

위전도 신호처리를 위한 웨이브렛 필터와 디지털 필터의 비교

유창용^{1,2} · 남기창^{1,2} · 김수찬^{1,2} · 김덕원²

¹연세대학교 대학원 생체공학협동과정, ²연세대학교 의과대학 의학공학교실
(2002년 1월 24일 접수, 2002년 4월 13일 채택)

Comparison of Digital Filters with Wavelet Multiresolution Filter for Electrogastrogram

C.Y. Ryu^{1,2}, K.C. Nam^{1,2}, S.C. Kim^{1,2} and D.W. Kim²

¹Graduate Program in Biomedical Engineering, Yonsei University

²Department of Medical Engineering, Yonsei University College of Medicine

(Received January 24, 2002. Accepted April 13, 2002)

요약 : 위전도(EGG : electrogastrography)는 비관혈적으로 복부에 전극을 부착하여 위에서 발생하는 위 근육의 전기적인 활동성(gastric electrical activity)을 측정하는 방법이다. 위전도 신호는 주파수가 매우 낮으며(0.0083~0.15 Hz) 진폭이 매우 작기(10~100 μV) 때문에 잡음의 영향을 많이 받게 된다. 이로 인해 FIR(finite impulse response) 필터나 IIR(infinite impulse response) 필터에서는 위전도 신호와 같이 0.1417 Hz의 좁은 대역폭을 가지는 신호를 필터링하기 위해서는 높은 차수로 인해 불안정해지거나 신호가 왜곡되는 경우가 발생한다. 그래서 본 연구에서는 Daubechies 모웨이브렛을 7단계로 확장한 웨이브렛 다단계 분해 필터를 사용하였으며 기존에 많이 사용되는 2종류의 FIR 필터, 4종류의 IIR 필터들을 신호대 잡음비(SNR : signal to noise ratio)과 재생신호 자승오차(RSE : reconstruction squared error) 등의 파라미터를 이용하여 시뮬레이션 위전도 신호를 이용하여 성능을 평가하였다. 정규분포임의잡음(normal distribution random noise)이 합성된 시뮬레이션 위전도 신호를 사용한 웨이브렛 다단계 분해 필터의 SNR은 비교대상이 된 필터들 중, 최고의 SNR에 비해 잡음의 레벨에 따라 각각 9.5, 6.9, 4.7 dB 더 좋은 성능을 보여주었다. RSE에서도 1.22×10^6 , 1.22×10^6 , 1.22×10^6 이 더 적은 에러를 보여주었다.

Abstract : Electrogastrography(EGG) is a noninvasive method for measuring gastric electrical activity on the abdomen resulting from gastric muscle. EGG signals have a very low frequency range(0.0083~0.15 Hz) and extremely low amplitude(10~100 μV). Consequently, EGG signal is easily influenced by other noises. Both finite impulse response(FIR) and infinite impulse response(IIR) filters need high orders or have phase distortions for passing very narrow bandwidth of the EGG signal. In this study, we decomposed EGG signals using a wavelet multiresolution method with Daubechies mother wavelet. The EGG signals were decomposed to seven levels. We reconstructed signal by summing the decomposed signals from level four to seven. To evaluate the performance of the wavelet multiresolution filter(WMF) with simulated EGG signal using two kinds of FIR and four kinds of IIR filters., we used two indices: signal to noise ratio(SNR) and reconstruction squared error(RSE). The SNR of WMF had 9.5, 6.9, and 4.7 dB bigger than that of the other filters at different noise levels, respectively. Also, The RSE of WMF had 1.22×10^6 , 1.16×10^6 , and 1.02×10^6 smaller than that of the other filters at different noise levels, respectively. The WMF performed better in the SNR and RSE than two kinds of FIR and four kinds of IIR filters.

Key words : Electrogastrography, FIR filter, IIR filter, wavelet, RSE, SNR

서론

본 연구는 1998년도 보건복지부 선도기술개발사업 의료공학기술개발사업(과제번호 : HMP-98-G-1-007)의 지원으로 이루어졌음.
통신저자 : 김덕원, (120-752) 서울시 서대문구 신촌동 134
연세대학교 의과대학 의학공학교실

Tel. (02)361-5402, Fax. (02)364-1572

E-mail. kdw@yumc.yonsei.ac.kr

위가 연동운동을 하기 위해서는 세포들의 분극 현상으로 활동전위(action potential)가 선행된다[1]. 정상인의 경우 소화를 위한 일정한 리듬에 따른 활동전위가 발생하나, 위의 활동성이 비정상적일 경우 위가 정상적인 연동운동을 하지 못하여 그에 따라 비정상적인 리듬의 활동전위가 발생하게 되므로 이 활동

전위를 측정하여 위의 활동성(motility)을 알 수 있다[2-5]. 이와 같이 위가 위치한 복부의 표피에 전극을 부착하여 비관혈적으로 활동전위를 측정하는 방법을 위전도(electrogastrography : EGG)라고 한다[6].

정상적인 인체의 위전도 주기는 약 3 cpm (cycles per minute, 1 cpm ≒ 0.01667 Hz)으로 알려져 있으며 보통 0.5~9 cpm 정도를 위전도 신호로 보고 있다[7,8]. 사람의 위전도 신호는 보통 위서맥(bradycastria, 0.5~2.4 cpm), 3 cpm (normal EGG, 2.4~3.7 cpm), 위빈맥(tachycastria, 3.7~9 cpm)의 범위로 구분을 한다[8]. 위전도 신호의 범위인 0.5~9 cpm은 주파수로 변환하면 0.0083~0.15 Hz로 0.2 Hz 미만의 매우 낮은 주파수이고, 0.1417 Hz의 매우 좁은 대역을 가지는 신호이며 10~100 μV의 매우 작은 신호이다. 그러므로 잡음의 영향을 많이 받으며 특히 저주파 대역에 신호이어서 기저선 변동이 큰 영향을 주기 때문에 이러한 잡음을 제거하기 위해서는 전처리 과정이 반드시 필요하다. 일반적으로 하드웨어적인 필터링으로 1차적인 전처리를 하고, 2차적으로 디지털적인 필터링 방법인 FIR(finite impulse response) 필터, IIR(infinite impulse response) 필터 등 여러 가지 디지털 필터가 사용된다. 그러나 대역폭이 아주 좁은 위전도 신호의 경우 FIR 필터는 상당히 높은 차수를 필요로 하고 이로 인해 위상 변화(phase shift)가 생기며 IIR 필터는 높은 차수에서 불안정해지는 문제가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 웨이블릿 다단계 분해를 이용하여 위전도 신호를 필터링하였다. 웨이블릿 다단계 분해를 이용한 위전도 신호 필터링의 성능을 평가하기 위해서, 정현파의 조합으로 만들어진 위전도 신호와 랜덤잡음을 섞어 만든 신호를 웨이블릿 다단계 분해, FIR과 IIR 필터들을 이용하여 필터링을 한 후, 신호대 잡음비, 필터링 처리 속도, 재생신호 자승오차 등의 파라미터를 이용하여 필터의 성능을 비교하였다. 또한 실제 위전도 신호에

적용한 결과를 보였다.

방 법

웨이블릿은 제한된 기간 동안에만 유효하며 평균적인 합이 0인 파형을 의미한다[9]. 즉 푸리에(Fourier) 변환의 정현파와 같은 경우 연속적인 파형이나, 웨이블릿은 제한된 시간에서만 존재하며 시간이 지남에 따라 감쇠가 일어난다. 그림 1(a)에서처럼 푸리에 분석이 신호를 여러 종류의 주파수를 가지는 정현파로 분해하는 것이라면 웨이블릿 분석은 그림 1(b)에서처럼 신호를 다양한 천이(translation)와 스케일링(scaling)을 갖는 모 웨이블릿(mother wavelet)으로 분해하는 것이다[10]. 그러므로 주파수 대역에 따라 서로 다른 분해능을 가지는 윈도우 함수를 제공하며 연속 웨이블릿 변환은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$W_g [f(x)] (a, b) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int f(x) g^* \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \quad (1)$$

a : 스케일링 변수

b : 천이 변수

f(x) : 시평면 신호

g(x) : 모 웨이블릿, *는 conjugation

웨이블릿 변환의 결과로 얻는 것은 그림 2에서와 같이 큰 진폭과 저주파 성분을 가지는 저주파계수(approximation)와 작은 진폭과 고주파 성분을 가지는 고주파계수(detail)이다. 그림 2에서 cD는 원래 신호 S의 고주파 성분을 의미하는 것이고 cA는 저주파 성분을 의미한다. 여기서 저주파와 고주파 신호는 그 신호의 길이가 원래 신호의 반으로 줄어드는 다운 샘플링(downsampling)으로 얻어진다. 본 논문에서는 웨이블릿 다단계 분해를 위해서 다운 샘플링 된 신호를 보간법으로 원

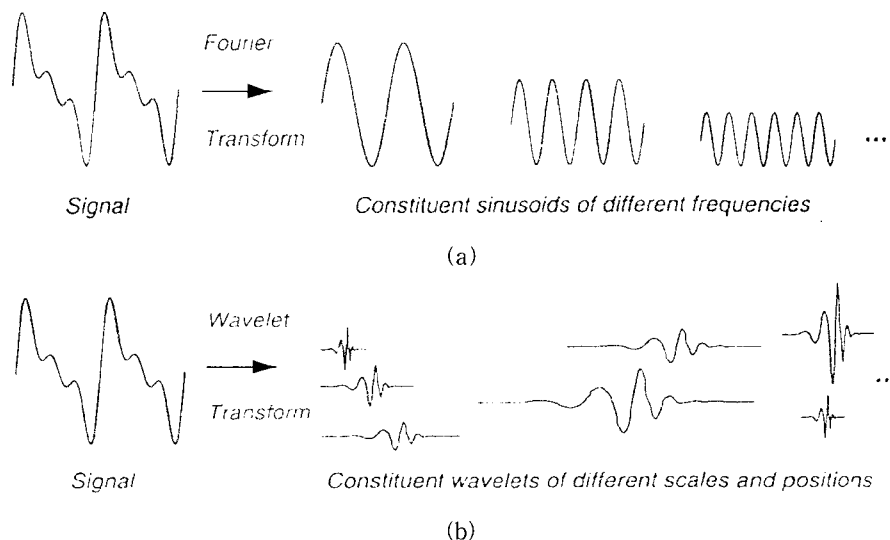


그림 1. (a) Fourier 분석의 개념 (b) 웨이블릿 분석의 개념

Fig. 1. (a) The concept of Fourier analysis (b) The concept of Wavelet analysis

래의 신호와 같은 크기로 만들어서 다단계의 프로세싱을 하였다. 그림 2는 1단계의 변환을 실행한 것이며, 여기서 저역 통과를 거친 저주파를 계속해서 변환을 하여 다단계로 확장할 수 있다.

웨이브렛의 종류와 계수의 크기에 따라서 결과의 차이가 있을 수 있으므로 본 연구에서는 필터의 모양이 위전도 신호와 유사한 Daubechies 웨이브렛을 선택했다. 계수의 크기는 필터링 속도와 반비례하므로 필터의 성능과 속도를 고려해서 16 계수를 선택하였다. 필터링에 사용되어진 모 웨이브렛인 16 계수의 Daubechies 웨이브렛은 다운 샘플링에 사용되는 저역과 고역 필터와 업 샘플링(upsampling)에 사용되는 저역과 고역 필터로 구성된다.

1. 웨이브렛 다단계 분해

위전도 신호의 범위는 보통 0.5~9 cpm 혹은 0.5~10 cpm 으로 논의[8]되고 있는데 본 연구에서는 0.5~9 cpm을 위전도 신호의 범위로 보았으며 필터링시에는 차단 주파수를 0.498~7.5 cpm으로 구현하였다. 이것은 아주 좁은 대역폭으로 인해서 천이역(transition band) 자체가 노이즈를 덜 포함하도록 하기 위해서 7.5 cpm으로 고역 차단 주파수를 설정하였다. 비교 대상이 되는 다른 필터들도 모두 같은 차단 주파수로 필터를 구현하였다.

다단계의 주파수 분해에서 나오는 신호는 그림 3에서와 같이 신호 S가 모 웨이브렛을 이용한 저주파와 고주파 필터를 거치면 저주파 성분을 포함하는 A1과 고주파 성분을 가지는 D1의 신호로 분해된다. 여기서 A1을 반복적으로 필터를 거치면 다시 고주파와 저주파 성분으로 나누어지며 계속적으로 D2(A1의 고주파 성분), D3(A2의 고주파 성분), A3(A2의 저주파 성분) 등의 성분들이 얻어지게 된다.

적절한 필터링을 위해서 다단계의 주파수 분해를 하게 되는데 이 단계를 결정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 샘플링 주파수(sampling frequency)를 F_s 라 하고 대역통과 범위(passband frequency range)는 저역 차단 주파수는 F_L , 고역 차단주파수는 F_H , Nyquist frequency를 $F_n(= F_s/2)$ 이라 할 때, 다운 샘플링을 함에 따라서 식 (2)의 주파수들을 경계로

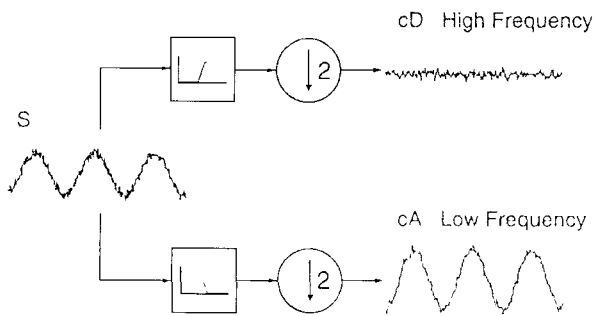


그림 2. 잡음 신호의 웨이브렛 변환 출력
Fig. 2. Wavelet transform output of noise signal

나뉘지게 된다.

n번째 다운 샘플링(D_n, A_n)후의 주파수

$$F_{Dn} = F_{D(n-1)}/2 = F_n/2^n = F_s/2^{n+1} \quad (2)$$

D_n : n번째 다운 샘플링된 고주파 성분($F_{Dn} \sim F_{Dn-1}$ 의 주파수 성분 포함)

A_n : n번째 다운 샘플링된 저주파 성분($0 \sim F_{Dn}$ 의 주파수 성분 포함)

식 (2)에서 마지막의 다운 샘플링은 F_{Dn} 보다 낮은 저주파 성분 A_n 과 F_{Dn} 보다 높은 고주파 성분 D_n 으로 구분되어 진다.

분해된 신호의 복원은 다운 샘플링했던 횟수만큼 업 샘플링(upsampling)을 하면 된다. 이때 대역통과 범위의 신호가 있는 부분들만 업 샘플링을 하게 되면 원하는 신호들만 필터링할 수 있게 된다. 업 샘플링에 사용되는 단계는 주파수 영역을 비교해서 구할 수 있다. 즉, 각 단계의 경계 주파수와 저역, 고역 통과 주파수를 비교하여 구한다. 다단계분해의 각 단계의 경계 주파수와 고역, 저역 차단 주파수와 일치하는 경우에는 해당 단계를 선택하면 되나, 각 차단 주파수가 각 단계 사이의 값일 경우는 식(3)과 같이 비교를 하여 선택한다. 차단 주파수와 경계 주파수와의 차이만큼이 에러의 요인이 된다. 이 에러를 제거하기 위해서는 경계 주파수와 차단 주파수가 일치하도록 샘플링 주파수를 선택하면 된다.

고역 차단 부분은

$$F_{D_{k+1}} < F_H < F_{D_k} \text{에서}$$

$$|F_H - F_{D_{k+1}}| > |F_H - F_{D_k}| \text{ 이면 } D_{k+1} \text{을 선택} \quad (3)$$

$$|F_H - F_{D_{k+1}}| < |F_H - F_{D_k}| \text{ 이면 } D_{k+2} \text{를 선택}$$

단, $k = 1, 2, 3, \dots, n$

저역 차단 부분은

$$F_{D_{j+1}} < F_L < F_{D_j} \text{에서}$$

$$|F_L - F_{D_{j+1}}| > |F_L - F_{D_j}| \text{ 이면 } D_j \text{를 선택} \quad (4)$$

$$|F_L - F_{D_{j+1}}| < |F_L - F_{D_j}| \text{ 이면 } D_{j+1} \text{을 선택}$$

단, $j = 1, 2, 3, \dots, n$

여기서 D_k 혹은 D_{k-1} 단계에서 D_j 혹은 D_{j-1} 단계를 업 샘플링하여 합산(summation)하면 원하는 대역의 신호만을 필터링할 수 있다.

본 연구에서 사용된 필터의 단계는 위 식에서 다음과 같이 구할 수 있다. 샘플링 주파수는 2 Hz이고, 대역통과 주파수의 범위는 0.0083~0.125 Hz이므로 각 주파수는 식 (5)와 같이 구해진다.

$$F_s = 2 \text{ Hz}$$

$$F_H = 0.0083 \text{ Hz}$$

$$F_L = 0.125 \text{ Hz}$$

$$F_n = F_s/2 = 1/2 = 1 \text{ Hz} \quad (5)$$

각 단계별로 다운 샘플링을 했을 때의 경계 주파수는 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{D1} &= F_n/2 = 0.5 \\ F_{D2} &= F_{D1}/2 = 0.25 \\ F_{D3} &= F_{D2}/2 = 0.125 \\ F_{D4} &= F_{D3}/2 = 0.0625 \\ F_{D5} &= F_{D4}/2 = 0.03125 \\ F_{D6} &= F_{D5}/2 = 0.015625 \\ F_{D7} &= F_{D6}/2 = 0.0078125 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 고역 차단 부분은 식 (7)과 같다.

$$F_{D3}(0.125 \text{ Hz}) < F_H(0.125 \text{ Hz}) < F_{D2}(0.25 \text{ Hz}) \quad (7)$$

식(7)에서 식(3)과 같이 계산하여 D4 단계를 선택한다. 저역 차단 부분은 식 (8)과 같다.

$$F_{D7}(0.0078125 \text{ Hz}) < F_L(0.0083 \text{ Hz}) < F_{D6}(0.015625 \text{ Hz}) \quad (8)$$

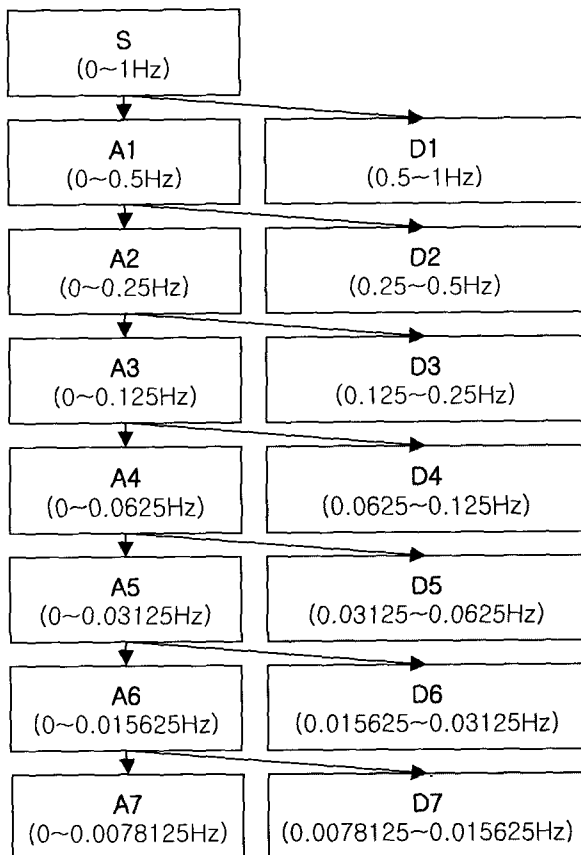


그림 3. 7 단계 웨이블릿 다단계 분해도
Fig. 3. Seven levels wavelet multiresolution block diagram

식 (8)에서 식(4)와 같이 계산하여 D7 단계를 선택한다.

그러므로 D4, D5, D6, D7을 업 샘플링하여 합하고 재구성하면 0.0083~0.125 Hz의 통과영역(passband)을 갖는 필터링을 할 수 있다(그림 3 참조).

2. FIR 필터와 IIR 필터

첫번째 필터는 Parks-McClellan optimal FIR 필터(이하 FIR1)로 위상이 선형적이며 통과영역과 저지영역(stopband)이 모두 리플(ripple)이 고른 특성이 있다. 필터를 위한 계수 b는 식 (9)와 같이 구해진다. 차수는 n에 의해서 결정된다[11].

$$b(k) = b(n+2-k), \quad k=1, \dots, n+1 \quad (9)$$

두번째 필터는 Frequency sampling-based FIR 필터(이하 FIR2)로 임의의 모양의 주파수 응답을 디자인할 수 있으며 필터를 위한 계수 b는 식 (10)과 같이 구했다. 차수는 n에 의해서 결정된다[11].

$$b(z) = b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n} \quad (10)$$

세번째 필터는 Butterworth IIR 필터(이하 IIR1)로 통과영역의 주파수 응답이 아주 평탄하다는 장점이 있다. 그러나 천이영역(transition band)의 경사가 급하지 못하다는 단점이 있다. 필터 계수 b는 식 (11)과 같이 구해지며 차수는 n에 의해서 결정된다[11].

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{1 + a(2)z^{-1} + \dots + a(n+1)z^{-n}} \quad (11)$$

네번째 필터는 Chebyshev type I 필터(이하 IIR2)로 통과영역의 리플이 일정하고 저지영역이 평탄하다. 필터 계수 b는 식 (11)과 같이 구해지며 차수는 n에 의해서 결정된다[11].

다섯번째 필터는 Chebyshev type II 필터(이하 IIR3)로 통과영역이 평탄하고 저지영역의 리플이 일정하다. 필터 계수 b는 식 (11)과 같이 구해지며 차수는 n에 의해서 결정된다[11].

여섯번째 필터는 Elliptic(Cauer) 필터(이하 IIR4)로 Butterworth 필터나 Chebyshev 필터보다 천이영역의 경사가 급하다는 장점이 있으나 통과영역과 저지영역에서 모두 일정한 리플이 있다. 필터 계수 b는 식 (11)과 같이 구해지며 차수는 n에 의해서 결정된다[11].

FIR 필터의 차수는 각각 차수를 증가시켜가며 실제 측정되어진 정상인의 위전도 신호를 필터링하였을 때 신호의 왜곡이 심해지거나(그림 4의 IIR Filter (e) 7th order), 위상이 많이 변화되기 직전의 차수를 선택하였다(그림 4의 FIR Filter (b)~(e)). IIR 필터의 차수는 계산에 의해 최적 차수를 구하고[12], 최적 차수 전후의 차수를 실제 신호에 적용하였을 때 가장 성능이 좋은 차수를 선택하였다(그림 4 참조). 최적의 FIR1는 12차

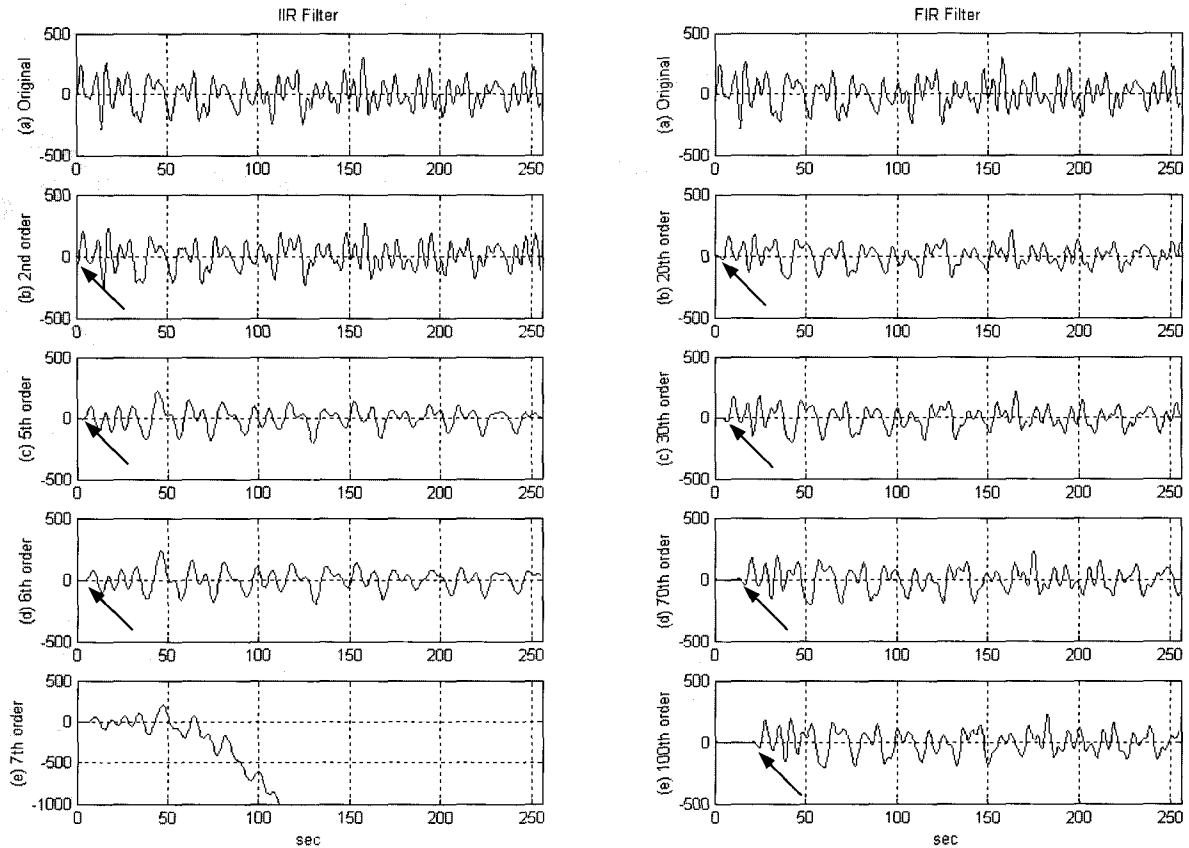


그림 4. IIR 필터와 FIR 필터의 차수 증가에 따른 위상 변화
 Fig. 4. Phase shift casued by order increase of IIR and FIR filter

수, FIR2는 20차수이었으며 IIR필터는 IIR1이 12차수, IIR2가 6차수, IIR3이 6차수, 그리고 IIR4가 6차수이었다. 신호의 길이는 모두 동일하게 4분 16동안의 신호인 512개의 데이터를 이용하였다.

3. 신호대 잡음비의 비교

본 연구의 시뮬레이션에서는 잡음이 섞인 위전도 신호를 임의적으로 만들기 위하여 평균이 0이고 분산이 1인 normally distributed random noise(randn)의 랜덤잡음을 위전도 신호에 첨가하였다. 위전도 신호는 본 연구에서 얻어진 정상인의 실제 위전도 신호를 주파수 분석하여 얻어진 스펙트럼을 근거로 하여 식 (15)와 같이 3 cpm을 중심으로 0.5 cpm에서 9 cpm 사이의 정현파를 조합하여 만들었다.

$$y = 0.2\sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t) + 0.2\sin(2\pi f_3 t) \tag{15}$$

$$+ 0.2\sin(2\pi f_4 t) + 0.2\sin(2\pi f_5 t) + 0.2\sin(2\pi f_6 t)$$

- t : 시간(sec)
- f₁ : 1.8 cpm (0.03 Hz)
- f₂ : 3.0 cpm (0.05 Hz)
- f₃ : 4.8 cpm (0.08 Hz)
- f₄ : 6.0 cpm (0.10 Hz)

$$f_5 : 7.2 \text{ cpm (0.12 Hz)}$$

$$f_6 : 9.0 \text{ cpm (0.15 Hz)}$$

잡음의 정도는 3단계로 증가시키면서 신호대 잡음비(SNR)를 추정하였다. SNR의 계산식은 식 (16)을 이용하였다[13].

$$SNR = 10 \times \log_{10} \frac{\sigma_s}{\sigma_n} \text{ [dB]} \tag{16}$$

여기서, σ_s 는 위전도 신호의 분산, 그리고 σ_n 은 잡음 신호의 분산이다.

4. 재생신호 자승오차의 비교

필터링의 목적은 잡음이 섞인 신호를 잡음에 영향을 받지 않고 왜곡됨 없이 재생시키는 것이다. 본 연구에서는 이러한 신호 재생시 발생하는 오차정도를 평가하기 위하여 재생신호 자승오차를 사용하였으며, SNR을 평가한 것과 같은 방법으로 잡음 신호를 임의로 생성한 후에 위전도 신호의 재생신호 자승오차(RSE : reconstruction square error)를 추정하였다. RSE는 그 크기가 작으면 작을 수록 필터의 성능이 좋아서 잡음이 깨끗하게 제거되어 원본신호와 거의 동일함을 의미한다.

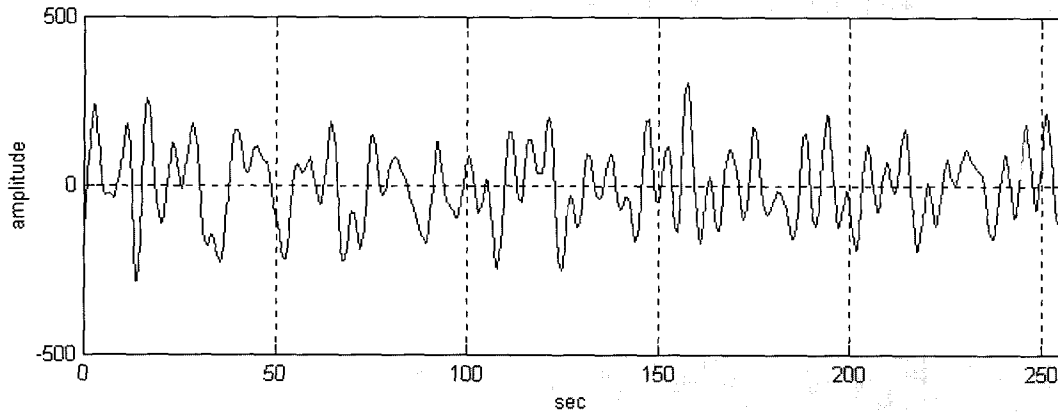


그림 5. 피검자의 복부에서 측정된 노이즈가 섞인 위전도 신호
 Fig. 5. EGG signal with noise measured on the abdomen of subject

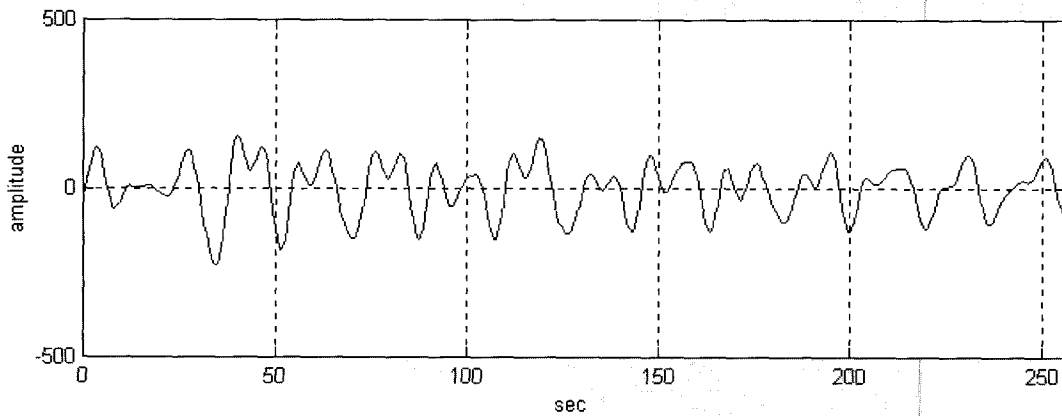


그림 6. 웨이블릿 다단계 분해를 이용하여 필터링한 위전도 신호
 Fig. 6. Filtered EGG signal using wavelet multiresolution

재생신호 자승오차의 계산식은 식 (17)을 이용하였다[13].

여기서 X_r 은 L개의 샘플수를 갖는 재생된 신호이고, X_o 는 L개의 샘플수를 갖는 잡음이 없는 원신호이다.

$$RSE = \sum_{l=0}^{L-1} (X_r(l) - X_o(l))^2 \quad (17)$$

표 1. 랜덤잡음이 섞인 위전도 신호의 신호대 잡음비의 비교(단위 : dB)

Table 1. Comparison of the SNRs of EGG signal corrupted with random noise(unit : dB)

잡음레벨	Original	FIR1	FIR2	IIR1	IIR2	IIR3	IIR4	Wavelet
0.5	8.52	10.26	11.15	9.58	6.68	12.13	12.00	21.57
0.75	0.40	6.42	8.76	8.00	5.56	10.24	10.68	17.61
1	-5.46	4.79	8.24	6.98	4.83	8.99	8.68	13.69

Original : simulated EGG signal + noise

FIR1 : Parks-McClellan optimal FIR filter(12nd order)

FIR2 : Frequency sampling-based FIR filter(20th order)

IIR1 : Butterworth filter(12nd order)

IIR2 : Chebyshev type I filter (passband ripple 0.1dB, 6th order)

IIR3 : Chebyshev type II filter (stopband ripple 40dB, 6th order)

IIR4 : Elliptic(Cauer) filter (passband ripple 0.1dB, stopband ripple 40dB, 6th order)

Wavelet : Wavelet multiresolution filter (Daubechies 16)

표 2. 랜덤잡음이 섞인 위전도 신호의 재생신호 자승오차의 비교(단위 : 106)

Table 2. Comparison of the RSEs of EGG signal corrupted with random noise(unit : 106)

잡음레벨	FIR1	FIR2	IIR1	IIR2	IIR3	IIR4	Wavelet
0.5	2.41	2.21	2.60	3.48	2.02	2.04	0.80
0.75	3.53	2.82	3.05	3.89	2.44	2.34	1.18
1	4.16	2.97	3.39	4.20	2.77	2.87	1.75

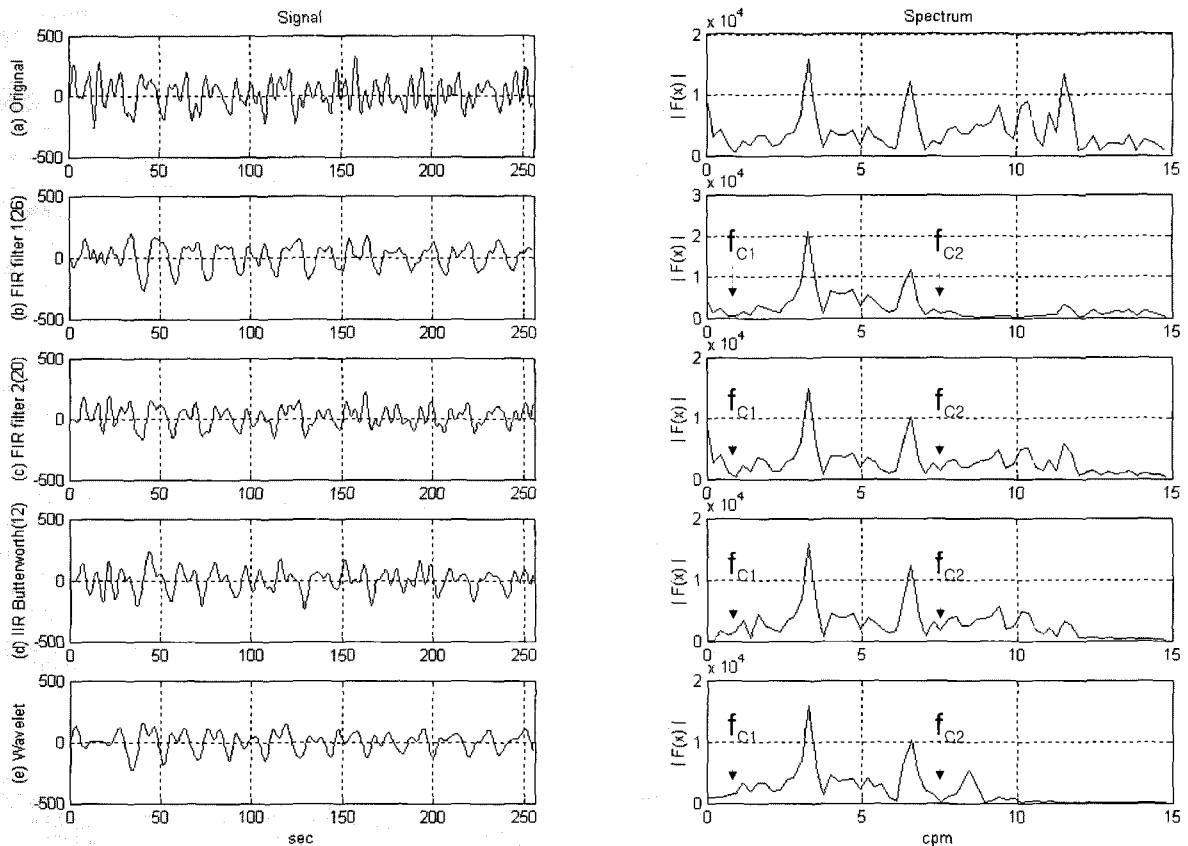


그림 7. 측정된 위전도 신호 및 FIR과 IIR 필터들을 적용한 후의 신호들과 스펙트럼들

- (a) 필터링 전의 잡음이 있는 위전도 신호와 스펙트럼
- (b) 26차의 FIR filter1을 적용한 후의 위전도 신호와 스펙트럼
- (c) 20차의 FIR filter2를 적용한 후의 위전도 신호와 스펙트럼
- (d) 12차의 IIR Butterworth filter를 적용한 후의 위전도 신호와 스펙트럼
- (e) Wavelet multiresolution filter를 적용한 후의 위전도 신호와 스펙트럼

Fig. 7. Measured EGG signal and FIR and IIR filtered signals, and their spectra

- (a) Noisy EGG signal and spectrum before filtering
 - (b) Filtered EGG signal and its spectrum using 26th order FIR filter1
 - (c) Filtered EGG signal and its spectrum using 20th order FIR filter2
 - (d) Filtered EGG signal and its spectrum using 12nd order IIR Butterworth filter
 - (e) Filtered EGG signal and its spectrum using wavelet multiresolution filter
- f_{c1} : low cutoff frequency(0.5 cpm)
 f_{c2} : high cutoff frequency(7.5 cpm)

결 과

원래 신호로의 복원은 D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, A7을 합함으로써 쉽게 이루어지며 업 샘플링을 거쳐야 하나 단단계

분해를 위해 다운 샘플링한 것을 바로 보간법을 통해 업 샘플링을 하기 때문에 다시 업 샘플링을 할 필요가 없다. 그림 5의 4차 하드웨어 필터를 통과한 실제 위전도 신호를 7단계 분해하여 대역폭과 범위인 0.0083 Hz(0.5 cpm)에서 0.125 Hz(7.5

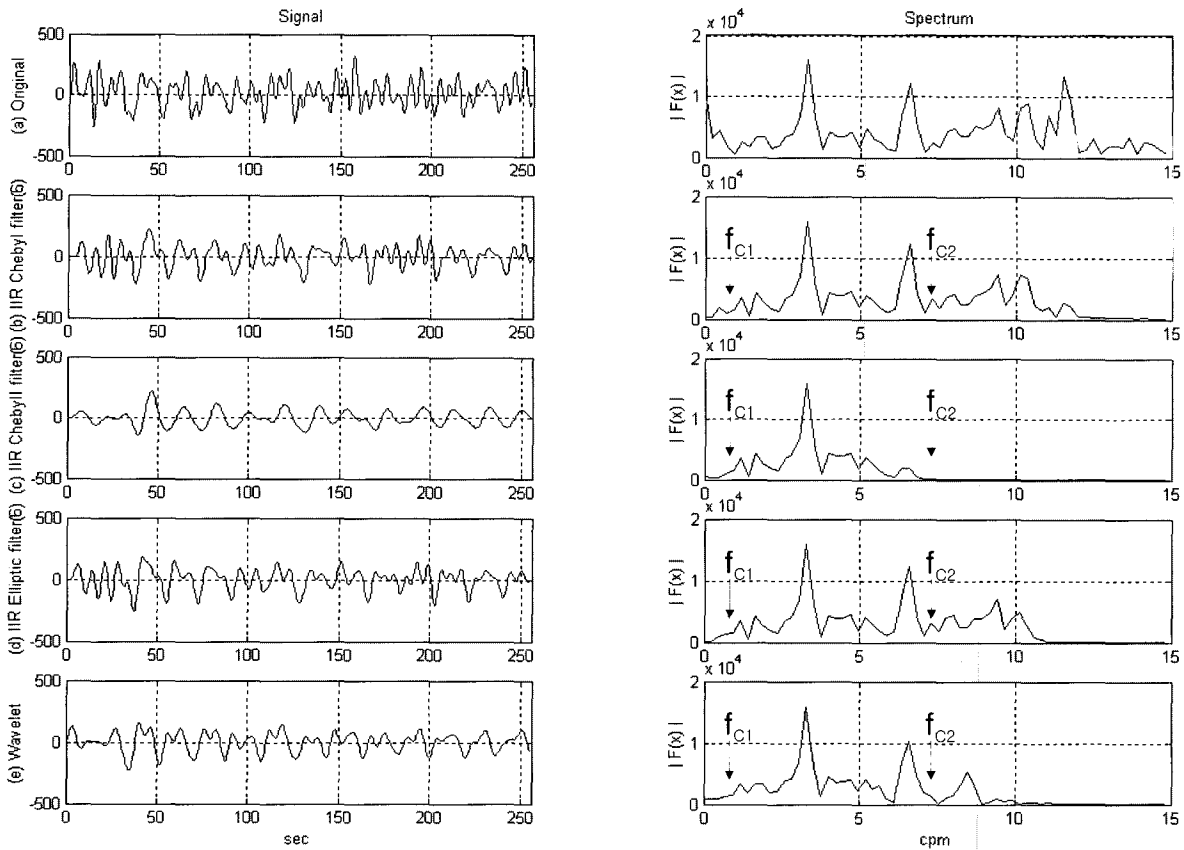


그림 8. 측정된 위전도 신호 및 IIR 필터들을 적용한 후의 신호들과 스펙트럼들

- (a) 필터링 전의 잡음이 있는 위전도 신호와 스펙트럼
- (b) 6차의 IIR Chebyshev filter를 적용한 후의 위전도 신호와 스펙트럼
- (c) 6차의 IIR Chebyshev filter를 적용한 후의 위전도 신호와 스펙트럼
- (d) 6차의 IIR Elliptic filter를 적용한 후의 위전도 신호와 스펙트럼
- (e) Wavelet multiresolution filter를 적용한 후의 위전도 신호와 스펙트럼

Fig. 8. Measured EGG signal and IIR filtered signals, and their spectra

- (a) Noisy EGG signal and its spectrum before filtering
 - (b) Filtered EGG signal and its spectrum using 6th order IIR Chebyshev filter
 - (c) Filtered EGG signal and its spectrum using 6th order IIR Chebyshev filter
 - (d) Filtered EGG signal and its spectrum using 6th order IIR Elliptic filter
 - (e) Filtered EGG signal and its spectrum using wavelet multiresolution filter
- f_{c1} : low cutoff frequency(0.5 cpm)
 f_{c2} : high cutoff frequency(7.5 cpm)

cpm)에 해당하는 D4, D5, D6, D7 단계를 합하여 복원하였을 때 그림 6에서와 같이 깨끗한 위전도 신호를 얻을 수 있었다.

표 1의 각 잡음레벨에서의 SNR은 각각 5회의 SNR을 얻어서 평균한 값이다. 필터들 중에서 웨이브렛 다단계 분해 필터를 제외하고 IIR3와 IIR4의 SNR이 제일 좋았으며, 잡음의 레벨이 시뮬레이션 위전도 신호 크기의 0.5배, 0.75, 1배 일때 웨이브렛 다단계 필터의 SNR과 다른 필터들 중의 최고의 SNR과의 차이는 각각 9.5, 6.9, 그리고 4.7 dB이었다.

SNR을 사용한 필터의 성능평가에서는 웨이브렛 다단계 분해 필터가 가장 좋은 성능 보여주었으며 그 다음으로 IIR3 필터가 좋은 성능을 보였다.

표 2의 각 잡음레벨에서의 RSE도 각각 5회의 RSE를 얻어

서 평균한 값이다. 필터들 중에서 웨이브렛 다단계 분해 필터를 제외하고 IIR3와 IIR4의 RSE가 적었으며, 잡음의 레벨이 시뮬레이션 위전도 신호 크기의 0.5배, 0.75, 1배 일때 웨이브렛 다단계 필터의 RSE와 다른 필터들 중의 최저의 RSE와의 차이는 각각 1.22×10^6 , 1.16×10^6 , 그리고 1.02×10^6 이었다. SNR을 사용한 필터의 성능평가에서는 웨이브렛 다단계 분해 필터가 가장 좋은 성능 보여주었으며 그 다음으로 IIR3 필터가 좋은 성능을 보였다.

그림 7과 8은 실제 위전도를 측정하여 얻어진 아날로그 필터링을 거친 위전도 신호를 디지털 필터링하였을 때, 각각의 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림 7의 (b) FIR filter 1는 0.5 cpm 이하의 신호는 많이 차단하였으나 10~15 cpm의 신호는

웨이브렛 다단계 분해를 이용한 방법보다 잡음이 많았다. 그림 7의 (c) FIR filter 2는 0.5 cpm 아래에서는 거의 차단되지 않았으며 9 cpm 이상에서도 잡음을 많이 감소시키지 못하였다. 그림 7의 (d) IIR Butterworth filter의 경우는 0.5 cpm 이하에서는 차단 효과가 있었으나 9 cpm 이상에서는 (c)의 FIR filter와 같이 거의 차단효과가 없었다.

그림 8의 (b), (d)의 IIR 필터들 모두 0.5 cpm 이하의 주파수는 차단효과가 있었으나 9 cpm 이상에서는 차단효과가 없었다. 그림 8의 (c)의 IIR 필터는 차단주파수 이상에 해당하는 부분을 깨끗하게 필터링하였지만 다른 필터들에 비해 감소가 적어야 할 6.5~7 cpm 부분이 너무 많이 필터링되었다. 반면에 웨이브렛 다단계 분해를 이용한 방법은 0.5 cpm 이하의 신호를 확실히 차단하였으며 9 cpm 이상의 신호들도 깨끗하게 차단하였다.

시뮬레이션 위전도 신호를 이용하여 SNR과 RSE의 성능이 다른 필터들에 비해 웨이브렛 다단계 분해 방법이 우수함을 확인 할 수 있었듯이 실제 측정된 위전도 신호에서도 그 우수성을 확인할 수 있다.

결 론

기준에 많이 사용되고 있는 디지털 필터는 위전도 신호와 같이 아주 낮은 주파수의 좁은 대역의 신호를 필터링하기에는 신호왜곡, 높은 차수 등의 많은 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하는 방법으로 웨이브렛 다단계 분해를 사용하여 위전도 신호의 잡음을 제거하는 필터를 설계하였다. 설계된 웨이브렛 다단계 분해 필터는 기존의 필터들(2개의 FIR 필터, 4개의 IIR 필터)과 비교하였으며, SNR과 RSE를 사용하여 성능을 평가하였다. 위전도 신호와 같이 아주 낮은 주파수와 아주 좁은 대역폭을 갖는 신호를 필터링하는데 있어서, 웨이브렛 다단계 분해 필터 방법은 SNR과 RSE의 두 성능 비교 파라미터에서 모두 다른 필터들 보다 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 기존의 필터들이 차수가 높아짐에 따라 위상 변화가 발생(그림 4. FIR filter (e) 100th order)하거나 불안정(그림 4. IIR filter (e) 7th order)해지는 것을 볼 수 있었는데 웨이브렛 다단계 분해 필터에서는 필터링된 신호에서 위상 변화가 발생하거나 불안정해지지 않았다. 그러나 비교대상이 되었던 IIR 필터들이 대부분 실시간으로 필터링을 할 수 있는 반면 웨이브렛 다단계 분해 필터는 실시간 처리가 불가능하다는 단점이 있었다. 실제 측정된 잡음이 있는 위전도 신호에 각각의 필터들을 적용해 본 결과에서도 웨이브렛 다단계 분해 필터의 우수성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. A.J. Vander, J.H. Sherman, and D.S. Luciano, Human Physiology, McGraw Hill, pp.583-586, 1994
2. J.Z. Chen and R.W. McCallum, "Electrogastrography: measurement, analysis and prospective applications", Medical & Biological Engineering & Computing, Vol 29, pp.339-350, 1991
3. J.Z. Chen and R.W. McCallum, "Gastric Slow Wave Abnormalities in Patients with Gastroparesis", The American Journal of Gastroenterology, Vol 87, No. 4, pp.477-482, 1992
4. Z.Y. Lin and J.Z. Chen, "Time-Frequency Representation of the Electrogastrogram - Application of the Exponential Distribution", IEEE, Vol 41, No. 3, pp.267-275, 1994
5. J.G. Webster, Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation, A Wiley-Interscience Publication, Vol. 2, pp.1107-1111, 1988
6. W.C. Alvarez, "The electrogastrogram and what it shows", Journal of America Medicine Association, Vol. 78, pp.1116-1118, 1992
7. 이상인, 김명옥, 지훈상, 문영명, 강진경, 박인서, 최홍제, "위근전도의 임상적 응용", 대한소화기병학회, 제24권, 제5호, pp.951-958, 1992
8. J.Z. Chen, and R.W. McCallum, Electrogastrographic Parameters and Their Clinical Significance, Electrogastrography: Principles and Applications, Raven Press, pp.45-74, 1994
9. R.K. Young, Wavelet Theory and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, pp.1-214, 1993
10. M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim and J.M. Poggi, Wavelet Toolbox for Use with MATLAB®, The Math Works, pp.1.1-7.14, 1996
11. Signal Processing Toolbox(version 5) for use with MATLAB, The Mathworks Inc., 2000
12. L.R. Rabiner and B. Gold, Theory and application of digital signal processing, New Jersey, Prentice Hall, pp.241, 1975
13. 박광리, 이경중, 이병채, 정기삼, 윤형로, "스트레스 심전도의 근잡음 제거를 위한 Wavelet interpolation Filter의 설계", 의공학회지, Vol. 20, No. 5, pp.495-503, 2000
14. 유창용, 이상인, 남기창, 송철규, 김덕원, "4채널 위전도 시스템의 개발 및 유용성", 의공학회지, Vol. 21, No. 6, pp.543-550, 2000