
3차원 음향 합성을 위한 수직면에서의 음상 정위 향상

김 동 현*, 정 하 영*, 김 기 만*

Enhancement of Sound Image Localization on Vertical Plane for Three-Dimensional Acoustic Synthesis

Dong-Hyun Kim*, Ha-Young Jeong*, Ki-Man Kim*

요 약

자유 공간에서 음원으로부터 사람의 귀로 음향적인 전달 과정을 표현하는 머리전달함수는 사람이 음원의 위치를 판단할 수 있는 중요한 정보를 포함하고 있으며, 이를 이용하여 실질적으로는 존재하지 않는 음원을 근사적으로 생성할 수 있는 입체 음향 시스템을 구현할 수 있다. 그러나 개인의 것이 아닌 일반적인 머리전달함수를 사용함으로써 인해 앞뒤 판정 오차, 고도 판정 오차와 같은 음상 정위 능력이 저하된다. 이 논문에서는 머리전달함수의 스펙트럼 notch 레벨을 증가시켜 수직면상에서의 앞뒤 판정 오차와 고도 판정 오차를 줄였다. 제안된 방법의 성능을 정지된 음원과 움직이는 음원에 대하여 주관 평가를 통해 증명하였다.

Abstract

The head-related transfer function (HRTF), which expresses the acoustic process from the sound source to the human ears in the free field, contains critical informations which the location of the source can be traced. It also makes it possible to realize multi-dimensional acoustic system that can approximately generate non-existing sound source. The use of non-individual, common HRTF brings performance degradation in localization ability such as front-back judgment error, elevation judgment error. In this paper, we have reduced the error on vertical plane by increasing the spectral notch level. The performance of the proposed method was proved through subjective test that it is possible to improve the ability to locate stationary/moving source.

* 한국해양대학교 전파공학과

접수일자 : 1999년 7월 16일

1. 서론

일반적으로 직접 측정하거나 이론적으로 모델링된 머리전달함수는 3차원 입체 음향의 핵심적인 요소로 사용되며 방향에 따라 인간의 청각 시스템이 어떻게 반응하는지를 나타낸다. 인간이 음원의 방향을 지각할 수 있는 것은 머리전달함수가 포함하고 있는 두 귀간 시간차와 두 귀간 레벨차등에 의한 것이며 음의 위치를 지각하는데 매우 중요한 역할을 한다[1]. 공간상에서의 음의 지각은 수평면과 수직면에서의 지각으로 나눌 수 있다. 수평면의 음상 정위는 머리전달함수의 두 귀간 시간차와 두 귀간 레벨차가 중요한 단서로 사용되지만 수직면의 음상 정위는 스펙트럼상의 특징이 더욱 중요한 단서로 사용된다. 이러한 스펙트럼의 특징은 머리전달함수를 측정하거나 모델링할 때 사람의 몸통, 어깨, 머리에 의한 반사와 굴절, 그리고 외이에서의 필터 효과인 귓바퀴 응답에 의한 것이다[1,2].

정확한 음상 정위를 갖는 머리전달함수 필터를 설계하기 위해서는 청취자 개인의 머리전달함수를 사용하는 것이 가장 바람직하나 다른 사람의 머리전달함수를 이용하여 필터를 설계함으로써 많은 오차가 발생하게 되며, 특히 수직면상의 음상 정위에 있어서는 앞뒤 판정 오차, 고도 판정 오차와 같은 문제가 발생한다.

최근 Zhang[4]등은 좌우 방향의 음상 정위 능력을 향상시키기 위하여 머리전달함수의 모든 주파수 대역에서 스펙트럼 notch 레벨을 증가시키는 방법을 제시하였다. 그러나 이 방법 역시 전 주파수에 대해 같은 비율로 스펙트럼 notch 레벨을 증가시킴으로써 음이 왜곡되는 착색(coloration)현상이 발생하는 문제점이 있다. 따라서 음의 착색현상이 발생하지 않도록 스펙트럼의 차를 증가시키는 주파수의 범위를 최소한으로 줄일 필요가 있다. 앞뒤 판정에서는 저주파대, 즉 2kHz이하에서 나타나는 피크와 notch들이 음의 정면과 후면 정위에 대한 정보를 포함하고 있으며, 고도 판정에서는 특히 5kHz -10kHz가 중요한 단서를 제공한다는 것이 알려져 있다[2].

이 논문에서는 머리전달함수의 스펙트럼 notch 레벨을 증가시켜 수직면상에서 음상이 정위될 때

발생하는 앞 뒤 판정 오차, 고도 판정 오차를 최소화시키고 음원에 대한 음상 정위 능력을 향상시켰다. 이때 스펙트럼 차를 증가시키는 주파수의 범위를 기존의 방법과는 달리 일부 대역으로 한정하여 음의 착색 현상이 발생하지 않도록 하였다. 제안된 방법의 성능을 검증하기 위하여 정지 음원과 움직이는 음원에 대하여 청취 실험을 수행하였고 기존의 방법과 비교하였다.

II. 수직면상에서의 음상 정위 향상

본 논문에서 제안된 머리전달함수의 스펙트럼 차를 증가시키는 방법은 다음과 같다. $H_p(f)$ 는 임의의 P 방향에서 머리전달함수라고 할 때 스펙트럼 차를 증가시켜 음상 정위를 향상시킨 머리전달함수 $H'_p(f)$ 는 다음과 같다.

$$H'_p(f) = W_p(f) H_p(f) \dots\dots\dots(1)$$

여기서 $W_p(f)$ 는 주파수 함수로써 주파수 범위는 5kHz -10kHz이고 가중치로 사용된다. 이 가중치는 식 (2)에 의해 구해진다.

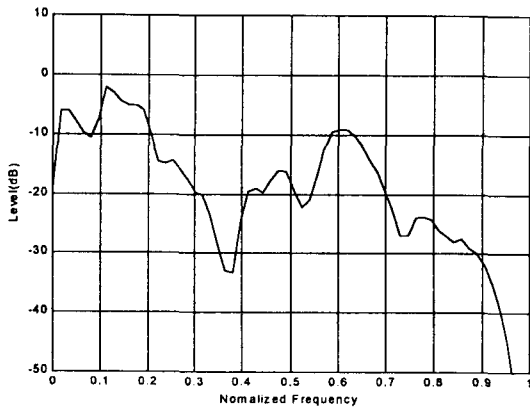
$$W_p(f) = |\widehat{H}_p(f)|^{m(f)} \dots\dots\dots(2)$$

$$\widehat{H}_p(f) = H_p(f) / \max_j |H_p(f)| \dots\dots\dots(3)$$

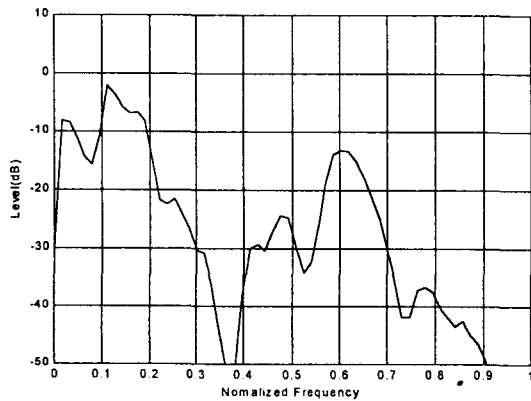
(1), (2)식에 의해 $H_p(f)$ 의 주파수 성분 중 상대적으로 큰 값은 $W_p(f)$ 에 의해 변화가 거의 없는 반면, 상대적으로 작은 값을 갖는 성분은 크기가 감소하게 된다. 기존의 방법의 경우 상수 $m(f)$ 는 주파수의 함수가 아닌 전 주파수 대역에서 일정한 값이었다. 그러나 제안한 방법에서는 $m(f)$ 값도 주파수의 함수인 가중치로 5kHz -10kHz에서만 상수 값을 가지며, 반복적인 실험을 통해 구한 결과 약 0.5 ~ 0.7 에서 최적의 값을 갖는 것으로 확인되었다.

제안된 방법을 적용한 경우 머리전달함수의 변화를 고찰하였다. 이때 사용된 머리전달함수는 미국의 MIT 대학 Media Lab.에서 측정된 것으로 44.1kHz의 표본화 주파수를 가지며 128개의 샘플 수를 갖는다[3]. 그림 1은 수평 0도, 고도 60도에

서 측정된 머리전달함수와 이 머리전달함수를 제안된 방법을 이용하여 5kHz -10kHz 대역에서 0.6의 $m(f)$ 값을 가지고 스펙트럼 차를 증가시켜 음상 정위를 향상시킨 머리전달함수를 나타낸 것이다. 그림 1은 측정된 머리전달함수에 비해 제안된 방법의 경우 스펙트럼상의 특징인 피크와 notch들이 분명해지는 것을 보여준다.



(a)



(b)

그림 1. 수평각 0도, 고도각 60도에서의 머리 전달함수, (a) 측정 데이터, (b) 제안된 방법을 이용한 경우.

III. 청취 실험 및 결과 고찰

제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 측정된 머

리전달함수와 전 주파수대역에 걸쳐 스펙트럼 차를 증가시킨 머리전달함수, 그리고 제안된 방법들을 고도와 앞뒤 판정의 정확도에 대하여 비교 청취 실험을 수행하였다.

피실험자들을 통해 정지해 있는 음원과 움직이는 음원에 대한 음상 정위 능력을 평가하였다. 실험에 참가한 피실험자는 모두 15명으로 남자 10명, 여자 5명으로 두 실험 모두 참가하였고 이들은 모두 입체 음향에 대한 사전지식이 없는 사람들이었다. 실험에 사용된 음원은 무향실에서 녹음된 5초 가량의 남자음성(16bit, 44.1kHz)과 연속적 클릭음(16bit, 44.1kHz)이다. 그림 2에 나타낸 것과 같이 각 음원은 머리전달함수와 콘블류션되어 왼쪽과 오른쪽 신호를 만든다. 생성된 음은 디스크에 저장한 뒤 헤드폰을 통해 들려주고 주어진 용지에 답하도록 하였다.

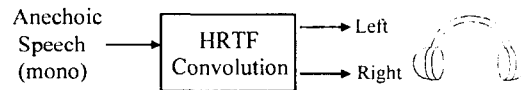
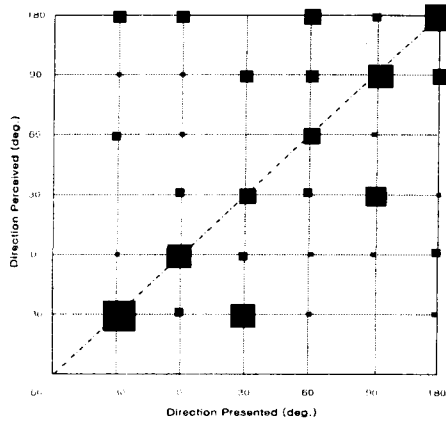


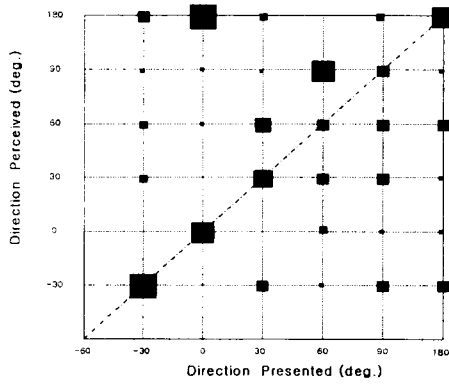
그림 2. 청취 실험용 데이터 생성 과정.

첫 번째 실험은 일반적 머리전달함수와 전주파수 대역에 걸쳐 스펙트럼 차를 증가시킨 머리전달함수, 그리고 제안된 방법인 최소한의 범위만 스펙트럼 차를 증가시킨 머리전달함수를 정지해 있는 음원에 대한 정위 능력 실험이다. 먼저 피실험자들에게 수회에 걸쳐 고도 변화를 익히게 한 후 본 실험에 임하도록 하였고 청취 실험을 위한 고도는 정면을 기준으로 각각 -30°, 0°, 30°, 60°, 90°, 180° (또는 -90°)이다.

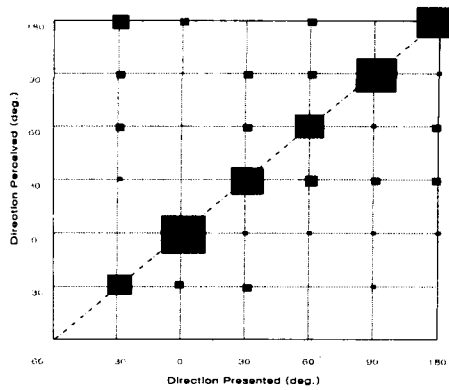
두 번째 실험은 움직이는 음원에 대한 정위 능력 실험으로 마찬가지로 피실험자에게 음의 변화를 익히게 한 후 실험에 임하였으며 청취 실험을 위한 궤도는 -30°~40°, 40°~-30°, 30°~90°, 90°~-30°이다. 그림 3은 정지해 있는 음원에 대한 정위 실험의 결과이다. 가로축은 헤드폰을 통해 들려준 음원의 위치이고, 세로축은 피실험자가 지각한 음원의 위치이다. 사각형의 크기는 음을 들려주었을 때 피실험자에 의해 지적된 음원의 위치의 횡수에 비례하도록 하였다. 따라서 대각선을 따라 큰 사각형이 나와야



(a)

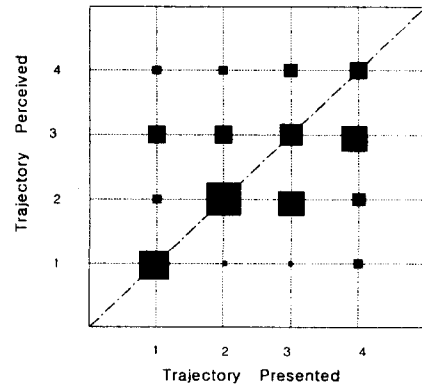


(b)

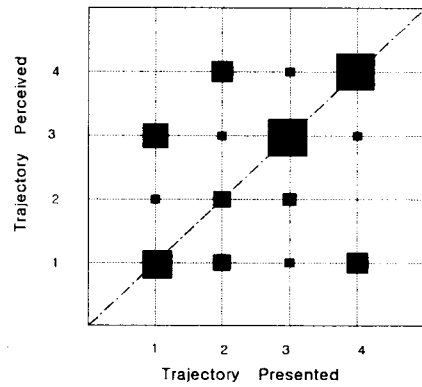


(c)

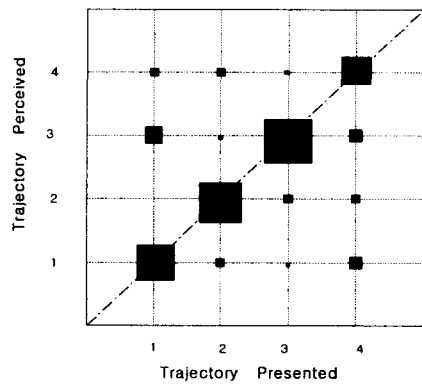
그림 3. 정지 음원에 대한 청취 실험 결과, (a) 측정된 머리전달함수를 사용한 경우, (b) 전주파수 대역에 대해 스펙트럼 차를 증가시킨 경우, (c) 제안된 방법.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 움직이는 음원에 대한 청취 실험 결과, (a) 측정된 머리전달함수를 사용한 경우, (b) 전주파수 대역에 대해 스펙트럼 차를 증가시킨 경우, (c) 제안된 방법.

좋은 결과라 할 수 있다. 그림 3의 (a)는 미국의 MIT media Lab.에서 측정한 머리전달함수를 사용하였을 때 결과로써 이 경우 앞 뒤 판정 오차, 고도 판정 오차가 매우 심하게 나타남을 볼 수 있다. (b)는 전 주파수 대역에 걸쳐 스펙트럼 차를 증가시킨 머리전달함수를 사용했을 때의 결과로써 이 경우는 앞 뒤 판정 오차, 고도 판정 오차는 줄어들었으나 음의 착색현상으로 인해 원음과 차이를 보여 피실험자들이 거부감을 나타내기도 하였다. (c)는 제안된 방법인 5kHz -10kHz 대역에서 스펙트럼 차를 증가시킨 머리전달함수를 사용했을 때의 결과로 이 경우, 앞의 결과들보다 앞 뒤 판정 오차, 고도 판정 오차가 많이 개선되었으며 음의 착색 또한 현저히 줄었다. 그림 4는 움직이는 음원에 대한 정위 실험 결과이다. 그림 3의 결과와 마찬가지로 제안된 방법을 사용하여 움직이는 음원에 대한 정위 능력을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 머리전달함수의 스펙트럼상의 낮치 레벨을 증가시켜 수직면상에서 음상이 정위될 때 발생하는 앞 뒤 판정 오차, 고도 판정 오차를 최소화시키고 움직이는 음원에 대한 정위 능력을 향상시켰다. 특히 스펙트럼 차를 증가시키는 주파수의 범위를 5kHz -10kHz 대역으로 한정하여 음의 착색이 발생하지 않도록 하였다.

청취 실험 결과, 일반적인 머리전달함수에 비해 앞 뒤 판정, 고도 판정, 움직이는 음원에 대한 정위 능력이 우수한 특성을 보였으며, 전 주파수 대역에 걸쳐 스펙트럼 차를 증가시킨 경우처럼 심한 음의 착색 또한 일어나지 않았다. 본 논문에서 제안한 5kHz -10kHz 대역에서 스펙트럼 차를 증가시킨 머리전달함수를 이용하면 수직면상에서의 음상 정위에 매우 유용하게 이용할 수 있으며 청각 특성에 대한 연구가 좀 더 이루어진다면 보다 향상된 음상 정위를 얻을 수 있을 것이라 기대된다. 앞으로 헤드폰 청취뿐만 아니라 스피커를 이용한 청취

시 음상 정위 능력 향상을 위한 연구가 이루어져야 할 것이며, 아울러 수평각에서의 음상 정위에 미치는 영향을 고찰하여야 한다. 또한 청취 실험시 백색 잡음을 사용하여 대역 제한 가중치 효과에 대한 보다 명확한 증명이 이루어져야 한다.

참고문헌

- [1] D. Begault, *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*, Academic Press, 1994.
- [2] F. Asano, Y. Suzuki, and T. Sone, "Role of spectral cues in median plane localization," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.88, no.1, pp.159-168, 1990.
- [3] Bill Gardner and Keith Martin, "HRTF Measurements of a KEMAR Dummy Head Microphone," *MIT Media Lab. Perceptual Computing-Technical Report #280*, May 1994.
- [4] Ming Zhang, Kah-Chye Tan, and M.H. Er, "Three-Dimensional Sound Synthesis Based on Head-Related Transfer-Functions," *J. Audio Eng. Soc.*, vol.46, no.10, pp.836-844, Oct. 1998.
- [5] E. Wenzel et al., "Localization using Nonindividualized Head-Related Transfer Functions," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.94, pp.111-123, 1993.
- [6] J. Huopaniemi and M. Karjalainen, "HRTF Filter Design Based on Auditory Criteria," in *Proc. Nordic Acoust. Meeting*, Helsinki, Finland, June 1996.
- [7] M. Kleiner, B.I. Dahlenback and P. Svensson, "Auralization-An Overview," *J. Audio Eng. Soc.*, vol.41, no.11, pp.861-875, Nov. 1993.
- [8] H. Moller et al., "Transfer Characteristics of Headphones Measured on Human Ears," *J. Audio Eng. Soc.*, vol.43, no.4, pp.203-217, Apr. 1995.



김 동 현(Dong-Hyun, Kim)
1997년 한국해양대학교 전파공
학과(공학사)
1999년 한국해양대학교 대학원
전파공학과(공학석사)
*주요관심분야 : 오디오 신호처
리, 입체음향, 전기음향



정 하 영(Ha-Young, Jeong)
1999년 한국해양대학교 전파공
학과 재학중
*주요관심분야 : 오디오 신호처
리, 입체음향, 전기음향



김 기 만(Ki-Man, Kim)
1988년 연세대학교 전자공학과
(공학사)
1990년 연세대학교 대학원 전자
공학과(공학석사)
1995년 연세대학교 대학원 전자
공학과(공학박사)

1995년~1996년 연세의료원 의용공학교실(Fellow)
1996년~현재 : 한국해양대학교 전파공학과 조교수
*주요관심분야 : 오디오 신호처리, 스마트 안테나,
소나 신호처리, 마이크로폰 어레이 시스템,
실시간 DSP 구현 등