

범용 DSP 칩을 이용한 다중 채널 보청기의 저전력 구현

*, **, *

*, **

Low-Power Implementation of A Multichannel Hearing Aid Using A General-purpose DSP Chip

Bum-Jun Kim* Joon Byun* Young-Cheol Park*

요약 본 논문에서는 범용 DSP 칩을 이용한 저전력 다중 채널 보청기 시스템 구현을 제시한다. 본 시스템은 WDRC(Wide Dynamic Range Compression)를 이용한 음향 증폭 알고리즘, 적응 하울링 제거 알고리즘, 단일 채널 잡음 감소 알고리즘을 포함한다. 저전력 구현을 위해 각 알고리즘을 정수연산 프로그램으로 재구성하였고, BelaSigna® 250의 명령어를 사용하여 정수연산 프로그램을 어셈블리 프로그램으로 변환하였다. 실시간 시스템을 사용한 실험을 통해 각 알고리즘의 성능을 확인하였다. 또한 구현 시스템의 클럭을 측정하였으며, 그 결과 전체 신호 처리 블록이 대략 7.02MHz 클럭에서 실시간으로 동작함을 확인하였다.

Abstract In this paper, we present a low-power implementation of the multi-channel hearing aid system using a general-purpose DSP chip. The system includes an acoustic amplification algorithm based on Wide Dynamic Range Compression (WDRC), an adaptive howling canceller, and a single-channel noise reduction algorithm. To achieve a low-power implementation, each algorithm is re-constructed in forms of integer program, and the integer program is converted to the assembly program using BelaSigna® 250 instructions. Through experiments using the implementation system, the performance of each processing algorithm was confirmed in real-time. Also, the clock of the implementation system was measured, and it was confirmed that the entire signal processing blocks can be performed in real time at about 7.02MHz system clock.

Key Words : Adaptive Feedback Cancellation, Digital Hearing Aids, General purpose DSP chip, Single Channel Noise Reduction, Wide Dynamic Range Compression

1.

일반적으로 보청기 시스템에는 세 가지 기능이 요구된다. 첫 번째로 음향 증폭 알고리즘이다. 음향 증폭은 단 채널과 다중 채널 구조로 나눌 수 있다. 단 채널 시스템의 경우 음향 증폭을 위해 전체 주파수를 하나의 입력 출력 관계식에 적용한 것이다. 반면, 다중 채널 보청기 시

스템은 마이크로 들어온 입력 신호를 난청자의 주파수별 청력 손실정도에 따라 청력 역치를 넘어서는 크기로 소리를 증폭해 보청기 사용자의 원활한 의사소통을 돕도록 한다[1]. 이를 위해 WDRC(Wide Dynamic Range Compression) 알고리즘이 널리 사용된다.

두 번째로 음향 왜곡 제거기이다. 음향왜곡은 보청기

This Paper was supported by the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE), Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) in 2018 through the Encouragement Program for The Industries of Economic Cooperation Region.

*Division of Computer Science, Yonsei University

**Corresponding Author : Computer and Telecomm. Eng. Division Yonsei Univ.(young00@yonsei.ac.kr)

Received January 30, 2018

Revised February 01, 2018

Accepted February 20, 2018

시스템에서의 출력 결과가 다시 마이크로 집음 되어 증폭이 무한히 반복되는 현상을 나타낸다. 이 현상에 의해 발생하는 하울링(howling)은 보청기 사용자에게 불편함을 초래하며 특히 보청기의 증폭 이득 범위를 제한한다는 단점을 갖게 된다[2]. 하울링을 제어하기 위해 적응 디지털 필터 기반 귀환 제어 알고리즘을 흔히 사용한다[1].

세 번째로 요구되는 기능은 잡음 제거 기능이다. 잡음 제거는 음향 증폭에 의한 잡음의 증폭을 제거함으로써 음성의 명료도를 향상시키는 것이다. 잡음은 주변 환경에 따라 변화하는 요소이기에 실시간으로 잡음을 파악하고 제거한다.

종래의 보청기 시스템은 하드웨어 기반의 구성으로 인한 유연성이 부족하거나 C언어 등과 같은 고급 언어를 이용한 코드 작성에 따른 프로그램이 커지기 때문에 휴대를 목적으로 하는 보청기를 사용자의 사용 시간이 감소되는 단점이 있다. 위와 같은 환경에 대응하기 위해 본 논문에서는 보청기 알고리즘의 구조를 단순화하여 어셈블리어로 구현함으로써 저전력에서 동작하는 보청기 시스템을 제시한다. 실시간 구현을 위해 본 논문에서는 BelaSigna® 250을 사용하였다. 이 프로세서는 휴대용 오디오 어플리케이션 용으로 개발한 초 전력 오디오 프로세서로서 저전력 보청기 시스템 구성에 자주 사용된다[3]. 본 연구에서는 시스템의 저전력화를 위해 전체 알고리즘을 어셈블리 언어로 구현 하였다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 이루어진다. 먼저 2장에서 보청기 시스템 알고리즘, 적응 음향 귀환 제거, 음향 증폭, 잡음 제거에 사용되는 알고리즘을 소개한다. 3장에서 알고리즘 구현을 소개한다. 4장에서 실시간 구현 알고리즘 적용에 따른 결과를 소개한다. 마지막으로 5장에서 결론으로 마무리한다.

2.

본 논문에서 구현한 알고리즘은 시간 영역에서 짐음 된 신호를 블록 단위로 주파수 영역에서 처리한다. 논문에서 다루는 DSP칩은 입력 신호의 블록 단위 주파수 분석 및 합성 과정을 위해 그림 1과 같은 WOLA(Weighted Overlap-Add) 필터뱅크를 이용했다[4, 5]. 전반적인 WOLA 필터뱅크의 동작은 그림 1과 같이 동작하며, 시간

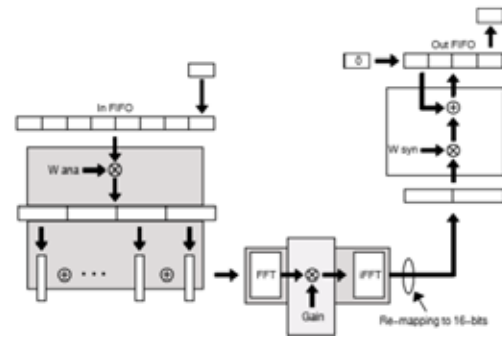


그림 1. WOLA 연산(분석, 이득 적용 및 합성) [6]
Fig. 1. WOLA Operations(Analysis, Gain Application and Synthesis) [6]

영역에서 짐음 된 신호를 블록 단위로 분석, 증폭, 합성의 세 과정을 거치게 된다[6].

본 논문에서는 WOLA 필터뱅크를 이용하여 적응 음향 귀환 제거, 음향 증폭, 잡음 제거의 세 기능을 적용한다. 반복적인 필터 뱅크 동작 없이 모두 구현하여 연산량 측면에서 복잡도를 저하 시키는 이득을 볼 수 있다.

2.1 WDRC

본 논문에서는 8대역 WDRC 시스템을 구현하였다. 각 밴드는 다수의 FFT로 분할 된 주파수 빈(bin)들로 이루어져 있다. FFT의 크기가 커짐에 따라 주파수 해상도는 좋아지나 50% OLA 과정에 따른 출력의 지연이 발생하게 된다. 일반적으로 음향 음성과 시각적인 움직임간의 차이가 10msec이하이면 큰 거부감이 없는 것으로 알려져 있다[7]. 본 연구에서는 128-point FFT를 사용하였으며, 결과적으로 4msec의 OLA 시간 지연이 발생하게 된다[3].

표 1. 밴드 분할
Table 1. Band splitting

대역 주파수(Hz)	FFT Bin 수
0~250	2
250~500	2
500~875	3
875~1250	3
1250~1625	3
1625~2375	6
2375~4125	14
4125~8000	31

128-point FFT를 사용하는 경우, 8개의 각 밴드는 다음과 표 1에서 표시된 빈들로 이루어진다. 대역의 분할은 사람의 청각 특성을 고려하였다.

각 대역의 이득은 대역 입력 파워에 의해 결정되므로, 먼저 다음과 같이 대역 파워를 측정한다.

$$E_i(l) = \lambda E_i(l-1) + (1-\lambda) Q_i(l) \quad (1)$$

$$Q_i(l) = \sum_{k \in i} |X(k,l)|^2. \quad (2)$$

위식에서 k 는 주파수 인덱스, l 은 프레임 인덱스, λ 는 평활 인자이다. 따라서 $Q_i(l)$ 은 l 번째 프레임 i 번째 밴드에 해당하는 빈들의 파워 합을 나타내고, $E_i(l)$ 은 i 번째 밴드의 추정 파워이다. 수식 (1)에서 λ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\lambda = \begin{cases} \beta_a & , E_i(l) < Q_i(l) \\ \beta_r & , E_i(l) \geq Q_i(l) \end{cases} \quad (3)$$

즉, λ 는 신호의 레벨이 급격하게 커질 경우에는 빠르게 추정하며, 신호의 레벨이 떨어질 때는 신호 레벨을 천천히 반영하도록 함으로써 시간 영역에서의 과도한 이득을 방지하는 결과를 얻을 수 있다.

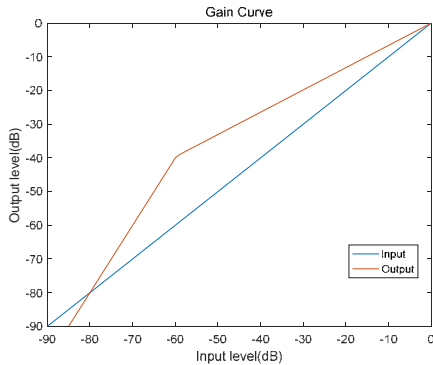


그림 2. 대역 이득 곡선(예시).
Fig. 2. Band gain curve (example).

$$P_{\min}(k,l) = \begin{cases} \gamma(P_{\min}(k,l-1) + \frac{1-\gamma}{1-\beta}(P(k,l) - \beta P(k,l-1))), & P_{\min}(k,l-1) < P(k,l) \\ P_{\min}(k,l) = P(k,l) & otherwise \end{cases} \quad (9)$$

한편 대역별 이득값은 난청인의 청각 손실을 기반으로 측정된다. 그림 2는 선형적으로 증폭할 때의 이득 곡선을 표현하였으며, 빨간 선과 파란 선의 차이가 이득이 된다. -80dB 이하의 신호는 배경 잡음일 가능성이 높기 때문에 잡음으로 간주하여 감쇄시킨다.

2.2

본 논문에서 구현한 하울링 제거기는 변형된 주파수 영역 NLMS(Normalized Least-Mean-Square) 알고리즘을 사용한다. 먼저 블록 단위 신호 처리 시 합성단에서 블록 크기만큼의 지연 시간이 발생하기 때문에, 경로에 의해 발생하는 지연 시간을 보상해 줘야 한다. 이 과정에서 지연된 참조 신호를 한번 더 주파수 영역으로 변환하는 과정이 필요한데, 이를 위해 BelaSigna® 250의 두 번째 입력 채널을 사용하도록 하였다.

결과적으로 음향 귀환 제거를 위한 필터 계수 갱신식은 다음과 같다[8].

$$Y(k,l) = W^*(k,l)X(k,l) \quad (4)$$

$$E(k,l) = D(k,l) - Y(k,l) \quad (5)$$

$$P_X(k,l) = \lambda P_X(k,l-1) + (1-\lambda) |X(k,l)|^2 \quad (6)$$

$$W(k,l) = W(k,l-1) + \mu P_X^{-1}(k,l) X(k,l) E^*(k,l) \quad (7)$$

위 수식에서 $Y(k,l)$, $X(k,l)$, $W(k,l)$, $D(k,l)$, $E(k,l)$, $P_X(k,l)$ 는 각각 주파수 영역에서의 필터 출력, 참조 신호, 가중치, 기대신호, 참조신호 파워 추정치를 나타낸다. μ 는 스텝 사이즈이다.

2.3

보청기 마이크에 음성 신호와 잡음이 혼재되어 집음될 때, 입력신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y(k,l) = S(k,l) + N(k,l) \quad (8)$$

$S(k,l)$ 은 음성 신호를, $N(k,l)$ 은 잡음을 나타낸다. 본 논문에서는 최소추적(minimum-tracking) 방법으로 잡음 PSD(power spectral density)를 추정하며[9], 잡음 감소 이득은 Wiener 필터 방법으로 계산된다 [10].

입력신호의 파워 $P_X(k,l)$ 를 식(6)으로 추정한 다음, 식(9)와 같이 최소 PSD를 추적한다.

추적된 최소 PSD와 입력 PSD를 사용하여 Wiener 이득은 다음과 같이 계산된다.

$$G(k,l) = \frac{P_X(k,l) - P_{\min}(k,l)}{P_X(k,l)} \quad (10)$$

3.

3.1.

알고리즘 구현을 위해 먼저 각 알고리즘을 인터저 형식의 연산 구조로 변형하였다. 이를 위해 음향 증폭 알고리즘에서 필요로 하는 로그 및 역로그 연산은 미리 계산된 LUT(Look-Up Table)을 사용하였다. 또한 NLMS 알고리즘 구현을 위해 필요한 나눗셈 연산은 shift 연산으로 대체하였다. 이를 위해 로그양자화 기법을 사용하였다. 먼저, 추정된 입력 파워를 식(6)을 통해 추정된 입력 파워를 다음과 같이 양자화 한다.

$$\hat{P}(k,l) = Q_{\log}\{P(k,l)\} = 2^m, m = \text{정수} \quad (11)$$

즉, 추정된 입력 파워를 2^m 정수 중 가장 가까운 값으로 양자화 한다. 다음 양자화된 파워로 나누는 과정(즉, $P(k,l)^{-1}$ 연산)을 다음과 같은 shift 연산으로 대체할 수 있다.

$$P^{-1}(k,l) \approx (\hat{P}(k,l))^{-1} = \text{shift left by } m \quad (12)$$

잡음감소를 위해서는 식(10)과 같이 Wiener 이득을 계산하여야 한다. 계산을 위해 필요한 나눗셈을 피하기 위해 미리 계산된 이득 LUT를 사용하였다. 이를 위해 신호의 파워와 잡음의 파워를 입력으로 하여 계

산되는 Wiener 이득을 (32×32) LUT로 구성하였다. 먼저 식(6)과 (9)를 사용하여 파워를 추정한 후, 이를 0~32 사이의 값으로 양자화한다. 양자화된 파워 값을 입력으로 하여 LUT의 이득값을 읽어오게 된다.

본 논문에서 잡음의 종류에 따라 세 가지의 LUT를 구성하였다. 첫 번째는 바람 잡음(wind noise)과 자동차 소음(car noise)과 같이 상대적으로 저주파 대역에 에너지가 집중된 잡음, 두 번째는 중주파수 대역까지 에너지가 분포하는 잡음(예를 들면 babble noise), 세 번째는 일정한 파워를 가지며 전 주파수 대역에 고르게 에너지가 분포한 잡음으로 분류하여 각각의 경우에 적합한 Wiener 이득 LUT를 구성하여 사용하였다. 한편 잡음의 형태는 저주파 대역 에너지와 중간 대역의 에너지의 비율로 단순하게 판별하였다.

표 2. 알고리즘 별 프레임 당 소요 클럭

Table 2. Clocks consumed by each algorithm per frame

알고리즘	소요 클럭
적응 음향 게환 제거 알고리즘	10,187
잡음 감소 알고리즘	12,265
광범위 압축	5,614
합계	28,066

알고리즘 구현을 위해 구성된 인터저 프로그램을 EDK 4 SignaKlara IDE를 사용하여 어셈블리 프로그램으로 변환하였다. BelaSigna®250은 117개의 제한된 명령어를 가지고 있으며, 어셈블리어의 사용에 있어 레지스터에도 제한을 받는다. 변수로 사용할 수 있는 레지스터는 6개로 한정되기 때문에 어셈블리 프로그램 구성 시 세분화된 모듈화 작업을 요한다.

최종적으로 구현된 어셈블리 프로그램을 실행하여 측정된 소요 클럭은 표 2와 같다. 표 안의 클럭수는 한 프레임 당 소요되는 클럭을 나타낸다. 실시간 동작 시 조건에 따라 프레임 별 소요 클럭이 달라질 수 있기 때문에 최대 소요 클럭을 측정하였다. 측정된 결과에 의하면 16kHz로 샘플링된 신호를 입력으로 사용하는 경우 전체 알고리즘이 7.02MHz 클럭에서 실시간으로 동작할 수 있음을 보여준다. 각 알고리즘 별로는 잡음 감소 알고리즘이 3.06MHz 클럭을 소요하며,

궤환 제거 알고리즘이 2.55MHz 클럭을 소요하는 반면, 음향 증폭 알고리즘은 1.4MHz의 낮은 클럭에서 실시간 동작이 가능함을 알 수 있다. 이는 BelaSigna® 250이 낮은 클럭에서 동작하는 WOLA 하드웨어 블록을 내장하고 있기 때문이다.

4.



그림 3. 실험 환경
Fig. 3. Experiment environment

실험 환경은 성능 측정을 위해 TASCAM 사의 US-366 USB 2.0 Audio Interface와 BEGRINGER 사의 TUBE ULTRAGAIN MIC 100, AGG C417 마이크를 이용하였고, 녹음 프로그램으로 Adobe Audition 3.0을 이용했다. 그림 3은 실험 환경을 보여 준다.

4.1 WDRC

그림 4는 그림 2와 같은 광범위 압축 기술의 이득 곡선을 이용하였을 경우 입력 신호의 증폭도를 측정하였다. 입력 신호로 -47dB의 2200Hz의 톤 신호를 주었다. 2200Hz는 표 1의 6번 밴드에 속하게 되며, 그림 2와 같은 이득 곡선에 의하면 -47dB의 입력에 대하여 약 4.5dB의 증폭이 발생된다. 그림 4의 결과는 4.5dB의 증폭이 발생함을 확인할 수 있다.

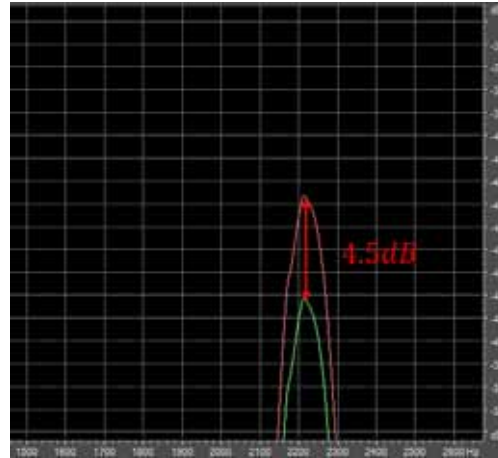


그림 4. 2200Hz 톤 신호 음향 증폭 결과
Fig. 4. 2200Hz tone signal sound amplification result

4.2

그림 5의 (a)는 하울링이 발생하는 상태에서 측정된 보청기 출력 신호의 스펙트로그램이다. 그림의 x축은 시간을, y축은 주파수(Hz)를 나타낸다. 3350Hz에서 하울링이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 구현된 하울

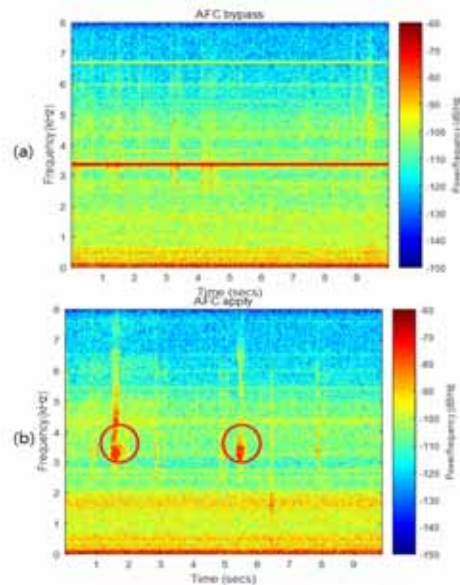


그림 5. 적응 하울링 제거 실험 결과 (a) 하울링 발생 상태, (b) 하울링 제거 후.
Fig. 5. Results of adaptive howling cancellation: (a) before and (b) after howling cancellation.

링 제거 알고리즘을 동작시킨 결과 (b)와 같이 하울링 성분이 제거되는 것을 확인할 수 있다. 이때 경로의 변화에 따라 적응하며 제거하는지 확인하기 위하여 두 번에 걸쳐 경로를 변경했다(원표시). 경로 변경 이후 대략 0.03 초 이내에 적응 음향 궤환 제거가 동작하여 하울링 성분이 제거되는 것을 확인할 수 있었다.

4.3

구현된 감소 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 Babble 잡음과 F16 잡음을 사용하여 실험하였다. 그림 6은 각 잡음에 대한 보청기 입출력 신호의 스펙트로그램이다. 각 잡음에 대해 자동으로 분류된 잡음 형태에 맞는 Wiener 이득 LUT를 참조하였다. Babble 잡음의 경우 4000Hz 대역까지 분포한 잡음이 감소되는 것을 확인할 수 있다. F16 잡음 역시 감소되는 것을 볼 수 있다.

표 3. 잡음 제거 결과에 대한 PESQ
Table 3. PESQ for noise reduction

잡음 종류	Input	Output
Babble	1.8210	2.2340
F16	2.0450	2.3740
Babble + F16	1.9920	2.2470

자동 잡음 분류 알고리즘의 성능을 측정하기 위해 초기 5초 동안 Babble 잡음이 존재하고, 이후 5초에 걸쳐 F16 잡음이 있는 경우에 대해 실험하였다. 그림 7은 잡음 감소 결과를 보여준다. 잡음 유형이 바뀌어도 효과적으로 잡음을 제거하는 것을 확인할 수 있다. 잡음 감소에 따른 음성 음질 향상을 측정하기 위해 PESQ를 측정하였다. 잡음 감소 알고리즘의 동작에 따라 PESQ가 0.255향상됨을 볼 수 있다.

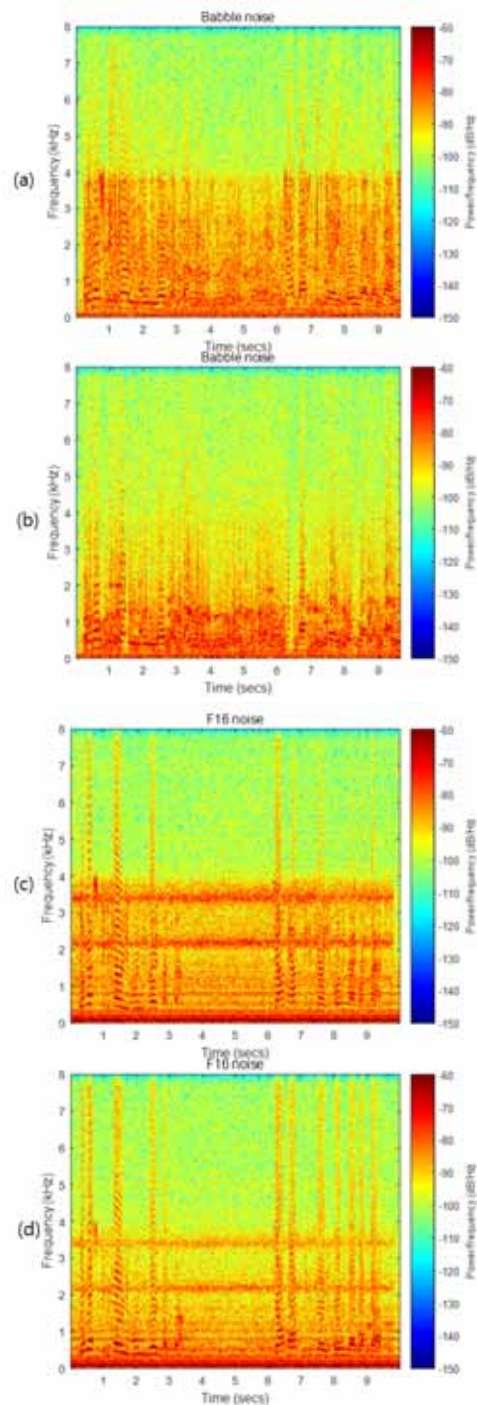


그림 6. 잡음 감소 결과. Babble 잡음에 대한 입력(a) 과 출력(b). F16 잡음에 대한 입력(c) 과 출력(d).
Fig. 6. Noise reduction: babble noise (a) input and (b) output. F16 noise (c) input and (d) output.

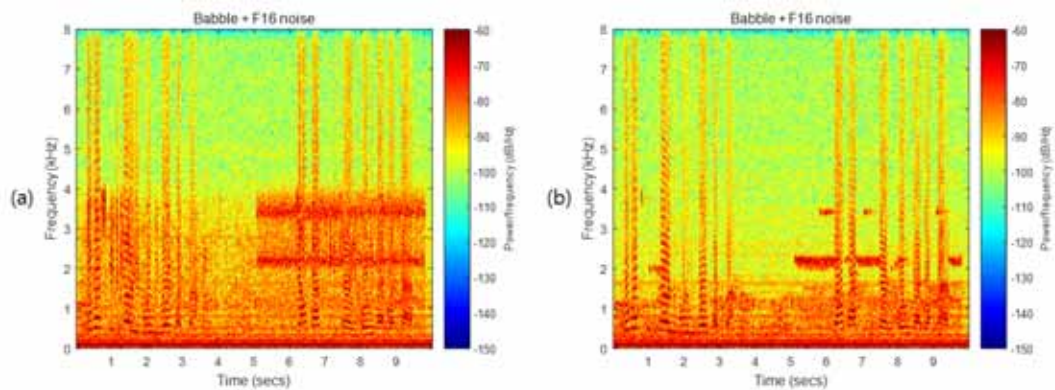


그림 7. Babble 잡음 + F16 잡음에 대한 잡음 감소 결과 (a) 입력, (b) 출력
 Fig. 7. Noise reduction for babble noise + F16 noise, (a) input, (b) output.

5.

본 논문에서는 범용 DSP 칩을 이용하여 다중 채널 보청기 시스템을 저전력 구현하였다. WDRC기반의 음향 증폭 알고리즘과 적응 음향 궤환 제거 알고리즘, 잡음 감소 알고리즘을 각각 인터저 프로그램을 통해 BelaSigna® 250의 어셈블리어로 구현하였다. 시스템은 7.02MHz에서 실시간 구현되며, 실험결과 우수한 성능을 보인다. 본 논문에서 구현한 저 전력 다중 채널 보청기 시스템은 사용자 개개인의 특성에 따라 매개변수를 쉽게 변경할 수 있으며, 기능의 추가가 용이한 장점이 있다.

REFERENCES

- [1] Arthur Schaub, Digital hearing aids, Thieme, New York, 2008.
- [2] Hamacher, V, et al. "Signal processing in high-end hearing aids: state of the art, challenges, and future trends." EURASIP Journal on Applied Signal Processing 2005 pp. 2915-2929, Dec. 2005.
- [3] AMI Semiconductor, Hardware Reference Manual for Orela® 4500 and BelaSigna 250, SignaKlara Tools EDK 4.1, 2007.
- [4] Robert Bernnan and Todd Schneider, "A flexible filterbank structure for extensive signal manipulations in digital hearing aids", IEEE International Conference, May. 1998.
- [5] Rosa-Zuera M, Gil-Pita R, Alexandre-Cortizo E, Ultrilla-Manso M and Cuadra-Rodriguez L, "WOLA Filter Bank Design Requirements in Hearing Aids", Pattern Recognition and Information Processing, 10th, Jan. 2009.
- [6] WOLA Filterbank Coprocessor: Introductory Concepts and Techniques, Semiconductor Components Industries, LCC, 2009.
- [7] Jeremy Agnew, Jeffrey M. Thornton, "Just Noticeable and Objectionable Group Delays in Digital Hearing Aids", Journal of the American Academy of Audiology, vol.11, no.6, June. 2000.
- [8] Princen. J. and Bradley. A., "Analysis/Synthesis filter bank design based on time domain aliasing cancellation." IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol.34, no.5, Oct. 1986.
- [9] Sundarajan Rangachari, Philipos C. Loizou, "A noise-estimation algorithm for highly non-stationary environments", Speech Communication, vol. 48, issue 2, pp, 220-231, Feb. 2006.

[10] J. Benesty, S. Makino, J. Chen, Speech Enhancement, Springer Science & Business Media, New York, 2005.

(Bum-Jun Kim) []



- 2017 2 : ()
- 2017 3 ~ : ()

< > , , ,

(Jun Byun) []



- 2017 2 : ()
- 2017 3 ~ : ()

< > , , ,

(Young-Cheol Park) []



- 1986 2 : ()
- 1988 2 : ()
- 1993 2 : ()
- 2002 3 ~ :

< > , , ,