

논문 2004-41SP-4-16

# Opposite 필터를 적용한 가변 Q 디지털 그래픽 이퀄라이저

## (A Variable-Q Digital Graphic Equalizer with Opposite Filters)

이 용 희\*, 김 인 철\*\*, 조 국 춘\*\*\*

(Yonghee Lee, Rinchul Kim, and Googchun Cho)

### 요 약

본 논문에서는 opposite 필터를 적용한 가변 Q 디지털 그래픽 이퀄라이저를 제안한다. 그리고 제안한 이퀄라이저를 설계하는 방법을 제시한다. 본 논문에서 제안하는 가변 Q 이퀄라이저에서는 이퀄라이저의 성능을 개선하기 위해서 이득에 따라 이퀄라이저 필터의 Q-factor를 조정한다. 또한, opposite 필터의 Q-factor를 이득이 높아짐에 따라 완만하게 증가하도록 설정함으로써 opposite 필터가 대역간 간섭을 효과적으로 제거할 수 있게 한다. 실험을 통해 제안한 opposite 필터를 적용한 가변 Q 이퀄라이저는 사용자가 설정한 이득을 매우 충실하게 표현함을 보여준다.

### Abstract

This paper proposes a variable-Q digital graphic equalizer with the opposite filters. A method for designing the proposed equalizer is also presented. In the proposed variable-Q equalizer, we adjust the Q-factor of the equalizer filter depending on the gain, yielding an improved equalizer performance. Also, by increasing the Q-factor of the opposite filters gracefully as the gain becomes greater, the inter-band interference can be removed effectively. We shall show that the frequency response of the proposed equalizer can reproduce the user's gain setting faithfully.

**Keywords:** 그래픽스 이퀄라이저, 오디오, 가변 Q factor, opposite 필터

## I. 서 론

오디오 신호는 주위 환경에 따라 발생하는 반향 등으로 인해 특정 주파수 성분이 감쇠 혹은 증폭되어 원음이 왜곡될 수 있다. 이러한 오디오 신호의 왜곡을 보상하여 원음을 충실히 표현하기 위해 오디오 이퀄라이저를 사용한다<sup>[1-2]</sup>. 일반적으로 오디오 시스템에서는 그 구조가 비교적 간단한 그래픽 이퀄라이저(graphic equalizer)를 채택하는데, 이는 미리 정해진 주파수 대역의 개수만큼 이퀄라이저 필터를 설치하고 이들을 직렬 연결하여 구현된다. 이때, 이퀄라이저 필터로는 일반적으

로 2차 IIR(infinite impulse response) 필터가 적합한 것으로 알려져 있으며<sup>[2]</sup>, 필터의 특성은 중심 주파수(center frequency), Q-factor, 그리고 이득(gain) 등 3요소로 규정된다. 여기서 Q-factor는 필터의 대역폭에 반비례하는 요소로, 중심 주파수와 함께 필터의 통과 대역을 결정한다.

한편, 최근 들어 대부분의 오디오 신호가 디지털화된 형태로 제공되고, class-D 증폭기 등 디지털 증폭기가 보급됨에 따라 디지털화된 오디오 증폭기에 대한 관심이 높아졌다<sup>[3]</sup>. 이에 따라 디지털 필터를 사용하는 디지털 그래픽 이퀄라이저의 개발이 필요하게 되었다. 디지털 그래픽 이퀄라이저를 위한 디지털 필터는 기존의 아날로그 필터를 쌍선형 변환(bilinear transform)하여 얻을 수 있다<sup>[1,4]</sup>.

이러한 오디오 이퀄라이저들은 이퀄라이저 필터들을 대역 수만큼 직렬 연결하여 구현된다. 이때, 각 이퀄라이저 필터들은 주어진 대역 밖에서도 0dB가 아닌 주파수 응답을 가지게 되어 인접한 대역에 원하지 않는 영

정희원, LG 전자 MM연구소  
(LG Electronics Institute of Tech., MM Lab.)

\* 정희원, 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부  
(University of Seoul, Dept. of ECE)

\*\*\* 정희원, (주)디지털엔아날로그  
(Digital & Aanlog)

※ 본 논문은 2002-4년 산자부 부품소재기술개발 사업  
중 (주)디지털엔아날로그 위탁연구의 일부분임  
접수일자: 2003년3월3일, 수정완료일: 2004년6월11일

향을 주게 된다. 이러한 조건 하에서 이퀄라이저의 출력은 원하는 주파수 응답과는 다른 특성을 보이게 된다. 특히, 아날로그 이퀄라이저에서는 이득이 낮아짐에 따라 이퀄라이저 필터의 Q-factor가 급격하게 작아져 인접한 대역에 주는 영향이 커지게 된다. 이러한 단점을 해결하기 위해 1980년도 중반에 이득에 관계없이 Q-factor를 일정하게 유지시켜주는 상수 Q 이퀄라이저(constant-Q equalizer)가 제안되었다<sup>[2]</sup>. 그러나 상수 Q 이퀄라이저는 기존의 방법에 비해 매우 제한적인 성능 개선을 얻을 수 있었다. 최근에 Azizi<sup>[1]</sup>는 대역간 간섭을 효과적으로 제거할 수 있는 opposite 필터 개념을 제안하였다. 이 방법에서는 주어진 대역에서 인접한 대역에 주는 영향을 분석하여, 인접한 대역에 주는 영향을 opposite 필터로 보상하자는 것이다. Azizi의 방법은 우수한 성능을 보이나, 복잡한 이퀄라이저 설정에서는 여전히 원하는 주파수 응답과 차이를 드러내게 된다.

본 논문에서는 대역 및 이득에 따라 서로 다른 Q-factor의 필터를 채용하는 가변 Q 이퀄라이저(variable-Q equalizer)를 제안한다. 대역에 따라 서로 다른 Q-factor를 적용한 이퀄라이저는 [5]에서 소개된 바 있다. [5]에서는 인접한 대역에 많은 영향을 주는 필터의 Q-factor는 크게 하고, 그렇지 않은 가장자리 대역의 필터는 Q-factor를 작게 하여, 각 필터가 인접한 대역에 주는 영향을 일정하게 유지시키려고 한 것이다. 그러나 인접한 대역에 주는 영향은 대역의 위치뿐만 아니라 각 대역의 이득의 크기에 따라서 차이가 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 대역 및 이득에 따라 Q-factor를 적용시킴으로써, 보다 개선된 성능을 얻을 수 있도록 하였다. 특히, 제안한 방법을 Azizi의 opposite 필터를 이용한 이퀄라이저<sup>[1]</sup>에 적용하였을 때 향상된 성능을 얻을 수 있음을 보이겠다.

## II. 그래픽 이퀄라이저

### 1. 이퀄라이저 필터

이퀄라이저에서는 일반적으로 다음과 같은 2차 IIR 필터를 사용한다<sup>[1]</sup>.

$$H(s) = \frac{1 + \frac{G^+ 2\pi F_c}{Q} s^{-1} + (2\pi F_c)^2 s^{-2}}{1 + \frac{2\pi F_c}{G^- Q} s^{-1} + (2\pi F_c)^2 s^{-2}} \quad (1)$$

여기서,  $F_c$ 와  $Q$ 는 각각 중심 주파수와 Q-factor를

나타내고,  $G^+$ ,  $G^-$ 는 이득을 나타낸다. 필터의 이득을  $G$ 라고 하면, 이득이 양수일 때는  $G^- = 1$ ,  $G^+ = G$ 이고 음수일 때는  $G^+ = 1$ ,  $G^- = G$ 로 정의되는데, 이는 필터의 주파수 응답이 이득에 대하여 대칭이 되도록 하기 위함이다.  $F_s$ 를 표본화율(sampling rate)이라고 하면, 식 (1)로 표현된 아날로그 이퀄라이저 필터는 다음과 같은 고주파 영역이 wrapping되는 현상을 보정한 쌍선형 변환<sup>[1,4]</sup>에 의해

$$s = \frac{2\pi F_c}{\tan\left(\pi \frac{F_c}{F_s}\right)} \frac{(z-1)}{(z+1)} \quad (2)$$

식 (3)으로 표현되는 디지털 이퀄라이저 필터로 변환된다.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (3)$$

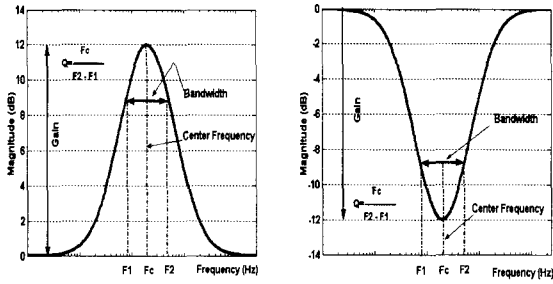
여기서, 필터 계수들은 다음과 같이 주어진다<sup>[6]</sup>.

$$\begin{aligned} b_0 &= T^2 + \frac{G^+ 2\pi F_c T}{Q} + (2\pi F_c)^2 \\ b_1 &= -2T^2 + 2(2\pi F_c)^2 \\ b_2 &= T^2 - \frac{G^+ 2\pi F_c T}{Q} + (2\pi F_c)^2 \\ a_0 &= T^2 + \frac{2\pi F_c T}{Q G^-} + (2\pi F_c)^2 \\ a_1 &= -2T^2 + 2(2\pi F_c)^2 \\ a_2 &= T^2 - \frac{2\pi F_c T}{Q G^-} + (2\pi F_c)^2 \\ T &= \frac{2\pi F_c}{\tan\left(\pi \frac{F_c}{F_s}\right) Q} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)에서 분모의 상수항이 1이 되도록 정규화하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

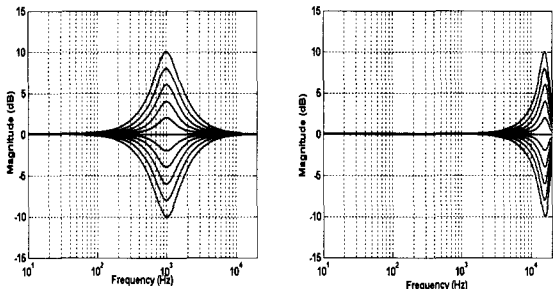
$$H(z) = \frac{b'_0 + b'_1 z^{-1} + b'_2 z^{-2}}{1 + a'_1 z^{-1} + a'_2 z^{-2}} \quad (5)$$

여기서,  $a'_i = a_i / a_0$ ,  $b'_i = b_i / a_0$ 이다. 식 (4)에서  $a_1 = b_1$ 이라는 사실을 참조하면, 식 (5)로 정의되는 필터는 4개의 계수들로 표현됨을 알 수 있다.



(a) 양의 이득

(b) 음의 이득



(c) ±10dB per 2dB at 1KHz

(d) ±10dB per 2dB at 16KHz

그림 1. 이퀄라이저 필터의 주파수 응답

Fig. 1. Frequency response of the equalizer filters.

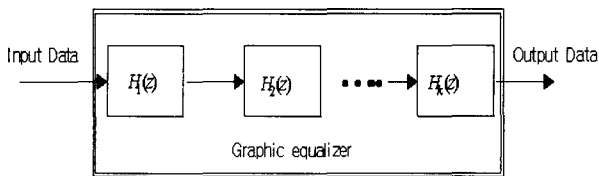


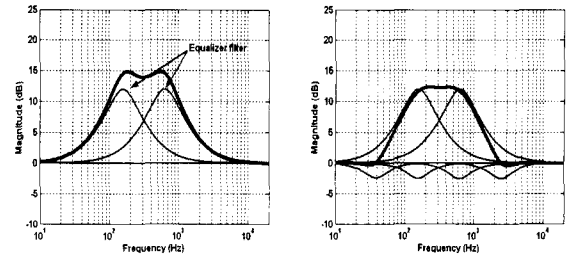
그림 2. 그래픽 이퀄라이저의 블록선도.

Fig. 2. Block diagram of the graphic equalizer.

그림 1에서는 식 (5)로 표현되는 디지털 필터의 주파수 응답을 제시하였다. 그림 1(a)와 (b)에서는 각각 이득이 +12dB, -12dB일 때의 주파수 응답을 나타내었고, 이와 동시에 중심 주파수, 대역폭, 그리고, Q-factor와의 관계를 도시하였다. 그림 1(c)에서는 중심 주파수가 1KHz이고 Q=1.4일 때 이득을 -10dB에서 10dB까지 2dB씩 변화시켰을 때의 주파수 응답이다. 그림 1(c)를 참조하면, 각 이득에서의 주파수 응답은 좌우대칭이고, 0dB를 중심으로 상하대칭임을 알 수 있다. 그러나 그림 1(d)에 제시한 중심 주파수가 16KHz일 때의 주파수 응답은 쌍선형 변환으로 인한 왜곡 때문에 좌우 대칭적인 주파수 응답을 보이지 못하는 것을 알 수 있다.

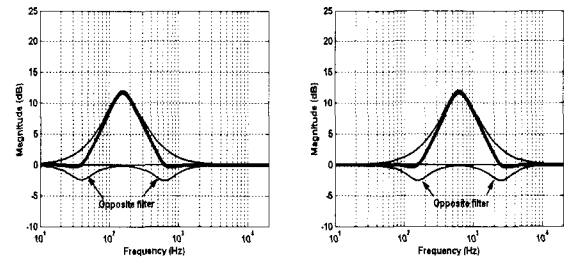
## 2. Opposite 필터

그래픽 이퀄라이저는 그림 2와 같이  $k$ 개의 이퀄라이저 필터를 직렬 연결하여 구현한다. 이때, 오디오 신호



(a) Without opposite filter

(b) With opposite filter



(c) 대역 2

(d) 대역 3

그림 3. 대역 간 간섭의 예.

Fig. 3. Example of inter-band interference.

에 원하는 주파수 선택적 효과를 충실히 제공하기 위해서,  $k$ 개의 필터의 중심 주파수들은 가청주파수 범위를 적절히 나눌 수 있도록 결정한다. 그림 2의 구조에서 각 이퀄라이저 필터는 주어진 대역에서는 원하는 이득으로 표현되지만, 주어진 대역 밖으로 길게 늘어진 주파수 응답을 갖게 된다. 이에 따라 어떤 한 대역의 이득을 조정하면, 이득 조정 결과는 그 주변의 주파수 영역에 영향을 주게 된다. 이러한 영향으로 인접한 대역간의 이득이 서로 합해져서 원하는 이득을 제대로 표현하지 못하게 된다.

최근에 Azizi<sup>[11]</sup>는 이러한 대역간의 간섭을 최소화하여 각 대역을 원하는 이득으로 충실히 표현하는 한 방법으로 opposite 필터 개념을 제안하였다. Azizi는 대역간 간섭이 주로 바로 옆에 인접한 대역에서 오는 영향임을 참조하여, 주어진 대역에 이득을 조정하면 인접한 양쪽 대역에 주어진 대역에 의한 영향을 보상할 수 있는 opposite 필터를 설치하였다. 이에 따라, 인접한 대역에서도 원하는 주파수 응답을 가질 수 있도록 하였다.

Opposite 필터의 개념을 구체적으로 살펴보기 위해 그림 3에서는 5대역 이퀄라이저에서 각 대역의 이득을 0, 12, 12, 0, 0dB로 설정하였을 때의 예를 들었다. opposite 필터를 사용하지 않았을 때에는 그림 3(a)에 제시한 바와 같이 인접한 대역의 간섭으로 인해 실제 주파수 응답은 12dB로 설정된 중심 주파수에서 원하는

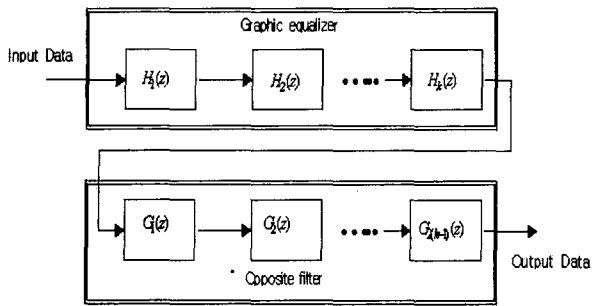


그림 4. Opposite 필터를 적용한 그래픽 이퀄라이저의 블록선도.

Fig. 4. Block diagram of the graphic equalizer employing the opposite filters.

이득보다 큰 이득을 가지는 것으로 나타났다. 이때, opposite 필터를 적용하면, 그림 3(b)에 제시한 바와 같이 실제 주파수 응답은 각 중심 주파수에서 원하는 이득에 근접하게 된다. 이것은 그림 3(c)와 (d)에 보인 것과 같이, 특정 대역에서 이퀄라이저 필터가 12dB로 설정되었을 때, 그 대역에 인접한 양쪽의 중심 주파수에서 이퀄라이저 필터 이득의 역수인 이득을 가지는 opposite 필터를 설치함으로써, 인접한 양쪽의 중심 주파수에서 이퀄라이저 필터에 의한 영향을 제거하였기 때문이다. 이때, opposite 필터의 Q-factor는 Azizi<sup>[1]</sup>에서와 동일하게 이퀄라이저 필터의 Q-factor의 제곱으로 했다.

Opposite 필터를 사용한 이퀄라이저는 그림 4와 같이 구조를 가진다. 그림 3(c)에 보인 바와 같이 이퀄라이저 필터마다 2개의 opposite 필터가 요구된다. 따라서 첫 번째 대역과 마지막 대역에 대해서는 인접한 대역이 1 개라는 것을 참조하면, 대역의 개수가  $k$ 일 때 opposite 필터는  $2(k-1)$ 개 필요하다. 이에 따라 하드웨어 구현 시, 필터 계수를 저장하는 공간과 계산량이 모두 2~3 배정도 증가한다. 그러나 성능에 있어서는 얻고자하는 주파수 응답을 거의 비슷하게 얻을 수 있다.

### III. 가변 Q 이퀄라이저

앞에서 살펴본 바와 같이, 서로 다른 대역에 설치한 이퀄라이저 필터들의 상호 간섭 때문에 실제 이퀄라이저에서는 원하는 주파수 응답을 얻지 못한다. 현재까지 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 상수 Q 이퀄라이저와 opposite 필터를 이용한 이퀄라이저, 비선형 최적화를 이용한 방법 등이 소개되고 있다. 상수 Q 이퀄라이저<sup>[2]</sup>는 아날로그 회로로 구현할 때 효과적인 방

법이나, 필터의 상호 간섭을 효과적으로 제거하지 못한다는 단점이 있다. 비선형 최적화를 이용한 방법<sup>[1]</sup>은 원하는 주파수 응답에 근접한 응답을 갖도록 개별적인 이퀄라이저 필터의 이득, 중심 주파수, Q-factor들을 최적화시켜 사용하는 방법이다. 이 방법은 원하는 주파수 응답이 수정될 때마다 매번 최적화 과정을 거쳐야 하므로, 복잡도가 크게 증가한다는 단점이 있다. II. 2절에서 설명한 opposite 필터를 이용한 이퀄라이저<sup>[1]</sup>는 비교적 우수한 성능을 보이나, 평탄한 영역에서 큰 리플을 가지며, 복잡한 이퀄라이저 설정에서 여전히 실제 주파수 응답은 원하는 주파수 응답과 차이가 난다는 단점이 있다.

본 논문에서는 디지털 그래픽 이퀄라이저의 성능을 개선하여 원하는 주파수 응답을 적절히 표현할 수 있는 가변 Q 이퀄라이저를 제안한다. 먼저, III.1절에서는 가변 Q 이퀄라이저를 설계하는 방법을 설명하고, III.2절에서는 opposite 필터를 적용한 가변 Q 이퀄라이저 설계 방법에 대하여 설명하겠다.

#### 1. 가변 Q 이퀄라이저 설계

중심 주파수가 각각  $f_1, f_2, \dots, f_N$ 인  $N$  개의 이퀄라이저 필터를 설치한  $N$  대역 그래픽 이퀄라이저를 고려해보자. 본 논문에서는 이러한 이퀄라이저의 성능 판단 기준으로 원하는 주파수 응답  $H(f)$ 과 실제 주파수 응답  $P(f)$ 간의 차이를 다음과 같이 정의되는 Euclidean 거리  $C(f)$ 로 측정하였다.

$$C(f) = \int_a^b H(f) - P(f)^2 df \quad (6)$$

여기서, 측정 주파수 영역은 첫 번째와 마지막 대역 중심 주파수 바깥쪽은 전이 대역임을 참조하여, 측정 주파수 영역을  $[f_1, f_N]$ 으로 설정하였다. 일반적으로 그래픽 이퀄라이저에서는 중심 주파수에서의 이득만을 정의하기 때문에 측정 주파수 영역내의 모든 주파수에 대하여 원하는 주파수 응답  $H(f)$ 를 설정하기는 어렵다.

만약, 그래픽 이퀄라이저의 이득을  $h_1, h_2, \dots, h_M$  등  $M$  단계로 구분할 때, 모든 대역에서의 이득을  $H(f) = h_i$ 로 동일하게 설정한다면,  $[f_1, f_N]$  내의 모든 주파수에서 동일한 크기의 주파수 응답을 갖는 것으로 볼 수 있으므로, 식 (6)을 통한 측정이 매우 용이

해진다. 이때, 이퀄라이저 필터간의 간섭 현상은 각 필터의 이득이 누적되어 실제 이득이 커지는 것으로 나타나는데, 이러한 환경 하에서  $C(f)$ 를 최소화시킴으로써 대역간 간섭이 최소화된 이퀄라이저를 설계할 수 있다.

한편,  $k$ 번째 대역을 위한 디지털 이퀄라이저 필터는 중심 주파수  $f_k$ , 이득  $G_k$ , Q-factor의 함수로 나타내어진다. 만약, 그래픽 이퀄라이저의 중심 주파수는 항상 고정되어있다는 점을 참조한다면, 이퀄라이저 필터의 이득을  $G_k = h_i$ 로 설정하였을 때 식 (6)을 최소화시키는 Q-factor  $Q_i$ 를 다음과 같이 검색함으로써 이퀄라이저 필터를 설계할 수 있다.

$$Q_i = \operatorname{argmin}_{q \in S} \int_{f_1}^{f_N} h_i - P(f, q)^2 df \quad (7)$$

여기서  $S$ 는 Q-factor 값의 집합이다. 식 (7)에서 주목할 점은 Q-factor는 모든 대역에 동일하게 적용되고, 다만 이득에 따라 적합한 값이 결정된다는 것이다. 본 논문에서는 주어진 이득  $h_i$ 에 대하여 식 (7)을 만족시키는 Q-factor  $Q_i$ 를 집합  $S$ 내에서 검색하여 최적의 Q-factor를 결정하였다. 이때, 가능한 Q-factor의 값의 집합인  $S$ 는 0부터 0.01 간격으로 3까지의 값으로 구성하였다. 한편, 디지털 이퀄라이저에서 고주파 대역의 중심 주파수가 높은 경우에는 식 (2)의 쌍선형 변환에 의한 고주파 영역 wrapping 현상이 커지므로 모든 대역에 동일한 Q-factor를 사용하기 어렵다. wrapping 현상은 고주파 2개 대역에서 현저히 나타나는 것으로 측정되었으므로, 이 두 대역을 제외한 다른 대역에 대하여 식 (7)에 따라 Q-factor를 먼저 결정하였다. 그런 다음, 고주파 2개 대역에 대한 Q-factor를 개별적으로 최적화시킨다.

2. Opposite 필터를 적용한 가변 Q 이퀄라이저 설계  
 식 (5)로 표현되는 이퀄라이저 필터는 대칭적인 주파

수 응답을 가진다. opposite 필터는 인접한 중심 주파수에서 이퀄라이저 필터의 이득을 보상하는 것이므로, 동일한 특성을 가지는 opposite 필터를 양쪽의 인접한 중심 주파수 위치에 설치한다. 이때 이퀄라이저를 설계하는 문제는 이퀄라이저 필터의 Q-factor  $Q_i$ 와 opposite 필터 Q-factor  $Q_i'$ 을 함께 검색하는 문제로 귀착되며, 이는 식 (7)과 유사하게 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\{Q_i, Q_i'\} = \operatorname{argmin}_{q, q' \in S} \int_{f_1}^{f_N} |h_i - P(f, q, q')|^2 df \quad (8)$$

본 논문에서는 식 (8)을 이용하여 모든 이득 값  $h_i, i = 1, \dots, M$ 에 대해 개별적으로 다음과 같은 과정을 수행함으로써 이퀄라이저를 설계하였다. 먼저 초기 상태의 값을 얻기 위해, opposite 필터의 Q-factor  $Q_i'$ 를 0으로 설정하였을 때, 이퀄라이저 필터의 Q-factor  $Q_i$ 를 결정한다. 이때  $Q_i$ 는 opposite 필터를 적용하지 않았을 때 이퀄라이저와 유사하다. 두 번째로,  $Q_i$ 를 고정시킨 상태에서, 각 대역에 대한 opposite 필터의 이득을 이퀄라이저 필터의 인접한 중심 주파수에서의 이득의 부호를 반대로 결정하고, 식 (8)을 만족시키는  $Q_i'$ 을 검색한다. 세 번째로,  $Q_i'$ 를 고정시키고, 이퀄라이저의 Q-factor 및 이에 따라 opposite 필터의 이득을 조정하면서 식 (8)을 만족시키는  $Q_i$ 를 검색한다. 네 번째로,  $Q_i$ 를 고정시키고, 식 (8)을 만족시키는  $Q_i'$ 을 검색한다. 세 번째와 네 번째 과정을 왜곡 값이 더 이상 최소화되지 않을 때까지 반복 수행하여 최적의  $Q_i$  및  $Q_i'$ 을 얻는다.

한편, 이퀄라이저의 설계는 각 이퀄라이저 필터의 중심 주파수를 어떻게 설정하는가에 따라 그 특성이 매우 달라진다. 본 논문에서는 표 1에 제시한 바와 같이 10 대역 이퀄라이저에서 3가지 중심 주파수 설정 방법을

표 1. 10대역 이퀄라이저에서 3가지 중심 주파수 설정 방법(단위:Hz).  
 Table 1. 3 configurations of center frequencies in 10-band equalizer (unit: Hz).

대역 기법	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
설정 1	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
설정 2	28	56	112	224	447	893	1782	3556	7096	14158
설정 3	28	56	112	224	447	892	1774	3494	6643	11419

고려하였다. 설정 1은 일반적인 방법으로 1KHz를 중심으로 1옥타브 간격으로 중심 주파수를 배열한 것이다. 설정 2는 20Hz부터 20,000Hz까지 주파수 영역을 로그 스케일로 10개의 동일한 간격으로 중심 주파수를 배치한 것이다. 설정 3은 설정 2와 동일하되, 쌍선형 변환 시 wrapping된 주파수를 그대로 사용한 것으로, 설정 2에 비해 고주파 영역의 중심 주파수가 작아졌음을 알 수 있다.

표 1에 제시한 3가지 중심 주파수 설정에 대하여 본 절에서 소개한 방법으로 opposite 필터를 적용한 10대역 이퀄라이저를 설계하였을 때, 이득에 따른 Q-factor는 표 2에 제시하였다. 표 2를 살펴보면, 이퀄라이저 필터의 Q-factor  $Q_i$ 는 이득이 증가함에 따라 그 값이 커지는 특성을 보인다. 이는 높은 이득에서는 대역간 간섭이 커지기 때문에 Q-factor를 높임으로써 이를 보상하고자 하는 것이다. 그러나 낮은 이득에서는 대역간 간섭이 비교적 작기 때문에 Q-factor의 값을 작게 하여 주파수 영역에서 평활화 효과(smoothing effect)를 높일 수 있다. opposite 필터의 Q-factor  $Q_i'$ 는 Azizi<sup>[1]</sup>의 경우에  $Q_i$ 의 제곱으로 설정하였지만, 본 논문에서 제시한 표 2의 결과를 보면, 이득에 따라 그 값이 완만하게 증가함을 알 수 있다. 예를 들어 설정 3의 경우, 이퀄라이저 필터의 Q-factor는 1.33에서 2.42까지의 값을 가지지만, opposite 필터의 Q-factor는 1.95부터 2.24까지의 비교적 좁은 범위의 값으로 표현된다. 이는 opposite 필터가 이퀄라이저 필터에 비해 이득이 작고, opposite 필터가 설치된 위치에서 이퀄라이저 필터의 주파수 응답의 모양이 이득에 따라 급격한 변화를 보이지 않음으로 판단된다. 이러한 Q-factor 설정은 다음절에서 설명하겠지만, 평탄한(smooth) 주파수 응답을 얻는데 크게 기여한다.

IV. 시뮬레이션

본 절에서는 본 논문에서 제안한 가변 Q 이퀄라이저의 성능을 기존의 이퀄라이저의 성능과 Matlab을 이용하여 비교 평가한다. 실험에서는 48KHz로 표본화된 오디오 신호에 적용할 수 있는 10 대역 그래픽 이퀄라이저를 고려하였다.

첫 번째로, 그림 5에서는 표 1의 설정 1과 같이 중심 주파수를 설정하고, 모든 대역의 이득을 -10dB에서 2dB 간격으로 10dB까지 동일하게 변화시켰을 때 상수

표 2. Opposite 필터를 적용한 가변 Q 이퀄라이저에서 Q-factor의 예.

Table 2. Example of Q-factors for variable-Q equalizers employing the opposite filter.

기법 이득(dB)	설정 1		설정 2		설정 3	
	Q	Q'	Q	Q'	Q	Q'
12	1.69	1.83	1.85	1.89	2.42	2.24
11	1.59	1.79	1.75	1.85	2.30	2.21
10	1.50	1.75	1.64	1.81	2.18	2.18
9	1.41	1.71	1.55	1.77	2.08	2.17
8	1.33	1.67	1.47	1.75	1.98	2.15
7	1.25	1.63	1.38	1.70	1.89	2.15
6	1.18	1.60	1.31	1.67	1.77	2.09
5	1.11	1.56	1.23	1.63	1.68	2.07
4	1.05	1.53	1.16	1.60	1.59	2.05
3	0.99	1.50	1.10	1.58	1.50	2.02
2	0.92	1.45	1.03	1.54	1.42	2.00
1	0.88	1.45	0.97	1.51	1.33	1.95

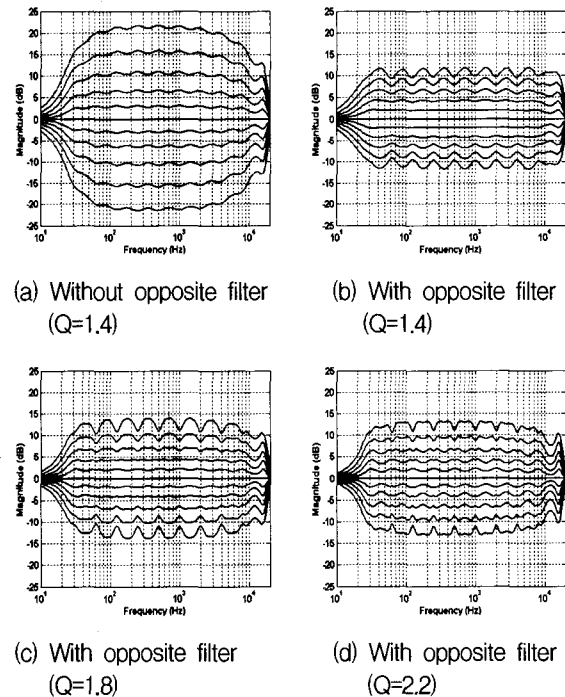


그림 5. 10대역 상수 Q 이퀄라이저의 주파수 응답.  
Fig. 5. Frequency responses for 10-band constant-Q equalizers.

Q 이퀄라이저의 주파수 응답을 제시하였다. 그림 5(a)는 Q-factor가 1.4일 때 opposite 필터를 적용하지 않은 상수 Q 이퀄라이저의 주파수 응답이다. 그리고 그림

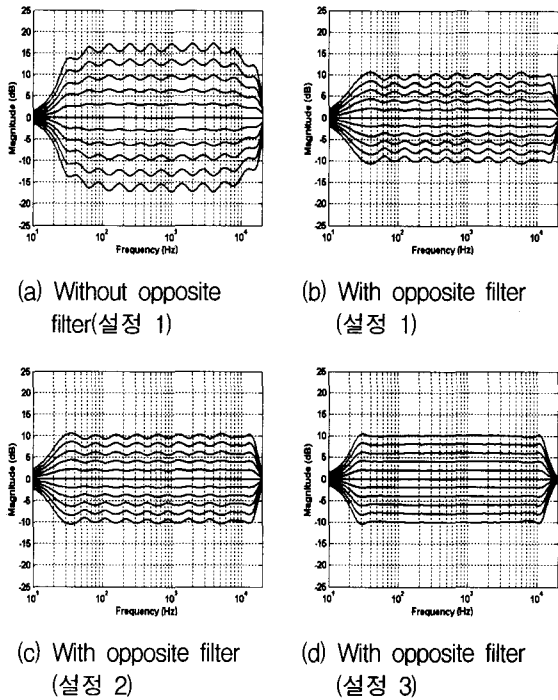


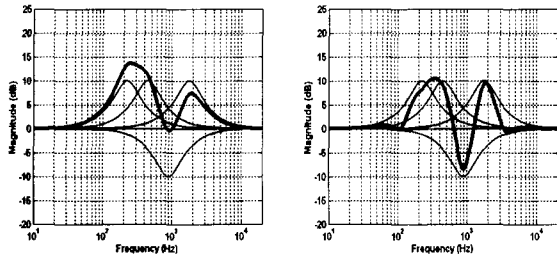
그림 6. 10대역 가변 Q 이퀄라이저의 주파수 응답.  
Fig. 6. Frequency responses for 10-band variable-Q equalizers.

5(b), (c) 및 (d)는 Q-factor가 각각 1.4, 1.8 및 2.2일 때 opposite 필터를 적용한 상수 Q 이퀄라이저의 주파수 응답을 제시한 것이다. 여기서, opposite 필터의 Q-factor는 Azizi<sup>[1]</sup>가 제시한 대로, 이퀄라이저 필터의 Q-factor의 제곱을 사용하였다. 그림 5(a)를 살펴보면, 모든 대역의 이득을 10dB로 설정하였을 때 대역간 간섭에 의해 실제 주파수 응답이 약 21dB로 매우 높아짐을 알 수 있다. 그러나, 그림 5(b)에서 알 수 있듯이, opposite 필터를 적용함으로써 실제 주파수 응답은 원하는 이득에 매우 근접하게 됨을 알 수 있다. 따라서, opposite 필터는 대역간 간섭을 제거하는데 효과적임을 알 수 있다. 한편, 그림 5(b)부터 (d)에 제시한 opposite 필터를 적용한 이퀄라이저에서 Q-factor에 따른 성능을 살펴보면, Q-factor가 커짐에 따라 리플이 커지고, 고주파 대역에서 불균일한 특성을 나타내어 주파수 평활화 효과가 감소함을 알 수 있다. 또한, 이퀄라이저 필터의 Q-factor에 더불어 opposite 필터의 Q-factor도 함께 커지기 때문에 대역간 간섭이 오히려 커져, 실제 주파수 응답은 원하는 이득을 적절하게 표현하지 못함을 알 수 있었다.

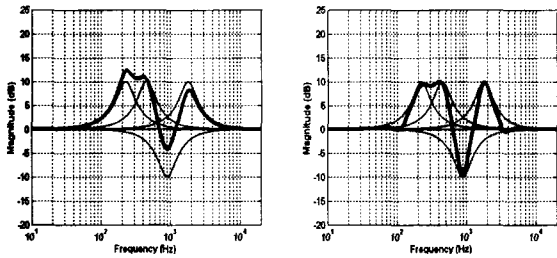
한편, 그림 6에서는 모든 대역의 이득을 -10dB에서 2dB 간격으로 10dB까지 동일하게 변화시켰을 때 제안

한 가변 Q 이퀄라이저의 주파수 응답을 제시하였다. 그림 6(a)는 표 1의 설정 1과 같이 중심 주파수를 설정하고 [6]에서 제시한 Q-factor를 적용하였을 때 opposite 필터를 적용하지 않은 가변 Q 이퀄라이저의 주파수 응답이다. 그리고, 그림 6(b), (c) 및 (d)에서는 각각 설정 1, 설정 2, 및 설정 3으로 중심 주파수를 설정하고, 이에 따라 표2와 같은 Q-factor를 사용하였을 때, opposite 필터를 적용한 가변 Q 이퀄라이저의 성능을 제시한 것이다. 그림 6(a)를 살펴보면, 그림 5(a)에 제시한 상수 Q 이퀄라이저에 비해 실제 주파수 응답이 원하는 이득에 보다 근접한 것으로 나타나, 본 논문에서 제안한 가변 Q 이퀄라이저의 장점을 잘 보여준다. opposite 필터를 적용한 가변 Q 이퀄라이저는 그림 6(b)-(d)에 보인바와 같이 opposite 필터를 적용하지 않은 가변 Q 이퀄라이저뿐만 아니라 opposite 필터를 적용한 상수 Q 이퀄라이저에 비해 매우 우수한 성능을 보였다. 이는 표 2에 제시한 바와 같이 각 이득별로 이퀄라이저 필터 및 opposite 필터에 적절한 Q-factor를 설정함으로써 원하는 이득을 잘 표현함과 동시에 주파수 영역에서 평활화 효과를 향상시켰기 때문으로 판단된다. 특히, 설정 3과 같이 중심 주파수를 설정한 이퀄라이저는, 그림 6(d)에 보인바와 같이, 고주파 영역에서의 주파수 wrapping을 고려하여 중심 주파수를 가청주파수 영역에서 균일하게 분포시킴으로써 설정한 이득에 가장 근접한 특성을 나타내었다.

마지막으로, 그림 7과 8에서는 가장 우수한 특성을 보이는 설정 3과 같이 중심 주파수를 분포시켰을 때, 상수 Q 이퀄라이저, 가변 Q 이퀄라이저, opposite 필터를 적용한 상수 Q 이퀄라이저, opposite 필터를 적용한 가변 Q 이퀄라이저 등 4가지 이퀄라이저의 성능을 평가하였다. 그림 7에서는 인접 대역간의 간섭에 의한 영향을 살펴보기 위한 것으로 제4, 5, 7대역의 이득을 10dB, 제 6대역의 이득을 -10dB, 나머지 대역의 이득을 0dB로 설정하였을 때, 네 가지 이퀄라이저의 성능을 제시하였다. 그리고 그림 8에서는 임의로 설정된 이득을 각 이퀄라이저가 얼마나 충실히 표현하는 지를 알아보기 위한 것으로, 각 대역의 이득을 2, -12, 8, 4, -10, 6, 10, -4, -4, 0dB로 설정하였을 때의 성능을 나타내었다. 그림 7과 8을 살펴보면, 이득에 따라 Q-factor를 조정하는 가변 Q 이퀄라이저는 상수 Q 이퀄라이저에 비해 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 특히, opposite 필터를 적용한 가변 Q 이퀄라이저는 인접 대역간의 간섭을 최소화하여 임의로 설정된 이득을 매우 충실히 표현하



(a) Constant-Q without opposite filter (b) Constant-Q with opposite filter



(c) Variable-Q without opposite filter (d) Variable-Q with oppo -site filter

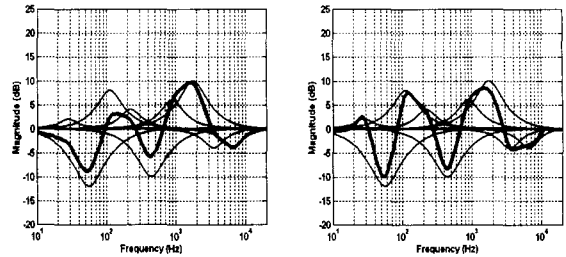
그림 7. 4가지 이퀄라이저의 성능 비교 I.  
Fig. 7. The first performance comparison between the 4 equalizers.

였다. 따라서, 본 논문에서 제안한 가변 Q 이퀄라이저를 사용한다면, 기존의 방법에 비해 이퀄라이저의 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

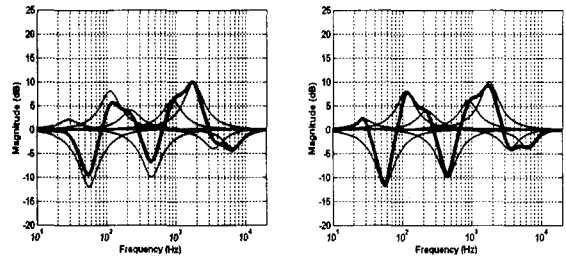
V. 결 론

본 논문에서는 이득에 따라 Q-factor를 조정하는 가변 Q 이퀄라이저를 제안하였다. 그리고 가변 Q 이퀄라이저를 설계하는 방법을 제시하고, 최근에 소개된 opposite 필터를 적용한 이퀄라이저에 적용하였다. 본 논문에서 제안하는 가변 Q 이퀄라이저는 높은 이득에서 Q-factor를 크게 하여 대역간 간섭을 최소화시키고, 낮은 이득에서는 Q-factor를 작게 하여 주파수 영역에서 평활화 효과를 얻을 수 있도록 한다. 그리고 opposite 필터에 대해서는 이득이 비교적 작고, 인접한 중심 주파수에서 이퀄라이저 필터의 이득을 보상하기 위한 것이라는 점을 참조하여 비교적 좁은 범위에서 값이 선택되었다. 그 결과, 본 논문에서 제안한 가변 Q 이퀄라이저는 특히, opposite 필터를 적용하였을 때 사용자가 설정한 이득을 매우 충실하게 표현할 수 있음을 보였다.

일반적으로 디지털 이퀄라이저 필터는 식 (5)에 보인



(a) Constant-Q without opposite filter (b) Constant-Q with oppo -site filter



(c) Variable-Q without opposite filter (d) Variable-Q with oppo -site filter

그림 8. 4가지 이퀄라이저의 성능 비교 II.  
Fig. 8. The second performance comparison between the 4 equalizers.

바와 같이 4개의 계수들로 표현되고, 디지털 그래픽 이퀄라이저에서는 각 대역 및 이득에 적합한 계수들을 별도로 저장하여, 사용자 설정에 따라 적합한 계수들을 호출하여 사용한다. 이러한 측면에서 볼 때, 본 논문에서 제안한 가변 Q 이퀄라이저는 이득에 따라 적합한 Q-factor를 가지는 이퀄라이저 필터를 사용하므로, 기존의 이퀄라이저와 동등한 수준의 계산량과 저장공간을 요구한다. 따라서 본 논문에서 제안한 가변 Q 이퀄라이저는 시스템 복잡도를 일정 수준으로 유지하면서 향상된 성능을 제공하므로, 향후 고품질 디지털 오디오 시스템에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

[1] S.A. Azizi, "A new concept of interference compensation for parametric and graphic equalizer banks," 111th AES Convention, Preprint 5482, Sep. 2001.  
[2] D. Bohn, "Constant-Q graphic equalizers," J. Audio Eng. Soc., vol. 34, no. 9, pp. 611~626, Sep. 1986.  
[3] J.M. Goldberg, M.B. Sandler, "Noise shaping and pulse-width modulation for an all-digital audio power amplifier," J. Audio Eng. Soc., vol. 39, no.



6, pp. 441~448, Aug. 1991.

[4] A.V. Openheim and R.W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing. Prentice-Hall, 1998.

[5] STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES, data sheet, "Five bands digital controlled graphic equalizer," Nov. 1999.

[6] 이용희, 김인철, "가변 Q-factor를 가지는 디지털 그래픽 이퀄라이저," 방송공학회논문지 제8권, 제1호, pp.3~10, 2003년 3월.

저 자 소 개



**이 용 희**(정회원)  
 2002년 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 학사 졸업.  
 2004년 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 석사 졸업.  
 2004년 LG전자기술원 Mobile Multimedia 연구소 재직

<주관심분야: 디지털 신호처리, 음향 신호처리>



**김 인 철**(정회원)  
 1985년 서울대학교 제어계측공학과 학사 졸업.  
 1987년 서울대학교 제어계측공학과 석사 졸업.  
 1992년 서울대학교 제어계측공학과 박사 졸업.

1992~1994년 대우전자(주) 영상연구소 선임연구원  
 1994~1999년 한성대학교 정보공학과 조교수  
 1999~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터 공학과 부교수

<주관심분야: 오디오 및 비디오 신호처리, 실시간 신호처리>



**조 국 춘**(정회원)  
 1990년 한양대학교 전자공학과 학사졸업.  
 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사졸업.  
 1996년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 졸업.

현재 (주)디지털엔아날로그 디지털미디어연구소 이사

<주관심분야: 신호처리, 반도체, 전력전자>

