



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](#)

碩士學位論文

전자기파 및 음향파를 이용한
배전반 부분방전 위치검출 시스템 개발

李 激 鎬

濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

2024年 2月



전자기파 및 음향파를 이용한 배전반 부분방전 위치검출 시스템 개발

指導教授 金 豪 贊

李 激 鎬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2023年 12月

李激鎬의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

이 기 영

委 員

최 영 준

委 員

김 호 찬



濟州大學校 産業大學院

2023年 12月



Development of Partial Discharge Detection
Systems Using Electromagnetic and Acoustic
Waves in Switchboard Systems

Eun Ho Lee

(Supervised by professor Ho-Chan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2024. 2.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
SUMMARY	vi
1. 서 론	1
2. 부분방전 진단 방법	3
2.1 부분방전 유형	4
2.2 부분방전 검출 방안	5
2.2.1 전기적 검출에 의한 방법	5
2.2.2 화학적 검출에 의한 방법	6
2.2.3 음향파 검출에 의한 방법	8
3. 전자기파 및 음향파를 이용한 부분방전 위치검출 시스템 개발	10
3.1 부분방전 검출 모듈 개발	11
3.1.1 전자기파에 의한 부분방전 검출 모듈 개발	11
3.1.2 음향파에 의한 부분방전 검출 모듈 개발	12
3.2 부분방전 위치검출 시스템 개발	16
3.2.1 부분방전 위치검출 하드웨어 개발	16
3.2.2 부분방전 위치검출 소프트웨어 개발	20
3.2.3 부분방전 위치검출 모니터링 장치 개발	25
4. 실험 및 결과	30
4.1 실험 항목 및 구성도	30

3.2 실험 결과	32
5. 결 론	38
참 고 문 헌	39

LIST OF FIGURES

그림 1. 내부 및 외부 부분방전의 종류와 특징	3
그림 2. 부분방전 측정을 위한 유형별 센서	4
그림 3. 부분방전의 발생 결합 조건에 따른 검출 방법	5
그림 4. 전기적 검출에 의한 부분방전 검출 방법	6
그림 5. 화학적 검출에 의한 부분방전 검출 방법	7
그림 6. 음향과 검출에 의한 부분방전 검출 방법	8
그림 7. 부분방전 위치검출 시스템 개요도	10
그림 8. 일반적인 초고주파 측정 프로세스	11
그림 9. 전자기와 검출을 위한 안테나와 센서	11
그림 10. 전자기와 감지를 위한 검출 모듈과 검출시험 결과	12
그림 11. 아크 발생시 수신되는 음향과 감지기 구조와 음향과 강도	14
그림 12. 음향과 검출을 위한 센서 모듈과 음향과 강도	15
그림 13. 시각적 부분방전 위치검출 모듈과 하드웨어 구현	17
그림 14. 시각적 부분방전 위치검출 하드웨어 통합 모듈	17
그림 15. 부분방전 위치검출 스크린과 제어 장치의 구성도와 하드웨어 구현	18
그림 16. 스크린과 제어를 위한 유저 인터페이스 설계 및 구현	19
그림 17. 시각적 부분방전 위치검출 소프트웨어 흐름도	20
그림 18. 임계치 설정, 검출 및 알람 기능 흐름도	21
그림 19. 부분방전의 전자기와 음향과 표출 기능 흐름도	22
그림 20. 부분방전 위치검출 방안	23
그림 21. 부분방전 위치검출 흐름도	24
그림 22. 원격 모니터링 서버의 전체 개요도	25
그림 23. 원격 모니터링 서버의 로그인 개요도	26
그림 24. 음향과, 전자기와, 온도, 습도의 파형, 데이터, 통계 및 영상 모니터링 개요도 ..	27
그림 25. 알람 발생 모니터링 개요도와 원격 서버 장치	28
그림 26. 원격 모니터링 소프트웨어를 통한 관측 결과	29

그림 27. 전체 시스템 통합에 따른 시험을 위한 구성 요소 및 시험 구성도	30
그림 28. 부분방전 위치검출 모니터링 하드웨어 시스템	32
그림 29. 아크 발생시 전자기파와 음향파에 의한 부분방전 검출	32
그림 30. 아크 발생시 전자기파와 음향파에 의한 부분방전 검출 결과	33
그림 31. 아크 발생시 부분방전 위치검출	34
그림 32. 아크 발생시 부분방전 위치검출 결과	35
그림 33. 이벤트 발생시 부분방전 시각적 표출	36
그림 34. 이벤트 발생시 부분방전 시각적 표출 결과	37

LIST OF TABLES

SUMMARY

If there are microscopic defects in the insulators of electric devices, the electric field is concentrated in that area and a weak discharge occurs. This can lead to insulation deterioration and lead to insulation breakdown after a long period of time. Therefore, if insulation deterioration is detected early using factors such as partial discharge and an appropriate response is made according to the degree of deterioration, the electrical facilities can be maintained more stably. In fact, the construction of a diagnostic system to monitor power equipment deterioration through prototypes such as partial discharge pattern analysis using various sensors is actively underway for ultra-high voltage switchgear, but a high-precision diagnostic system has not been universally established in switchboards. This is because the diagnostic system itself is expensive and it is difficult to install various sensors in a narrow steel enclosure. Discharge detection and measurement in switchboards is based on the energy exchange that occurs during discharge, which includes electric pulse current, radiation (light), sound (noise), gas pressure increase, and chemical reaction, etc. Therefore, when a partial discharge occurs, the electromagnetic waves and sound waves appear.

In this paper, we develop a partial discharge detection system using electromagnetic waves and sound waves in a switchboard. It includes hardware design, software design, and location estimation monitoring system for partial discharge location estimation. We present the experimental results in three areas: electromagnetic and acoustic wave detection, partial discharge location identification accuracy, and visual display accuracy when an event occurs.

1. 서 론

최근 전력설비의 대형화, 밀집화, 다기능화 그리고 초고압화로 부하가 많아질수록 대정전 등의 사고 시 더 많은 경제적 손실이 발생하므로 지금보다 더욱 안정적인 계통 운영은 필수적이다. 전력설비의 절연열화(insulated deterioration)는 부분방전(PD, partial discharge), 기계적 결합, 습기, 열 그리고 산소 등에 의한 원인으로 발생하며 절연파괴의 전초단계가 되므로, 절연열화는 불안정한 계통의 원인이며 절연파괴로 이어질 때는 심각한 전기사고를 일으킬 수 있다. 전력공급 설비의 순간정전이나 고장 등의 사고는 인명은 물론 가동중단으로 인해 생산성에도 치명적인 결과를 초래하게 된다. 따라서 전력기기와 설비를 안정적, 효율적, 경제적으로 운영하기 위한 여러 가지 검출방법 및 진단기술도 크게 발전하고 있다[1]. 이 중에서도 부분방전은 고전압 스트레스, 제작 및 설치상의 문제로 인해 절연체 내외부에서 일어나는 국부적인 절연파괴 현상으로 절연체의 절연 능력을 약화시키는 직접적인 원인이 된다.

부분방전은 전극간을 완전히 교락(confounding)하지 않는 전기적 방전으로 정의하고, 전동기, 콘덴서, 케이블 등 전기기기의 절연체에 미세한 공극형상 결합 등이 있으면 그 부분에 전계가 집중 미약한 방전이 발생한다. 이로 인해 절연열화되고 장시간 후에는 절연파괴에 이를 수 있으므로, 부분방전과 같은 요인들로 절연열화를 조기에 검출하고 열화 정도에 따라 적절하게 대응한다면 보다 안정적으로 계통을 유지할 수 있다. 실제로 초고압 개폐기는 다양한 센서들을 활용하여 부분방전 패턴분석 등의 시제품을 통한 전력 설비 열화 감시 진단시스템 구축이 활발히 진행되고 있지만 배전반의 경우에는 고정밀의 진단시스템이 보편적으로 구축되지 않은 상황이다. 진단시스템 자체가 고가이기도 하며 좁은 철제 외함 안에 다양한 센서들을 설치하기 어렵기 때문이다.

발전소에서 생산한 전기를 수용가에 분배할 목적으로 설치된 배전반은 아파트, 학교 등에서 전기를 사용할 수 있게 해주는 전력설비이며, 철제외함 내부는 개폐기, 변압기 등의 전력기기로 구성된다. 일반적으로 배전반의 설치된 곳의 인구 밀도가 높으므로 배전반에서 절연파괴로 인한 사고가 발생할 경우는 경제적 손실 뿐만 아니라 인명 피해를 초래할 수 있다. 따라서 배전반에 경제적이면서도 정밀한 진단시스템을 구축하여 안정적인 전기공급이 이루어지도록 할 필요가 있다[2,3].

배전반 등의 전기설비에 대한 방전검출 및 측정은 방전 중에 발생하는 에너지 교환을 기반으로 하는데, 에너지 교환은 전기펄스 전류, 유전 손실, 방사선(빛), 소리, 가스압력 증가 및 화학반응 등으로 나타난다. 따라서 부분방전 발생시에 전기적 신호변화에 나타나는 물리적 화학적 현상은 음 또는 빛의 발생과 물질의 화학적 변화이다. 음향파를 이용한 측정법을 보면, 공기중에서 부분방전시 음향파를 발생하고, 고체절연의 내부 방전에서도 음파를 발생한다. 이 음향파는 우리가 들을 수 있는 가청영역뿐만 아니라 들을 수 없는 초음파 영역까지의 대역을 가진다. 공기중에서 일어나는 코로나와 같은 방전은 지향성을 갖는 초음파 마이크로 폰(30 ~ 50kHz 대역)을 사용하여 발생 위치를 알아내는 데 사용한다.

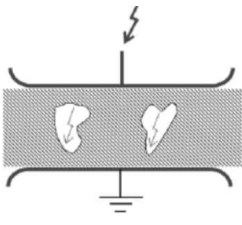
본 논문에서는 배전반에 적용하도록 전자기파와 음향파를 이용한 복합 검출로 부분방전의 동시측정, 위치검출, 그리고 시각적 부분방전 발생 위치검출 시스템을 개발한다. 부분방전 위치검출을 위한 하드웨어 설계 및 구현, 소프트웨어 설계 및 구현, 그리고 위치검출 모니터링 구현 과정을 나타낸다. 전자기파와 음향파 검출, 부분방전 위치 식별 정확도와 이벤트 발생시에 시각적 표출 정확도 등의 3가지 항목 실험을 통해 개발된 시스템의 실험 결과를 살펴본다.

2. 부분방전 진단 방법

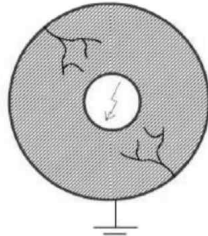
부분방전은 전기장비에서 원하지 않는 현상으로 다양한 유형의 부분방전을 식별하고 그 심각성을 평가하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 시간영역에서 다양한 유형의 소스로부터 부분방전 관련된 음향파와 전자기파를 조사하고 이러한 결과를 기반으로 검출 장치를 설계, 개발하도록 한다.

부분방전은 그림 1에서 볼 수 있듯이 특정 설정에서의 발생에 따라 내부 및 외부방전 (internal & external discharges)의 두 가지 주요 하위그룹(sub-groups)으로 구분된다[4]. 이러한 각 하위그룹은 그림 1에서 볼 수 있는 일반적인 경우로 취급할 수 있는 여러가지 실험설정으로 나타낼 수 있다. 부분방전은 절연체 내부의 불순물/캐비티로 인해 응력이 가해진 영역이 있거나 외부에 돌출부가 있을 때 발생하고, 응력이 가해진 영역은 도체주위에 날카로운 모서리나 돌출부가 있는 경우에 형성한다. 이상과 같이 정의된 것에 따르면 절연체의 국부적인 곳에서의 전계의 집중이나 절연내력의 저하로 발생할 수 있는 것으로 생각할 수 있고, 따라서 부분방전을 분류하면 내부방전(internal discharges), 코로나방전(corona discharges)과 표면방전(surface discharges) 등으로 분류할 수 있다.

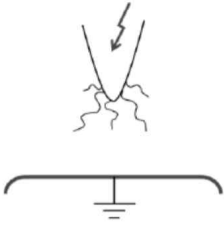
	종 류	특 징
내부 부분방전	<ul style="list-style-type: none"> Void Electrical Tree 	<ul style="list-style-type: none"> 절연물 내부 Void에서 발생 - 고체절연체 내부의 지속적인 PD는 방전채널(Treeing) 형성
외부 부분방전	<ul style="list-style-type: none"> Corona Surface Floating 	<ul style="list-style-type: none"> 비균질 기체 절연계에서 발생 이종 절연물들의 경계면에서 발생 전계 중 도전성 물질과 전극사이에서 발생



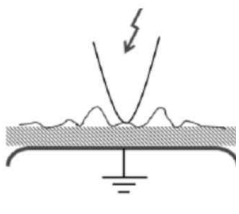
Void



Electrical Tree



Corona



Surface

그림 1. 내부 및 외부 부분방전의 종류와 특징

2.1 부분방전 유형

배전반 등의 전기설비에 대한 방전검출 및 측정은 방전 중에 발생하는 에너지 교환 기 반하며, 이러한 에너지 교환으로는 전기펄스 전류, 유전 손실, 방사선(빛), 소리, 가스압력 증가, 그리고 화학반응 등으로 나타낸다. 즉, 부분방전이 발생할 때마다 부분방전은 전파, 빛 및 열의 형태로 전자기 방출, 가청 및 초음파 범위의 음향과 방출, 오존 및 질소 가스 의 산화물, 과도 전류 및 과도접지 전압(TEV) 방출과 같은 형태로 에너지를 방출한다. 부 분방전은 다음과 같이 다양한 방전 현상의 용어들이 포함한다.

- 내부 방전 : 고체 또는 액체 유전체 내의 공극 또는 공동에서 발생
- 표면 방전 : 다른 절연재료의 경계에서 발생
- 코로나 방전 : 불균일 전계하에 있는 기체 유전체에서 발생
- 트리잉(Treeing) : 방전채널을 형성하는 고체 유전체에서 방전의 지속적인 영향

부분방전 측정을 위한 유형별 센서는 그림 2와 같다[4].

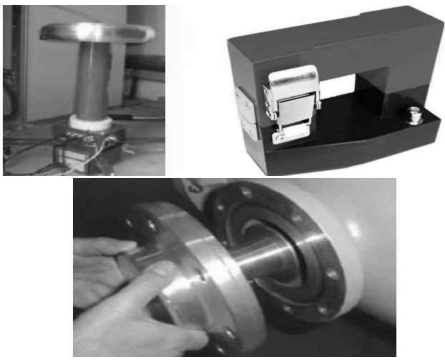
전자기 신호 (Electromagnetic Signal)	적용 센서
<ul style="list-style-type: none"> ✓ TEV 센서 또는 커플링 캐패시터 센서 ✓ HFCT(High Frequency Current Transformer) 센서 ✓ UHF(Ultra High Frequency) 센서 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 음향(Acoustic) 센서 ✓ 초음파(Ultra Sensor) 센서 ✓ 광(Optical) 센서 ✓ 화학(Chemical) 센서 ✓ 적외선(Ir) 센서 ✓ 온도(Temperature) 센서
	

그림 2. 부분방전 측정을 위한 유형별 센서

공학적인 측면에서 보면, 부분방전은 전계강도가 절연 재료의 파괴지점을 초과하는 절연 시스템의 작은 부분의 국부적인 절연파괴로 볼 수 있고, 절연파괴의 초기원인이므로 조기에 검출할 수 있는 부분방전 데이터는 절연 시스템 보호에 대한 예측가능한 정보를 개발하는 데 효과적인 메시지이다. 부분방전의 발생 결함 조건에 따른 검출방법 분류는 그림 3과 같다[5].

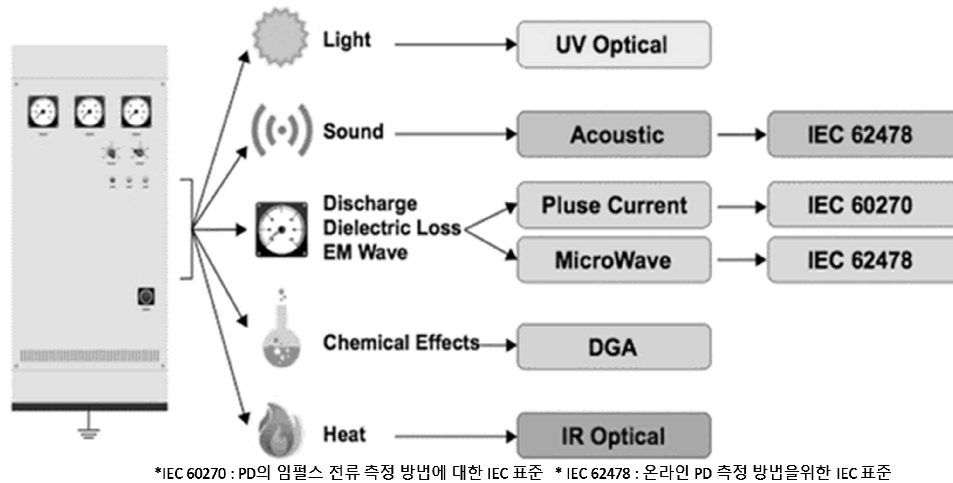


그림 3. 부분방전의 발생 결함 조건에 따른 검출 방법

2.2 부분방전 검출 방안

시간이 지남에 따라 높은 전기장에 노출된 전기절연은 기계적, 열적 및 전기적 스트레스로 인해 파손되기 시작한다. 부분방전은 절연파괴의 증상이자 추가 절연손상의 메커니즘이기 때문에 부분방전 검출은 절연 상태를 평가하고 문제를 진단하는 경우에 사용된다. 지난 50년 동안 부분방전을 검출하기 위한 몇 가지 방법이 개발되었고, 이러한 방법은 전기, 화학, 음향과 등의 검출을 통한 방법이다.

2.2.1 전기적 검출에 의한 방법

그림 4에서 전기적 검출(electrical detection)는 공극의 전류 스트리머에 의해 생성된 전기펄스를 기반으로 하고, 이러한 단일펄스는 나노초 단위로 지속되며 1MHz를 초과하는 측정가능한 주파수 구성요소를 가진다[6].

펄스모양, AC 사이클 내에서의 상대적 위상위치(phase location) 및 신호강도(signal intensity)는 모두 부분방전 오류 유형 및 절연손상의 심각도에 영향을 미친다. 전기적 측정은 직접 프로빙(direct probing)과 RF 방출 테스트로 나눌 수 있는데, 직접 프로빙 방법은 용량성 커플러를 변압기의 위상 단자에 연결하고 RF 방출 테스트는 주로 변압기 내부의 안테나를 사용하여 측정한다.

전기적 검출의 주요 문제는 부분방전의 잘못된 검출로 이어질 수 있는 노이즈에 대한 장비의 민감성이다. 일반적으로 테스트 대상장비는 오프라인 상태로 가져와 고전압 소스에서 전원을 공급한 다음 테스트해야 하고, 많은 시간과 장비가 필요하다. 따라서 전기적 검출 시스템은 높은 비용을 초래하지만 비교적 정확하고 장비 관리자에게 장비상태에 대한 중요한 정보를 제공한다.

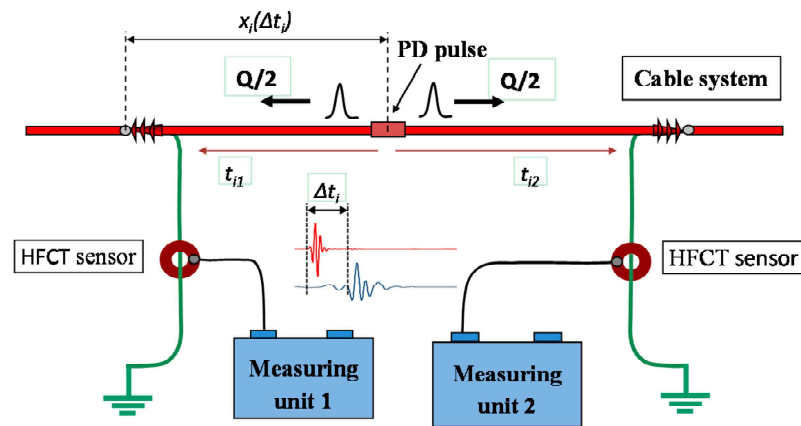


그림 4. 전기적 검출에 의한 부분방전 검출 방법

2.2.2 화학적 검출에 의한 방법

화학적 검출(chemical detection)은 전류 스트리머가 주변물질을 다른 화학성분으로 분해하기 때문에 부분방전을 화학적으로 검출하는데, 주로 용존가스 분석(DGA, dissolved gas analysis)과 고성능 액체 크로마토 그래피(HPLC, high performance liquid chromatography)가 사용된다.

화학적 검출 테스트는 주로 변압기와 같은 오일로 채워진 구성요소에 대해서만 수행하

는데, DGA 테스트는 미네랄 오일의 분해로 생성된 오일에 용해된 가스를 식별하고 HPLC 테스트는 변압기 벽 절연파괴의 부산물, 즉 셀룰로오스 및 그 부산물을 측정한다. DGA 테스트는 오일샘플을 채취하여 다양한 용존가스, 수소뿐만 아니라 아세틸렌, 메탄, 이산화탄소, 이산화탄소 및 에틸렌의 수준을 측정하면, 부분방전의 존재를 나타내지만 각 가스의 다른 수준이 특정유형의 결함과 관련될 수 있기때문에 추가정보도 제공한다. HPLC 테스트는 오일의 글루코스 수치가 매우 적고 분해된 글로코스 형태가 매우 안정적 이지 않고 포도당 농도에 대한 표준값이 없고 결함과의 상관관계가 있기때문에 DGA와 동일한 불확실성을 가진다.

화학적 검출의 한계는 이러한 방법이 부분방전 절연손상의 위치 또는 범위에 대한 정보를 제공하지 않고, 부분방전 활동의 심각성과 관련하여 상당한 불확실성이 있으며, 평균적인 구성요소의 상태에 대한 즉각적인 정보를 제공하지 않는다[7].

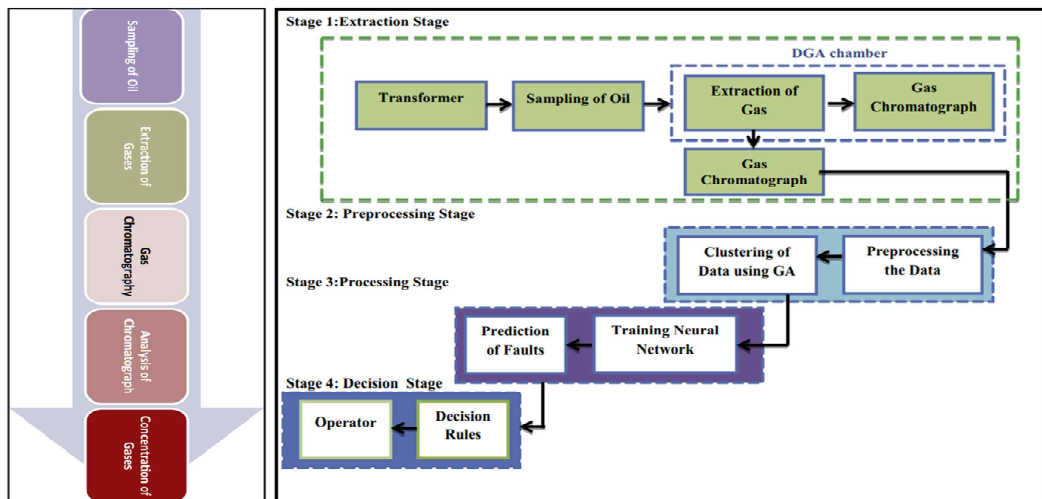


그림 5. 화학적 검출에 의한 부분방전 검출 방법

2.2.3 음향과 검출에 의한 방법

음향과 검출(acoustic detection)은 부분방전이 내는 소리 현상을 기반으로 하고, 이 소리는 현재 스트리머가 형성되고 스트리머를 둘러싼 물질이 증발할 때 생성된다. 증발은 압력장의 형태로 전파되는 기계적 에너지의 빠른 방출을 유발하는데, 가장 좋은 예는 번개가 치면 천둥이 형성되는 것이다[8].

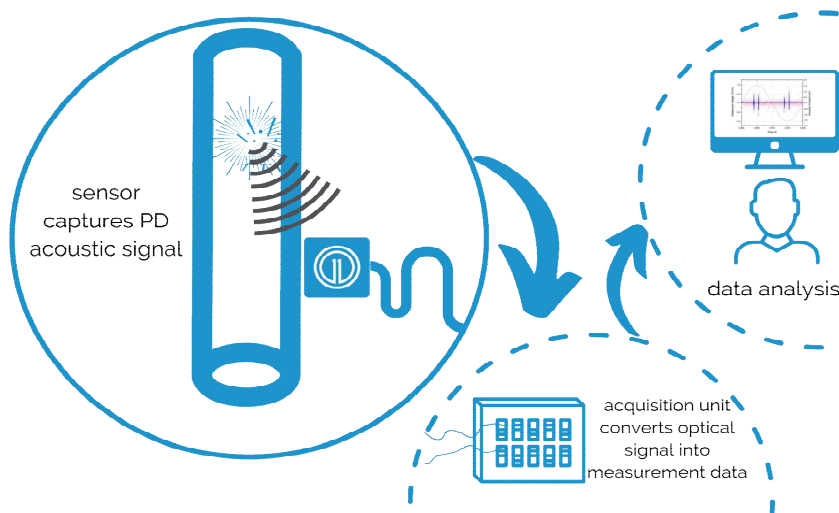


그림 6. 음향과 검출에 의한 부분방전 검출 방법

음향과 검출 시스템은 외부 및 내부 시스템의 두 가지 범주로 나눌 수 있는데, 현재 전력시스템에서 더 많이 활용되는 외부 음향과 검출 시스템은 부분방전 음향신호를 검출하기 위해 전력장비 외부에 장착된 센서를 사용한다. 반면 내부 시스템은 전력장비 내부에 설치된 센서를 사용하여 압력파를 직접 측정한다.

음향과 검출의 장점은 여러 위치에서 센서를 사용하여 위치정보를 사용할 수 있고, 이 위치정보는 부분방전의 유형과 절연결함의 심각도를 식별하는 데 도움이 될 수 있다. 전기에 비해 음향과 검출의 또 다른 장점은 전자기 간섭(EMI)에 대한 내성이 있어 음향과에 대한 더 나은 신호 대 잡음비(SNR)가 오경보를 덜 발생시켜 온라인 부분방전 검출에 이상적이다.

변압기 코어의 기계적 진동은 음향과 잡음의 주요 원인이지만 이러한 진동의 주파수

성분은 부분방전 음향과보다 낮고, 음향과 검출에도 한계가 있다. 음향과 검출의 단점은 음향과 전파 경로의 복잡한 특성이 존재하고, 수신된 음향과의 강도가 매우 낮아서 부분 방전을 검출하려면 센서가 신호진폭의 작은 변화에 반응해야 한다. 그리고 음향과에 의한 부분방전 검출장비의 유용성을 제한하는 중요한 점은 장치의 가격이 높아 압전 변환기 및 기타 기성품 구성요소와 같은 대량 생산 구성요소를 사용하는 검출 시스템보다 더 저렴하게 만들 수 없다.

부분방전 발생시 전기적 신호변화에 나타나는 물리적 현상은 음 또는 빛의 발생과 물질의 물리적 변화인데, 코로나 또는 연면 방전(creeping discharge)시 또는 고체절연의 내부 방전에서도 음파를 발생한다. 이 음파는 우리가 들을 수 있는 가청영역뿐만 아니라 들을 수 없는 초음파 영역까지의 대역을 가진다. 기중에서 일어나는 코로나와 같은 방전은 지향성을 갖는 초음파 마이크로폰(30 ~ 50kHz 대역)을 사용하여 발생 위치를 알아내는 데 사용된다. 고체 내부 방전인 경우, 압전효과를 이용하는 초음파 센서를 사용하여 부분방전의 측정과 발생 위치를 알아낸다.

3. 전자기파 및 음향파를 이용한 부분방전 위치검출 시스템 개발

전자기파와 음향파를 이용한 부분방전 위치검출 시스템은 부분방전 위치검출 하드웨어, 소프트웨어, 그리고 모니터링 서버로 구성되고, 그림 7은 부분방전 위치검출 시스템의 개요도를 나타낸다.

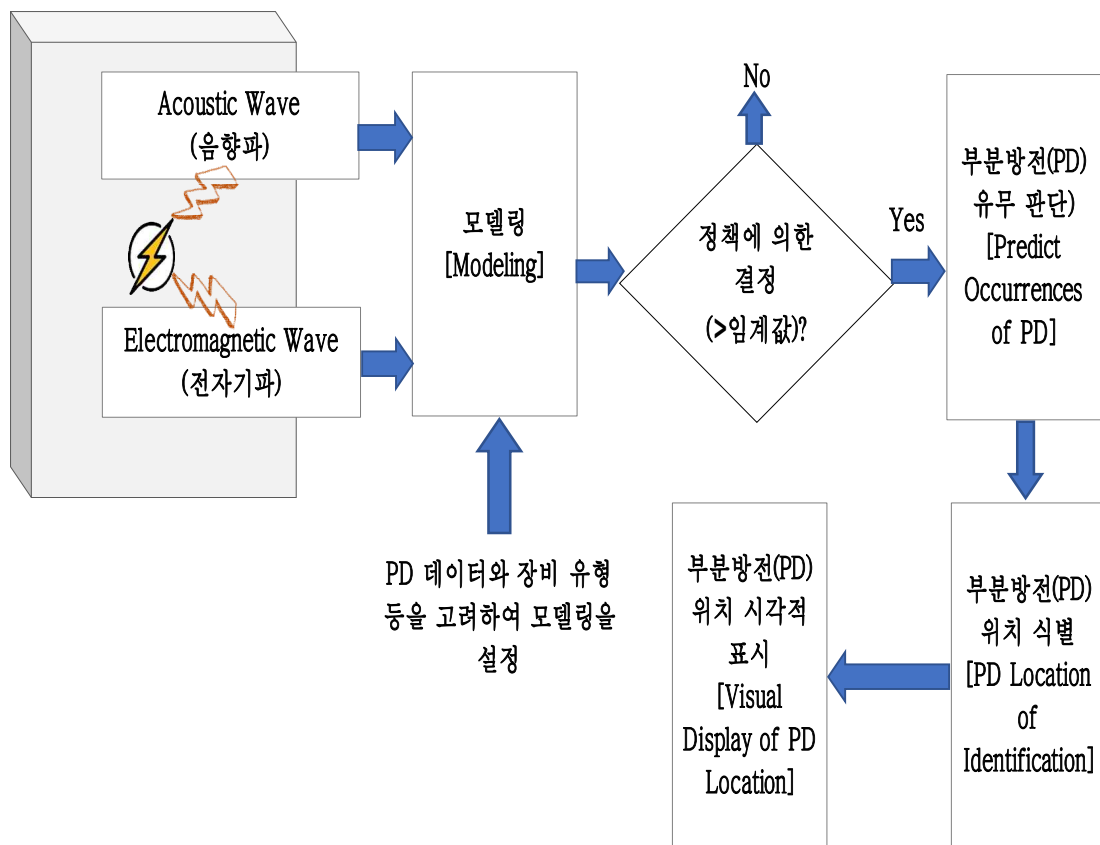


그림 7. 부분방전 위치검출 시스템 개요도

3.1 부분방전 검출 모듈 개발

3.1.1 전자기파에 의한 부분방전 검출 모듈 개발

부분방전에서 발생하는 초고주파(UHF)를 검출하기 위한 일반적인 프로세스는 그림 8과 같다[9,10].

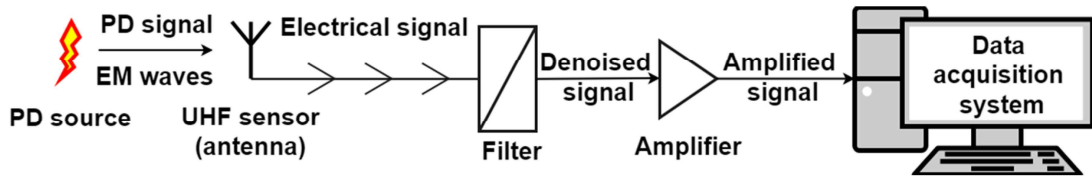
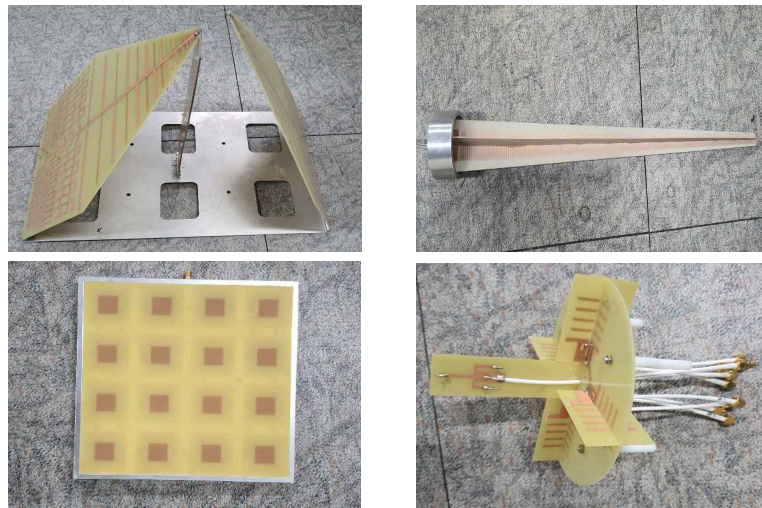
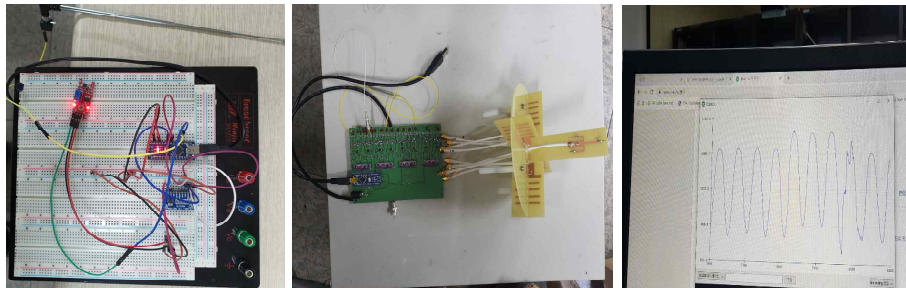


그림 8. 일반적인 초고주파 측정 프로세스

그림 8에서 전자기파를 검출하기 위한 안테나와 센서는 그림 9와 같다.



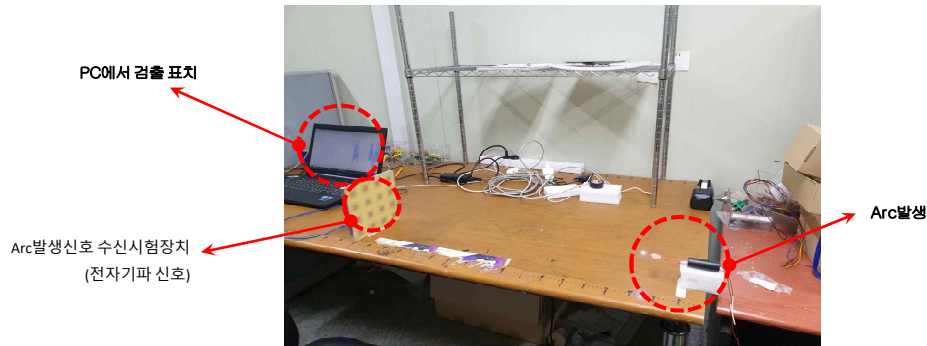
(a) 안테나



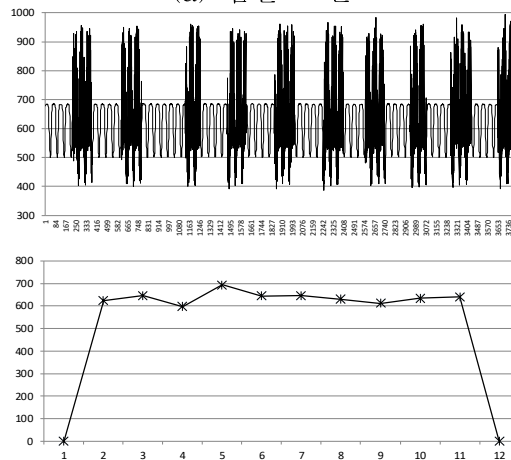
(b) 센서

그림 9. 전자기파 검출을 위한 안테나와 센서

전자기파에 의한 부분방전 검출모듈에 대한 하드웨어와 검출시험 결과는 그림 10과 같다.



(a) 검출 모듈



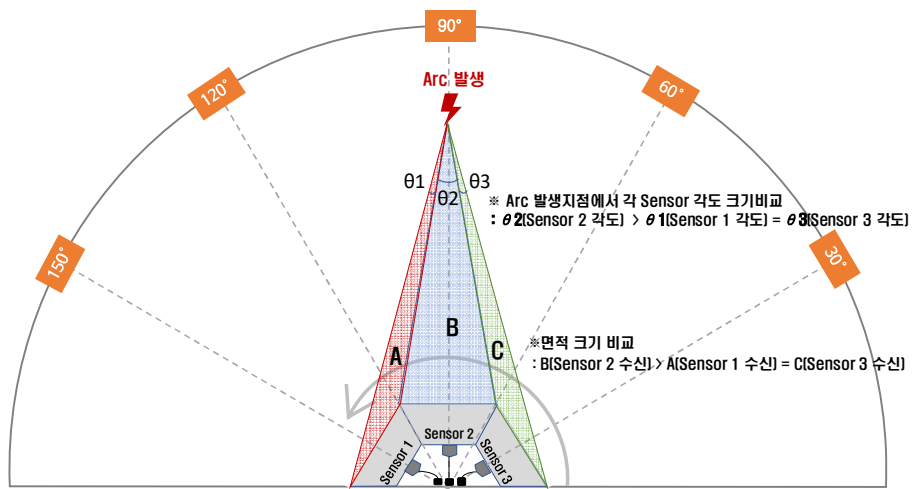
(b) 검출시험 결과

그림 10. 전자기파 감지를 위한 검출 모듈과 검출시험 결과

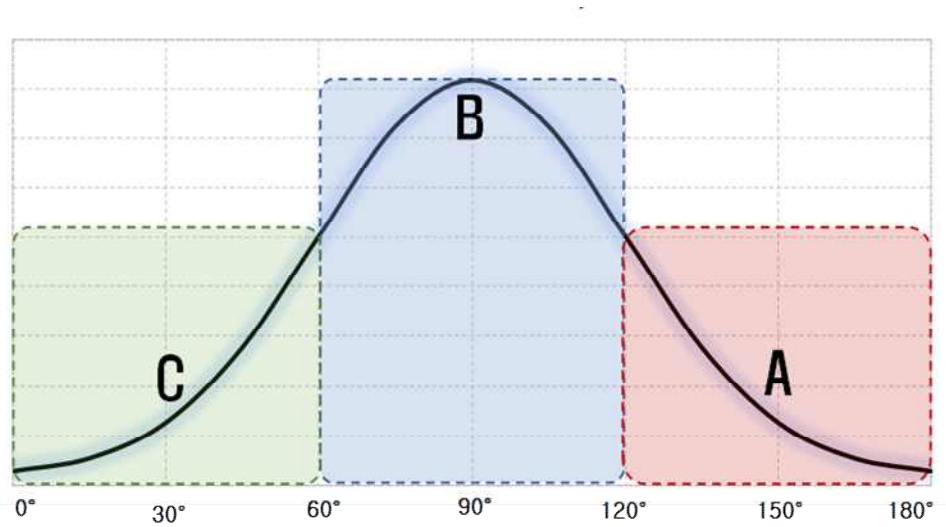
3.1.2. 음향파에 의한 부분방전 검출 모듈 개발

전기설비의 공간 방향에 따라 아크 발생시 생성되는 음향파의 강도(intensity)는 일정한 공간내에서의 거리와 방향에 따른 변수로 볼 수 있으며, 발생지역에 의해 검출되는 음향파 강도의 세기는 달라진다. 음향파는 지향성에 대한 특징이 있어 주파수가 높을수록 지향성이 높아지는 특징이 있으므로, 수신에 효과적인 원추형을 적용한다. 그림 11에서 각 센서들이 음향파를 효과적으로 수신할 수 있도록 각 센서를 기준으로 오목하게 원뿔형으로 고안하였다. 이 경우에는 Sensor1과 Sensor2로의 음향파 수신시 전자기파가 반사되어 Sensor1 또는 Sensor2쪽으로 수신되지 않고, Sensor1 또는 Sensor2 쪽으로의 음향파 강도는 낮아진다.

그림 11(a)에서 음향파에 의한 아크감지기는 아크 발생지점(90도)에서 Sensor2와의 거리 및 방향이 가장 근접되어 있고, 아크 발생지점(90도)을 예로 보면, 음향파를 효과적으로 수신할 수 있도록 각 센서를 기준으로 오목하게 원뿔형으로 고안되어 Sensor1과 Sensor2로의 음향파 수신시 반사되어 Sensor1 또는 Sensor2 쪽으로 수신되지 않고 반사되어 Sensor1 또는 Sensor2 쪽으로의 음향파의 강도를 낮도록 하였다. 그림 11(b)에서 Sensor2와의 상관관계인 면적 B는 Sensor1의 면적 A와 Sensor3의 면적 C보다 큰 것을 알 수 있다[11].



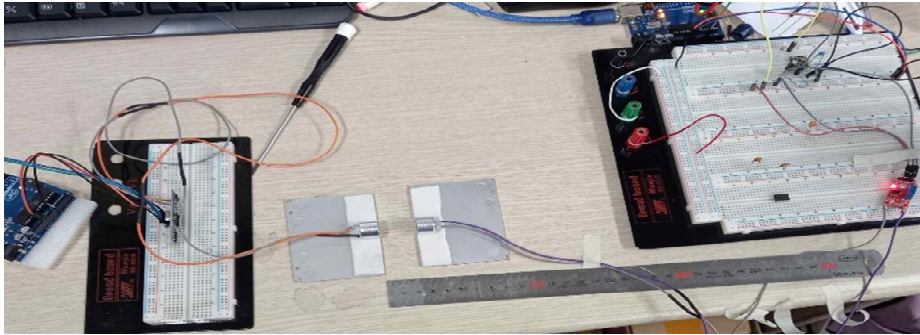
(a) 음향과 감지기 구조



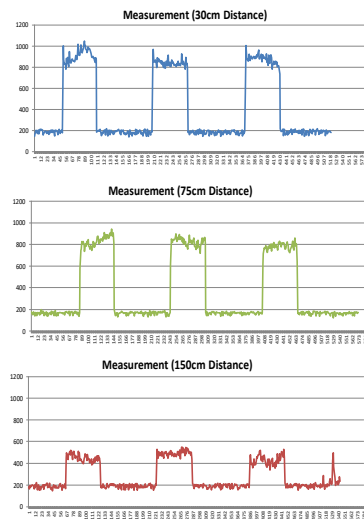
(b) 음향과 강도

그림 11. 아크 발생에 수신되는 음향과 감지기 구조와 음향과 강도

음향파 발생 거리에 따른 음향파 검출 센서 모듈과 측정 모듈은 그림 12와 같다. 그림 12(a)는 음향파 검출 센서 모듈을 나타내고, 그림 12(b)에서 모든 측정거리(30cm, 75cm, 150cm)에서 음향파가 검출되고 거리가 30cm일 때 음향파 강도가 제일 높음을 알 수 있다.



(a) 음향파 검출 센서 모듈



(b) 거리별(30cm, 75cm, 150cm) 음향파 측정 모듈

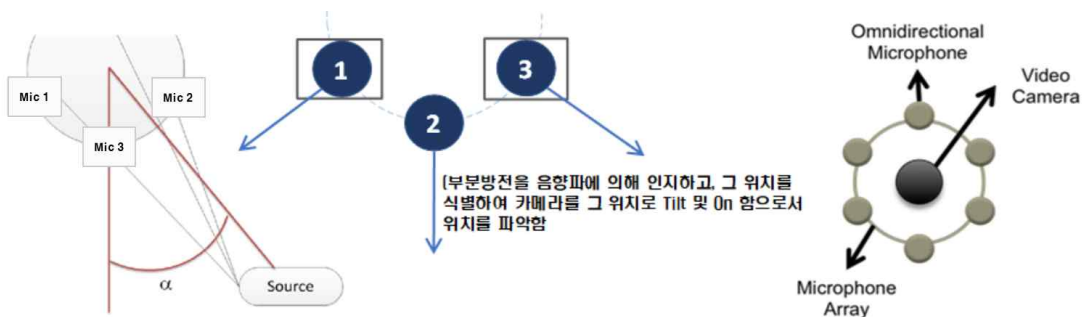
그림 12. 음향파 검출을 위한 센서 모듈과 음향파 강도

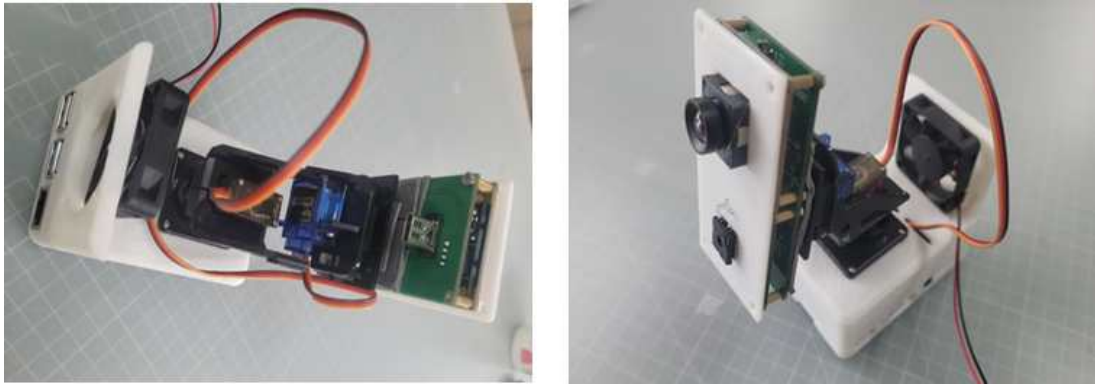
3.2 부분방전 위치검출 시스템 개발

3.2.1 부분방전 위치검출 하드웨어 개발

전기설비 공간에서 발생하는 아크는 전력기기의 절연열화 현상의 하나로, 전력계통망의 사고, 썬지(surge)와 같은 외부적인 요인과 과부하, 기기의 노후화 등과 같은 내부적인 요인에 의해 열화 또는 절연파괴와 같은 현상에 의해 발생된다. 따라서 수배전 설비에서 아크가 발생하는 경우 더 큰 사고로 이어지기 전에 빠르게 상황을 판단하고 능동적으로 대처할 필요가 있다. 전기설비의 공간 방향에 따라 아크 발생시 생성되는 음향파의 강도는 일정한 공간 내에서의 거리와 방향에 따른 변수로 볼 수 있어 발생 지역에 의해 검출되는 음향파 강도는 달라진다.

음향파는 지향성에 대한 특징이 있어 주파수가 높을수록 지향성이 높아지므로, 센서의 방향성을 명확히 하면 그 방향성에서 수신되는 음향파를 효과적으로 수신할 수 있다. 시각적 위치검출 방법과 하드웨어 구성은 그림 13과 같다. 부분방전은 어레이(array) 방식의 음향파 검출 모듈을 사용하여 음향파에 의해 인지하고, 그 위치를 식별하여 해당 방향으로 카메라를 Tilt하여 스크린과 제어장치 모듈의 7인치 LCD를 통해 위치를 파악한다[11].





(b) 하드웨어 구현

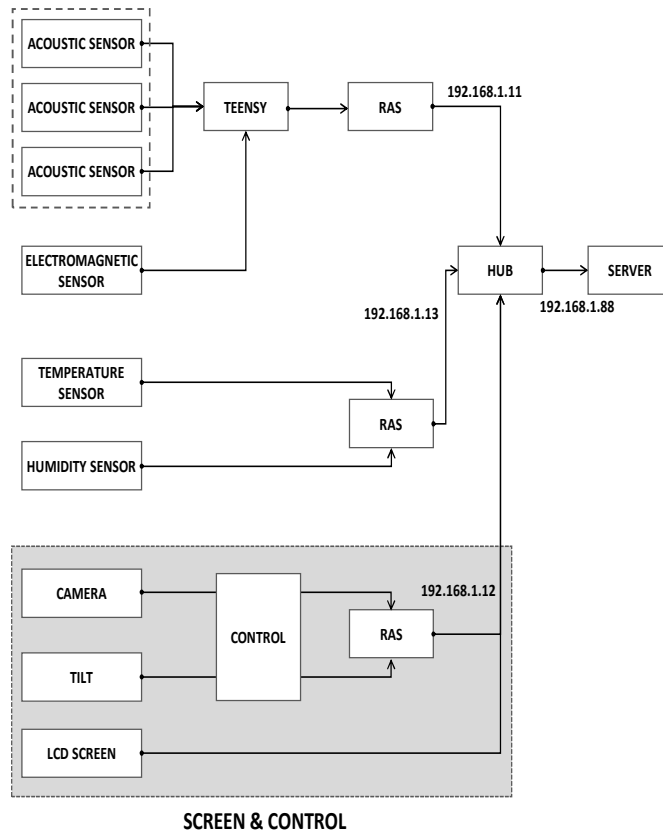
그림 13. 시각적 부분방전 위치검출 모듈과 하드웨어 구현

그림 14는 아크 발생을 식별하기 위한 전자기파 모듈, 음향과 모듈 및 위치검출 모듈을 통합하여 제작한 부분방전 위치검출 하드웨어 통합 모듈을 나타낸다.

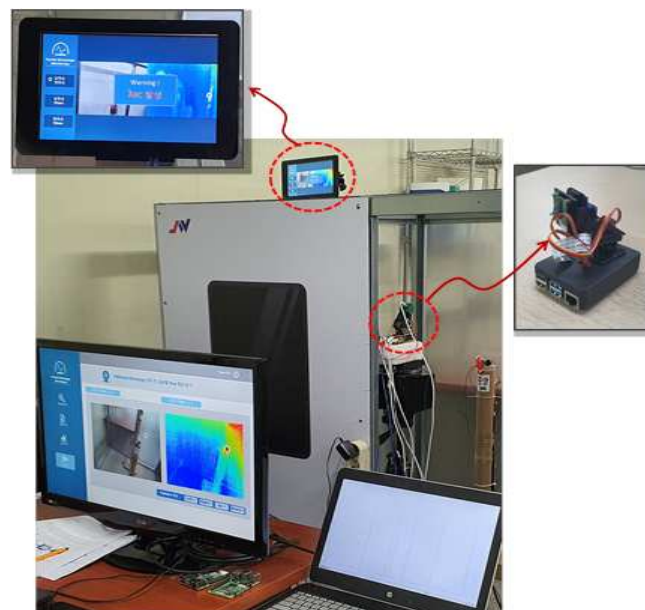


그림 14. 시각적 부분방전 위치검출 하드웨어 통합 모듈

그림 15에서 부분방전 위치검출 하드웨어는 전기설비의 외부 스크린과 제어 장치가 추가로 구성되는데, 이는 전자기파 식별 모듈과 음향과 식별 모듈로부터 입력된 데이터를 통해 아크 발생 여부를 판단하고, 카메라의 위치를 이동하여 아크 발생 위치를 스크린에 표시를 위해, 원격 모니터링 서버로 이동하여 실행하도록 기능한다.



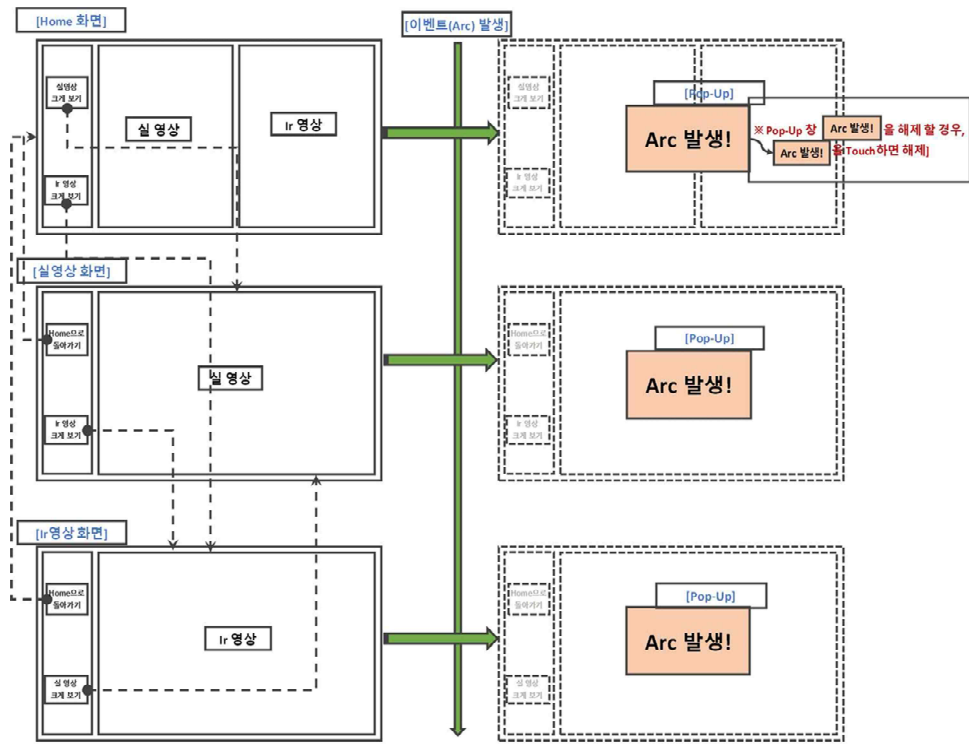
(a) 구성도



(b) 하드웨어 구현

그림 15. 부분방전 위치검출 스크린과 제어 장치의 구성도와 하드웨어 구현

그림 16은 스크린과 제어를 위한 유저 인터페이스 설계를 위한 UI 디자인 구성도와 모니터 구현을 나타낸다. Pop-Up 창에 나타난 Arc 발생을 해제하려고 할 경우에는 모니터의 “Arc 발생” 부분을 터치하면 해제하도록 설계하였다.



[SCREEN & CONTROL에 대한 UI 디자인 & 구성]

(a) UI 디자인 구성도



(b) 모니터 구현

그림 16. 스크린과 제어를 위한 유저 인터페이스 설계 및 구현

3.2.2 부분방전 위치검출 소프트웨어 개발

그림 17은 복합 감지 측정에 의한 부분방전 위치검출 기능과 시각적 부분방전 위치 적용 표출기능을 위한 전체 흐름도를 나타낸다. 전체 소프트웨어는 배전반내의 부분방전에 대한 전자파와 음향파 검출 기능, 부분방전 표출 기능, 부분방전에 대한 위치검출 기능, 아크 등의 부분방전에 의한 시각적 제어 기능 등을 포함하고 있다[11].

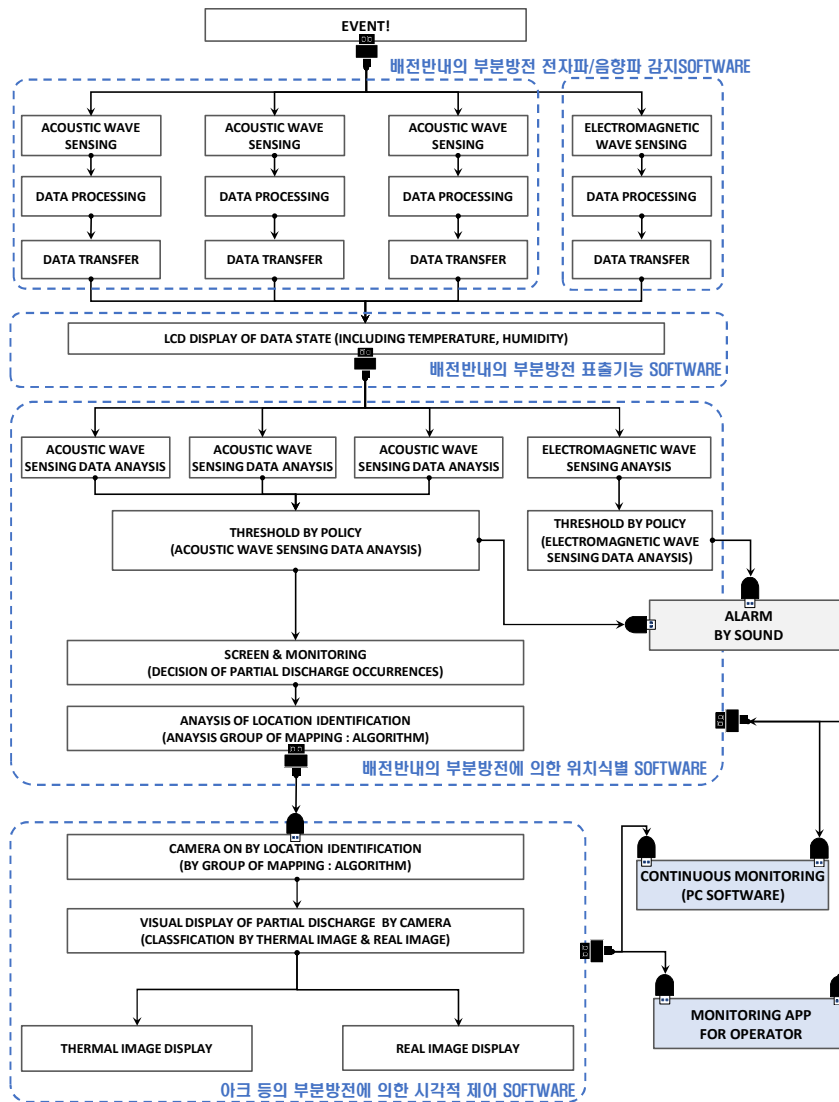


그림 17. 시각적 부분방전 위치검출 소프트웨어 흐름도

그림 18은 복합 감지 측정에 의한 부분방전 검출 기능을 수행하기 위한 임계치 설정, 검출 및 알람 기능을 수행하는 흐름도를 나타낸다.

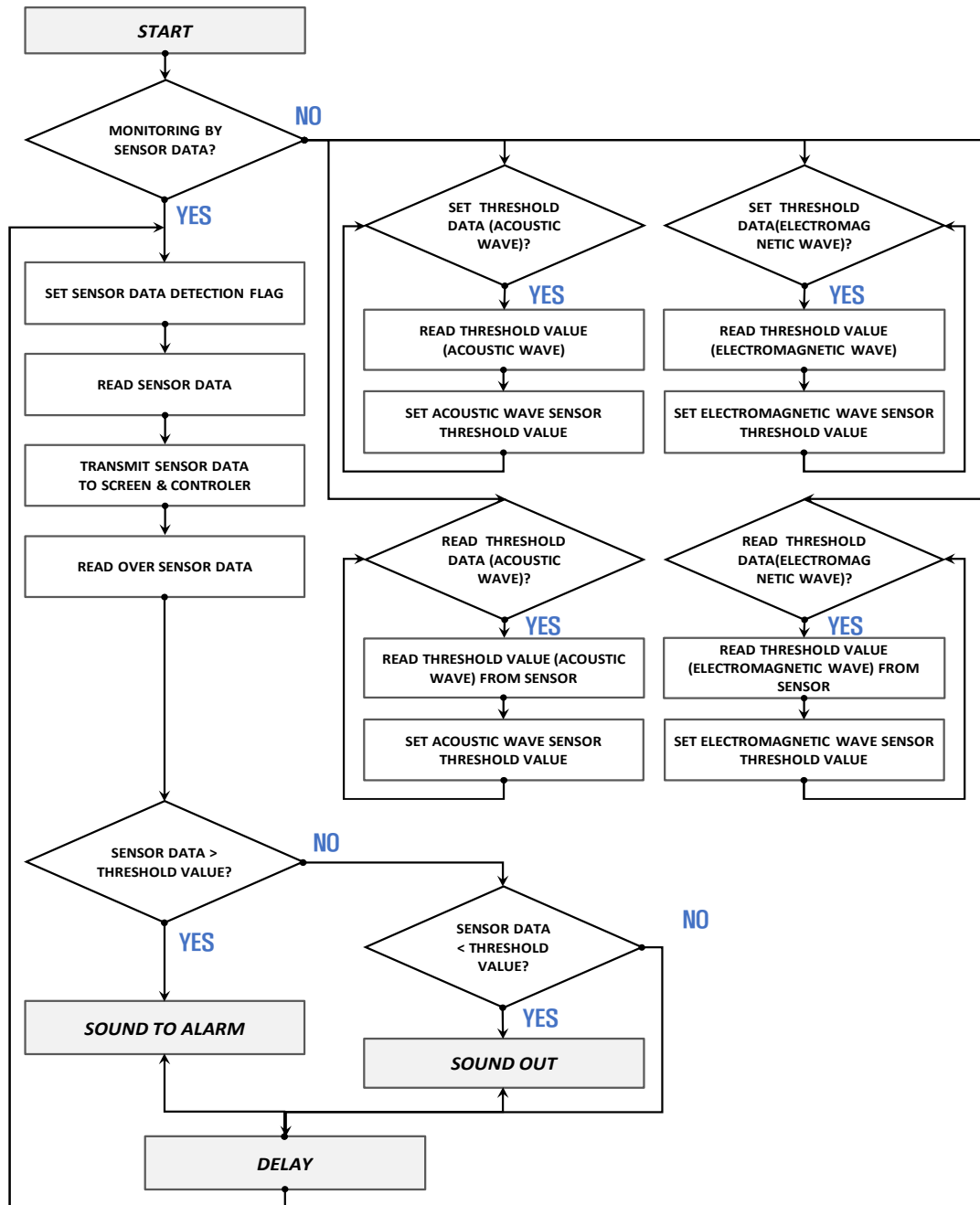


그림 18. 임계치 설정, 검출 및 알람 기능 흐름도

그림 19는 아크 발생시에 부분방전의 전자파 및 음향파 표출 기능을 수행하는 과정을 나타내는 흐름도이다.

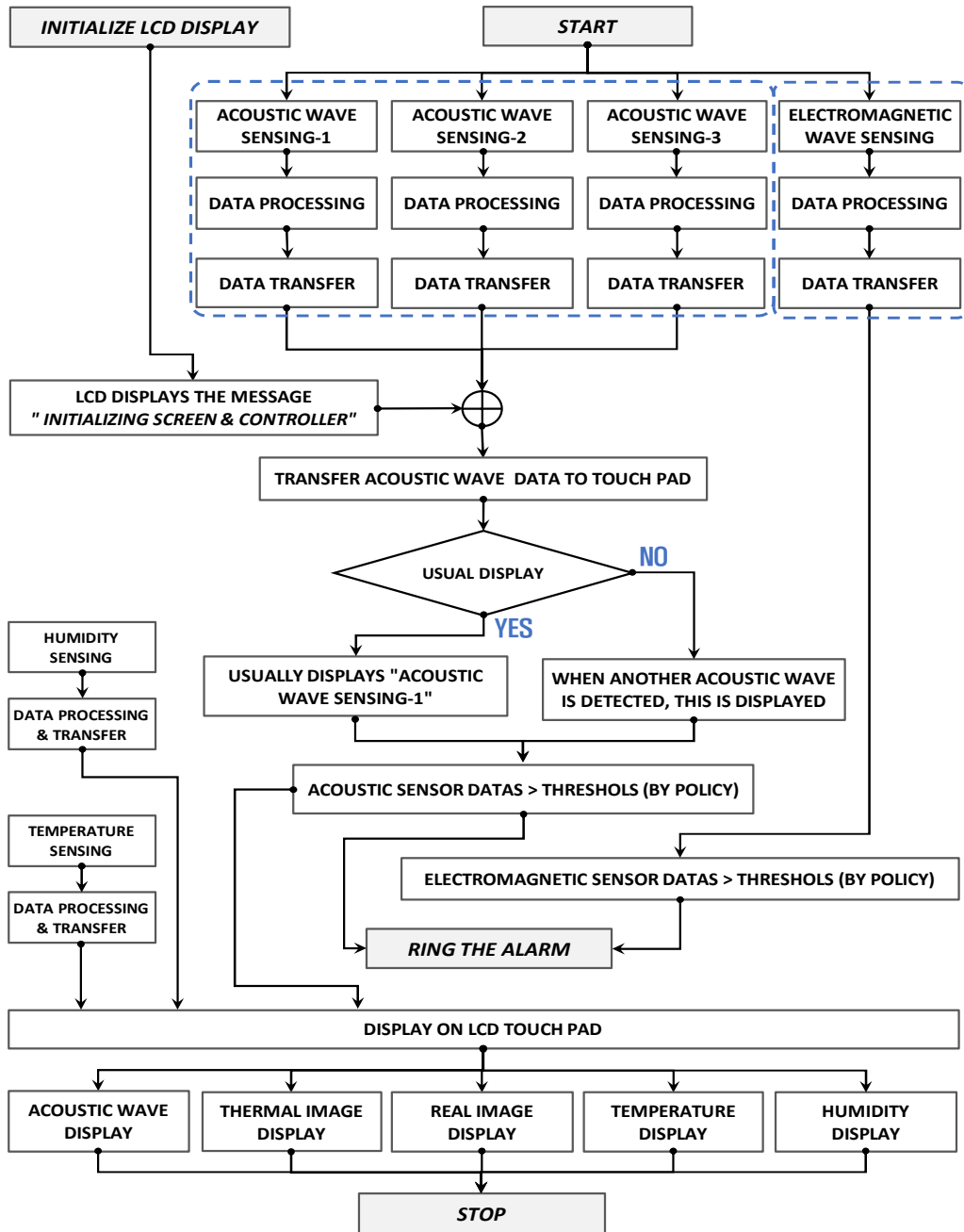


그림 19. 부분방전의 전자기파 및 음향파 표출 기능 흐름도

그림 20과 그림 21은 아크 발생시에 위치를 식별하여 해당 방향으로 카메라를 Tilt하여 아크가 발생하였는가를 결정하는 위치검출 방안과 흐름도를 나타낸다. 카메라가 Tilt하는 동안 각 어레이는 광원을 수집하여 전기적인 신호로 변환하는 절차, 그리고 이 신호를 통해 부분방전 위치를 식별하는 절차를 나타낸 흐름도이다[11].

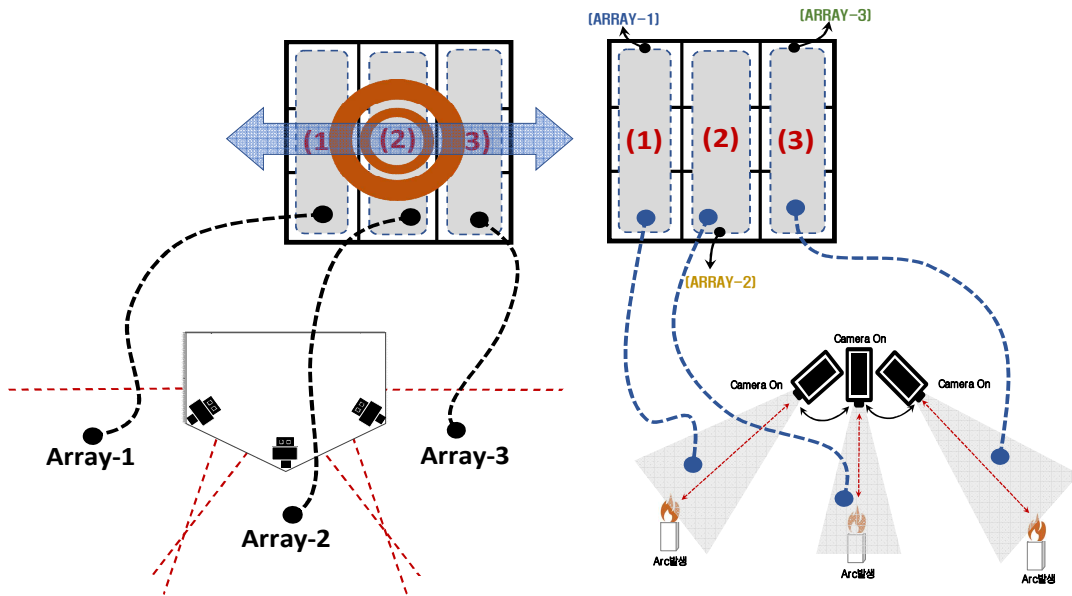


그림 20. 부분방전 위치검출 방안

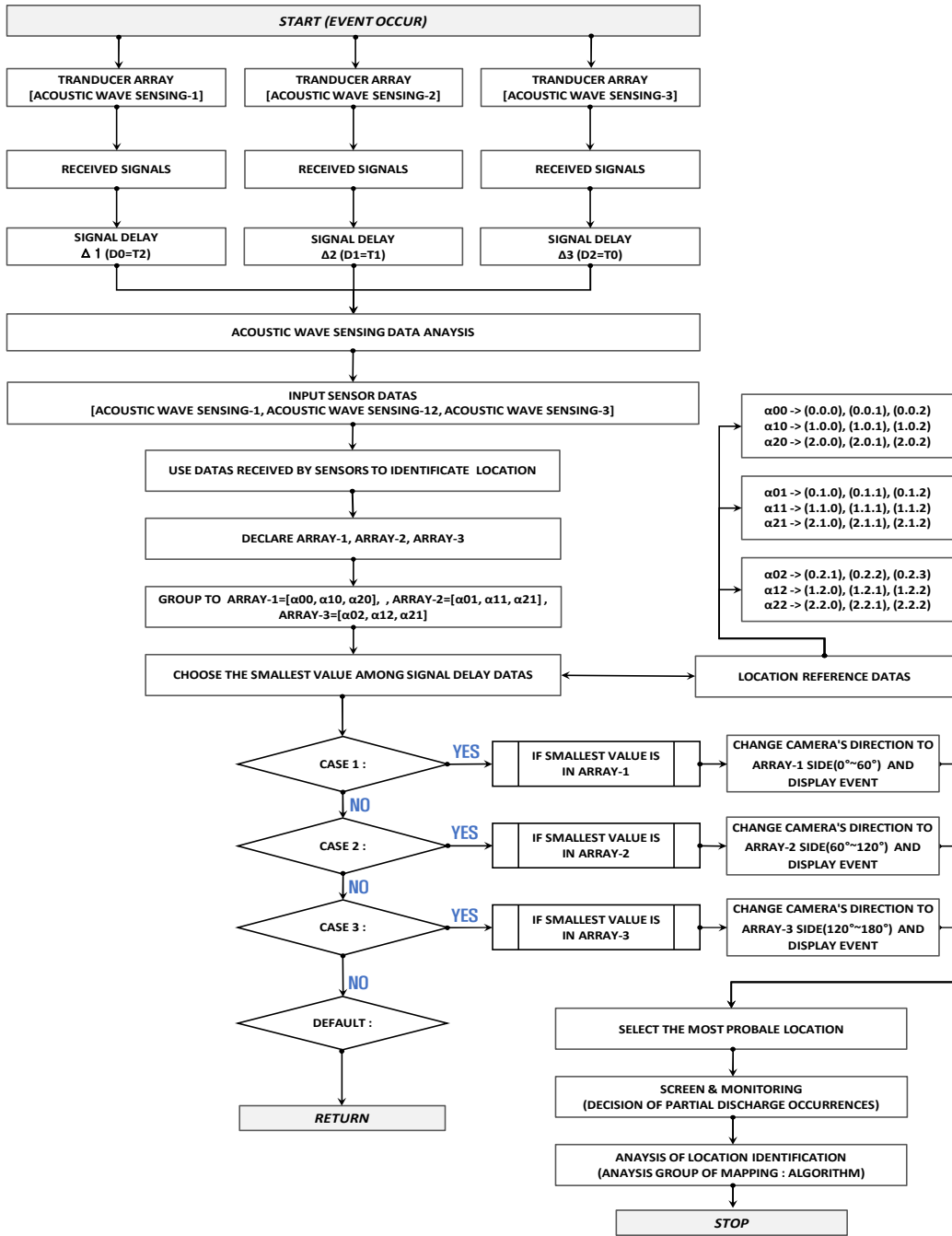


그림 21. 부분방전 위치검출 흐름도

3.2.3 부분방전 위치검출 모니터링 장치 개발

부분방전 위치검출 모니터링 서버(server)는 전자기파와 음향과 모듈로부터 데이터 수신을 하고, 모니터링 알고리즘에 의해 알람 표시 판단을 위해 아크 발생으로 부분방전이 나타나는 경우 이에 대한 데이터를 표시하며 GUI를 통해 알람을 표시한다. 그림 22는 부분방전 위치검출 모니터링을 위한 원격 모니터링 서버의 전체 Architecture이다.

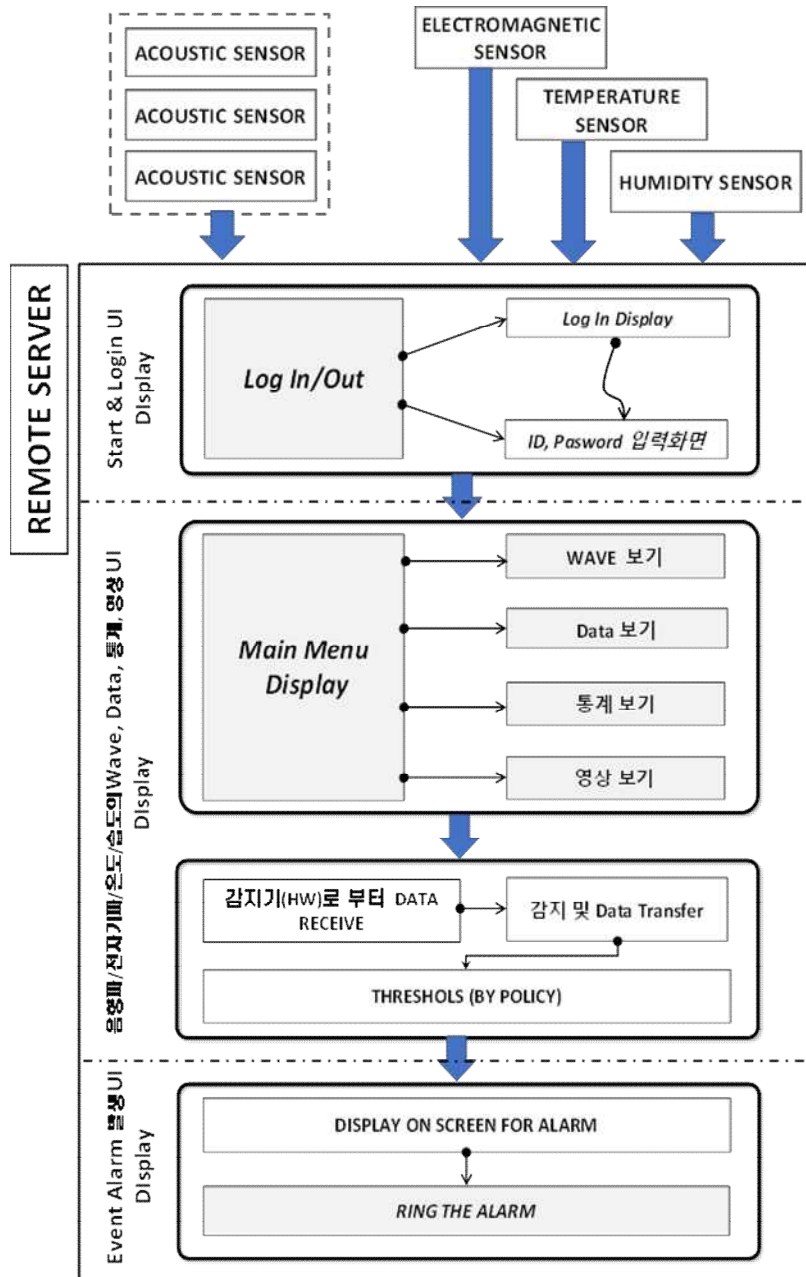


그림 22. 원격 모니터링 서버의 전체 개요도

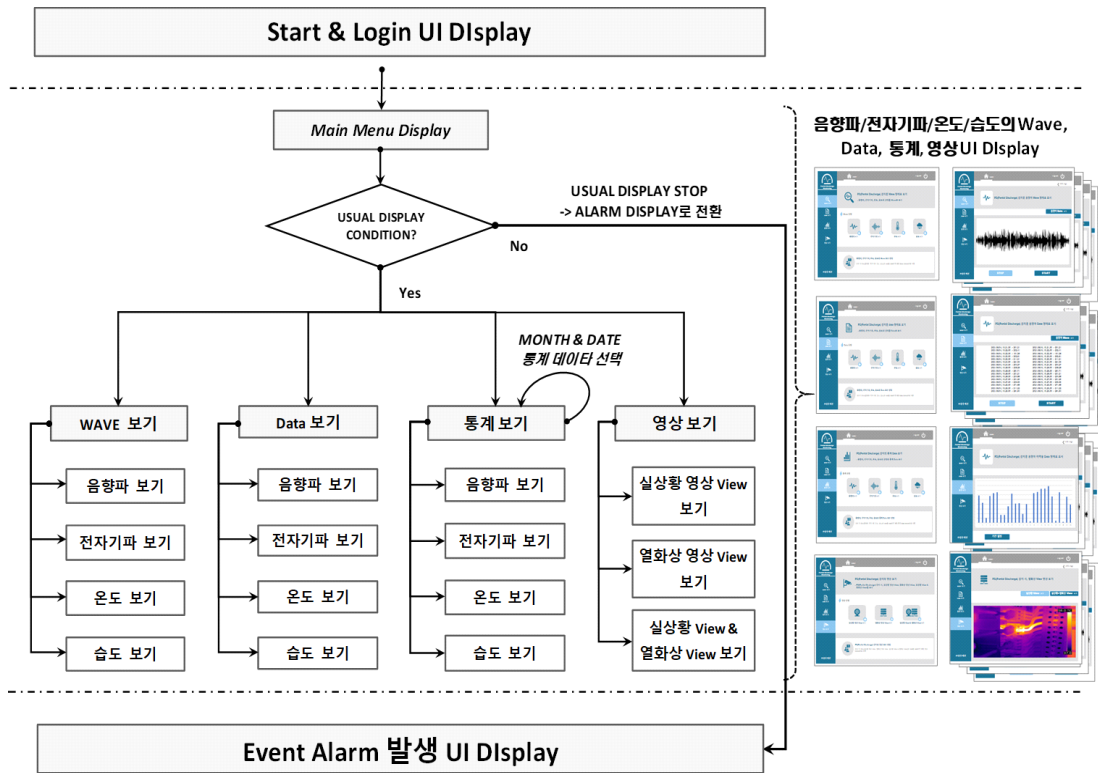
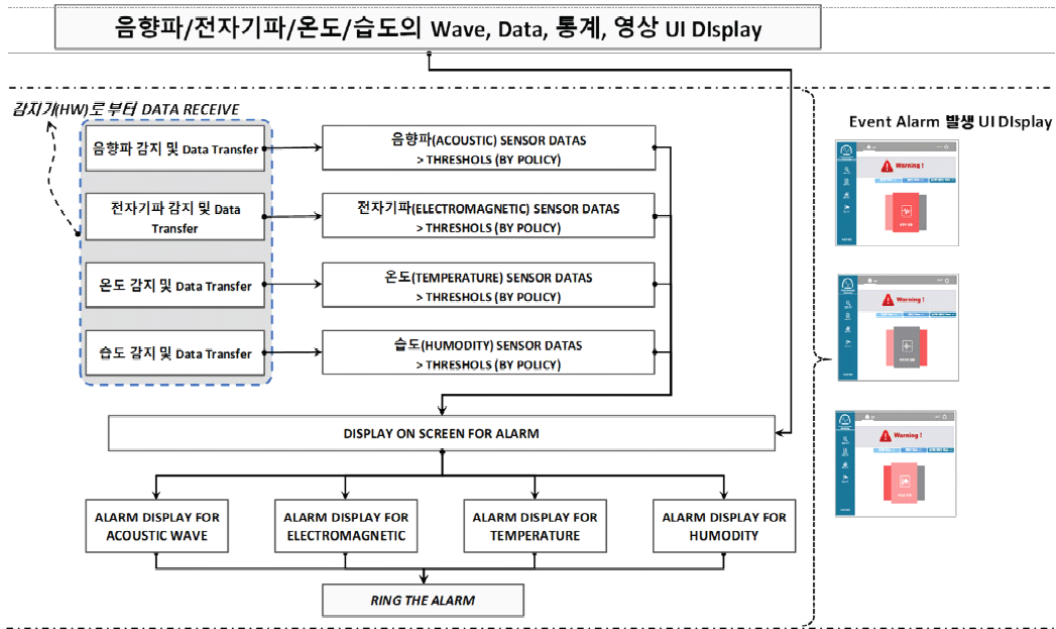
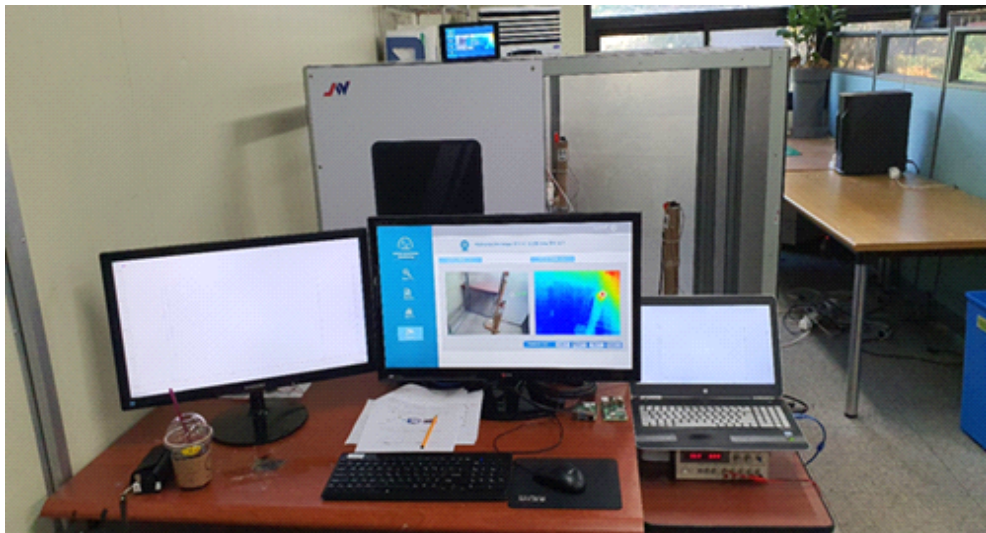


그림 24. 음향파, 전자기파, 온도, 습도의 파형, 데이터, 통계 및 영상 모니터링 개요도

그림 25는 음향파와 전자기파가 임계치 이상인 경우에 모니터에 알람을 표시되도록 하는 모니터링 모니터링 개요도와 원격 서버 장치를 나타낸다.



(a) 알람 발생 모니터링 개요도



(b) 원격 서버 장치

그림 25. 알람 발생 모니터링 개요도와 원격 서버 장치

그림 26은 원격 모니터링 소프트웨어를 통한 관측 결과로 모니터에 나타낼 수 있는 데이터 표시, 통계데이터 표시, 이미지 표시 및 이벤트 팝업 기능을 나타낸다.

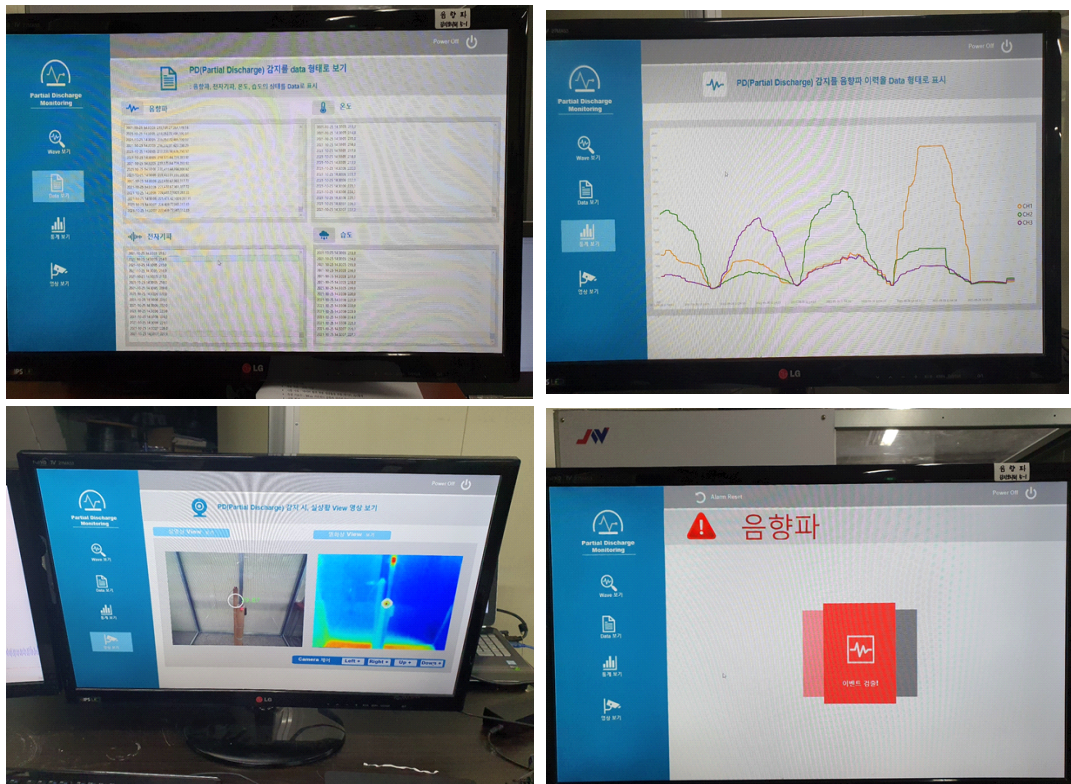


그림 26. 원격 모니터링 소프트웨어를 통한 관측 결과

4. 실험 및 결과

4.1 실험 항목 및 구성도

본 논문에서는 전자기파와 음향파를 이용한 부분방전 위치검출장치 하드웨어, 소프트웨어, 그리고 모니터링 서버를 개발하였다. 개발 결과물은 부분방전 위치검출 모니터링 시스템의 구성요소이므로, 전체 시스템에 대한 검증을 위해 다음과 같은 세 가지의 실험 항목을 설정하였다.

- i) 아크 발생시 전자기파와 음향파에 의한 부분방전 검출 정확도
- ii) 부분방전 위치 식별 정확도
- iii) 이벤트 발생시 시각적 표출 정확도

그림 27은 부분방전 위치검출 모니터링을 위한 전체 시스템 통합에 따른 시험을 위한 구성요소 및 시험 구성도를 나타낸다.

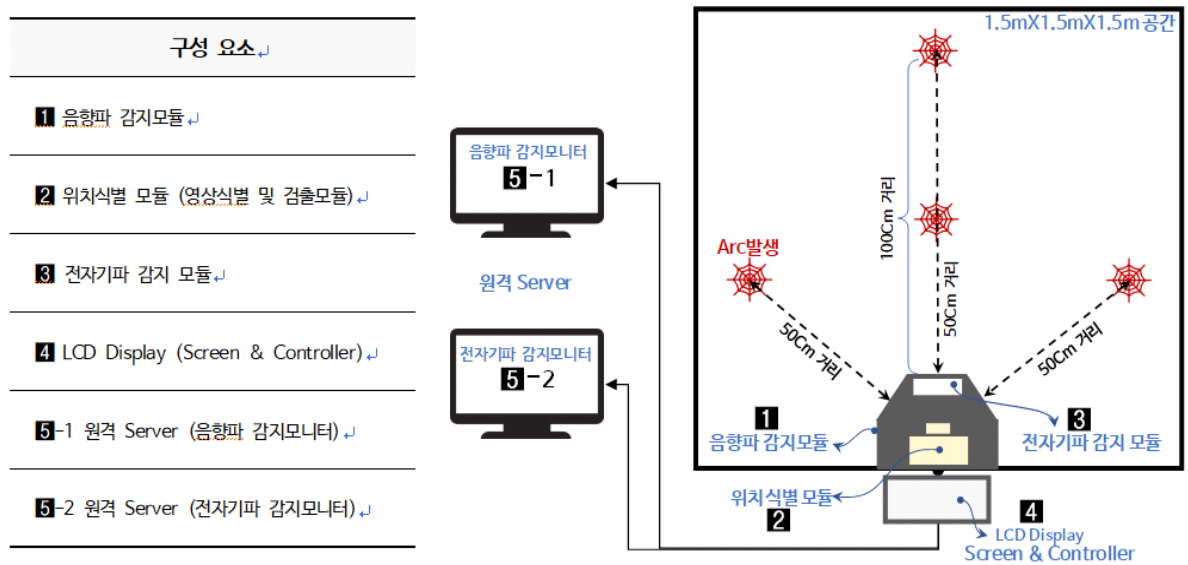
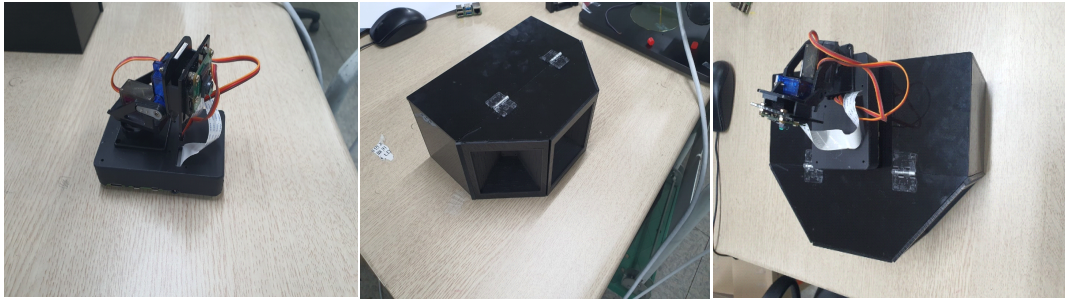
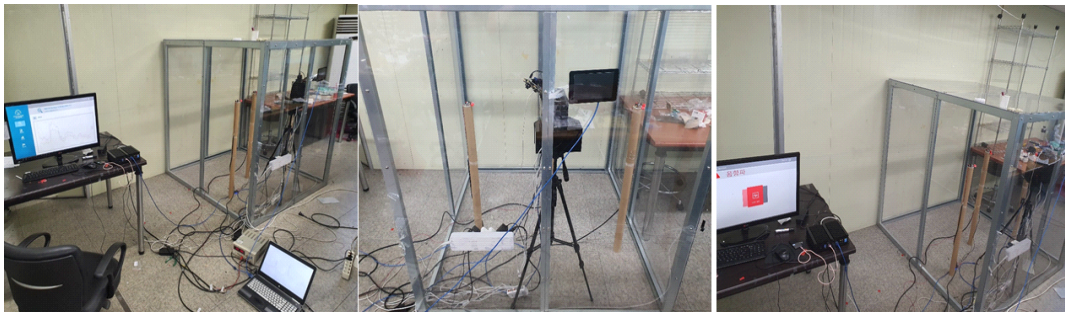


그림 27. 전체 시스템 통합에 따른 시험을 위한 구성 요소 및 시험 구성도

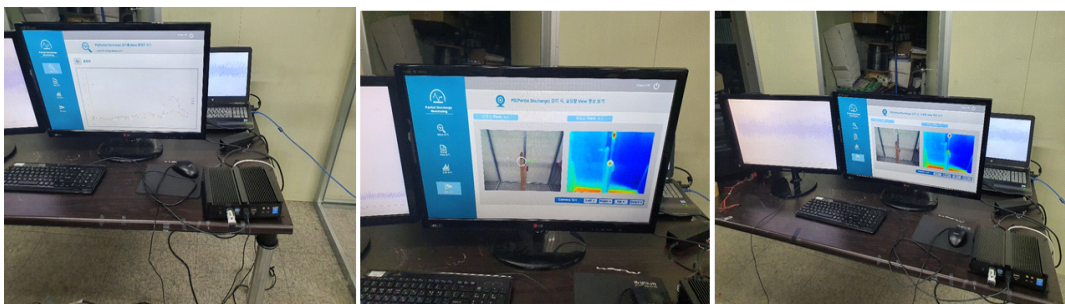
그림 28은 부분방전 위치검출 모니터링을 위한 전체 시스템 통합에 따른 시험을 위한 하드웨어 장치를 나타낸다. 전체 통합 하드웨어는 전자기파, 음향파와 위치검출 기능을 모두 통합한 모듈, 각 모듈별 유선 및 무선 세팅, 그리고 음향파와 전자기파 검출 모니터링으로 구성된다.



(a) 전자기파, 음향파, 위치검출 통합 모듈



(b) 각 모듈별 유선 및 무선 세팅



(c) 음향파와 전자기파 검출 모니터링



(d) 전체 통합 하드웨어 시스템

그림 28 부분방전 위치검출 모니터링 하드웨어 시스템

4.2 실험 결과

아크 발생시 전자기파와 음향파에 의한 부분방전 검출 정확도 측정은 그림 29와 같이 아크 발생시에 원격 서버의 전자기파와 음향파 검출모니터에서 동시에 나타나고 이를 육안으로 확인하는 과정을 통해 이루어진다. 실험은 1.5m×1.5m×1.5m 시험공간 내에서 50cm의 거리에서 아크를 1 ~ 2초 정도 발생시키고 3 ~ 4초 정도 기다리고, 다시 1 ~ 2초 정도를 10번 발생시킨다.

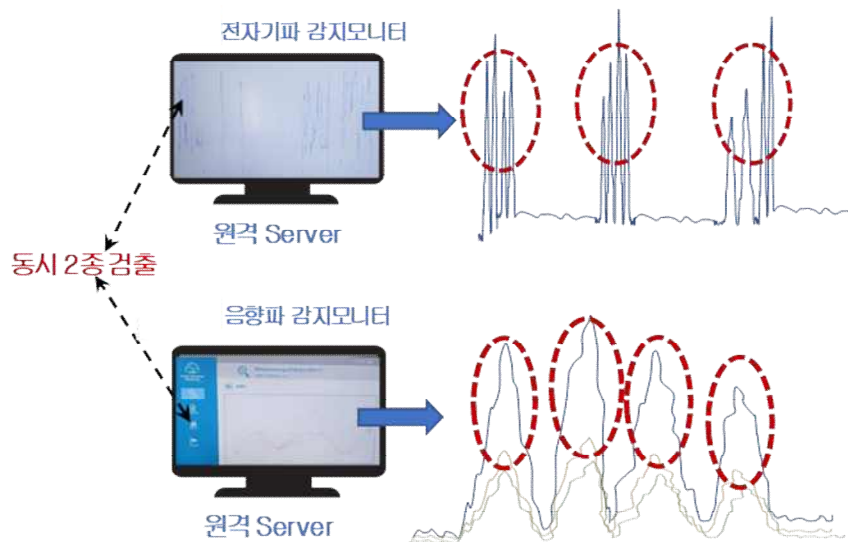


그림 29. 아크 발생시 전자기파와 음향파에 의한 부분방전 검출

그림 30은 아크 발생시 전자기파와 음향파에 의한 부분방전 검출 결과를 나타낸다. 50cm의 거리에서 5회의 아크를 발생시켜 원격 서버에서 전자기파와 음향파 검출 파형을 확인하였고 5회 모두에서 전자기파와 음향파를 확인하였다. 그리고 50cm의 거리에서 아크 발생에 따라 아크 발생 시간과 검출모니터에 나타나는 시간의 차이를 측정한 결과 모두 0.2초내에 식별이 이루어짐을 확인하였다.

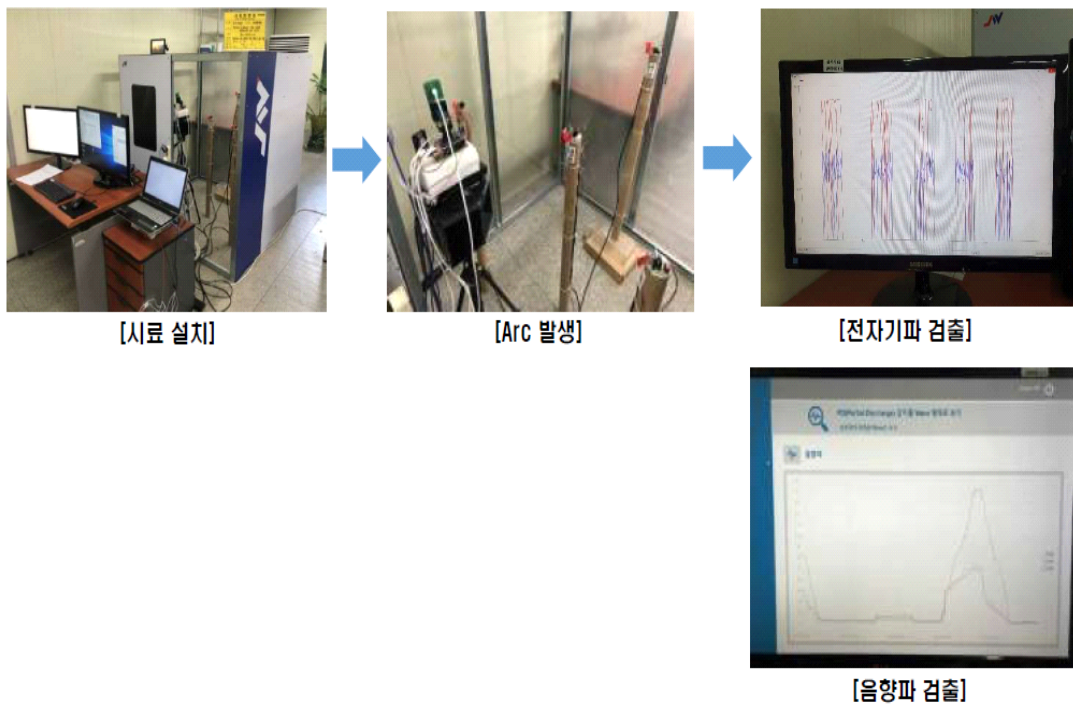


그림 30. 아크 발생시 전자기파와 음향파에 의한 부분방전 검출 결과

아크 발생시 부분방전 위치검출 정확도 측정은 그림 31과 같이 좌측, 중앙, 우측 부분에서 아크 발생에 따른 위치에 원격 서버의 위치검출 모니터에서 영상으로 나타나고 이를 육안으로 확인하는 과정으로 진행된다. 실험은 1.5m×1.5m×1.5m 시험공간 내에서 50cm의 거리에서 아크를 1 ~ 2초 정도 발생시키고 음향파 검출 데이터에 의해 해당 방향으로 카메라가 움직여 아크 발생위치를 식별한다. 1 ~ 2초 정도의 아크를 좌측, 중앙, 우측 순서로 15번 발생시킨다.

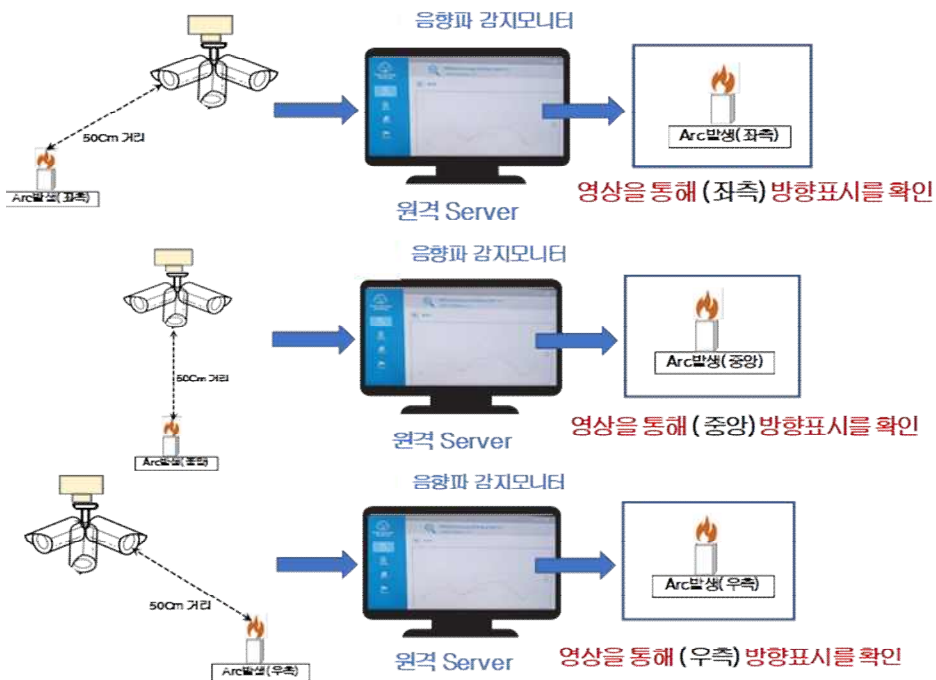


그림 31. 아크 발생시 부분방전 위치검출

그림 32는 아크 발생시 부분방전 위치검출 결과를 나타낸다. 50cm의 거리에서 아크를 좌측, 중앙, 우측에서 발생시켜 원격 서버의 검출 모니터에서 위치를 확인하였고, 5회를 반복해서 실험하였는데 5회 모두에서 위치검출이 정확히 이루어졌다.

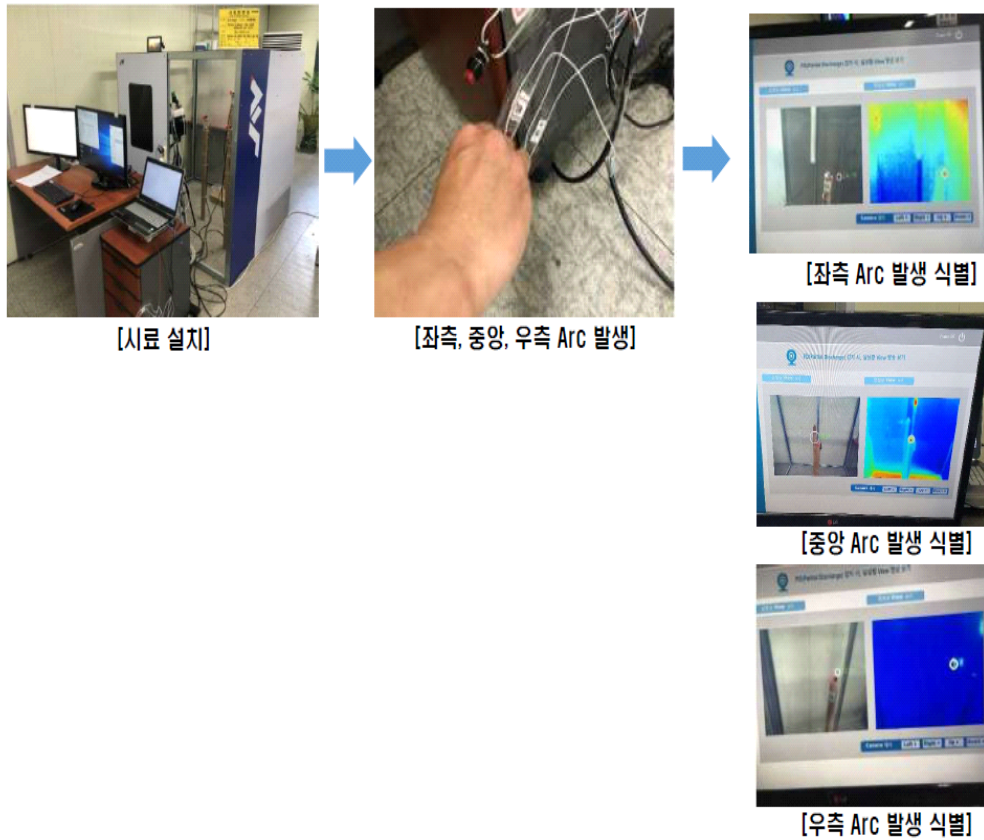


그림 32. 아크 발생시 부분방전 위치검출 결과

이벤트 발생시 부분방전 시각적 표출 정확도 측정은 그림 33과 아크 검출시에 데이터를 전송하여 시험공간 외부에서 시각적으로 실영상과 Ir영상이 동시에 아크 발생 지점을 보여주는지 여부를 파악하고, 이에 대한 정확도를 %로 나타낸다. 실험은 1.5m×1.5m×1.5m 시험공간 내에서 50cm의 거리에서 아크를 1 ~ 2초 정도 발생시키고, 이를 반복하여 좌측에서 우측으로 번갈아가며 총 10회를 실시한다.



그림 33. 이벤트 발생시 부분방전 시각적 표출

그림 34는 이벤트 발생시 시각적 표출 결과를 나타낸다. 아크 검출시에 데이터를 전송하여 시험공간 외부에서 시각적으로 실영상과 Ir영상이 동시에 아크 발생 지점을 보여주는 것을 확인하였고, 위의 과정을 반복하여 5회를 실시한 결과 5회 모두 아크 발생 시에 실영상과 Ir영상이 동시에 아크 발생 지점을 표시되었다.

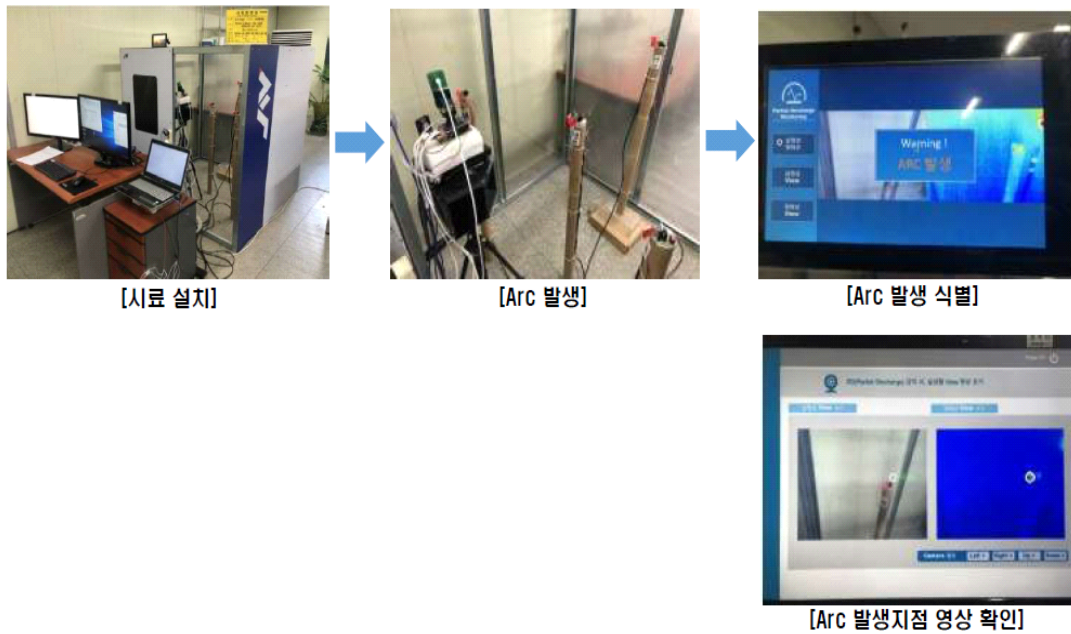


그림 34. 이벤트 발생시 부분방전 시각적 표출 결과

5. 결 론

본 논문에서는 부분방전에 의한 전기사고의 예방을 위해 배전반에 적용하도록 전자기파와 음향파를 이용한 복합 검출로 부분방전의 동시측정, 위치 식별, 그리고 시각적 부분방전 발생 위치추정 기술을 제안하였다. 이를 위해 부분방전 위치추정을 위한 하드웨어 설계, 소프트웨어 설계, 그리고 위치추정 모니터링을 구현하였다. 부분방전 위치추정 시스템의 신뢰성 검증을 위해 실험장치를 구성하고 다음과 같은 3가지 항목의 실험을 수행하였다.

첫째, 50cm의 거리에서 아크를 발생시키고 전자기파와 음향파 검출하는 실험을 5회 실시한 결과 5회 모두 아크 발생에 따른 전자기파와 음향파가 모니터에 동시에 표시되었다. 둘째, 부분방전 위치 식별 정확도를 확인하기 위해 아크를 좌측, 중앙, 우측에 각각 5회를 발생시킬 때에 검출 모듈에서 부분방전 위치를 영상으로 나타내었다. 마지막으로 이벤트 발생시에 알람 표출과 동시에 실제 배전반에서 부분방전 발생 위치를 나타내는 영상을 표시하도록 하였다.

실험을 통해 설계된 배전반 부분방전 위치추정 시스템은 배전반에 부분방전이 발생하면 원격에서 빠르게 검출하여 실시간 모니터링을 가능하고, 이벤트 알람을 표출하여 부분방전에 대한 조치를 취할 수 있다. 따라서, 기존 배전반 등의 전기설비에 제안한 시스템을 컴팩트하여 적용하면 수배전반 내부에 설치된 전력기기들에 대한 사전 정밀진단 및 보수가 가능하고, 이를 통해 안정적인 전력설비 운영으로 정전 등의 전기사고 예방이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 김선호, 김선구, 노창일, 정홍수, 김원만, 이동준, “내부고장으로 인한 아크상태의 저압 배전반 시험방법 동향 고찰,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 927-928, 2007.
- [2] 김대복, 박현수, 김일권, 이동준, “수배전반 내 부분방전 및 아크 검출시스템 개발,” 대한전기학회 전력기술부분회 추계학술대회 논문집, pp. 256-257, 2010.
- [3] 이상익, 김기현, 신성수, 배석명, “아크 및 부분방전 검출기능을 갖는 수배전반,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2167-2168, 2010.
- [4] <https://m.blog.naver.com/firerisk/221386090554>
- [5] <http://www.wintech-power.com/about%20pd.htm>
- [6] F. Álvarez, F. Garnacho, J. Ortego, and Mi. Sánchez-Urán, “Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment,” *Sensors*, vol. 15, no. 4, pp. 7360-7387, 2015.
- [7] S. Al-Janabi, S. Rawat, A. Patel, and I. Al-Shourbaji, “Design and evaluation of a hybrid system for detection and prediction of faults in electric transformer,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 67, pp. 324-335, 2015.
- [8] <https://optics11.com/blog/acoustic-testing-vs-acoustic-emission-testing-what-is-what>
- [9] H. Chai, B. T. Phung, S. Mitchell, A. Choudhary, and S. Pal, “Application of UHF sensors in power system equipment for partial discharge detection: A review,” *Sensors*, vol. 19, no. 5, pp. 1029-0, 2019.
- [10] 임상혁, 옥승훈, 이정수, 이두기, “UHF대역 CT센서를 이용한 배전반 부분방전 위치 추정 기술,” 대한전기학회 전기물성·응용부분회 추계학술대회 논문집, pp. 171-172, 2022.
- [11] 이은호, 배전반 등에 적용되도록 전자기파 및 음향파를 이용하여 복합감지의 동시측정, 부분방전 위치검출, 그리고 시각적 PD 발생 감시시스템 개발, 중소기업부 최종보고서, 2022.

감사의 글

경영학 학사를 졸업하고 전기분야 현업에 종사하며 시작한 전기공학의 배움의 시작에서 어느덧 4년이 흘러 이렇게 감사의 마음을 전하게 되어 감회가 새롭습니다. 감사의 말씀을 전하기에는 턱없이 부족한 글이지만 지금의 저를 위해 물심양면 도와주시고 응원해주신 분들께 감사의 인사를 드립니다.

먼저, 저에게 대학원의 길을 인도하여 주시고 이끌어 주신 김호찬 교수님께 감사의 인사 올립니다. 교수님께서 지도하여 주신 대학원의 시간으로 제가 이렇게 전기인으로 자신 있게 발걸음하게 되었습니다. 또한, 대학원 석사과정 동안 현장 실무만 알았던 저를 무한한 관심과 애정으로 도움을 주신 이개명 교수님, 김세호 교수님, 김일환 교수님, 김호민 교수님, 진영규 교수님, 최영준 교수님께도 이 기회를 빌어 감사의 말씀을 드립니다.

그리고, 항상 옆에서 함께 고민하여 주시고 제 생각의 틀을 넓혀주신 부창진 교수님, 오영훈 교수님, 김정혁 교수님! 항상 감사한 마음으로 살겠습니다.

대학원 생활동안 현업과 학업에 정신없이 보냈지만 그 시간을 뜻 깊게 만들어 준 우리 대학원 동기분들에게 감사드리며, 저와 함께 길을 걸어 주시는 정재창 학우에게 항상 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

항상 저의 버팀목이 되어 주시고 길잡이가 되어주시는 사랑하는 부모님, 평생 옆에서 효도하는 아들이 되겠습니다. 그리고 우리형, 누나! 지금처럼 행복하게 같이 하자.

마지막으로 사랑하는 영지야. 나한테 와서 고생만 하는 것 같네. 옆에서 함께 있어 주고 웃을 수 있는 가정을 만들어 줘서 고마워. 지금처럼 알콩달콩 잘살아보자. 그리고 첫째 멧쟁이 하람이, 둘째 공주 루하, 셋째 방글이 루원아 사랑해.

2023년 12월

이은호 올림