

# 웨이브렛 변환을 이용한 Exercise ECG 신호분석 알고리즘의 개발

박광리, 이경중

연세대학교 보건과학대학 의용전자공학과

## Development of Exercise ECG Analysis Algorithm Using Wavelet Transform

G.L.Park, K.J.Lee

Dept. of Biomedical Eng. college of Health Science, Yonsei Univ.

### Abstract

In this research we would like to develop an exercise ECG signal analysis algorithm using the wavelet transform, which is possible to analyze the time and the frequency simultaneously. Wavelet transform has an advantage of dividing the nonstationary signals into the high frequency and low frequency band successively. Thus, it can separate the unnecessary noises from the frequency band of QRS complex and then using the selected frequency band we could detect the QRS complex and ST segment.

QRS 콤플렉스의 주파수를 포함하고 있는 대역과 60Hz 전력선 잡음, 기저선 변동 및 근잡음의 잡음 대역을 분리시킴으로써 QRS 콤플렉스 검출율을 향상시킬 수 있다.

본 연구는 exercise ECG 신호분석시 웨이브렛 변환을 이용함으로써 신호에 포함된 잡음을 제거하고 효과적으로 QRS 콤플렉스와 ST 세그먼트를 검출할 수 있는 알고리즘을 개발하려고 한다.

### 웨이브렛 변환

### 서 론

최근 심장질환의 발병이 증가함에 따라 심전도 검사에 대한 필요성의 증가와 더불어 정상 상태에서 측정하는 진단 심전계와 달리 운동부하 상태에서 발생하는 이상 신호를 검출하기 위한 exercise ECG에 대한 관심이 높아지고 있다. exercise ECG 신호는 피검자가 심한 운동 부하 상태에서 기록되기 때문에 60Hz 전력선 잡음, 기저선 변동 및 근잡음이 포함되어 있다. 이와 같은 잡음을 효과적으로 제거하고 정확한 QRS 콤플렉스를 검출하기 위한 알고리즘이 많이 제시되었지만 운동부하가 큰 exercise ECG의 경우에는 잡음제거를 위한 효과적인 알고리즘이 제시되지 못하고 있는 실정이며 잡음제거를 위해 mean 알고리즘, median 알고리즘 [1], hybrid 알고리즘, increment 알고리즘 [2] 등이 사용되고 있으나 QRS 콤플렉스 검출 및 ST 세그먼트의 검출에는 어려움이 있다. 최근 시변(time-varying) 불안정 신호를 주파수 대역별로 분할하여 분석할 수 있는 장점을 가지고 있는 웨이브렛 변환이 심전도 신호분석에 응용되어 잡음제거시 좋은 성능을 나타내고 있으며 [3], 압축, 뇌파, 및 이미지 처리 분야등 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 웨이브렛 변환은 exercise ECG 신호를

웨이브렛 변환은 웨이브렛 함수와 스케일 함수를 시변 입력신호와 곱하여 주파수 영역에서 고주파와 저주파로 주파수 분할을 하게 된다 [4].

$$\Psi(n) = \sum_k h(k) \Phi(2n-k) \quad (1)$$

$$\Phi(n) = \sum_k g(k) \Phi(2n-k) \quad (2)$$

( $\Psi$  : 웨이브렛 함수,  $\Phi$  : 스케일 함수)

위의 식 (1), 식 (2)에서  $h(k)$ 는 웨이브렛 함수의 계수로써 고주파 통과 필터 계수와 같은 역할을 하며,  $g(k)$ 는 스케일 함수의 계수로써 저주파 통과 필터의 계수로써 작용을 한다. 각 함수들의 계수에 의해서 주파수 분할이 이루어지기 때문에 심전도 분석에 유용한 모 웨이브렛(mother wavelet)을 선택하기 위한 모 웨이브렛의 주파수 분석은 매우 중요하다. 모 웨이브렛의 주파수 분석과 이를 근거로 심전도 신호 분석에 가장 적합한 웨이브렛을 선택하여야 한다. 본 논문에서는 잡음제거와 QRS 콤플렉스 및 ST 세그먼트 검출을 위해 웨이브렛 변환을 취하게 되는데, 잡음제거시 고주파 영역을 '0'으로 만들어줄 때 발생하는 신호왜곡을 최소화하기 위하여 고주파의 영향을 최소화하는 Vaidyanathan and Hoang 필터 계수를 사용하였다 [5].

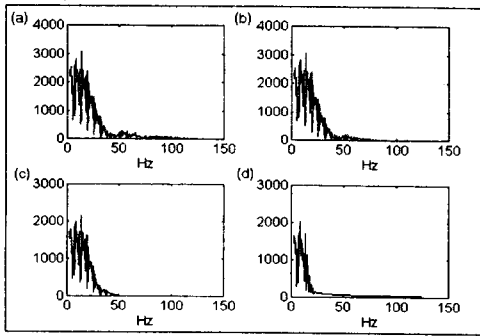


그림 1 스케일 함수에 의한 스펙트럼  
(a) 입력신호 (b)  $j=-1$  (c)  $j=-2$  (d)  $j=-3$

그림 1은 스케일 함수를 이용하여 웨이브렛 변환을 취할 때, 레벨의 감소( $j = -1, -2, \dots, -k$ )에 따라 신호의 주파수 스펙트럼이 'dyadic' (이분)으로 분할됨을 나타낸다. 샘플링 레이트는 aliasing 을 발생시키지 않기 위해 신호가 포함하고 있는 주파수 성분의 2배 이상으로 설정해주어야 하기 때문에 레벨이 감소함에 따라 샘플링 레이트가 1/2로 감소되며, 각 레벨에서의 차단 주파수도 1/2로 감소된다. 이와 같이 웨이브렛 변환은 신호가 가지고 있는 주파수 성분을 분할 및 분석할 수 있다.

$$D_{2j} [x(n)] = \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{2j}(K) \Psi_{2j} (n-2^j k) \quad (3)$$

$$C_{2j} [x(n)] = \sum_{k=0}^{2^j-1} c_{2j}(K) \Phi_{2j} (n-2^j k) \quad (4)$$

식 (3)은 detail 신호로써 식 (1)의 웨이브렛 함수와 translation factor인 'd' 에 의해서 입력신호의 고주파 성분을 레벨에 따라 분할하며, 식 (4)는 approximate 신호로써 식 (2)의 스케일 함수와 스케일 factor인 'a' 에 의해서 입력신호의 저주파 성분을 레벨에 따라 분할한다.

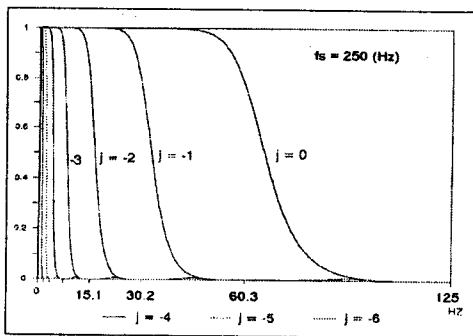


그림 2 스케일 함수에 의한 주파수 특성

그림 2는 스케일 함수의 웨이브렛 변환에 의한

주파수 특성을 나타내고 있다. 그림 1은 스케일 함수가 웨이브렛 변환함에 의해서 입력되는 신호 중 저주파 성분이 저역통과 필터를 통과한 것과 같은 결과를 나타낸다. 또한 분리된 각 주파수 영역에서는  $j = 0, -1, -2, -3, \dots, -k$  까지 레벨이 변화하면서 점점 저주파 성분으로 주파수를 분할하게 된다. 결국 웨이브렛 변환은 고정된 윈도우를 갖는 STFT(Short Time Fourier Transform)와 달리 윈도우의 길이를 'dyadic'으로 줄여가면서 주파수를 분할하기 때문에 불안정성 특성을 갖는 신호 분석에 매우 유용하다. 심전도의 경우 신호가 여러 주파수 성분을 갖는 시변 신호이며, 불안정성하기 때문에 주파수를 분석함에 있어서 기존의 푸리에 변환보다 웨이브렛 변환을 이용할 경우 정확한 분석이 가능하다.

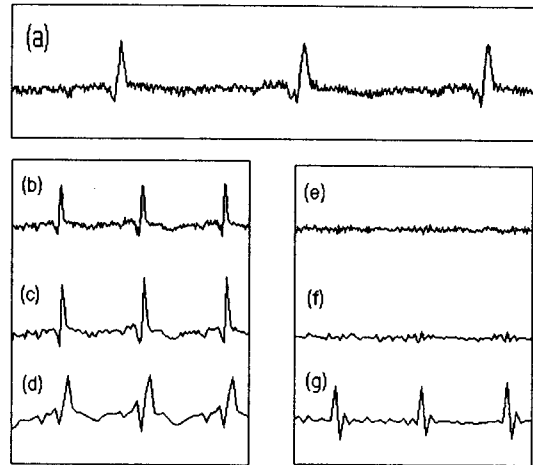


그림 3 웨이브렛 변환에 의한 주파수 분할  
(a) 입력신호 (b)-(d) 저주파 (e)-(g) 고주파

그림 3은 입력 신호에 대해 웨이브렛 변환을 취하여 저주파 영역과 고주파 영역으로 분할된 결과 파형이다

### 신호분석 알고리즘

#### ① 잡음제거

진단 알고리즘은 크게 잡음제거를 위한 웨이브렛 수축 변환과 검출을 위한 확장 변환으로 나눌 수 있다. 웨이브렛 수축 변환은 신호를 고주파 영역과 저주파 영역으로 주파수를 분할하며, 웨이브렛 확장 변환은 수축변환에 의해 얻어진 고주파 영역을 '0'으로 만들어 줌으로써 원하지 않는 고주파 영역을 제거하여 QRS 콤플렉스 및 ST 세그먼트 검출에 사용할 최종적인 신호를 얻게 된다. ST 세그먼트는 심전도 신호의 저주파 성분으로써 잡음제거시

웨이브렛 변환을 이용한 Exercise ECG 신호분석 알고리즘의 개발

발생되는 저주파 영역의 왜곡을 최소화하는 것이 중요하며, 이를 만족하는 최적의 웨이브렛 함수를 선택해야 한다.

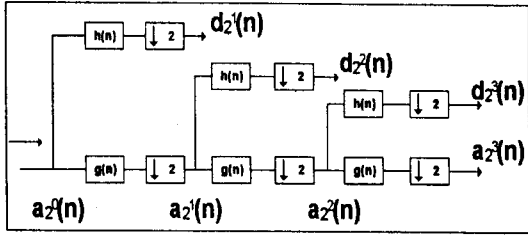


그림 4 웨이브렛 수축 변환 블럭도

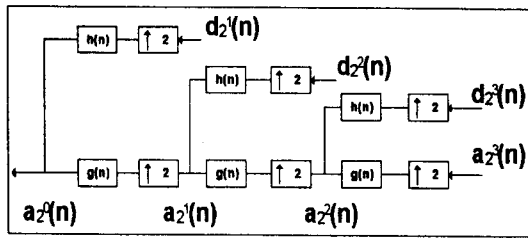


그림 5 웨이브렛 확장 변환 블럭도

그림 4와 그림 5는 피라미드 알고리즘에 의한 웨이브렛 수축 변환과 확장 변환에 대한 블럭도이다 [6]. 웨이브렛 확장 변환시 고주파 필터 계수인  $g(n)=0$ 으로 만들어 줌으로써 검출에 사용할 최종적인 신호  $a_2^0$ 를 얻게되며, 그 결과 파형은 그림 6과 같다.

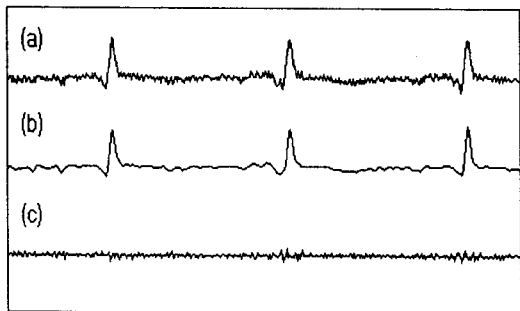


그림 6 웨이브렛 변환을 이용한 잡음제거 (a) 입력파형 (b) 잡음제거 파형 (c) 잡음

② QRS 콤플렉스 및 ST 세그먼트 검출

잡음을 제거한 최종 신호는 약 0-30Hz의 주파수 대역을 가지고 있으며, 이 파형에 미분을 취함으로써 P파나 T파등 QRS 콤플렉스를 검출하는데 오류를 발생시키는 파라메타를 제거시킨다. 그림 7은

웨이브렛 확장, 수축 변환을 이용하여 잡음을 제거한 후 미분을 취하여 QRS 콤플렉스를 검출한 결과 파형이다. QRS 콤플렉스는 적응 문턱치 방법을 이용하여 검출하였다[7]. 적응 문턱치 방법은 초기 문턱치  $H_1$ 을 식 (5)와 같이 미분신호 최대치  $PK_1$ 의 80%로 설정하고,

$$H_1 = 0.8 PK_1 \quad (5)$$

그 다음 문턱치  $H_{n+1}$ 부터는 식 (6)을 근거로 설정한다.

$$H_{n+1} = 0.8H_n + 0.2 (0.8PK_n) \quad (6)$$

검출시 오류를 방지하기 위하여 이전의 검출위치와 현재의 검출위치의 차이를 비교해서 R-R범위가 이전의 범위의 1.8배 이상이 되면 다시 문턱치를 낮추고 다시 검출을 시도한다. 만약,

$$\text{현재 R-R범위} > \text{이전의 R-R범위} \times 1.8 \quad (7)$$

이면, 새로운 문턱치  $Hn'$ 는

$$(Hn') = 0.8 (Hn) \quad (8)$$

으로 재설정된다.

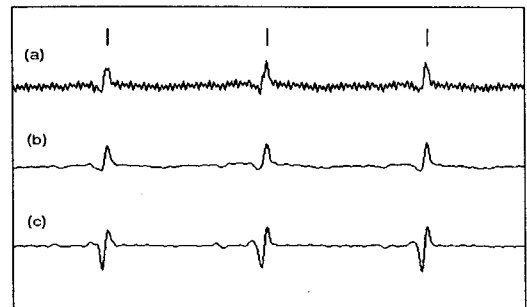


그림 7 QRS 콤플렉스 검출 파형 (a) 입력파형 (b) 잡음제거 파형 (c) 미분파형

Exercise ECG에 있어서 ST 세그먼트는 매우 중요한 진단 파라메타이다. ST 세그먼트를 이용하여 ST 레벨, ST 기울기를 측정하는데 있어서 60Hz 전력선 잡음, 근잡음 및 고주파 잡음은 진단에 오류를 발생시키는 원인이 된다. 또한 잡음제거시 발생하는 저주파 영역의 신호왜곡도 ST 세그먼트 검출에 어려움을 준다.

$$ST = R + 64ms + \max[4, (200 - \text{심박수})/16] \times T \quad (9)$$

식 (9)는 심박수에 따라 ST 세그먼트를 설정할 수 있도록 하였다.

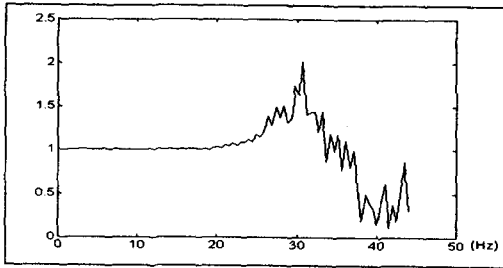


그림 8 잡음제거 신호에 대한 주파수 스펙트럼

그림 8은 입력신호에 대한 잡음제거비를 나타낸 주파수 스펙트럼으로써 저주파 영역에서 왜곡이 발생되지 않음을 알 수 있다. 웨이블릿 변환을 이용한 잡음제거 방법은 저주파 영역에는 전혀 영향을 미치지 않기 때문에 ST 세그먼트 검출에 정확성을 높일 수 있다.

### 결 론

- 1) 웨이블릿 변환을 이용함으로써 exercise ECG 신호에 왜곡을 발생시키지 않고 잡음을 제거함으로써 신호의 질을 향상시킬 수 있다.
- 2) 신호의 질이 향상됨에 따라 QRS 콤플렉스 검출율을 높일 수 있게 되므로 진단의 정확성을 높일 수 있다.
- 3) 웨이블릿 변환이 신호의 저주파 성분에 영향을 미치지 않기 때문에 ST 세그먼트를 효과적으로 검출할 수 있다.

### 참고문헌

- [1] Mertents J, and Mortara D, "A new algorithm for QRS averaging", Computers in Cardiology, pp. 367-369, 1984.
- [2] Albrecht P, Rice K, Jarisch WR, and Mark G, "Efficient measurement of long term ST segment trends", Proc. of 5th annual Conference, pp. 644-649, 1983.
- [3] Valtino X. Afonso, Willis J. Tomkins et al., "Comparing Stress ECG Enhancement Algorithm", IEEE Engineering in medicine and Biology, pp. 37-44, May/June 1996.
- [4] Metin Akay, "Wavelet in Biomedical Engineering," Anals of Biomedical Engineering,

Vol. 23, pp. 531-542, 1995.

[5] martin Vetterli and Jelena Kovacevic, "Wavelet and Subband Coding", Prentice Hall, 1995.

[6] Ali N. Akansu, and Richard A. Haddad, Multiresolution Signal Decomposition, Academic Press, 1992.

[7] P. Laguna, N.V. Thakor, P. Caminal, R. Jane and Hyoung Ro Yoon, " New algorithm for QT interval analysis in 24-hour Holter ECG : performance and applications", Med. & Bio. Eng & Comput, pp. 67-73, Jan, 1990.

[8] Mladen Victor Wickerhauser, Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software, IEEE Press, 1993

[9] Nitish V. Thakor, and Sun Yi-chun, "MULTIWAVE:A Wavelet-based ECG Data Compression Algorithm", IEEE Conference, pp. 393-396, 1993.

[10] Cuiwei Li, Chongxun Zheng, "QRS Detection by Wavelet Transform, IEEE Conference, pp.330-331, 1993.