

필터뱅크 기반 프로스트 알고리즘을 이용한 빔포밍 최적화

박지훈(ICU), 이성주(ETRI), 홍정표(ICU),
정상배(ICU), 한민수(ICU)

<차 례>

- | | |
|---------------------|----------------|
| 1. 서론 | 4. 최적화 실험 및 결과 |
| 2. 프로스트(Frost) 알고리즘 | 4.1. 실험 환경 |
| 3. 필터뱅크 프로스트 | 4.2. 최적화 실험 결과 |
| 3.1. QMF 기반 필터뱅크 | 5. 결론 |
| 3.1. 필터뱅크의 빔포밍 적용 | |

<Abstract>

Beamforming Optimization Using Filterbank-based Frost Algorithm

Ji-Hoon Park, Sung-Joo Lee, Jeong-Pyo Hong,
Sang-Bae Jeong, Min-Soo Hahn

Beamforming is one of the spatial filtering techniques which extract only desired signals from noisy environments using microphone arrays. Fixed beamforming is a simple concept and easy to implement. However, it does not show good performance in real noisy conditions. As an adaptive beamforming, Frost algorithm can be a good candidate. It uses the concept of the linearly constrained minimum variance (LCMV) algorithm. The difference between the Frost and the LCMV algorithm is the error correction scheme which is very effective feature in the aspect of performance. In this paper, as quadrature mirror filtering (QMF)-based filterbank is utilized as the pre-processing of the Frost beamforming, the filter length and the learning rate of each band is optimized to improve the performance. The performance is measured by the signal-to-noise ratio (SNR) and the Bark's scale spectral distortion (BSD).

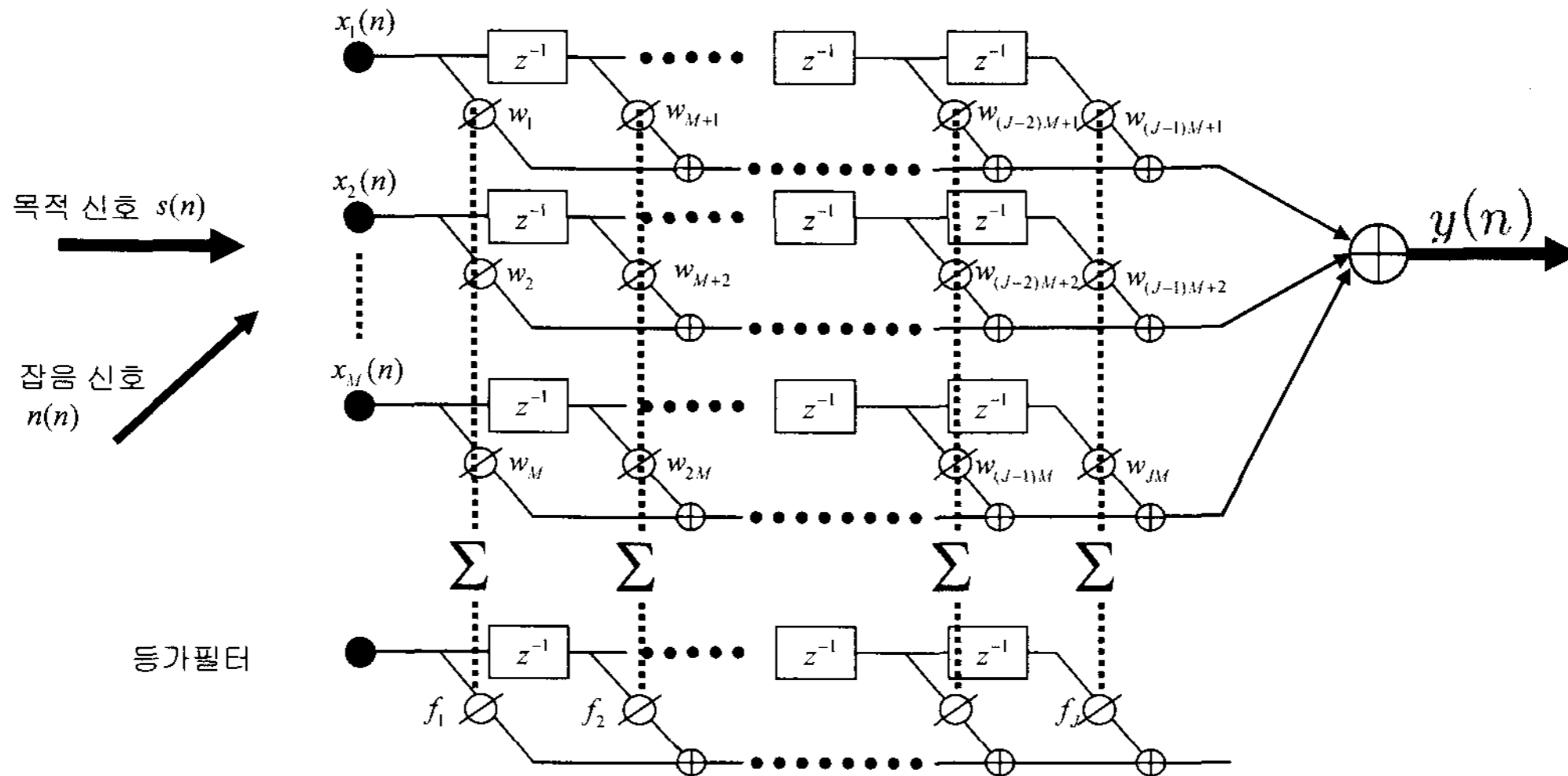
* Keywords: Speech enhancement, Microphone array, Frost beamforming, Filterbank.

1. 서 론

음성은 차량의 네비게이션, 핸드폰, 지능형 로봇 등의 여러 가지 기기들을 제어할 수 있는 가장 편리한 인터페이스이다. 이러한 음성 인터페이스를 유용하게 사용하기 위해 음성 합성, 음성 인식 등의 다양한 기능들이 단말기기에 집적되고 있는데 이중에서도 통화 품질 및 음성 인식률은 가산성 잡음에 상당히 민감하다. 이러한 가산성 잡음 제거하기 위해 오래전부터 다양한 잡음 제거 기술들이 개발되어왔다. 잡음제거 기술은 크게 정상(stationary) 잡음 제거 기술과 비정상(nonstationary) 잡음 제거 기술 두 가지로 나누어진다. 정상 잡음 제거 기술은 단일 마이크로폰 입력을 이용한 위너 필터 및 칼만 필터가 대표적이다 [1][2]. 일반적으로 신호의 초기구간이나 실시간 음성 검출기를 이용하여 잡음구간에서의 잡음 통계치를 추정하여 필터를 설계하고 음성구간에서 그 통계량이 차감되도록 하는 기술이다. 하지만 일상생활에서 음성 인터페이스의 성능을 저하시키는 원인은 정상 잡음보다 비정상 잡음의 경우가 더 많다. 비정상 잡음은 신호의 크기 및 주파수 응답이 지속적으로 변하여 신호 자체만으로 목적 신호(desired signal)와 잡음 신호의 구분이 어렵다는 특징이 있다. 이러한 비정상 잡음을 제거하기 위한 최근의 연구는 마이크로폰 배열을 이용한 공간적 필터링 개념의 잡음 제거 기술들에 집중되고 있다. 마이크로폰 배열 기반 잡음제거는 암묵 신호 분리(blind source separation: BSS)[3]와 빔포밍(beamforming) 알고리즘으로 나눌 수 있다.

빔포밍은 배경 잡음이 섞인 특정 방향의 목적 신호를 보다 잘 수신하기 위해, 각 마이크로폰마다 입력되는 신호의 가중치를 조절하여 원하는 표적 신호만을 필터링하는 공간적 개념의 필터링 기술이다. 빔포밍 알고리즘은 가중치를 제안하는 방법에 따라서 크게 가중치가 고정되어있는 비적응적 빔포밍(fixed beamforming)과 입력 신호에 따라 가중치가 바뀌는 적응적 빔포밍(adaptive beamforming)으로 나누어진다. 비적응적 빔포밍은 delay and sum, Dolph Chebyshev, 최소자승법 알고리즘이 대표적이다[4]. 적응적 빔포밍은 프로스트(Frost) 알고리즘과 generalized sidelobe canceller (GSC) 알고리즘이 널리 사용되어지고 있다. GSC 알고리즘은[5] 크게 세 개의 과정으로 구성되어있다. 첫 번째 과정은 비적응적 빔포밍 단이고, 두 번째 과정은 목적 신호를 제거하여 각 채널의 잡음 신호만을 뽑아내는 blocking matrix (BM) 과정이며, 마지막으로 비적응적 빔포밍 신호와 잡음 신호의 차이를 통해 최종 빔포밍 결과를 출력하는 multiple input canceller (MIC) 과정으로 이루어져 있다. 하지만 잘못된 잡음 신호의 예측은 목적 신호의 왜곡이 생기게 되어 성능이 저하하는 문제점이 있다. 반면 프로스트 알고리즘은 기본적인 GSC 알고리즘보다 목적 신호의 왜곡이 적고 성능이 우수하다고 알려져 있다.

사람의 음성 인지 특성은 고주파 대역보다 저주파 대역에 민감하다. 이러한 관점에서 보았을 때 전 대역 빔포밍은 한 가지의 가중치를 전 대역에 적용하여 주



<그림 1> 프로스트 알고리즘의 개요도

파수에 따른 그 특성을 반영하기 힘들다는 문제점이 있다. 필터뱅크(filterbank) 프로스트는 이러한 문제점을 해결해줌으로써 음질 향상을 가져온다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 프로스트 알고리즘에 대해서 자세히 설명하고, 3장에서는 quadrature mirror filter (QMF) 기반의 필터뱅크 구조와 적용 방법에 대해서 설명한다. 4장에서는 실험을 통해 필터뱅크 프로스트 최적화 작업의 결과를 보여주고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 프로스트(Frost) 알고리즘

프로스트 알고리즘의 개요도는 <그림 1>에서 나타낸 바와 같다. <그림 1>에서 $x_m(n)$ 은 m 번째 마이크로폰에 입력된 신호로 식 (1)과 같이 나타낸다 [6].

$$x_m(n) = s(n) + n_m(n) \text{ for } m = 1, \dots, M \quad (1)$$

여기서 $s(n)$ 는 목적 신호로서, 개념상으로 프로스트 알고리즘은 목적 신호가 마이크로폰 배열의 정면에서 온다고 가정하기 때문에 각 m 번째 마이크로폰에 입력되는 목적 신호는 같다고 본다. 실제 구현 측면에서는 선행 정보로 입력되는 목적 신호원의 위치 정보를 바탕으로 각 채널의 입력 신호 $x_m(n)$ 에 시간 지연을 부가해 줌으로써 목적 신호가 정면에서 온다는 가정을 충족시킬 수 있다. 그리고

$n_m(n)$ 는 잡음 신호로서 목적 신호원의 방향 이외의 방향에서 오는 신호는 잡음 신호로 처리한다. 여기서 M 은 마이크로폰의 개수를 나타낸다. 그리고 <그림 1>에서 J 는 입력 신호에 사용되는 적응 필터의 길이를 나타낸다. <그림 1>의 하단부에 위치한 등가필터는 목적 음성 신호 방향에 대한 주파수 특성을 구하기 위한 구조도로써 상단부의 점선으로 이루어진 필터 계수들의 합으로 표현된다. 여기서 w_i 는 필터 계수로써 가중치를 나타내고, f_j 은 등가 필터 구조도의 j 번째 탭의 필터 계수이다. 목적 신호 방향으로의 주파수 응답 왜곡을 일으키지 않으면서 잡음 제거가 가능하려면, 등가필터의 단위 충격 응답이 $\delta(n)$ 을 유지하도록 하면서 빔포밍 출력 신호 $y(n)$ 의 전력을 최소화시킴으로써 최적화된 가중치를 구할 수 있다. 이러한 프로스트 알고리즘의 제약 조건을 식 (2)에 정리하였다.

$$\min_W E[W^T R_{XX} W], \text{subject to } C^T W = F \quad (2)$$

여기서 $E[\cdot]$ 은 통계적 평균치 연산자이며, $W = [w_1, w_2, \dots, w_{JM}]^T$ 이다. R_{XX} 는 자기 상관도 행렬로써 식 (3)과 같다.

$$R_{XX} = X(n)X^T(n) \quad (3)$$

$X(n) = [\underline{x}_1^T(n), \underline{x}_2^T(n), \dots, \underline{x}_J^T(n)]$ 는 입력 신호를 행렬의 형태로 표현한 것이고, $F = [f_1, f_2, \dots, f_J]$ 이며, C 는 제약 행렬로써, 열벡터가 등가필터 계수를 계산할 수 있도록 1과 0으로 이루어져 있다. 이는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$c_j^T W = f_j \text{ for } j = 1, \dots, J \quad (4)$$

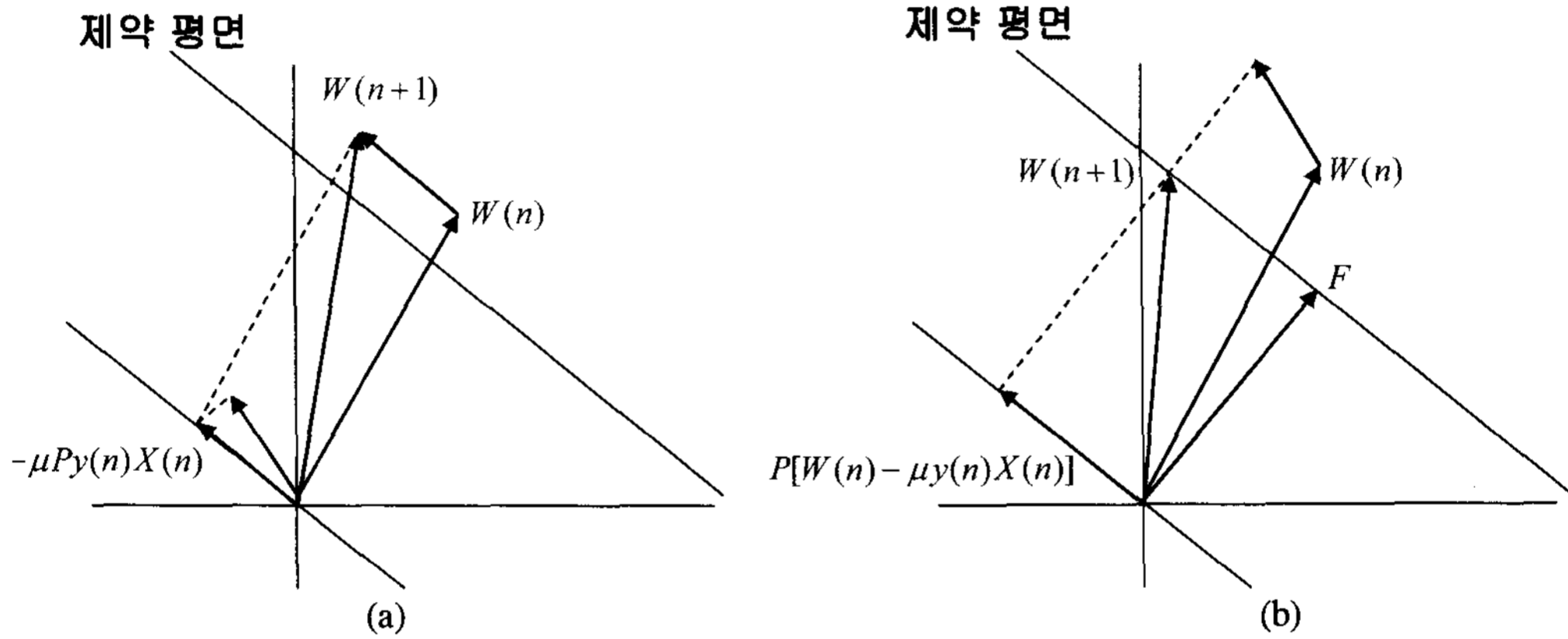
최적화된 가중치 W_{opt} 는 Lagrange multiplier를 이용해서 수행할 수 있다. 그 결과는 다음 식 (5)와 같다.

$$W_{opt} = R_{XX}^{-1} C [C^T R_{XX}^{-1} C]^{-1} F \quad (5)$$

프로스트 알고리즘의 갱신 알고리즘은 기존의 linearly constrained minimum variance (LCMV) 알고리즘의 오류를 발산하는 문제점을 가진 gradient projection 방법 대신 constrained least mean square (LMS) 방법을 사용하여 그 문제점을 해결하였다. 프로스트의 갱신 알고리즘으로 갱신되는 $(n+1)$ 번째 가중치는 아래 식 (6)과 같다.

$$W(n+1) = P[W(n) - \mu y(n)X(n)] + F \tag{6}$$

이때 행렬 P 는 투영 행렬로써, $I - C(C^T C)^{-1} C^T$ 이고, μ 는 학습률(learning rate)이다. 이때 초기 가중치는 $W(0) = F$ 로 정의된다. 이러한 갱신 알고리즘을 기하학 형태로 표현해보면 <그림 2>의 (b)와 같다. <그림 2>의 (a)는 기존 LCMV 알고리즘의 gradient projection 방법을 나타내는데 그림에서 보는 바와 같이 $(n+1)$ 번째 가중치가 <그림 2>의 (a)에서는 제약 평면으로 수렴하지 않아 오류가 누적되면 발산하는 문제점을 보여준다. 반면, 프로스트가 제안하는 constrained LMS 방법인 <그림 2>의 (b)에서는 오류가 발생하여도 제약 평면으로 수렴함으로써 오류가 누적되지 않는 것을 확인할 수 있다.

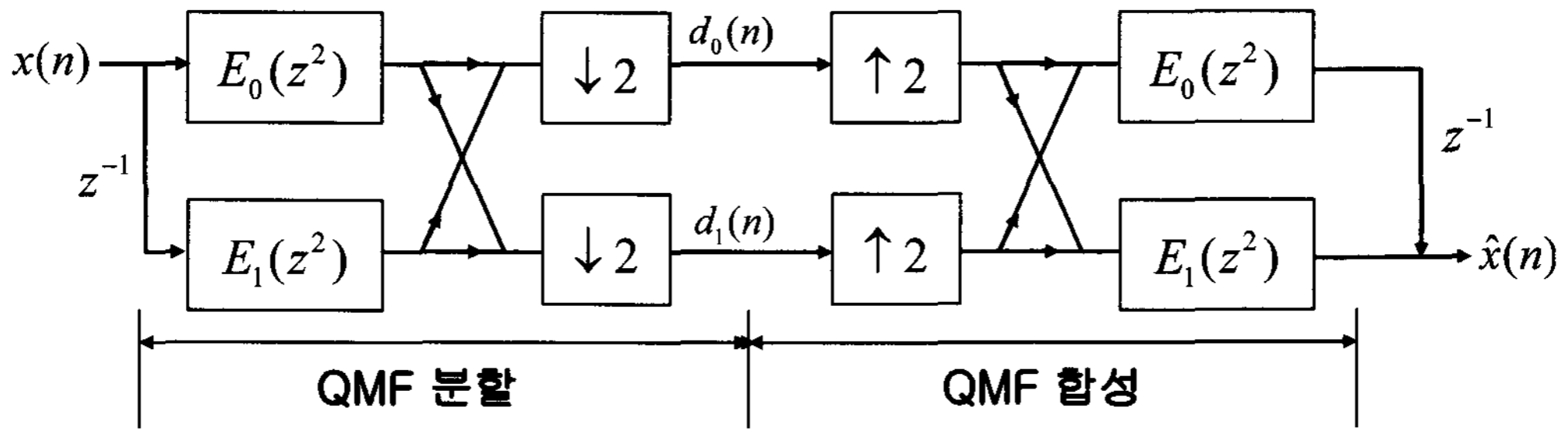


<그림 2> 가중치 갱신 알고리즘의 비교; (a) gradient projection algorithm, (b) constrained LMS algorithm

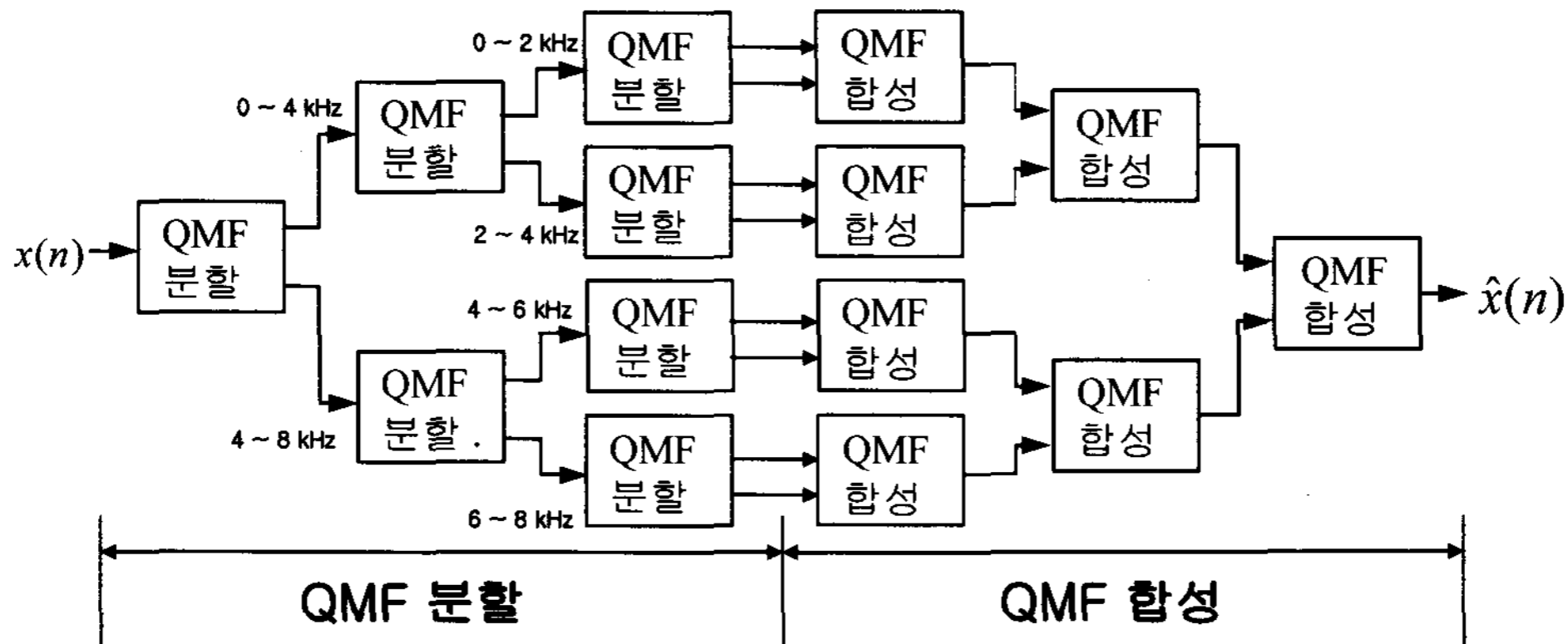
3. 필터뱅크 프로스트

프로스트 기법의 단점은 너무나 강력한 제약 조건으로 알고리즘의 수렴 속도가 빠르지 않다는 것이다. 그리고 전 대역 빔포밍은 한 가지의 가중치를 전 대역에 적용하여 주파수에 따른 그 특성을 반영하기 힘들다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 QMF 기반의 필터뱅크를 설계하여 프로스트 알고리즘에 적용해 수렴속도 향상과 음질 향상을 가져온다[7].

3.1. QMF 기반 필터뱅크



<그림 3> QMF 구조도

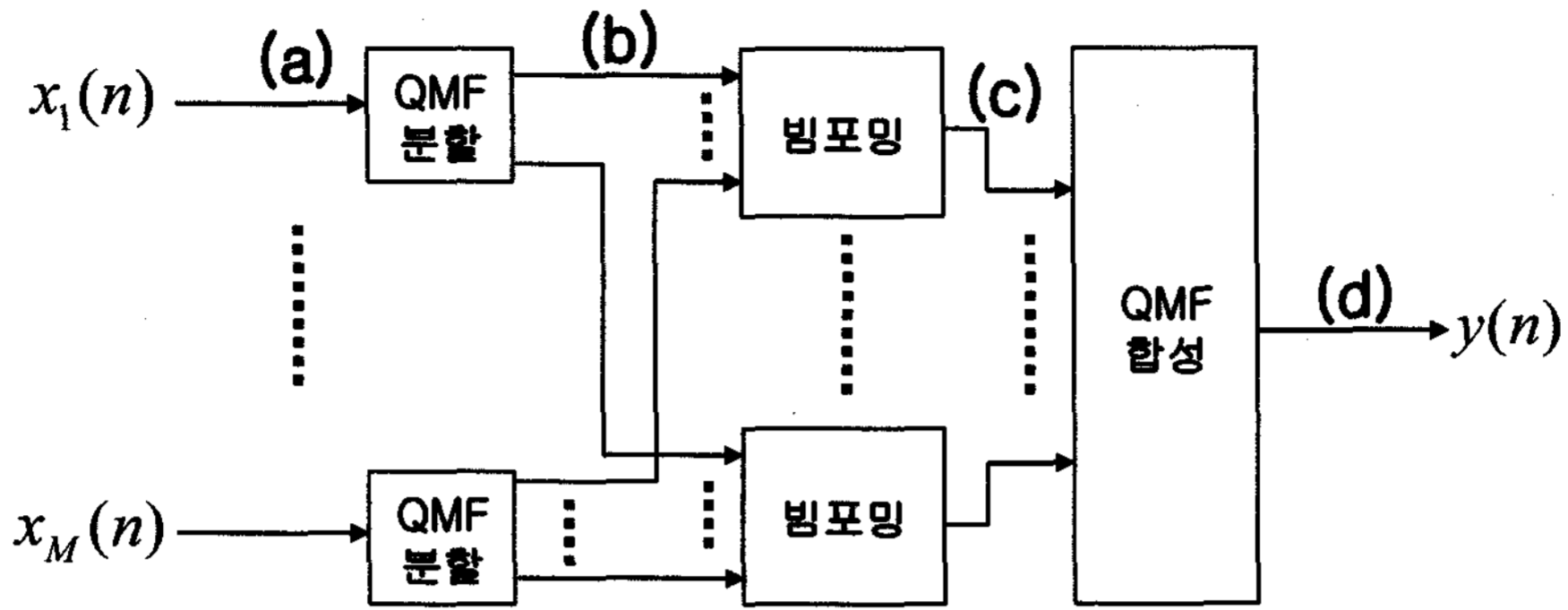


<그림 4> 다상 QMF 구조도

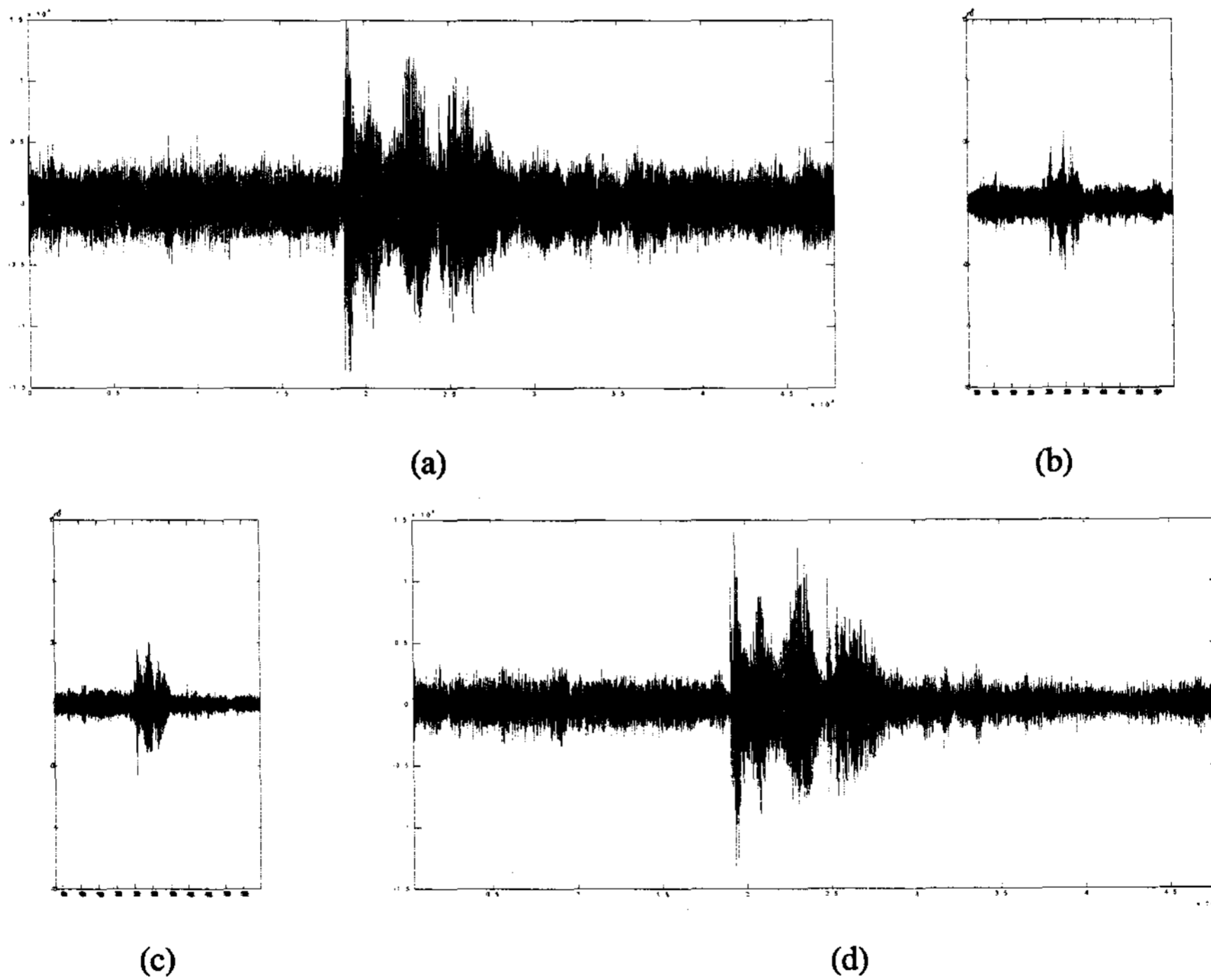
일반적으로 분할된 필터뱅크를 다시 합성할 때 대역 통과 필터의 구조적 문제로 인해 완벽한 복구가 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하고자 제안된 방법이 <그림 3>의 QMF 구조이다. $x(n)$ 은 QMF 입력신호이고, $\hat{x}(n)$ 은 QMF 출력 신호이다. $E_0(z^2)$ 은 QMF를 위한 저대역 통과 필터이고, $E_1(z^2)$ 은 고대역 통과 필터이다. $\downarrow 2$ 는 다운샘플링이고 $\uparrow 2$ 는 업샘플링이다. $d_0(n)$ 과 $d_1(n)$ 은 각각 최종적으로 분할된 저대역, 고대역 신호이다. 그림에서 보는 것과 같이 $d_0(n)$ 과 $d_1(n)$ 이 생성되기 이전과정을 QMF 분할과정, 이후 과정으로 출력 신호가 생성되는 과정을 QMF 합성 과정이라 한다.

3.2. 필터뱅크의 빔포밍 적용

필터뱅크를 적용시킴으로써 각 밴드마다 적용되는 필터길이가 짧아져 실행시간 단축을 불러오고, 전대역을 한 가지 필터만으로 잡음제거를 하던 방법에 비해



<그림 5> 필터뱅크의 빔포밍 적용 구성도



<그림 6> QMF 기반의 필터뱅크 빔포밍 각 지점에서의 파형; (a) 입력 신호, (b) QMF 분할된 입력신호, (c) (b)를 잡음 제거한 신호, (d) QMF 합성한 최종 신호

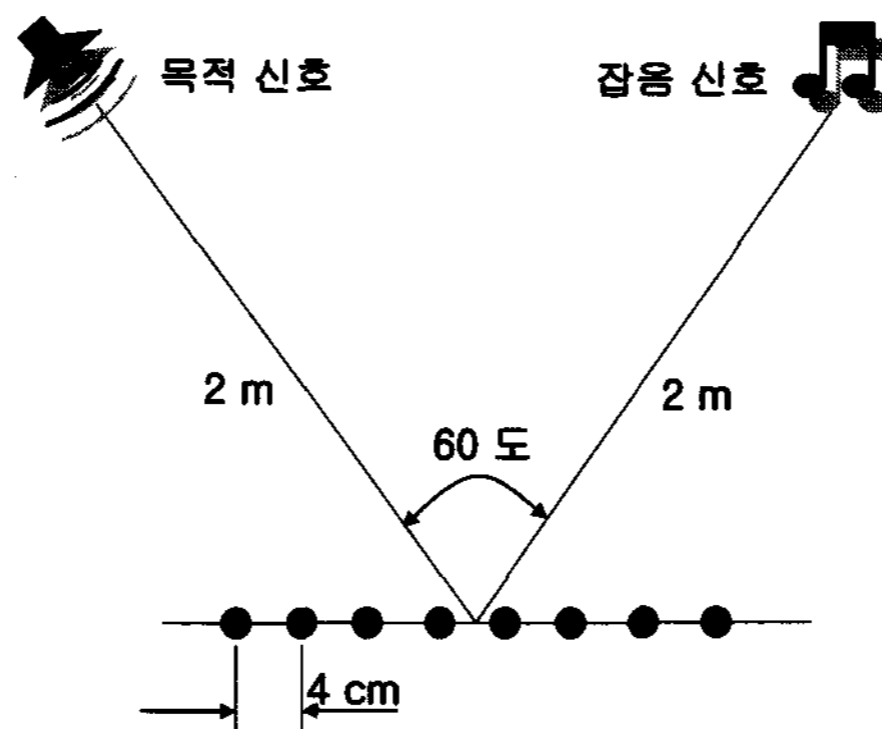
잡음제거 성능 향상을 불러올 수 있다. 주파수 대역을 1 kHz 단위로 나눈 필터뱅크를 설계하기 위해 <그림 3>의 QMF 구조를 다상(polyphase) QMF 구조로 설계하였다. 다상 QMF 구조는 <그림 4>와 같이 나타내어진다.

QMF 기반의 필터뱅크를 빔포밍에 적용한 구조도는 <그림 5>와 같다. 필터뱅크 분할 과정과 필터뱅크 합성 과정은 <그림 4>와 같은 구조로 이루어져 있다. 또한 <그림 5>에서의 각 지점 (a, b, c, d) 에서의 신호의 파형은 아래 <그림 6>에서 보여준다.

4. 실험 및 결과

4.1. 실험 환경

훈련용 데이터의 녹음 환경은 <그림 7>에서 보여준다. 마이크는 8개를 사용하였고, 마이크간의 거리는 4 cm로 선형 배열하였다. 마이크 배열의 중심으로부터 2 m 거리에서 목적 신호를 발생하였고, 잡음 신호는 목적 신호와 60도 각도를 이룬 지점에서 발생하였다. 목적 신호는 다수의 남성, 여성 화자가 발성한 phoneme balanced word (PBW) 452 단어를 사용하였으며, 잡음 신호는 노랫말이 들어간 음악을 사용하였다. Signal-to-noise ratio (SNR) 환경에 따른 실험을 위해 목적 신호와 잡음신호를 따로 녹음하여 SNR에 따라 5가지 경우에 대해서 합성하였다: 0, 5, 10, 15, 20 dB. 그리고 실험을 위해 빔포밍 알고리즘은 전대역 프로스트 알고리즘과 필터뱅크 프로스트 알고리즘을 사용하였다.



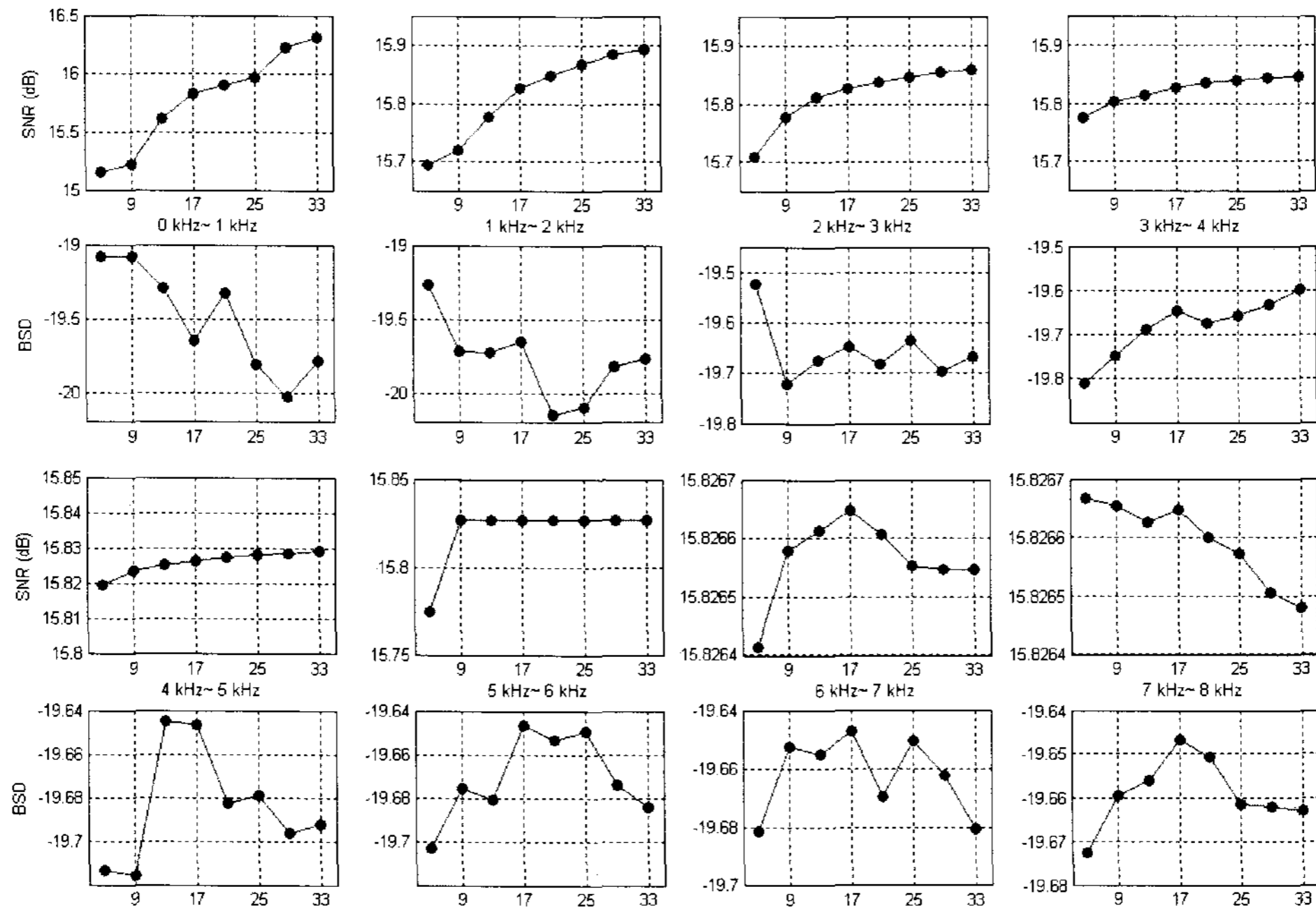
<그림 7> 실험 DB 수집 환경

평가를 위해서 SNR과 Bark-scale spectral distortion (BSD)이 사용되었다 [8]. 음질 평가의 기준 음성으로는 잡음이 섞이지 않은 목적 신호의 비적응적 빔포밍 결과를 사용하였다. SNR 계산을 위해 식 (7)을 사용하였다. 그리고 BSD는 아래 식 (8)을 사용하여 계산하였다.

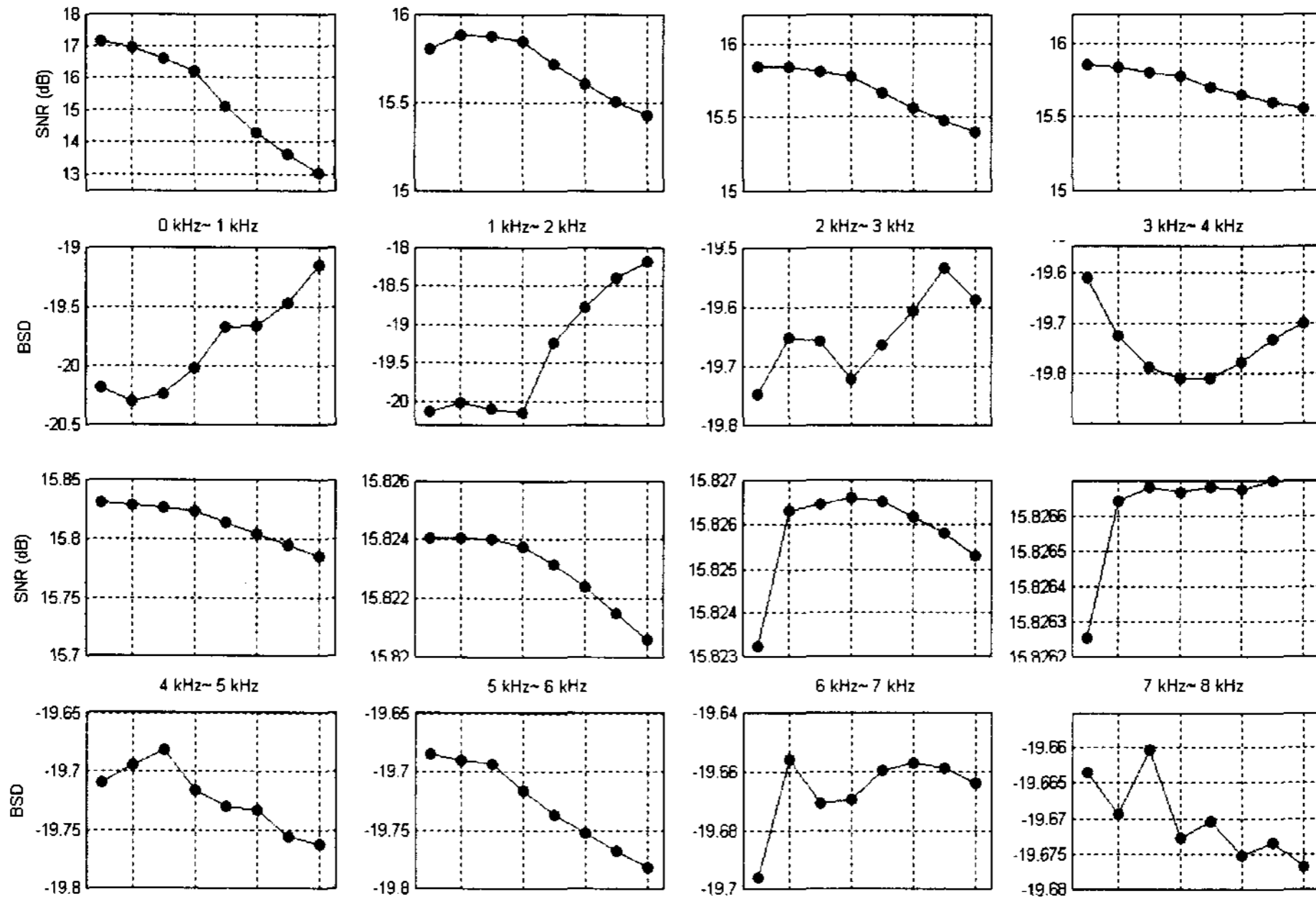
$$\text{SNR} = \frac{\sum_{j \in T_s} \left[\sum_{n=0}^L x^{(j)2}(n) \right]}{\sum_{j \in T_s} \left[\sum_{n=0}^L (y^{(j)}(n) - x^{(j)}(n))^2 \right]} \quad (7)$$

$$\text{BSD} = \frac{\sum_{j \in T_s} \left[\sum_{i=0}^K (L_x^{(j)}(i) - L_y^{(j)}(i))^2 \right]}{\sum_{j \in T_s} \left[\sum_{i=0}^K (L_x^{(j)}(i))^2 \right]} \quad (8)$$

여기서 T_s 는 음성구간의 프레임 구간이고, L 은 프레임 길이이다. $x^{(j)}(n)$ 은 기준 음성으로 비적응적 빔포밍 결과의 j 번째 프레임 신호이고, $y^{(j)}(n)$ 은 평가하고자 하는 빔포밍 출력 음성 신호의 j 번째 프레임 신호이다. 식 (8)에서 K 는 밴드의 개수이고, $L_x^{(j)}(i), L_y^{(j)}(i)$ 는 j 번째 프레임의 i 번째 밴드의 bark spectrum이다.



<그림 9> 필터 길이에 따른 SNR과 BSD 결과
(필터길이 : 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33)

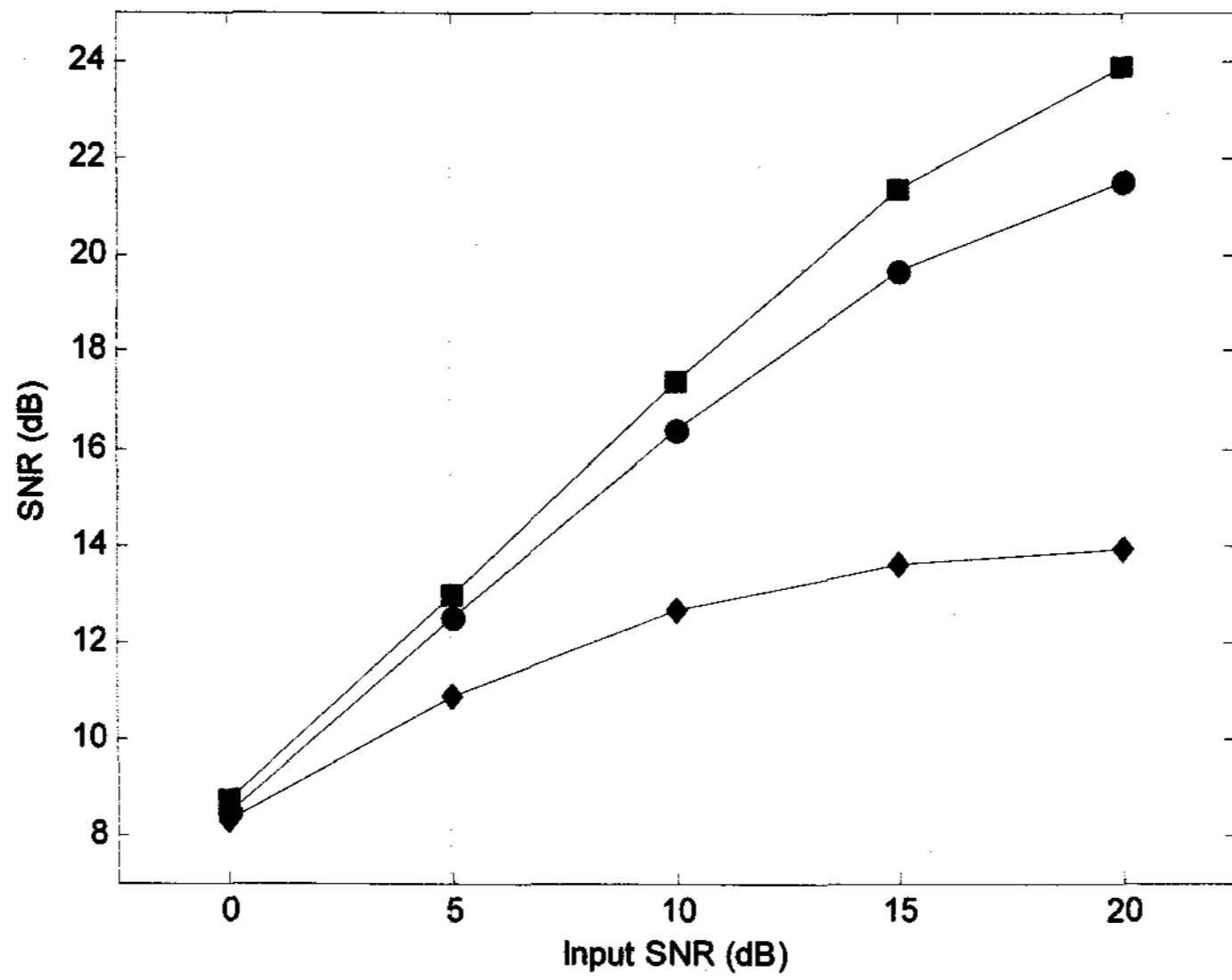


<그림 8> 학습률에 따른 SNR과 BSD 결과
(학습률 : 0.001, 0.004, 0.007, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05)

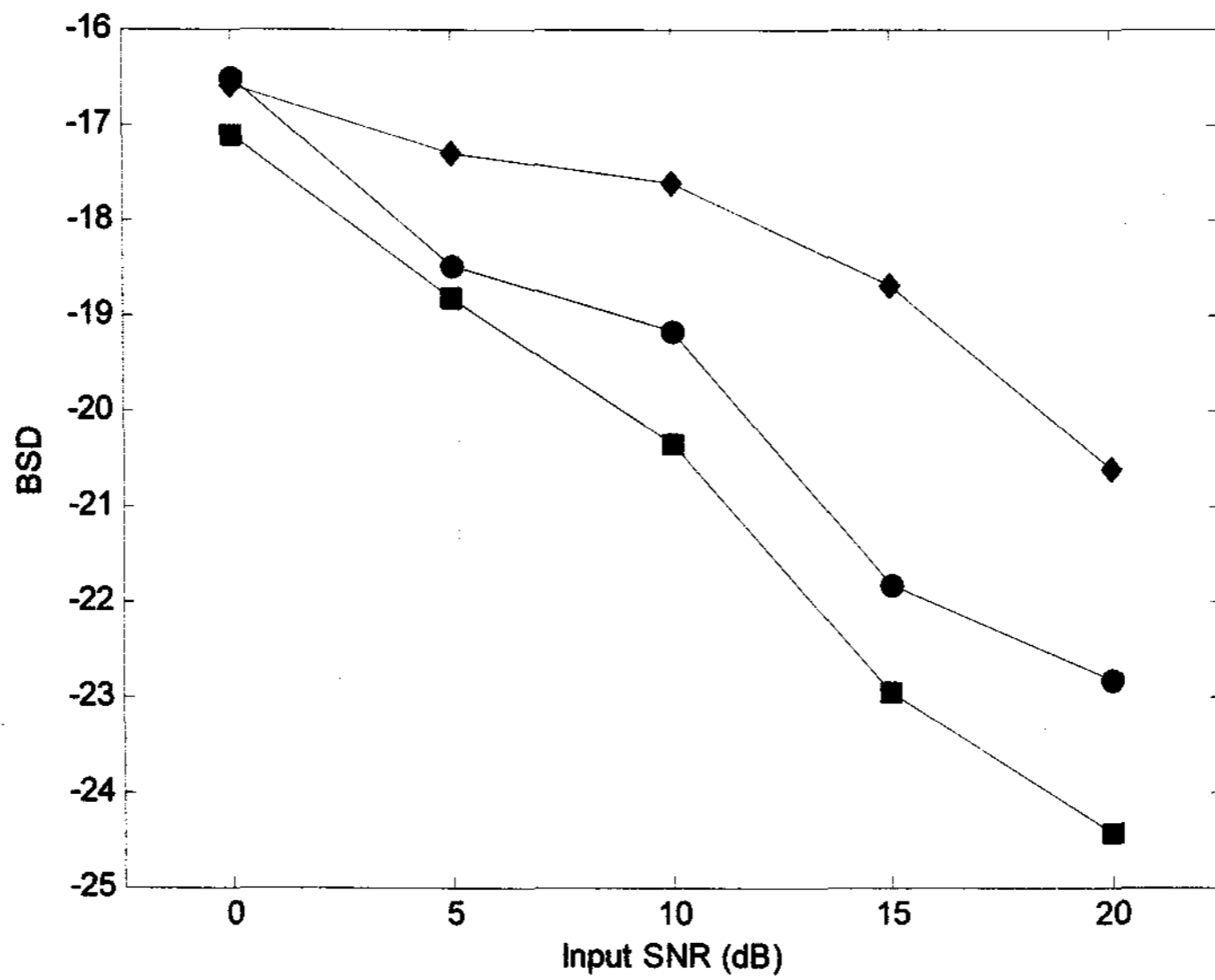
4.2. 최적화 실험 결과

최적화 실험은 밴드마다 학습률과 필터 길이를 조절하여 SNR과 BSD 모두 최적으로 나오는 결과를 찾는 것으로 <그림 6>의 환경에서 수집한 훈련용 데이터를 사용하여 최적화 결과로 사용한다. <그림 8>과 <그림 9>는 최적화된 학습률과 필터 길이를 찾기 위한 실험 결과이다. 가로축은 학습률과 필터 길이를 조절한 값이고 세로축은 각각 실험 결과이다. 각 대역마다 위 아래로 SNR과 BSD 결과를 보여준다. <그림 8>은 필터 길이를 17로 고정하고 학습률을 조절해가며 실험한 결과이다. <그림 9>는 학습률을 0.01로 고정하고 필터 길이를 조절해가며 실험한 결과이다. <그림 8>과 <그림 9>에서 SNR과 BSD 두 가지를 동시에 만족하는 값을 최적화 값으로 결정하였다. 예를 들어 <그림 9>에서 5~6 kHz 영역의 SNR과 BSD를 보게 되면 필터길이가 13일 때 SNR도 높으면서 BSD는 가장 낮은 실험 결과를 보여준다. 이러한 실험 결과를 정리한 것이 <표 1>이다. <표 1>에서 보는 바와 같이 각 밴드마다 최적화된 학습률과 필터길이가 다양한 것을 확인할 수 있다.

<그림 10>은 전대역 프로스트와 필터뱅크 프로스트, 그리고 <표 1>의 학습률과 필터 길이를 사용한 최적화된 필터뱅크 프로스트의 SNR과 BSD 결과를 보여준



(a)



(b)

<그림 10> SNR과 BSD 성능평가 결과; (a) SNR 결과, (b) BSD 결과
 (◆ : 전대역 프로스트, ● : 필터뱅크 프로스트, ■ : 최적화된 필터뱅크 프로스트)

다. 실험용 데이터의 수집 환경 및 조건은 <그림 6>과 동일하며, 목적 신호는 훈련용 데이터에서 사용하지 않은 신호를 사용하였고, 잡음은 TV 방송을 사용하였다. 전대역 프로스트는 최적화 실험에서 사용했던 방법과 같은 방법으로 실험하여 최적의 결과를 보여주는 학습률(0.007)과 필터 길이(152)를 사용한 결과이고, 필터뱅크 프로스트는 초기값으로써 각 밴드마다 학습률(0.01)과 필터 길이(17)를 사용하였다. 그림에서 보듯이 SNR과 BSD 모두 다양한 SNR 환경에 대해서 최적화된 필터뱅크 프로스트가 전대역 프로스트보다 평균적으로 SNR이 7 dB, BSD 값이 3 가량 상승해 세 가지 방법 중 가장 우수한 성능을 보여주었다. 낮은 SNR에서 성능의 차이가 크게 보이지 않는 것은, 잡음 신호를 최소화 시키면서 목적 신호도 왜곡이 커지기 때문에 발생한 것으로 예상된다. 반면 입력 신호의 SNR이 증가하면서는 그 성능의 차이가 확연히 드러남으로써 최적화된 필터뱅크 프로스트의 성능을 확인할 수 있다. 또한 실험용 데이터에서도 성능 향상으로 최적화된 값들이 실제 상황에서도 성능 향상을 가져올 것으로 생각된다.

<표 1> 최적화 실험으로 결정되어진 최적화된 필터길이와 학습률

주파수 대역	필터 길이	학습률	주파수 대역	필터 길이	학습률
0~1 kHz	29	0.004	4~5 kHz	9	0.001
1~2 kHz	21	0.01	5~6 kHz	13	0.01
2~3 kHz	9	0.01	6~7 kHz	21	0.01
3~4 kHz	5	0.01	7~8 kHz	5	0.04

5. 결 론

본 논문에서는 프로스트 빔포밍을 시간 영역에서 구현하고 QMF 기반의 필터뱅크를 구현하여 프로스트 빔포밍에 적용하였으며, 최적화 실험을 통해서 각 대역마다의 최적화된 학습률과 필터 길이를 결정하여 필터뱅크 영역에서 각 밴드마다 최적화된 필터 길이와 학습률이 다르다는 것을 확인하였다. 시간영역에서의 빔포밍은 주파수 영역의 빔포밍에 비해 필터를 갱신하는데 많은 정보를 이용해서 필터를 갱신함으로써 필터가 보다 더 최적화에 접근한다는 장점이 있다. 본 논문에서는 다상 QMF 구조를 통해 필터뱅크가 1 kHz의 대역을 갖도록 설계하여 수행시간 단축에도 효과를 가져왔다. 또한 각 필터뱅크 대역마다 학습률과 필터 길이를 조절해서 SNR과 BSD 측정을 통해 최적화된 학습률과 필터 길이도 결정하였다. 실험 결과를 통해 최적화된 필터뱅크 프로스트 빔포밍이 가장 우수한 성능을 보여준 것으로 확인하였다.

실험 환경이나 실험 장비가 변하였을 경우 최적화된 값들은 바뀔 수가 있다. 이러한 경우에서도 최적화된 값을 찾을 수 있는 연구가 필요하다. 또한 음성 신호 검출 기법으로는 잡음 섞인 환경에서 성능의 신뢰도가 떨어지며, 비정상 잡음 등이 검출될 수도 있기 때문에 방향 정보와 다채널 입력 신호를 이용한 목적 신호 검출 기법을 각 필터뱅크 밴드마다 수행하여 음성구간에서도 잡음만이 섞인 대역의 학습률을 조절하여 잡음을 제거하는 등의 연구가 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] ETSI Std. ES 202 212 V1.1.2, *Speech Processing Transmission and Quality Aspects (STQ)*, 2005.
- [2] S. Jeong, M. Hahn, "Speech quality and recognition rate improvement in car noise environments", *Electronics Letters*, Vol. 37, No. 2, pp. 800-802, 2001.
- [3] O. Yilmaz, S. Rickard, "Blind separation of speech mixtures via time-frequency masking", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 52, No. 7, pp. 1830-1847, 2004.
- [4] B. Veen, K. Buckley, "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering", *IEEE ASSP Magazine*, Vol. 5, No. 2, pp. 4-24, 1988.
- [5] J. Griffiths, W. Jim, "An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 30, No. 1, pp. 27-34, 1982.
- [6] O. Frost, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 60, No. 8, pp. 926-935, 1972.
- [7] P. Vaidyanathan, "Quadrature mirror filter banks, m-band extensions and perfect-reconstruction techniques", *IEEE ASSP Magazine*, Vol. 4, No. 3, pp. 4-20, 1987.
- [8] S. Wang, A. Skey, A. Gersho, "An objective measure for predicting subjective quality of speech coders", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 5, pp. 819-829, 1992.

접수일자: 2008년 5월 8일

게재결정: 2008년 6월 24일

▶ 박지훈(Ji-Hoon Park) : 교신저자

주소: 305-732 대전광역시 유성구 문지로 119번지

소속: 한국정보통신대학교(ICU) 공학부

전화: 042) 866-6206

E-mail: batho2n@icu.ac.kr

▶ 이성주(Sung-Joo Lee)

주소: 305-350 대전광역시 유성구 가정동 161번지

소속: 한국전자통신연구원 음성처리연구팀

전화: 042) 860-5732

E-mail: lee1862@etri.re.kr

▶ 홍정표(Jeong-Pyo Hong)

주소: 305-732 대전광역시 유성구 문지로 119번지

소속: 한국정보통신대학교(ICU) 공학부

전화: 042) 866-6206

E-mail: rookie@icu.ac.kr

▶ 정상배(Sang-Bae Jeong)

주소: 305-732 대전광역시 유성구 문지로 119번지

소속: 한국정보통신대학교(ICU) 공학부

전화: 042) 866-6285

E-mail: sdlee@icu.ac.kr

▶ 한민수(Min-Soo Hahn)

주소: 305-732 대전광역시 유성구 문지로 119번지

소속: 한국정보통신대학교(ICU) 공학부

전화: 042) 866-6123

E-mail: mshahn@icu.ac.kr