creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

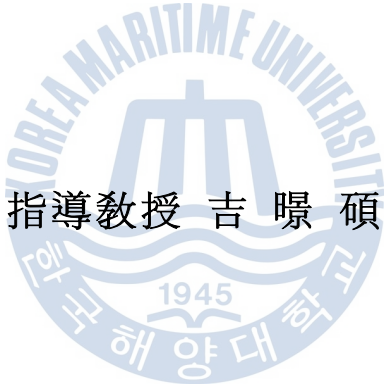
Disclaimer

dCollection

工學博士 學位論文

음향신호 분석에 의한 전력용 유입변압기의 절연진단기술

Insulation Diagnostic Technique for Oil-immersed Power Transformers by Analysis of Acoustic Signal



指導敎授 吉 曝 碩

2011年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朴 大 元

本 論文을 朴大元의 工學博士 學位論文으로 認准함

委員長 : 工學博士 金 潤 植 ㊞

委 員 : 工學博士 吉 暻 碩 ㊞

委 員 : 工學博士 徐 東 煥 ㊞

委 員 : 工學博士 趙 漢 九 ㊞

委 員 : 工學博士 吉 亨 准 ㊞

2011年 6月

韓國海洋大學校 大學院

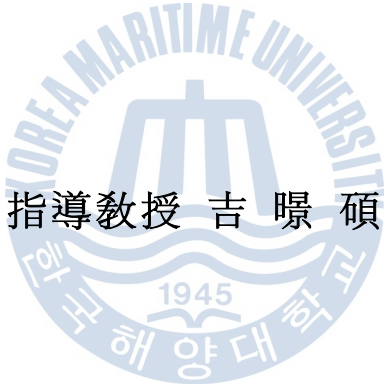
電氣電子工學科

朴 大 元

工學博士 學位論文

음향신호 분석에 의한 전력용 유입변압기의 절연진단기술

Insulation Diagnostic Technique for Oil-immersed Power Transformers by Analysis of Acoustic Signal



指導敎授 吉 曝 碩

2011年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朴 大 元

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 진단기술 ····· 6
2.1 절연열화기구 ····· 6
2.2 절연진단기술 ····· 9

제 3 장 부분방전의 발생과 검출 ····· 24
3.1 부분방전의 발생 ····· 24
3.2 부분방전의 검출 ····· 35
3.3 검출회로 ····· 45

제 4 장 평가 및 분석 ····· 54
4.1 주파수 스펙트럼 ····· 54
4.2 유중 음향신호의 전파특성 ····· 61
4.3 위치추정 ····· 71

제 5 장 결 론 ····· 82

참 고 문 헌 ····· 85

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

그림 및 표 목차

<그림 목차>

그림 1.1 특고압 전력설비 고장통계(한국전기안전공사, 2008) ····· 2
그림 2.1 직류전압에서 절연물의 I-t 특성 ····· 10
그림 2.2 절연물의 등가모델과 벡터도 ····· 13
그림 2.3 주파수응답의 측정 방법 ····· 16
그림 2.4 주파수응답 분석의 예 ····· 16
그림 2.5 유중가스 분석법 ····· 18
그림 2.6 부분방전의 전기적 검출법 ····· 21
그림 2.7 부분방전의 음향신호 측정법 ····· 22
그림 3.1 코로나 방전 ····· 24
그림 3.2 전자사태 과정 ····· 26
그림 3.3 연면방전 ····· 28
그림 3.4 내부방전 ····· 30
그림 3.5 결함의 등가회로 ····· 31
그림 3.6 교류전압에서 부분방전 발생 패턴 ····· 32
그림 3.7 부분방전 검출의 기본회로 ····· 36
그림 3.8 부분방전 검출회로 ····· 38
그림 3.9 음향신호 측정회로의 구성 ····· 40
그림 3.10 AE센서의 구조 ····· 41
그림 3.11 음파의 입사, 반사 및 굴절 ····· 44
그림 3.12 광대역 및 협대역 AE센서 ····· 46
그림 3.13 역결합회로 ····· 47

그림 3.14 역결합회로의 주파수 응답 ····· 48
그림 3.15 시제작 음향신호 증폭회로 ····· 49
그림 3.16 음향신호 증폭회로의 주파수 응답 ····· 49
그림 3.17 결합회로망 ····· 51
그림 3.18 시제작 광대역 증폭회로 ····· 53
그림 3.19 광대역 증폭회로의 주파수 응답 ····· 53
그림 4.1 전극계의 구성 ····· 55
그림 4.2 음향검출 실험계의 구성 ····· 57
그림 4.3 음향신호파형의 예 ····· 58
그림 4.4 결함에 따른 주파수 스펙트럼 ····· 60
그림 4.5 교정실험계의 구성 ····· 62
그림 4.6 교정펄스파형의 예 ····· 64
그림 4.7 인가 전하량에 따른 출력전압 ····· 65
그림 4.8 실험계의 구성 ····· 65
그림 4.9 거리에 따른 유중 음향신호의 측정 ····· 66
그림 4.10 부분방전 펄스와 음향신호 검출파형의 예 ····· 69
그림 4.11 거리에 따른 음향신호의 감쇄 ····· 70
그림 4.12 음향신호의 도달시간차 ····· 72
그림 4.13 AE센서를 이용한 부분방전 위치추정 ····· 73
그림 4.14 좌표계 (I) ····· 74
그림 4.15 부분방전 위치추정 실험계의 구성 ····· 74
그림 4.16 음향신호의 파형 (I) ····· 76
그림 4.17 좌표계 (II) ····· 78
그림 4.18 음향신호의 파형 (II) ····· 79

<표 목차>

표 2.1 유입변압기의 이상에 따른 발생가스 ····· 19
표 3.1 매질의 음향특성 ····· 43
표 3.2 여러 가지 매질들 간의 음향 반사율 ····· 45
표 3.3 커플링 캐패시터의 사양 ····· 50

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

Insulation Diagnostic Technique for Oil-immersed Transformers by Analysis of Acoustic Signal

by Dae-Won, Park

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

Abstract

This dissertation deals with the on-line diagnostic method for oil-immersed power transformers by acoustic signal measurement, which is recently being accepted as a non-destructive and an effective dielectric diagnosis. Partial discharge (PD) detection can be divided into two methods: one, electrical, the other, non-electrical. The electrical method has high sensitivity, which enables precise measurement. However, some of the shortcomings of this method include the fact that it is likely to be affected by electromagnetic noise and its coupling network can not be installed during operation. The non-electrical method includes acoustic, optical, and chemical detection. The acoustic detection method is less sensitive than the electrical method. This method, however, is less likely to be affected by electromagnetic noise as it is electrically insulated. Additionally, the

acoustic emission sensor can be installed easily during operation. Locating the defect is possible by measuring the time difference of arrival (TOA) of the acoustic signal using multiple sensors.

Partial discharges were generated by increasing the AC voltage from 0 to 50 kV while immersing the electrode system in insulating oil.

To detect acoustic signals generated by PDs in insulating oil, a wideband acoustic emission (AE) sensor, with a frequency range of 100 kHz~1 MHz, and a narrowband AE sensor, with a frequency range of 50 kHz~250 kHz, were used. The two types of AE sensors that measured acoustic signals were installed on the outer surface of the metallic enclosure. As the AE sensor uses a single cable for transmitting both power and signal, therefore the acoustic signal was separated from the DC voltage by a circuit with high-pass filter characteristics. The decoupler was designed to separate the acoustic signals from the DC voltage. The prototype decoupler designed in this paper transmitted acoustic signals from the AE sensor to the DC source are attenuated by more than 200 dB, but are transmitted to the input terminal of the amplifier without attenuation.

Electrode system have been fabricated to simulate the defects that can be generated inside the oil-immersed transformer. A plane electrode was made from a tungsten-copper alloy disc 15 mm thickness and 60 mm diameter to avoid electric field concentration; the radius of curvature of the needle electrode was 10 μm. A pressboard of thickness 1.6 mm was inserted between the electrodes.

From the FFT results, the frequency ranges of the acoustic signals generated at the needle-plane, plane-plane, and particle electrodes were in the ranges 50～170 kHz, 50～400 kHz, and 50～400 kHz, respectively. Although the signals vary depending on the type of defect, the frequency spectra of the acoustic signals lies in the range of 50～400 kHz. Therefore, it should be noted that a narrow-band AE sensor with a resonant frequency of 140 kHz is suitable for the diagnosis of oil-immersed transformers by acoustic detection.

Relationships between acoustic signals and distances were analyzed to determine the propagation characteristics of acoustic signals in the insulating oil. To determine the sensitivity of the measurement system, a calibration experiment was carried out with a standard PD calibrator (CAL 1A, Power Diagnostix Systems GmbH, 1 pC～100 pC).

The output voltage of the measurement system increased linearly in proportion to the injected charge. The sensitivity of the measurement system was measured as 23.65 mV/pC.

Relationship between the magnitude of a PD pulse and the acoustic signal was analyzed while increasing the distance between the AE sensor and the electrode. When a PD of 23.3 pC generated, the magnitude of the acoustic signal appeared to be 940 mV, 795 mV, 700 mV, 570 mV and 450 mV at distances of 170 mm, 300 mm, 400 mm, 590 mm and 800 mm, respectively. The acoustic signal was non-linearly attenuated with respect to distance.

To find the location of the PD occurrence in oil-immersed transformers by the acoustic method, three or more AE sensors are

required. In this dissertation, five AE sensors were used to estimate the position in 3-D by the TOA of the acoustic signals and coordinates were marked on the enclosure to calculate the location of the PD occurrence by installation of AE sensors.

Five AE sensors were installed to estimate the position of the PD source in a 3-D by using the differences in the TOA of the acoustic signals. The experimental results show the position of the PD source with an error margin of 10 %. The positioning error was due to the non-linear propagation characteristics of the acoustic signal.

The insulation diagnostic technique by acoustic signal analysis is expected to be widely used power facilities with oil insulation such as power transformers, metering out fits (MOFs).

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

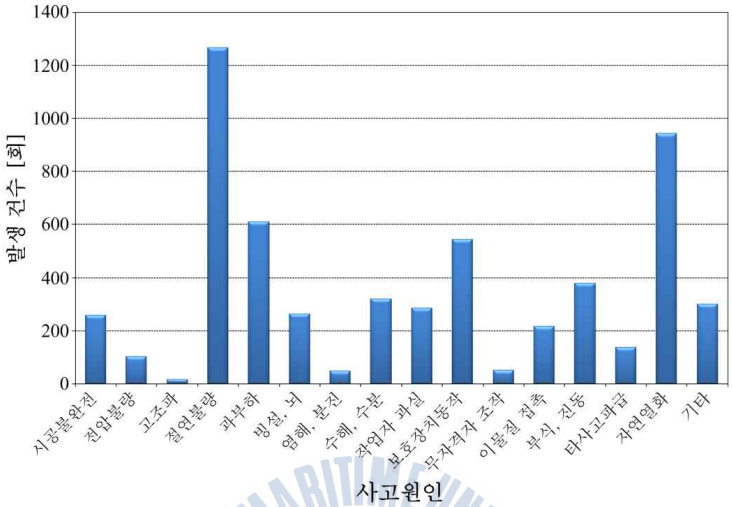
제 1 장 서 론

1.1 연구배경

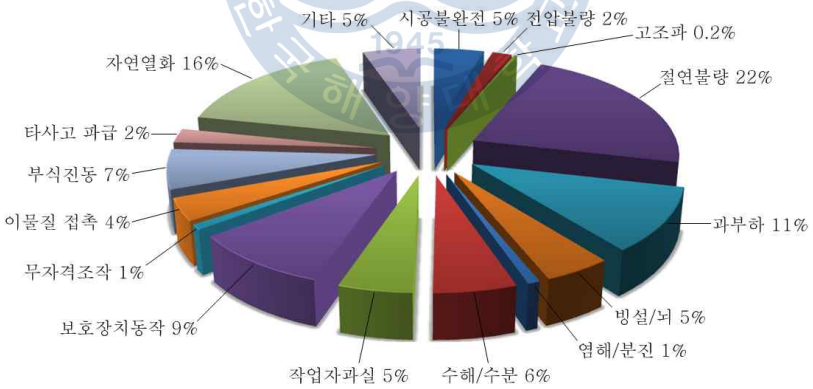
최대수요전력 7천만 kW, 송전전압 765 kV, 21세기 고도정보화 사회에서 전기는 일순간이라도 없어서는 안 될 중요한 에너지원이자 공기, 물과 더불어 삶의 필수요소가 되었다. 특히 전력용 유입변압기는 전자기 유도현상을 이용하여 교류전압이나 전류를 변환시키는 장치로써 특고압 및 초고압 전력계통에 널리 사용되고 있으며, 과거부터의 기술개발에 따라 점검방법이나 관리 기준이 결정되어 정기점검을 통해 안정적으로 운전되어 온 전력설비이다. 이러한 전력용 유입변압기에서 사고가 발생하면 피해범위가 광범위하기 때문에 수리나 교체에 막대한 비용과 인력이 소요되는 등 기술적·경제적 손실이 발생하며 전력공급의 중단은 물론 전기화재 및 인명사고와 같은 2차 사고를 발생시키므로 안정적인 전력공급과 신뢰성 있는 운전을 위해 주기적인 상시 진단과 유지 보수가 이루어져야 한다[1]~[4]. 그러나 변압기를 구성하는 재료나 성능의 발전에 비하여 유지보수 및 점검수준은 상대적으로 미흡한 실정이다.

그림 1.1은 국내 특고압설비의 사고통계를 나타낸 것으로 전체 사고에서 절연불량에 의한 사고건수가 1,267건으로 나타났으며, 이는 전체 사고의 22 %로 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다[5].

전력계통에 사용되는 설비, 특히 전력용 유입변압기 진단기술의 흐름은 종래의 시간기준 정비(Time Based Maintenance, TBM)에서 상태기준 정비(Condition Based Maintenance, CBM)의 개념으로 바뀌고 있으며, 시간 기준정비는 사용기기의 변천과 전력수요의 증가로 인하여 종래의 기준을 적용하는 것은 경제적·신뢰성 측면에서 바람직하지 못하다[6]~[9].



(a) 원인별 사고발생건수



(b) 원인 비율

그림 1.1 특고압 전력설비 고장통계(한국전기안전공사, 2008)

Fig. 1.1 Statistics of ultra-high voltage power facility fault (KESCO, 2008)

현재 전력용 유입변압기의 유지보수 및 절연진단기술의 세계적 추이는 미국, 일본, 유럽 등 선진국을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 기술의 목적은 전력용 변압기의 절연열화 및 이상 유무를 상시 감시하여 향후 발생 가능한 사고를 조기에 발견하고 유지 보수함으로써, 전력공급의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위함이다[7].

전력용 변압기가 가지는 절연내력은 변압기의 수명과 성능에 직접적인 관련이 있다. 최적의 변압기 절연설계가 이루어지고, 우수한 특성의 절연재료를 사용할지라도 운전 중에 발생되는 전기적, 기계적, 환경적 스트레스로 인하여 절연열화가 진행되며, 설계단계에서 고려된 기대수명을 다하지 못하고 절연파괴에 이르게 된다[10]~[12]. 절연진단을 위한 방법으로는 크게 오프라인(off-line) 측정법과 온라인(on-line) 측정법으로 나눌 수 있으며 오프라인 측정법은 정밀진단이 가능하지만 측정을 위해 변압기의 운전을 중단해야 하는 단점이 있다. 반면 온라인 측정법은 운전에 지장을 주지 않고 절연상태를 진단할 수 있다. 절연진단을 위한 최근의 기술로는 부분방전 측정법이 주류를 이루고 있으며, 이는 절연물에 결함이 생기면 이 부분에서 전계가 집중되고 부분방전이 발생하게 된다. 따라서 이러한 부분방전을 측정하면 열화를 초기에 검출할 수 있다[13]. 부분방전의 측정에는 전기적 측정방법과 그 외 물리적 현상을 측정하는 비전기적 방법이 있다. 커플링 캐패시터(coupling capacitor)를 사용한 전기적 측정방법은 감도가 우수하여 정밀 측정이 가능하지만 주변 전자계에 의한 영향을 받기 쉬우며, 초고압의 경우 운전 중 결합회로망의 설치가 어렵고 절연에 대한 문제가 있다[14]~[18]. 또한 고주파 변류기(High Frequency Current Transformer, HFCT)를 사용하는 방법은 접지선을 통해 흐르는 고주파 잡음에 의한 영향으로 측정이 어렵다. 비전기적 방법에는 방사전자파 검출, 음향 검출법이 있으며, 그 중에서 음향 검출법은 전기적 방법에 비해

감도는 낮지만, 운전 중 센서의 설치가 용이하고 전기적으로 절연되어 있어 주변 전자계 노이즈에 강한 장점이 있다. 또한 다수의 센서를 설치하여 음향신호의 도달시간차를 측정하면 부분방전이 발생하는 결함의 위치를 추정할 수 있다[14].

1.2 연구목적 및 내용

본 논문에서는 전력용 유입변압기의 절연진단을 위하여 부분방전에 의해 발생하는 음향신호의 주파수 성분을 분석하고 음향신호의 유중 전파특성과 절연결함의 위치를 추정하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 변압기 절연체계에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 침전극, 평판전극 및 프레스보드를 이용하여 침-평판, 평판-평판, 파티클(particle) 전극을 제작하였으며, 부분방전에 의해 발생하는 음향신호를 검출하기 위한 역결합회로와 고감도 증폭회로를 설계·제작하였다.

부분방전 음향신호의 최적검출을 위한 주파수 대역을 선정하기 위하여 광대역 AE센서와 협대역 AE센서를 사용하여 결함에 따른 음향신호의 주파수 성분을 분석하였다. 또한 음향신호와 부분방전 전하량의 관계를 분석하기 위하여 부분방전 펄스와 음향신호의 크기를 측정하였다. 부분방전 펄스를 측정하기 위하여 커플링 캐패시터와 검출 임피던스로 이루어진 결합회로망(coupling network)을 구성하고, 고감도 증폭회로를 설계·제작하였으며 IEC 60270에 따른 전기적 측정법과 음향신호 측정법을 비교하여 동일한 크기의 부분방전이 발생할 때 유중 음향신호의 거리에 따른 전파특성을 분석하였다.

유입변압기 내부에 존재하는 결함의 위치를 추정하기 위하여 음향신호의 도달시간차(Time Difference of Arrival, TDA)를 이용하였으며, 철심

이 없는 경우와 철심이 있는 경우를 고려하여 3차원 위치추정 알고리즘을 제안하고 결함의 위치를 계산하였다.

부분방전에 의해 발생하는 음향신호는 유입변압기의 크기 및 현장조건에 따라 다르게 나타날 수 있지만, 본 논문에서 제시한 방법을 적용하면 전력용 유입변압기의 절연상태에 대한 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 정확한 부분방전 음향신호의 검출을 위하여 적합한 주파수 대역의 센서를 선정해야 하며, 검출회로에 대한 연구가 선행된다면 전력용 유입변압기의 상시 절연진단에 광범위하게 적용이 가능하다.

본 논문을 통해 얻어진 실험결과로부터 유입변압기의 절연진단에 적용하기 위해서는 부분방전에 의해 발생하는 음향신호의 고정도 측정이 필수적이다. 음향신호측정에 의한 절연진단기술은 유입변압기의 운전을 중단시키지 않고 부분방전의 발생 및 위치에 대한 다양한 정보를 얻을 수 있다. 이와 더불어 유입변압기 뿐만 아니라 타 전력기기의 온라인 절연진단에 활용될 수 있으며 아직까지 국내에서 음향신호의 측정에 의한 절연진단기술과 측정장치에 대한 연구가 활발히 이루어지지 않고 있으므로 이에 대한 자료로 충분히 활용될 수 있을 것이다.

제 2 장 절연열화 및 진단기술

2.1 절연열화기구

전력용 유입변압기는 여러 가지 스트레스에 의해 절연유 내부에 기포나 가스가 발생하며, 절연지의 중합도가 저하되는 등 본래의 절연성능을 악화시키는 절연열화현상이 발생한다[15],[16]. 절연열화현상은 사용 환경, 사용 조건, 절연재료의 구성에 따라 다양한 특성을 가지기 때문에 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하여 절연물의 열화가 발생된다. 특히 절연유, 절연지 등과 같은 절연재료의 열화현상은 유입변압기의 성능을 저하시킨다[17]~[19].

유입변압기를 구성하고 있는 각각의 절연재료는 전기적, 기계적 스트레스를 받으면 시간의 흐름에 따라 초기의 성능이 저하된다. 특히 절연유, 절연지, 프레스보드 등의 조합으로 복합적인 절연구성을 하고 있어 절연열화와 재료의 종류에 의해 각각 다르게 나타나며, 그 결과 변압기 초기 설계시의 기대수명에 큰 폭의 차이가 생긴다. 유입변압기에서 절연열화에 따른 사고는 제조 시 결함 또는 운전 중 절연재료의 절연내력이 약화되어 발생한다[20].

유입변압기의 열화요인은 크게 4가지로 분류되며 운전 중 온도 상승에 따른 열적 열화, 과도한 진동 및 급격한 부하변동에 따른 기계적 열화, 절연재료의 절연내력이 과도이상전압 또는 과전압으로 인하여 약화되는 전기적 열화, 제조 시 결함이나 사용 환경에 따른 수분이나 먼지 등에 의한 환경적 열화 등으로 나눌 수 있다[10]~[12].

일반적으로 운전 중인 전력설비의 절연물 내부에서 보이드 방전이 발생하면, 보이드 표면은 침식된다. 부분방전에 의한 절연물 내부의 침식은

보이드의 확대 혹은 보이드 간의 절연파괴가 발생하여 큰 방전으로 이행된다. 부분방전에 의한 절연 손상은 전계가 집중하기 쉬운 도체 근처에서 시작하는 경우가 많다. 예를 들면, 변압기 내부의 절연물에 보이드가 존재하거나 박리가 발생할 경우 부분방전이 발생하고 절연열화로 진전된다. 그러나 열화를 촉진하는 유해한 부분방전의 크기와 수명간의 관계는 아직까지 명확하게 해석되지 못한 실정이다[21]~[25].

기계적 열화는 변압기 기동・정지시의 전자력, 운전 중의 진동, 열사이클에 의한 응력 등이 있다. 기동・정지시의 전자력에 의하여 권선 단말부 또는 권선의 고정부 등에 응력이 집중하여 발생하고, 이러한 현상이 반복되면 균열이 발생한다. 운전 중의 진동은 절연층에 균열을 발생시키며, 권선의 고정상태가 느슨할 경우 권선의 진동에 의하여 철심사이에서 마찰열화가 발생한다[26]~[27].

급속한 부하변동이나 기동・정지시의 냉열 사이클에 의한 열응력의 반복에 의해 열화가 발생하는데, 도체의 온도상승시의 신축에 의한 응력과 열 발생은 절연층의 박리나 보이드의 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 의해 진행된다. 화학약품에 의한 열화는 부식, 용해로 나타나며, 기계용 기름 등의 사용에 의한 열화는 절연재료의 팽창에 의한 박리나 용해와 같은 현상으로 나타난다. 또한 먼지나 이물질의 부착으로 연면 절연저항의 저하를 발생시켜 2차적인 열화로 진전되는 경우가 많다. 먼지에 의한 오손은 탄소분, 철분 등의 도전성 물질의 부착으로 인하여 연면 절연저항이 저하

되고, 흡습에 의하여 절연저항은 더욱 저하된다. 결로는 절연파괴의 직접적인 원인이 되기도 하며, 흡습상태에서 운전하게 되면 열에 의한 가수분해가 촉진된다. 또한 연면 절연저항이 저하한 상태에서 고전압이 인가되면 누설전류와 미소방전에 의하여 트래킹이 발생한다. 트래킹에 의한 열화는 탄화도전로를 형성하기 때문에 연면 절연파괴를 유발하기도 한다. 그러나 환경적인 열화 현상은 일반적인 경우에 절연층 표면에 나타나므로 절연재료의 직접적인 수명에는 지장이 없고, 대부분 절연성능을 회복할 수 있으며, 육안으로도 열화정도를 추정하는 것이 가능한 경우가 많다.

이러한 열화요인이 복합적으로 작용하여 변압기의 성능과 수명이 저하된다. 그 결과 변압기에서는 유중가스 발생, 진동 및 소음증가, 부분방전 발생 등으로 인하여 절연성능의 저하가 발생되고 최종적으로 절연파괴로 진전되어 사고가 발생한다[28],[29].

또한 절연열화에 기인되는 사고에 의한 피해는 날로 증가하는 추세에 있기 때문에 변압기의 절연열화를 진단하는 것은 대단히 중요하다. 절연진단기술은 일본, 유럽, 미국 등지에서 이미 오래전부터 연구가 진행되어 왔으며, 현재는 실제 적용되고 있는 방법도 있다.

가장 유효한 절연진단을 위해서는 전력용 유입변압기에 대한 정확한 절연열화기구를 이해하고, 각각의 열화 상황에 가장 적합한 절연진단방법을 선정하여 적용해야 한다. 장기간 구축된 데이터와 실제 경험을 거쳐 절연열화 정도와 실험결과의 상관성을 검토하여야 정확한 진단이 가능해진다.

2.2 절연진단기술

유입변압기는 전력시스템에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있는 설비로 전력 수요의 증가에 따라 점차적으로 초고압·대용량화되고 있다. 이러한 유입변압기의 고장이 발생하게 되면 그 정전범위가 넓고 막대한 경제적 손실이 발생하는 등 전력계통에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 변압기 내부에 이상이 발생하거나 발생할 가능성이 있을 경우 즉시 경보할 수 있는 감시체계가 요구되고 있다. 이를 위해 국제적으로도 IEC, CIGRE 등 전문가 그룹을 중심으로 전기관련 전 분야에 규격화가 진행되고 있으며, 고품질의 전력을 무중단으로 공급하기 위해서 전력설비의 절연진단기술에 대한 연구가 진행되고 있다.

이러한 절연진단기술은 크게 오프라인 진단방법과 온라인 진단방법으로 나눌 수 있으며 대표적인 오프라인 진단방법에는 절연저항 측정, 누설전류 측정, 유전정접($\tan\delta$) 측정, 주파수응답 분석(Frequency Response Analysis, FRA) 등이 있으며, 이들 방법은 최초 제작 시 또는 정밀진단이 필요할 때 사용된다[30]~[34].

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 수행된다. 절연저항은 절연저항계를 이용하여 비교적 용이하게 측정할 수 있으며, 측정전압이 비교적 낮고 측정방법이 간단하기 때문에 일반적으로 이용되고 있다.

절연저항의 측정에는 직류전원을 내장한 간편한 절연저항계가 이용되고 있으며, 일반적으로 사용되고 있는 절연저항계의 정격전압은 500~5,000 V이며, 절연저항의 측정범위는 1 MΩ~10 TΩ이다. 최근에는 정격전압 1,000 V에서 10 TΩ 이상의 절연저항을 측정할 수 있는 절연저항계도

사용되고 있다. 절연저항은 피시험물의 절연구조, 형상, 흡습, 오손 및 시험전압 등에 영향을 받으며, 특히 측정시의 습도 및 주위 온도의 영향을 받기 쉽기 때문에 주변의 환경조건을 명기해야 한다. 또한 절연저항의 측정값으로 절연성능을 판단하기에는 곤란하며, 정기적으로 절연저항을 측정하여 변화를 관측하는 것으로부터 절연성능의 평가가 가능하다[35]~[36].

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

$$I(t) = I_d(t) + I_a(t) + I_r(t) \tag{2.1}$$

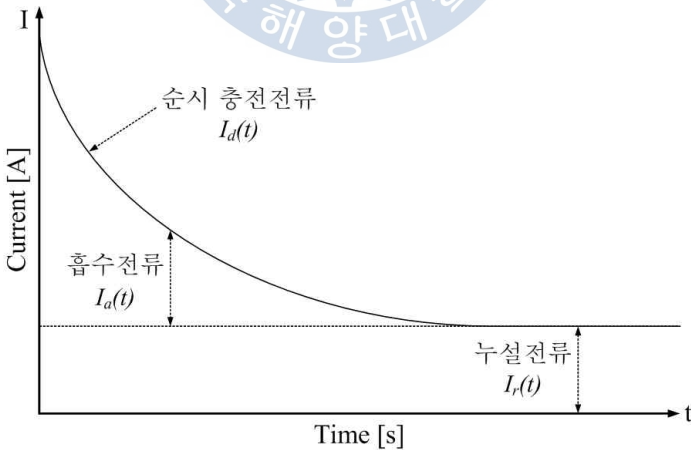


그림 2.1 직류전압에서 절연물의 I-t 특성

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

순시 충전전류는 유전체의 전자분극, 원자분극 등에 의해 발생하는 전류로써 급격하게 감소한다. 흡수전류는 쌍극자 분극과 공간전하 분극에 기인한 전류로 상당히 긴 시간에 걸쳐 시간에 따라 감소한다. 흡수전류 $I_a(t)$는 시간 t에 대한 함수로 다음과 같은 실험식이 이용된다.

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

여기서 A는 기하학적 정전용량, 인가전압, 온도 등에 의하여 결정되는 정수로 식 (2.2)에 의해 전류-시간 특성을 보면 흡수전류가 큰 시간영역에서는 기울기 n의 직선으로 나타나지만, 시간이 지남에 따라 누설전류의 영향을 받으므로 직선에서 벗어난다.

절연저항측정에서는 전류-시간 특성, 절연저항-온도 특성, 절연저항, 성극지수(polarization index, PI), 유전흡수율(dielectric absorbtion ration, DAR), 절연저항-전압 특성 등으로부터 절연재료의 특성을 판단한다. 절연저항계는 직류 고전압 발생장치, 전압계 및 전류계로 구성되는데, 직류 고전압 발생장치는 전압변동이 작아야 한다. 이는 전압변동에 의하여 피시험물의 충전전류가 측정전류에 중첩되어 오차를 발생시키기 때문이다. 전류계는 측정전류가 작으므로 직류증폭기를 부착한 미소전류계가 사용된다. 절연저항의 측정방법은 비교적 간단하고, 측정에 필요한 전원이 소용량이며, 누설전류의 크기, 흡수전류의 형태, 펄스성 전류가 발생하는 kick 현상, 전압특성 등 절연상태를 진단할 수 있는 정보가 풍부하며, 현장 적용성이 우수하다. 또한 측정감도가 높으며, 흡습, 수트리(water tree)의 검출에 유효하다. 그러나 누설전류의 크기는 피시험물의 형태와 크기에 따라 변화하기 때문에 단편적인 전류의 크기만으로 절연상태를 판단할 수 없다.

절연상태가 건전한 경우 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 특성곡선에서 누설전류의 상승으로 전류의 감쇄율이 낮아지게 된다. 이러한 특성을 이용하여 누설전류 또는 절연저항의 시간 변화를 나타내는 지표로서 식 (2.3)의 성극지수(polarization index, PI)에 의해 절연물의 상태를 판정한다.

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

정전용량을 C인 절연물에 교류전압 V를 인가할 때 흐르는 전류 I는

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

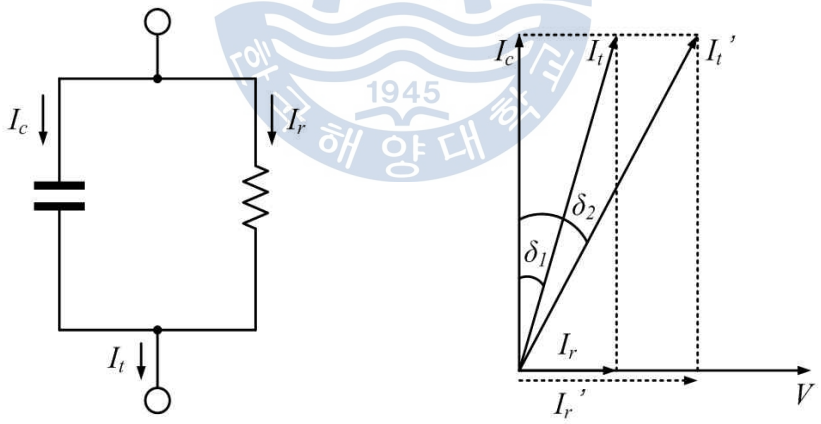
로 된다. 즉, 절연물에 흐르는 전류는 인가전압과 주파수에 의하여 결정되며, 절연재료의 비유전율과 $\tan\delta$의 값에 의해 변화한다. 교류누설전류의 측정은 전압과 전류의 관계로부터 절연물의 열화 정도를 추정하는 것이다. 절연재료가 흡습하면 비유전율이 증대되고, 부분방전이 발생하면 $\tan\delta$가 증가하므로 전류의 측정에 의하여 절연특성을 추정하는 것이 가능하다. 절연재료에 교류전압을 인가하면 손실이 발생하는데 이 손실은 누설전류에 의한 손실, 유전분극에 기인한 손실 및 부분방전에 기인한 손실로 분류된다. 이러한 손실 때문에 그림 2.2에 나타낸 것과 같이 전체전류 I_t는 충전전류 성분 I_c보다 뒤지게 되고, 이 위상각은 유전손실각, 유

전정접이라고 한다. 절연물에서의 유전손실 W는

$$W = \omega C V^2 \tan\delta \tag{2.5}$$

와 같이 된다.

$\tan\delta$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 결함에 의해 고유값이 달라지기 때문에 절연물의 품질관리나 절연성능 평가에 널리 이용되고 있다.



(a) 등가모델 (b) 벡터도

그림 2.2 절연물의 등가모델과 벡터도

Fig. 2.2 Equivalent model and vector diagram of dielectric materials

tanδ 측정장치는 시험용 전원, 표준 캐패시터, 측정 회로부 및 검출부로 구성된다. 시험용 전원은 고주파 성분을 포함하지 않는 정현파 전압에 근사한 전원으로 시험전압까지 부분방전을 발생하지 않아야 한다. 표준 캐패시터는 정전용량이 정확하게 교정되어야 하며 손실이 없거나 손실을 알고 있는 것이라야 한다. 전원전압 파형의 왜형은 tanδ값에 상당한 오차를 주기 때문에 가능한 정현파 전압의 전원을 사용하여야 한다. 전원전압에 고조파 성분이 포함되면 부분방전 발생위상이 달라지기 때문에 전압파형의 왜형률이 10 % 이상인 경우에는 특히 주의 하여야 한다. 절연물 내부의 tanδ를 측정하는 경우에는 반드시 가드 전극을 설치하고, 표면누설전류, 표류용량의 영향을 제거해야 한다.

기계적, 열적요인으로 절연물의 열화가 진행되면 절연물 내부에 미소한 크랙(crack), 박리, 보이드(void) 등이 발생하고 이들 결함 부분에서 부분방전이 발생한다. 이 때문에 절연물의 열화는 부분방전 개시전압이 저하하고 Δtanδ가 증가하는 경향이 나타난다. Δtanδ는 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 결함 부분이 흡습하면 tanδ의 증대, 부분방전 개시전압의 증가 및 Δtanδ의 감소 등이 있기 때문에 경년열화의 정량적인 판단을 위해서는 tanδ의 측정 시의 조건을 일정하게 하는 것이 필요하다.

tanδ의 측정에는 쉐링브릿지(schering bridge)를 사용하는 것이 일반적이다. 부분방전이 발생하지 않는 전압에서의 정전용량 C_o와 정격전압에서의 정전용량 C_E의 차 ΔC와 C_o의 비 즉, 정전용량의 증가비 $\Delta C/C_o$는

$$\Delta C/C_o = (C_E - C_o)/C_o \quad (2.6)$$

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

절연물이 열화하면 일반적으로 $\tan\delta$가 증가하고, 이 때 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. 측정결과의 평가 시 $\tan\delta$, 절연저항은 절연물의 종류와 구성에 따라 값이 달라질 수 있기 때문에 절대적인 수치에 의한 평가는 불가하며, 초기의 값과 비교하여 경시적인 변화로부터 종합적으로 판단해야 한다[37],[38].

변압기의 권선은 단락 사고 시의 전자력에 의해 변형이 발생하면 권선의 기계적 강도와 절연강도가 저하된다. 또한 경년열화에 의해서도 권선의 고정력이 감소하게 된다. 주파수응답 분석은 변압기 내부 권선의 변형을 주파수 영역에서의 전달함수의 차이에 따라 검출할 목적으로 개발된 기술이다. 주파수응답 분석에서는 변압기를 정지해 외부 단자에 측정장치를 접속해 입력 전압의 주파수에 대한 전류나 임피던스의 관계를 전달 함수로서 주파수 영역에서 측정 데이터를 비교함으로써 내부 권선의 변형 유무, 발생 부위를 분석할 수가 있다. 진단에 이용되는 입력신호는 주파수 가변인 정현파 저전압 신호를 사용한다. 입력 전압 V와 전류 I의 주파수에 따른 비, 즉 변압기 임피던스 Z의 측정회로를 그림 2.3에 나타내었으며 그림 2.4와 같이 초기 측정시의 주파수응답 특성과 열화가 진행된 상태에서의 주파수응답 특성이 다르게 나타나는 것을 이용하여 절연상태

를 진단한다[39]~[42]. 일반적으로 수 MHz 정도의 주파수 영역까지 해석하며, 이 방법 또한 비교 측정법이기 때문에 측정 시 리드선의 배치와 접속은 동일한 조건으로 이루어져야 한다.

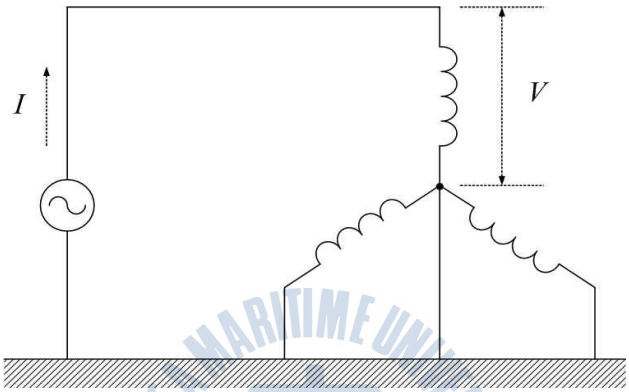


그림 2.3 주파수응답의 측정 방법

Fig. 2.3 Measurement method of frequency response

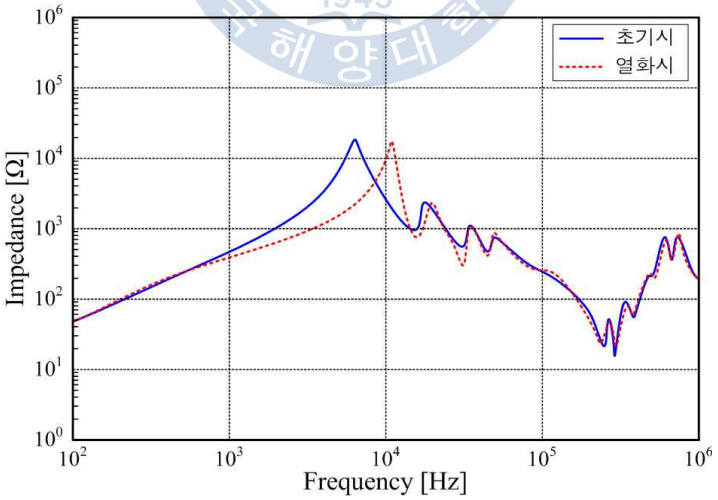


그림 2.4 주파수응답 분석의 예

Fig. 2.4 Example of frequency response analysis

앞서 기술한 진단방법은 절연상태의 정확한 진단이 가능하지만 진단에 필요한 파라미터를 측정하기 위하여 운전을 정지시켜야 하는 단점이 있어 절연상태의 상시진단이 어렵다[34].

반면 온라인 진단방법은 전력공급의 중단없이 현장에서 측정이 가능하기 때문에 시간적, 경제적으로 유리하며 운전 중 기기의 상태를 확인할 수 있기 때문에 최근 전력용 유입변압기 뿐만 아니라 전력설비에 대부분 적용되고 있다. 유입변압기에 적용되는 대표적인 온라인 진단방법에는 유중가스분석, 부분방전 측정법이 있으며 부분방전 측정법은 전기적 검출법과 전자파 검출법, 음향신호 검출법으로 세분화 할 수 있다.

2.2.1 유중가스 분석법

유입변압기에서 채취한 절연유에 용존 되어있는 가스를 측정 및 분석하여 변압기 내부의 이상 유무 및 열화 상태를 진단하는 방법을 유중가스 분석법이라 한다. 유입변압기에 이용되고 있는 유중가스 분석법은 국내·외적으로 적용실적이 많은 기술로 변압기의 절연진단에 사용되고 있다[43],[44].

유입변압기 내부에서 아크나 부분방전이 발생하면 국부적인 과열현상으로 발열을 동반한다. 변압기 내부의 절연지, 절연유, 프레스보드 등의 절연재료들은 이러한 과열이나 방전에 의해 열화 및 분해되면서 여러 종류의 가스를 발생시킨다. 분해된 가스는 대부분 절연유에 용해되어 있기 때문에 그림 2.5와 같이 절연유를 채취, 분석하여 변압기 내부의 절연상태를 진단할 수 있다[45],[46].

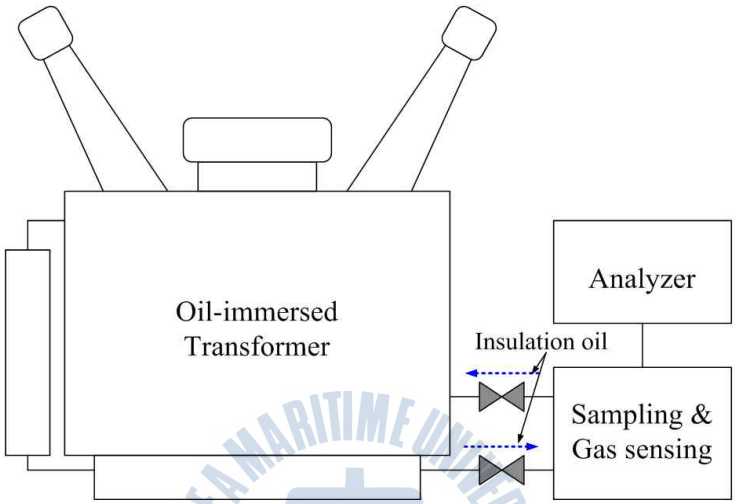


그림 2.5 유중가스 분석법

Fig. 2.5 Method of resolved gas analysis

변압기 내부의 절연유가 열화되면 유기산, 수분, 카르보닐, 퍼옥시사이드, 유황산화물 등이 생성되어 절연유에 용해된다. 절연지의 절연열화는 셀룰로오스 분자의 결합이 파괴되어 발생하며 푸르푸랄(furfural), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2) 등이 생성되어 절연유에 용해된다. 또한 변압기 내부에서 과열이나 방전이 발생할 경우, 아세틸렌, 에틸렌 등의 가스가 발생하여 절연유에 용해된다[47],[48].

과열이나 방전에 의해 열화 및 분해되면서 발생되는 가스의 종류를 표 2.1에 나타내었다.

표 2.1 유입변압기의 이상에 따른 발생가스

Table 2.1 Generated gases according to defects of an oil filled transformer

이상의 종류		주요 발생 가스
과열에 의한 열화	절연유	H_2, CH_4, C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6
	고체절연물	H_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_4, C_2H_6
방전에 의한 열화	절연유	H_2, CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_3H_6
	고체절연물	H_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_2, C_2H_4

따라서 정기적으로 절연유를 샘플링해서 용해되어 있는 유중가스의 성분, 함유량을 분석함으로써 절연이상 및 열화의 정도를 판단할 수 있다. 가스분석에 의한 방법은 대형 유입변압기에서 정기적으로 소량의 절연유를 채취하여 가스 크로마토그래피(gas chromatography)를 이용해 발생가스성분을 분석하였으나 이를 상시 감시할 수 있도록 온라인 진단기술이 개발되었다. 이 기술은 가스 투과막과 가스 센서를 사용하여 수소(H_2), 일산화탄소(CO), 아세틸렌(C_2H_2), 에틸렌(C_2H_4)과 같은 특정 가스 성분을 측정하는 것과 가스 크로마토그래피를 구비하여 모든 가스 성분을 측정하는 방법이다[49]~[51].

유중가스 분석법은 상용화되어 사용된 기간이 길고 절연진단을 위한 자료가 충분히 확립되어 있기 때문에 절연상태를 판단하기 편리하다. 하지만 운전 중 실시간 측정이 불가능하며 가스분석을 위한 시간 및 비용이 많이 소요된다. 또한 부분방전의 발생을 실시간으로 측정할 수 없기 때문에 다른 진단법과 같이 병행해야하는 단점이 있다.

2.2.2 부분방전 측정법

부분방전은 절연물에 전압이 인가될 때에 보이드, 이물질 등에서 전계가 집중되어 발생하는 미소 국부방전을 말한다. 초기의 부분방전은 절연성능에는 영향을 미치지 않지만 지속적으로 방치될 경우 절연파괴로 이어지므로 초기에 부분 방전을 측정하면 절연상태를 진단할 수 있다. 부분방전이 발생하게 되면 방전에 따른 전하의 이동으로 인해 전류형태의 펄스가 발생함과 동시에 전자파나 초음파 영역의 음향신호가 발생하기 때문에 부분방전 측정법으로써 펄스 상태의 전류를 검출하는 '전기적 측정법', UHF대역의 전자파를 안테나에 의해 검출하는 '전자파 측정법', 음향신호를 검출하는 '음향신호 측정법'이 사용되고 있다.

(1) 전기적 측정법

전기적 측정법은 변압기 내부에서 절연열화, 접촉 불량 등으로 인한 부분방전이 발생하면 전하의 이동에 의한 펄스성 전류가 나타난다. 변압기의 중성점이 직접 접지되어 있는 경우, 접지선을 통해 펄스성 전류가 흐르고 이를 측정하면 부분방전의 크기를 검출할 수 있다[52]~[54].

부분방전에 의한 펄스성 전류는 그림 2.6에 나타낸 것과 같이 커플링 캐패시터와 검출 임피던스 또는 접지선에 취부한 관통형 고주파 변류기 등을 이용하여 검출한다[19]. 커플링 캐패시터와 검출 임피던스를 이용한 방법은 감도가 좋지만 설치 현장에서 발생하는 전자계 노이즈의 영향을 받기 쉽고, 결함의 위치를 파악하기 힘들다는 단점이 있다[55],[56]. 특히 초고압의 경우 운전 중 결합회로망의 설치가 불가능하고 장시간 설치하여 사용할 경우 커플링 캐패시터 자체의 절연이 저하될 수도 있기 때문에 현장에서 적용하기가 매우 힘든 실정이다. 또한 고주파 변류기를 이용한 방법은 변압기가 설치된 현장에서 접지선으로 흐르는 고주파 잡음에 의한

영향으로 부분방전 펄스의 검출이 힘들기 때문에 전자파 측정이나 음향 측정 방법이 현장에서 적용되고 있다.

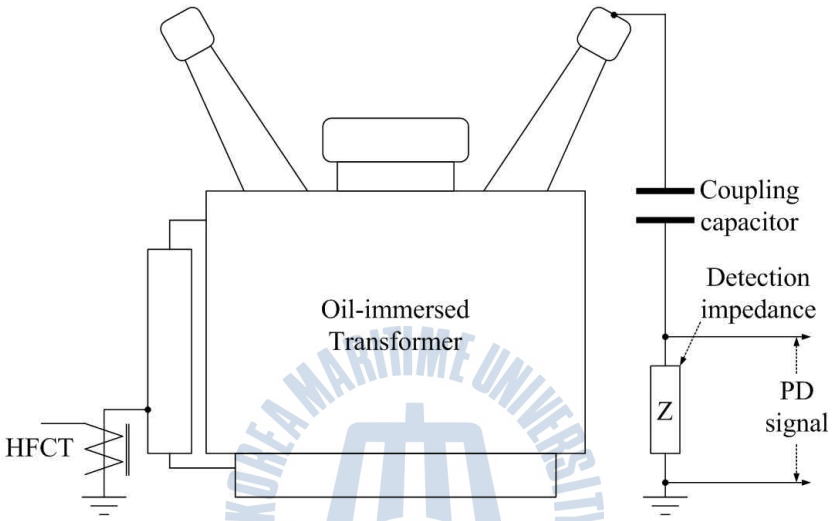


그림 2.6 부분방전의 전기적 검출법

Fig. 2.6 Electrical detection method of partial discharges

(2) 전자파 측정법

부분방전은 수 ns정도의 매우 짧은 상승시간을 가지며, 수 백 kHz~수 GHz이상의 주파수 성분이 존재한다. 이러한 부분방전 펄스에 의해 방사되는 전자파를 검출하면 부분방전의 발생여부를 알 수 있다.

전자파 검출법은 대부분 300 MHz~3 GHz의 주파수 범위의 UHF 대역의 전자파를 검출하는 것으로 높은 공진도와 민감도를 나타내지만, 외부 전자파 노이즈에 의한 영향을 받기 쉬우며 검출 안테나에 하나의 주파수 분석기만 사용이 가능하고 수 ns의 펄스를 측정하므로 측정계기의 수평

분해능이 높아야 하는 단점이 있다[57]~[59].

이러한 UHF 검출법은 가스절연개폐기(gas insulated switchgear, GIS)에 적용하기 위하여 주로 연구되어 왔으며 최근에는 유입변압기의 드레인 밸브(drain valve)에 삽입하는 구조로 변압기 내부에서 발생하는 부분방전을 검출하는 연구가 진행되고 있다[60],[61].

(3) 음향신호 측정법

부분방전에 따라 발생하는 음향신호는 유입 변압기에서는 절연유를 통해 변압기의 외함까지 전달되기 때문에 그림 2.7과 같이 AE(acoustic emission)센서를 변압기 외함에 부착하여 검출할 수가 있다[62]~[64].

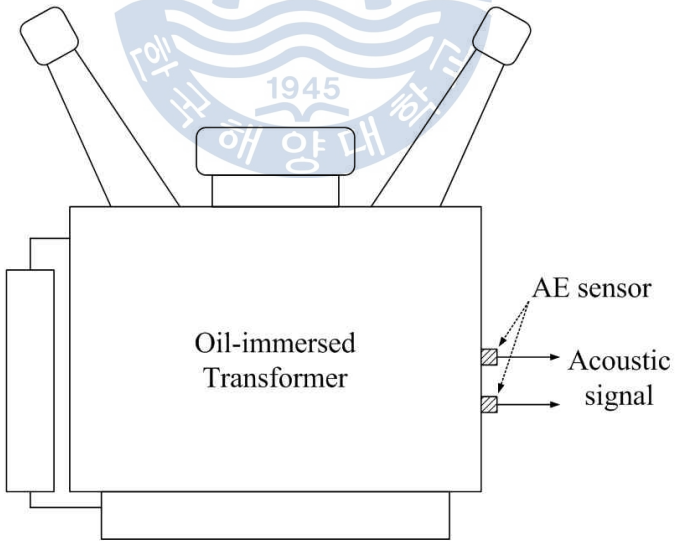


그림 2.7 부분방전의 음향신호 측정법

Fig. 2.7 Acoustic detection method of partial discharges

AE센서는 압전 소자가 이용되어 기계적 진동을 전기신호로 변환한다. 변압기의 내부 구조나 전달 경로에 의한 음향신호의 감쇄가 있기 때문에 음향신호의 검출방법으로는 부분방전의 정량적인 측정은 어려우나 음향신호의 유중에서 전파되는 속도만큼 도달시간의 지연이 있기 때문에 전기적인 측정법과 병용하면 부분방전이 발생되는 부분까지의 거리가 계산될 수 있다는 특징이 있으며 더욱이 복수의 AE센서를 이용함으로써 방전 부분의 위치의 추정이 가능하다[65].

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

제 3 장 부분방전의 발생과 검출

3.1 부분방전의 발생

절연물의 열화정도를 진단하기 위해서는 정확한 부분방전 펄스의 측정이 필요하며, 측정된 방전펄스가 절연물 내부에서 발생한 것인지 외부에서 전도된 것인지를 구분하여야 한다. 부분방전은 전력설비의 금구류 및 연결부위에서의 코로나방전(corona discharge), 절연물 표면을 통해 방전이 발생하는 연면방전(surface discharge), 절연물 내부의 내부방전(internal discharge)으로 구분할 수 있다[35]. 코로나방전은 그림 3.1과 같이 불평등 전계가 형성될 수 있는 부분에 전계가 집중될 때 주변의 절연파괴가 부분적으로 파괴되어 표면 부근에서 빛이나 소리를 수반하는 현상으로 갭의 도중까지 신장하는 스트리머 코로나(streamer corona), 전극표면근방에서만 빛이 나는 글로우 코로나(glow corona) 등 여러 가지 종류가 있다.

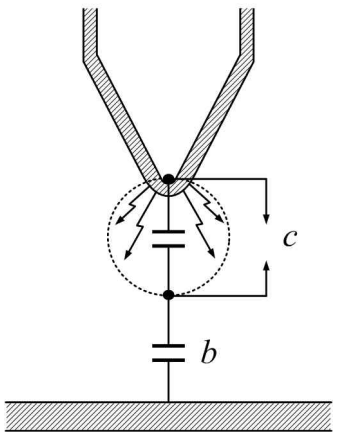
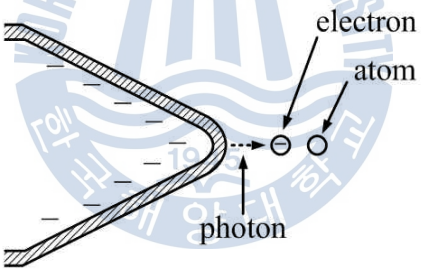


그림 3.1 코로나 방전

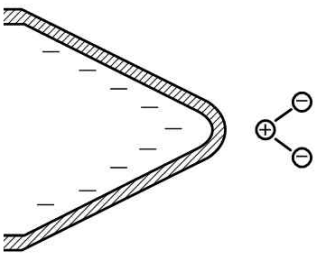
Fig. 3.1 Corona discharges

불평등 전계에서도 전극간 거리가 특히 클 때(대기압 공기에서 수 10 cm이상)에는 리이더(leader)라 하는 도전성이 높은 방전로가 진전하게 된다.

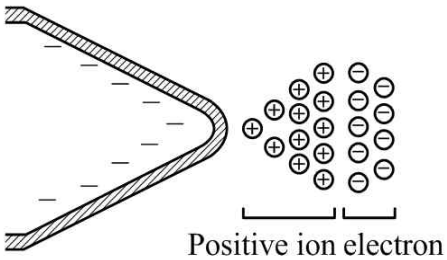
공기 중의 방전은 공기 중에 있는 자유전자가 전계에 의해 가속되면서 시작된다. 전계에 의해 충분한 에너지를 얻은 전자들이 원자들과 충돌해서 이온(ion)을 생성시킨다. 이러한 과정은 그림 3.2에 나타낸 것과 같으며, 양이온들에 의해 전극에서 전자들을 공급해 방전이 지속적으로 이루어질 때까지 전자들의 수는 계속 증가한다. 이 때의 초기전자는 광전리에 의해서 생성된다[66]~[68].



(a) 개시



(b) 전자쌍 형성



(c) 전자사태

그림 3.2 전자사태 과정

Fig. 3.2 Process of an electron avalanche

전계에 의해 전자들이 기체를 통과할 때 기본적인 이온화 과정은 식 (3.1)과 같이 나타낸다.

$$A + e \rightarrow A^{+} + e + e \tag{3.1}$$

여기서, A는 원자, A^{+}는 양이온, e는 전자이다.

식 (3.1)에서와 같이 중성원자에 어떤 전자가 충돌하면 양이온과 전자가 생기고, 이 때 전자들은 각각 두 개 이상의 전자들을 생성시킨다. 이러한 과정이 연쇄적으로 일어나 전자들의 양이 급속하게 증가하는 것을 전자사태(electron avalanche)라 하며, 이 때의 방전전류는 식 (3.2)와 같다.

$$I = I_0 e^{\alpha d} \tag{3.2}$$

여기서 d는 갭(gap) 간격, α는 Townsend의 1차 이온화 계수이다.

식 (3.2)에서 Townsend의 1차 이온화 계수 α는 일정한 전계에서 하나의 전자가 1 cm의 거리를 이동할 때 생성된 전자의 수를 나타내는 계수(coefficient)이다. 이상의 과정을 거치면서 전자들의 양이 급속히 증가하는 이온화 과정을 1차 과정(primary process)이라 하고, 양이온과 광자들이 전극을 강타해 전자들이 방출되는 과정은 2차 과정(secondary process)이라고 한다. 1차 및 2차 과정을 거쳐 방출된 전자들은 전극의 극성에 따라 전극에 흡수되거나 중성원자에 부착하여 음이온을 형성한다. 이후 이온들이 모두 소멸할 때까지 전계의 세기는 이온의 영향으로 변한다. 국부적으로 전계가 다시 집중되면 위에서 설명한 일련의 과정이 반복된다. 이와 같이 전계가 집중된 부분에서만 절연파괴가 일어나고 다른 부분에서는 절연이 파괴되지 않은 상태로 남게 되는 현상을 국부방전 또는 코로나(corona)라고 한다. 전계의 집중은 전선의 표면상태에 따라 결정되는데 물방울(水滴, water drops)이나 곤충, 먼지 등이 부착된 부분에서 보다 집중되며, 전선의 경년 정도에 따라서도 집중의 정도가 크게 차이 난다. 전계가 집중되는 부분에서의 코로나 발생은 식 (3.3)의 임계전계치 E_o 이상이 되면 본격적으로 시작한다.

$$E_o = 30\ \delta M \tag{3.3}$$

여기서, E_o : 코로나 방전개시 전계강도, [kV_{peak}/cm]

$\delta = 2.94\ P\ /\ (273+\theta)$: 상대공기밀도

P : 기압, [kPa]

θ : 온도, [℃]

M : 도체표면상태계수 ($\fallingdotseq$ 0.5)

이러한 코로나방전은 전력기기 외부의 충전부나 측정 금구류 등에서 발생되는 것으로 절연물 내부에서 발생하는 부분방전 펄스와는 구분되어야 하는데 많은 경우 코로나방전과 부분방전의 구분이 쉽지 않기 때문에 부분방전 펄스로 오인하는 경우가 발생한다[69].

연면방전은 그림 3.3과 같이 부적절한 절연설계에 의한 누설거리의 부족이나 절연물의 표면오손에 기인한 유효 누설거리 감소로 인하여 발생한다. 이는 절연물의 표면에 열화를 발생시키기 때문에 초기에는 절연 성능의 저하에 많은 영향을 미치지 않을 수도 있다. 그러나 연면방전에 의해 발생하는 고주파 전압이 교류전압에 중첩되어 절연물에 과도한 전기적 스트레스를 가하게 되므로 절연물에 손상을 준다. 또한 장기간에 걸쳐 연면방전이 발생하면 열화과정을 거쳐 절연물 표면의 결함부위에 열화가 집중되고 침식이나 부식이 발생되므로 절연물의 전기적 특성이나 기계적 특성을 저하시킨다. 더욱 열화가 진행되면 연면방전으로 인한 발열과 오손이 촉진되고 탄화도전로가 형성되어 절연파괴로 진전되기도 한다[35].

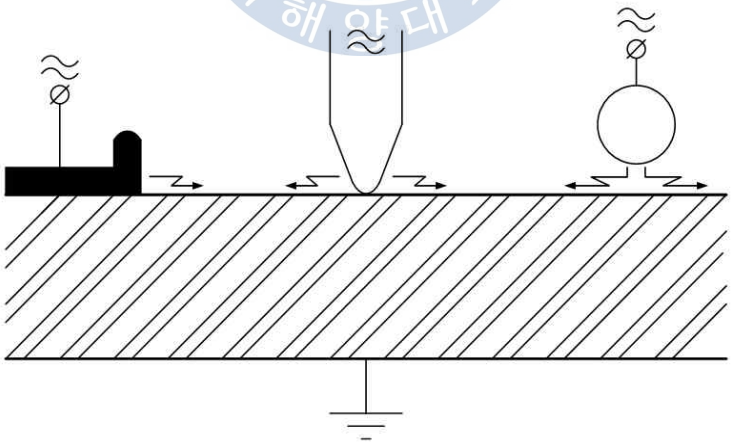


그림 3.3 연면방전

Fig. 3.3 Surface discharges

연면방전의 장기적인 발생으로 인한 절연파괴는 전원용량의 차이에 따라 다르지만, 일반적으로 글로우 방전의 형식으로 이루어지며 최종적으로는 아크방전으로 진전한다. 측정된 부분방전이 잡음, 코로나방전, 연면방전이 아닌 것으로 판명되면 절연물의 내부에서 발생한 부분방전이다. 절연물 내부에서 발생한 부분방전은 절연열화를 가속시키므로 부분방전 방전전하량, 발생빈도 등을 측정함으로써 열화의 종류와 열화원인을 알아낼 수 있으며, 절연물의 열화상태를 추정할 수 있다.

절연물에서의 내부방전은 보이드 방전 및 전기트리 방전으로 나누어 볼 수 있으며, 초기 보이드 방전이 진전되면 절연물 내부에 수지상의 전기트리가 발생하고 최종적으로 절연파괴에 이른다. 절연시스템의 설계 및 제작 시 절연물 내부에는 보이드가 존재하지 않아야 하며, 미세한 보이드까지 완전히 제거할 수 있다고 하더라도 이는 절연특성에 큰 영향을 미치지 못한다. 그러나 전기설비 및 전력기기의 설치위치 및 운전상태에 따라 전기적, 열적, 기계적, 환경적 스트레스로 인하여 열화가 진행되면 절연물 내부의 미세한 보이드의 크기가 커질 뿐만 아니라 다수의 보이드가 생성된다.

보이드의 발생은 절연물의 절연특성을 상당히 저하시키며, 결과적으로 기기의 수명을 저하시킨다. 그림 3.4와 같이 고체절연물 내부에 보이드가 존재하는 경우, 이곳에 고전압이 인가되면 보이드 내부의 유전율이 절연물의 유전율에 비하여 작으므로 전계가 집중되며, 기체의 절연내력은 고체에 비하여 상당히 낮으므로 보이드 내부에서 기체방전이 발생된다. 기체방전에 의하여 보이드는 열적, 화학적 열화가 촉진되고 그 크기가 점차 증가되며 이로 인하여 고체절연물의 유효 절연성능이 점차 감소하게 된다.

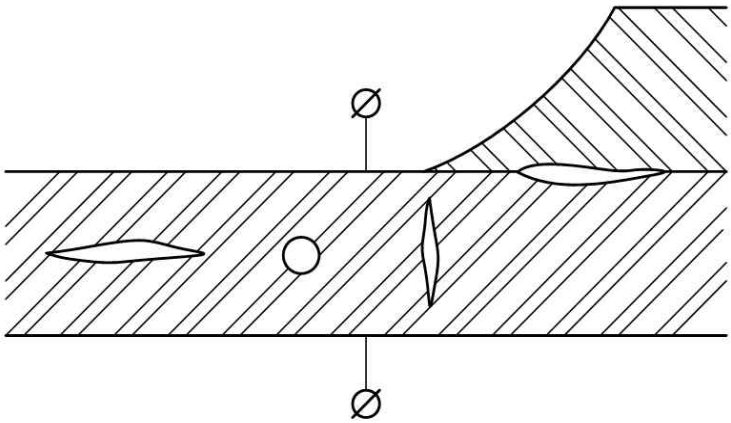
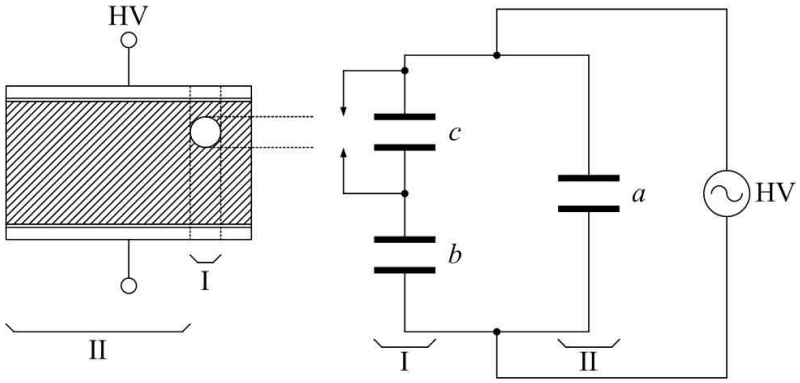
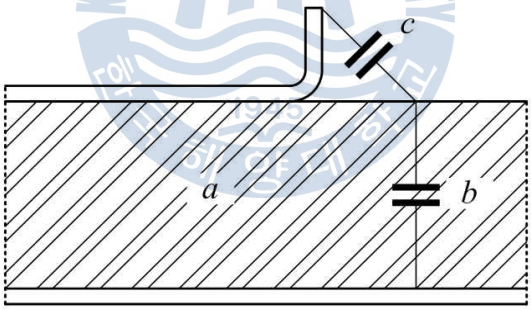


그림 3.4 내부방전
Fig. 3.4 Internal discharges

부분방전의 발생 메커니즘은 그림 3.5에 나타낸 등가회로를 사용하여 설명할 수 있다[21]. 그림 3.5(a)에서 영역 I은 절연물에 보이드 결함이 존재하는 부분이며, Ⅱ 영역은 절연물의 전체로 나타낼 수 있다. 결함부분에서 보이드의 정전용량은 c로 이것은 절연파괴 통로로서 작용하게 되며, b는 보이드와 직렬로 접속되는 나머지 부분의 정전용량이고, a는 정상적인 부분의 정전용량 값을 나타낸다. 그림 3.5(b)에는 연면방전의 예를 나타낸 것으로 그림 3.5(a)와 동일하게 표현되며, 표면에서 발생하는 방전은 전극의 정전용량 c와 절연물을 통한 정전용량 b, 그리고 절연물의 나머지 부분은 정전용량 a로 표현된다. 절연물에 보이드 또는 결함이 존재하는 경우 교류 운전전압이 인가되면 결함내의 정전용량 c에 전계가 집중적으로 가해지고 공기의 절연내력 이상으로 되면 보이드 내부에서는 불꽃방전의 형태로 부분방전 현상이 발생한다.



(a) 보이드 결함



(b) 연면 결함

그림 3.5 결함의 등가회로

Fig. 3.5 Equivalent circuit of defects

일반적으로 알려진 부분방전 펄스의 형태는 그림 3.6과 같이 인가전압이 상승하는 부분에서 일정 시점에 도달할 때 방전 펄스가 발생되며 전압이 감소하면 사라지는 형태를 가지게 된다. 운전전압이 서서히 증가하면

전압 U의 범위에서 보이드 내에서 방전이 발생하고, 다시 감소하는 시점에서 인가전압이 V이하로 되면 방전이 소멸한다. 이와 같이 방전이 발생하는 전압 U를 보이드 내 방전개시전압(discharge inception voltage, DIV)이라 하고, 방전이 소멸되는 시점의 전압 V를 방전소멸전압(discharge extinction voltage, DEV)이라고 한다[35].

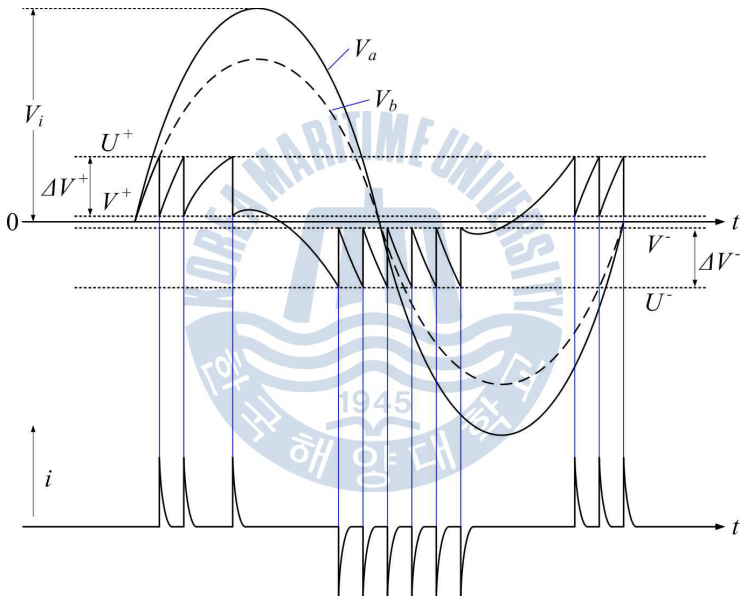


그림 3.6 교류전압에서 부분방전 발생 패턴
Fig. 3.6 Typical PD patterns in AC voltage

그림 3.6와 같은 방전 파형에서 보이드 내부에서 발생하는 방전전하량 q_l은 식 (3.4)와 같이 표현된다.

$$q_l \simeq (b+c)\Delta V \tag{3.4}$$

여기서, $\Delta V = U - V$로 보이드 내부에서 발생하는 전압강하분이다. 그러나 q_l은 직접 검출이 불가능한 값이므로 방전발생시 리드선을 통해 흐르는 겉보기 전하를 측정함으로써 방전의 크기를 정의한다. 겉보기 방전전하량 q는

$$q = b\Delta V \tag{3.5}$$

와 같이 표현할 수 있다.

실제 시료에서의 전압강하는 $(b\Delta V)/(a+b)$이고, 부분방전 검출장치에서는 q의 값이 측정된다. 방전전하량 q가 존재할 때, 이 때의 방전 에너지는

$$P = \frac{1}{2}c(U^2 - V^2) = \frac{1}{2}c \times \Delta V \times (U + V) \tag{3.6}$$

가 되는데, 여기서 V는 U에 비하여 약 10 % 정도로 작다면 식 (3.6)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2}c \times \Delta V \times U \tag{3.7}$$

그리고 방전개시전압은 $U = \frac{b}{(b+c)} V_i$와 같이 표현되는데 여기서, V_i는 시료에서 방전이 발생하는 외부 방전개시전압이다. 그러므로 식 (3.7)은 다시 식 (3.8)과 같이 정리할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} c \times \Delta V \times \frac{b}{(b+c)} V_i \tag{3.8}$$

식 (3.8)에서 b는 c에 비교하면 무시될 수 있는 값이므로

$$P = \frac{1}{2} b \Delta V V_i = \frac{1}{2} q V_i \tag{3.9}$$

로 나타낼 수 있다.

절연물에서 발생하는 부분방전은 내부의 공극 또는 절연물의 경계면 등에서 발생하며 결함의 종류와 위치에 따라 고유의 특성을 갖는다. 절연물 내부에 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.

3.2 부분방전의 검출

본 논문에서는 유입변압기 절연진단에 적용하기 위한 기술로 음향신호의 측정에 의한 부분방전의 검출방법에 대하여 기술하고자 한다. 온라인 상태에서 부분방전을 검출하는 기술로는 여러 가지 방법이 있으나 본 논문에서는 커플링 캐패시터와 검출 임피던스를 사용하여 부분방전 전하량을 직접 측정할 수 있는 전기적 측정법과 AE센서와 역결합회로를 이용한 음향신호 측정법에 대하여 기술하였다.

3.2.1 전기적 검출법

부분방전의 전기적 측정법은 절연상태를 평가하기 위하여 시료와 병렬로 커플링 캐패시터와 검출 임피던스를 접속하고 시료에서 발생하는 부분방전펄스를 검출하는 것으로 그림 3.7과 같이 간략화하여 나타낼 수 있다. 검출회로에서 고전압 발생원과 커플링 캐패시터(coupling capacitor) k는 부분방전이 발생하지 않아야 하며, 부분방전은 시료 a에서만 발생해야 한다. 검출 임피던스 Z양단에는 시료에서 발생하는 부분방전 펄스에 의해 전압신호로 변환되며 증폭기 A를 통해 관측된다. 검출 임피던스는 기기의 접지방식에 따라 시료에 직접 연결하는 방법과 커플링 캐패시터 k와 직렬로 접속하는 두 가지 방법을 고려할 수 있으며, 고전압 발생원의 임피던스가 충분히 크다면 전기적으로 같은 전압이 발생한다. 만일 시료 a의 용량이 크다면 충전전류는 임피던스 Z를 통하여 흐르지 않으므로 k에 접속하게 된다[35],[70].

실제 적용에서는 커플링 캐패시터와 직렬로 검출 임피던스를 접속하는 방법이 주로 사용되는데 이는 시료에서 큰 방전이 발생할 경우 검출회로에 과도전류가 흐르게 되어 회로를 소손, 파괴시킬 수 있기 때문이다. 따

라서 검출회로의 입력단에는 과도전류에 대한 보호대책으로 보호 소자를 접속해야 한다.

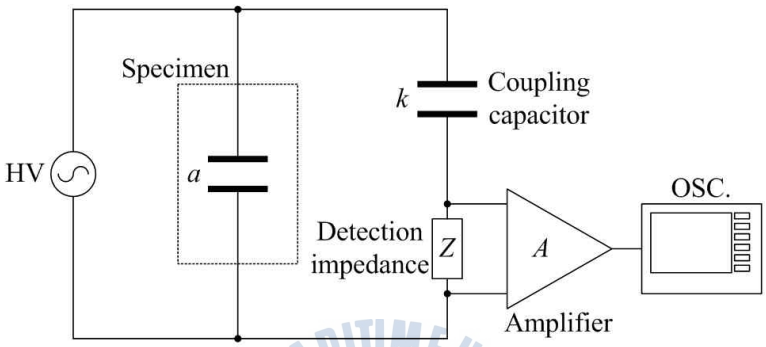


그림 3.7 부분방전 검출의 기본회로
Fig. 3.7 Basic circuit of PD detection

검출회로의 적용에 있어서는 그림 3.8과 같이 표류정전용량이 병렬 접속된 RC 적분회로와 RLC 동조회로의 두 가지 방법이 있다. 그림 3.8(a)와 같은 RC 회로에서 임펄스 전압은[25]

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{Rm}) \tag{3.10}$$

와 같이 발생하며, 여기서, q는 방전의 크기로 $q = b \cdot \Delta V$이다.
회로의 합성정전용량 m은

$$m = \frac{ak}{a + k} + C \tag{3.11}$$

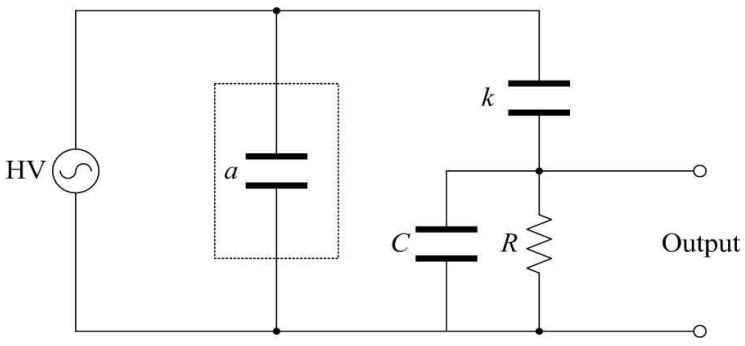
와 같다.

그림 3.8(b)의 RLC 회로에서 임펄스는 RC 회로와 같은 파고치로부터 감쇄 진동하게 되고 출력 전압은 다음과 같이 주어진다.

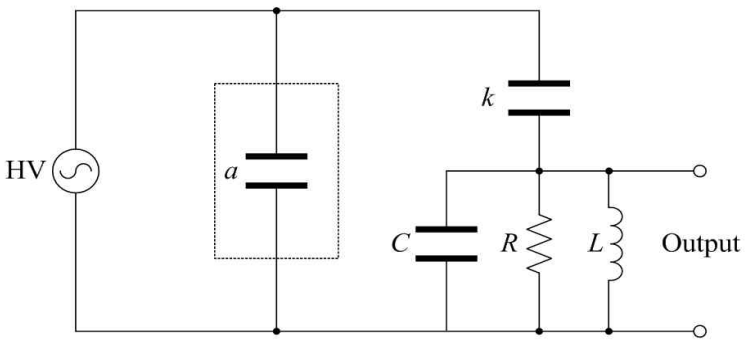
$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{2Rm}) \cos\omega t \qquad (3.12)$$

여기서, $\omega = \sqrt{\frac{1}{Lm} - \frac{1}{4R^2m^2}}$ 이고, m 은 회로의 합성 정전용량으로 식 (3.11)과 같은 값을 갖는다. 식 (3.10) 및 식 (3.12)에서와 같이 검출저항 양단의 임펄스 전압은 방전전하 q 와 결합콘덴서 k 에 비례하며, 이 출력 전압 측정을 통해 방전전하의 크기를 구할 수 있다.

부분방전 검출에 적용하기 위해서는 검출대상에 따라 부분방전 펄스의 주파수가 달라지기 때문에 그림 3.8의 구성을 그대로 적용하는 것이 아니라 RLC 정수를 적절히 조합하여 부분방전 검출에 필요한 주파수 대역을 선정하여야 한다.



(a) RC 회로



(b) *RLC* 회로

그림 3.8 부분방전 검출회로

Fig. 3.8 PD detection circuits

부분방전은 수 MHz 범위의 고주파 전류펄스 형태로 발생하기 때문에 커플링 캐패시터와 검출 임피던스로 구성되는 결합회로망이 필요하며, 여기에 사용되는 커플링 캐패시터 및 *RLC* 소자로 이루어진 검출 임피던스는 인가전압 범위에서 방전이 발생하지 않는 안정적인 소자를 사용해야 한다. 만일 인가전압 범위에서 내부방전이 발생하면 피시험물에서 발생하는 부분방전 펄스와 구분되지 않기 때문에 측정이 곤란하다.

3.2.2 음향신호 검출법

변압기 내부에서 부분방전이 발생하면 이것에 수반하여 수 십 kHz~수 백 kHz의 주파수 대역을 갖는 초음파영역의 음향신호가 발생한다고 알려져 있다[71],[72]. 이 음향신호는 변압기 내 매질을 통해 탄성진동파로

변압기 내부에 전파되고, 변압기 외부에 설치된 AE센서에 의해 검출된다. AE센서는 내부에 장착되어 있는 압전 진동자를 이용하여 기계적 진동을 전기적 신호로 변환시키며, 이를 증폭시켜 변압기 부분방전 발생여부를 확인할 수 있다.

음향신호를 이용한 부분방전 측정방법은 센서를 변압기 외함에 마그네틱 홀더를 이용하여 설치하기 때문에 측정이 간편하고 변압기의 외함에 설치하므로 절연에 대한 문제가 없다. 부분방전에 의해 발생하는 음향신호를 측정하기 위해서는 측정센서의 동작원리와 검출회로에 대한 정확한 이해가 필요하며 부분방전에 의해 발생하는 음향신호의 분석을 통하여 최적의 센서를 선택하여야 한다[73].

음향신호의 측정회로는 그림 3.9와 같이 AE센서, 역결합회로(decoupler), 증폭회로 및 필터로 구성된다. 센서에 의해 검출된 부분방전 음향신호는 매우 미소하기 때문에 증폭회로 및 필터를 사용하여 미소한 신호를 증폭하여 센서의 감도를 개선하여 원하는 신호만을 검출한다.

특히 음향신호 검출법은 다수의 센서를 설치하여 음향신호의 도달시간차를 측정함으로써 부분방전의 발생위치, 즉 변압기 내부 결함의 위치를 추정할 수 있기 때문에 유지보수가 용이하며 유지보수에 소비되는 비용 및 시간을 최소화 할 수 있다. 또한 결함이 발생하는 부분은 설계단계에 반영하여 절연을 강화할 수 있는 장점이 있다. 그러나 음향검출법은 전기적인 측정방법과 비교하여 감도가 낮고, 센서 뿐만 아니라 검출에 필요한 회로를 수입에 의존하고 있는 실정이다. 본 절에서는 AE센서의 동작원리와 센서로부터 검출된 부분방전 음향신호를 측정하기 위한 센서, 역결합회로 및 증폭회로에 대하여 서술하였다.

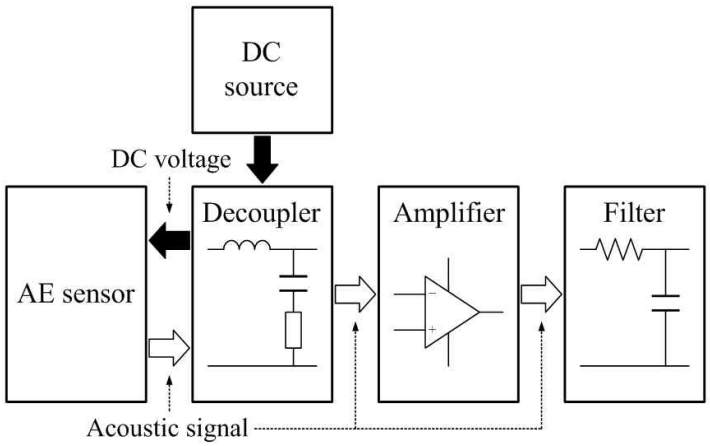


그림 3.9 음향신호 측정회로의 구성

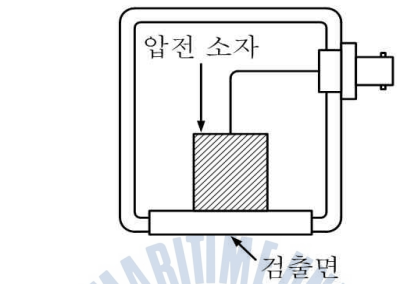
Fig. 3.9 Configuration of acoustic signal measurement circuit

(1) AE(Acoustic Emission)센서

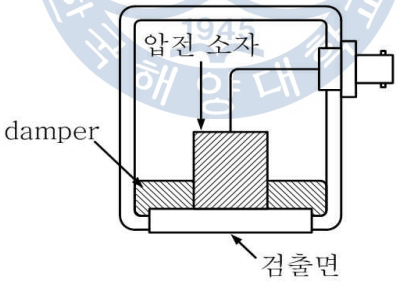
AE센서는 음향신호를 전기적 신호로 변환하여 검출하기 위한 변환기로 측정범위는 20 kHz 전후에서 수 MHz 이상에 이른다. AE센서는 그 목적이나 용도에 따라 여러 가지 형태가 있지만, 일반적으로는 페로브스카이트(perovskite)형으로 불리는 강유전체를 이용한 압전소자를 사용하며 압전효과를 가진다.

압전효과는 정(正)압전효과와 역(逆)압전효과로 나뉘며, 정압전효과란 압전 소자에 양면에 압축력(압력)을 가하면 위쪽의 전극에는 양의 전하(+), 아래쪽의 전극에는 음의 전하(-)가 대전되고, 신장력을 가하면 그 반대의 전하가 대전되어 전압이 발생하는 현상을 말한다. 또한 역압전효과는 정압전효과와 반대로 압전 소자 양면에 직류전압을 가하면 압전 소자의 내부 전하와 인가 전하사이에서 인력과 척력이 작용하기 때문에 소자의 수축과 신장이 발생한다.

일반적으로 AE센서는 협대역 AE센서와 광대역 AE센서로 나눌 수 있으며 협대역 AE센서는 그림 3.10(a)와 같이 센서의 검출면 내부에 압전 소자를 붙여 전달된 음향신호를 검출한다.



(a) 협대역 AE센서



(b) 광대역 AE센서

그림 3.10 AE센서의 구조

Fig. 3.10 Structure of AE sensor

광대역 AE센서는 그림 3.10(b)와 같이 완충재(damper)를 사용하여 압전 소자의 주위를 감싸는 구조이며 공진을 억제시켜 넓은 주파수 대역을

측정한다. 완충재는 압전 소자 내부를 통해 전달되는 음향신호를 압전 소자와 완충재의 경계에서 반사시키지 않고 완충재로 투과시켜야 하며 압전 소자의 음향임피던스와 최대한 비슷한 특성이 요구된다.

(2) 음파의 전파특성

음파가 매질이 다른 두 물질의 경계면에 전파되고 있을 때 그 경계면에서 일부는 투과하고 일부는 반사되는 특성을 가진다. 음파가 매질의 경계면에 수직 입사한 경우 입사되는 음의 크기를 음압이라고 하며, 투과와 반사의 비율은 경계면에 접하는 두 매질의 음향임피던스에 따라 정해진다. 음향임피던스는 매질의 밀도와 음속을 곱한 것으로 식 (3.13)과 같이 나타낼 수 있다[74],[75].

$$Z = \frac{P}{v} = \rho \bullet c \tag{3.13}$$

여기서 P는 음압, v는 입자 속도, ρ는 매질의 밀도, c는 음속이다.

표 3.1에 여러 가지 매질에 대한 음향특성을 나타내었다. 두 매질에 대한 음향임피던스의 차이에 의해 결정되는 투과와 반사의 정도를 표시하는 것이 투과율 T_1 과 반사율 R_1 이며 그 식은 다음과 같다.

$$\text{반사율 } R_1 = \frac{\text{반사파의 강도}}{\text{입사파의 강도}} = (\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1})^2 \tag{3.14}$$

$$\text{투과율 } T_1 = \frac{\text{투과파의 강도}}{\text{입사파의 강도}} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \tag{3.15}$$

여기서 Z_1, Z_2는 입사와 투과측 물질에 대한 각각의 고유 음향임피던스이며, 이들의 차이가 클수록 반사율이 커지기 때문에 입사파의 일부분만 경계면을 통과하여 전달되며, 만약 같은 매질일 경우 음향임피던스는 $Z_1 = Z_2$ 이므로 반사없이 투과하게 된다.

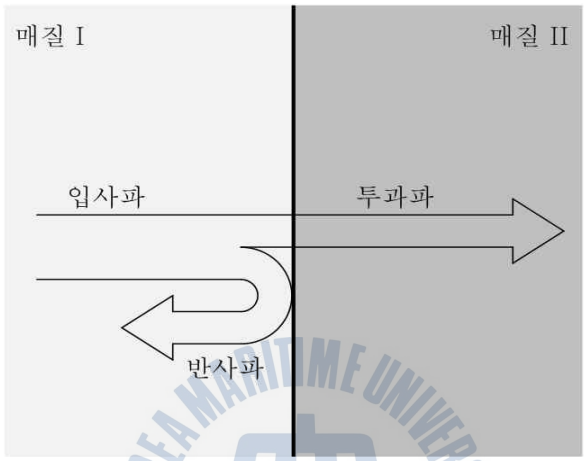
표 3.1 매질의 음향특성
Table 3.1 Acoustic characteristics of materials

매 질	음향임피던스 (kg/m^3)	속도 (m/s)	밀도 (kg/m^3)
공기	0.00004	343	0.001
물	0.15	1490	1.00
알루미늄	1.70	6300	2.70
동	4.20	4700	8.90
절연유	0.12	1490	0.86
프레스보드	0.18	2000	0.9~1.3

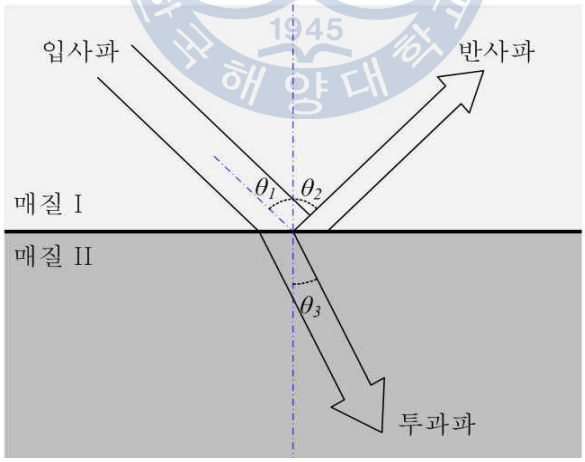
그림 3.11에는 매질이 다른 두 경계면을 중심으로 음파의 반사와 투과, 굴절과의 관계를 나타내었다. 음파가 경계면으로 비스듬히 입사될 때, 경계면의 수직과 입사파가 이루는 각을 입사각(θ_1), 경계면을 통과하지 못한 반사파가 이루는 각을 반사각(θ_2), 경계면을 통과한 굴절파와 이루는 각을 굴절각(θ_3)이라 하며, 스넬의 법칙(snell's law)을 적용하면 입사각(θ_1)과 굴절각(θ_3)과의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다[72].

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_3} = \frac{v_1}{v_3} = \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \tag{3.16}$$

여기서, θ_1 은 입사각, θ_3 는 굴절각이며 v_1, λ_1 와 v_2, λ_2 는 매질 I과 매질 II에서 음파의 속도 및 파장이다.



(a) 음파의 반사와 투과



(b) 음파의 굴절

그림 3.11 음파의 입사, 반사 및 굴절

Fig. 3.11 Incidence, reflection and refraction of acoustic wave

일반적으로 밀도가 큰 매질에서 음파의 속도가 빠르며 기체보다는 액체에서, 액체보다는 고체에서 전파속도가 빠르다. 또한 밀도가 낮은 매질에서 높은 매질로 음파가 진행할 때 반사율이 크다. 대표적인 매질들 간의 반사율을 표 3.2에 나타내었다.

표 3.2 여러 가지 매질들 간의 음향 반사율

Table 3.2 Coefficient of acoustic reflection between various mediums

매 질	알루미늄 (%)	철 (%)	절연유 (%)	물 (%)	공기 (%)
알루미늄	0	20	74	72	100
철	20	0	89	88	100
절연유	74	89	0	0.3	100
물	72	88	0.3	0	100
공기	100	100	100	100	0

3.3 검출회로

현재 국내에서 수행되고 있는 부분방전 검출 및 절연진단에 대한 연구는 활발하게 연구되고 있다. 하지만 이를 위한 핵심기술인 검출방법과 회로에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 부분방전을 검출기술과 회로에 대한 연구를 수행하였으며 부분방전 음향신호를 측정하기 위한 역결합회로 및 증폭회로를 설계·제작하였다. 또한 부분방전 전하량과 음향신호의 관계를 분석하기 위하여 검출 임피던스, 결합회로망 그리고 증폭회로로 구성되는 전기적 검출회로를 제작하였다.

3.3.1 음향신호 검출회로

유중에서 발생하는 부분방전에 의한 음향검출 및 주파수 성분의 분석을 위하여 그림 3.12에 나타낸 것과 같이 측정 주파수 대역 100 kHz～1 MHz인 광대역 AE센서(AE-900S-WB)와 주파수 대역 50 kHz～250 kHz, 공진 주파수 140 kHz인 협대역 AE센서(AE-901)를 사용하였다.

(a) 광대역 AE센서

(b) 협대역 AE센서

그림 3.12 광대역 및 협대역 AE센서

Fig. 3.12 Wideband and narrowband AE sensor

AE센서는 마그네트 홀더와 세트로 구성되어 변압기 외함에 취부가 용이하지만 전원선과 신호선을 공통으로 사용하므로 전압원과 음향신호를 분리하기 위한 필터특성의 역결합회로가 필요하다[76].

따라서 그림 3.13과 같이 음향신호만을 검출하기 위하여 *RLC* 소자로 구성된 역결합회로를 설계·제작하였다. 직류전원의 고주파 성분은 L1-C2에 의해 차단되고, 직류전원만 안전하게 센서에 공급되어진다. 또한 AE센서에서 검출된 음향신호는 R1-C3에 의해 전원측으로는 차단되며, 오직 콘덴서 C4를 통해 음향신호만을 검출할 수 있도록 설계하였다.

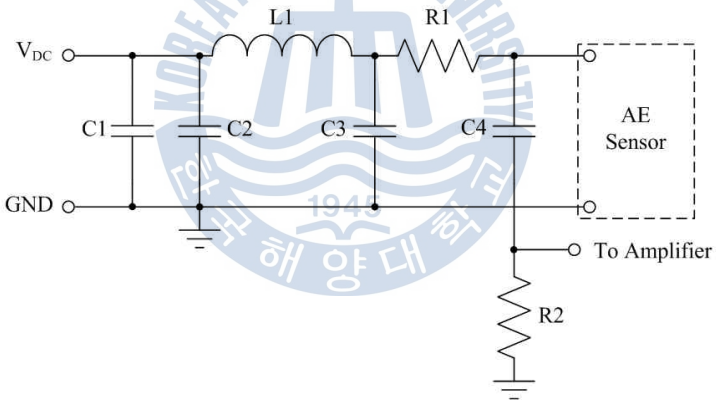


그림 3.13 역결합회로
Fig. 3.13 Circuit of the decoupler

역결합회로의 주파수 응답은 그림 3.14와 같으며, AE센서에서 전원측으로 10 kHz이상의 음향신호는 200 dB이상 감쇄시키며, 증폭회로의 입력단 즉, R2로는 감쇄없이 전달한다.

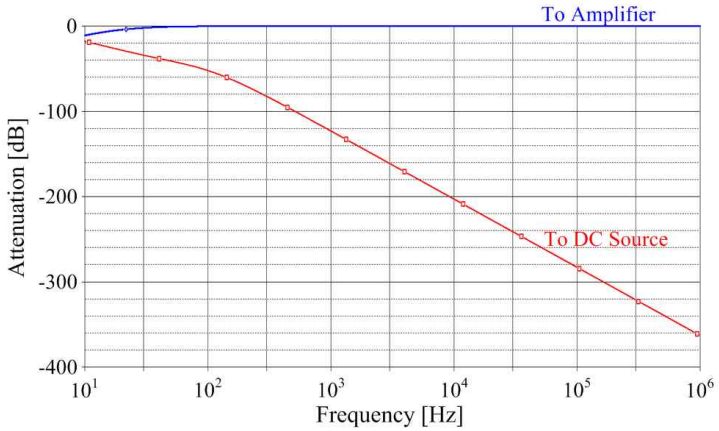
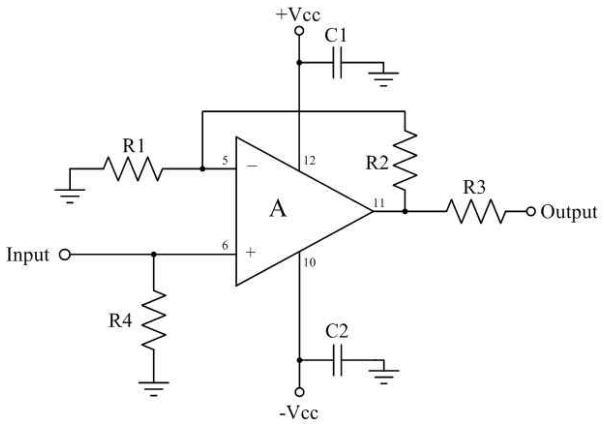


그림 3.14 역결합회로의 주파수 응답

Fig. 3.14 Frequency response of the decoupler

AE센서로부터 검출된 음향신호는 매우 미소하기 때문에 측정감도를 개선하기 위하여 그림 3.15와 같이 음향신호 증폭회로를 설계하였다. 증폭회로에는 연산증폭기(DC～140 MHz, AD811)를 사용하였으며, 이득은 40 dB로 설계하였다.



(a) 회로도

(b) 사진

그림 3.15 시제작 음향신호 증폭회로

Fig. 3.15 Prototype acoustic signal amplifier

음향신호 검출회로의 주파수 응답은 함수발생기로 1 kHz에서 10 MHz까지 정현파 입력전압에 대한 출력전압의 비율로써 분석하였으며, 그림 3.16과 같이 -3 dB의 주파수대역은 11 kHz~5.5 MHz로 AE센서의 주파수 대역을 충분히 포함한다.

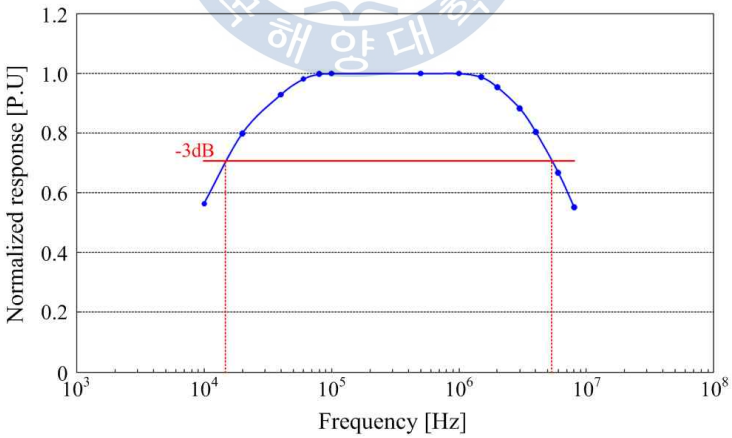


그림 3.16 음향신호 증폭회로의 주파수 응답

Fig. 3.16 Frequency response of the prototype acoustic signal amplifier

3.3.2 전기적 검출회로

본 절에서는 부분방전 전하량과 음향신호의 관계를 분석하기 위하여 교류전압 25 kV까지 방전이 발생하지 않는 커플링 캐패시터를 사용하였으며, 사양을 표 3.3에 나타내었다.

표 3.3 커플링 캐패시터의 사양
Table 3.3 Specifications of the coupling capacitor

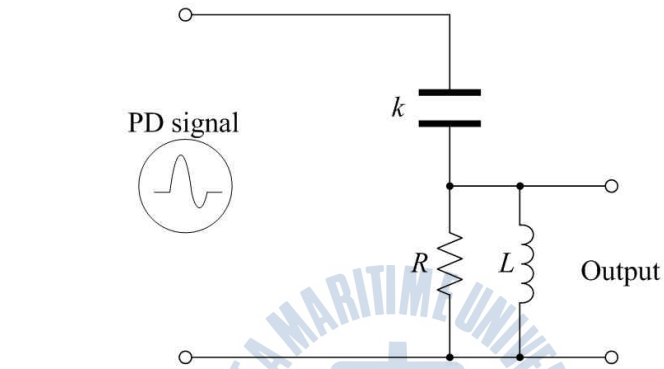
Model	CC25C/V
Rated voltage (kV)	25
Capacitance (pF)	1,000
max. height (mm)	300

본 논문에서 설계한 결합회로망은 부분방전 펄스의 특성을 고려하여 1 MHz 이상의 고주파 신호를 검출할 수 있도록 구성하였다. 이러한 주파수 대역을 선정할 때 커플링 캐패시터를 포함하는 결합회로망은 *RLC* 조합으로 그림 3.17(a)와 같다.

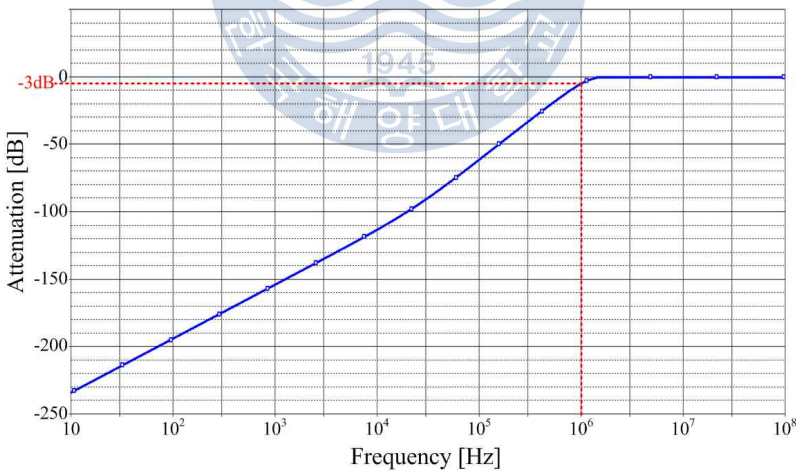
결합회로망에서 커플링 캐패시터는 피시험물에 따라 달라질 수 있으며, 커플링 캐패시터의 용량이 달라지면 검출 임피던스 역시 달라지므로 시료의 종류에 따라 결합회로망의 구성은 충분히 고려되어야 한다. 결합회로망은 인가전압인 60 Hz의 상용주파수 전압신호는 완전히 차단시키고, 고주파 펄스형태의 방전펄스만을 통과시키는 고역통과필터의 특성을 가져야 한다.

그림 3.17(a)와 같이 구성한 결합회로망은 -3 dB가 되는 차단주파수를

1 MHz로 선정하여 상용주파수 시험전압은 -200 dB 이하로 완전히 차단할 수 있으며, 피시험물에서 발생하는 부분방전 펄스를 충분히 검출할 수 있다.



(a) 구성

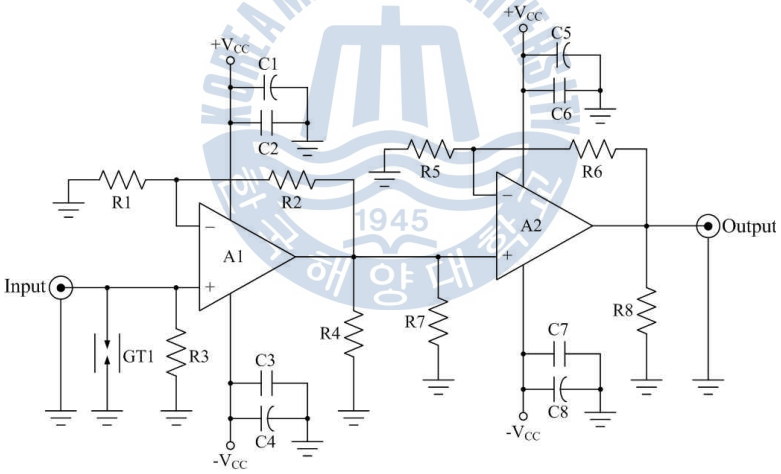


(b) 주파수 특성

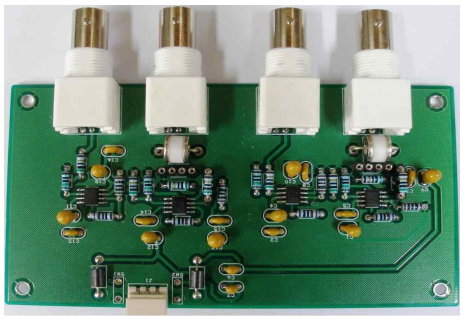
그림 3.17 결합회로망

Fig. 3.17 Coupling network

부분방전 펄스의 크기는 대단히 작기 때문에 출력단에 증폭회로를 접속해야만 부분방전 펄스를 검출할 수 있다. 증폭회로는 부분방전 펄스를 측정할 수 있는 충분한 주파수 대역, 낮은 잡음특성을 갖도록 설계되어야 하므로 그림 3.18과 같이 2단으로 구성되는 증폭회로를 설계하였으며 증폭회로에 사용한 TI사의 THS 3001 연산증폭기는 단위이득에서 주파수 대역이 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 제작하였다[77].



(a) 회로도



(b) 사진

그림 3.18 시제작 광대역 증폭회로

Fig. 3.18 Prototype wideband amplifier

신호발생기를 이용하여 정현파 입력에 대한 출력전압의 비로 시제작 증폭회로의 주파수 응답을 평가하였으며 이를 그림 3.19에 나타내었다. 증폭회로가 갖는 -3 dB의 주파수 대역은 20 kHz~45 MHz이므로 수 십 ns의 상승시간을 갖는 부분방전 펄스의 검출에 적합함을 확인하였다.

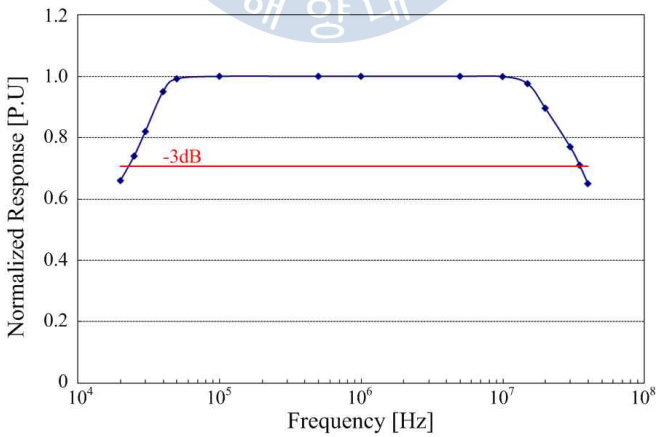


그림 3.19 광대역 증폭회로의 주파수 응답

Fig. 3.19 Frequency response of the prototype wideband amplifier

제 4 장 측정 및 분석

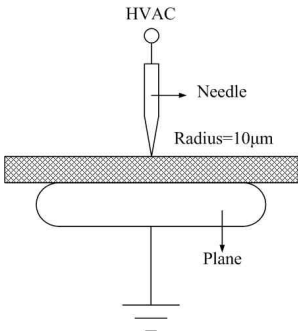
유중 부분방전 음향신호의 측정을 위하여 유입변압기 내부에서 발생할 수 있는 결함을 모의하기 위하여 침-평판, 평판-평판 및 파티클(particle) 전극계를 제작하였다.

절연유 내부에 전극계를 설치하여 결함에서 발생하는 부분방전을 모의하였으며 음향신호를 측정하고 결함의 종류에 따른 음향신호의 주파수 스펙트럼을 분석하였다. 또한 음향신호의 절연유 내부에서의 전파특성과 3차원 위치추정에 대하여 연구하였다.

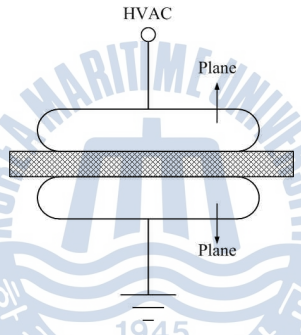
4.1 주파수 스펙트럼

유입변압기는 철심이나 코일과 같은 구조물이 운전 중 진동과 충격에 의해 기계적으로 파괴되어 부분방전이 발생된다. 또한 제조 시 결함이나 내부오손 등에 의해 먼지나 이물질이 절연물 표면에 부착되어 연면 절연저항의 저하를 발생시켜 2차적인 열화로 진전되는 경우가 많다. 부분방전은 절연물 및 결함의 종류에 따라 고유의 방전특성을 가지므로, 유입변압기 내부에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 그림 4.1과 같이 전극계를 제작하였다.

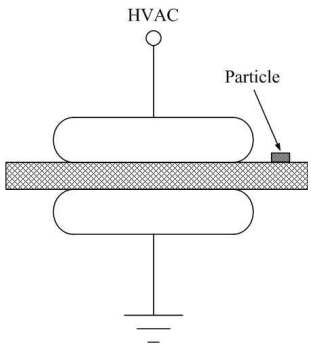
평판전극은 텅스텐과 구리의 합금으로 지름 60 mm, 두께 15 mm로 가장자리를 둥글게 처리하여 전계 집중이 발생하지 않도록 설계하였으며, 침의 곡률반경은 약 10 μm이다. 또한 전극사이에 유입변압기에서 사용하는 두께는 1.6 mm의 프레스보드를 삽입하였다.



(a) 침-평판



(b) 평판-평판



(c) 파티클(particle)

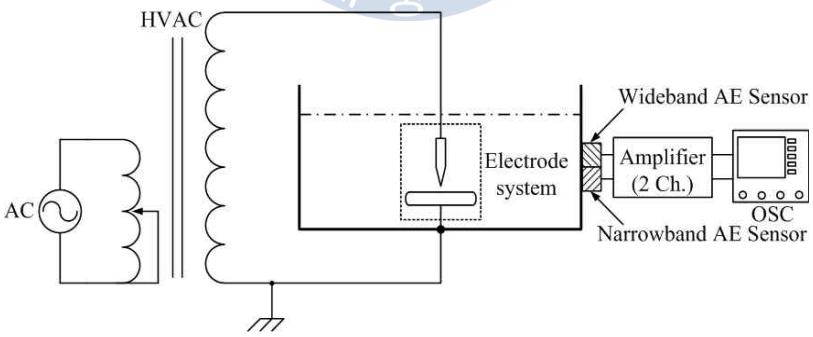
그림 4.1 전극계의 구성

Fig. 4.1 Configuration of electrode systems

유중 부분방전의 음향검출을 위한 실험계는 시험전압을 인가하기 위한 전원공급부, 유입 변압기를 모의하기 위한 금속제 외함(740 mm × 740 mm × 1000 mm), 전극계, 유중 부분방전에 의한 음향신호를 측정하기 위한 광대역 AE센서와 협대역 AE센서, 음향신호를 분리하기 위한 역결합회로, 측정된 미소 음향신호를 증폭하기 위한 증폭회로로 구성된다.

유중에서 발생하는 부분방전 음향신호의 검출과 결함에 따른 주파수 스펙트럼 분석을 위하여 그림 4.2와 같이 실험계를 구성하였다.

제작된 전극계를 유중에 위치시키고 인가전압을 가변시켜 유중 부분방전을 발생시켰다. 실험에 사용된 절연유는 유입변압기에서 사용되고 있는 천연광유 1종 2호의 절연유이며, 광대역 AE센서와 협대역 AE센서를 금속외함 외벽의 동일한 위치에 부착하여 부분방전이 발생할 때의 음향신호를 검출하였다.



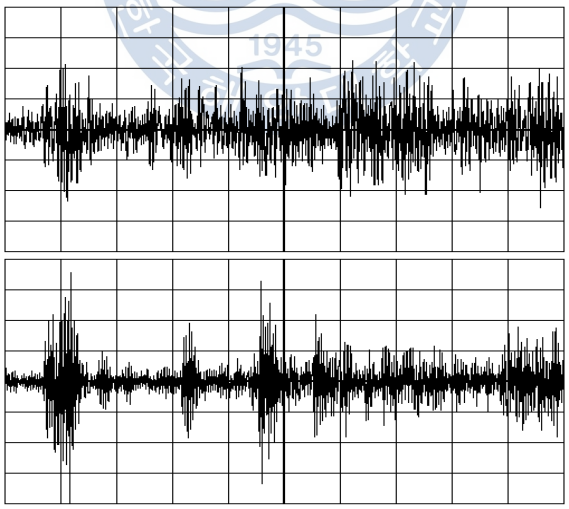
(a) 구성도

(b) 사진

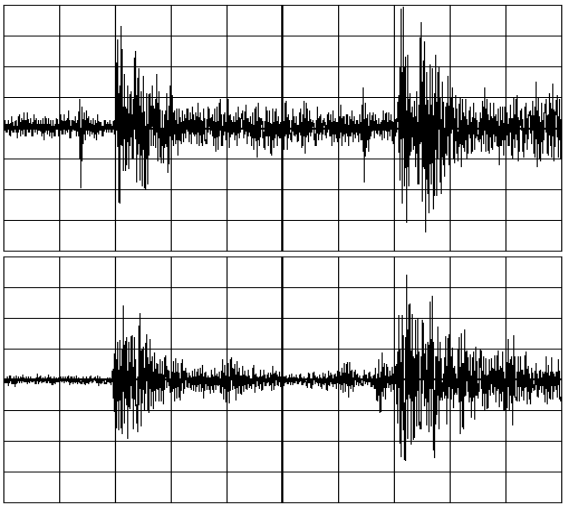
그림 4.2 음향검출 실험계의 구성

Fig. 4.2 Configuration of the acoustic detection system

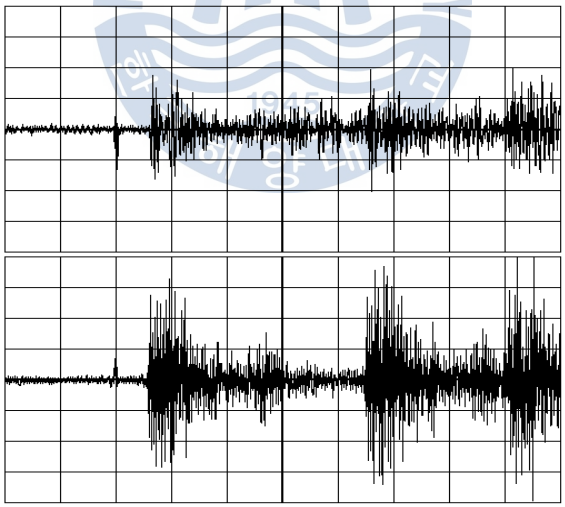
각각의 AE센서에서 측정된 부분방전 음향신호는 그림 4.3과 같으며, 측정된 음향신호의 주파수 스펙트럼 분석 결과를 그림 4.4에 나타내었다.



상 : 광대역 AE센서 [500 mV/div, 2 ms/div]
하 : 협대역 AE센서 [500 mV/div, 2 ms/div]
(a) 침-평판



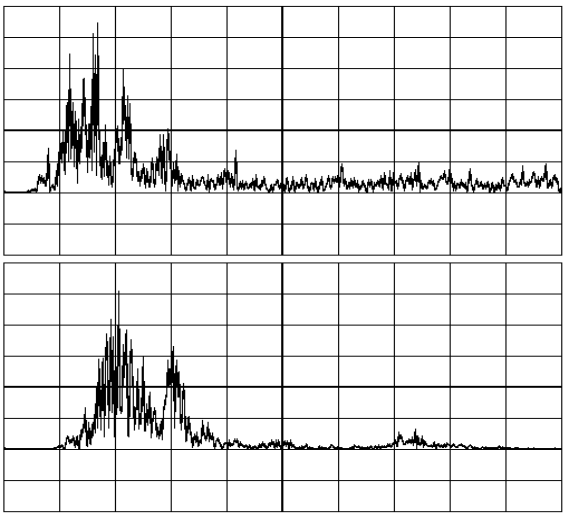
상 : 광대역 AE센서 [500 mV/div, 2 ms/div]
하 : 협대역 AE센서 [500 mV/div, 2 ms/div]
(b) 평판-평판



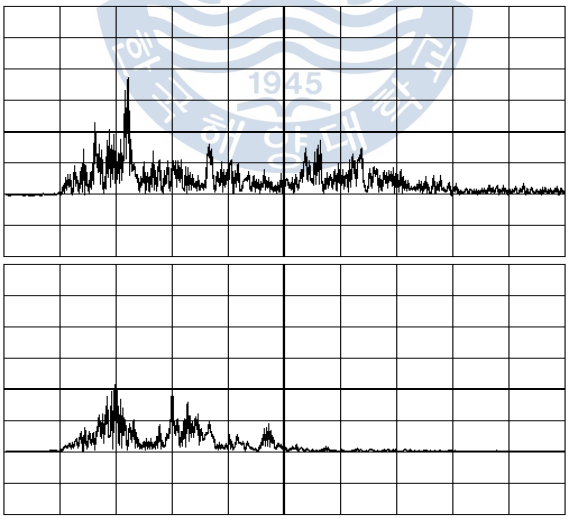
상 : 광대역 AE센서 [500 mV/div, 2 ms/div]
하 : 협대역 AE센서 [500 mV/div, 2 ms/div]
(c) 파티클(particle)

그림 4.3 음향신호파형의 예

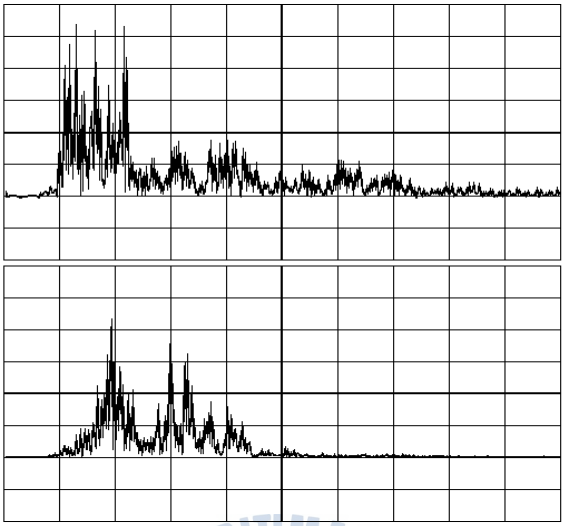
Fig. 4.3 Typical waveforms of acoustic signal



상 : 광대역 AE센서 [20 mV/div, 50 kHz/div]
하 : 협대역 AE센서 [20 mV/div, 50 kHz/div]
(a) 침-평판



상 : 광대역 AE센서 [20 mV/div, 50 kHz/div]
하 : 협대역 AE센서 [30 mV/div, 50 kHz/div]
(b) 평판-평판



상 : 광대역 AE센서 [10 mV/div, 50 kHz/div]
하 : 협대역 AE센서 [30 mV/div, 50 kHz/div]
(c) 파티클(particle)

그림 4.4 결함에 따른 주파수 스펙트럼
Fig. 4.4 Frequency spectrum depending on defects

유중에서 발생한 부분방전 음향신호의 주파수 스펙트럼 분석 결과, 침-평판 전극에서 발생한 음향신호의 주파수는 50 kHz～170 kHz, 평판-평판 전극에서 50 kHz～400 kHz, 그리고 파티클 전극에서도 50 kHz～400 kHz에 분포하였고, 평판-평판 전극과 파티클 전극에서 주파수 범위가 가장 넓게 나타났다. 광대역과 협대역 AE센서에 측정된 음향신호의 주파수 대역을 비교한 결과, 광대역 AE센서에서 측정된 음향신호의 주파수 범위가 협대역 AE센서로 측정한 주파수범위보다 다소 넓게 나타났지만 400 kHz이상에서는 음향신호의 주파수 성분이 나타나지 않았다. 따라서 전력용 유입변압기의 상시 절연진단에 음향검출기술 적용 시 400 kHz 이하의 주파수 대역에서 음향신호를 검출하면 외부 노이즈에 영향을 받지 않고 부분방전을 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 유중 음향신호의 전파특성

음향신호 검출법은 전자계 간섭에 의한 영향이 매우 작으며 변압기의 외함에 부착하므로 센서의 취부가 용이하고 고전압 도체에 직접 연결하지 않기 때문에 전기적으로 절연된 상태에서 실시간으로 측정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 음향신호만으로는 부분방전 전하량을 검출할 수 없기 때문에 이에 대한 정보를 얻기 위해서는 커플링 캐패시터 또는 고주파 변류기를 함께 사용해야 하는 단점이 있다.

음향신호는 전달하는 매질에 따라 감쇄하는 특성이 다르며 유중에서 음향신호가 전파하는 특성을 알면 부분방전 전하량을 추정할 수 있다. 따라서 음향신호의 측정만으로 부분방전 전하량을 추정하기 위하여 동일한 크기의 부분방전 발생 시 음향신호의 거리에 따른 전파특성에 대하여 연구하였다.

음향신호의 유중 전파특성을 분석하기 위하여 먼저 그림 4.5와 같이 실험계를 구성하고 표준펄스 발생기 CAL 1A(Power Diagnostix GmbH, 1 pC～100 pC)를 이용하여 교정실험을 수행하였다. 커플링 캐패시터와 검출 임피던스를 사용하여 결합회로망을 구성하고 절연유내에 제작된 침-평판 전극을 위치시켜 표준펄스 발생기를 사용하여 부분방전 펄스를 인가하였다.

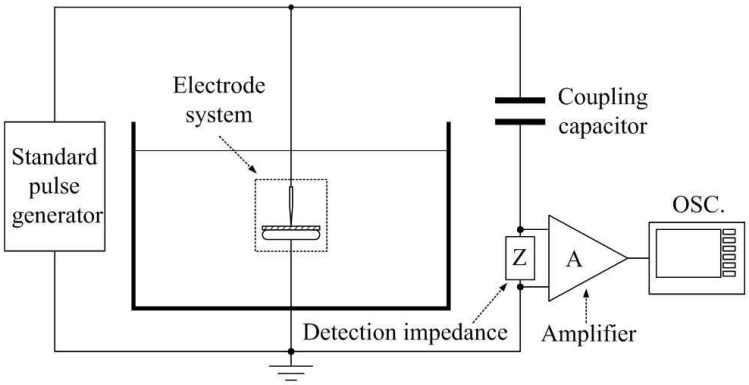
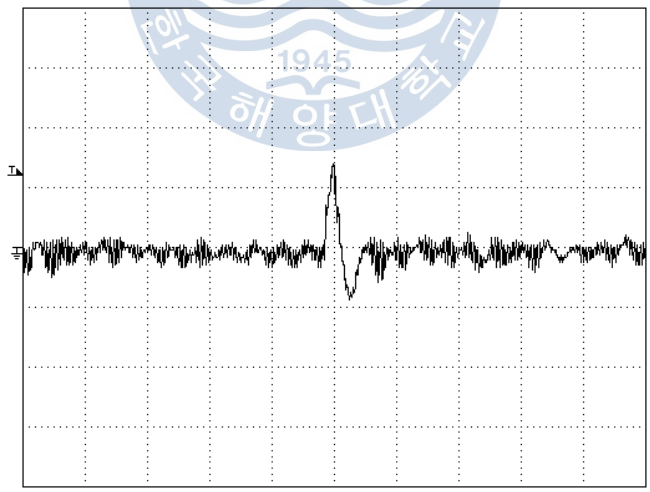


그림 4.5 교정실험계의 구성

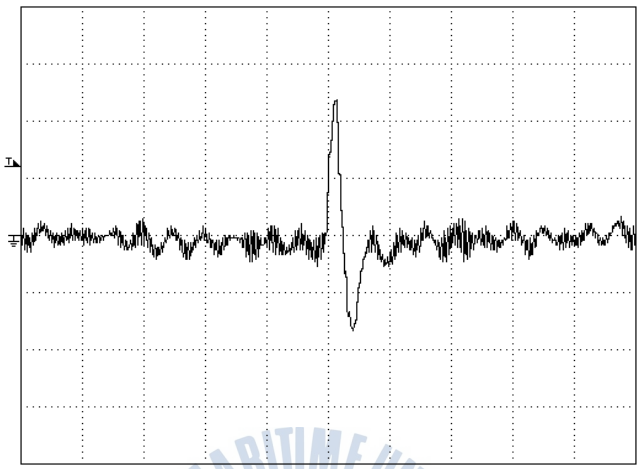
Fig. 4.5 Configuration of the calibration experiment system

증폭회로 출력단에서 인가 전하량에 따른 출력전압을 측정하였으며 그 결과를 그림 4.6에 나타내었다.



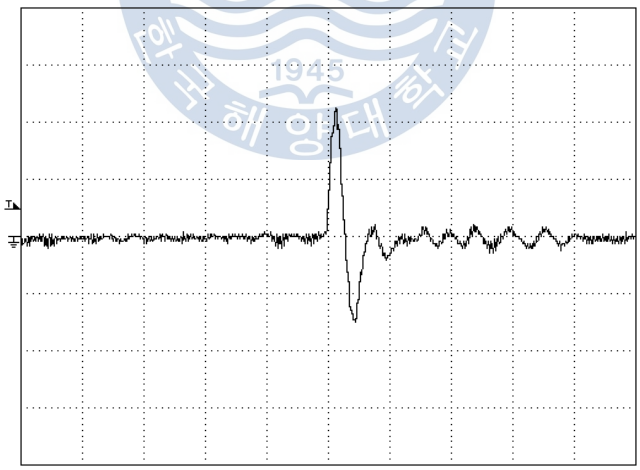
[200 mV/div, 200 ns/div]

(a) 10 pC



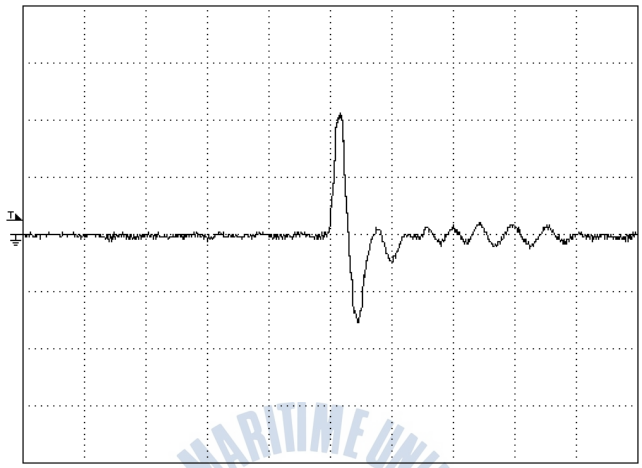
[200 mV/div, 200 ns/div]

(b) 20 pC



[500 mV/div, 200 ns/div]

(c) 50 pC



[1 V/div, 200 ns/div]

(d) 100 pC

그림 4.6 교정펄스파형의 예

Fig. 4.6 Typical calibration pulse waveform

실험계에 구성된 결합회로망과 증폭회로의 인가전하량에 따른 출력전압은 10 pC에서 295 mV, 20 pC에서 500 mV, 50 pC에서 1.11 V, 100 pC에서 2.14 V로 측정되었다. 본 실험계에서 사용된 부분방전 측정회로는 그림 4.7과 같이 10 pC～100 pC까지 선형적인 출력을 나타내었으며 측정감도는 23.65 mV/pC이었다.

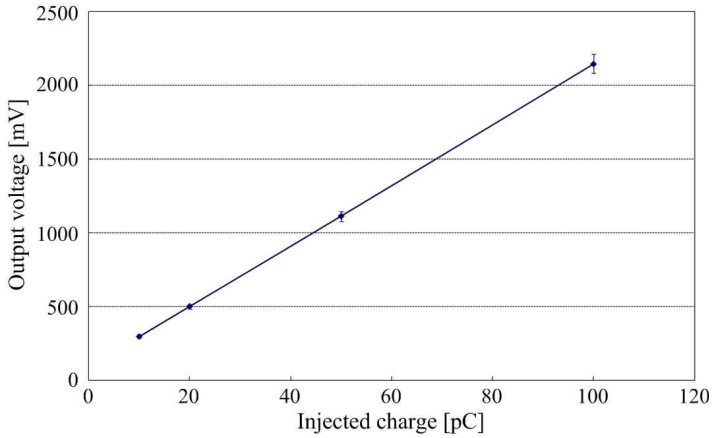


그림 4.7 인가 전하량에 따른 출력전압

Fig. 4.7 Output voltage as a function of injection charge

부분방전 음향신호의 거리에 따른 전파특성을 분석하기 위하여 그림 4.8과 같이 실험계를 구성하였다.

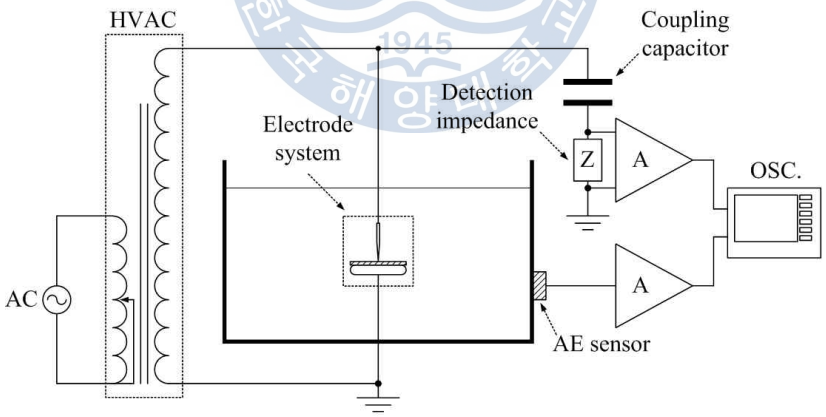


그림 4.8 실험계의 구성

Fig. 4.8 Configuration of the experiment system

그림 4.9에 나타낸 것과 같이 전극계과 센서와의 거리를 각각 170 mm, 300 mm, 400 mm, 600 mm, 700 mm, 800 mm로 변화시키면서 동일한 부분

방전 전하량이 발생하였을 때 방전펄스신호와 음향신호를 측정하였으며 검출파형의 예를 그림 4.10에 나타내었다.

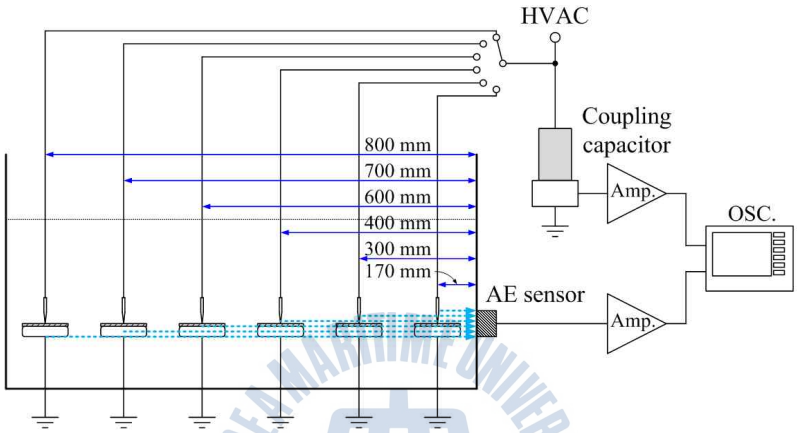
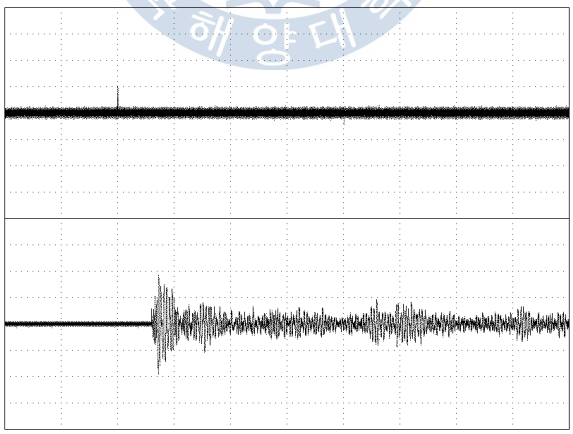


그림 4.9 거리에 따른 유중 음향신호의 측정

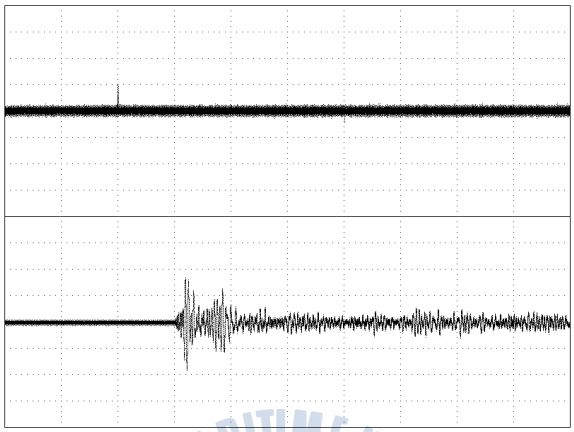
Fig. 4.9 Measurement of acoustic signals as function of distance in insulation oil



상 : 방전펄스신호 [500 mV/div, 200 μs/div]

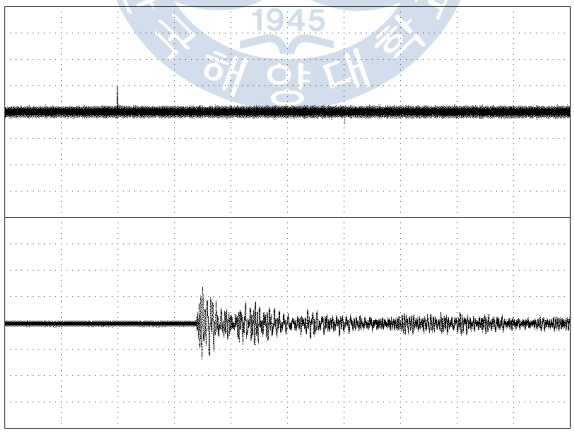
하 : 음향신호 [500 mV/div, 200 μs/div]

(a) 170 mm



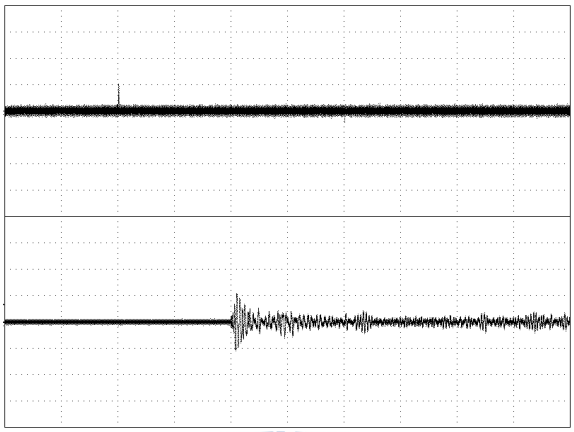
상 : 방전펄스신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
하 : 음향신호 [500 mV/div, 200 μs/div]

(b) 300 mm



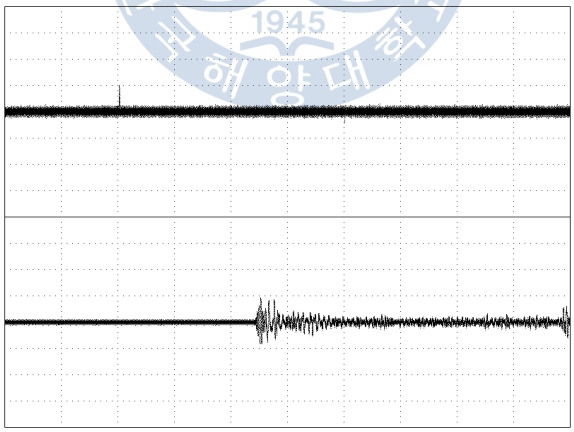
상 : 방전펄스신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
하 : 음향신호 [500 mV/div, 200 μs/div]

(c) 400 mm



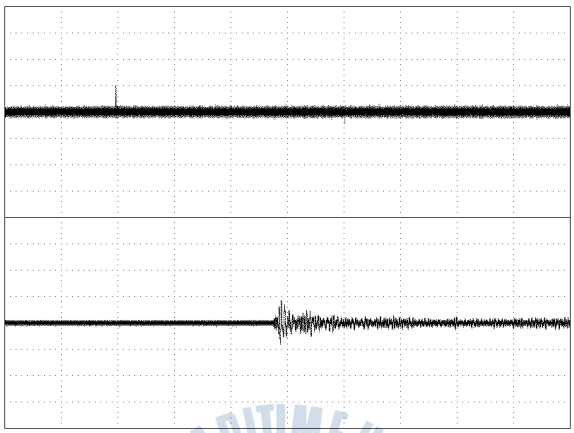
상 : 방전펄스신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
하 : 음향신호 [500 mV/div, 200 μs/div]

(d) 600 mm



상 : 방전펄스신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
하 : 음향신호 [500 mV/div, 200 μs/div]

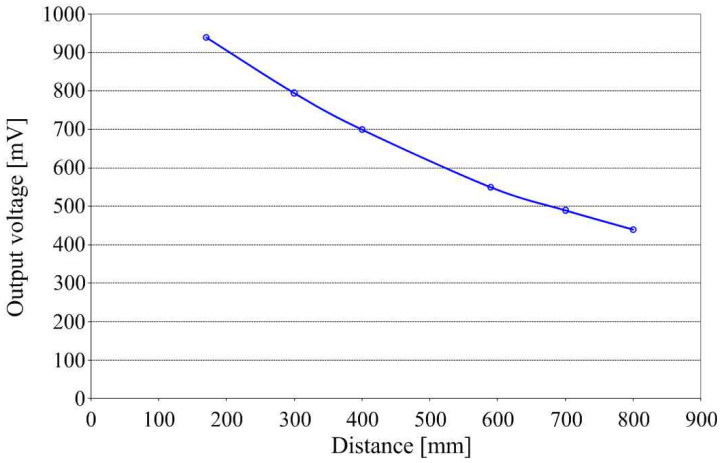
(e) 700 mm



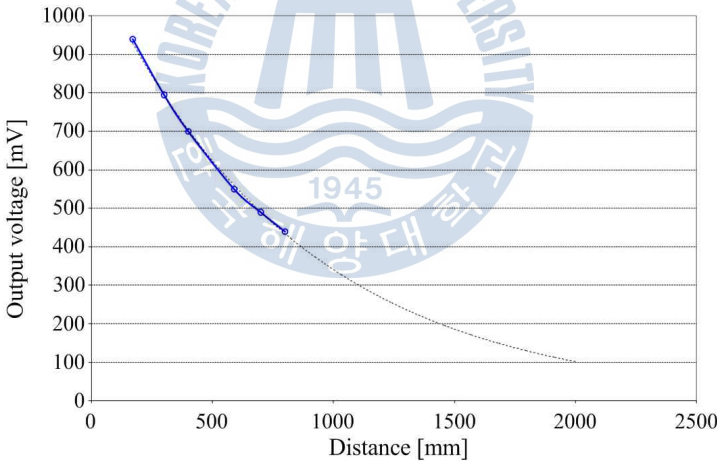
상 : 방전펄스신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
하 : 음향신호 [500 mV/div, 200 μs/div]
(f) 800 mm

그림 4.10 부분방전 펄스와 음향신호 검출파형의 예
Fig. 4.10 Typical waveforms of PD pulse and acoustic signal

23.3 pC의 동일한 부분방전 발생시, 거리에 따른 유중 음향신호의 크기는 170 mm에서 940 mV, 300 mm에서 795 mV, 400 mm에서 700 mV, 590 mm에서 570 mV, 700 mm 및 800 mm에서 각각 490 mV와 450 mV로 측정되었다. 실험계에서 측정된 음향신호의 크기를 그림 4.11(a)에 나타내었으며, 금속제 외함의 크기가 2 m까지 커진다면 음향신호의 크기는 그림 4.11(b)에 나타낸 것과 같이 거리에 따라 지수적으로 감소할 것으로 예측된다. 따라서 음향신호의 거리에 따른 전파특성을 이용하면 음향신호의 측정만으로도 방전전하량의 추정이 가능할 것으로 판단된다.



(a) 거리에 따른 음향신호



(b) 음향신호의 감쇄 추정

그림 4.11 거리에 따른 음향신호의 감쇄

Fig. 4.11 Attenuation of acoustic signal as a function of distance

4.3 위치추정

일반적으로 부분방전 펄스를 측정하는 전기적 방법은 위치추정이 불가능한 단점이 있다. 그러나 음향신호 측정에 의한 방법은 유입변압기 내부에서 발생하는 부분방전 위치를 추정할 수 있는 장점이 있다.

유입변압기에서 발생하는 결함의 위치추정은 측정방법에 따라 전기-음향법과 음향-음향법으로 나눌 수 있으며 전기-음향법은 커플링 캐패시터나 고주파 변류기로 측정된 신호를 기준신호로 하고, 음향신호를 측정함으로써 전기신호와 음향신호의 시간차로부터 부분방전의 발생 위치를 계산하는 방법이다. 그러나 변압기가 설치된 환경은 전자계의 노이즈 및 각종 고주파 잡음이 존재하고 또한 방전펄스의 크기가 매우 작기 때문에 많은 오차가 발생할 수 있다. 반면, AE센서만을 이용한 음향-음향법은 초음파대역의 음향신호를 측정함으로써 전자계의 노이즈에 강하며 3개 이상의 AE센서를 설치하여 음향신호들 간의 도달시간차를 이용하여 부분방전 발생위치를 추정할 수 있다[28]~[31].

본 논문에서는 음향-음향법을 사용하여 결함의 위치추정 알고리즘을 설계하였으며 AE센서로부터 측정된 음향신호의 도달시간차로부터 결함의 위치를 3차원으로 추정하였다. 실험은 변압기 철심을 고려하지 않았을 경우와 철심을 고려한 경우로 나누어 수행하였으며 각각의 경우에서 계산된 결함의 위치와 실제 설치위치를 비교하여 추정의 정확도를 분석하였다.

음향신호의 유중 전파 속도를 v라고 하고 그림 4.12에 나타낸 것과 같이 각 센서에 측정된 음향신호의 도달시간차를 $t+\Delta t_1$, $t+\Delta t_2$라고 하면 그림 4.13과 같이 변압기 외함에 설치된 AE센서 A, B, C에서 부분방전 발생점 P까지의 거리 l_1, l_2, l_3은 다음 식과 같이 표현된다.

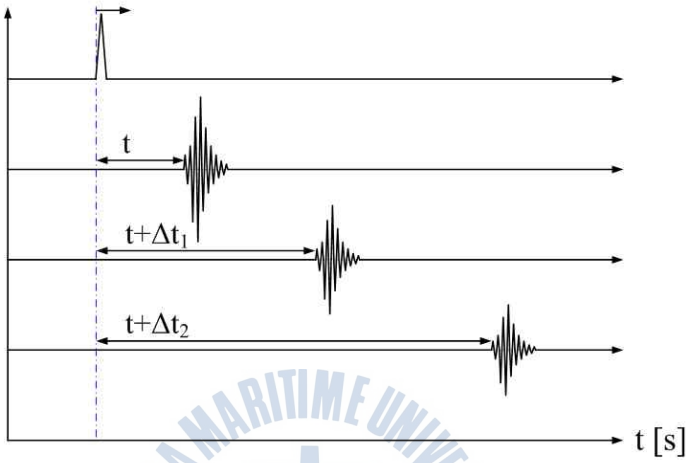


그림 4.12 음향신호의 도달시간차
Fig. 4.12 Arrival time difference of acoustic signals

$$l_1 = v \cdot t \tag{4.1}$$

$$l_2 = v \cdot (t + \Delta t_1) \tag{4.2}$$

$$l_3 = v \cdot (t + \Delta t_2) \tag{4.3}$$

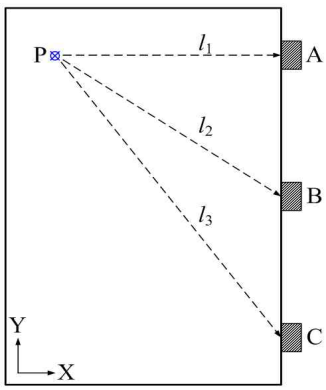


그림 4.13 AE센서를 이용한 부분방전 위치추정

Fig. 4.13 Positioning of PD origin using AE sensors

유중 부분방전을 모의하기 위한 전극계는 그림 4.1(a)에 나타낸 침-평판 전극을 사용하였다.

음향신호의 측정을 통한 유입변압기 내부결함의 위치는 2차원 평면상으로 추정할 경우 3개 이상의 AE센서가 필요하며, 3차원 공간상으로 추정할 경우 5개 이상의 AE센서가 필요하다. 각각의 센서로부터 측정된 음향신호들 간의 도달시간차를 이용하여 위치를 추정할 수 있다[72]~[75]. 먼저 변압기 철심을 고려하지 않고 절연유만 있을 경우 결함의 위치를 추정하였다. 5개의 AE센서를 그림 4.14와 같이 외함 표면에 부착시키고 제작된 침-평판 전극계를 P점에 위치하였으며 전극계와 AE센서의 설치위치에 대한 좌표를 각각 부여하였다.

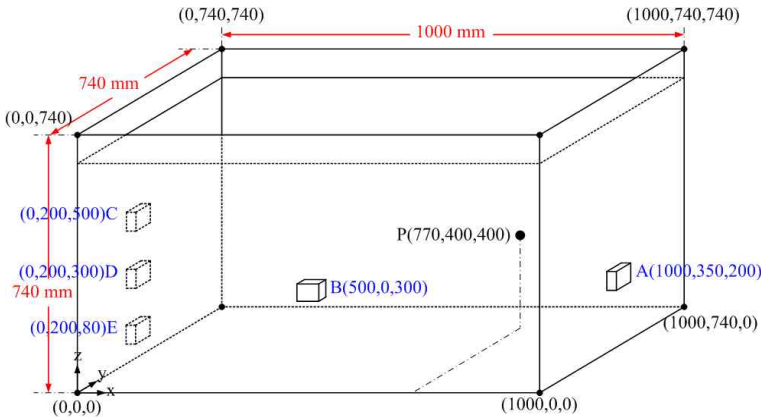


그림 4.14 좌표계 (I)

Fig. 4.14 Coordinate system (I)

부분방전 발생위치를 추정하기 위한 실험계는 그림 4.15와 같이 유입 변압기를 모의하기 위한 금속제 외함, 침-평판 전극계 및 AE센서로 구성된다.

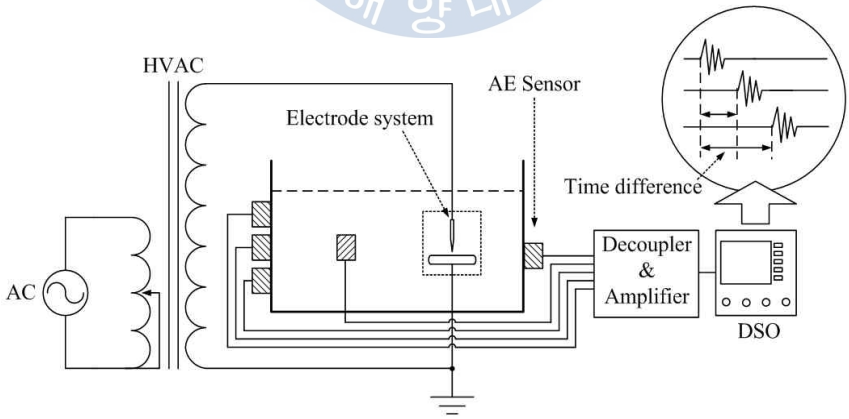
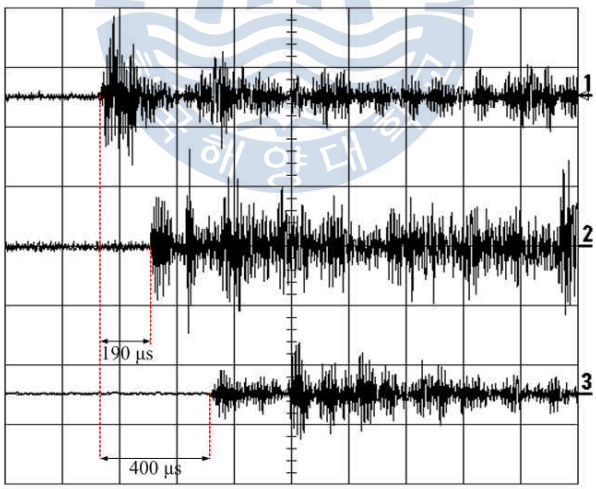


그림 4.15 부분방전 위치추정 실험계의 구성

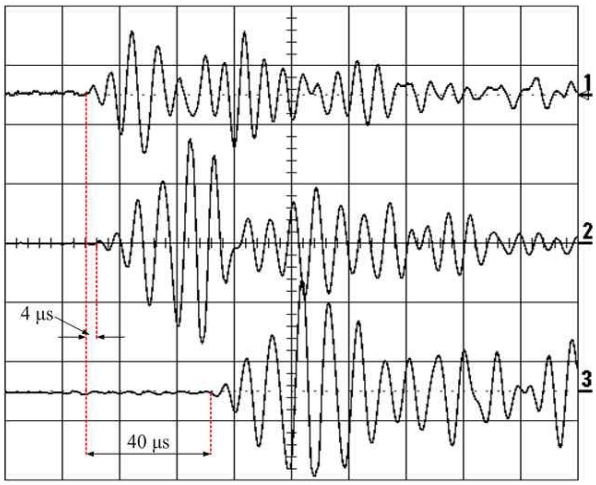
Fig. 4.15 Configuration of the experimental setup for PD positioning

모의 결함에 따라 발생하는 유중 부분방전 음향신호의 주파수 스펙트럼 분석을 통해 유중 부분방전 음향신호의 주파수 성분은 50 kHz~400 kHz임을 확인하였으므로 공진주파수가 140 kHz인 협대역 AE센서를 사용하였다.

음향신호의 도달시간차는 수평면과 수직면으로 나누어 측정하였으며 결함의 위치를 계산하였다. 외함 표면에 설치된 각각의 AE센서에서 측정된 파형을 그림 4.16에 나타내었다. 센서 A와 B에서 측정된 부분방전 음향신호의 도달시간차는 190 μs로 나타났으며, A와 C에서는 도달시간차가 400 μs로 측정되었다. 또한 AE센서 C와 D, C와 E에서 측정된 부분방전 음향신호의 도달시간차는 각각 4 μs, 40 μs로 측정되었다.



Ch.1 : AE센서 A [1 V/div, 200 μs/div]
Ch.2 : AE센서 B [1 V/div, 200 μs/div]
Ch.3 : AE센서 C [2 V/div, 200 μs/div]
(a) 수평면



Ch.1 : AE센서 C [2 V/div, 20 μs/div]
Ch.2 : AE센서 D [2 V/div, 20 μs/div]
Ch.3 : AE센서 E [5 V/div, 20 μs/div]
(b) 수직면

그림 4.16 음향신호의 파형 (I)
Fig. 4.16 Waveforms of acoustic signals (I)

식 (4.1)~(4.3)과 그림 4.14에 나타낸 금속제 외함 및 AE센서의 좌표 그리고 각각의 센서로부터 측정된 도달시간차로부터 다음 식을 만들 수 있다.

$$t_{B-A} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{(x-500)^2+y^2} - \sqrt{(x-1000)^2+(y-350)^2}) \qquad (4.4)$$

$$t_{C-A} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{x^2+(y-200)^2} - \sqrt{(x-1000)^2+(y-350)^2}) \qquad (4.5)$$

$$t_{D-C} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{x^2+(z-300)^2} - \sqrt{x^2+(z-500)^2}) \quad (4.6)$$

$$t_{E-C} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{x^2+(z-80)^2} - \sqrt{x^2+(z-500)^2}) \quad (4.7)$$

여기서,

t_{B-A} : AE센서 A와 B사이의 도달시간차 [s]

t_{C-A} : AE센서 A와 C사이의 도달시간차 [s]

t_{D-C} : AE센서 C와 D사이의 도달시간차 [s]

t_{E-C} : AE센서 C와 E사이의 도달시간차 [s]

v : 음향신호의 전파속도 [m/s]

이다.

상기 식으로부터 계산된 부분방전 발생점의 좌표는 x=786.4 mm와 y=415.4 mm, z=428.3 mm이다. 실제 모의 결함의 설치위치가 x=770 mm, y=400 mm, z=400 mm이며, 금속제외함의 크기가 1000 mm × 740 mm × 740 mm임을 고려하면 철심이 없는 상태에서 최대 4 %이내의 오차로 결함의 위치추정이 가능하였다.

다음으로 절연유 내부에 변압기 철심이 존재할 경우, 음향신호의 측정에 의한 결함의 위치추정에 대한 실험을 수행하였다. 앞서 철심을 고려하지 않았을 경우와 동일한 조건에서 그림 4.17과 같이 센서의 설치위치를 변경하고 내부에 변압기 철심을 위치시켰다. 모의 결함인 침-평판 전극계를 P′ 지점에 위치하고 철심이 없을 때와 동일하게 전극계와 AE센서의 설치위치에 대한 좌표를 각각 부여하였다.

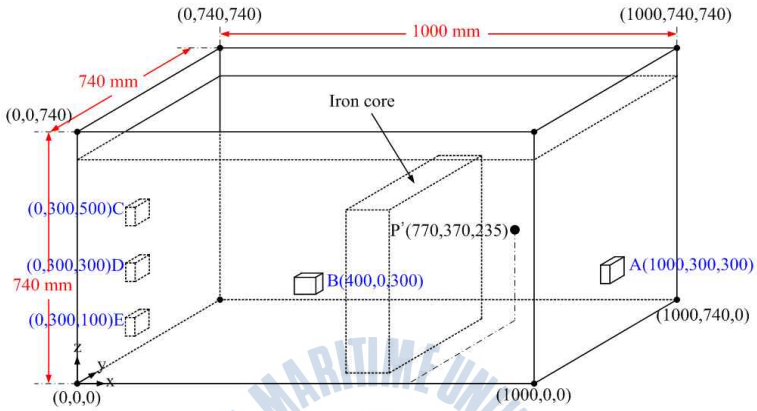
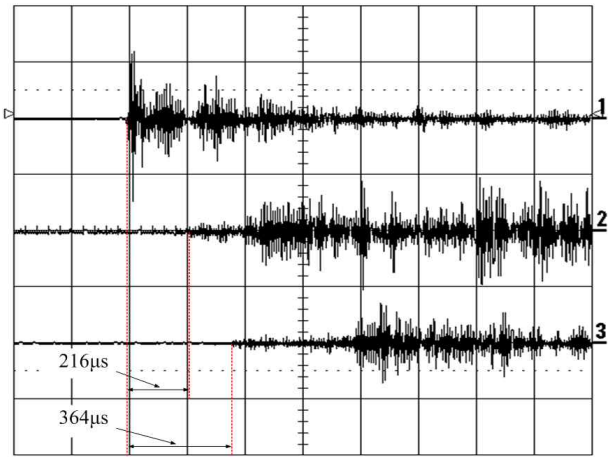


그림 4.17 좌표계 (II)

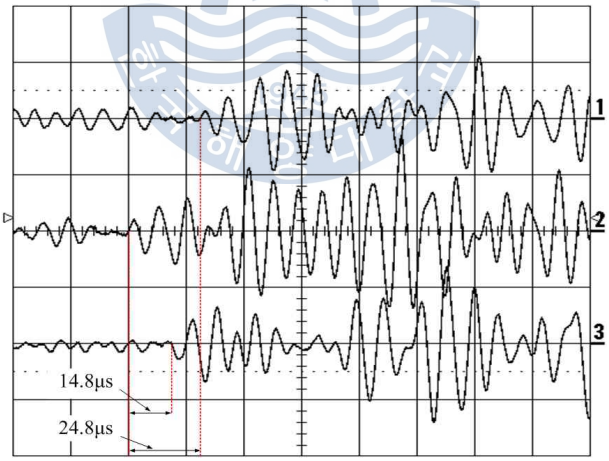
Fig. 4.17 Coordinate system (II)

교류 고전압을 절연유 내부에 위치한 모의결함에 인가하여 부분방전을 발생시켰으며 이 때의 음향신호를 측정하였다. 철심이 존재할 경우 AE센서에 측정된 파형을 그림 4.18에 나타내었다. 센서 A와 B에서 측정된 부분방전 음향신호의 도달시간차는 216 μs로 나타났으며, A와 C에서는 도달시간차가 364 μs로 측정되었다. 또한 AE센서 C와 D, C와 E에서 측정된 부분방전 음향신호의 도달시간차는 각각 14.8 μs, 24.8 μs로 측정되었다.



Ch.1 : AE센서 A [5 V/div, 200 μs/div]
Ch.2 : AE센서 B [2 V/div, 200 μs/div]
Ch.3 : AE센서 C [5 V/div, 200 μs/div]

(a) 수평면



Ch.1 : AE센서 C [2 V/div, 20 μs/div]
Ch.2 : AE센서 D [2 V/div, 20 μs/div]
Ch.3 : AE센서 E [2 V/div, 20 μs/div]

(b) 수직면

그림 4.18 음향신호의 파형 (II)
Fig. 4.18 Waveforms of acoustic signals (II)

그림 4.17에 나타낸 금속제 외함 및 AE센서의 설치좌표 그리고 각각의 센서로부터 측정된 도달시간차로부터 다음 식을 만들 수 있으며 전극계의 위치를 계산하였다.

$$t_{B-A} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{(x-400)^2+y^2} - \sqrt{(x-1000)^2+(y-300)^2}) \quad (4.8)$$

$$t_{C-A} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{x^2+(y-300)^2} - \sqrt{(x-1000)^2+(y-300)^2}) \quad (4.9)$$

$$t_{D-C} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{x^2+(z-500)^2} - \sqrt{x^2+(z-300)^2}) \quad (4.10)$$

$$t_{E-C} = \frac{1}{v} \cdot (\sqrt{x^2+(z-500)^2} - \sqrt{x^2+(z-100)^2}) \quad (4.11)$$

여기서,

t_{B-A} : AE센서 A와 B사이의 도달시간차 [s]

t_{C-A} : AE센서 A와 C사이의 도달시간차 [s]

t_{D-C} : AE센서 C와 D사이의 도달시간차 [s]

t_{E-C} : AE센서 C와 E사이의 도달시간차 [s]

v : 음향신호의 전파속도 [m/s]

이다.

상기 식으로부터 계산된 부분방전 발생점의 좌표는 x=778.1 mm와 y=430.4 mm, z=256.9 mm이다. 실제 모의 결함의 설치위치가 x=770 mm,

y=370 mm, z=235 mm이며, 금속제외함의 크기가 1000 mm × 740 mm× 740 mm임을 고려하면 철심이 있는 상태에서는 최대 10 %이내의 오차로 결함의 위치추정이 가능하였다. 철심을 고려하지 않았을 경우와 비교하여 비교적 큰 오차가 발생하였으며 이는 절연유에서 음향신호의 반사와 투과, 굴절에 의한 영향으로 판단된다.

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

제 5 장 결 론

본 논문에서는 전력용 유입변압기의 절연진단을 위하여 부분방전에 의해 발생하는 음향신호 검출하고 음향신호의 유중 전파특성을 분석하여 절연결함의 종류와 위치추정에 대한 연구를 수행하였다. 변압기 절연체계에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위해 곡률반경이 10 μm인 침전극, 평판전극 및 프레스보드를 이용한 침-평판, 평판-평판, 파티클 전극을 제작하였으며, 음향신호의 검출을 위한 역결합회로 및 고감도 증폭회로와 부분방전 펄스를 검출하기 위한 결합회로망 및 광대역 증폭회로를 설계·제작하였다.

음향신호만을 검출하기 위해 구성된 역결합회로는 직류전원의 고주파 성분을 차단하고, 순수한 직류성분만 AE센서에 공급되며 음향신호만을 검출할 수 있다. 음향신호 증폭회로의 이득은 40 dB로 설계하였으며 -3 dB의 주파수대역은 11 kHz~5.5 MHz로 AE센서의 주파수 대역을 충분히 포함하는 특성을 갖는다.

또한 부분방전 펄스의 측정을 위하여 커플링 캐패시터와 검출 임피던스의 결합회로망, 저잡음 증폭회로를 사용하여 결합회로망을 구성하였다. 결합회로망은 상용주파수 시험전압에서 고임피던스로 동작하고 고주파 성분의 부분방전펄스에 대해서는 저임피던스로 작용하는 고역통과필터로서 상용주파수 전압은 200 dB 이하로 감쇄시키고 1 MHz 이상의 부분방전펄스는 감쇄없이 검출한다.

부분방전에 의해 발생하는 음향신호의 최적검출을 위한 주파수 대역을 선정하기 위하여 광대역 AE센서와 협대역 AE센서를 사용하여 결함에 따른 음향신호의 주파수 성분을 분석하였으며 침-평판 전극에서 발생한 음

향신호의 주파수는 50 kHz～170 kHz, 평판-평판 전극에서 50 kHz～400 kHz, 그리고 파티클 전극에서는 50 kHz～400 kHz에 분포하였고, 평판-평판 전극과 파티클 전극에서 주파수 성분이 넓게 나타났다. 광대역과 협대역 AE센서에 측정된 음향신호의 주파수대역을 비교한 결과, 광대역 AE센서에서 측정된 음향신호의 주파수 범위가 협대역 AE센서로 측정한 주파수범위보다 다소 넓게 나타났지만 400 kHz이상에서는 음향신호의 주파수 성분이 나타나지 않았다. 따라서 전력용 유입변압기의 상시 절연진단에 음향검출기술 적용시 주파수 대역 50 kHz～250 kHz, 공진주파수 140 kHz의 협대역 AE센서를 사용하면 외부 노이즈에 영향을 받지 않고 부분방전 음향신호만을 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

부분방전에 의해 발생하는 음향신호의 크기와 방전전하량에 대한 관계를 분석하였으며 커플링 캐패시터와 검출 임피던스, 고감도 증폭회로를 설계·제작하고 IEC 60270에 따른 전기적 측정법과 음향신호 측정법을 비교하여 동일한 크기의 부분방전이 발생할 때 거리에 따른 음향신호의 특성을 분석하였다. 인가전하량에 따른 출력전압은 10 pC에서 295 mV, 20 pC에서 500 mV, 50 pC에서 1.11 V, 100 pC에서 2.14 V로 측정되었다. 설계한 부분방전 측정회로는 10 pC～100 pC까지 선형적인 출력을 나타내었으며 측정감도는 23.65 mV/pC로 나타났다.

23.3 pC의 동일한 부분방전 발생시, 유중 음향신호의 크기는 거리에 따라 각각 940 mV, 795 mV, 700 mV, 570 mV 및 450 mV로 측정되었으며 거리에 따라 지수적으로 감쇄하는 비선형적인 특성을 나타내었다. 이러한 거리에 따른 음향신호의 전파특성을 이용하면 부분방전 발생 시 음향신호의 측정만으로 방전전하량의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

유입변압기 내부결함의 위치를 추정하기 위하여 음향신호의 도달시간차를 이용한 3차원 위치추정 알고리즘을 제안하였으며 철심이 없는 경우

와 철심이 있을 경우 부분방전이 발생하는 결함의 위치를 추정하였다.

AE센서의 설치위치와 변압기 외함에 좌표를 부여하였으며 이를 이용하여 결함의 위치를 추정한 결과, 철심을 고려하지 않았을 경우 4% 이하의 오차로 위치추정이 가능하였으며 절연유 내부에 철심이 존재할 경우에는 10% 정도의 오차로 위치를 추정할 수 있었다.

부분방전에 의해 발생하는 음향신호는 유입변압기의 크기 및 현장조건에 따라 다르게 나타날 수 있지만, 본 논문에서 제시한 방법을 적용하면 절연상태에 대한 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 정확한 부분방전 음향신호의 검출을 위하여 적합한 주파수 대역의 센서를 선정해야 하며, 검출회로에 대한 연구가 선행된다면 유입변압기의 상시 절연진단에 광범위하게 적용하는 것이 가능하다.

본 논문을 통해 얻어진 실험결과로부터 유입변압기의 절연진단에 적용하기 위해서는 검출 감도를 높여 미소 부분방전이 발생했을 때 음향신호를 측정하는 것이 필수적이다. 음향신호 측정에 의한 절연진단기술은 유입변압기의 운전을 중단시키지 않고 부분방전의 발생 및 위치에 대한 다양한 정보를 얻을 수 있다. 이와 더불어 유입변압기 뿐만 아니라 타 전력기기의 온라인 절연진단에 활용될 수 있으며 아직까지 국내에서 음향신호의 측정에 의한 절연진단기술과 회로에 대한 연구가 활발히 이루어지지 않고 있으므로 이에 대한 자료로 충분히 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] S. Tenbohlen, D. Uhde, J. Poittevin, U. Sundermann, H. Borsi, P. Werle, H. Matthes, E. F. Fuchs and K. J. Roesler, "Enhanced Diagnosis of Power Transformers using On- and Off-line Methods : Results, Examples and Future Trends", CIGRE Paris 12-204, Session 2000.

[2] J. P. van Bolhuis, E. Gulski, J. J. Smit, "On-line detection, requirements for practical use, Conference Record of the 2002", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7-10, 2002.

[3] Martin D. Judd, Li Yang, Ian B. B. Hunter, "Partial discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensor Part 1 : Sensors and Signal Interpretation", IEEE electrical Insulation Magazine, March/April Vol. 21, No. 2, 2005.

[4] G. J. Pukel, M. Muhr, W. Lick, "Transformer diagnostics : Common used and new methods", International Conference on condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2006, Changwon, Korea, April 2006.

[5] 한국전기안전공사, "전기재해통계보고서-전기설비사고통계", 2011.

[6] 전력연구원, "변전설비 진단기술 개발 연구", pp.32~33, 1998.

[7] T. K. Saha, "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, no. 5, pp.903~917, October 2003.

[8] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers", Redwood Press, pp.242~262, 1992.

[9] 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.

[10] E. Gulski, "Digital Analysis of Partial Discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.822～837, 1995.

[11] 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.

[12] A. Krivda, "Automated Recognition of Partial Discharge", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.796～821, 1995.

[13] S. M. Markalous, "Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals", Ph.D. Thesis (Dissertation), Universität Stuttgart, 2006.

[14] L. E. Lundgaard, "Acoustic partial discharge detection, fundamental considerations", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 4, pp.25～31, 1992.

[15] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers", Redwood Press, pp.242～262, 1992.

[16] D. Templeton, H. Q. Li, K. F. Lee, J. Pearson, R. Brinzer A. Reid and M. Judd, "Sensitivity testing of a UHF power transformer monitoring system", Proc. 15th ISH, Ljubljana, Slovenia, Paper T7-617, 2007.

[17] R. M. Eichhorn, "Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insolation, Vol. E I-12, No. 1, pp.2～18, 1976.

[18] E. J. McMahon, "A Tutorial on Treeing", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. EI-13, No. 4, 1978.

[19] L. A. Dissado, S. J. Dodd, J. V. Champion, P. I. Willians and J. M. Alison, "Propagation of Electrical Tree Structures in Solid Polymeric Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 3, pp.259～279, 1997.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 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.

[26] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, T. Strehl: "Performance Check and Sensitivity Verification for UHF PD Measurements on Power Transformers", Proc. 15th ISH, Ljubljana, Slovenia, Paper T7-100, 2007.

[27] S. Meijer and J.J. Smit "Sensitivity check procedure for GIS with retrofit UHF PD sensors", Proc. 15th ISH, Ljubljana, Slovenia, Paper T7-97, 2007.

[28] A. J. Reid, M. D. Judd, B. G. Steward, R. A. Fouracre and S. Venkatesan, "Correlation between RF Energy and IEC 60270 Apparent Charge for Selected Partial Discharge Source Geometries", Proceedings 15th ISH, Ljubljana, Slovenia, Paper T7-531, 2007.

[29] P. Agoris, P. Cichecki, S. Meijer, E. Gulski and J. J. Smit,

"Analysis of Artificial Defects in Transformer Insulation using the UHF technique", Proc. 15th ISH, Ljubljana, Slovenia, Paper T7-737, 2007.

[30] 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.

[31] 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.

[32] 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.

[33] E. Gulski, H. P. Burger, G. H. Vailancourt and R. B rooks, "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.

[34] T. Leibfried, K. Feser, "Off-line- and on-line-monitoring of power transformers using the transfer function method", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Que., Canada, Jun. 1996.

[35] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment", Butterworth, pp.129~152, 1989.

[36] 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.

[37] 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.

[38] T. Okamoto and T. Tanaka, "Novel Partial Discharge Measurement Computer-Aided Measurement System", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 21, pp.1015～1019, 1986.

[39] M. Wang and A. J. Vandermaar "Review of condition assessment of power transformers in service", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, no. 6, pp.12～25, Nov/Dec 2002.

[40] A. Akbari Azirani, P. Werle, H. Borsi, E. Gockenbach, "Transfer Function-Based Partial Discharge Localization in Power Transformers: A Feasibility Study", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 5, pp.22～32, 2002.

[41] A. Setayeshmehr, A. Akbari, H. Borsi, E. Gocken-bach, "A New Technique for On-line Monitoring and Diagnosing of Power Factor and Capacitance of Transformers Bushing", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, pp. 608～615, June 2006.

[42] E. P. Dick and C. C. Erven, "Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis", IEEE Transactions PAS-97, No. 6, pp.2144～2153, 1978.

[43] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Standard C57.104-2008, Feb. 2009.

[44] R. Naresh, V. Sharma, and M. Vashisth, "An integrated neural fuzzy approach for fault diagnosis of transformers", IEEE Trans. Power Del., Vol. 23, No. 4, pp.2017～2024, Oct. 2008.

[45] M. Duval and A. dePablo, "Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases", IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 17, No. 2, pp.31～41, Mar./Apr. 2001.

[46] M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers", IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 18, No. 3, pp.8～17, May/Jun. 2002.

[47] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Standard C57.104-2008, Feb. 2009.

[48] R. Naresh, V. Sharma, and M. Vashisth, "An integrated neural fuzzy approach for fault diagnosis of transformers", IEEE Trans. Power Del., Vol. 23, No. 4, pp.2017~2024, Oct. 2008.

[49] M. Duval and A. dePablo, "Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases", IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 17, No. 2, pp.31~41, Mar./Apr. 2001.

[50] M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers", IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 18, No. 3, pp.8~17, May/Jun. 2002.

[51] N. A. Muhamad, B. T. Phung, T. R. Blackburn, and K. X. Lai, "Comparative study and analysis of DGA methods for transformer mineral oil", Proc. of Power Tech, pp.45~50, 2007.

[52] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment", Butterworth, pp.129~152, 1989.

[53] E. Gulski, H. P. Burger, G. H. Vaillancourt, 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.

[54] 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.

[55] 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.

[56] 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.

[57] D. Judd, O. Farish, and B. F. Hampton, "The excitation of UHF signals by partial discharges in gis", IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., Vol. 3, No. 4, pp.213~228, Oct. 1996.

[58] R. Bell, C. Charlson, S. P. Halliday, T. Irwin, J. Lopez-Roldan, and J. Nixon, "High-voltage onsite commissioning tests for gas-insulated substations using UHF partial discharge detection", IEEE Trans. Power Del., Vol. 18, No. 4, pp.1187~1191, Oct. 2003.

[59] L. Yang, M. D. Judd, and C. J. Bennoch, "Denoising UHF signal for PD detection in transformers based on wavelet technique", Proc. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.166~169, Oct. 2004.

[60] C. S. Chang, J. Jin, S. Kumar, Q. Su, T. Hoshino, M. Hanai, and N. Kobayashi, "Denoising of partial discharge signals in wavelet packets domain", Proc. Inst. Elect. Eng., Sci. Measure. Techn., Vol. 152, No. 3, pp.129~140, 2005.

[61] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, and T. Strehl, "Sensitivity of UHF PD measurements in power transformers", IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insul., Vol. 15, No. 6, pp.1553~1558, Dec. 2008.

[62] R. T. Harrold, "Ultrasonic Spectrum Signatures of Under-Oil Corona Sources", IEEE Trans. EI-10, No. 4, July/August 1992.

[63] E. Howells, E. T. Norton, "Detection of Partial Discharges in Transformers Using Acoustic Emission Techniques", IEEE Trans. PAS-97, No. 5, pp.1538~1549, Sept./Oct. 1978.

[64] L. E. Lundgaard, G. Tangen, B. Skyberg, and K. Fagustad, "Acoustic Diagnoses of GIS: Field Experience and Expert Systems", IEEE Trans. PD-7, No. 1, pp.287~294, Jan. 1992.

[65] L. E. Lundgaard, W. Hansen, and K. Dursun, "Location of Discharges in Power Transformers Using External Acoustic Sensors", Proceedings of the 6th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Paper No. 15.05, New Orleans, 1989.

[66] N. Giao Trinh, "Short Notes on the Physics of Corona Discharge", IEEE/PES Special Course on Corona and Field Effects of High Voltage Transmission Lines, 1981

[67] 宅間 董•柳父 悟 執筆, 李福熙 譯, "高電壓大電流工學", 靑文閣, 1982.

[68] 정성계, 이덕출, "고전압 공학", 문운당, 1982.

[69] S. M. Strachan; S. Rudd, S. D. J. McArthur, M. D. Judd, S. Meijer, E. Gulski, "Knowledgebased diagnosis of partial discharges in power transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 15, No. 1, pp.259~268, February 2008.

[70] IEC International Standard 60270, High Voltage Test Techniques -Partial Discharge Measurements. International Electrotechnical Commission (IEC), 3rd Edition, 2000.

[71] H. Kawada, M. Honda, T. Inoue, and T. Amemiya, Partial discharges automatic monitor for oil-filled power transformer", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 2, pp.422~428, 1984.

[72] L. E. Lundgaard, "Partial discharge XIII: Acoustic partial discharge detection-fundamental considerations", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, pp.25~31, July/August 1992.

[73] T. Bengtsson M. Leijon, L. Ming and B. Jonsson, "Directivity of acoustic signals from partial discharge in Oil", IEE proceeding-Science, Measurement and Technology, Vol. 142, No. 1, pp.85~88, 1995.

[74] R. T. Harrold, "Acoustic technology applications in electrical insulation and dielectrics", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 20, No. 1, pp.3~19, 1985.

[75] D. W. Auckland, J. R. Hyde, A. J. McGrail, and B. R. Varlow, "The ultrasonic location of discharge in transformer-a new approach", IEEE International Insulation, pp.77~78, 1994.

[76] 길경석, 송재용, 서황동, 황돈하, 강동식, 김용주, "저압 유도전동기에

서 미소 부분방전 측정에 관한 연구", 전기전자재료학회 논문지 제18권 제10호, pp.960~964, 2005.

[77] Gyung-Suk Kil, Il-Kwon Kim, Dae-Won Park, Su-Yeon Choi, Chan-Yong Park, "Measurements and analysis of the acoustic signals produced by partial discharges in insulation oil", Current Applied Physics, Vol. 9, No. 2, pp.296~300, 2009.

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

연구논문 발표실적

◎ 국제전문학술지

(1) "Analysis of Partial Discharge in Insulation Oil using Acoustic Signal Detection Method", WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS, Issue 3, Vol. 3, pp.90～94, 2008. 3.

(2) "Measurements and analysis of the acoustic signals produced by partial discharges in insulation oil", Current Applied Physics, Volume 9, Issue 2, pp.296～300, 2009. 3.

◎ 국내전문학술지

(1) "용량성 프로브와 광전송회로을 이용한 광대역 전압측정장치", 한국센서학회지, 제13권 제5호, pp.363～368, 2004. 9.

(2) "변전소내 정보기기에서 서지의 측정과 분석", 한국해양정보통신학회 논문지, 제9권 제2호, pp.289～294, 2005. 4.

(3) "서지에 대한 누전차단기의 오동작 특성", 한국해양정보통신학회 논문지, 제9권 제3호, pp.570～575, 2005. 6.

(4) "국제규격 대응 컴퓨터 네트워크용 서지방호장치 개발", 한국해양정보통신학회 논문지, 제9권 제6호, pp.1253～1259, 2005. 10.

(5) "직류전동차 탑재용 피뢰기의 최적선정에 관한 연구", 한국철도학회 논문집, 제10권 제2호, pp.112～116, 2007. 4.

(6) "애자/피뢰기 모니터링을 위한 유비쿼터스 센서 개발", 한국철도학회 논문집, 제10권, 제2호, pp.117～123, 2007. 4.

(7) "부분방전에 의한 주계전기의 절연성능 평가", 한국철도학회 논문집, 제10권 제4호, pp.388～392, 2007. 8.

(8) "부분방전에 의한 음향신호의 검출과 위치추정에 관한 연구", 한국전기전자재료학회논문지, 제20권 제10호, pp.907~911, 2007. 10.
(9) "가공배전선로의 전력설비 감시를 위한 유비쿼터스 센서", 한국조명전기설비학회논문지, 제21권 제10호, pp.59~65, 2007. 12.
(10) "뇌방전 위치표정에 관한 연구(Ⅰ)", 한국조명전기설비학회논문지, 제21권 제10호, pp.40~45, 2007. 12.
(11) "인버터 구동 유도전동기에서 과도전압의 측정과 분석", 한국철도학회논문집, 제10권 제6호, pp.650~654, 2007. 12.
(12) "가스절연개폐기에서 용량성 전압프로브를 이용한 부분방전의 측정", 한국전기전자재료학회논문지, 제21권 제1호, pp.85~89, 2008. 1.
(13) "저압배선계통에서 직렬아크의 검출에 관한 연구", 한국전기전자재료학회논문지, 제21권 제2호, pp.182~187, 2008. 2.
(14) "직렬아크신호의 검출방법", 한국철도학회논문집, 제11권 제5호, pp.477~481, 2008. 10.
(15) "하이브리드 차량용 견인전동기의 절연성능 비교분석", 한국전기전자재료학회논문지, 제21권 제12호, pp.1124~1128, 2008. 12.
(16) "병렬아크의 고속차단에 관한 연구", 한국조명전기설비학회논문지, 제22권 제12호, pp.95~100, 2008. 12.
(17) "다양한 전류원에 대한 접지시스템의 위험전압 측정과 분석", 대한전기학회 논문지, 제58권 제1호, pp.113~118, 2009. 1.
(18) "부분방전 측정에 의한 하이브리드차량 견인전동기의 절연성능평가", 한국철도학회 논문집, 제12권 제2호, pp.249~253, 2009. 4.
(19) "복합차체의 낙뢰에 대한 인체 안전성 분석", 한국전기전자재료학회논문지, 제22권 제6호, pp.526~531, 2009. 6.
(20) "몰드변압기의 부분방전 검출기술에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 논문지, 제22권 제9호, pp.786~791, 2009. 9.

(21) "자외선램프를 이용한 선박평형수 처리시스템의 설계 및 제작", 한국마린엔지니어링학회지, 제33권 제6호, pp.952~958, 2009. 9.
(22) "식물성 플랑크톤에 대한 UV LED의 살균성능 분석", 한국마린엔지니어링학회지, 제33권 제6호, pp.959~964, 2009. 9.
(23) "유중 부분방전의 음향검출에 관한 연구", 한국전기전자재료학회논문지, 제23권 제1호, pp.53~60, 2010. 1.
(24) "직렬아크현상의 검출기술 및 장치", 한국마린엔지니어링학회지, 제34권 제2호, pp.332~338, 2010. 3.
(25) "지지애자의 표면오염 모니터링 기술 및 장치", 한국전기전자재료학회논문지, 제23권 제5호, pp.413~417, 2010. 5.
(26) "에너지 절감형 LED 집어등의 설계 및 제작", 한국마린엔지니어링학회지, 제34권, 제4호, pp.515~521, 2010. 5.
(27) "직렬아크 및 코로나방전의 주파수 스펙트럼 분석", 한국전기전자재료학회 논문지, 제23권 제7호, pp.554~559, 2010. 7.
(28) "광대역 접지임피던스 측정기의 설계 및 제작", 한국전기전자재료학회 논문지, 제23권 제10호, pp.793~797, 2010. 10.
(29) "에너지 절감형 평형수 처리장치 개발에 관한 연구(I)", 한국마린엔지니어링학회지, 제34권, 제6호, pp.880~886, 2010. 9.
(30) "Disinfection of *Tetraselmis* sp. with UV LED Application", Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 1, No. 1, pp.1~6, 2011. 1.
(31) "대지 위험전압 측정기의 설계 및 적용", 한국전기전자재료학회논문지, 제24권 제3호, pp.250~255, 2011. 3.
(32) "몰드변압기에서 용량성 프로브에 의한 부분방전 검출 기술", 한국전기전자재료학회논문지, 제24권 제4호, pp.319~324, 2011. 4.

◎ 국제학술회의 발표

(1) "Measurement and Analysis of Acoustic signal Generated by Partial Discharges in Insulation Oil", Proceeding of the 7th WSEAS Int. Conf. on Power Systems, pp.272~275, Beijing, China, Sep. 15~17, 2007.

(2) "Detection and Analysis of Series Arc Discharge in Indoor Wiring Systems", Proceeding of the 7th WSEAS Int. Conf. on Power Systems, pp.267~271, Beijing, China, Sep. 15~17, 2007.

(3) "Design and Fabrication of a Lightning Warning System", Proceeding of the 5th Asia Lightning Protection Forum, pp. 87~91, 2008. 4.

(4) "Analysis of Acoustic Signals Generated by Partial Discharges in Insulation Oil", Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp.525~528, IEEE, 2008.

(5) "Detection Algorithm of Series Arc for Electrical Fire Prediction", Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp.716~719, IEEE, 2008.

(6) "Study about Insulation Evaluation and Diagnosis for Electrical Power Systems of Hybrid Vehicle", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2008, No. P-179, 2008. 7.

(7) "Series Arc Detection in Inverter-Driven Air Conditioners", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2009, Paper No. I9FP0268.1-5, Shenyang, China, July 5~9, 2009.

(8) "A Study on the Frequency Dependence of Impedance and Risk Voltages in Grounding Systems", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2009, Paper No. I9FP0269.1-5, Shenyang, China, July 5~9, 2009.

(9) "Design and Fabrication of a Multi-function Ground Meter", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2009, Paper No. I9FP0270.1-5, Shenyang, China, July 5~9, 2009.

(10) "Detection and Analysis of Partial Discharge on Cast Resin Insulation System", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2009, Paper No. I9FP0271.1-6, Shenyang, China, July 5~9, 2009.

(11) "Disinfection of Phytoplankton by Application of UV LED", Proceeding of the 2th International Conference on Maritime and Naval Science and Engineering (MN'09), pp.87~91, Brasov, Romania, September 24~26, 2009.

(12) "Disinfection of Phytoplankton by Electrical Pulse Treatment", Proceeding of the 8th International Symposium on Marine Engineering, pp.P03.1~5, Busan, Korea, October 18~22, 2009.

(13) "Germicidal Efficacy on Tetraselmis sp. by UV Treatment", Proceeding of the 8th International Symposium on Marine Engineering, pp.P04.1~7, Busan, Korea, October 18~22, 2009.

(14) "Development of a Ballast Water Treatment System Using Medium-pressure Ultraviolet Lamps", Proceeding of the 8th International Symposium on Marine Engineering, pp.P08.1~5, Busan, Korea, October 18~22, 2009.

(15) "Partial Discharge Detection by a Capacitive Probe in a Cast-Resin Transformer", Proceeding of the 9th WSEAS Int. Conf. on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems (IMCAS'10), pp.98~101, Hangzhou, China, April 11~13, 2010.

(16) "Design and Field Test of a Wide-band Ground Impedance Meter", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2010, Paper No. 72.1～72.4, Busan, Korea, July 11～14, 2010.

(17) "Series Arc Detection by a Ultra-violet Sensor", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2010, Paper No. 73.1～73.4, Busan, Korea, July 11～14, 2010.

(18) "Acoustic Detection of Partial Discharge in Insulation Oil", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2010, Paper No. 73.1～73.5, Busan, Korea, July 11～14, 2010.

(19) "Disinfection of *Tetraselmis* sp. with UV LED Application", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2010, Paper No. 74.1～74.5, Busan, Korea, July 11～14, 2010.

(20) "Condition Monitoring Method of Closed Switchboards by Frequency Spectrum Analysis", Proceedings of 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp.1171～1174, IEEE, Sept. 6～11, 2010.

(21) "Measurement and Φ-q-n Analysis of Partial Discharge by a Capacitive Probe in a Dry-type Transformer", Proceedings of 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp.105～108, IEEE, Sept. 6～11, 2010.

(22) "Acoustic Detection of Partial Discharges in Insulation Oil", Proceeding of the 10th WSEAS Int. Conf. on INSTRUMENTATION, MEASUREMENT, CIRCUITS and SYSTEMS (IMCAS'11), pp.56～59, Venice, Italy, March 8～10, 2011.

(23) "Frequency Spectrum Analysis of Electromagnetic Waves Radiated by Electrical Discharges", Proceeding of the 10th WSEAS Int. Conf. on INSTRUMENTATION, MEASUREMENT, CIRCUITS and SYSTEMS (IMCAS'11), pp.65~69, Venice, Italy, March 8~10, 2011.

◎ 대학학술논문지

(1) "A New Wideband High Voltage Measurement System With An Integrated Optical Link", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제22집, pp.37~41, 2005.

(2) "서지에 대한 누전차단기의 오동작 특성", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제22집, pp.43~47, 2005.

(3) "변전소내 정보기기에서 서지의 측정과 분석", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제22집, pp.49~53, 2005.

(4) "가스절연변전소 피뢰설비의 관리를 위한 전문가 시스템 개발", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제25집, pp.65~70, 2008.

(5) "유중 부분방전에 의한 음향신호의 주파수특성 분석", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제25집, pp.71~74, 2008.

(6) "견인전동기의 절연성능평가", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제26집, pp.117~122, 2009.

(7) "탄소 복합차체의 낙뢰에 대한 안전성 고찰", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제26집, pp.123~127, 2009.

(8) "발광다이오드의 파장별 수중투과 특성 분석", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제26집, pp.129~132, 2009.

(9) "Analysis of Disinfection Characteristics of UV LED on *Tetraselmis* sp.", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제27집, pp.73~77, 2010.

(10) "Analysis of Partial Discharges as Defects of the CNCO-W Cable", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제27집, pp.79~83, 2010.

(11) "전기펄스에 의한 식물성 플랑크톤의 사멸", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제27집, pp.85~88, 2010.

(12) "A Study on the Photoreaction of Squids", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 연구논문집 제27집, pp.89~93, 2010.

◎ 국내학술회의 발표

(1) "피뢰기 진단을 위한 저항분 누설전류의 새로운 측정기법", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회(방전·플라즈마 분과), pp.73~75, 2004. 5. 21~22.

(2) "용량성 프로브를 이용한 광대역 전압측정장치", 대한전기학회 부산울산경남지회 합동춘계학술대회, pp.211~214, 2004. 5. 28.

(3) "변전소내 정보기기에서 서지의 측정과 분석", 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, 제8권, 제2호, pp.147~150, 한국해양정보통신학회, 2004. 10.

(4) "아발란치 다이오드의 서지응답 특성에 관한 연구", 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, 제8권, 제2호, pp.156~159, 한국해양정보통신학회, 2004. 10.

(5) "서지에 대한 누전차단기의 오동작 특성", 한국해양정보통신학회 추계종합학술대회 논문집, 제8권, 제2호, pp.160~263, 한국해양정보통신학회, 2004. 10.

(6) "고압 CV케이블에서의 부분방전 측정과 위치검출에 관한 연구", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.198~204, 2005. 5. 19.

(7) "저주파구동형 집어등용 전자식 안정기 개발", 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, 제9권, 제1호, pp.273~276, 한국해양정보통신학회, 2005. 5. 27~28.
(8) "국제규격 대응 컴퓨터 네트워크용 서지방호장치 개발에 관한 연구", 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, 제9권, 제1호, pp.277~280, 한국해양정보통신학회, 2005. 5. 27~28.
(9) "고휘도 short-arc 램프용 전자식 안정기 설계", 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, pp.233~238, 한국마린엔지니어링학회, 2005. 6. 23~25.
(10) "전원회로용 서지방호장치의 설계 및 제작", 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, pp.806~811, 한국마린엔지니어링학회, 2005. 6. 23~25.
(11) "직류전동차용 피뢰기 진단기술", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 143.1~143.6, 2006. 5. 18.
(12) "전기철도환경하에서의 서지방호용 절연변압기 제작 및 성능평가", 2006년도 대한전기학회 전기물성응용부문회 추계학술대회 논문집, pp.176~177, 2006. 10. 27~28.
(13) "Monitoring Device for Lightning Arresters in Overhead Power Distribution System", 대한전기학회 부산경남울산지회 춘계학술대회 논문집, pp.109~114, 2007. 5. 19.
(14) "가공배전선로의 전력설비 감시를 위한 유비쿼터스 센서", 대한전기학회 전력IT 연구회 춘계학술대회 논문집, pp.88~91, 2007. 5. 31.
(15) "AE센서를 이용한 유중 부분방전의 음향신호 측정 및 분석", 대한전기학회 '송배전 설비연구회' 및 '고전압 및 방전응용 기술연구회' 합동 춘계학술 발표회 논문집, pp.2.20~2.22, 2007. 6. 1.

(16) "유입변압기 진단을 위한 부분방전 검출방법", 대한전기학회 '송배전 설비연구회' 및 '고전압 및 방전응용 기술연구회' 합동 춘계학술 발표회 논문집, pp.2.23~2.26, 2007. 6. 1.
(17) "낙뢰 경보 시스템의 설계 및 제작", 대한전기학회 '송배전 설비연구회' 및 '고전압 및 방전응용 기술연구회' 합동 춘계학술 발표회 논문집, pp.2.27~2.30, 2007 .6. 1.
(18) "옥내배선에서의 직렬아크 특성 분석", 대한전기학회 '송배전 설비연구회' 및 '고전압 및 방전응용 기술연구회' 합동 춘계학술 발표회 논문집, pp.2.31~2.34, 2007. 6. 1.
(19) "가스절연개폐기에서 용량성 전압프로브를 이용한 부분방전 측정", 한국전기전자재료학회 2007년도 추계학술대회 논문집, pp.476~477, 2007. 11. 1~3.
(20) "병렬아크에 대한 누전차단기의 트립특성 분석", 한국전기전자재료학회 2007년도 추계학술대회 논문집, pp.478~479, 2007. 11. 1~3.
(21) "직렬아크 검출 알고리즘에 관한 연구", 2007 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.247.1~247.5, 2007. 11. 8~9.
(22) "인버터 구동 유도전동기에서 과도전압의 측정 및 분석", 2007 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.249.1~249.6, 2007. 11. 8~9.
(23) "AE센서를 이용한 유입변압기의 부분방전 검출장치", 2008년도 대한전기학회 경남지회 춘계학술대회, p.36, 2008. 5. 21.
(24) "접지시스템에서 접촉전압과 보폭전압의 비교측정", 2008 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.103.1~103.4, 2008. 6. 12~13.
(25) "탄소섬유 복합차체의 낙뢰에 대한 안전성 분석", 2008 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.105.1~105.6, 2008. 6. 12~13.
(26) "병렬아크의 고속 차단에 관한 연구", 2008 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.106.1~106.5, 2008. 6. 12~13.

(27) "부분방전 측정에 의한 저압용 유도전동기의 절연성능 평가", 2008 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.319.1～319.5, 2008. 6. 12～13.
(28) "서지전압에 의한 저압유도전동기의 절연평가", 2008 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.320.1～320.5, 2008. 6. 12～13.
(29) "불평형전류 측정에 의한 회전기 열화감시장치", 2008 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 341.1～341.5, 2008. 6. 12～13.
(30) "몰드변압기 절연진단기술에 관한 연구", 2008년도 대한전기학회 부산지회 춘계학술대회 논문집, pp.18～21, 2008. 6. 20.
(31) "다양한 전류원에 대한 접지시스템의 위험전압 측정과 분석", 2008년 대한전기학회 부산지회 춘계학술대회 논문집, pp.70～73, 2008. 6. 20.
(32) "고분자 복합소재차체를 적용한 바이모달트램의 전기적 절연 및 접지시스템에 관한 연구", 대한전기학회 제39회 하계학술대회 논문초록집, pp.1063～1064, 2008. 7. 16.
(33) "몰드변압기에서 부분방전 검출방법의 비교분석", 2008 한국조명전기설비학회 추계학술대회 논문집, pp.301～306, 2008. 10. 17.
(34) "다양한 전류원에서 접지동봉과 탄소접지봉의 임피던스 특성비교", 2008 한국조명전기설비학회 추계학술대회 논문집, pp. 293～296, 2008. 10. 17.
(35) "복합차체의 낙뢰에 대한 인체 안전성 분석", 2008 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.47.1～47.6, 2008. 11. 13～14.
(36) "하이브리드 차량용 견인전동기의 절연성능 비교분석", 2008 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.59.1～2008. 11. 13～14.
(37) "직렬아크 신호의 검출", 2008 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.60.1～60.5, 2008. 11. 13～14.
(38) "유중 부분방전 음향신호의 전달특성", 2009 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.841～847, 2009. 5. 21～22.

(39) "다전극 대지저항률 측정시스템", 2009 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.892～899, 2009. 5. 21～22.
(40) "에어컨에서의 직렬아크검출 알고리즘에 관한 연구", 2009 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.1970～1976, 2009. 5. 21～22.
(41) "도시철도차량에 LED 광원의 적용에 관한 연구", 2009 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.2050～2055, 2009. 5. 21～22.
(42) "전력케이블 절연결함에 따른 부분방전 특성 분석", 2009 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.1977～1983, 2009. 5. 21～22.
(43) "절연계의 결함별 부분방전 패턴분석", 대한전기학회 고전압·방전응용기술연구회 춘계학술대회 논문집, pp.97～99, 2009. 5. 29.
(44) "다전극을 이용한 위험전압 측정시스템", 대한전기학회 고전압·방전응용기술연구회 춘계학술대회 논문집, pp.72～74, 2009. 5. 29.
(45) "구형파 펄스에 의한 식물성 플랑크톤의 비활성화 특성 분석", 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, pp.445～446, 2009. 6. 17～19.
(46) "중압 수은램프를 이용한 선박평형수 처리시스템", 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, pp.443～444, 2009. 6. 17～19.
(47) "식물성 플랑크톤에 대한 자외선 발광다이오드의 살균특성 분석", 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, pp.91～92, 2009. 6. 17～19.
(48) "UV센서를 이용한 직렬아크신호의 광학적 검출", 2009 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.211.1～211.5, 2009. 11. 19～20.
(49) "광대역 접지임피던스 측정기의 설계 및 제작", 2009 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.212.1～212.5, 2009. 11. 19～20.
(50) "유중부분방전 음향신호의 주파수특성 분석", 2009 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.241.1～241.6, 2009. 11. 19～20.
(51) "용량성 안테나를 이용한 몰드변압기의 부분방전 측정", 2009 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.244.1～244.6, 2009. 11. 19～20.

(52) "지지애자의 열화진단을 위한 표면누설전류 검출방법", 2009년도 대한전기학회 부산지회 추계학술대회 논문집, pp.36～38, 2009. 12. 12.
(53) "LED 집어등의 설계 및 실증", 2009년도 대한전기학회 부산지회 추계학술대회 논문집, pp.39～42, 2009. 12. 12.
(54) "직렬아크 방전의 주파수 스펙트럼 분석", 2010년 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 및 산학연 기술 교류회 논문집, p.24, 2010. 3. 26～27.
(55) "광대역 접지임피던스 측정기의 설계", 2010년 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 및 산학연 기술 교류회 논문집, p.26, 2010. 3. 26～27.
(56) "자외선 발광다이오드에 의한 식물성 플랑크톤의 살균", 2010년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, pp.415～416, 2010. 4. 22～24.
(57) "UV 램프에 의한 미생물 살균 능력 분석", 2010년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, pp.419～420, 2010. 4. 22～24.
(58) "직렬아크 및 코로나 방전의 방사 전자파 주파수 스펙트럼 분석", 2010년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, pp.421～422, 2010. 4. 22～24.
(59) "선박용 LED 조명기기의 서지보호기술", 2010년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, pp.425～426, 2010. 4. 22～24.
(60) "자외선 램프의 광출력 비교 분석", 2010년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, pp.431～432, 2010. 4. 22～24.
(61) "방사전자파의 주파수분석에 의한 배전반 진단기술", 2010 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.62.1～62.5, 2010. 6. 10～12.
(62) "유중 부분방전의 위치 추정", 2010 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.307.1～307.7, 2010. 6. 10～12.
(63) "전극 구조에 따른 코로나 방전의 주파수 스펙트럼 분석", 2010년도 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, p.118, 2010. 6. 16～18.

(64) "용량성 프로브를 이용한 몰드변압기의 부분방전 위상분포 분석", 2010 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.536~542, 2010. 10. 28~30.
(65) "자외선 방식 BWTS의 필터 적용에 따른 살균효과 비교", 2010년 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, pp.389~390, 2010. 10. 28~30.
(66) "10m^3/h Pilot BWTS의 살균성능", 2010년 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, pp.391~392, 2010. 10. 28~30.
(67) "대지전계측정에 의한 낙뢰 경보 시스템", 2010년 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, pp.393~394, 2010. 10. 28~30.
(68) "살균 효율 향상을 위한 자외선 광원의 최적 배치", 2010년 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, pp.399~400, 2010. 10. 28~30.
(69) "UV Lamp에 따른 해수 살균능력 비교", 2010년 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, pp.403~404, 2010. 10. 28~30.
(70) "살균효율 향상을 위한 UV-LED 구동방법", 2010년 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, pp.405~406, 2010. 10. 28~30.
(71) "선박 전기전자기기용 서지방호장치의 제작", 2010년 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, pp.407~408, 2010. 10. 28~30.
(72) "에폭시수지 절연물에서의 부분방전 위상분포 분석", 2010 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, p.240, 2010. 11. 10~11.
(73) "웨이블렛 변환을 이용한 직렬아크 신호의 판별", 2010 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, p.241, 2010. 11. 10~11.
(74) "진동센서를 이용한 부분방전 측정 및 분석", 2010 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, p.242, 2010. 11. 10~11.
(75) "CNCO-W 케이블의 결함에 따른 부분방전펄스 위상분포 분석", 2011 한국조명전기설비학회 춘계학술대회 논문집, pp.263~264, 2011. 5. 12~13.

(76) "LabVIEW를 이용한 부분방전 분석장치의 설계 및 제작", 2011 한국조명전기설비학회 춘계학술대회 논문집, pp.265～266, 2011.5.12～13.
(77) "트래킹 결함을 갖는 CNCO-W 케이블에서 부분방전펄스의 위상분포", 2011년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, p.185, 2011. 6. 9～11.
(78) "함정용 LED 홍등의 설계 방안", 2011년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, p.186, 2011. 6. 9～11.
(79) "부분방전 측정장치의 제작 및 평가", 2011년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, p.187, 2011. 6. 9～11.
(80) "유중 부분방전 음향신호의 전달특성", 2011년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, p.188, 2011. 6. 9～11.
(81) "TiO_2 광촉매의 해수살균", 2011년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, p.189, 2011. 6. 9～11.
(82) "자외선 반응기의 구성에 따른 해수처리", 2011년 한국마린엔지니어링학회 전기공동학술대회 논문집, p.190, 2011. 6. 9～11.

◎ 연구보고서

(1) "가스절연개폐장치(GIS)용 피뢰기 열화진단장치 개발에 관한 연구", 2002. 2. 1～2002. 12. 28 p.40, (주) 효성.
(2) "전철용 피뢰기의 수명예측기법 개발에 관한 연구", 2002. 11. 1～2003. 7. 31, p.67, 한국철도기술연구원.
(3) "전철용 피뢰기의 진단장치 개발", 2003. 9. 1～2004. 4. 30, P.49, 한국철도기술연구원.
(4) "철도용 피뢰기의 최적관리방안에 관한 연구", 2004. 9. 14~2004. 12. 20, P.107, 한국철도기술연구원.

(5) "초고속 Marx 발전기 제작지원", 2004. 8. 1~2004. 12. 30, 태양엔지니어링.

(6) "저주파 구동형 1kW급 집어등용 전자식 안정기 개발", 2004. 5. 1~2005. 2. 28, 중소기업청.

(7) "정보시스템/기기용 국제규격대응 서지방호장치 개발", 2004. 6. 15~2005. 6. 14, P.52, 정보통신진흥연구원.

(8) "GIS용 피뢰설비의 열화감시시스템 개발", 2006. 3. 1~2007. 2. 28, P.136, 산업자원부.

(9) "IT 기술 기반 대전력기기 설계 및 진단기술 개발", 2006. 11. 1~2007. 10. 31, 한국전력공사.

(10) "특고압 배전선로 관리를 위한 유비쿼터스 전력센서개발", 2007. 4. 1~2008. 1.31, P.58, (주)효성중공업PG.

(11) "극미소 부분방전검출에 의한 전기전자기기의 신뢰성 평가기술 개발", 2007. 5. 1~2008. 4. 30, P.172, 한국산업기술재단.

(12) "수배전반의 지능형 부분방전 진단시스템 개발", 2007. 10. 1~2008. 6. 30, P.42, (주)케이디파워.

(13) "수배전반 아크검출시스템 개발", 2007. 10. 1~2008. 6. 30, P.39, (주)케이디파워.

(14) "하이브리드차량용 회전기 절연진단기술 개발 및 최적접지방법 연구", 2007. 6. 1~2008. 7. 31, P.55, 한국철도기술연구원.

(15) "접지임피던스 및 위험전압 측정기 개발과 이를 이용한 접지시스템 평가기법 연구", 2007. 8. 1~2008. 7. 31(1차년도), P.30, 지식경제부.

(16) "탄소복합차체의 낙뢰에 대한 영향분석", 2008. 7. 14~2008. 8. 30, P.20, (주)한국화이바.

(17) "뇌운 경보시스템용 일체형 대지전계 측정센서 개발", 2006. 10. 1 ~ 2008. 9. 30, P.36, 지식경제부.

(18) "배전용 감시진단 통합화 구조설계 개발", 2007. 12. 1～2009. 11. 30, P.23, (주)세니온.
(19) "에어컨용 직렬아크 검출회로 개발", 2008. 10. 1～2009. 3. 31, P.45, 삼성전자(주).
(20) "접지임피던스 및 위험전압 측정기 개발과 이를 이용한 접지시스템 평가기법 연구", 2008. 8. 1～2009. 7. 31(2차년도), P.36, 한국전기안전공사.

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교