양한 형태로 발생하게 되는데 이를 그림 3.6과 표 3.1에 나타내었다.

그림 3.6에서 보이드가 비대칭이라면 절연파괴전압 U^+ , U^- 가 동일하지 않게 된다. 보이드 양단의 전압이 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 사이클에서 발생하게 되고, 다음 반주기에서 전압은 U^- 에 도달하지 못하게 되어 방전은 발생하지 않는다. 그러나 만약 V_c 가 U^- 를 초과하면 방전은 일정하게 발생하게 된다.

표 3.1은 결함의 위치, 전극의 형상, 절연재료 등에 의해 나타나는 방전펄스의 위상분포 특성을 나타내었다.

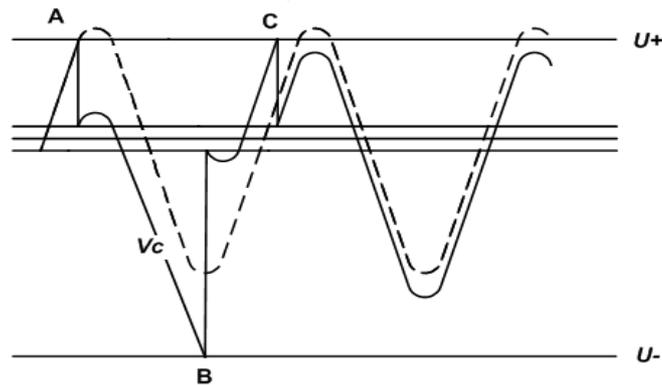
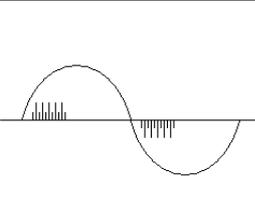
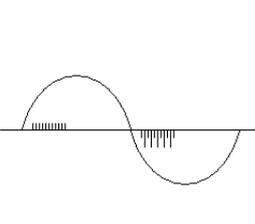
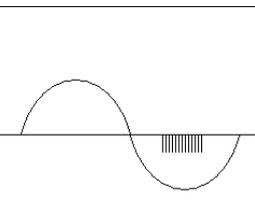
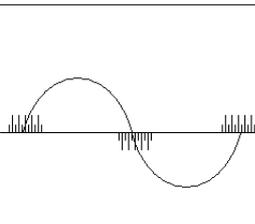
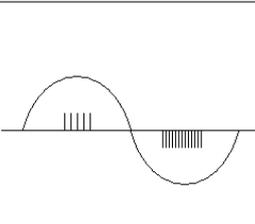


그림 3.6 비대칭 보이드에서 부분방전의 발생
Fig. 3.6 Occurrence of PD in an asymmetrical void

표 3.1 방전펄스의 위상분포 패턴

Table 3.1 Typical patterns of PD pulse

	위상분포 패턴	특 성	원 인
1		<ul style="list-style-type: none"> 영점과 첨두값 사이에 방전펄스 발생 정극성 및 부극성에서 동일한 특성 	<ul style="list-style-type: none"> 고체절연체 내부의 보이드에서 방전 발생 전극과 접촉이 없는 연면방전
2		<ul style="list-style-type: none"> 영점과 첨두값 사이에 방전펄스 발생 한쪽 극성에서 방전의 크기가 크게 발생 	<ul style="list-style-type: none"> 전극주위의 절연체내 보이드에서 방전 발생 정극성 : 고압측 부극성 : 접지측
3		<ul style="list-style-type: none"> 동일한 크기의 방전이 한쪽 극성 첨두값에서 발생 전압증가에 따라 발생 수 증가, 크기는 일정 	<ul style="list-style-type: none"> 가스내 전극의 침예한 부분에서 방전 발생 정극성 : 고압측 부극성 : 접지측
4		<ul style="list-style-type: none"> 영점부근에서 방전펄스 발생 	<ul style="list-style-type: none"> 금속부위나 반도체층에서 불완전 접촉에 의해 방전 발생
5		<ul style="list-style-type: none"> 양쪽 극성 첨두값 부근에서 방전 발생 극성에 따라 크기는 동일하지만 발생 수가 다르게 나타남 	<ul style="list-style-type: none"> 액체절연체내 전극의 침예한 부분에서 발생 정극성 : 고압측 부극성 : 접지측

3.2 부분방전의 특성

절연체에서 발생하는 부분방전은 내부의 공극 또는 절연물의 경계면 등에서 발생하며 결함의 종류와 위치에 따라 고유의 특성을 갖는다. 먼저 그림 3.7과 같이 제한적으로 존재하는 보이드 등에서 발생하는 부분방전은 외부로부터 전압이 가해지면 방전개시전압에서 급격하게 방전전하량이 증가하고, 방전에 수반되는 가스 화합물과 같은 불순물에 의해 공간이 채워지므로 일정하게 방전이 유지되는 특성을 갖는다. 다시 외부전압을 서서히 감소시키면 방전이 소멸되는 방전소멸전압은 일반적으로 방전개시전압보다 낮은 범위에서 나타난다. 그러나 지속적인 전압 스트레스가 가해지면 내부 보이드가 확장하고, 부분방전이 확대되어 결국 절연파괴에 도달하게 된다.

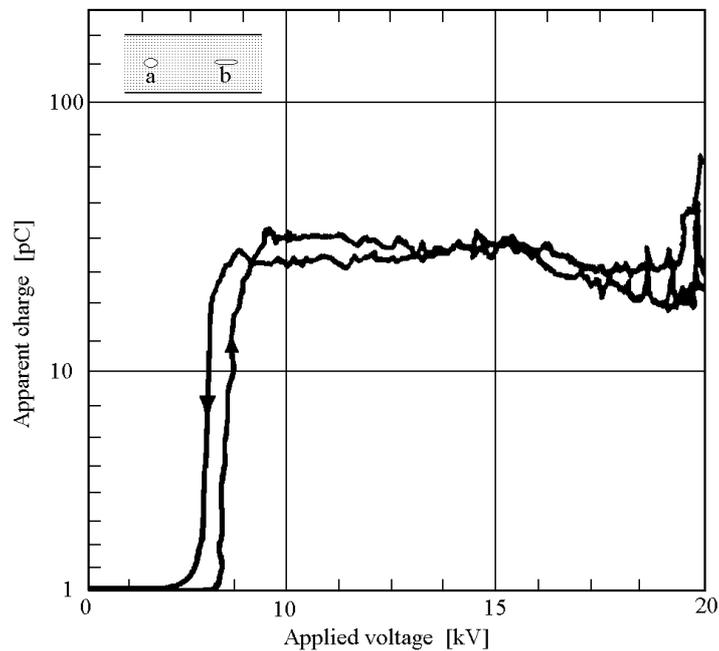
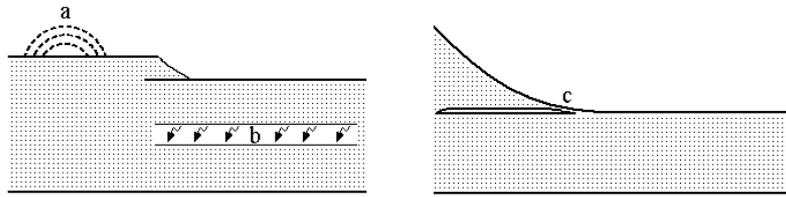


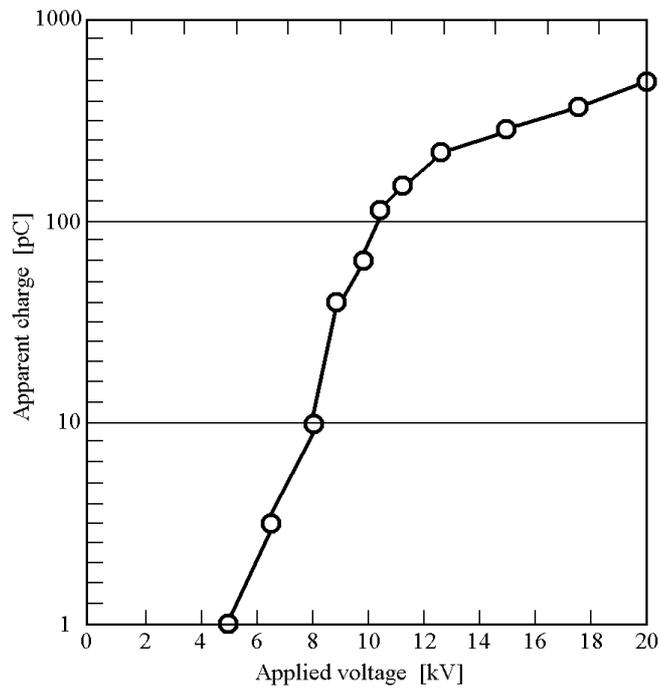
그림 3.7 보이드에서 방전 특성

Fig. 3.7 Discharge characteristics in a void

그림 3.8과 같이 절연체의 연면방전, 내부에 비교적 긴 공극을 가지는 경우, 절연체의 경계면에서 나타나는 방전은 외부로부터 전압인가시 지속적으로 방전이 증가하는 형태를 나타내며, 수십 nC 이상의 방전전하량이 검출되기도 한다.



(a) 긴 공극과 경계면



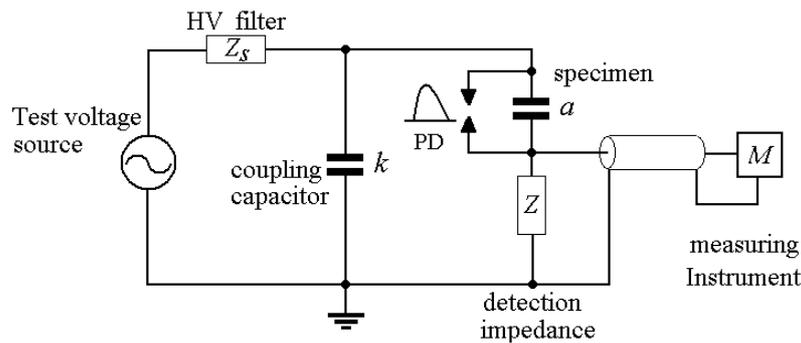
(b) q-V 특성

그림 3.8 긴 공극과 경계면에서 방전 특성

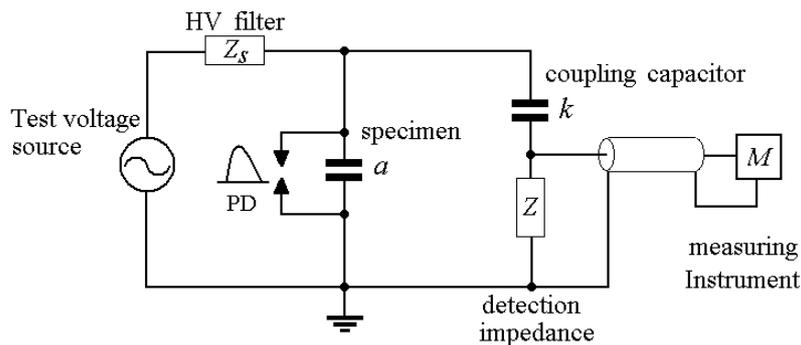
Fig. 3.8 Discharge characteristics in a large gap and an interface

3.3 부분방전의 검출원리

부분방전 발생에 따라 펄스전류가 발생하고 이 펄스전류를 검출함으로써 부분방전의 유무를 판정할 수 있다. 부분방전 펄스를 외부에서 검출하는 기본적인 회로는 그림 3.9와 같이 나타낼 수 있으며, 접지 기기 또는 비접지 기기에 따라 검출임피던스의 접속 위치를 선택할 수 있다^[42]. 실제 적용에서는 결합콘덴서와 직렬로 검출임피던스를 접속하는 방법이 주로 사용되는데 이는 시료에서 큰 방전이 발생할 경우 검출회로에 과도전류가 발생하여 회로를 소손시킬 수 있기 때문이다.



(a) 접지 기기



(b) 비접지 기기

그림 3.9 부분방전 검출의 개략도

Fig. 3.9 Schematic diagram of PD detection

검출회로의 구성은 시료에 시험전압 인가를 위한 전원공급부, 부분방전 펄스전류를 펄스전압으로 변환하는 검출 임피던스, 펄스전류가 검출임피던스에 유효하게 흐르도록 폐회로를 형성하기 위한 결합콘덴서, 검출임피던스의 출력을 측정하는 장치로 구성된다.

일반적으로 전원과 시료 사이에는 전원으로부터의 잡음 유입이나, 부분방전 펄스전류의 전원으로부터의 유출 방지를 위한 저항, 인덕턴스 등으로 폐회로를 구성한다. 이때 검출임피던스의 접속 위치는 시료의 고압측 단자에 접속된 결합콘덴서의 접지 단자와 대지사이 또는 시료의 접지측 단자와 대지사이에 접속하여 부분방전을 검출한다.

절연성능 평가에 가장 널리 이용하고 있는 파라미터는 방전전하량으로 방전 크기의 최대값이 절연파괴 직전에 급격히 변화한다는 많은 실험결과에 그 근거를 두고 있다. 절연체에 시험전압 인가 후 초기현상으로 부분방전의 크기가 감소하는 것은 일반적으로 미소 공기층의 표면 전기전도도가 증가하여 생기는 현상으로 알려져 있다^{[43],[44]}. 부분방전의 크기는 전원 주파수 및 인가전압의 크기에 비례하며 미소 공기층이 전극에 가까이 위치하고 있으면 전원의 극성에 따라 부분방전의 크기가 다르다. 또한 부분방전의 최대값은 열화시간이 경과함에 따라 뚜렷한 전이 현상을 나타내므로 절연시스템의 수명을 예측할 수 있다.

부분방전의 단위시간당 발생빈도는 방전전하량과 마찬가지로 절연체의 열화진단의 중요한 요소로서 연구의 대상이 되어왔다^{[45],[46]}. 절연특성이 양호하게 제작된 절연물은 열화과정 초기에는 부분방전 발생빈도는 감소하는 추세를 보이다가 절연파괴 전에 갑자기 그 발생빈도가 증가하지만, 절연특성이 불량하게 제작된 절연물의 열화과정은 초기부터 절연파괴까지 급속히 부분방전 발생빈도가 증가하는 경향을 나타낸다.

인가전원 전압과형에서 부분방전의 위상분포를 측정하여 절연물의 열화특성을 판별하는 방법은 많은 실험을 통하여 시도되어왔다¹⁾. 절연상태에 열화가 진전됨에 따라 부분방전이 일어나는 위상각은 인가전압 과형의 최대값에서 영점으로 확산된다. 또한 부분방전의 위상 분포는 절연물 두께와 미소 공기층의 체적과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다^{[45]~[47]}.

절연성능 평가에 있어서는 부분방전의 단순한 파라미터를 기준으로 열화정도를 추정하는 것은 불가능하며, 방전전하량, 발생빈도, 위상분포 등의 파라미터를 종합적으로 측정·분석하여 절연성능을 평가해야만 한다.

제 4 장 부분방전 측정시스템의 설계 및 제작

저압용 전기전자기기는 생산단계에서 품질관리를 목적으로 절연평가를 수행하고 있는데, 주로 사용하는 방법은 내전압시험이나 절연파괴시험으로 운전전압에 비해 높은 전압을 인가하기 때문에 피시험체의 절연성능 저하를 초래한다. 이러한 시험방법 대신 낮은 전압에서 부분방전 펄스를 검출하는 것으로 보다 정확한 절연성능의 평가가 가능하며, 일부에서 부분방전시험법을 품질관리에 적용하는 연구가 진행되고 있다^{[48]~[50]}.

본 연구에서는 저압용 전기전자기기의 절연성능 평가를 위하여 부분방전 측정기술을 적용하였으며, 부분방전 측정시스템의 개략적인 구성은 그림 4.1에 나타내었다. 측정시스템은 시험전압 인가를 위한 전원공급부, 고주파 대역의 방전펄스 검출을 위한 결합콘덴서 및 결합회로망, 미소 방전펄스 증폭을 위한 저잡음 고감도 증폭회로로 구성되고, 방전펄스의 관측 및 분석에는 오실로스코프(1.5 GHz, DL9240, 10 GS/s Yokogawa)를 사용하였다.

시료에서의 부분방전은 전류 임펄스 형태로 발생하며, 다양한 검출회로가 이용되고 있지만 보다 미소한 방전펄스 검출을 위해서는 임피던스 결합에 의한 전기적 측정방식을 적용하는 것이 효과적이다. 또한 부분방전 검출에서는 외부 잡음에 따라 검출감도가 달라지므로 필터, 차폐, 접지 등의 잡음억제 대책이 필요하다.

본 장에서는 부분방전 측정시스템에서 언급된 요소기술에 대한 설계 및 제작, 외부 잡음에 대한 분석과 대책기술 적용, 최종 시스템 구성 및 평가에 대한 연구내용을 기술하였다.

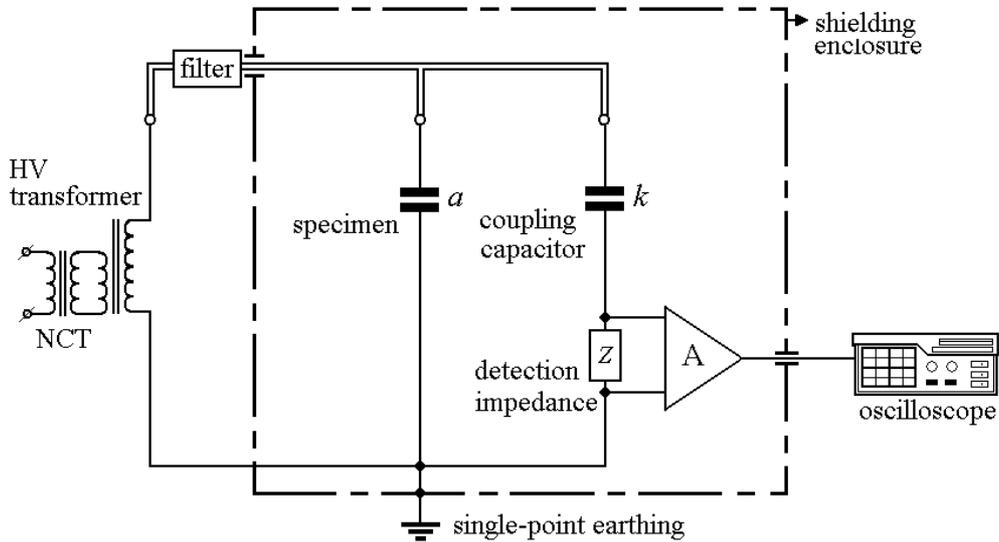


그림 4.1 부분방전 측정시스템의 개략도

Fig. 4.1 Schematic diagram of the PD measurement system

4.1 검출회로

임피던스 결합에 의한 부분방전 검출회로는 시료와 병렬로 결합콘덴서와 검출임피던스를 접속하여 절연체에서 발생하는 방전펄스를 검출하는 것으로 그림 4.2와 같이 간략화 할 수 있다. 검출회로에서 고전압 발생원과 결합콘덴서(coupling capacitor) k 는 방전이 발생하지 않아야 하며(discharge free), 방전은 시료 a 에서만 발생해야 한다. 검출 임피던스 Z 양단에는 시료에서 발생하는 방전펄스에 의해 전압 임펄스를 발생시키게 되며 증폭기 A 를 통해 관측된다. 검출임피던스는 기기의 접지방식에 따라 시료에 직접 연결하는 방법과 결합콘덴서 k 와 직렬로 접속하는 두 가지 방법을 고려할 수 있으며, 고전압 발생원의 임피던스가 충분히 크다면 전기적으로 같은 전압이 발생한다. 만일 시료 a 의 용량이 크다면 충전전류는 임피던스 Z 를 통하여 흐르지 않으므로 k 에 접속하게 된다.

실제 적용에서는 결합콘덴서와 직렬로 검출임피던스를 접속하는 방법이 주로 사용되는데 이는 시료에서 큰 방전이 발생할 경우 검출회로에 과도 전류가 흐르게 되어 회로를 소손시킬 수 있기 때문이다. 따라서 검출회로의 입력단에는 과도전류에 대한 보호대책으로 보호 소자를 접속해야 한다.

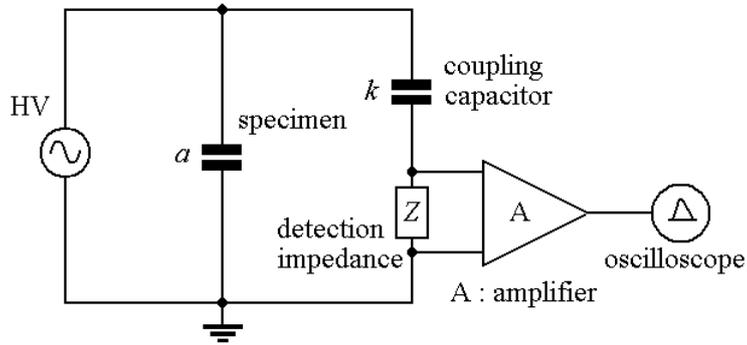


그림 4.2 부분방전 검출의 기본회로
Fig. 4.2 Basic circuit of PD detection

검출회로의 적용에 있어서는 그림 4.3과 같이 표류정전용량이 병렬 접속된 RC 적분회로와 RLC 동조회로의 두 가지 방법이 있다. 그림 4.3(a)와 같은 RC 회로에서 임펄스 전압은^[25]

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{Rm}) \quad (4.1)$$

와 같이 발생하며, 여기서, q 는 방전의 크기로 $q = b \cdot \Delta V$ 이다. 회로의 합성정전용량 m 은

$$m = \frac{ak}{a + k} + C \quad (4.2)$$

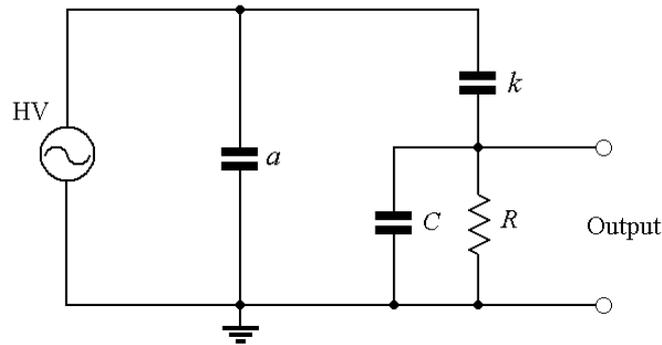
와 같다.

그림 4.3(b)의 RLC 회로에서 임펄스는 RC회로와 같은 파고치로부터 감쇄 진동하게 되고 출력 전압은 다음과 같이 주어진다.

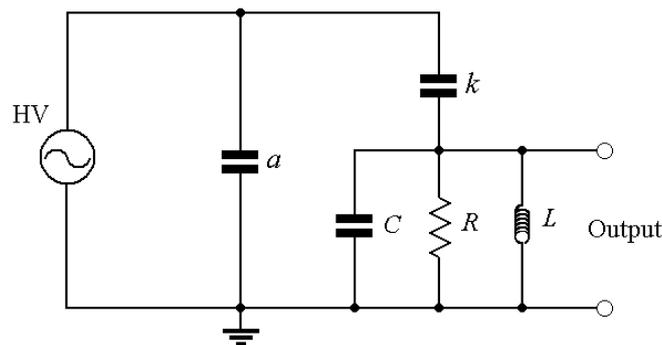
$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{2Rm}) \cos \omega t \quad (4.3)$$

여기서, $\omega = \sqrt{\frac{1}{Lm} - \frac{1}{4R^2m^2}}$ 이고, m 은 회로의 합성정전용량으로 식 (4.2)와 같은 값을 갖는다. 식(4.1) 및 (4.3)에서와 같이 검출저항 양단의 임펄스 전압은 방전전하 q 와 결합콘덴서 k 에 비례하며, 이 출력전압 측정을 통해 방전전하의 크기를 구할 수 있다.

부분방전 검출에 적용하기 위해서는 검출대상에 따라 부분방전 펄스의 주파수가 달라지기 때문에 그림 4.3에 언급한 구성을 그대로 적용하는 것이 아니라 RLC 정수를 적절히 조합하여 부분방전 검출에 필요한 주파수 대역을 선정해야한다.



(a) RC 회로



(b) RLC 회로

그림 4.3 부분방전 검출회로
Fig. 4.3 PD detection circuits

저압용 전기전자기기에서 부분방전은 수 MHz 범위의 고주파 전류 펄스 형태로 발생하기 때문에 결합콘덴서와 검출임피던스로 구성되는 결합회로망이 필요하며, 여기에 사용되는 결합콘덴서 및 RLC 소자는 시험전압 범위에서 방전이 발생하지 않는 안정적인 소자를 사용해야 한다. 만일 시험전압 범위에서 내부방전이 발생하면 피시험체에서 발생하는 부분방전 펄스와 구분되지 않기 때문에 정확한 측정이 곤란하다.

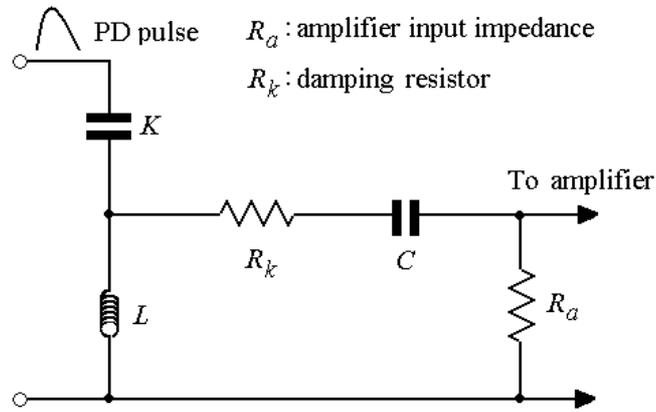
따라서 본 연구에서는 AC전압 8 kV까지 방전이 발생하지 않는 결합콘덴서(ceramic capacitor type 07761 1 nF, Morgan)를 사용하였으며, 결합콘덴서의 전기적 사양은 표 4.1과 같다.

표 4.1 결합콘덴서의 전기적 사양
Table 4.1 Electrical specifications of the coupling capacitor

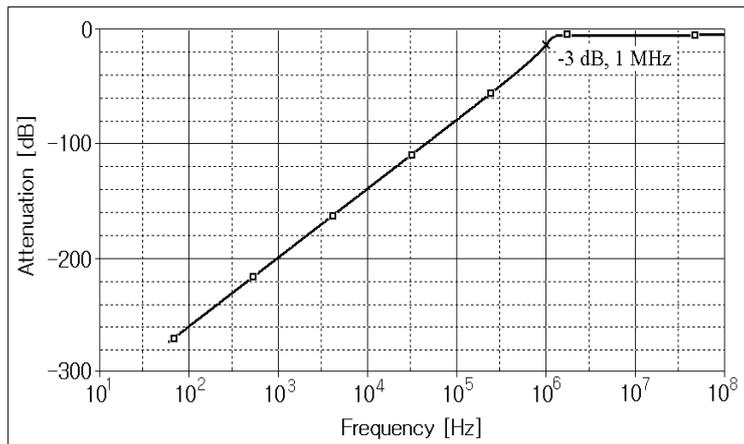
Model	07761
Rated voltage [kV]	30
Capacitance [pF]	1,000
PD test [kV]	below 5 pC at 8 kV AC

본 연구에서 결합회로망은 저압용 전기전자기기에서 발생하는 부분방전 펄스 특성을 고려하여 1 MHz 이상의 고주파 신호를 검출할 수 있도록 구성하였다. 이러한 주파수를 선정할 때 결합콘덴서를 포함하는 결합회로망은 RLC조합으로 그림 4.4와 같이 구성할 수 있다. 결합회로망에서 결합콘덴서는 피시험체에 따라 달라질 수 있으며, 결합콘덴서가 달라지면 검출임피던스 역시 달라지므로 시료의 종류에 따라 결합회로망의 구성은 충분히 고려되어야 한다. 결합회로망은 부분방전 시험전압인 60 Hz의 상용주파수 전압신호는 완전히 차단하고, 고주파 펄스형태의 방전펄스만을 통과시키는 고역 통과 필터의 특성을 가져야 한다.

그림 4.4와 같이 구성한 결합회로망은 -3 dB가 되는 차단주파수를 1 MHz로 선정하여 상용주파수 시험전압은 -270 dB로 완전히 차단할 수 있으며, 저압용 전기전자기기에서 발생하는 부분방전 펄스를 충분히 검출할 수 있다.



(a) 구성

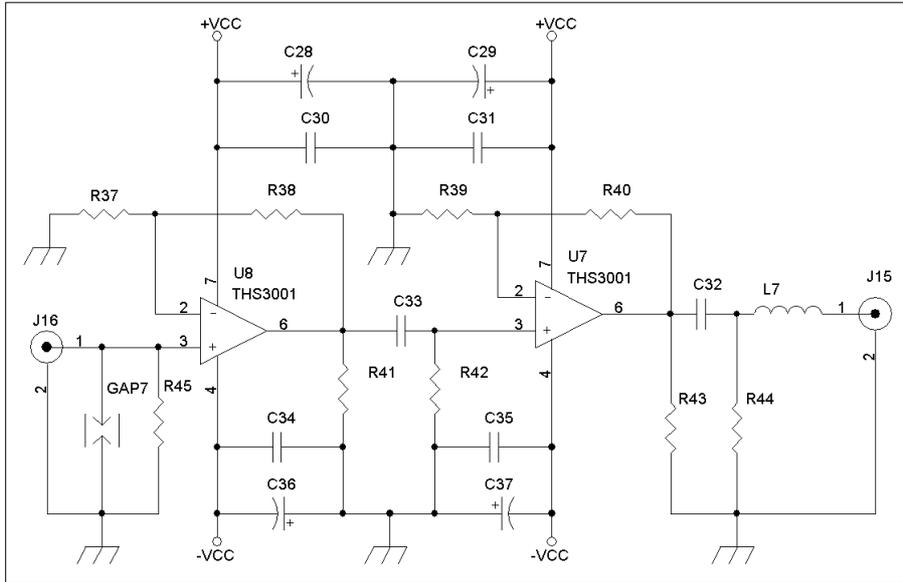


(b) 주파수 특성

그림 4.4 결합회로망

Fig. 4.4 Coupling network

부분방진 펄스의 크기는 대단히 작기 때문에 출력단에 증폭회로를 접속해야만 부분방진 펄스를 검출할 수 있다. 증폭회로는 충분한 주파수 대역, 낮은 잡음특성을 갖도록 설계되어야 하므로 그림 4.5와 같이 2단으로 구성되는 증폭회로를 설계·제작하였다^[49].



(a) 회로도



(b) 사진

그림 4.5 시제작 증폭회로
Fig. 4.5 Prototype amplifier

증폭회로에 사용한 TI사의 THS 3001 연산증폭기는 주파수 범위 DC ~ 420 MHz로 부분방전 검출에 충분한 주파수 범위를 가지고, 입력 off set 전압은 3 mV_{max} 로 대단히 낮은 잡음 레벨 특성을 갖는다. 증폭회로의 증폭도는 40 dB로 설계하였으며, 부분방전 펄스의 발생 주파수 범위 및 외부 또는 내부의 방사잡음에 대한 영향을 고려하여 출력단에 10 MHz의 저역통과 필터회로를 삽입하였다.

4.2 차폐함

본 연구의 목적은 저압용 전기전자기기의 절연성능 평가를 위한 부분방전 측정시스템의 개발로 기기의 절연성능에 영향을 주지 않는 범위에서 부분방전시험을 통하여 절연물의 절연성능을 평가하는 것이다. 미소부분방전 검출을 위해서는 외부 잡음을 효과적으로 차단할 수 있어야 하며, 부분방전 검출회로의 최소 검출감도는 잡음 레벨의 2배 이상일 때 검출 가능하다^[42]. 이러한 관점으로부터 본 연구에서는 부분방전 검출회로를 차폐함내에 구성하고, 전원공급부에 필터를 설치하는 등의 잡음 대책을 강구하였다. 정확한 부분방전 펄스 검출을 위해서는 잡음의 발생원인을 정확히 분석하여 효과적인 잡음대책을 적용하고, 억제되지 않는 잡음에 대해서는 검출회로의 주파수 대역 조절 등의 기법을 적용하여 부분방전 펄스와 잡음의 분리가 가능해야 한다.

따라서 본 연구에서는 잡음의 발생 원인을 분석하고 이에 대한 대책을 마련함으로써 부분방전 펄스만을 측정할 수 있도록 하였다.

부분방전 측정시 외부 잡음은 그림 4.6과 같이 전원으로부터 유입되는 전도 잡음, 외부로부터의 방사 잡음, 접지측으로부터 유입되는 접지 잡음의 3가지로 구분할 수 있다^{[52],[53]}.

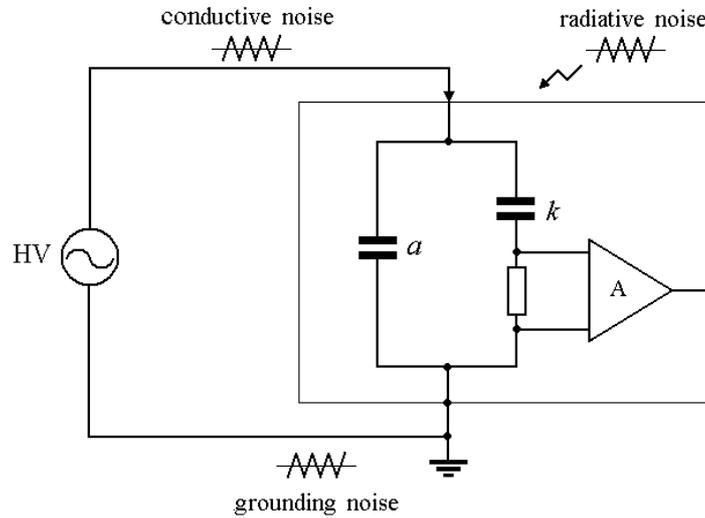


그림 4.6 외부 잡음의 종류
 Fig. 4.6 Types of external noises

먼저 부분방전 측정을 위해 외부로부터 공급되는 입력전원에 의한 잡음으로 수십 ~ 수백 kHz 주파수 대역의 전도성 잡음이다. 전도성 잡음은 전력계통의 차단기 등에 의한 서지와 전력용 반도체 응용 기기에서 발생하는 고주파 잡음 및 전원공급용 변압기 자체에서 발생하는 부분방전 등으로 구분할 수 있다. 이러한 잡음을 차단하기 위해서는 전원공급과 부분방전 검출에 사용되는 기기 및 소자를 시험전압 범위에서 방전이 발생하지 않는 안정적인 것을 사용하고, 서지 및 고주파 잡음에 대해서는 보호회로의 구성과 직렬 필터회로 설치 등의 대책이 요구된다.

두 번째로 방송국 등에서 송신되는 수십 MHz 대역의 고주파 통신신호, 외부 기기로부터 발생하는 방사 성분의 잡음이 있다. 이러한 방사잡음은 차폐 기법 등을 적용하여 차단할 수 있다.

세 번째 잡음은 접지시스템의 불안정에 의해 발생하는 접지잡음으로 주로 생산 공정과 같이 각종의 전기전자기기를 사용할 때 발생하는 고주

파 잡음이 대부분이며, 낙뢰 또는 전력계통의 지락 사고 등에 의해 대지 전위가 상승함에 따라 발생하기도 한다. 접지잡음은 고주파 대역인 수 ~ 수십 kHz 대역에서 발생하는데 이를 위한 대책으로는 단일접지 방식의 적용이나 접지필터를 설치하는 것이 주로 사용된다.

정확한 부분방전 펄스의 검출을 위해서는 S/N비가 크고 잡음 신호가 최소화 되도록 하는 구성이 필요하므로 상기 언급된 잡음의 원인별로 적절한 대책을 마련해야 한다. 본 연구에서는 검출회로를 차폐함에 설치하고, 전원공급부에 필터를 접속하는 것으로 외부 잡음을 차단하였으며, 접지로부터 유입되는 잡음에 대해서는 단일접지 방식을 적용하였다.

먼저 차폐기법은 방송용 반송파 등의 방사 잡음제거를 위한 대책으로 공급전원의 인입선 결합회로망에 사용되는 결합콘덴서와 검출회로부 등에 방송주파수 및 통신신호가 감지되지 않도록 구리 및 알루미늄과 같이 도전율이 높은 금속으로 차폐시키는 것이 가장 효과적이다. 부분방전 검출과 관련된 모든 부분을 차폐구조로 하면 외부로부터 감지된 방사 신호는 접지를 통해 제거된다. 이때 차폐함의 접지방법으로는 직접 접지에 연결하는 방식과 인덕턴스의 접지필터를 통하여 접지시키는 방법이 있다. 첫 번째 모델은 차폐함을 직접 접지함으로서 차폐함에 감지된 통신잡음과 접지잡음을 동시에 제거할 수 있으며, 인덕터의 접지필터를 사용하는 경우에는 차폐함에 유기된 통신잡음이 부분방전 검출회로에 침입할 가능성이 있으므로 본 연구에서는 차폐함을 직접 접지하는 방식을 적용하였다.

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 검출기법에서는 검출회로 등에 의한 내부 잡음 발생원이 아니라 외부에서 유입되는 잡음에 대한 차폐가 요구되므로 잡음원에 대하여

검출회로를 차폐시키는 구조가 필요하다.

차폐함의 차폐효과는 금속 재질의 재료적인 특성에 큰 영향을 받기 때문에 가능한 도전율이 높은 재질을 사용해야한다. 본 연구에서는 차폐함의 구조를 그림 4.7과 같이 2중 차폐구조로 구성하였으며, 외부에는 투자율이 높은 재질을 사용하고 내부 차폐물은 도전율이 높은 재료를 사용함으로써 차폐효과를 극대화하였다^{[54],[55]}.

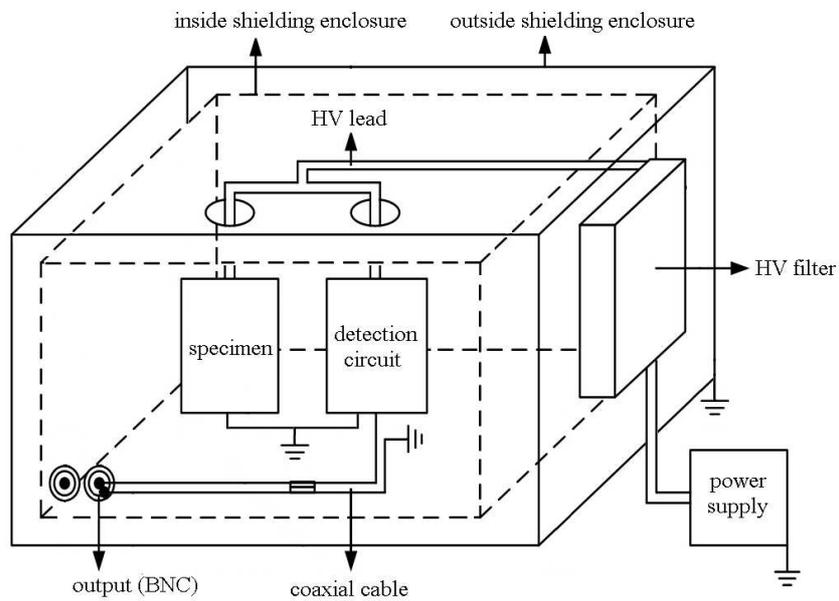


그림 4.7 차폐함의 개략도

Fig. 4.7 Schematic diagram of the shielding enclosure

방사 잡음에 대한 차폐함의 차폐효과는

$$SE(dB) = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 20 \log \frac{H_1}{H_2} = 20 \log \frac{E_1}{E_2} \quad (4.4)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 차폐기법 적용시 사용되는 재질의 투자율 및 도
전율을 고려할 때 차폐효과는

$$SE(dB) = 20 \log [e^{-\alpha t} \cdot \frac{(1+K)^2}{4K} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 \cdot e^{-2\alpha t} \right\}] \quad (4.5)$$

와 같이 된다. 여기서, $\alpha = \sqrt{\pi f \mu \sigma}$, $K = \frac{Z_\omega}{Z_m} = \frac{k \sqrt{\mu_o / \epsilon_o}}{\sqrt{\frac{j\omega \mu}{\sigma + j\omega \epsilon}}}$ 이다.

상기의 K 값에서 Z_ω 는 거리에 따른 방사 잡음에 대한 파동임피던스를 나
타낸 것으로

$$Z_\omega = \frac{|\vec{E}_t|}{|\vec{H}_t|} = \begin{cases} Z_E = \frac{n_o \lambda_o}{2\pi r} \gg n_o \\ Z_H = \frac{n_o 2\pi r}{\lambda_o} \ll n_o \end{cases} \quad (4.6)$$

와 같이 표현된다. 식 (4.5)을 흡수손실(A), 반사손실(R) 및 다중 반사손
실(B)로 표현하면

$$SE(dB) = A_{dB} + R_{dB} + B_{dB} \quad (4.7)$$

와 같으며, 본 연구에서는 차폐의 대상이 주로 근거리의 전기장에 의한
방사 잡음이고, 일반적으로 전기장 차폐에 있어 다중 반사손실은 그 영향
이 그다지 크지 않기 때문에 무시할 수 있다.

흡수손실은 다음 식과 같이 표현되며,

$$A_{dB} = 8.68 \alpha t \quad (4.8)$$

여기서 차폐 재료의 투자율, 도전율 등을 고려할 때 α 는 $\alpha = \sqrt{\pi f \mu \sigma}$ 와 같이 되고, 이를 고려하면 식 (4.8)은

$$A_{dB} = 8.68 t \sqrt{\pi f \mu \sigma} = 1.314 t \sqrt{\sigma_r \mu_r f} \quad (4.9)$$

와 같이 된다.

여기서, t : 금속체의 두께(cm), σ_r : 비도전율(구리의 도전율을 1이라할 때 도전율의 비율), μ_r : 비투자율, f : 차폐대상 주파수(MHz)이다. 반사 손실은 근거리 필드와 원거리 필드, 파동 임피던스에 따라 달라지는데 본 연구에서는 근거리 필드의 고임피던스 영역이므로 아래의 수식으로 표현할 수 있다.

$$R_{dB} = 322 - 10 \log_{10} \left(\frac{\mu_r r^2 f^3}{\sigma_r} \right) \quad (4.10)$$

여기서, r 은 잡음발생원으로부터 거리(m)이다. 따라서 전기장에 대한 차폐함의 차폐효과는

$$SE(dB) = [1.314 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r}] + [322 - 10 \log_{10} \left(\frac{\mu_r r^2 f^3}{\sigma_r} \right)] \quad (4.11)$$

과 같다.

2중 차폐구조의 차폐함에서 외부에는 니켈 78.5%에 철이 21.5% 혼합된 합금재질로 이때 비투자율은 4,000이고, 도전율은 0.238의 값을 가지므로 식 (4.11)에 의해 차폐효과는 360 dB로 계산된다. 내부의 차폐함은 도전율이 높은 동 재질로 비투자율과 도전율은 모두 1의 값을 가지며, 차폐효과

는 293 dB로 얻어진다. 그러나 내부 차폐함의 경우에는 한쪽 면이 열려있는 상태이므로 개구부를 통한 방사잡음의 침투가 발생하는데 이는 식 (4.12)에 의해 계산될 수 있다.

$$SE_L = 20 \log(Lf) + 20 \log(1 + \ln \frac{L}{S}) - 20 \log n + 27.3 \frac{d}{L} \quad (4.12)$$

여기서, L : 개구부 길이, S : 개구부 높이, d : 차폐재료의 두께(mm) 이다. 따라서 식 (4.11)에 의해 산출된 차폐효과에 식 (4.12)에서 계산된 침투효과를 고려하면 내부의 동판에 의한 차폐효과는 190 dB로 얻어진다.

본 연구에서 제작한 2중 구조의 차폐함에서는 외부 방사 잡음에 대하여 550 dB의 차폐효과를 기대할 수 있다.

차폐함을 이용하면 방사잡음은 효과적으로 차단되지만, 입력전원으로부터 발생하는 전도 잡음에 대한 대책은 되지 못한다. 따라서 전도 잡음 제거를 위해서는 전원공급 인입단에 필터를 설치하는 것이 가장 효과적이다. 잡음제거를 위하여 필터를 적용하고자 할 경우에는 전원의 특성을 정확히 파악하는 것이 선행되어야 한다. 전원필터 적용시에는 정상적인 전원주파수 신호는 그대로 통과시키고, 수십 kHz 대역의 잡음 신호는 차단할 수 있는 구성이 필요하다. 부분방전시험을 위한 전원공급부는 일반적으로 220 V의 전원을 공급받아 시험용 변압기로 승압시키는 과정을 거치게 되므로 입력전원에 고주파 잡음이 존재하면 시험용 변압기에 그대로 전달된다. 따라서 효과적인 잡음제거를 위해서는 전원공급의 인입단에서 전도 잡음을 최대한 억제하는 것이 필요하다. 따라서 그림 4.8과 같이 전원공급 인입단에 노이즈차단 변압기(NCT : Noise Cut Transformer)를 설치하고, 시험용 변압기 출력단에서는 다시 직렬 인덕턴스를 접속함으로써

부분방전검출을 위한 결합회로의 시료 및 결합콘덴서의 정전용량을 이용하여 LC 고전압 필터회로를 구성하였다^{[56],[57]}. 최종적으로 전도 잡음은 전원공급의 입력단에서 NCT를 통해 1차적으로 억제되고, 시험전압 출력측에 고전압 LC필터에 의해 다시 한번 차단된다. 여기서 사용한 직렬 인덕터는 결합콘덴서의 정전용량이 비교적 작고 제한적으로 사용되기 때문에 충분한 감쇄비를 얻기 위하여 높은 투자율을 갖는 적층구조의 철심코어를 사용하였다. 철심코어에 감아놓은 권선은 부분방전이 생기는 것을 막기 위하여 절연내력 40 kV의 실리콘 케이블을 사용하였다.

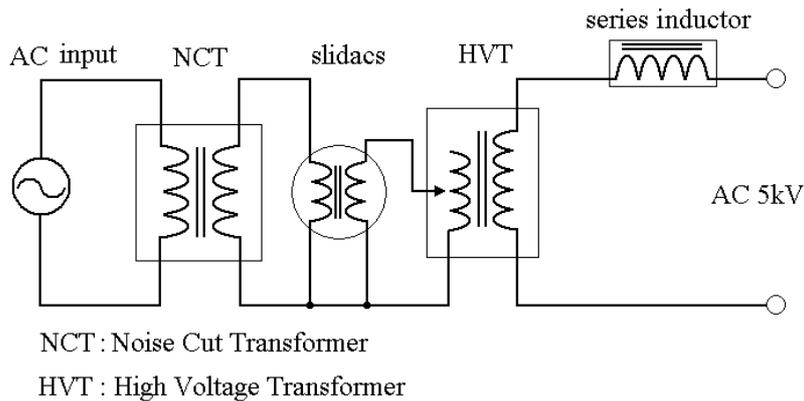


그림 4.8 전원공급부의 구성
Fig. 4.8 Configuration of the power supply

상기의 조건에 의해 인덕터의 용량은 다음 식과 같이 표현된다^{[58]~[60]}.

$$L = \frac{\mu \mu_r N^2 s}{2 \pi b} \quad (4.13)$$

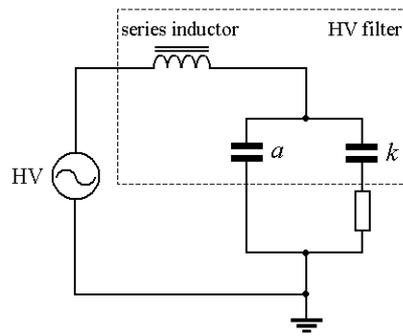
여기서, μ_r : 철심의 비투자율(2,000), N : 감은 권선수(20 T), s : 철심코어의 단면적, b : 철심코어의 반경이다. 식 (4.13)에 의해 계산된 인덕터의

용량은 대략 2.74 mH가 된다. 그림 4.9와 같이 직렬형 인덕터를 제작하였으며, RLC미터로 인덕턴스의 값을 측정한 결과 100 Hz 범위에서 약 2.3 mH의 값을 나타내었다.

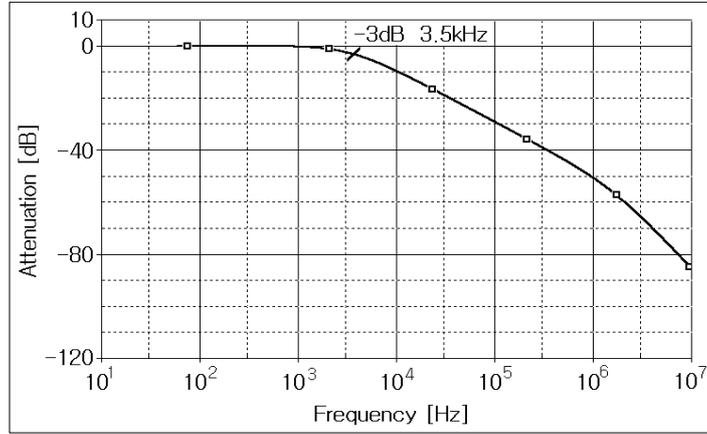
고전압 출력단에 구성된 LC 필터회로의 주파수 특성을 평가하기 위하여 PSpice 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 그림 4.9(c)에 나타내었다. 진도성 잡음에 대한 차단주파수는 3.5 kHz로 시료에 인가되는 60 Hz의 시험전압은 그대로 통과하고, 3.5 kHz이상의 잡음에 대해서는 효과적인 차단이 가능하다. 부분방전 검출회로에서 결합회로망을 고려하면 전원에 의한 전도 잡음은 부분방전 검출에 영향을 주지 않는 범위로 억제된다.



(a) 직렬인덕터



(b) HV 필터



(c) 주파수 특성

그림 4.9 고전압 필터

Fig. 4.9 HV Filter

접지측을 통해 유입되는 잡음은 생산 공정과 같이 각종의 전기기기를 사용할 때 발생하는 고주파 잡음이 대부분이며, 낙뢰 또는 전력계통의 지락 사고 등에 의해 대지전위가 상승함에 따라 발생하기도 한다. 이러한 잡음에 대한 대책으로는 단일접지방식이 가장 현명한 방법으로 판단되며, 본 연구에서는 접지시스템이 양호한 실험실내의 평가가 이루어지므로 전원공급부와 측정시스템의 접지에 단일접지방식을 적용함으로써 접지 잡음을 최소화 하였다.

4.3 측정시스템의 평가

제안한 부분방전 측정시스템은 그림 4.10과 같이 시험전압 공급부, 결합회로망, 증폭회로 및 오실로스코프 등의 측정 장치로 구성되는데, 검출회로는 외부 잡음에 대한 대책으로 차폐함 내부에 설치된다.



그림 4.10 부분방전 측정시스템의 사진
Fig. 4.10 Photograph of the PD measurement system

부분방전 검출에서는 측정시스템의 잡음 특성에 따라 검출감도가 달라지며, 잡음에 대한 충분한 대책을 적용하더라도 완전히 제거하는 것은 불가능하므로 잡음레벨을 정확히 측정·분석할 필요가 있다. 따라서 전원공급부, 결합회로망, 증폭회로를 검토하여 잡음 발생을 최소화 하고 측정시스템에 대한 잡음 특성 평가를 수행해야 한다.

측정시스템에서의 잡음은 외부잡음과 내부잡음으로 구분할 수 있으며, 정확한 부분방전 검출을 위해서는 외부 잡음을 적절히 차단하고, 내부 잡음에 대한 정확한 분석이 요구된다. 외부 잡음의 경우에는 앞서 언급한 바와 같이 전원공급부에 필터의 설치, 차폐함의 설계·제작, 단일 접지 시스템 적용 등의 방법으로 부분방전 펄스 검출과는 무관하게 충분한 대책을 마련하였다.

내부 잡음의 경우에는 특별히 억제 또는 제거할 방법이 없기 때문에 잡음 레벨을 고려하여 잡음레벨 이상의 부분방전 펄스만을 검출하는 것으로 만족해야 한다. 그러나 내부 잡음은 결합회로에 안정적인 소자를 사용하고, 저잡음 증폭기의 적용, 접속부의 완전한 처리 등으로 줄일 수 있다. 내부 잡음의 발생원으로는 결합콘덴서, 결합회로, 증폭회로에 의한 것으로 구분된다. 특히 결합콘덴서의 경우에는 시험전압 범위에서 내부 방전이 발생하는 경우에는 피시험체에서 발생하는 부분방전 펄스로 오인되기도 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 결합콘덴서는 시험전압 범위이내에서는 방전이 발생하지 않는 것을 사용하는 것으로 해결할 수 있다.

결합회로망에서는 특별한 잡음을 발생시키지 않는 것으로 판단되며, RLC 정수를 사용함에 있어서 공진현상에 따른 잡음이 발생할 수 있으나 부분방전 검출의 주파수 범위가 수 MHz 대역이기 때문에 공진현상에 의한 잡음의 영향은 받지 않는 것으로 판단된다.

내부 잡음의 가장 큰 원인은 증폭회로에 의한 것이며, 특히 증폭회로에 적용되는 연산증폭기 자체의 잡음에 대한 영향이 크다. 따라서 증폭기 선정에 있어 주파수대역 및 증폭도 등에 대한 것뿐만 아니라 잡음 레벨에 대한 충분한 고려가 있어야 한다. 증폭회로에 사용된 연산증폭기의 잡음 레벨은 최대 $1.6 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ 정도로 우수한 잡음 특성을 갖는다. 그러나 증폭기의 증폭도를 높이거나, 차동입력을 가지는 형태로 사용하면 증폭기 자체의 잡음레벨이 다소 높아지는 특성을 나타낸다. 또한 증폭기에 대한 잡음의 영향은 제거하기가 어렵기 때문에 잡음레벨에 대한 정확한 측정과 분석을 통해 적절한 검출감도를 산출해야 한다.

전원공급부와 검출회로에서 발생하는 잡음이 있다면 정확한 부분방전 검출이 불가능하기 때문에 측정시스템의 잡음 평가는 시험전압 범위내에서 전원공급부와 결합콘덴서에서 잡음 특성을 평가하였다. 결합콘덴서의 중요한 특성으로 내부방전은 최대 사용 전압에서 5 pC 이하로 정해져 있다. 그러나 본 연구에서는 1 pC 이하의 부분방전 측정을 목적으로 하기 때문에 1 pC 이하로 내부방전이 보증되는 전압에서 사용하였다. 결합콘덴서의 내부방전은 그림 4.11과 같이 2.64 kV에서 약 0.2 pC 정도의 방전이 발생하고, 1분간 3 kV의 전압을 일정하게 인가하였을 때 최대 방전전하량은 0.4 pC으로 대단히 적은 범위에서 발생하며, 방전소멸전압은 2.4 kV로 측정되었다. 저압용 전기전자기기에서 부분방전 검출은 내전압 시험전압보다 낮은 범위로 피시험체에 전기적인 스트레스가 최소화 되도록 적용하기 때문에 결합콘덴서는 측정전압 범위내에서 안정적인 특성을 가지는 것으로 평가되었다.

전원공급부와 결합회로망에서 발생하는 잡음에 대한 평가를 위하여 그림 4.12와 같은 회로를 구성하였다. 검출회로에서 피시험체를 제거하고 두 개의 결합콘덴서를 설치하였으며, 각각에 증폭회로를 접속하여 전원공급

부와 결합회로망에서 발생하는 잡음신호를 측정하였다. AC 2kV의 시험 전압을 공급한 상태에서 최소 잡음신호 이외의 외부 또는 내부 방전 신호는 발생하지 않으므로 부분방전 측정에 영향을 주지 않는 것으로 평가되었다.

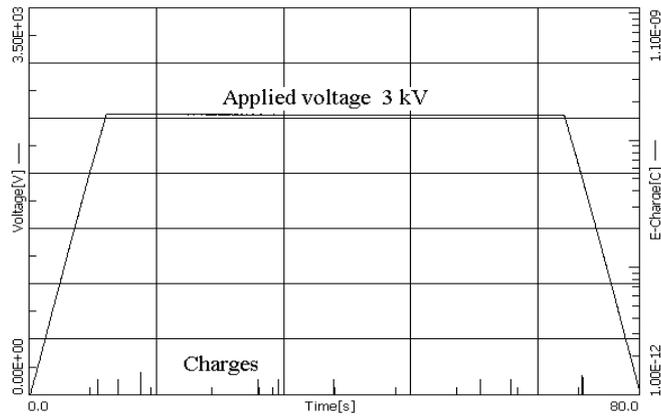


그림 4.11 결합콘덴서의 부분방전 평가
Fig. 4.11 PD testing of the coupling capacitor

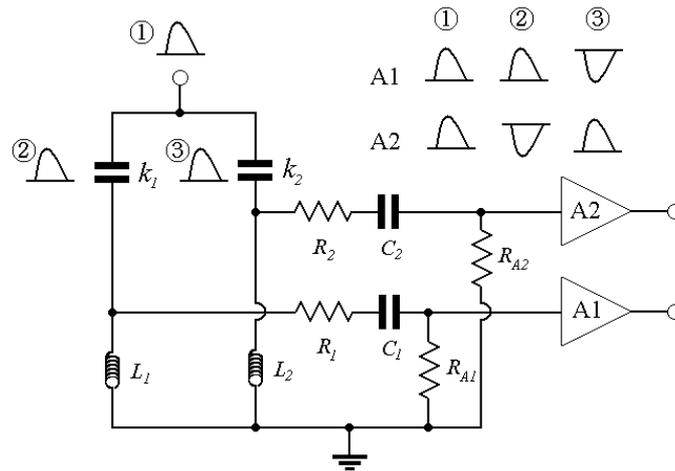
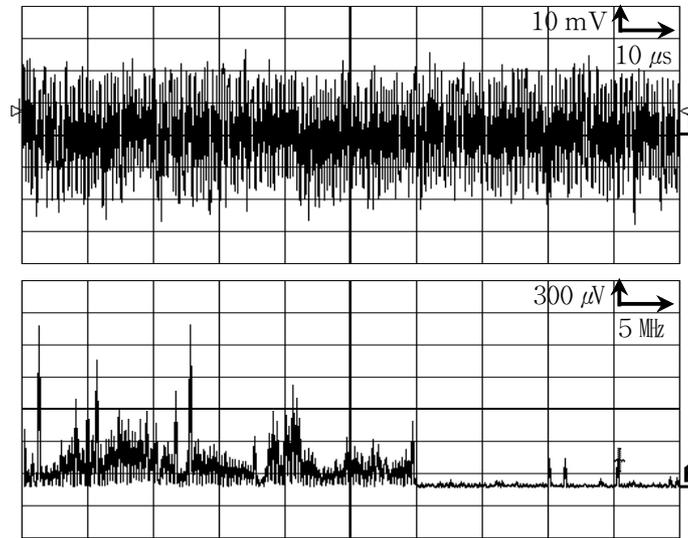
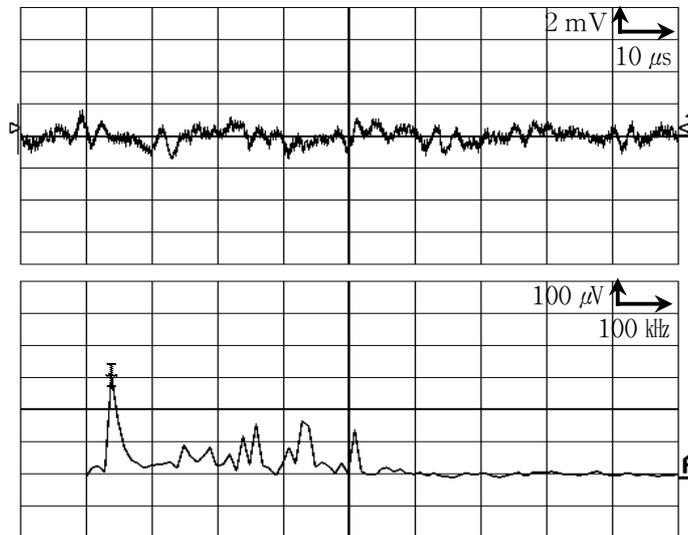


그림 4.12 결합회로망의 잡음 평가회로
Fig. 4.12 Noise test circuit of the coupling network

측정시스템의 잡음에 대한 평가에는 실제 측정회로와 동일한 구성에서 평가가 이루어져야 하므로 2kV의 시험전압이 인가된 측정 대기상태에서 잡음 크기의 변화를 측정·분석하였다. 잡음 신호는 외부 및 내부 잡음을 모두 포함하기 때문에 차폐함의 차폐효과도 검증할 수 있는데 잡음 측정 시 차폐함의 개구부가 열렸을 때와 닫혔을 때 잡음 레벨을 측정하여 비교하였다. 측정된 잡음 신호는 그림 4.13과 같이 차폐함의 개구부가 열려 있는 상태에서 잡음 레벨은 50 mV_{p-p}로 나타나고 주요 주파수 범위는 2 ~ 45 MHz 범위에서 관측되었다. 13 MHz, 20 MHz, 45 MHz의 방사잡음 성분이 측정되지만, 개구부를 완전히 닫으면 잡음 신호는 3 mV_{p-p}로 측정되고, 주요 주파수 성분은 400 kHz 이하로 방사잡음은 완전히 차단된다. 전원공급부에는 전도 잡음에 대한 대책으로 NCT와 고전압 필터를 사용하기 때문에 400 kHz 이하의 성분은 증폭기 내부 잡음과 접지로부터 유입되는 것으로 추정된다.



(a) 개구부 열림



(b) 개구부 닫힘

그림 4.13 잡음 레벨 평가
Fig. 4.13 Evaluation of noise level

제 5 장 부분방전시험 및 분석

현재 저압용 전기전자기기는 내전압시험을 통해 품질관리 및 절연성능 평가가 이루어지고 있는 실정이며, 이 방법은 피시험체의 절연파괴에 따라 발생하는 누설전류의 값을 측정하는 것으로 시험 중 기기의 절연성능 저하를 초래한다. 내전압시험에서는 시험기준을 만족하더라도 이미 기기의 절연성능을 저하시키기 때문에 초기 고장률 증가의 요인이 되고 있다. 따라서 피시험 기기의 절연성능에 영향을 주지 않는 범위에서 절연평가를 수행할 수 있는 방법으로 부분방전시험법을 제안하였다.

정확한 부분방전의 측정을 위해서는 이미 알고 있는 크기의 방전전하량을 이용하여 측정시스템의 교정 평가를 수행하는 것이 필요하다. 특히 동일한 측정시스템에서 시험 대상 시료가 변경될 경우, 시료의 정전용량의 변화에 의해 검출되는 부분방전의 크기도 달라지기 때문에 시험대상이 바뀌는 경우에는 교정평가가 먼저 이루어져야 한다. 본 연구에서는 전용의 교정기(CAL1A, 1 ~ 100 pC, GmbH)를 이용하는 방법으로 교정실험을 수행하였으며, 교정기는 1 ~ 100 pC의 정극성 및 부극성의 방전펄스 출력을 가지는 것으로 사양은 표 5.1과 같다.

부분방전펄스는 시료측에서 발생하여 검출임피던스로 전달되므로 그림 5.1과 같이 시료측에 교정기를 접속한 상태에서 교정평가를 수행해야 하며, 교정기 내부 정전용량은 시료 정전용량에 비해 1/10 이하의 작은 값을 가질 때 정확한 교정이 가능하다^[42].

표 5.1 교정기의 사양

Table 5.1 Specifications of the calibrator

Model	CAL1A
Maker	GmbH
Range [pC]	1 ~ 100
Injection capacitor [pF]	below 1 pF
IEC60270 compliant	OK
Connection	BNC type

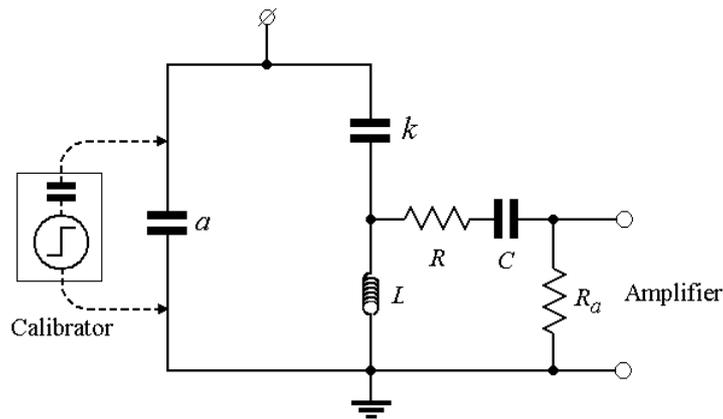


그림 5.1 교정방법

Fig. 5.1 Calibration method

현재까지 저압용 전기전자기기의 절연성능 평가를 위한 방법으로는 절연저항, 유전손실각의 측정 및 절연파괴 유무의 평가에 의한 내전압시험이 주로 적용되고 있다. 절연저항이나 유전손실각의 측정은 주위 환경조건에 따라 크게 달라지므로 주기적인 측정과 관리가 필요하며, 내전압시

험에 의한 방법은 기기의 절연과괴로 인한 누설전류를 측정하는 시험으로 피시험체의 절연성능을 저하시키는 단점이 있다. 따라서 저압용 전기전자 기기에서도 가능한 낮은 전압에서 미소 부분방전을 측정하는 것으로 절연성능을 평가하는 부분방전시험법의 적용이 요구된다. 저압용 기기에서는 고압과는 달리 사용되는 절연체의 두께나 구조, 재질 등에서 다소 차이가 있기 때문에 발생하는 부분방전 펄스는 미소한 크기로 나타나고, 방전개시전압에서 수십 pC 이상의 방전전하량을 나타내는 경우 심각한 열화가 진행된 것으로 평가하고 있다. 국내외 규격에서도 저압용 전기전자기기에 부분방전시험을 적용하는 경우, IEC 60664-1에서는 10 pC 이상의 방전전하량이 검출되면 열화상태로 판단하고 있으며, 특별한 경우에는 2 pC의 전하량을 판단기준으로 하고 있다. 또한 IEC 60558에서는 단순히 700 V 이하에서 부분방전이 발생하지 않아야 한다고 정의하고 있다. 그러므로 피시험체의 절연성능에 영향을 주지 않는 범위에서 절연평가를 수행하기 위하여 부분방전 측정시스템은 가능한 낮은 전압영역에서 1 pC 전후의 방전전하량 검출이 가능해야하며, 방전개시전압과 방전소멸전압에 대한 정확한 측정이 요구된다.

본 연구에서는 절연변압기와 유도전동기를 대상으로 부분방전시험과 내전압시험에 의한 절연성능 평가를 수행하였다.

저압용 전기전자기기의 부분방전시험에 관한 규격에서는 단순히 방전전하량에 대해서만 판단기준을 정의하고 있지만, 방전전하량의 크기만으로는 절연성능의 정확한 평가가 불가능하므로 방전에 관련된 파라미터를 종합적으로 분석하여 절연평가를 수행해야 한다.

부분방전실험에서는 현재 사용되고 있는 내전압시험을 병행하여 시험전후의 절연상태를 비교·분석하는 것으로 내전압시험이 피시험체의 절연성능에 미치는 영향을 평가하였다. 절연성능 평가에 이용되는 방전 파라미터

는 방전전하량, 방전펄스의 위상분포, 방전개시전압과 소멸전압, 방전전하량의 누적분포 등으로 이러한 방전 파라미터를 측정·분석함으로써 저압용 전기전자기기에 효과적으로 적용할 수 있는 부분방전시험법을 제시하고자 한다.

5.1 절연변압기

절연변압기의 경우에는 각종 전자회로의 전원공급부 등에 주로 사용되기 때문에 설치된 상태에서 절연성능을 평가하는 것은 불가능하므로 생산단계 초기에 정확한 절연성능을 평가할 수 있어야 한다. 현재 절연변압기의 절연성능 평가에는 내전압시험법을 적용하고 있으며, 내전압시험은 규격마다 다소간의 차이는 있지만 대체적으로 1,500 V의 전압을 적용하고 있다^{[9]~[11],[61]}. 부분방전시험은 초기상태에서 1차적으로 시험전압에 따른 초기 절연상태의 방전 파라미터를 산출하고, 내전압시험 후 변화를 관측함으로써 절연성능을 평가하였다. 절연변압기에서 부분방전은 권선과 철심사이 또는 권선간에 발생할 수 있으므로 각각의 조건에 대하여 동일한 실험을 수행하였다.

5.1.1 1차권선과 철심

(1) 교정실험결과

부분방전시험에서는 시험대상에 따라 검출감도가 달라지므로 시험 전에 교정평가가 필요하므로 시료를 검출회로에 접속한 상태에서 그림 5.1에 언급한 방법대로 교정실험을 수행하였다.

교정실험은 전용의 교정기에서 이미 알고 있는 전하량의 교정펄스를 주입하고, 이때 검출회로에서 측정되는 전압신호를 방전전하량으로 환산하여 피시험체에 따른 측정시스템의 감도를 산출한다. 그림 5.2는 1 pC의 정극

성 교정펄스에 대한 측정시스템의 응답파형을 나타낸 것으로 상승시간은 약 30 ns이고, 펄스의 지속시간은 75 ns 정도로 측정되었다. 교정신호는 1 ~ 50 pC까지 정극성 및 부극성으로 주입하였으며, 교정실험결과로부터 측정시스템의 검출감도는 정극성에서 34.8 mV/pC, 부극성에서 25.2 mV/pC으로 산출되는데 극성에 따른 감도의 차이를 방전전하량으로 환산할 경우 0.28 pC으로 비교적 큰 차이를 나타내었다. 이는 절연변압기의 절연구조에 기인한 것으로 극성에 따라 교정펄스의 전달경로가 상이하기 때문인 것으로 추정된다.

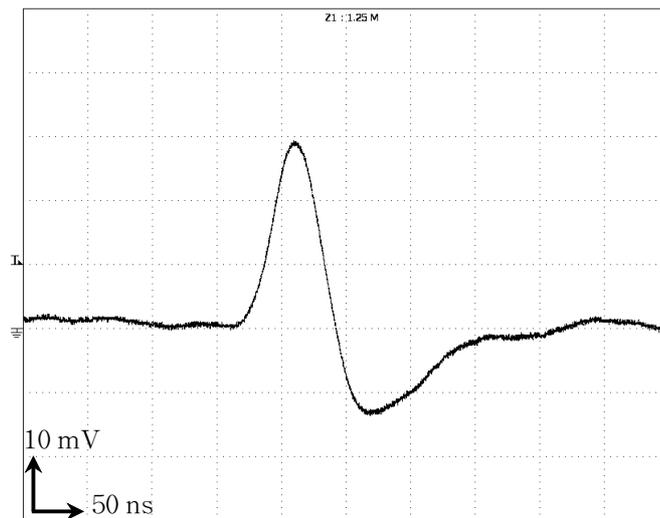


그림 5.2 1차권선과 철심사이에서 교정펄스에 대한 응답파형
 Fig. 5.2 Response waveform to the calibration pulse between the primary coil and the core

그림 5.3은 절연변압기의 1차권선과 철심사이에서 교정펄스에 대한 응답 전압의 관계를 나타낸 것으로 전구간에서 선형적인 특성을 나타내지만 극성에 따른 검출감도의 차이는 명확하게 나타나므로 방전펄스의 극성을 고

려한 평가가 이루어져야 한다. 측정시스템의 잡음레벨을 고려하면 최소 검출 가능한 방전펄스는 정극성에서 0.17 pC, 부극성에서 0.24 pC이었다.

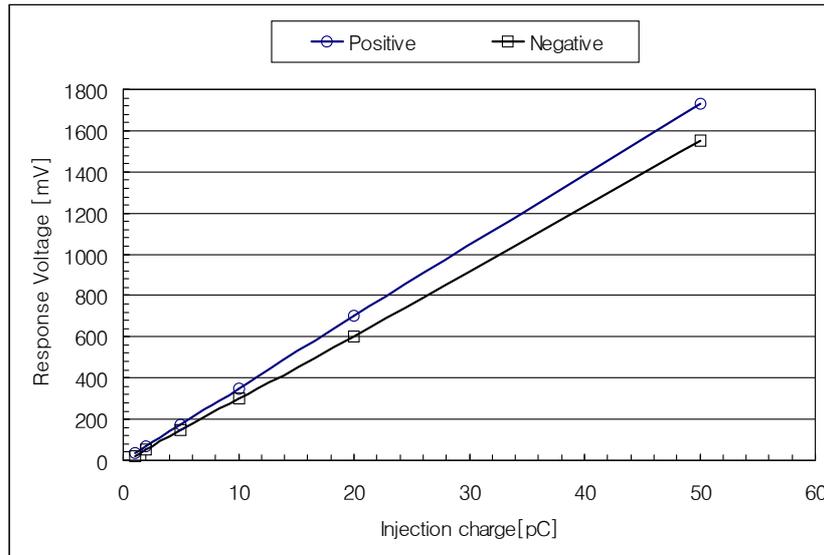
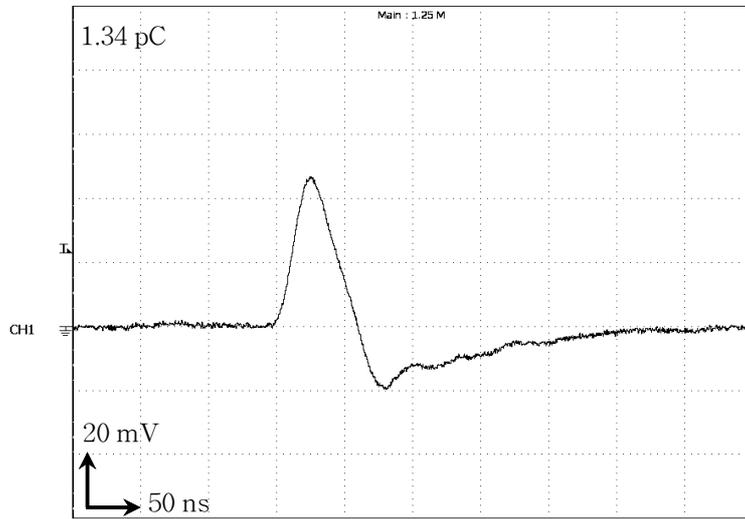


그림 5.3 1차권선과 철심사이에서 교정펄스에 대한 응답전압
 Fig. 5.3 Response voltage as a function of calibration pulse between the primary coil and the core

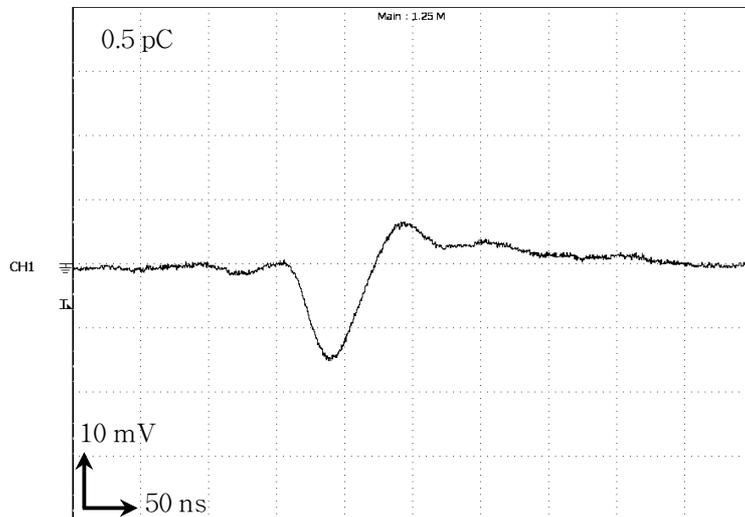
(2) 부분방전시험

부분방전실험에 사용한 절연변압기의 내전압시험 기준은 220 V 전압을 사용하기 때문에 1,500 V의 전압에서 1분간 절연파괴가 일어나지 않는 것으로 규정되어 있다. 따라서 절연변압기를 대상으로 내전압시험 전의 초기상태에서 부분방전시험을 실시하고, 이후 1분간의 내전압시험과 10분간의 에이징에 의한 모의 열화과정을 거친 후 부분방전 파라미터의 변화를 분석하였다.

먼저 초기상태 시료에서 방전개시전압은 750 V이었으며, 방전전하량은 그림 5.4와 같이 정극성에서 1.34 pC, 부극성에서는 0.5 pC으로 나타났다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 5.4 내전압시험 전 1차권선과 철심사이에서 방전과형
 Fig. 5.4 Typical PD waveforms measured between the primary coil and the core before WVT

인가전압에 따른 방전전하량의 변화는 표 5.2와 같으며, 낮은 전압에서는 정극성의 부분방전 펄스가 크게 나타나고 상대적으로 높은 전압에서는 부극성의 방전펄스가 더 크게 측정되었다. 이러한 현상은 시험전압의 극성에 따른 방전 메커니즘의 차이와 절연물 내부에 존재하는 결함의 위치 등에 따라 달라지는 것으로 추정된다. 그림 5.5에서는 인가전압이 상승함에 따라 방전전하량은 급증하는 경향을 나타내었으며, 내전압 시험전압보다 낮은 전압에서 수십 pC의 방전펄스가 검출되었다.

방전전하량의 누적분포는 그림 5.6과 같이 인가전압의 크기에 따라 발생빈도와 방전전하량의 크기가 증가하는 경향을 나타내었으며, 1,150 V의 전압에서 방전전하량의 크기는 100 pC에 이르는 방전 펄스도 관측되었다.

표 5.2 내전압시험 전 1차권선과 철심사이에서 부분방전 시험결과
Table 5.2 PD test results between the primary coil and the core before WVT

정극성		부극성	
시험전압 [V]	방전전하량 [pC]	시험전압 [V]	방전전하량 [pC]
750	1.34	750	0.50
778	2.32	778	1.25
847	4.20	847	5.35
919	5.14	919	6.71
990	12.10	990	13.75
1,050	14.57	1,050	24.05
방전개시전압	750 V	방전개시전압	750 V
방전소멸전압	735 V	방전소멸전압	735 V

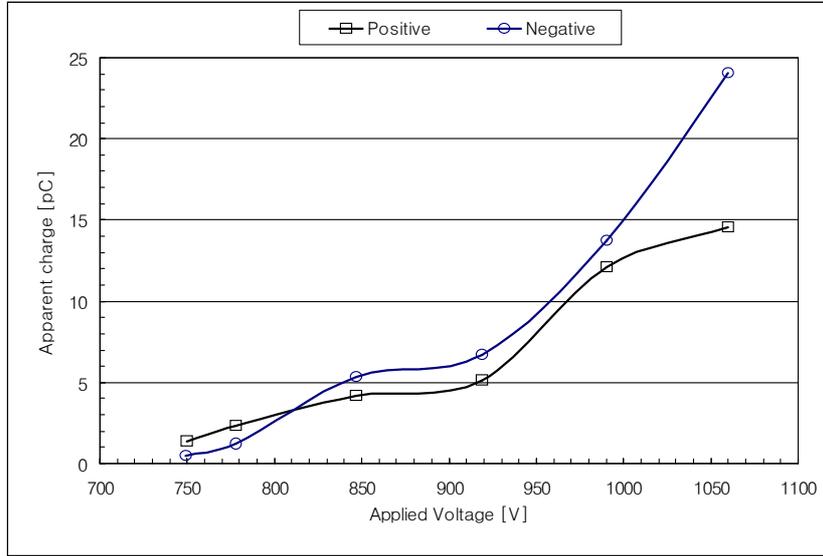


그림 5.5 내전압시험 전 1차권선과 철심사이에서 방전전하량의 변화
 Fig. 5.5 Changes in apparent charges between the primary coil and the core before WWT

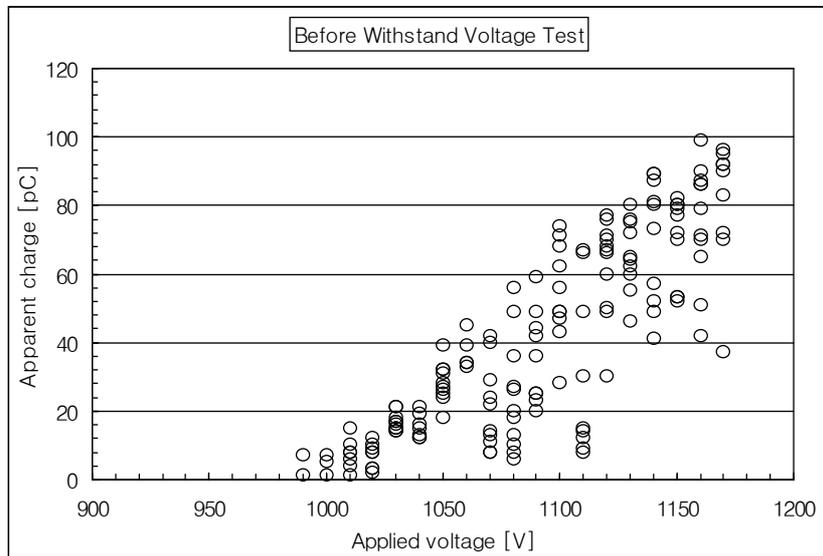
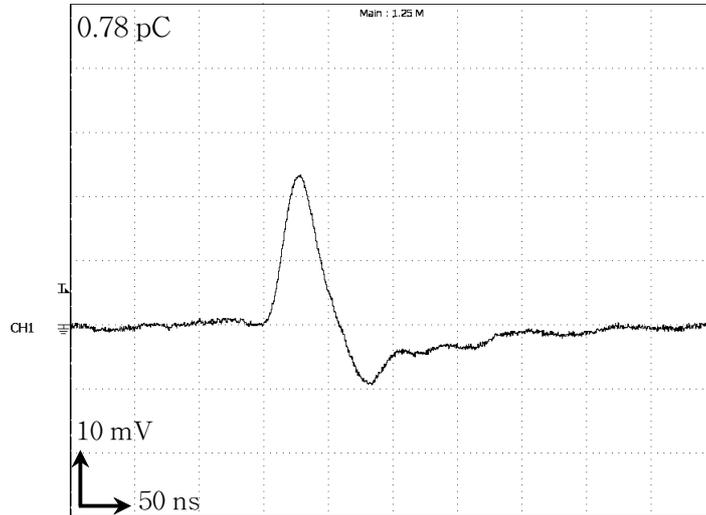


그림 5.6 내전압시험 전 1차권선과 철심사이에서 방전전하량 분포
 Fig. 5.6 Apparent charge distribution between the primary coil and the core before WWT

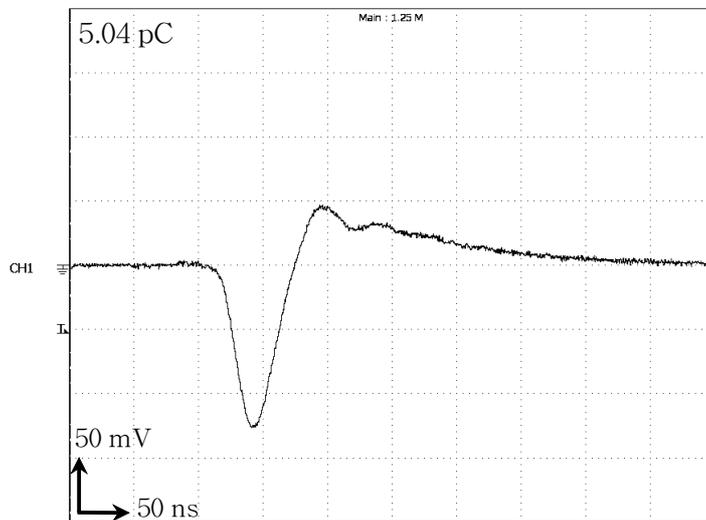
초기상태 시료에 대한 방전 파라미터를 측정된 후 내전압시험을 실시하였으며, 내전압시험에는 1,500 V의 전압을 1차권선과 철심사이에 1분간 인가하고, 누설전류 레벨은 1 mA로 설정하였다. 내전압시험을 수행한 결과 1 mA의 누설전류는 발생하지 않았으며, 시험기준으로 볼 때 절연성능에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 내전압시험을 실시한 시료에 대하여 초기상태 시료와 마찬가지로 동일한 부분방전시험을 수행하였다.

내전압시험 후, 방전개시전압은 707 V로 초기상태에 비하여 낮게 측정되었으며, 이때 검출되는 방전펄스는 그림 5.7과 같이 정극성에서 0.78 pC, 부극성에서 5.04 pC으로 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

인가전압에 따른 방전전하량의 변화는 표 5.3과 그림 5.8과 같이 얻어졌으며, 초기상태와 비교하면, 방전개시전압과 방전소멸전압은 감소하고, 동일한 전압영역에서 검출되는 방전펄스의 크기는 증가하는 것으로 관측되었다. 시험전압 990 V 이후에는 50 pC 이상의 방전펄스가 검출되는 등 내전압시험으로 인해 1차권선과 철심사이에서 절연성능의 저하가 발생하는 것으로 평가되었다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 5.7 내전압시험 후 1차권선과 철심사이에서 방전파형
 Fig. 5.7 Typical PD waveforms measured between the primary coil and the core after WVT

표 5.3 내전압시험 후 1차권선과 철심사이에서 부분방전 시험결과
 Table 5.3 PD test results between the primary coil and the core after WVT

정극성		부극성	
시험전압 [V]	방전전하량 [pC]	시험전압 [V]	방전전하량 [pC]
707	0.78	-	-
778	5.20	778	5.04
847	11.67	847	6.23
919	18.00	919	14.09
990	51.67	990	56.75
방전개시전압	707 V	방전개시전압	778 V
방전소멸전압	664 V	방전소멸전압	664 V

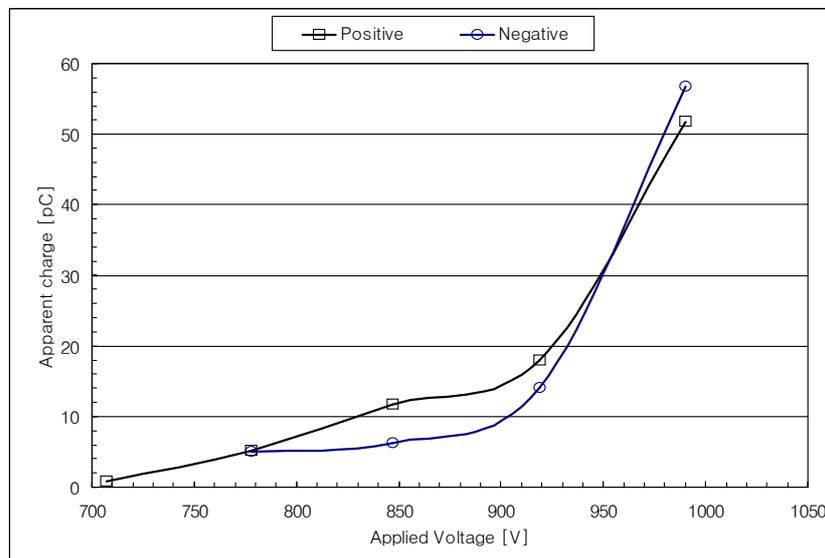


그림 5.8 내전압시험 후 1차권선과 철심사이에서 방전전하량의 변화
 Fig. 5.8 Changes in apparent charges between the primary coil and the core after WVT

내전압시험 후 방전전하량의 누적분포에 대한 특성은 그림 5.9와 같이 나타나는데 초기상태와 비교하면 상대적으로 낮은 전압에서도 방전펄스가 관측되며, 시험전압의 증가에 따라 방전펄스의 발생빈도와 크기도 현저한 증가를 나타내었다. 이는 내전압시험에 의해 절연성능의 저하가 발생된 것으로 동일한 전압영역에서 초기상태보다 방전전하량의 크기가 크고, 방전펄스의 수도 많아지는 것으로 측정되었다.

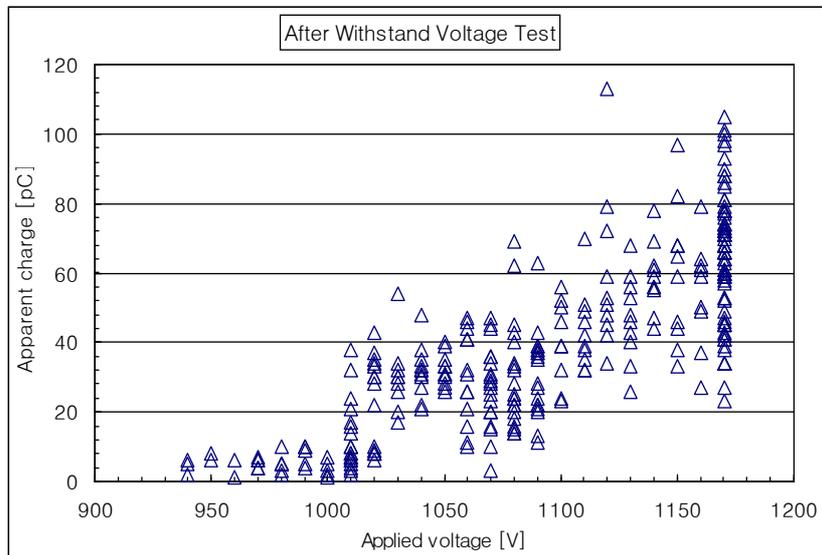


그림 5.9 내전압시험 후 1차권선과 철심사이에서 방전전하량 분포
 Fig. 5.9 Apparent charge distribution between the primary coil and the core after WWT

그림 5.10은 1,050 V 이하의 상대적으로 낮은 전압범위만을 확대하여 나타낸 것으로 방전전하량의 크기 및 발생빈도가 현저하게 증가하는 것으로 관측되었다. 초기상태에서는 시험전압 990 V 이상의 범위에서 방전펄스가 관측되지만 내전압시험 후에는 940 V에서부터 방전펄스가 측정되며, 시험전압 증가에 따라 방전펄스의 크기와 발생빈도가 더욱 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 내전압시험 후에는 낮은 전압에서 높은 방전전하량 분포를 나타내므로 내전압시험 중 피시험체의 절연성능 저하가 발생하는 것으로 판단된다.

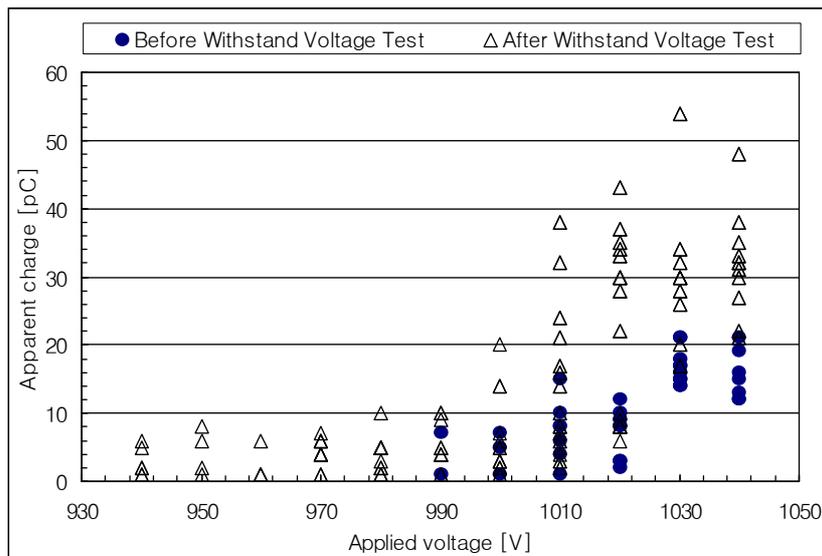
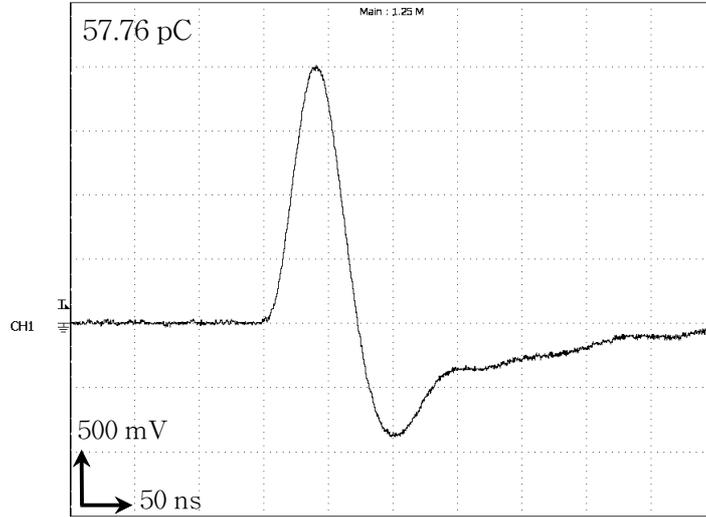


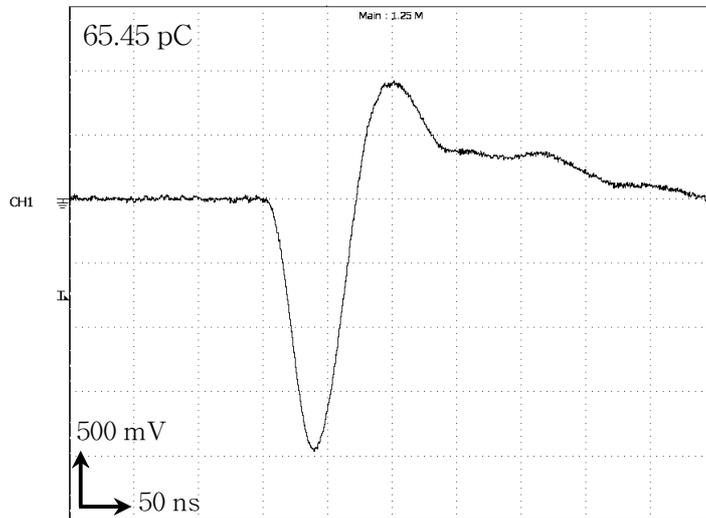
그림 5.10 1차권선과 철심사이에서 방전전하량 분포의 변화
 Fig. 5.10 Changes in apparent charge distribution between the primary coil and the core

절연상태에 보다 가혹한 상태를 모의하기 위하여 내전압 시험전압과 동일한 1,500 V의 전압을 10분간 인가하여 에이징 후 부분방전시험을 수행하였다. 에이징 후에도 1차권선과 철심사이에서는 1 mA의 누설전류를 초과하지 않으므로 내전압시험기준으로 볼 때 절연성능에 아무런 문제가 없는 것으로 평가된다. 그러나 부분방전시험을 수행한 결과, 방전전하량은 그림 5.11과 같이 495 V의 전압에서 약 60 pC 전후로 측정되어 에이징 후 현저하게 증가하였으며, 방전개시전압과 방전소멸전압은 그림 5.12에서와 같이 급격하게 낮아지는 특성을 나타내었다. 따라서 내전압 시험기준을 만족하더라도 피시험체는 절연성능에 심각한 저하를 초래할 수 있는 것으로 판단된다.

내전압시험 전후의 절연성능 저하에 대한 평가를 위하여 부분방전시험에서 중요한 파라미터인 방전펄스의 위상분포를 측정하였다. 시료는 앞서 실험한 시료와 동일한 것을 사용하고 제안한 부분방전 측정시스템을 적용하여 시험전압의 위상에 따른 방전펄스의 분포를 측정하였다. 측정결과는 그림 5.13과 같이 나타나는데, 먼저 초기상태 시료에서 920 V의 인가전압에 대한 위상분포 특성은 (a)와 같이 시험전압의 침두값에서 간헐적으로 나타나고 방전전하량의 크기도 수 pC으로 측정되며, 내전압시험 후에는 (b)와 같이 방전전하량의 크기뿐만 아니라 발생빈도도 증가하는 경향을 나타내었다. (c)는 에이징 후 측정결과로 인가전압 495 V에서 방전전하량이나 발생빈도가 이전의 결과에 비해 크고 많이 발생하는 특성을 나타내었다. 방전펄스의 위상분포로부터 내전압시험은 피시험체의 절연성능 저하를 발생시키므로 절연성능 평가법으로는 적합하지 못하며, 내전압 시험전압의 50%이내에서 절연성능 평가가 가능한 부분방전시험법을 적용하는 것이 효과적이라고 판단된다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 5.11 에이징 후 1차권선과 철심사이에서 방전파형

Fig. 5.11 Typical PD waveforms measured between the primary coil and the core after aging

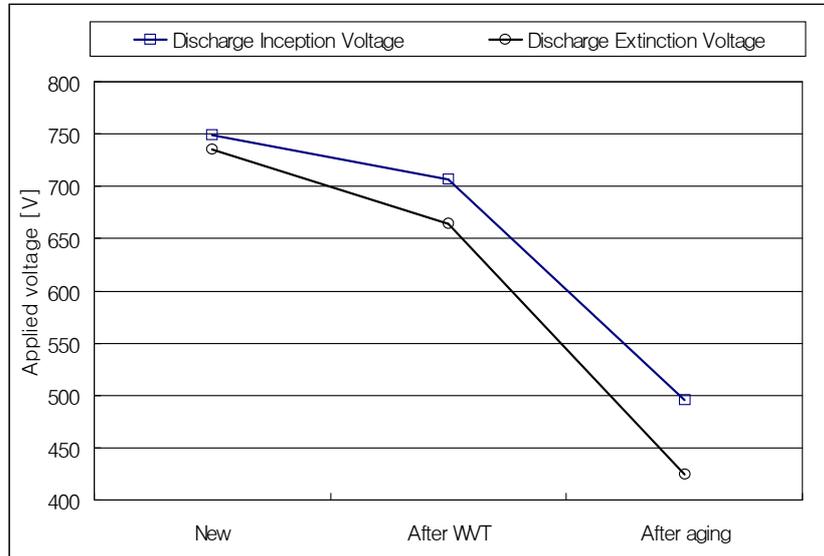
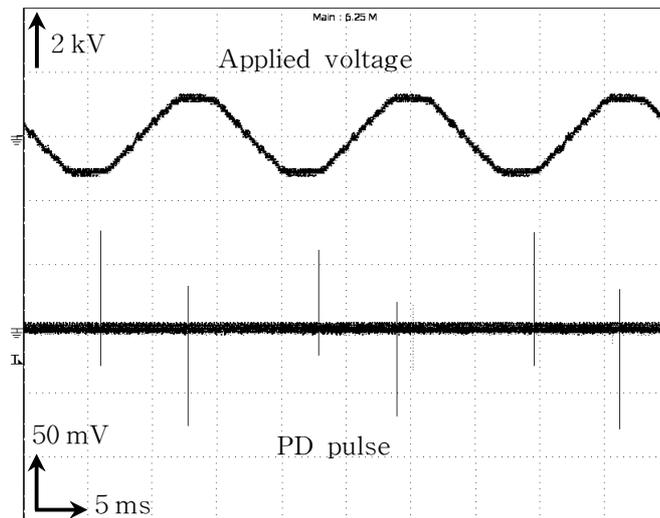
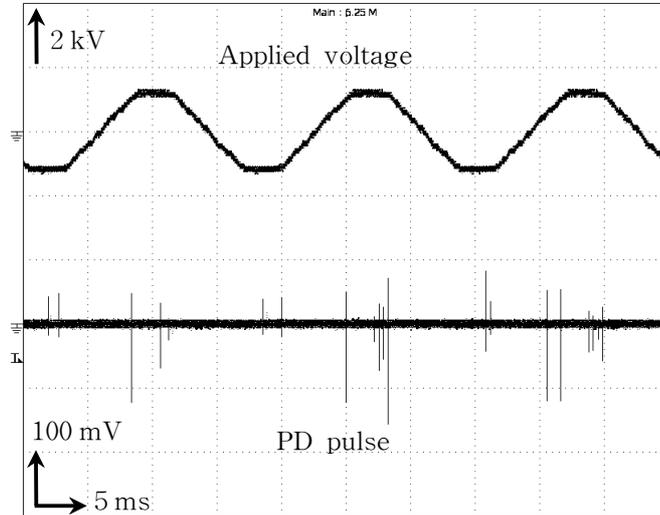


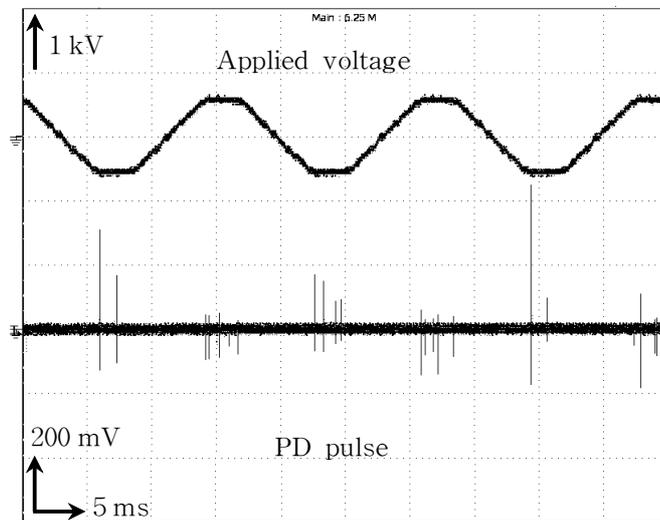
그림 5.12 1차권선과 철심사이에서 DIV와 DEV의 변화
 Fig. 5.12 Changes in DIV and DEV between the primary coil and the core



(a) 내진압시험 전



(b) 내진압시험 후



(c) 에이징 후

그림 5.13 1차권선과 철심사이에서 부분방진 위상분포
 Fig. 5.13 Phase distribution of PD pulse between the primary coil and the core

절연변압기의 1차권선과 철심사이에서 내전압시험과 부분방전시험을 적용하였으며, 실험결과로부터 다음과 같은 특성을 얻었다.

교정실험결과 절연변압기의 1차권선과 철심사이에서는 정극성 34.8 mV/pC, 부극성 25.2 mV/pC의 감도를 가지며, 잡음레벨을 고려한 최소 검출 가능한 방전펄스의 크기는 각각 0.17 pC과 0.24 pC으로 나타나므로 저압용 전기전자기기에서 발생하는 미소부분방전의 검출에 적합하였다.

내전압시험 전 초기상태 시료에서 부분방전시험을 수행한 결과, 최초 방전개시전압은 750 V로 나타나며, 내전압시험기준에 따라 1분간 시험전압을 인가한 후에는 707 V로 낮아지고, 시험전압을 10분 동안 인가한 에이징 후에는 495 V로 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 내전압시험과 에이징 실험에서 10분 동안 시험전압을 인가하여도 누설전류는 흐르지 않으므로 내전압 시험기준을 만족하고 피시험체의 절연성능은 양호한 것으로 평가되지만, 방전 파라미터의 분석으로부터 시험과정에서 피시험체의 절연성능을 저하시키는 것으로 확인되었다.

방전전하량의 변화는 방전개시전압에서 초기상태 시료의 경우 1 pC 내외의 작은 값이 관측되며, 1분간 내전압시험을 적용한 이후에는 5 pC, 10분 동안 인가하여 에이징 한 경우에는 60 pC 정도의 방전전하량이 검출되었다. 절연성능의 저하에 따라 방전전하량은 급격한 변화를 나타내므로 방전개시전압에서 방전전하량의 변화를 측정하는 것으로 절연성능 평가가 가능하다.

방전펄스의 위상분포의 분석으로부터 초기 상태에서는 시험전압의 첨두값 부근에서 간헐적인 부분방전이 발생하며, 이때 방전전하량의 크기는 수 pC 정도로 측정된다. 그러나 내전압시험과 에이징 후에는 방전펄스의 크기와 발생빈도가 증가하므로, 내전압시험에 의해 피시험체의 절연 저하가 발생함을 확인할 수 있었다.

5.1.2 1차권선과 2차권선

절연변압기는 1차권선과 2차권선 사이의 절연성능 평가도 중요하며, 여기에서도 내전압시험을 그대로 적용하고 있으므로 부분방전실험을 통해 내전압시험 전후의 절연성능 변화를 평가하였다.

(1) 교정실험결과

부분방전실험에 앞서 교정펄스를 주입하여 교정실험을 수행하였으며, 1 pC의 교정펄스에 대한 응답파형은 그림 5.14와 같이 상승시간은 약 40 ns로 1차권선과 철심사이에서 측정된 파형보다 다소 길어지는 특성을 나타내었으며, 펄스의 지속시간은 동일하게 측정되었다. 교정실험결과로부터 검출감도는 정극성에서 30 mV/pC, 부극성에서는 25.2 mV/pC으로 얻어졌으며, 정극성 및 부극성에 대한 감도의 차이는 4.8 mV로 방전전하량으로 환산할 경우 0.16 pC의 차이를 나타낸다.

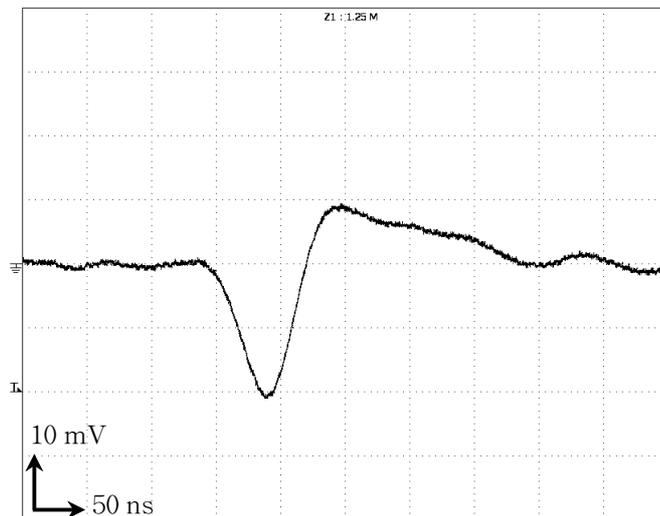


그림 5.14 1차권선과 2차권선 사이에서 교정펄스에 대한 응답파형
Fig. 5.14 Response waveform to the calibration pulse between the primary and the secondary coils

교정실험결과를 그래프로 나타내면 그림 5.15와 같이 전구간에서 선형적인 특성을 나타내지만 극성에 따라 감도의 차이가 나타나므로 방전펄스 측정시 극성을 고려한 평가가 이루어져야 한다. 측정시스템의 잡음레벨과 검출감도를 기준으로 할 때 1차권선과 2차권선 사이에서 최소 검출 가능한 방전펄스의 크기는 정극성 0.2 pC, 부극성 0.24 pC으로 얻어진다.

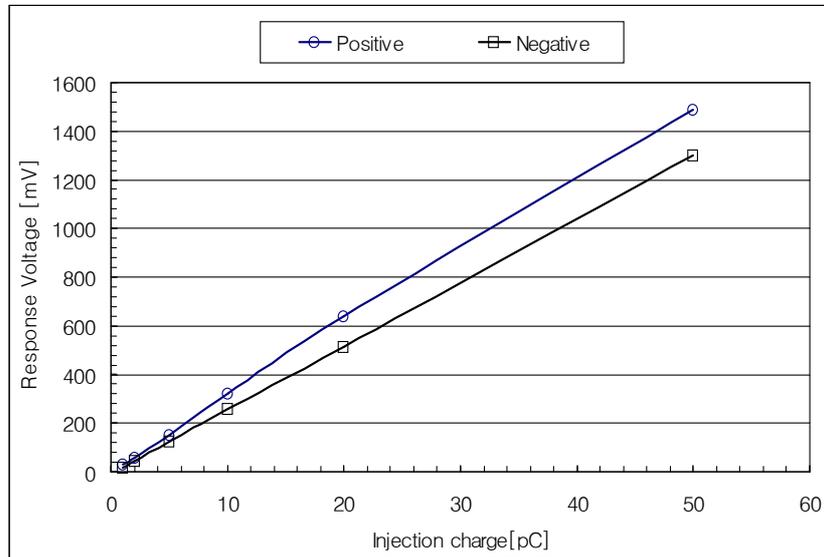


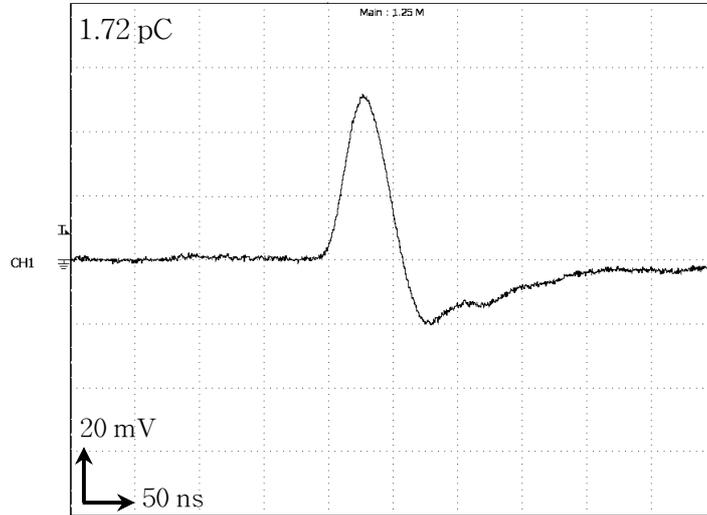
그림 5.15 1차권선과 2차권선 사이에서 교정펄스에 대한 응답전압
 Fig. 5.15 Response voltage as a function of calibration pulse between the primary and the secondary coils

(2) 부분방전시험

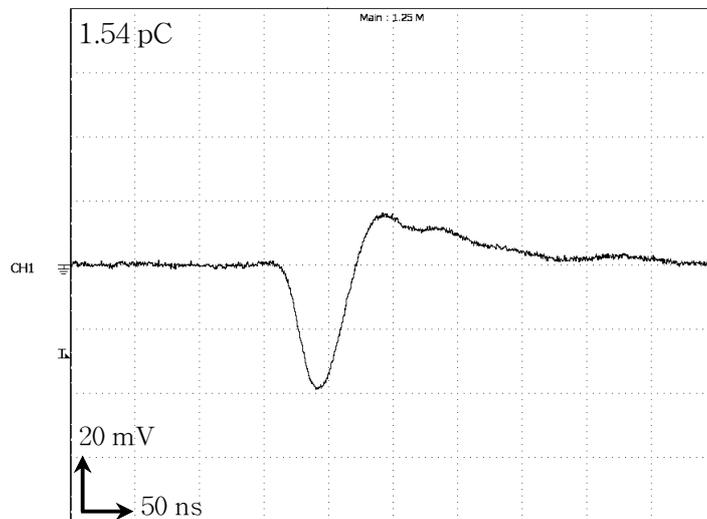
1차권선과 2차권선 사이의 절연성능 평가를 위하여 부분방전시험을 적용하였으며, 시험에 적용한 시료는 초기상태 시료, 1분간의 내전압시험 후의 시료, 내전압 시험전압을 10분간 인가한 에이징 후의 시료를 대상으로 방전 파라미터를 측정하고, 이를 바탕으로 1차권선과 2차권선간의 절연성능 평가를 수행하였다.

먼저 초기상태 시료에서는 시험전압 495 V에서 그림 5.16과 같이 정극성 1.72 pC, 부극성 1.54 pC의 방전신호가 검출되며, 인가전압에 따른 방전전하량의 관계는 표 5.4와 같이 정리된다. 1차권선과 철심사이에서와 마찬가지로 방전개시전압 부근에서는 정극성 신호가 크게 측정되며, 이후에는 부극성의 방전신호가 크게 검출된다. 인가전압에 따른 방전전하량의 변화는 그림 5.17에서도 알 수 있듯이 비교적 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 방전전하량은 1차권선과 철심사이와 비교할 때 방전개시전압에서도 다소 크게 측정되었으며, 시험전압에 따라 증가하는 경향도 큰 것으로 확인되었다.

1차권선과 철심사이에서와 비교할 때 방전개시전압은 30% 이상 낮게 측정되는데 이는 1차권선과 2차권선은 하나의 보빈에 같이 설치되므로 절연구조가 1차권선과 철심사이에서 보다 취약한 구조이고, 권선간 접촉되는 부분도 존재할 수 있기 때문에 상대적으로 낮은 전압에서 방전이 발생하는 것으로 판단된다. 그러므로 부분방전시험에 있어서도 1차권선과 철심사이에 적용하는 전압보다 낮은 전압에서 절연성능 평가가 이루어져야 한다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 5.16 내전압시험 전 1차권선과 2차권선 사이에서 방전파형
 Fig. 5.16 Typical PD waveforms measured between the primary and the secondary coils before WVT

표 5.4 내전압시험 전 1차권선과 2차권선 사이에서 부분방전 시험결과
 Table 5.4 PD testing results between the primary and the secondary coils before WVT

정극성		부극성	
시험전압 [V]	방전전하량 [pC]	시험전압 [V]	방전전하량 [pC]
495	1.72	495	1.54
565	16.37	565	21.67
636	37.67	636	50.40
방전개시전압	495 V	방전개시전압	495 V
방전소멸전압	438 V	방전소멸전압	438 V

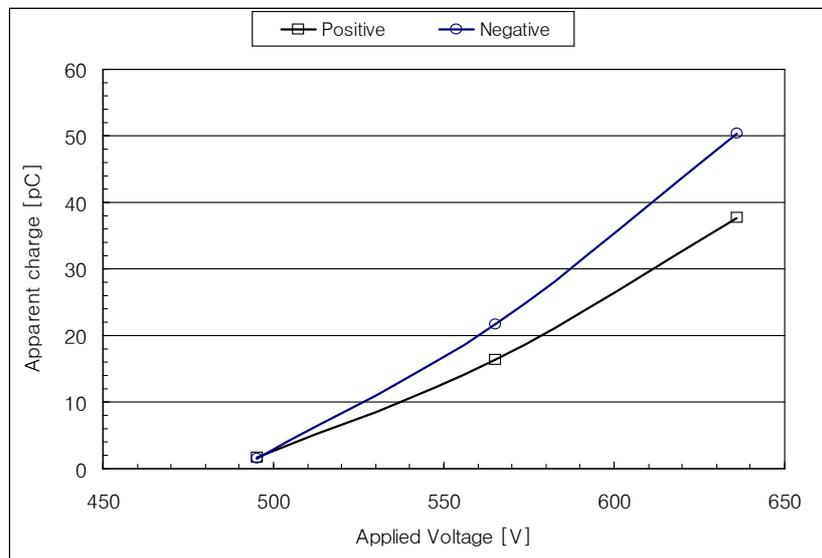


그림 5.17 내전압시험 전 1차권선과 2차권선 사이에서 방전전하량의 변화
 Fig. 5.17 Changes in apparent charges between the primary and the secondary coils before WVT

방전전하량 누적분포 특성은 그림 5.18과 같이 시험전압이 증가함에 따라 방전전하량의 크기 및 누적분포도 증가하는 경향을 나타내었으며, 최대 방전전하량은 770 V에서 400 pC에 이르는 것으로 측정되었다. 1차권선과 철심사이에 비하여 상대적으로 낮은 전압 영역에서 높은 방전전하량을 나타내었으며, 시험전압 700 V 이하에서는 발생빈도가 작게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 경향으로 미루어 볼 때 내전압시험 적용시 1차권선과 2차권선 사이에서는 1차권선과 철심사이에 사용되는 전압과 동일한 시험전압을 인가하면 상대적으로 더 많은 전기적 스트레스가 가해지는 것으로 판단되며, 부분방전시험 적용시에는 700 V 이하의 낮은 전압을 인가하여 절연평가를 수행해야 할 것이다.

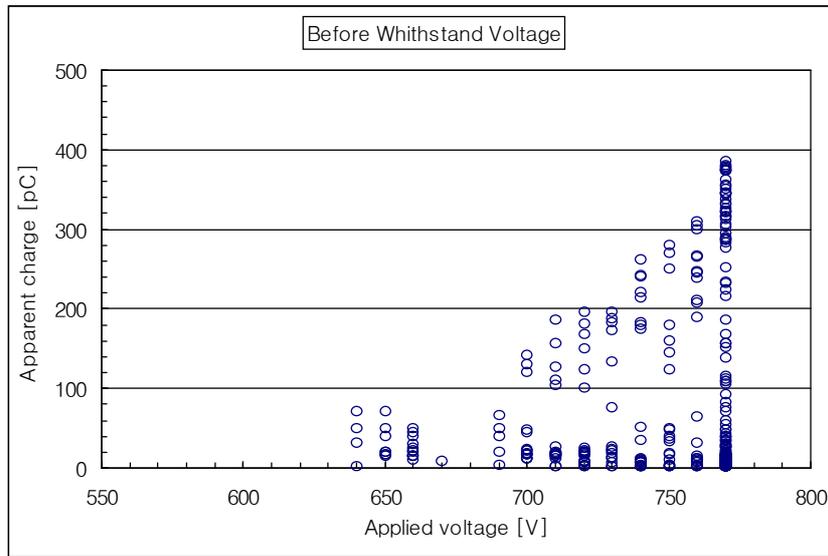
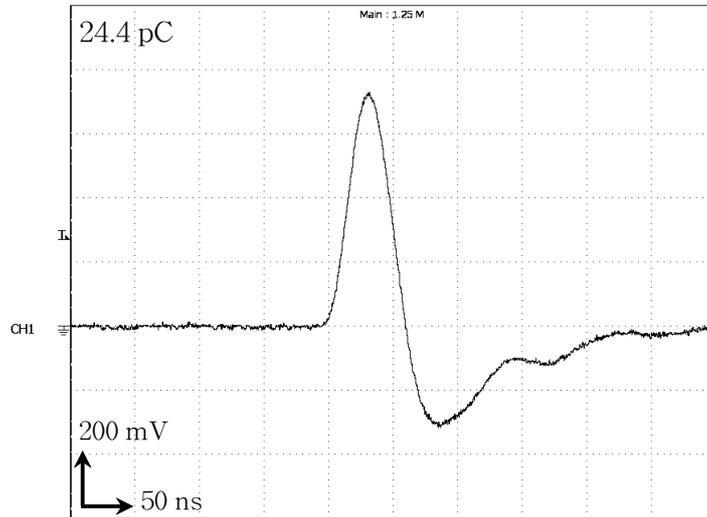


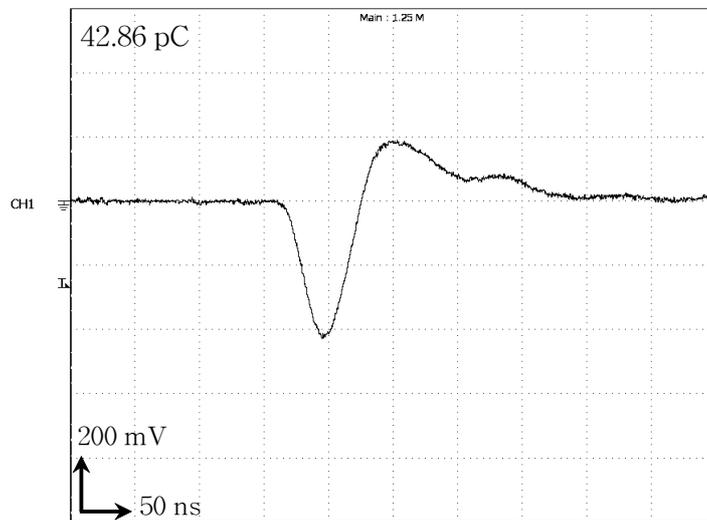
그림 5.18 내전압시험 전 1차권선과 2차권선 사이에서 방전전하량 분포
 Fig. 5.18 Apparent charge distribution between the primary and the secondary coils before WVT

정상 시료에 대하여 기본적인 방전 파라미터를 평가한 후 내전압시험을 수행하였으며, 시험전압은 1,500 V를 인가하고 누설전류의 레벨은 1 mA로 설정하여 1분간 시험한 결과 누설전류는 흐르지 않으므로 내전압 시험기준을 만족하였다. 내전압시험 후 방전 파라미터의 변화를 측정한 결과 방전개시전압은 438 V로 다소 낮아지고, 이때 방전전하량은 그림 5.19와 같이 정극성에서 24.4 pC, 부극성에서 42.86 pC이 검출되었다. 또한 방전소멸전압도 368 V로 낮아지는 것으로 측정되어 1차권선과 2차권선 사이에서도 내전압시험 후에는 시험기준의 합격여부에 상관없이 절연성능에 영향을 주는 것으로 평가되었다.

방전개시전압에서 방전전하량의 증가 경향을 살펴보면 1차권선과 철심 사이에서 측정한 결과보다 방전전하량이 크게 측정되는 것으로 보아 권선 간의 절연구조가 취약함에도 불구하고 동일한 전압에서 내전압시험이 이루어지므로 절연성능에 많은 전기적 스트레스가 가해지는 것으로 추정된다. 따라서 절연성능 평가에는 부분방전시험을 적용하는 것이 효과적으로 판단되며, 피시험체의 종류 및 절연물의 구조에 따라 시험전압을 조정할 필요가 있다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 5.19 내전압시험 후 1차권선과 2차권선 사이에서 방전파형
 Fig. 5.19 Typical PD waveforms measured between the primary and the secondary coils after WVT

내전압시험 이후 방전전하량 누적분포에 대한 특성은 그림 5.20에 나타난 것과 같이 내전압시험 이전보다 크기 및 발생빈도가 증가하였다. 특히, 시험전압 700 V 이하에서는 방전전하량의 크기 및 누적분포가 내전압 시험 이전보다 현저하게 증가한 것으로 나타났다.

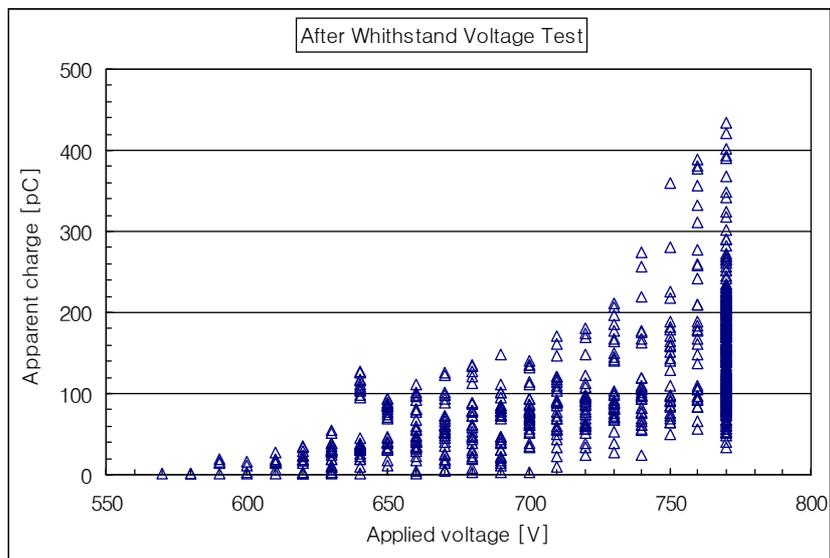


그림 5.20 내전압시험 후 1차권선과 2차권선 사이에서 방전전하량 분포
 Fig. 5.20 Apparent charge distribution between the primary and the secondary coils after WVT

그림 5.21에는 700 V 이하의 낮은 전압 범위만을 확대하여 나타낸 것으로 방전전하량의 크기가 뚜렷이 증가하는 특징을 나타내었다. 이는 내전압 시험전압에 의해 권선간의 절연성능의 저하가 발생하기 때문이다.

현재 저압용 전기전자기기의 절연평가를 위해 사용되고 있는 내전압시험은 시험기준의 충족여부에 상관없이 피시험체의 절연성능을 저하시키는 것으로 평가되었다. 그러므로 저압용 전기전자기기에서는 내전압시험에 의한 절연성능 평가보다는 부분방전시험을 적용하는 것이 기기의 절연성능에 영향을 주지 않으면서 정확한 평가가 가능한 것으로 판단된다.

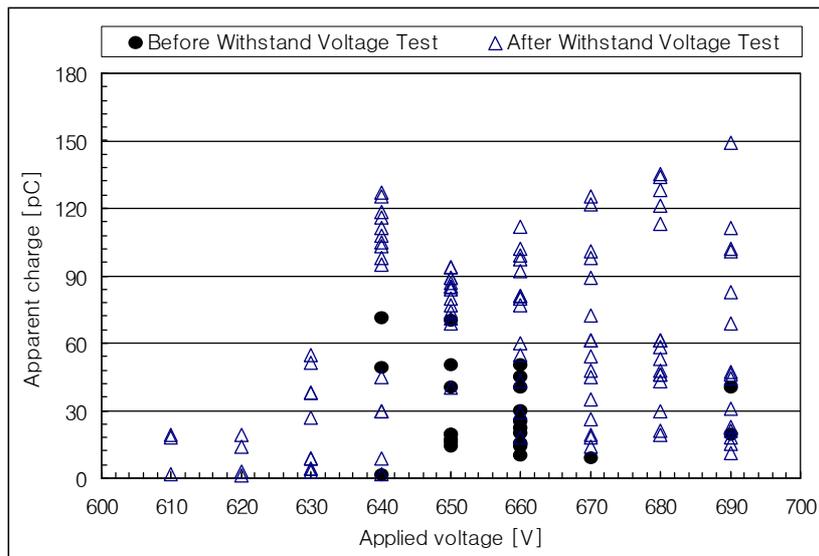


그림 5.21 1차권선과 2차권선 사이에서 방전전하량 분포의 변화
 Fig. 5.21 Changes in apparent charge distribution between the primary and the secondary coils

권선간의 절연성능에 인위적인 열화를 모의하기 위하여 에이징 실험을 수행하였으며, 에이징 실험도중 10분이 되는 시점에서 1 mA의 누설전류가 측정되었다. 이후 시험전압 1,000 V의 전압에서 누설전류가 흘러 더 이상의 실험은 불가능한 상태로 되었다. 이때 부분방전시험을 적용하여 방전 파라미터의 변화를 분석한 결과, 방전개시전압은 그림 5.22에 나타난 것과 같이 320 V로 낮아졌으며, 단일펄스에 대한 방전전하량은 그림 5.23과 같이 50 pC이상으로 측정되었다. 또한 방전소멸전압은 240 V로 급격히 낮아지는 특성을 나타내는데 이는 이미 내전압시험에 의해 권선간 절연이 파괴되어 낮은 전압에서도 방전현상이 지속적으로 나타나기 때문이며, 이러한 경우에는 방전전하량의 누적분포 측정이 불가능하였다.

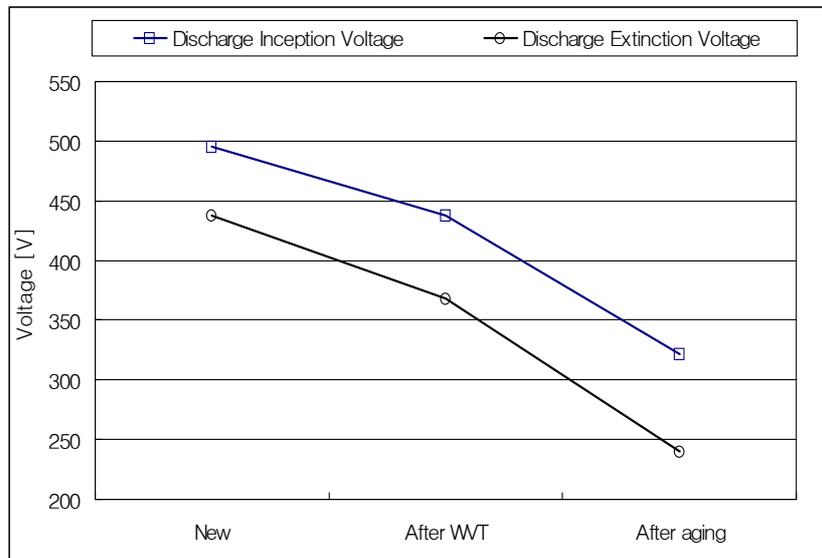
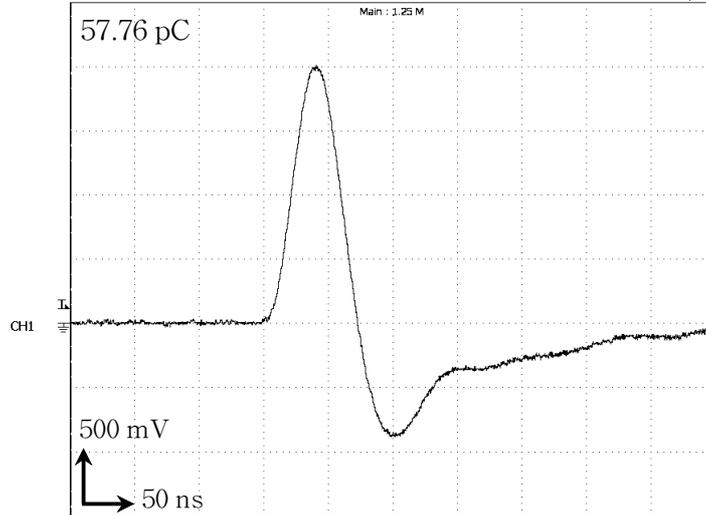
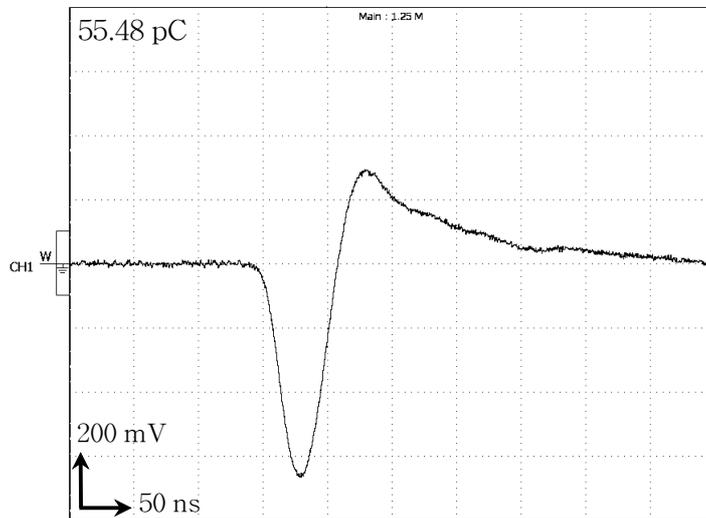


그림 5.22 1차권선과 2차권선 사이에서 DIV와 DEV의 변화
 Fig. 5.22 Changes in DIV and DEV between the primary and the secondary coils



(a) 정극성



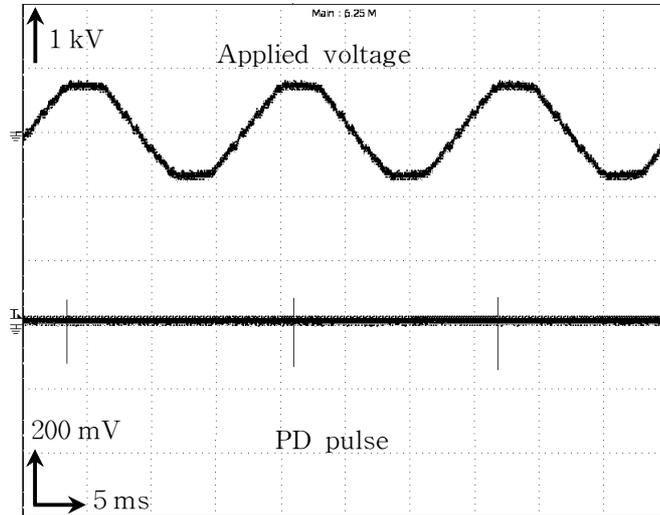
(b) 부극성

그림 5.23 에이징 후 1차권선과 2차권선 사이에서 방전파형
 Fig. 5.23 Typical PD waveforms measured between the primary and the secondary coils after aging

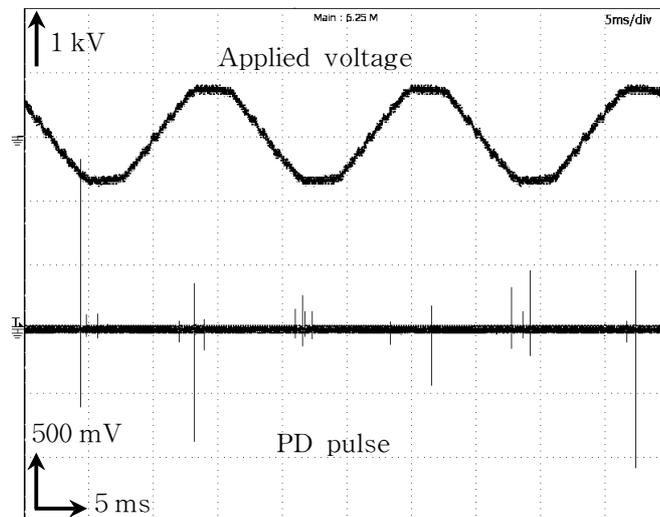
권선간의 부분방전실험에서 방전펄스의 위상분포 분석을 수행하였으며, 시료는 앞서 실험한 시료와 동일한 것을 사용하고, 시험전압의 위상에 따른 방전펄스의 분포를 측정하였다.

먼저 내전압시험 전후의 시료에 대한 방전펄스의 위상분포는 그림 5.24와 같이 측정되었다. 정상상태의 시료에서는 시험전압 560 V에서 전압 위상이 증가하는 시점의 90° 부근에서만 방전펄스가 발생하는 것으로 나타나며, 내전압시험 이후에는 시험전압의 90°와 270° 위상 부근에서 방전펄스가 측정되는데 내전압시험 전과 비교하여 방전전하량과 발생빈도가 모두 증가하는 경향을 나타내었다.

에이징 후 누설전류가 흐른 경우에는 이미 절연파괴가 일어난 것으로 보이며, 방전펄스의 위상분포는 그림 5.25와 같이 측정된다. 초기에 320 V의 시험전압 인가시에는 (a)와 같이 인가전압 90° 위상에서 방전펄스가 다수 검출되고, 시간에 지남에 따라 (b)에서처럼 270° 위상에서도 방전펄스가 발생하기 시작하여 (c)와 같이 점차적으로 커지고, 최종적으로는 (d)와 같은 형태로 방전펄스의 크기와 발생빈도가 증가하는 특성을 나타내었다. 이는 비대칭 또는 전극 근방에 존재하는 보이드나 결함이 부분방전에 의해 열적 작용이 발생하여 바니쉬(vernish) 절연물이 화학적으로 변질되는 과정에서 점차 확대되고 전극내에서 대칭적인 위치로 되므로 절연열화가 지속되면 시험전압의 부극성에서 방전신호가 증가하는 것으로 추정된다. 내전압시험으로 인하여 절연에 손상이 발생하여도 시험전압 인가 초기에는 공기층 등에 의해 어느 정도 보호되는 특성을 가지고 있으며, 시간이 경과함에 따라 점차적으로 절연이 파괴되고 불꽃 방전의 크기가 확대되는 경향을 보이면서 최종적으로는 전로파괴에 도달하는 것으로 전형적인 절연파괴의 양상을 나타낸다.

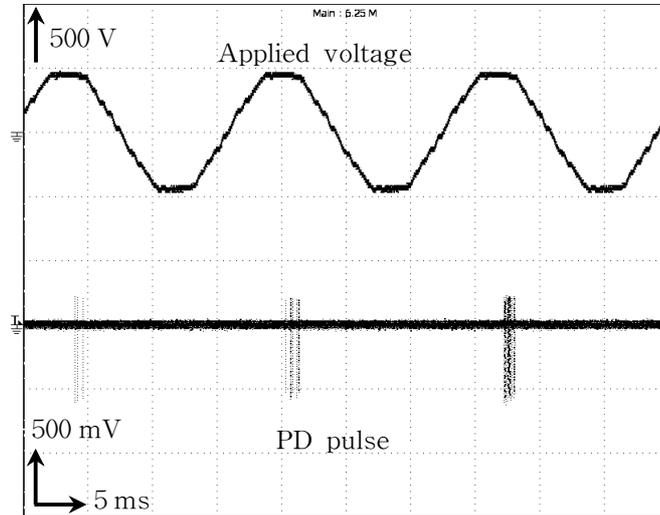


(a) 내전압시험 전

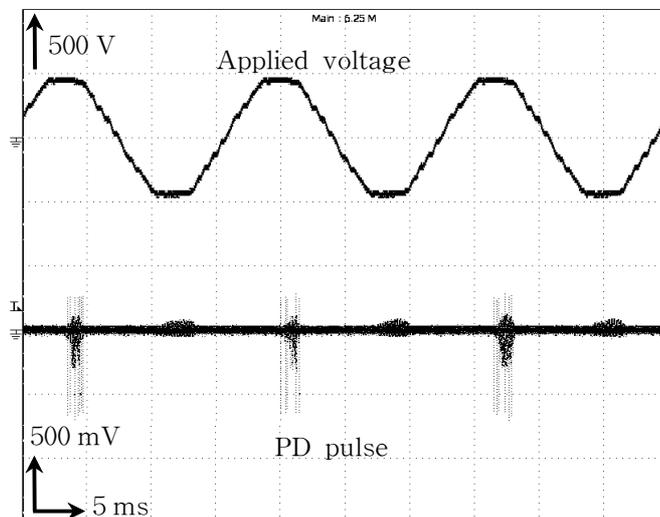


(b) 내전압시험 후

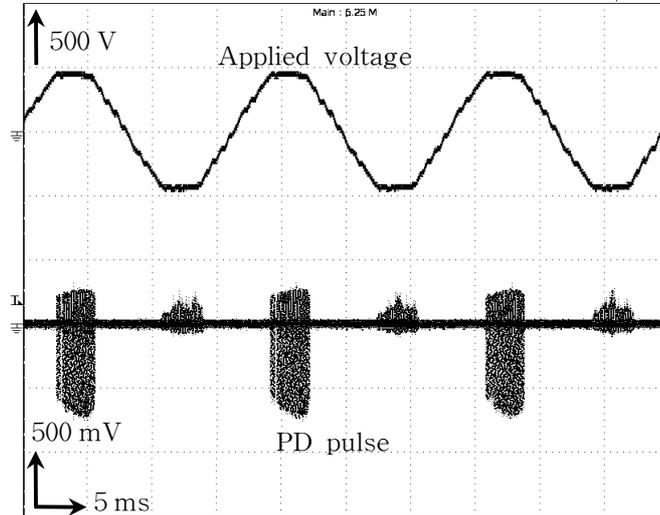
그림 5.24 내전압시험 후 1차권선과 2차권선 사이에서 부분방전 위상분포
 Fig. 5.24 Phase distribution of PD pulse between the primary and the secondary coils after WVT



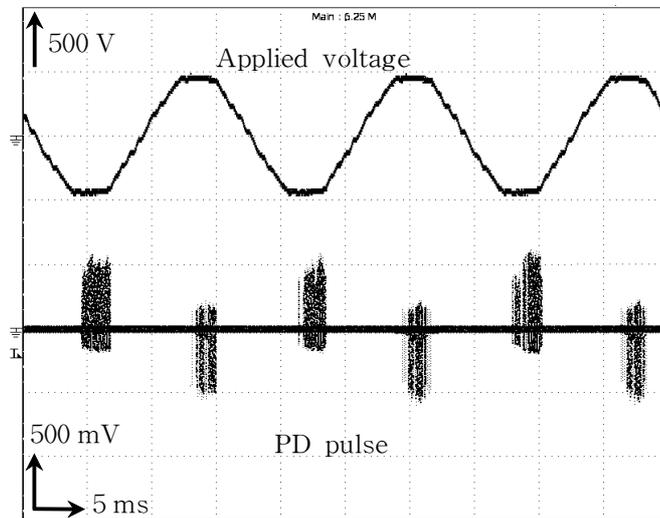
(a) 전압인가 후



(b) 전압인가 30초 후



(c) 전압인가 1분 후



(d) 전압인가 5분 후

그림 5.25 에이징 후 1차권선과 2차권선 사이에서 부분방전 위상분포
 Fig. 5.25 Phase distribution of PD pulse between the primary and the secondary coils after aging

절연변압기의 1차권선과 2차권선 사이에서 내전압시험과 부분방전시험을 적용하여 절연평가를 수행한 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

교정실험결과 검출감도는 정극성 30 mV/pC, 부극성 25.2 mV/pC으로 얻어졌으며, 잡음레벨을 고려할 때 최소 검출 가능한 방전펄스는 각각 0.17 pC 및 0.24 pC으로 나타났다.

내전압시험 전 초기상태 시료에서 부분방전시험을 수행한 결과, 최초 방전개시전압은 495 V로 측정되었으며, 이때 검출되는 방전전하량은 1 pC 정도로 미소하게 검출되었다. 내전압시험기준에 따라 1분간 시험전압을 인가한 후에는 방전개시전압은 438 V로 낮아지고, 방전전하량은 정극성에서 24.4 pC, 부극성에서 42.86 pC으로 급격하게 증가하였다. 이러한 원인은 1차권선과 철심사이보다 절연구조가 취약함에도 불구하고 동일한 전압영역에서 내전압시험을 수행하였기 때문에 권선간에서 보다 많은 전기적 스트레스로 인하여 절연성능 저하의 정도가 더 크게 발생한 것으로 판단된다. 시험전압을 10분 동안 인가한 후에는 320 V의 전압에서 60 pC에 가까운 방전전하량이 측정되는데 이는 이미 내전압시험에 의해 권선간에서 절연파괴가 발생하였기 때문이다.

1차권선과 2차권선 사이에서 내전압시험에 의한 절연평가를 행하는 경우에는 전기적 스트레스의 강도가 더욱 크게 작용하기 때문에 시험과정에서 피시험체의 절연성능에 심각한 손상을 끼치는 것으로 평가되었다.

방전펄스의 위상분포 분석으로부터 1차권선과 철심사이에서와 비슷한 경향을 나타내며, 내전압시험에 의해 절연파괴가 발생하면 시험전압 인가직 후에는 부극성의 방전펄스가 다수 검출되고, 시간이 지남에 따라 점차적으로 정극성의 방전펄스가 측정되었다. 시험전압을 5분 정도 계속 인가하는 경우에는 정극성과 부극성 양쪽 모두 방전전하량 및 발생빈도가 급격히 증가하는데 낮은 전압에서도 절연파괴로 진전하는 양상을 나타낸다.

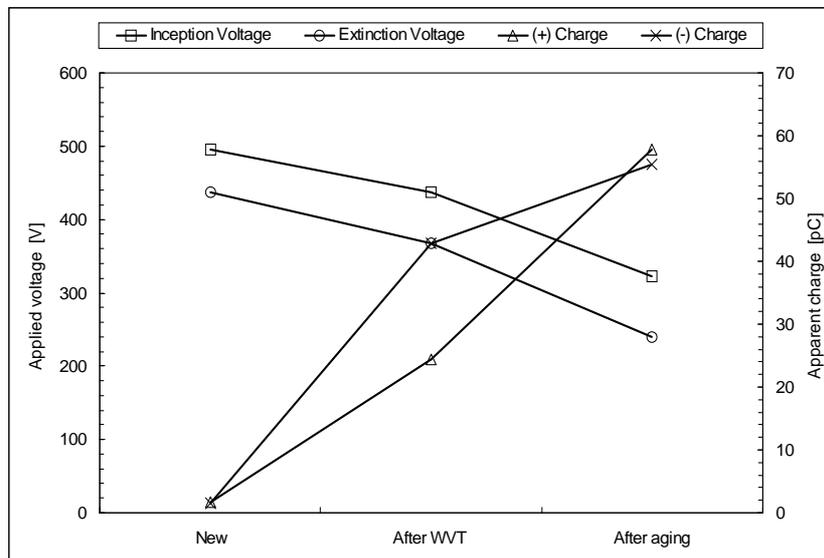
실험결과로부터 현재 저압용 전기전자기기의 절연성능 평가에 사용되는 내전압시험은 시험 중 피시험체의 절연을 열화시키는 것으로 평가되었다. 즉 내전압시험에 의해 기기의 절연성능을 약화시키므로 시험기준을 만족하여도 초기 고장 발생의 원인이 된다. 따라서 저압용 전기전자기기를 대상으로 하는 절연성능 평가에서는 부분방전시험법을 적용하는 것이 바람직하다.

부분방전시험 적용을 위해서는 전용의 교정기에 의해 정확한 교정평가를 수행하여 피시험체의 종류에 따른 검출감도를 산출하고, 정상상태의 시료를 대상으로 기본적인 방전 파라미터를 측정해야 한다. 기본 파라미터는 방전개시전압, 방전소멸전압, 방전전하량, 방전펄스의 위상분포 등으로 절연성능 평가의 기준이 되기 때문에 정확한 측정과 분석이 필요하다.

방전개시전압은 부분방전이 발생하기 시작하는 시점에서의 시험전압으로 절연성능에 따라 달라지는데 절연상태에 열화 또는 불량이 발생하면 방전개시전압은 낮아지는 경향을 나타내었다. 절연성능에 대한 평가는 단순히 어느 한 가지 특성만으로 추정하는 것은 불가능하므로 방전개시전압에서 발생하는 방전전하량을 함께 고려한다면 보다 정확한 평가가 가능하다. 절연체의 열화상태에 따라 그림 5.26에 나타낸 바와 같이 방전개시전압은 낮아지며, 이때 방전전하량은 급증하는 경향을 나타낸다. 따라서 부분방전시험에서 1차적으로 고려되어야 할 사항은 방전개시전압 및 방전전하량의 관계로 방전개시전압이 낮아지면서 방전전하량이 증가하면 절연체 내부에서 열화가 진행되고 있는 것을 의미한다. 또한 방전소멸전압도 감소하는 경향을 나타내므로 방전개시전압과 방전소멸전압, 방전전하량의 변화를 측정하는 것으로 절연성능 평가가 가능함을 확인하였다.



(a) 1차권선-철심



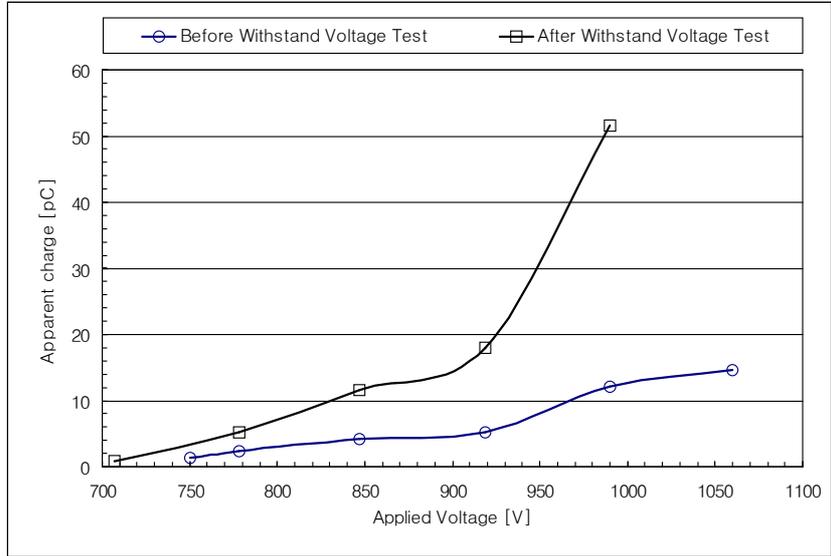
(b) 1차권선-2차권선

그림 5.26 방전개시전압과 방전전하량의 변화
 Fig. 5.26 Changes in DIV and apparent charge

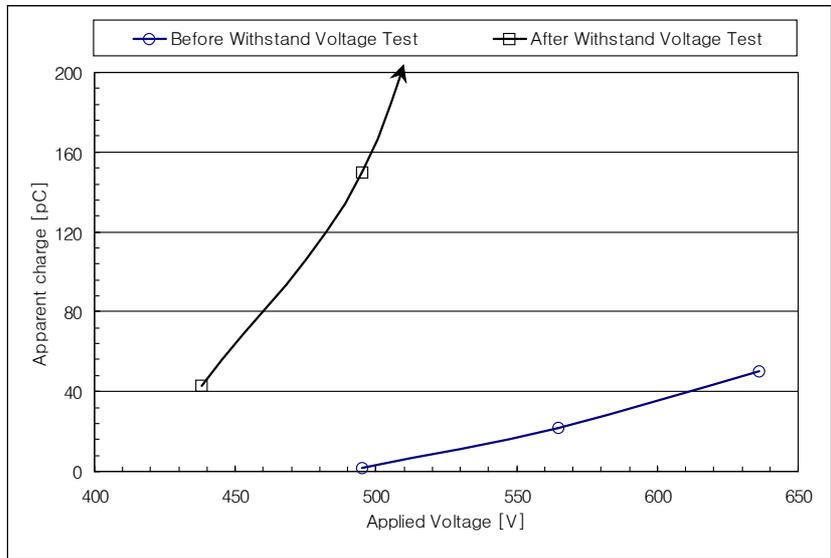
두 번째로 시험전압 증가에 따른 방전전하량의 변화를 관측하는 것으로 절연성능의 미소한 변화를 분석하는 것이 가능하다. 절연물 내부에서 미소한 열화가 진행되고 있는 경우 방전개시전압 및 이때 방전전하량의 변화가 크지 않으므로 열화상태를 알아내는 것이 쉽지 않다. 그림 5.27에 나타낸 것과 같이 절연물의 초기상태와 내전압시험 후의 상태를 비교하면 동일한 시험전압에서 현저한 방전전하량의 차이를 나타낸다. 그러므로 시험전압의 증가에 따른 방전전하량의 변화를 관측하는 것으로 미소한 열화나 불량에 대한 평가도 가능한 것으로 판단된다.

방전펄스의 위상분포는 절연물의 절연성능에 따라 시험전압의 위상에서 발생하는 부분방전 펄스의 크기, 발생빈도 등이 달라지는 경향을 나타내므로 이러한 위상분포를 측정·분석하는 것으로 절연성능에 대한 평가가 가능하다. 그러나 위상분포를 적용하기 위해서는 높은 샘플링 속도와 메모리 용량을 갖는 관측 장비가 필요하기 때문에 일반적으로 적용하기는 쉽지 않으므로 절연성능에 대한 보다 정밀한 분석이 요구될 때 방전펄스의 위상분포를 적용하는 것이 효과적이다.

저압용 전기전자기기에서 부분방전시험을 적용하여 절연성능을 평가하기 위해서는 상기에서 언급한 방전 파라미터의 변화에 대한 충분한 비교·검토가 이루어져야 정확한 절연성능 저하를 추정할 수 있다.



(a) 1차권선-철심

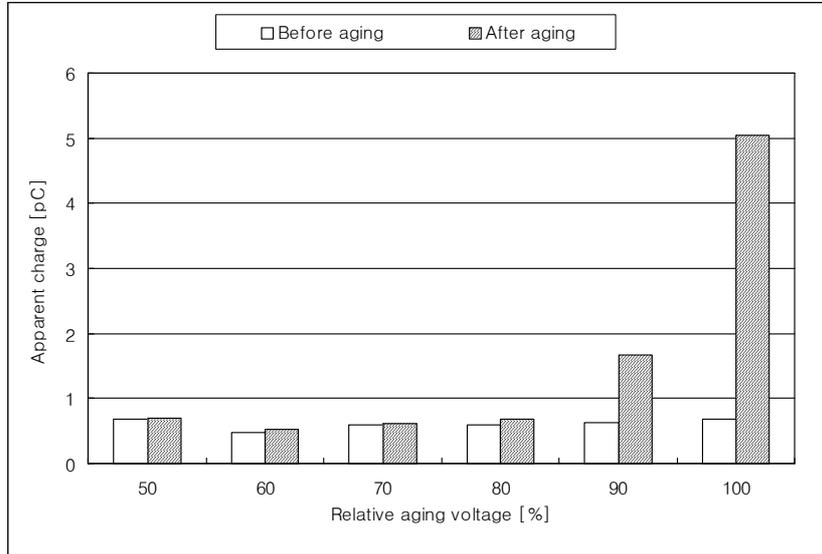


(b) 1차권선-2차권선

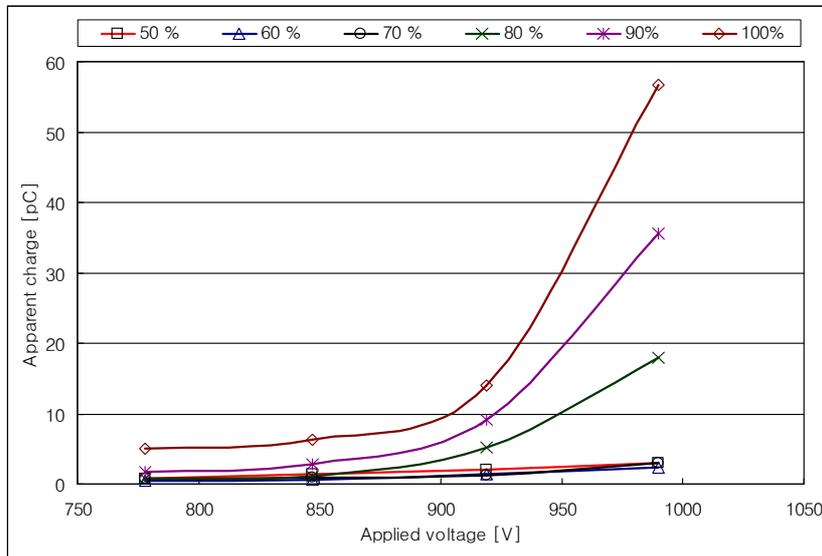
그림 5.27 방전전하량의 변화
Fig. 5.27 Changes in apparent charges

절연변압기의 1차권선과 철심사이에서 부분방전시험을 수행하는 동안 인가전압에 의한 절연저하의 발생여부 확인 및 적절한 시험전압 도출을 위해 내전압시험 전압의 50 ~ 100%까지 10% 단계마다 10분 동안 전압을 인가하여 에이징 후 방전전하량의 변화를 측정하였다. 실험결과는 그림 5.28과 같이 얻어졌으며, 방전개시전압은 750 ~ 778 V 정도로 미소한 차이를 나타내었다. 방전개시전압에서 방전전하량의 변화는 그림 5.28(a)와 같이 내전압 시험전압의 80% 범위까지는 대략 0.6 pC내외로 변화를 나타내지 않았으며, 90%의 전압을 인가한 경우에는 1.75 pC으로 소폭의 증가를 나타내는데 이는 시험전압의 인가로 인하여 절연성능 저하가 발생하기 때문이다. 100%의 전압으로 에이징 한 경우에는 495 V의 전압에서 65.45 pC의 방전전하량 크기를 나타내므로 부분방전시험에서는 인가되는 시험전압의 크기를 80% 이하로 하여야 피시험체의 절연성능에 영향을 주지 않는다.

시험전압을 증가시키면서 방전전하량의 변화를 측정한 결과는 그림 5.28(b)와 같이 나타나는데 50 ~ 70%의 전압에 의해 모의 열화과정을 거친 시료에서는 뚜렷한 변화는 관측되지 않으므로 절연성능의 저하는 없는 것으로 평가되었다. 80%의 전압을 인가한 경우에는 방전개시전압에서 방전전하량의 변화는 관측되지 않았지만 시험전압을 증가시키면서 방전전하량을 측정한 결과에서는 870 V의 전압영역에서부터 다소 증가하는 경향을 나타내는데 80%의 전압에서는 시험 중 미소한 절연저하가 발생하는 것으로 판단된다. 90 ~ 100%의 전압에서는 인가전압에 따른 방전전하량의 급격한 변화를 나타내므로 피시험체의 절연에 확인한 저하를 유발하는 것으로 평가되었다. 결국 시험 중 시험전압 인가에 의한 절연 저하를 피하기 위해서는 내전압 시험전압의 70% 이하로 가능한 낮은 시험전압에서 방전전하량의 크기와 방전개시 및 소멸전압을 분석해야 한다.



(a) 방전개시전압에서 방전전하량의 변화



(b) 인가전압에 따른 방전전하량의 변화

그림 5.28 에이징 후 방전전하량의 변화

Fig 5.28 Changes in apparent charges after aging

실험결과에서도 알 수 있듯이 동일한 기기에서도 절연물의 구조에 따라 방전개시전압과 방전소멸전압은 큰 차이를 나타내므로 저압용 전기전자기기의 절연평가를 위한 시험법에서는 기기의 종류에 상관없이 일괄적으로 시험전압을 결정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 1 pC 이하의 방전전하량이 발생하는 시점에서 방전개시전압을 측정하고, 이 전압의 크기를 기준으로 부분방전시험법을 적용하는 것이 적합한 것으로 판단된다. 특히, 시험전압에 따른 절연저하 발생 유무에 대한 측정과 분석 및 적절한 시험전압 도출에 관한 연구가 선행된다면 피시험체의 절연성능에 영향을 주지 않는 범위에서 정확한 절연평가가 가능할 것으로 기대한다.

5.2 유도전동기

저압 유도전동기는 산업현장에서 가장 많이 사용되는 동력설비 중의 하나로 최근 마이크로프로세서와 디지털제어기법의 도입, 전력용 반도체 소자의 진보에 따라 유도전동기의 가변속 제어가 가능하므로 응용분야가 크게 확대되고 있다. 현재까지 저압용 유도전동기의 경우에도 생산 단계나 출고시 품질관리에 내전압시험을 적용하고 있는 실정이며^[61], 이미 확인된 바와 같이 내전압시험 중 절연성능의 저하를 일으키므로 절연성능 평가에는 부분방전시험을 적용하였다.

부분방전시험에 사용한 시료는 220 V 3상 5마력 유도전동기로 Y-결선의 중성점과 전동기 외함 사이에 시험전압을 인가하고, 방전펄스를 측정·분석함으로써 절연성능을 평가하였다.

(1) 교정실험결과

시험전압 인가 전에 교정실험을 수행하였으며, 1 pC의 교정펄스 주입 시 응답파형은 그림 5.29와 같이 얻어진다. 교정실험은 검출기의 증폭도를

고려하여 1 pC ~ 50 pC의 교정신호를 정극성 및 부극성으로 주입하였으며, 교정실험결과로부터 측정시스템의 검출감도는 정극성에서 11.4 mV/pC 이고, 부극성에서는 11 mV/pC으로 나타났다. 0.4 mV의 차이는 방전전하량으로 환산하면 대략 0.036 pC이므로 검출감도는 동일한 것으로 나타난다. 교정실험결과를 그래프로 나타내면 그림 5.30과 같이 얻어지는데 전구간에서 선형적인 특성을 나타내었으며, 교정실험에 의한 감도를 고려하면 유도전동기에서 최소 검출 가능한 방전의 크기는 0.53 pC이었다.

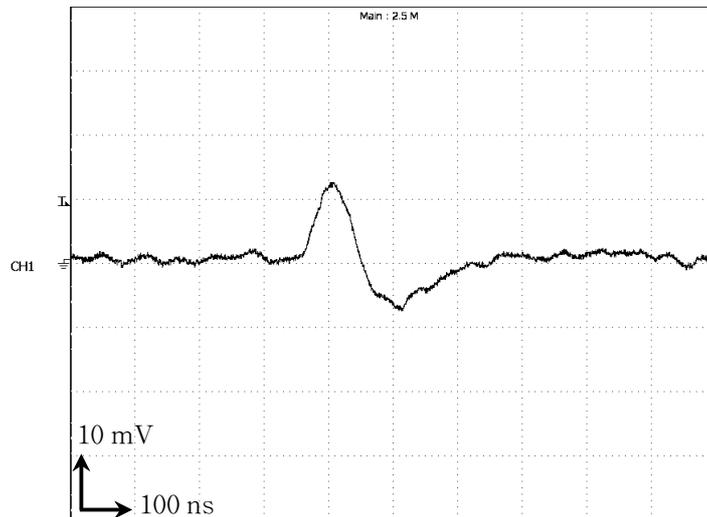


그림 5.29 교정펄스에 대한 응답파형
 Fig. 5.29 Response waveform to the calibration pulse

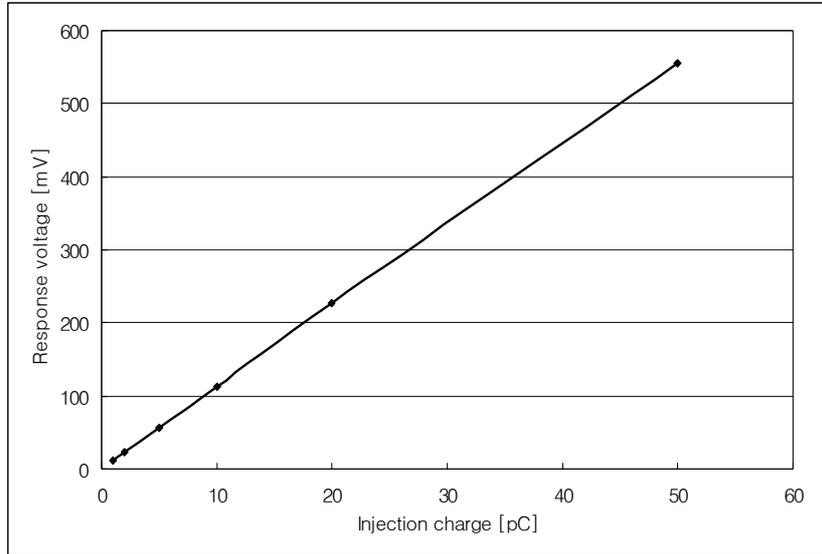


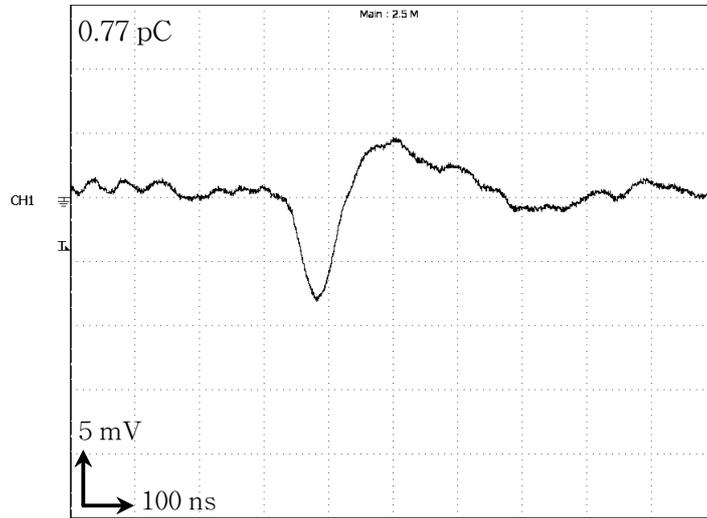
그림 5.30 교정펄스에 대한 응답전압

Fig. 5.30 Response voltage as a function of calibration pulse

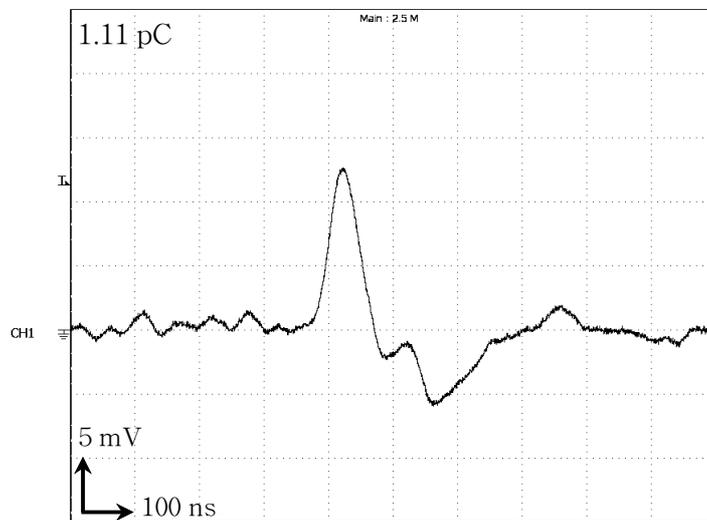
(2) 부분방전시험

교정실험결과로부터 측정시스템의 감도는 11.4 mV/pC 으로 산출되며 이 감도를 기준으로 유도전동기에 시험전압을 인가할 때 고정자권선에서 발생하는 부분방전 펄스를 검출하였다.

시험전압 470 V 에서 그림 5.31(a)와 같이 약 0.77 pC 의 크기를 갖는 부극성 방전 펄스가 검출된다. 이후 800 V 이내의 범위까지는 부극성의 부분방전 펄스만이 검출되는데 부극성 과형이 먼저 검출되는 것은 고정자권선과 외함사이의 표면구조에 기인한 것으로 판단된다. 정극성 부분방전 펄스는 인가전압이 805 V 에서 나타나며, 최소 검출된 크기는 그림 5.31(b)에 나타낸 바와 같이 약 1.11 pC 이었다.



(a) 부극성



(b) 정극성

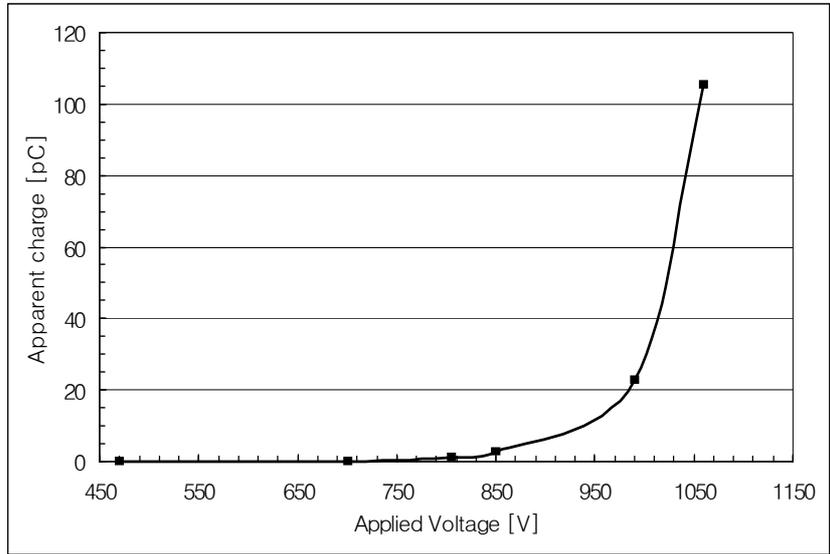
그림 5.31 부분방전 파형의 예
 Fig. 5.31 Typical PD waveforms

유도전동기에서 인가전압에 따라 검출되는 정·부극성의 방전 전하량은 표 5.5와 같이 정리될 수 있으며, 방전펄스의 증가되는 경향은 그림 5.32와 같이 나타난다. 부분방전이 발생하는 방전개시전압은 방전펄스의 극성에 따라 달라지는데 부극성 신호가 발생하는 방전개시전압은 470 V이었으며, 정극성의 부분방전 개시전압은 805 V이었다. 최초 방전이 발생한 이후에는 전압 증가에 따라 급격히 방전전하량 및 발생빈도가 증가하는 경향을 나타내었다.

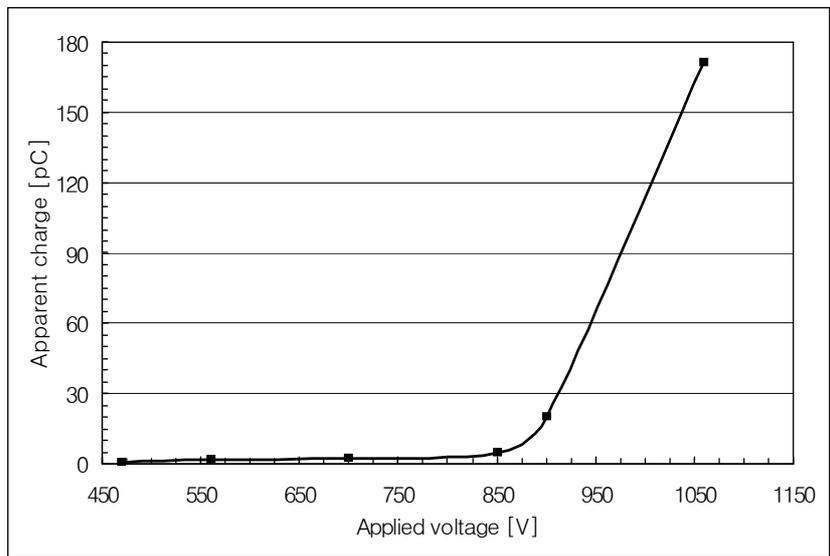
유도전동기를 대상으로 부분방전펄스를 검출한 결과 1 pC이하의 방전펄스 검출이 가능하였으며, 절연변압기에 적용한 실험과정과 동일하게 초기상태의 방전 파라미터 측정에 의해 판단기준을 도출하는 것이 가능하고, 이를 기준으로 하면 피시험체의 절연성능의 저하 없이 절연평가가 가능할 것으로 판단된다.

표 5.5 부분방전 시험결과
Table 5.5 PD test results

부 극 성		정 극 성	
인가전압 [V]	방전전하량 [pC]	인가전압 [V]	방전전하량 [pC]
470	0.77	-	-
630	2.11	805	1.11
700	2.32	850	1.67
850	4.59	990	22.72
1,060	171	1,060	105.3
방전개시전압	470 V	방전개시전압	805 V
방전소멸전압	450 V	방전소멸전압	764 V



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 5.32 방전전하량의 변화
 Fig. 5.32 Changes in apparent charges

현재까지 저압용 전기전자기기에 적용을 위한 부분방전시험법은 극히 미흡하며, 국내에서도 제시된 바가 없기 때문에 내전압시험과 비교하여 저압용 전기전자기기에 적합한 부분방전시험 적용방안을 도출하였다.

저압용 전기전자기기에 사용되고 있는 내전압시험에 의한 절연성능 평가는 시험기준의 만족 여부에 상관없이 피시험체의 절연성능을 저하시키는 것으로 평가되었다. 또한 피시험체의 절연물의 종류, 구조 및 사용전압 등을 전혀 고려하지 않고 일괄적으로 시험전압을 적용하기 때문에 피시험체의 종류에 따라 절연성능에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 절연변압기를 대상으로 한 실험에서 권선간에 내전압시험 기준을 적용하여 1,500 V의 시험전압을 인가하는 경우에는 10분이 지난 시점에서 절연파괴가 발생하였으며, 1분간의 내전압시험이후 측정결과에서도 절연성능이 현저하게 저하되는 특성을 나타내었다. 내전압시험기준을 만족한 경우에도 700 V의 전압에서 100 pC이상의 큰 방전전하량을 나타내는데 이는 이미 절연성능의 저하가 발생된 것으로, 피시험체의 절연성능에 영향을 주지 않는 범위에서 절연성능을 평가하기 위해서는 시험대상의 종류와 절연물의 구조 등에 따라 시험전압을 고려해야만 한다.

방전개시전압과 방전소멸전압, 방전전하량은 절연물의 절연상태에 따라 현저한 변화를 나타내는 파라미터이므로 정확한 측정이 이루어져야 한다. 만일 절연열화가 진행되고 있다면 방전개시전압과 방전소멸전압은 현저히 낮아지며, 방전전하량은 낮은 전압에서도 크게 측정되는 특성을 갖는다. 따라서 방전개시전압과 방전소멸전압, 방전전하량의 변화를 측정·분석하는 것으로 저압용 전기전자기기의 절연 평가가 가능하였다.

부분방전시험 중 인가전압에 따른 방전전하량의 변화를 측정한 결과로부터 미소한 절연성능의 저하가 발생하는 경우, 방전개시전압의 크기는 초기 절연상태의 시료에 비해 큰 변화가 관측되지 않았다.

그러나 시험전압을 증가시키면서 방전전하량을 측정하면 동일한 전압영역에서 내전압시험 후 방전전하량이 현저히 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 인가전압의 크기에 따른 방전전하량의 변화를 관측하는 것으로 비교적 미소한 절연성능의 변화를 측정할 수 있다.

부분방전 펄스의 위상분포에 대한 측정결과에서는 절연성능이 양호한 경우에는 교류시험전압의 90° 위상에서 간헐적인 방전펄스가 발생하지만, 절연성능 저하시에는 방전펄스의 크기와 발생빈도가 급격히 증가하고, 방전펄스는 90°와 270°의 위상에서도 나타났다. 따라서 방전펄스의 위상분포도 저압용 전기전자기기의 절연성능 평가에 중요한 자료가 된다.

저압용 전기전자기기에 대한 부분방전 시험전압의 최대값은 시험 중 피시험체의 절연성능을 저하시키지 않는 범위로서, 이는 피시험체에 대한 에이징 실험과 방전전하량의 측정으로부터 산출할 수 있다.

본 논문에서 적용한 절연변압기의 경우에는 내전압시험에 규정된 시험전압의 70%인 1,050 V이하에서 에이징과 시험전압에 의해 절연성능의 저하가 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

실험결과로부터 저압용 전기전자기기의 절연평가에 부분방전시험을 적용하면 피시험체의 절연성능 저하를 일으키지 않고 내전압시험에 비해 절연에 관한 여러 가지 정보의 획득이 가능함을 알 수 있었다. 그러나 부분방전시험에 있어서도 시험전압을 증가시켜 방전 파라미터를 측정하는 경우에는 피시험체의 절연에 영향을 줄 수 있으므로 가능한 낮은 전압에서 적용해야 할 필요가 있다.

이러한 관점에서 1 pC의 부분방전이 발생하는 방전개시전압을 측정하여 방전개시전압의 감소나 동일한 전압에서 방전전하량의 증가 등을 분석하는 것으로 저압용 전기전자기기의 절연성능에 대한 평가가 가능한 부분방전시험법을 제안한다.

저압용 전기전자기기에서는 초기상태에서 1 pC 정도의 미소한 부분방전 펄스가 발생하는 것으로 측정되었으며, 이때 피시험체에 인가되는 전압은 내전압시험 전압과 비교할 때 30 ~ 50 % 정도로 피시험체의 절연성능에는 영향을 주지 않는다.

결론적으로 저압용 전기전자기기에서 절연성능 평가에 부분방전시험을 적용하기 위한 방안으로 1 pC의 부분방전이 발생하는 방전개시전압을 측정함으로써 생산단계 초기부터 절연평가를 수행해야 한다. 이때 방전개시전압의 현저한 감소 또는 최초 방전펄스의 크기가 급증하면 절연성능에 이상이 있는 것으로 판단하고, 인가전압에 따른 방전전하량의 변화, 방전펄스의 위상분포 등을 측정하는 것으로 보다 정밀한 절연평가를 수행하는 것이 효과적이다.

제 6 장 결 론

본 논문에서는 저압용 전기전자기기의 절연 평가기술로 부분방전시험의 적용에 관한 연구를 수행하였다. 저압용 기기의 절연시스템에서 부분방전 특성을 분석하기 위하여 측정시스템을 설계·제작하고, 절연변압기와 유도전동기를 대상으로 부분방전실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

부분방전 측정시스템은 내부결함이 없는 콘덴서와 검출임피던스의 결합회로망, 저잡음 증폭회로, 정전 차폐함과 전원필터로 구성하였다. 결합회로망은 상용주파수 시험전압에서 고임피던스로 동작하고 고주파 성분의 방전 펄스에 대해서는 저임피던스로 작용하는 고역통과필터로서 상용주파수 전압은 270 dB로 감쇄시키고 1 MHz 이상의 방전 펄스는 감쇄없이 검출한다. 절연층간이나 보이드에서 발생하여 결합회로망에 전달되는 방전 펄스의 크기는 수 ~ 수십 μV 이므로 이득 40 dB의 저잡음 고속응답 증폭회로를 설계하여 1 pC 이하의 미소부분방전 펄스의 측정이 가능하였다.

또한 검출 가능한 방전 펄스의 크기는 외부로부터 방사 및 전도되는 잡음과 내부회로의 잡음에 의존하므로, 고역 차단주파수 3.5 kHz의 고전압 필터를 설계하여 전도 잡음을 차단하고, 방사 잡음은 니켈합금과 동판의 2중 정전 차폐구조로 감쇄시킬 수 있었다. 잡음에 대한 평가결과, 교류전압 2 kV가 인가된 상태에서 증폭회로 출력단의 최대 잡음레벨은 3 mV_{p-p}이었다. 따라서 본 측정시스템은 6 mV 이상의 방전 펄스를 검출할 수 있다.

저압용 전기전자기기에 대한 부분방전실험에서 측정시스템의 검출감도는 피시험체의 정전용량에 따라 달라지므로 실험에 앞서 IEC 60270에 의

한 고정펄스 발생기로 감도를 산출한 결과, 절연변압기에서 34.8 mV/pC, 유도전동기에서는 11.4 mV/pC로 각각 0.2 pC과 0.5 pC의 전하량 검출이 가능하다.

절연변압기를 대상으로 한 부분방전실험에서 최초 방전펄스가 발생하는 방전개시전압은 1차권선과 철심사이에서 778 V로 나타났으며, 이때 검출되는 방전전하량은 0.5 pC으로 측정되었다. 절연거리가 상대적으로 짧은 1차권선과 2차권선 사이에서는 495 V의 방전개시전압에서 1.54 pC의 전하량이 검출되었다.

유도전동기의 고정자권선과 외함사이에 교류시험전압을 인가할 때 방전개시전압은 정극성과 부극성에서 805 V와 470 V로 다르게 나타나고, 이때 방전전하량은 각각 1.11 pC과 0.77 pC으로 측정되었다. 이와 같이 절연변압기와 유도전동기에서는 내전압 시험전압의 30 ~ 50 %에 해당하는 전압 범위에서 1 pC 레벨의 방전전하량 검출이 가능하였다.

실험결과로부터 현재 저압용 전기전자기기의 절연평가에 사용되고 있는 내전압시험법은 인가전압에 의해 피시험체의 절연성능의 저하가 발생함을 확인하였다. 또한 절연성능의 저하에 따라 방전개시전압과 방전소멸전압은 감소하고 방전전하량은 증가하였으며, 방전 펄스수와 위상분포가 변화하므로 이들 파라미터의 변화를 측정하는 것으로 저압용 전기전자기기의 절연평가가 가능함을 알 수 있었다.

저압용 전기전자기기에 대한 부분방전 시험전압의 최대값은 시험 중 피시험체의 절연성능을 저하시키지 않는 범위로서, 이는 피시험체에 대한 에이징 실험과 방전전하량의 측정으로부터 산출할 수 있다.

본 논문에서 적용한 절연변압기의 경우에는 내전압시험에 규정된 시험전압의 70 %인 1,050 V이하에서 에이징과 시험전압에 의해 절연성능의 저하가 발생하지 않으므로 부분방전 시험전압의 최대값은 1,050 V 이하가 된

다. 또한 내전압 시험전압의 30~50% 범위에서 0.5 pC~1.5 pC의 방전전하의 측정이 가능하므로 피시험체의 절연성능을 충분히 평가할 수 있다

결론적으로 저압용 전기전자기기에 대한 부분방전시험은 피시험체의 절연성능을 저하시키지 않고 절연재료의 선정과 절연 구조, 제조상 결함 등 절연에 관한 다양한 정보를 얻을 수 있으므로, 반도체 소자나 PCB와 같이 절연거리가 극히 짧은 전자부품에 대한 절연 평가에도 광범위한 활용이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers", Redwood Press, pp.242-262, 1992.
- [2] J. C. Fothergill, L. A. Dissado and P. J. J. Sweeney, "A Discharge Avalanche Theory for the Propagation of Electrical Tree", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 2, pp.474-486, 1994.
- [3] R. M. Eichhorn, "Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. E I-12, No. 1, pp.2-18, 1976.
- [4] E. J. McMahon, "A Tutorial on Treeing ", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. EI-13, No. 4, 1978.
- [5] L. A. Dissado, S. J. Dodd, J. V. Champion, P. I. Williams and J. M. Alison, "Propagation of Electrical Tree Structures in Solid Polymeric Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 3, pp.259-279, 1997.
- [6] Y. Ehara, M. Naoe, K. Yrano, H. Kishida, M. Matsuyam and T. Ito, "Fractal Analysis of the Treeing Process from Luminous Discharge image and Measurement of Discharge Magnitude" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 5, pp.728-733, 1998.
- [7] 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.
- [8] T. Okamoto and T. Tanaka, "Auto-correlation Function of PD Pulses under Electrical Treeing Degradation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.857-874, 1995.
- [9] IEC Publication 60664-1, Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 1 : Principles, requirements and tests, 2002.
- [10] IEC Publication 60884-1, Plugs and socket-outlets for household and similar purpose, 2002

- [11] IEC Publication 61558-1, Safety of power transformers, power supplies, reactors, and similar products, 2005.
- [12] IEC Publication 60664-2-3, Insulation coordination for equipment within low-voltage systems-Part 3 : Use of coating, potting or moulding for protection against pollution, 2003.
- [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] Christopher J Melhorn and Le Tang, "Transient Effect of PWM Drives on Induction Motors", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.33, No.4, pp.1065-1072, 1997.
- [15] 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.31 No.4, pp.554-560, 1996.
- [16] C. J. Melhorn and L. Tang, "Effects of PWM ASD's on standard squirrel cage induction motors", PCIM Conf., Dallas, TX, pp.356-364, 1994.
- [17] 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.
- [18] S. A. Boggs, "Partial Discharge - Part II : Detection Sensitivity", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.6, No.5, pp.35-42, 1990.
- [19] E. Gulski, "Digital Analysis of Partial Discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.822-837, 1995.
- [20] 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.
- [21] A. Krivda, "Automated Recognition of Partial Discharge", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.796-821, 1995.

- [22] Wolfgang Pfeiffer, "Partial-discharge Testing of Components for Low-voltage Equipment", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.31 No.4, pp.247-257, 1991.
- [23] IEC Publication 60-1, Medical electrical equipment-Part 1 : General requirements for safety, 1995.
- [24] IEC Publication 60950-1, Information technology equipment- Safety- Part 1: General requirements, 2001.
- [25] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment", Butterworth, pp.129-152, 1989.
- [26] E. Gulski, H. P. Burgcr, G. H. Vaillancuurt and R. Brooks, "PD Pattern Analysis During Induced Test of Large Power Transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, pp.95-101, 2000.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] R. Gutfleisch and L. Niemeyer, "Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.729-743, 1995.
- [30] L. Niemeyer, "A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.510-528, 1995.
- [31] T. Okamoto and T. Tanaka, "Novel Partial Discharge Measurement Computer-Aided Measurement System", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.21, pp. 1015-1019, 1986.
- [32] J. P. Zondervan, E. Gulski and J. J. Smit, "Fundamental Aspects of PD Patterns of On-Line Measurements on Turbogenerators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp.59-70, 2000.

- [33] 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.
- [34] E. A. Cherney, "Partial Discharge - Part V : PD in Polymer-type Line Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, No. 2, pp.28-32, 1991.
- [35] 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.
- [36] C. Laurent, C. Mayoux, "Partial Discharge - Part XI : Limitations to PD as Diagnostics for Deterioration and Remaining Life", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 2, pp.14-17, 1992.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] A. Krivda, E. Gulski, L. Satish and W. S. Zaengl, "The Use of Fractal Features for Recognition of 3-D Discharge Patterns", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.889-892, 1995.
- [40] R. E. James and B. T. Phung, "Development of Computer-based Measurements and their Application to PD Pattern Analysis", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.838-856, 1995.
- [41] E. Gulski, H. P. Burger, G. H. Vailancourt and R. B. Brooks, "PD Pattern Analysis During Induced Test of Large Power Transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp.95-101, 2000.
- [42] IEC Publication 60270, High-voltage test techniques-Partial discharge measurement, 2000.

- [43] E. Gulski, "Diagnosis of HV Components by Digital PD Analyzer", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.630-640, 1995.
- [44] C. Cachin and H. J. Wiesmann, "PD Recognition with Knowledge based Preprocessing and Neural Networks", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.578-589, 1995.
- [45] R. C ndela, G. Mrelli and R. Schifani, "PD Recognition by Means of Statical and Fractal Parameters and a Neural Network" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp.87-94, 2000.
- [46] G. C. Stone, T. E. Goodeve, H. G. Sedding and W. McDermid, "Unusual PD Pulse Phase Distributions in Operating Machines", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.567-577, 1995.
- [47] E. M. Lalitha and L. Satish, "Wavelet Analysis for Classification of Multi-source PD Patterns", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp.40-47, 2000.
- [48] 길경석, 송재용, 서황동, 황돈하, 강동식, 김용주 "저압 유도전동기에 서 미소 부분방전 측정에 관한 연구" 전기전자재료학회 논문지 제18 권 제10호, pp.960-964, 2005
- [49] 길경석, 송재용, 서황동, 문승보, 조영진, 황돈하, "저압용 전열수구에 서 방전신호의 발생과 검출에 관한 연구" 대한전기학회 논문지 제54 권 제11호, pp. 498-502, 2005.
- [50] 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.
- [51] Robrt F. Coughlin, Frederick F. Driscoll. "Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits" 3rd Edition, PRENTICE-HALL, INC., 1987.
- [52] Richard Lee Ozenbaugh, "EMI Filter Design", Marcel Dekker, inc., 1996.

- [53] Henry W. Ott, "NOISE REDUCTION TECHNIQUES IN ELECTRONIC SYSTEMS" 2th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- [54] V. Prasad Kodali, "Engineering Electromagnetic Compatibility" IEEE PRESS, 1996.
- [55] Ralph Morrison, "GROUNDING AND SHIELDING TECHNIQUES" 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1998
- [56] L.M. Schneider, "Take the Guesswork Out of Emissions Filter Design", EMC Technology and Interference Control News April-June, 1984.
- [57] L.M. Schneider, "Noise Source Equivalent Circuit Model for Off line Converters and its Use in Input Filter Design", IEEE Symposium on Electro-magnetic Compatibility, Arlington VA, August, 1983.
- [58] D. Neufeldt, "Radiation Masks Conducted RFI Power Line Filter Testing", EMC Technology and Interference Control News, April-June, 1984.
- [59] L.M. Schneider, "Modelling Takes the Guesswork Out of Filter Design and Selection", Power Sources Users Conference, Anaheim CA, October, 1984.
- [60] S. V. Marshall, G. G. Skitek, Electromagnetic Concepts and Applications, 3rd Edition, 1996.
- [61] IEC Publication 60034-1, Rotating electrical machines- Part 1: Rating and performance, 2002.

연구논문 발표실적

◎ 국제전문 학술지

- (1) “A New Wideband High Voltage Measurement System With an Integrated Optical Link”, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 9, Vol. 4, pp. 1172~1176, 2005. 9.
- (2) “An Arrester Diagnosis by measurement of Surface Temperature”, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 9, Vol. 4, pp. 1406~1409, 2005. 9.

◎ 국내전문 학술지

- (1) “휴대용 극저주파 전장측정기 개발”, 한국센서학회지, Vol. 9, No. 2, pp. 120~126, 2000. 3.
- (2) “전자파 대응 단위세대 분전반의 설계 및 제작”, 한국조명·전기설비학회 논문지, Vol. 14, No. 6, pp. 18~25, 2000.11.
- (3) “봉상접지극의 과도임피던스 특성”, 한국해양정보통신학회지, Vol. 5, No. 1, pp. 133~143, 2001. 1.
- (4) “방사선 펄스의 고안정 계측 및 분석기술 개발”, 한국해양정보통신학회 논문지, Vol. 5, No. 2, pp. 303~308, 2001. 4.
- (5) “필드 밀을 이용한 대지전장 측정장치 개발”, 한국해양정보통신학회 논문지, Vol. 5, No. 2, pp. 315~320, 2001. 4.
- (6) “대지전장 측정에 의한 뇌경보 시스템 개발에 관한 연구”, 한국센서학회지, Vol. 10, No. 4, pp. 250~258, 2001. 7.
- (7) “뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성과 피뢰기 열화진단 전문가시스템”, 대한전기학회 논문지, Vol. 51C, No. 4, pp.152~157, 2002. 4.

- (8) “누설전류의 파고분포 분석에 의한 새로운 피뢰기 진단기술 및 장치”, 대한전기학회 논문지, Vol. 52C, No. 12, pp. 562~567, 2003. 12.
- (9) “방전신호 검출에 의한 전기화재 예측” 한국해양정보통신학회 논문지, Vol. 8, No. 2, 2004. 4.
- (10) “용량성 프로브와 광전송회로를 이용한 광대역 전압측정장치”, 한국센서학회지, Vol. 13, No. 5, pp. 363~368, 2004. 9.
- (11) “변전소내 정보기기에서 서지의 측정과 분석”, 한국해양정보통신학회 논문지, Vol. 9, No. 2, 2005. 4.
- (12) “서지에 대한 누전차단기의 오동작 특성” 한국해양정보통신학회 논문지, Vol. 9, No. 3, 2005. 6.
- (13) “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.
- (14) “전력선 통신기술을 이용한 조명제어 스위치의 개발”, 한국해양정보통신학회 논문지, Vol. 9, No. 4, 2005. 7.
- (15) “저주파 구동형 집어등용 전자식 안정기 개발”, 한국해양정보통신학회 논문지, Vol. 9, No. 5, 2005. 8.
- (16) “온도측정에 의한 산화아연형 피뢰기 진단”, 대한전기학회 논문지, Vol. 54C, No. 8, pp. 361~364, 2005. 8.
- (17) “국제규격 대응 컴퓨터 네트워크용 서지방호장치 개발”, 한국해양정보통신학회 논문지, Vol. 9, No. 6, 2005. 10.
- (18) “저압 유도전동기에서 미소 부분방전 측정에 관한 연구”, 전기전자재료학회 논문지, Vol. 18, No. 10, pp. 960-964, 2005. 10.
- (19) “피뢰기 열화진단에 있어 전원 고조파의 영향과 보정에 관한 연구”, 대한전기학회 논문지, Vol. 54C, No. 11, pp. 562~567, 2005. 11.
- (20) “저압용 진열수구에서 방전신호의 발생과 검출에 관한 연구” 대한전기학회 논문지, Vol. 54C, No. 11, pp. 562~567, 2005. 11.

◎ 국제학술회의 논문집

- (1) “Electrical Characteristic Changes of ZnO Blocks by a Lightning Impulse Current and an Expert System to Diagnose Deterioration of Lightning Arrester”, International Conference on Electrical Engineering, pp. 1281~1284, 2001. 7.
- (2) “New Method for Analyzing Deterioration of Lightning Arresters”, International Conference on Electrical Engineering, pp. 1555~1558, 2002. 7.
- (3) “A New Optically Isolated Wideband High Voltage Measurement System”, Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Power Systems and Electromagnetic Compatibility, pp. 130~133, 2005. 8.
- (4) “An Arrester Diagnosis by measurement of Surface Temperature”, Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Power Systems and Electromagnetic Compatibility, pp. 134~137, 2005. 8.

◎ 국내학술회의 논문집

- (1) “양식장 전력설비의 원격 감시 및 제어 시스템 표준화”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp. 398~401, 2000. 5.
- (2) “서-지 차단장치 내장형 단위세대 분전반의 특성”, 한국해양정보통신학회 춘계 종합학술대회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp. 480~483, 2000. 5.
- (3) “안테나용 동축형 과도전압 차단장치”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp. 489~492, 2000. 5.
- (4) “전자파 대응 단위세대 분전반의 설계 및 제작”, 대한전기학회 춘계종합학술대회 논문집, pp. 104~106, 2000. 5.
- (5) “봉상접지극의 과도임피던스 특성”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 4, No. 2, pp. 568~572, 2000. 10.
- (6) “방사선 펄스의 고안정 계측회로 설계”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp. 577~580, 2000. 10.

- (7) “필드 밀을 이용한 뇌경보시스템의 개발“ 대한전기학회 춘계종합학술대회 논문집, pp. 105~108, 2001. 4.
- (8) “방사선 펄스의 고안정 계측 및 분석기술 개발”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회논문집, Vol. 5, No. 1, pp. 465~468, 2001. 5.
- (9) “필드 밀을 이용한 대지전장 측정장치 개발”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp. 577~580, 2001. 5.
- (10) “스파크신호검출에 의한 전기화재 예측”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집 Vol. 5, No. 1, pp. 371~374, 2001. 10.
- (11) “누설전류 파고분석에 의한 피뢰기 열화진단 기술”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 65~68, 2002. 4.
- (12) “누설전류의 파고분석에 의한 피뢰기 진단기술”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 46~49, 2003. 4.
- (13) “피뢰기 열화진단을 위한 저항분 누설전류의 측정기술”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 50~53, 2003. 4.
- (14) “피뢰기 열화진단을 위한 저항분 누설전류의 새로운 검출기법” 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 73~75, 2004. 5.
- (15) “용량성 프로브를 이용한 광대역 전압측정장치” 대한전기학회 부산울산경남지회 합동춘계학술대회 논문집, pp. 211~214, 2004. 5.
- (16) “변전소내 정보기기에서 서지의 측정과 분석”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 8, No. 2, pp. 147~150, 2004. 10.
- (17) “아발란치 다이오드의 서지응답 특성에 관한 연구”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 8, No. 2, pp. 156~159, 2004. 10.
- (18) “서지에 대한 누전차단기의 오동작 특성”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 8, No. 2, pp. 160~263, 2004. 10.
- (19) “고압 CV 케이블에서 부분방전 특성과 위치검출 방법에 관한 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회논문집, p. 190, 2005. 5.
- (20) “저주파 구동형 집어등용 전자식 안정기 개발”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, Vol. 9, No. 1, pp. 273~276, 2005.5
- (21) “국제규격 대응 컴퓨터 네트워크용 서지방호장치 개발에 관한 연구”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, Vol. 9, No. 1, pp. 277~280, 2005. 5.

- (22) “전력선통신기술을 이용한 조명제어 스위치의 개발”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, Vol. 9, No. 1, pp. 281~284, 2005. 5.
- (23) “저압 유도전동기에서 발생하는 부분방전의 측정과 분석”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 165~167, 2005. 5.
- (24) “ZnO 피뢰기 소자의 누설전류-온도변화 분석”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 168~170, 2005. 5.
- (25) “전원회로용 서지방호장치의 설계 및 제작”, 한국마린에지니어링학회 전기학술대회 논문집, pp. 806~811, 2005. 6.
- (26) “선박 신호회로용 서지방호장치의 개발”, 한국마린에지니어링학회 전기학술대회 논문집 pp. 941~945, 2005. 6.
- (27) “선박 통신 안테나용 뇌방호장치의 설계 및 제작”, 한국마린에지니어링학회 전기학술대회 논문집 pp. 946~949, 2005. 6.
- (28) “열화된 저압용 콘센크에서 방전신호의 발생과 검출”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 9, No. 2, pp. 200~203, 2005. 11.
- (29) “극미소 부분방전 측정시스템의 설계 및 제작”, 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 9, No. 2, pp. 208~221, 2005. 11.
- (30) “저압용 전기전자부품의 신뢰성 평가를 위한 부분방전 측정시스템에 관한 연구” 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 321~322, 2005. 11.
- (31) “전력케이블 진단을 위한 부분방전 검출장치의 설계 및 제작”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, p. 135, 2005. 11.
- (32) “피뢰기 진단을 위한 휴대용 누설전류 검출장치의 개발”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, p. 136, 2005. 11.

◎ 연구보고서

- (1) “방사선 펄스의 고정도 계측에 관한 연구”,
1999. 12~2001. 10, 과학기술부
- (2) “서지 차단장치 내장형 분전반 및 배선기구의 개발”,
2000. 5~2001. 4, 중소기업청
- (3) “전력설비(케이블, 피뢰기, 차단기) 열화진단 장치개발”,
2001. 7~2002. 4, 중소기업청

- (4) “서-지 / 낙뢰 대책관련 각종 시험기준 및 표준조사”,
2001. 1~2001. 11, 한국전기연구원
- (5) “가스절연개폐기용 피뢰기 누설전류 측정방법에 관한 연구”,
2001. 2~2001. 11, (주) 효성 중공업 PU
- (6) “폴리머 피뢰기의 열화진단기술개발”,
2001. 5~2002. 2, 한국전기연구원
- (7) “분전반 내장형 전자식 적산전력량계 개발”,
2001. 5~2002. 2, 산학연콘소시업사업
- (8) “신발용 피혁의 품질검사 장치의 개발”,
2001. 12~2002. 11, 산업자원부
- (9) “저주파 구동형 집어등용전자식 안정기 개발”,
2004. 5~2005. 2, 산학연콘소시업사업
- (10) “정보시스템/기기용 국제 규격 대응 서지 방호장치 개발”,
2004. 6~2005. 5, 정보통신부
- (11) “C. champion호 Fore Mast 조명설비의 스파크와 Wing Bridge
코로나 현상 원인분석”, 2004. 09. 09~2004. 09. 18, 모든해상(주)
- (12) “초고속 Marx 발전기제작지원”,
2004. 8.~2004. 12, 태양엔지니어링
- (13) “철도용 피뢰기의 최적관리방안에 관한 연구”,
2004. 9~2004. 12, 한국철도기술연구원
- (14) “저압 인버터용 전동기 고정자 권선에서 미소부분방전 측정기법”,
2005. 1~2005. 10, 한국전기연구원
- (15) “철도용 고압배전 지중선로의 열화검출 적용방안 연구”,
2005. 3~2005. 11, 한국철도기술연구원
- (16) “GIS용 피뢰설비 열화감시시스템 개발”,
2005. 3~2007. 2, 산업자원부
- (17) “극미소 부분방전검출에 의한 전기전자기기의 신뢰성 평가 기술”,
개발”, 2005. 5~2008. 4, 산업기술재단