

# 가상음장 재현을 위한 근거리 머리전달함수 측정 및 해석.

신기훈, 박영진

소음 및 진동제어 연구센터, 한국과학기술원

## Measurement and analysis of the near-field HRTFs for virtual audio enhancement.

Ki H. Shin [ks007b@kaist.ac.kr](mailto:ks007b@kaist.ac.kr), Youngjin Park [yjpark@kaist.ac.kr](mailto:yjpark@kaist.ac.kr)  
NoVIC, KAIST

### 요약

효과적인 가상음장 재현을 위한 머리전달함수(Head Related Transfer Function: HRTF) 측정 시도는 1994년에 이루어진 MIT의 Bill Gardner에 의한 KEMAR 머리전달함수 측정 이후 이미 여러 차례에 걸쳐 이루어졌다. 그러나 대부분의 시도는 음원이 머리중심점에서 1 m 이후에 위치한 원거리에서 국한되었고 음원이 1 m나 그 이내에 위치한 근거리에서의 측정은 스피커에서 반사된 음파가 dummy head나 피험자의 귀에 다시 들어가는 것을 막기 어려워 시도된바가 적으며 data도 공개되지 않은 것이 현 실정이다. 음원이 머리중심점에서 1 m보다 가까운 거리에 있는 경우 머리전달함수의 특성은 고도와 방위뿐만 아니라 거리에도 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 이를 알아보기 위해 무향실에 B&K HATS (Head and Torso Simulator)를 설치하고 단극음원에 가까우며 반사가 적은 스피커를 따로 제작하여 근거리 머리전달함수를 측정하였고 이를 분석하였다.

### 1. 머리전달함수

머리전달함수는 머리 주변 임의의 위치에 자리잡은 음원에서 발산되는 음장과 청취자의 고막에 도달하는 음

장사이의 전달함수를 말한다. 음원의 위치에 따라 그 특성이 달라지며, 머리에 의한 산란과 소리가 오는 방향에 따라 외이의 각 공동이 음파를 다르게 변조하여 내이에 흘러보내는 것이 그 원인이다. 보통  $\bar{q}_0$ 의 volume flux를 갖는 단극음원은  $\bar{q}_0 e^{-j\omega t}$ 으로 표현할 수 있으며, 이에 대해 거리가  $r$  떨어진 지점에서의 자유음장은 다음과 같이 표현된다

$$p_{ff} = -j\omega \frac{\rho_0 \bar{q}_0}{4\pi r} e^{j(kr - \omega t)} \quad (1)$$

그럼 1에서와 같이 사람의 머리를 구체로 묘사하고 단극음원이 구체에서  $r$  떨어진 지점에 있는 경우에 구체 표면에 맺히는 음압은 아래와 같다 [1]

$$p_r = \frac{j\rho_0 c \bar{q}_0}{4\pi a^2} \Psi e^{-j\omega t} \quad (2)$$

여기서  $a$ 는 구체의 반지름이고  $c$ 는 음속이며  $\Psi$  다 음과 같은 무한급수 전개이다

$$\Psi = \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) p_n(\cos\theta) \frac{h_n(kr)}{h_n'(ka)}, \quad r > a \quad (3)$$

여기서  $p_n$ 은  $m$ 차 Legendre 다항식이며  $h_m$ 은  $m$ 차 구형 Hankel 함수이고  $\theta$ 는 구의 중심점과 음원을 잇는 직선과 중심점에서 관심있는 구체 표면 지점까지의 직선 사이의 각도이다. 머리전달함수는 앞서 언급한바와 같이 음원과 고막사이의 음향학적 전달함수이나 이를

구하기 위해서는 음원에서 발생하는 음장을 음원 바로 앞에서 측정하여야하는 어려움이 있으므로 다음과 같이 새로 정의하고 이를 측정한다

$$H = \frac{P_s}{P_{ff}} \quad (4)$$

우선  $p_s$  와  $p_{ff}$  를 측정하여 식 (4)와 같이 머리전달 함수를 구한 후, 이로부터 기존의 머리전달함수 정의를 다음과 같은 관계식을 통하여 산출해낸다 [2]

$$H_2 = \frac{p_s}{p_c} = \frac{p_s}{p_{ff}} \frac{p_{ff}}{p_c} = H \frac{r_s}{r} e^{j\omega(r/c)} \quad (5)$$

$H_2$  는 음원과 고막사이의 원래 머리전달함수이며  $p_c$  은 그림 1에서 보여지듯이 큰원이 머리이고 작은원이 점으로 묘사된 단극음원을 감싸는 무한소의 구를 나타낸다고 할때 그 표면에 맺히는 음압이다. 단극음원의 중심에서는 음압이 무한대이므로  $p_c$  으로 대신하며 식 (5)에서와 같이 측정하여 산출한  $H$  에  $r_s/r$  과 음원이 머리중심에서 떨어진만큼의 전달지연인  $e^{j\omega(r/c)}$  를 곱하여 원래 정의인  $H_2$  를 얻어낸다.

## 2. 구체에 의한 음파의 산란

사람머리의 표준치를 바탕으로 제작된 더미헤드를 사용하여 측정된 머리전달함수를 분석하기 위해서 먼저 사람의 머리를 단단한 구로 가정하여 수치적으로 산출한 머리전달함수를 분석하였다. 구의 머리전달함수는 Bauck and Cooper 가 1980 년에 제시한 식 (4)의 해를 구하는 algorithm 을 통하여 산출하였다. [3] 구체의 반지름을 9 cm 로 하여 수평면에서 음원이 왼쪽귀 정면으로부터 시계방향으로 30 도씩 위치를 바꿀때마다 왼쪽귀에 해당하는 머리전달함수의 magnitude 응답을 거리별로 그림 1 에 나타내었다. 음원이 귀 근방에 위치할 경우, inverse square law 에 의하여 음원이 가까울 때 magnitude 가 크고 거리가 증가함에 따라 작아짐을 알수 있다. 아울러 음원이 대상 귀 바로 앞이나 근방에 위치할 경우, 높은 주파수를 갖는 음파가 낮은 주파수를 갖는 음파에 비해 구 표면에서 반사가 더 잘되어 소위 말하는 high frequency pressure doubling 효과를 관찰할수 있

다. 따라서 이부근에서는 머리전달함수의 magnitude 응답이 고주파 영역에서 높고 저주파 영역에서는 상대적으로 낮다. 이와 반대로 음원이 대상 귀에서 반대편으로 점차 멀어짐에 따라 구 표면에 부딪히는 음파의 파장이 구의 원주보다 길면 음파의 회절에 의하여 귀까지 도달하고 원주보다 짧으면 반사되는 shadowing 효과 때문에 머리전달함수의 magnitude 응답이 low-pass filter 의 형상을 띠는것을 볼수있다. 또한 이 경우, 같은 방위각도에서 음원이 구 표면에 근접할수록 shadowing 효과가 더욱 심해져서 가까운 거리의 magnitude 응답이 먼 거리의 응답보다 작아지며 고주파 영역에서는 구의 한편으로 돌아가는 음파와 반대편으로 돌아가는 음파가 대상 귀에 도달할 때 phase 가 달라 ripple 현상이 일어나는 것을 볼수있다. 이에 반해 음원이 대상 귀의 정반대편(-90 도)에 위치할 경우, 구의 양편을 따라 전파되는 음파가 서로 phase 가 맞게 도달하므로 ripple 현상은 사라지고 오히려 높은 주파수 영역에서 응답이 높아지는 acoustic bright spot 현상이 일어난다.

## 3. 근거리 머리전달함수 측정

실제 사람의 머리는 단순한 구체보다 훨씬 복잡한 형상을 띠며 음파의 입사각도에 따라 주파수 성분을 변조하여주는 fossa 와 concha 등의 공동으로 이루어진 외이가 있다. 음원이 머리중심으로부터 1 m 이내에 위치할 때 음원의 고도와 방위 및 거리에 따라 머리전달함수가 변하는 정도를 알아보기 위해 무향실에서 B&K HATS 의 근거리 머리전달함수를 측정하였다. 스피커가 더미헤드에 근접함에 따라 머리표면에서 반사된 음파가 다시 스피커에 반사되어 귀에 들어가는 것을 막기위해 사람의 가청주파수 전 영역(20~20000 Hz)에서 고른 성능을 갖는 compression driver 표면에 흡음재를 부착하여 단극음원에 가까운 스피커를 제작하였다. 그림 2 에서 볼수있듯이 스피커 고정용 jig 를 제작하여 음원의 고도각도를 -35 도에서 90 도까지 5 도씩 바꾸고 더미헤드는 stepping motor 를 장착한 turntable 위에 설치하여 각각의 고도각마다 방위각을 5 도씩 돌려 근거리 머리전

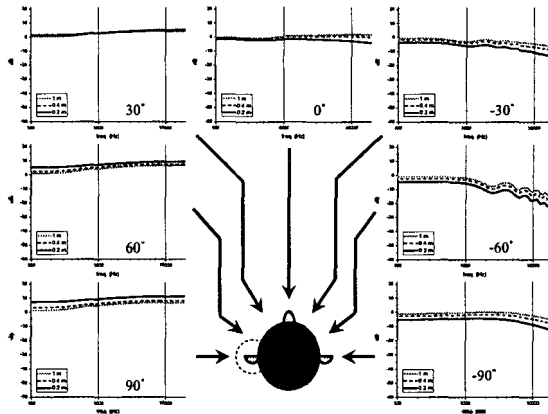
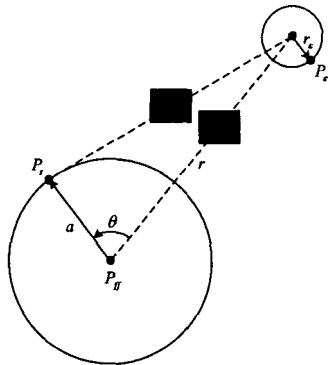


그림 1 구체로 묘사된 머리와 머리중심에서  $r$  떨어진 지점에 위치한 단극음원(왼편) 및 이를 바탕으로 수치적으로 산출된 왼쪽귀의 머리전달함수(오른편)

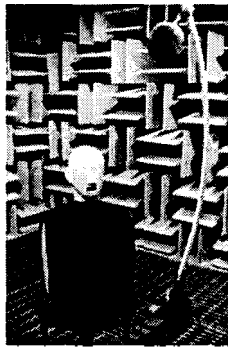


그림 2 근거리 머리전달함수 측정

달함수를 측정하였다. 음원과 머리 중심 사이의 거리는 서로 다른 길이의 rod를 사용하여 한쪽 끝에 스피커를 설치하고 반대쪽 끝은 jig에 고정하여 1 m에서 0.2 m까지 0.2 m 간격으로 5차례 조절하였다.

먼저 머리중심점에 free-field microphone을 설치하여  $p_{ff}$ 를 측정하고 다시 더미헤드를 설치하여 각 음원 위치에 따른  $p_s$ 를 측정하였다. 스피커를 가진하는 입력 신호로는 20 Hz에서 20 kHz까지 고른 파워를 갖는 random white signal을 사용하였고 더미헤드의 양쪽 귀에서 나오는 출력신호와 함께 NI DAQPad 6070E를 사용하여 44.1 kHz로 샘플하였다. 측정된 입력력 신호를 적절한 신호처리 과정을 통해 1장에서 언급한 산출 과정을 그대로 답습하여 머리주변 총 4630개의 음원 위치에 대

한 근거리 머리전달함수를 구하였다. 이 중에서 몇몇 수평면(고도각 0도) 근거리 머리전달함수의 magnitude 응답을 그림 1에서와 같이 각각의 방위각도당 0.2, 0.4, 1 m의 거리별로 그림 3에 나타내었다.

#### 4. 주파수와 시간영역에서의 해석

측정하여 얻어진 더미헤드의 머리전달함수는 2장에 소개된 구체의 머리전달함수와 전반적으로 모양이 매우 다르고 훨씬 더 복잡하다(그림 3). 이는 더미헤드가 실제 사람의 머리를 더 가깝게 묘사하고 외이와 몸통이 있기 때문이다. 특히 복잡한 형상을 가진 외이는 2 kHz에서 14 kHz까지의 고주파영역에서 음파를 음원의 방향에 따라 증폭 또는 감쇠시킨다. 따라서 대상 귀의 정면이나 근방에 음원이 위치할 경우 inverse square law에 따라 가까운 거리에서의 응답이 크고 1~5 kHz에서는 pressure doubling effect로 인하여 상승하나, 구체와는 달리 대략 5 kHz이상의 고주파영역에서는 급격히 감쇠함을 관찰할 수 있다. 그러나 음원이 대상 귀에서 반대편으로 옮겨감에 따라 구체의 경우와 같이 shadowing 효과로 인하여 먼 거리에서의 응답이 더 커짐을 볼 수 있고, 머리에 부딪혀 머리표면을 따라 양쪽으로 대상 귀까지 전도되는 음파간에 phase가 달라 대략 방위각 -30도 근방에서부터는 1 kHz 이상의 고주파영역에 ripple 현상

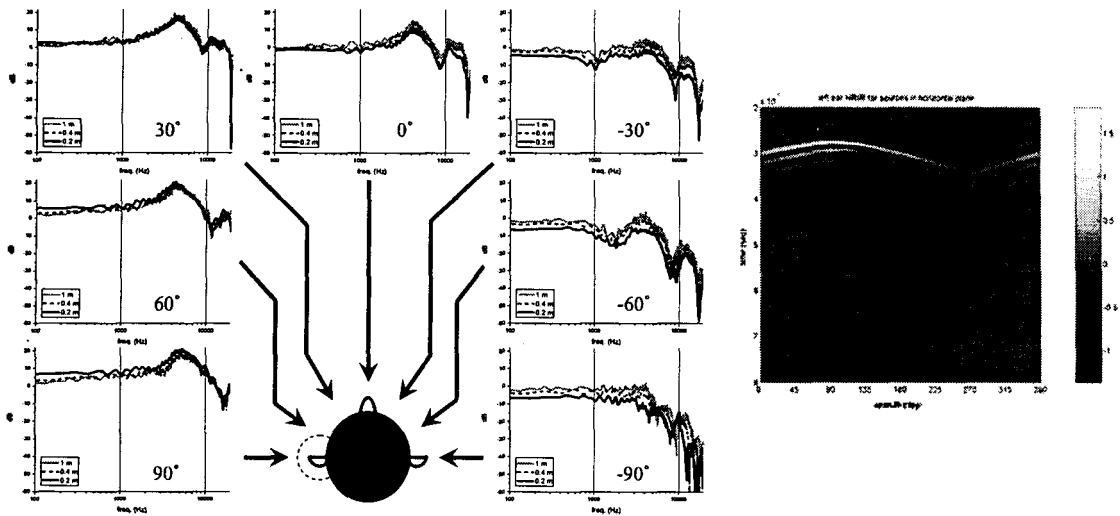


그림 3 더미헤드를 사용하여 측정된 왼쪽귀의 수평면 근거리 머리전달함수(왼편)와 이를 역 푸리에 변환하여 산출한 HRIR(오른편)

이 일어남을 확인할수 있다. 마찬가지로 음원이 대상 귀의 정반대편에 자리할 경우 일어나는 bright spot 현상은 구체의 경우 약 600 Hz부터 일어나는데 반해 더미헤드의 경우 1~3 kHz 구간과 6~8 kHz 구간에서만 일어나며 ripple 현상은 사라지지 않는다. 이는 구체와는 달리 더미 헤드의 앞뒤 형상의 비대칭성으로 인하여 머리 표면을 따라 전도되는 음파의 phase가 어긋나기 때문이다.

더미헤드를 이루는 각 부분이 음원의 위치에 따라 내이로 흘러들어오는 소리에 미치는 영향을 더 상세히 보고자 머리전달함수를 시간영역에서 살펴보면 다음과 같은 해석을 유추해낼수 있다. 그림 3의 오른쪽은 음원이 1 m 정면에서 시계반대방향으로 5도씩 일주함에 따른 HRIR (Head Related Impulse Response)을 오른쪽으로 나열하여 연결한것이다. 음원이 대상 귀 근방에 위치할 경우 첫번째 피크 다음에 음폭 패인 끝을 따라 두번째 피크가 형성되고 음원이 대상 귀의 뒤편으로 돌아감에 따라 끝이 사라지는것을 볼수있다. 이는 바로 외이를 이루는 각 공동의 공명과 어깨에 의한 반사때문이며 두번째 피크 다음의 자잘한 변화는 어깨를 제외한 상체와 turntable에 의한 반사때문이다.

### 5. 결론 및 향후 연구

근거리 머리전달함수를 5개의 거리에서 성공적으로 측정하였고 이를 구체의 음파 산란에 의한 이론적 해와 비교 분석하였다. 분석 결과, 측정된 머리전달함수는 구체의 이론적 해와 대체적으로 비슷한 성향을 보이는 것을 확인하였으며 소규모의 청음실험을 통하여 그 성능을 입증하였다. 측정된 데이터를 바탕으로 음원의 방위각과 고도각 및 거리에 따라 변화하는 주요 인자들을 분리하여 실시간 가상음장 재현에 쓰이기 편리하도록 효율적인 머리전달함수 모델링 기법을 개발하는 것을 추후 연구과제로 수행중이다.

### 참고문헌

1. Rabinowitz, W. M., Maxwell, J., Shao, Y., and Wei, M., "Sound localization cues for a magnified head: Implications from sound diffraction about a rigid sphere," Presence 2, 125-129, 1993.
2. Richard, O. D., and William, L. M., "Range dependence of the response of a spherical head model," J. Acoust. Soc. Am., 104, 5, 1998.
3. Bauck, J. L., and Cooper, D. H., "On acoustical specification of natural stereo imaging," Audio Engineering Soc., 66<sup>th</sup> convention, 1980.