한국음향학회지 제20권 제3호 pp. 98~103 (2001)

1/3-옥타브 대역통과필터를 이용한 음상정위기법 성능 향상

Improving a Sound Localization Using 1/3-octave Band Pass Filter

황 신*, 양 진 우**, 정 완 섭***, 김 순 협*
(Shin Hwang*, Jin-Woo Yang**, Wan-Sup Cheung***, Soon-Hyob Kim*)

*광운대학교 컴퓨터공학과, **춘천기능대학 전자과, ***한국표준과학연구원 음향진동그룹

(접수일자: 2001년 2월 13일; 채택일자: 2001년 3월 12일)

인간의 청각기관은 소리의 방향과 거리인지에 있어서 여러 가지의 정보들을 복합적으로 이용한다. 이러한 양 귀에 들어오는 소리세기의 차이, 위상의 차이, 그리고 주파수 스펙트럼의 차이 등의 정보들을 종합적으로 포함하고 있는 것이 머리전달함수이다. 본 논문에서는 이 머리전달함수를 이용한 3차원 음상정위를 위해 사람의 청각기관에 알맞은 1/3-옥타브 대역통과필터를 이용한 알고리즘을 제안한다. 먼저 측정된 머리전달함수의 음색왜곡 및 음질저하를 최소화하기 위해 1/3-옥타브 대역통과필터를 이용해 간략화시켰으며, 간략화된 데이터베이스를 크기와 시간의 부분으로 나누어 모듈을 구성하였다. 이의 성능평가를 위해 객관평가와 주관평가를 실시하였으며, 실험결과 85.7%정도의 음상정위의 성능 개선을 가져왔다.

핵심용어: 입체음향, 음상정위, 음향신호처리, 음향인지, 음향평가
투고분야: 음악음향 및 음향심리 분야 (8.2)

The binaural auditory system of human has the capability of differentiating the direction and distance of sound sources. This feature is well characterised in terms of the inter-aural intensity difference (IID), the inter-aural time difference (ITD) and/or the spectral shape difference (SSD) arising from the acoustic transfer of a sound source to the outer ears. This paper proposes an effective way of extracting the three sound perception factors (IID, ITD, SSD) from the head-related transfer functions (HRTF's) that depends on the direction and distance of the acoustic source from the listener. It includes the estimation method of the equivalent ITD and 1/3-octave band-based IID factors and their usage to locate a sound source in space. Subjective and objective tests were carried out to examine the effectiveness of the proposed methodology and its applicability to real sound systems. Those experimental results are illustrated in this paper.

Keywords: *Spatial sound, Sound-image localization, Sound processing, Sound perception, Sound assessment*
Ask subject classification: *Musical acoustics and Psychoacoustics (8.2)*

I. 서 론

인간 청각기관의 방향 인지능력에 관한 연구가 계속 행해져옴으로써 입체음향이라는 새로운 분야에 대한 연구가 진행되어오고 있다. 음향신호의 양 귀로 입사되는 소리의 차이들은 사람의 머리, 몸통 그리고 귓바퀴 등의 영향과 음원으로부터 양 귀까지의 거리차이에 기인하며, 이러한 요인들을 한꺼번에 포함하고 있는 것이 바로 머리전달함수이다[7]. 이를 위해 현재까지 MIT Media Lab.의 William

책임저자: 황 신 (hs9067@shinbiro.com)
139-701 서울시 노원구 월계 1동 447-1
광운대학교 컴퓨터공학과 정보통신연구실 506호
(전화: 940-5123; 팩스: 912-5123)

G. Gardner[1]를 비롯해 많은 사람들이 머리전달함수를 측정하려고 노력해왔고, 이미 측정된 머리전달함수들도 여럿 공개되어 있다[1-5]. 그리고, 머리전달함수의 방대한 데이터량과 그 분석의 어려움 등의 문제를 해결하기 위해 이들의 특징들만으로 간단히 합성, 표현하려는 시도들도 이루어져 왔다. 그러나 머리전달함수를 이용한 음장재현이나 음상제어 시스템을 구현하기 위해서는 원래의 신호와 컨볼루션을 해야하는데, 시간적으로 볼 때 이 길이는 그리 긴 것처럼 느껴지지는 않지만, 실제로 이 길이의 머리전달함수를 그대로 컨볼루션에 사용하면 매우 많은 계산량이 필요하다. 바로 이 점이 실시간 시스템 구현의 가장 큰 문제라고 할 수 있다. 또한 고주파에서 발생할 수 있는 머리 그림자 효과 (head shadowing) 현상으로 인해 측정 머리전달함수를 개선 없이 그대로 가져다 컨볼루션하는 기법은 음질저하와 음색왜곡이라는 문제점을 발생시킨다[2-3]. 이에 본 논문에서는 1/3-옥타브 대역통과필터 (1/3-octave band pass filter)를 이용하여 수많은 딥 (dip)과 노치 (notch)를 완화시킴으로서 음질저하와 음색왜곡이라는 문제점 개선을 그리고, 머리전달함수를 이용한 기존의 3차원 음장 재현 시스템에서 이용되는 기법인 시간 축 상에서의 단순한 컨볼루션이 아닌 주파수 축 상에서의 등화 (equalization) 기법을 비롯한 방법들에 대해서 알아보고, 이를 이용한 알고리즘의 구현과 성능평가 실험에 대해서 알아본다.

II. 머리전달함수의 측정 및 분석

머리전달함수 (HRTF: head-related transfer function) [13]는 자유 음장에서 어떤 특정한 위치에 있는 음원으로부터 사람 귀의 외이도 (ear canal)에 이르기까지의 음전파 (sound transmission) 특성을 나타내는 주파수축상에서의 전달함수를 의미하며, 사람의 머리, 귓바퀴 그리고 상반신 등에 의한 선형왜곡을 포함하고 있다. 삼차원 공간상에 존재하는 음상을 재현하기 위해서는 머리전달함수를 측정, 그 데이터를 이용하여 재현하게 된다. 그러나 측정된 머리전달함수는 특정주파수에서 피크와 노치가 과도하게 나타나고 전체적으로 리플이 심하게 발생하여 신호처리시 원음이 심하게 변질되어 나타난다. 이러한 점들을 고려할 때, 본 연구에서는 사람의 청각기관에서 볼 수 있는 주파수 대역폭의 특성과 유사한 1/3-옥타브 대역통과필터를 사용함으로써 리플이 심하게 발생하는 머리전달함수의 문제점들을 해결하고자 하였다.

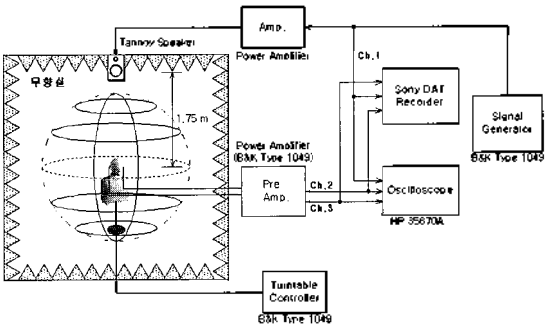
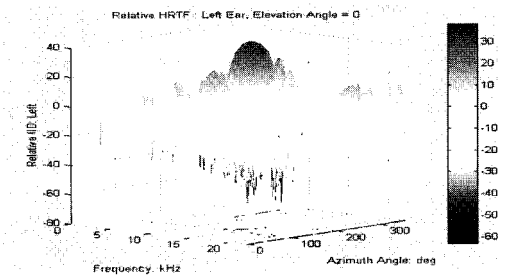


그림 1. 머리전달함수 측정 블록 다이어그램
Fig. 1. A block diagram for the measurement of HRTF

2.1. 머리전달함수의 측정

머리전달함수는 머리중심에서의 음압에 대한 귀에서의 음압의 비로 주어진다. 따라서 머리중심 위치에서의 음원의 고유한 음향특성을 측정하기 위해 그림 1에서와 같이 기준용 마이크로폰을 이용하여 스피커 시스템으로부터 발생되는 음향신호와 신호발생기의 백색잡음 신호간의 임펄스 응답을 측정하여야 한다.

또한 청취자들의 헤드폰 사용에 머리전달함수를 응용하기 위해서는 헤드폰의 주파수 특성을 측정해야 하며, 이를 위해 헤드폰과 신호발생기의 백색잡음간의 임펄스응답을 측정하여야 한다. 음원의 방위를 변화시키면서 수행



(a)

(b)

그림 2. 수평면내에서의 상대적인 머리전달함수 Level
(a) 왼쪽 귀의 경우 (b) 오른쪽 귀의 경우
Fig. 2. A level of relative HRTF by the each azimuth at the median plane, the elevation of 0°,
(a) A case of left ear, (b) A case of right ear.

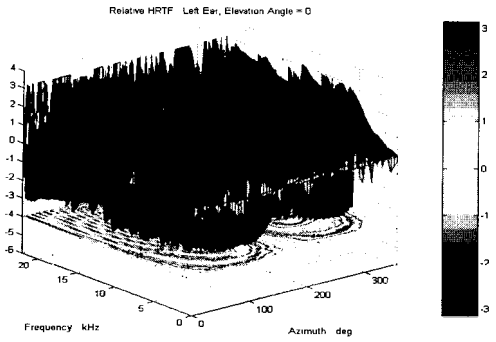
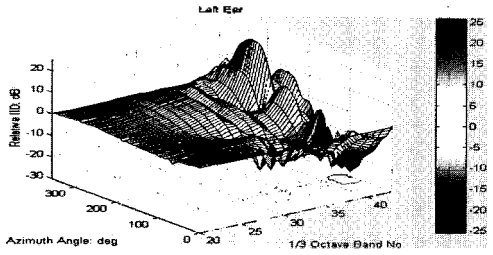
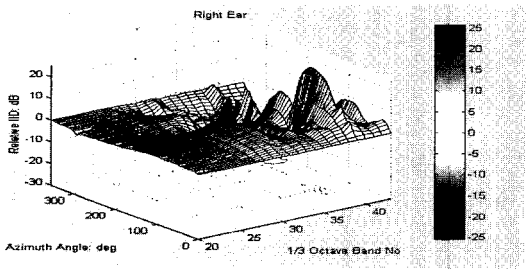


그림 3. 고도 0°에서의 측정 머리전달함수의 위상특성 왼쪽 귀의 경우

Fig. 3. A phase characteristic of the measured HRTF at the elevation of 0°, A case of left ear.



(a)



(b)

그림 4. 1/3-octave 대역통과필터를 이용한 IID (a) 왼쪽 귀 (b) 오른쪽 귀

Fig. 4. The interaural intensity difference using the 1/3-octave band pass filter, (a) The case of left ear, (b) The case of right ear.

되며, 수평면 0°에서 360°까지 72개 방향에서 입사하는 음에 대한 두 귀의 임펄스 응답을 측정하였다.

그림 2와 그림 3에서와 같이 측정 머리전달함수는 특정 주파수에서 피크와 노치가 과도하게 나타나고 전체적으로 리플이 심하게 발생하여 신호처리 시 원음이 심하게 변질되어 나타났다. 사실, 측정 머리전달함수는 음원 스피커의 음향특성 (음향출력 및 방향성 등), 양 귀 음압 측정용 마이크로폰의 전기적 그리고 음향학적 특성, 청음자의 체형 (양 귀, 머리, 어깨 및 상체의 크기, 형상)에 의한 반사, 회절, 산란 등에 의한 음향학적 특성, 그리고 실험실의 음향 특성치 (잔향 시간, 반사 및 흡음 특성)에 의한 복합적 영향인자들을 포함하고 있다.

이는 음악과 같은 음질이 요구되는 분야에서 머리전달함수 사용을 어렵게 만드는 가장 커다란 요인이다. 사실 외국에서는 머리전달함수가 20년 전부터 연구되기 시작했고, 이를 음악에 적용하려는 시도도 있었지만, 음질저하라는 요인 때문에 아직까지도 발전이 미비한 것이 사실이다.

2.2. 1/3-octave 대역통과필터를 이용한 공간 인자 추출

기준점 방위각 0°의 머리전달함수 $H_L(f:r_0,\theta_0,\phi_0)$과 $H_R(f:r_0,\theta_0,\phi_0)$에 대하여 임의의 공간에서 측정된 머리전달함수 $H_L(f:r,\theta,\phi)$과 $H_R(f:r,\theta,\phi)$의 상대적 양을 다음 식에 따라 환산한다.

$$R_{L,R}(f:r,\theta,\phi)=\frac{H_{L,R}(f:r,\theta,\phi)\cdot H_{L,R}(f:r_0,\theta_0,\phi_0)^*}{|H_{L,R}(f:r_0,\theta_0,\phi_0)|^2} \tag{1}$$

식 (1)에서 아래첨자 L,R은 좌측 혹은 우측을 의미하며 위첨자 *는 공액복소수를 표시한다. 그리고 기준점에 대한 선정은 스피커를 구성하는 방법에 따라 선정하며, 고도 $\phi_0=0^o$로 고정하고, 방위각 $\theta_0=0^o$과 $\theta_0=30^o$ 두 가지를 사용하였다. 측정된 머리전달함수를 위 식 (1)에 따라 환산하여 그 결과를 인간 청각특성, 즉 주파수 대역별 마스킹 (masking) 특성에 따라 공간특성인자를 추정한다. 즉, 이러한 방법이 1/3-옥타브 임계밴드 통과필터의 중심주파수를 이용하는 방법이다. 중심주파수를 f_c, 하한주파수와 상한주파수를 각각 f_L, f_H라 하면, 임의의 밴드 폭 내의 머리전달함수의 유효진폭은 다음과 같이 환산한다.

$$L_{L,R}(f_c)=\left\{\int_{f_L}^{f_H}|R_{L,R}(f:r,\theta,\phi)|^2df\cdot(f_H-f_L)\right\}^{1/2} \tag{2}$$

식 (2)를 이용하여 가청주파수 범위 (20Hz ~ 20kHz)에 대한 1/3-옥타브 임계밴드 통과필터의 중심주파수에 대한 좌·우 머리전달함수의 진폭을 각각 계산할 수 있다. 그리고 방위각과 고도에 따라 측정된 모든 머리전달함수들을 식 (2)에 따라 환산함으로써 새로운 머리전달함수의 진폭에 대한 데이터베이스, $\{L_L(f_c), L_R(f_c): 0^o\le\theta\le360^o, -60^o\le\phi<90^o\}$을 구축할 수 있다.

그림 4는 상대적인 머리전달함수를 1/3-옥타브 임계밴

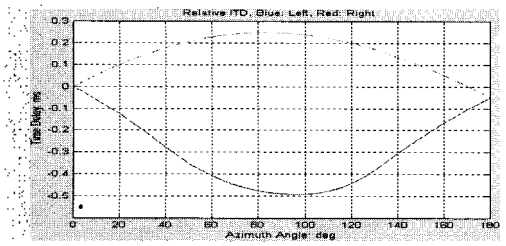


그림 5. 상대적인 음압 도달시간 고도 = 0°일 때
Fig. 5. The relative interaural time difference, A case of elevation of 0°.

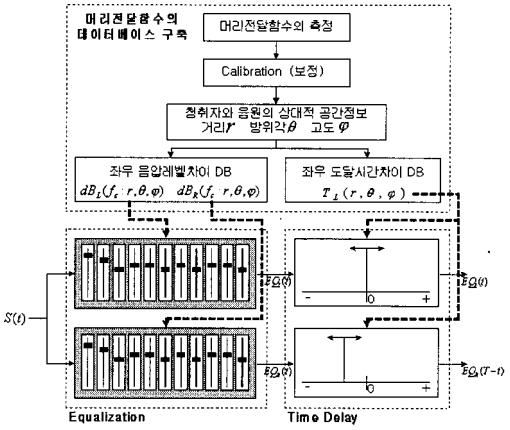


그림 6. 전체 시스템 구성도
Fig. 6. A schematic of the entire system.

드 통과필터의 연산과정을 통하여 구한 머리전달함수의 진폭 특성을 보여주고 있다.

2.3. 선형위상 특성을 고려한 음악도달시간 추정

식 1에 따라 연산된 상대적 머리전달함수의 위상성분에는 기준점에 대한 좌·우측의 음압 도달시간에 비례하는 선형위상성분이 존재한다. 이러한 선형적 위상성분을 이용하면 기준점에 대한 상대적 음압 도달시간을 매우 정밀하게 추정할 수 있다. 좌·우측의 상대적 머리전달함수의 위상을 $\Phi_L(f:r,\theta,\phi)$, $\Phi_R(f:r,\theta,\phi)$라하고 각각의 상대적 음압 도달시간을 τ_L, τ_R이라 하면, 다음 식 (3)에 주어진 최소자승법의 추정 연산으로부터 정확히 환산된다.

$$\tau_{L,R}(r,\theta,\phi)=\frac{1}{2\pi}\times\frac{\int_{f_1}^{f_2} f\cdot[\Phi_{L,R}(f)-\Phi_{L,R}(f_1)]df}{{f_2}^3-{f_1}^3} \tag{3}$$

위 식 (3)에서 f_1과 f_2는 상대적 머리전달함수의 선형위상특성이 잘 만족하는 하단 주파수와 상단 주파수를 각각 나타내며, $\{\Phi_L(f:r,\theta,\phi)-\Phi_R(f:r,\theta,\phi)\}$는 하단주파수 f_1에 대한 주파수 f에서의 상대적인 위상이다. 측정 머리전달함수에서 하단주파수는 $f_1=200Hz$, 그리고 상단주파수는 $f_2=1.25kHz$의 대역에서 상대적인 선형위상을 측정할 수 있었다.

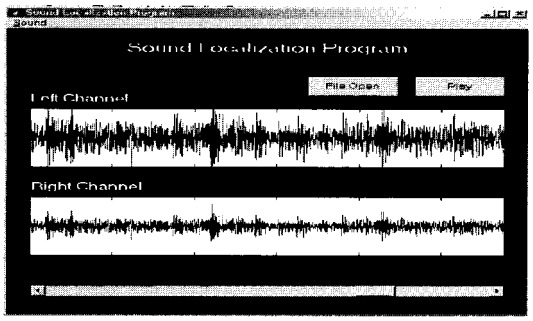


그림 7. 구현된 시스템
Fig. 7. The implement of algorithm.

그림 5는 방위각과 고도가 0°인 기준점을 선정하였을 때, 수평면에 위치한 음원의 방위각의 변화에 대한 좌·우측 귀에 도달된 상대적인 음압 도달시간차를 각각 보이고 있다.

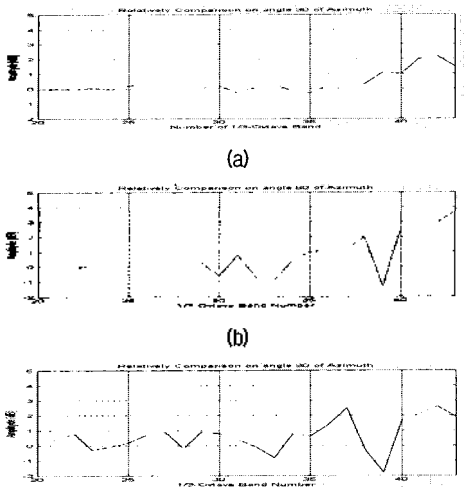
식 (1)의 상대적 위상정보와 식 (3)과 같은 연산과정으로부터 모든 측정 머리전달함수에 대한 좌·우측 귀의 음압 도달시간 $\{\tau_L(r,\theta,\phi),\ \tau_R(r,\theta,\phi)\}$에 대한 데이터베이스를 구축할 수 있다.

III. 음상정위 성능개선을 위한 알고리즘 구현

구현된 시스템은 크게 머리전달함수의 데이터베이스 구현부와 등화 (equalization)부, 시간지연 (time delay)부로 나뉜다. 이 가운데 머리전달함수의 데이터베이스 구현부는 앞의 3장에서의 결과에서처럼 오프라인으로 실험하여 1/3-옥타브 대역별로 구성하였으며, 등화부, 시간지연부는 온라인으로 처리된다.

위의 그림 6과 같은 구성도를 바탕으로 시스템은 MATLAB을 사용하여 구현하였다.

좌측 채널 (left channel)과 오른쪽 채널 (right channel)의 파형 부분은 선택된 방위각에 따른 등화와 시간지연 과정을 거친 후에 결과로 나타나는 파형의 응답을 보여주고 있다.



(a) (b) (c)

그림 8. 각 방위각에서의 상대적인 비교
(a) 방위각 30° (b) 방위각 60° (c) 방위각 90°
Fig. 8. The relative comparison at the each azimuth, (a) azimuth of 30°, (b) 60°, (c) 90°,

IV. 실험 및 고찰

본 논문에서 구현된 시스템의 음상정위의 정확성을 높이기 위해 객관평가실험은 신호처리 된 음을 HATS (head and torso simulator)로 녹음하여 각 방위각에 대해서 상대적인 음압을 비교하여 보았으며, 주관평가실험은 청취자 7명에 의하여 음의 정위에 대한 평가실험을 하였다.

4.1. 객관평가실험

우선 드라이 소스를 신호처리 과정을 거친 음을 재생하여 HATS의 귀에 헤드폰을 장착하여 주어진 방향성 정보가 녹음된 음의 방향성 정보와의 상대적인 비교에 의해 평가된다.

실험은 0°부터 355°까지 5°간격의 각 방위각에 대하여 실험을 행하였으며, 그림 8의 (a), (b) 그리고 (c)에서 보는 것처럼 각 방위각에서 상대적인 차이를 구해본바 별 다른 큰 차이없이 나옴을 알 수가 있었다. 그러나 고주파 부분 즉, 12~17kHz부분에서는 2~4dB 정도의 차이가 남을 알 수 있었다. 이것은 머리전달함수의 측정시 고주파부분에서의 머리 그림자 효과 (head shadowing) 현상을 고려하면 그 결과에 의해 사람이 들을 때, 저주파 부분에서보다는 고주파 부분에서 큰 차이가 났음을 알 수가 있었다. 또한 머리전달함수의 측정 시 양 귀간의 도달 시간차에 의해 방위각이 높아 갈수록 측정된 머리전달함수의 상대적인 차이가 커짐을 알 수가 있었다.

표 1. 주관평가 결과 분모: 자극횟수 분자: 판정횟수
Table 1. The result of subjective assessment.
Denominator: stimulus time, Numerator: judgment time.

제시 / 피험자	① 0°~360°범위에서 Random하게 제시	② 앞뒤의 판정은 고려하지 않고 좌·우만 고려
A	7 / 15	12 / 15
B	9 / 15	14 / 15
C	11 / 15	14 / 15
D	13 / 15	14 / 15
E	8 / 15	11 / 15
F	6 / 15	12 / 15
G	7 / 15	13 / 15
평 균	58 %	85.7 %

(15회 제시, 10도 이내의 오차는 맞는 것으로 평가)
- 방위각 전체 시계방향 0°~360°판정
- 앞·뒤 판정은 고려하지 않고 좌·우 방향 판별

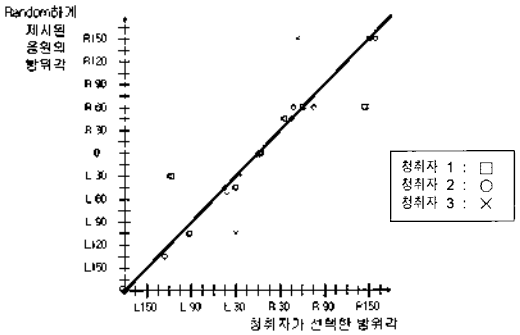


그림 9. Headphone 청취실험의 결과
음원을 제시할 경우 3명의 피험자의 판정
Fig. 9. The result of listening experiment using the headphone, A judgement in case of presenting three subjects with a sound source.

4.2. 주관평가실험

드라이 소스를 신호처리 과정을 거친 음을 재생하여 청취자의 귀에 헤드폰을 장착하여 주어진 방향성 정보를 청취자가 판정지에 방위각을 판단하여 기입함으로써 제시된 음원의 방위각과 판단된 방위각을 상대적으로 비교 평가하는 주관평가를 실시하였다. 우선 청취자의 음상정위에 대한 선호도 평가 실험을 행하였으며, 다음으로 기존에 공개된 MIT KEMAR 머리전달함수 데이터베이스를 이용한 제품화되어있는 사운드카드에서 제공하는 입체음향 솔루션 패키지 (3D solution package)와의 음질에 있어서 청취비교 평가실험을 행하였다. 청취자 7명 중 4명은 음향에 대한 지식을 조금이라도 접한 전문가를 그리고 3명은 일반인을 대상으로 삼았다.

헤드폰을 이용한 음상 정위에서는 음원의 종류에 따라 정위 성능에 편차를 보인다. 특히 임펄스 성 음원 (예로 총소리)은 음상 정위에 좋은 성능을 보였다. 표 1에서 제시

된 음원에 대해 7명의 피험자가 약 10°이내의 음원을 ①의 실험조건에서는 58%정도를 ②의 실험조건에서는 85.7%정도의 음원의 위치를 판별하였다.

헤드폰을 이용한 음상정위 실험 시에는 헤드폰의 청취시 기본적으로 내재되어있는 앞·뒤의 혼동, 즉 혼돈지역(cone of confusion) 현상을 가져왔다. 이러한 결과는 다른 연구자들에게서도 보고된 사실이다[1,4,6]. 특이할 만한 점은 앞·뒤의 혼동에도 불구하고 정중앙면 (0°), 그리고 정후면 (180°)의 경우 모든 피험자들이 공통적으로 정확한 판정을 하였다. 피험자 중에서도 특히 음악을 많이 듣거나 입체음향에 대해 사전지식이 있는 피험자의 경우는 좋은 정위 성능을 보이는데 이것은 가드너가 말한 전문가 (golden ear)의 경우 좋은 정위 판정을 하는 실험결과와도 일치한다[1].

4.3. 결론 및 고찰

음상 정위 프로그램 (Sound Localization Program)은 단일 음원, 즉 모노입력을 받아들여 측정된 머리전달함수의 데이터베이스, 즉 양 귀간 레벨 차이와 양 귀간 도달 시간차이에 의해 두 개의 채널로 만들어진다. 이때 레벨 차이의 데이터는 주파수 대역에서 1/3-옥타브 대역으로 구성된 이퀄라이저로서 제어되며, 시간차이의 데이터는 시간 축 상에서 샘플을 이동시킴으로써 구현했다. 이것은 음원을 시간 축 상에서 주파수 대역을 변환하고 다시 시간 축 상으로 변환해야만 하는 단점이 있다. 이 때문에 이미 하드웨어로 구현되어 나와있는 제품과는 크게 실시간 재현이라는 차이를 가지고 있다. 이런 단점을 가지고 있는 구현된 프로그램의 고음질의 성능을 평가하기 위해서 헤드폰을 이용한 객관 평가와 주관평가를 실시하였다.

먼저 객관 평가는 음원을 음상 정위 프로그램을 통하여 좌측 채널과 오른쪽 채널로 만들어 HATS를 통해 녹음을 하여 각 방위각에 따른 머리전달함수가 가지는 주파수 특성과 녹음된 두 개 채널의 주파수 특성을 서로 상대적으로 비교하는 방법이다. 이 때 각 방위각에서 상대적인 차이를 구해본바 별 다른 큰 차이없이 나옴을 알 수가 있었다. 그러나 고주파 부분 즉, 12~17kHz부분에서는 2~4dB 정도의 차이가 남을 알 수 있었다. 이것은 머리전달함수의 측정 시 고주파부분에서의 머리 그림자 효과 현상을 고려하면 그 결과에 의해 사람이 들을 때, 저주파 부분에서보다는 고주파 부분에서 큰 차이가 났음을 알 수가 있었다.

두 번째로 헤드폰을 이용한 주관평가를 행하였다. 여기에서 사용되는 음원은 크게 임펄스 성 음원, 즉 총소리와 백색잡음 그리고 음악을 사용하였는데, 먼저 실험에서는 임펄스 성 음원에서 85.7%정도의 음상정위 실험 결과를 가져왔다. 이 결과는 헤드폰의 청취시 기본적으로 내재되어있는 앞·뒤의 혼동, 즉 혼돈지역 현상을 고려하지 않았을 때, 정중앙면 (0°), 그리고 정후면 (180°)의 경우 모든 피험자들이 공통적으로 정확한 판정을 하였다.

본 논문은 일반적인 청취환경에서 듣는 스피커가 아닌 헤드폰의 재생시스템에서만 적용이 가능하다는 단점이 있다. 앞으로 스피커간의 상호간섭 제거 (crosstalk cancellation)와 트랜스오랄 필터 (transaural filter)에 대한 연구가 이루어져 일반적인 청취환경인 스피커 재생을 위한 시스템의 개발이 있어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Bill Garder and Keith Martin, "HRTF Measurements of a KEMAR Dummy Head Microphone" , MIT Media Lab. perceptual computing Technical Report #280, May, 1944
2. 정완섭, 황신, 방승범, 김순협, "머리전달함수를 이용한 공간음상정위의 문제점 고찰", 99 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 제 18권 제1(s)호, pp. 142-152, 1999.
3. 방승범, 황신, 정완섭, 김순협, "머리전달함수의 인지량적 평가방법과 이를 이용한 음상정위 기법의 연구", 99 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 제18권 제2(s)호, 1999.
4. 강성훈, "방송 음향" , 기전연구사, 1997.
5. "Sound Field" , Charlotte Street Business, Wakefield, West Yorkshire, WF1 1UH
6. Durand R. Begault, "3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia" , AP professional.
7. H. Moller, M. F. Sorensen, D. Hammershoi, C.B. jensen, "Head-Related Transfer Function of Human Subjects" , *J. Audio Eng.* sep.43(5), pp. 300-321, 1995.

저자 약력

● 황 신 (Shin Hwang)

1999년 2월 원광대학교 전자공학과 졸
2001년 2월 광운대학교 석사과정 졸업
2001년~현재 광운대학교 박사과정 재학 중

● 양 진 우 (Jin-Woo Yang)
한국음향학회지 제19권 제5호 참조
현재 춘천기능대학 전자과 교수

● 정 완 섭 (Wan-Sup Cheung)
한국음향학회지 제19권 제3호 참조
현재 한국표준과학연구원 음향진동그룹 책임연구원

● 김 순 협 (Soon-hyob Kim)
한국음향학회지 제19권 제5호 참조
현재 광운대학교 컴퓨터공학과 교수