

머리움직임이 입체음향 시스템의 머리전달함수에 미치는 영향: 구 머리전달함수의 민감도해석

The effect of head movement on HRTF in 3D sound system: Sensitivity analysis on Sphere HRTF

° 김선민*·박영진**

Sunmin Kim and Youngjin Park

Key Words : 3D sound(입체음향), Sphere HRTF(구 머리전달함수), Head movement(머리움직임), sensitivity analysis(민감도 해석).

ABSTRACT

Human's vision is mostly confined to the area in the front and we, humans heavily depend on the sense of hearing to gather information in areas out of our sight. Thus, the virtual reality system consisting of the 3D sound effect gives the user a much better sense of reality than the system without the sound effect. Virtual 3D sound technology has mainly been researched with binaural system. The conventional binaural sound systems reproduce the desired sound at two arbitrary points using two channels in 3-D space. Head movement of listener might be change the nominal acoustic transfer function and deteriorate the performance of 3D sound system based on loudspeakers that needs a crosstalk canceller. In this paper, four kinds of sensitivity functions of sphere HRTF are derived to investigate the effect of head movement on HRTF in 3D sound system. Changes of HRTF caused by rotational and translational motion of head are obtained as we calculate the derivatives of HRTF with respect to angle and distance.

기호설명

| | |
|----------|---|
| r | distance from the center of the sphere to the source (m) |
| μ | normalized frequency |
| ρ | normalized distance to the source |
| θ | angle of incidence (rad), the angle between the ray from the center of the sphere to the source and the ray to the measurement point on the surface of the sphere |
| h_m | m th-order spherical Hankel function |
| h'_m | the derivative of h_m with respect to its argument |
| P_m | Legendre polynomial of degree m |
| Q_m | m th-order modified spherical Hankel function |
| P_s | pressure on the surface of the sphere (kg/m^2) |
| P_f | free field pressure at the center of the sphere |
| H | head related transfer function relative to free field |

임의의 위치에 가상의 음원이 위치하도록 하는 것을 말한다.⁽¹⁾

가상공간 속에 있는 청취자는 특정한 위치에 있는 스피커로부터의 소리를 듣고 물리적으로 소리가 나오고 있는 곳이 아닌 임의의 지점에서 소리가 나온다고 느끼게 된다. 이러한 3 차원 입체음향 기술은 시각, 청각, 촉각 등의 인간의 감각을 실제가 아닌 가상적인 공간에서 실제처럼 느끼게 해주는 가상현실시스템에서 중요한 부분을 차지한다. 가상현실시스템의 시각시스템은 사람이 주시하는 방향에 대한 2 차원적인 감각을 제공하는 반면, 3 차원 입체음향기술은 시각을 통해 보이지 않는 위, 아래 혹은 뒤에 있는 새나 자동차와 같은 물체의 존재를 느끼게 해주어 3 차원 공간 전체를 감지할 수 있도록 해준다.

대부분의 입체음향 시스템은 2 개의 채널을 사용하는 바이너럴 사운드(binaural sound) 시스템으로 일반적인 헤드폰이나 2 개의 라우드스피커를 사용하여 구현된다. 바이너럴 사운드 시스템에서 가장 중요한 것은 음원과 사람의 두 귀 사이의 음향학적 전달함수인 머리전달함수(HRTF, head related transfer function)로 이 값이 정확하다면 입체음향재현이 정확히 된다고 할 수 있다. 머리전달함수가 정확하더라도 사람이 머리를 움직이게 되면 실제의 머리전달함수와 미리 측정한 머리전달함수가 달라져 입체음향 시스템의 성능이 저하되므로 머리움직임과 머리전달함수의 관계를 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 사람의 머리움직임에 의해 머리

1. 서 론

3 차원 입체음향재현이란 헤드폰이나 라우드스피커(loudspeaker)를 이용하여 3 차원 공간 상의

* 한국과학기술원, 기계공학과

E-mail: sunmin@bomun.kaist.ac.kr

Tel: (042) 869-3076, Fax: (042) 869-8220

** 한국과학기술원, 기계공학과

전달함수가 얼마나 변화하는지를 살펴보기 위해 수학적 모델을 가지고 있는 구 머리전달함수(sphere HRTF)의 민감도 해석(sensitivity analysis)을 수행한다.

2. 입체음향시스템

2.1. 바이너럴 사운드 시스템

바이너럴 사운드는 사람이 두 귀만으로 소리의 방향을 인지할 수 있다는 사실에 착안하여 양쪽 귀에 들리는 소리를 두 개의 채널을 사용하여 스피커나 헤드폰으로 재현하는 기술을 말한다.⁽¹⁾ 이 기술의 핵심은 가상음원과 사람의 귀 사이의 음향학적 전달함수인 머리전달함수이다. 두 귀만을 가진 사람이 3차원 공간 상에서 방향을 인지할 수 있는 것이 바로 음원의 위치에 대한 정보를 담고 있는 머리전달함수 때문이다. 그림 2는 바이너럴 사운드 시스템을 나타낸 것으로 머리전달함수의 측정(왼쪽)과 헤드폰을 이용하는 방법(가운데), 스피커를 이용하는 방법(오른쪽)을 통해 구현된다.

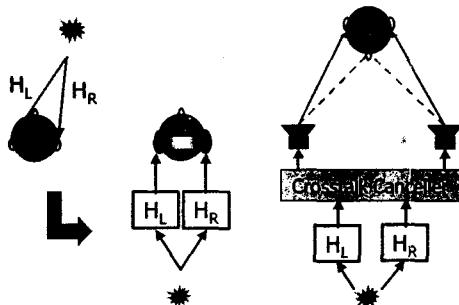


Figure 1. Binaural sound system.

그림 1의 왼쪽 그림에서 보는 것과 같이 실제 음원의 위치를 바꿔가면서 실제로 각 위치에 대한 머리전달함수를 미리 측정하여 데이터 베이스를 구축한다. 그림 1의 가운데 그림에서 보는 것과 같이 헤드폰을 이용하여 입체음향 구현하고자 할 때는 구현하고자 하는 가상음원의 위치에 해당하는 머리전달함수를 이용하여 헤드폰에 소리를 재생시켜주면 입체음향이 재현된다. 스피커를 이용하는 입체음향 시스템은 그림 1의 오른쪽 그림에서 보는 것과 같이 헤드폰 입체음향 시스템과는 달리 스피커와 두 귀 사이에 음향학적 공간이 존재하게 된다. 즉 왼쪽스피커에서 출력된 소리가 왼쪽 귀로만 전달되는 것이 아니고 오른쪽 귀로도 전달이 되게 된다. 오른쪽의 경우도

마찬가지이다. 이러한 현상을 크로스톡(crosstalk)이라고 하며 이를 상쇄해주기 위한 신호처리 알고리즘이 필요하다.⁽¹⁾

2.2 머리움직임과 입체음향 시스템

스피커를 이용한 입체음향 시스템은 헤드폰을 이용한 입체음향 시스템과는 달리 머리 움직임에 대해 보상 해주지 않는다. 헤드폰을 이용한 입체음향 시스템은 헤드트랙커로부터 측정된 머리 움직임을 이용하여 가상 음원이 통과해야 할 머리전달함수를 그에 맞게 선택하여 필터링 함으로써 머리 움직임을 보상할 수가 있고 해주어야 한다.

그러나 스피커를 이용한 입체음향 시스템은 사용자가 머리를 움직이더라도 가상 음원이 머리를 쫓아오지 않으므로 보상을 해 줄 필요가 없는 것이다. 이것은 보상을 해주지 않아도 사용자가 머리를 움직일 때 성능이 저하되지 않는다는 것이다. 스피커를 이용한 입체음향 시스템은 크로스톡 제거기가 필요하기 때문이다. 이미 측정된 음향학적 전달함수를 이용하여 미리 크로스톡 제거기를 설계해 놓고 실시간으로 원하는 위치의 가상 음원을 적절한 머리전달함수로 필터링하고 크로스톡 제거기를 통과시킴으로써 입체음향을 구현하는데, 사용자가 머리를 움직이게 되면 음향학적 전달함수가 변하므로 미리 설계된 크로스톡 제거기의 성능 저하로 인해 입체음향 시스템의 성능이 저하된다. 다음 절에서 사람의 머리움직임에 머리전달함수가 얼마나 민감한지를 살펴보기 위한 민감도 해석(sensitivity analysis)을 수행한다.

3. 구 머리전달함수의 민감도 해석

3.1. 구 머리전달함수

그림 2와 같이 사람의 머리를 구(sphere)로 가정하고 음원을 단음원(mono pole)으로 가정하면 머리전달함수에 대한 수학적 모델을 얻을 수 있다.⁽²⁾

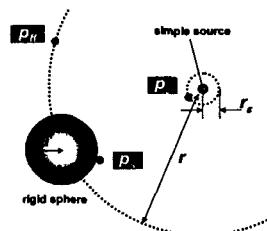


Figure 2. Sphere HRTF model

머리전달함수를 구가 없을 때 자유음장에서의 음압에 대한 구에 의해 산란된 구 표면에서의 음압이라고 정의하면 구에 의해 산란된 소리의 영향을 알 수 있다. 자유음장에서 거리 r 만큼 떨어진 곳에서의 음압을 식 (1)에 반지름이 a 인 구에 의해 산란된 구 표면에서의 음압을 식 (2)에 기술한다.⁽³⁾

구에 의한 음장은 구의 반지름에 영향을 받으므로 반지름에 의한 영향을 없애고 거리와 음원의 주파수에 의한 물리량으로 표시하기 위해 식 (6)과 같이 주파수와 거리를 무차원 변수로 표현하면 머리전달함수는 아래와 같이 표현된다.⁽²⁾

$$p_{ff}(r, \omega, t) = -i\omega \frac{\rho_0 S_\omega}{4\pi r} e^{i(kr - \omega t)} \quad (1)$$

$$p_s(r, a, \omega, \theta, t) = \frac{i\rho_0 c S_\omega}{4\pi a^2} \Psi e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$\Psi = \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) P_m(\cos \theta) \frac{h_m(kr)}{h'_m(ka)}, \quad r > a \quad (3)$$

$$H(\rho, \mu, \theta) = \frac{p_s}{p_{ff}} = -\frac{\rho}{\mu} e^{-i\mu\rho} \Psi, \quad \rho > 1 \quad (4)$$

$$\Psi(\rho, \mu, \theta) = \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) P_m(\cos \theta) \frac{h_m(\mu\rho)}{h'_m(\mu)} \quad (5)$$

$$\mu \equiv \frac{f}{c/2\pi a}, \quad \rho = \frac{r}{a} \quad (6)$$

여기서, h_m 은 spherical Hankel function이고 P_m 은 Legendre polynomial으로 계산의 편의를 위해 새로운 변수 Q_m 을 정의하고 식 (8)과 식 (9)와 같이 회귀적(recursive) 관계식을⁽⁴⁾ 이용하면 머리전달함수를 다음과 같이 손쉽게 구할 수 있다.

$$H(\rho, \mu, \theta) = \frac{\rho}{i\mu} e^{-i\mu} \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) P_m(\cos \theta) \times \frac{Q_m(\frac{1}{i\mu\rho})}{\frac{m+1}{i\mu} Q_m(\frac{1}{i\mu}) - Q_{m-1}(\frac{1}{i\mu})} \quad (7)$$

$$P_m(x) = \frac{2m-1}{m} x P_{m-1}(x) - \frac{m-1}{m} P_{m-2}(x), \quad (8)$$

$$P_0(x) = 1 \quad \& \quad P_1(x) = x$$

$$Q_m(z) = -(2m-1)z Q_{m-1}(z) + Q_{m-2}(z), \quad (9)$$

$$Q_0(z) = z \quad \& \quad Q_1(z) = z - z^2$$

3.2. 민감도 함수

사람의 머리움직임이 머리전달함수에 미치는 영향을 살펴보기 위해 3.1 절에서 언급한 구 머리전

달함수의 민감도 함수를 구해보자. 회전방향, 직경방향, 좌/우방향, 앞/뒤방향의 네 가지 종류의 움직임에 대해서 아래와 같이 민감도 함수를 정의한다.

$$S_\theta \equiv \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial \theta} \quad (10)$$

$$S_r \equiv \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial r} \quad (11)$$

$$S_x \equiv \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial x} = S_r \cos \theta - S_\theta \frac{\sin \theta}{r} \quad (12)$$

$$S_y \equiv \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial y} = S_r \sin \theta + S_\theta \frac{\cos \theta}{r} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial \theta} &= -\frac{\rho \sin \theta}{i\mu} e^{-i\mu} \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) P_m'(\cos \theta) \\ &\times \frac{Q_m(\frac{1}{i\mu\rho})}{\frac{m+1}{i\mu} Q_m(\frac{1}{i\mu}) - Q_{m-1}(\frac{1}{i\mu})} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P_m'(x) &= \frac{2m-1}{m} P_{m-1}(x) + \frac{2m-1}{m} P_{m-1}'(x) \\ &- \frac{m-1}{m} P_{m-2}'(x), \end{aligned} \quad (15)$$

$$P_0'(x) = 0 \quad \& \quad P_1'(x) = 1$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial r} &= \frac{1}{i\mu a} e^{-i\mu} \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) P_m(\cos \theta) \\ &\times \frac{Q_m(\frac{a}{i\mu r})}{\frac{m+1}{i\mu} Q_m(\frac{1}{i\mu}) - Q_{m-1}(\frac{1}{i\mu})} \\ &+ \frac{1}{r\mu^2} e^{-i\mu} \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) P_m(\cos \theta) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} &\times \frac{Q_m'(\frac{a}{i\mu r})}{\frac{m+1}{i\mu} Q_m(\frac{1}{i\mu}) - Q_{m-1}(\frac{1}{i\mu})} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_m'(z) &= -(2m-1)z Q_{m-1}(z) - (2m-1)z Q_{m-1}'(z) \\ &+ Q_{m-2}'(z), \end{aligned} \quad (17)$$

$$Q_0'(z) = 1 \quad \& \quad Q_1'(z) = 1 - z$$

각 민감도 함수는 각각의 머리움직임에 대한 머리전달함수의 변화량으로 머리전달함수로 나누었기 때문에 머리전달함수에 대한 상대적인 변화량을 의미한다.

위의 식에서 알 수 있듯이 머리전달함수 H 의

회전방향과, 직경방향 두 가지에 대한 미분치를 구하면 네 가지의 민감도 함수를 구할 수 있다. 회전방향과 직경방향에 대해 머리전달함수의 미분치는 식 (14)와 식 (16)과 같이 구해지고 이에 필요한 Legendre polynomial 과 modified spherical Hankel function에 대한 미분치는 각각 식 (15)과 식 (17)과 같이 회귀적인 식으로 표현할 수 있다.

4. 컴퓨터 모의실험

4.1. 음원의 방향에 따른 민감도 해석

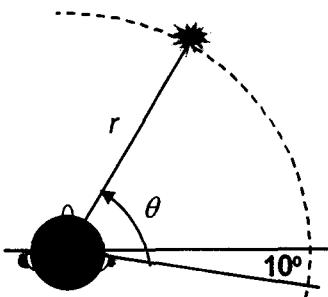


Figure 3. System configuration

음원이 0 도에서 180 도 움직이는 경우에 대해 3 장에서 유도한 구 머리전달함수의 민감도 함수를 구해보았다. 그림 3에서 보는 것과 같이 두 귀는 중심으로부터 뒤쪽으로 10 도 뒤에 있다고 가정하고 음원의 입사각은 귀에서부터의 각도로 정의하고 거리는 2m 떨어져 있다고 하였다.

(1) 회전방향에 대한 민감도 해석, S_θ

그림 4는 음원의 회전방향에 대한 주파수 별 민감도 함수를 나타낸다. 그림 안에 표시된 숫자는 음원의 입사각으로 100 도 이하의 음원에 대해서는 주파수가 증가함에 따라 민감도가 선형적으로 증가하는데 반해 100 도 이상의 음원에 대해서는 물결 모양으로 증가하는 것을 알 수 있다. 입사각이 180 도에 가까워질수록 물결 모양의 물결 횟수는 작아지고 크기는 커지는데 이는 청취자의 머리가 음원과 귀 사이를 막음으로써 소리가 차단되거나 회절되는 그림자 현상(shadow effect)에 의한 것이다.

전체적으로 주파수가 커짐에 따라 민감도가 커짐을 알 수 있었고 나머지 세 개의 민감도 함수에 대해서도 같은 패턴을 보였으므로 앞으로는 간편성을 위해 주파수별 그림은 제시하지 않고 모든 주파수에 대해 평균적인 값을 사용하도록 한다(주파수 대역: 0~22kHz).

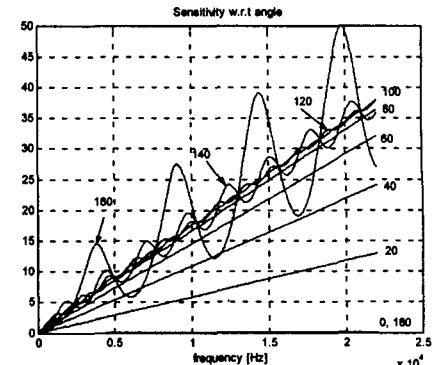


Figure 4. Sensitivity with respect to frequency

음원의 입사각에 따른 음원의 회전방향에 대한 민감도 함수의 주파수에 별 평균치를 그림 5에 제시한다. 음원의 측정하는 귀쪽에 있을 때는 민감도가 작았고 음원이 반대편으로 넘어감에 따라 민감도가 커짐을 알 수 있다. 음원이 측정점(오른쪽 귀)의 완전한 반대편(bright spot)에 있을 때는 민감도가 매우 작았지만 그곳에서 약간만 벗어나도 매우 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

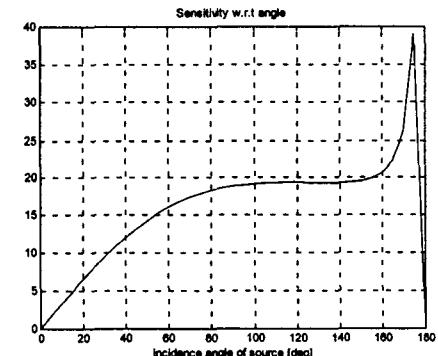


Figure 5. Sensitivity with respect to angle

위에서 구한 오른쪽 귀에서 민감도를 이용하여 두 귀에서의 민감도를 구할 수 있다. 예를 들어 음원이 30 도에 위치했을 때는 30 도에서의 민감도(오른쪽 귀)와 150 도에서의 민감도(왼쪽 귀)의 합으로 구해진다. 그림 6에 두 귀에서의 민감도의 합을 극좌표로 제시한다. 여기서, 각도를 주의해야 한다. 그림 5에서의 오른쪽 귀에 해당되는 0 도는 그림 6에서의 극좌표에서는 -10 도가 된다. 그림 6에서 90 도는 사람 머리의 정면에 해당되는 것이고 그림 안에 표시된 네모 표시는 사람의 귀의 위치에 해당된다. 다른 민감도와의 비교분석은 4.3 절에 언급한다.

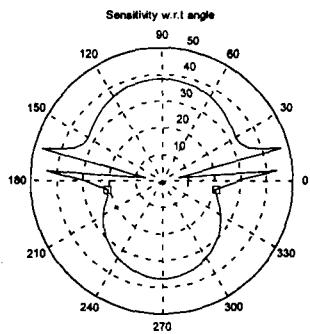


Figure 6. Sensitivity of two ears in polar coordinate

(2) 직경 방향에 대한 민감도 해석, S_r

4.1 (1) 절에서와 마찬가지로 직경 방향에 대한 민감도를 그림 7 과 8 에 제시한다.

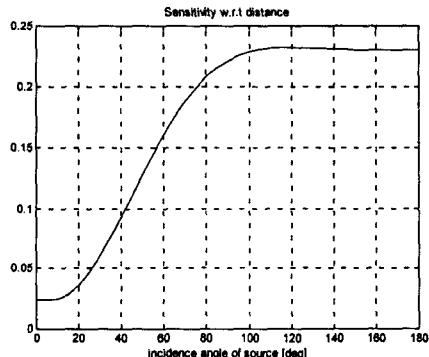


Figure 7. Sensitivity with respect to angle

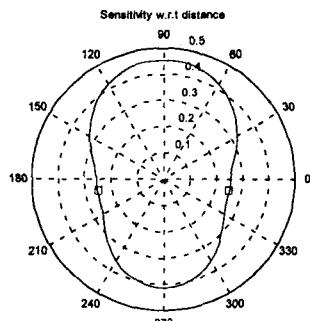


Figure 8. Sensitivity of two ears in polar coordinate

(3) 좌/우 방향에 대한 민감도 해석, S_x

좌/우 방향에 대한 민감도를 그림 9 와 10 에 제시한다.

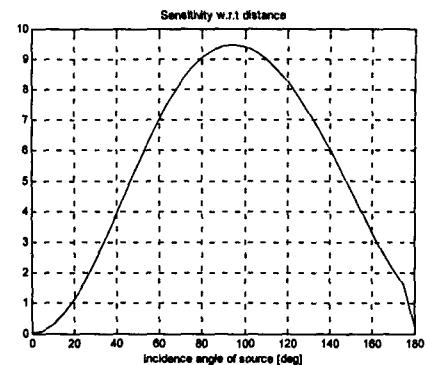


Figure 9. Sensitivity with respect to angle

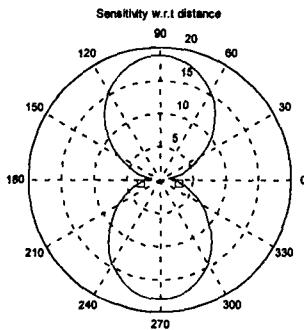


Figure 10. Sensitivity of two ears in polar coordinate

(4) 앞/뒤 방향에 대한 민감도 해석, S_y

앞/뒤 방향에 대한 민감도를 그림 11 와 12 에 제시한다.

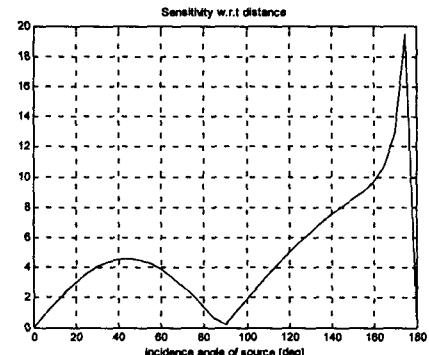


Figure 11. Sensitivity with respect to angle

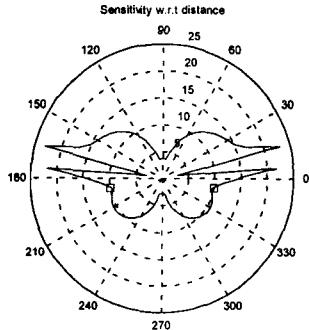


Figure 12. Sensitivity of two ears in polar coordinate

4.2. 음원의 거리에 따른 민감도 해석

위에서는 음원의 방향에 따른 네 가지의 민감도를 해석하였고 여기서는 음원의 거리에 따른 민감도를 해석한다. 음원의 회전방향에 대한 민감도는 음원의 거리가 멀어져도 영향을 거의 받지 않았고 좌/우방향과 앞/뒤 방향에 대한 민감도는 직경방향에 대한 민감도와 같은 패턴을 가지므로 거리에 따른 직경방향에 대한 민감도의 해석 결과만 제시한다. 거리를 2m~10m 까지 변화시켰다.

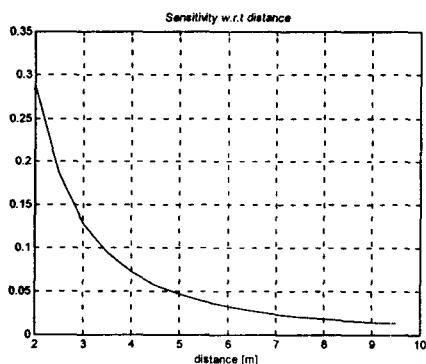


Figure 13. Sensitivity with respect to distance

4.3. 민감도 해석 결과 분석

위에서 구한 민감도 함수는 머리전달함수에 대한 머리전달함수의 변화량을 의미하는 것으로 네 가지의 민감도 함수를 비교하기 위하여 회전방향에 대한 민감도로부터 머리회전 0.3 도 변화(원주방향으로 1cm 변화)에 따른 머리전달함수 변화의 백분율을 구하고 직경방향, 좌/우방향, 앞/뒤방향에 대한 민감도로부터 1cm 변화에 따른 머리전달함수 변화의 백분율을 구한다. 머리전달함수 변화의 백분율은 머리의 회전에 대해서는 16%정도, 직경방향에 대해서는 0.4%정도, 좌/우방향에 대해서는 11%정도, 앞/뒤방향에 대해서는 10%정도의 변화량을 갖는다고 볼 수 있다.

민감도 해석 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다. (1) 네 가지의 민감도 함수 모두 주파수가 증가함에 따라 그 크기가 증가하였다. (2) 네 가지의 머리움직임 중, 회전방향에 대해서 가장 민감하다. (3) 회전방향에 대한 민감도는 거리에 영향을 받지 않는다. (4) 병진운동에 관한 민감도는 스피커의 거리를 멀게 하면 민감도가 떨어진다.

5. 결론

머리움직임이 머리전달함수에 미치는 영향을 살펴보기 위해 구 머리전달함수의 민감도 해석을 수행하였다. 음원의 주파수가 높을수록 머리움직임에 민감하였고 입체음향 시스템의 스피커를 멀리 배치할 경우 머리의 병진운동에 대한 민감도는 낮출 수 있으나 머리의 회전에 대한 민감도에는 거의 영향을 끼치지 않는다.

후기

본 논문은 한국과학재단 가상현실연구센터의 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) Begault, D. R., 1994, 3-D sound for virtual reality and multimedia, Academic press.
- (2) Rabinowitz, W. M., Maxwell, J., Shao, Y., and Wei, M. 1993, "Sound localization cues for a magnified head: Implications from sound diffraction about a rigid sphere", Presence 2, pp. 125-129.
- (3) Richard, O. D. and William, L. M., 1998, "Range dependence of response of a spherical head model", J. Acoust. Soc. Am. 104(5), Nov. pp. 3048-3058.
- (4) Bauck, J. L., and Cooper, D. H., 1980, "On acoustical specification of natural stereo imaging", Preprint 1649 (H-7), 66th Convention Audio Engineering Society, Los Angeles, CA.