

---

# 블루투스 헤드셋에서의 음질 향상에 관한 연구

- 개인 청각손실 방지측면 고려 -

김현태\* · 박장식\*\* · 송종관\*\*\*

Study on Sound Quality Improvement in Bluetooth Headset

Hyun-tae Kim\* · Jang-sik Park\*\* · Jong-kwan Song\*\*\*

---

이 논문은 2008년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음

---

## 요 약

최근 젊은 층을 중심으로 블루투스 헤드셋 등 착용형 청음기기에 의한 소음성 난청을 겪고 있다. 본 논문에서는 청력 손상을 주로 일으키는 감도가 높은 주파수대에서 개인별 청각 특성과 최대가청한계를 고려하여 소리 크기를 조절함으로써 블루투스 헤드셋에서의 청각 손상을 감소하는 동시에 보다 자연스런 음량 조절이 가능한 방법을 보인다. CSR Bluetooth headset example design board(DEV-PC-1645)에 구현한 실험에서 청력 특성이 좋은 대역에서 기존 방법에 비해 보다 낮은 소리 크기에서 불편없이 인지 가능하였다. 또한 그 결과로써 과도한 대역별 소리 에너지를 줄여 청각 손상도 방지할 수 있었다.

## ABSTRACT

Today, many young people suffer from noise-induced hearing loss by using wearable hearing devices, such as Bluetooth headset. This paper present hearing loss reduction and more natural volumn control algorithms considering individual hearing characteristics and threshold of feeling for Bluetooth headset. Experimental results using CSR Bluetooth headset example design board(DEV-PC-1645) show that individuals may be able to perceive without the inconvenience at the less sound intensity and the more sensitive frequency bands. As a result, we may prevent hearing loss to reduce excessive sound energy in each frequency bands.

## 키워드

개인별 소리크기 조절, 자기 동조, 최소가청한계, 블루투스 헤드셋, Kalimba-DSP

Personal Sound Intensity Control, Self-Tuning, Minimum Threshold of Hearing, Bluetooth Headset, Kalimba-DSP

---

\* 동의대학교 멀티미디어공학과

접수일자 2009. 05. 29

\*\* 동의과학대학 디지털정보전자과

\*\*\* 경성대학교 전기전자·메카트로닉스공학부

## I. 서론

착용형 청음기기의 보급이 확대되면서 음향기기에 의한 소음성 난청이 증가하고 있다. 개인용 음향기기의 최대 음량은 78~136dB로 이를 장기간 사용할 때에는 영구적인 청력손실이 발생할 수 있다. 최근 소음성 난청을 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 최대가청한계가 설정되지 않아 소음성난청을 방지에는 효과가 떨어진다. 제안하는 청각 손실 방지 알고리즘은 사람마다 다른 최소가청한계 특성을 갖는 청각특성과 최대가청한계를 고려하여 소리의 크기를 조절함으로써 음향기기에 의한 청각 손상을 감소시키는 방법에 관한 것이다.

## II. 청각 손실 방지 필요성

### 2.1 ISO266:2003 표준 등청감곡성

청각 손실 방지 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 청감 특성을 갖게 된 사람에게 표준 등청감곡선을 기준으로 소리를 제공하는 것은 부적절하다.

### 2.2 주파수별 소음 노출 허용 시간과 크기

그림 1은 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, 주파

수별 순음을 같은 시간 동안 노출한다면 청각을 손상 방지를 위해 허용되는 소리의 크기는 주파수별로 다르다. 예를 들면, 250Hz 주파수의 순음을 120dB 크기로 30분간 노출이 허용되지만, 3kHz 주파수의 순음을 90dB 크기로 30분간 노출이 허용된다. 그림 2에 나타난 등청감곡선은 크기 변화가 그림 1에 나타난 표준 등청감곡선의 최소가청한계의 주파수 특성 모양과 유사한 형태를 갖는다. 제안하는 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.

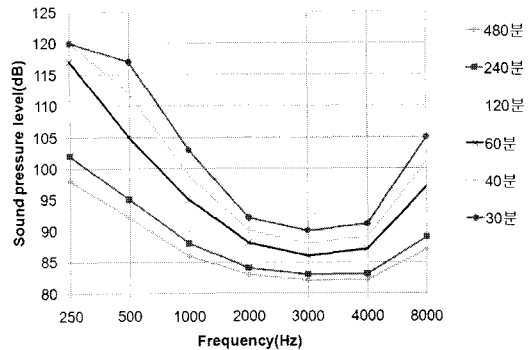


그림 1. 주파수별 소음 노출 허용 시간 및 크기 관계 곡선

Fig. 1 Relation curve between noise exposure allowed time and loudness level at each frequency band

## III. 알고리즘 구현

구현을 위하여 BlueCore5-Multimedia를 탑재하고 있는 CSR Bluetooth Headset example design board (DEV-PC-1645)를 사용하였다. BlueCore5 - Multimedia는 Microcontroller와 Kalimba DSP를 내장하고 있으므로 블루투스 헤드셋의 신호처리용 알고리즘을 구현하는데 적합하다[5-7].

### 3.1 청각 손실 방지 알고리즘 처리 구조

그림 2는 Kalimba-DSP에서 제안하는 알고리즘을 구

현하기 위한 구성도이다. 전체 처리 과정은 두 모드(mode0, mode1)로 구성되며 모드 전환은 button1의 입력을 받아서 제어기가 흐름을 제어한다. mode0는 loop-back 모드이며 Kalimba-DSP에서 음성 신호를 입력 받아 주파수 영역에서 이퀄라이즈 필터링된다. 그리고 button2(증가), button3(감소)를 조작하여 주파수 영역에서 이퀄라이저를 재구성하여 볼륨을 조절 한다. mode1은 tone-generation 모드이며 진폭 크기를 순차적으로 증가시켜 순음이 발생되며 음향기기 사용자의 최소가청한계를 측정한다. 사용자는 button2를 이용하여 각 주파수에서 최소가청한계값을 선택하며, 최소가청한계측정이 완료되면 이퀄라이저가 설정된다.

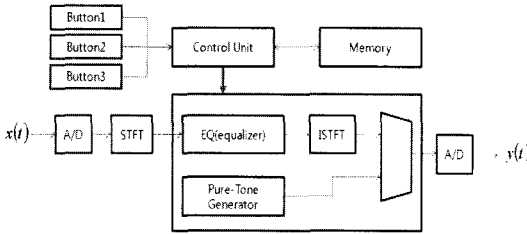


그림 2. 알고리즘 처리 구성도  
Fig. 2 Schematic Diagram for the Algorithm

### 3.1.1 최소가청한계 측정

최소가청한계 측정은 mode1(tone-generation모드)에서 가능하며 제어기는 각 주파수(250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz)에서 진폭 크기를 순차적으로 증가시켜 순음을 발생시킨다. 음향기기 사용자는 발생하는 소리를 들으며 button2를 조작하여 자신이 들을 수 있는 최저 음압인 최소가청한계를 선택할 수 있으며 tone-generation 모드가 끝나면 측정된 최소가청한계는 EQ 설정에 사용되며 메모리에 저장된다.

### 3.1.2 최대가청한계 설정

최대가청한계는 사람이 들을 수 있는 최대크기의 소리이며 볼륨 조절시 최대 기준이 된다. 최대 가청한계 설정은 표준 등청감곡선 상의 최대가청한계를 기준으로 설정한다.

## 3.2 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 제한하는 시스템은 개개인의 청력특성을 고려하여 EQ값,  $\Delta_{fn}$ 에 의하여 주파수 영역에서 각 주파수성분마다 다르게 볼륨 조절을 하여 음향기기 사용자의 청력을 보호한다.

### 3.2.1 주파수 샘플링 필터 설계

#### 1) 주파수 응답 정의

입력신호의 샘플링 주파수는 8kHz이므로 디지털 신호가 표현할 수 있는 최대 주파수는 4kHz이다.  $h[n]$ 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 설계 방법은 수식 (1)과 같이 볼륨 조절시 각 주파수  $f$ 에서의 EQ값,  $\Delta_{fn}$ 에 의하여  $H_1[k]$ 를 설정하면서 시작된다. 주파수 응답  $H_1[k]$ 의 인덱스  $k$ 에서 0~64는 디지털 주파수  $0 \sim \pi$ ,  $k$ 가 65~127는 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 3의 (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 3의 (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 할당하여야 한다. 본 시스템 구현 시 선형 위상 할당은 지수함수를 사용하지 않고 수식 (2)와 같이 순환 이동하여 선형 위상을 나타내는  $h_2[n]$ 를 계산한다.

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

여기서,  $m=64$ 이며,  $N=128$ 이다.

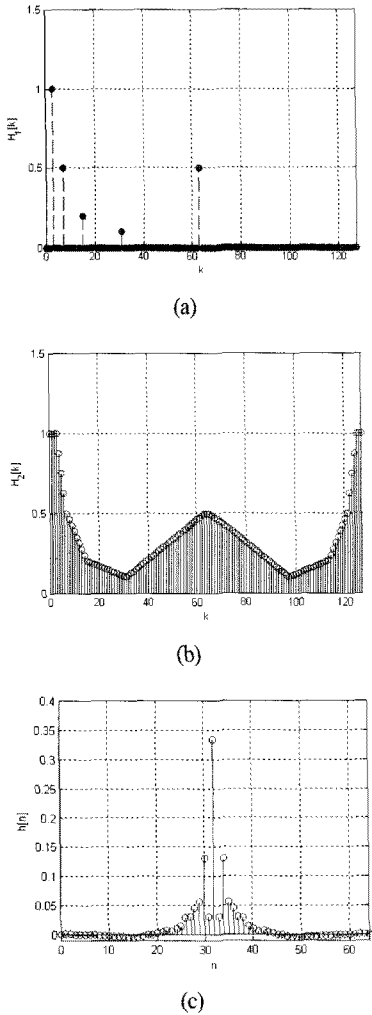


그림 3. 주파수 샘플링 설계 방법을 이용한 이퀄라이저 설계 (a) 볼륨조절시 설정된  $\Delta_{f_n}$  값 (b) 선형 보간된 이퀄라이저 (c) 순환 이동 및 근사화된 이퀄라이저 임펄스 응답  
Fig. 3 Equalizer Design using frequency sampling method (a) Volume controlled value  $\Delta_{f_n}$  (b) Linear interpolated equalizer (c) Circular shifted and approximated impulse response of the equalizer

### 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)와 같이  $h[n]$ 을 구할 수 있으며 그림 3의 (c)에 나타내었다.

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

본 시스템에서 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.

### 3.2.2 이퀄라이저의 필터링

디지털 시스템에서 실시간 음성  $x[n]$ 을 처리하기 위하여 블록 컨볼루션을 사용한다. 음성 입력은 아래 식 (4)와 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.

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

$$\text{where } y_r[n] = x_r[n] * h[n]$$

식(5)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 제안하는 구조에서 이퀄라이저 필터링 결과이며 이를 다시 역 이산 푸리에 변환한 시간영역에서는 식(8)과 같이 얻는다.

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

### 3.2.3 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.

## IV. 실험 결과

청각 손실 방지 알고리즘 구현을 위하여 BlueCore5 - Multimedia를 탑재하고 있는 CSR Bluetooth Headset example design board (DEV-PC-1645)를 사용하였으며, 그림 4와 같다.

첫 번째 실험은 FFT처리 후 주파수 영역에서 EQ처리 실험이다. 샘플링 주파수는 위와 동일하고 각 버튼에 EQ의 각 주파수 스펙트럼 값을 변경할 수 있게 구성하였다. 실험결과 버튼으로 EQ의 스펙트럼 값 변경 시 5개의 대표 주파수 성분을 가지는 테스트신호에서 해당 주파

수가 변화 되는 것을 확인할 수 있었으며, 그림 5에 나타내었다.

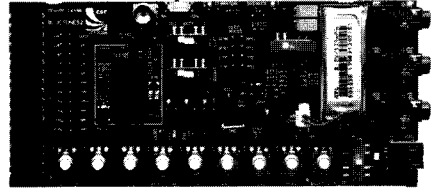
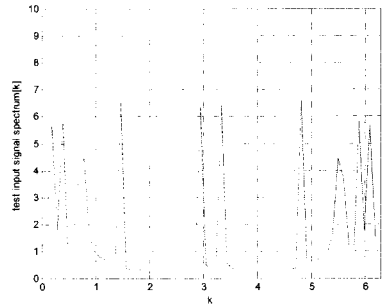
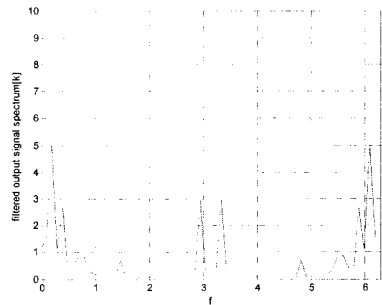


그림 4. CSR 블루투스 헤드셋 example design board(DEV-PC-1645)

Fig. 4 CSR BluetoothHeadset example design board(DEV-PC-1645)



(a)



(b)

그림 5. 테스트 신호를 이용한 EQ 실험  
Fig. 5 Equalizer test using test input signal

그림 5의 (a)는 테스트 신호의 주파수 스펙트럼이다. 영 위상을 가지며, 동일 진폭의 5가지 대표 주파수를 가지는 사인 함수이다. 그림 5의 (b)는 설정된 EQ를 통과한 결과 스펙트럼이며, 주파수 대역별 진폭이 차등으로 변화된 것을 확인할 수 있다.

두 번째 실험은 개인 청각특성 설정 실험이다. 이는 loop-back모드와 tone-generation모드로 구성이 되며 모드의 변경은 버튼으로 가능하다. 샘플링 주파수는 loop-back모드에서 8kHz로 설정되어 있으며 tone-generation모드에서는 44.1kHz로 설정되어 있다. 샘플링 주파수가 가변적인 이유는 8kHz 때는 4kHz 이상의 순음을 발생 시킬 수 없기 때문이다. 실험 결과 tone-generation에서는 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz의 순음이 정확하게 발생되었다. tone-generation모드가 종료되면 각 주파수 f의 최소가청한계와 볼륨 조절 간격이 설정되며 loop-back모드가 시작된다. 버튼을 이용하여 볼륨 증가, 감소했을 때 EQ의 값이 변경되어 볼륨 증가, 감소가 됨을 확인할 수 있었다.

## V. 결 론

실험을 통해 제안하는 방법이 개인의 청각 손실을 방지하는 데 효과적이라는 사실을 확인하였으며, 음량 조절을 주파수 대역별 차등 적용함으로써 인해 발생할 수 있는 사실감 저감에 대한 연구를 계속하고자 한다.

## 참고문헌

- [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
- [5] "Kalimba DSP Assembler User Guide", CSR, 2006
- [6] "Mono Headset SDK User Guide", CSR, 2007
- [7] "BlueCore 5-Multimedia Kalimba DSP User Guide", CSR

## 저자소개

김현태(Hyun-Tae Kim)



1989년 2월 부산대학교 전자공학과 (학사)  
1995년 2월 부산대학교 전자공학과 (석사)

2000년 2월 부산대학교 전자공학과(박사)  
2002년 3월~현재 동의대학교 멀티미디어공학과 부교수

※ 관심분야 : 음성 및 음향신호처리, 멀티미디어신호처리, 입체음향

박장식(Jang-Sik Park)



1992년 2월 부산대학교 전자공학과 (학사)  
1994년 2월 부산대학교 전자공학과 (석사)

1999년 2월 부산대학교 전자공학과(박사)  
1997년 3월~현재 동의과학대학 디지털정보전자과 교수

※ 관심분야 : 음성 및 음향신호처리, 멀티미디어통신, 입체음향

송종관(Jong-kwan Song)



1989년 2월 부산대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
1991년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과졸업(공학석사)

1995년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업 (공학 박사)

1997년~현재 경성대학교 전기전자·메카트로닉스공학부 교수로 재직.

※ 관심 분야는 영상처리 및 통신 등임