

Simulink 기반 다채널 디지털 보청기 알고리즘 개발 플랫폼 구현

변준, 민지환, 차태환, 자유나, 박영철

Implementation of Multichannel Digital Hearing Aid Algorithm Development Platform using Simulink

Jun-Byun, Ji-hwan Min, Tae-hwan Cha, You-na Ji, Young-cheol Park

요약 본 논문에서는 Matlab에서 제공하는 Simulink를 활용하여 다채널 디지털 보청기 알고리즘 개발 플랫폼의 구현을 제안하였다. 디지털 보청기는 난청자의 원활한 의사소통을 돕는 의료기구로 그 중요성이 날로 증가하고 있다. 특히 다채널 디지털 보청기는 난청자의 주파수 별 청력 손실 정도에 따른 보상이 가능해 고막의 손상을 최소화하는 동시에 보청기 사용자에게 적합한 증폭이 가능해진다. 본 논문에서 구현한 개발 플랫폼은 WOLA 필터뱅크를 이용해 입력 신호의 분석 및 합성이 이루어지며 광역동범위압축(Wide Dynamic range compression) 기반의 난청 보상 알고리즘, 적응 필터를 이용한 음향 cue 제거 알고리즘(Adaptive feedback cancellation)을 포함한다. Simulink를 이용한 개발 플랫폼에서 각 블록의 파라미터를 설정 할 수 있고 블록별 결과가 확인이 가능하다. 이를 이용해 기계어 코딩 전 단계에서 알고리즘 테스트가 가능하기 때문에 보청기 알고리즘의 개발 시간이 단축 가능하고 계산량 및 성능 최적화가 가능해졌다.

Abstract In this paper, we implement the development platform of multichannel digital hearing aid algorithm using Simulink provided by Matlab. The digital hearing aids are considered medical devices designed to compensate for hearing loss, they need to be correctly selected, to help a person who has difficulty in hearing. The development platform that implemented in this paper, includes WOLA filterbank for analysis/synthesis of input signal, Wide dynamic range compression for hearing loss compensation and adaptive filter for feedback cancellation. Using the development platform, algorithm parameters for each block can be set depending on the hearing aid user. Thus it is possible to test the algorithm before the machine language. As a result, the time for algorithm development can be saved and performance and computational complexity can be optimized.

Key Words : Adaptive feedback canceller, Digital hearing aid, Simulink, Wide dynamic range compression, Hearing loss

1. 서론

오늘날 의학의 발달로 인간의 평균 수명이 급격하게 늘어나고, 다양한 소음에 노출되어 있는 현대인들의 특성으로 인해 난청인구가 늘어나고 있는 추세이다. 이로 인해 다양한 난청자의 필요를 충족시킬 수 있는 디지털 보청기의 수요 또한 늘어나고 있다.

디지털 보청기는 마이크로 들어온 입력 신호를 난청자의 주파수 별 청력 손실(Hearing loss) 정도에 따라 소리를 증폭해 보청기 사용자의 원활한 의사소통을 돕는 의료 기구이다. 이를 위해 난청 환자의 청력 역치를 넘어서는 크기로 소리를 적절히 증폭시키는 광역동범위압축(Wide Dynamic Range Compression) 알고리즘이 이용된다.[1] 이

This Study is a study performed for Economic Cooperation Issues Industry Development Project supported by the Ministry of Industry and the Korea Industrial Technology Association usual.

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

Received March 30, 2016

Revised April 10, 2016

Accepted April 18, 2016

때 주파수 대역을 여러 밴드로 나누는 다채널 알고리즘의 경우 단 채널 알고리즘에 비해 난청자의 청력 손실 커브(Hearing loss curve)를 세밀하게 보정해 자연스러운 음질을 출력 할 수 있다는 장점이 있다.

디지털 보청기에서 필요한 또 다른 기술은 음향 케환 제거(feedback cancellation) 기술이다. 음향 케환은 보청기 스피커의 출력 소리가 다시 마이크로 되돌아 들어가 출력이 비정상적으로 커지는 현상을 말한다. 이는 보청기 사용자에게 불편함을 일으키며 특히 보청기의 증폭 이득 범위를 제한한다는 단점을 가지고 있다.[2] 이전에는 협대역 필터를 이용하여 케환 신호를 제거하는 기술이 사용되었는데 이는 빠르게 변하는 음향 케환 경로를 잘 추적하기 어렵고 3개 이상의 음향 케환 주파수의 경우는 제거하지 못한다는 단점이 있다.[3] 이러한 문제점을 극복하기 위해 제안된 것이 입력 신호에 따라 적응적으로 필터를 갱신하여 음향 케환 경로를 추정하는 적응 음향 케환 제거 필터(Adaptive feedback canceller : AFC)이다.[1,3] 적응 필터의 경우 여러 주파수 대역의 음향 케환 경로를 빠르게 추정할 수 있지만 상대적으로 연산량이 높아 저전력 구현이 필수적인 보청기에서 문제가 되어 왔다. 하지만 최근 하드웨어의 발달, 그리고 적응 필터의 연산량 최적화 등의 노력을 통해 저전력 시스템에서도 적응 필터가 이용되고 있다.[1,3] 이외에도 최근 디지털 보청기의 성능을 확장시키기 위해 잡음 제거 기술[1,4], TV나 스마트폰과 다른 통신 기기들과의 융합 등 다양한 기술들이 소개되고 있다.

디지털 보청기는 장시간 사용해야하므로 시스템의 저전력화가 필수적이고 이를 위하여 알고리즘의 코딩을 낮은 레벨의 기계어로 해야 한다는 번거로움이 있다. 따라서 기계어 프로그래밍 이전 단계에 PC에서 보청기 알고리즘의 성능을 테스트할 수 있는 검증 플랫폼의 수요가 증가하고 있다. 본 논문에서는 다채널 디지털 보청기에서 필요한 신호처리 알고리즘을 모듈별로 구현하여 Matlab에서 지원하는 Simulink를 이용해 통합 테스트

환경을 구축하고자 한다. Simulink는 그래픽 화면 상에서 블록선도 방식으로 시스템을 모델링하여 모의실험 및 분석을 간편하게 도와주는 소프트웨어 패키지로 DSP 보드를 장착하여 실제 외부 신호를 이용한 실험 실험을 지원해 알고리즘의 고속 설계가 가능하다. 개발된 테스트 환경에서는 보청기에서 사용하는 신호처리 알고리즘들의 모듈별 성능을 확인 할 수 있으며 기계어 코딩 전 단계에서 알고리즘을 테스트함으로써 알고리즘 개발 시간을 단축 하고 계산량과 성능면에서 최적화가 가능해진다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 이루어진다. 먼저 2장에서 다채널 디지털 보청기에서 사용되는 알고리즘을 소개하고 3장에서 구현된 통합 테스트 플랫폼을 소개한다. 4장에서 실험결과를 보이며 마지막 5장에서 결론으로 마무리한다.

2. 보청기 알고리즘

2.1 WOLA(Weighted Overlap-Add) 필터뱅크

본 논문에서는 디지털 보청기 알고리즘으로 들어온 입력 신호의 주파수 분석 및 합성을 위해 WOLA 필터뱅크를 이용하였다. WOLA는 디지털 보청기 알고리즘 구현을 위해 널리 이용되는 필터뱅크로 분석(analysis), 증폭(gain) 그리고 합성(synthesis) 세 부분으로 나눌 수 있다.[5]

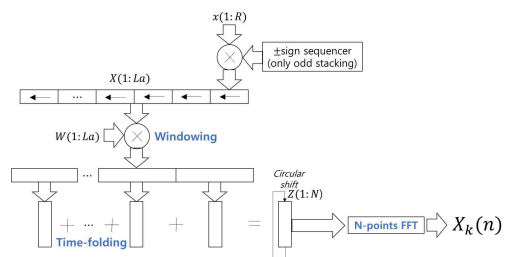


그림 1. WOLA 분석 필터뱅크 [5]
Fig. 1. WOLA analysis filterbank

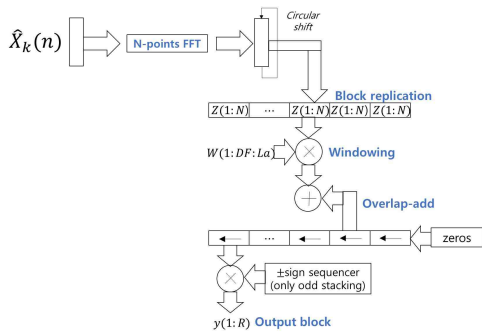


그림 2. WOLA 합성 필터뱅크 [5]
Fig. 2. WOLA synthesis filterbank

WOLA는 블록 기반으로 연산이 수행되는 필터뱅크로 R 개의 새로운 신호가 입력 버퍼에 넘겨지며 La 샘플씩 윈도우가 취해진 입력 버퍼는 최종적으로 N 포인트 FFT를 통해 입력 신호의 주파수 성분을 분석한다.[6] 그림 1은 합성 필터뱅크의 블록 다이어그램을 보이고 있다. 난청 보상 알고리즘이 적용된 신호는 마지막 합성 단계에서 시간 도메인 신호로 합성될 수 있으며 이는 그림 2에서 볼 수 있다.

2.2 난청 보상 알고리즘

그림 3은 다채널 디지털 보청기 알고리즘의 블록도를 보이고 있다. 난청 보상 이득을 계산하기 위해 먼저 WOLA 필터뱅크를 이용해 주파수 대역별로 분할된 입력 신호는 포락선 추정(Envelope estimation) 방식을 이용하여 해당 대역에서의 크기를 계산 해 밴드별 평균 에너지를 구한다.[7] 난청자는 주파수 대역 별로 청력 손실 정도가 다른데 구해진 밴드별 평균 에너지를 이용하여 난청 정도에 따른 보상 이득 값을 구할 수 있게 된다. 본 논문에서 구현한 통합 시스템에서는 다양한 보청기 시스템을 지원하기 위하여 5, 8, 그리고 16채널까지 주파수 대역 분할을 선택 할 수 있도록 하였다.

i 번째 채널의 포락선 추정은 1차 채귀 평균 방식을 이용하여 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$P_i(n) = \lambda P_i(n-1) + (1-\lambda) Q_i(n) \quad (1)$$

$$Q_i(n) = \sum_{k \in i} |X_k(n)|^2 \quad (2)$$

위의 수식에서 $X_k(n)$ 은 보청기 마이크 입력 신호, k, n 은 각각 주파수와 시간 인덱스를 나타낸다. 이때 추정 시정수 λ 는 신호의 크기에 따라 달라지게 되는데 신호의 크기가 커질 때에는 과하게 증폭되는 것을 방지하기 위하여 에너지의 크기를 빠르게 추정해야하므로 어택 시간(attack time)을 짧게 두고 반대로 에너지의 크기가 줄어들 때에는 급격한 신호의 변화를 막기 위해 릴리즈 시간(release time)을 크게 두어 천천히 떨어지도록 설정한다.[1] 각 밴드별로 난청자의 청력 손실 정도와 입력 신호 레벨을 측정하여 청력 손실만큼 보상해준다.

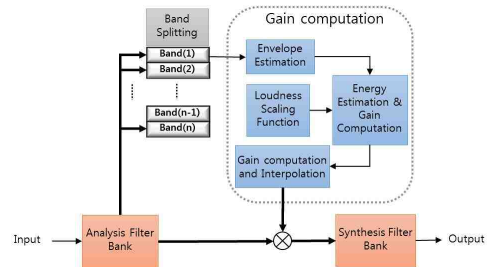


그림 3. 난청 보상 알고리즘 블록다이어그램
Fig. 3. Blockdiagram of WDRC algorithm

2.3 음향 제한 제거 알고리즘

음향 제한은 보청기 스피커의 출력 소리가 다시 마이크로 되돌아 들어가 출력이 비정상적으로 커지는 현상으로 보청기 사용자들에게 불편함을 주고, 난청 보상 이득의 최대치에 제한을 준다는 단점이 있다.[1,8,9]

본 논문에서는 적은 연산량으로 음향 제한 신호를 제거하기 위해 주파수 도메인에서 서브밴드(subband) 기반의 음향 제한 제거 알고리즘을 사용하도록 한다. 본 논문에서 구현된 음향 제한 제거 알고리즘의 블록 다이어그램은 그림 4와 같으며 아래 (3)-(5)는 적응 필터의 계수 갱신 식을 보이고 있다.

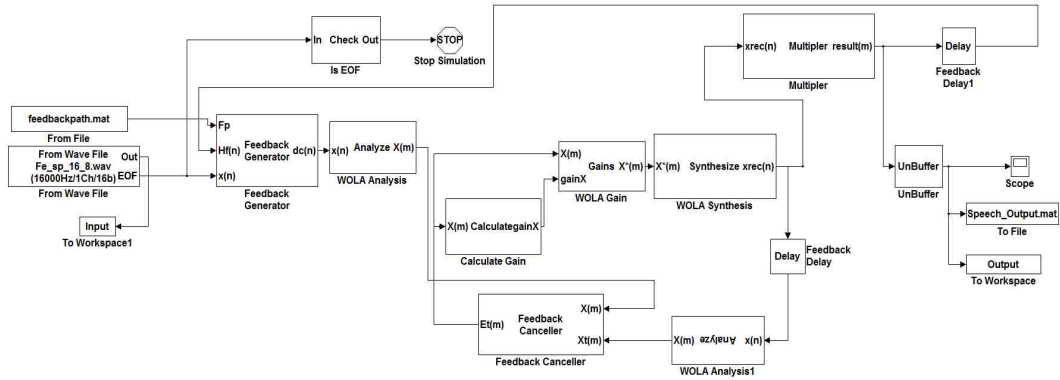


그림 5. Simulink 기반 개발 플랫폼
Fig. 5. Simulink based platform

$$w(k+1) = w(k) + \mu X'(k) P^{-1}(k) E(k) \quad (3)$$

$$P(k) = |X(k)|^2 \quad (4)$$

$$E(k) = Y(k) - X(k) W(k) \quad (5)$$

$E(k)$ 는 음향 케환 신호가 제거된 음성 신호로 보청기 증폭 이득을 계산하는 입력으로 사용된다.

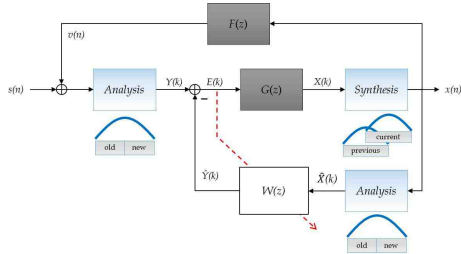


그림 4. 음향 케환 제거 알고리즘 블록 다이어그램
Fig. 4. Blockdiagram of AFC

3. 구현된 Simulink 기반 개발 플랫폼

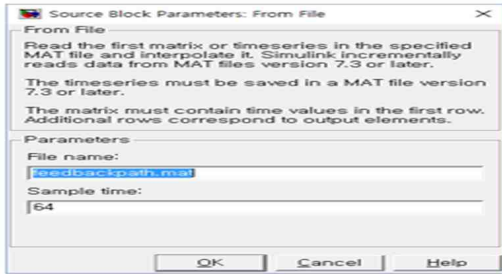
3.1 Simulink 개발 플랫폼

본 논문에서는 보청기 알고리즘의 성능을 테스트 할 수 있는 통합 개발 플랫폼을 Simulink를 이용해 구현함으로써 기계어 코딩 전 알고리즘의 성능을 쉽게 테스트하여 개발기간을 단축하고자 하였다.

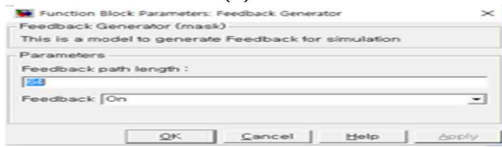
그림 5는 구현된 통합 개발 시스템의 전체 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 'From wave File' 블록을 통해 목표 음성 파일을 읽어 올 수 있으며 앞 절에서 소개된 보청기 알고리즘들을 각각의 블록으로 구성하여 개발자의 의도에 맞게 파라미터를 설정할 수 있도록 하였다.

음향 케환은 물리적인 음향 도메인에서 일어나는 상황이므로 이를 실험적으로 모델링하기 위해 Feedback Generator 블록을 추가해 시뮬레이션 상에서 임의로 음향 케환 신호를 생성하였다. 그림 6은 음향 케환과 관련된 블록의 파라미터 설정창이다. (a)는 From File 블록의 다이얼로그로 시뮬레이션에 필요한 음향 케환 경로를 읽어온다. 이때 음향 케환 경로의 길이는 사용자가 임의로 설정할 수 있다. (b)에서는 음향 케환 신호를 생성할 것인지 여부를 결정할 수 있다. 이 블록을 비활성화 시키면 음향 케환의 영향이 없는 온전한 난청 보상 알고리즘 결과를 테스트 할 수 있게 된다. (c)는 Feedback canceller 블록의 설정창으로 주파수 대역에 따른 적응 필터 계수의 갱신 속도를 설정할 수 있다. 일반적으로 고주파 대역에서 음향 케환으로 인한 값의 포화(saturation)가 일어날 확률이 높기 때문에 고주파 대역은 빠르게 업데이트하고 저주파대역은 상대적으로 천천히 업데이트하여 음성의 왜곡을 줄이고자 하였다.[9,10]

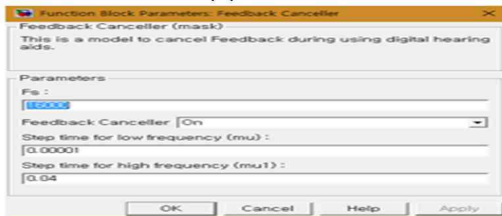
음향 케환 신호가 가/감된 음성 신호는 WOLA



(a)



(b)



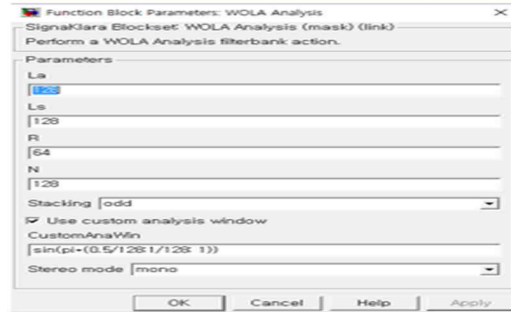
(c)

그림 6. Feedback 관련 블록 다이얼로그
Fig. 6. Block dialogs associated Feedback

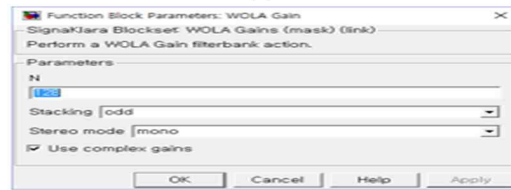
필터뱅크에 의해 주파수 도메인으로 분석된다. 그림 7은 WOLA 라이브러리 설정창으로 (a)는 WOLA Analysis/Synthesis, (b)는 WOLA Gain 블록의 다이얼로그이다. (a)에서는 분석 윈도우 크기(La), 합성 윈도우 크기(Ls), overlap percentage, FFT size 와 Custom Window를 설정할 수 있다. (b)에서는 Calculate Gain 블록에서 계산된 이득을 적용하는 역할을 한다.

WOLA 분석필터뱅크를 통해 주파수 도메인으로 옮겨진 신호는 Feedback canceller 블록에 의해 음향 케환 신호가 제거된 후 난청 보상 이득을 계산하는 Calculate Gain 블록으로 넘겨진다. Calculate Gain 블록에서는 앞 절에서 설명한 대로 난청 보상 이득을 계산한다.

이때 이득을 계산하는데 필요한 어택, 릴리즈 시간, 보청기 채널 개수와 채널별 최대 증폭 이득을 그림 8과 같이 설정 할 수 있도록 하였다. 계산된 난청 보상 이득은 WOLA 라이브러리를 통



(a)



(b)

그림 7. WOLA Library 관련 블록
Fig. 7. Block associated WOLA Library

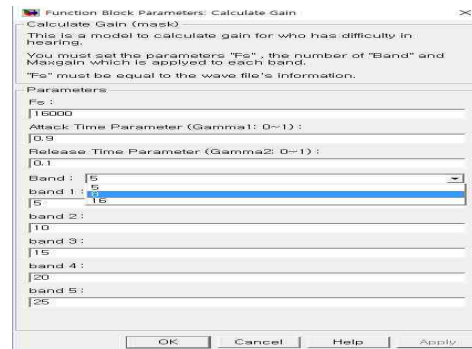


그림 8. Calculate Gain block dialog
Fig. 8. Calculate Gain block dialog

해 입력 신호에 적용되고 마지막으로 합성 필터뱅크를 거쳐 최종 보청기 출력을 얻게 된다.

이처럼 Simulink로 이루어진 통합 개발 플랫폼을 이용해 다양한 파라미터를 기계어 코딩 전에 테스트함으로써 보청기 알고리즘 개발에 시간을 단축 할 수 있다.

4. 실험

4.1 실험환경 설정

본 논문에서 구현된 개발 플랫폼을 실험하기 위해 다음과 같은 환경에서 실험이 진행되었다. 입력 신호는 TIMIT 데이터베이스의 여성 음성 신호를 이용하였으며 50% overlap-add의 sine window가 적용되었다. 다음 표 1은 실험을 위해 WOLA 필터뱅크에 사용된 파라미터를 보이고 있다.

표 1. WOLA 파라미터
Table 1. Parameters of WOLA filterbank

파라미터	값
프레임당 샘플 사이즈 (R)	64
분석 윈도우 사이즈(La)	128
합성 윈도우 사이즈(Ls)	128
샘플링 주파수 (Fs)	128
FFT 사이즈 (N)	128
stacking	Odd

4.2 난청 보상 알고리즘 실험 결과

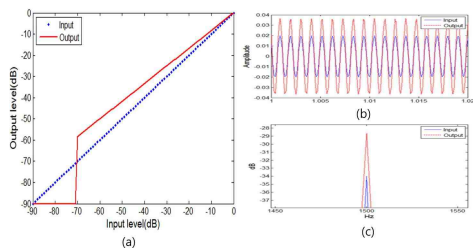


그림 9. (a) 3번째 밴드의 이득 곡선과 Sine 신호에 대한 (b) 시간, (b) 주파수 도메인에서의 WDCR 결과
Fig. 9. (a) Gain curve at 3rd band, the WDCR results of sine curve at (b) time and (b) frequency domain

본 실험에서는 5채널을 사용하였으며([0, 500, 1000, 2000, 4000, 8000] Hz) 각 채널별 최대 이득은 [5, 10, 15, 20, 25] dB로 설정하여 고주파대역으로 갈수록 증폭률이 높아지도록 하였다. 포락선 추정을 위해 사용되는 어택, 릴리즈 시간은 각각 0.9와 0.1로 설정하였다.

그림 9 (a)는 실험에서 사용한 이득 곡선의 한 예로 3번째 밴드(1-2 kHz)에서의 값을 보이고 있다. 입력 신호의 레벨이 -50dB 이하인 값은 잡음이라고 판단되어 증폭하지 않는다. 또한 입력 신

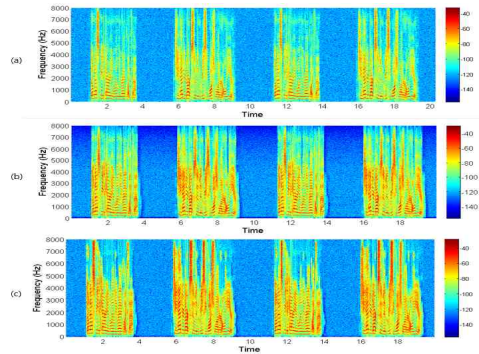


그림 10. 여성음성의 난청 보상 알고리즘 수행결과
Fig. 10. (a) Input, (b) 5 and (c) 16 band output of WDCR

호가 커질수록 증폭 이득 값은 점점 줄어들고 0 dB가 넘어가면 이득 값을 0 dB로 설정하여 과도한 증폭을 방지하였다. 1500Hz Sine 신호를 입력으로 사용한 경우의 (b) 시간 도메인, (c) 주파수 도메인 결과 또한 확인 할 수 있다. 입력으로 들어간 Sine 신호는 약 10 dB 정도 증가치를 보여 그림 9 (a)의 이득 커브와 대응되는 결과를 보임을 알 수 있다.

그림 10은 TIMIT 여성 음성 파일에 대한 실험 결과이다. (a)는 음성 입력신호이고 (b) 난청 대역이 보상된 출력 결과이다. 작은 레벨을 가진 고주파 대역의 신호가 증폭된 것을 확인 할 수 있다.

4.3 음향 궤환 제거 알고리즘 실험 결과

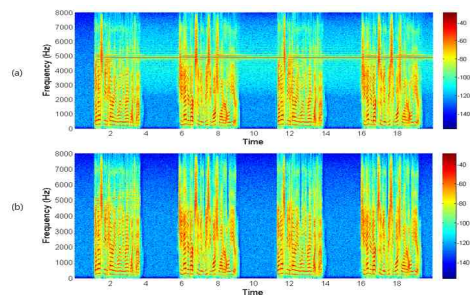


그림 11. 고정된 음향 궤환 경로에 대한 (a) 입력과 (b) 출력 신호
Fig. 11. (a) Input and (b) output of AFC for fixed feedback path

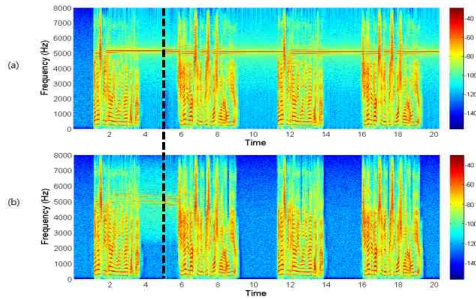


그림 12. 변화하는 음향 경로(점선)에 대한 (a) 입력과 (b) 출력 신호
 Fig. 12. (a) Input and (b) output of AFC for varying feedback path

음향 케환 제거 블록에서는 사용된 파라미터는 다음과 같다. 실험을 위해 모델링된 음향 케환 경로가 이용되었다. 적응 필터 업데이트에 사용되는 저주파와 고주파대역으로 나누어서 각각 0.00001/0.04로 설정하였다.

그림 11의 (a)는 고정된 음향 케환 경로를 사용하여 하울링이 일어난 보청기 입력 신호를 보이고 있다. (b)는 음향 케환 경로 제거 알고리즘이 적용된 결과이다. (a)에서 관찰 되는 하울링이 적응 필터 적용 후 제거가 된 것을 확인할 수 있다.

그림 12는 그림 11과 동일한 입력신호에서 음향 케환 경로가 바뀌었을 경우의 실험 결과이다. 음향 케환 경로는 보청기의 위치, 사용자의 움직임에 따라 변화 할 수 있다. 실험 결과를 보면 이러한 음향 케환 경로의 변화에도 적응 필터가 적절하게 빠른 속도로 수렴하여 케환 신호를 제거함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 Simulink 기반의 보청기 개발 플랫폼을 구현하고 그 성능을 확인 하였다. 개발 플랫폼에서는 난청 보상 알고리즘, 음향 케환 제거 알고리즘이 각각 블록으로 구현되었으며 개발자의 의도에 따라 각 블록의 파라미터 설정 변경이 가능하도록 하였다. 본 플랫폼에서는 입력 신

호의 분석 및 합성을 위해 WOLA 필터뱅크를 이용하였으며 실험을 통해 각 블록의 알고리즘들이 정확하게 구현되었음을 4장에서 보였다. Simulink 기반으로 구현된 본 개발 플랫폼은 기계어 코딩된 시뮬레이션 상에서 보청기의 성능 확인 및 최적화 작업에 활용 되어 보청기 시스템의 개발기간을 단축 할 수 있다. 추후 음질 개선 알고리즘, 마이크로폰 어레이를 이용한 빔포밍 등 다양한 기능을 추가 구현하여 플랫폼의 확장이 가능하다.

REFERENCES

- [1] Schaub, Arthur., "Digital hearing aids. New York: Thieme", 2008, 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 (2005): 2915-2929.
- [3] Akhtar, Muhammad Tahir, and Akinori Nishihara. "Acoustic feedback neutralization in digital hearing aids-A two adaptive filters-based solution." Circuits and Systems (ISCAS), 2013.
- [4] Van den Bogaert, Tim, et al. "Speech enhancement with multichannel Wiener filter techniques in multimicrophone binaural hearing aids." The Journal of the Acoustical Society of America 125.1 2009.
- [5] Semiconductor, O. N. "'WOLA Filterbank Coprocessor: Introductory Concepts and Techniques." (2009).
- [6] Vicen-Bueno, Raúl, et al. "A hearing aid simulator to test adaptive signal processing algorithms." Intelligent Signal Processing, 2007. WISP 2007. IEEE International Symposium on. IEEE, 2007.
- [7] Jenstad, Lorraine M., et al. "Comparison of linear gain and wide dynamic range

compression hearing aid circuits II: Aided loudness measures." Ear and Hearing 21.1 (2000): 32-44.

- [8] Spriet, Ann, et al. "Adaptive feedback cancellation in hearing aids with linear prediction of the desired signal." Signal Processing, IEEE Transactions on 53.10 (2005): 3749-3763.
- [9] Spriet, Ann, et al. "Adaptive feedback cancellation in hearing aids." Journal of the Franklin Institute 343.6 (2006): 545-573.
- [10] Chi, Hsiang-Feng, et al. "Band-limited feedback cancellation with a modified filtered-X LMS algorithm for hearing aids." Speech Communication 39.1 (2003): 147-161.

저자약력

변 준(Jun-Byun)



2013년 ~ 현재: 연세대학교 컴퓨터
정보통신공학부 (학사)

<관심분야>

디지털 신호처리, 음성 신호처리,
음질 개선

민 지 환(Ji-Hwan Min)



2011년 ~ 현재 : 연세대학교 컴퓨
터정보통신공학부 (학사)

<관심분야>

멀티미디어 시스템, 이동통신

차 태 환(Tae-Hwan Cha)



2011년 ~ 현재 : 연세대학교 컴퓨
터정보통신공학부 (학사)

<관심분야>

디지털 신호처리, 적응 신호처리

지 유 나(You-na Ji)



2011년 : 연세대학교 컴퓨터정보통
신 공학부 (학사)
2011년 ~ 현재: 연세대학교 전산학
과 (석박통합 과정)

<관심분야>

디지털 신호처리, 음질 개선, 음성
신호처리, 적응 신호처리

박 영 철(Young-Cheol Park) [중심회원]



1986년 : 전기전자공학과 (학사)
1988년 : 전기전자공학과 (석사)
1993년 : 전기전자공학과 (박사)
2002년~현재 : 연세대학교 컴퓨터
정보통신공학부 교수

<관심분야>

디지털 신호처리, 오디오 신호처
리, 음성 신호처리, 적응 신호처리