

# 머리전달함수가 음상정위에 미치는 영향

김진욱\*, 고대식\*, 강성훈\*\*, 김현빈\*\*\*

\*목원대학교 전자 및 컴퓨터공학, \*\*대전보건대, \*\*\*ETRI

## Effect of HRTF on Sound Localization

Jinwook Kim\*, Daesik Ko\*, Seonghoon Kang\*\*, Hyunbin Kim\*\*\*

\*Mokwon Univ., \*\*Taejeon Medical College, \*\*\*ETRI

*jukim@ee.mokwon.ac.kr*

### 요 약

본 논문에서는 MIT 머리전달함수(Head-Related Transfer Function;HRTF)와 Neumann의 머리전달함수를 이용하여 머리전달함수가 음상정위에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 이를 위하여 머리전달함수의 측정조건과 시간 및 주파수특성을 비교 분석하였고 청취실에서 헤드폰 재생을 통하여 10° 간격으로 음상정위에 대한 주관평가를 실시하였으며, 주관평가 자료를 이용하여 개인과 전체 평균에 대한 방향 지각 에러(각도)를 계산하였다. 실험결과, MIT 머리전달함수에 비하여 Neumann 머리전달함수를 이용한 음상정위가 양호하게 나타났으며 음상에 대해서도 청취자들은 Neumann 머리전달함수에 의한 재생음이 보다 자연스럽고, 명확한 품질을 갖는다고 답하였다.

### 1. 서 론

최근 오디오 시스템의 발전은 청취자들의 요구에 의하여 단순한 스테레오음의 청취를 벗어나 어떠한 공간에서도 실제 공간과 같은 느낌과 소리가 발생하는 현장감 있는 음을 구현하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 입체 음향의 구현에 있어 방향정보 즉 음상정위는 매우 커다란 비중을 차지하고 있으며 이는 화상회의 시스템이나 시뮬레이션 분야에서 현실감을 증대시키기 위한 수단으로도 활용되고 있다. 방향감 제어를 위해서는 머리전달함수가 필수적으로 필요한데 불행하게도 현재 공개된 머리전달함수로는 MIT에서 제공되는 것뿐이다. 하지만 MIT의 머리전달함수는 기본적으로 측정에 사용된 더미헤드가 보정기 보정용으로 제작되었기 때문에 음상정위에 가장 좋은 특성을 갖는지는 미지수이다.

그므로 본 연구에서는 보정용이 아닌 녹음용으로 제작된 Neumann 더미헤드를 이용하여 불특정 머리전달함수를 측정하고 MIT 머리전달함수와 비교 분석하였다.

### 2. 머리전달함수의 특성

#### 2.1 머리전달함수

인간의 방향에서 방사된 소리는 방사되는 공간, 사람의 머리, 몸통, 귀바퀴, 등이를 거쳐 고막에 전달되게 되고 이 과정에서 반사와 회절현상을 일으키며 두 귀에 도달하게 된다. 이와 같이 이산 방위각, 고도각을 갖는 위치에 따라 두 귀에 도달하는 신호 응답(머리 시스템이 갖는 시스템응답)을 머리전달함수라고 하며 식 (1)과 같이 표현된다. 머리전달함수는 두 귀에서의 경로차에 의한 음압의 비, 시간지연, 거리에 따른 음압의 차로써 표현할 수 있으며, 임펄스 응답을 시간과 주파수 영역에서 신호분석을 통해 인간이 음원의 위치를 시각하는 단서를 유추해낼 수 있다.

$$\frac{P_2}{P_1}(\phi, \theta) = \frac{\text{의이도입구에서의음압}}{\text{머리중심에서의음압}} \quad (1)$$

여기서,  $\phi$ 와  $\theta$ 는 음원의 위치를 나타내는 방위각과 고도각이다.

본 연구에서는 유일하게 인터넷상 공개되어 있는 MIT 머리전달함수와 국내에서 측정된 Neumann 더미헤드를 이용해 측정한 머리전달함수를 이용하였다. Neumann 머리전달함수 측정은 그림 1과 같은 장치 구성과 75Hz에서 99% 이상의 흡음율을 갖는 무향실에서

행해졌다. 머리전달함수 측정은 뒷테이블에 의해 더미헤드가 회전하고 원형의 레일에 스피커를 장착해 고도각을 변화시키도록 되어 있다. 이 때 더미헤드가 회전하면서 머리 중심이 크게 벗어나지 않도록 정확한 중심점을 선정해주어야 한다. 표 1은 두 개의 머리전달함수에 대한 데이터의 형태, 측정 위치수의 차이를 나타내고 있다. 표 1에서와 같이 두 데이터는 측정상에서의 큰 차이를 나타내지 않는다. 더미헤드의 타임을 가장 큰 차이로 볼 수 있다.

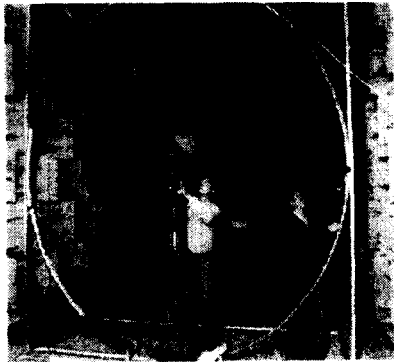


그림 1 무향실의 장치구성

표 1. MIT, Neumann HRTF 데이터 비교

HRTF	MIT	Neumann
데이터 형태	Big-Endian	Little-Endian
샘플갯수	512 (Full Data)	512
측정용 신호	MLS	MLS
샘플당 비트	16	16
샘플링 주파수	44,100Hz	44,100Hz
수평각	0~360 (5° 간격)	0~360 (10° 간격)
고도각	-40~90(10° 간격)	-40~90(10° 간격)
더미헤드특성	보정기 보정용 재질이 약간 딱딱하다.	녹음용 재질이 부드럽다.

## 2.2 머리전달함수의 신호특성

머리전달함수의 신호특성에 있어 머리전달함수가 포함하는 주요단서는 두 귀간의 interaural time differences(ITD), interaural amplitude or level differences (IAD, ILD)이다. 특히 IAD는 저주파대역 보다 1.5kHz[1] 이상에서 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다. 이와 같은 사실은 고주파대역의 신호가 음상 정위에 보다 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다.

ITD는 머리전달함수의 위상특성을 나타내는 단서로서 1.5kHz 이하의 낮은 주파수대역에서 음상정위의 주요 단서가 된다. 그림 2는 60° 간격으로 나타낸 머리전

달함수의 주파수 특성으로 저주파대역에서 신호의 큰 변화가 없으며 고주파영역에서 큰 변화를 나타내고 있으며 뒷 방향에 대해서는 회절현상 등에 의해 신호의 변화가 더 심한 것을 알 수 있다. Neumann 머리전달함수 경우 1kHz이상에서 뚜렷한 변화가 시작되고 있다.

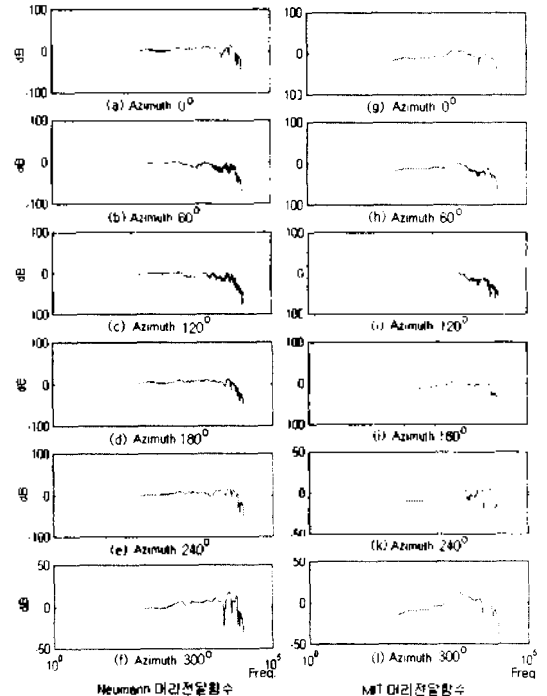


그림 2. Neumann(Left) 과 MIT(Right) 머리 전달함수의 주파수 특성

달거리각 된서에 있어, 그림 1에서와 같이 HRTF는 더미헤드를 중심으로 스피커의 위치가 원형을 이루기 때문에 거리함수로서 나타나지 않는다.

## 3. 음상정위에 대한 주관평가

### 3.1 주관평가 방법

주관 평가를 위해 음원은 무향실에서 녹음된 2초 가량의 여자 음성(PCM, 16-bit, 4,100Hz)을 사용하였으며, MatLab을 이용하여 머리전달함수와 콘볼루션 연산을 수행하여 WAV 포맷으로 PC에 저장하였다. 이 때 사용된 머리전달함수의 형태는 RAW 형태의 데이터로 어떠한 처리과정도 거치지 않은 순수한 위펄스 응답을 이용하였다. 이는 머리전달함수 측정시 사용한 장비들에 대한 특성을 양쪽 모두 고려해 줄 수 없기 때문이다.

이렇게 생성된 신호는 헤드폰 재생을 위한 입체음향 파일이며, PC에 녹음된 파일은 다시 DAT에 저장하여 리스닝 룸(양소음 20dBA)에서 주관 평가를 실시하였다. DAT에 녹음된 음원은 수평각을 10° 간격으로 하였으며, 랜덤한 순서로 녹음되었다. 실험에 참가한 피실험자들은 입체음향에 대한 사전지식이 없는 사람을 대상으로 간단한 샘플을 들려주고 설명을 10여분 동안하고 주관 평가에 임하였다. 피실험자들은 정취한 음에 대해서 면의 구누로써 답하도록 하였다.

### 3.2 주관평가 결과

그림 3, 4는 음상 정위 평가에 대한 결과로서 음원에 대한 방향지각이 정확하다면 그림 3에서 점들은 대각선 상에 놓이게 된다. 그림 3에서 대체적으로 두 경우에 있어 비슷한 음상정위 결과를 볼 수 있으나 Neumann 머리전달함수가 보다 대각선 모양이 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나 두 경우 모두 앞-뒤 혼동(reversal) 현상이 나타나고 있다. x축은 음원이 발생한 방향이며 y축은 피실험자가 지각한 방향을 나타낸다.

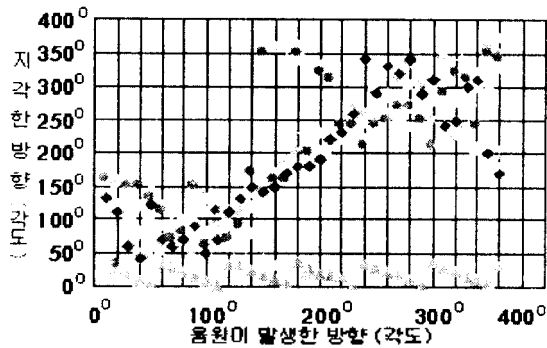


그림 3. Neumann 머리전달함수 주관평가 응답

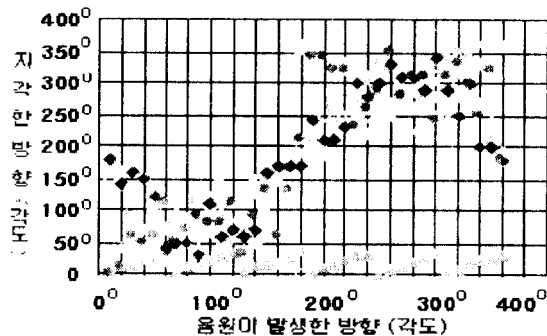


그림 4. MIT 머리전달함수 주관평가 응답

주관 평가시 피실험자의 정확한 심리적 상태는 알 수 없으나 그 외의 동일한 평가 조건하에서도 개개인의 큰 차이를 나타냈다. 그림 5, 6는 두 개의 머리전달함수에 대한 개개인의 주관평가 결과를 나타낸다. 대체적으로 피실험자들이 각각의 머리전달함수에 대해 응답한 결과가 유사한 형태를 가지고 있으며, 거의 대각선에 가까운 응답을 나타내는 피실험자는 다른 머리전달함수에 대한 평가에서도 좋은 응답을 나타내고 있다. 즉 개개인 마다 차이를 나타낸다는 것을 알 수 있으며, 모든 피실험자들이 앞-뒤 혼동현상을 나타내고 있다. 특히 0°와 180° 부근보다는 좌우 후방중앙(125° 근방)에서 앞-뒤 혼동현상이 현저하게 많이 나타나고 있다.

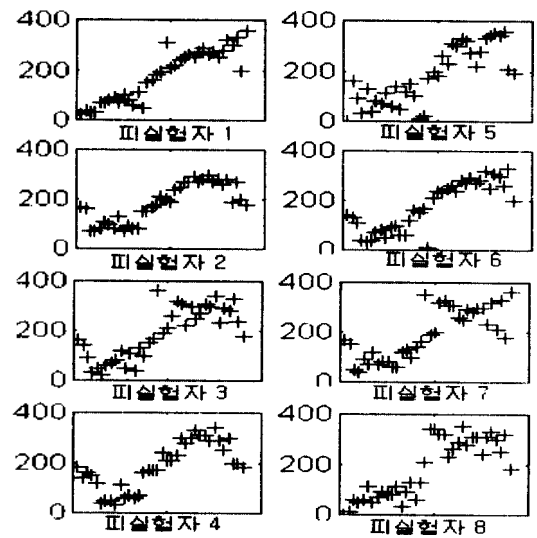


그림 5. MIT 머리전달함수에 대한 개인 주관평가 응답

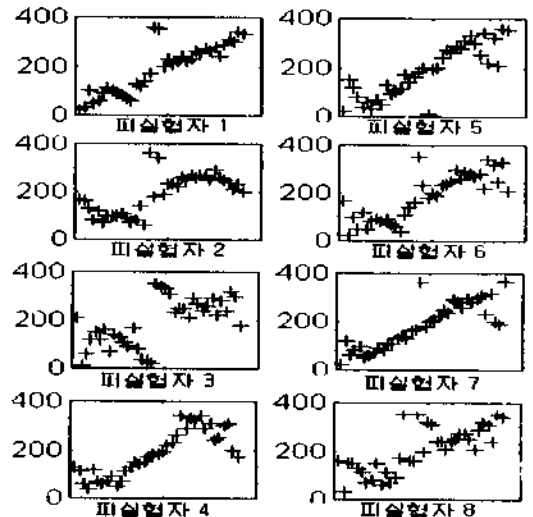


그림 6. Neumann 머리전달함수에 대한 개인 주관평가 응답

주관평가에 대한 결과는 식 (2)를 이용하여 방향 지각 에러 E를 구할 수 있다.

$$E = \frac{1}{J} \cdot \frac{1}{K} \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K |S_{jk} - R_{jk}| \quad (2)$$

여기서  $S_{jk}$  는 실제 또는 시뮬레이션된 방향이며,  $R_{jk}$  는 지각된 방향을 나타낸다. j, k는 전체 방향에 대한 단일 방향의 개수(J=19)와 하나의 음원에 대한 반복 횟수(K=2)를 나타낸다. [4]

표 2는 두 개의 머리전달함수에 대한 각각의 피실험자들에 대한 방향 지각 에러 E를 나타낸다. 개인에 따라 30° 이상의 큰 차이를 나타내고 있으며, Neumann 머리전달함수가 MIT 머리전달함수보다 방향 지각 에러가 작게 나타났다.

표 2 머리전달함수에 의해 구현된 음원의 음상 정위 에러 E

피실험자	MIT	Neumann
1	21	26
2	32	30
3	42	52
4	36	31
5	41	54
6	42	27
7	53	30
8	43	48
평균	41	37

음상 정위에 대한 평가 외에 두 머리전달함수에 대한 음원에 대해 피실험자들은 Neumann 머리전달함수에 의한 binaural 신호에 대해 자연스럽게 느꼈다. 그러나 두 개의 머리전달함수 모두 헤드폰 재생에 있어서의 외제화(Externalization)은 전방향에 대해 나타나지 않았다.

#### 4. 결론

분특성 머리전달함수를 통해 지금까지 우리가 알고 있는 음상 정위 지각 단서들이 음상 정위에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 주관평가에 의한 음상 정위 에러를 통해 Neumann 머리전달함수가 다소 정확도가 높은 음상정위 결과를 나타냈다. 그러나 두 개의 분특성 머리전달함수 모두 음상의 외제화가 잘 되지 않았으

며, 특히 거리 지각에 있어 직접음과 간접음의 변화, 진폭변화, 시간 지연 등의 단서를 이용하여도 거리 지각은 잘 이루어지지 않는 것으로 알려져 있다. 이를 위해 지각 단서들의 보다 면밀한 관찰과 음상 정위의 정밀성 실험과 전후 방향 에러에 대한 고찰해 나갈 것이며, 이와 같은 머리전달함수에 의한 음상 정위의 정교한 구현은 멀티채널 방식에도 적용되어 보다 현실감 있는 입체 음향을 구현할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] J. Blauert, *Spatial Hearing. The psychophysics of human sound localization*, (Revised edition, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1997).
- [2] Middlebrooks, J. C., & Green, D. M. "Sound localization by human listeners." *Annual Review of Psychology*, 42, p.135-159
- [3] 김진욱, 고대식, 강성훈외 2. "HRTF를 이용한 음상 제어 알고리즘에 관한 고찰." 한국음향학회 학기학술 발표회. 1997. 6
- [4] Masayuki Morimoto and Yoichi Ando "On the simulation of sound localization." *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, 3, 1980