

# 웨이브렛 변환의 노이즈 제거기법에 의한 부분방전신호 특성

(Characteristics of Partial Discharges Signals Utilizing Method of Wavelet Transform Denoising Process)

이현동\* · 이광식\*\*

(Hyun-Dong Lee · Kwang-Sik Lee)

## 요 약

본 논문은 전기적 검출법에 의해 측정된 부분방전 신호에 대하여 웨이브렛 변환을 적용하여 각기 다른 주파수 성분을 동시에 추출하고 이들의 시간정보를 얻음으로써 시간과 주파수 영역에서 동시에 해석할 수 있도록 하였다. 그리고, 웨이브렛 변환의 노이즈 제거기법을 적용하여 부분방전 측정시에 포함되어 있는 노이즈를 제거하여 잡음제거 효과를 나타내었다.

## Abstract

In this paper, As the wavelet transform has the properties of multi-resolution analysis and time-frequency domain localization, application of wavelet transform is used at partial discharge(PD) signal detected by electrical detection method to extract PD signal's various frequency component and its time domain. therefore we can analyzed PD signal's time-frequency domain simultaneously. On the other hand, using wavelet transform denoising process, included noise signal in detected PD signal is well eliminated. we can propose the true shape of PD signal.

## 1. 서 론

21세기 정보화 사회로의 전환에 의한 정보 네트워크의 정비·확대, 도시화의 진전, 도시 라이프 스타일의 변화, 산업구조의 변화 등에 의해 전력의 안정 공급, 고품질화, 고신뢰성에 대한 요구가 날로 강조되는 시점이다. 대용량화된 변압기, 가스 개폐장치(Gas Insulated Switchgear : GIS) 등의 전력설비의 경제적인 유지보수와 신뢰성 향상을 위해 운전상태

에서 이상유무를 검출할 수 있는 예방진단시스템이 일부 적용되고 있는 상황이다. 그 예로는 1997년 한국전력공사의 송변전처에서는 각 전력관리처별로 상태감시시스템을 시범 적용하였으며, 2000년에는 이를 확대 적용하고 있는 실정이다. 또한 2002년 운전예정인 765[kV]변전소에는 예방진단시스템이 적용될 계획이다[1][2].

전력설비의 절연시스템의 상태를 파악하기 위한 여러 진단방법이 수십년간 행하여지고 있으며, 예방진단시스템에 적용되는 온라인 이상검출 기술로는 절연유의 가스분석 기술, 초음파 측정기술, 부분방전 측정기술, 온도 측정기술 등이있다.

\* 정회원 : 영남대학교 대학원 전기공학과 박사과정

\*\* 정회원 : 영남대학교 전자정보공학부 교수, 공박  
접수일자 : 2001년 6월 14일

전력설비에서 절연성이 저하하여 절연이 파괴되기 전에, 거의 모든 경우가 부분방전(partial discharge : PD)을 수반하고 있다. PD는 두 도체사이의 절연물이 일부분 교락된 전기적 방전으로 이상징후 발생시 응답 특성이 빠른 장점을 가지고 있으므로 PD를 측정하여 전력설비의 사고를 미연에 방지할 수 있는 유효한 방식이다. 그러나, PD 신호는 일시적인 시간영역을 가지며, 신호의 크기가 아주 미약하고 주변환경의 여러 잡음에 쉽게 영향을 받기 때문에 PD 신호와 잡음의 판별은 대단히 어려운 실정이다[3][4].

최근에 음성이나 영상 신호처리, 지진파, 의료 등에서 많은 응용연구가 진행되고 있는 웨이브렛 변환을 이용한 분석이 전력시스템에서도 채택되고 있으며, 잡음제거 기법등이 소개되고 있다[5][6][7].

본 연구에서는 모의한 GIS 내부의 PD에 의한 방전펄스 전류를 전기적 방법으로 측정하였다. 측정된 신호는 기존의 통계적 방법과는 달리 새로운 신호 해석방법인 시간-주파수 해석의 도구(신호의 급격한 변화부분은 아주 짧은 고주파 기저를 이용하고, 저주파 신호에 대해서는 긴 윈도우를 적용)인 웨이브렛 변환을 적용하여 각기 다른 주파수 성분을 동시에 추출하고 이들의 시간정보를 얻음으로써 시간과 주파수 영역에서 동시에 해석할 수 있도록 하였다. 그리고, 웨이브렛 변환의 노이즈 제거기법을 적용하여 부분방전 측정시에 포함되어 있는 노이즈를 제거하여 잡음제거 효과를 나타내었다.

## 2. 웨이브렛 변환 [8]

웨이브렛 변환은 푸리에 변환이 주어진 신호를 사인(sine)과 코사인(cosine)기저함수를 이용하여 표현하는 것과는 달리 일정한 시간-주파수 정보를 가지는 기저함수(basic function)로서 주어진 신호를 표현한다. 그래서 푸리에 변환이 정제적 신호해석에 유리한 반면에 웨이브렛 변환은 비정제적 신호(non-stationary signal) 해석에 커다란 장점을 가지게 된다. 웨이브렛 변환에 사용되는 기저함수로서는 스케일링(scaling) 함수와 마더웨이브렛(mother wavelet)이 있으며 모 웨이브렛은 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,  $\frac{1}{\sqrt{a}}$ 는 정규화 인자(normalization factor)이다.

웨이브렛 변환은 연속 웨이브렛 변환과 이산 웨이브렛 변환으로 분류된다.

이산신호(discrete signal)  $s(t)$ 에 대한 연속시간 영역에서 웨이브렛 변환(CWT: Continuous Wavelet Transform)과 이산 웨이브렛(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 웨이브렛 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 웨이브렛은 연속 웨이브렛을 샘플화하여 변형시킨 형태이다. 그리고 웨이브렛은 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.

(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.

WT는 잡음이 첨가된 신호에서 잡음을 제거하는

특징을 가지고 있으므로, 잡음에 영향을 많이 받는 PD 신호의 잡음제거에 우수한 특징을 가지고 있다. 잡음을 제거하는 방법으로는 여러가지가 있지만, 대개의 경우 그 원인을 제거하는 것보다는 결과로서 나오는 잡음을 필터로 감쇄시키는 방법이 주로 사용되고 있다. Donoho와 Johnstone에 의해 웨이브렛 잡음제거 기법이 개발되었으며, 웨이브렛을 이용한 잡음제거 과정은 다음과 같다.

- (i) 잡음 성분을 정규화한다.
- (ii) Hard 또는 Soft thresholding 방법으로 웨이브렛 도메인에서 thresholding을 수행한다.

Hard thresholding과 soft thresholding은 다음과 같다.

Hard thresholding

$$\delta_{\lambda}^H = \begin{cases} S(t), & \text{if } |S(t)| > \lambda \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Soft thresholding

$$\delta_{\lambda}^S = \begin{cases} \text{sgn}(S(t))(|S(t)| - \lambda) & \text{if } |S(t)| > \lambda \\ 0 & \text{if } |S(t)| \leq \lambda \end{cases}$$

여기서  $\lambda$ 는 임계값으로서

$\lambda = \sqrt{2 \log(n)} (2\sigma) / \sqrt{n} 2^{(J-i)/2}$ ,  $n$ 은 각 스케일에서의 샘플수를 나타내며,  $\sigma$ 는 웨이브렛 도메인상에서의 각 스케일의 표준편차를 가리키며,  $J$ 는 각 스케일로 ( $j = j_0, \dots, J$ )이다[8].

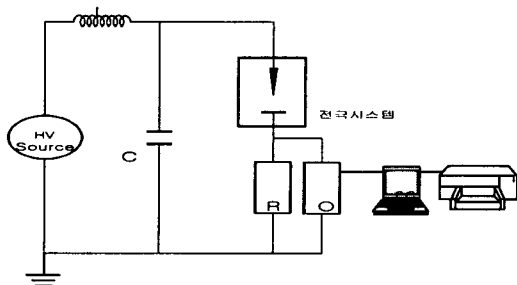


그림 1. 실험 회로도  
Fig. 1. Experimental set-up diagram

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

그림 1은 부분방전을 모의하고 부분방전시의 방전 펄스 전류를 측정하기 위한 전극 배치의 개략도를 나타낸 것이다.

그림 1은 방전펄스 전류를 측정하기 위해 사용한 실험회로도이다. 본 회로도에는 다음과 같이 구성되어 있다. 전압원으로서 교류고전압 발생장치 (입력 :AC 220[V],1[ $\phi$ ], 60[Hz], 출력 :AC 30[kV], Pultec Electronics Co. Ltd.), 4기압의 SF6 가스가 주입되어 있으며, 기밀성이 유지되는 압력 챔버, 전극 시스템 (침대 평판전극, gap: 5[mm], 침단 각도: 30[ $^{\circ}$ ], 평판전극 직경: 55[mm], 전극재료: SUS304), 정합용 무유도 저항 R (50[ $\Omega$ ], 전극시스템의 방전 펄스에 의해 야기되는 전압펄스가 양단에 걸린다.), 브로킹 코일 L, 결합콘덴서 C(고주파 전류펄스를 빨리 방출시키기 위함), 브로킹 코일과 결합콘덴서는 전압원에 포함되어 있으며, 이는 일종의 고전압필터(high-voltage filter)로 변압기의 미소방전과 잡음을 억제시키는 역할을 행한다. 오실로스코프 O(Lecroy 9350AL, 500[MHz]), 측정된 방전펄스의 파형의 데이터는 GPIB를 통하여 PC 및 출력가능한 측정시스템이다.

전극시스템의 전극배치는 중력에 대하여 수평방향으로 하고, 전원인가측에 침전극을 접지측에 평판전극을 배치하였으며, 전압의 인가속도는 0.1[kV/sec]로 하여 전압을 인가하여 부분 방전 측정시스템인 Corona Detecting Apparatus System(이하CDAS)의 방전 오실로그래프상에 부분방전이 발생하는 순간을 방전개시전압(corona onset voltage:  $V_{co}$ )으로 하여 이때의 무유도 저항 양단의 전압파형을 측정한다. 후 웨이브렛 변환을 이용하여 방전펄스 신호를 분할·재구성하였다. 모웨이브렛(mother wavelet)의 선정에는 여러 종류의 모웨이브렛중 방전펄스 신호의 분석에 사용된 모웨이브렛(mother wavelet)은 측정된 PD신호가 크기가 작고, 짧은 지연특성과 빠른 감쇠, 그리고 진동하는 형태의 신호이므로 신호의 형태를 고려하여 'Daubechies 3'를 적용하였고, 적용된 모웨이브렛 함수를 그림 2에 나타내었다.

PD신호를 여러 형태의 고역 필터 성분들로 나누기 위해서 웨이브렛 필터 बैं크를 사용하여 4단계의

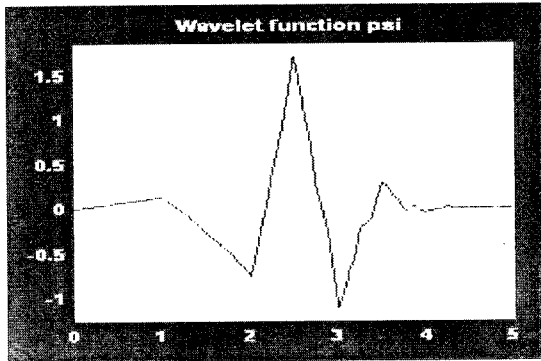


그림 2. 원형 함수 Daubechies 3  
Fig. 2. Mother wavelet function Daubechies 3

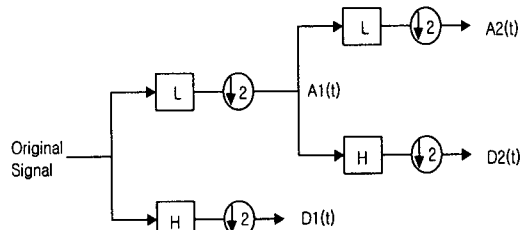


그림 3. 웨이브렛 분해를 위한 필터 뱅크 구조  
Fig. 3. Filter bank structure for wavelet analysis

주파수 대역별( $F_s/2, F_s/4, F_s/8, F_s/16$ )로 나누어서 분할처리 하였다(그림 3). 즉 이산 웨이브렛 변환(Discrete Wavelet Transform: DWT)을 이용하여 PD신호를 저역통과 필터(L)를 통과한 신호(A1, A2, A3, A4)와 고역통과필터(H)를 통과한 신호(D1, D2, D3, D4)로 분할하였다.

저역통과 필터(L)를 통과한 신호는 high-scale로 저주파 성분이며 PD신호의 고유한 특성으로 크기와 해상도를 변화시킬 때 각 조건에서의 파형의 변화된 상태를 나타낸 것으로 웨이브렛 변환에서는 'approximation'이라 한다. 한편 고역통과필터(H)를 통과한 신호는 low-scale로 고주파 성분이며 PD신호의 미세한 특성을 나타내며 신호분석에 있어서 중요한 정보를 제공하여 준다. 웨이브렛 변환에서는 이를 'detail'로 칭한다.

분해된 PD 신호를 원래의 신호로 재구성하는 웨이브렛의 역변환은 그림 4와 같이 고역통과 필터(L)와 저역통과 필터(H)의 mirror필터인 L'와 H'에 분

해된 신호를 통과시키는 과정으로 수행하였다.

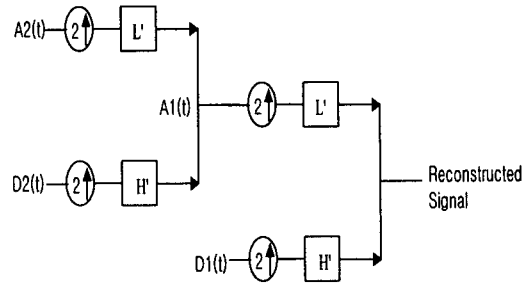


그림 4. 웨이브렛 합성을 위한 필터 뱅크 구조  
Fig. 4. Filter bank structure for wavelet synthesis

## 4. 결과 및 검토

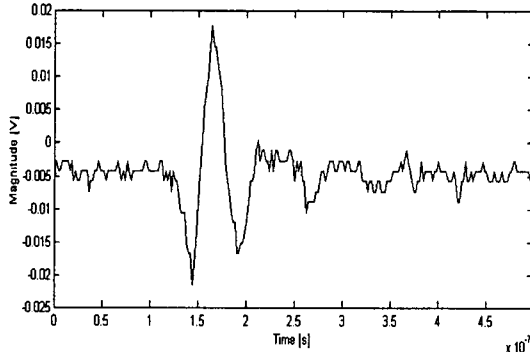
### 4.1 부분방전 방전펄스

그림 5는 4기압의 SF<sub>6</sub> 가스가 주입되어 있는 압력 챔버내의 전극시스템(그림 1)에서의 인가전압의 증가에 따른 PD발생시의 방전전류 파형이다. 그림 5의 (a)는 침전극에 인가전압 12[kV]가 인가되었을 경우의 방전전류 파형이고, (b)는 인가전압 20[kV], (c)는 인가전압이 30[kV]인가되었을 경우의 방전전류 파형이다. SF<sub>6</sub> 가스중의 부분방전은 급준한 펄스를 야기시킨다. SF<sub>6</sub> 가스중의 방전 형태에는 streamer형과 leader형이 공존하며, 개개의 방전 형태는 압력, 전압 파형, 전극형상에 따라서 크게 변화한다고 생각된다. SF<sub>6</sub> 가스는 강한 전자 부착성에 의해서 부이온을 만드는 것이 가능하기 때문에 외부 전계를 상충하여 약화시킬 수 있으므로 이에 의해서 부분 방전 내부에는 높은 전계강도를 유지할 수 있는 것으로 생각할 수 있으며, 이 작용에 의해서 부분 방전의 외부 즉 미전리의 가스 공간에 대해서는 전계가 비교적 낮은 값으로 머무른다. 이 때문에 방전 진전에는 보다 높은 전압이 필요하였다. 방전에 따른 초기전자의 생성기구를 표1에 나타내었다.

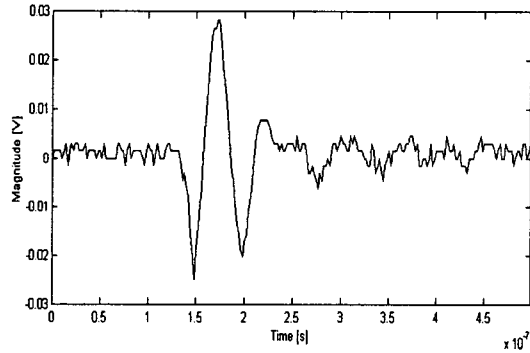
인가전압 12[kV]를 인가한 경우의 방전초기의 방전전류 펄스의 valley에서 peak까지의 상승시간은 20[ns]이고, 하강시간은 28[ns]이며, 정합용 무유도 저항 양단의 전압은 최대치가 0.016[V], 최저치의 절대치가 0.0214[V]이다. 이를 전류로 환산하면 0.35[ $\mu$ A]

웨이브렛 변환의 노이즈 제거기법에 의한 부분방전신호 특성

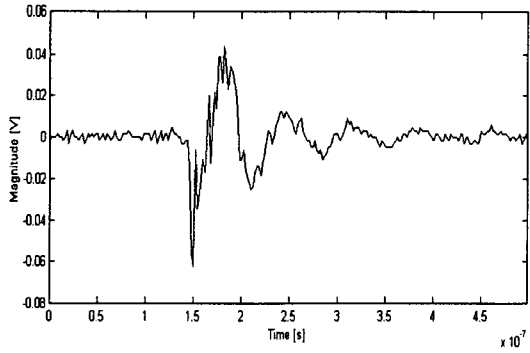
와 0.43[mA]정도의 미약한 방전이다. 인가전압의 증가에 따른 방전의 진진으로 펄스의 크기가 증가하였으며, 절연파괴에 도달하기전에는 펄스의 파형이 일그러지면서 펄스의 상승과 하강의 시간이 급준하게 되었다.



(a) 인가전압 12 [kV]의 방전전류 파형



(b) 인가전압 20 [kV]의 방전전류 파형



(c) 인가전압 30 [kV]의 방전전류 파형

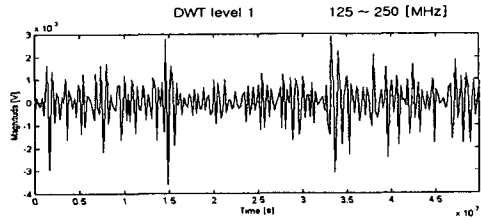
그림 5. 인가전압에 대한 방전전류 파형  
Fig. 5. Current waveform of corona discharge

표 1. 초기전자생성의 각종 기구와 특징  
Table 1. Mechanism and characteristics of electron initiation

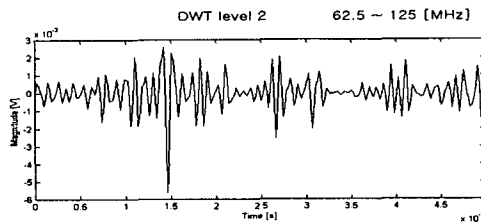
전자 생성 기구	생성과정을 지배하는 주요인자	전계의존성
부이온에서의 전자이탈	· gap중의 부이온수 · 전리원의 有無, 강도	· E/p에 의존
전계전자방출	· 음극표면전계 · 음극표면거칠기상태 · 음극재료	· E에 의존 (Foeler-Nordheim의 식)
자연전리	· 도달 우주선강도 · 자연방사능의 대소	· 無
광전자방출	· 자외선 등의 線原의 강도 · 전극재료	· 無
정이온에 의한 2차 전자 방출	· gap중의 정이온수 · 음극표면전계	· E/p에 의존
수분효과	· 부착수분량 · 전극재료 · 표면거칠기	· E에 의존
exo-전자방출	· 음극면광강도 · 파장 · 전극의 재료 · 표면거칠기 · 내력	· 無

그림 6은 전극시스템의 침전극에 교류고전압 12[kV]를 인가했을때의 방전전류펄스(그림 5(a))에 대하여 모웨이브렛 Daubechies 3를 이용하여 4단계의 DWT를 적용하여 방전전류 펄스를 분해한후 재구성하여 나타낸 것이다. 그림 6의 (a)는 그림 3의 웨이브렛 분해를 위한 필터뱅크구조를 이용하여 분해된 신호를 그림 4의 웨이브렛 합성을 위한 필터뱅크 구조를 통해서 재구성된 D1신호로 주파수 대역이 125~250[MHz]의 신호이고 (b)는 D2 신호로 주파수 대역이 62.5~125[MHz]의 신호이고 (c)는 D3 신호로 주파수 대역이 32.25~62.5[MHz]의 신호, (d)는 D4 신호로 주파수 대역이 16.125~32.25[MHz]대역의 정보를 가지는 detail신호이다. 한편 (e)는 0~16.125[MHz]대역의 주파수 정보를 가지는 Approximation 신호이다.

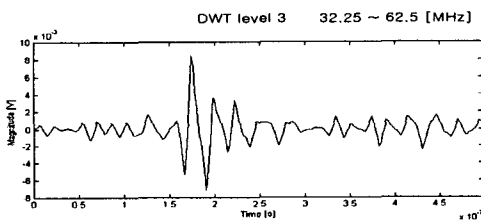
인가전압 12[kV]인가시의 방전전류 펄스(그림 5의 a)에서 펄스는 14.4[ns]에서 개시하여 일시적인 시간영역을 가진 후 미약하게 진동하는 것을 볼 수 있는데, 이 방전전류 펄스의 성분을 DWT를 통해 분해한 후 재구성한 결과 펄스 개시 시점인 14.4[ns]에서의 펄스크기를 detail성분보다는 A4인 Approximation성분이 가지고 있으므로, detail성분들은 노이즈성분에 가까운 것으로 생각된다. 특히 펄스개시 시점에서의 노이즈 성분은 방전전류 펄스가 급준파이기 때문에 detail 성분중 D1, D2 성분이 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



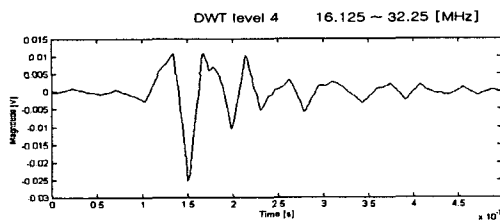
(a) D1 신호



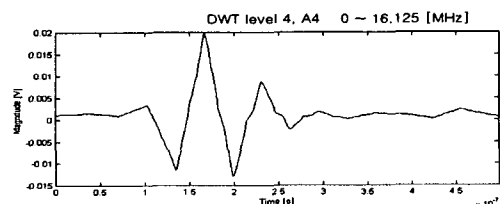
(b) D2 신호



(c) D3 신호

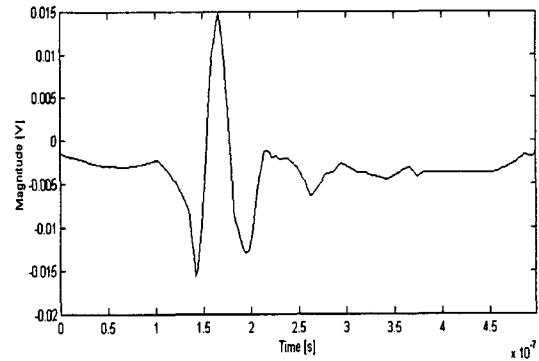


(d) D4 신호

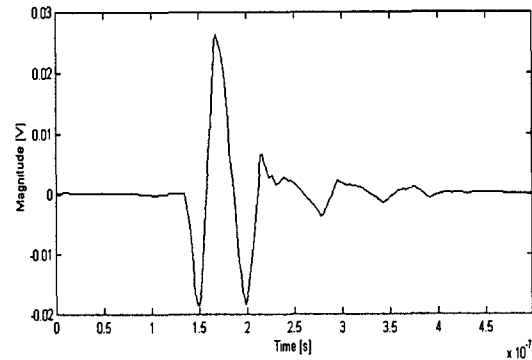


(e) A4 신호

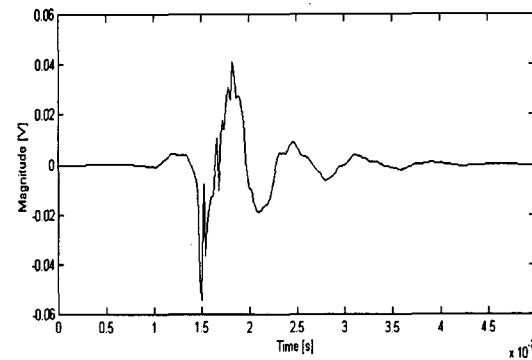
그림 6. 방전전류 펄스파형의 DWT분해후 재구성 (인가전압 12 kV)  
Fig. 6. The DWT reconstruction of PD signal in 4 level (Applied voltage 12 kV)



(a) 노이즈가 제거된 12 kV 파형



(b) 노이즈가 제거된 20 kV 파형



(c) 노이즈가 제거된 30 kV 파형

그림 7. 웨이블릿 변환의 denoising에 의한 부분방전 전류펄스 파형  
Fig. 7. PD pulse signal after wavelet denoising process

그림 7은 그림 5의 인가전압에 대한 방전전류 파형을 웨이브렛 변환의 노이즈제거기법을 이용하여 방전전류 펄스의 신호에 포함되어 있는 노이즈성분을 soft thresholding을 이용하여 제거하여 나타낸 것이다. 그림 7의 (a)는 인가전압 12[kV]의 방전전류 파형을 노이즈 제거한 것이며, (b)는 인가전압 20[kV], (c)는 인가전압 30[kV]인가시의 방전전류 파형을 노이즈제거한 것이다. 이들 노이즈 제거시의 thresholding의 임계값으로는 각 단계의 detail성분의 최대값을 임계값으로 선정하였다. 노이즈가 포함된 방전전류 파형보다 신호의 강도가 저하하였으며, 방전전류 펄스가 강한 급준파의 형태로 나타나는 14.4~21.2[ns]의 시간영역을 제외하고는 노이즈 제거효과가 뛰어난 것을 알 수 있다.

또한, 그림 5의 인가전압에 대한 방전전류 파형에서는 방전의 개시 시점에서 얼마만큼의 시간동안 미약진동이 일어나는가를 노이즈 성분으로 인하여 구별하기 어려웠으나, 웨이브렛 변환의 노이즈제거 기법을 통하여 방전의 급준펄스가 발생한 후 약 200[ns]의 지속시간을 가지며, 강한 급준파이후인 21.2[ns]이후의 미소 진동 신호를 가진다. 이들 미소 진동하는 신호들은 gap중에 존재하는 캐리어들로 다음의 방전 현상을 주도할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

비주기적이고 일시적인 시간영역을 갖으며, 주변 잡음에 대하여 영향을 많이 받는 PD 신호를 새로운 시간-주파수 해석의 도구인 웨이브렛 변환을 이용하여 시간-주파수 해석을 통하여 PD 신호가 가지고 있는 주파수성분에서의 시간정보를 제시하였으며, 노이즈제거기법을 통하여 노이즈가 포함된 PD 신호의 노이즈 성분을 제거함으로써 PD 신호의 형태와 발생시점을 잘 파악할 수 있었다.

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

## 참고 문헌

- (1) 김정배 외, "초고압 가스절연개폐장치의 스마트 진단 시스템 개발", 전기산업신기술세미나논문집, pp.169~177, 2000년 11월.
- (2) 권동진 외, "변전기기 예방진단 시스템의 적용-765kV 변전소 예방진단 시스템", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1885~1887, 2000.
- (3) F.H Kreuger, Partial Discharge Detection in HV Equipment, Heywood London, Butterworths, 1989.
- (4) E. Gulski and F.H Kreuger. "Computer aided recognition of discharge sources", IEEE Trans. on Elect. Insul. Vol.27, pp. 82~92, 1992.
- (5) 박차훈, "웨이브렛 변환을 이용한 실시간 모니터링 ECG 테리미터리 시스템 구현", 박사학위논문, 2000년 12월.
- (6) 이현동, 이 광식, 이 동인, "이산 웨이브렛변환에 의한 부분방전패턴 분석", 한국조명·전기설비학회 논문집 제15권 제1호, pp. 84~89, 2001.
- (7) 이현동, 이광식의, "다중해상도 분해에 의한 부분방전 신호의 특징에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1924~1926, 2000.
- (8) Charles K.Chui, An Introduction to Wavelets, 1992.

## ◇ 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.