

# 웨이블릿 변환을 이용한 부분 방전 신호 분석 An Analysis of Partial Discharge signal Using Wavelet Transforms

Jae-Jun Park\*, Jin-Kang Jang\*\*, Sung-Hong Kim\*\*\*, Jong-Tak Shim\*\*, Jae-Hwan Kim\*\*  
박재준\*, 장진강\*\*, 임윤석\*\*, 심종탁\*\*, 김재환\*\*

\* Dept. of Computer Science, JoongBu Univ., Majon-Ri, Chuboo-Meon, Kum San Gun, Chung Nam, Korea

\* 충청남도 금산군 추부면 마전리 산 2-25, 중부대학교 컴퓨터 과학부

\*\* Dept. of Electrical Engineering Kwangwoon Univ., 447-1, Wolgye-dong, Nowon-ku, Seoul, Korea

\*\* 서울시 노원구 월계동 447-1번지 광운대학교 전기공학과

\*\*\* Electrical Facilities, Suncheon Chongam College, Deckweol-Dong, Suncheon, Chonnam, Korea

\*\*\* 전남 순천시 덕월동 224-9번지, 순천침암대학 전기설비과

### ABSTRACT

Recently, the wavelet transform has been a new and powerful tool for signal processing. It is more suitable specially for the feature extraction and detection of non-stationary signals than traditional methods such as, the Fourier Transform(FT), the Fast Fourier Transform(FFT) and the Least Square Method etc. because of the characteristic of the multi-scale analysis and time-frequency domain localization. The wavelet transform has been developed for the analysis of PD pulse signal to raise in the progress of insulation degradation. In this paper, the wavelet transform was applied to one foundational method for feature extraction. For the obtain experimental data, a computer-aided partial discharge measurement system with a single acoustic sensor was used. If we are applying to the neural network method the accumulated data through the extracted feature, it is expected that we can detect the PD pulse signal in the insulation materials on the on-line.

**Key words(중요 용어) :** Partial discharge, Wavelet transforms, feature extraction

### I. 서 론

최근에 기기의 고압, 대용량화 됨으로서 절연의 중요성이 높아져 가고 있으며, 이로 인해 고전압 장치의 절연성능을 시험, 진단하기 위한 다양한 분석 기법들이 소개되고 있다. 더우기 절연 성능을 저하시키는 부분 방전 메커니즘을 해석함에 있어서는 고전적 추정 방법인 위상각에 따른  $\phi$ -q-n 파라미터를 이용한 통계적인 기법들이 널리 사용되어 왔다.[2]-[4] 그러나, 본 연구에서는 이러한 통계적인 기법과는 달리 부분 방전 발생 신호의 시간-주파수 특성을 분석할 수 있는 새로운 기법을 이용하여, 시간에 따른 절연체의 열화를 해석할 수 있는 기술에 관하여 검토하려한다. 이를 위해, 신호처리분야에서 널리 사용되는 주파수-크기 분석법인 FFT 스펙트럼 해석이 아닌 시간 흐름에 따른 주파수 분석이 가능한 웨이블릿 기법을 이용하여 연구하기로 한다.

### II. 실험 장치 및 방법

음향방출 시스템을 이용한 부분방전 검출 복합시스템을 사용하여 분석하려는 부분방전 신호를 검출

하였다.[1] 시료에 가해지는 전압은 110V 상용전압을 승압시켜 15[kV]로 유지하고, 실험에 사용된 시료는 전력용 케이블 재료로 많이 쓰이고 있는 가교 폴리에틸렌(XLPE)으로 제작하였으며, 1.5[mm]의 간극을 갖는 침대-평판 전극 구조를 구성하였다.

음향 방출 신호를 얻기 위하여 하부전극에는 250kHz~600kHz 대역의 출력을 갖고, 최대 공진 주파수가 500kHz대역인 음향 센서를 사용하였으며, 평판 전극 아래 10 [mm]되는 위치에 설치하였다. 또한 센서에 연결된 증폭기(pre-amp)는 센서의 공진 주파수에 맞춰 설계된 것으로서 100[kHz]-1[MHz] 대역에서 최대 공진 주파수를 갖는다. 센서로부터 출력된 신호는 디지털 오실로스코프를 거치면서 일정한 시간 간격으로 샘플링되어 인터페이스카드를 거쳐 컴퓨터에 저장된다. 디지털 오실로스코프의 샘플링 주파수( $f_s$ )는 각각 50, 25, 10MS/s 로 나누어 설정한다. 이는 음향센서의 최대 출력 주파수의 2배를 훨씬 초과하는 샘플링 비율로서 나이퀴스트 이론에 위배되지 않는 샘플링 주파수이다. 연속적으로 부분방전 신호를 감지하는 것은 오실로스코프를 통해 측정된 신호가 너무 방대한 데이터(125,000pt/1

detect)이기 때문에 해석하기에 곤란하다. 이에 AC 전압이 인가된 후 일정한 시간 간격을 가지고 오실로스코프를 통해 획득된 데이터가 컴퓨터로 전송되고(5분 간격) 이 저장된 신호를 일정한 간격으로 구획 분할한 후, FFT, STFT 기법등을 이용하여 분석한 후, 비주기적 신호를 분석하는데 새롭게 적용되는 방법인 웨이블릿 기법을 적용하였다. 먼저 획득 신호와 유사성이 높은 웨이블릿 원형 함수를 설정하고 원신호와 마더 웨이블릿을 비교하여 그 유사성을 측정하고, 이를 바탕으로 특징을 추출하였다.

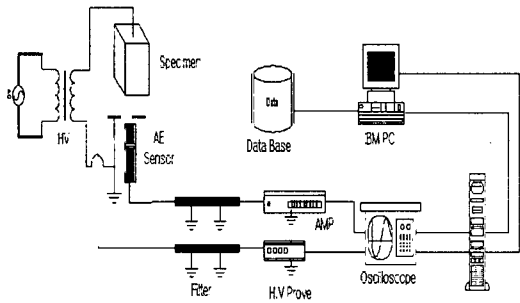


그림. 1. 실험장치 블록선도  
Fig. 1. Block Diagram of Experimental Device

### III. 웨이블릿 변환 이론

신호 해석의 목적은 신호의 변환에 의해 임의의 신호로부터 관련 정보를 얻어내는데 있다. 일부 신호 해석 방법은 해석을 위해서 일정한 가정을 해야 하며, 이것이 정확한 결과를 낸다고 하더라도 일반적으로 사용하기에는 곤란할 경우가 있다. 이 경우 일반적으로 적용 가능한 시험 방법이 필요하며, 해석 신호의 역변환도 고려하여야 한다. 지금까지 정상 신호를 변환하기 위한 방법으로 Fourier 변환이 많이 사용되어 왔다. 이 방법은 무한 주기의 정현파 기저 함수로부터 신호의 수직적 투영 즉 내적을 계산하는 방법이다. 이 방법은 신호가 정상성분을 가지고 있다면 해석은 용이하다. 그러나 아주 짧은 주기를 가지면서 급격히 변화는 비주기 신호에서는 전체 주파수축에 대하여 넓게 퍼지는 양상을 보이게 된다.

정현파가 아닌 신호에 대하여 해석하는 방법으로 시간-주파수의 2차원적 함수로 분석하는 Short time Fourier Tr. 해석 방법이 Gabor에 의해서 나오게 되었다. 이는 신호를 일정한 크기의 해석 윈도우를 사용하여 윈도우의 크기에 따라 결정되는 극히 제한되는 제한된 범위에 대한 정보만을 제공하고, 빠른 과도 현상이 일어나는 신호에 대해서는 정확한 분석이 이루어지기 어렵다. 이에 가변적인 윈도우를 얻을 수 있는 방법인 웨이블릿 변환이 사용되게 되었다. [5],[13]

#### III. 1 마더 웨이블릿

웨이블릿 변환(Wavelet Tr.)은 원형함수를 시간

에 따라 scaling과 shift를 통해 원신호와의 비교가 이루어지고, 그 유사성이 계수값의 크기로 표현되며 신호를 재구성하는 기법이다. 이 방법은 STFT가 일정한 윈도우를 취하므로 나타나는 분해능의 한계를 극복할 수 있게 해준다.

마더 웨이블릿  $\Psi(t)$ 는 짧고 진동하는 함수로서 평균값이 0이고 양쪽 끝에서 급격하게 감쇄하는 형태를 갖는다. 웨이블릿은 마더 웨이블릿  $\Psi(t)$ 를 scaling과 shift 시켜 얻어진 함수들의 집합  $\Psi_{a,b}(t)$ 이며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

여기서, a: scaling factor, b: shift factor 이다. 웨이블릿의 기저들은 모웨이블릿  $\Psi(t)$ 의 스케일링 및 병진하므로 얻어지며, 다음 두 가지 허용 조건(admissibility condition)을 만족하여야 한다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\Psi(t)| = 0 \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

또한, scaling 함수의 적분값은 아래의 식을 만족하게 된다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 1 \quad (4)$$

결국, 웨이블릿 변환식은 다음 식과 같이 표현된다.

$$W_{\Psi} f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int f(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

#### III. 2 이산 웨이블릿(Discrete Wavelet Tr.)

이산 웨이블릿 변환은 식(5)의 변환식에서 a, b 인자를 이산치로 나타냄으로써 이루어진다. 이산 웨이블릿 함수는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi_{2^j}(t) = 2^j \Psi(2^j t) \quad (j=0, -1, -2, -3, \dots) \quad (6)$$

여기서, j는 scaling 지수를 의미하며, 시간 t에서의 크기 인자  $2^j$  을 사용하였을 때, 입력  $x(t)$ 에 대한 웨이블릿 변환은 다음과 같이 표현된다.

$$d_{2^j} = D_{2^j}[x(t)] = x(t) * \Psi_{2^j}(t) \quad (7)$$

여기에서,  $D_{2^j}[x(t)]$ 는  $2^j$ 의 웨이블릿 변환 연산자를 나타낸다. 결국 웨이블릿 계수  $d_{2^j}$ 는 주어진 신호  $x(t)$ 와 이산 웨이블릿 함수  $\Psi_{2^j}(t)$ 의 상승 적분에 의해 구해지게 된다.

#### III. 3 다중 해상도 웨이블릿 변환.

이산 웨이블릿의 확장으로 직교벡터공간에서 웨이블릿 함수를 변화시킴에 따라서 다양한 크기의 해상도로 신호  $x(t)$ 에 포함되어 있는 성분들을 분석할 수 있게 된다. 이를 위해 다중 해상도 신호 분할 알고리즘이 소개되었으며, 이는 신호성분을 단계별로 더욱 세밀하게 표현하는 웨이블릿을 만들어서 적용하는 과정을 거치게 된다. 다시 말해  $2^j$ 만큼 확

장된 식 (6)에 있는 이산 웨이블릿 함수  $\psi_2(t)$ 를 시간축에 대해  $2^{-j}n$  천이시키고,  $\sqrt{2^{-j}}$ 로 정규화 함으로써,

$$\sqrt{2^{-j}}\psi_2(t-2^{-j}n) \quad (8)$$

의 정규직교 웨이블릿이 구성된다. 다중 해상도 웨이블릿 변환 (multiresolution wavelet transform)은 웨이블릿 함수를 정규 직교기저에서 적용함으로써 주어진 신호의 특성을 분해하여 나타내는 알고리즘이라 할 수 있다.  $j$ 를 0에서  $-j$ 까지 적용하여, 해석하고자 하는 신호의 approximation 성분  $A(j)$ 와 detail 성분  $D(j)$ 로 나누어 나가는 것이다. 이 분해 과정은 원신호  $S$ 를 각각 고차, 저차 필터로 분해하는 과정과 같다. 이는 다음과 같이 재구성되어진다.

$$S = cD_1 + cD_2 + cD_3 + \dots + cD_n + cA_n \quad (9)$$

이산 웨이블릿 변환은 아래의 계산 과정을 반복하면서 수행되게 된다. 우선 정규 직교의 경우에 scaling 함수와 웨이블릿 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi(n) = \sum_{k=0}^N g(k)\psi(2n-k) \quad (10)$$

$$\psi(n) = \sum_{k=0}^N h(k)\psi(2n-k) \quad (11)$$

여기에서,  $g(n)$ 과  $h(n)$ 은 각각 scaling과 웨이블릿 필터 계수를 나타낸다. 이때 주어진 이산 신호  $x(n)$ 을  $j=0$ 일때의 scaling 함수에 적용하면

$$x(n) = \sum_{k=0}^N a^k\psi(n-k) \quad (12)$$

가 되고, 식(12)의  $x(n)$ 을  $j=1$ 인 경우에 적용하면,  $x(n) = A_2[x(n)] + D_2[x(n)]$ 으로 표현된다.  $A_2[x(n)]$ ,  $D_2[x(n)]$ 은 각각  $j=1$ 일 때의 approximation, detail 성분을 나타낸다.

$A_2[x(n)]$ ,  $D_2[x(n)]$  성분을 수식으로 전개하면 다음과 같다.

$$A_2[x(n)] = \sum_{k=0}^N a_2(k)\psi_2(n-2k) \quad (13)$$

$$D_2[x(n)] = \sum_{k=0}^N d_2(k)\psi_2(n-2k)$$

분해능인  $j$ 값의 변화에 따른 신호  $x(n)$ 의 분해과정은 보통  $j = \log_2 N$ (여기서,  $N$ 은  $x(n)$ 의 데이터 수)일 때까지 반복되며,

$$\begin{aligned} A_{2^{j-1}}[x(n)] &= A_2[x(n)] + D_2[x(n)] \\ &= \sum_{k=0}^N a_2(k)\psi_2(n-2^j k) \\ &+ \sum_{k=0}^N d_2(k)\psi_2(n-2^j k) \end{aligned} \quad (14)$$

로 나타낼 수 있다. 위 수식에 대한 더 자세한 설명은 다음을 참고하기 바란다. [5]-[9],[10]-[11]

#### IV. 부분 방전 신호에 웨이블릿 변환 적용

##### IV.1 웨이블릿 기법의 적용

웨이블릿을 부분 방전 해석에 적용하기 위해 'Meyer', 'Morlet', 'Daubechies', 'Mexican Hat' 등의 여러 원형 웨이블릿 함수 중에서 'Daubechies' 함수를 선택하였고, 이를 6-level의 분해 과정을 거치면서 'db4'-'db12' 까지 차례대로 수행하였다.[12],[14],[15]

##### IV.2 웨이블릿 변환을 이용한 특징 벡터 추출

'db12' 변환에 따른 특징 추출(feature extraction)을 위해 신호 S에 웨이블릿 기법을 적용한 후, 윈도우를 5 segment(4ms/1seg)분할하였으며, 이후 변환에 의해 구해진 정량화된 값에 절대값을 취하고, 각 구획에 대한 합을 구하였다. 이는 각 구획내의 면적을 나타내는 것이다. 여기서는 Detail-6의 값을 기준으로 시간에 따른 각 구획내 합의 결과를 관찰하였다. (20분 간격으로 적용)

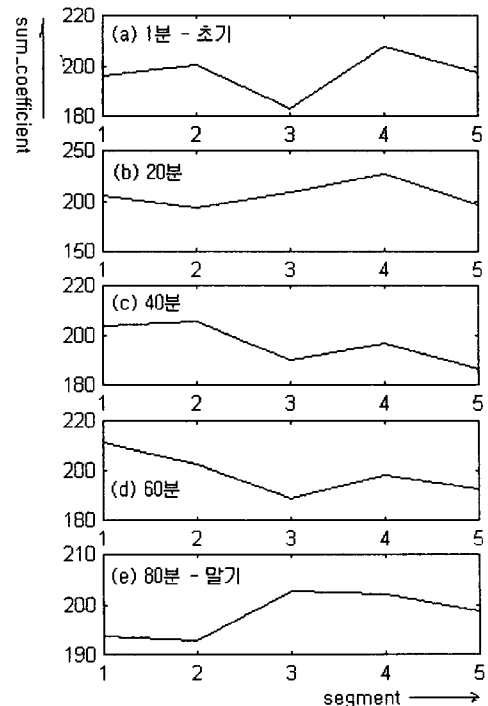


그림. 2. 구획에 따른 계수합의 변화

Fig 2. Variation of sum\_segment on the segment (Detail 6-level)

#### IV. 결 론

본 논문에서는 time scaling과 shift의 변화를 통해 원형 함수와 원신호와의 유사성을 비교 및 다중 분해할 수 있는 방법을 부분 방전 신호에 적용하여 보았다. 먼저 여러 원형함수와 부분 방전 신호와의 유사성을 확인하였으며, 그중 최적의 계수값을 나타내는 함수인 'db12' 웨이블릿을 선정하였다. 이는 급격히 순간적으로 변화하는 비주기적인 부분 방전 신호를 해석하는데 적합한 것이었으며, 특히 기본 잡음 파형 속에서 방전 신호의 정량화된 계수값을 나타내는 역할을 하였다. 변환으로부터 얻어진 계수값을 특징 벡터로 사용하기 위해 윈도우를 일정한 시간으로 구획 분할하였으며, 각 구획 영역내의 계수들의 합을 산출하였다. 이는 구획 영역(segment area)의 면적을 나타내는 것이라 할 수 있다. 이들 벡터값은 절연물의 열화 과정 동안 말기로 갈수록 적어지는 양상을 볼 수 있었다.

이 논문에서는 통계적으로 신호를 처리하는 기법을 사용하지 않았다. 그래서 앞으로 더 많은 특징 벡터의 추출과 이들을 통계적으로 처리하는 방법을 연구해야 할 것이며, 더 많이 획득된 데이터를 이용하여 데이터 베이스를 구축하고, 이를 하드웨어로 구현하므로 온라인 절연 진단이 가능하게 하는 일이 남아 있다 하겠다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국전력공사 지원에 의하여 기초전력 공동연구소 주관(관리번호 98-281)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

[1] Sung-Hong Kim et al, "A life prediction of insulation degradation using computer system", ICEE'98, Proceedings, Vol. 2, 869-872, 1998.

[2] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer aided recognition of discharge sources", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. 27, 82-92, 1992.

[3] R. E. James and B. T. Phung, "Development of computer-based measurements and their application to PD Pattern analysis", IEEE Trans. Die. and Elect. Insul. Vol. 2, 838-856, 1995.

[4] A. Krivda, "Automated Recognition of Partial Discharges", IEEE Trans. Die. and Elect. Insul. Vol. 2, 796-821, 1995.

[5] Stephane G. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation", IEEE Trans. on Pattern Recognition and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 7, pp. 674-693, July 1989.

[6] C. Sidney Burrus and Ramesh A. Gopinath and Haitao Guo, "Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms : A Primer", Prentice-Hall, 1997.

[7] Gerald Kaiser, "A Friendly Guide to Wavelets", Springer-Verlag, 1994.

[8] Charles K. Chui, "An Introduction to Wavelets", Academic Pr., 1992.

[9] Stephane G. Mallat, "A Wavelet Tour of Signal Processing", Academic Pr., 1998.

[10] Stephane Mallat and Wen Liang Hwang, "Singularity Detection and Processing with Wavelets", IEEE Trans. on Information Theory, Vol. 38, No. 2, pp. 617-643, March 1992.

[11] Xiang-Gen Xia AND Zhang, "On Sampling Theorem, Wavelets, and Wavelet Transforms", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol 41, No. 12, pp. 3524-3535, March 1992.

[12] Yusheng Quan, Ning Gao, GuanJun Zhang, Zhang Yan, "Wavelet Transform Applying in Partial Discharge Measurement", Conference of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998.

[13] Vetterli M., and C. Herley, "Wavelets and Filter Banks : Theory and Design", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 40, No. 9, pp. 2207-2232, Sept 1992.

[14] M. Misiti, G. Oppenheim, "Wavelet TOOLBOX", The MATH Works Inc.

[15] M. Mukai, T. Okano, et. al., "Study on Degradation Diagnosis of Partial Discharge in a Void by Wavelet Analysis", International Symposium on Electrical Insulating Materials, 1995