

# 독립성분분석을 이용한 음향 반향 제거

## Acoustic Echo Cancellation Using Independent Component Analysis

김대성\*, 배현덕\*\*  
(Dae-Sung Kim\*, Hyun-Deok Bae\*\*)

\* 충청대학교 전자과, \*\* 충북대학교 공과대학 전자공학과

(접수일자: 2002년 11월 13일; 수정일자: 2003년 5월 27일; 채택일자: 2003년 6월 4일)

본 논문에서는 독립성분분석을 이용한 음향 반향제거 방법을 제안하였다. 음향반향제거기의 마이크로폰에 반향 이외의 잡음이 부가될 경우 반향제거기의 성능은 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 두 개의 마이크로폰을 이용하여 반향과 선형으로 섞인 잡음을 받은 후 독립성분 분석 기법을 통해 반향과 잡음을 분리하였다. 그리고 분리된 반향 신호를 반향제거기에 사용되는 적응 알고리즘의 기준 신호로 이용함으로써 반향제거기의 성능을 향상시켰다. 컴퓨터 모의실험을 통해 제안한 방법의 타당성을 확인하였다.

**핵심용어:** 음향 반향제거, 독립성분 분석, 적응 필터, 적응 알고리즘

**부고분야:** 음향 신호처리 분야 (1.4)

In this paper, we proposed a method for acoustic echo cancellation based on independent component analysis. When the large acoustic noise is picked up by the microphone, the performance of echo cancellation decreased. We used two microphones that received echo signal which is linearly mixed with the noise, then separated the echo signals from the received signals with independent component analysis algorithm. The separated echo signal is used for the reference signal of adaptive algorithm, which leads to better performance of the echo cancellation. Computer simulation results show the validity of the proposed method.

**Keywords:** Acoustic echo cancellation, Independent component analysis, Adaptive filter, Adaptive algorithm

**ASK subject classification:** Acoustic signal processing (1.4)

### I. 서론

음향 신호처리 분야에서 적응 알고리즘을 이용하여 음향반향을 제거하는 연구는 지속적인 관심의 대상이 되어 왔다[1,2]. 또 근래에 들어서는 이동전화기가 널리 보급되면서 더욱더 반향제거에 대한 연구가 의미를 가지게 되었다. 그런데 차량 내부에서 이동전화를 사용할 경우를 고려해 보면, 송화기(근단화자의 마이크로폰)로 유입되는 신호는 반향뿐만 아니라 다른 종류의 배경잡음(자동차 소음 혹은 다른 사람의 목소리)이 부가될 수 있다[...]. 이것은 실내에서 반향제거를 할 경우와는 다른 조건이 되며 반향 이외의 잡음으로 인해 반향제거기의 성능은 저하된다. 따라서 차량 내부와 같이 반향 이외의

신호가 송화기로 유입될 경우 반향제거기의 성능을 향상시키는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 반향 이외의 배경잡음이 근단화자의 마이크로폰에 유입될 때 반향제거기의 성능을 높이는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 정규최소평균자승(NLMS: Normalized Least Mean Square) 알고리즘과 독립성분 분석(ICA: Independent Component Analysis)을 이용하여 반향제거기의 성능을 높이는 시도이다. 정규최소평균자승 알고리즘은 적응반향제거기의 계수 갱신에 이용되며, 독립성분 분석 기법은 마이크로폰에 유입되는 신호에서 반향과 배경잡음을 분리하게 된다. 이렇게 분리된 반향은 적응 알고리즘의 기준 신호로 사용되어 적응반향제거 성능을 향상시키게 된다. 여기서 독립성분분석 알고리즘을 사용함에 있어서는 반향과 배경잡음은 선형 결합으로 섞여 있다고 가정하며 이를 분리하기 위해서는 추가로 마이크로폰이 설치된 것으로 가정한다. 제안한

책임저자: 김대성 (dskim@ok.ac.kr)  
313-792 충북 청원군 강내면 월곡리 330  
충청대학교 전자과  
(전화: 043-230-2275; 팩스: 043-230-2279)

방법을 통해 반향과 배경잡음이 동시에 마이크로폰에 유입될 때 적응반향제거기에 배경잡음이 유입되는 것을 최소화 하여 반향제거기의 성능을 향상시킬 수 있는 것을 컴퓨터 모의실험을 통해 확인하였다.

이 논문의 구성은 2장에서 간단하게 기존의 음향반향 제거 모델과 정규최소평균자승 알고리즘을 알아보고 3장에서 독립성분분석 알고리즘을 이용한 음향 반향제거 방법에 대해 알아보았다. 그리고 4장에서 컴퓨터 모의실험을 수행하였으며 5장에서 결론을 맺었다. 이 논문에서 굵은 로마자 대문자는 행렬이며 굵은 로마자 소문자는 열벡터 (column vector)를 의미한다.

## II. 적응반향제거기

이 연구에서는 기존의 방법으로서 그림 1과 같은 음향

반향 제거 모델을 고려하였다. 그림 1에서  $n$ 은 이산 시간 지수 (time index)이며  $x[n]$ 은 입력 신호이다. 그리고  $d[n]$ 은 배경잡음  $n[n]$ 과 반향신호  $z[n]$ 이 더해진 신호다. 아울러  $h[n]$ 은 적응 필터이며 반향 경로의 임펄스 응답은  $\hat{h}[n]$ 이다. 일반적으로 차량 내부에서 반향이 발생할 경우 반향 경로의 임펄스 응답은 그림 2와 같다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 반향 경로의 임펄스 응답은 급격한 감쇠를 갖게 된다[1].

그림 1과 같은 모델에서 반향제거기는 배경잡음  $n[n]$ 이 없을 때, 반향 신호를 적응 필터의 기준신호로 사용하여 반향을 제거하게 된다[3]. 그러나 그림 1처럼 마이크로 들어가는 신호가 반향 신호와 배경잡음이 더해진 경우에는 반향제거기가 반향만을 제거하지 못하게 되어 반향제거 성능이 저하된다. 따라서 반향과 배경잡음을 분리한 후 반향만을 적응 필터의 기준 신호 (desired signal)로 사용하면 반향제거기의 성능을 향상시킬 수 있다. 그러

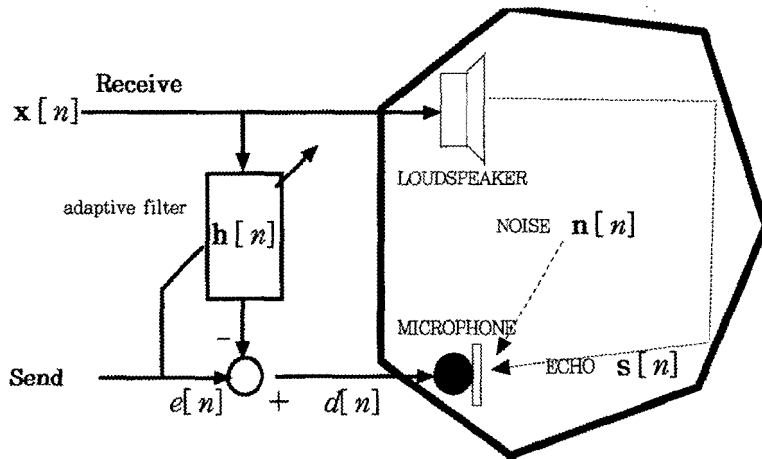


그림 1. 음향반향제거기 모델  
Fig. 1. Acoustic echo cancellation model.

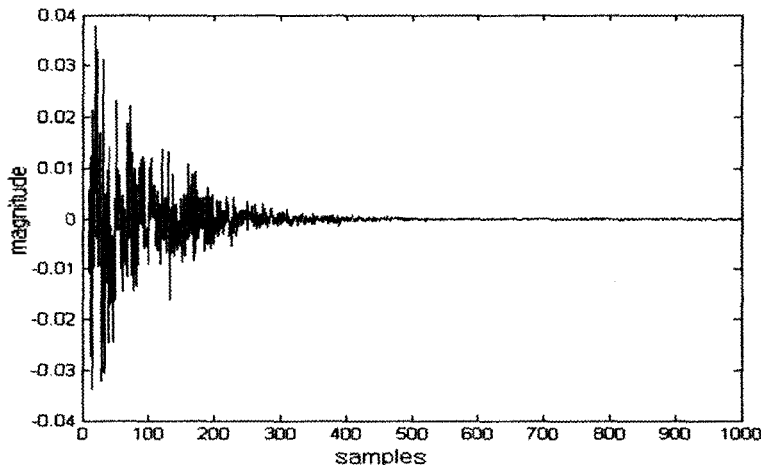


그림 2. 반향 경로의 임펄스 응답  
Fig. 2. Impulse response of echo path.

므로 반향과 배경잡음을 분리하기 위한 기법을 도입할 필요가 있다.

그림 1과 같은 반향제거기에서 적응 필터의 계수를 갱신하는 적응알고리즘으로서 최소평균자승 알고리즘[6]이나 뉴턴/최소평균자승 알고리즘[1], 혹은 부밴드 최소평균자승 알고리즘[2] 등을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 식 (1)과 같은 계수 갱신식을 갖는 정규최소평균자승 알고리즘을 사용하였다.

$$\mathbf{h}[n+1] = \mathbf{h}[n] + \frac{\mu}{\|\mathbf{x}[n]\|^2} \mathbf{x}[n]e[n] \quad (1)$$

식 (1)에서  $\mu$ 는 스텝사이즈 (step size)이다. 정규최소평균자승 알고리즘은 적은 연산량에 비해 우수한 성능을 보여서 시스템 식별, 반향제거기 등에 널리 사용된다[3].

### III. 독립성분 분석을 이용한 제안한 방법

이 장에서는 그림 1과 같은 반향제거기 대신 이 연구에서 제안한 그림 3과 같은 반향제거기 모델을 고려한다.

그림 3의 모델에서는 반향과 잡음이 동시에 존재한다. 따라서 이렇게 반향과 잡음이 동시에 존재하는 상황에서 그림 1과 같이 하나의 마이크를 이용하면 단일 마이크에 반향과 잡음이 동시에 유입되므로 반향제거기의 성능은 저하된다. 그러므로 이러한 문제를 해소하기 위해서 그림 3의 모델에서는 두 개의 마이크를 사용하였다. 두 개의 마이크는 각각 선형으로 섞여서 유입되는 잡음과 반향을 받아들인다. 그리고 받아들인 신

호를 독립 성분 분석 알고리즘을 이용하여 반향만을 분리한 후 이 신호를 반향 제거기에 이용하게 된다. 그러므로 그림 3의 모델에서는 반향만이 반향 제거기에 사용되므로 반향과 잡음이 동시에 존재하는 상황에서도 반향제거기의 성능을 향상시킬 수 있다.

그림 3의 모델에서 반향과 잡음은 그림 4와 같이 계수 (rank)가 2인 미지의 혼합행렬  $\mathbf{A}$ 에 의해 선형으로 섞이는 것으로 가정하며  $\mathbf{A}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

그러면 그림 3의 모델에서 선형으로 섞여서 마이크로폰으로 유입되는 신호는 그림 4와 같이 나타낼 수 있고, 두 개의 마이크로폰으로 각각 받아들인 신호  $\mathbf{x}_1[n]$ 과  $\mathbf{x}_2[n]$ 으로부터 반향 신호만을 추출하는 절차가 필요하게 된다.

이 연구에서는 독립성분 분석 알고리즘을 사용하여  $\mathbf{x}_1[n]$ 과  $\mathbf{x}_2[n]$ 으로부터 반향 신호만을 추출토록 시도하였다. 이를 위해서 그림 5와 같은 독립성분 추출 모델을 이용하였으며 이 모델에서 독립성분 분석 알고리즘은 혼합행렬의 역행렬을 추정하게 된다.

그림 5에서 분리행렬  $\mathbf{W}$ 는 혼합행렬  $\mathbf{A}$ 의 역행렬을 추정하게 되며  $\mathbf{W}$ 가  $\mathbf{A}$ 의 역행렬을 추정하게 되면 본래의 반향 신호와 잡음을 분리할 수 있게 된다[4].

분리 행렬  $\mathbf{W}$ 를 결정하는 독립성분분석 알고리즘으로는 여러 가지 알고리즘들이 있으나 이 연구에서는  $\mathbf{y}[n]$ 의 비가우시안성 (nongaussianity)이 최대가 되도록 하는 고속독립성분분석 (Fast ICA) 알고리즘[4]을 사용하

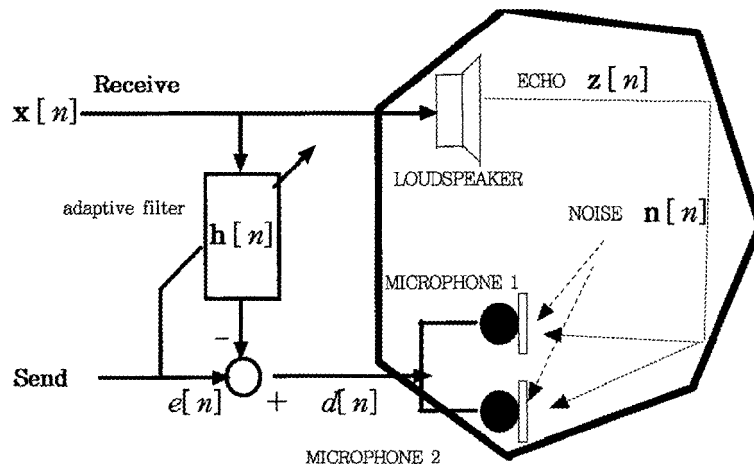


그림 3. 독립성분분석을 이용한 반향제거기 모델  
Fig. 3. Acoustic echo cancellation model using independent component analysis.

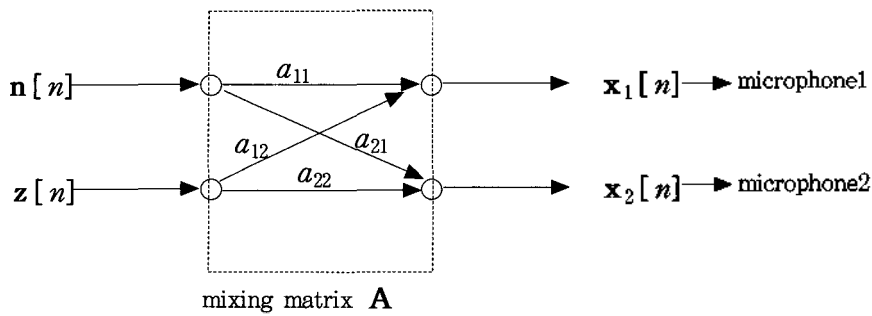


그림 4. 신호 혼합 모델  
Fig. 4. Signal mixture model.

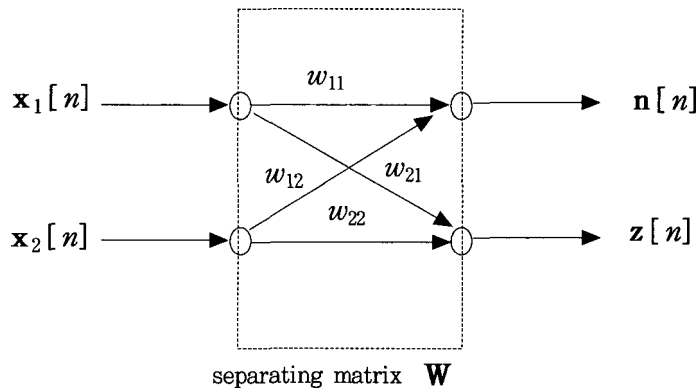


그림 5. 독립성분분석 모델  
Fig. 5. Independent component analysis model.

였다. 이 알고리즘은 두 개의 마이크로폰으로 받아들인 두 개의 입력 신호를 이용하여 입력 행렬  $\mathbf{X}$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1[n] \\ \mathbf{x}_2[n] \end{bmatrix} \quad (3)$$

를 만든 후 분리행렬  $\mathbf{W}$ 를 적용시켜 독립 성분을 추출하게 된다. 이를 위해 먼저  $\mathbf{W}$ 를 랜덤하게 선택한 후 다음과 같은 반복 과정을 거친다.

$$\mathbf{W}_p = \mathbf{X} (\mathbf{X}^T \mathbf{W}_p)^3 - 3 \mathbf{W}_p \quad (4)$$

$$\mathbf{W}_p = \mathbf{W}_p - \sum_{j=1}^{p-1} (\mathbf{W}_p^T \mathbf{W}_j) \mathbf{W}_j \quad (5)$$

$$\mathbf{W}_p = \mathbf{W}_p / \|\mathbf{W}_p\| \quad (6)$$

여기서  $\|\cdot\|$ 은 행렬의 놈 (norm)이고  $p$ 는 독립 성분의 개수이다. 이러한 분리행렬의 적응 과정은  $\mathbf{W}$ 의 갱신 정도의 크기가 작은 상수  $\delta$ 보다 작아질 때까지 계속되어 독립 성분 신호를 추출할 수 있는  $\mathbf{W}$ 의 원소를 찾게 된다. 식 (4)에서 (6)과 같은 갱신식을 갖는 고속독립성분 분석 알고리즘을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 고속독립성분분석 알고리즘

Table 1. Fast independent component analysis algorithm.

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>p=1</math>로 놓는다<br/>(독립 성분 수는 <math>m</math>이고 입력 행렬은 <math>\mathbf{X}</math>이다)</li> <li>2. <math>\mathbf{W}_p</math>를 랜덤 하게 선택한다.</li> <li>3. <math>\mathbf{W}_p = \mathbf{X} (\mathbf{X}^T \mathbf{W}_p)^3 - 3 \mathbf{W}_p</math></li> <li>4. <math>\mathbf{W}_p = \mathbf{W}_p - \sum_{j=1}^{p-1} (\mathbf{W}_p^T \mathbf{W}_j) \mathbf{W}_j</math></li> <li>5. <math>\mathbf{W}_p = \mathbf{W}_p / \ \mathbf{W}_p\ </math></li> <li>6. <math>\mathbf{W}_p</math>가 수렴하지 않으면 단계 3으로</li> <li>7. <math>p \leq m</math>이면 <math>p=p+1</math>로 하고 단계 2로</li> </ol> |
|---|

#### IV. 컴퓨터 모의 실험

이 장에서는 제안한 방법의 성능을 평가하기 위해 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 이 실험에는 스텝사이즈를 0.1로 한 정규최소평균자승 알고리즘을 적용 알고리즘으로 사용하였으며 반향 경로의 임펄스 응답은 다음과 같다[1,5].

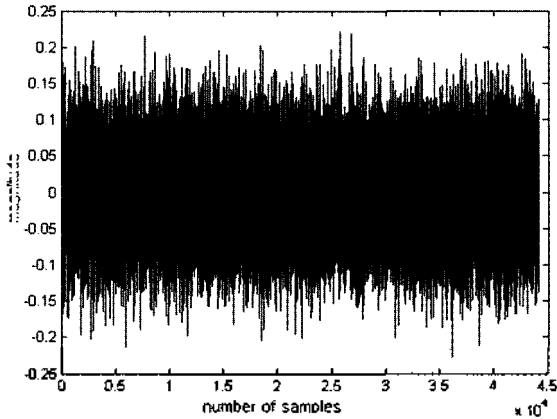
$$\hat{h}[n] = \begin{cases} 0, & 0 \leq n \leq 60 \\ q(n)\exp(-0.02n), & 61 \leq n < 990 \end{cases} \quad (7)$$

식 (8)에서  $q(n)$ 은 분산이 0.02 이고 평균이 0인 백색 가우시안 잡음이다.

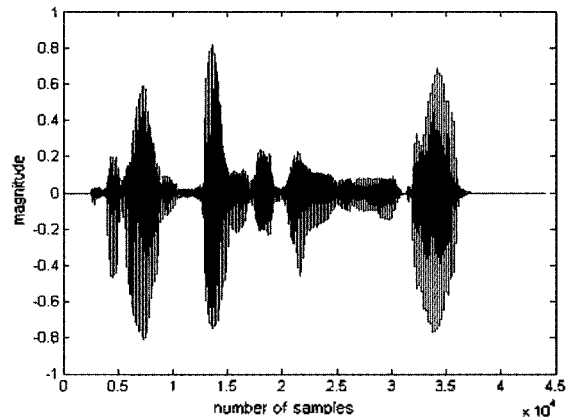
이 연구에서는 배경 잡음과 반향 신호를 달리하여 세 가지 경우에 대해 컴퓨터 모의실험을 수행하였다.

첫 번째 실험에서는 반향신호로서 백색 가우시안 잡음 (평균이 0이고 분산이 0.2492)을 사용하였고 배경잡음으로는 22 KHz로 샘플링된 음성 신호를 사용하였다. 그림 6의 (a)는 반향 신호이고 (b)는 반향 신호보다 5 dB 큰 잡음이다. 이 두 신호는 혼합 행렬

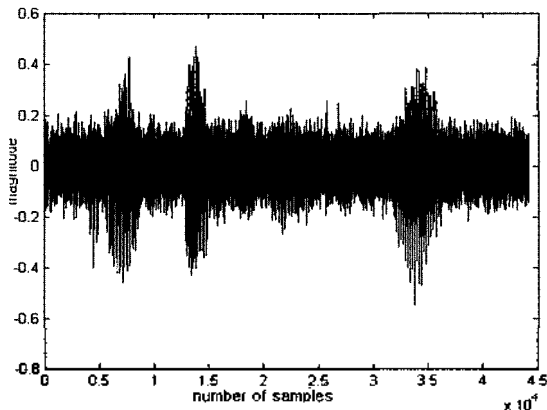
$$A = \begin{bmatrix} 0.5559 & 0.4765 \\ 0.3177 & 0.6354 \end{bmatrix} \quad (8)$$



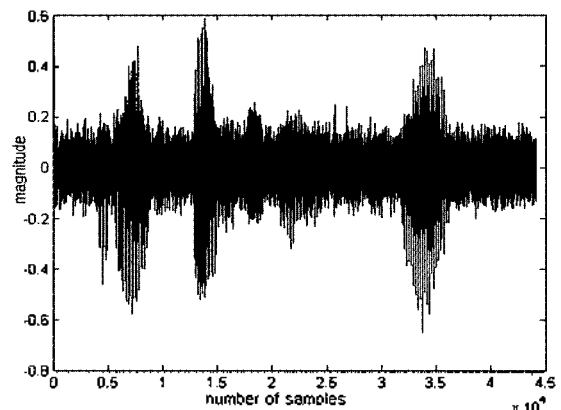
(a) 반향신호



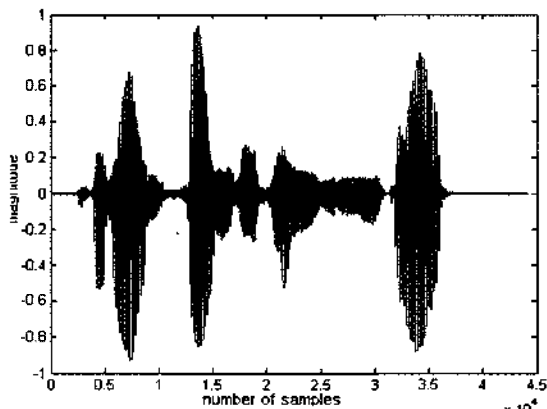
(b) 배경잡음신호



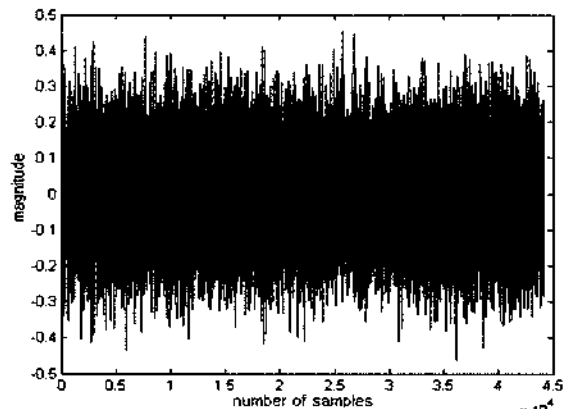
(c) 반향과 배경잡음이 섞인 신호



(d) 반향과 배경잡음이 섞인 신호



(e) 분리된 배경잡음 신호



(f) 분리된 반향 신호

그림 6. 제안한 방법의 성능 평가 (반향: 백색가우시안 잡음, 배경잡음: 음향 신호)  
 Fig. 6. Performance evaluation of the proposed method (echo: white Gaussian noise, noise : acoustic signal).

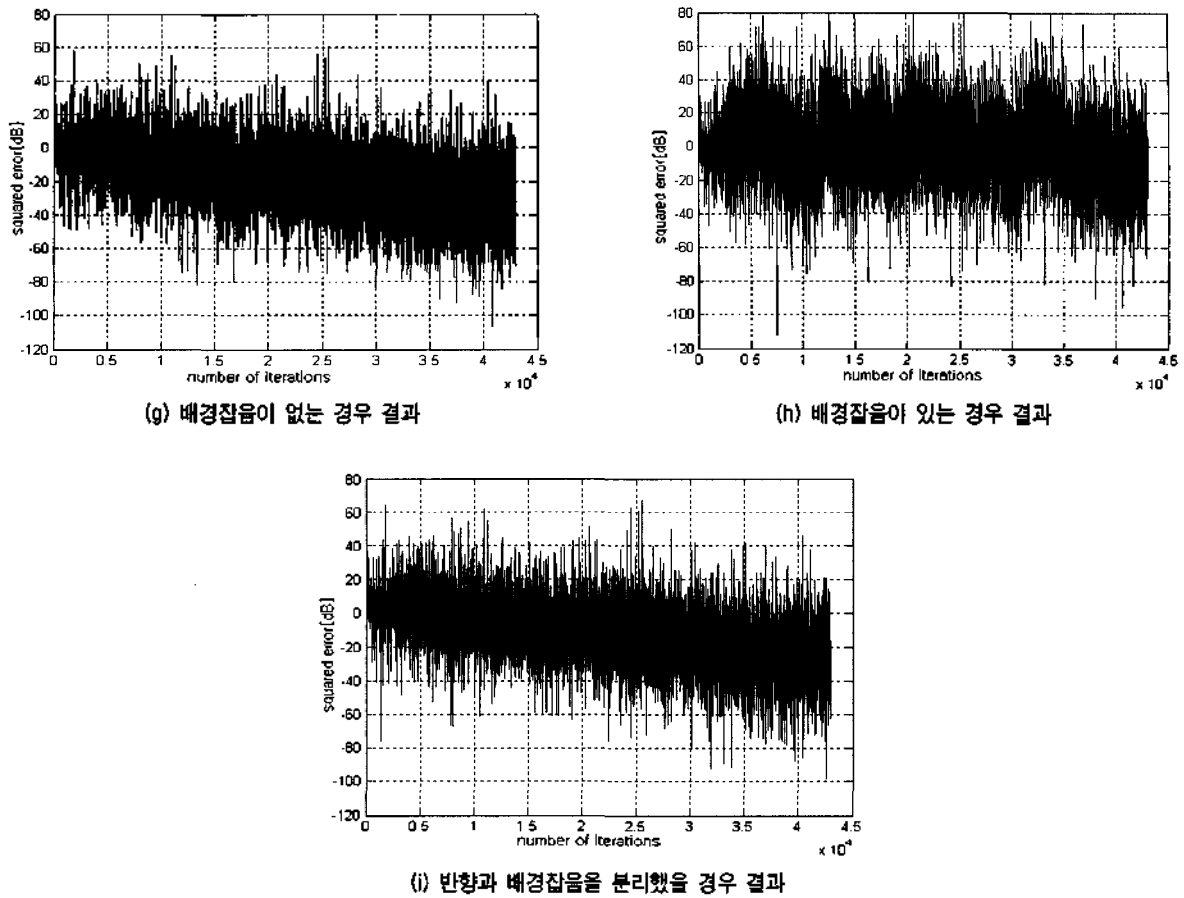


그림 6. 제안한 방법의 성능 평가 (반향: 백색가우시안 잡음, 배경잡음: 음향 신호)

Fig. 6. Performance evaluation of the proposed method (echo: white Gaussian noise, noise : acoustic signal). (Continue)

에 의해 (c)와 (d)처럼 섞인다. 섞인 신호를 독립성분 분석 알고리즘으로 분리하면 그림 6의 (e)와 (f)의 결과를 얻을 수 있다.

먼저 배경잡음은 존재하지 않고 반향만이 존재하는 경우를 고려하였다. 반향만이 존재할 경우이므로 이때에는 적응 알고리즘이 원활히 적응하여 (g)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 반향과 배경잡음이 동시에 존재할 때의 결과는 (h)이다. 이 경우 배경잡음으로 인해 반향제거기의 성능은 (g)보다 저하된다. 반향과 배경잡음이 동시에 존재하고 이를 독립성분 분석을 통해 반향만을 분리한 후 적응 알고리즘의 기준 신호로 사용한 결과가 (i)이다. 그림에서 알 수 있듯이 반향과 배경잡음을 분리하지 않았을 때보다 5 dB에서 10 dB 정도 우수한 성능을 보인다.

두 번째 실험으로는, 반향신호로서 음성 신호 (그림 7의 (a))를 사용하였고 배경잡음으로 백색 가우시안 잡음 (평균이 0이고 분산이 0.2492, 그림 7의 (b))을 사용하였다. 배경잡음은 존재하지 않고 반향만이 존재하는 경우에 대한 결과가 그림 7의 (c)이다. 그리고 반향과 배경잡음이

동시에 존재할 때의 결과는 (d)이다. 이 경우에도 배경잡음으로 인해 반향제거기의 성능은 (c)보다 저하된다. 반향과 잡음이 동시에 존재하고 이를 독립성분 분석을 통해 반향만을 분리한 후 적응 알고리즘의 기준 신호로 사용한 결과가 (e)이다. 이 결과에서도 나타나듯이 반향과 배경잡음을 분리하지 않았을 때보다 반향과 배경잡음을 분리하여 반향만을 적응 알고리즘의 기준 신호로 사용한 경우에 약 5 dB 이상의 우수한 성능을 보인다.

세 번째 경우에 대한 실험으로는, 반향신호 (그림 8의 (a))와 배경잡음 (그림 8의 (b))으로서 각각 음성 신호를 사용하였다. 여기서 배경잡음은 반향보다 10 dB 크게 설정하였다. 반향만이 존재하는 경우에 대한 결과가 그림 8의 (c)이다. 그리고 반향과 배경잡음이 동시에 존재할 때의 결과는 (d)이다. 이 경우에도 배경잡음으로 인해 반향제거기의 성능은 (c)보다 저하된다. 반향과 잡음이 동시에 존재하고 이를 독립성분 분석을 통해 반향만을 분리한 후 적응 알고리즘의 기준 신호로 사용한 결과가 (e)이다. 이 결과에서도 나타나듯이 반향과 배경잡음을 분리

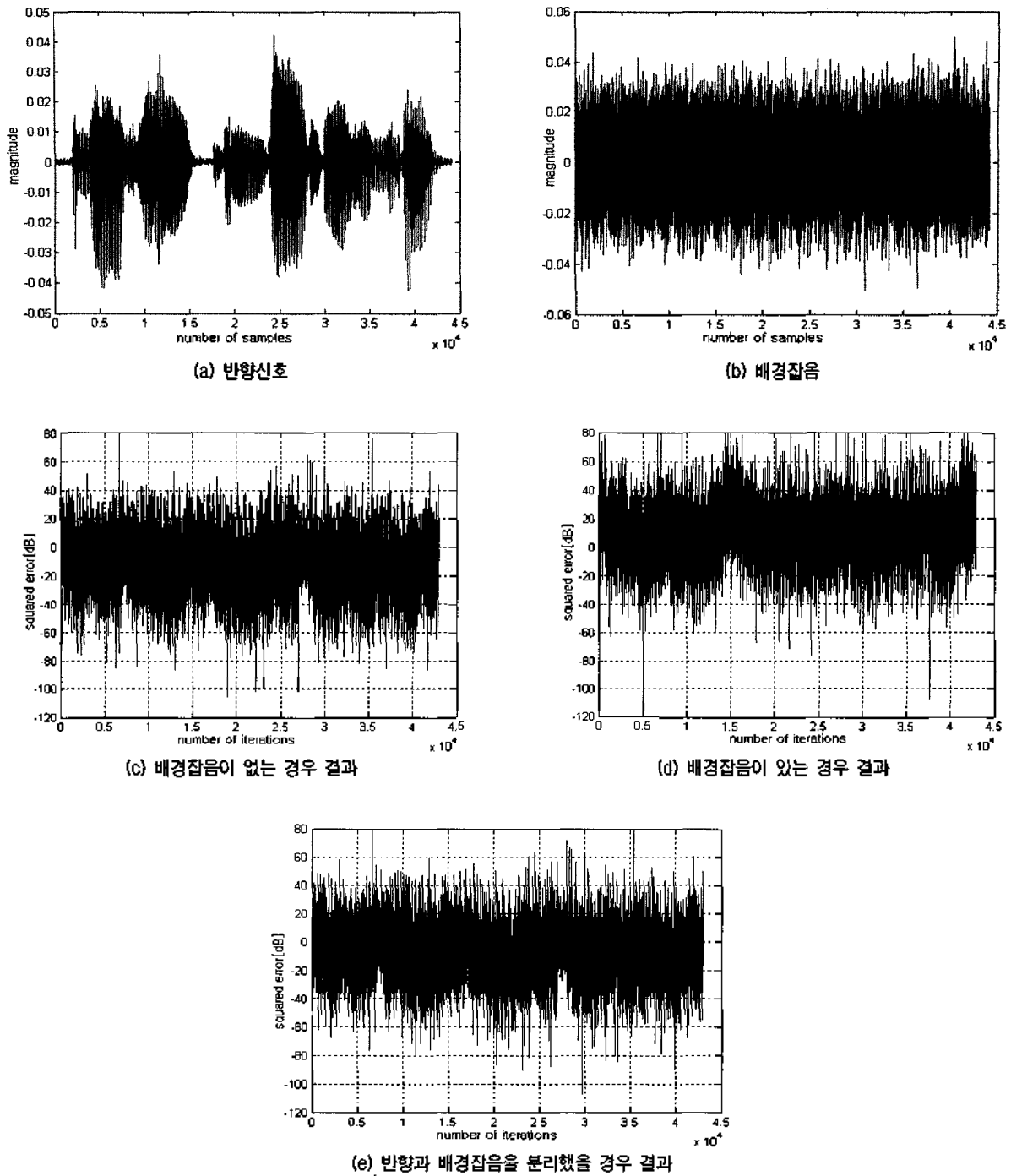


그림 7. 제안한 방법의 성능 평가 (반향: 음향신호, 배경잡음: 백색가우시안잡음)  
 Fig. 7. Performance evaluation of the proposed method (echo: acoustic signal, noise: white Gaussian noise).

하지 않았을 때보다 반향과 배경잡음을 분리하여 반향만을 적용 알고리즘의 기준 신호로 사용한 경우에 약 5 dB 이상 우수한 성능을 보인다.

컴퓨터 모의 실험 결과, 반향과 배경잡음이 동시에 존재할 경우 독립성분 분석 기법을 사용할 경우에 우수한 탈향제거 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그러나 제안한 방법에 있어서 독립성분 분석 기법을 사용할 때 만

약 반향 신호와 배경잡음이 통계적으로 독립이지 않을 경우에는 독립성분분석 알고리즘은 반향과 배경잡음을 분리 할 수 없게 된다. 그러나 두 개의 마이크로폰으로 각각 유입되는 혼합된 음성 신호와 잡음은 독립성분 분석으로 분리가 가능하다[4]. 특히, 이 연구에서는 두 개의 마이크로폰에 선형으로 섞인 두 개의 신호가 유입되는 것으로 가정하였으나 만약 반향과 함께 차량 소음, 그리

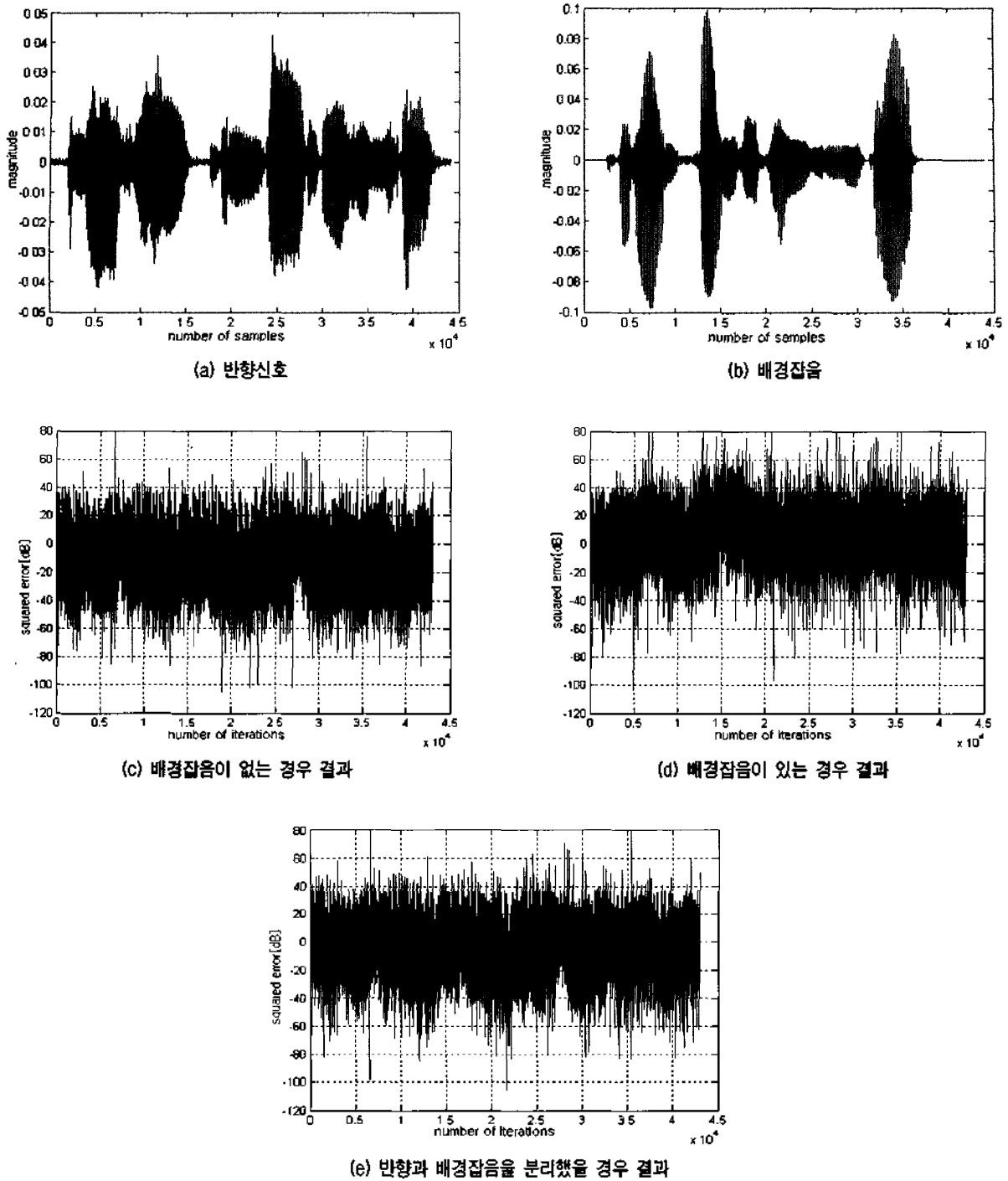


그림 8. 제안한 방법의 성능 평가 (반향: 음향신호, 배경잡음: 음향신호)  
 Fig. 8. Performance evaluation of the proposed method (echo: acoustic signal, noise: acoustic signal).

고 다른 사람의 목소리와 같은 배경 잡음이 존재할 때, 즉 세 개의 신호가 존재할 경우 이들을 독립성분분석 알고리즘을 이용하여 분리할 때는 마이크로폰이 모두 세 개가 필요하다. 즉 배경잡음을 반향과 분리하기 위해서는 배경잡음에 포함된 통계적으로 독립인 신호원들의 수보다 하나 많은 마이크로폰을 이용하여 반향과 배경잡음을 분리할 수 있게 된다[4].

## V. 결론

본 논문에서는 반향신호와 통계적으로 독립인 배경잡음이 섞여서 반향제거기의 기준 신호로 인가될 때 독립성분분석 알고리즘을 이용하여 반향제거기의 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다. 반향신호와 선형으로 섞인



배경잡음을 분리하기 위해 두 개의 마이크로폰으로부터 신호를 받았으며 이 신호들을 독립성분 분석 알고리즘을 이용하여 분리한 후 반향 신호만을 반향제거용 적응 필터의 기준 신호로 사용하였다. 컴퓨터 모의실험 결과 제안한 방법은 독립성분 분석 알고리즘을 사용하지 않았을 경우보다 우수한 결과를 보였다. 향후 연구 과제로는 독립성분분석 알고리즘 사용시 연산량을 감소시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

### 참고 문헌

1. T. Pellilon, A. Gilloire, and S. Theodoridis, "The fast newton transversal filter: An efficient scheme for acoustic echo cancellation in mobile radio," *IEEE Trans. on Signal Processing*, 42 (3), 509-518, March, 1994.
2. A. Gilloire and M. Vittelii, "Adaptive filtering in subbands with critical sampling: analysis, experiments and application to acoustic echo cancellation," *IEEE Trans. on Signal Processing*, 40, 1862-1875, Aug. 1992.
3. S. Haykin, *Adaptive Filter theory*, 4th Ed. Upper Saddle River, N. J Prentice-Hall, 2002.
4. A. Hyvarinen, J. Karhunen, and E. Oja, *Independent Component Analysis*, JHON WILEY & SONS, INC., 2001.

5. 이봉상, 주성범, 백홍기, "음향반향제거기용 서브밴드 등가모델의 성능 분석," 제7회 신호처리합동학술대회 논문집, 7 (1), 1075-1078, 1994.
6. B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1985.

### 저자 약력

● 김 대 성 (Dae-Sung Kim)



1994년 2월: 충북대학교 전자공학과 학사  
 1997년 2월: 동 대학 대학원 전자공학과 석사  
 1999년 2월: 동 대학 대학원 전자공학과 박사과정수로  
 2002년 4월 ~ 현재: 충청대학 전자과 전임강사  
 \* 주관심분야: 적응신호처리, 음향신호처리, 독립성분분석

● 배 현 덕 (Hyen-Deok Bae)



1977년 2월: 한양대학교 전자공학과 학사  
 1980년 2월: 서울대학교 대학원 전자공학과 석사  
 1992년 2월: 서울대학교 대학원 전자공학과 박사  
 1994년 ~ 1995년: 미국 시라큐스대학 전기전자공학  
 과 방문교수  
 1987년 3월 ~ 현재: 충북대학교 전자공학과 교수  
 \* 주관심분야: 적응신호처리, 다중신호처리, 독립성분분석