

Neumann 더미헤드를 사용한 머리전달함수(HRTF)의 측정

서상원, 김재우, 이명진, 김용완
시스템공학연구소 감성공학연구부
대전시 유성구 어은동 1
sangweon@seri.re.kr

A Measurement of Head-Related Transfer Functions Using the Neumann Dummy Head

Sangwon Suh, Jaewoo Kim, Myungjin Lee, Yongwan Kim
Dept. of Human Computer Interface, SERI
1 U-Eun Dong, Yu-Seong, Taejon
sangweon@seri.re.kr

요약

시스템공학연구소 감성공학연구부에서는 수행중인 “멀티미디어 콘텐츠용 입체음향처리 S/W 개발” 과제의 일환으로 머리전달함수(Head-Related Transfer Function, HRTF)의 측정을 수행하였다. 본 논문에서는 무향실에서의 HRTF 데이터 측정 과정 및 얻어진 HRTF들에 대한 음상정위 청취 평가 결과에 대해 설명한다. 청취 평가에서는 피험자들이 측정된 HRTF와 MIT Media Lab의 KEMAR 더미헤드 HRTF를 사용하여 각 방향에 대해 필터링된 음원을 듣고 음상정위 주관 평가를 시행하였는데, 측정된 HRTF를 사용하여 양호한 음상정위 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

청취자가 음원의 위치를 인식하는 것은 소리가 머리, 몸통, 귀 등에서 반사와 회절을 일으켜 두 귀에 도달되는 음의 특성이 서로 다르기 때문이다. 이와 같은 특성은 음이 귀에 입사하는 방향

에 따라 달라지며, 자유음장(free field)에서 음원의 음압에 대한 두 귀에서의 음압의 비로 주어지는 머리전달함수를 측정함으로써 결정할 수 있다 [3,4]. 머리전달함수는 음이 두 귀에 입사하는 여러 각도에 대해 측정하여 DB화하여 이용할 수 있으며, 실내의 공간적 음향 특성을 헤드폰이나 오디오 시스템에 손쉽게 인가하기 위해 주파수 영역이 아닌 시간 영역에서의 임펄스 응답(Impulse Response)으로 하는 것이 바람직하다. 음원으로부터 고막까지 음이 전파될 때 음의 전달 경로에는 음이 입사하는 방향의 함수로 주어지는 부분과 입사 방향과는 무관한 부분으로 나눌 수 있다. 즉, 전자의 경우는 음원으로 부터 외에도 입구까지의 구간을 말하며, 이 구간에서의 음의 전파 특성은 주파수와 방향의 함수로 주어지며, 전달 함수는 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{P_2}{P_1}(\phi, \theta) = \frac{\text{막혀있는 외이도 입구에서의 음압}}{\text{머리 중심에서의 음압}}$$

여기서, ϕ 와 θ 는 음원의 위치를 나타내는 방위각과 고도각을 나타낸다.

2. 머리전달함수의 측정

HRTF 측정은 무향실에서 수행하였다. 무향실 벽체에는 흡음 효과가 뛰어난 유리 섬유가 부착되어 있는데, 이 유리 섬유는 저주파 영역에서의 흡음 효과를 증대시키기 위하여 방진 레일이 사용된다. 본 무향실은 췌기의 끝에서 끝까지의 유효 공간이 7.0(L)×4.5(W)×4.5(H)m이며, 75Hz 주파수 이상에서 99%의 흡음율을 나타내고 있기 때문에 100Hz 이상 주파수 대역에서의 머리전달함수 측정시 벽면에서의 반사에 의한 영향을 거의 무시할 수 있다.



그림 1. Neumann KU 100 dummy head

그림 1은 측정에 사용된 Georg Neumann GMBH사의 KU 100 더미헤드(dummy head)의 외형을 나타내고 있다. 측정 장치의 구성도는 그림 2와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 측정장치는 크게 스피커 시스템에 MLS신호를 가해 주는 구동부와 더미 헤드 내에 설치되어 있는 마이크로폰의 출력신호를 측정하여 임펄스 응답을 결정할 수 있는 계측부로 구성되어 있다. 구동부는 컴퓨터에 의해 제어되는 MLS신호 발생기로부터 나온 전기신호를 전력 증폭시키기 위한 전력 증폭기(B&K 2706)와 스피커에 인가되는 실효 전압을 측정하기 위한 디지털 전압계(Fluke) 및 오실로스코프 (HP 54601)등으로 이루어진다. 더미 헤드의 마이크로폰의 출력 신호를 검출하여 임펄스 응답을 측정하기 위한 계측부는 두 종류의 마이크로폰에 분극 전압을 인가하기 위한 두개의 전력 공급기신호 증폭기(B&K 2636), 컴퓨터 의해 제어되는 16bit A/D변환기가 내장된 MLS신호 처리기 및 주변기기들로 이루어진다.

신호 발생기에서 전력 증폭기로 입력된 65,535개의 Burst MLS신호는 스피커 시스템에 인가되며, 스피커는 무향실 내에서 더미 헤드를 향하여 음

파를 발생시킨다. 이때 스피커에 입력되는 실효 전압은 약 6 volt가 되도록, 전력 증폭기의 이득을 조정한다. 머리전달함수 측정에 사용되는 스피커는 점음원에 가까운 지향 특성과 측정 대상 주파수 대역에서 비교적 평탄한 특성 및 시간에 따른 음압 특성이 비교적 안정되어야 한다. 본 연구에서는 상기 특성들이 비교적 양호하며, 단일 유닛으로 구동 되는 Bose 101A 스피커를 사용하였으며, 음향 간섭을 최소화 하기 위해 스피커 전면에 있는 덕트는 밀폐시켰다. 이 스피커 시스템의 주파수 특성은 12kHz 부근에 notch가 있는 것을 제외하고 비교적 평탄한 특성을 가지고 있다. 이와 같은 주파수 특성은 단일 유닛 스피커로서는 대체적으로 양호한 편이며, 고주파로 갈수록 음압 감쇠가 심한 머리전달함수의 특성을 감안할 때 비교적 만족스럽다고 평가된다.

스피커 시스템에서 방사된 음향신호는 더미 헤드 내에 내장되어 있는 두 개의 마이크로폰에 입력되어 출력 전압을 발생시키게 된다. 본 연구에서 측정된 데이터는 두개의 마이크로폰의 출력을 동시에 측정된 왼쪽과 오른쪽의 HRTF DB이다. 마이크로폰의 출력 신호는 마이크로폰 전력 공급기와 신호 증폭기를 거쳐 분석기에 입력된다. 분석기에 입력된 신호는 16bit A/D 변환기를 거쳐 디

Elevation	Number of Measurements	Azimuth increments
-90	1	-
-40	30	12
-30	36	10
-20	36	10
-10	36	10
0	36	10
10	36	10
20	36	10
30	36	10
40	30	12
50	22	16
60	18	20
70	12	30
80	6	60
90	1	-

표 1. 공간상의 머리전달함수 측정 위치 수

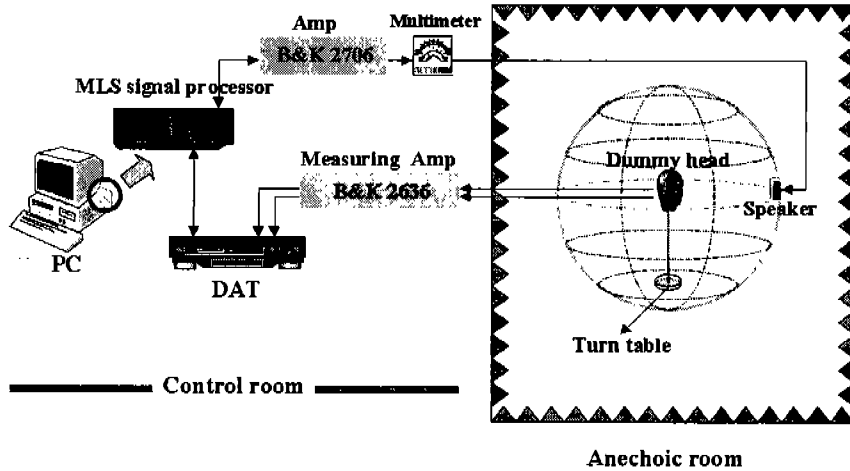


그림 2. 측정 장치의 구성도

지털 신호로 변환되어 처리된다. A/D변환기에 입력된 신호는 분해능을 향상시키고, 신호의 왜곡을 방지하기 위해 autoranging 기법에 의해 자동적으로 증폭 또는 감쇠 된다. 신호 발생기의 출력 신호와 마이크로폰에서 검출되어 신호 증폭기에 의해 증폭된 신호의 비로 주어지는 임펄스 응답은 MLS 분석기에 의해 결정된다. 이때 임펄스 응답은 32,768개의 MLS신호에 의해 결정되며 [1], 샘플링 주파수는 44.1kHz이다. 상기의 두 신호는 DAT(Sony TCD-D7)에 동시에 녹음하였다. (추후에 청감 실험을 위한 데이터로 활용) 상기와 같은 일련의 과정은 음원의 위치를 변화시키면서 수행되며, 본 연구에서는 총 372개 방향에서 입사하는 음에 대한 두 귀의 임펄스 응답을 각각 측정하였다. 표 1은 머리전달함수의 측정 갯수를 나타낸다. 표 1에 나타난 바와 같이 고도각은 -90° 에서 90° 범위에서 10° 간격으로 변화시켰으며, 고도각의 조정 오차는 $\pm 1.0^\circ$ 이내로 평가되었다. 각 고도각에서 방위각은 더미 헤드 가 장착된 Turn table(B&K 5997)를 시계 반대 방향으로 임의의 각도로 회전시켜 설정하였다. Turn table은 제어기(B&K5997)에 의해 자동으로 조정되며, 분해능은 1° 이다. 고도각과 방위각은 두 컷구멍의 중심을 잇는 축과 머리의 중심축이 만나는 점을 기준점으로 하여 이루어진다. 또한 방위각은 더미헤드 정면이 스피커를 향하고 있을 때가 0° 를 나타내며, 이 위치에서 더미 헤드를 시계 반대 방향으로 10° 회전시켰을 때를 방위각 10° 로 규정한다. 스피커 시스템과 기준점까지의

거리는 1.55m로 설정하였다. 스피커 시스템은 스테인레스 스틸로 이루어진 직경 3.5m빔에 부착하였으며, 음의 반사를 최소화하기 위해 빔의 모든 면을 흡음재로 마감하였다. 이 빔은 사각형 알루미늄 파이프에 의해 그림과 같이 지지되며, 파이프 면 역시 흡음재로 마감하였다. 그림 3은 머리 전달함수 측정을 수행한 무향실의 전경을 보여 준다.

이 무향실은 앞에서 설명한 바와 같이 유리 섬유를 썬기 형태로 만들어 사진과 같이 벽에 부착한 구조로 되어 있다. 사진 중앙에 Turn table위에 놓여 있는 더미 헤드가 보이고 사진 오른쪽에는 스피커 시스템이 빔에 부착되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한 빔의 모든 면은 음의 반사를 최소화하기 위해 흡음재로 덮여 있는 것을 볼 수 있다. 측정시 실내 온도는 측정 오차를 최소화하기 위해 $23^\circ \pm 2^\circ$ 로 유지시켰다.

3. 측정된 HRTF 데이터

머리전달함수는 앞절에서 정의한 것과 같이 머리 중심에서의 음압과 귀에서의 음압의 비로 주어진다. 따라서 머리 중심 위치에서의 음원의 고유한 음향 특성을 측정하기 위해, 앞 절에서와 같이 기준용 마이크로폰을 이용하여 스피커 시스템으로부터 발생하는 음향 신호와 신호 발생기의 MLS 출력 신호간의 임펄스 응답을 측정하여야 한다. 또한 헤드폰에 머리전달함수를 응용하기 위해서는 헤드폰의 주파수 특성을 측정해야 하며, 이를 위해 헤드폰과 신호 발생기의 MLS 출

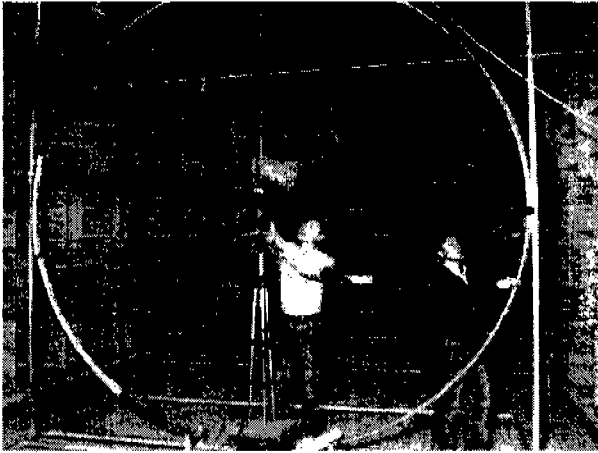


그림 3. 무향실에서의 머리전달함수 측정 모습

력 신호간의 임펄스 응답을 측정하여야 한다[1]. 측정된 임펄스 응답들은 다음과 같다.

- 스피커 시스템의 임펄스 응답
- 헤드폰의 임펄스 응답
- Neumann 더미 헤드외의 외이도 위치에서의 임펄스 응답

그림 4는 측정된 임펄스 응답으로부터 얻은 머리 전달함수의 예를 보인다. 음원이 더미헤드 정면에 있을 때 오른쪽 귀에서의 크기 응답이다.

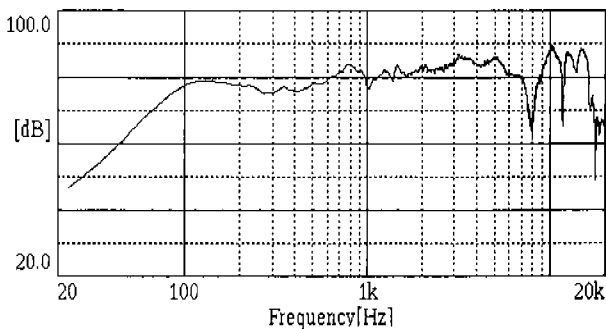


그림 4. 측정된 머리전달함수

4. 청취평가 및 결과 분석

청취평가는 8명의 피험자가 헤드폰을 통하여 각 방향에 대한 청취시료를 2번씩 연달아 듣고 음상정위 결과를 평가 쉬트에 표기하게 함으로써 행하였다. 음원은 3초간의 여성의 음성을 사용하였으며 고도각 0도에서 각 방위각(10도 간격)에 따

라 입체화된 소리를 들은 후 36개로 이산화된 방향 번호들 가운데서 선택해 지각된 방향을 나타내는 것으로 하였다. 같은 모노 음원에 대하여 KEMAR 더미헤드 HRTF를 사용한 청취 시료와

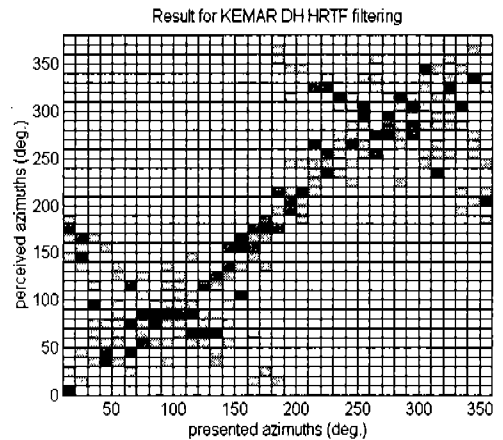


그림 5. 음상정위 주관평가 결과 : KEMAR DH HRTF

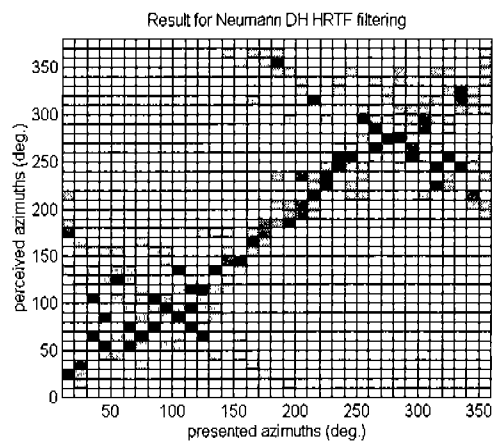


그림 6. 음상정위 주관평가 결과: Neumann DH HRTF

본 Neumann 더미헤드 HRTF로써 필터링한 청취 시료에 대해 위의 음상정위 평가를 하였으며 그림 5와 그림 6은 그 결과를 각각 나타낸다. 그림에서 gray scale은 빈도수를 표현한다. 대체로 두 경우에 있어 비슷한 음상정위 결과를 볼 수 있다. 두 경우 모두 앞-뒤 혼동(reversal)[2]의 양상이 현저하게 나타나고 있다. Reversal이 아닌 경우에는 측정된 Neumann DH HRTF 쪽이 평가 결과들이 정확한 정위 선상에 좀 더 밀집되어 나타나는데, reversal의 영향을 받지 않는 경우에

는 정위의 정확도가 KEMAR DH HRTF의 경우보다 다소 높은 결과를 보인다고 할 수 있겠다.

5. 결론

본 시스템공학연구소 감성공학연구부에서 수행한 머리전달함수(HRTF)의 측정과 측정된 HRTF 데이터를 사용한 음상정위 주관 평가 결과에 대하여 기술하였다. Neumann 더미헤드로 측정한 SERI의 HRTF 데이터와 MIT Media Lab의 KEMAR 더미헤드 HRTF 데이터에 대해서 음의 방향성 구현을 비교해 보았는데, 8명의 피험자들에 대한 청취 평가에서 앞뒤 혼동(reversal)의 영향을 제외할 경우 다소 더 정확도가 높은 음상정위 결과를 얻는 등 양호한 측정 결과를 확인하였다.

참고문헌

- [1] Bill Gardner and Keith Martin, "HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone", MIT Media Lab, Technical Report #280, May. 1994.
- [2] Durand R, Begault, "3D SOUND for Virtual Reality and Multimedia", Academic Press, Inc., 1994.
- [3] Jens Blauert, "Spatial Hearing", (translated by John Allen), The MIT Press, 1983.
- [4] 강성훈, 강경욱, "입체음향", 기전연구소, 1997.