

머리전달함수 측정시스템의 개발과 분석

Newly Designed HRTF Measurement System and its Analysis

이윤재*, 박영진, 박윤식
(Yun-Jae Lee, Youngjin Park, and Youn-sik Park)

Abstract: When we render 3D sound images using headphones or speakers, the main key of this technology is the Head-related transfer function (HRTF) database. Even though there are various HRTF databases, they have some drawbacks such as detrimental effects caused by imperfect measuring environment and insufficient measurement points. Moreover there is no database with Korean subjects. We are planning to develop the HRTF database for Korean. As a first step to establish the HRTF database aimed at Korean, the new HRTF measurement system with minimized aforementioned drawbacks is designed. In this paper, the newly designed HRTF measurement system is introduced and the overall effects caused by the diffraction of the apparatus, especially the headrest and backrest of the chair, are analyzed. The backrest of the chair does not distort the HRTFs significantly while the headrest makes significant distortion on the HRTFs and it could have significant effects on directional perception. We determined acceptable head rotation angle and head position of the subject for accurate HRTF measurement based on the experiments with B&K HATS. We conclude that the 3 degrees of the head rotation and the 1.5cm front/back/left/right shift of the head do not distort the HRTFs significantly.

Keywords: HRTF (Head-Related Transfer Function), SD (Spectral Distortion), 3D sound technology, head rotation, head position

I. 서론

가상입체음장을 구현하기 위해서는 머리주변 임의의 위치에 있는 음원에서 방사된 음파와 양 귀 고막에 도달하는 음파간의 전달함수를 사용하게 되는데, 이를 머리전달함수라고 한다. 가상입체음장을 구현하거나 그에 대한 연구를 하기 위해 가장 먼저 필요로 하는 것은 머리전달함수 데이터베이스이고, 이를 위해 많은 연구실 혹은 연구센터에서는 머리전달함수 데이터베이스를 구축하고 있다. 또한 머리전달함수를 측정하기 위해서 각 연구실 혹은 연구센터에서는 머리전달함수 측정장치를 개발했고, 기존의 머리전달함수 측정장치에는 몇 가지 단점이 존재한다. 첫째, 대부분의 기존의 장치의 경우에는 수평면에서 임의의 각도에 대한 머리전달함수를 측정하기 위해 피실험자가 앉아있는 의자를 회전하게 되는데[1-6], 이 때 피실험자의 몸과 머리가 움직일 수 있다. 둘째, 몇몇의 실험장치의 경우에는 하나의 스피커를 이용하여 머리전달함수를 측정하였다[2,4,6]. 조밀한 간격의 머리전달함수를 측정하기 위해서는 상당히 긴 시간이 걸리게 되는데, 하나의 스피커를 이용한 경우에는 실험시간이 상당히 길어져 조밀한 간격의 머리전달함수를 측정하기 어렵다. 마지막으로 거의 모든 기존의 장치는 피실험자가 실험에 직접 참여하지 않기 때문에[1-6], 실험 중에 피실험자의 집중력이 저하되어 졸거나 혹은 움직임이 발생하는 경우가 많으므로[7], 장시간 동안의 실험을 위해서는 피실험자가 실험에 집중할 수 있게 하는 요소를 첨가할 필요가 있다. 본 논문에서는 이러한 요소를 고려한 새로운 형태의 머리전달함수 측정장치를 제안하고자 한다.

II. 머리전달함수 측정시스템

1. 새롭게 제안된 머리전달함수 측정시스템

제안된 장치는 두 가지 측면에서 개념적인 설계를 실시하였다. 하나는 피실험자의 움직임을 제한하면서도 편안하게 실험에 참여할 수 있는 장치를 고안하자는 것이고, 다른 하나는 피실험자가 실험 중에 집중력을 유지할 수 있도록 피실험자가 실험에 직접 참여할 수 있도록 하자는 것이다. 두 가지 개념적인 설계를 바탕으로 고안된 장치는 그림 1과 같다. 피실험자의 움직임을 제한하면서도 편안하게 실험에 참여할 수 있는 장치를 고안하기 위하여 그림 1과 같이 머리를 움직임을 최소화 시키기 위한 머리고정대(headrest)와 몸의 움직임을 제한하기 위한 벨트를 사용하였다. 그리고 기존의 장치가 대부분 의자를 회전시켜가며 좌/우측 방위각의 머리전달함수를 측정했던 것과 달리 피실험자의 움직임을 최대한

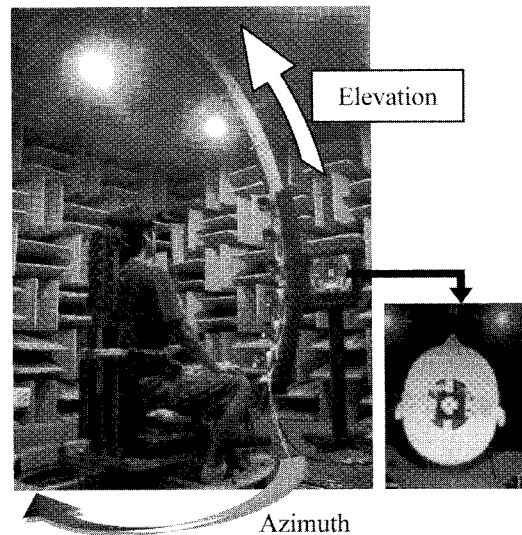


그림 1. 머리전달함수 측정시스템.
Fig. 1. The HRTF measurement system.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2009. 10. 26., 채택확정: 2009. 11. 22.
이윤재, 박영진, 박윤식: KAIST 기계공학과
(yjlee67@kaist.ac.kr/yjpark@kaist.ac.kr/yspark0117@kaist.ac.kr)
※ 본 연구는 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 국가지정연구실 사업(ROA-2005-000-10112-0)과 두뇌 한국 21프로젝트 일환으로 수행하였음.
※ 상기 논문은 KACC2009 학술대회에서 초안이 발표되었습니다.

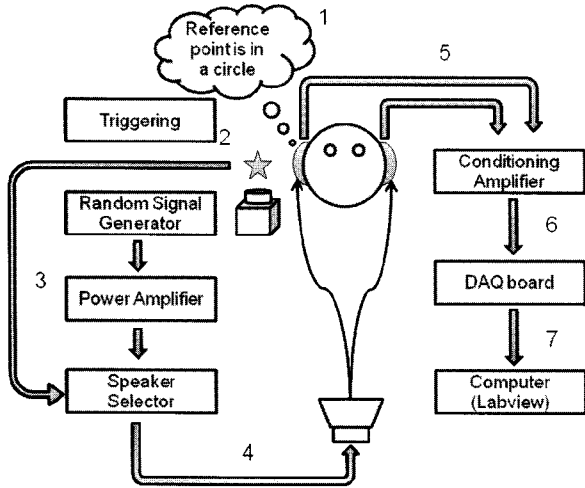


그림 2. 머리전달함수 실험과정.
Fig. 2. The procedure of the HRTF measurement.

제한하기 위해서 스피커 마운트가 달린 프레임이 회전하도록 설계하였다.

두 번째로 피실험자가 직접 참여할 수 있는 장치를 고안하기 위하여 카메라, 모니터, 스피커 분배기를 사용하였다. 피실험자가 모니터를 통해 자신의 머리 위치를 확인한 뒤, 머리의 위치가 허용범위 안에 위치하게 되면 피실험자는 자신의 손에 있는 버튼을 누르게 된다. 피실험자가 버튼을 누르게 되면 스피커 분배기가 작동하게 되고, 스피커 분배기는 맨 밑에 위치한 스피커부터 차례대로 1초간의 입력신호를 보내게 된다. 전파된 입력신호는 외이도 입구에 위치한 마이크로폰으로 측정하게 되며 랩뷰를 통해 자동으로 컴퓨터에 데이터가 저장되게 된다. 전체적인 실험과정은 그림 2와 같다.

2. Guided circle의 반지름 결정

새롭게 고안한 머리전달함수 측정 장치는 피실험자의 머리 위에 설치된 카메라를 통해 수평면에서 피실험자의 머리 위치를 좌표계의 중심에 맞추게 된다. 카메라는 머리 위 약 1.1m 위에 부착되어 있으므로, 피실험자 머리의 작은 위치변화까지 표현하는데 한계가 있을 수 있다. 따라서 카메라로 비추는 머리 위치 변화에 따른 머리전달함수의 왜곡 정도를 파악하고, 허용가능한 최소 범위를 정하고자 한다. 좌표계는 다음과 같이 정의하였다. 방위각(azimuth) 90°는 음원이 오른쪽 귀 방향으로 치우친 경우이며, 180°는 음원이 머리 뒤에 위치한 경우이다. 고도각(elevation)은 0°가 음원이 정면에 위치할 때이고, 90°가 머리 위에 음원이 위치한 경우, 180°는 음원이 머리 뒤에 위치한 경우를 의미한다. 머리전달함수는 B&K HATS를 이용하여 무향실에서 측정하였으며, 실험조건

표 1. 머리전달함수 측정 실험조건.

Table 1. The measurement conditions of the HRTFs.

Feature	Specification
Sampling frequency	48kHz
Spatial resolution	5 degree
NFFT (Number of FFT)	2048
Frequency resolution	About 23Hz
Source position	Median & horizontal plane

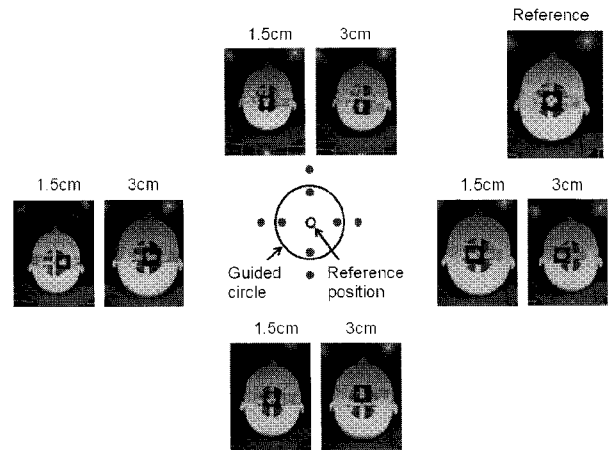


그림 3. 전후좌우로 이동시킨 B&K HATS의 모습.
Fig. 3. B&K HATS under each condition.

은 표 1과 같다. 실험은 B&K HATS을 좌표계의 중심을 기준으로 하여 전후 좌우로 1.5cm, 3cm를 이동시켜 가면 측정하였고, 모니터에 비춘 B&K HATS의 이동 모습은 그림 3과 같다.

머리전달함수는 가상입체음향을 구현하기 위해 필요한 전달함수이므로, 실험장치의 특성에 의해 발생하는 오류라 할지라도 사람이 방향을 인지하는 데 방해가 돼서는 안 된다. 따라서 실험 결과는 모니터를 봤을 때 머리중심이 정확히 좌표계의 중심에 놓은 경우를 기준으로, 각 조건에 대한 머리 전달함수를 2007년 일본의 Nishino에 의해 제안된 스펙트럼 왜곡(SD: Spectral Distortion)[8]을 통해 살펴보고, 중앙면과 수평면에서 각 조건의 최대 스펙트럼 왜곡을 표 2에 정리해 보았다.

중앙면과 수평면의 동측방향(ipsilateral direction)에서는 B&K HATS를 각각 1.5cm, 3cm 이동시킨 경우 모두 상당히 낮은 스펙트럼 왜곡, 약 1dB내외를 나타냈고, 전체적으로 사람이 인지할 수 있는 최소 음압차이인 1dB를 크게 넘지 않기 때문에 사람이 그 차이를 느끼기 힘들다는 것을 알 수 있다. 수평면의 대측방향에서도 B&K HATS를 각각 1.5cm, 3cm 이동시킨 경우 모두 최대 스펙트럼 왜곡의 차이가 최대 SD 값을 살펴보다도 수평면에서 사람이 방향을 인지하는 데 영향을 미치는 것으로 알려진 평균 6dB가 채 되지 않기 때문에, 방향을 인지하는 데는 큰 영향을 미치지 않을 것이라고 판단할 수 있다. 실험 결과를 통하여 피실험자의 머리 중심을 좌표계의 중심에 놓으려고 할 때, 약 3cm 이하의 오차

표 2. 수평면과 중앙면에서 최대 SD값.

Table 2. The maximum SD values under each condition.

		Median(L) (dB)	Median(R) (dB)	Contralateral direction(dB)	Ipsilateral direction(dB)
Left	1.5cm	0.8234	0.8358	3.6191	1.0527
	3cm	1.0557	1.2812	3.7437	1.2812
Right	1.5cm	0.7309	0.7425	2.0354	1.6071
	3cm	0.5773	0.8668	2.9943	0.9191
Front	1.5cm	0.9209	1.6127	3.3547	1.9522
	3cm	1.0152	1.7340	1.5324	1.1389
Back	1.5cm	0.7483	1.5775	5.6690	1.8657
	3cm	0.9365	1.2280	5.0529	1.7789

는 사람이 방향을 인지하는 측면에서 큰 차이가 존재하지 않는다는 것을 알았으므로 정확한 실험을 위하여 안전을 둔다고 할 때, 반지름 1.5cm의 원을 허용 가능한 범위로 정하였다.

III. 제안된 머리전달함수 측정장치의 영향

1. 머리고정대와 의자등받이에 의한 영향

의자등받이와 머리고정대가 머리전달함수에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 머리고정대 및 등받이가 없는 turn-table과 새로 제작한 머리전달함수 측정장치에서 B&K HATS의 머리전달함수를 측정하여 비교분석 해보았다. 모든 실험은 무향실에서 같은 조건하에 실시하였으며, 실험조건은 표 1, 그리고 각각의 실험장치에 대한 사진은 그림 4와 같다.

측정된 머리전달함수를 정량적으로 살펴보기 위해서 SD를 이용하여 데이터를 분석하였다. 이 척도를 가지고 머리고정대와 의자등받이에 대한 영향을 사람의 방향 인지 관점에서 살펴보면 그림 5와 같다.



(a) turn-table (b) w/ apparatus (c) w/o the headrest

그림 4. 각각의 조건에 따른 실험장치.
Fig. 4. B&K HATS under each condition.

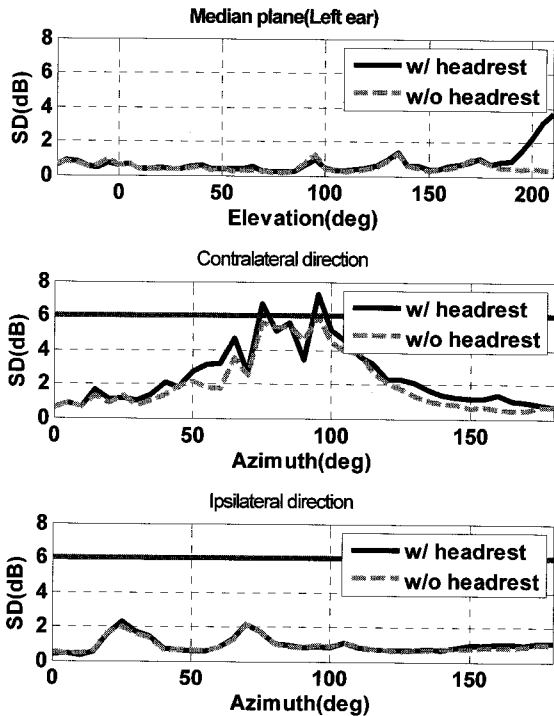


그림 5. 중앙면과 수평면에서 각 조건의 SD.
Fig. 5. SD under each condition in the median/horizontal plane.

수평면에서의 SD값이 평균적으로 6dB가 안되기 때문에 사람이 방향을 인지하는 데 미치는 영향이 미비하다는 것을 알 수 있다. 하지만 중앙면에서의 스펙트럼 왜곡을 보면 중앙면 고도각 195° 이상에 위치한 음원에 대해서 머리고정대에 의한 영향이 나타나는데, 이는 SD를 이용하여 분석하기는 어려운 측면이 있다. 따라서 머리 뒤쪽에 위치한 음원에 대한 머리전달함수를 측정한 후에는 머리고정대에 의한 영향을 신호처리를 통해 보정한 후 머리전달함수를 사용해야 한다.

2. 머리회전이 머리전달함수에 미치는 영향

새롭게 고안한 머리전달함수 측정 장치의 의자에 달린 머리고정대는 머리를 돌려싸고 있는 것이 아니라 머리 뒤를 받쳐주는 역할만 하기 때문에 실험 중에 발생할 수 있는 머리의 회전에 취약하다. 따라서 본 절에서는 수평면에서 피실험자의 머리가 회전할 때, 최대허용 회전각도를 제시하고자 하며, 이를 위하여, B&K HATS의 머리를 회전시켜가며 무향실에서 실험을 하였다. 실험조건은 위와 동일하며, 머리를 0°, 3°, 5°, 10°, 15°로 회전하면서 측정했다. 측정된 B&K HATS의 머리전달함수의 스펙트럼 왜곡은 그림 6과 같다.

전체적으로 머리를 더 회전시킬수록 스펙트럼 왜곡이 커지는 것을 볼 수 있으며, 머리를 5°도 회전시킬 때마다 SD값이 약 1dB씩 커지게 된다. 그리고 B&K HATS의 머리를 3° 회전시켰을 때, 중앙면에서 스펙트럼 왜곡이 현저하게 줄어든다. 따라서 실험 중에 수평면에서 발생할 수 있는 피실험자 머리의 최대허용 회전각도를 3도 이하로 정의하였으며,

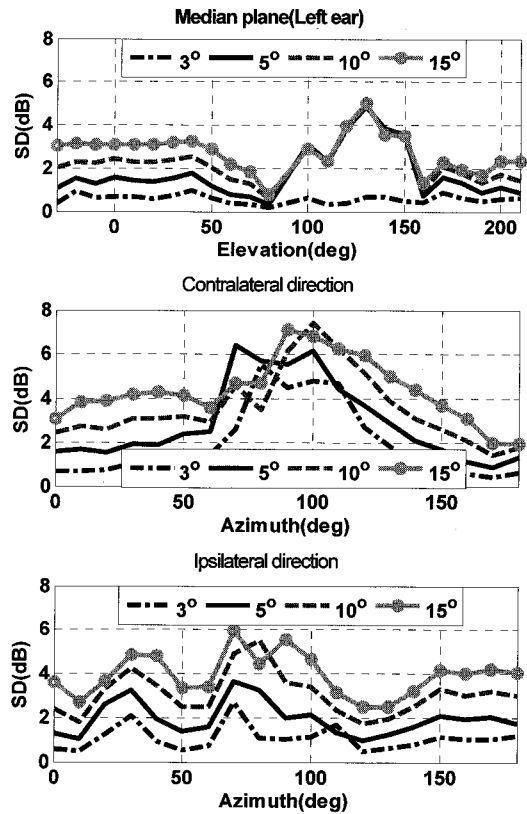


그림 6. 중앙면과 수평면에서 머리회전각도에 따른 SD값.
Fig. 6. SD values as the angle of the head rotation is varied in the median/ horizontal plane.

피실험자가 모니터를 관찰하여 수평면에서 자신의 머리회전이 3도 이상 발생했을 때에는 즉시 실험을 중단하고, 피실험자의 머리를 정 위치에 놓고 실험을 진행해야 한다.

IV. 결론

본 논문에서는 새로운 형태의 머리전달함수 측정시스템에 대해 소개하였다. 제안된 시스템은 실험 중에 발생할 수 있는 피실험자의 움직임을 효과적으로 제한하고, 피실험자가 실험 중에 집중력이 저하되어 파생되는 문제점을 보완하기 위해 피실험자가 직접 실험에 참여할 수 있도록 설계되었다. 제안된 장치는 음원이 고도각 195도 이상에 위치할 경우 머리고정대에 의한 음장의 왜곡이 사람이 방향을 인지하는데 영향을 미칠만한 크기로 발생하는 것을 알 수 있었고, 이는 향후에 신호처리를 통하여 보정해야 하며, 현재 이에 대한 연구가 진행 중이다.

또한 수평면에서 피실험자의 머리회전이 머리전달함수에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보았으며, 약 5도의 머리회전이 발생할 때마다 전 주파수대역에서 약 1dB씩 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, 정확한 머리전달함수를 측정하기 위해서는 최대 3도 이하로 머리회전이 발생해야 한다.

참고문헌

[1] V. R. Algazi, R. O. Duda, and D. M. Thompson, "The CIPIC HRTF database," *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, pp. W2001-1-4, Oct. 2001.

[2] S. Takane, D. Arai, T. Miyajima, K. Watanabe, Y. Suzuki, and T. Sone, "A database of Head-Related Transfer Functions in whole directions on upper hemisphere," *Acoust. Sci. & Tech.*, vol. 23, no. 3, 2002.

[3] E. Grassi, J. Tulsi, and S. Shamma, "Measurement of Head-Related Transfer Functions based on the empirical transfer function estimate," *Proc. of the 2003 International Conference on Auditory Display*, pp. ICAD03-119-122, July 2003.

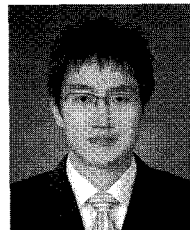
[4] X. BoSun, Z. XiaoLi, R. Dan, and L. ZhiQiang, "Head-related transfer function database and its analyses," *Sci. China-Phys Mech Astron.* vol. 50, no. 3, pp. 267-280, June 2007.

[5] M. Pec, M. Bujacz, and P. Strumillo, "Head related transfer functions measurement and processing for the purpose of creating a spatial sound environment," *Proc. of SPIE*, vol. 6937, pp. 69373D1-D8, 2007.

[6] IRCAM HRTF DATABASE : <http://recherche.ircam.fr/equipements/salles/>.

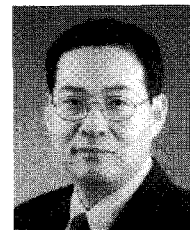
[7] K. A. J. Riederer, "Part Va: Effect of head movements on measured Head-Related Transfer Functions," *Proc. of 18th Intern. Congress on Acoustics ICA*, 2004.

[8] T. Nishino, N. Inoue, K. Takeda, and F. Itakura, "Estimation of HRTFs on the horizontal plane using physical features," *Appl. Acoust.* vol. 68, issue. 9, pp. 897-908, 2007.



이 윤 재

2008년 인하대학교 기계공학과 졸업. 2008년~현재 KAIST 대학원 기계공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 음향신호처리, 3차원 입체음향.



박 영 진

1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 동 대학원 석사. 1987년 University of Michigan 박사. 1987년~1988년 the university of Michigan research fellow. 1988년~1990년 New Jersey Institute of Technology assistant professor. 1990년~현재 KAIST 기계공학과 교수. 관심분야는 3차원 입체음향, 능동소음 및 진동제어, 차량능동제어, 제어이론, 강인제어, 시스템 규명 및 제어응용.



박 윤 식

1972년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1979년 Iowa state university 석사. 1981년 동 대학원 박사. 1981년~1984년 KAIST 기계공학부 선임연구원. 1984년~현재 KAIST 기계공학과 교수. 관심분야는 동역학, 진동 및 소음 제어, 구조물 동특성 변경법, 모달 해석, 시스템 규명.