



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

음향신호의 유중 전파특성에 관한
연구

A Study on the Propagation Characteristics
of Acoustic Signal in Insulation Oil



2016年 02月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

尹 民 榮

本 論文을 尹民榮의 工學碩士 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 李 成 根 ㉠



2015年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

尹 民 榮

목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	iii
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이 론	4
2.1 절연 및 열화	4
2.2 절연진단기술	8
제 3 장 실험 및 방법	15
3.1 실험계 구성	15
3.2 음향신호 검출	17
제 4 장 측정 및 분석	21
4.1 음향신호의 유중 전파특성	21
4.2 적용 실험	34
제 5 장 결 론	42

참 고 문 헌 44



그림 및 표 목차

<그림 목차>

그림 1.1	2013년도 전기설비사고통계	1
그림 2.1	부분방전의 등가회로	6
그림 2.2	부분방전 패턴	7
그림 2.3	옥조곡선	9
그림 2.4	음파의 입사파, 반사파 및 굴절파	14
그림 3.1	실험계	16
그림 3.2	음향센서 및 주파수 응답	17
그림 3.3	역결합회로	18
그림 3.4	역결합회로의 주파수 응답	19
그림 3.5	시제작 음향신호 증폭기	20
그림 3.6	음향신호 증폭기의 주파수 응답	20
그림 4.1	반사의 유중 전파경로	22
그림 4.2	전파경로별 방전펄스와 음향신호의 파형 예 (깊이 430 mm)	25
그림 4.3	전파경로별 방전펄스와 음향신호의 파형 예 (깊이 230 mm)	27
그림 4.4	전파경로별 방전펄스와 음향신호의 파형 예 (깊이 30 mm)	30
그림 4.5	거리에 따른 음향신호 도달시간	31
그림 4.6	유중에서 거리에 따른 속도변화	31
그림 4.7	교정펄스파형의 예	32
그림 4.8	인가 전하량과 출력전압의 관계	33
그림 4.9	실험계 구성	34
그림 4.10	검출파형의 예	36

그림 4.11	위치표정 알고리즘 VI	38
그림 4.12	부분방전의 위치	39
그림 4.13	측정 결과	41



<표 목차>

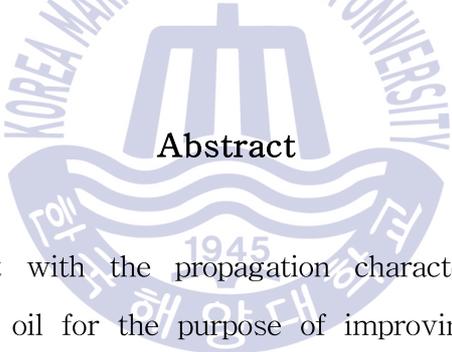
표 2.1 열화 원인	5
표 2.2 변압기 이상에 따른 발생가스 성분	11
표 2.3 음향특성	12
표 2.4 반사율	13
표 3.1 실험장치 사양	16
표 4.1 전파경로별 이동거리 및 도달시간 (깊이 430 mm)	23
표 4.2 전파경로별 이동거리 및 도달시간 (깊이 230 mm)	26
표 4.3 전파경로별 이동거리 및 도달시간 (깊이 30 mm)	28



A Study on the Propagation Characteristics of Acoustic Signal in Insulation Oil

by Min-Young Yun

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



Abstract

This thesis dealt with the propagation characteristics of acoustic signal in insulation oil for the purpose of improving the reliability of acoustic emission (AE) method used for degradation monitoring of oil-immersed transformers.

A discharge source was placed in insulation oil and AE sensors (140 kHz) were attached on the oil tank to study the changes of velocity and propagation path with the depth and distance. The average velocity was 1,436m/s and the velocity decreased with the increase of depth from the oil surface to 430 mm. The propagation paths were classified into three sections by the shortest reflection path of the detected signal. The minimum distinguishable distance in each section

was 70 mm.

In addition, with the application of average velocity and propagation path, a partial discharge (PD) positioning algorithm was designed using the time of arrival (TOA) based on LabVIEW program. It was also verified that PD with a magnitude over than 526.3pC can be detected by the AE sensors. The proposed algorithm could localize PD with a error below 2%, which was 2% higher than the conventional method.



제 1 장 서 론

최근 산업의 급속한 발전에 따라 전력수요가 증가되고 그에 따른 전력설비의 신뢰성이 요구되어 절연진단기술에 대한 중요성이 부각되고 있다. 현재 전력설비의 유지 보수 및 절연진단분야는 우리나라를 포함한 각 선진국을 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있다. 이러한 기술은 기기의 절연열화 및 이상 유무를 상시 감시하여 향후 발생 가능한 사고를 조기에 발견하고 유지 보수함으로써, 신뢰성 및 경제성을 확보할 수 있다^[1~5].

따라서 전력설비의 사고를 사전에 방지하여 경제 및 기술적으로 발생 가능한 막대한 피해를 막을 수 있다.

2013년도 전기설비사고통계 자료를 토대로 절연 불량으로 인한 사고가 22%, 자연열화로 인한 사고가 16%로 발생했으며, 그림 1.1에 나타내었다.

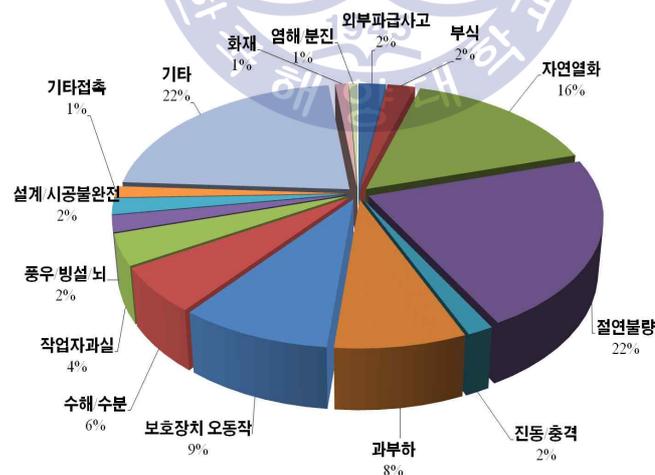


그림 1.1 2013년도 전기설비사고통계 (전기안전포탈시스템, 2013)

Fig. 1.1 Statistics of electric equipment fault in 2013
(Electrical safety portal system, 2013)

통계에 따르면 절연불량으로 인한 사고가 가장 많은 부분을 차지하고 있으며, 그에 따른 진단이 더 절실한 실정이다. 절연 파괴의 원인으로는 전기적요인, 열적요인, 기계적요인 및 환경적요인이 있다. 그 중 전기적요인은 제작과정에서 이물질 및 수분이 함유되어 부분방전 발생하게 되는데 초기에는 영향이 없지만 장기간 지속될 경우 큰 사고로 이어질 수 있다.

유입변압기를 장시간 사용하게 되면 절연유와 프레스보드와 같은 절연물의 절연열화에 의한 고장이 발생한다. 절연체 내·외부에 기포와 Crack과 같은 결함에 전계집중이 되면 부분방전이 발생한다. 부분방전이 지속적으로 발생하게 되면 절연파괴로 이어지는데 변압기에서의 부분방전은 고장의 주요원인으로 안정적인 전력공급을 위해 부분방전 측정이 요구된다.

전력기기를 진단하는 방법은 전원을 차단하여 진단을 하는 오프라인 진단법과 지속적인 모니터링으로 진단을 하는 온라인 진단법이 있다. 오프라인 진단법은 대표적으로 IEC 60270에 의한 전기적 측정으로 정밀한 진단이 가능하나 전원을 차단 시켜야 된다는 단점이 있다. 반면, 온라인 진단법은 실시간 모니터링이 가능하여 유지 보수 및 자산관리를 관리하는데 효율적이다^[6~8]. 온라인 진단법에는 음향검출법, 유증가스검출법 및 광학적 검출법이 있으며, 그 중 음향검출법은 센서의 설치가 간편하고 전기적으로 절연되어 있어 주변 전자계의 노이즈에 강한 장점이 있다. 또한 다수의 센서를 설치하여 음향신호의 도달시간차를 측정하면 부분방전의 위치를 추정할 수 있다. 그러나 기존 연구는 음파의 유증 전파특성과 관계없이 입사 신호만으로 부분방전의 발생 유무와 위치만을 분석하였다^[9~11]. 음향신호의 정확한 검출을 위해서는 방전에 의해 발생하는 음향신호의 전파특성을 분석할 필요가 있다.

따라서 유입변압기의 상시 절연진단기술 중 음향검출기술의 신뢰성을 확

보하기 위하여 유중에서 발생하는 부분방전 발생을 모의하고, 이때 발생하는 음향신호를 검출하여 전파특성 및 위치표정에 관한 연구가 필요하다.



제 2 장 이 론

2.1 절연 및 열화

절연이란 도체와 도체사이의 절연을 목적으로 사용하는 것으로 대표적으로 액체 형태의 절연유, 고체 형태의 프레스보드 및 기체 형태의 SF₆ 등과 같은 절연물이 있다.

유입변압기를 구성하는 주재료는 도전재료로서의 동, 알루미늄, 철심으로서의 규소강대, 구조재료로서의 강재, 절연재료로서의 절연유, 셀룰로오스를 주재료로 하는 절연지, 프레스보드 등의 절연물이 있다. 유입변압기는 전기적, 기계적 스트레스 등을 받으면 시간의 흐름에 따라 초기의 절연성능이 저하된다. 특히 절연유, 절연지, 프레스보드 등의 경우에는 복합적인 절연구성을 형성하고 있어 절연열화와 재료의 종류에 의해 각각 다르게 나타나며, 그 결과 변압기 수명에 큰 폭의 차이가 생긴다.

절연물의 열화현상은 사용 환경, 사용 조건, 절연재료의 구성에 따라 다양한 특성을 가지기 때문에 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하여 절연물의 열화가 발생된다. 절연유의 열화는 공기중의 수분의 흡수나 불순물의 흡입을 통해 발생되며 최대의 요인은 절연유가 고온에서 공기와 접촉하여 발생하는 산화현상이다. 특히 절연유, 절연지 등과 같은 절연재료의 열화현상은 유입변압기의 절연수명을 악화시킨다^[12].

운전 중 기기의 온도 상승에 따른 열적 열화, 과도한 진동 및 급격한 부하변동에 따른 기계적 열화, 절연재료의 절연내력이 이상전압으로 인하여 약화되는 전기적 열화, 제조시 결함이나 사용 환경에 따른 수분이나 먼지 등에 의한 환경적 열화 등으로 분류되며, 이러한 열화요인이 복합적으로 작용하여 변압기의 성능과 수명이 저하된다. 그 결과 변압기에서는 기계적

강도 저하, 유증 가스발생, 진동 및 소음증가, 부분방전 발생 등으로 인한 절연파괴가 발생한다.

유입변압기에는 여러 가지 스트레스에 의해 절연유 내부에 기포나 가스가 발생하며, 절연지의 중합도가 저하되는 등 본래의 절연성능을 악화시키는 절연열화현상이 발생한다. 전력설비의 절연열화는 다음과 같은 원인에 의해 발생하며, 표 2.1에 나타내었다.

표 2.1 열화 원인

Table 2.1 Causes of deterioration

열화 원인		열화 현상
전기적요인	서지전압	부분방전, 트래킹, 전기트리
열적요인	발열	절연층의 건조, 보이드, 박리의 생성, 썩기 폴립
기계적요인	진동, 충격	절연층의 박리 균열, 마모, 묽음 폴립, 지지재의 균열
환경요인	먼지, 수분	절연특성의 저하, 박리, 팽윤, 마모

유입변압기에서 절연열화에 따른 사고에는 이상전압에 따른 절연재료의 절연내력이 약화되어 스파크를 동반한 부분방전이 발생하며, 이로 인하여 절연유나 절연지로부터 가연성 가스가 발생한다^[13].

부분방전의 발생 메커니즘은 그림 2.2의 등가회로를 사용하여 설명할 수 있다^[14~16]. 그림 2.1에서 영역 I은 절연체에 결함이 존재하는 부분이며, II 영역은 절연체의 전체부분으로 나타낼 수 있다. 결함부분에서 보이드의 정전용량은 c 로 이것은 절연파괴 통로로서 작용하게 되며, b 는 보이드와 직렬로 접속되는 나머지 부분의 정전용량이고, a 는 정상적인 부분의 정전용량 값을 나타낸다.

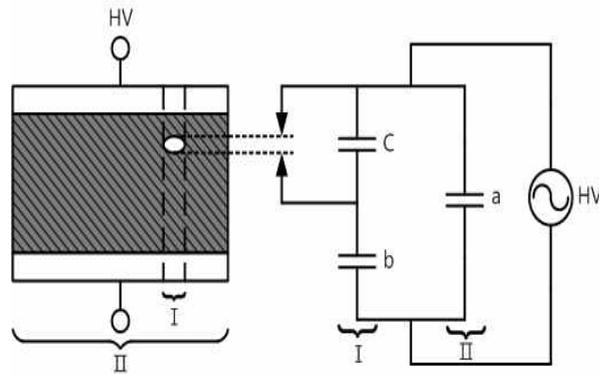


그림 2.1 부분방전의 등가회로

Fig. 2.1 Equivalent circuit of partial discharge

장기적인 열화에 의한 절연과피는 전원의 차이에 따라 다르며, 일반적으로 글로우방전의 형식으로 이루어지며 아크방전으로 진전되기도 한다. 아크방전의 경우 발생하는 열에 의해 절연물이 심각하게 손상된다.

그림 2.2와 같은 방전과형에서 보이드 내에서 발생하는 방전전하량 q_I 은 식 (2.1)과 같이 표현된다.

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

여기서, $\Delta V = U - V$ 로 보이드 내의 전압강하분이다. 그러나 q_I 은 직접 검출이 불가능하므로 방전 발생시 리드선을 통해 흐르는 방전전하를 측정함으로써 방전의 크기를 정의한다.

이때 방전전하량 q 는

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

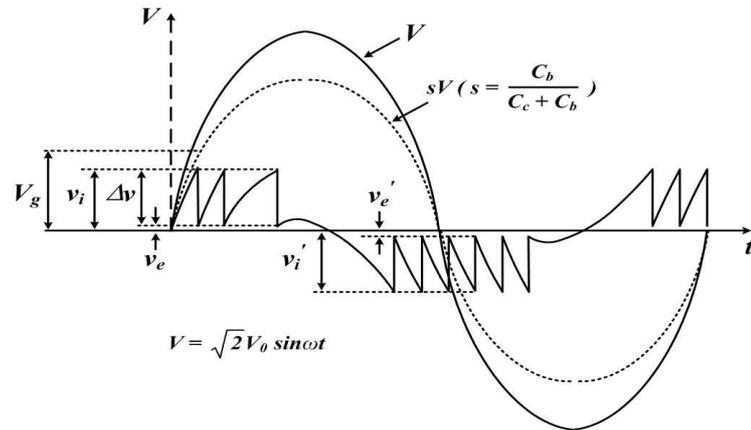


그림 2.2 부분방전 패턴

Fig. 2.2 Typical patterns of PD

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

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

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

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

그리고, 방전개시전압은 $U = \frac{b}{b+c} V_i$ 와 같이 표현되는데 여기서, V_i 는 시료에서 방전이 발생하는 외부 방전개시전압이다. 그러므로

식 (2.4)는 아래와 같이 다시 정리할 수 있다.

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

식 (2.5)에서 b 는 c 와 비교하여 아주 작은 값이기 때문에 식 (2.6)과 같다.

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

2.2 절연진단기술

전극과 전극사이에 있는 절연물 내에서의 전기적 방전을 부분방전(PD, Partial Discharge) 이라 칭하며, 전극간에 파괴에 이르지 않으면서 발생되는 작은 방전들 전체를 지칭한다. 부분방전에는 돌출부에서 발생하는 코로나 방전, 보이드에서 발생하는 내부방전, 표면을 따라 발생하는 연면방전 등이 있다. 부분방전이 발생하는 초기에 크기가 미세하지만 시간 흐름에 따라 점차 크기가 증가하고, 최종적으로 절연을 파괴하기 때문에 방전발생원 추정과 열화정도를 진단하기 위해서는 정확한 부분방전 측정이 필요하다. 그러나 부분방전 측정은 매우 복잡하고 다양한 형태로 발생하기 때문에 측정된 방전펄스를 절연체 중심으로 내부방전과 외부방전으로 구분하고, 부분방전 발생 메커니즘 및 특성을 파악하여 유입변압기에서 발생하는 부분방전에 대하여 검토하여야 한다.

절연시스템의 설계 및 제작 시 절연체 내부에는 보이드와 같은 결함이 존재하지 않아야 하나, 실제 변압기에서 완전히 결함을 제거하기는 불가능하다. 특히 제조상 내부에 발생한 아주 미소한 보이드는 절연특성에 큰 영향을 주지는 못하지만, 전기설비의 지속적인 운행에 따라 각종 열화가

진행되면 절연체 내부의 보이드의 크기가 확장되며, 다수의 보이드가 생성된다^[17]. 결과적으로 절연과피를 발생시켜 전력설비의 수명이 짧아지게 되는데, 이처럼 고장률이 시간에 따라 변화를 그래프로 나타낸 것을 육조곡선이라 한다^[18].

육조곡선은 설계나 제조상의 결함 또는 불량부품으로 인하여 발생하는 초기고장기간(DFR, Decreasing Failure Rate), 제품의 사용조건의 우발적인 변화에 기인한 우발고장기간(CFR, Constant Failure Rate), 마모·노화 등의 원인에 의한 마모고장기간(IFR, Increasing Failure Rate)으로 구분된다. 유입변압기에서는 고장의 발생상황은 시간의 경과에 따라서 특정 고장 패턴에 따른다는 것이 잘 알려져 있고, 그림 2.3에 나타내었다.

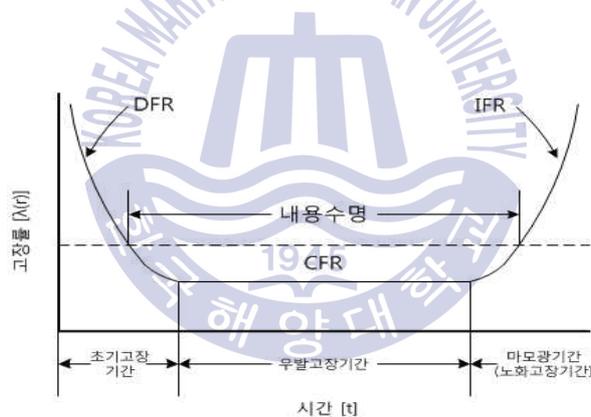


그림 2.3 육조곡선

Fig. 2.3 Bathtub curve

유입변압기는 전력설비 중 매우 중요한 설비로 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. 검출 방법에는 유증가스 분석에 의한 진단과 음향신호 검출법, 전기적 검출법 및 전자파를 이용한 UHF법 등이 있다.

(1) 전기적 검출법

변압기 내부에서 절연 열화, 접촉 불량 등으로 인한 부분방전이 발생하면 펄스성 전압변화가 나타난다. 부분방전에 의한 방전전류는 검출임피던스, 커플링 캐패시터와 접지선에서 측정 가능한 로고스키코일 또는 고주파 변류기 등을 이용하여 검출한다. 전기적 검출법은 다른 검출법에 비해서 감도가 좋지만 주변 기기에 의한 노이즈의 영향이 매우 크고, 실시간으로 측정이 불가능하다는 단점이 있다^[19~21]. 따라서 초고압의 경우 운전 중 결합회로망의 설치가 불가능하므로 현장에서 적용하기가 힘든 실정이다.

(2) 유증가스 분석 검출법

변압기 내부에 국부적인 가열 및 부분방전이 발생하면 절연유 및 절연지가 분해되면서 여러 종류의 가스가 발생한다. 이 분해가스는 절연유에 용해되므로, 유증 용존가스를 가스 크로마토그래피(Gas chromatography)로 분석하여 가스 성분, 발생량, 경시변화를 파악하여 변압기 열화 진전 상태를 판단할 수 있다^[22~24]. 유증가스 분석 진단장치에는 가스 크로마토그래피 외에도 수소가스 상시 감시장치와 다종류가스 자동분석장치 등이 있다. 일반적으로 분석 대상가스는 다음의 9종류 'O₂(산소), N₂(질소), H₂(수소), CH₄(메탄), C₂H₆(에탄), C₂H₄(에틸렌), CO(일산화탄소), CO₂(이산화탄소), H₂O(수증기)'이다.

화탄소)지만, 필요에 따라서 C₃, C₄계 탄화수소가스도 분석하기도 한다. 변압기 이상에 따른 발생가스 성분을 표 2.2에 나타냈다. 절연유중 방전에 의해 나타나는 특징 가스는 수소(H₂)와 아세틸렌(C₂H₂)가스인데, 특히 수소가스는 부분방전과 같은 저에너지 방전에서 나타나는 가스로 잘 알려져 있다.

표 2.2 변압기 이상에 따른 발생가스 성분

Table 2.2 Gases generated by faults in an oil immersed transformer

이상의 종류		주요 발생 가스
과열에 의한 열화	절연유	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₆
	고체절연물	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆
방전에 의한 열화	절연유	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆
	고체절연물	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄

(3) 전자파 검출법 (UHF 검출법)

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^[25~27].

(4) 음향신호 검출법

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 (2.7)과 같이 나타낼 수 있다^[28].

$$P_v = \rho \cdot c \quad (2.7)$$

여기서 P 는 음압, v 는 입자 속도, ρ 는 매질의 밀도, c 는 음속이다. 표 2.3에 여러 가지 매질에 대한 음향특성을 나타내었다.

표 2.3 음향특성

Table 2.3 Acoustic characteristics of medium

매 질	음향임피던스 [kg/m ³]	속도 [m/s]	밀도 [kg/m ³]
공기	0.00004	343	0.001
물	0.15	1,490	1.00
알루미늄	1.70	6,300	2.70
절연유	0.12	1,400 ~ 1,500	0.86
철	0.69	5,000 ~ 6,000	1.27
프레스보드	0.18	2,000	0.9 ~ 1.3

두 매질에 대한 음향임피던스의 차이에 의해 결정되는 투과와 반사의 정도를 표시하는 것이 투과율과 반사율이며 그 식은 다음과 같다.

$$\text{반사율 (R)} = \frac{\text{반사파의 강도}}{\text{입사파의 강도}} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (2.8)$$

$$\text{투과율 (T)} = \frac{\text{투과파의 강도}}{\text{입사파의 강도}} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.9)$$

여기서 Z_1, Z_2 는 입사와 투과측 물질에 대한 각각의 고유 음향임피던스이며, 음향임피던스의 차이가 클수록 반사율이 커지기 때문에 입사파의 일부분만 경계면을 통과하여 전달되며, 만약 같은 매질일 경우 음향 임피던스는 $Z_1 = Z_2$ 이므로 반사율은 영(Zero)이 된다. 대표적인 매질들 간의 반사율을 표 2.4에 나타내었다.

표 2.4 반사율

Table 2.4 Reflection coefficients between different mediums

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

그림 2.4에는 매질이 다른 두 경계면을 중심으로 입사파의 반사와 투과, 굴절과의 관계를 나타내었다. 입사파가 경계면으로 비스듬히 전파될 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, 반사각과 입사각은 항상 동일하다.

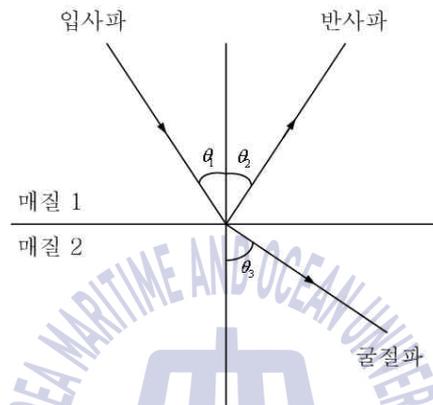


그림 2.4 음파의 입사파, 반사파 및 굴절파

Fig. 2.4 Incidence, reflection and refraction of acoustic wave

변압기 내부에서 부분방전이 발생하면 이것에 수반하여 초음파가 발생한다. 이 초음파는 변압기내에 매질을 통해 압력진동파로 변압기 탱크 내부 혹은 탱크 외벽에 설치한 초음파 센서에 입력되고, 입력된 음향적 신호를 전기적 신호로 변환, 신호를 증폭시켜 전기적 부분방전량과 상관관계를 통하여 부분방전량을 측정할 수 있다. 음향신호를 이용한 변압기 진단은 (음향검출법) 센서를 변압기 외함에 부착하기 때문에 설치가 간편하고 주변 전자계의 영향을 덜 받아 측정이 편하다는 장점이 있다^{[29],[30]}. 음향신호의 측정을 위해서는 센서, 증폭기 및 필터 등의 주변 장치가 필요하다.

또한 파장의 전파속도는 공기 중에서는 340 m/s, 수중 또는 유중에서는 1,400 ~ 1,500 m/s, 금속 중에서는 6,000 m/s 등 재질에 따라 다르게 나타나므로, 이를 이용한 시간차로 하여 부분방전 발생위치를 추정할 수 있다.

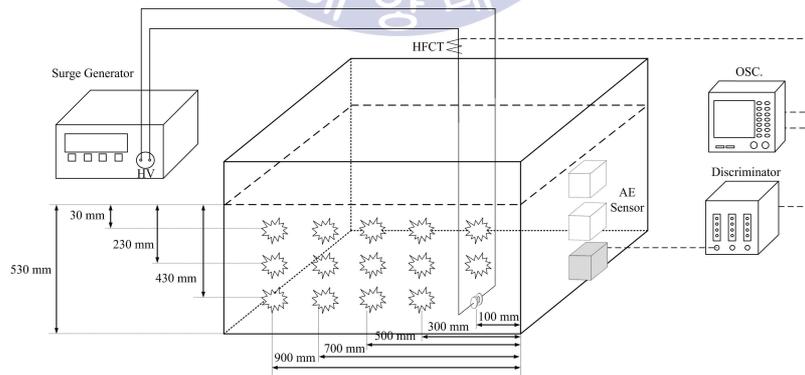
제 3 장 실험 및 방법

3.1 실험계 구성

유중에서의 음향신호 전달특성을 파악하기 위하여 유입변압기를 모의한 유중탱크(1,000 mm x 740 mm x 740 mm)에 Surge generator를 이용하여 1 kV의 임펄스(1.2/50 μ s)를 방전관에 인가하여 유중 음향신호를 발생 시켰다. 깊이를 30 mm, 230 mm 및 430 mm씩 위치하여 각각 거리를 100 mm, 300 mm, 500 mm, 700 mm 및 900 mm 변화시키면서 동일한 크기의 방전을 발생하였을 때 방전펄스와 음향신호를 측정하였다.

또한 개폐서지로 인한 노이즈를 제거하기 위해 인가전원(Surge generator) 과 측정기기 전원은 서로 분리시켜 실험을 진행하였으며, 측정기기는 전원 노이즈를 제거하기 위해 NCT를 사용하였다.

일정한 크기의 임펄스를 인가하였을 때 유중 전파특성을 파악할 수 있도록 구성하였고, 그림 3.1에 나타내었다.



(a) 구성도



(b) 사진

그림 3.1 실험계

Fig. 3.1 Experimental system

표 3.1 실험장치 사양

Table 3.1 Specifications of experiment equipment

기기명	사 양
전원장치	표준 뇌 임펄스 1.2/50 μ s, 4.2 kV _{max} 상용주파수 전압 220 V/15 kV
오실로스코프	1 GHz, 5 GS/s, 4 CH
Discriminator	11 kHz ~ 5.5 MHz (-3 dB), 40 dB
협대역 AE센서	공진주파수 140 kHz
HFCT	200 k ~ 10 MHz (-3 dB)

3.2 음향신호 검출

유중에서 발생하는 부분방전에 의한 음향검출 및 주파수 성분의 분석을 위하여 공진주파수 140 kHz인 AE센서를 사용하였다. 그림 3.2에 (a)는 센서의 검출면 내부에 압전 소자를 붙여 전달된 음향신호를 검출한다. 센서의 주파수 응답은 (b)에서와 같이 140 kHz에서 15 dB이상을 보인다.

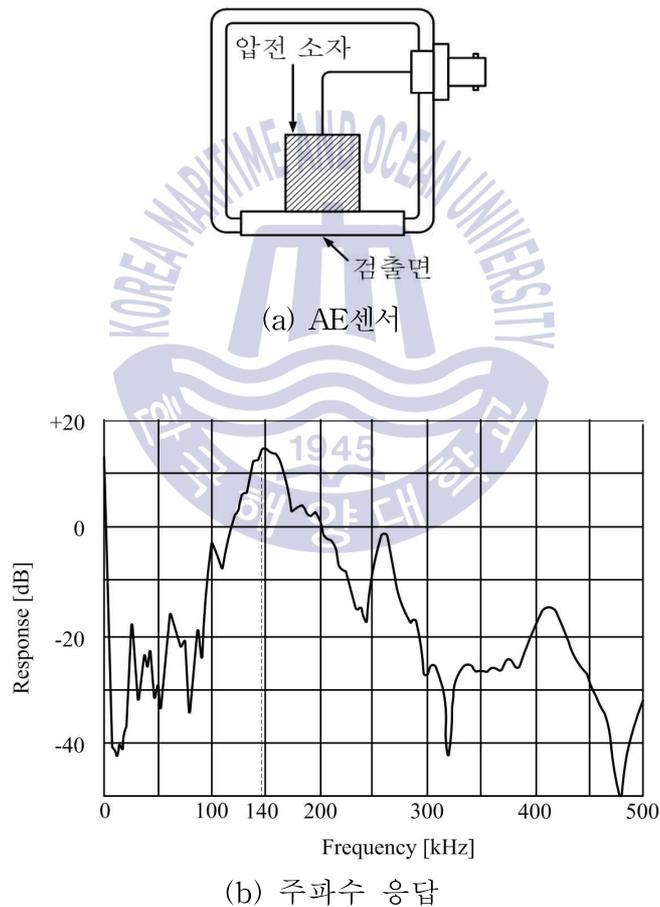


그림 3.2 음향센서 및 주파수 응답

Fig. 3.2 Frequency response of AE sensor

AE센서는 마그네트 홀더와 세트로 구성되어 변압기 외함에 탈부착이 용이하지만 전원선과 신호선을 공통으로 사용하므로 전원과 음향신호를 분리하기 위한 역결합회로 (Decouple)가 필요하다. 또한 AE센서의 음향신호는 매우 미소하므로 측정감도를 개선하기 위한 증폭기도 필요하다.

따라서 음향신호만을 검출하기 위하여 LC 소자로 구성된 역결합회로를 그림 3.3에 나타내었다. L1-C2에 의해 직류전원의 고주파 성분이 차단되고, 직류전원만 안전하게 센서에 공급되어진다. 또한 AE센서에서 검출된 음향신호는 R1-C3에 의해 전원측으로는 차단되며, 오직 콘덴서 C4를 통해 음향신호만을 검출할 수 있도록 설계하였다.

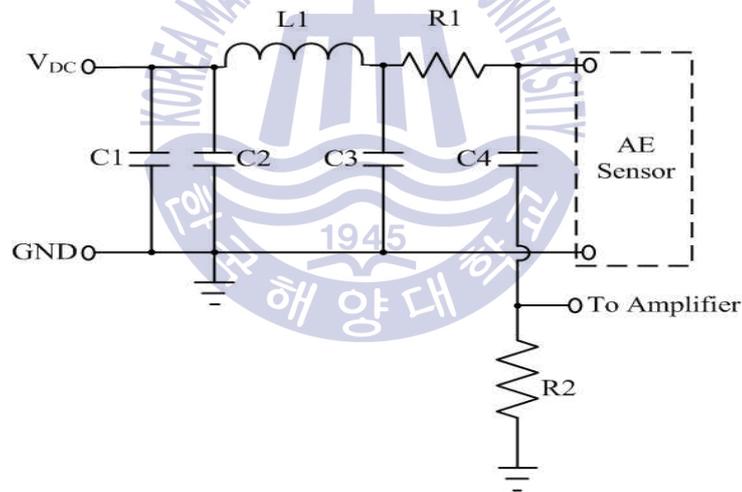


그림 3.3 역결합회로

Fig. 3.3 Circuit of the decoupler

역결합회로의 주파수 응답은 그림 3.4와 같으며, AE센서에서 전원측으로 10 kHz이상의 음향신호는 200 dB이상 감쇄시키며, 증폭회로의 입력단측, R2로는 감쇄 없이 전달된다.

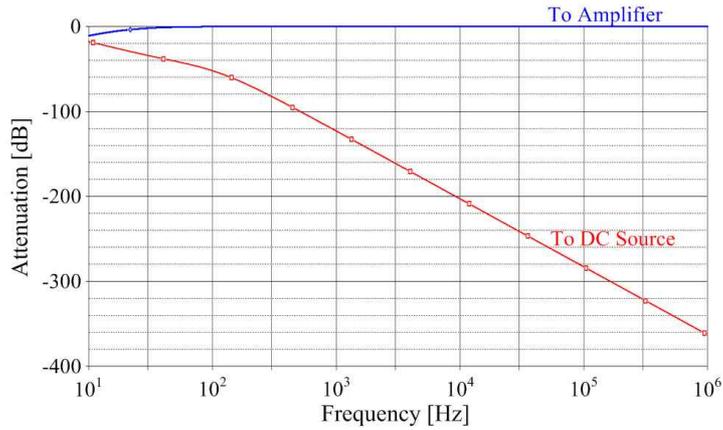
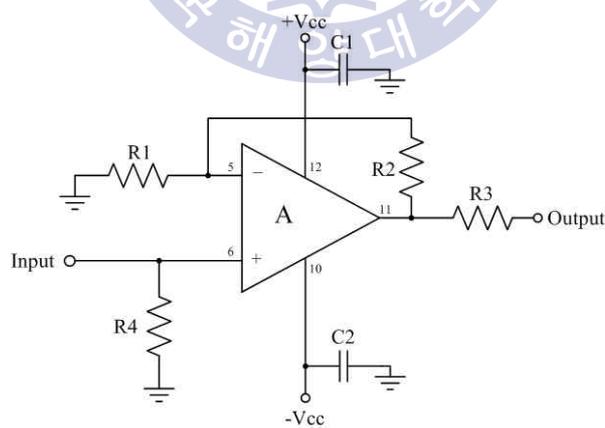


그림 3.4 역결합회로의 주파수 응답

Fig. 3.4 Frequency response of the decoupler

검출된 음향신호는 매우 미소하기 때문에 측정감도를 개선하기 위하여 그림 3.5와 같이 음향신호 증폭회로를 설계하였다. 증폭회로에는 고이득의 연산증폭기(~140 MHz)를 사용하였으며, 이득은 40 dB 즉 100배로 설계하였다.



(a) 회로도



(b) 사진

그림 3.5 시제작 음향신호 증폭기

Fig. 3.5 Prototype of acoustic signal amplifier

음향신호 검출회로의 주파수 응답은 함수발생기로 1 kHz에서 10 MHz 까지 정현파 입력전압에 대한 출력전압의 비율로써 분석하였으며, 그림 3.6과 같이 -3 dB의 주파수대역은 11 kHz~5.5 MHz로 AE센서의 주파수 대역을 충분히 포함한다.

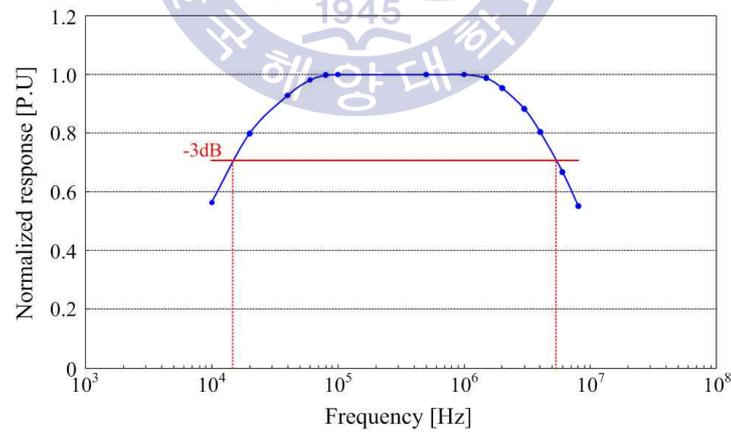


그림 3.6 음향신호 증폭기의 주파수 응답

Fig. 3.6 Frequency response of the prototype acoustic signal

제 4 장 측정 및 분석

절연유 내부에 방전관을 설치하여 음향신호의 절연유 내부에서의 전파 특성을 분석하고 부분방전을 모의하여 음향신호의 도달시간을 측정하였다. 또한 음향신호의 절연유 내부에서의 전파특성과 위치표정에 대하여 연구하였다.

4.1 음향신호의 유중 전파특성

음향신호는 매질에 따라 전파되는 특성이 다르며 유중에서 음향신호가 전파하는 특성을 알면 도달하는 전달경로를 파악할 수 있다. 그러나 음향 검출법은 음향신호만으로는 부분방전 전하량을 검출할 수 없기 때문에 전하량을 측정할 수 있는 장비와 함께 음향신호를 검출해야 하는 단점이 있다. 따라서 그림 4.1과 같이 실험계를 구성하고 동일한 크기의 방전 발생 시 음향신호의 거리에 따른 전파특성에 대하여 연구하였다.

깊이와 거리에 따른 속도와 도달시간의 특성을 확인하기 위한 실험을 진하였다. 깊이 430 mm에서 거리에 따른 유중 음향신호의 도달시간과 속도는 100 mm에서 각각 $71.2 \mu\text{s}$ 와 $1,404 \text{ m/s}$, 300 mm에서 $213.2 \mu\text{s}$ 와 $1,407 \text{ m/s}$, 500 mm에서 $352.3 \mu\text{s}$ 와 $1,419 \text{ m/s}$, 700 mm에서 $491.1 \mu\text{s}$ 와 $1,428 \text{ m/s}$ 및 900 mm에서 $627 \mu\text{s}$ 와 $1,435 \text{ m/s}$ 가 측정되었다. 거리에 따라 속도는 약 2%의 차이를 보이며 평균속도는 약 $1,419 \text{ m/s}$ 이다.

또한 그림 4.1와 같이 음향신호가 반사되는 방향과 속도를 알면 반사되어 검출되는 신호의 구간을 나눌 수 있다.

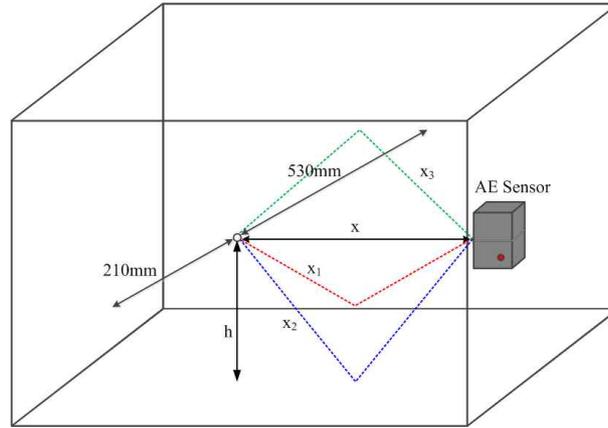


그림 4.1 반사의 유중 전파경로

Fig. 4.1 Propagation paths of reflection in insulation oil

센서로부터 100 mm 거리에서 가장 먼저 검출되는 신호(제 1 구간의 시작지점)는 유중으로부터 직접 전달되는 신호로 $71.2\mu\text{s}$ 의 도달시간이 측정됐다. 제 1 구간은 100 mm의 지면으로부터 반사되었을 때의 최단거리를 갖는 식 4.1로 계산을 하여

$$= h + \left(\frac{y}{2}\right)^2 \quad (4.1)$$

한 면의 거리를 구할 수 있다. 계산을 통해 $x = 111.8\text{ mm}$ 로 총 이동거리 및 도달시간은 각각 223.6 mm , $158.94\mu\text{s}$ 로 산출되었고, 음향신호가 검출되기 전 구간을 제외하면 $87.74\mu\text{s}$ 가 제 1 구간임을 알 수 있다. 따라서 반사되어 들어가기 전에 음향신호는 유중에서 직접 들어가는 신호라는 것을 알 수 있다. 두 번째로 반사되어 전달되는 최단거리는 방전발생원에서 210 mm의 거리로부터 외함의 측면을 통해 반사되는 신호로써 이동거리와 도달시간은 각각 431.74 mm , $300.58\mu\text{s}$ 로 산출되었다. 제 1 구간을 포함하

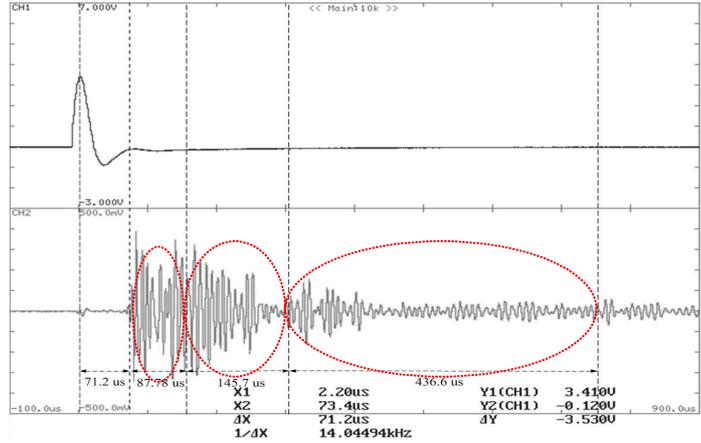
는 영역인 $300.58\mu\text{s}$ 에서 제 1 구간을 제외하면 $144.9\mu\text{s}$ 가 제 2 구간이 된다. 제 3 구간은 방전 발생원으로부터 530 mm 거리에서 전파되었을 때, $x=532.3\text{ mm}$ 로 AE센서까지 이동거리는 1064.6 mm이다. 도달시간을 계산한 결과 $741.27\mu\text{s}$ 가 산출되었고 제 1 구간과 제 2 구간을 제외한 영역은 $436.6\mu\text{s}$ 로 제 3 구간이 되고 그림 4.2에 나타내었다.

하지만 센서와 방전원으로부터 사이의 거리가 300 mm, 500 mm, 700 mm 및 900 mm의 제 1 구간은 직접 전달되는 거리와 거리차이가 20~67 mm까지로 직접 전파되는 파형의 도달시간과 가까워 겹쳐짐을 알 수 있다. 표 4.1는 같은 방법으로 방전원의 깊이 430 mm에서 센서로부터 거리별로 각각 100 mm, 300 mm, 500 mm, 700 mm 및 900 mm까지의 1~3 구간을 선정하였다.

표 4.1 전파경로별 이동거리 및 도달시간 (깊이 430 mm)

Table. 4.1 Distance and TOA by propagation paths (depth=430 mm)

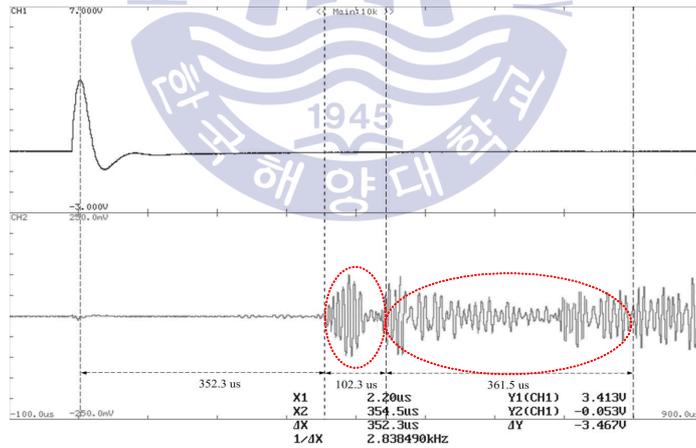
구분 거리 [mm]	제 1 구간		제 2 구간		제 3 구간	
	거리 [mm]	시간 [μs]	거리 [mm]	시간 [μs]	거리 [mm]	시간 [μs]
100	223.6	87.7	431.7	145.7	1,064.7	436.6
300	367.4	판단불능	516.1	108.4	1,101.1	407.3
500	538.3	판단불능	652.9	102.3	1,172.0	361.5
700	728.0	판단불능	816.3	78.3	1,270.2	316.1
900	921.9	판단불능	993.1	64.5	1,390.5	276.8



상: 방전펄스 [1.00 V/div, 100 μ s/div]

하: 음향신호 [100 mV/div, 100 μ s/div]

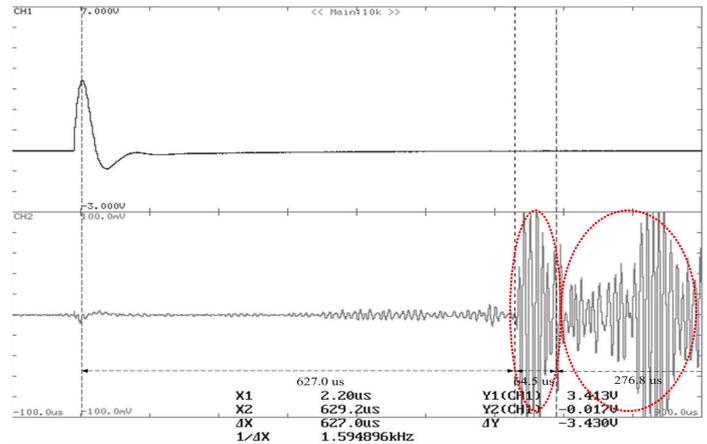
(a) 100 mm



상: 방전펄스 [1.00 V/div, 100 μ s/div]

하: 음향신호 [50 mV/div, 100 μ s/div]

(b) 500 mm



상: 방전펄스 [1.00 V/div, 100 μ s/div]

하: 음향신호 [20 mV/div, 100 μ s/div]

(c) 900 mm

그림 4.2 전파경로별 방전펄스와 음향신호의 파형 예 (깊이 430 mm)

Fig. 4.2 Examples of discharge pulse and acoustic signal by propagation paths (depth=430 mm)

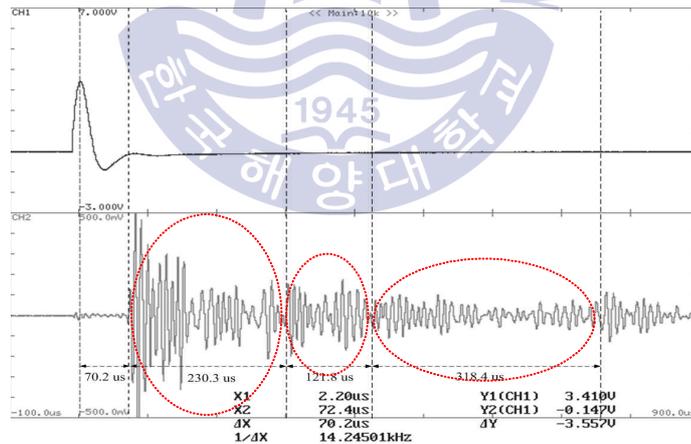
그림 4.3과 같이 깊이 230 mm에서 거리에 따른 유중 음향신호의 도달 시간과 속도는 100 mm에서 각각 70.2 μ s 와 1424 m/s, 300 mm에서 139.2 μ s와 1,436 m/s, 500 mm에서 348.6 μ s 와 1,434 m/s, 700 mm에서 486.4 μ s 와 1,439 m/s 및 900 mm에서 621.7 μ s와 1,447 m/s가 측정되었고, 평균속도는 약 1,436 m/s이다.

또한 표 4.2는 절연유로부터 깊이가 230 mm일 때, 센서와 방전원 사이의 거리가 증가 할 때의 전파경로를 나타내었다.

표 4.2 전파경로별 이동거리 및 도달시간 (깊이 230 mm)

Table. 4.2 Distance and TOA by propagation paths (depth=230 mm)

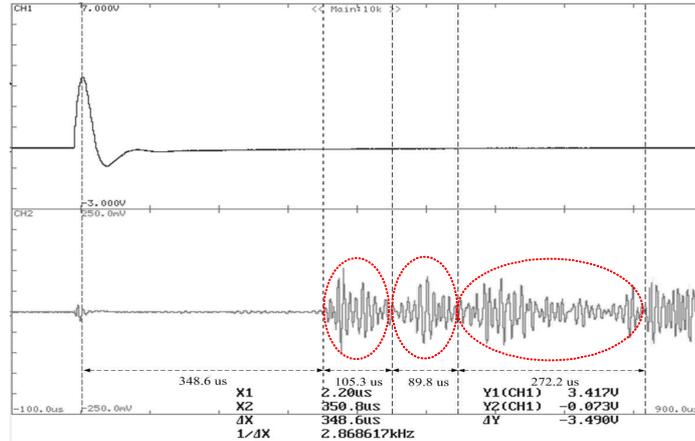
구분 거리 [mm]	제 1 구간		제 2 구간		제 3 구간	
	거리 [mm]	시간 [μ s]	거리 [mm]	시간 [μ s]	거리 [mm]	시간 [μ s]
100	431.7	230.3	608.2	121.8	1,064.7	318.4
300	516.1	220.2	670.8	107.7	1,101.1	300.0
500	652.9	105.3	781.0	89.8	1,172.0	272.7
700	816.3	82.0	921.9	73.6	1,270.2	226.2
900	993.1	69.7	1,081.6	61.6	1,390.5	215.0



상: 방전펄스 [1.00 V/div, 100 μ s/div]

하: 음향신호 [100 mV/div, 100 μ s/div]

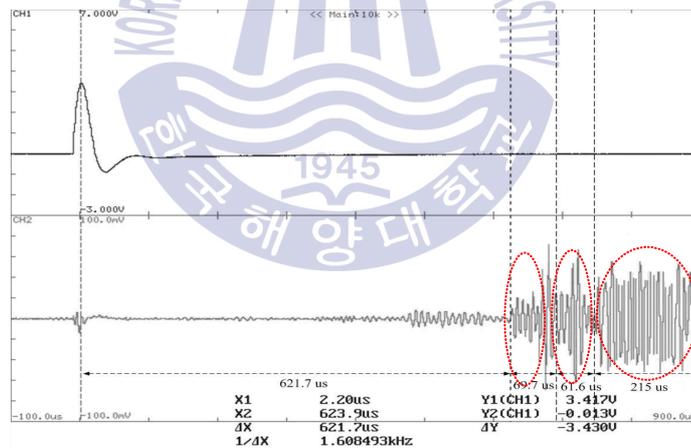
(a) 100 mm



상: 방전펄스 [1.00 V/div, 100 μ s/div]

하: 음향신호 [50 mV/div, 100 μ s/div]

(b) 500 mm



상: 방전펄스 [1.00 V/div, 100 μ s/div]

하: 음향신호 [20 mV/div, 100 μ s/div]

(c) 900 mm

그림 4.3 전파경로별 방전펄스와 음향신호의 파형 예 (깊이 230 mm)

Fig. 4.3 Examples of discharge pulse and acoustic signal by propagation paths (depth=230 mm)

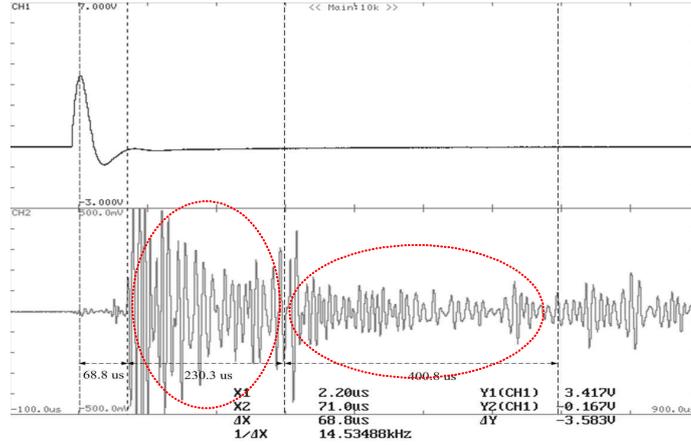
그림 4.4과 같이 깊이 30 mm에서 거리에 따른 유중 음향신호의 도달시간과 속도는 100 mm에서 각각 $68.8 \mu\text{s}$ 와 $1,453 \text{ m/s}$, 300 mm에서 $204.8 \mu\text{s}$ 와 $1,464 \text{ m/s}$, 500 mm에서 $343.1 \mu\text{s}$ 와 $1,457 \text{ m/s}$, 700 mm에서 $487.1 \mu\text{s}$ 와 $1,437 \text{ m/s}$ 및 900 mm에서 $618.1 \mu\text{s}$ 와 $1,456 \text{ m/s}$ 가 측정되었고, 평균속도는 약 $1,453 \text{ m/s}$ 이다.

표 4.3은 절연유로부터 깊이가 30 mm일 때, 센서와 방전원 사이의 거리가 증가 할 때의 전파경로를 나타내었다. 제 3 구간을 보면 구간을 구별할 수가 없었다. 제 2 구간과 제 3 구간의 거리의 차가 45 ~ 60 mm로 거리가 짧아 구분을 할 수가 없었다.

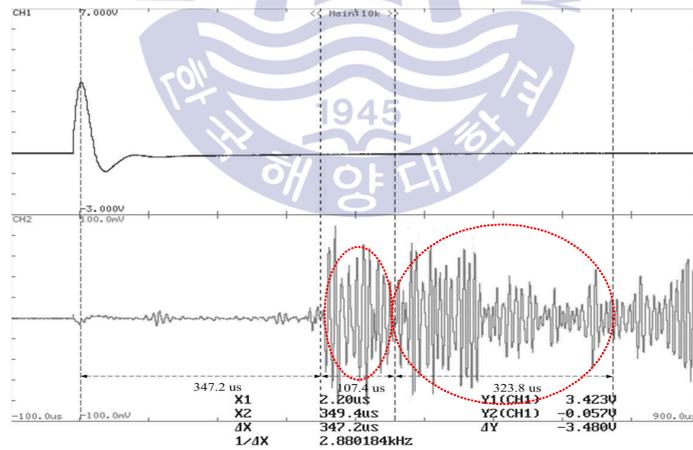
표 4.3 전파경로별 이동거리 및 도달시간 (깊이 30 mm)

Table. 4.3 Distance and TOA by propagation paths (depth=30 mm)

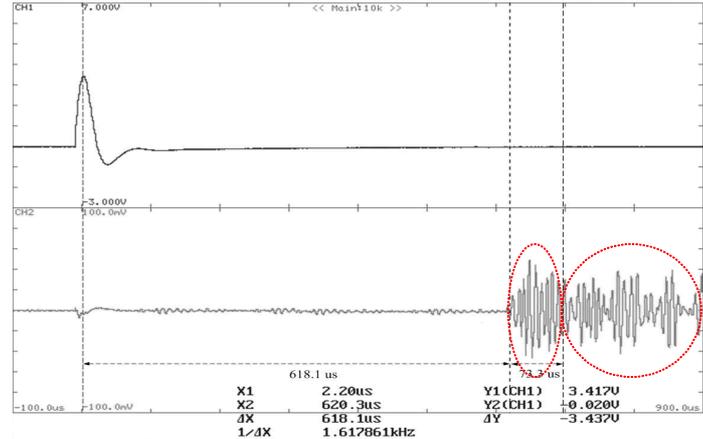
구분 거리 [mm]	제 1 구간		제 2 구간		제 3 구간	
	거리 [mm]	시간 [μs]	거리 [mm]	시간 [μs]	거리 [mm]	시간 [μs]
100	431.7	230.3	1,004.9	400.2	1,064.7	판단불능
300	516.1	220.2	1,044.0	107.7	1,101.1	판단불능
500	652.9	107.4	1,118.0	323.8	1,172.0	판단불능
700	816.3	82.0	1,220.6	73.6	1,270.2	판단불능
900	993.1	73.3	1,345.3	245.2	1,390.5	판단불능



상: 방전펄스 [1.00 V/div, 100 μ s/div]
 하: 음향신호 [100 mV/div, 100 μ s/div]
 (a) 100 mm



상: 방전펄스 [1.00 V/div, 100 μ s/div]
 하: 음향신호 [100 mV/div, 100 μ s/div]
 (b) 500 mm



상: 방전펄스 [1.00 V/div, 100 μ s/div]

하: 음향신호 [20 mV/div, 100 μ s/div]

(c) 900 mm

그림 4.4 전파경로별 방전펄스와 음향신호의 파형 예 (깊이 30 mm)

Fig. 4.4 Examples of discharge pulse and acoustic signal by propagation paths (depth=30 mm)

그림 4.5와 4.6는 깊이 30 mm, 230 mm 및 430 mm에서 각각 도달거리 및 속도를 나타내었다. 센서와 방전원사이의 거리가 증가함에 따라 도달 시간은 선형적으로 증가 하였고, 속도는 각각 1,419 m/s, 1,447 m/s 및 1,456 m/s로 보였다.

따라서 유층에서 깊이에 따른 속도는 2%의 차이를 보였고, 평균속도는 1,436 m/s로 분석 되었다. 깊이가 증가함에 따라 압력이 증가하여 속도차이 현상이 발생하였다.

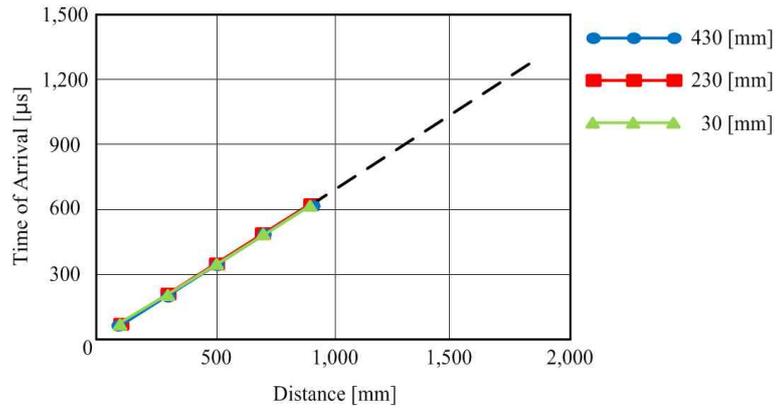


그림 4.5 거리에 따른 음향신호 도달시간
 Fig. 4.5 TOA of acoustic signal against the distance

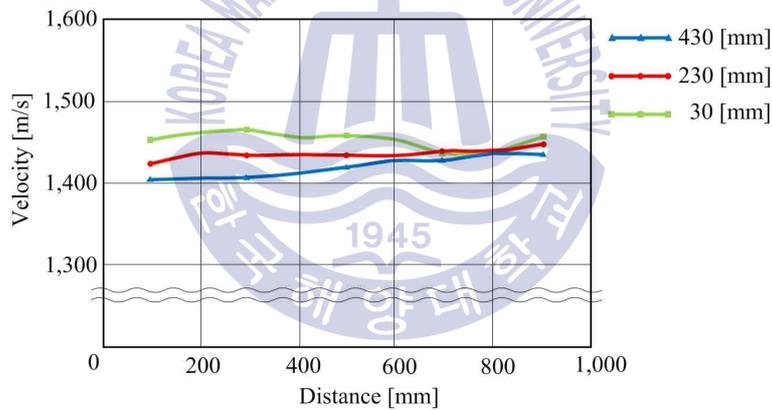
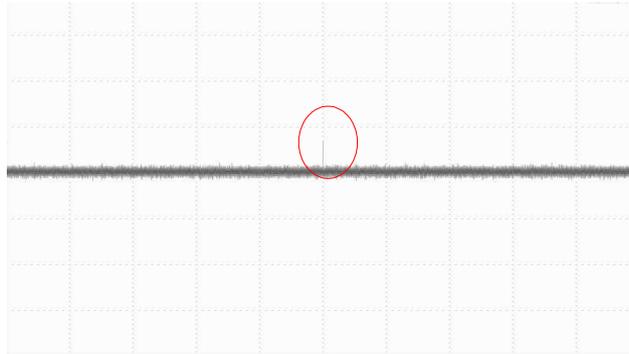


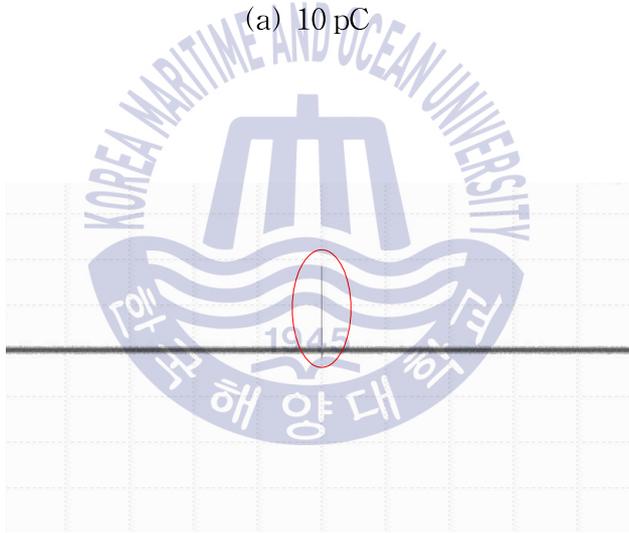
그림 4.6 유중에서 거리에 따른 속도변화
 Fig. 4.6 Change of velocity against the distance

방전관으로부터 발생하는 방전펄스의 크기를 측정하기 위하여 HFCT 교정 실험을 진행하였다. 표준펄스발생기(CAL 1A)와 50Ω의 무유도 저항을 이용하여 인가전하량에 따른 출력파형을 그림 4.7에 나타내었다.



[5 mV/div, 50 μ s/div]

(a) 10 pC



[20 mV/div, 50 μ s/div]

(b) 100 pC

그림 4.7 교정펄스파형의 예

Fig. 4.7 Examples of calibration pulse waveform

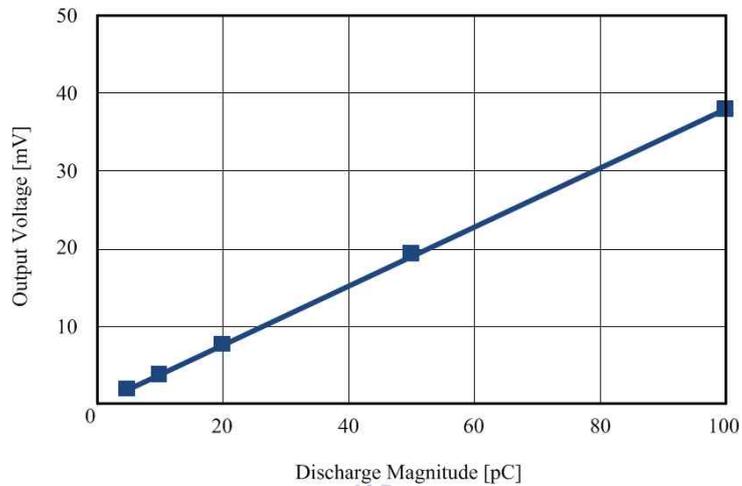


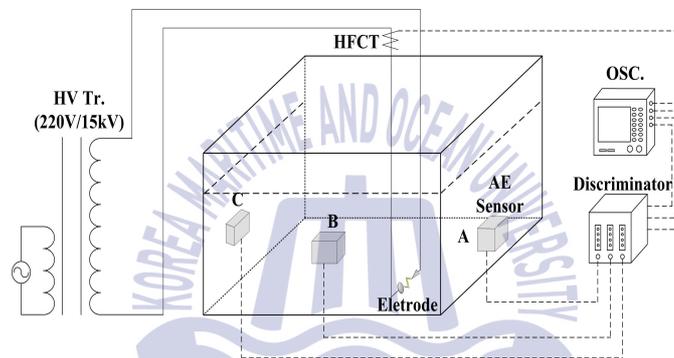
그림 4.8 인가 전하량과 출력전압의 관계

Fig. 4.8 Relation between injection charge and output voltage

5 ~ 100 pC의 전하량을 인가하여 HFCT 교정을 진행한 결과 전하량과 출력전압은 각각 5 pC, 10 pC, 20 pC, 50 pC 및 100 pC에서 1.91 mV, 3.84 mV, 7.72 mV, 19.23 mV 및 38.0 mV를 보였으며, 측정감도는 0.38 mV/pC 이다.

4.2 적용 실험

유중 전과특성을 이용하여 부분방전 위치표정에 적용을 하기 위하여 그림 4.9와 같이 실험계를 나타내었다. 5 mm의 평판-평판 전극계에 1 mm의 홈을 내어 보이드 결함 전극계를 모의하였다. 서로 다른 위치에 3개의 AE센서를 부착 후, 각 센서의 음향신호 방전펄스 크기 및 도달시간을 측정하였다.



(a) 구성도

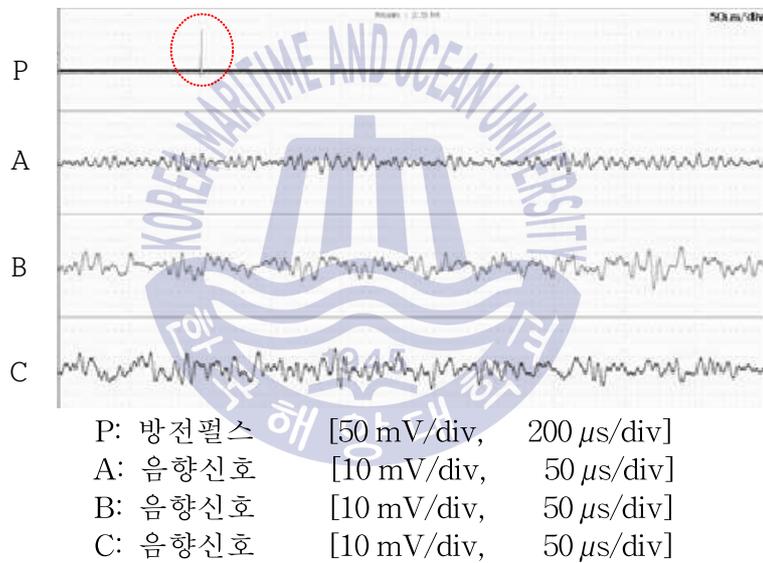


(b) 사진

그림 4.9 실험계 구성

Fig. 4.9 Experimental setup

전파특성 연구에서 HFCT의 감도는 0.38 mV/pC 으로 산출되었다. 보이드 결함전극계의 전류신호 크기에 따른 음향신호 측정 가능 유무를 판단하기 위하여 실험을 진행하였다. 그림 4.10 에서 방전펄스가 421.1 pC 에서 방전이 발생하지 않았고 526.3 pC 이상부터 음향신호가 검출 되었다. 따라서 본 실험조건에서 HFCT로부터 측정된 방전펄스를 기준으로 음향신호는 526.3 pC 에서 발생함을 확인할 수 있었다.



(a) 421.1 pC

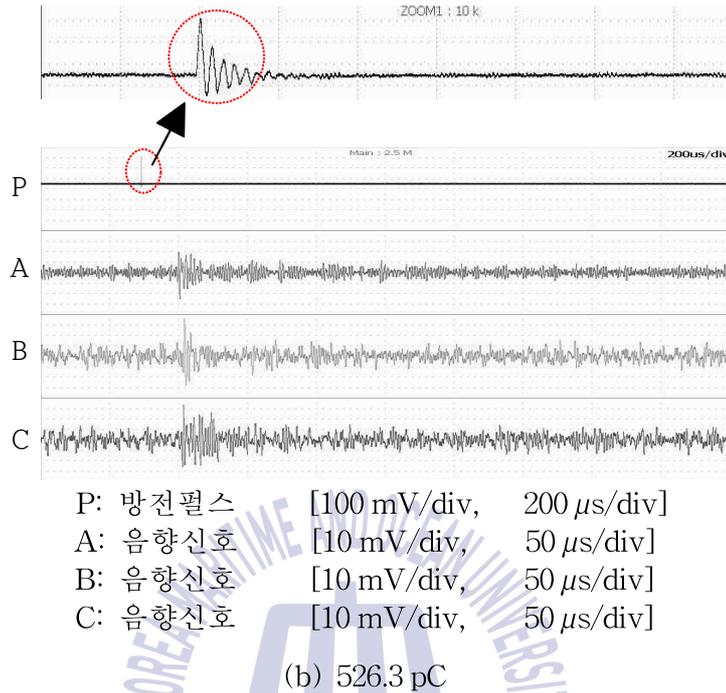
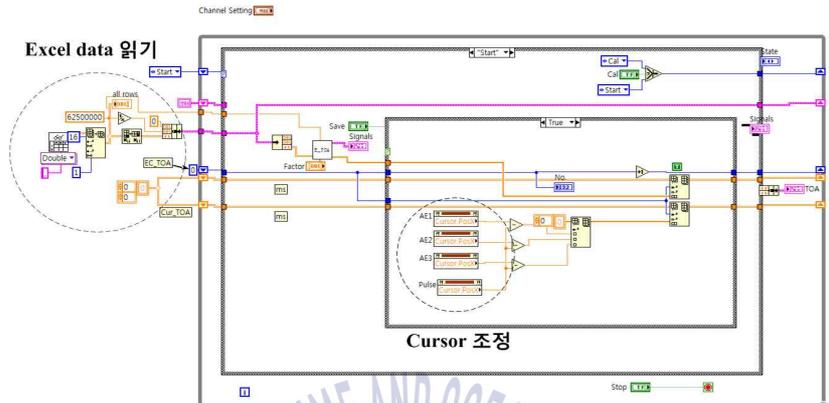


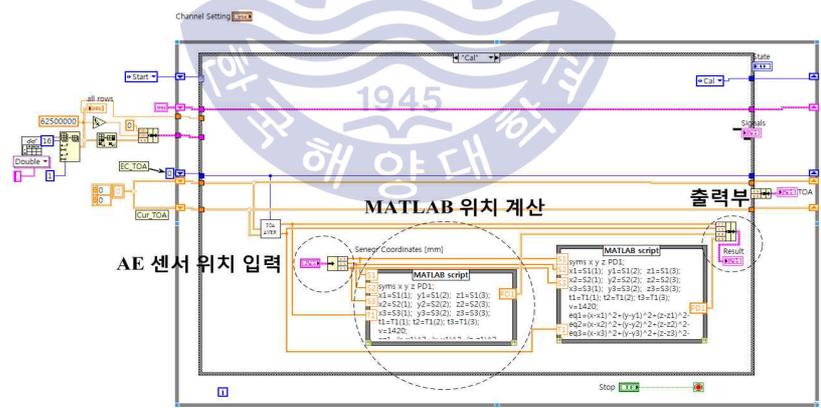
그림 4.10 검출파형의 예

Fig. 4.10 Examples of detected signal

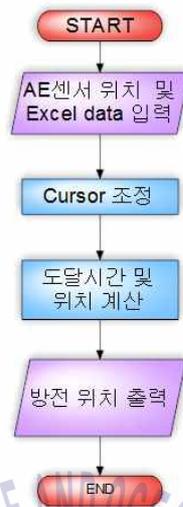
또한 거리와 도달시간을 토대로 속도를 산출하여 최종적으로 LabVIEW기반의 프로그램으로 위치표정을 하였고, 그림 4.11와 같이 프로그램을 설계하였다. 그림 4.11 (a)는 오실로스코프를 이용하여 받은 Excel data를 읽어 각 채널 당 Cursor위치를 조절하고 (b)에서 현재 부착되어 있는 AE센서 위치를 입력 후, MATLAB을 통해 도달시간 및 위치표정 결과를 출력 한다.



(a) 입력부



(b) 위치 계산



(c) 플로우 차트

그림 4.11 위치표정 알고리즘 VI

Fig. 4.11 VI of positioning algorithm

유입변압기의 부분방진 위치표정은 전기적신호를 기준으로 음향신호의 도달시간을 이용하는 방법과 첫 번째로 검출되는 음향신호 도달시간을 기준으로 각 센서에 도달시간을 이용하는 방법이 있다. 전기-음향법은 전기신호를 기준으로 각 센서의 도달시간을 측정하는 방법으로 음향-음향법보다 더 정밀하게 위치표정이 가능하다^{[31],[32]}.

또한 HFCT를 사용함으로써 도달시간을 이용한 위치뿐만 아니라 방진의 크기도 알 수 있다.

그림 4.12는 음향의 전파속도를 라고 하면 3개의 AE센서 A, B, C에서 PD위치까지의 거리를 표시한 좌표계이며, 다음과 같은 식으로 표현 가능하다.

$$= v \cdot t \quad (4.2)$$

$$l_2 = v \cdot (t + \Delta t_1) \quad (4.3)$$

$$l_3 = v \cdot (t + \Delta t_2) \quad (4.4)$$

부분방전 발생원으로부터 각각 3개의 AE센서 위치는 그림 4.12와 같다. 유중 전파특성을 통해 측정된 평균속도 1,436 m/s를 식에 대입하여 계산을 하였다.

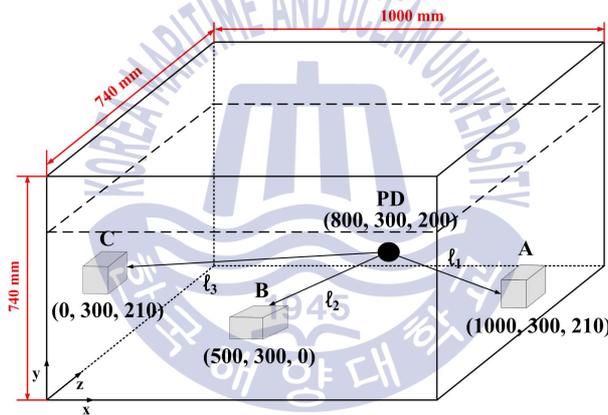


그림 4.12 부분방전의 위치

Fig. 4.12 Positioning of PD

오실로스코프로 측정된 도달시간을 Excel data로 저장하여 LabVIEW와 MATLAB을 통하여 다음과 같은 식으로 데이터분석을 하였다.

$$P = \frac{1}{v} \cdot \left((x-1,000)^2 + (y-300)^2 + (z-210)^2 \right) \quad (4.4)$$

$$t_{B-P} = \frac{1}{v} \cdot \left(\sqrt{(x-500)^2 + (y-300)^2 + z^2} \right) \quad (4.5)$$

$$P = \frac{1}{v} \cdot (x^2 + (y - 300)^2 + (z - 210)^2) \quad (4.6)$$

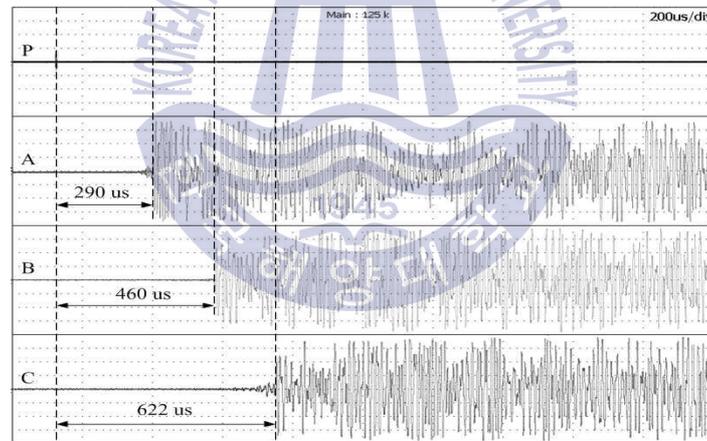
여기서, t_{A-P} : 방전펄스와 음향신호 A의 도달시간차 [s]

t_{B-P} : 방전펄스와 음향신호 B의 도달시간차 [s]

t_{C-P} : 방전펄스와 음향신호 C의 도달시간차 [s]

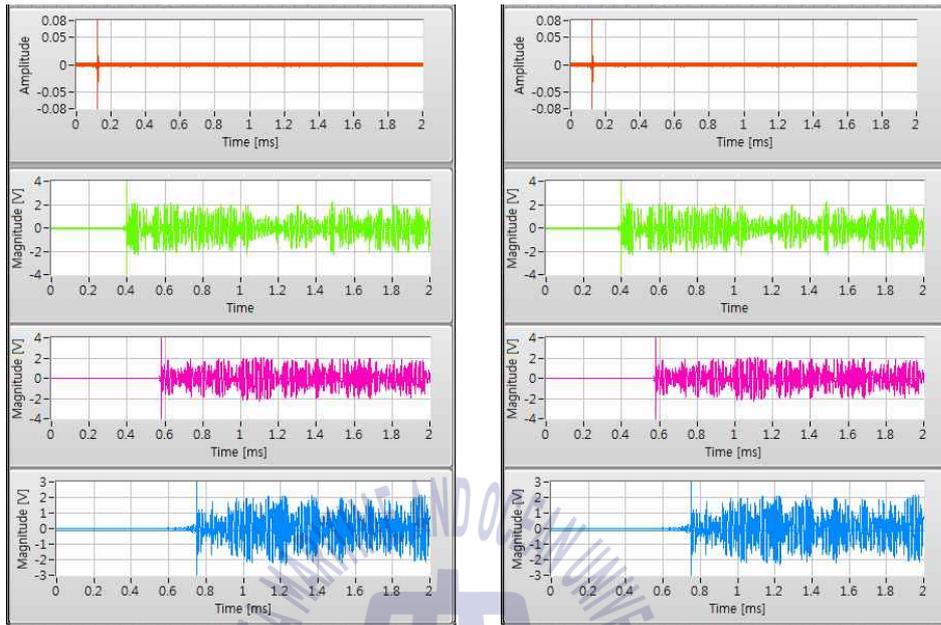
v : 음향신호의 전파속도 [m/s]

방전신호를 기준으로 A, B, C의 AE센서의 도달시간차는 각각 $290 \mu\text{s}$, $460 \mu\text{s}$ 및 $622 \mu\text{s}$ 의 시간차를 보였으며, 그림 4.13에 나타내었다.



P: 방전펄스	[200 mV/div, 200 μs /div]
A: 음향신호	[20 mV/div, 200 μs /div]
B: 음향신호	[20 mV/div, 200 μs /div]
C: 음향신호	[20 mV/div, 200 μs /div]

(a) 오실로스코프



전기-음향법(적용)

전기-음향법(기준)

(b) 프론트패널

그림 4.13 측정 결과

Fig. 4.13 Measurement result

LabVIEW를 이용한 분석결과 유중 전파특성을 이용한 전기-음향법과 기존의 전기-음향법은 각각 $x=804.5$ mm, $y=300$ mm, $z=556.8$ mm 및 $x=816.4$, $y=315.4$, $z=568.3$ 로 나왔다. 실제위치가 $x=800$ mm, $y=300$ 및 $z=540$ mm인 점을 감안하였을 때, 유중 전파특성을 이용한 전기-음향법은 실제 위치와 2%의 오차를 기존의 전기-음향법은 4%의 오차를 보였고, 방전펄스의 크기는 913.8 pC으로 측정되었다.

기존 방법 대비 유중 전파특성과 전기-음향법을 이용하면 오차를 2% 이내로 줄일 수 있으며, 방전펄스의 크기도 구할 수 있다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 유입변압기의 절연진단에 사용하는 음향검출 방법의 신뢰도 향상을 목적으로 유중 전파특성을 분석하였다.

1. 역결합회로와 음향신호의 고감도 검출을 위하여 증폭기를 설계 및 제작하였다. 역결합회로는 AE센서(140 kHz)에서 전원으로 전달되는 10 kHz 이상의 음향신호를 200 dB이상 감쇄시킨다. 증폭기는 이득 40 dB이며, -3 dB의 주파수대역은 11 kHz~5.5 MHz로 AE센서의 모든 신호를 증폭할 수 있다.
2. 유중탱크에 AE센서 및 방전원을 설치한 후, 음향증폭기와 오실로스코프 (1 GHz, 5 GS/s)를 사용하여 전파특성을 분석하였다. 유중 깊이는 30 mm, 230 mm 및 430 mm이며, 거리는 100 mm, 300 mm, 500 mm, 700 mm 및 900 mm에서 도달 속도를 측정하였다. 깊이에 따라 속도는 약 2%의 차이를 보였으며, 평균속도는 1,436 m/s이었다. 또한 전파경로별 구간은 유중탱크에서 최단거리로 반사되어 검출되는 신호를 제 1 구간, 제 2 구간 및 제 3 구간으로 설정하였으며, 구간별 최소 판별 가능한 거리는 70 mm이상이었다.
3. 표준펄스발생기를 사용하여 방전원에서 발생하는 전하량을 산출하였다. 인가전하량 5 pC~100 pC에 따른 출력전압은 1.91 mV~38.0 mV로 선형적인 특성을 나타내었으며, 측정감도는 0.38 mV/pC이었다.
4. 평균속도 및 전파경로를 적용한 LabVIEW 기반의 TOA로 평균속도와 전파경로를 적용하여 위치표정 알고리즘을 설계하였다. 기존 방법에 비해 정확도가 2배이상 향상된 2% 이내로 추정할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] S. Tenbohlen, D. Uhde, and J. Poittevin, "Enhanced Diagnosis of Power Transformers using On- and Off-line Methods: Results, Examples and Future Trends", CIGRE Paris, No. 12-204, 2000.
- [2] T. Leibfried and K. Feser, "Off-line- and On-line-Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, pp.34-37, 1996.
- [3] T. Aschwanden, M. Hassig, J. Fuhr, et al., "Development and Application of New Condition Assessment Methods for Power Transformers", CIGRE Paris, No. 12-207, 1998.
- [4] P. Guinic and J. Aubin, "Cigre's Work on Power Transformers", EPRI, Substation Equipment Diagnostics Conference IX, New Orleans, Louisiana, USA, 2001.
- [5] H. Kawada, M. Honda, T. inoue, and T. Amemiya, "Partial discharges automatic monitor for oil-filled power transformer", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, No. 6, pp. 1045-1048, 1986.
- [6] Stone, G.C., "A perspective on online partial discharge monitoring for assessment of the condition of rotating machine stator winding insulation", Electrical Insulation Magazine, IEEE, Vol. 28, pp. 8-13, 2012.
- [7] Ezatollah Mohammadi, Mehdi Niroomand, Mahdie Rezaein, Zahra AminiPD, "Partial Discharge Localization and Classification Using Acoustic Emission Analysis In Power Transformer", International Telecommunications Energy Conference, 2009. INTELEC 2009, October 2009, pp. 1-6.
- [8] Fuangsoongnern, Plueksawan, Tikakosol, K. "A measurement technique to identify and locate partial discharge in transformer

- with AE and HFCT”, Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2014 IEEE, pp. 108-113, 2014.
- [9] Hiroki Murayamal, Tomohiko Katayamal, Kyohei Yamadal, Masahiro Kozakol, Masayuki Hikital, Kenji Kashine, Itaru Nakamura, Hidenobu Koide, “Development of Partial Discharge Location System in Oil-Filled Transformer Considering Acoustic Wave Propagation Properties”, Conference Proceedings of ISEIM2011, pp. 273-276, 2011.
- [10] Syed Aqeel Ashraf, Brian G. Stewart, Chen gke Zhou, Donald Hepburn, J.M.Jahabar, “Numerical Simulation of Partial Discharge Acoustic signals”, High Voltage Engineering and Application(ICHVE), pp. 577-579, 2008.
- [11] Sacha M. Markalous, Stefan Tenbohlen, Kurt Feser, “Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals”, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions, Vol. 15, pp. 1576 - 1583, 2008.
- [12] Foltig, C.; Jenau, F. “Implementation and analysis of multi-factor aging tests on the winding insulation of original sized generator stator bars used in large rotating machines”, High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 1 - 4, 2014.
- [13] Jian Hao, Ruijin Liao, Chen, G., Zhiqin Ma, Lijun Yang, “Breakdown characteristics of the oil-pressboard insulation under compound electric field”, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE, Vol. 19, pp 188-199, 2012.
- [14] L. Niemeyer, “A generalized approach to partial discharge modeling”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, Issue. 4, pp.510-528, 1995.
- [15] F. Gerdinand, M. Budde, and M. Kurrat, “Electrical and mechanical strength of mineral filled epoxy insulators in correlation to power loss factor”, 8th, IEEE, ICSD, Toulouse, 2004.
- [16] J. Fabre and A. Pichon, “Deteriorating Processes and Products of

- paper in Oil, Application to transformers", International Conference on large high voltage electric systems, CIGRE paris, p.137, 1960.
- [17] 송재용, "저압용 전기전자기기의 절연성능 평가를 위한 부분방전시험에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원, 박사학위논문, 2006.
- [18] Anita Oommen, "A case study evaluation of the causes for the premature failure of transformers on the eskom transmission network", cigre, pp. 120.1-120.9, 2005.
- [19] 김성욱, "유중 부분방전의 음향검출에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원, 석사학위논문, 2010.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] R. T. Harrold, "Acoustic technology applications in electrical insulation and dielectrics", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 20, No. 1, pp.3-19, 1985.
- [29] R. T. Harrold, "Acoustic emission signatures of arcs and sparks", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1980.
- [30] T. Bengtsson M. Leijon, L. Ming and B. Jonsson, "Directivity of acoustic signals from partial discharge in Oil", IEE proceeding-Science, Measurement and Technology, Vol. 142, Issue. 1, pp.85-88, 1995.
- [31] P. M. Eleftherion, "Acoustic emission-based PD source location in transformers", Electrical Insulation Magazine, IEEE, Vol. 11, Issue. 6, p.22, 1995.
- [32] Y. Lu, X. Tan, and X. Hu, "PD detection and localization by acoustic measurements in an oil-filled transformer", IEE proceeding-Science, Measurement and Technology, Vol. 147, No. 2, pp.81-85, 2000.