

보청기를 위한 배경 잡음 제거 기법의 성능 평가

박선준, 도 원, 신승우, 윤대회, 김동욱†, 박영철†
연세대학교 신호처리연구센터, 삼성 생명 과학 연구소†

Performance Evaluation of Environmental Noise Reduction Techniques for Hearing Aids

S. J. Park, W. Doh, S. W. Shin, D. H. Youn, D. W. Kim†, Y. C. Park†
Center for Signal Processing, Yonsei University, †BME Center, Samsung Biomedical Research Institute

ABSTRACT

To provide ameliorated aided environment to hearing impaired listeners, background noise reduction techniques are investigated as a front-end of conventional hearing aids, and their effects are tested in a subjective manner. Several speech enhancement schemes were implemented and preference tests for normal listeners are performed to select the best possible scheme for hearing impaired listeners. Results indicated that SDT scores without the speech enhancement scheme drop more sharply as SNR decreases than those with the speech enhancement techniques. SDT scores obtained for hearing impaired listeners with hearing aids showed large variability. However, all impaired listeners preferred noise suppressed sounds to unsuppressed ones.

서론

청각의 손실은 말과 언어라는 정보 교환의 수단이 부분적으로 단절됨을 의미하며 이것은 일상 생활에서의 많은 불편을 감수하게 할 뿐 아니라 정서적, 심리적으로도 적지 않은 영향을 미친다. 따라서 청각 손실을 겪고 있는 난청자들에게 보청 시스템의 필요성과 그 역할은 실로 지대하다. 특히, 최근에 들어서는 디지털 신호처리 기술과 집적 회로 설계 기술의 발달로 기존 아날로그 방식에서 제기되는 여러 문제점들을 해결할 수 있는 방안이 제안되고 있다[1].

하지만, 현재까지 도입되고 있는 디지털 보청 방식은 아직까지는 초보적 단계이다. 현 디지털 보청 방식은 아날로그 방식에서는 얻을 수 없는 비교적 자유로운 응답 특성을 얻는 것에는 성공하였으나[2], 증폭 과정에서 발생하는 신호의 왜곡에 대한 효과적 대응책은 없는 상태이다. 따라서, 소리를 증폭시킬 때 난청자의 인지도에 크게 영향을 미치는 주변 환경의 잡음 억제나 BTE(behind-the-ear) 혹은 ITE(in-the-ear) 형태의 보청 시스템에서 주로 발생하는 음향 왜곡의 제거, 양이 효과(binaural effect)를 도입한 보청 알고리즘 등의 구현이 비교적 용이한 디지털 방식을 보청 알고리즘에 도입하는 연구가 지속적으로 수행되

고 있는 상황이다[1].

배경 잡음이 존재할 경우, 중도 난청 환자가 정상 청력과 유사한 어음 명료도 검사(SDT, speech discrimination test) 점수를 얻으려면 SNR이 2.5 ~ 12.5 dB 정도 높아야 한다고 알려져 있다[3]. 또한, 배경 잡음들은 보청 시스템에 의해 증폭되었을 경우, 감음신경성 난청자들이 가지는 라우드니스 누가현상(loudness recruitment phenomenon)에 의해 정상인이 느끼는 거부감에 비해 더욱 큰 거부감을 주게 된다[4]. 따라서, 보청 시스템에서의 가장 중요한 문제중 하나는 이와 같은 배경 잡음들을 제거하는 것이다[5]. 본 논문에서는 여러 음질 향상 기법을 정상인을 대상으로 주관적 평가를 수행하여, 신호도 및 잡음 제거 효과를 실험하였고, 보청 시스템의 전처리 단으로 사용하여 배경 잡음을 제거할 경우, 난청자에게 미치는 효과에 대한 연구를 수행하였다.

배경 잡음의 영향

대화 상황에서 배경 잡음은 음질이나 인지도를 저하시킨다. 이는 정상인뿐만 아니라 난청자의 경우에도 마찬가지이다. 그러나, 인간에게는 여러가지 음 중 특정음에 집중하여 선택적으로 음을 들을 수 있는 능력을 갖고 있으므로, 잡음 환경 하에서도 어느 정도 음성을 알아들을 수 있다[6]. 이는 감각적이라기보다는 중추적인 것으로 전체 소리 중 대상 소리의 패턴을 추출함으로써 선택적인 청취를 할 수 있게 된다. 인간은 대상 음성이 아닌 소리로부터의 메스킹 현상을 극복하기 위해서 음성 신호의 잉여 단서(redundancy of speech cues)를 사용하게 된다. 예를 들어, 필터를 이용하여 2 kHz 이상의 음성 신호를 잘라낸 경우에 음성을 알아들을 수 있지만, 반대로 2 kHz 이하의 음성 신호를 잘라낸 경우에도 알아들을 수 있다. 즉, 음성 신호의 잉여 단서는 정상인의 경우 잡음이 매우 심한 환경에서 음성을 인지할 수 있는 능력을 주는 것이다. 하지만, 난청자는 기본적으로 음성의 많은 단서들을 듣지 못할 뿐만 아니라 왜곡없는 증폭된 신호를 듣는 경우에도 마찬가지이다. 난청자가 듣는 음성의 단서들이 조용한 환경에서는 충분할 지라도 잡음이 있는 환경에서 인지하기에는 부족하다.

음질 향상 기법

음질 향상 기법은 잡음이 섞여있는 신호로부터 추정된

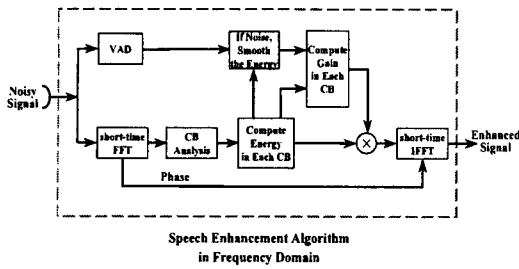


그림 1. 음질 향상 기법의 신호 처리 흐름도
 Fig. 1. Signal processing in speech enhancement techniques

평균 노이즈를 이용하여 배경 잡음을 제거한다. 배경 잡음 억제 효과의 실험하기 위하여 다음 세가지의 음질 향상 알고리즘들을 C-언어를 사용하여 구현하였다.

- 파워 차감법을 이용한 음질 향상 기법(PS)[7]
- 위너 필터를 사용한 음질 향상 기법(WF)[8]
- MLE 추정법을 이용한 음질 향상 기법(MLE)[9]

각각의 방식들을 단구간 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역에서 처리하도록 하였다. 구현한 주파수 영역에서의 신호 처리 블록도는 그림 1과 같다.

우선 잡음이 섞인 입력 신호가 들어오면 VAD(voice activity detector)로부터 음성 신호의 유무를 판단하게 된다. 주파수 영역에서의 신호 해석을 위하여 입력 신호는 단구간 푸리에 변환을 통하여 변환되고, 인간의 청각 특성이 고려된 임계 대역폭에 따라 에너지를 계산한다. 각 임계 대역에 가해질 이득이 추정된 잡음으로부터 계산되며, 구한 이득을 각 대역에서 계산된 에너지에 적용한다. 최종적으로 입력 신호의 주파수 스펙트럼으로부터 얻은 위상 성분을 각 주파수 성분의 크기에 가하여 역 단구간 푸리에 변환을 통하여 시간 샘플로 출력한다.

음질 향상 기법에서 필수적으로 사용되는 음성 신호의 유무 판별, 노이즈 구간의 검출 및 노이즈의 레벨 추정은 에너지 및 영교차율 등을 이용하여 구현할 수 있으나[10], 본 논문에서는 음질 향상 기법 자체의 영향을 알아보기 위해 음성 유무의 판단 결과를 인덱스로 가해주는 방식을 택하였다. 각 음질 향상 기법은 주파수 영역에서 이득을 가하여 주는 형태로 표현할 수 있으며, 구현한 세가지 방식에 대한 이득식은 표 1과 같다.

표 1. 구현 음질 향상 기법의 이득식
 Table 1. Gain functions of implemented speech enhancement techniques

	이득식
PS	$\left[\frac{ y(n) ^2 - \lambda_w(n)}{ y(n) ^2} \right]^{1/2}$
WF	$\frac{ y(n) ^2 - \lambda_w(n)}{ y(n) ^2}$
MLE	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{ y(n) ^2 - \lambda_w(n)}{ y(n) ^2}}$

$|y(n)|$: n번째 밴드에서의 관측 신호의 크기
 $\lambda_w(n)$: n번째 밴드에서 추정된 잡음의 파워

실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 앞서 언급한 이론들을 바탕으로하여 크게 세가지의 임상 실험을 행하였다. 우선 정상인을 대상으로 하여 구현한 세가지 음질 향상 기법에 대하여 선호도 조사를 행하였다. 그리고 선호도 조사를 통해 선정된 알고리즘들을 사용, 정상인을 대상으로 어음 명료도 검사를 행하였다. 마지막으로, 선정된 음질 향상 알고리즘들을 적용한 신호를 난청자에게 들려 준 경우의 어음 명료도 검사를 행하였다.

1. 음질 향상 기법의 선호도 조사

음질 향상 기법을 난청자에게 적용하기 위하여 우선 20명의 정상인을 대상으로 하여 세가지 음질 향상 기법을 통하여 배경 잡음을 제거한 소리를 들려주고 세가지 기법 중 가장 선호하는 기법을 선택하도록 하였다. 20명의 실험 대상자 중, 10명은 음성 신호를 전문적으로 처리하는 연구원이었으며, 3명은 전문 오디오 평론가였다.

청력계기(聽力計器, audiometer) GSI61에서 발생시킨 백색 잡음과 음성 대역 잡음을 이용하여 음성 대 잡음비가 각각 10, 5, 0dB가 되도록 데이터 세트를 만들었다. 가산 잡음에 의해 오염된 신호를 세가지 음질 향상 기법을 적용한 후 정상인들에게 들려주고 음성 신호의 명료도, 신호의 왜곡된 정도, 그리고 잡음의 억제 정도 세가지 기준에 대하여 MOS(mean opinion score) 테스트를 행하였다. 또한, 세가지 기준을 고려한 경우 어떠한 소리를 선호하는가에 대한 설문을 하였다.

그림 2는 세가지 기준에 대한 전 데이터의 평균 MOS를 보여준다. MOS 결과를 보면, 잡음 제거 정도는 PS, WF를 사용한 경우가 MLE에 비해 우수하게 나타난 반면, 음성 신호의 명료도 및 신호의 왜곡 측면에서는 MLE가 두가지 방식보다 더 우수함을 볼 수 있다. 그림 3은 실험 대상 정상인들의 음질 향상 기법 선호도를 보여준다. 선호도 조사는 위의 세가지 기준을 종합적으로 생각할 경우 선호하는 방식을 복수로 선택하도록 하였다. 결과를 보면, 90%이상의 사람들이 비록 잡음은 비교적 적게 줄어들었지만 음성 신호의 왜곡이 적게 발생하는 MLE를 선호함을 볼 수 있다. 즉, PS와 WF는 잡음 제거 측면에서는 MLE보다 훨씬 뛰어났지만, 음성 신호에 음악성 잡음(musical noise)과 같은 왜곡을 많이 발생시킨 결과 선호도가 낮음을 볼 수 있다.

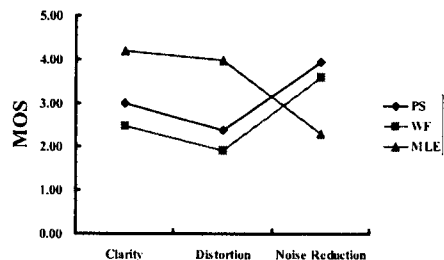


그림 2. 음질 향상 기법의 MOS
 Fig. 2. MOS of speech enhancement techniques

보청기를 위한 배경 잡음 제거 기법의 성능 평가

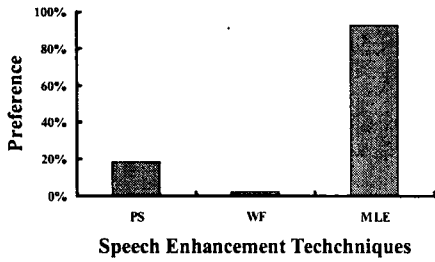


그림 3. 음질 향상 기법의 선호도
Fig. 3. Preference of speech enhancement techniques

따라서, 선호도의 결과에 따라 난청자들에게 적용할 음질 향상 기법을 MLE로 선정하게 되었다. 특히, 난청자의 경우 음성 신호의 왜곡은 정상인 보다 난청자의 인지도에 훨씬 큰 영향을 미치므로 배경 잡음이 잔재하더라도 음성 신호의 왜곡이 적은 MLE를 선택하는 것이 바람직하다.

2. 어음 명료도 검사 - 정상인

난청자에게 음질 향상 기법을 적용하기에 앞서 선호도 조사를 바탕으로 선정한 MLE를 이용하여 정상인 4명을 대상으로 어음 명료도 검사를 행하였다. 데이터는 TDH-50p 헤드폰을 사용하여 대상자들에게 들려 주었으며, 측정시 양이 효과를 배제하기 위하여 측정 반대편 귀에 사용 데이터와 같은 레벨의 백색 잡음을 이용하여 메스킹을 하였다.

그림 4는 정상인의 어음 명료도 검사 결과이다. 우선 백색 잡음을 음성 대 잡음비가 0, -5, -10, -15 dB가 되도록 합성하여 들려주고 SDT 점수를 측정하였다. 그후 MLE를 사용하여 배경 잡음을 억제하고 SDT 점수를 측정하였다. 결과에서 알 수 있듯이, 음성 대 잡음비가 저하될수록 SDT 점수가 급격히 저하됨을 알 수 있다. 하지만, 음질 향상 기법을 적용한 데이터를 들려준 경우 음성 대 잡음비가 저하되면서 SDT 점수가 낮아지지는 했지만, 비교적 완만히 낮아짐을 볼 수 있다.

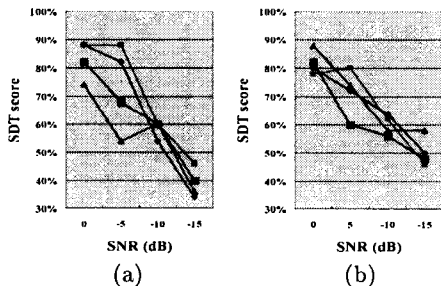


그림 4. 정상인의 SDT 점수 (a) 배경 잡음 억제 전, (b) 배경 잡음 억제 후
Fig. 4. SDT scores of normal listeners (a) before noise suppression, (b) after noise suppression

3. 어음 명료도 검사 - 난청자

난청자를 대상으로한 어음 명료도 검사는 음향 측정실에서 두개의 스피커를 사용하였다. 대상으로 한 난청자들은 모두 감음신경성 난청자로 중등도난청에서 고도난청이

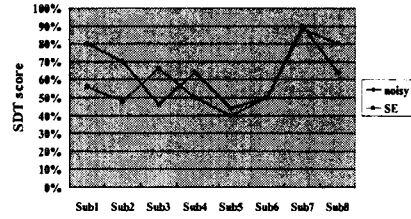


그림 5. 보청 환경하의 음질 향상 기법 적용 - SDT 점수
Fig. 5. Speech enhancement application under aided condition - SDT scores

있는 경우였다. 난청자의 경우 입력 레벨을 깨끗한 원신호에서의 MCL에 맞추어 들려 주었다. 실험 결과, 보청 시스템을 착용하지 않은 경우에는 잡음이 있는 경우가 음질 향상 기법을 적용한 경우보다 어음 명료도 검사 결과가 좋지 않은 결과를 얻었다. 이는 음질 향상 기법에 따른 음성 신호 레벨의 감소가 원인이라 할 수 있다. 하지만, 난청자들은 잡음 환경의 청취에 심한 거부감을 느꼈으며, SDT 점수는 낮더라도 잡음이 억제된 경우의 소리가 편안하다는 반응을 보였다. 또한, 정상인이 느끼는 음악성 잡음 및 신호의 왜곡은 거의 인지하지 못하였다.

보청 환경 하에서의 배경 잡음 억제의 효과를 알아보기 위해 난청자가 보청 시스템을 착용하도록 하여 잡음 존재시와 잡음 억제 후의 어음 명료도 검사를 행하였다. 그림 5는 난청자가 보청 시스템을 착용한 경우 심한 잡음 환경 하에서의 SDT 점수와 MLE를 이용한 배경 잡음 억제하의 SDT 점수를 보여준다. 보청 시스템은 편의를 위해 난청자가 평상시 착용하고 있는 보청 시스템을 사용하였다. 결과를 보면, 보청 시스템을 착용하지 않은 경우 대부분의 난청자가 배경 잡음 억제시 SDT 점수가 저하된 결과를 얻은 반면, 보청 시스템을 착용한 경우에는 난청자에 따라 배경 잡음 억제시 크게 SDT 점수가 향상된 경우, 거의 변화가 없는 경우, 저하되는 경우로 나눌 수 있음을 알 수 있다.

우선 배경 잡음을 억제한 경우 SDT 점수가 향상된 그룹의 대상자들의 좌우 귀의 평균 청력도가 그림 6에 나타나 있다. SDT 점수가 향상된 환자는 대상 3과 8로서, 청력도를 보면 저주파에서 고주파로 갈수록 심한 저하를 보임을 알 수 있다. 즉, 심한 기울기를 갖는 고도난청을 갖는 난청자의 경우 배경 잡음 제거가 큰 도움을 줌을 볼 수

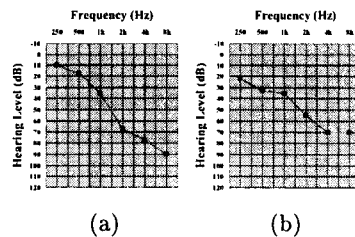


그림 6. 그룹 1 난청자의 청력도 (a) 대상 3, (b) 대상 8
Fig. 6. Audiogram of impaired listeners (group 1) (a) subject 3, (b) subject 8

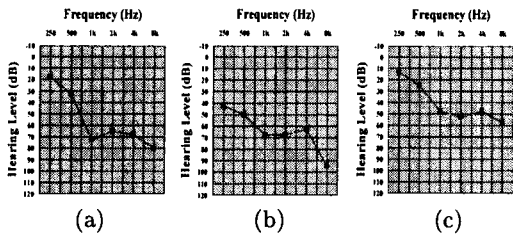


그림 7. 그룹 2 난청자의 청력도 (a) 대상 5, (b) 대상 6, (c) 대상 7

Fig. 7. Audiogram of impaired listeners (group 2) (a) subject 5, (b) subject 6, (c) subject 7

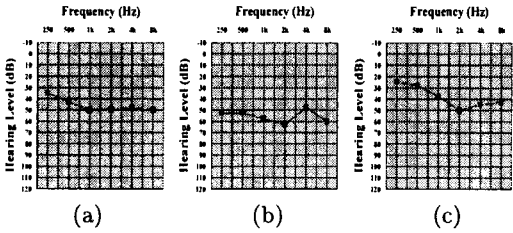


그림 8. 그룹 3 난청자의 청력도 (a) 대상 1, (b) 대상 2, (c) 대상 4

Fig. 8. Audiogram of impaired listeners (group 3) (a) subject 1, (b) subject 2, (c) subject 4

있다.

그림 7은 음질 향상 기법의 적용 유무에 따른 변화가 거의 없는 경우로, 대상 5, 6, 그리고 7의 난청자가 해당된다. 이들의 청력도를 보면 1 kHz 이하에서 약간의 기울기를 갖는 난청 현상으로 보이고, 1 kHz 이상에서 비교적 평평한 심한 난청이 있음을 볼 수 있다. 비록 어음 명료도 검사에서는 비슷한 점수를 얻었지만, 난청자들은 잡음이 있는 환경에서 듣는 것을 너무나 힘들어 했으며, 배경 잡음이 억제된 소리가 훨씬 편안하다는 반응을 보였다.

음질 향상 기법을 통한 배경 잡음 억제가 오히려 역효과를 보여준 대상 1, 2, 그리고 4 난청자의 청력도가 그림 8에 나타나 있다. 이들의 청력도를 보면 전 주파수 대역에 걸쳐 마치 전음성 난청과 같은 가정 역할을 갖음을 볼 수 있으나, 이들은 라우드니스 누가현상이 존재하는 감음 신경성 난청자들이었다.

위의 결과들로 미루어 볼 때, 주파수 대역에서 심한 기울기의 가정 역할을 갖는 난청자들의 경우나 저주파와 고주파의 난청 정도가 차이가 심하게 나는 난청자들의 경우 배경 잡음을 억제가 난청자들에게 도움을 줄 수 있음을 알 수 있다. 특히, 심한 기울기의 가정 역할을 갖는 난청자들의 어음 인지도에 큰 향상을 줄 수 있음을 볼 수 있고, 어음 명료도 자체의 상승 외에 거부감을 줄여 보다 나은 보청 환경을 제공할 수도 있음을 알 수 있다.

결론

본 논문에서는 디지털 신호 처리 기법을 이용하여 보다 향상된 보청 환경 조성을 위한 연구를 수행하였다. 정상인보다 난청자들에게 배경 잡음이 주는 영향이 심하다는 사

실에 바탕하여 보청 환경 상에서 배경 잡음의 제거 효과에 관한 실험을 행하였다. 음질 향상 기법을 난청자에게 적용하기 앞서, 정상인을 상대로한 선호도 조사를 수행하였으며 배경 잡음 제거 기법을 정상인에 적용한 경우의 어음 명료도 검사를 행하였다. 그 결과를 바탕으로 선정된 음질 향상 기법을 난청자들에게 적용시켜 난청자에게 큰 도움이 될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. A. M. Engebretson, "Benefits of Digital Hearing Aid," *IEEE Eng. in Medicine and Biology Magazine*, vol.31, No.2, pp.238-248, 1994.
2. N. Dillier, T. Frölich, M. Kompis, H. Bögli, and W. K. Lai "Digital Signal Processing(DSP) Applications for Multiband Loudness Correction Digital Hearing Aids and Cochlear Implants," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol.30, No.1, pp.95-109, 1993.
3. B. Hagerman, "Clinical Measurements of Speech Reception Threshold in Noise," *Technical Audiology*, No.107, p.13, 1983.
4. E. Villchur, "Signal Processing to Improve Speech Intelligibility in Perceptive Deafness," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.53, pp.1646-1657, Jun. 1973.
5. H. Sheikzadech, H. Sameti, L. Deng, and R. L. Brennan, "Comparative Performance of Spectral Subtraction and HMM-Based Speech Enhancement Strategies with Application to Hearing Aid Design," *Proc. IEEE ICASSP*, pp.113-116, 1994.
6. C. I. Berlin, *Hair Cells and Hearing Aids*, Singular Publishing Group, 1996.
7. S. F. Boll, "Suppression of Acoustic Noise in Speech Using Spectral Subtraction," *IEEE Trans. on Acoust., Speech, and Signal Processing*, vol.27, No.2, pp.113-120, 1979.
8. J. S. Lim and A. V. Oppenheim, "Enhancement and Bandwidth Compression of Noisy Speech," *Proc. of the IEEE*, vol.67, No.12, pp.1586-1604, 1979.
9. R. J. McAulay and M. L. Malpass, "Speech Enhancement Using a Soft-Decision Noise Suppression Filter," *IEEE Trans. on Acoust., Speech, and Signal Processing*, vol.28, No.2, pp.137-145, 1980.
10. L. R. Rabiner and M. R. Sambur, "An Algorithm for Determining the Endpoints of Isolated Utterances," *The Bell System Technical Journal*, vol.54, No.2, pp.297-315, Feb. 1975.