

논문 2012-50-3-16

# 가상 음원 이미징을 위한 향상된 진폭 패닝 기법

## (Enhanced Amplitude Panning for Virtual Source Imaging)

현 동 일\*, 박 영 철\*\*, 윤 대 희\*\*\*

(Dong-il Hyun, Young-cheol Park, and Dae Hee Youn)

### 요 약

본 논문에서는 스테레오 패닝 시스템에 대해 기존의 진폭 패닝이 가지는 문제점을 분석하였다. 이러한 문제점이 피드포워드 빗형 필터 형태로 발생하는 것을 관찰하고 이를 해결하기 위하여 피드백 빗형 필터를 사용한 스테레오 진폭 패닝 시스템을 제안하였다. 방향 인지에 대해 중요한 단서인 양이간레벨차의 차이가 최소가 되도록 하여 빗형 필터를 설계하였으며 제안된 시스템이 방향 인지에 관련된 대역에 대해 선택적으로 동작하도록 주파수 대역을 설정하였다. 제안된 시스템의 성능을 주관적 음질 평가를 통하여 검증하였다.

### Abstract

In this paper, the problems of the conventional amplitude panning method for a stereophonic panning system are analyzed. We observed that the distortion showed a feedforward comb filter response. As a remedy to this distortion, we propose a stereophonic panning system using a feedback comb filter. The comb filter is designed to minimize the difference between interaural level difference(ILD) of the proposed system and that of HRTF because ILD is most salient cue for the perception of the source direction. The proposed system is configured to operate selectively for the frequency band related to the source direction. The performance of the proposed system is verified by subjective listening tests.

**Keywords :** 진폭 패닝 (amplitude panning), 빗형 필터 (comb filter)

## I. 서 론

3차원 입체 음향 시스템 (3D audio system)은 청자의 주변에 가상의 음원을 위치시키는 것을 목적으로 하며 음악 뿐 아니라 게임, 가상현실 (virtual reality), 증강현실 (augmented reality) 등 다양한 분야에 적용되어 왔다. 3차원 입체 음향 시스템은 크게 헤드폰 환경과 스피커 환경으로 구분될 수 있다. 일반적으로 헤드폰 환경에서는 가상 음원 이미징 (virtual source imaging) 을 위해 머리전달함수 (HRTF: head-related transfer

function) 렌더링 기법이 사용된다<sup>[1]</sup>. 스피커 환경의 경우는 한쪽 채널의 출력이 반대 방향의 귀로 전달되는 대측성의 크로스토크(crosstalk)로 인한 왜곡이 발생하며 이를 제거하기 위한 방법으로 크로스토크 상쇄 (crosstalk cancellation)기법이 사용된다<sup>[2]</sup>. 또 다른 방법으로는 각 스피커에서 출력되는 음원의 진폭만을 조절함으로써 가상 음원을 이미징하는 기법인 진폭 패닝 (amplitude panning) 기법이 있다<sup>[3]</sup>. 진폭 패닝 기법은 구현이 간단하다는 장점을 가지지만 크로스토크로 인한 왜곡으로 인하여 여전히 음상의 방향이 의도된 방향보다 바깥방향으로 인지된다.

본 논문에서는 이러한 왜곡을 분석하고 이를 해결하기 위한 방법으로 빗형 필터 (comb filter)를 사용하였다. 제안된 방법은 크로스토크로 인하여 왜곡이 발생하는 대역에 대해서만 적용이 가능하며 결과적으로 크로스토크로 인한 방향 인지에 대한 왜곡을 개선할 수 있

\* 정회원, \*\*\* 평생회원, 연세대학교 전기전자공학과 (Department of Electrical and Electronic Engineering)

\*\* 평생회원, 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 (Computer and Telecommunications Engineering Division, Yonsei University)

접수일자:2012년11월26일, 수정완료일:2013년2월20일

다. 주관적 음질 평가를 통하여 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 기존의 진폭 패닝 방법과 그 문제점을 기술하였으며 빗형 필터를 이용하는 진폭 패닝 방법은 III장에 제안되었다. IV장에서 주관적 음질 평가 방법과 결과를 정리하고 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 스테레오 패닝을 이용한 가상 음원 이미징

### 1. 기존의 스테레오 패닝 법칙

두개의 전방 스피커를 사용하는 스테레오 진폭 패닝에는 일반적으로 두 가지의 법칙이 사용된다. 사인 법칙 (sine law)은 저주파 대역에서만 유효한 양이간 시간차 (ITD; interaural time difference)를 근사화하였으며 양이간 레벨차 (ILD; interaural level difference)는 고려되지 않았다<sup>[4]</sup>. 탄젠트 법칙 (tangent law)은 대측성의 스피커에서 귀까지의 전파경로를 근사화함으로써 유도되었다. 사인과 탄젠트 법칙은 각각 다음과 같은 공식으로 표현될 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$\frac{\sin \theta_s}{\sin \theta_o} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \tag{1}$$

$$\frac{\tan \theta_T}{\tan \theta_o} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \tag{2}$$

$\theta_s$ 와  $\theta_T$ 는 각각 가상 음원에 대해 인지되는 수평방위각을 나타내며  $\theta_o$ 는 그림 1에서 나타낸 것과 같이 전방과 스피커 간의 각도이며  $g_n$ 는 대응되는 채널에 대한 이득인자이다.

3차원 벡터기반 진폭 패닝 (VBAP; vector base amplitude panning)은 가상 음원을 정위시키기 위하여

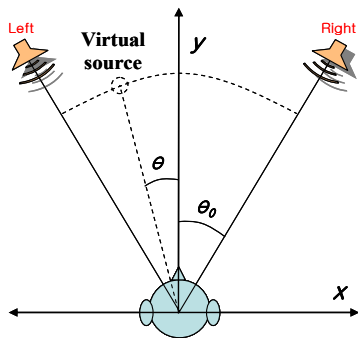


그림 1. 표준 스테레오 청취 설정  
Fig. 1. Standard stereophonic listening configuration.

세 개의 스피커를 사용하는 반면에 2차원 VBAP는 그 셋업이 스테레오 진폭 패닝과 유사하다<sup>[6]</sup>. 2차원 VBAP의 이득인자는 탄젠트 법칙을 만족한다.

### 2. 스테레오 패닝의 문제점

기존의 스테레오 진폭 패닝 기법은 각 채널에 대해 패닝 법칙을 따르는 이득을 곱해줌으로써 가상 음원을 위치시킨다. 패닝 법칙은 가상 음원을 중앙과 왼쪽 스피커 사이 또는 중앙과 오른쪽 스피커 사이에 음원을 위치시키려고 할 때 정확한 음원 정위가 어려움이 알려져 있다<sup>[7]</sup>.

그림 2는 스테레오 청취 설정에서의 동측 (ipsilateral) 및 대측 (contralateral) 성분을 나타낸다.  $L_i$ 와  $R_i$ 는 해당 방향에 위치한 스피커로부터 대응되는 귀에 전달되는 성분을 나타내며,  $L_c$ 와  $R_c$ 는 해당 방향에 위치한 스피커로부터 반대편에 위치한 귀에 전달되는 성분을 나타낸다. 스피커가 위치한 방향으로 인하여 동측과 대측에 각각 전달되는 신호들 간에는 ITD가 발생한다. 한쪽 귀에 대한 신호는 동측에서 들어오는 신호와 대측에서 들어오는 신호로 구성되며 이 때 ITD의 두 배에 해당하는 주기를 가지는 주파수 대역에서는 에너지 상쇄가 발생하게 된다.

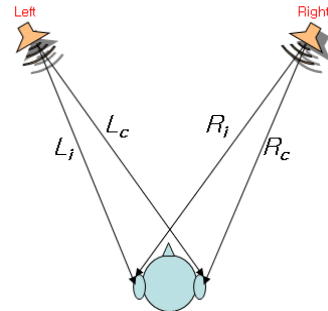


그림 2. 스테레오 청취 설정에서의 동측 및 대측 성분  
Fig. 2. Ipsilateral and contralateral components in stereophonic listening configuration.

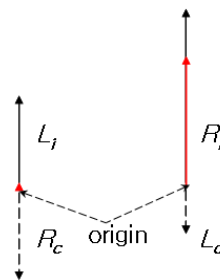


그림 3. 반위상 관계로 인한 에너지 상쇄  
Fig. 3. Energy cancellation caused due to anti-phase relation.

예를 들어 가상 음원이 중앙과 오른쪽 스피커 사이에 위치시키려고 할 때 왼쪽 스피커로부터의 동측 성분과 오른쪽 스피커로부터의 대측성분은 그림 3와 같이 위상은 반대이며 크기가 거의 같은 경우가 발생할 수 있으며 이 경우 왼쪽 귀에 전달되는 성분이 매우 작아지게 되어 결과적으로 ILD를 조절하기 어렵게 된다<sup>[8]</sup>.

이러한 에너지 상쇄는 반주기(T/2)가 ITD와 같은 주파수 대역뿐만 아니라 주기에 대해 3T/2, 5T/2와 같은 홀수배의 값들이 ITD와 같은 주파수 대역에서도 반복적으로 나타난다.

그림 4는 탄젠트 법칙에 의해 생성된 ILD를 나타낸 것이다. 탄젠트 법칙에 의해 결정된 이득이 곱해진 스

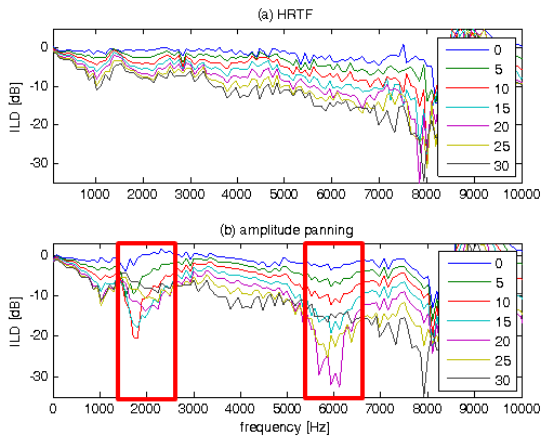


그림 4. 0~30도 방향에 대한 ILD:  
(a) HRTF, (b) 진폭 패닝  
Fig. 4. ILD corresponding to azimuth from 0 to 30 degree: (a) HRTF and (b) amplitude panning.

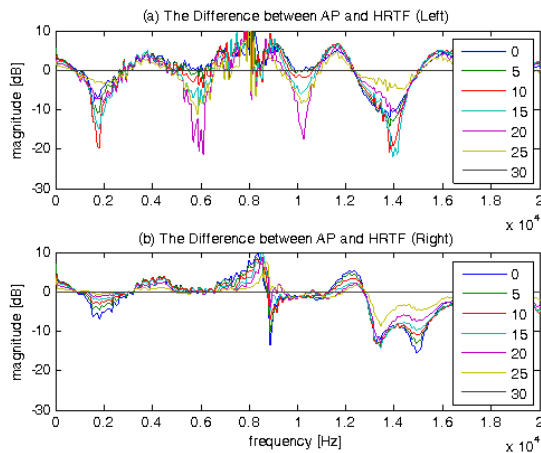


그림 5. 0~30도 방향에 대한 전달함수의 레벨 차이: (a) 왼쪽 귀, (b) 오른쪽 귀  
Fig. 5. Level difference of the transfer function between amplitude panning system and HRTF: (a) left ear and (b) right ear.

피커 출력에 대해 스피커의 방향 (30도)에 해당하는 머리관련 임펄스응답 (HRIR: head-related impulse response)을 이용하여 필터링하여 ILD를 계산하였다. HRIR은 MIT HRTF 데이터베이스에서 사용하였다<sup>[9]</sup>.

이에 대하여 각 채널에 대하여 이상적인 경우를 나타내는 HRTF와 스테레오 패닝의 경우의 전달함수에 대한 레벨 차이를 그림 5에 나타내었다. 이는 오른쪽 방향에 대한 결과로서 상대적으로 왼쪽 귀에 대해 큰 왜곡이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 크로스토크로 인한 왜곡이 피드포워드 (feedforward) 형태의 빗형 필터의 전달함수와 유사한 것을 확인할 수 있다.

기존의 연구에서는 대측성분을 동측성분에 대한 이득과 지연만으로 모델링할 수 있으며 이를 이용한 스피커 재생환경에 대한 크로스토크 상쇄기법을 제안되고 있다<sup>[10]</sup>.

$$C_{RL} = \alpha z^{-K} C_{RR} \quad (3)$$

스피커와 청취자간에 존재하는 전달함수 (room transfer function)에서 특히 반대방향으로 입사되는 대측성분에 해당하는 크로스토크는 의도된 방향으로 가상 음원 이미지를 왜곡시키는데 간섭으로 동작하는 문제점을 가지고 있다. 크로스토크 상쇄는 이러한 전달함수에 대해 역필터 (inverse filter)를 적용함으로써 스피커 환경에서도 헤드폰과 같은 가상 음원 이미지를 가능케 하는 기법이다. 크로스토크 상쇄기법은 기본적으로 HRTF가 제공되는 것을 전제로 하며 특히 개인에 따라 다른 특성을 가지기 때문에 반드시 개인에 해당하는 HRTF가 제공되어야 한다. 타인의 HRTF를 적용할 경우 음상정위의 정확성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 또한 일반적으로 HRTF는 5도 단위로 제공된다. 따라서 이러한 HRTF를 이용하는 크로스토크 상쇄 기법은 움직이는 음원을 표현하기 위해 인접 방향 간에 대한 보간이 필요하며 이는 상당한 연산량을 필요로 한다는 단점을 가진다. 역필터 계산 및 역필터링 또한 많은 연산량을 요구한다.

### III. 빗형 필터를 이용한 향상된 진폭 패닝 기법

#### 1. 제안된 진폭 패닝 시스템

II장에서 언급된 것과 같이 기존의 스테레오 진폭 패닝 기법은 대측성분으로 인해 피드포워드 빗형 필터 형태의 왜곡이 발생하며 이는 인지되는 방향을 변형시킨

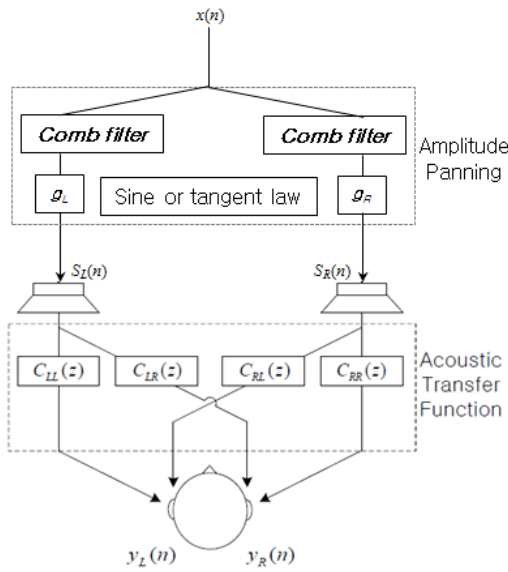


그림 6. 빗형 필터를 이용한 진폭 패닝 시스템  
Fig. 6. Amplitude panning system using comb filter.

다. 또한 기존의 크로스토크 상쇄 기법은 많은 연산량을 필요로 하기 때문에 본 논문에서는 기존의 스테레오 진폭 패닝 기법에 대해 피드백(feedback) 빗형 필터를 사용한 진폭 패닝 기법을 제안한다.

제안된 시스템에서의 빗형 필터는 상대적으로 왜곡이 심하게 발생하는 방향, 즉 음원이 정위되는 반대방향에만 적용되도록 하였다.

2. 빗형 필터 계수를 위한 비용함수 및 주파수 대역 백워드 빗형 필터는 다음과 같은 수식으로 표현되며 이때 계수  $a$ 와  $b$ 를 결정하기 위한 기준이 필요하다.

$$y[n] = ax[n] + by[n - K] \tag{4}$$

이 경우  $K$  값은 동측성분과 대측성분의 상호상관도가 최대가 되게 하는 시간지연으로서 44.1 kHz 샘플링된 HRIR에 대해 11 샘플로 얻어졌다.

빗형 필터를 이용한 성능 개선은 해당 주파수 대역의 주기(T)에 대해 T/2의 홀수배의 값이 ITD가 같아지는 주파수 대역에 대해서만 적용되어야 하며 나머지 대역에 대해서는 동일한 크기를 가져야 한다. 이를 만족하기 위해서는  $a$ 와  $b$ 의 합이 항상 1과 같아야 한다. 따라서 빗형 필터 수식은 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$y[n] = (1 - \alpha)x[n] + \alpha y[n - K] \tag{5}$$

스피커들이 좌우 30도에 위치되는 일반적인 재생환경에서 빗형 필터 형태의 왜곡은 1.5 kHz 이상의 대역

에 대해서 발생한다. Duplex 이론에서는 1.5 kHz 이하의 대역에서는 ITD가, 1.5 kHz 이상의 대역에서는 ILD가 방향 인지에 관련된 공간적 단서(spatial cue)임이 알려져 있다<sup>[11]</sup>. 크로스토크 상쇄와 관련된 가장 낮은 대역이 2 kHz 대역이기 때문에 ITD에 대한 고려는 무시될 수 있으며 따라서 제안된 시스템의 출력이 나타내는 ILD와 HRTF가 나타내는 ILD간의 차이가 최소화 되도록 하는 계수  $a$ 를 얻도록 하였다.

$$ILD_{diff} = E \left\{ \left( ILD_{HRTF} - ILD_{method} \right)^2 \right\} \tag{6}$$

수식 (3)에서는 대측성분을 단순히 이득과 지연만을 이용해 표현할 수 있다고 했지만 실제로는 머리 음영 효과(head shadow effect)로 인하여 주파수가 증가함에 따라 에너지가 감소하게 된다. 이로 인하여 첫 번째 크로스토크 상쇄 대역에 대해 필터 계수  $a$ 를 얻을 경우 두 번째 대역 이후로 오히려 ILD값이 음수로 얻어지는 문제점이 발견되었고 이는 가상 음원이 반대 방향에 정위될 수 있는 문제점을 가진다. 따라서 제안된 시스템에서는 두 번째 대역에 대하여 ILD값의 차가 최소화 되도록 필터 계수  $a$ 를 구하여 적용하였다.

그림 7은 빗형 필터를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우의 대해 각각  $a$  값과 ILD 차이를 나타낸다. HRTF가 제공되지 않는 나머지 각에 대해서는 선형 보간을 통한 값을 적용함으로써 움직이는 음원에 대한 처리를 해줄 수 있다.

빗형 필터 처리는 한쪽 채널에 대해서만 적용되기 때

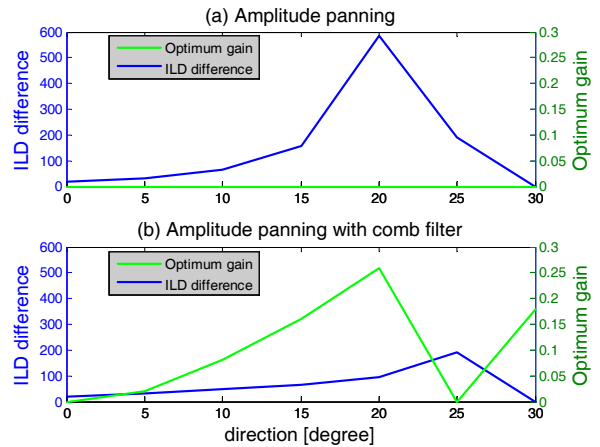


그림 7. 빗형 필터 사용에 따른 ILD 차이: (a) 진폭 패닝, (b) 빗형 필터를 사용한 진폭 패닝

Fig. 7. ILD difference due to comb filter: (a) amplitude panning and (b) amplitude panning with comb filter.

문에 기존의 패닝에서는 각 채널에 대해 샘플당 한 번의 곱셈만이 필요한 반면 제안된 시스템에서는 한쪽 채널에 대해서만 두 번의 곱셈이 필요하게 된다. 따라서 제안된 시스템은 샘플당 1.5번의 곱셈을 필요로 한다. 크로스토크 필터링 방법의 경우는 크로스토크 필터를 구하기 위한 연산을 제외하더라도 일반적으로 크로스토크 상쇄를 위해 50차 이상의 차수를 가지는 역필터링(inverse filtering)을 필요로 한다<sup>[12]</sup>. 따라서 제안된 시스템은 크로스토크 상쇄 기법에 비해 매우 낮으며 기존의 패닝과 유사한 수준의 연산량을 필요로 한다.

### 3. 스피커 위치 및 청자에 대한 고려사항

스피커 위치가 좌우 30도가 아닌 경우에는 크로스토크가 전달되는 시간이 달라지게 되며 빗형필터 형태의 왜곡도 달라지게 된다. 스피커의 방향에 따른 ITD는 다음과 같은 구형 머리 모델에 의해 계산될 수 있다<sup>[13]</sup>.

$$ITD = \frac{D}{2c} (a \sin(\cos \phi \sin \theta) + \cos \phi \sin \theta) \quad (7)$$

$\theta$ 와  $\phi$ 는 각각 수평방위각과 수직방위각을 나타내며  $D$ 는 구형 머리의 직경으로써 17.5cm 값을 사용한다.  $c$ 는 음속이며 344 m/sec로 얻어진다.

이 모델에서는 사람의 머리를 일괄적으로 하나의 값으로 모델링하고 있다. HRTF는 사람마다 다른 값을 가지며 따라서 ITD 또한 개인에 따라 다른 값을 가진다. 사람에 따른 ITD 분포를 확인하기 위하여 많은 사람들에게 대한 HRTF를 가지는 CIPIC 데이터베이스에 대하여 ITD를 분석하였다<sup>[14]</sup>. 그림 8은 45명에 대해 30도에 해당하는 ITD를 나타낸 것이다. 평균과 분산 값으로부터 더미헤드에 대해 얻은 값인 11을 기준으로  $\pm 1$ 의 범위 내에 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 실제 구현 시에는 사용자로 하여금 개별적으로  $\pm 1$  범위의 조절이 가능하게 함으로써 개인차에 의해 발생할 수 있는 문제점을 해결할 수 있다.

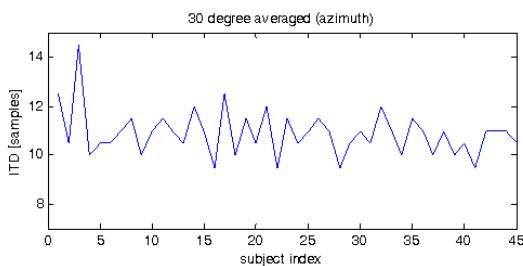


그림 8. 개인별 HRTF에 대해 분석된 ITD  
Fig. 8. Analyzed ITD of individual HRTF.

## IV. 성능 평가

제안된 시스템에 대한 성능을 검증하기 위하여 주관적 음질 평가를 수행하였다. 그림 1에서와 같은 재생환경에서 실험을 수행하였다. 3D 오디오에 대한 경험이 있는 17명이 실험에 참가하였으며 기존의 탄젠트 법칙

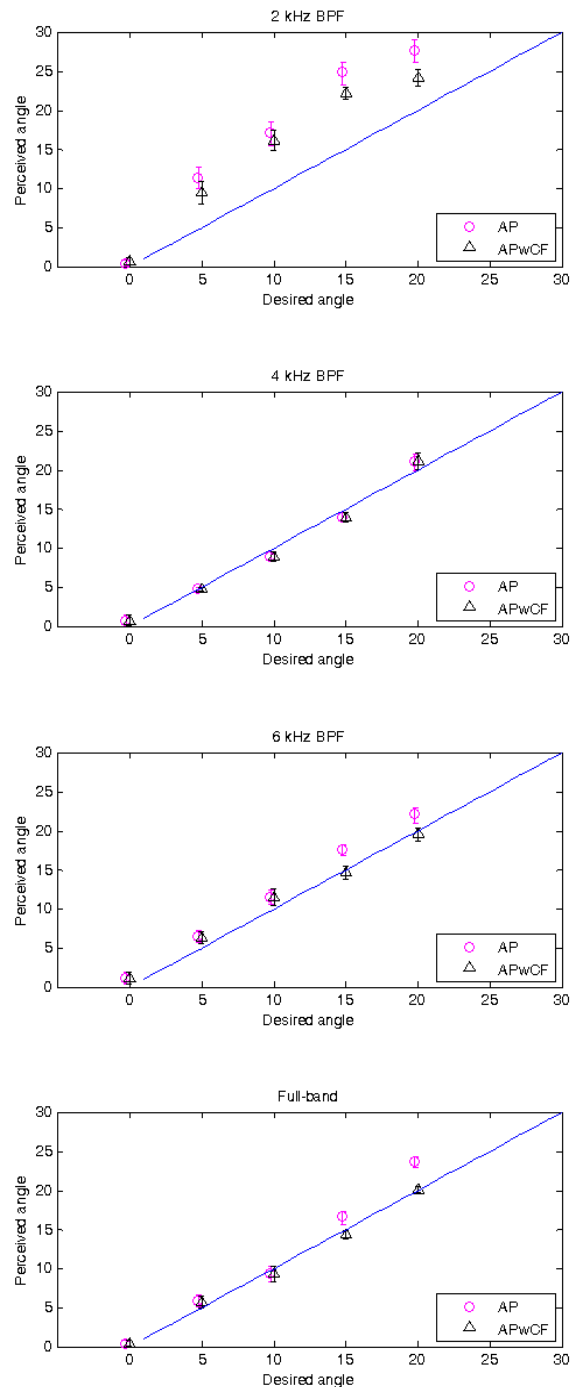


그림 9. 주관적 음질 평가 결과: 2, 4, 6 kHz 대역 및 전대역  
Fig. 9. Subjective listening test results: 2, 4, 6 kHz band and Full-band.

을 이용한 방법과 제안된 방법을 비교하였다. 두 방법은 임의순서로 제공되었으며 0도와 30도 사이에 5도 단위로 실제 스피커를 두고 청취자가 원할 때 재생하여 비교할 수 있도록 하였으며 인지된 음원의 방향을 답하도록 하였다.

30도 재생환경에서 크로스토크로 인한 상쇄가 발생하는 ILD 범핑(bumping)은 2 kHz 대역에서 처음 발생하며 두 번째 ILD 범핑은 6 kHz 대역에서 일어난다. 따라서 대역별 성능을 검증하기 위하여 백색 가우시안 잡음에 대하여 각 대역별로 필터링된 신호와 전대역 신호에 대하여 실험을 반복하였다.

그림 9는 실험 결과를 나타낸 것이다. 청취자들이 답한 방향에 대한 평균과 95% 신뢰구간을 함께 나타내었다. 2 kHz의 경우 성능향상이 가장 두드러졌으며 모든 방향에 대해서 기존에 비해 의도된 방향에 가깝게 인지되는 것을 볼 수 있었다. 4 kHz의 경우 예상한 것과 같이 신호를 변화시키지 않기 때문에 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 6 kHz의 경우 상대적으로 개선이 적었지만 여전히 제안된 방법이 더 나은 성능을 보였다. 최종적으로 전대역 신호에 대한 경우에도 제안된 방법이 기존의 방법보다 나은 성능을 보임을 확인할 수 있다.

추가로 빗형필터 처리를 이용한 패닝 시스템이 음질

표 1. 평가 샘플  
Table 1. Test samples.

sample	description
Music_1	music
Music_3	music
louis_raquin_15	speech
tel_mg54_speech	speech

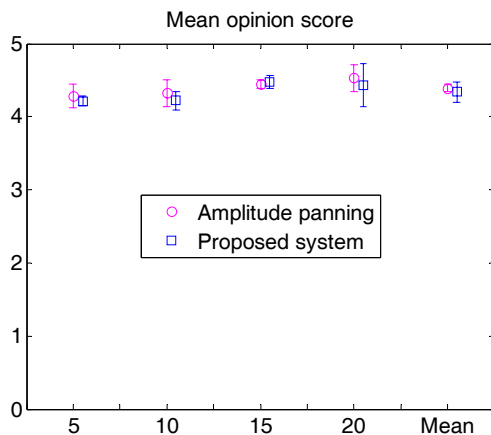


그림 10. MOS 평가 결과  
Fig. 10. MOS test results.

왜곡을 발생시키는 지를 확인하기 위하여 기존의 패닝 시스템과 함께 MOS (mean opinion score)를 평가하였다. 표 1에 표시된 것과 같이 음악과 음성을 포함한 4개의 샘플이 사용되었다. 동일한 환경에서 각 방향으로 렌더링된 음원에 대하여 실제 방향에 위치한 음원과 비교하여 평가하도록 하였다.

실험결과를 그림 10에 나타내었다. 피실험자들은 음질열화는 거의 느낄 수 없었다고 응답하였으며 따라서 음색차이를 기준으로 평가하였다. 모든 방향에 대해 기존의 시스템과 유사한 수준의 음질을 보이는 것을 확인할 수 있다.

### V. 결 론

기존의 진폭 패닝은 구현이 쉬운 반면에 크로스토크로 인하여 가상 음원의 위치가 스피커 쪽에 치우치게 되는 문제점을 가진다. 본 논문에서는 크로스토크로 인한 왜곡을 감소시키기 위하여 피드백 빗형 필터를 적용한 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 여전히 적은 연산량을 필요로 하며 움직이는 음원에 대해서도 적용이 용이한 장점을 가진다. 주관적 음질 평가를 통하여 제안된 시스템이 기존의 진폭 패닝보다 의도된 방향에 가상 음원을 가깝게 이미징하는 것을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] K. C. Foo, M. J. Hawksford, and M. P. Hollier, "Three-dimensional sound localization with multiple loudspeakers using a pair-wise association paradigm and embedded HRTFs," in *Proc. 104th Conv. AES*, May 1998, preprint 4745.
- [2] W. G. Gardner, 3-D audio using loudspeakers, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass, USA, 1997.
- [3] D. Griesinger, "Stereo and surround panning in practice," in *Proc. 112th Conv. AES*, May 2002, preprint 5564.
- [4] B. B. Bauer, "Phasor Analysis of Some Stereophonic Phenomena," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 33, pp. 1536-1539, 1961.
- [5] J. C. Bennett, K. Barker, and F. O. Edeko, "A New Approach to the Assessment of Stereophonic Sound System Performance," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 33, pp. 314-321, 1985.
- [6] V. Pulkki, "Virtual source positioning using vector base amplitude panning," *J. Audio Eng.*

Soc., Vol. 45, no. 6, pp. 456-466, 1997.

- [7] V. Pulkki and M. Karjalainen, "Localization of amplitude-panned virtual sources, part I: Stereophonic panning," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 49, pp. 739-752, 2001.
- [8] J. Blauert. *Spatial Hearing*. MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
- [9] B. Gardner, K. Martin "HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone," Perceptual computing technical report #280, MIT Media Lab, 1994,  
<http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>
- [10] S. Kim, D. Kong, and S Jang, "Adaptive Virtual Surround Sound Rendering System for an Arbitrary Listening Position, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 56, no. 4, pp. 243-254, 2009.
- [11] F. L. Wightman and D. J. Kistler, *Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments*. Princeton, NJ: Lawrence Erlbaum, ch. 1, pp. 1-23, 1997.
- [12] L. Wang, F. Yin, and Z. Chen, "A stereo crosstalk cancellation system based on the commonacoustical pole/zero model," *EURASIP J. on advanced in signal Process.*, vol. 2010, Feb. 2010
- [13] Larcher, V., and J.-M. Jot, "Techniques d'interpolation de filtres audio-numeriques. Application a la reproduction spatiale des sons sur ecouteurs," in *Proc. the 4th congress of the French Soc. of Acoust.*, 1997
- [14] V. R. Algazi, R. O. Duda, D. M. Thompson, and C. Avendano, "The CIPIC HRTF database," in *Proc. of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, New Paltz, NY, pp. 99-102, Oct. 2001.

저 자 소 개



현 동 일(정회원)

2005년 연세대학교 기계전자  
공학부 학사 졸업.

2007년 연세대학교 전기전자  
공학과 석사 졸업.

2013년 연세대학교 전기전자  
공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 오디오 신호처리, 3D 오디오, 오디오 부호화>



박 영 철(평생회원)

1986년 연세대학교 전자공학과  
학사 졸업

1988년 연세대학교 전자공학과  
석사 졸업

1993년 연세대학교 전자공학과  
박사 졸업

현재 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수  
<주관심분야: 음성 신호처리, 적응 신호처리, 오디오 신호처리>



윤 대 희(평생회원)-교신저자

1977년 연세대학교 전자공학과  
학사 졸업

1979년 Kansas State University  
석사 졸업

1982년 Kansas State University  
박사 졸업

현재 연세대학교 전기전자공학과 교수  
<주관심분야: 적응 신호처리, 음성 신호처리, 오디오 신호처리>