

## ECG 신호의 파형 감지를 위한 디지털 필터의 설계 및 왜형 해석

남현도\*, 안동준\*, 이철희\*\*

\*단국대학교 전기공학과, \*\*강원대학교 전기공학과

### Design and Distortion Analysis of Digital Filters for ECG Waveforms Detection

Hyun-do Nam\*, Dong-jun Ahn\*, Cheol-heui Lee\*\*

\* Dept. of Electrical Eng. Dankook Univ., \*\* Dept. of Electrical Eng. Gangwon Univ.

#### ABSTRACT

Design as well as Distortion analysis of signal conditioning filters is very useful for practical applications. Distortion analysis of digital filters for waveforms detection in ECG signals is presented. Several band pass and band reject filters are designed for the analysis. Computer simulations are performed to compare the distortions of the Butterworth type filters and linear phase optimal FIR filters which are widely used for ECG signal processing.

#### 1. 서론

ECG 신호의 위독은 저주파, 고주파 성분의 잡음과 같은 배경 잡음이 섞이게 되므로 ECG 측정기에서 신호를 기록할때 과도한 DC 전위가 나타나는 것을 방지하고 저주파, 고주파 성분의 잡음을 제거하기 위한 아날로그 대역 통과(band pass) 필터를 사용한다.

그리고 ECG 진단을 위한 base line 안정화, QRS complex 검출, 근잡음 제거등을 위해(원하는 파형 감지) 디지털 신호 처리 기법에 의한 signal conditioning 필터를 사용한다. [1] 디지털 필터는 주로 A/D 변환시에 섞여들어 오는 고주파 잡음의 제거를 위한 저역 통과 필터와 60Hz의 전력선 간섭을 제거하기 위하여 대역 저지(band reject) 필터등이 사용된다.

그러나 이러한 디지털 필터들은 원하지 않는 주파수 성분의 신호들을 제거하는 것 뿐만 아니라 원하는 파형 성분에 왜곡(distortion)을 가하게 되기 때문에 ECG 신호와 같이 짧은 시구 간동안에 존재하는 과도현상적인 신호의 왜곡은 심각한 문제이다. 이와 같은 왜곡 현상은 주파수의 왜곡, 진폭의 왜곡으로 나누어 생각할 수 있으며 ECG 신호의 QRS complex가 순간 변화율이 크므로 QRS complex의 왜곡현상은 한층 더 심하게 나타날 것이다.

본 논문에서는 ECG 신호의 고주파 잡음과 전력선 간섭 제거를 위하여 사용되는 디지털 대역 통과 필터와 대역 저지 필터를 설계하고 이들의 왜곡 현상을 분석함으로써 적절한 필터 대역의 선정 기준을 제시하고자 한다. 필터구조로는 Chebyshev 필터나

Bessel 필터에 비해 좋은 과도 특성을 보이는 Butterworth 필터와 선형 위상(linear phase) FIR 필터를 사용하여 표준 ECG 신호와 triangular burst 신호에 대한 왜형 분석을 행하였다.

#### 2. Butterworth 필터

통과 대역에 따른 필터 구조의 선정도 중요한 문제이나, 어떤 형태의 필터를 선택하느냐도 매우 중요한 문제이다. 필터의 형태로는 Bessel 형과 Butterworth형, 그리고 Chebyshev형이 많이 사용되는데, Bessel형은 차단 특성은 나쁘나 주파수의 변화에 따라 거의 일정한 위상 특성을 가지도록 한것이다. Butterworth형은 통과 대역에서의 전달 특성을 균일하게 하기위한 것으로 감쇄 대역에서의 전달 특성은 n 차 필터의 경우 대략 16n[dB/oct]의 특성을 가지고 있으며, Chebyshev형은 차단 특성을 예리하게 하기 위한 것으로 동일특성의 감쇄특성을 가지는 필터로 설계할 때 다른 필터들 보다 적은 차수로 구성이 가능한 장점이 있으나 통과 대역에서의 전달 특성 ripple이 차수의 증가에 따라 심해지고 위상 특성도 불균일하다. [2] 따라서 우수한 과도 상태 특성이 요구되는 생체 신호와 같은 예에서는 Butterworth 필터 구조가 유리하다.

표준화된(normalized) Butterworth 필터의 응답은 식(2.1)과 같다.

$$|H(\Omega)|^2 = \frac{1}{\sqrt{1 + (\Omega^2)^n}} \quad (2.1)$$

단, n: 필터 차수

식(2.1)을 다시 쓰면

$$H(s)H(-s) = \frac{1}{1 + (-s^2)^n} \quad (2.2)$$

따라서 식(2.2)에서의 극점은 s-평면의 단위원 내에 존재하게 되고 좌반 평면에 위치한 안정한 극점들만 선택하면 식(2.3)과 같다.

$$H(s) = \frac{k_0}{\prod_{k=1}^n (s - s_k)} \quad (2.3)$$

단,  $k_0$  : 표준화 상수

$s_k : \exp[j\pi(1/2 + (2k-1)2n)] : k = 1, 2, \dots, n$

### 3. 선형 위상 FIR 필터

FIR 필터는 전달 함수가 영점만(all-zero transfer function) 가지기 때문에 IIR (Butterworth) 필터의 경우와 같이 불안정한 극점에 대한 고려가 필요없으며, 영점이 안정하다면 절대적인 안정도가 보장된다. 선형 위상 FIR 필터는 FIR 필터의 전달 함수가 해석적이고 연속성을 가지도록 정의함으로써 위상 특성이 선형성을 유지하여 비선형 필터 구조에 비해 유리한 특성을 가진다. 선형 위상 FIR 필터의 형태는 필터의 차수가 기수, 우수인 경우와 임펄스 응답의 형태가 대칭, 비대칭인 4가지로 분류된다. [3]. [4]

선형 위상 FIR 필터의 설계 방법으로는 윈도우를 사용하는 방법과 주파수 샘플링 방법, 그리고 최적 설계법으로 나누어 볼 수 있는데, 본 논문에서는 Chebyshev의 근사화법(Chebyshev approximation methods)을 이용하여 선형 위상 최적 FIR 필터를 설계하였다. [5]

### 4. 시뮬레이션 결과 및 검토

ECG 신호에서 P 파와 T 파의 주파수는 비교적 낮은 편이므로 왜곡 현상이 심하게 나타나지 않을 것이다. 따라서 그림 4.1과 같이 왜곡이 심하게 일어날 것으로 생각되는 QRS complex 파형과 유사한 형태의 triangular burst를 만들고 8차의 Butterworth 필터와 64차의 선형 위상 최적 FIR 필터 공히 대역 통과 필터(통과 대역: 0.05-100Hz)와 대역 저지 필터(저지 대역: 55-65Hz)를 디지털 필터로 설계하였고 왜곡 현상을 분석하였다. 대역 통과 필터의 통과 대역은 진단용에 적합하도록 정하였고 필터들의 차수를 각각 8차와 64차로 정한 것은 필터의 차수를 더 증가시켜도 특성이 별로 좋아지지 않았기 때문이다. 그림 4.2는 표준 ECG 신호 발생기에서 발생시킨 분당 맥박수(BPM: Beat Per Minute)가 60이고 발생 전압이 1 V[p-p]인 표준 ECG 신호를 표준화 주파수 500[Hz]로 A/D 변환하여 디지털 데이터로 저장하고, 필터들의 표준화 주파수는 공히 500[Hz]로 하였다.

그림 4.3은 Butterworth 필터구조를 가지는 대역 통과 필터의 왜곡현상을 보인 것이고(차수: 8, 통과 대역: 0.5-30Hz, 0.05-100Hz), 그림 4.4는 선형 위상 최적 FIR 필터의 구조를 가지는 대역 통과 필터의 왜곡 현상을 보인 것이다.(차수: 64차, 통과 대역폭: 0.5-30Hz, 0.05-100Hz) 통과대역을 0.5-30Hz, 0.05-100Hz로 한것은 이 대역들이 모니터링용과 진단용으로 쓰이기 때문이다. (그림에서 'o'는 원 피형이고, 'f'는 필터링 결과이다.)

그림 4.5는 Butterworth 필터구조를 가지는 대역 저지 필터의 왜곡현상을 보인 것이고(차수: 8, 저지 대역폭: 55-65Hz), 그림 4.6은 선형 위상 최적 FIR 필터의 구조를 가지는 대역 저지 필터의 왜곡현상을 보인 것이다.(차수: 64, 대역폭은 55-65Hz)

대역 통과 필터의 경우에 그림 4.3(b)와 그림 4.4(b)에서 P파 및 T파, 그리고 base line 왜곡도 발생하고 있음을 볼 수 있다.

표 4.1은 그림 4.3에서 4.6까지의 결과에 대하여 주파수의 왜곡과 진폭의 왜곡을 분석한 것으로 대역 통과 필터의 경우 대상 필터 공히 대역 폭이 넓을 수록 왜곡 현상이 감소함을 알 수 있다.

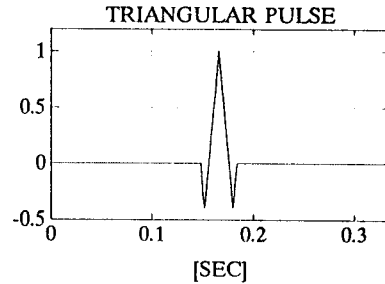


그림 4.1 Triangular burst

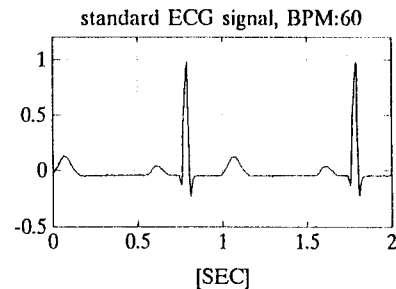
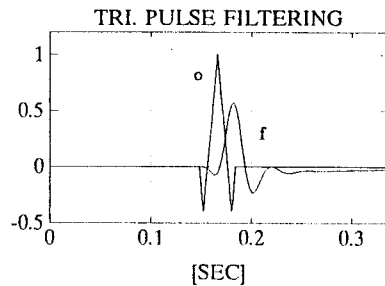
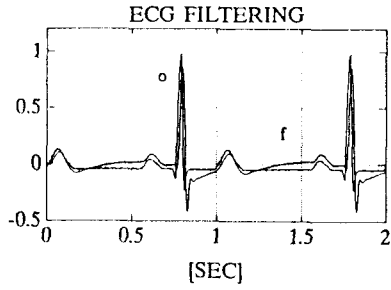


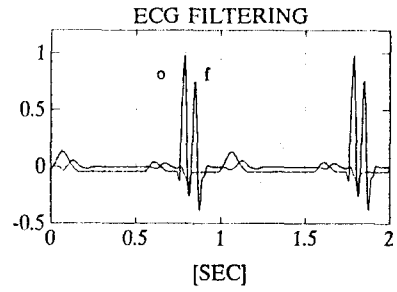
그림 4.2 표준 ECG 신호 ( BPM: 60)



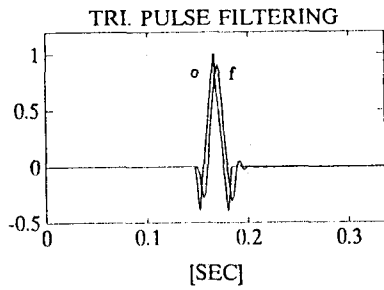
(a) triangular burst의 경우(0.5-30Hz)



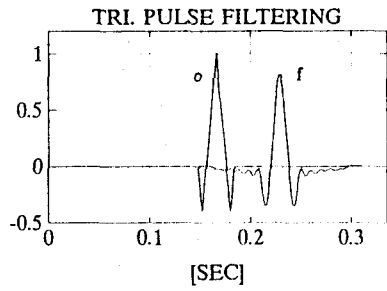
(b) 표준 ECG 신호의 경우(0.5-30Hz)



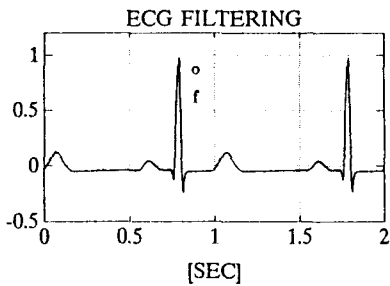
(b) 표준 ECG 신호의 경우(0.5-30Hz)



(c) triangular burst의 경우(0.05-100Hz)

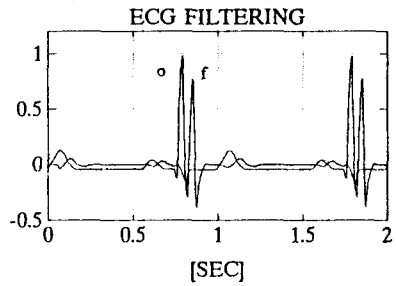


(c) triangular burst의 경우(0.05-100Hz)



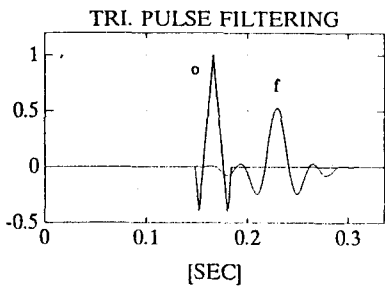
(d) 표준 ECG 신호의 경우(0.05-100Hz)

그림 4.3 Butterworth 대역 통과 필터  
(차수: 8, 통과 대역: 0.5-30Hz, 0.05-100Hz)

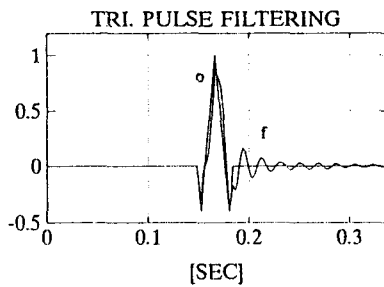


(d) 표준 ECG 신호의 경우(0.05-100Hz)

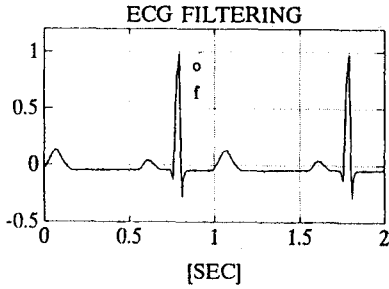
그림 4.4 선형위상 최적 FIR 대역 통과 필터  
(차수: 64, 통과 대역: 0.5-30Hz, 0.05-100Hz)



(a) triangular burst의 경우(0.5-30Hz)



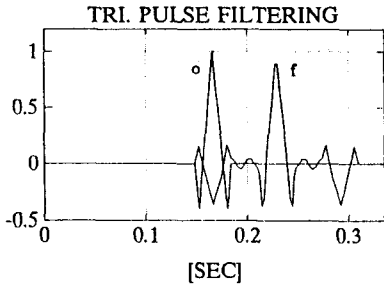
(a) triangular burst의 경우



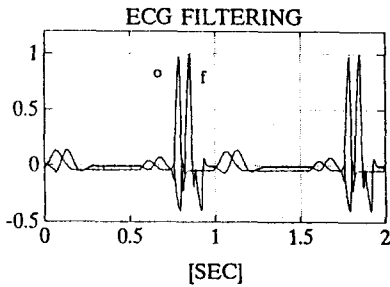
(b) 표준 ECG 신호의 경우

그림 4.5 Butterworth 대역 저지 필터

(차수: 8, 저지 대역: 55-65Hz)



(a) triangular burst의 경우



(b) 표준 ECG 신호의 경우

그림 4.6 선형위상 최적 FIR 대역 저지 필터

(차수: 64, 저지 대역: 55-65Hz)

5. 결론

ECG 신호를 취득할때 수반되는 배경 잡음의 제거시에 사용되는 signal conditioning 필터들의 시간 영역에서의 왜곡현상을 분석하고 설계 기준을 제시하였다. Signal conditioning 디지털 필터중 IIR 필터와 FIR 필터에서 ECG 신호에 적용이 적절한 Butterworth 필터와 선형 위상 최적 FIR 필터를 고려하였다. 대역 통과 필터의 경우에, 통과 대역 폭이 클수록 왜곡 현상이 줄어들음을 볼 수 있었으며 Butterworth 필터와 선형 위상 최적 FIR 필터의 왜곡현상을 비교하였다. 또한 P파 및 T파, 그리고 base line 왜곡이 발생하므로 이에 대한 연구가 더 행해져야 될 것이다.

참고 문헌

- [1] 장태규, 조재희, 양원형, "ECG신호의 파형 감지를 위한 Signal Conditioning 필터에 관한 연구", 1992년도 전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 311-313.
- [2] Athanasios Papoulis, Circuit and Systems a modern approach, Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1980.
- [3] T. W. Parks and C. S. Burrus, Digital Filter Design, John Wiley & Sons, Inc. 1987.
- [4] Oppenheim, A. V. and R. W. Schaffer, Digital Signal Processing, Prentice Hall Inc. 1975.
- [5] Lawrence R. Rabiner and Bernard Gold, Theory and application of Digital Signal Processing, Prentice Hall Inc., 1975.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구과제 91-01-00-04의 지원에 의하여 이루어 졌음.

표 4.1 주파수 왜곡과 진폭 왜곡의 분석

필터 구조	Butterworth 필터(8차)			선형 위상 최적 FIR 필터(64차)		
	대역 통과 필터		대역 저지 필터	대역 통과 필터		대역 저지 필터
대역 폭	0.5-30Hz	0.05-100Hz	55-65 Hz	0.5-30Hz	0.05-100Hz	55-65 Hz
주파수 왜곡	+ 0.008	+ 0.012	+ 0.010	+ 0.0074	+ 0.016	+ 0.130
진폭 왜곡	+ 0.1486	- 0.0168	- 0.091	+ 0.0409	+ 0.0185	- 0.0088
표준 ECG 신호의 QRS complex 진폭: 1.121						
표준 ECG 신호의 QRS complex 주기: 0.044 [sec]						