

# 웨이브렛 변환을 이용한 부분방전 신호의 분석

## Analysis of Partial Discharge Signal Using Wavelet Transform

論 文
49C-11-5

李 炫 東\* · 金 忠 年\* · 朴 光 緒\* · 李 廣 植\*\* · 李 東 仁\*\*

(Hyun-Dong Lee · Chung-Nyun Kim · Kwang-Seo Park · Kwang-Sik Lee · Dong-In Lee)

**Abstract** - This paper deals with the multiresolution analysis of wavelet transform for partial discharge(PD). Test arrangement is based on the needle-plane electrode system and applied AC high voltage. The measured PD signal was decomposed into "approximations" and "details". The approximation are the high scale, low-frequency components of the PD signal. The details are the low-scale, high frequency components. The decomposition process are iterated to 3 level , with successive approximation being decomposed in turn, so that PD signal is broken down into many lower-resolution components. Through the procedure of signal wavelet transform, signal noise extraction and signal reconstruction, the signal is analyzed to determine the magnitude of PD.

**Key Words** : partial discharge, wavelet transform, approximation, detail

### 1. 서 론

최근 사회의 정보 네트워크의 정비·확대 등 정보화의 진전과 산업구조의 변화에 따라 전력의 안정공급, 고품질화에 대한 요구가 한층 높아져 가고 있으며, 전체 에너지 수요에 대한 전기에너지의 비율도 급증하고 있는 실정이다.

이와 같은 사회적 요구에 대응하기 위해 전기에너지를 효율 좋게 발생하는 기술개발과 더불어 소비자에게 효율적으로 전달하기 위해 송전전압을 초고압화 하는 등 전력전송 설비의 증대를 기하고 있다. 전력설비에서 절연성이 저하하여 절연이 파괴되기 전에 거의 모든 경우가 부분방전을 수반하고 있다. 그러므로 이 부분방전 발생기구를 연구, 검토하여 그 결과를 절연진단 등에 응용가능 할 것으로 보며, 이들에 관한 많은 연구가 진행되고 있다[1].

부분방전은 아주 미약하고, 주변환경의 여러 잡음에 쉽게 영향을 받기 때문에 부분방전과 잡음의 판별은 극히 난이하다[2].

최근의 부분방전의 분석은 부분방전의 제량과 결합의 상호관계인 위상-방전전하량-펄스수, 즉  $\phi - q - n$  파라미터를 이용한 통계적인 기법과 FFT를 이용하거나 안테나를 이용한 주파수 스펙트럼에 의한 구분화 방법이 시도되고 있으며[3][4][5], 그 측정에도 부분방전 발생시 나타나는 방전펄스전류, 초음파, 진동, 방사전자계, 광, 가스생성 등의 특성에 기인한 방전펄스측정법, 초음파법, 진동가속법, 발광검출법, 발생가스 분석법 등이 있으며[6][7], 이들 신호들의 분석은 크게 시간영역(time domain)의 분석과 주파수영역(frequency domain)의 분석들로 많이 소개되어져 왔으나[8],

이러한 해석법들은 방전신호와 같은 비주기적인 신호, 일시적인(transient)시간영역을 갖는 신호에 포함될수 있는 정보의 해석에 만족스러운 결과를 보여주기에 한계가 있으며, 분석이 정량적이지 못하고 전문가적인 경험에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 침대 평판전극을 이용 부분방전을 모의하여 방전펄스 전류를 전기적 방법으로 측정후, 기존의 통계적 방법과는 달리 시간-주파수해석의 도구(신호의 급격한 변화부분은 아주 짧은 고주파 기저를 이용하고, 저주파 신호에 대해서는 긴 윈도우를 적용)인 웨이브렛 변환을 이용하여 부분방전시 발생하는 방전전류펄스의 변화량을 시간대역과 주파수대역에서 규명하기 모호한 부분의 정보량을 분석, 정량화하고자 하였다.

### 2. 관련이론

#### 2.1 웨이브렛 변환(Wavelet Transform)[9]

웨이브렛 변환은 푸리에 변환이 함수  $e^{-j\omega t}$ , 즉 사인(sine)과 코사인(cosine)기저함수의 팽창(dilation)을 이용하여 주어진 신호를 표현하는 것과는 달리 일정한 시간-주파수 정보를 가지는 하나의 고정된 함수인 모웨이브렛 함수(mother wavelet function)와 스케링 함수(scaling function)를 기저함수로 사용한다.

웨이브렛 변환식은 다음과 같다.

$$(W_{\psi} f)(b, a) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

여기서 변수  $a$ 는 scale parameter,  $b$ 는 position

\* 正 會 員 : 嶺南大 大學院 電氣工學科 博士課程

\*\* 正 會 員 : 嶺南大 電子情報工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 4月 28日

最終完了 : 2000年 9月 21日

parameter,  $f(t)$ 는 측정된파형,  $W_\psi$ 는 기본 웨이브렛 (basic wavelet)  $\Psi$ 에 관한 IWT(integral wavelet transform)이다.

WT의 역변환이 존재하기 위해선 다음의 조건이 성립하여야 한다.

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\widehat{\Psi}(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty$$

이 조건은 허용(admissibility)조건으로, 모든 웨이브렛 함수는 이 조건을 만족해야 하며, square-integrable한 함수에서 이 조건은 웨이브렛 함수의 평균값이 0 임을 의미한다.

### 2.2 분해알고리즘

$$\phi(2x-l) = \sum_k [a_{l-2k} \phi(x-k) + b_{l-2k} \Psi(x-k)]$$

$k, l \in Z$   $\phi$ : scaling function,  $Z$ :정수 (1)

$$f_j(x) = \sum_k C_k^j \phi(2^j x - k),$$

$$C^j = \{C_k^j\} \in l^2$$

$$g_j(x) = \sum_k d_k^j \Psi(2^j x - k),$$

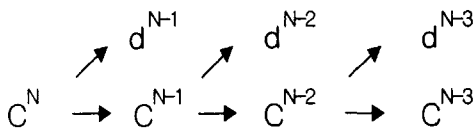
$$d^j = \{d_k^j\} \in l^2$$

(1),(2),(3)을 적용하면

$$C_k^{j-1} = \sum_l a_{l-2k} C_l^j, \quad d_k^{j-1} = \sum_l b_{l-2k} C_l^j$$

로 된다.

이를 도시하면 다음과 같다.



분해수열( $\{a_k\}, \{b_k\}$ )을 가중치로 한 이동평균 scheme에 의하여 수열  $C^{j-1}, d^{j-1}$ 이  $C^j$ 로부터 구해진다.

### 2.3 재구성 알고리즘

$$\phi(x) = \sum_k p_k \phi(2x-k)$$

$$\Psi(x) = \sum_k q_k \phi(2x-k) \quad x \in R$$

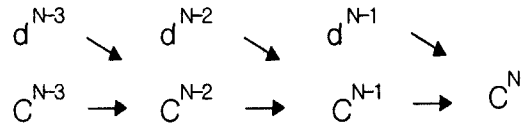
$$f_j(x) = \sum_k C_k^j \phi(2^j x - k), \quad C^j = \{C_k^j\} \in l^2$$

$$g_j(x) = \sum_k d_k^j \Psi(2^j x - k), \quad d^j = \{d_k^j\} \in l^2$$

(4),(5)의 two-scale 관계와 (6),(7)을 적용하며

$$C_k^j = \sum_l [p_{k-2l} C_l^{j-1} + q_{k-2l} d_l^{j-1}]$$

로 된다. 이를 도시하면 다음과 같다.



$C^j$ 는 재구성 수열( $\{p_k\}, \{q_k\}$ )을 가중치로 한 2개의 이동평균을 이용하여  $C^{j-1}, d^{j-1}$ 로부터 결정되어진다.

### 3. 실험장치 및 방법

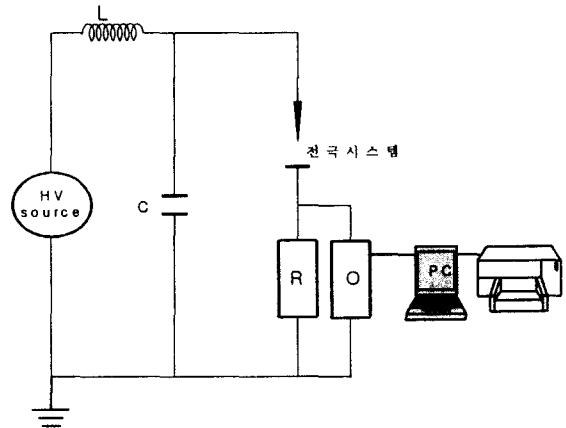


그림 1 실험 회로도

Fig. 1 Experimental setup diagram

그림 1은 방전펄스 전류를 측정하기 위해 사용한 실험회로도이다. 본 회로도는 다음과 같이 구성되어 있다. 전압원으로서 교류고전압 발생장치 (입력 :AC 220[V]1 $\phi$ , 60[Hz], 출력 :AC 30[kV], Pultec Electronics Co. Ltd.), 전극 시스템 (침대 평판전극, gap: 5[mm], 침판 각도: 60 $^\circ$ , 평판전극 직경: 45[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.

전극시스템에 전압의 인가속도는 0.1[kV/sec]로 하여 전압을 인가하여 부분 방전 측정시스템인 Corona Detecting Apparatus System(이하CDAS)의 방전 오실로그래상에 부분 방전이 발생하는 순간을 방전개시전압(corona onset voltage:  $V_{co}$ )으로 하여 이때의 무유도 저항 양단의 전압파형을 측정 후 웨이브렛 변환을 이용하여 방전펄스 신호를 분할·재구성하였다. 모웨이브렛(mother wavelet)의 선정에는 여러 종류의 모웨이브렛중 방전펄스 신호의 분석에 사용된 모웨이브렛(mother wavelet)은 'Daubechies family'를 이

용하였다. PD신호를 여러 형태의 고역 필터 성분들로 나누기 위해서 웨이브렛 필터 뱅크를 사용하여 세단계의 주파수 대역별(Fs/2, Fs/4, Fs/8)로 나누어서 분할처리 하였다. 즉 이산 웨이브렛 변환(Discrete Wavelet Transform: DWT)을 이용하여 PD신호를 저역통과 필터를 통과한 신호(A1, A2, A3)와 고역통과필터를 통과한 신호(D1, D2, D3)로 분할하였다. 저역통과 필터를 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 고역통과필터를 통과한 신호는 low-scale로 고주파 성분이며 PD신호의 미세한 특성을 나타내며 신호분석에 있어서 중요한 정보를 제공하여 준다. 웨이브렛 변환에서는 이를 'detail'로 칭한다.

방전개시전압 이후 전압을 서서히 높여 5[kV]전압인가시의 방전펄스 파형에 대하여도 웨이브렛 변환에 의한 분석을 실시하였다.

4. 결과 및 검토

그림 2는 침대 평판전극에 교류고전압을 0.1[kV/sec]의 속도로 서서히 인가할 때 전극시스템에서의 부분방전이 인가전압의 부의 위상영역 270[°]부근에서 발생하여 CDAS 오실로그램상 단펄스가 나타날 때 오실로스코프의 sampling frequency(Fs)를 500[MHz]로 설정하여 무유도 저항 R양단에 인가되는 방전펄스의 파형이다.

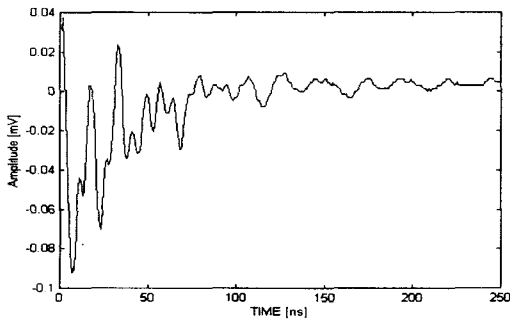
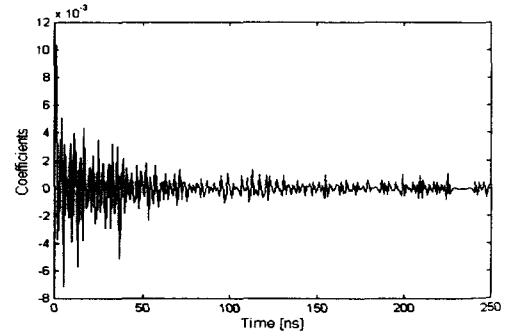


그림 2 3[kV]인가시의 방전펄스전압파형  
Fig. 2 Discharge pulse voltage waveform with 3[kV]

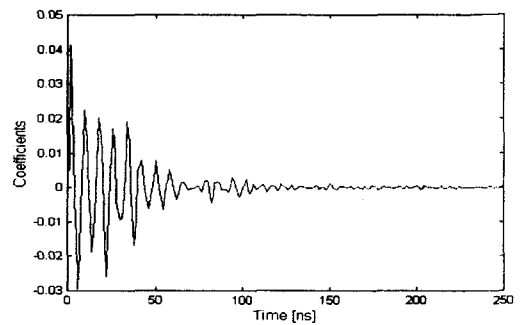
불평등전계의 대표적 구성인 침대평판에서 침단의 전극에 전압인가에 의해 전계가 집중되고 corona의 발생공간은 부분적 이온화에 기인하여 공기의 전기 전도도가 증가한다.

공기중의 양이온과 전자의 수는 이온화와 재결합으로 인하여 그 수가 일정하게 동적 평형을 이루게 된다. 하지만 외부의 작용 즉 전압인가 등에 의해 분자들이 에너지를 얻게 되면, 분자는 전자를 방출하고 양이온화된다. 전자의 이동속도는 양이온보다 상대적으로 빠르므로 공기중의 양이온 수는 증가하게 된다. 분자들이 에너지를 얻는 과정에는 전자충돌, 충돌전자로 인한 원자의 여기상태에서 나오는 광자에 의한 방법, 이온전자 재결합에서 나오는 광자, 양이온의 운동전자 포획, 준안정에 의한 이온화 과정등이 있지만, 일

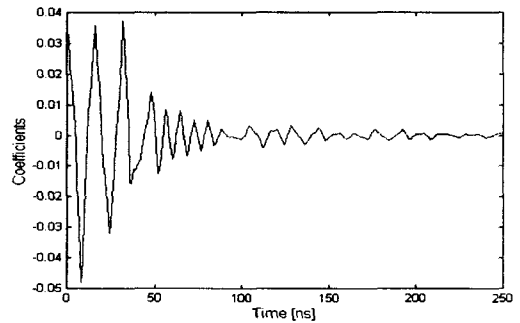
단 전자가 전계에 의해 강한 힘을 받아 전계방향으로 가속되면 전자충돌에 의한 이온화가 방전현상을 주도하였다.



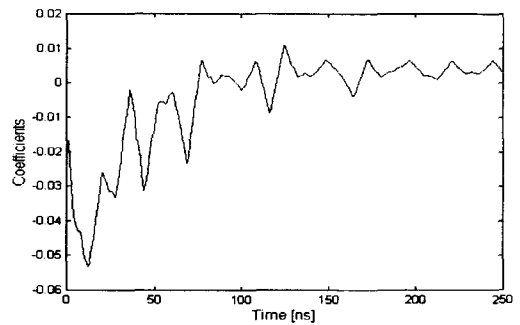
D1



D2



D3



A3

그림 3 3[kV]인가시의 wavelet변환 파형  
Fig. 3 Wavelet transform waveform with 3[kV]

그림 3은 측정회로인 무유도저항 50[Ω]양단에 인가되는 방전펄스파형인 그림 2를 모웨이브렛으로 'Daubechies'를 선정하여 웨이브렛 필터뱅크로 분해(decomposition)하여 재구성(reconstruct)한 것이다.

PD신호를 이산 웨이브렛을 수행하여 저역통과필터를 통과한 신호(A1)과 고역통과필터를 통과한 신호(D1)로 나누고, A1을 다시 두 개의 저역필터(A2)와 고역필터(D2)로 분해하고, 이 저역필터를 통과한 신호를 또 다시 두개의 저역필터(A3)와 고역필터(D3)로 분해하였다. 이와 같이 고역통과필터 D1, D2, D3신호, 저역통과필터를 통과한 A1, A2, A3신호로 나눈 후 그중 고역통과필터를 통과한 D1, D2, D3와 저역통과필터를 통과한 A3신호를 재구성하여 나타낸 것이다. 저역통과필터 신호중 A3만을 나타낸 것은 신호의 저주파 성분은 신호의 고유한 특성만을 나타내기 때문으로 단지 신호의 경향만을 보여주기 때문이다.

무유도 저항 양단에 인가된 방전펄스전압 신호에 대한 wavelet 변환을 통해 그 성분을 나타내므로 노이즈 신호와 구별할 수 있음을 보여 준다.

PD신호는 D1+D2+D3+A3로 재구성될수 있으므로 각 성분의 정보는 다음과 같다. D1의 최대치는 0.01034, 최소치는 -0.0071이다. 시간에 대한 각 펄스신호의 정점간 폭을 시간폭으로 정의하면 이들 신호의 평균시간폭은 2.67[ns]이다.

고역통과필터를 통과한 D2, D3의 신호로 방전펄스가 감쇄진동적이라는 것을 잘 보여주고 있으며, 감쇄진동의 한 펄스당 시간폭은 D2에서는 7.98[ns], D3에서는 16.02[ns]이고, 펄스의 최대치는 D2에서 0.04132, 최소치는 -0.0295이고 D3에서의 최대치는 0.03744, 최소치는 -0.04809이다.

충돌전리작용으로 생성된 전자사태 선단에 있던 전자가 gap을 건너 양극에 흡수되는 시간을 결정짓는 rising time은 측정회로에 따라 의존하지만 본 실험에 사용된 무유도 저항 50[Ω]의 측정회로에서는 4.48[ns]이다.

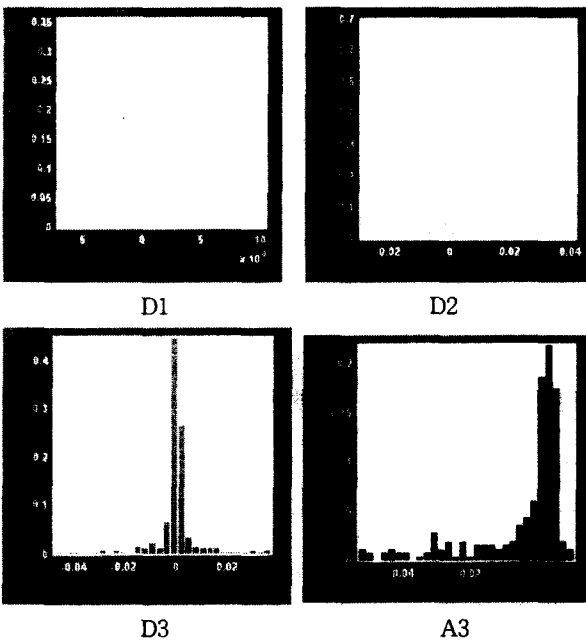


그림 4 3[kV]인가시 Coefficients에 대한 발생빈도  
Fig. 4 Frequency-distribution diagram for coefficient with 3[kV]

그림 4는 단순히 그림 3의 고역통과필터를 통과한 신호 D1, D2, D3와 저역통과필터를 통과한 신호A3의 계수(크기)에 대한 발생빈도를 나타낸 것이다.

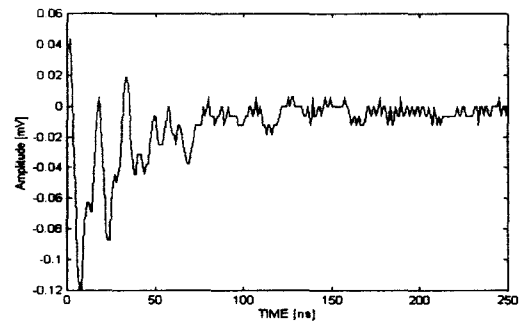
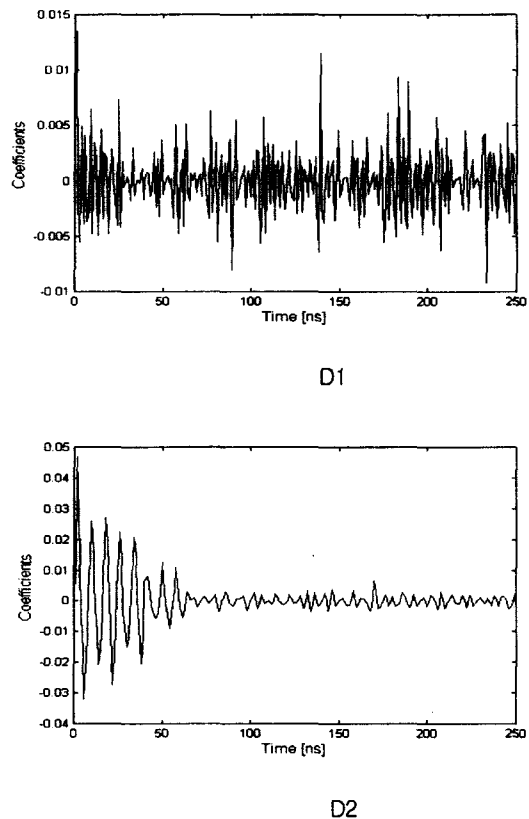


그림 5 5.0[kV]의 방전펄스전압파형  
Fig. 5 Discharge pulse voltage waveform with 5[kV]

그림 5는 침대 평판전극에서 부분방전이 개시된 이후 전압을 더욱 상승시켜 5[kV]인가시의 방전펄스전압 파형을 나타내었다. 방전펄스의 진폭이 전압상승에 따라 미소하게 증가하였으나 그 차이는 미미하다. 실제적으로 참고문헌 [1]에서나 실험적으로보면 코로나 방전에 있어서 방전이 개시된 후 인가전압의 상승과 더불어 방전펄스의 수는 증가하나 방전의 크기는 비슷하다.



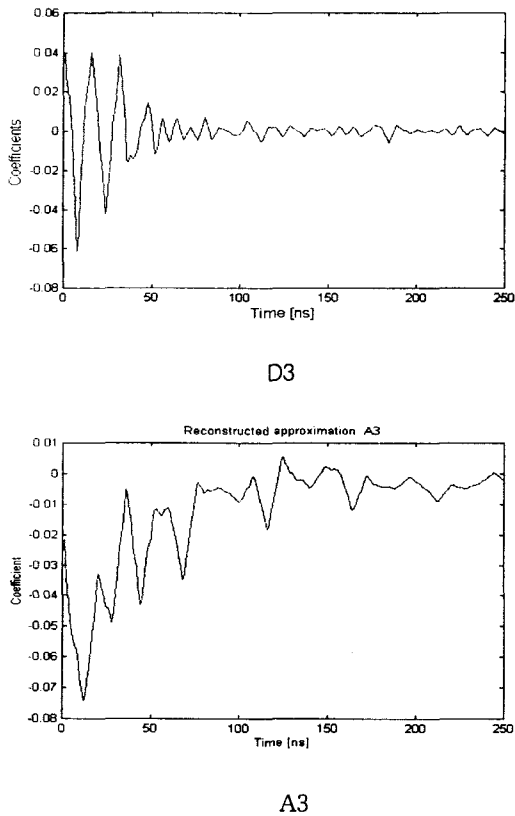


그림 6 5[kV]인가시의 wavelet변환 파형  
Fig. 6 Wavelet transform waveform with 5[kV]

그림 6은 측정회로인 무유도저항 50[Ω]양단에 인가되는 방전펄스파형인 그림 5를 모웨이브렛으로 'Daubechies'를 선정하여 웨이브렛 필터뱅크로 분해(decomposition)하여 재구성(reconstructure)한 것이다.

즉 PD신호를 이산 웨이브렛을 수행하여 저역통과필터를 통과한 신호(A1)과 고역통과필터를 통과한 신호(D1)로 나누고, A1을 다시 두 개의 저역필터(A2)와 고역필터(D2)로 분해하고, 이 저역필터를 통과한 신호를 또 다시 두 개의 저역필터(A3)와 고역필터(D3)로 분해하였다. 고역통과필터를 통과한 D1,D2,D3와 저역통과필터를 통과한 신호중 A3를 재구성하여 나타내었다.

고역통과필터를 통과한 D1의 신호는 인가전압 상승에 따라 방전펄스에 상당한 노이즈 성분이 포함되어 있음을 보여주고 있으며, 인가전압 3[kV]일 때보다 시간영역 전역으로 노이즈가 상당히 포함되어 있음을 알 수 있다. 또한, 신호의 크기도 커짐을 알 수 있다. D1의 최대치는 0.0135, 최소치는 -0.00917이고, 이들 신호의 평균시간폭은 2.70[ns]이다.

고역통과필터를 통과한 D2, D3의 신호로 방전펄스가 감쇄진동적이라는 것을 잘 보여주고 있으며, 감쇄진동의 한 펄스당 시간폭은 D2에서는 7.80[ns], D3에서는 15.72[ns]이고, 펄스의 최대치는 D2에서 0.04672, 최소치는 -0.03221이고 D3에서의 최대치는 0.04025, 최소치는 -0.06098이다.

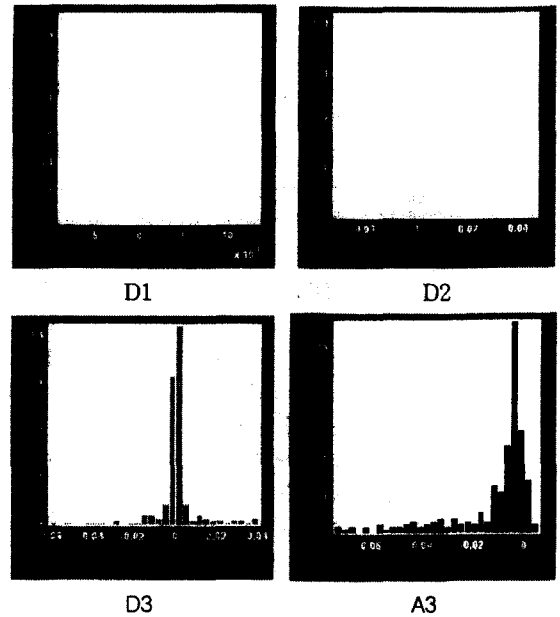


그림 7 5.0[kV]인가시의 각 coefficient에 대한 발생빈도  
Fig. 7 Frequency-distribution diagram for coefficient with 5[kV]

그림 7은 단순히 그림 6의 고역통과필터를 통과한 신호 D1, D2, D3와 저역통과필터를 통과한 신호A3의 계수(크기)에 대한 발생빈도를 차트로 나타낸 것이다.

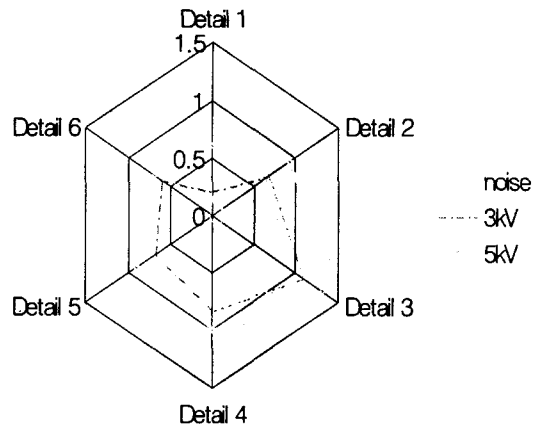


그림 8 Detail 성분 계수 합의 변화 비교  
Fig. 8 Variation of sum-coefficient of detail for noise and applied voltage

그림 8은 잡음과 부분방전 신호의 구분을 위한 특징을 추출하기 위해 잡음신호와 방전신호에 대하여 웨이브렛 변환을 적용한 후 정량화 된 값에 대하여 벡터노름을 한 것이다. 그림 8에는 스케일을 확장하여 6단계의 분해과정에 대한 것을 나타내었다. 이는 고역통과필터를 통과한 신호의 면적을 나타내는 것으로 스케일을 증가함에 따라 잡음과 방전신호와의 구별이 명확해지고, 전압의 증가에 따라 그 면적이 증가함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

비주기적이고 일시적인 시간영역을 갖으며, 주변잡음에 대하여 상당한 영향을 받는 부분방전 신호를 정량적으로 해석하기 위해 전기적 방법으로 측정된 방전펄스 신호를 웨이브렛 변환을 이용해 부분방전 신호를 분석한 결과 전 시간대역에 걸쳐 노이즈 성분이 포함되어 있으며, 인가전압의 증가에 따라 전 시간대역에 걸쳐 심하게 나타났다. 부분방전 신호를 웨이브렛 변환에 의해 분해 및 재구성함으로써 방전 신호의 모니터링시 허위 경보를 줄일 수 있을 것으로 판단되며, 방전펄스 신호는 감쇄진동적이라는 것을 알 수 있었다. 방전펄스의 rising time은 4.5[ns]정도이며, 인가전압 상승에 따라 펄스의 진폭이 방전펄스 전 시간대역에서 증가함을 알 수 있었다. 방전 신호 정량화를 위한 각 주파수대역의 추출된 특징값의 벡터노름 결과 잡음과 방전신호와의 구별이 명확해지고, 그 면적이 증가 함을 알 수 있었다.

향후 이들 데이터를 기본으로 부분방전 종류에 대한 데이터베이스 작업을 구축하고, 발생빈도를 확률적으로 나타내므로 절연진단 및 평가자료로서의 유용성이 기대된다.

## [Reference]

- [1] F.H Kreuger, Partial Discharge Detection in HV Equipment, 1969, Heywood London, 1989, Butterworths, London.
- [2] Kopf U, Feser K, "Rejection of Narrow-band Noise and Repetitive Pulses in On-site PD measurement", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.30, No 6, 1995.
- [3] E. Gulski and F.H Kreuger. "Computer aided recognition of discharge sources", IEEE Trans. on Elect. Insul. Vol.27, pp 82~92, 1992.
- [4] N.Hozumi, T.Okamoto and T.Imajo, "Discrimination of Partial Discharge Pattern using a Neural Network", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.27, pp550~556, 1992.
- [5] B.Fruth and L.Niemeyer, "The Importance of Statistical Characteristics of Partial Discharge Data", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.27, pp60~69, 1992.
- [6] 中村光一外3人."超音波法による油入變壓器の放電占標定に関する實驗的檢討", 電學論 B, 116券 10号, pp 1285~1291, 平成8年.
- [7] R.Mangeret, J.Farenc, Bui Ai, "Optical Detection of Partial Discharge using Fluorescent Fiber", IEEE. EI-26, No.4, pp783~789, August 1991.
- [8] Jen-shin Chang, "Electromagnetic Emission from Atmospheric Pressure Gas Discharge", IEICE Trans, Comun. Vol.E79-B, No.4 pp447~456, April 1996.
- [9] Charles K.Chui, An Introduction to Wavelets, 1992

## 저 자 소 개



이 현 동 (李 炫 東)

1970년 6월 13일생. 1993년 영남대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 영남이공대전자과 겸임교수  
Tel : 053-810-1513, Fax : 053-813-8230

E-mail : leeeum@orgio.net



김 충 년 (金 忠 年)

1966년 6월 16일생. 1992년 영남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995~1998년 대우중공업(주) 우주항공연구소 주임연구원. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 053-810-1513, Fax : 053-813-8230

E-mail : kchn0512@dreamwiz.com



박 광 서 (朴 光 緒)

1970년 3월 23일생. 1997년 영남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 053-810-1513, Fax : 053-813-8230

E-mail:a9714704@chunma.yeungnam.ac.kr

이 광 식 (李 廣 植)

2000년 7월 49c권 7호 참조

이 동 인 (李 東 仁)

2000년 7월 49c권 7호 참조