

# PA Map(Pulse Analysis Map)을 이용한 새로운 부분방전 패턴인식에 관한 연구

論 文

56-6-15

## A Study on the New Partial Discharge Pattern Analysis System used by PA Map (Pulse Analysis Map)

金智鴻<sup>†</sup> ·金正泰<sup>\*</sup> ·金鎮基<sup>\*\*</sup> ·具滋允<sup>\*\*\*</sup>  
(Ji-Hong Kim · Jeung-Tae Kim · Jin-Gi Kim · Ja-Yoon Koo)

**Abstract** - Since one decade, the detection of HFPD (High frequency Partial Discharge) has been proposed as one of the effective method for the diagnosis of the power component under service in power grids. As a tool for HFPD detection, Metal Foil sensor based on the embedded technology has been commercialized for mainly power cable due to its advantages.

Recently, for the on-site noise discrimination, several PA (Pulse analysis) methods have been reported and the related software, such as Neural Network and Fuzzy, have been proposed to separate the PD (Partial Discharge) signals from the noises since their wave shapes are completely different from each other. On the other hand, the relevant fundamental investigation has not yet clearly made while it is reported that the effectiveness of the current methods based on PA is dependant on the types of sensors. Moreover, regarding the identification of the vital defects introducible into the Power Cable, the direct identification of the nature of defects from the PD signals through Metal Foil coupler has not yet been realized. As a trial for solving above shortcomings, different types of software have been proposed and employed without any convincing probability of identification.

In this regards, our novel algorithm "PA Map" based on the pulse analysis is suggested to identify directly the defects inside the power cable from the HFPD signals which is output of the HFCT and metal foil sensors. This method enables to discriminate the noise and then to make the data analysis related to the PD signals. For the purpose, the HFPD detection and PA (Pulse Analysis) system have been developed and then the effect of noise discrimination has been investigated by use of the artificial defects using real scale mockup. Throughout these works, our system is proved to be capable of separating the small void discharges among the very large noises such as big air corona and ground floating discharges at the on-site as well as of identifying the concerned defects.

**Key Words** : Pulse shape, Pulse-Analysis map(PA Map), Diagnosis, Partial Discharge, Noise Discrimination.

### 1. 서 론

IEC 60270에 의한 Conventional method를 이용한 부분방전 검출법은 커플링 커패시터와 같은 고가의 대형 측정설비로 인해 on-line에서 절연 진단 적용이 힘들고, 측정 대역이 저주파 대역이기에 주변 노이즈 유입이 쉬워 진성 부분방전과 구분이 어려운 단점이 있어 현재는 non-conventional method인 HFCT(High Frequency Current Transformer), Antenna, Ultra-sonic 등의 센서를 이용한 PD검출이 많이 시도되고 있다.

Non-conventional method는 현장 적용이 용이하고, 측정 주파수 대역이 높아 신호 대 잡음비(SNR)가 매우 뛰어나며, 부분방전의 방전원 위치 추정이 가능한 장점 등으로 많은 연구가 발표되고 있다. 그러나 non-conventional method은

많은 장점에도 불구하고, 측정방법에 따라 정확한 교정(calibration)이 힘들고, 부분방전의 정량화(Quantization)에 따른 문제점과 부분방전 원(PD Source)의 패턴인식 및 분류 작업의 어려움이 현실적인 문제로 대두되고 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 그 중 패턴분류는 크게 3가지 형태의 분석기법으로 구분할 수 있는데 첫 번째, Phase-Resolved Data를 이용한 분석법, 두 번째, Time-Resolved Data를 이용한 분석법, 마지막으로 Without Phase/Time Information 인 경우를 들 수 있다.[1] 이중 가장 많이 사용되고 있는 Phase-Resolved Data를 이용한 분석법 중 PRPD 분석 결과를 뉴럴, 퍼지, 카오스 등의 기법으로 해석하려는 방법들이 많이 연구되어 발표되고 있지만 학습결과가 너무 단적이어서 잘못된 판정을 통해 대형 사고를 야기할 수 있고, 동일한 위상에서 발생하는 비슷한 크기의 서로 다른 방전원을 구분하기 힘든 문제점이 있다. 이러한 불명확한 방전원 구분은 전력설비 사고예방 판단에 많은 어려움을 주며 장시간의 정밀 측정을 통해 주관적 판단을 해야하므로, 시간과 신뢰도에서 많은 문제점을 야기하고 있으며, 무엇보다 부분방전 개시 전압(PDIV)을 기준으로 볼 때, 개시 초기의 방전 검출이 중요한데, 기존의 방식으로는 낮은 방전량의 패턴 인식이 사실상 힘들다는 문제점이 크게 대두된다.

† 교신저자, 正會員 : Calvus Instruments 代表理事  
E-mail : 100@hanyang.ac.kr

\* 正會員 : 대전대 전기정보시스템공학과 부교수

\*\* 正會員 : 국방과학연구소 선임연구원

\*\*\* 正會員 : 한양대 전기공학과 교수

接受日字 : 2007年 4月 27日

最終完了 : 2007年 5月 10日

이러한 문제점을 해결하고자 펄스의 형태를 분석하여 SNR을 높이고 부분방전의 방전원을 구분하려는 것이 PA(Pulse Analysis) Map의 기본 연구 배경이며, 국외 연구 기관에서 측정 펄스들의 파형 특성을 추출하여 부분방전과 노이즈를 구분하는 펄스 분석(PA : Pulse Analysis) 방법 [2~5]과 3상 전력기기에 대한 각 상별 측정을 비교 검토하여 노이즈를 구분하는 3PAR(3 Phase Amplitude Relation Diagram) 방법[6,7] 등 다양한 방법이 시도되고 있다.

PA Map은 부분방전 펄스를 고주파대역에서 측정하여 펄스의 형태에 대한 통계적 처리를 통해 분석한 후 특정 좌표의 대푯값으로 매핑 하는 클러스터링 기법으로 PA Map을 적용하면 결함의 종류에 따라 고유의 중심 좌표를 가지며 여기에서 얼마까지 떨어진 영역을 설정 가능하여 특별한 패턴인식을 프로그램하지 않아도 육안으로 쉽게 구분할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 이러한 장점을 가진 PA Map 알고리즘과 이를 이용한 기중에서의 신뢰성 평가와 154kV 전력케이블에서의 부분방전 패턴연구에 관하여 다루고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시스템 구성 및 알고리즘

본 연구에서는 전력설비 결함에 따라 부분방전 펄스 모양이 서로 다른 양상을 보이는 실험적 현상[8]을 기반으로 펄스형태 분석 시스템을 자체 제작하여 PA Map알고리즘을 적용하였다. PA Map은 매질에 따른 전파경로와 방전원에 따른 펄스 shape이 다른 점을 착안하여, 측정된 펄스의 형태를 효과적으로 분류 및 신호처리 하기위해 고안된 알고리즘으로, 기존의 측정 방법(PRPD)에 비해 1GSPS(Giga sampling per second)이상의 고속 샘플링을 통해 연산되기에 프로세서와 주변장치와의 정확한 동기화와 프로세서간의 데이터 처리 속도 최적화 및 제한된 메모리 공간에서의 데이터 압축 효율성이 선결과제다. 이를 위해 ASIC과 Dual DSP core를 이용하여 ADC로부터 고속 데이터 획득과 펄스 분석의 데이터 처리를 동시에 진행하도록 하였으며, 프로세서의 입출력 포트의 한계를 극복하기 위해 ADC의 클럭을 상승에지(rising edge)와 하강에지(falling edge)에 동시에 동작하게 하여 IO 클럭(IOCLK)보다 2배의 클럭으로 샘플링이 이뤄지게 하였고, 이에 따른 방대한 데이터 처리를 위해 500MHz의 bus clock과 60ns의 reflash time을 갖는 64MB의 32bit 고속 SDRAM를 이용하였으며, 버스 클럭의 향상을 위해 32bit 버스에 2채널의 10bit ADC 데이터가 실리도록 하여 2배의 버스대역폭을 얻게 되었다. 또한 고속 통신을 위해 USB 프로토콜을 이용하여 서버와의 통신이 이뤄지도록 장치고안을 하였다. 이러한 하드웨어적인 디자인 알고리즘을 통해 부분방전 펄스 형태의 연구가 가능한 시스템 구현이 가능해 졌다.

데이터 처리는 크게 3가지 기본 알고리즘으로 구성되어 있는데 첫째, 측정된 펄스에 대해 정확한 방전 펄스의 시간적 파형을 자동으로 캡처하는 작업과 둘째, 이의 크기를 자동으로 보정해주는 Normalization 작업, 마지막으로 센서의 특성을 보완해주는 펄스의 특성 추출하는 신호처리 작업이

그 작업 내용이다. 이러한 선처리 알고리즘 연산 후 시간영역의 첨쇄도(Kurtosis)와 왜도(Skewness)를 통해 얻은 데이터를 적용하였다. 통계적 파라미터로는 variance, standard deviation, skewness 및 kurtosis 등을 고려할 수 있으나 본 연구에서 각 파라미터를 적용시켜본 결과 첨쇄도(kurtosis)와 왜도(skewness)가 가장 효과적이었다. 따라서, 이를 PA 알고리즘 중 하나로 적용하였으며 “PA Map”이라 명명하였다.

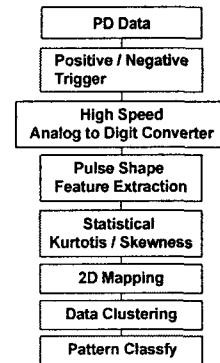


그림 1 PA 알고리즘 순서도

Fig. 1 Flowchart of PA Algorithm

그림 1은 PA Map의 알고리즘을 표현한 순서도로 부분방전을 1GSPS 이상의 sampling을 통하여 얻어진 데이터를 특정 파라미터를 추출하기위해 통계적인 방법으로 첨쇄도와 왜도를 구한 뒤 mapping을 하면 2차원의 PA Map을 구할 수 있다. 여기에서 얻어진 데이터에 data mining 처리를 하면 결함에 따른 방전원을 구별할 수 있다. 또한, 데이터 처리를 통해 PA Map과  $\Phi$ -q-n 표현도 동시에 이뤄지고, 데이터 link를 통해 PA Map에서나  $\Phi$ -q-n상에서 서로의 데이터 위치를 확인 할 수 있는 기능이 있어 기존분석법도 공존하게 설계하였다.

여기서, 집적량의 분포를 정량적인 정보로 제공하기 위하여 제안된 방법인 통계량 (statistical operator) 계산은 식1.1을 근거하여 구할 수 있다.

$$\mu_k = \sum (x_i - a)^k \cdot p_i \quad (식1.1)$$

$x_i$  : 이산치,  $p_i$  :  $x_i$ 에 대한 확률 값.

차수 k에 의해 모멘트가 결정되며 분포에 대한 특성을 나타내주는 정량적인 지수가 된다. 또한 first moment와 second moment은 각각 식1.2와 식1.3과 같이 주어지는데,

$$\mu = \sum x_i \cdot p_i \quad (식1.2)$$

$$\sigma^2 = \sum (x_i - \mu)^2 \cdot p_i \quad (식1.3)$$

식1.2와 식1.3은 third moment(왜도)와 forth moment(첨쇄도)를 계산하는데 주로 사용되며 이는 식 1.4와 식1.5와 같이 구할 수 있다.

- Third moment  $S_k$  - 분포의 왜도(skewness) ;

$$S_k = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 \cdot p_i}{\delta^3} \quad (식1.4)$$

- Fourth moment  $K_u$  - 분포의 첨쇄도(kurtosis) ;

$$K_u = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 \cdot p_i}{\delta^2} - 3 \quad (식1.5)$$

## 2.2. 측정 및 분석 시스템

PA Map 알고리즘을 이용한 부분방전 펄스 파형의 특성 및 방전 양상을 분석하기 위해서는 각종 결함에서 발생하는 방전의 양상이 어떠한 차이가 있는지 파악하여야 한다. 이에 따라 고주파 데이터 획득을 위해 크게 고주파 데이터 수집(DAQ) 장치와 고속 데이터 전송장치 그리고 고속 데이터 처리 및 mapping 장치가 필요한데, 이를 위해 본 연구진에서 제작한 1 GSPS의 sampling을 갖는 PA Map system과 신뢰성을 평가하기 위해 TDS 744A 500MHz 오실로스코프 및 Agilent사의 5 GHz급 스펙트럼 분석기를 이용하여 PA Map 시스템이 가진 펄스의 형태 분석 신뢰성 실험을 하였다.

센서는 100 kHz ~ 20 MHz 범위의 3 dB 특성을 지닌 상용 HFCT와 정확한 비교 분석을 위해 자체 제작한 50Ω 저항성 센서를 이용하였고, 센서의 전달 임피던스 특성은 그림 2와 같다.

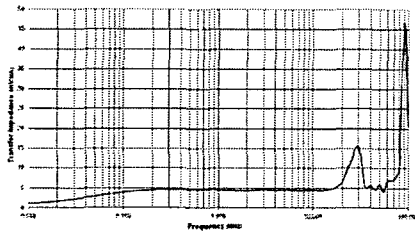


그림 2 HFCT의 전달임피던스 특성

Fig. 2 Transfer impedance of high frequency CT

실험을 하기위한 측정 시스템은 그림 3과 같이 구성하여 실험 하였고, 데이터를 수집하고 분석하는 부분을 DAQ/DSP system이라 표시하였다. 또한, 신뢰성 있는 측정을 위해 오실로스코프를 이용하여 비교 분석하였다.

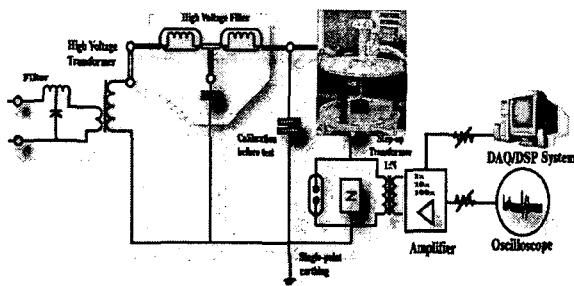


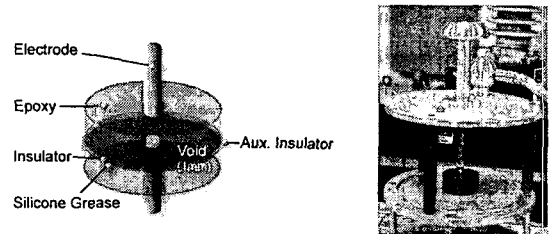
그림 3 부분방전 측정 시스템 개략도

Fig. 3 Block diagram of PD measuring system

## 2.3. 모의 결함 제작

전력기기의 절연 시스템의 대표적 결함인 절연체 내 보이드를 모델링하기 위해 그림 4 (a)와 같이 시편을 제작하였다. 에폭시로 둘러싼 전극 사이에 두께 1 mm의 절연체(에폭시) 시트를 넣고 절연체 시트에 1 mm  $\phi$  구멍을 뚫어 인위적인 보이드 결함을 제작하였다. 결함 이외에서 발생하는 방전을 방지하기 위해 실리콘 그리스를 이용하여 계면에 넓

게 도포하였다. 한편, 보이드 방전과 구별하기 위한 코로나 노이즈는 곡률반경 0.5mm인 침을 모의결함 상부 전극에 같이 설치하였다. 그림 4 (b)에 보이드 모의결함 시료위에 코로나 발생을 위해 설치한 침전극이 나타나 있다.



(a) 인위적 보이드 결함 시편 (b) 코로나 발생 전극  
(a) Artificial void defect and corona electrode (b) Set-up

그림 4 모의 보이드 결함과 코로나 발생 전극

Fig. 4 Test set-up for artificial void defect and corona

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 PRPD 분석기법의 문제점

부분방전의 가장 큰 특징은 on-line 상태에서 절연상태의 진단이 가능한 점이다. 그러나 현장에서는 예측 불가능한 노이즈와 통신장애를 발생시키는 공기중 방전인 코로나는 부분방전 측정에 많은 오차로 작용하여 절연 진단에 많은 어려움을 준다. 특히 PRPD해석 기법을 이용할 경우 그 문제점은 크다 말할 수 있다. 그림 5는 이러한 문제를 확인하기 위해 동일한 크기의 노이즈와 코로나 및 보이드 방전을 발생시켜 측정한 것이다.

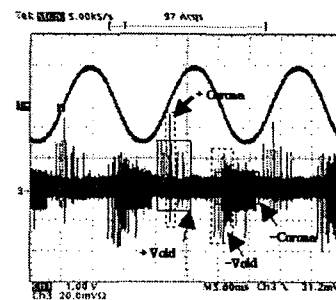


그림 5 다중방전 측정 결과 (10mV 수준)

Fig. 5 Oscillograph of measuring multiple discharge

그림 5는 다중방전 측정 결과로 정극성 코로나와 보이드, 부극성 코로나와 보이드가 유사한 크기로 방전되고 있고, 그 크기는 20 mV/Div에서 10 mV로 5 pC 정도이다.

정극성에서 코로나 방전은 그 크기가 매우 크고 가늘며, 부극성 코로나는 작고 넓으며 균일하게 발생함을 알 수 있고, 정극성 보이드는 분포가 넓고 규칙적이며, 부극성 보이드는 분포가 좁음을 알 수 있다.

보이드 결함인 경우 전력설비의 절연에 미치는 영향이 کم에도 불구하고 PRPD 분석시 그림 6에서와 같이 방전 원 (PD Source : Void)과 노이즈의 구분이 매우 어렵다는 것을 알 수 있다. 다중 방전인 경우 방전의 크기가 작고 서로 비슷한 경우 결함별 패턴 분류는 더욱 힘들어 지는 것이  $\phi$

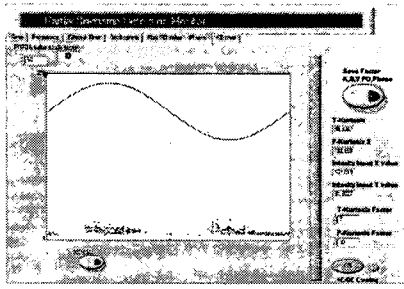


그림 6 측정된  $\Phi$ -q-n 화면  
Fig. 6 PRPD( $\Phi$ -q-n) pattern

-q-n을 이용한 PRPD 분석법의 단점이다. 비슷한 크기의 방전인 경우 군집된 형태에 따라 패턴을 구분하는 PRPD 분석 방법으로는 결함에 따른 패턴을 구분하기가 힘들다. 따라서, 현장에서 크기가 작은 방전을 노이즈와 구분하고, 코로나와 다른 결함의 원인을 분석 하기위해선 기존의  $\Phi$ -q-n과는 다른 관점에서의 분석기법이 요구된다.

이러한 방전의 크기와 위상이 같은 경우에도 노이즈 원과 방전 원의 구분이 가능한 알고리즘 구현을 본 연구의 주된 연구테마로 설정하고, 이에 따른 새롭고 효과적인 매핑 기법에 대해 언급하고자 한다.

### 3.2 PA Mapping

그림 7은 상부 화면이 PA Map이고 하단부가 PA Map과 연결된 PRPD 분석기법이다. PA Map은 같은 크기의 다중 방전일 경우에 이를 명확하게 구분하기 위해서 본 연구팀이 제안한 알고리즘으로 X축과 Y축의 값이 각각 첨쇄도(Kurtosis)와 왜도(skewness)의 standard deviation을 이용하여 intensity graph에 mapping 하였다. 이는 TF mapping 기법을 이용한 분석 기법에 비하여 Frequency 영역의 해를 얻기 위해 FFT를 취하지 않기 때문에 연산량이 적어 향후 모니터링 시스템을 이용한 임베디드 시스템에서 고속 연산을 시행할 수 있는 장점이 있다. 또한 mapping의 결과도 그림 7과 같이 동일한 크기의 서로 다른 결함을 명확하게 패턴화 할 수 있다.

이 이론의 핵심은 주파수에 해당하는 성분이 첨쇄도와 왜도에 포함되어 있기에 이를 분석하는 것만으로도 고속의 펄스 분석(Pulse Analysis)가 가능해 진다는 것이다.

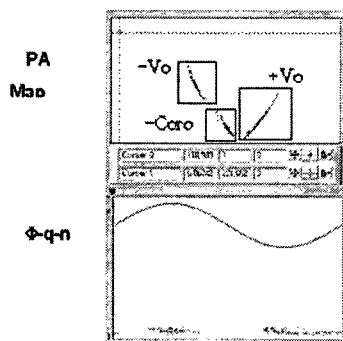
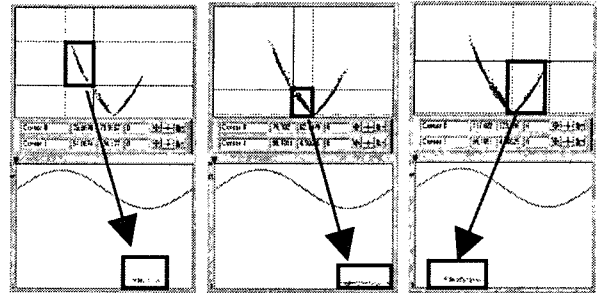


그림 7 PA Map 전체 화면  
Fig. 7 PA Map

이러한 알고리즘의 PA mapping은 그림 7과 같이 "V"자 형태의 매핑이 이뤄진다. 정극성과 부극성은 서로 대칭하여 위치하고 있고, 특히 PA Map은 외부의 위상에 대한 정보 없이도 파형만으로 정극성과 부극성 파형을 구분 가능하도록 알고리즘을 디자인하였다.



(a) 부극성 보이드 (b) 부극성 코로나 (c) 정극성 보이드  
(a) Negative void (b) Negative corona (c) Positive void

그림 8 PA Map을 이용한 영역별  $\Phi$ -q-n 화면

Fig. 8 PRPD pattern of select region used by PA Map select bar

그림 8과 같이 PA Map은 "V"자의 반을 기준으로 왼쪽편은 부극성 방전이 위치하고, 오른쪽 편은 정극성 방전이 위치한다.

절연 진단인 경우 방전 초기에 결함 검출 능력이 있어야 큰 사고를 미연에 방지 할 수 있는데, 현장에서는 많은 노이즈와 코로나로 인해 진성 부분방전 신호를 추려내기가 매우 힘들다. 따라서 기존의  $\Phi$ -q-n 화면으로는 부극성 코로나와 보이드 방전을 구분하기가 쉽지 않았지만, PA Map인 경우에는 그림 7과 8에서 볼 수 있듯이 결함원에 따른 코로나와 보이드 방전을 명확히 구분함으로써 그 유용성을 확인 할 수 있다.

### 3.3 Noise 영역

PA Map에서 노이즈에 해당하는 영역과 패턴 형태를 연구하기 위해 전원을 인가하지 않은 상태에서 주변 노이즈를 측정한 결과 그림 9와 같이 "V"자의 형태에서 맨 아래 부분이 주변 노이즈 영역으로 매핑 됨을 알 수 있다. 이는 PA Map을 이용할 경우 노이즈와 신호의 구분이 매우 쉽게 이뤄짐을 증명하는 것으로 PA Map의 화이트 노이즈와 부분방전원의 패턴 분류가 PRPD분석에 비해 매우 쉽게 구분되어짐을 알 수 있다.

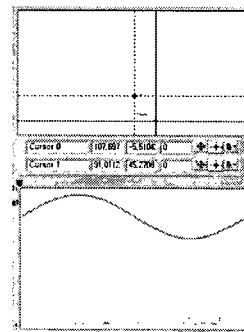


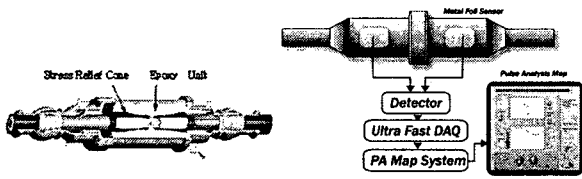
그림 9 노이즈 영역의 PA Map  
Fig. 9 PA Map of noise region

#### 4. 154kV XLPE 전력 케이블 실험

펄스 파형을 이용한 분석 기법의 문제점은 센서에 따라 그 매핑이 큰 차이점을 보인다는 것이다. 특히 주파수와 시간 영역을 이용한 TF map(Time Frequency map)과 같은 경우 공진성이 있는 센서를 이용할 경우 신뢰도가 낮아진다. 즉, CT 나 금속 포일 센서의 측정 임피던스와 같은 공진성 센서를 이용하면 공진점의 특정 주파수의 크기가 매우 커지게 되어 방전원을 구분하기 매우 어렵게 되기 때문이다. 이러한 문제점이 PA Map에서는 어떻게 나타나는지를 측정하기 위해 실물의 154kV XLPE 전력 케이블 접속체에 내장된 금속 포일 센서와 현장에서 사용되는 측정 인덕턴스를 이용하여 부분방전 신호를 검출 하였고, 실험에 사용된 센서와 측정 임피던스는 자체 공진 성분 그대로 유지시키고 실험을 하였다.



(a) 코로나 방전 (a) Test set-up  
(b) 보이드 및 코로나 방전 (b) Void and corona discharge



(c) PJ 구조 및 실험 개략도  
(c) Structure of PJ and block diagram of test

그림 10 154kV XLPE 전력 케이블 실험  
Fig. 10 Test of 154kV XLPE power cable

그림 10 (a)는 실험을 하기위한 154kV XLPE 전력케이블의 실험 전경과 PJ의 내부 구성도를 보여주고 있고 그림 10(b)는 실험을 하기위해 설치된 측정 시스템의 블록 다이어그램이다. 센서는 실제의 케이블을 이용하였고, 측정 임피던스는 현장에서 사용되는 제품을 이용하여 현장과 가장 유사한 환경에서 실험을 하였다. 여기서 얻어진 데이터를 매우 빠른 DAQ 시스템을 통해 PA Map을 하도록 시스템을 고안하였다.

#### 4.1 CT센서를 이용한 측정

##### 4.1.1 저주파용 CT

CT센서는 그 사용의 편리성으로 인해 현장에서 많이 사용되는 센서 중에 하나이다. 그러나 센서 자체가 R-L-C 공진형 구조로 되어있어 특수한 주파수만을 Q factor만큼 증폭시키는 효과가 있다. 이러한 공진문제는 특정 주파수의 방전 값을 크게 증폭시키는 효과로 이어져서 센서의 선형성에 문제가 된다. 이러한 문제로 인해 최근에는 100MHz이상의 높은 대역에서 공진을 갖는 센서가 상용화되어 있지만, 이번

실험에 사용된 CT센서는 공진점이 5MHz대역에서 발생하는 가장 보편화된 센서를 가지고 실험을 하였다. 즉, 낮은 공진 주파수를 갖은 센서에서도 PA Map이 측정 기능을 제대로 발휘하는 것이 주된 목적이다.

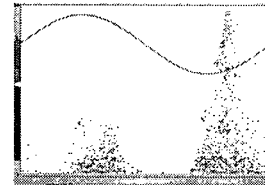
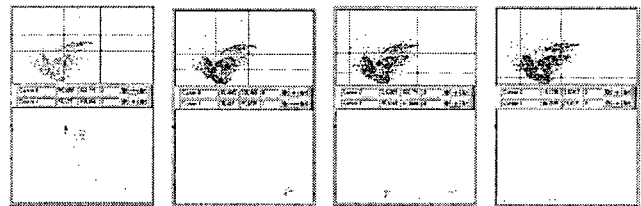


그림 11 전력 케이블에서의 보이드, 코로나 방전과 노이즈의  $\Phi$ -q-n 화면  
Fig. 11  $\Phi$ -q-n pattern of void, corona, and back ground noise in power cable

그림 11은 154kV XLPE 케이블에 12kV 전압을 인가하였을 경우 발생된 보이드와 코로나와 주변 노이즈의  $\Phi$ -q-n 화면이고 인가전압 위상을 프로그램 상으로 90도 shift한 것이다.



(a) 코로나 (b) 정극성 보이드 (c) 보이드 (d) 노이즈  
(a) Corona (b) Positive void (c) Void (d) Noise

그림 12 154kV XLPE 케이블에 적용된 PA Map  
Fig. 12 PA Map in 154 XLPE power cable

그림 12는 공진성 센서를 이용하여 PA Map을 수행한 결과이다. 이 경우에도 경계영역이 넓게 형성되는 것을 볼 수 있음에도 불구하고 전체적으로 4가지의 클러스터를 명확하게 구분 할 수 있다. 그림 12 (a)는 코로나 영역, (b)는 정극성 보이드 영역, (c)는 정극성과 부극성 보이드 전체 영역, (d)는 주변 노이즈 영역을 표시한 것이다.

#### 4.1.2 고주파용 CT

다른 센서의 적용을 통한 PA Map의 특성을 관찰하기 위해 100MHz의 전달 임피던스를 갖는 상용 HFCT를 이용하여 실험을 하였다. 결함으로는 보이드 방전과 중단 반도체에서 발생하는 접지측 코로나 방전이다.

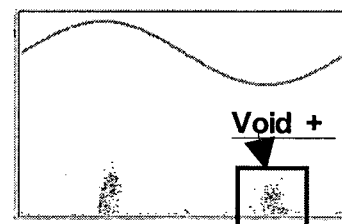
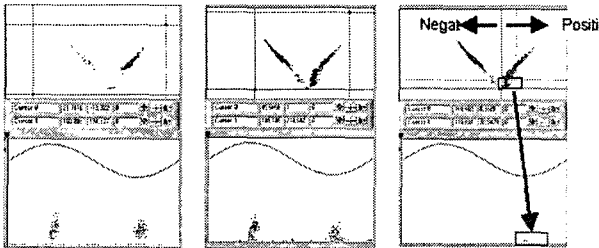


그림 13 보이드, 코로나 방전과 노이즈의  $\Phi$ -q-n 화면  
Fig. 13  $\Phi$ -q-n pattern of void, corona, and noise

PRPD 분석으로 살펴본 방전의 형태는 그림 13과 같다. 지중 케이블에서는 위상의 정보를 얻을 수 없기 때문에 현장에서 적용하는 방법인 상용전원인 220V를 이용하여 60Hz 위상정보를 측정하였다. 따라서 인가전원과 상용전원의 위상이 상황에 따라 달리 나타나는데 현장에서 위상 shift기능을 이용하여 사용자가 임의적으로 동기화 할 수 있게 한다. 그러나 현장에서 사용자가 완벽하게 위상의 위치를 알 수 없는 경우도 많은데, 방전원이 무엇인지 모를 경우가 그러한 예이다. 이 경우 PA Map은 매핑된 "V"자 형태의 반을 기준으로 왼편은 부극성 오른편은 정극성이 위치하게 되는데 그림 14(c)에서와 같이 위의 PA Map화면에서 "V"자의 오른쪽 부분(정극성)을 선택하면 PRPD의 결과가 부극성에 표시되는 것으로 위상이 반전을 알 수 있다. 결과적으로 PA Map 알고리즘은 외부의 위상정보 없이 펄스의 모양으로 정극성과 부극성의 위치를 정확하게 파악 가능하다. 따라서 PA Map의 위치 정보를 통해 그림 13의 위상은 정극성과 부극성의 위치가 바뀌어 있음을 알 수 있으며, 양 전원간의 약 180도 위상차가 생겼음을 알 수 있다.



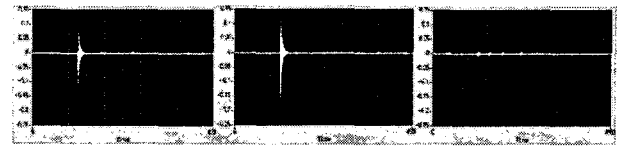
(a) 보이드와 노이즈 (b) 전체 (c) 접지측 코로나 방전

그림 14 결함에 따른 PA Map과 검증을 위한  $\Phi$ -q-n 화면  
Fig. 14  $\Phi$ -q-n patterns for compare PA Mapping with nature of defect

결함에 따른 분석을 살펴보면 그림 14와 같이 보이드와 접지측 코로나 방전을 볼 수 있다. 가장 중요한 점은 보이드와 노이즈성 코로나와 기타 주변 노이즈를 구분할 수 있는 판단 능력인데, 그림 16에 표시된 것과 같이 보이드와 코로나가 같은 극성에 비슷한 방전의 크기로 방전된다면 구분하기가 매우 힘들 것이다. 그러나 이에 따른 PA Map 분석은 그림 14(a)와 (c)에서 보듯이 보이드와 코로나를 명확히 육안으로도 구분 지을 수 있다는 점이 PA Map이 가진 우수성이다. 따라서, PA Map은 패턴인식을 위한 Neural Network나 Fuzzy와 같은 별다른 분석기법 없이 쉽게 패턴구분이 가능하기에 이로 인한 패턴 분석 어려움도 크게 저감시킬 수 있다.

4.2 금속 Foil 센서를 이용한 측정

금속센서를 이용하여 부분방전 계측실험을 하였고, 결함에 따른 오실로 스코프 파형은 그림 15와 같이 3가지 결함에 따른 부분방전 펄스를 측정할 수 있었다. 각각 종단에 스트레스크론의 미삽입으로 인한 접지측 코로나 방전과 또 다른 곳에서의 코로나 방전이다. 서로 다른 곳에서 발생하는 코로나의 경우에도 매질의 형태와 전파경로가 상이할 경우 구분이 가능함을 보여주는 실험사례로 그림 15(a)와 (b)는 같은 극성의 서로 다른 코로나이다.



(a) 부극성 코로나#1 (b) 부극성 코로나#2 (c) 정극성 코로나  
(a) -corona #1 (b) +corona #2 (c) +corona

그림 15 결함에 따른 오실로 스코프 파형

Fig. 15 Oscillograph by the nature of defect

실험에 따른 PRPD 분석 파형이 그림 16에 나타나있다. 위상에 대한 정보는 앞서 설명한 바와 같이 인가 전원의 위상보다 180도 지연된 상태임을 그림 17 (b),(c)를 통해서 알 수 있다.

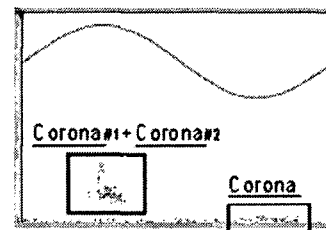
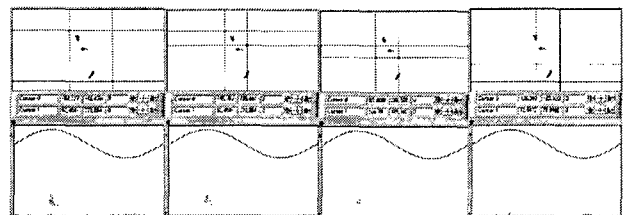


그림 16 PRPD 분석 파형

Fig. 16 PRPD pattern



(a) 전체 (b) (-)코로나#1 (c) (+)코로나#2 (d) (+)코로나

그림 17 PA Map을 이용한 분석 파형

Fig. 17 Analysis wave form used by PA Map

금속 포일 센서를 이용한 경우에도 CT센서나 shunt 등의 다른 센서와 마찬가지로 결함에 따른 명확한 클러스터가 형성됨을 알 수 있었고, 특히 지중 케이블 절연 진단에 있어서 금속포일 센서인 경우에는 임피던스를 고주파 시스템으로 설계한다면 상당한 감도의 PA Map 알고리즘을 구현할 수 있음을 그림 17에서 시사해주고 있다.

상기 실험들을 통해 PA Map 알고리즘은 서로 다른 결함원 뿐만 아니라 여러 형태의 코로나도 발생 종류에 따라 구분이 가능하고, 무엇보다도 서로 다른 형태의 센서를 적용할 경우에서도 큰 골격을 잃지 않고 방전원의 클러스터화가 가능함을 알 수 있다. 따라서 다양한 현장 실험을 통해 보다 체계적인 데이터베이스를 구축하는 것이 향후 연구 과제라 말할 수 있겠다.

5. 결 론

전력설비의 절연 진단을 할 때 현장에서 가장 중요한 것은 전력설비에서 발생하는 부분방전의 신호가 유해한 것인

지 아닌지를 명확하게 판단하는 것이다. 이것은 사람의 주관적 능력만으로 평가되는 것이 아니라 객관적인 진단 도구를 이용하여 매우 정확한 근거에 의해 판단하는 것이 올바르며, 진단도구가 보다 더 과학적 사실에 근접한 정보를 사용자에게 알려준다면 대형 사고로부터 많은 인명과 재산의 피해를 크게 줄일 수 있을 것이다. 이러한 취지에 과거에는 노이즈와 부분방전의 구분자체가 이슈였다면, 본 논문에서는 방전의 유해성을 판단해줄 수 있는 도구를 지중 케이블과 인위적인 결합의 실험을 통해 논증하고자 하였고, 현재의 문제점과 향후의 진단 기술의 발전방향을 제시하고자 하였다.

그 결과, PRPD분석을 이용한 경우 방전원과 노이즈의 위상과 크기가 비슷한 경우 결합별 패턴화가 매우 힘들지만 펄스의 형태를 분석하여 매핑하는 PA Map 알고리즘을 적용한 경우 이에 대한 분석이 육안으로 구분이 가능할 정도로 쉽게 이뤄짐을 확인할 수 있었다. 아울러, 서로 다른 임피던스의 센서를 적용하더라도 공진 성분에 영향을 크게 받지 않고 데이터 추출과 클러스터화가 가능하며, 외부의 위상 정보 없이도 정·부극성 파악이 가능하다는 점이 가장 두드러진 장점이라 말할 수 있겠다.

이상의 결과로부터 PA Map 알고리즘은 현장에서 평가자의 판단에 큰 도움을 줄 것으로 사료되고, 기존의 분석 기법과 같은 부분방전 패턴에 대한 해박한 전문적 지식이 없더라도 쉽게 절연진단의 위험성을 감지하여 사고를 미연에 방지하는데 크게 기여할 것으로 예상되는 바이다.

**감사의 글**

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력원  
 구원 (R-2004-B-123) 주관으로 수행된 과제임.

**참 고 문 헌**

[1] K. Feser, E. Gockenbach, E. Gulski, W. Hauschild, E. Lemke, M. Muhr, "SENSORS AND SENSING USED FOR NON-CONVENTIONAL PD DETECTION" CIGRE2006, Paris, D1-102, 2006.  
 [2] A.Cavallini et al, "A New Approach to the Dianosis of Solid Insulation Systems Based on PD Signal Inference", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.19, No.2, pp.23~30, 2003.  
 [3] A.Cavallini et al, "Advanced PD Interference in On field Measurements. Part 1 : Noise Rejection", IEEE Trans on DEI, Vol.10, No.2, pp.216~224, 2003.  
 [4] W. Krause, H.-G. Kranz, "Pulse Preclassification for online PD Noise Suppression based on realtime Pulse Shape Identification", 14th International Symposium on High Voltage Engineering, G-002, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29, 2005.  
 [6] R. Heinrich, S. Schaper, W. Kalkner, R. Plath, A. Bethge, "Synchronous Three Phase Partial Discharge Detection on Rotating Machines", ISH 2003, Paper 542.  
 [7] K. Rethmeier, W. Kalkner, R. Plath, "On-site PD decoupling and localization at cross bonded HV cable

systems", ISH 2005, Paper G-104.

[8] J.T. Kim, J.H. Kim, J.Y. Koo, "Noise Discriminations in Measuring Partial Discharges using Pulse Wave Shape Analysis" CMD, 2006, Paper 698.

**저 자 소 개**



**김 지 홍 (金智鴻)**

1973년 8월 13일생. 2000년 대전대 공대 전기공학과 졸업(학사). 2002년 한양대 공대 전기전자제어계측공학과 졸업(석사), 2004년 한양대 공대 전기전자제어계측공학과 박사수료, 현재 Calvus Instruments 대표이사  
 Tel : (031)437-8086  
 Fax : (031)409-8085  
 E-mail : 100@hanyang.ac.kr



**김 정 태 (金正泰)**

1960년 1월 1일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1992년 한양대 공대 전기공학과 졸업(공학박). 현재 대전대 공대 전기정보시스템공학과 부교수.  
 Tel : (031)539-1914  
 Fax : (031)535-3579  
 E-mail : jtkim@daejin.ac.kr



**김 진 기 (金鎭基)**

1966년 3월 5일생. 1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1991년 한양대 공대 전기공학과 졸업(석사). 2002년 Texas tech University, Electrical engineering and Electrophysics Department, Ph.D. 현재 국방과학연구소 선임연구원.  
 Tel : (042)821-4047  
 E-mail : jingikim@empal.com



**구 자 윤 (具滋允)**

1951년 2월 7일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1980년 프랑스 ENSEEIHT 졸업(석사). 1980년~1984년 프랑스 ENSIEG 졸업(공학박). 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 한양대 퓨전전기 기술융용연구센터(FET) 소장  
 Tel : (031)400-5163  
 Fax : (031)407-9873  
 E-mail : koojy@hanyang.ac.kr