

## 신호처리 기술에 의한 부분방전 방사전자파의 특징 추출

(The Feature Extraction of Partial Discharge Electromagnetic Wave utilizing Signal Processing Techniques)

이현동\* · 이광식

(Hyun-Dong Lee · Kwang-Sik Lee)

### 요 약

최근 고전압 전력기기에서의 부분방전을 측정하기 위한 다양한 절연진단 기술들이 소개되었다. 부분방전 신호는 아주 미약하고 주변환경의 여러잡음에 쉽게 영향을 받으므로 주위 노이즈와의 구별이 어려운 실정이다. 본 논문에서는 부분방전 검출법중 부분방전에 의해 방사되는 전자파를 안테나로 측정하는 방사전자파법을 이용하여 변전소 구내의 배경잡음과 실험실내의 모의 부분방전을 방사전자파법에 의해 측정분석하였다. 또한 간섭신호와 모의 부분방전시 방사되는 방사전자파의 특징을 추출하고, 그 인식을 위하여 웨이블릿 패킷 변환을 이용하였다. 그 결과 간섭신호와 부분방전의 특정주파수대역의 시간정보 특징으로 그 차이를 구별할 수 있었다.

### Abstract

In recent years, diagnostic techniques have been investigated to detect a partial discharge(PD) in a high voltage electrical equipment. Because PD signal is very sensitive and difficult to suppress strong noises such as narrow-band radio frequency noise and random noise, the accuracy and credibility of PD measurement might be influenced by surrounding interference. Using the technique of PD detection by electromagnetic wave, we have studied the characteristics of both PD and substation-in interference signal. Also, we propose a wavelet packet transform based technique to perform a feature extraction from the interference and PD signal and a classification of the extracted features. The results show that time-frequency characteristics between PD and interference can be obviously distinguished. It is helpful for the development of the insulation diagnosis technique.

Key Words : partial discharge, wavelet packet transform

### 1. 서 론

송전전압을 초고압화하고, 설비의 대용량화, compact

\* 주저자 : 영남대학교 대학원 전기공학과 박사과정  
Tel : 053-810-1513, Fax : 053-813-8230  
E-mail : leeeun@orgio.net  
접수일자 : 2001년 10월 4일  
1차심사 : 2001년 10월 8일  
심사완료 : 2001년 10월 23일

화, 전력구조 개편의 일환으로 분산전원이나 전력저장 시스템의 운용 등을 고려하고 있는 상황이다. compact화는 설계전계를 크게 할 필요성이 있는데, 이는 기기 절연중의 미소결함의 유해성이 높아지므로, 미소결함을 검출하기 위한 고감도 부분방전 검출기술의 개발이 중요하게 되고 있다. 또한 경제적인 유지보수와 신뢰성 향상을 위해 기기의 운전중에 이상유무를 검출할 수 있는 상시감시시스템의 확립

도 중요하다[1][2].

부분방전의 검출법중 부분방전에 의해 발생하는 방사전자파를 비접촉 센서인 안테나를 이용한 방사전자파법이 주목을 받고 있다. 이 방법은 검출감도가 좋고, 검출범위가 넓으며, 센서의 수를 적게할 수 있어 경제적인 이점이 있으므로 그 중요성이 부각되고 있다[3][4]. 한편, 부분방전 측정에서 현장에서의 정기적인 펄스형태의 노이즈, 정현적인 연속노이즈, 불연속적인 노이즈등의 영향을 많이 받는다. 이러한 간섭효과를 줄이기 위하여 신호처리 알고리즘인 고속 푸리에 변환이나 하드웨어 내지는 소프트웨어적인 필터를 구성하여 간섭효과를 줄이거나 주위 노이즈와의 구분해석을 시도하는 실정이다[5][6]. 그러나 이러한 해석들은 부분방전 신호와 같이 비주기적인 신호, 일시적인 시간영역을 갖는 신호에 포함될 수 있는 정보의 해석에 만족스러운 결과를 보여주지 못하는 한계가 있는 것으로 사료된다.

이러한 한계 극복을 위하여 삼각함수를 기저함수로 하는 푸리에변환과는 달리 주파수에 관한 정보뿐만 아니라 시간에 대한 정보(시간 분해능)를 가지고 있는 새로운 시계열의 시간-주파수 해석의 도구인 웨이블릿 변환을 이용한 신호처리도 많은 연구가 진행되고 있으나, 그 이용이 연속웨이블릿 변환이나, 이산웨이블릿 변환에 국한되어 있다[7][8].

따라서 본 연구에서는 변전소 현장에서의 간섭신호와 실험실 내의 모의 부분방전 신호에 대한 방사전자파를 안테나로 측정 후, 방사전자파 신호가 가지는 특성의 주파수를 자기회기(Auto-regressive) 모델링에 의해 알아보고, 웨이블릿의 패킷 변환을 이용하여 간섭신호와 모의 부분방전 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 통해서 발생빈도가 가장 높은 주파수 대역의 시간정보를 추출하여 간섭신호와 부분방전 신호의 차이를 보여줌으로써 on-line 모니터링시의 진단 오류를 줄이는데 그 목적이 있다.

## 2. 웨이블릿 변환 [4]

웨이블릿 변환은 푸리에 변환이 주어진 신호를 사인(sine)과 코사인(cosine)기저함수를 이용하여 표현하는 것과는 달리 일정한 시간-주파수 정보를 가

지는 기저함수(basic function)로서 주어진 신호를 표현한다. 그래서 푸리에 변환이 정제적 신호해석에 유리한 반면에 웨이블릿 변환은 비정제적 신호(non-stationary signal) 해석에 커다란 장점을 가지게 된다. 웨이블릿 변환에 사용되는 기저함수로서는 스케일링(scaling) 함수와 마더웨이블릿(mother wavelet)이 있으며 모 웨이블릿은 다음 식처럼 표현된다.

$$\psi_{a,\tau} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 스케일링 파라미터(scaling parameter)이고  $\tau$ 는 천이 파라미터(translation parameter)이며,  $a^{\frac{1}{2}}$ 는 정규화 인자(normalization factor)이다.

웨이블릿 변환은 연속 웨이블릿 변환과 이산 웨이블릿 변환으로 분류된다.

이산신호(discrete signal)  $s(t)$ 에 대한 연속시간 영역에서 웨이블릿 변환(CWT : Continuous Wavelet Transform)과 이산 웨이블릿(DWT : Discrete Wavelet Transform)은 다음 식처럼 주어진다.

$$\begin{aligned} CWT(a, \tau) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int s(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \\ &= \langle s(t), \psi_{a,\tau}(t) \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 스케일링 파라미터와 천이 파라미터가 다음의 식(3)과 같이 표현될 경우 이산 웨이블릿 변환이 얻어진다.

$$a = 2^m, \tau = n 2^m \quad m, n \in \text{정수} \quad (3)$$

$$DWT(m, n) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_k s(k) \psi\left(2^{-\frac{m}{2}} k - n\right) \quad (4)$$

식 (2)와 식(4)로부터 이산 웨이블릿은 연속 웨이블릿을 샘플화하여 변형시킨 형태이다. 그리고 웨이블릿은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

(i)  $\omega=0$  에서  $\Psi(\omega)=0$  즉,  $\int \psi(t) dt = 0$  : dc 성분이 0이다.

(ii) 밴드패스(bandpass) 신호이다.

신호처리 기술에 의한 부분방전 방사전자파의 특징 추출

(iii) 시간영역에서 영(zero)으로 빠르게 감소한다.

특징 (i)은 웨이브렛 변환이 역변환이 존재하기 위한 조건이며, 특징(ii)은 주파수영역에서 웨이브렛 함수의 특징을 나타낸다. 특징 (iii)은 실제적인 웨이브렛 변환에서 시간영역에서의 분해능을 좋게 하기 위한 조건이 된다.

마더웨이브렛의 형태는 Morlet, Haar, Shannon, Meyer, Daubechies 등 만들어 낸 사람들에 따라서 다양하며 각각의 모 웨이브렛이 가지고 있는 신호 분해의 특성과 장점에 따라서 응용되는 분야는 다를 수 있다.

웨이브렛 패킷 변환은 웨이브렛 변환이 가지고 있는 스케일링과 천이에 주파수가 추가되어 스케일링에 의해 분할된다. 이때 윈도우의 크기가 결정되며, 위치와 주파수를 이용해 주어진 위치에 윈도우를 배치함으로써 다차원 분해가 용이하다는 특징을 갖는다. 웨이브렛 변환은 그림 1로 표현할 수 있으며 고주파영역에서 분해하지 못했던 부분까지도 분해할 수 있는 특징을 가지고 있으므로 처리하고자 하는 대상을 선택적으로 적용할 수 있는 그림 2와 같은 구조를 갖는다.

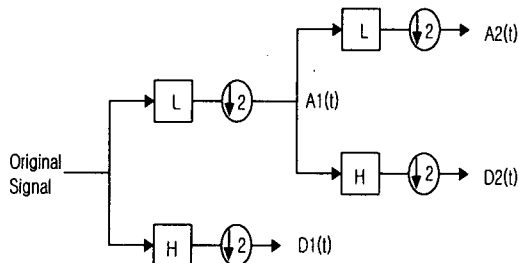


그림 1. 웨이브렛 분해를 위한 필터 뱅크 구조  
Fig. 1. Filter bank structure for wavelet analysis

그림 2의 각각의 단계는 다차원 분해된 웨이브렛 패킷 변환의 부밴드 트리이며, 이 또한 모 웨이브렛의 스케일링과 천이를 통한 선형 조합에 의해서 생성됨을 보여준다. 웨이브렛 패킷 변환은 각각의 단계에서 동시에 두 개의 조각으로 나누어져 있으며, 고주파 영역에서 각 밴드를 분해하므로 옥타브 밴드로 분해하는 웨이브렛 변환보다 다차원 분해가 용이하게 된다.

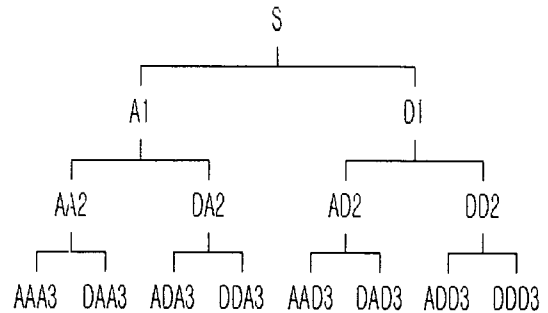
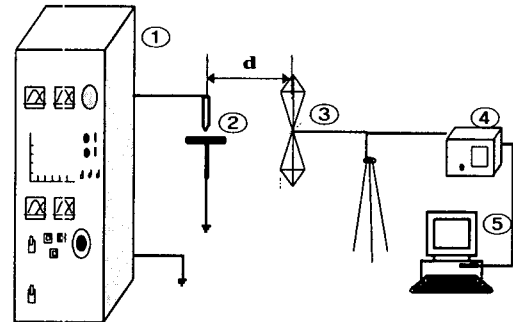


그림 2. 웨이브렛 패킷 변환의 트리구조  
Fig. 2. Wavelet packet decomposition tree



① 전원부 ② 전극부 ③ 안테나  
④ 오실로스코프 ⑤ PC

그림 3. 실험 회로도  
Fig. 3 Experimental set-up diagram

### 3. 배경 잡음과 부분방전의 측정

전력설비의 on-line 부분방전 모니터링시 외부 노이즈에 대한 PD의 구별을 제시하기 위하여 경산시 소재의 한국전력공사 154[kV] 변전소내의 배경잡음을 측정하고, 실험실내에서 침대 평판전극을 구성하여 PD를 모의하였다. 변전소 구내의 배경잡음의 측정은 지상고 10[m]인 154[kV] 변압기 1차측 송전선 아래에 본 실험에 사용된 바이코니칼 안테나를 설치하여 측정하였다. 실험실내의 PD에 방사전자파 측정에 대한 개략도는 그림 3과 같다.

실험실내의 PD측정에 대한 구성요소는 다음과 같다. 전압원으로는 교류고전압 발생장치(입력 : AC 220[V] 1 $\phi$ , 60[Hz], 출력 : AC 30[kV], Pultec Electronics Co. Ltd.)를 사용하였다. 전극시스템으로

는 칩대평판 전극으로, 칩전극은 곡률반경 0.11[mm]이며, 평판전극은 직경이 50[mm]인 스테인레스 스틸로 로고스키형 타입을 사용하였다. 전극갭은 5[mm]로 하여 불평등전계를 형성하였다. 한편, 전극의 배치는 중력에 대하여 수평방향으로 하고, 전원인가측에 칩전극을 접지측에 평판전극을 배치하였다. PD의 방사전자파의 측정은 주파수 대역이 30~300[MHz]의 대역특성을 가진 바이코니칼 안테나(EMCO 3110)를 전극부의 중심에서 5[m]떨어진 위치에 설치하여 측정하였으며, 전극부와 안테나의 배치는 수직상태를 기본으로 하였다. 이는 칩대 평판전극에 방전시 전극부가 송신안테나의 역할로서 전자파를 방사한다고 보았을 때 수신 안테나와 동일한 편파특성을 가지도록 하기 위함이다. 그림 4에 실험에 사용된 바이코니칼 안테나의 안테나 팩터와 이득을 나타내었다. 방사 전자파의 시간파형의 측정은 디지털 오실로스코프(Lecroy 9350AL, bandwidth(0~1GHz), sampling rate(1GSa/s), sensitivity range(2mV/div ~1V/div)를 이용하였다. 그의 sampling rate를 500 MSa/s로 하여 측정하였다. 측정된 파형의 데이터는 GPIB를 통하여 PC로 전송하였다.

#### 4. 결과 및 검토

그림 5의 (a)는 154[kV] 변전소 구내의 변압기 1차측 송전선로 아래에 안테나를 설치하고, 오실로스코프의 샘플링 주파수를 500[MHz]로 설정한 후에 측정된 시간파형이다. 이들 신호는 대부분이 이동통신, 고주파 보호 신호, 기타 라디오 방송등으로 나타날 수 있는 정현적인 형태의 신호들이다. 그림의 (b)는 10차 자기회기(Auto-Regressive : AR) 모델링에 의한 스펙트럼 추정치이다. 변전소 구내의 주파수 대역분석에서 기존의 주파수 대역 표준화기기인 스펙트럼 아날라이저를 이용하지 않은 이유는 스펙트럼 아날라이저의 경우는 변화하는 환경의 전자기적 잡음이나 방전과 같은 비정재파신호에 적합하지 않는 것으로 판단되었기 때문이다. 이는 결정론적 신호의 경우에는 계측장치로부터 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 비정재 신호의 경우는 신호의 통계적 특성이나 배경잡음과의 연관성, 장비의 성능과 특성에 따라 많은 변화를 보이기 때문이다.

변전소 구내의 AR 스펙트럼이 갖는 주 주파수 밴

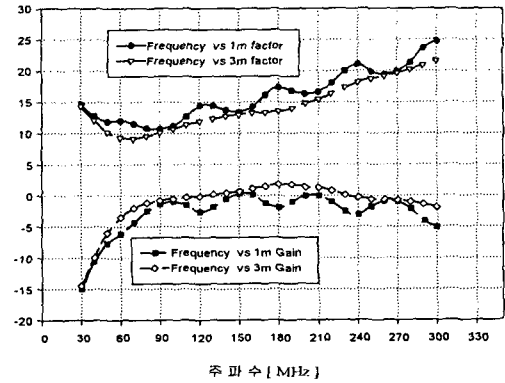
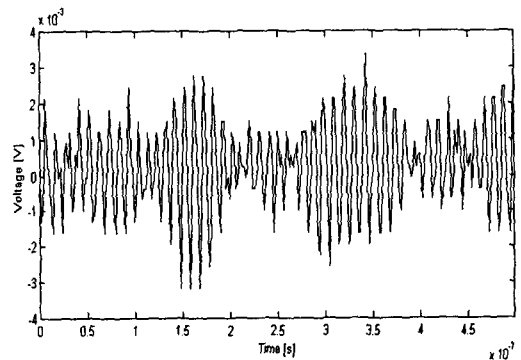
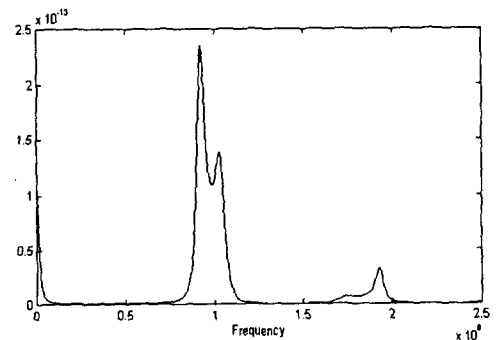


그림 4. 바이코니칼 안테나 팩터와 이득  
Fig. 4. The factor and gain of biconical antenna



(a) 변전소 구내의 배경잡음



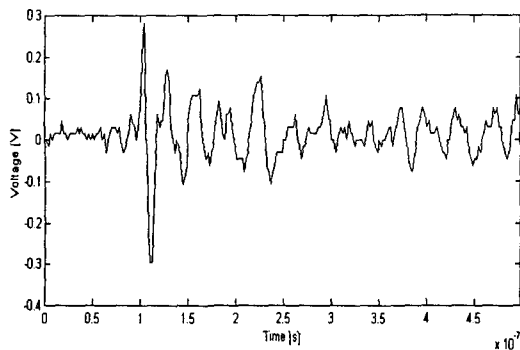
(b) 배경잡음의 AR 스펙트럼

그림 5. 변전소 구내 배경잡음의 시간과 주파수 영역 파형  
Fig. 5. waveform of time and frequency domain of substation-in background

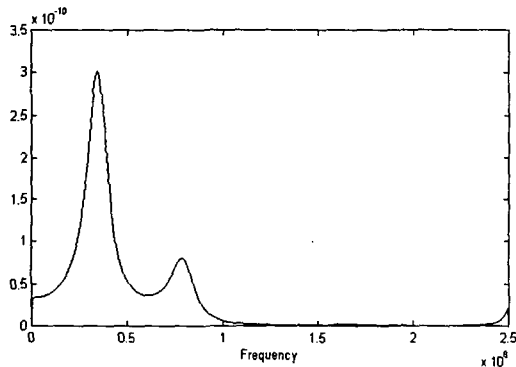
드는 83~110[MHz]의 주파수폭을 지니고 있으며,

신호처리 기술에 의한 부분방전 방사전자파의 특징 추출

91[MHz]에서 최대치를 나타내었으며, 104, 190[MHz]에서 첨두치를 나타내고 있다. 이러한 특성은 국내 FM방송이 갖는 주파수 대역특성에 따른 영향으로 평가된다.



(a) 모의 부분방전 방사전자파 신호



(b) 방사전자파의 AR 스펙트럼

그림 6. 실험실 PD에 의한 시간과 주파수 영역 파형  
Fig. 6. Waveform of time and frequency domain of Lab-in PD

그림 6은 실험실에서 침대평판 전극시스템을 사용하여 부분방전을 모의하였을 경우에 방전시 방사되는 전자파를 바이코니칼 안테나로 측정된 것이다. 그림의 (a)는 방전시 방사되는 전자파의 시간파형이다.

방사전자파는 불평등전계의 대표적 구성인 침대 평판전극에서 침단의 전극에 전압인가를 함으로서 전계가 집중되고, corona의 발생공간은 부분적 이온화에 기인하여 공기의 전기 전도도가 증가하며, 전자가 전계에 의해 강한 힘을 받아 전계방향으로 가속

되면 전자충돌에 의한 이온화가 방전현상을 주도하며, 공기입자가 기저상태로 떨어질때 전자파를 방사하는 것으로 사료된다

그림의 (b)는 배경잡음과 마찬가지로 AR 모델링에 의한 스펙트럼 추정치이다. 변전소 구내에서 발생하는 주파수 스펙트럼과는 상이하게 30[MHz]대역 부근에서 최대치를 나타내고 있다.

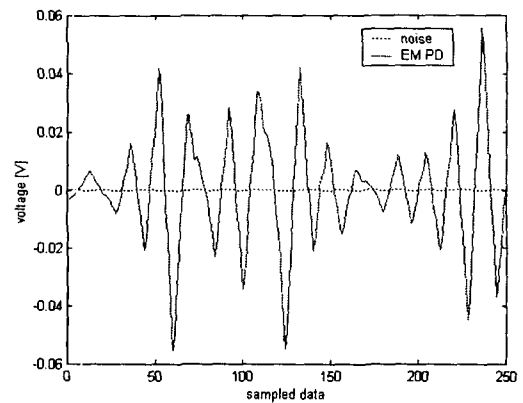


그림 7. 웨이블릿 패킷 변환에 의한 특정 주파수 추출

Fig. 7. The extraction of dominant frequency by wavelet packet transform

전력설비는 방전에 의하여 주위에 전자파를 방사하는데, 이 방사전자파는 광대역의 불규칙한 주파수 스펙트럼을 갖는데, 이러한 방사전자파를 펄스화 하였을 경우 방전의 개시 이벤트시간에서 어떠한 특정한 패턴을 나타낸다. 이러한 특정 패턴을 추출하기 위하여 웨이블릿 패킷 변환을 사용하였다. 그림 7은 변전소 구내의 배경잡음과 PD가 구별되는 특성의 주파수 대역을 30[MHz]로 인식한 후에 웨이블릿 패킷 변환을 이용하여 30[MHz]대역의 주파수 성분을 나타내는 시간 파형이다. 실험에서 500[MHz]로 샘플링하였으므로, Nyquist의 샘플링 이론에 의해 배경잡음과 PD의 시간파형은 0~250[MHz]의 주파수 성분을 지니고 있는데, 특정 주파수 대역이 30~60[MHz]대역이므로, 그림 2의 웨이블릿 패킷 변환의 트리구조에서 DAAA4의 주파수 대역이 31.25~62.5[MHz]의 성분을 추출하여 나타낸 것이다.

신호가 가지는 주파수 성분과 아울러 진폭의 차이를 확인하고, 이러한 주파수 성분의 시간영역을 제시

함으로써 방송파등의 간섭효과에 의한 진단의 오류를 방지할 수 있으리라 사료된다.

## 5. 결 론

154[kV] 변전소 구내의 배경잡음과 실험실 내의 모의 부분방전에 대하여 새로운 검출기법인 방사전자파법을 이용하여 측정하였으며, 이들 방사전자파에 대한 신호의 분석은 새로운 시간-주파수 해석도구인 웨이브렛 변환중 웨이브렛 패킷변환을 이용하였다. on-line 모니터링시 간섭효과에 의한 진단오류를 방지하기 위하여 특정주파수 대역을 웨이브렛 패킷 변환을 이용하여 그 특징을 추출하였다.

154[kV] 변전소 구내의 배경잡음은 우리나라의 라디오 FM 방송대역의 정현적 신호에 그 특징이 나타나는 반면에 실험실 내의 모의 PD는 그 특징이 30 [MHz]대역에서 특징이 추출되었다. 이러한 특징의 주파수 대역의 이벤트 시간을 웨이브렛 패킷변환을 이용하여 추출한 결과 변전소 구내의 배경잡음과 확실한 차이를 구별할 수 있었다.

이러한 진단 기술을 이용하여 간섭효과에 의한 on-line 모니터링시의 진단오류를 방지할 수 있으리라 사료된다.

- 분방전패턴 분석”, 한국조명·전기설비학회 논문집, Vol. 15, No.1, pp.84~89, 2001.
- [8] 이동준, 광희로 “Wavelet transform을 이용한 GIS내 초음파 신호 분석”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1918~1920, 2001.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000 - 1 - 30200 - 001 - 3)지원으로 수행되었음.

## ◇ 저자소개 ◇

**이 현 동 (李炫東)**  
1970년 6월 13일생. 1993년 영남대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

**이 광 식 (李廣植)**  
1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 1995~1998년 당학회 대구·경북 지회장. 현재 당학회 부회장. 영남대 공대 전자정보공학부 교수. 영남대 산업기술대학원장.

## References

- [1] T. Okamoto, "Recent Partial Discharge Diagnostics," T.IEE Japan, Vol.115-B, No.10, pp.1136-1139, 1995.
- [2] 권 동진 외, "변전기기 예방진단 시스템의 적용-765kV 변전소 예방진단 시스템", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1885~1887, 2000.
- [3] A. Hamid, Z.I. Kawasaki "Analysis of VHF-wideband Electromagnetic Noises from Partial Discharge Using Discrete Wavelet Transform", IEEE of PES, Vol.1, pp.263~268, 2001.
- [4] "Partial Discharge Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the acoustic Method", CIGRE TF 15/33.03.05, 1999.
- [5] Changchang Wang, "Analysis and suppression of interference for on-line monitoring of partial discharge of power transformers", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol.2, pp.530-533, 1997.
- [6] Changchang Wang, "Interference rejection for on-line PD monitoring of power transformers", IEEE International Symposium on El., Vol.1, pp.24-27, 1998.
- [7] 이현동, 이광식, 이동인 "이산 웨이브렛변환에 의한 부