

이산 웨이블렛 변환 기법을 이용한 변압기 열화신호의 특징추출에 관한 연구

A Study on Feature Extraction of Transformers Aging Signal using
Discrete Wavelet Transform Technique

박재준, 김면수, 오승현, 김성홍, 권동진, 송영철, 안창범

Jae-Jun Park , Meyoun-Soo Kim , Seung-Heon Oh, Sung-Hong Kim,
Dong-Jin Kweon, Young-Chul Song, Chang-Beom Ahn

Abstract

본 연구에서, Daubechies' Mother Wavelet를 이용한 이산 웨이블렛 변환(Discrete Wavelet Transform)에 기초한 새롭고 효과적인 특징추출방법을 제안하였다.

특징추출을 이용하여 응용방향을 설명하고 또는 통계적 파라메터의 평가를 행하였다.

본 연구에서는 다음과 같은 몇 가지 사실을 알 수 있었다.

1. 시스템에서 발생된 (인가전압이 0[V]) 노이즈라 볼 수 가있는 랜덤노이즈 (Random Noise)를 디지털필터인 FIR(Finite Impulse Response)필터를 통하여 상당한 노이즈를 억제할 수가 있었다.
2. 이산 웨이블렛 변환 시 레벨 1~4까지 변환한 결과 최적의 변환상태 Level-3 을 기준으로 하였다.
3. 특징추출 파라메터는 음향방출신호의 최대값, 평균값, 분산, 왜도, 첨쇄도를 특징추출파라메터로 이용하였다.
4. 특징추출 결과를 이용하여 전체 열화시간 중 대표적 음향방출신호 중 초기열화신호, 중기열화신호, 말기열화신호를 얻을 수 있었다. 이런 특징추출을 통하여 변압기열화상태를 진단할 수 있는 가능성을 확인 할 수가 있었다.

**Key Words(중요용어) :Acoustic Emission Signals, Discrete Wavelet Transform,
FIR Digital Filter, Feature Extraction, Multi-Decomposition**

I. 서론

최근 전기 기기의 고전압, 대용량화 됨으로 하여 안정적이고 효율이 좋은 전력의 공급이 절실히 요구되고 있다. 이에 따라 전력 기기인 변압기나 전력 케이블을 비롯한 전력 계통과 절연 시스템에 있어서 절연 성능의 향상을 위한 중요성이 어느 때 보다 높다 하겠다.

전력의 대용량화는 절연시스템의 열화와

결함을 가져 오게 되는 주요한 원인이 된다. 절연 시스템의 약화를 가져오게 되면 곧바로 부분 방전이 발생되어 곧 전로 파괴에 이르게 된다.

이런 변압기와 같은 전력기기가 절연 파괴에 이른다면 상상을 초월한 대 혼란과 손실이 막대하리라고 생각한다. 한 예로서 금년 여의도 지하 전력 구에서 전력 사고는 국가의 정보망 및 재산상의 피해를 보여주는 좋은 예가 될 수 있다고 할 것이다.

이런 절연 파괴를 미연에 방지하기 위해 대

용량 및 소용량 변압기의 원격 제어를 이용한 상시 진단의 목적으로 본 연구를着手하였다.

일차적으로 변압기의 특정 부분에 불평등 전계가 가해지게 되면 부분 방전이 발생하게 된다.

필연적으로 수반된 여러 신호들 (초음파신호 =음향방출신호, 방전전하, 광(빛)) 이 방출하게 된다.

그 중 변압기의 부분 방전 발생 위치 및 거리추정에 적합하고, 전자기에 영향을 받지 않은 초음파 신호는 초음파 센서를 이용하여 데이터를 획득하게 된다. 그 후 A/D Converter를 통하여 디지털 한 자료가 실시간 (real time) RAM으로 입력되어진다.

이때, 입력된 데이터는 자체 연구 개발된 디지털 필터 (FIR - Filter) 알고리즘을 통하여 시스템내의 노이즈를 제거하게 된다.

종래의 신호 해석 및 분석을 통한 진단 방법으로 위상각에 따른 $\phi - q - n$ 분포 패턴을 널리 이용하여 연구되어 왔고 실용화를 하고 있다.

종래의 디지털신호처리의 기법으로서는 주파수-크기 분석법인 FFT 스펙트럼 해석을 주로 이용하였지만, 최근에서는 시간의 흐름에 따른 주파수 분석에 탁월한 웨이블렛 변환기법을 이용하고 있다.

본 연구에서도 일 차원 및 이 차원 신호(영상신호)해석에 용이한 이산 웨이블 변환 (Discrete Wavelet Transform ; 이하 DWT라고 한다)기법을 이용하여 변압기에서 부분방전이 발생될 때 수반된 음향방출신호를 실시간 계측하여 열화의 진행에 따라 초기, 중기, 말기신호의 특징을 추출하는데 multi-resolution(multi-window)를 사용하여 고주파 신호 영역과 저주파 신호영역 모두를 분리하여 비선형적인 신호(초음파신호=음향방출신호, 부분 방전 신호)의 계수를 통한 특징 추출을 실시하였다.

II 실험방법 및 디지털 신호처리 과정

1. 실험장치

(1) Sensor

센서는 음향방출회사 Vallen System 제품으로서 20[KHZ]~500[KHZ] 밴드폭을 갖는 40dB 전 치 증폭기(Preamplifier)가 내장된 150[KHZ] 공진주파수를 갖는 AE Sensor를 사용하였습니다. 이 센서는 Magnetic hold를 이용하여 모

의 변압기 벽 외면에 부착하였다.

(2) 전극구성

전극의 구성은 그림1에서 보여준 것처럼 침대평판 전극으로 구성하였다. 침 전극은 일본 제 10[μm] 곡률반경을 갖는 침 전극을 사용하였고 평판전극은 로고스키전극으로 구성하여 1[KV/s]의 승압속도로 15[KVRMS]까지 인가 후 일정하게 인가하였다.

(3) Data acquisition System

Data Acquisition System은 Digital Oscilloscope을 이용하게 되면 real time으로 data를 pc로 전송 받기 어려운 점이 많기 때문에 본 연구에 적합한 A/D Converter를 설정하였습니다.

ULTRAVIEW에서 생산된 12bit A/D board로서 80MHZ/Dual 40MHZ를 처리할 수 있으며, 최대 80MS/S 샘플링을 가지고 있으며 2Chanel로 구성되었으며, 차폐된 동축 케이블 (Shield coaxial cable)을 통하여 음향센서로부터 신호가 A/D보드로 입력되도록 구성하였습니다.

본 연구에서는 위상각을 고려하지 않은 단일AE 채널만을 이용하여 4Mbyte A/D보드의 버퍼메모리를 갖는 PCI버스방식을 가지고 있다.

Sampling Rate는 채적의 상태라고 생각되는 8MS/S을 유지하였으며, 4M byte를 실시간 data를 획득하는데 걸리는 시간은 125[ms] = 0.125[s]이었다. 9분 동안 데이터를 획득하고 1분 동안의 휴지시간을 두고 절연파괴 시 까지 연속적으로 계측을 실시하였다. 4M byte의 정보는 2진 정보로 되어 있으므로 Visual C++ 6.0으로 Interface 프로그램을 작성하여 10진 형식으로 코드 변환을 실시하였다. 동시에 4 M byte의 데이터를 나타낼 수 없으므로 EXCEL창에서 쉽게 나타낼 수 있도록 하기위해서 64등분하는 프로그램을 작성하여 파일로 분류 선별하였다.

한 file내의 신호 point수는 16384개의 Point를 가지게 되므로 한 파일동안 데이터를 획득하는데 소용되는 시간은 1.95[ms]이었다.

음향방출신호의 한 point동안의 시간은 0.12[μs]가 된다.

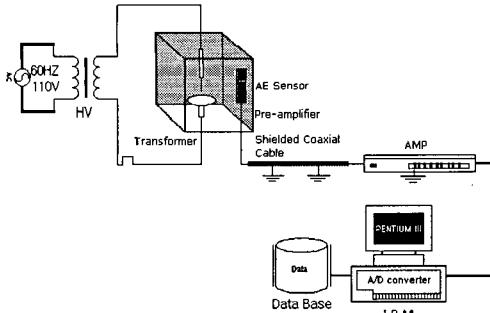


그림1. 실험장치

2. Data Processing

(1) D.C offset

Data acquisition 과정에서 신호가 Zero 점으로 입력 되어있지 않기 때문에 Visual C++ 6.0의 프로그램으로 신호를 영점으로 설정하였다.

(2) Digital Filter

본 연구에서 사용된 필터는 시스템의 랜덤 노이즈 제거에 용이한 디지털 필터 중 한 기법으로서 FIR(finite impulse response) 디지털 필터를 이용하여 랜덤노이즈를 제거하였고 그리고 화이트 노이즈 제거에 용이한 이산 웨이블렛 변환을 통하여 화이트 노이즈를 제거하였다.

FIR 디지털 필터의 장점은 입력 신호에 의존하여 자동적으로 계수(coefficients)를 조정 할 수 있다는 점이다. 그림2에서 나타낸 것처럼 본 연구에서 적용한 FIR디지털필터의 구조를 보여주고 있다.

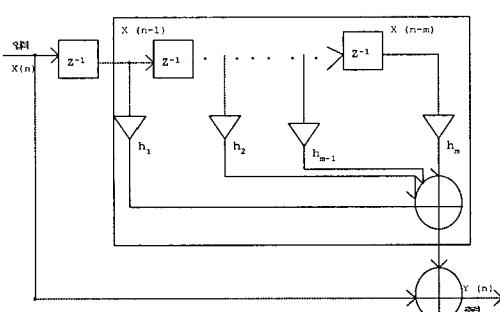


그림2. 디지털 FIR 필터의 구조

(3) 마더웨이블렛 선정

Mother Wavelet의 선정은 각기 다른 신호의 변화를 탐지하고 위치를 확인 하는데 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 Mother Wavelet의 선정은 연속된 신호의 성질과 종류에 달려있다 할 것이다.

본 연구에서 사용된 음향 방출 신호는 low-amplitude, short duration, fast decaying 그리고 oscillating하는 형태의 신호이므로 우선 Mother Wavelet를 선정하기 위해서 두 종류의 Mother Wavelet인 Haar Mother Wavelet과 Daubechies' Mother Wavelet의 알고리즘을 위해서 사용된 각각의 필터계수를 표1에서 나타내고 있다.

Daubechies' Mother Filter Coefficients	
저	.026749f, -.016864f, -.078233f, .266864f,
주	.602949f, .266864f, -.078233f, -.016864f
파	, .026749f
고	0.000f, -.045636f, .028772f, .295636f,
주	-.557543f, .295636f, .028772f,
파	-.045636f, 0.00f

표1. Daubechies' 마더 웨이블렛의 필터계수

(4) 이산 웨이블렛 변환

이산 웨이블렛(Discrete Wavelet Transform, 이하 DWT라 한다)은 웨이블렛의 변환식

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

에서 a, b 인자를 이산치로 나타냄으로써 이루어진다. 이산 웨이블렛 함수는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi_{2^j}(t) = 2^j \Psi(2^j t)$$

$$(j = 0, -1, -2, -3, \dots) \quad (2)$$

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

$$d_{2^j} = D_{2^j}[x(t)] = x(t) * \Psi_{2^j}(t) \dots \dots \dots \quad (3)$$

여기에서, $D_{2^j}[x(t)]$ 는 2^n 의 웨이블렛 변환 연산자는 나타낸다. 결국 웨이블렛 계수 d_{2^j} 는 주어진 신호 $x(t)$ 와 이산 웨이블렛 함수 $\Psi_{2^j}(t)$ 의 상승 적분에 의해 구해지게 된다. 이 과정은 원 신호를 2의 역승 형태에 기초

한 다음 샘플링의 방법을 사용하여, 고주파 필터와 저주파 필터를 사용하여 필터링하는 개념이다.

(5) 다중해상도 웨이블렛 변환 (multi-resolution Wavelet Transform)

이산 웨이블렛의 확장으로 직교벡터공간에서 웨이블렛 함수를 변화 시킴에 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 웨이블렛을 만들어서 적용하는 과정을 거치게 된다. 다시 말해 2^j 만큼 확장된 식 (1)에 있는 이산 웨이블렛 함수 $\Psi_{2^j}(t)$ 를 시간 축에 대해 $2^{-j}n$ 천이 시키고, $\sqrt{2^{-j}}$ 로 정규화 함으로써, 함수를 $\Psi_{2^j}(t)$ 를 시간 축에 대해 $2^{-j}n$ 천이시키고, $\sqrt{2^{-j}}$ 로 정규화 함으로써,

$$\sqrt{2^{-j}} \Psi_{2^j}(t - 2^{-j}n) \quad (4)$$

웨이블렛이 구성된다. 다중 해상도 웨이블렛 변환(multiresolution Wavelet Transform)은 웨이블렛 함수를 정규 직교기저에 적용함으로써 주어진 함수 특성을 분해하여 나타내는 알고리즘이라 할 수 있다. 웨이블렛은 고주파와 저주파를 단계별로 분리 적용하여 level-1, level-2...로 분해하여간다.

그 역의 과정을 합성 즉, 역 웨이블렛 (IDWT)이라고 한다.

이산웨이블렛의 과정 및 그 역의 과정인 역웨이블렛을 그림3에서 나타내고 있다.

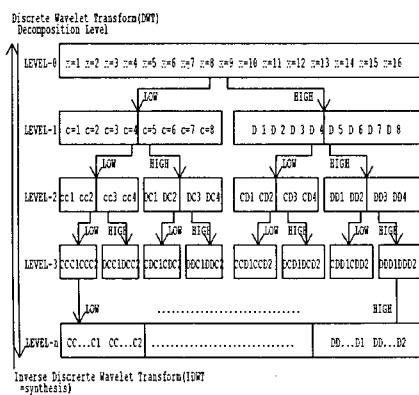


그림3. 이산웨이블렛 변환의 분해와 합성
Figure 3. Decomposition and reconstruction of discrete wavelet transform (DWT).

(6) 자료처리의 흐름도

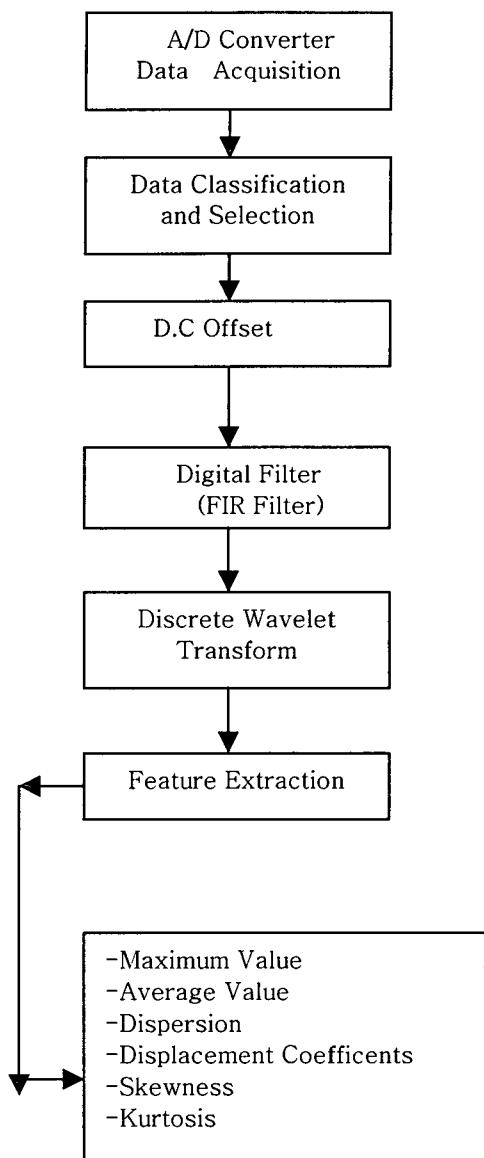


그림4. 자료처리의 흐름도
Figure 4. Flowchart of data processing flow.

(7) 특징추출(Feature Extraction)

이산웨이블렛의 다중분해능을 이용하여 특징을 추출하기 위해서 원신호를 DWT의 레벨을 0, 1, 2, 3, 4로 하여 원신호의 형태를 그대로 유지되는 레벨을 찾아, 그 레벨로 고정하여 각각의 통계파라메터에 이용한다.

원신호의 포인트 수는 16384 Point인데 이산웨이블렛을 Level-1로 하면 2^1 (2배)만큼 압축이 되어진다. Level-2로 하면 2^2 (4배)만큼 압축되어지고, Level-3로 하면 2^3 (8배)만큼, Level-4로 하면 2^4 (16배)압축되어진다. 계속하여 레벨을 높여주어 Level-n로 되면 2^n 만큼으로 압축되어진다.

즉 Level-3으로 하면 16384포인트의 신호가 2048의 웨이블렛계수로, Level-4로 하면 웨이블렛의 계수가 1024포인트의 신호로 압축되어 표현될 수 있으므로 최적의 웨이블렛의 레벨을 선정하여 특징을 추출하면 된다. 본 연구에서는 Level-3으로 고정하여 통계적인 파라메터에 적용하였다.

1. Maximum Value
2. Average Value
3. Dispersion
4. Skewness
5. Kurtosis

III. 결과 및 검토

1. 디지털 필터

디지털 신호처리기법으로 연속적인 노이즈는 입력 신호로부터 예보자 연속 신호를 마이너스 한만큼 노이즈를 줄일 수 있다.

시간 영역에서 작용한 이런 예보 알고리즘이 노이즈의 통계적 특성으로 이용하고 있다.

이 음향방출신호에 자체 알고리즘하여 FIR디지털필터를 이용한 결과를 나타내고있다. 그림5의 경우는 부분방전장치에 전압을 인가하지 않은 상태에 시스템에서 발생된 노이즈로서, 이런 노이즈를 랜덤노이즈로 가정하고 알고리즘을 적용한 결과 그림6과처럼 상당한 정도의 노이즈가 제거된 상태를 볼 수가 있다.

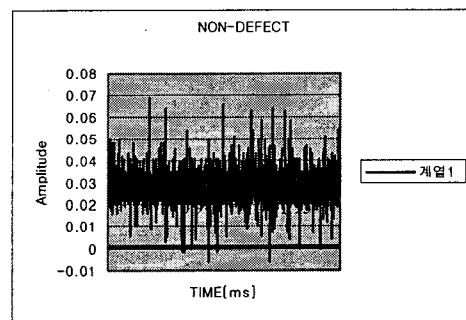


그림 5. 전압을 인가하지 않은 경우 시스템내의 랜덤노이즈 신호

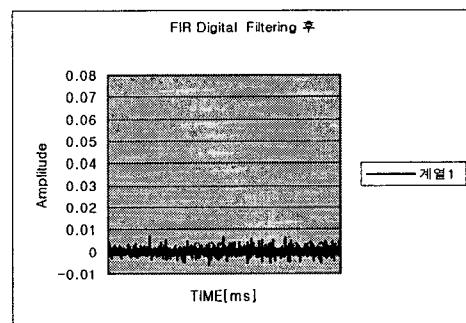


그림6. FIR 디지털 필터링 후의 노이즈가 제거된 상태신호

2. 음향방출신호

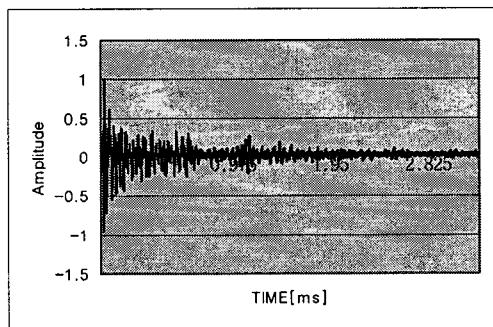


그림7. 실측된 전형적인 음향방출신호

부분방전시 발생된 음향방출신호의 전형적인 신호파형을 그림 7에서 나타내었다.

신호의 포인트 수는 24576포인트로서 2.825[ms]의 시간동안 측정한 신호이다.

계측된 모든 음향방출신호의 전반적인 특징은 신호 전반부에서는 급상승하여 급강하되는 형태를 나타내고 있으며, 부분방전신호 원이 모의 변압기의 중앙에 위치하여 부분방전이 일어나면 음향의 전파에 의하여 다른 벽면에 부딪쳐 다시 반사되어오게 되므로 이는 echo에 의하여 음향펄스의 파가 길어지고 있다고 사료된다.

2. 변압기 부분방전시 열화정도에 따른 음향 방출신호의 패턴

(1)변압기 부분방전시 발생된 음향방출 열화 초기신호-말기신호

열화초기 음향방출신호의 패턴으로서 그림8에서 나타내고있다. 열화말기 음향방출신호 패턴으로서 그림9에서 나타내고있다.

음향방출 열화 초기신호는 중기 및 말기신호에 비하여 발생 펄스폭이 크고, 발생신호의 duration time 이 상대적으로 길기 때문에 excel상에서 나타내기 쉬운 정도인 16384포인트 만으로 나타내고있다. 음향방출 과정은 지수함수적인 형태이지만, 말기의 음향방출신호보다 좀 더 완만한 지수함수 형태의 신호가 다수의 신호형태로 표현 되고있다.

열화의 말기신호는 초기에 비하여 진폭이 낮고, 펄스의 duration time도 극히 짧은 시간동안의 신호로서 단발성의 펄스가 다수의 신호의 특징으로나타나고있다. 역시 지수함수적인 펄스의 형태를 이루고있지만 초기에 비하여 기울기가 더욱 큰 지수함수의 형태를 가진 신호로서 나타내고있다. 뒤 절에서 언급하겠지만 통계적인 특징 중에서 왜도 및 첨쇄도의 영향을 주고있는 한 요인이된다.

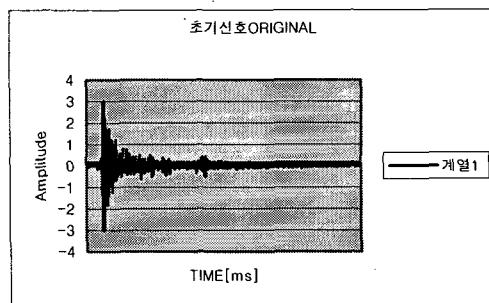


그림8.
변압기 부분방전시 열화초기의 음향방출신호

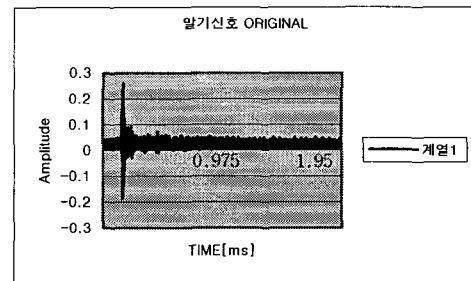


그림9.
변압기 부분방전시 열화말기의 음향방출신호

(2) Daubechies' Wavelet Transform 의 음향방출신호의 적용

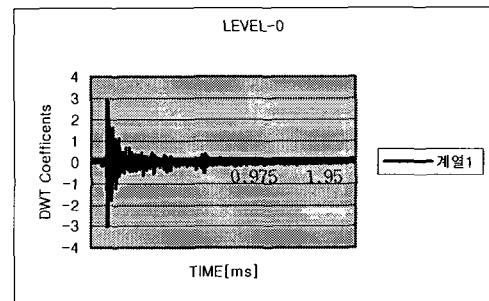


그림18. 음향신호의 이산 웨이블렛변환 Level-0

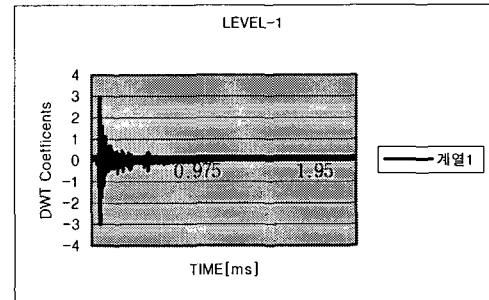


그림19. 음향신호의 이산 웨이블렛변환 Level-1

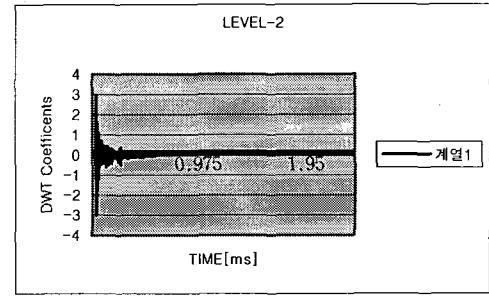
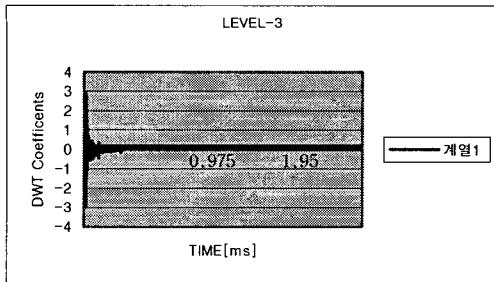


그림20. 음향신호의 이산 웨이블렛변환 Level-2



초기상태 신호 특징	
원형신호 최대값	0.54
웨이블렛 후 최대값	0.5
평균	0.04
분산	0.007
왜도	3.4
첨쇄도	20

그림21. 음향신호의 이산 웨이블렛변환 Level-3

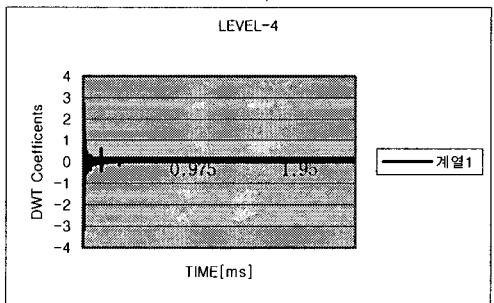


그림22. 음향신호의 이산 웨이블렛변환 Level-4

부분방전시 발생된 음향방출신호를 Daubechies' 마더 웨이블렛 이산 필터계수를 표1에서 나타내었다. Visual C++ 6.0으로 다중-분해능 이산웨이블렛을 자체알고리즘한 결과 음향방출신호에 적용한 결과를 그림18에서 22까지 각 레벨인 Level-0, Level-1, Level-2, Level-3, Level-4까지 나타내었다.

본 연구에서 특징추출을 위한 통계파라메터에 적용하기위해서 DWT의 Level-3으로 고정하여 모든신호를 DWT하였다.

하나의 파일에서 나타낸 신호는 16384포인트인데 DWT의 Level-3으로 하면 $\frac{16384}{2^3}$ 개의

2048포인트의 Zero Cross 의 Positive 값을 재 배열하여 각 통계파라메터에 적용하였다.

Daubechies' 이산웨이블렛이 음향방출신호의 분석 및 합성에 용이함을 알 수가 있었다.

4. Feature Extraction

(1) 열화 초기상태 특징추출

(2) 말기열화상태 특징 추출

말기상태 신호 특징	
원형신호 최대값	0.12
웨이블렛 후 최대값	0.1
평균	0.009
분산	0.0033
왜도	4
첨쇄도	23

초기, 말기의 열화상태 신호의 특징으로서 통계파라메터인

1. Maximum Value (original signal)
2. Maximum Value (after DWT)
3. Average Value
4. Dispersion
5. Skewness
6. Kurtosis

의 각 특징을 초기 및 말기의 자료를 평균화 한 값을 나타내고있다.

IV. 결론

본 연구에서 다음 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1. 마더웨이블렛의 선정시 HAAR의 이산 웨이블렛은 음향방출신호에 부적합하고, Daubechies' Discrete Wavelet Transform이 적합하다는 사실을 알 수가 있었다.
2. 랜덤노이즈의 제거기법으로서 FIR Digital Filter의 알고리즘이 상당한 노이즈를 제거할 수가 있었다.
3. DWT의 Multi-Decomposition시 Level -3가 특징추출 위해서 사용되었다.
4. 열화초기-말기 신호패턴의 특징을 추출한 결과에 대해서

- (1) 초기에서는 펠스의 진폭이 말기
에 비하여 상대적으로 크지만,
말기에서는 작았다.
 - (2) 초기상태에서는 펠스발생
duration time이 길고 말기에서
는 단발성펄스로서 극히 짧았
다.
 - (3) 왜도 및 첨쇄도의 경우도 초기
와 말기에서 공통적으로 지수함
수적인 펠스 즉, 신호전반부에
서 높다가 급강하하는 형태를
이루고 있었다.
그러나 말기에서는 급강하하는 정
도가 더욱 커서 왜도 및 첨쇄도가
초기에 비하여 상대적으로 컸다.
5. 초기상태 신호의 경우 *duration time* 이 크게 되는 경우는 부분방전
신호 원이 모의 변압기 내부 중앙에
위치하여 발생된 신호가 사방벽면의
반사에 기인될 수가 있다고 사료 됩니다.