

웨이블렛 변환을 이용한 전력시스템 고장전류의 판별

(Faults Current Discrimination of Power System Using Wavelet Transform)

이준탁* · 정종원

(Joon-Tark Lee · Jong-Won Jeong)

요약

Wavelet 변환은 신호를 분석하고 해석하는데 효과적인 수학적 도구로 알려져 여러 응용분야에서 다양한 연구가 진행되고 있다. Wavelet 변환은 Fourier 변환과 유사한 측면도 있으나, Fourier 변환과는 달리 다양한 Wavelet 모함수를 사용함으로써 해석 속도가 빠르고, 시간 - 주파수 영역에서 국재화가 가능하다는 특징을 가지고 있을뿐만 아니라 고주파 성분에 대해선 시간 분해능이 높고, 저주파 성분에 대해선 주파수 분해능이 좋다는 장점을 가지고 있으므로, 전력계통의 다양한 고장 전류의 판별에 적극 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

본 논문에서는 고장 전류의 특성을 해석하는데 용이한 복소형의 Morlet Wavelet 모함수를 사용하여 전력계통의 고장기록장치로부터 얻어지는 선로의 전류 데이터를 Wavelet 변환하였고, 이로부터 다양한 고장 모드를 판별할 수 있었다. 실험 결과 Wavelet 변환을 이용하여 선로의 고장 모드를 판별하는 것이 기존의 고속 Fourier 변환을 이용하는 것보다 특징점 고찰에 더욱 유용하다는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

Recently the subject of "wavelet analysis" has been drawn by both mathematical and engineering application fields such as Signal Processing, Compression/Decomposition, Wavelet-Neural Network, Statistics and etc. Even though it's similar to Fourier analysis, wavelet is a versatile tool with much mathematical content and great potential for applications. Especially, wavelet transform uses localizable various mother wavelet functions in time-frequency domain. Therefore, wavelet transform has good time-analysis ability for high frequency component, and has good frequency-analysis ability for low frequency component. Using the discriminative ability is more easy method than other conventional techniques.

In this paper, Morlet wavelet transform was applied to discriminate the kind of line fault by acquired data from real power transformation network. The experimental result presented that Morlet wavelet transform is easier, and more useful method than the Fast Fourier Transform(FFT).

Key Words : Wavelet Transform, Fast Fourier Transform(FFT), Fault Current Discrimination

* 주저자 : 동아대학교 전기공학과 교수

Tel : 051-200-6951, Fax : 051-200-7743, E-mail : jwjeong@donga.ac.kr

접수일자 : 2006년 12월 8일, 1차심사 : 2006년 12월 14일, 심사완료 : 2006년 12월 28일

1. 서 론

경제의 성장으로 인한 국내의 전력 수요는 해마다 증가하고 대도시의 인구 집중현상에 따른 전력수요 밀도가 크게 작용하고 있는 시점에서, 여러 가지 환경요인으로 인한 송·배전 선로의 전력 설비 고장 유형이 다양화(수목접촉, 외물접촉, 조류, 고충건축물, 절연열화, 산불, 기후, 도로굴착 등) 되어지고 있다. 그러나 이런 고장의 원인을 분석하는 경우 기존의 방법(벡터해석법 등)으로는 그 다양한 원인의 판별이 곤란하여, 원인불명의 처리가 많아지고 있는 실정이다.

기존의 신호처리분야에서 가장 많이 사용되는 기법으로 Fourier 변환과 Wavelet 변환이 있는데[1-5], 이 두 변환은 서로 다른 기저함수를 사용한다. 즉 Fourier 변환은 $e^{(-j\omega t)}$ 와 같이 연속이며, 미분 가능한 함수를 사용하는 반면, Wavelet 변환은 기본 Wavelet에 시간적으로도 주파수적으로도 국재화시키는 함수를 사용한다는 점에서 차이가 있으며, Wavelet 변환은 고주파 성분에 대해서는 시간 분해능이 높고, 저주파 성분에 대해서는 주파수 분해능이 높아지므로, 주어진 신호에 대한 지식이 없이도 시간-주파수 해석이 가능하고, 고주파 성분을 갖는 특이점의 검출에도 적합하게 된다.

본 논문에서는 Wavelet 변환의 이러한 성질을 이용하여 기존의 송·배전 선로의 고장 전류의 파형을 Wavelet 변환시켜 기본파 성분 및 고조파 성분의 특징을 동시에 파악함으로서 다른 신호처리 기법보다는 용이하면서도 고장 요인에 따른 파형간의 확실한 차이를 보여주고자 하였다. 이를 위하여 고장 전류 데이터를 적절히 가공하여, 고장 원인의 특성 파악을 위해 Wavelet 해석하였으며, 통계학적 검정에 대한 해석을 용이하게 하기 위하여 연속 Wavelet 변환을 사용하였다. 그리고 연속 Wavelet 변환의 사용 시 연산시간이 길어지는 단점을 극복하기 위해 Multi-Level Decomposition을 통해 데이터의 수를 줄여 시간을 단축시켰고, 유의 수준 및 신뢰구간 등의 통계학적 검정법이 이용되었다[6-12].

2. Fourier 변환

Fourier 변환은 절대 가합인 수열에 대해 주파수 영역 (ω) 표현을 제공하는 것으로, Fourier 변환은 두 가지 특징을 가진다. 첫째는 변환이 무한 수열에 대해 정의된다는 것이고 둘째는 가장 중요한 특징으로 변환이 연속변수(ω)의 함수라는 것이다. 수치 계산의 관점에서 셀 수 없을 정도로 무한한 주파수에 대한 무한 합을 계산해야 하므로 컴퓨터 연산 시 문제 가 되어진다. 이에 반해 이산 Fourier 변환(DFT)은 Fourier 변환을 수치적으로 계산하는 기법을 제공하는 것으로 주기적 신호에 대해 이산 Fourier 급수를 사용함으로써 이 문제를 다룰 수 있다.

하지만 DFT는 비록 계산 가능한 변환이기는 하지만 식 (6)의 직접적인 계산은 매우 비효율적이고, 특히 수열의 길이 N 이 클 때는 더욱 비효율적이다. 1965년 Cooley와 Tukey는 DFT 연산중에 수행할 계산의 양을 실질적으로 줄이는 방법을 제시하였으며 이로 인하여 다른 효율적인 알고리즘이 개발되는 계기가 되었다. 이러한 모든 효율적인 알고리즘들은 총체적으로 고속 Fourier 변환(FFT)알고리즘이라고 한다.

3. Wavelet 변환

3.1 Wavelet 해석

시간 등간격 Δt 및 $n=0, 1, 2 \cdots N-1$ 인 시계열 x_n 에 대해 무차원의 시간 파라미터 η 에 종속되는 Wavelet 함수 $\psi_n(\eta)$ 이 존재한다고 가정할 때, Wavelet 변환이 허용적이 되려면, 평균치가 영이고 시간과 주파수 공간에서 국재화 될 수 있어야 한다. 또한 직교 Wavelet은 이산 Wavelet 변환을 시행하는 경우에 해당되고, 비직교 Wavelet은 이산 및 연속 Wavelet 변환에 통용될 수 있다. 본 연구에선 통계학적 검정에 대한 해석을 용이하게 하기 위하여 연속 Wavelet 변환을 사용한다. 따라서 이산 시계열 x_n 의 연속 Wavelet 변환은 식 (1)과 같이 시계열 x_n 과 스케일 변환되고 천이된 Wavelet 함수

$\Psi_s(\eta)$ 의 합성적분으로 정의되고 첨자 *는 복소共액을 나타낸다.

$$W_n(s) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \Psi^* \left[\frac{(\eta - n)\Delta t}{s} \right] \quad (1)$$

Wavelet 스케일 s 를 변화시키고 국재화된 시간 지수 n 을 따라 천이시킴으로써, 스케일에 대한 어떤 특성의 진폭은 물론, 진폭이 시간과 변화에 대한 그림을 구성할 수 있다. 식 (1)을 사용해서 Wavelet 변환을 계산할 수 있지만, Fourier 공간에서 계산하는 것이 훨씬 빠르다. 연속 Wavelet 변환의 근사는 매 스케일 s 에 대한 식 (1)의 합성적분을 N회 수행하여야 한다. 여기서 N은 시계열에서의 데이터 수를 나타낸다. 전체 N회의 합성적분을 수행하는 것은 선택적이며 이보다 작게 취할 수도 있다. 전체 데이터 수가 N이면, 시계열 x_n 에 대한 이산 Fourier 변환은 식 (2)와 같으며, $k=0, 1, 2 \dots N-1$ 은 주파수 지수이다. 한편 스케일 변환된 함수 $\Psi(t/s)$ 의 푸리에 변환은 $\Psi(\omega)$ 로 주어진다. 따라서, 합성 정리에 의하여, Wavelet 변환 $W_n(s)$ 은 시계열 x_n 의 이산 푸리에 변환 \widehat{x}_k 과 Wavelet 함수의 푸리에 변환 $\Psi(\omega)$ 의 곱을 역Fourier 변환한 식 (3)로 정의될 수 있으며 여기서 각 주파수는 식 (4)로 정의된다.

$$\widehat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\omega_k n/N} \quad (2)$$

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} \widehat{x}_k \widehat{\Psi}^*(\omega_k) e^{j\omega_k n \Delta t} \quad (3)$$

$$\omega_k = \begin{cases} \frac{2\pi k}{N\Delta t} & k \leq N/2 \\ -\frac{2\pi k}{N\Delta t} & k > N/2 \end{cases} \quad (4)$$

각 스케일 s 마다 식 (11)과 표준 Fourier 변환 투턴을 사용해서 모든 n 에 대해 효율적이고도 동시에 연속 Wavelet 변환을 계산할 수 있다.

3.2 분 해

원래의 신호를 Lowpass Filter와 Highpass Filter를 통과시켜서 근사화 부분과 세부화 성분을 나누는 것이다. 본 연구에선 연속 Wavelet 변환이 계산이 복잡하여 시간이 오래 걸리는 단점을 극복하기 위해 Daubechies 레벨 3으로 분해하여 데이터 수를 줄였다.

3.3 Wavelet 모함수 선택

Wavelet 변환은 신호에 존재하는 특성의 형태를 반영해야 한다. 비직교 Wavelet 함수는 신호 해석에 유리하고, Wavelet 진폭을 smooth하고 연속적으로 변환시킬 수 있다. Morlet과 Paul Wavelet은 복소수이나, Mexican Hat 및 Coiflet Wavelet는 실수치이다. 시간 영역에서 이들 Wavelet을 도시하면 그림 1과 같다. 본 연구에서는 Morlet wavelet 모함수를 사용하였다[13-14].

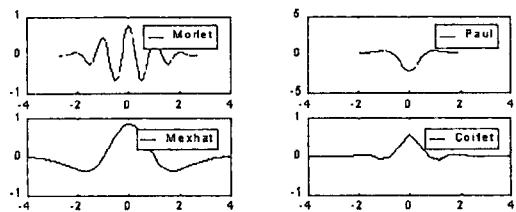


그림 1. Wavelet 모함수

Fig. 1. Mother function of Wavelet

3.4 Wavelet 변환에 의한 고장전류 판별

본 논문에서는 고장 기록 장치로부터 취득한 데이터 중 영상 전류 데이터를 먼저 Fourier 변환을 수행하여 그 원인별 특성을 파악하고자 하였다. 그리고 제안하는 Wavelet 변환을 수행하기 위해 Multi-Level Decomposition을 통해 데이터의 수를 줄임으로 연속 Wavelet 변환 시 연산시간을 줄였으며, Morlet Wavelet 변환을 통하여 시간 및 주기에 따른 원인별 영상 전류의 특성을 파악하고, 반복적인 분석을 통해 그 원인별 영상 전류의 시간-주파수 특성을 파악하여 Wavelet 변환되어진 미지의 영상 전류의 시간-주파

웨이블렛 변환을 이용한 전력시스템 고장전류의 판별

수 특성에 의해 역으로 고장 원인을 파악하였다.
Wavelet 변환을 위한 순서도는 그림 2와 같다.

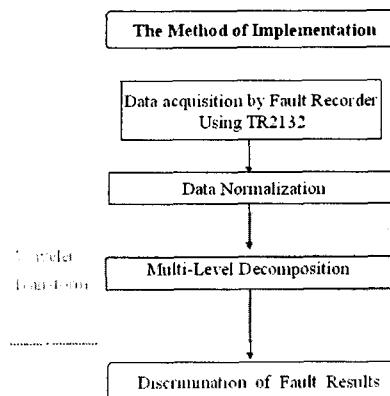


그림 2. Wavelet 변환을 이용한 고장전류판별 위한 순서도

Fig. 2. Flowchart of Fault Current Discrimination using Wavelet transform

4. 자료취득 장치의 구성도

송전선로의 고장 전류 자료 취득 장치는 F/R(고장기록장치)로서 그림 3, 그림 4와 같다.

F/R(Fault Recorder)은 전력설비에 취부되어 있는 PT(전압-변성기))와 CT(전류-변류기)의 2차 출력 값(전압 : 63.5/115[V]/190[V], 전류 : 5[A])으로 고장 발생시 정보를 취득하여 저장 및 Local 출력하여 주는 장치로서 전압전류 파형 AC Channel 16/32, DC Channel(on-off접점) 32/64로 구성되어 있다.

취득 데이터의 샘플링 타임은 0.5208[ms]이다.

또한 그림 5에서 보여지는 것과 같이 통신(TCP/IP방식)의 Dial-up Modem을 통하여 원거리에서도 자료를 취득하여 분석할 수 있다.

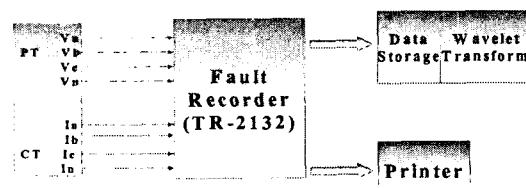


그림 3. 자료 취득 장치 구성도

Fig. 3. Block diagram of Fault Recorder

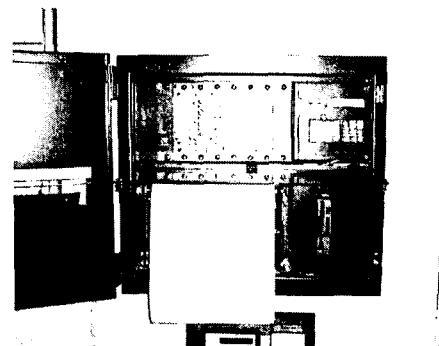


그림 4. 고장기록장치(TR-2132)
Fig. 4. Fault Recorder(TR-2132)

이러한 일련의 과정을 통해 고장이 발생한 경우 현재는 그림 6~7에서와 같이 순시전류의 파형과 주파수를 통해 고장의 발생을 알 수는 있으나 그 원인을 찾는 것은 어려워 선로 순시원들에 의해 직접적으로 고장의 원인을 찾는 방법이 사용되어진다.

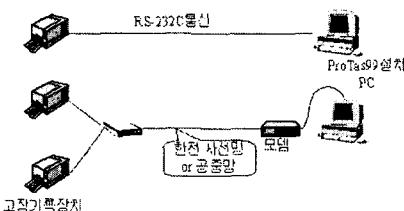


그림 5. 자료취득 장치와 연결통신망
Fig. 5. Fault Recorder and Network

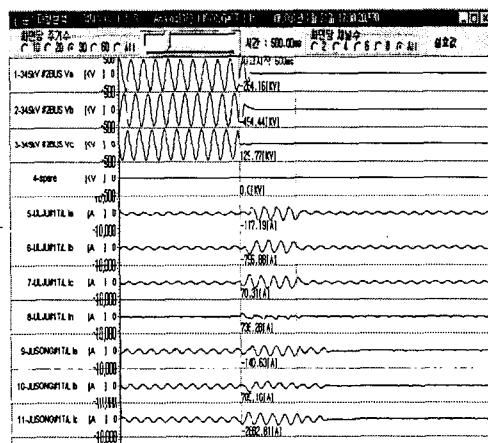


그림 6. 시간영역에서의 고장 데이터

Fig. 6. Fault Data in Time Domain

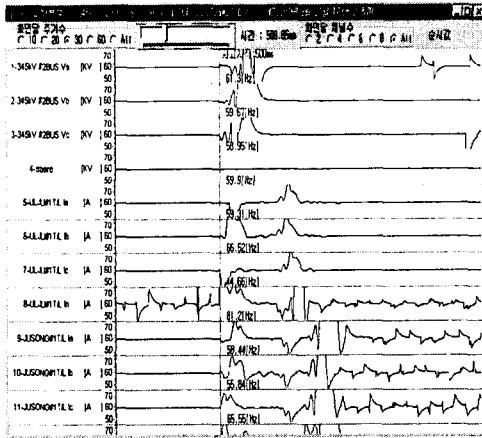


그림 7. 주파수 영역에서의 고장 데이터
Fig. 7. Fault Data in Frequency Domain

5. 실험결과

본 논문에서의 실제 고장전류의 원인 분석 결과는 다음과 같다.

그림 8과 그림 9는 경북지역의 2001년 8월 5일 섬락으로 인한 애자 파손에 의한 지락 고장의 결과를 기존의 Fourier 변환과 Wavelet 변환한 결과이고 그림 10과 그림 11은 경남지역의 2000년 12월 25일 수목접촉으로 인한 지락 고장의 결과를 각각 변환한 결과이다. 또한 그림 12과 그림 13은 경북지역의 2002년 4월 16일의 송전선 낙뢰로 인한 애자파손의 결과를 각각 Fourier 변환과 Wavelet 변환으로 보이고 있다.

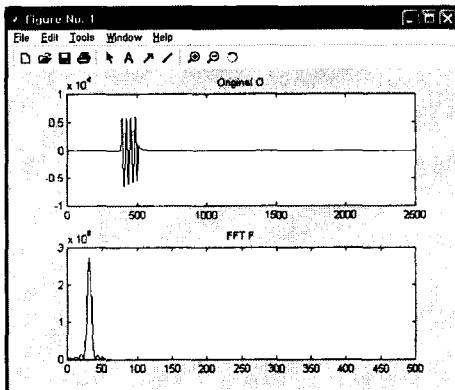


그림 8. 섬락사고 파형의 Fourier 변환 결과
Fig. 8. Result of F/T under Flashover

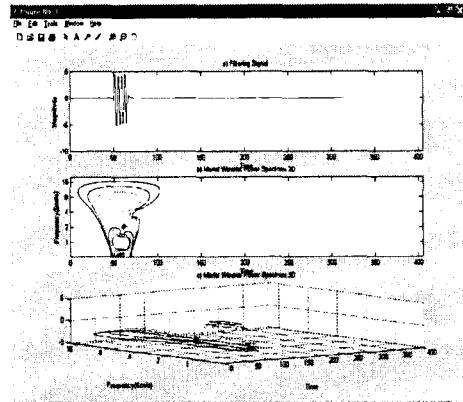


그림 9. 섬락사고 파형의 Wavelet 변환 결과
Fig. 9. Result of W/T under Flashover

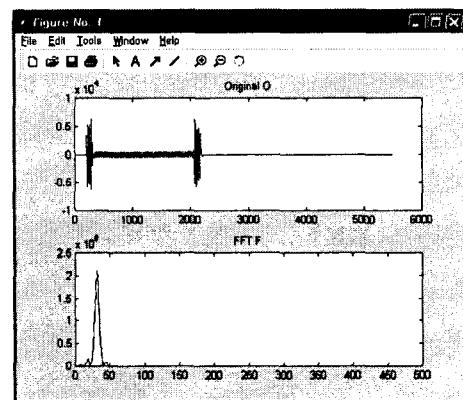


그림 10. 수목 접촉 사고 파형의 Fourier 변환 결과
Fig. 10. Result of F/T under Tree Contacting

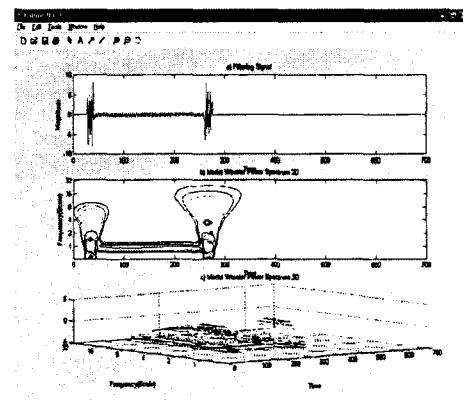


그림 11. 수목 접촉 사고 파형의 Wavelet 변환 결과
Fig. 11. Result of W/T under Tree Contacting

웨이블렛 변환을 이용한 전력시스템 고장전류의 판별

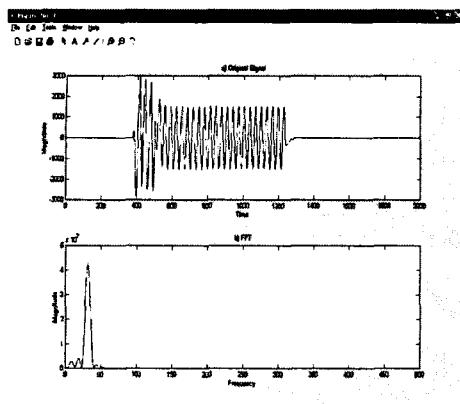


그림 12. 송전선 낙뢰 사고파형의 Fourier 변환 결과
Fig. 12. Result of F/T under Surge

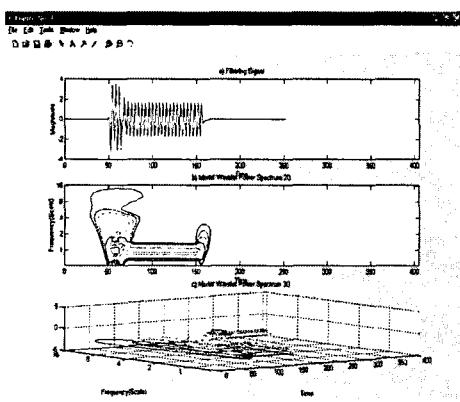


그림 13. 송전선 낙뢰 사고파형의 Wavelet 변환 결과
Fig. 13. Result of W/T under Surge

각 그림에서 보여지는 바와 같이, 기존의 방법인 Fourier 변환의 결과로는 그림 8, 그림 10 및 그림 12에서 보이는 바와 같이 변환되어진 결과가 유사하여 주파수의 그 특징적인 차이를 구별하기가 곤란하다. 그러나 제안된 Wavelet 변환의 결과로는 그림 9, 그림 11 및 그림 13에서 보이는 바와 같이 그 구별이 확연함을 알 수 있다.

Wavelet 변환에 의한 결과는 그림 9에서 보여지는 것과 같이 95[%] 신뢰구간인 붉은색 contour가 고주파 부분에 밀집이 되어지고 있으며, 전 주파수 영역에서 그 특징을 보인다. 그림 11은 붉은색 contour가 고주파 부분에 밀집이 되어지고 그 천이 시간은 극히 짧다. 뿐만 아니라 수목의 연속적인 접

촉이 원인이라 생각되는 긴 주기를 가지고 있다. 그럼 13의 경우, 붉은색 contour가 고주파 부분에 밀집이 되어지고 있으며, 그 천이 구간 다른 원인에 의해 아주 길게 나타나고 있다.

실험 결과에서 고장 원인별 Fourier 변환과 Wavelet 변환의 결과에서 기존의 신호 해석의 방법이 되어졌던 Fourier 변환 기법에 의한 결과에 비해 제안되어진 Wavelet 변환 기법에 의해 해석되어진 결과는 각 원인별로 시간-주파수 영역에서의 특징이 서로 상이하므로 그 원인별 차이를 확연히 보여 줌을 알 수 있다

6. 결 론

본 논문에서는 네트워크에 의한 자료취득 장치로부터 얻어지는 고장 전류의 고장 원인의 판별에 있어 기존의 Fourier 변환 결과에 비하여 제안한 Wavelet 변환의 결과가 훨씬 그 고장 원인의 판별이 용이함을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 본 연구를 통하여 고장 전류의 원인별 특성을 파악함으로써 시간과 주파수를 동시에 해석할 수 있다는 Wavelet 변환의 장점을 통해 고장의 원인뿐만 아니라 정확한 시간정 보도 얻을 수 있기 때문에 기존의 고장 원인 판별의 방법에 비하여 고장에 대해 보다 신속하고 정확하게 대처할 수 있을 것으로 생각된다.

향후 제안한 알고리즘의 신뢰도를 높이기 위한 지속적인 연구가 수행되어진다면 현재의 고장 원인을 판별하기 위해 수행되어지는 인적·물적인 투자에 비해 작은 비용으로 정확한 고장 원인을 판별하는 것이 가능하리라고 사료되어진다.

References

- [1] Rioul, Olivier and Martin Vetterli, "Wavelets and signal processing," IEEE Signal Processing Magazine, October 1991, p.14-38.
- [2] J. Bradley, C. Brislawn, and T. Hopper, "The FBI Wavelet/Scalar Quantization Standard for Gray-scale Fingerprint Image Compression," Tech. Report LA-UR-93-1659, 1993.
- [3] Q. Zhang and A. Benveniste, "Wavelet networks," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 3, pp. 889-898, Nov. 1992.
- [4] Y. C. Pati & P. S. Krishnaprasad, "Analysis and synthesis of feedforward neural network using discrete

- affined wavelet transformations" IEEE Trans. Neural Network, vol.4,pp.73-85, Jan. 1993.
- [5] Mary Beth Ruskai, "Wavelet and Their Application", Jones and Bartlewtt Publishers, Inc, 1992.
- [6] M. Holschneider "Wavelets An Analysis Tool", Clarendon Press, Oxford, Inc, 1995.
- [7] G. Strang, "Wavelet transforms versus Series) Amer. Math. Soc., Vol. 28, No. 2, pp 288-305, 1993.
- [8] Steven G. Kranz, "wavelets Mathematics and Applications", CRC Press, Inc, 1994.
- [9] Holschneider, "Wavelets An Analysis Tool", Calrendon Press Oxford, 1995.
- [10] I. Daubechies, "Ten Lectures on Wavelets", Siam, 1992.
- [11] C. K. Chui, "An Introduction to Wavelets", Academic Press, 1992.
- [12] R. K. Young, "Wavelet Theory and its Applications", Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [13] I. Daubechies, "The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal analysis", IEEE Trans. Information Theory 36, 1990.
- [14] Jacques Lewalle: "Tutorial on Continuous Wavelet Analysis of Experimental Data", 1995.

◇ 저자소개 ◇

이준탁 (李浚杓)

1956년 11월 21일생. 1979년 동아대학교 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 중앙대학교 전기공학과 졸업(박사). 일본 축파대학 객원교수. 부산 울산 광역시 건설 심의위원. 중기청 자문위원. 현재 동아대학교 전기공학과 교수.

Tel : (051)200-7740

Fax : (051)200-7743

E-mail : jtlee@dau.ac.kr

정종원 (鄭鍾元)

1972년 5월 6일생. 1998년 동아대학교 공대 전기공학과 졸업. 2001년 부산대학교 mechatronics 졸업(석사). 현재 동아대학교 전기공학과 박사과정.

Tel : (051)200-6951

Fax : (051)200-7743

E-mail : jwjeong@donga.ac.kr