

Wavelet 변환을 이용한 유발전위뇌파의 해석에 관한 연구

이용희*,최교환**,이동규*,유시영*,이용구*,김선일**,이두수*
*한양대학교 공과대학 전자공학과, **의과대학 계량 의학교실

A study on the analysis of evoked potentials using wavelet transform

Y.H. Lee, K.H. Choi, D.G. Lee, S.Y. You, E.G. Lee, S.I. Kim, D.S. Lee
Dept. of Electronics and Dept. of Medical Information, Hanyang Univ.

Abstract

Evoked potentials signals occur as a result of neuroelectric responses of the brain to sensory stimulation. In this paper, to analysis such signals we utilize a time-frequency analysis technique called wavelet transform. The wavelet analysis is performed based on a single prototype function, which can be thought of as a bandpass filter. Because the wavelet transform in a fine temporal analysis decomposes time-varying signals in EP into a dilated lowpass and a contracted highpass components, EP signal fetures can be obtained and analyzed quantitatively at the levels of resolution. In the results, we analyze the VEP signal with the wavelet transform.

서론

유발전위 뇌파는 뇌에서의 자극에 따른 전기 생리학적 반응을 나타낸 것으로 뇌에서의 신경학적인 손상은 유발전위뇌파에 나타난다. 이러한 유발전위뇌파가 뇌에서의 손상이나 활동을 반영한다는 사실은 많은 연구결과에 의해 보고되 왔다. 따라서 유발전위뇌파의 해석에 의해 뇌에서의 신경학적인 손상을 검출할 수 있거나 임상에게 보다 정확한 진단 자료를 제공할 수 있게 되면 환자에 있어서 그 만큼 시간적인 치료시기나 비용적인면에서 큰 도움이 될 것이다. 그러나 유발전위뇌파는 주변잡음과 자발적인 뇌파에 물려 그 특성을 정확하게 나타내는데는 어려움이 많이 있다.

이러한 유발전위 뇌파의 해석은 다양한 접근 방법에 의해 오래전부터 진행되어 왔다. 시간영역에서 평균 가산법에 의해 유발전위뇌파를 측정하여 해석하거나 주파수 영역에서 파워스펙트럼을 해석하여 특징을 얻는 방법, 적응 필터를 이용하여 주변잡음을 제거함으로써 향상된 유발전위뇌파의 특징을 얻는방법등이 있다.[1][2] 이러한 방법에 의해 얻어진 유발전위뇌파는 임상상의 많은 경험과 통계적인 특성에 의해 해석되 왔다. 본 논문에서는 유발전위뇌파에서 진단을 위한 유용한 특징 파라메타를 얻고 이를 정량적으로

해석하기 위해 시간-주파수 해석법인 wavelet변환을 이용한다.신호를 해석하기위한 가장 일반적인 접근 방법은 신호의 시간에 따른 주파수 영역에서의 특성을 해석하는 것이다.[3][4][5] 안정성(stationary)신호의 경우 신호의 주파수 영역 해석은 Fourier 변환을 통해 수행된다. 그러나 비안정성(nonstationary)신호를 해석하는데는 신호의 변화성과 불연속성 문제에 부딪친다. 즉 신호의 주파수가 변화하는 경우나 불연속적으로 변화하는 신호의 경우 Fourier 변환은 전 시간영역 구간에 걸쳐 수행하기 때문에 시간에 따른 주파수 영역에서의 localization 특성이 좋지 않다. Gabor(1946)는 Fourier변환에서 고정된 길이의 window함수를 이용하여 시간영역에 걸쳐 이동함으로서 그 구간에서 포함된 주파수 성분을 해석하는 STFT(short time fourier transform)을 전개하였다. 이것은 Labiner에 의해 음성신호를 해석하는데 효과적으로 이용되었다. 그러나 STFT해석은 고정된 window길이에 의해 고정된 시간-주파수 해상도만을 제공하기 때문에 시간에 따라 변화하는 신호에서 시간-주파수영역 둘 다에 대해 포함된 정보를 알고자 하거나 특정시간에 신호에 포함된 주파수성분을 알고자 할 경우 시간-주파수 영역 해석을 고려하게 된다.

Wavelet 변환

wavelet은 다른 척도(scale)과 해상도(resolution)을 가지고 신호를 해석하는 시간-주파수 영역 해석 방법으로 시간에 따라 서서히 변화하는 신호를 해석하는데 적합하다. wavelet 변환은 Grossmann과 Morlet에 의해 수학적으로 소개된 이후 시변신호를 다루는데 유용하게 이용되 왔다. 본 논문에서는 Morlet에 의해 전개된 다해상도 wavelet 해석을 적용한다. [1][4][5]

Z 를 정수집합 R 을 실수의 집합 R^+ 를 양의 실수의 집합 $L^2(R)$ 은 자승적분가능함수의 Hilbert공간으로 정의 한다. wavelet 변환은 $L^2(R) \rightarrow L^2(R^2)$ 으로 사상하는 변환이다. wavelet 변환은 다음과 같이 기저 함수와 신호의 내적으로 정의한다.

$$\mathcal{W}(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{ab}(t) f(t) dt = \langle \Psi_{ab}, f \rangle \quad (1)$$

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

여기서 $a \in R^+, b \in R$ 이며 $\Psi(t)$ 는 mother wavelet 기저 함수이다. a 가 크면 기본 wavelet를 확장하여 저역통과함수로 동작하며 작은 값이면 짧은 시간 주기에서 고역 통과 함수로서 나타나게 된다. $\Psi_{ab}(t)$ 는 wavelet 계열로서 a 는 척도 인자이며 b 는 시간에 걸쳐 이동하는 인자이다. 이산시간에서의 wavelet은 식 2)에서 $a_0 = a_0^m, b = nb_0 a_0^n$, $n, m \in Z$ 로 놓고 이산화하면 wavelet 계열은 다음과 같이 쓸 수 있다

$$\Psi_{mn}(t) = a_0^{-\frac{m}{2}} \Psi(a_0^{-m}t - nb_0)$$

임의의 신호 $f(t) \in L^2(R)$ 는 다음식에 의해 나타낼 수 있다.

$$f(t) = \sum_m \sum_n c_{m,n} \Psi_{mn}(t) \quad (3)$$

여기서 wavelet 계수 $c_{m,n}$ 은 다음의 내적으로 표현된다.

$$c_{m,n} = \langle f, \Psi_{mn} \rangle$$

다해상도 wavelet 해석은 단일 기본 함수의 확장과 이동에 의해 형성된 기저 함수를 사용하여 수행한다. 이것은 $L^2(R)$ 의 부공간 $\{V_m | m \in Z\}$ 로 구성한다. 신호는 각 해상도 레벨에서 다해상도 부공간과 직교 부공간으로 나뉘게 된다. 즉

$$\dots V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \dots$$

이것은 임의의 신호 $f(t) \in V_m \Leftrightarrow f(2x) \in V_{m-1}$ 이고 $V_m \subset V_{m-1}$ 이 성립함을 의미한다. 여기서 $m \in Z$ 이다. W_m 을 V_{m-1} 의 직교 여집합으로 놓으면 $V_{m-1} = V_m \oplus W_m, V_m \perp W_m$ 이며 반복적으로 수행하면 $L^2(R)$ 공간은 무한한 W_m 공간으로 나타낼 수 있게 된다.

$$\dots W_i \oplus W_{i-1} \oplus \dots W_0 \oplus \dots \oplus W_{i+2} \oplus W_{-I+2} \dots = L^2(R)$$

이것은 척도 함수 $\phi(t)$ 에 의해 반복적으로 수행한다. 척도 인자를 2의 급수로 정하게 되면 m번째 레벨에서 다해상도 부공간 V_m 은 basis 함수

$$2^{\frac{m}{2}} \phi(2^{-m}t - n)$$

에 의해 나타내지고 V_m 에 직교 공간 W_m 은 $2^{\frac{m}{2}} \Psi(2^{-m}t - n)$ 에 의해 나타낸다 여기서 $n \in Z$ 이다. 이것은 octave대역을 같은 대역통과 필터구조가 된다. 즉 대수척도에 비례하는 주파수 대역을 나타낸다. 그림 1은 m에 따른 주파수 대역을 나타낸 것이다. 그림 2는 여기서 $\phi(t)$ 는 scaling 함수라 하고 $\Psi(t)$ 는 wavelet 함수라 한다. scaling 계수는

$$d_{mn} = \langle f, \phi_{mn} \rangle$$

이며 wavelet 계수는

$$c_{mn} = \langle f, \Psi_{mn} \rangle$$

이다. 여기서 실제의 구현은 QMF(quadrature mirror filter) 쌍으로

$$d_{mn} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \bar{h}(2n-k) d_{m+1,k} \quad (4)$$

$$c_{mn} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \bar{g}(2n-k) d_{m+1,k} \quad (5)$$

$$\bar{h}(n) = h(-n) \quad (6)$$

$$\bar{g}(n) = g(-n)$$

$$g(n) = (-1)^n h(1-n)$$

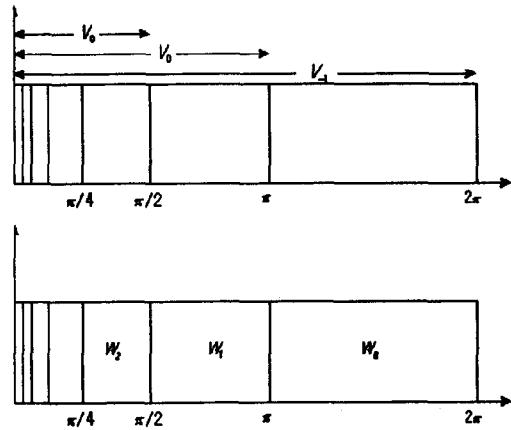


그림 1. octave 대역의 직교 부공간 V_m 과 W_m

와 같이 계산한다. d_{mn} 은 신호의 고역 통과 필터 성분을 얻을 수 있으며 c_{mn} 은 신호의 저역통과 성분을 나타낸다. 그림 2는 계층구조의 다해상도 wavelet 변환 구조이며 그림 3은 Daubechies 6-tab wavelet에 의한 QMF 쌍에 의한 필터 응답이다.

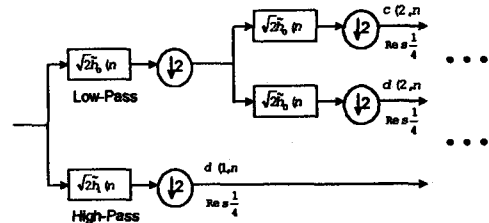


그림 2. 계층구조의 다해상도 wavelet 변환 구조

VEP신호의 wavelet 변환 및 고찰

실험은 시각유발전위뇌파(VEP)를 측정하여 해석하였다. 자극은 LED matrix 가늘을 통해 2회/sec 를 주었다. VEP측정은 샘플링 주파수 1024Hz로 하였으며 Grass P511을 통해 CED 1401 plus 에서 얻었다.

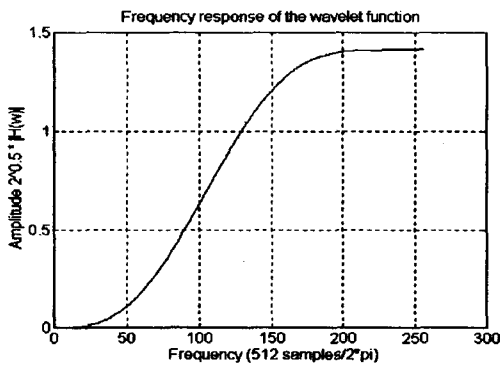
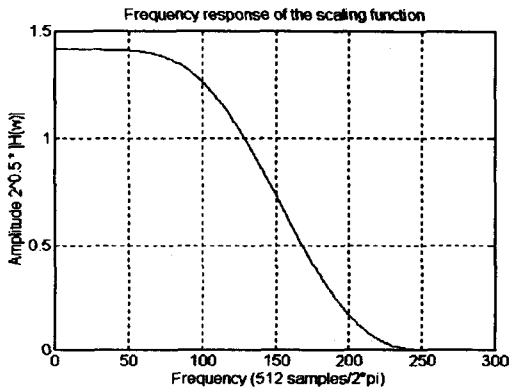


그림 3. Daubechies 6-tab wavelet에 의한 QMF 쌍에 의한 필터 응답

자극의 형태는 양쪽에 동시에, 그리고 왼쪽, 오른쪽에 각각 수집하였다. 100회 평균 가산 데이터를 측정하였다. 그림 4은 정상인의 평균가산한 VEP신호이다. 본 논문에서는 주파수 영역에서 최대 평단화를 제공하는 Daubechies wavelet을 이용하였다. Daubechies 6-tab의 계수 $h(n)$ 은 다음과 같다.

[0.3327 0.8069 0.4599 -0.1350 -0.0854 0.0352]

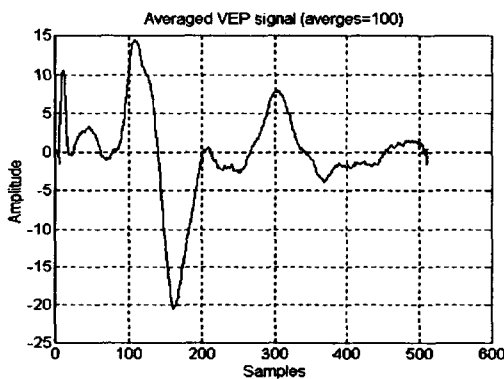


그림 4. 평균가산한 VEP신호(정상인)

그림 5는 4레벨의 wavelet 변환을 수행한 결과이다. 위에서부터 $m=1$ 부터 4까지의 수행 결과이며 좌측이

저역 통과 성분이며 우측이 이에 직교인 고역 통과 성분을 나타낸다. 이 결과에서 알수 있듯이 일반적인 임상에서 얻는 대부분의 정보는 저역통과영역에서 얻을 수 있으며 이와 직교인 고역통과성분에서는 각 레벨에서의 보다 세밀한 시간영역에서의 특성을 나타내고 있다. 그림 6는 그림5에서 나타난 각 레벨에 따른 신호를 주파수 영역에서 나타낸 것이다. 좌측이 저역통과성분의 결과이며 우측이 고역통과성분이다.

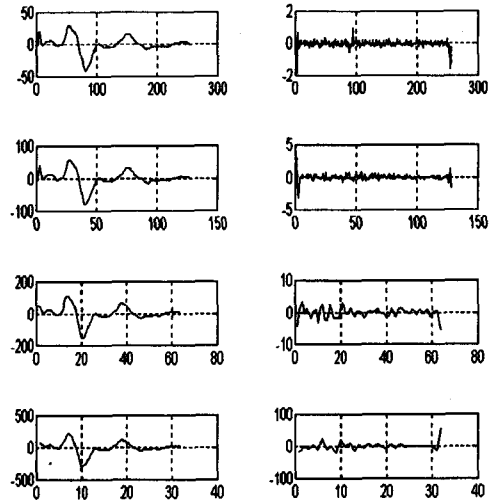


그림 5. VEP신호의 wavelet 변환 (4-레벨 Daubechies 6-tab wavelet)

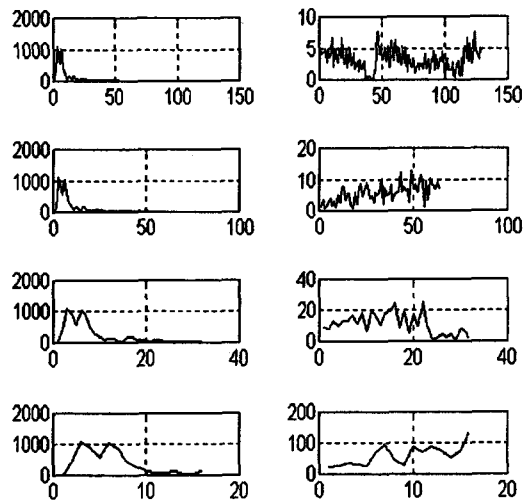


그림 6. 주파수 영역에서의 VEP신호 (4-레벨 Daubechies 6-tab wavelet)

결 과

본 연구에서는 시간-주파수 영역해석법인 wavelet 변환을 통해 VEP신호를 해석하였다. 이 방법은 기존의 푸리에 변환에 변환에 의해 파악하기 어려운 시간에 따라 변화하는 신호를 해석하는데 적합하며 시간의 척도를 변화시킴으로서 주파수 영역에서의 특징을

해석할 수 있었고 각 해상도 레벨에서 직교공간인 고역 주파수성분과 저역 주파수 성분으로 구분함으로써 좀 더 다양한 EP신호의 해석이 가능함을 보였다.

참고 문헌

- 1) Nitish V. Thakor, "Multiresolution Wavelet Analysis of Evoked Potentials," IEEE Trans. Biomedical Eng. Vol. 40. No.11, November 1993.
- 2) Xiao-Hu Yu and Zhen-Ya He, "Time-Varying Adaptive Filter for Evoked Potential Estimation," IEEE Trans. Biomedical Eng. Vol. 41. No.11, November 1994.
- 3) Martin Vetterli and Cormac Herley, "Wavelets and Filter Bank : Theory and Design," IEEE Trans. Signal processing, Vol. 40, No. 9 September 1992.
- 4) S. G. Mallat, " A theory of multiresolution signal decomposition : the wavelet representation," IEEE Trans Patt... Analysis Machine Intell. Vol. 11, pp.674-493, 1989.
- 5) Ali N. Akansu and R. A. Haddad, "Multiresolution Signal Decomposition," Academic Press 1992.