

청각 손실 방지를 위한 Self-Tuning 알고리즘 개발

Development of Self-Tuning Algorithm for Reducing Hearing Damage

김현태*, 박장식**
(Hyuntae Kim, Jangsik Park)

Abstract - 종래의 음향기기에서 소리 크기는 각 주파수별로 다른 감도를 갖는 개인의 주파수 청력 특성을 고려하지 않고 모든 주파수에 대하여 동일하게 선형으로 소리 크기를 조절한다. 따라서 감도가 높은 주파수대에서 청력 손상을 일으킨다. 이를 개선하기 위한 표준 청력특성, ISO266:2003 표준을 이용한 평활화 방법이 있지만, 이 표준에 따른 등청감곡선은 여러 사람에 대해 평균한 청력특성이기 때문에 다양한 환경에 의해 변형된 개인별 청력특성에 맞지 않아 청력 손상을 감소시키는 실질적인 효과가 저하되는 문제점이 있다. 본 연구는 사람마다 다른 최소가청한계 특성을 갖는 청각특성과 최대가청한계를 고려하여 소리 크기를 조절함으로써 음향기기에 의한 청각 손상을 감소시키는 방법에 관한 것이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 청력 특성이 좋은 대역에서 기존 방법에 비해 보다 낮은 소리 크기에서 불편없이 인지 가능하다는 것을 확인할 수 있었으며, 동시에 과도한 대역별 소리 에너지를 줄여 청각 손상도 방지할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : 자기 동조: 청력 손상: 최소가청한계: 등청감곡선: 개인별 소리크기 조절

1. 서론

휴대용 음향기기의 보급이 확대되면서 음향기기에 의한 소음성 난청이 증가하고 있다. 개인용 음향기기의 최대 음량은 78~136dB로 이를 장기간 사용할 때에는 영구적인 청력손실이 발생할 수 있다. 최근 소음성난청을 방지하기 위하여 많은 기술들이 개발되고 있다[1] 이 중에서도 와이즈오디오사의 청력보호기술이 각광 받고 있다[2]. 와이즈오디오사는 테스트를 통하여 개인청력 특성을 파악한 후 이퀄라이저를 설정하여 사용자에게 적절한 사운드환경을 제공하고 있다. 그러나 와이즈오디오사의 테스트환경에서 발생하는 순음은 정상적인 일반성인은 모든 소리가 다 들을 수 있으므로 사용자에게 맞는 이퀄라이저를 설정할 수 없으며 볼륨은 각 주파수에서 선형적으로 증가, 감소함으로 최대가청한계(사람이 들을 수 있는 최대 크기의 소리)가 설정되지 않아 소음성난청을 방지에는 효과가 떨어진다. Self-tune는 사람마다 다른 최소가청한계 특성을 갖는 청각특성과 최대가청한계를 고려하여 소리의 크기를 조절함으로써 음향기기에 의한 청각 손상을 감소시키는 방법에 관한 것이다.

2. SELF-TUNE 알고리즘 필요성

2.1 ISO266:2003 표준 등청감곡선

저자 소개

* 正 會 員 : 동의대학교 멀티미디어공학과 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 동의과학대학 디지털정보전자과 教授 · 工博

self-tune 알고리즘을 적용하는 음향기기 혹은 통신기기의 초기 기준 소리 크기는 ISO266:2003 표준 등청감곡선을 기준으로 한다[3]. 그러나, ISO266:2003 표준은 여러 사람에 대한 평균적인 등청감 특성이기 때문에 다양한 개인적인 음향 환경, 즉, 선천적인 요인이나 질환, 작업 환경, 음악 청취 습관 등의 영향에 의하여 변형된 청각 특성을 갖게 된 사람에게 표준 등청감곡선을 기준으로 소리를 제공하는 것은 부적절하다.

2.2 주파수별 소음 노출 허용 시간과 크기

[그림 1]은 120dB을 최대 가청한계로 설정하고 주파수별 소음 노출 허용 시간과 크기를 표시한 것이다[4]. 주파수별 순음을 같은 크기로 제공할 때, 청각을 손상하지 않기 위한 허용 시간은 주파수마다 다르다. 그리고, 주파수별 순음을 같은 시간 동안 노출한다면 청각을 손상하지 않기 위하여 허용되는 소리의 크기는 주파수별로 다르다. 예를 들면, 250Hz 주파수의 순음을 120dB 크기로 30분간 노출이 허용되지만, 3kHz 주파수의 순음을 90dB 크기로 30분간 노출이 허용된다. [그림 1]에 나타난 등청감곡선은 크기 변화가 표준 등청감곡선의 최소가청한계의 주파수 특성 모양과 유사한 형태를 갖는다. self-tune 알고리즘은 이 점에 착안하여 청력 특성이 각각 다른 사람에게 맞는 소리를 제공하기 위하여 각 개인별 최소가청한계를 측정하고 이를 기준으로 소리 크기를 조절함으로써 모든 주파수에 대하여 동일하게 크기를 조절하여 발생하는 특정 주파수에 대한 청력 손상을 줄이고자 한다.

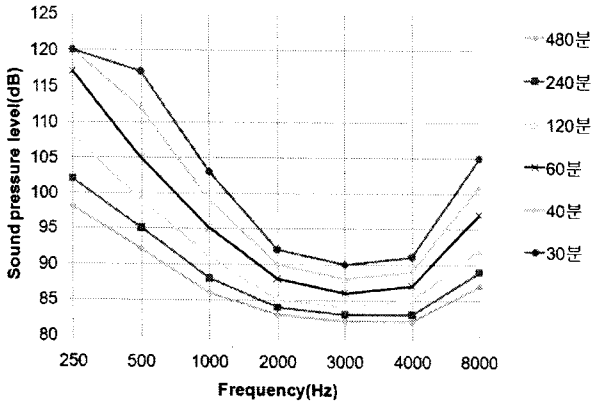


그림 1. 주파수별 소음 노출 허용 시간 및 크기 관계 곡선

3. 알고리즘 구현

3.1 이퀄라이저 처리과정

처리 과정은 크게 주파수 샘플링 필터 설계, 이퀄라이저의 필터링, 그리고 볼륨 조절로 나눌 수 있다. 종래의 음향기기에서 소리 크기의 조절은 모든 주파수에 대하여 동일하게 선형으로 소리의 크기를 조절하지만 self-tune을 기반으로 하는 시스템은 개개인의 청력특성을 고려하여 EQ값, Δ_{fn} 에 의하여 주파수 영역에서 각 주파수성분마다 다르게 볼륨 조절을 하여 음향기기 사용자의 청력을 보호한다.

3.1.1 주파수 샘플링 필터 설계

1) 주파수 응답 정의

입력신호의 샘플링 주파수는 8[kHz]이므로 디지털신호가 표현할 수 있는 최대 주파수는 4[kHz]이다. $h[n]$ 는 설계하려는 이퀄라이저의 임펄스 응답이며, $H(e^{j\omega})$ 은 이퀄라이저의 푸리에 변환이다. $H[k]$ 는 $h[n]$ 의 이산 푸리에 변환(DFT)이고 $H(e^{j\omega})$ 를 주파수 샘플링한 결과와 같으며 $H[k]$ 의 연산량을 줄인 것이 고속 푸리에 변환(FFT)이다. 주파수 샘플링 필터 설계방법은 수식 (1)과 같이 볼륨 조절시 각 주파수 f 에서의 EQ값, Δ_{fn} 에 의하여 $H_1[k]$ 를 설정하면서 시작된다. 주파수 응답 $H_1[k]$ 의 인덱스 k 에서 $0 \sim 64$ 는 디지털 주파수 $0 \sim \pi$, k 가 $65 \sim 127$ 는 디지털 주파수 $\pi \sim 2\pi$ 를 의미한다.

$$H_1[k] = \begin{cases} \Delta_{f_1}, k=3 (f=250Hz) \\ \Delta_{f_2}, k=7 (f=500Hz) \\ \Delta_{f_3}, k=15 (f=1kHz) \\ \Delta_{f_4}, k=31 (f=2kHz) \\ \Delta_{f_5}, k=64 (f=4kHz) \\ 0, otherwise \end{cases}, 0 \leq k \leq 127 \quad (1)$$

[그림 2]의 (a)는 $H_1[k]$ 의 설정 예를 보여 주며 각 샘플 사이의 값들을 선형 보간 후 디지털 주파수 $0 \sim \pi$ 가 설정되고 이를 반전해서 디지털 주파수 $\pi \sim 2\pi$ 에 복사하면 주파수 샘플링 필터 $H_2[k]$ 가 완성되며 [그림 2]의 (b)에서 예를 보여준다.

2) 선형 위상 할당

$H_2[k]$ 의 역 이산 푸리에 변환 $h_1[n]$ 을 나타내며 지연이 없는 상태이므로 선형 위상을 할당하여야한다. self-tune구현시 선형 위상 할당은 지수함수를 사용하지 않고 수식 (2)와 같이 순환 이동하여 선형 위상을 나타내는 $h_2[n]$ 를 계산한다.

$$h_2[n] = \begin{cases} \tilde{h}_2[n] = h_1[((n-m))_N], 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, otherwise \end{cases} \quad (2)$$

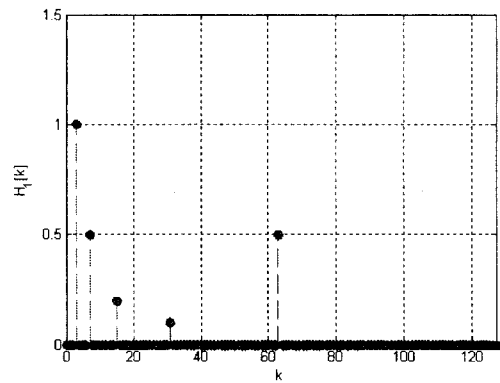
여기서, $m=64$ 이며 $N=128$ 이다.

3) 임펄스 응답

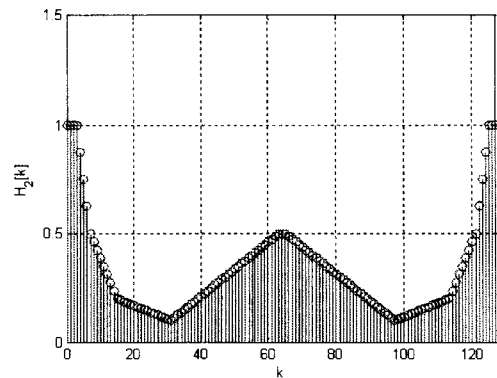
$h_2[n]$ 는 $n < 32$ 또는 $n > 96$ 인 경우 $h_2[n]$ 의 값은 무시할 수 있으므로 버린다. 따라서 최종 이퀄라이저의 임펄스 응답은 수식 (3)과 같이 $h[n]$ 을 구할 수 있으며 [그림 2]의 (c)에 나타내었다.

$$h[n] = h_2[n], 0 \leq n \leq 64 \quad (3)$$

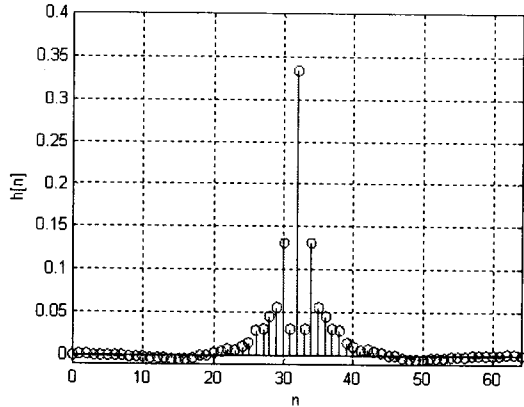
self-tune에서 설계한 이퀄라이저의 임펄스 응답을 $h[n]$ 이라 가정하며 $h[n]$ 을 이용하여 출력을 계산하진 않는다. 그러나 $h[n]$ 시스템과 동일한 결과를 얻기 위하여 입력 음성을 주파수 영역에서 필터링 시 $H_2[k]$ 를 이용하고, 순환 이동(circular shift)을 적용하여 처리한다.



(a) 볼륨조절시 설정된 Δ_{fn} 값



(b) 선형 보간된 이퀄라이저



(c) 순환 이동 및 근사화된 이퀄라이즈 임펄스 응답
 그림 2. 주파수 샘플링 설계 방법을 이용한 이퀄라이저

3.3.2 이퀄라이저의 필터링

디지털 시스템에서 실시간 음성 $x[n]$ 을 처리하기 위하여 블록 컨볼루션을 사용한다. 음성 입력은 아래 (4)식과 같이 천이된 유한 길이 L 의 구획 $x_r[n]$ 의 합으로 표현된다.

$$x[n] = \sum_{r=0}^{\infty} x_r[n-rL], \quad (4)$$

$$\text{where } x_r[n] = \begin{cases} x[n+rL], & 0 \leq n \leq L-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

시스템 출력 $y[n]$ 은 실시간 처리를 위하여 오버랩 애드 메소드를 사용하면 (5)식과 같이 계산되어진다. 그리고 출력은 블록 컨볼루션을 사용하면 천이된 유한 길이 L 의 구획 $x_r[n]$ 의 시스템 출력 $y_r[n]$ 의 합으로 표현된다.

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{r=0}^{\infty} y_r[n-rL], \quad (5)$$

여기서 $y_r[n] = x_r[n] * h[n]$ 이다. 식(7)에서 $y_r[n]$ 의 이산 푸리에 변환은 식(6)과 같다.

$$Y_r[k] = X_r[k]H[k], \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (6)$$

식 (6)은 앞서 설계한 이퀄라이저에서 위상을 고려하면 (7)이 된다.

$$Y_r[k] \approx X_r[k]H_2[k]e^{-j(2\pi k/N)m} = Y_s[k]e^{-j(2\pi k/N)m}, \quad (7)$$

$$0 \leq k \leq N-1$$

실제 $Y_s[k]$ 는 self-tune에서 이퀄라이저 필터링결과이며 이를 다시 역 이산 푸리에 변환한 시간영역에서는 식(8)과 같이 얻는다.

$$y_r[n] \approx \begin{cases} \tilde{y}_r[n] = y_s[((n-m))_N], & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

3.3.3 볼륨 조절

각 주파수 f 에 대하여 최소가청한계, Min_f 가 설정되면 (9)번 수식과 같이 f 에 대하여 소리 크기 조절 간격이 계산된다.

$$\Delta_f = \frac{Max_f - Min_f}{N} \quad (9)$$

$$L_f(n) = L_f(n-1) + \Delta_f \quad (10)$$

단 최대가청한계값, Max_f 는 표준등청감곡선을 기준으로 설정된다. $L_f(n)$ 는 주파수 f 에서의 n 번째 소리 크기이다. N 은 10으로 초기화 되어 있으며 각 주파수에서 (최대가청한계-최소가청한계)/10으로 볼륨 조절 단계를 10단계로 나누어져 있다.

4. 실험 결과

첫 번째 실험은 FFT처리후 주파수 영역에서 EQ처리 실험이다. 샘플링 주파수는 위와 동일하고 각 버튼에 EQ의 각 주파수 스펙트럼 값을 변경할 수 있게 구성을 하였다. 실험결과 버튼으로 EQ의 스펙트럼 값 변경시 음성신호에서 해당 주파수가 변화되는것을 확인할 수 있었다.

두 번째 실험은 self-tune 실험이다. self-tune는 loop-back 모드와 tone-generation모드로 구성이 되며 모드의 변경은 버튼으로 가능하다. 샘플링 주파수는 loop-back모드에서 8kHz로 설정되어 있으며 tone-generation모드에서는 44.1kHz로 설정되어있다. 샘플링 주파수가 가변적인 이유는 8kHz때는 4kHz이상의 순음을 발생시킬 수 없기 때문이다. 실험 결과는 tone-generation에서는 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz의 순음이 정확하게 발생되었다. tone-generation모드가 종료되면 각 주파수 f 의 최소가청한계와 볼륨 조절 간격이 설정되며 loop-back모드가 시작된다. 버튼을 이용하여 볼륨 증가, 감소했을때 EQ의 값이 변경되어 볼륨 증가, 감소가 됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer and J. R. Buck, Discrete-time signal processing 2nd edition, Prentice Hall, 1999.
- [2] Talbot-Smith, Michael, Audio Engineer's Reference Book, Elsevier Science Ltd, 2001
- [3] ISO 226:2003 "Acoustics - Normal equal - loudness-level contours" International Organization of Standards. (2003)
- [4] Moore, Brian C. J. , An Introduction to the Psychology of Hearing 5th edition, Emerald Group Pub Ltd, 2003