

가상 현실 선박 조종 시뮬레이터 구현을 위한 3차원 음장 생성(Ⅱ): 음장 제어

임 정 빈*

3-D Sound-Field Creation Implementing the Virtual Reality Ship Handling Simulator(Ⅱ): Sound-Field Control

*Jeong-Bin Yim**

〈목 차〉

Abstract

1. 서 론
2. 3차원 음장 제어
- 2.1 음장 제어 방법
- 2.2 영상 음원법

- 2.3 음장 제어 모델
- 2.4 음장 제어 요소
3. 실험
4. 결 론

Abstract

The paper is the second part on the 3-D sound-field creation implementing the Virtual Reality Ship Handling Simulator(VRSHS). As mentioned in the previous part I, the spatial impression, which arose from reproduced 3-D sound-field, give natural sound environmental context to a listener. This spatial impression is due to the reverberation by reflections and, is can be obtain by using Head-Related Transfer Function(HRTF). In this work, we formulate early and late reverberation models of the HRTF's with theoretical control factors based on the sound-energy distribution in an irregularly shaped enclosures. Using the reverberation models, we report results from psychophysical tests used to asses the validity of the proposed 3-D sound-field control method.

* 정회원, 해군사관학교 항해운용학과 조교수

1. 서 론

머리전달함수(Head Related Transfer Function, HRTF)의 모델링 이론과 방법 및 이를 이용한 3차원 음장 재생 방법에 관해서는 앞의 논문[가상 현실 선박 조종 시뮬레이터 구현을 위한 3차원 음장 재생(I): 머리전달함수 모델링]에서 기술하였다. 이 연구에서는, 이러한 HRTF를 이용하여, 임의의 공간에 대한 느낌 즉, 공간감(spatial impression)을 만들기 위한 잔향 모델과 음장 제어 요소 결정 방법에 대하여 기술한다.

3차원 음장 제어 모델에 주로 사용되는 방법은, 음선 추적법(Ray Tracing Model Method)과 영상 음원법(Image Model Method)이다[1]. 음선 추적법은, 주어진 공간에서 발생하는 음파(sound wave)의 모든 반사 경로(reflection paths)를 추적하기 때문에 계산 과정이 복잡하고, 계산 량이 큰 문제점이 있다. 이러한 음선 추적법은 콘서트 홀, 성당, 교회 등과 같은 대규모 건축 설계에 주로 사용되고 있다. 영상 음원법은, 반사 음파를 마치 빛의 반사와 같이 취급하므로, 음선 추적법과 비교하여 단순하고, 계산 량이 적게되는 장점이 있으나, 공간 특성에 대한 모델의 정밀도는 낮다. 그러나, 3차원 음장 제어에서는, 모델의 정밀도보다는 음장 제어에 필요한 계산 속도를 빠르게 하는 것이 우선 이고, 정해진 공간 창출보다는 임의의 공간 창출이 목적이므로, 영상 음원법을 적용하는 것이 유리하다. 또한, 영상 음원법을 적용하는 경우에도, 반사 차수를 점차 증가시키므로써, 음원 추적법과 대등한 정밀도를 얻을 수 있다.

이러한 영상 음원법 적용에는, 음선 추적법과 달리, 음 환경에서 발생하는 음파의 반사, 감쇠, 지연 등의 모든 음장 제어 요소를 유기적으로 분석하고, 결정된 후, 적용해야만 자연스러운 3차원 음장 구현이 가능하다.

이 연구에서는, 먼저, 실내와 같은 직방체(irregularly shaped enclosures)에서의 음-에너지에 관한 이론을 음장 제어에 적용할 수 있도록 정립하고, 음 환경에 적합한 제어 요소를 선정하여, 3차원 음장 제어 모

델을 구성하였다. 그리고, 결정된 제어 요소들을 음장 제어 모델에 적용하여 음장 제어 시뮬레이션을 하고, 청취자에 의한 심리음향 평가를 하였다.

2. 3차원 음장 제어

2.1 음장 제어 방법

그림 1은 잔향이 있는 $x-y-z$ 의 3차원 공간에서 측정된 전형적인 임펄스응답을, 직접음파 특성(D), 초기 반사 음파 특성(ER), 후기 반사 음파 특성(LR)으로 분리하여 간단히 나타낸 것이다.

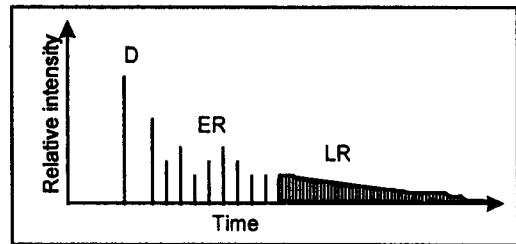


그림 1. 간단히 나타낸 잔향을 갖는 임펄스응답의 전형적인 형태(D=직접 음파, ER=초기 반사 음파, LR=후기 반사 음파).

일반적으로, 잔향 공간에서 음을 청취하게 되면, 공간의 특성을 느낄 수 있다. 즉, 잔향이 많은 대형 콘크리트 터널 내부에서는 울림이 크게 느껴지고, 콘서트 홀과 같이 적당한 잔향이 있는 장소에서는, 자연스러운 악기들의 음을 청취할 수 있다. 이러한 현상을 위의 그림 1에서 살펴보면, D는 음원이 공기를 통하여 청취자에게 직접 전달되는 특성이고, ER은 음원 근처에 있는 벽, 바닥, 천정 등에서 초기에 반사된 음파가 공간을 통하여 청취자에게 전달되는 특성이다. 그리고, LR은 초기 반사 음파 이후의 고차 반사 음파가 공기를 통하여 청취자에게 전달되는 특성이다. 이러한 D특성은 음원이 존재하는 방향감을 주고, ER은 두의 음상 정위(externalization)를 형성하여 직접 음파의 인텐시티 증감과 함께 거리감을 준다. LR은 청취자가 위치한 공간감을 준다. 여기서, 거리감은 공간감에 포함되는 의미로서, 공간감이 형성되어야 거리감을 느낄 수 있다. 따라서, D, ER,

LR 등의 특성을 효과적으로 혼합하여 음상정위, 거리감, 공간감을 제어할 수 있다.

여기서, HRTF는 그림 1과 같은 형태를 갖지 않고, D특성만을 갖고 있다. HRTF가 D특성만을 갖도록 측정하는 이유는, HRTF의 임펄스응답 수열의 길이를 짧게 할 목적 외에 HRTF 사용시의 유연성을 높이기 위한 목적도 있다. 즉, HRTF 적용 목적과 효과가 사용 환경에 따라 변하므로 HRTF 측정시 임의의 한 공간에 대한 잔향 특성을 포함시키지 않는다. 따라서, 음장 제어를 위해서는 원하는 잔향 특성을 HRTF에 포함시키는 제어 방법이 필요하다. 이 연구에서는, 영상 음원법을 이용하여 HRTF가 그림 1과 같은 잔향을 갖는 임펄스응답 형태를 갖도록 HRTF를 혼합하는 방법을 제안한다.

2.2 영상 음원법

그림 2는 $x-y-z$ 3차원 공간에서, $x-y$ 2차원 평면에 나타난 영상 음원법의 개념을 나타낸다.

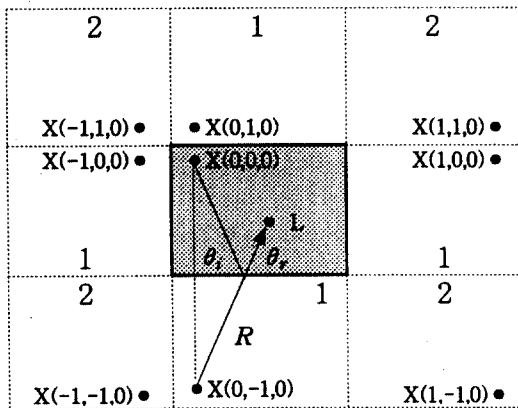


그림 2. $x-y$ 평면에서의 영상 음원 위치($X(0,0,0)$): 음원 위치, L :청취자 위치, $X(n_x, n_y, n_z)$:영상 음원 위치, $n_x, n_y, n_z=0, 1, 2, \dots$).

그림 2에서, 음원 $X(0,0,0)$ 을 포함하고 있는 좁은 실선의 사각형이 실 공간(real space)을 나타내고, 점선으로 표시한 사각형은 가상 공간(virtual space)을 나타낸다. 그리고, 편의상 가상 공간에 표시한 1, 2 등의 숫자는 $+x, +y, +z$ 축상에 나타나는 반사파

의 차수(order)를 나타내고, -1, -2 등의 숫자는 $-x, -y, -z$ 축상에 나타나는 반사파의 차수를 나타낸다. 그리고, x, y, z 축에 나타나는 반사파의 차수를 n_x, n_y, n_z ($-\infty \leq n_x, n_y, n_z \leq +\infty$)로 표시하고, 가상 공간에서의 영상 음원 위치를 $X(n_x, n_y, n_z)$ 로 나타낸다. 여기서, $x-y-z$ 좌표중심은 $Lx/2, Ly/2, Lz/2$ (Lx, Ly, Lz 는 각각 공간의 x, y, z 길이)로 한다.

음원 $X(0,0,0)$ 가 벽면에 반사될 때, 1차 반사 음파를 만들고, 1차 반사음파는 다시 2차 반사 음파를 만드는 방법으로, p ($p=1, 2, 3, \dots, \infty$)차까지의 반사 음파가 형성된다. 1차 반사 음파는 3차원 공간의 벽면이 모두 6개이므로, 6개의 반사가 형성되고, 2차 반사 음파는 18개, 3차 반사 음파는 38개, 4차 반사 음파는 66개 등으로 발생된다. p 차에 대한 반사 음파의 수 $N_{Ref}(p)$ 는 다음 식(1)과 같은 계차 수열로 나타낼 수 있다.

$$N_{Ref}(p) = a_1 + \sum_{k=1}^{p-1} b_k \quad (p \geq 2) \dots\dots\dots (1)$$

$$b_k = 8k + 4$$

여기서, 초기 조건으로서, $N_{Ref}(1) = a_1, a_1 = 6$.

식(1)에 대한 일반항을 구하면, $N_{Ref}(p) = 4p^2 + 2$ 이 된다. 그리고, p 차에 대한 총 반사음파의 수 $NT_{Ref}(p)$ 는,

$$NT_{Ref}(p) = \sum_{k=1}^p (4k^2 + 2) \dots\dots\dots (2)$$

가 되고, 식(2)에 대한 일반항을 구하면,

$$NT_{Ref}(p) = \frac{1}{3} p (4p^2 + 6p + 8)$$

여기서, L 과 $X(n_x, n_y, n_z)$ 사이의 경로 길이 R 과, L 로 입사될 때의 입사각 θ ,를 계산하는 경우, 모든 반사 음파 경로를 추적하는 것은 계산 과정이 복잡하다. 이 때, $X(n_x, n_y, n_z)$ 와 L 을 잇는 직선 경로를 이용하면 계산은 간단하다. 즉, 그림 2와 같이, $X(0,0,0)$ 가 벽면에 1차 반사되어 L 로 입사되는 경우, $X(0,-1,0)$ 와 L 을 잇는 직선 경로 상에서 간단히 구할 수 있다.

그림 2에서, $X(n_x, n_y, n_z)$ 에서 L 까지의 거리 $R(n_x, n_y, n_z)$ 와 고각 $\psi(n_x, n_y, n_z)$ 및, 방위각 $\theta(n_x, n_y, n_z)$ 는 다음 식(3)으로 구한다.

$$\left. \begin{aligned} R(n_x, n_y, n_z) &= \sqrt{x(n_x)^2 + y(n_y)^2 + z(n_z)^2}, \quad R(n_x, n_y, n_z) \geq 0 \\ \Theta(n_x, n_y, n_z) &= \cos^{-1} \frac{y(n_y)}{\sqrt{x(n_x)^2 + y(n_y)^2}}, \quad 0 \leq \Theta(n_x, n_y, n_z) \leq 180 \\ \Psi(n_x, n_y, n_z) &= \sin^{-1} \frac{z(n_z)}{r(n_x, n_y, n_z)}, \quad -90 \leq \Psi(n_x, n_y, n_z) \leq +90 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

위의 식(3)에서, $x(n_x), y(n_y), z(n_z)$ 는 각각 $X(n_x, n_y, n_z)$ 에 대한 x, y, z 위치이고, 다음 식(4)로 구한다.

$$\left. \begin{aligned} x(n_x) &= x_0 \pm \sum_{k=1}^{n_x} [L_x \pm ((-1)^k \cdot 2 \cdot x_0)], \quad (n_x \geq 1) \\ y(n_y) &= y_0 \pm \sum_{k=1}^{n_y} [L_y \pm ((-1)^k \cdot 2 \cdot y_0)], \quad (n_y \geq 1) \\ z(n_z) &= z_0 \pm \sum_{k=1}^{n_z} [L_z \pm ((-1)^k \cdot 2 \cdot z_0)], \quad (n_z \geq 1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

여기서, $x(0) = x_0, y(0) = y_0, z(0) = z_0$,
 x_0, y_0, z_0 : 각각 $X(0,0,0)$ 의 x, y, z 값.

위의 식(1)~(4)를 이용하여 p 차에 대한, $X(n_x, n_y, n_z)$ 에서 L 까지의 $R(n_x, n_y, n_z), \Theta(n_x, n_y, n_z), \Psi(n_x, n_y, n_z)$ 를 구하고, 이 요소들에 의하여 결정되는 제어요소를 계산한 후, (θ_i, ψ_j) ($i=1,2,\dots,I; j=1,2,\dots,J$) 방향에서 측정된 HRTF를 합성한다. 이 때, 각 제어 요소를 계산하기 전에 어떠한 방법으로 HRTF를 합성할 것인가를 결정해야 한다. 따라서, 다음과 같은 HRTF 합성 모델을 고려한다.

2.3 음장 제어 모델

그림 3은 3차원 음장 제어 모델이다. 이 모델은, (θ_i, ψ_j) ($i=1,2,\dots,I; j=1,2,\dots,J$) 방향에서 측정된 HRTF에 여러 가지 제어 요소를 부가하여 구성한다.

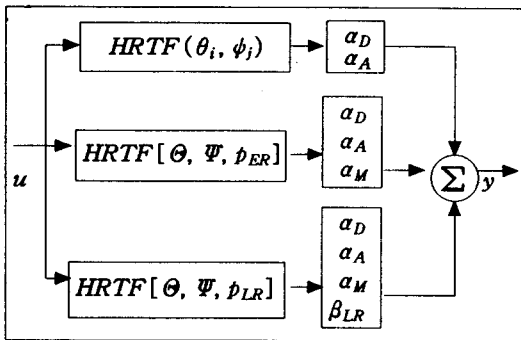


그림 3. 3차원 음장 제어 모델.

이 모델의 구조는 3부분으로 구성된다. 먼저, $HRTF(\theta_i, \psi_j)$ 는, 그림 1에서의 직접 음파 특성(D)을 구현하기 위한 부분이다. $HRTF[\Theta, \Psi, p_{ER}]$ 는, 초기 반사 음파 특성(그림 1에서의 ER)을 구현하기 위하여, 위의 식(3)에서 $p = p_{ER}$ 로 제한할 때의 $\Theta(n_x, n_y, n_z)$ 와 $\Psi(n_x, n_y, n_z)$ 위치에 대한 HRTF를 합성하는 부분이다. $HRTF[\Theta, \Psi, p_{LR}]$ 는, 후기 반사 음파 특성(그림 1에서의 LR)을 구현하기 위하여, 위의 식(3)에서 $p = p_{LR}$ 로 제한할 때의 $\Theta(n_x, n_y, n_z)$ 와 $\Psi(n_x, n_y, n_z)$ 위치에 대한 HRTF를 합성하는 부분이다.

그리고, 각 HRTF에는, 거리에 따른 음파의 감쇠 계수 α_D , 공기에 의한 음파의 감쇠 계수 α_A , 벽면 재질에서의 음파의 흡수에 대한 감쇠 계수 α_M 등의 제어 요소를 부가한다. 제어 요소들을 고려한 그림 3에서의 출력 $y(\theta_i, \psi_j)$ 는 다음 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y(\theta_i, \psi_j) &= u * \{ [HRTF(\theta_i, \psi_j)] \alpha_D \alpha_A \\ &+ HRTF[\Theta(n_x, n_y, n_z, p_{ER}), \Psi(n_x, n_y, n_z, p_{ER})] \alpha_D \alpha_A \alpha_M \\ &+ HRTF[\Theta(n_x, n_y, n_z, p_{LR}), \Psi(n_x, n_y, n_z, p_{LR})] \alpha_D \alpha_A \alpha_M \beta_{LR} \} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, u :음원, $*$:콘볼루션 연산, β_{LR} :후기 반사 음파 특성의 이득.

식(5)에서, 모든 반사 음파를 고려한 $y(\theta_i, \psi_j)$ 계산에는 긴 콘볼루션 연산 시간이 필요하다. 여기서, 그림 2와 같이 고려한 직방체에서는, 3차 또는, 4차까지의 반사 음파만이 (θ_i, ψ_j) 변화에 대하여 의미 있는 값을 갖는다. 그 이유는, 고차 반사로 진행될 수록 $\alpha_D, \alpha_A, \alpha_M$ 등의 감쇠 계수가 지수 증가 형태로 커지기 때문에 3차 또는 4차 이후의 반사 음파 특성이 (θ_i, ψ_j) 변화와는 근사적으로 독립된 형태로 되기 때문이다. 따라서, 이 연구에서는, 식(5)에서의 초기 반사 차수를 $p_{ER}=3$ 으로 정하고, p_{LR} 는 다음의 제어 요소 결정 이론 식에서 정하였다. 그리고, (θ_i, ψ_j) 변화마다 그림 3에서의 $HRTF[\Theta, \Psi, p_{LR}]$ 를 계산하는 것은 의미가 없으므로, (θ_i, ψ_j) 와는 독립으로, 미리 계산하여 음장 제어에 적용하였다. 그리고, 식(5)에서의 β_{LR} 의 크기를 조절하여 그 영향을 제어하였다. 이러한 방법을 적용하는 경우, 위의 식

(5)의 계산 시간을 크게 단축할 수 있다. 다음에는, $\alpha_D, \alpha_A, \alpha_M$ 등의 제어 요소 결정에 관하여 기술한다.

2.4 음장 제어 요소

점 음원(spherical source)에서 방사된 음파는 모든 방향으로 진행하고, 벽면 반사로 인하여 혼합 음장(diffused sound field)을 형성하게 된다. 이 때, 청취자 위치에 마이크로폰을 두고 측정한 평균 음압은, 다음 식(6)과 같은 음-에너지 밀도(sound energy density watt-sec/m³)로 나타난다[2].

$$D_{avg} = \frac{|P_{avg}|^2}{\rho_0 c^2} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, $|P_{avg}|$: 시공간에서 평균한 음압의 rms 크기, $\rho_0 c$: 공기의 특성 임피던스, ρ_0, c : 각각 공기 밀도 및 음속.

음파는 입사각과 같은 반사각으로 반사되며, 다시 제2, 제3 등의 반사파를 연속하여 만든다. 통계적 관점에서, 반사파들 사이의 평균 자유 경로(Mean Free Path, MFP(m))는 다음 식(7)로 되고,

$$MFP = \frac{4V}{S} \dots\dots\dots (7)$$

여기서, V, S : 각각 방의 체적과 총 표면적.

음파가 MFP 거리를 이동할 때 걸리는 시간 t_{MFP} (sec)는,

$$t_{MFP} = \frac{4V}{cS} \dots\dots\dots (8)$$

이 된다. 음파가 벽에 부딪히는 횟수가 점점 증가하게 되면, 각 반사면에 동일한 확률로 음파가 입사된다. 따라서, 벽면에서의 평균 흡수 계수 $\overline{\alpha_{Ab}}$ 은 다음 식(9)과 같이, 반사 면적에 따라 무게 가중된 형태로 된다.

$$\overline{\alpha_{Ab}} = \frac{S_1 \alpha_{Ab1} + S_2 \alpha_{Ab2} + \dots + S_n \alpha_{Abn}}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \dots\dots\dots (9)$$

여기서, S_1, S_2, \dots, S_n : 각 반사표면적, $\alpha_{Ab1}, \alpha_{Ab2}, \dots, \alpha_{Abn}$: 각 반사표면의 흡수 계수.

따라서, 벽면 재질에 따른 평균 감쇠 계수 $\overline{\alpha_M}$ 은, $\overline{\alpha_M} = (1 - \overline{\alpha_{Ab}}) \dots\dots\dots (10)$

이 된다. 그리고, 초기의 음-에너지 밀도를 D' 로 두면, t 초 후의 음-에너지 밀도 $D(t)$ 는,

$$D(t) = D'(1 - \overline{\alpha_{Ab}})^{t/t_{MFP}} \dots\dots\dots (11)$$

이 된다. 식(11)에 식(8)을 대입하고,

$1 - \overline{\alpha_{Ab}} \equiv e^{\log_e(1 - \overline{\alpha_{Ab}})}$ 로 하면, 식(11)은 다음 식(12)으로 되고,

$$D(t) = D' e^{-(cS/4V)[-\log_e(1 - \overline{\alpha_{Ab}})]t} \dots\dots\dots (12)$$

식(12)를 SPL(Sound Pressure Level(dB))로 나타내면 다음과 같다.

$$SPL_{t=t} - SPL_{t=0} = 1.085 \frac{cS}{V} [-2.3 \log_{10}(1 - \overline{\alpha_{Ab}})]t \dots\dots\dots (13)$$

따라서, 반사파는 벽면에 의한 흡수에 의하여 식(13)에 따라 감쇠 된다. 또한, 음은 반사 표면 흡수 뿐만 아니라 공기에 의해서도 흡수된다. 음파가 MFP 경과하는 동안, 공기에 의한 음 에너지 감소를 고려하면, 위의 식(12)은 다음 식(14)으로 나타난다.

$$D(t) = D' e^{-(cS/4V)[-\log_e(1 - \overline{\alpha_{Ab}}) - 4V\alpha_A/S]t} \dots\dots\dots (14)$$

이 때, 음-에너지가 60(dB) 감소할 때까지의 잔향시간 T_{60} (sec)는,

$$T_{60} = \frac{60V}{1.085 c (S[-2.3 \log_{10}(1 - \overline{\alpha_{Ab}})] + 4\alpha_A V)} \dots\dots\dots (15)$$

이 되고, 이 때의 반사 횟수 $n(T_{60})$ 은,

$$n(T_{60}) = \frac{T_{60}}{t_{MFP}} \dots\dots\dots (16)$$

이 된다. 따라서, T_{60} 시간 경과 때, 반사 음파는 $n(T_{60})$ 차까지의 반사파가 형성된다. 이 연구에서는, $n(T_{60})$ 에 대한 값을 그림 3에서의 $\rho_{L,R}$ 로 정하였다.

위의 식들에 나타나는 공기에 의한 에너지 감쇠 상수 α_A 는, $\alpha_A = \alpha_{Aa} + \alpha_{Ad}$ 로 계산된다. 공기의 경

우, $\alpha_{Ad} = 4.24 f^2 \times 10^{-11} (m^{-1})$ 으로 정해져 있다. 그리고, α_{Ad} 의 계산에는 주파수와 온도, 절대 습도, 대기압 등을 변수로 하는 복잡한 과정을 요한다. 이 연구에서는, 정상 상태의 온도($22^\circ C$)와 상대 습도($R.H. = 60\%$)를 기준으로 하여, 주파수에 따른 α_{Ad} 값을 1950년 Knudsen과 Harris에 의해 보고된 그래프[3]에서 구하였다. <표 1>은 주파수 f 에 따른 α_{Ad} 값이다.

<표 1> f 에 따른 α_{Ad} .

f	01.k	0.2k	0.5k	1k	2k	5k	10k	20k
$\alpha_{Ad} \times 10^4$	0.015	0.04	0.3	1.4	6.0	32	150	600

잔향 에너지의 정상 상태 값을 고려하면, 제1차 반사 직후까지의 rms 평균 음압의 크기는, 음원이 실내에 공급한 총 파워 $W(watt)$ 에 대하여 식(17)로 나타난다.

$$|P_{avg}|^2 = \frac{4\rho_0 c W}{k_R} \dots\dots\dots (17)$$

여기서, k_R : 식(18)로 계산되는 실내 상수.

$$k_R = \frac{\overline{\alpha_{Ad}(S+4V)}}{1 - \overline{\alpha_{Ad}(1+4V/S)}} \dots\dots\dots (18)$$

그리고, 제2차 반사 이후의 모든 반사를 고려한 거리 r 점에서의 에너지 밀도는 식(19)이 된다.

$$D_r = \frac{|P_r|^2}{\rho_0 c^2} = \frac{W}{4\pi r^2 c} \dots\dots\dots (19)$$

여기서, P_r : r 점에서의 rms 음압의 크기.

위의 식(17)과 식(19)을 합친, 모든 잔향에 대한 자승 평균 압력은 다음 식(20)이 된다.

$$|P|^2 = W\rho_0 c \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{k_R} \right) \dots\dots\dots (20)$$

기준 거리를 r_{REF} 로 했을 때의 $SPL_{r,REF}$ 와, r 점에서의 SPL_r 과의 차, $SPL_{r,r}$ 는,

$$\begin{aligned} SPL_{r,r} &= SPL_r - SPL_{r,REF} \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{k_R} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi r_{REF}^2} + \frac{4}{k_R} \right) \end{aligned} \dots\dots\dots (21)$$

이 된다. 따라서, 거리에 따른 음파의 감쇠계수 α_D 는, 위의 식(21)로부터,

$$\alpha_D = 10^{0.1 SPL_{r,r}(r)} \dots\dots\dots (22)$$

가 된다. 식(21)에서, r 점에서의 $SPL_{r,D}$ 는, 기준 거리 r_{REF} 와 실내 상수 k_R 로 결정되므로, $(1/4\pi r^2 \ll 4/k_R)$ 이 되는 거리 r 부터 거리에 독립된 특성이 된다. 이 연구에서는 후기 반사음파에 대한 효과를 제어할 목적으로, 후기 반사 음파 제어에는, k_R 을 고려하지 않은 다음 식(23)을 적용하였다.

$$SPL_{R,D} = SPL_r - SPL_{r,REF} = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi r_{DREF}^2}{4\pi r^2} \right) \dots\dots (23)$$

3. 실험

실험 환경 및 절차는 앞의 논문[가상 현실 선박 조종 시뮬레이터 구현을 위한 3차원 음장 재생 (I): 머리전달함수 모델링]과 동일하다. 3차원 음장 제어에 적용한 가상 공간의 크기는, 가로4.2m, 세로5.9m, 높이3.5m로 정하고, $p_{ER} = 3$ 으로 제한하였으며, $r_{REF} = 0.2(m)$ 로 정하였다. 이러한 가상 공간의 크기는 사용자 임의로 정한다. 그리고, p_{LR} 은 식(15)에서 계산한 $n(T_{60})$ 으로 정하고, r_{DREF} 은 후기 반사 음파의 영향을 증가시킬 목적으로 1.0(m)으로 하였다.

그림 4는, 위에서 열거한 실험 조건을 그림 3의 제어 모델에 적용하여 합성한 HRTF로서, 음원이 청취자에 대하여 방위각 60도, 고각 0도에 위치했을 때를 예로 들어 나타낸 것이다. 그림 4(위)는, 그림 3의 제어 모델에서의 직접 음파 전달 특성에 대한 $HRTF(\theta, \phi)$ 를 나타낸다. 그림4(중간)는, $r = 0.6m$ 일 때 그림 3의 제어 모델에서 합성한 초기 반사 음파 특성에 대한 $HRTF[\theta, \psi, p_{ER}]$ 를 나타낸다. 그림4(아래)는, 그림 3의 제어 모델에서 합성한

후기 반사 음파 특성에 대한 $HRTF[\theta, \psi, \beta_{LR}]$ ($\beta_{LR}=100$)를 나타낸다.

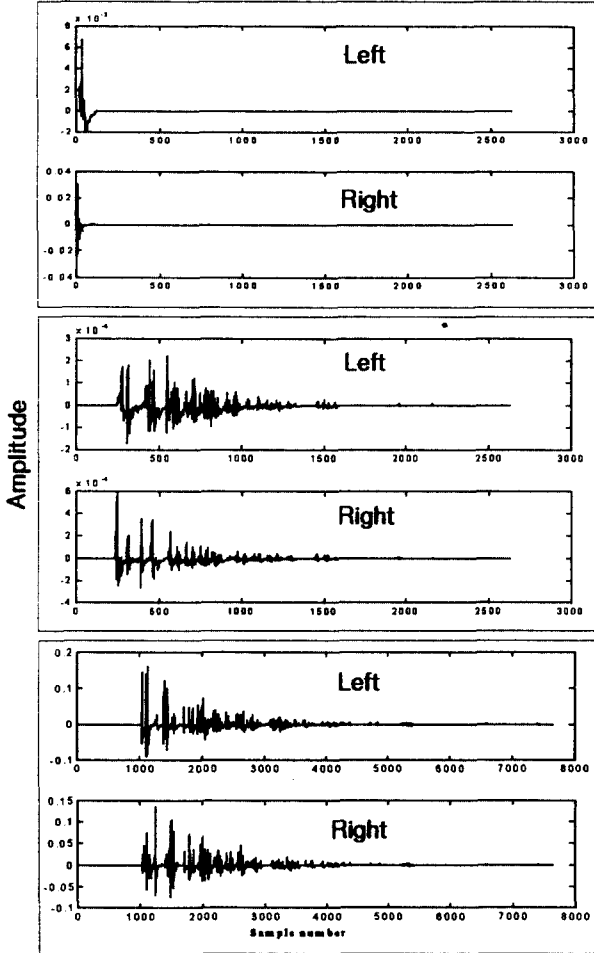


그림 4. 음장 제어 모델로부터 구한 합성 HRTF. 직접 음파 전달 특성에 대한 HRTF(60.0)(위), 초기 반사 음파에 대한 합성 HRTF(중간), 후기 반사 음파에 대한 합성 HRTF($\beta_{LR}=100$)(아래).

그림 4를 살펴보면, 초기 반사 음파(중간 그림) 및 후기 반사 음파(아래 그림)에 대한 합성 HRTF는, 그림 1의 잔향을 갖는 전형적인 임펄스응답 형태로 구성되었음을 알 수 있다. 따라서, 이 연구에

서 제안한 3차원 음장 제어 모델과 제어 요소 결정 방법이 잔향 특성 구현에 유용함을 알 수 있다.

거리감에 대한 심리 음향 평가 결과는, 다음 식 (24)으로 계산되는 청취자 총원에 대한 평균 지각 거리 A_{SD} (m)로 나타내었다.

$$A_{SD} = \frac{\sum_i \sum_j d(\theta_i, \psi_j)_{perceived}}{LM} \dots\dots\dots (24)$$

여기서, $d(\theta_i, \psi_j)_{perceived}$: (θ_i, ψ_j)위치에서 청취자가 인지한 거리(m), L, M : 각각 청취자의 수, 청취자 1인당 실험 반복수.

그림 5는 거리감에 대한 평가 결과로서, 거리 $r=0.6m$ 일 때, 방위각 θ_i ($\psi=0^\circ$)의 선박 기적음에 대하여 측정된 A_{SD} (그림 위)와, 고각 ψ_i ($\theta=60^\circ$)에 대한 A_{SD} (그림 아래)를 극좌표 형식으로 나타낸 것이다. 이 결과는, $r=0.6m$ 에 대한 A_{SD} 의 특징을 살펴보기 위하여 몇 가지 대표 값에 대해서만 간단히 나타낸 것으로, 원의 둘레는 θ_i (또는 ψ_i)를 나타내고, 직선의 길이는 A_{SD} 값을 나타낸다.

그림5(위)의 방위각 θ_i 변화에 대한 A_{SD} 를 살펴보면, 전면 방위각 부분 ($\theta=0^\circ \pm 30^\circ$)에서는 A_{SD} 값이 0.5m이하로 낮게 나타나고, 후면 방위각 부분 ($\theta=180^\circ \pm 10^\circ$)에서는 주어진 $r=0.6m$ 보다 다소 높게 나타나고 있다. 그림5(아래)의 고각 ψ_i 변화에 대한 A_{SD} 를 살펴보면, 모든 고각에서 거리 지각이 잘되고, 특히 $-\psi_i$ 에 대해서는 주어진 거리 $r=0.6m$ 보다 더 멀게 느끼고 있다. 그림 5에 대한 결과들은, '전-후면 음상정위 곤란 현상'과 함께, 청취자들이 헤드폰 착용시 일반적으로 듣지 못했던 후면 방위각 및 $-\psi_i$ 고각에 대한 3차원 음에 대하여 보다 쉽게 판별하고, 느낄 수 있기 때문으로 생각된다. 그리고 재생한 3차원 기적 음장에 공간감이 형성되었기 때문에 거리감이 느껴진다고 해석할 수 있다. 이러한 공간감에 대한 청취자들의 느낌을 서술로 대체하면, 이 실험에서 주어진 공간 크기의 실내에서 음을 듣는 것보다 울림 현상이 증가됨을 나타내었다. 이

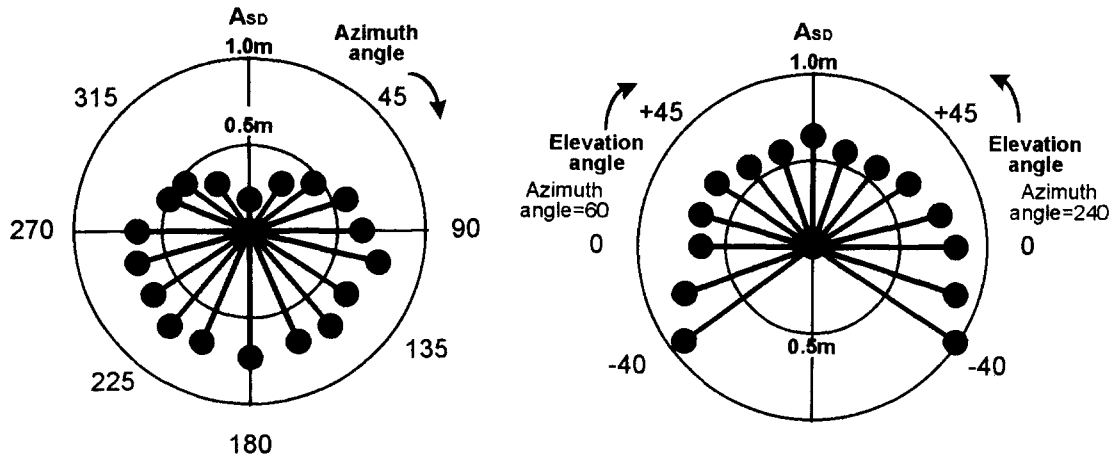


그림 5. 거리 지각에 대한 심리 음향 평가 결과. θ_i ($\psi=0^\circ$)에 대한 A_{SD} (그림 위)과 ψ_j ($\theta=60^\circ$)에 대한 A_{SD} (그림 아래). 원의 둘레는 θ_i (또는 ψ_j)를 나타내고, 직선의 길이는 A_{SD} 값을 나타낸다. 여기서, 큰 원은 $A_{SD}=1.0m$, 작은 원은 $A_{SD}=0.5m$ 를 나타낸다.

러한 이유는 $\beta_{LR}=100$ 으로 했기 때문이며, $\beta_{LR}=1$ 또는, $\beta_{LR}=10$ 으로 할 때는 울림 없이 자연 공간에서 음을 청취할 때와 대등한 정도의 공간감을 나타내었다.

이러한 인간의 거리감 또는 공간감이라는 느낌(또는 지각)정도를 측정하고, 평가하는 방법이 아직까지 확립된 바는 없고, 심리학에서 그 연구가 진행되고 있다. 따라서, 이에 대한 연구도 지속적으로 필요하다.

4. 결 론

HRTF를 이용한 3차원 음장 제어 방법을 기술하였다. 먼저, 영상 음원법을 3차원 음장 제어에 적용하기 위한 방법을 검토하고, 음장 제어 모델과 제어 요소 결정 이론 식을 제안하였다.

제안한 제어 모델을 이용하여 3차원 선박 기적음을 재생한 결과, 음상 정위와 거리감 및 공간감이 형성되었고, 이러한 느낌이 제어 가능함을 나타내었다. 따라서, 이 연구에서 제안한 방법이 가장

현실 선박 조종 시뮬레이터(VRSHS) 구현을 위한 3차원 음장 제어 방법으로 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

이 연구에서는, 선박 기적음을 대상으로 실험하였으나, 앞으로 선박이나, 해상에서 발생하는 모든 소음에 대하여 3차원 음장을 재생하고 평가하는 연구를 계속할 예정이고, VRSHS 하드웨어를 구성할 예정이다. 그리고, VRSHS에 적합한 3차원 입체 영상과 3차원 감각 센서에 관한 연구도 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Durand R. Begault, 3-D Sound, AP Professional, New York, 1994, pp.117-190.
- 2) Allan D. Pierce, Acoustics, Acoustical Society of America, New York, 1994, pp.250-312.
- 3) Leo L. Beranek, Acoustics, Acoustical Society of America, 1993 Ed., New York, 1996. pp.285-331.