

논문 2012-49SC-3-10

# 나노 디지털 보청기 펌웨어와 휘팅 소프트웨어 개발

## ( Nano Digital Hearing Aid Firmware and Fitting Software Development )

장 순 석\*

( Soon-Suck Jamg )

## 요 약

본 논문에서는 국방기술을 활용하여 전투병사의 귀를 폭음으로부터 보호하면서도 상호 교신의 어려움을 최소화하는 야전형 디지털 보청기에 관해 연구한 결과를 보여준다. 보청기는 작은 소리를 증폭하기도 하지만 급격하게 커지는 폭음은 오히려 감쇠시킬 수 있는 신호의 압축이 보편화되어 있다. 이를 전투 병사의 귀에 활용하면 그들의 귀를 보호하게 된다. 디지털 보청기의 개발 과정은 핵심 부품인 DSP IC 칩이 개선되어 새로이 출시되면, 그에 대응해서 새로운 칩에 맞는 펌웨어와 휘팅 소프트웨어를 개발하면 된다. 최근에 캐나다 DSP Factory에서 설계 출시된 Ezairo 5910칩을 가지고 현재 연구되는 보청기 펌웨어 개발의 일부를 소개하고 자 한다.

## Abstract

This paper shows the results about field operating digital hearing aids which protect the ears of the battle field soldiers from explosive sound and minimize the difficulty of mutual communication during the battle. The essence of the hearing aid is in its signal compression technology in which soft sound is amplified while rapidly increased explosive sound is attenuated. This nonlinear compression technology can be applied for the protection of the ears of the battle field soldiers. As a core part of the hearing aid, when a new DSP IC chip is launched, the modified firmware and fitting software is developed for adaption. Ezairo 5910 which was recently launched by DSP factory in Canada was used for the development of the firmware of the hearing aid.

**Keywords :** 디지털 보청기, 펌웨어, 휘팅 소프트웨어, 귀보호, 압축.

(digital hearing aid, firmware, fitting software, ear protection, compression)

## I. 서 론

본 논문에서는 국방기술을 활용하여 전투병사의 귀를 폭음으로부터 보호하면서도 상호 교신의 어려움을 최소화하는 야전형 디지털 보청기에 관해 연구한 결과를 보여준다. 보청기는 작은 소리를 증폭하기도 하지만 급격하게 커지는 폭음은 오히려 감쇠시킬 수 있는 신호

의 압축이 보편화되어 있다. 이를 전투 병사의 귀에 활용하면 그들의 귀를 보호하게 된다.

Ezairo 5910칩은 dual-MAC 24-bit DSP core (Clock 1.28 MHz)를 가지며 HEAR Configurable Accelerator를 자체 내장하여 대부분의 DSP 신호처리용 어셈블러 모듈이 내장되어 사용이 매우 편리하다<sup>[1]</sup>. 보청기용 DSP 칩 운용을 위해서는 난청인의 청력에 정교하게 적합한 휘팅이 가능하면서도 신호의 지연(약 12.5 msec)이 적고, 최소한의 메모리(<256 Kbyte) 공간에서의 효율적인 계산량으로 전력 소모 (< 300 mW at 1 V, 16 채널)를 최소화 하도록 펌웨어를 개발한다. 아무리 좋은 알고리즘일지라도 메모리 공간과 전력 소모 그리고

\* 정회원-교신저자, 조선대학교  
(Chosun University)

※ 본 논문은 2010년 중소기업청 제품화기술개발사업 (과제 제목: 해외 수출용 8채널 고기능성 FPCB 디지털 콧속형 보청기, 과제번호 SJ112664)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

접수일자: 2011년7월7일, 수정완료일: 2012년5월4일

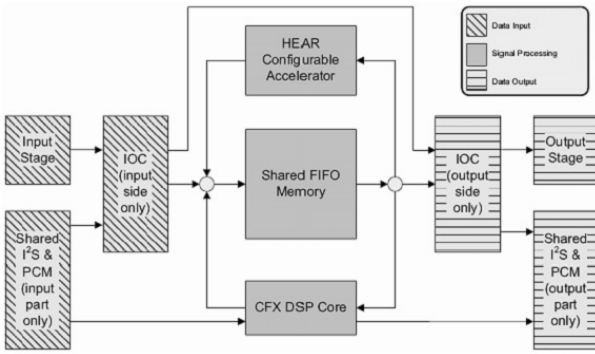


그림 1. Ezairo 5910 칩의 전체적인 내부 DSP 신호 흐름도  
 Fig. 1. Overall internal DSP signal flowchart of Ezairo 5910.

지연시간에서 문제가 되면 보청기용 DSP 칩에 적용할 수 없어 소용이 없게 된다. 지연시간과 전력 소모는 반비례하기 때문에 가장 최적한 알고리즘이 구상되어야 한다.

디지털 보청기는 핵심 부품인 DSP IC 칩이 개선되어 출시되면 연속해서 새로운 칩에 맞는 펌웨어와 휘팅 소프트웨어를 개발하게 된다. 최근에 캐나다 DSP Factory에서 설계 출시된 Ezairo 5910칩을 가지고 현재 연구되는 보청기 펌웨어 개발의 일부를 소개하고자 한다.

## II. WOLA 알고리즘 분석

마이크로폰으로 입력된 어음 신호는 전치 증폭된 후, 20 비트 분해도의 A/D를 거쳐 처리된 후 다시 D/A를 거쳐 리시버로 출력된다. 그림 3은 Ezairo 5910 칩에서의 신호처리 흐름도 예제를 보여준다. Analysis 과정에서 입력 신호는 FFT에 의해 분해되어 스펙트럼 영역으로 옮겨지고, Gain 과정에서 각 스펙트럼 밴드 별로 적절한 증폭이 결정된 후, Synthesis 과정에서 iFFT에 의해 다시 시간 영역으로 처리된 신호로 합성된 후 전력 증폭기를 통해 출력된다. 따라서 Gain 과정에서의 적응적인 대역별 증폭 정도가 결정되면 보청기로서의 중요

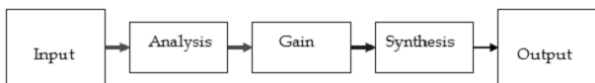


그림 2. WOLA 디지털 보청기 신호처리 알고리즘의 전체 개요도  
 Fig. 2. Overall flowchart of WOLA digital hearing aid signal processing algorithm.

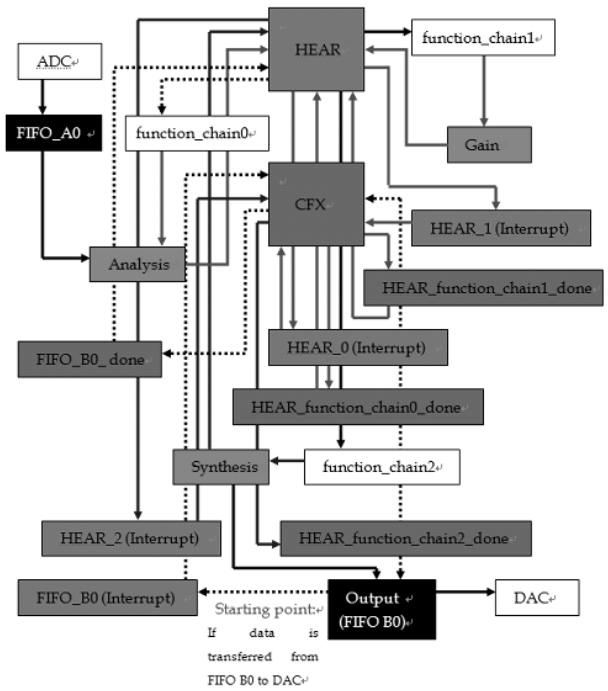


그림 3. Ezairo 5910 칩에서의 신호처리 흐름도 예제  
 Fig. 3. An example of signal processing flowchart in Ezairo 5910 DSP chip.

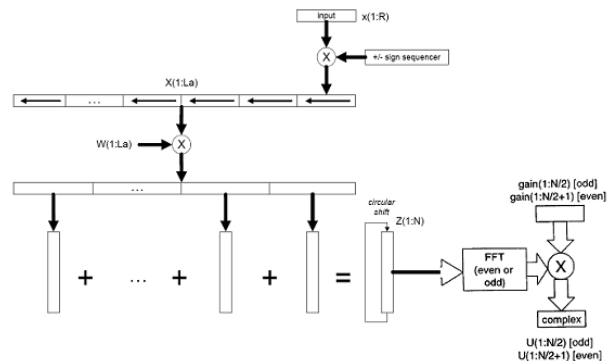


그림 4. WOLA 분석 단계  
 Fig. 4. WOLA Analysis Process.

한 기능이 실현된다.

어음 신호에 대한 보청기 신호 처리는 크게 4가지로 나뉘는데 압축(Compression), 소음 제거(Noise Reduction), 피드백 소거 (Feedback Cancellation), 방향성 (Directivity)으로 요약되며 가장 중요한 기능이 압축이다. 압축은 난청인의 협소한 청력의 역동 범위(DR)에 발생자의 어음이 모두 적절하게 분포되도록 신호의 레벨을 주파수 대역 별로 다르게 증폭 혹은 감쇄시켜주는 기능이다.

그림 4와 그림5는 WOLA 분석과 합성 과정을 그림으로 설명하고 있다. CODEC의 샘플링 주파수는 16kHz

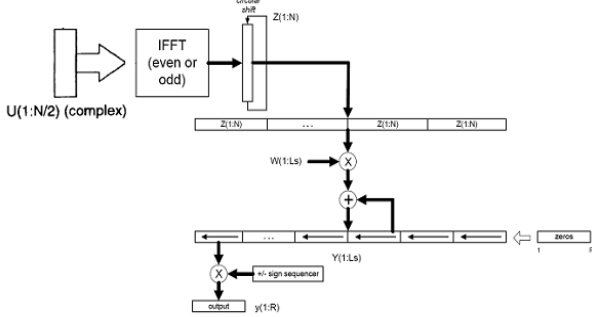


그림 5. WOLA 합성 단계  
Fig. 5. WOLA Synthesis Process.

이고 24 비트 분해도로 DSP에서 정수형 자료로 처리된다. 연속적으로 입력되는 신호  $x(n)$ 는 R개씩 부분적으로 입력되어  $X(1:La)$  버퍼에 넘겨진다. R개의 신규 데이터가 들어오면 R개 만큼  $X(1:La)$  버퍼로 옮겨지고  $X(1:La)$  버퍼에 처음 옮겨졌던 데이터 R개는 FIFO 방식으로 지워진다.

마찬가지로 WOLA 합성 과정에서도  $Y(1:La)$  버퍼로 출력된 출력 신호는 R개씩  $y(1:R)$ 로 옮겨져 최종 출력 신호로 리시버를 통해 출력된다. 분석 과정에서의  $W(1:La)$ 나 합성 과정에서의  $W(1:La)$ 는 창 함수로써 보통 Hanning 창을 적용한다. 입력 버퍼  $X(1:La)$ 에 들어온 신호 전체(예를 들어  $La=128$ 개)를 직접 모두 FFT-iFFT하면 가장 무난하지만 디지털 보청기의 CPU 처리 속도의 한계로 인해 좀 더 효율적인 시간-주파수 영역 변환을 위한 전처리와 후처리를 목적으로 개발된 것이 WOLA 기법이다. 디지털 보청기의 CPU 클럭 속도가 2MHz 정도이므로 알고리즘의 고효율화가 요구된 것이다. R개씩 (여기서는 8개)의 허용된 시간 지연( $8000/16000=0.5\text{msec}$ ) 가운데 필요한 모든 알고리즘 수행이 완료되어야 하기 때문에 예를 들어  $La$ 개(여기서는 128개)씩의 입력 신호를 N개(여기서는 32개)로 1/4 축소된 데이터 처리로도 신호의 변형을 최소화한 WOLA 알고리즘이다.  $W(1:La)$ 와  $X(1:La)$ 을 곱한 결과는 여전히  $1:La$  개의 데이터를 갖는다. 여기서 N개씩 데이터를 분할하여  $La/N(=128/32=4)$  등분으로 나뉜다. 그리고 각각의 분할된 부분의 데이터들을 더하여  $Z(1:N)$ 에 옮겨 넣었다. 그리고  $Z(1:N)$ 의 축소된 데이터를 가지고 FFT를 실행한 뒤 산출된 복소수 데이터로부터 필요한 Gain 처리를 시도한다. 이렇게 계산된 주파수 영역에서의 결과로부터 다시 WOLA 합성 과정을 통해 출력 신호  $y(n)$ 을 계산한다. 주파수 영역에서의 시

간 영역으로 역변환은 iFFT를 활용한다. 역변환된 결과는 우선  $Z(1:N)$ 으로 다시 옮겨지면서  $rp$  배수로 증식시킨다. 그리고  $W(1:La)$  창함수와 곱한 다음  $Y(1:La)$  버퍼에 순차적으로 이동시킨다.

다음은 WOLA 분석과 합성 과정을 Matlab 프로그램으로 묘사하였다.

```
La = 128 % Length of Analysis Window
Ls= 64 % Length of synthesis Window
N= 36 % FFT size of Filterbank
R= 8; % Block size of Filterbank
DF = 2; vr = La/DF;
```

```
[data,fs]= wavread('rec_001.wav'); % input data
w = hanning(La);
Out=[]; YOut=zeros(La/DF,1);
```

```
for i=1:R:length(data)-La-R,
    x=data(i:i+La-1).*w;
    w1=x(1:N); w2=x(N+1:N*2);
    w3=x(2*N+1:N*3); w4=x(3*N+1:N*4);
    for j=1:N,
        z(j)=w1(j) + w2(j) + w3(j) + w4(j);
    end
    Y=fft(z);
    % Gain Process...
    Yout = real(iff(Y));
    rp = vr/length(Yout); %
                                % replicate constant (La/DF)
    ib = repmat(Yout,rp,1); % input buffer
    Wwf = w(1:DF:end); neh = Wwf.*ib;
    YOut=YOut+neh; Out = [Out;YOut(1:R)];
    for L=1:R,
        for j=2:vr
            YOut(j-1)=YOut(j);
        end
        YOut(end)=0;
    end
end
soundsc(data,fs);pause(2); soundsc(Out,fs);
```

그림 6은 '갓어' 라는 음성 신호에 대해 FFT-iFFT

결과와 WOLA 신호처리 결과를 상호 비교하고 있으며 차이가 없음을 보여준다. 여기서는 R=64로써 4msec의 시간 지연을 가지며, 그림 6의 시간 응답 파형의 일부분을 그림 7에 나타내 보여주고 스펙트로그램의 비교를 그림 8에서 보여준다. 그림 8의 FFT-iFFT 결과와 WOLA 신호처리 결과에서 스펙트로그램으로는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 4msec는 일반 보청기에서 통상적으로 적용되는 작동 시간으로써 별 무리가 없으나 본 논문에서는 매우 격한 폭발음과 같은 소리가 입력되는 경우에 대해서 좀 더 빠른 대응 수단으로 0.5msec의 더욱 빠른 시간 내에 보청기 출력음을 급속

도로 감쇠시키고 자 하였다.

그림 9~그림 11은 그림 6~그림 8과 동일한 내용이며  $La = 128, Ls = 64, N = 32, R = 8, DF = 2$ 를 적용하였다. 결과적으로 R=64에서 R=8로 단축시켜도 음질의 변화는 거의 감지되지 않았으나 R이 짧아짐으로써 보청기의 작동 시간을 더욱 빠르게 적용할 수 있었다.

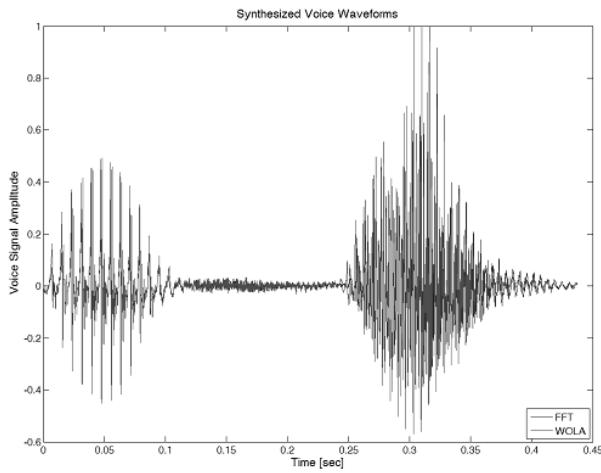


그림 6. '갓어'라는 음성신호를 FFT-iFFT 처리한 결과와 WOLA 처리한 결과를 시간영역에서 비교함 ( $La = 256, Ls = 64, N = 128, R = 64, DF = 2$ )

Fig. 6. Comparison of results between FFT-iFFT processing and WOLA processing of 'g1 a1 ss1 v1' phoneme voice signal in temporal domain ( $La = 256, Ls = 64, N = 128, R = 64, DF = 2$ ).

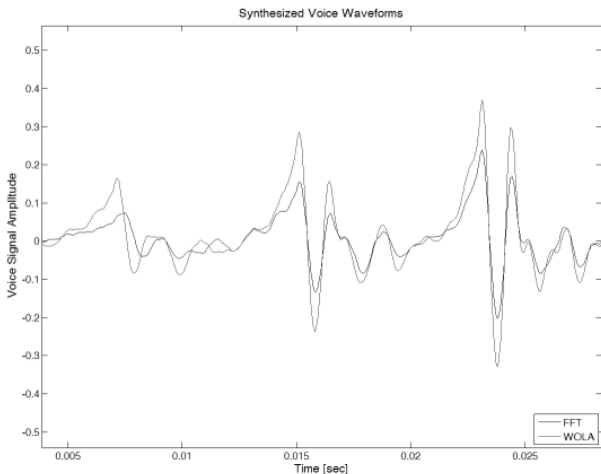


그림 7. 그림 6의 일부 구간을 강조한 그림  
Fig. 7. Part of magnified figure 6.

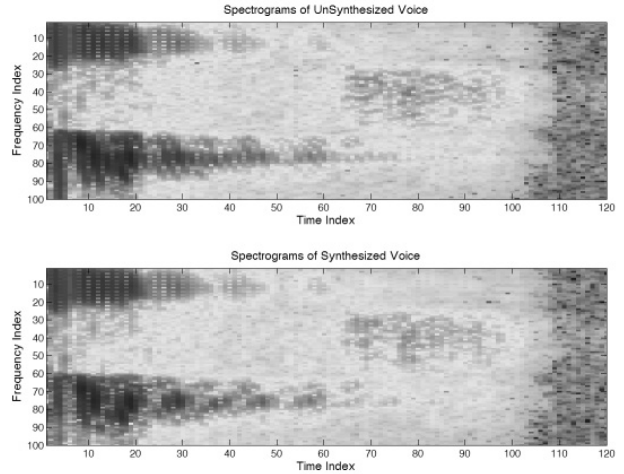


그림 8. '갓어'라는 음성신호를 FFT-iFFT 처리한 결과와 WOLA 처리한 결과를 스펙트럼 영역에서 비교함 ( $La = 256, Ls = 64, N = 128, R = 64, DF = 2$ )

Fig. 8. Comparison of results between FFT-iFFT processing and WOLA processing of 'g1 a1 ss1 v1' phoneme voice signal in spectral domain ( $La = 256, Ls = 64, N = 128, R = 64, DF = 2$ ).

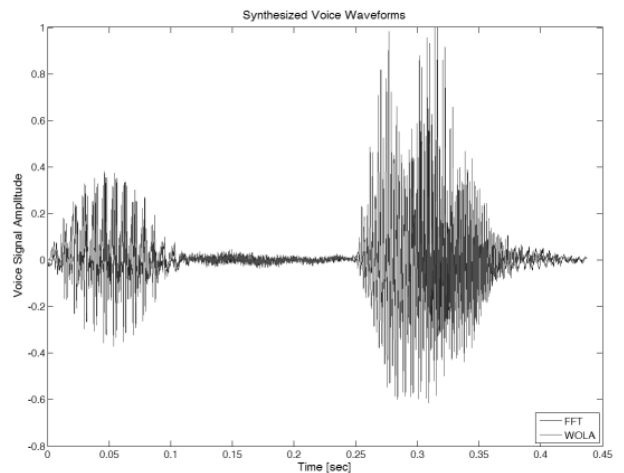


그림 9. '갓어'라는 음성신호를 FFT-iFFT 처리한 결과와 WOLA 처리한 결과를 시간영역에서 비교함 ( $La = 128, Ls = 64, N = 32, R = 8, DF = 2$ )

Fig. 9. Comparison of results between FFT-iFFT processing and WOLA processing of 'g1 a1 ss1 v1' phoneme voice signal in temporal domain ( $La = 128, Ls = 64, N = 32, R = 8, DF = 2$ ).

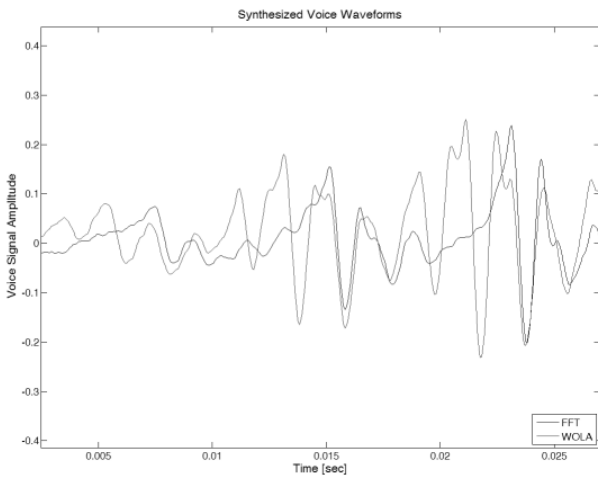


그림 10. 그림 9의 일부 구간을 강조한 그림  
Fig. 10. Part of magnified figure 9.

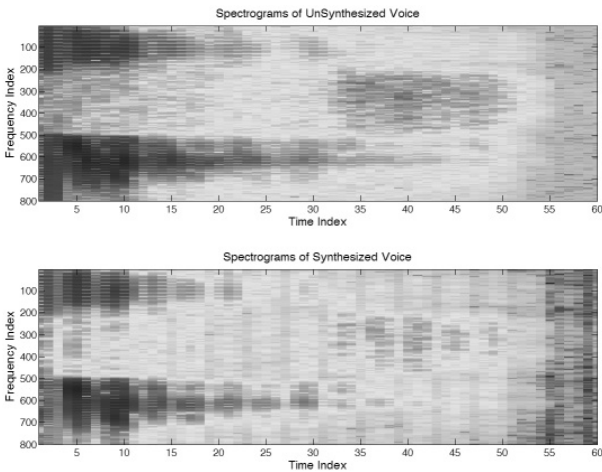


그림 11. ‘갸어’라는 음성신호를 FFT-iFFT 처리한 결과와 WOLA 처리한 결과를 스펙트럼 영역에서 비교함 (La = 128, Ls = 64, N = 32, R = 8, DF = 2)  
Fig. 11. Comparison of results between FFT-iFFT processing and WOLA processing of ‘g1 a1 ss1 v1’ phoneme voice signal in spectral domain (La = 128, Ls = 64, N = 32, R = 8, DF = 2).

그림 10이나 그림 11에서 FFT-IFFT 처리한 결과와 WOLA 처리한 결과가 다르게 보이긴 하여도 실제 출력음으로 들어보면 음질에서 어음 명료도 측면에서 크게 달라지지 않았다. 따라서 R=8이 되는 파라미터군들 (La = 128, Ls = 64, N = 32, R = 8, DF = 2)을 사용하여 계속해서 연구를 진행하였다.

그림 12는 PC와 보청기 칩 사이의 교신을 위해 휘팅 파라미터들을 PC와 보청기 칩 사이에 송수신하기 위해 개발된 Visual Basic 프로그래밍 결과물을 보여준다. N으로 32를 적용함으로써 16(0~15)채널의 주파수 응답을 가진다. 여기서 N/2개의 주파수 밴드는 각 밴드별로



그림 12. PC와 보청기 칩 사이의 교신을 위해 휘팅 파라미터들을 PC와 보청기 칩 사이에 송수신함  
Fig. 12. Fitting parameters used in DSP iC chip are transmitted and received between the DSP chip and PC.

증폭이나 감쇠 정도를 0.5msec 마다 비선형적으로 적용 가능하여 이를 채널이라고 정의한다. PC로부터 휘팅 파라미터 데이터들을 보청기 칩의 RAM과 EEPROM 메모리에 read/write/burn을 할 수 있으며, 마이크로폰과 리시버의 보정 및 귓속형 보청기를 착용한 상태에서 실이 측정도 가능하다. 이러한 기능들은 디지털 보청기를 개개 병사들의 귀에 맞춰 맞춤식으로 휘팅할 수 있다. 본 연구 결과 R의 개수를 8개로 적용하였는데 이는 0.5msec의 매우 짧은 지연 시간으로써 외부의 급격한 폭음 발생 시, 0.5msec 이내에 출력음을 급격히 감쇠시킬 수 있음을 의미한다.

그림 13은 PC와 보청기 칩 사이의 교신을 위한 I2C 통신 프로토콜의 일부를 보여준다. Ezairo 5910에 내장된 I2C 인터럽트 모듈을 활용하여 외부에서 입력된 I2C 인터럽트 루틴의 처리에 따라 Ezairo 5910칩 내부 자료를 외부 PC와 주고 받게 되며 Ezairo 5910칩에 내장된 EEPROM을 통해 RAM 과의 자료 교환이 이뤄진다. 휘팅 과정이 세분화될수록 인터럽트 루틴을 더욱 분기화시켜 다양한 기능을 갖도록 하였다.

그림 14는 디지털 보청기의 16개중 임의의 어떤 채널 주파수 대역에서 비선형증폭을 가급적 선형적으로 한 경우이다. 그림에서처럼 음성 음압 레벨의 범위가 25dB ~65dB 일 때, 25dB에서는 50dB까지는 45dB씩 선형적으로 증폭시키고 50dB에서 65dB까지는 비선형적으로 증폭을 적용할 수 있다. 그리고 최대 출력을 115 dB로 제한하기도 한다. 그러면 입력 음압 25dB~50dB까지는

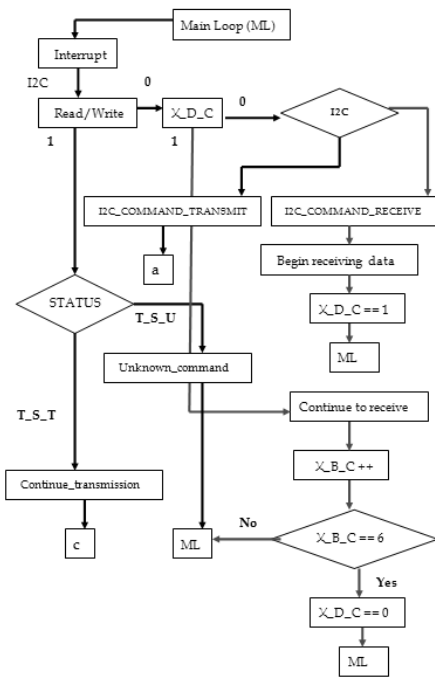


그림 13. PC와 Ezairo 5910 보청기 칩 사이의 교신을 위한 I2C 통신 프로토콜

Fig. 13. I2C communication protocol between Ezairo 5910 DSP chip and PC.

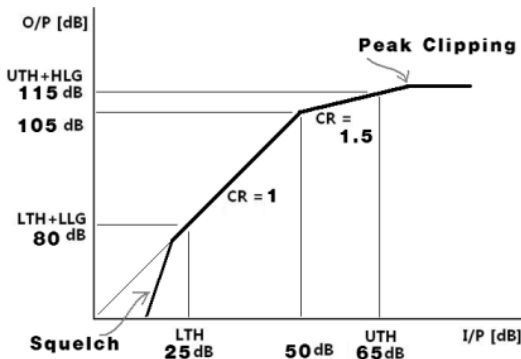


그림 14. 보청기의 채널별 비선형증폭 곡선  
Fig. 14. Nonlinear compression I/O curve of digital hearing aid in each channel.

80dB~105dB의 선형증폭이 이뤄져서 낮은 진폭의 음소에 대해서 감도가 좋도록 할 수 있고, 입력 음압 50dB 이상은 주로 모음이 신호의 대부분 에너지를 차지하게 되므로 비선형 압축을 주어 감도가 낮아지더라도 어음 변별에 크게 어렵지 않게 된다<sup>[2]</sup>. 115dB이상의 출력 발생은 귀에 과도한 불쾌감을 주므로 신호를 제한시키도록 하고, 25dB이하의 작은 소리에 대해서는 주변 소음으로 간주하여 증폭이 아닌 감쇠 기능을 동작시키어 주변 소음으로 인해 야기되는 불편함을 해소시킬 수 있다. 이러한 휘팅의 변화는 상황에 따라 사용자의 사용

목적에 맞춰 다르게 적용하면 된다. 폭발음은 순간적으로 180dB까지도 증가하기 때문에 115dB로 보청기 최대 출력을 제한시키면 귀를 소음으로부터 보호하게 된다 [3~4].

### III. 결 론

일반 병사들의 경우에는 정상 청력을 가지기 때문에 특수한 전투 수행환경에서 필요한 고주파수음을 들을 수 있게 하거나, 격한 폭발음으로부터 귀를 보호하여 전투의 지속성을 높인데 본 연구 결과가 활용될 수 있다. 앞으로 계속해서 실시간으로 음성 신호를 처리하여 난청인의 역할에 가장 최적하게 맞춰지도록 연구개발하고자 한다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. Brennan and T. Schneider, "Filterbank structure and method for filtering and separating an information signal into different bands, particularly for audio signal in hearing aids", US Patent US 6,236,731, 2001.
- [2] P. Henry and T.R. Letowski, "BoneConduction : Anatomy, Physiology, and Communication" Army Research Laboratory, May 2007.
- [3] 장순석, 권유정, "디지털 보청기", 두양사, 2005년 5월.
- [4] 장순석, 권유정, 이제형, "Digital Hearing Aid Fitting Program Testing System Development", 대한전자공학회 2005년 추계종합학술대회, 제28권 제3호, 415-418쪽, 2005년 11월

### 저 자 소 개



장 순 석(정회원)-교신저자  
1984년 한양대학교 전자공학과 학사 졸업.  
1988년 영국 버밍햄대학교 의과 대학 생리학과 석사 졸업.  
1991년 영국 버밍햄대학교 전기 전자공학과 박사 졸업.  
<주관심분야 : 보청기 펌웨어, 보청기 휘팅 소프트웨어, 음성인식>