

## 독립성분분석을 이용한 디지털 보청기용 적응형 궤환 제거\*

Adaptive Feedback Cancellation Using by Independent Component Analysis  
for Digital Hearing Aid

지 윤 상\*\* · 이 상 민\*\*\* · 정 세 영\*\* · 김 인 영\*\* · 김 선 일\*\*

Yoon Sang Ji · Sangmin Lee · Sae Young Jung · In Young Kim · Sun I. Kim

### ABSTRACT

Acoustic feedback between microphone and receiver can be effectively cancelled adaptive feedback cancellation algorithm. Although many speech sounds have non-Gaussian distribution, most algorithms were tested with speech like sounds whose distribution were Gaussian type. In this paper, we proposed an adaptive feedback cancellation algorithm based on independent component analysis (ICA) for digital hearing aid. The algorithm was tested with not only Gaussian distribution but also Laplacian distribution. We verified that the proposed algorithm has better acoustic feedback cancelling performance than conventional normalized root mean square (NLMS) algorithm, especially speech like sounds with Laplacian distribution.

**Keywords:** Adaptive feedback cancellation, hearing aid, ICA

### 1. 서 론

청력의 손실은 청각기관에서 발생된 중이염(otitis media)을 비롯한 각종 질환이나 소음이 발생되는 환경에 오랜 시간 노출된 경우나 고령화로 인하여 발생하게 된다. 청력손실이 발생되면 일반적으로 청력 손실을 보상시킬 수 있는 보청기를 착용하게 된다. 난청자는 보청기 착용에 앞서 청력 검사를 통해 청력손실 정도를 판별하고 그에 적합한 보청기를 사용하게 된다. 일반적으로 보청기는 입력신호의 각 주파수 채널에 따른 WDRC(wide dynamic range compression)의 과정을 거쳐서 난청인의 좁아진 청력범위를 정상인의 청력범위에 가깝게 보상해 준다. 이때 보청기는 고증폭 기능이 필요한데 이에 동반되는 문제 중 하나는 하울링(howling)이라 불리는 음향 궤환(acoustic feedback)이다. 음향 궤환은 보청기 리시버의 음향 출력 신호가 마이크로폰으로 다시 입력되어 다시 증폭됨으로써 발생되므로 리시버를 통해 최종 출력되는 신호는 입력의 음성신호에 궤환신호가 포함된 신

\* 본 연구는 보건복지부 보건의료기술 진흥사업의 지원에 의하여 이루어졌음(고유번호 : 02-PJ3-PG6-EV10-0001).

\*\* 한양대학교 의공학교실

\*\*\* 전북대학교 생체정보공학부

호이다. 이 제한신호는 난청인들에게 심한 불편감을 일으킬 뿐 아니라 보청기의 최대 사용 이득(maximum usable gain)을 제한하여 보청기의 전체적인 성능을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. 음향 제한을 제거함으로써 보청기의 최대 이득을 높여 주는 것이 청력 손실이 심한 고도 난청인에게는 매우 중요한 관건이 된다[1][2].

음향 제한 제거 방법에는 적응 필터의 계수 적응 방식에 따라 불연속 필터 계수 적응 방법과 연속 필터 계수 적응 방법으로 나눌 수 있다. 불연속 필터 계수 적응 방법은 Kates, Maxwell과 Zurek 등에 의해 제안되었고 입력 음향 신호의 경로를 차단시키고 음향 신호 대신에 잡음 발생기를 통해 잡음 신호를 인가하면서 적응 필터 계수를 갱신하는 방법이다. 잡음 신호의 인가 방법은 제한이 발생했을 경우에만 인가하거나 제한이 발생하지 않은 경우라도 일정 시간 간격에 따라 주기적으로 인가하는 방법으로 나눌 수 있다. 일반적으로 잡음 신호는 백색 잡음을 사용하는데 이 백색 잡음으로 인하여 신호대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)가 낮아지는 경향이 있다. 그러므로 이 방법은 잡음의 영향을 상대적으로 덜 받는 고도 난청자에게 효과적이다[1]. 이에 반해 Bustamante, Estermann과 Kaelin 등에 의해 제안된 연속 필터계수 적응 방법은 난청인에게 입력 음향 신호를 증폭하여 전달함과 동시에 연속적으로 적응 필터 계수를 갱신하는 방법으로서[3] 잡음을 인가하지 않고도 제한 제거가 가능하며, 입력신호의 레벨이 낮거나 피드백이 검출되는 경우에 대해서만 필터 계수의 갱신을 제한하지 않고 입력신호에 따라서 필터계수를 연속적으로 적응시킨다[1]. 최근 필터 계수를 연속적으로 갱신시키기 위해서는 평균자승오차(Mean Square Error, MSE)를 최소로 하는 최소평균제곱을 기반으로 한 알고리즘이 적용되었다. 그러나 이 방법에서 발생하는 문제점은 디지털 보청기 시스템의 입력 신호와 출력 신호가 가지는 상관성(correlation)을 완벽하게 제거하지 못한다는 것이다.

본 연구에서는 독립성분분석(independent component analysis, ICA) 기법을 이용한 적응 필터를 구현하여 기존의 NLMS(Normalized Least Mean Square)만을 적용한 적응필터 제한 제거법[4]과 비교하였다. 독립성분분석기법은 관측된 신호들이 알 수 없는 혼합기를 통과한 경우 측정된 혼합 신호로부터 고유신호에 대한 정보없이 신호들간의 독립성을 이용하여 각각 분리해 내는 기법이다[5]. 독립성분분석 기법은 이때 고유의 입력 신호들간의 분리를 위해 고차 통계 기법이 사용되어 기존의 NLMS와 같이 이차통계 기법을 기반으로 한 알고리즘보다 복잡한 계산을 하지만 성능이 뛰어나다.

## 2. 제안된 알고리즘

독립성분분석(independent component analysis, ICA) 기법을 이용한 고유신호의 분리는 4 차 cumulant에 의해 주어지는 kurtosis를 이용하여 non-Gaussianity를 최대로 하여 구하는 방법과 비선형 함수 출력들 간의 상호간 정보를 최소로 하는 방법이 있다[6-8]. 본 논문에서는 고유 신호의 CDF(cumulant density function)를 나타내는 비선형 함수를 이용하여 고유 신호 전체를 얻어내는 방법을 이용하였다. 적응 제한 제거 방법은 널리 사용되는 NLMS 알고리즘을 이용한 적응 필터를 사용하였다. <그림 1>에 제안된 제한 제거기의 블록도를 나타내었다.

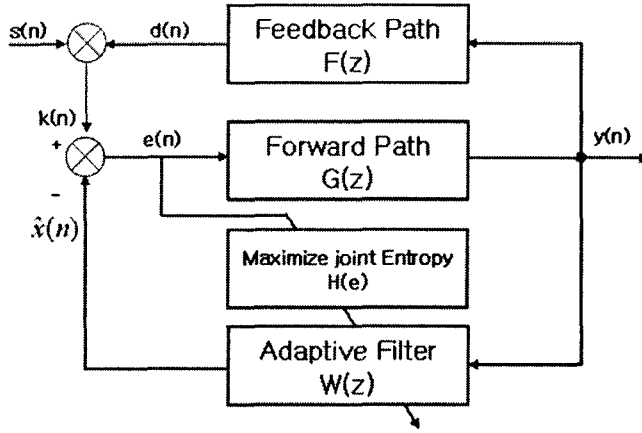


그림 1. ICA 알고리즘을 기반으로 왜환신호 제거기

알고리즘에 사용된 적응 필터는 32 탭이며 식 (1)과 같은 NLMS의 필터 계수 갱신에 의해 왜환 신호 제거가 이루어진다.

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu}{\|y(n)\| + \delta} e(n)y(n) \quad (1)$$

$$y(n) = w(n) * z(n) \quad (2)$$

$$e(n) = s(n) - y(n) \quad (3)$$

여기서  $\mu$ 는 수렴변수이다.  $\delta$ 는  $y(n)$ 이 0이 되어 수식이 불안정하게 되는 것을 막기 위해 아주 작은 양(positive)의 값으로 고정한다. 식 (2)의  $y(n)$ 은 기준 입력 신호 벡터이고 보청기 출력  $z(n)$ 과 적응 필터 계수  $w(n)$ 과의 적응 필터링된 값으로 나타낼 수 있다. 식 (3)은 왜환 경로에서의 출력과 적응필터에서의 출력의 차이를 에러함수로 나타낸다. 이러한 적응필터의 기능을 평가하는 방법 중 하나가 misalignment를 계산하는 것이다. Misalignment는 왜환 경로의 특성을 적응 필터가 얼마나 추적해 나가느냐를 나타내는 지표이다. 필터 계수의 misalignment 계산은 아래의 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다. 즉,  $\epsilon(n)$ 의 값이 0에 가까우면 왜환 경로의 특성에 적응필터가 일치하여 왜환 성분을 잘 추출한다는 의미가 된다.

$$\epsilon(n) = \frac{\|h - w(n)\|}{\|h\|} \quad (4)$$

여기서,  $h$ 는 왜환 경로의 계수 벡터,  $w(n)$ 은 시스템에서의 적응 필터의 계수,  $\|\cdot\|$ 는 벡터의 놈(norm)을 나타낸다. 이런 적응필터에 독립성분분석 기법을 적용하기 위해서 입력신호  $s(n)$ 과 출력신호  $y(n)$ 의 CDF를 근사화한 비선형 신호를  $e_1, e_2$ 라 하고, 두 신호 사이의 joint entropy는 식 (5)와 같이 각신호의 entropy의 합과 두 신호가 상호 정보의 차와 같다.

$$H(e_1, e_2) = H(e_1) + H(e_2) - I(e_1, e_2) \quad (5)$$

식 (5)에서  $e_1$ 과  $e_2$ 의 상호 정보인  $I(e_1, e_2)$ 를 최소로 만들어 준다면 신호  $e_1$ 과  $e_2$ 는 서로 독립이며 각각의 entropy  $H(e_1)$ ,  $H(e_2)$ 는 최대가 됨을 알 수 있다. 출력신호 entropy를 최대화하기 위해 식 (6)와 같이 비선형 함수를 통과한 출력의 entropy를 정의한다.

$$H(e) = - \sum_y f_e(e) \log f_e(e) = - E[\log f_e(e)] \quad (6)$$

여기서  $f_e(e)$ 는  $e$ 의 PMF(probability mass function)이며  $E$ 는 expectation을 나타낸다. 입력신호  $s(n)$ 과 출력신호  $y(n)$ 의 CDF를 근사화 하는 비선형 함수를 통과한 출력값은 식 (7), (8)과 같다.

$$e_1(n) = g(s(n)) \quad (7)$$

$$e_2(n) = g(y(n)) \quad (8)$$

여기서  $g(\cdot)$ 는 원 신호의 cdf를 근사화는 비선형 함수이다. 식 (9)와 같이 관측된 신호를  $x$ 라 하고 unmixing matrix를  $W$ 라 하고 시스템 출력을  $u$ 라고하면 관측된 신호와 비선형 함수를 통과한 신호  $e$ 간의 임의의 mapping에 의해서도 각 신호의 확률은 변하지 않으므로 식 (10)과 같이 출력의 PDF를 입력의 PDF로 나타낸다.

$$e = g(u), u = Wx \quad (9)$$

$$f_e(e) = \frac{f_x(x)}{|J|} \quad (10)$$

여기서  $|J|$ 는 관측신호  $x$ 에서  $e$ 로의 mapping을 위한 Jacobian determinant식이다. Jacobian determinant식은 식(11)과 같다.

$$|J| = \frac{\partial e_1}{\partial k} \frac{\partial e_2}{\partial s} - \frac{\partial e_1}{\partial s} \frac{\partial e_2}{\partial k} \quad (11)$$

출력  $e=[e_1(n);e_2(n)]$ 의 entropy를 최대로 하는 독립성분분석 알고리즘을 위해서 식 (10)을 식 (6)에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} H(e) &= - E[\log f_e(e)] = - E[\log (f_x(I)/|J|)] \\ &= E[\log |J|] + H(I) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $f_e(e) = f(I)/|J|$ 이고,  $I = [k, s]^T$ 이다.  $I$ 는 parameter  $w$ 에 영향을 받지 않기 때문에 식 (12)의  $E[\log|J|]$ 을 최대화 함으로써 비선형 함수의 출력에 대한 entropy를 최대화 할 수 있다. 그러므로 퀘환 신호 제거에 통계적 그레디언트 증가 기법을 적용하여 제거할 수 있다.

$$\Delta w = \frac{\partial}{\partial w} E[\log|J|] \quad (13)$$

식 (13)는 Jacobian으로 표현된 출력된 신호간 정보량을 최대가 되는 방향으로 적응필터의 계수를 갱신함을 의미하고 식 (14)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \Delta w &\propto \frac{\partial}{\partial w} \log|J| = \frac{\partial}{\partial w} \log f(u(n)) \\ &= \left( \frac{\partial e_1(n)}{\partial u(n)} \right)^{-1} \frac{\partial}{\partial w} \left( \frac{\partial e_1(n)}{\partial u(n)} \right) \\ &= \phi(u(n))x(t-n) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $f(u(n)) = \frac{\partial e_1(n)}{\partial u(n)}$  이고, score function  $\phi(u[k])$ 는 식 (15)와 같다.

$$\phi(u(n)) = - \left( \frac{\partial e_1}{\partial u} \right)^{-1} \frac{\partial^2 e_1}{\partial u^2} \approx - \frac{p'_k(u)}{p_k(u)} \quad (15)$$

Score function에서  $p_k(u)$ 는 supergaussian 분포를 갖는 신호에 대해서 식 (16)와 같이 Laplacian 분포의 pdf를 근사함수로 하는  $\text{sign}(\cdot)$ 을 사용하였다.

$$p_k(n) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_k^2} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|n|}{\sigma_k}\right) \quad (16)$$

퀘환신호 제거를 위해서 식(1)에 독립성분분석 알고리즘을 적용하면 식 (17)과 같은 적응필터 계수 갱신식을 얻을 수 있다.

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu}{\|y(n)\| + \delta} \phi(u(n))e(n)y(n) \quad (17)$$

식 (17)과 같이 독립성분분석을 기반으로 한 알고리즘은 퀘환신호가 가능한 독립이 되도록 하여 적응필터를 이용 출력신호에서 퀘환신호를 제거하도록 해준다. 입력신호가 non-Gaussian 분포를 가진다면 제안된 알고리즘은 기존의 NLMS알고리즘에 비해 더욱 효과적인 퀘환신호 제거 성능을 보일 것이다.

### 3. 실험 방법

본 논문에서 케환 발생 경로  $F(z)$ 에 대한 모델링은 Steiglitz-McBride[1]에 바탕을 두었다. 실험에 사용한 케환 경로의 임펄스 응답은 <그림 2>와 같다. <그림 2>에서 가로축은 샘플수를 나타내고, 세로축은 정규화된 음압 신호를 나타낸다.

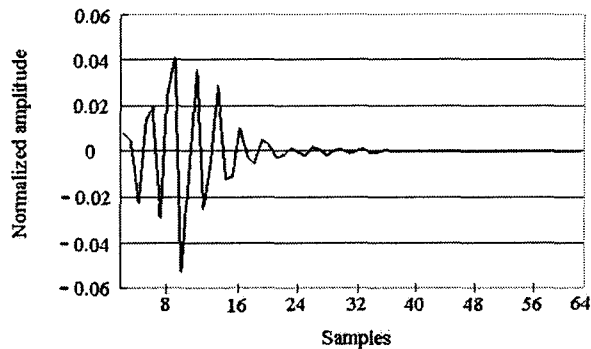


그림 2. 케환 경로의 임펄스 응답

실험에 사용한 음성 데이터는 음성신호의 스펙트럼과 유사한 랜덤 잡음을 16 차 AR 필터를 통과한 신호와 16 비트 분해능과 16 kHz 표본화율로 녹음된 “안녕하세요 한양대학교 의공학교실입니다.”라는 내용의 한국어 음성이다. 또한 입력 음성 신호의 레벨을 측정하기 위해 소음측정기 (CESVA SC-30, sound level meter)를 사용했다. 실험에 사용된 정상인과 난청인의 청력 데이터는 <그림 3>과 같다. 가로축은 주파수축을 의미하며 세로축은 청력범위를 나타낸다. 본 논문에서는 불쾌역치(uncomfortable level)를 100 [dB SPL]로 설정하였다.

제안된 알고리즘을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 알고리즘의 유용성을 평가하였고 실시간 동작의 구현은 <그림 4>에 나타낸 것처럼 TI사의 범용 프로세서인 TMS320C6711DSP가 내장된 DSK(DSP Starter Kit)를 이용하였다.

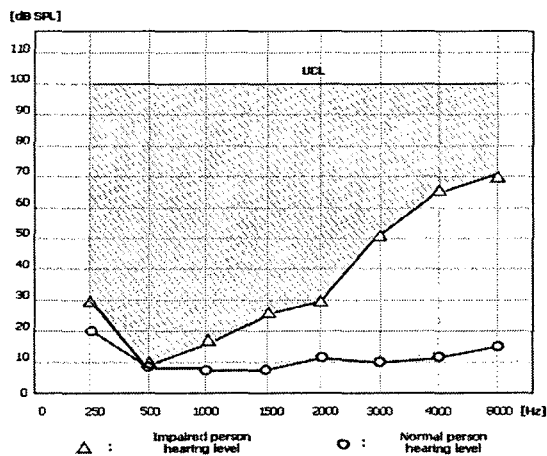


그림 3. 정상인과 난청인의 가청범위

실시간 구현에 사용된 장비는 보청기용 마이크로폰(EM3345, Knowles사), 스피커, TMS320C6711 DSK 보드, 도터카드(daughter card)이다. 도터카드는 스테레오 오디오 코덱 칩인 PCM3003을 사용하여 16 KHz의 AD/DA가 가능한 TI사의 TMDX326040A를 사용하였다. <그림 4>와 같이 입력 신호가 마이크로폰을 통해서 도터 카드의 입력단자로 들어오면 PCM3003 코덱의 아날로그-디지털 변환부(ADC)에서 16 KHz로 표본화된다. ADC에서 표본화 된 데이터는 MCBSP(multi channel buffered serial port)를 통해서 DSP프로세서 내부 메모리인 EDMA(enhanced direct memory access)에 저장된다. EDMA에서는 double buffering이라는 방법으로 CPU 스케줄링을 통한 빠른 연산 작업이 가능하여 본 논문에서 제안한 알고리즘의 실시간 구현이 가능하였다. Double buffering을 통한 알고리즘 연산 과정을 거친 후 다시 EDMA에서 MCBSP를 통해 데이터를 전송하고, 전송된 데이터는 PCM3003 코덱의 디지털-아날로그 변환부(DAC)를 통해 아날로그 신호로 바뀌고 그 신호는 스피커를 통해 출력된다.

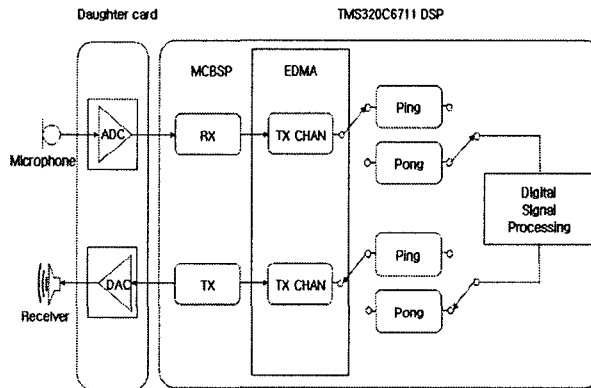


그림 4. 메인보드와 도터카드의 연결 및 신호처리 블록도

#### 4. 실험 결과

Misalignment는 궤환 경로를 적응 필터가 얼마나 일치하면서 궤환 성분을 없애는가를 나타내는 지표이다. 즉, misalignment의 수치가 낮을수록 적응 필터가 궤환 성분을 많이 제거한다는 것을 의미한다. Misalignment를 계산하는 것은 앞서 언급한 Gaussian분포를 가진 입력신호와 non-Gaussian분포를 가진 신호가 NLMS알고리즘과 ICA를 적용한 적응필터 중 어떤 알고리즘이 더 궤환신호를 효율적으로 제거하는지를 평가하기 위함이다. <그림 5>는 Gaussian분포를 갖는 입력신호에 대한 NLMS와 ICA를 적용한 적응필터의 궤환신호 제거에 대한 misalingment를 측정된 결과이다. 세로축은 misalingment 정도를 나타내는 지수이며 가로축은 알고리즘이 실행된 루프횟수이다.

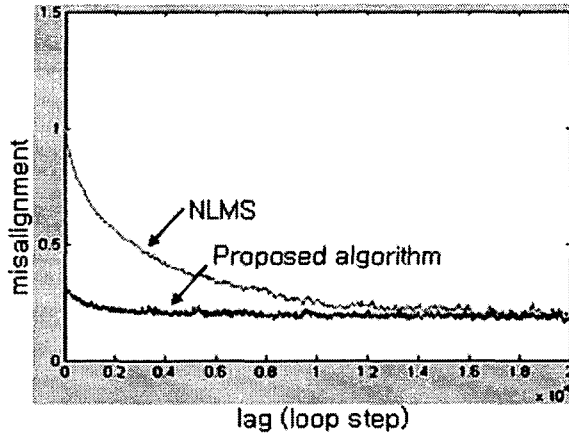


그림 5. Gaussian분포 신호의 웨한제거 misalignment

<그림 6>은 non-Gaussian분포를 갖는 입력신호에 대한 NLMS와 ICA를 적용한 적응필터의 웨한제거에 대한 misalignment를 측정한 것이다.

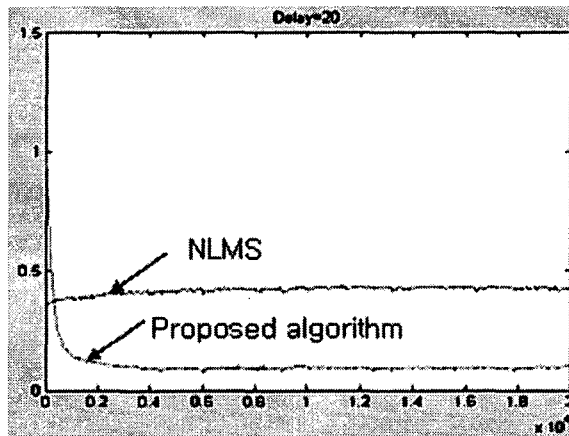


그림 6. non-Gaussian분포 신호의 웨한제거 misalignment

<표 1>은 위의 Gaussian분포 신호와 non-Gaussian분포 신호의 NLMS, ICA적용 적응필터의 웨한신호 제거에 대한 misalignment값과 수렴속도를 비교한 것이다.

표 1. 웨한제거 misalignment와 수렴 속도

		NLMS	ICA
Gaussian 신호	Misalignment	0.29	0.21
	수렴 loop step	1.75	0.17
non-Gaussian신호	Misalignment	0.47	0.18
	수렴 loop step	0.31	0.08



<표 1>을 보면 NLMS 알고리즘의 경우 입력신호가 Gaussian일 경우 misalignment가 0.29 수렴 속도가 1.75 [loop step]이며, non-Gaussian일 경우 misalignment는 0.47 수렴속도는 0.31 [loop step]로 실제 음성 신호와 같은 분포를 보이는 non-Gaussian신호에 대해서 성능이 저하되는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 제안된 ICA를 이용한 궤환 적응 필터의 경우 misalignment가 Gaussian신호에 비해 non-Gaussian신호가 0.03의 향상과 0.09의 수렴속도가 향상된 것을 확인 할 수 있다. 이는 제안된 알고리즘이 실제 음성신호의 분포를 갖는 non-Gaussian신호에 대해서 효과적으로 궤환 신호를 제거됨을 알 수 있었다.

<그림 7>은 문장에 대하여 각 알고리즘을 비교 평가한 결과이다. <그림 7>의 (a)는 실제 음성 파형에 대한 입력 신호를 나타내며 (b)는 궤환 성분이 생겼을 때 파형이며 (c)는 NLMS에 의해 궤환 성분을 제거한 파형이며 (d)는 ICA를 이용한 알고리즘에 의해 궤환 성분을 제거한 파형을 나타낸다.

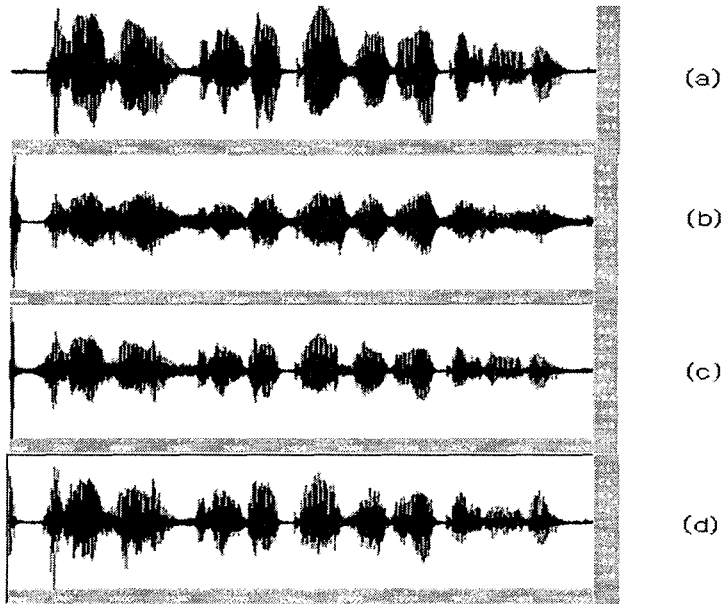


그림 7. 궤환 제거의 시간 영역 분석

<그림 8>은 각 알고리즘이 동작하는 결과를 주파수 영역에서 확인한 결과이다. <그림 8>의 (a)는 궤환신호를 NLMS알고리즘으로 제거하여 주파수 영역에서 분석한 그림이고, (b)는 ICA를 이용하여 제거하여 주파수 영역에서 분석한 그림이다. <그림 8>에서 보는 바와 같이 3300Hz~5500Hz사이의 신호를 보면 NLMS알고리즘에 비해 ICA를 적용한 알고리즘이 궤환신호를 효과적으로 제거하고 있음을 확인할 수 있다. 수치적 자료만으로 볼 때는 본 논문의 알고리즘이 수렴속도나 misalignment면에서 우수한 성능을 발휘하나 실험 환경이나 방법의 차이가 있으므로 수치적 성능 비교만으로 본 연구의 알고리즘의 우수성을 결론 내리기는 무리가 될 수 있다. 하지만 본 논문에서 제안한 알고리즘이 우수한 성능을 보였으며, 보청기에 실제 적용 했을 경우도 좋은 성능을 보일 수 있는 가능성을 제시한 것에 의의를 두고자 한다.

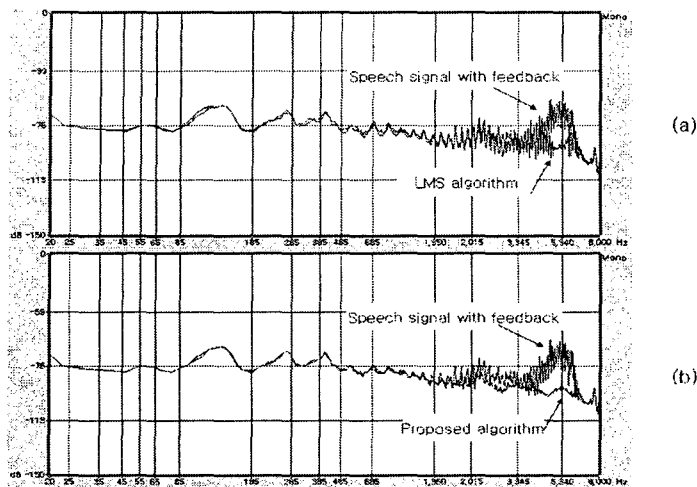


그림 8. 궤환 제거의 주파수 영역 분석 (a) NLMS 알고리즘, (b) ICA 적용한 알고리즘

## 5. 결론 및 고찰

디지털 보청기의 등장으로 아날로그 보청기에 비해 난청인의 청력에 맞는 효과적인 보청기 적합(fitting)이 가능해졌고, 디지털 신호처리 이론을 바탕으로 보청기 착용 시 발생할 수 있는 궤환 신호의 제거나 잡음 성분 제거와 같은 복잡한 알고리즘 개발이 가능하게 되었다. 본 논문에서는 고증폭으로 인한 발생하는 궤환 신호를 억제하기 위하여 기존의 NLMS 알고리즘에 ICA를 적용한 적응 필터 이론을 제안하여 궤환 신호를 제거 실험을 하였다. 적응 궤환 제거 알고리즘은 Gaussian 분포를 띄는 입력 신호와 실제 음성파형과 같은 non-Gaussian 분포를 갖는 입력 신호를 사용하여 기존의 NLMS 알고리즘과 제안한 알고리즘을 비교 평가하였다. 제안된 적응 궤환 제거 알고리즘의 결과를 NLMS 알고리즘에 의한 궤환 제거 결과와 비교하였을 때 향상된 결과를 확인할 수 있었다. 또한 제안된 보청기 알고리즘은 32 비트 부동소수점 DSP인 TMS320C6711을 사용하여 실시간 구현하여 실시간 환경에서의 알고리즘 성능을 측정하였다.

## 참고 문헌

- [1] Siqueira, M. G. & Alwan, A. 2000. "Steady-State Analysis of Continuous Adaptation in Acoustic Feedback Reduction Systems for Hearing-Aids." IEEE Trans. Speech Audio Processing, Vol. 8, No. 4.
- [2] Siqueira, M. G., Speece, R., Petsalis, E., Alwan, A., Soli S., & Gao, S. 1996. "Subband Adaptive Filtering Applied to Acoustic Feedback Reduction in Hearing Aids." Signals. Systems and Computers, 1996 Conference Record of the Thirtieth Asilomar Conference on, Vol. 1, 3-6.
- [3] dyrlund, O., & Bisgaard, N. 1991. "Acoustic feedback part III : Clinical testing of a DFS

- prototype." *Hearing Instrum.*, Vol. 42, No. 12, pp. 17-18.
- [4] Dyrland, O., & Bisgaard, N. 1991. 'Acoustic feedback part.' *Hearing Instrum.*, Vol. 42, No. 12, pp. 17-18.
- [5] Park, H. M., Oh, S. H. & Lee, S. Y. 2002. "Adaptive noise canceling based on independent component analysis." *Electronics Letters*, Vol. 38, No. 15, pp. 832-833.
- [6] Haykin, B. Jr., Glover, H. R., McCool, H. M., Kaunitz, J., Williams, C. S., Hear, R. H., Zeidler, J. R., Dong, Jr. E. and Goodilin, R. C. 1975. "Adaptive noise canceling: principles and applications." *Proc. IEEE*, Vol. 63, No. 12, pp. 1672-1716.
- [7] Walach, E., & Widrow, B. 1984. "The least mean fourth (LMF) adaptive algorithm and its family." *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. IT-30, No. 2, pp. 275-283.
- [8] Douglas, S. C., Meng, T. H. Y. 1994. "Stochastic gradient adaptation under general error criteria." *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 42, pp. 1335-1351.

접수일자: 2005. 05. 26

게재결정: 2005. 08. 30

▲ 지윤상

서울시 성동구 행당동 17 (우: 133-795)  
 한양대학교 의과대학 의공학교실  
 Tel: +82-2-2220-0698 Fax: +82-2-2296-5943  
 E-mail: mecanv@bme.hanyang.ac.kr

▲ 이상민

전라북도 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14 (우: 561-756)  
 전북대학교 공과대학 생체정보공학부  
 Tel: +82-63-270-4060 Fax: +82-63-270-2247  
 E-mail: sanglee@chonbuk.ac.kr

▲ 정세영

서울시 성동구 행당동 17 (우: 133-795)  
 한양대학교 의과대학 의공학교실  
 Tel: +82-2-2220-0698 Fax: +82-2-2296-5943  
 E-mail: seeked@bme.hanyang.ac.kr

▲ 김인영

서울시 성동구 행당동 17 (우: 133-795)  
 한양대학교 의과대학 의공학교실  
 Tel: +82-2-2291-1713 Fax: +82-2-2296-5943  
 E-mail: iykim@bme.hanyang.ac.kr

▲ 김선일

서울시 성동구 행당동 17 (우: 133-795)  
 한양대학교 의과대학 의공학교실  
 Tel: +82-2-2291-1713 Fax: +82-2-2296-5943  
 E-mail: sunkim@bme.hanyang.ac.kr