

가상 현실 선박 조종 시뮬레이터 구현을 위한 3차원 음장 생성(I): 머리전달함수 모델링

임 정 빈*

3-D Sound-Field Creation Implementing the Virtual Reality Ship Handling
Simulator(I): HRTF Modeling

*Jeong-Bin Yim**

〈목 차〉	
Abstract	3.2 머리전달함수 측정 이론
1. 서 론	4. 실험
2. 가상 현실 선박 조종 시뮬레이터의 개념	4.1 머리전달함수 측정
3. 3차원 음장 재생 이론	4.2 재생 음장 평가
3.1 음장 재생 원리	4.3 고찰
	5. 결 론

Abstract

This paper describes elemental technologies for the creation of three-dimensional(3-D) sound-field to implement the next-generation Ship Handling Simulator with human-computer interaction, known as Virtual Reality. In the virtual reality system, Head-Related Transfer Functions(HRTF's) are used to generate 3-D sound environmental context. Where, the HRTF's are impulse responses characterizing the acoustical transformation in a space. This work is divided into two parts, the part I is mainly for the model constructions of the HRTF's, the part II is for the control of 3-D sound-field by using the HRTF's. In this paper, as first part, we search for the theory to formulate models of the HRTF's which reduce the dimensionality of the formulation without loss of any directional information. Using model HRTF's, we report results from psychophysical tests used to asses the validity of the proposed modeling method.

* 정희원, 해군사관학교 항해운용학과 조교수

1. 서 론

선박 조종 시뮬레이터(Ship Handling Simulator, SHS)는, 해상 자연환경을 인위적으로 형성하고, 이 환경 속에 SHS를 구축한 해기사 교육 목적용 실험 장치이다. 기존 SHS는, 동화상을 스크린에 투사하기 위한 고속 대용량 그래픽 처리 장치와, 선박 운동 계산용 고속 데이터 처리 장치 및 넓은 공간의 건물과 다수의 운용 인력 등이 필요하다. 이러한 이유 때문에 장치가 고가이고, 유지 비용이 많이 들며, 교육 장소가 제한되는 문제점이 있다 [1],[2].

최근 컴퓨터 기술의 급속한 발전으로, 자연계에서 발생하는 환경을 인공적으로 만들 수 있는 가상 현실 시스템(Virtual Reality System, VRS)이 개발되고 있다. VRS는, 사람의 신체 부위에 헬멧 형태의 고글(Goagle)과, 헤드폰, 감각 센서 등을 부착하여 가상 공간을 만드는 장치이다. 이러한 VRS를 적용하여 SHS를 구축한 것이 가상 현실 선박 조종 시뮬레이터(Virtual Reality Ship Handling Simulator, VRSHS)로써, 기존 SHS의 단점을 적극 해소할 수 있는 차세대 시뮬레이터로 주목되고 있다. 현재, 미국, 유럽 등에서는 우주선 승조원, 항공기 조종사, 잠수함 승조원의 훈련 목적으로 VRS를 적용한 교육 장치가 연구 개발되고 있으나, SHS에 VRS를 적용한 연구 사례는 발표된 바 없다. 국내의 경우, 최근 VRS에 대한 관심이 고조되면서 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 3차원 영상 구현에 관한 연구가 대부분이며, 3차원 음향에 관한 연구는, 머리전달 함수(Head-Related Transfer Function, HRTF)라는 인간의 양 귀에 대한 특성 함수를 이용하는 방법이 1992년부터 저자 등에 의하여 진행되고 있다 [3]~[6].

현재, 3차원 고해상도의 그래픽 기능을 갖춘 SHS는 상당수 개발되어 있기 때문에, 이러한 SHS의 그래픽에 3차원 음향을 구현하고, 선박 운용 모델을 적용하므로써, VRSHS의 구현은 가능하다고 판단된다. 이러한 가능성을 기초로, 이 연구에서는 VRSHS 구축에 필요한 3차원 음향 재생에 관한 요소 기술을 개발하였다.

이 연구는 2개의 논문으로 구성하였다. 첫 번째 논문에서는, VRSHS에서의 3차원 음향 재생에 관한 기본 개념을 세우고, VRSHS에 적용하기 위한 HRTF 측정 이론을 정립하며, HRTF를 이용한 3차원 음향 재생 방법에 대하여 기술하였다. 두 번째 논문에서는, HRTF를 이용한 3차원 음향에 임의의 공간 환경을 부여하므로써, 현실과 같은 가상 음 환경을 형성하기 위한 방법을 제시하였다.

2 가상 현실 선박 조종 시뮬레이터의 개념

가상현실 선박 조종 시뮬레이터(Virtual Reality Ship Handling Simulator, VRSHS)의 기본 구성을 그림 1에 나타내었다.

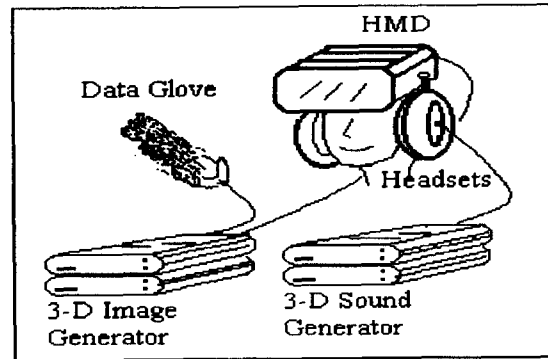


그림 1. VRSHS의 기본 구성도.

이 장치의 구성은 다음과 같다. 먼저, 사용자의 머리에 장착하는 헬멧형 영상 표시 장치(Head Mounted Display, HMD)로서, 사용자의 눈앞에 있는 소형 액정 화면에 선박의 선교(bridge)와 같은 상황이 펼쳐진다. 다음에는 화면에 나타난 가상의 선박 조종 장치들을 작동하기 위한 명령 감지용 글로브 센서(Data Glove)가 있다. 그리고, 선교 주위에서 발생하는 소리(예, 항해 장치의 각종 경보음 및 엔진 소음과 다른 선박에서의 기적음 등)가 마치 그 물체가 있는 방향에서 들리는 것과 같은 효과를 주기 위한 3-D Sound Generator가 필요하다. 또한, 3차원 영상 데이터를 고속으로 처리하기 위

한 3-D Image Generator 등이 있다.

여기서, 그림 2와 같은 시나리오를 가정한다. 이 그림은 본선이 상대 선박과 서로 마주 보면서 좌현 대 좌현(port-to-port)으로 항과 하는 경우를 나타낸다. 그리고, 상대 선박은 선수 방향으로 설치된 1개의 지향성 기적(directional whistle)을 갖고, 2분을 넘지 않는 잠음 1회의 무중 신호를 울리고 있다고 가정한다. 이러한 그림 2에서, 화면이 위에서 아래까지 연속하여 순차적으로 나타나는 경우, 현실감 있는 가상 환경이 되기 위해서는 상대 선박이 이동한 방향에서 기적 소리가 청취자에게 들릴 것이 요구된다.

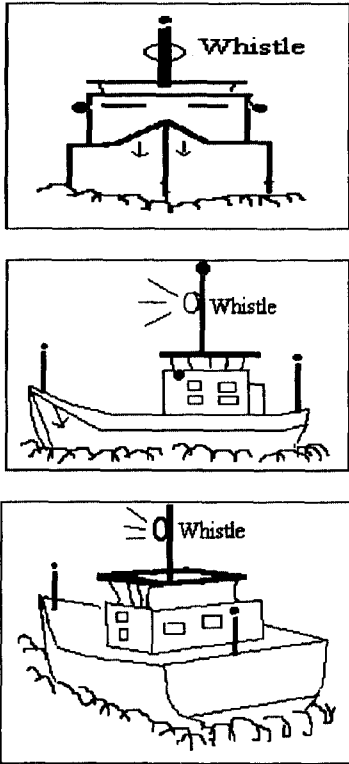


그림 2. VRSHS에서 화면 시나리오의 예. 본선에서 바라본 상대 선박의 정면(위), 좌측면(중간), 후면(아래).

이와 같이 3차원 공간에 나타난 음원(이 경우, 상대 선박의 기적음을 의미)에 대응하는 음향의 재생

또는, 재현을 3차원 음장 재생이라 한다. 여기에서 음장(sound-field)이라는 표현은 음원(sound source)이 존재하는 방향을 지각하는 음상정위(sound localization)와, 음원이 확산되는 공간의 넓이와 반사 정도 등을 지각하는 공간감(spatial impression)을 모두 포함하는 넓은 의미를 갖는다.

이러한 3차원 음장 재생의 대표적 방법은, 음원이 있는 여러 각도의 방향에서 녹음한 음을 그대로 음원의 방향에 대응하여 재생하는 방법이다. 이 경우, 물체의 이동 방향 수 및 서로 이동 방향이 다른 물체의 수가 증가하거나 긴 시간동안 음을 재생할 때는, 큰 용량의 녹음 저장 공간과 저장된 데이터를 액세스하는데 긴 시간이 필요한 문제점이 있다. 또한, 방향 변화의 속도에 따라 자연스럽게 연속된 방향으로의 재생은 곤란한 문제점도 있다.

따라서, 방향에 따라 유연하고 빠르게 그리고, 장소에 제약없이 3차원 음장을 재생할 수 있는 방법이 VRSHS에 요구된다.

3. 3차원 음장 재생 이론

3.1 음장 재생 원리

그림 3(위)은 HRTF(Head Related Transfer Function)를 이용한 음장 재생 시스템의 기본 구성도로서, HRTF 측정 부분(그림 위)과, 3차원 음장 재생 부분(그림 아래)으로 구분된다.

먼저, 그림 3에서, HRTF 측정을 위하여 의사머리 마이크로폰(Dummy Head Microphone, DHM)이라는 장치와 구동 스피커(Loud Speaker, LS)를 설치한다. 여기서, DHM은 인간 머리 형태를 갖는 마네킹 두 귀의 고막(ear-drum) 위치에 소형 마이크로폰을 좌측과 우측 귀 각각에 삽입한 측정 장치이다. 다음에는 DHM을 중심으로, 0도에서 360도까지의 수평면상을 I 개로 분할한 방위각 $\theta_i (i=1, 2, \dots, I)$ 와, -90 도에서 $+90$ 도까지의 수직면상을 J 개로 분할한 고각 $\psi_j (j=1, 2, \dots, J)$ 의 각 교차점에서, LS와 DHM에 설치한 마이크로폰 사이의 임펄스응답(impulse response) $g_L(\theta_i, \psi_j, n)$ 과

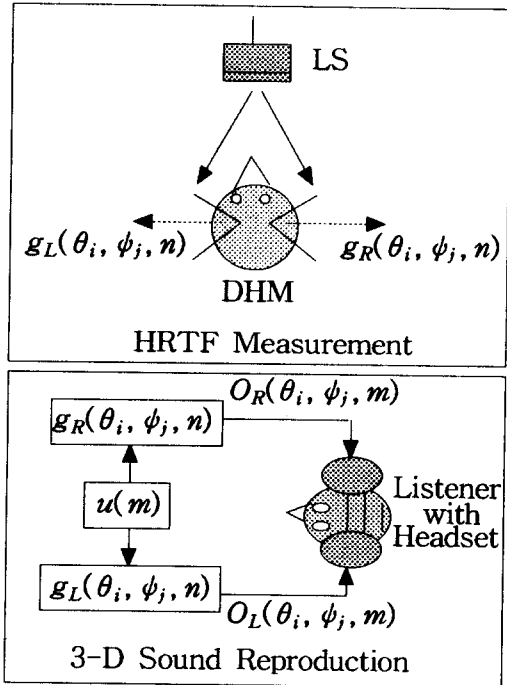


그림 3. 음장 재생 시스템의 기본 구성도.

$g_R(\theta_i, \phi_j, n)$ (n 은 수열 번호)를 측정한다. 여기서, $g_L(\theta_i, \phi_j, n)$ 은 DHM의 왼쪽 귀에 대한 임펄스응답을 의미하고, $g_R(\theta_i, \phi_j, n)$ 은 오른쪽 귀에 대한 임펄스응답을 나타내며, 이러한 임펄스응답을 'HRTF 임펄스응답'이라 하지 않고, 간단히 'HRTF'라 부른다. 따라서, DHM을 이용하여 측정된 HRTF에는 (θ_i, ϕ_j) 방향에 대한 DHM에서의 공간 정보를 포함하게 된다.

3차원 음장 재생 부분에서는, $g_L(\theta_i, \phi_j, n)$ 과 $g_R(\theta_i, \phi_j, n)$ 을 다음 식(1)과 같이 음원 $u(m)$ 과 각각 콘볼루션 연산하여,

$$\left. \begin{aligned} O_L(\theta_i, \phi_j, m) &= \sum_{n=0}^{N-1} g_L(\theta_i, \phi_j, n) u(m-n) \\ O_R(\theta_i, \phi_j, m) &= \sum_{n=0}^{N-1} g_R(\theta_i, \phi_j, n) u(m-n) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

여기서, N : 필터의 탭 수.

$O_L(\theta_i, \phi_j, m)$ 과 $O_R(\theta_i, \phi_j, m)$ 을 출력한다. 따라서, $O_L(\theta_i, \phi_j, m)$ 과 $O_R(\theta_i, \phi_j, m)$ 에는 각각

$g_L(\theta_i, \phi_j, n)$ 과 $g_R(\theta_i, \phi_j, n)$ 성분을 갖는 $u(m)$ 이 포함되므로, 이 신호를 청취자에게 들려주면, 청취자는 마치 $u(m)$ 이 공간 위치 (θ_i, ϕ_j) 에서 들리는 것으로 느껴지게 된다. 여기서, 음원 $u(m)$ 은 방향 특성을 갖지 않는 모노(mono)의 선박 기적음이나, 항해 장치의 경보음 등이다.

위의 식(1)에서, $O_L(\theta_i, \phi_j, m)$ 과 $O_R(\theta_i, \phi_j, m)$ 에 공간 위치 (θ_i, ϕ_j) 의 정보가 정확하게 포함되기 위해서는 $g_L(\theta_i, \phi_j, n)$ 과 $g_R(\theta_i, \phi_j, n)$ 이 정밀도 높게 측정되어야 한다. 또한, $g_L(\theta_i, \phi_j, n)$ 과 $g_R(\theta_i, \phi_j, n)$ 이 (θ_i, ϕ_j) 의 공간 정보를 그대로 유지하면서 수열의 길이가 가능한 짧아야만, 위의 식(1)에서의 콘볼루션 연산 시간을 단축할 수 있다. 특히, 현재의 VRS에서, 3차원 영상 데이터 처리에 고속 대용량의 연산 처리 장치가 사용되고 있는 점을 고려한다면, 3차원 음장 재생에도 고속 대용량의 연산 처리장치를 사용하는 것은 VRSHS 실현을 어렵게 하는 요인이 될 수 있다.

따라서, 이 연구에서는, $g_L(\theta_i, \phi_j, n)$ 과 $g_R(\theta_i, \phi_j, n)$ 이 (θ_i, ϕ_j) 의 공간 정보를 그대로 유지하면서, 수열의 길이 n 을 최소화 할 수 있는 HRTF 측정 이론을 다음과 같이 전개한다.

3.2 머리전달함수 측정 이론

그림 4(위)와 같은 잔향 공간(reverberant space)에, LS와 DHM을 설치하여 HRTF를 측정할 때, DHM 두 귀 각각에 관한 음향 전달계의 입출력 관계는, 그림 4(아래)와 같이 다중 경로를 갖는 단일 입력-2출력 시스템으로 고려할 수 있다.

(θ_i, ϕ_j) ($i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, M$) 방향에서, LS에서의 음원 $x(t)$ 과 DHM의 출력 신호 $y_L(\theta_i, \phi_j, t)$, $y_R(\theta_i, \phi_j, t)$ 과의 관계는 식(2)와 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} y_L(\theta_i, \phi_j, t) &= x(t) * h_{L1}(\theta_i, \phi_j, t - \tau_{L1}) a_{L1} + x(t) * h_{L2}(\theta_i, \phi_j, t - \tau_{L2}) a_{L2} + \dots + x(t) * h_{L1}(\theta_i, \phi_j, t - \tau_{L1}) a_{L1} + \dots \\ y_R(\theta_i, \phi_j, t) &= x(t) * h_{R1}(\theta_i, \phi_j, t - \tau_{R1}) a_{R1} + x(t) * h_{R2}(\theta_i, \phi_j, t - \tau_{R2}) a_{R2} + \dots + x(t) * h_{R1}(\theta_i, \phi_j, t - \tau_{R1}) a_{R1} + \dots \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

여기서,

첨자 L, R: 각각 DHM의 왼쪽 및 오른쪽 채널.

θ_i, ϕ_j : 각각 LS에 대한 DHM의 방위각 ($i=1, 2, \dots, N$)

(I 는 0도~360도 사이의 분할 수)과 조각 ($j=1, 2, \dots, J$)
 (J 는 -90도~+90도 사이의 분할 수).

$h_L(t), h_R(t)$: 각각 LS와 DHM 왼쪽 귀 및 오른쪽 귀 사이의 직접 음파 전달 경로에 대한 임펄스 응답.
 α_{Lk}, α_{Rk} : k 번째 경로에 대한 왼쪽 및 오른쪽 채널의 반사 음파에 대한 감쇠 계수, $\alpha_{L0} = \alpha_{R0} = 1$, $0 \leq \alpha_{Lk}, \alpha_{Rk} \leq 1$.

τ_{Lk}, τ_{Rk} : k 번째 경로에 대한 왼쪽 및 오른쪽 채널의 직접 음파와 반사 음파 사이의 시간차, $\tau_{L0} = \tau_{R0} = 0$, $0 < \tau_{L1} < \tau_{L2} < \dots < \tau_{Lk}$, $0 < \tau_{R1} < \tau_{R2} < \dots < \tau_{Rk}$.

k : 음파의 전달 경로, $k=0, 1, 2, \dots$.

*: 콘볼루션 연산.

위의 식(2)에서의 $x(t), y(t), h(t)$ 에 대한 이산(discrete) 표현을, $x(n), y(n), h(n)$ 으로 나타내고, 시간차 τ_k 을 n_k ($0 < n_1 < n_2 < \dots < n_k$)로 나타내면, 식(2)는 다음 식(3)이 된다.

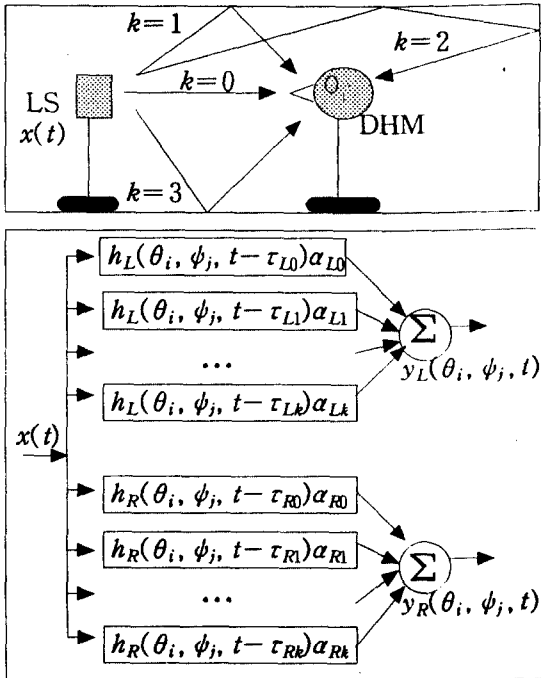


그림 4. 다중 경로를 갖는 단일 입력-2출력 시스템.

$$\begin{aligned} y_L(\theta_i, \phi_j, n) &= x(n) * g_L(\theta_i, \phi_j, n) \\ y_R(\theta_i, \phi_j, n) &= x(n) * g_R(\theta_i, \phi_j, n) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} g_L(\theta_i, \phi_j, n) &= \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{Ljk} h_L(n - n_{Ljk}) \\ g_R(\theta_i, \phi_j, n) &= \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{Rjk} h_R(n - n_{Rjk}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

식(3)과 (4)에서의 이산신호 $x(n), y(n), g(n), h(n)$ 에 대한 각각의 z 변환 표기를 $X(z), Y(z), G(z), H(z)$ 로 나타낸다. 그리고, 이론 과정을 간단히 하기 위하여 식(3)의 $y_L(\theta_i, \phi_j, n)$ 에 대해서만 전개하면,

$$Y_L(\theta_i, \phi_j, z) = X(z) G_L(\theta_i, \phi_j, z) \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $z = e^{j\omega}$

으로 된다. 위의 식(5)에서의 $G_L(\theta_i, \phi_j, z)$ 은 다음과 같이 된다.

$$G_L(\theta_i, \phi_j, z) = \frac{Y_L(\theta_i, \phi_j, z)}{X(z)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

위의 식(4)에서 경로 k 를 K 로 제한하는 경우, 식(6)은 다음 식(7)로 나타낸다.

$$G_L(\theta_i, \phi_j, z) = H_L(\theta_i, \phi_j, z) \sum_{k=0}^K \alpha_{Ljk} z^{-n_{Ljk}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

위의 식(7)을 살펴보면, $H_L(\theta_i, \phi_j, z)$ 이 경로 k 의 증가에 따라서 α 의 지수 감쇠와 n 의 지연 증가 형태로 합성된다. 따라서, 이와 같은 $G_L(\theta_i, \phi_j, z)$ 로부터 구한 임펄스응답은 단위원 밖에 많은 극점(pole)과 영점(zero)을 갖게되어 이산 신호처리 과정에서 역함수가 존재하지 않게 되고, 임펄스응답 수열이 길어지는 문제점이 발생한다.

이러한 문제점에 대한 하나의 해결 방안으로서, $G_L(\theta_i, \phi_j, z)$ 에 대한 cepstrum을 구하여 최소 위상 함수를 분리한 후, 이산 힐버트 변환 관계를 적용하여, 크기와 위상과의 관계를 ITD (Interaural Time Difference)로 단순 지연 근사하는 방법을 적용한다. 이산 신호 처리 이론에 따라 잔향을 갖는 공간에서 측정된 $G_L(\theta_i, \phi_j, z)$ 는 다음 식(8)과 같이 최소 위상 함수 $G_{Lmin}(\theta_i, \phi_j, z)$ 와 전대역 통과 함수 $G_{Lap}(\theta_i, \phi_j, z)$ 로 분리 구성할 수 있다[7].

$$G_L(\theta_i, \phi_j, z) = G_{Lmin}(\theta_i, \phi_j, z) G_{Lap}(\theta_i, \phi_j, z) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$G_L(\theta_i, \psi_j, z)$ 에 대한 켈스트럼을 식(9)로 구하고,

$$\widehat{g}_L(\theta_i, \psi_j, n) = DFT[\log |G_L(\theta_i, \psi_j, z)|] \quad (9)$$

여기서, DFT : 이산 푸리에 변환.

다음 식(10)으로 정의된 창함수를, 위의 식(9)에 걸어서 식(11)과 같은 최소 위상함수 $G_{Lmin}(\theta_i, \psi_j, z)$ 만을 분리한다.

$$w(n) = \begin{cases} 0, & n < 0 \\ 1, & n = 0 \\ 2, & n > 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$G_{Lmin}(\theta_i, \psi_j, z) = \exp[DFT(\widehat{g}_L(\theta_i, \psi_j, n) w(n))] \quad (11)$$

여기서, \exp : exponential.

$G_{Lmin}(\theta_i, \psi_j, z)$ 에는 DHM과 측정장치들이 갖고 있는 동일한 전기적 특성이 (θ_i, ψ_j) 위치에서 공통적으로 포함된다. 이 공통 특성은 음장 재생에 요구되지 않는 불필요한 바이어스 특성이므로 제거되어야 한다.

다음 식(12)과 같이 $G_{Lmin}(\theta_i, \psi_j, z)$ 에 대한 평균값을 구한다.

$$\overline{G_{Lmin}}(z) = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J G_{Lmin}(\theta_i, \psi_j, z) \quad (12)$$

위의 식(12)의 평균값을 다음 식(13)과 같이 적용하여 공통 특성이 제거된 $\widehat{G_{Lmin}}(\theta_i, \psi_j, z)$ 을 구한다.

$$\widehat{G_{Lmin}}(\theta_i, \psi_j, z) = \frac{G_{Lmin}(\theta_i, \psi_j, z)}{\overline{G_{Lmin}}(z)} \quad (13)$$

식(13)을 역 이산 푸리에 변환하면, 공통 특성이 제거된 임펄스 응답 $g_{Lmin}(\theta_i, \psi_j, n)$ 이 된다. 그리고, 위의 식(3)~(13) 과정을 오른쪽 채널에 대해서도 동일하게 적용하여 $g_{Rmin}(\theta_i, \psi_j, n)$ 을 구한다.

$$\begin{aligned} g_{Lmin}(\theta_i, \psi_j, n) &= IDFT[\widehat{G_{Lmin}}(\theta_i, \psi_j, z)] \\ g_{Rmin}(\theta_i, \psi_j, n) &= IDFT[\widehat{G_{Rmin}}(\theta_i, \psi_j, z)] \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $IDFT$: 역 이산 푸리에 변환.

다음에는, 다음 식(15)과 같이 $G_L(\theta_i, \psi_j, z)$ 과 G_R

(θ_i, ψ_j, z) 의 상호 상관 함수에서 최대 지연차 $ITD(\theta_i, \psi_j)$ 를 구한다.

$$ITD(\theta_i, \psi_j) = \arg \max_n IDFT[G_L(\theta_i, \psi_j, z) G_R^*(\theta_i, \psi_j, z)] \quad (15)$$

여기서, $*$: 공액 복소수.

마지막으로, 위의 식(14)에 식(15)의 $ITD(\theta_i, \psi_j)$ 를 삽입하면, 다음 식(16)과 같이, (θ_i, ψ_j) 의 공간 정보를 갖는 최소위상 특성의 임펄스응답 $h_L(\theta_i, \psi_j, n)$ 과 $h_R(\theta_i, \psi_j, n)$ 을 구하게 된다.

$$\begin{aligned} h_L(\theta_i, \psi_j, n) &\cong g_{Lmin}(\theta_i, \psi_j, n - ITD_L(\theta_i, \psi_j)) \\ h_R(\theta_i, \psi_j, n) &\cong g_{Rmin}(\theta_i, \psi_j, n - ITD_R(\theta_i, \psi_j)) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,

$$\begin{aligned} ITD_L(\theta_i, \psi_j) &= ITD(\theta_i, \psi_j), \quad ITD_R = 0, \quad \text{if } 0 < \theta_i < 180 \\ ITD_R(\theta_i, \psi_j) &= ITD(\theta_i, \psi_j), \quad ITD_L = 0, \quad \text{if } 180 < \theta_i < 360 \\ ITD_L(\theta_i, \psi_j) &= ITD_R(\theta_i, \psi_j) = 0, \quad \text{if } \theta_i = 0, 180 \end{aligned} \quad (17)$$

위의 식(17)과 같이 $ITD_L(\theta_i, \psi_j)$ 과 $ITD_R(\theta_i, \psi_j)$ 이 정해지는 이유는, HRTF 측정 때, DHM과 LS 사이의 θ_i 에 따라 DHM 양쪽 귀 사이의 지연 정도가 결정되기 때문이다. 위의 식(16)이 3차원 음장 재생에 이용되는 HRTF의 임펄스응답이며, θ_i 와 ψ_j 로 분류된 데이터 베이스로 만들어서 사용한다.

4. 실험

4.1 머리전달함수 측정

HRTF 측정을 위한 실험 장치의 구성도는 참고 문헌[8]에 상세히 기술되어 있다. 이 연구에서는, 방위각 $\theta = 0^\circ$ 에서 $\theta = 360^\circ$ 까지, 고각 $\psi = -40^\circ$ 에서 $\psi = +90^\circ$ 까지에 대한 HRTF를 측정하여 실험에 이용하였다. 그림 5는 16384점으로 측정된 HRTF를, 위에서 제안한 HRTF 측정 이론식을 적용하여 128점으로 단축한 결과로서, $\theta = 45^\circ, \psi = 0^\circ$ 에 대한 임펄스응답 $h_L(45, 0, n), h_R(45, 0, n)$ ($n = 128$)을 대표로 나타낸 것이다.

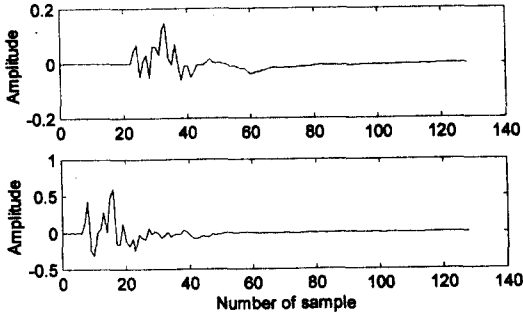


그림 5. $\theta=45^\circ, \psi=0^\circ$ 에서의 $h_L(45, 0, n)$ (위), $h_R(45, 0, n)$ (아래).

이 그림에서, $\theta=45^\circ$ 에 대한 HRTF이므로 $h_L(45, 0, n)$ (위)이 $h_R(45, 0, n)$ (아래)과 비교하여 구동 스피커에 대하여 가려져서 더 지연되고, 초기 피크 크기가 작게 나타나고 있다. 이러한 HRTF에 대한 평가는 물리적인 평가 방법 보다는 HRTF를 이용하여 직접 3차원 음장을 재생 후, 청취자에게 들려주고 평가하는 심리음향 평가(psychophysical assesment)방법이 일반적으로 유효하다.

4.2 재생 음장 평가

재생 음장에 대한 평가는, 방향별로 재생한 음을 청취자에게 들려주고, 그 때 청취자가 인지한 방향에 대한 정답율로 평가하는 음상정위(Sound Localization, SL) 평가 방법을 이용하였다. 실험 환경은 다음과 같다.

- 청취 실험은 헤드폰을 사용하고, 청취자는 남자 5명.
- 단일 음원 $u(m)$ 은, 44.1kHz로 샘플링된 .WAV 파일 형태의 선박 기적음.
- (θ_i, ψ_j) 로 주어지는 모든 HRTF와 $u(m)$ 과를 콘볼루션 연산하여 .WAV파일 형태로 PC에 저장하고, 이것을 자극음(stimulation sound)으로 하여, 시험절차에 따라 청취자에게 들려준다.
- 청취자 총원이 안락하게 느끼도록 헤드폰 레벨을 조종하고 유지.
- 고각 ψ 를 고정하고, 방위각 θ 를 225도, 45도, 135도 등과 같이 랜덤하게 변화시켰을 때 청취자가 인지한 자극음의 방위 정확도를 측정.

- 방위각 θ 를 고정하고, 고각 ψ 를 $-20^\circ, +50^\circ, +10^\circ$ 등과 같이 랜덤하게 변화시켰을 때 청취자가 인지한 자극음의 고각 정확도를 측정.
- 청취자 1인당 위의 실험을 5회 반복하여 측정. 그리고, 다음 식(18)로 계산되는 SL의 정확도 A_{SL} (%)로서, 재생 음장에 대한 평가를 하였다.

$$A_{SL} = \frac{\phi_{target} - \left[\frac{1}{LM} \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M |\phi_{target} - \phi_{perceived}| \right]}{\phi_{target}} \times 100 \quad (18)$$

여기서, ϕ_{target} : 청취자에게 주어진 방위각(또는 고각), $\phi_{perceived}$: 청취자가 인지한 방위각(또는 고각), L, M : 각각 청취자의 수, 청취자 1인당 실험 반복 수.

그림 6은 이 실험에 이용한 선박 기적음 파형을 나타낸다. 이 그림은, 기적음을 44.1kHz의 샘플링 레이트로 A/D 변환 후, 16비트의 부호를 갖는 정수($-32767 \sim +32768$)로 저장한 파형을 나타낸 것으로, 세로축은 16비트 크기에 대한 진폭을 나타낸다.

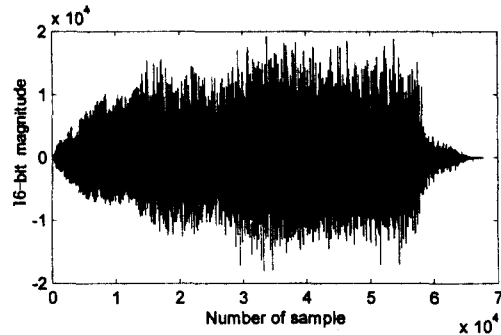


그림 6. 선박 기적음 파형.

그림 7은 SL 평가 결과로서, 방위각 θ_i ($\psi=0^\circ$ 으로 고정)에 대한 A_{SL} (그림 위)과, 고각 ψ_j ($\theta=45^\circ$ 으로 고정)에 대한 A_{SL} (그림 아래)을 극좌표 형식으로 나타낸 것이다. 그리고 방위각(또는 고각)에 대한 A_{SL} 의 특징만을 살펴보기 위하여 몇 가지 대표 값에 대해서만 간단히 나타낸 것으로, 원의 둘레는 청취자에게 주어진 ϕ_{target} 을 나타내고, 직선의 길이는 $\phi_{perceived}$ 에 대한 A_{SL} 값을 나타낸다. 그림(위)의 경우, 전면 방위각($\theta=0^\circ$)과 후면 방위각($\theta=180^\circ$)

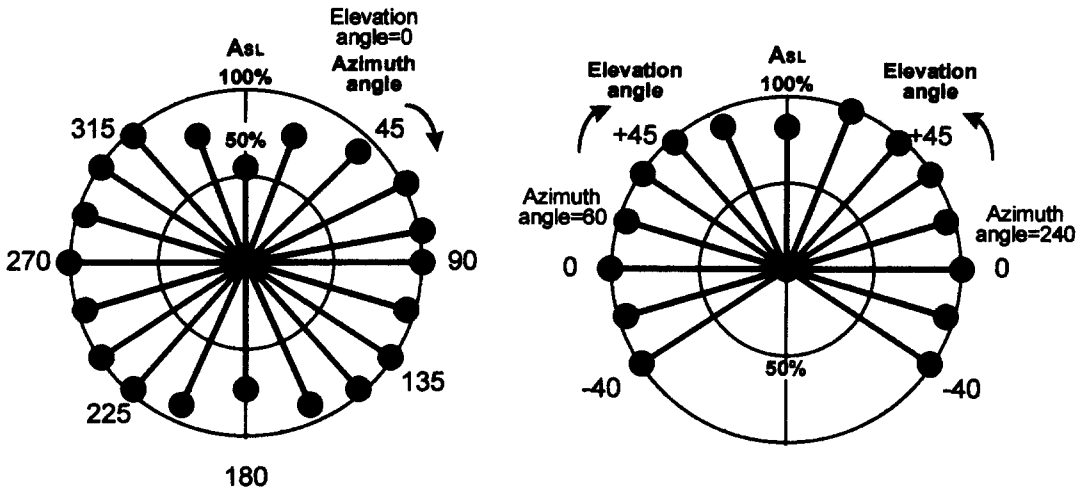


그림 7. 심리 음향 평가 결과. θ_i ($\psi=0^\circ$)에 대한 A_{SL} (그림 위)과 ψ_j ($\theta=45^\circ$)에 대한 A_{SL} (그림 아래). 원의 둘레는 ϕ_{target} , 직선의 길이는 $\phi_{perceived}$ 에 대한 A_{SL} 값을 나타낸다. 여기서, 큰 원은 $A_{SL}=100\%$, 작은 원은 $A_{SL}=50\%$ 이다.

부근에서는 A_{SL} 이 60~70%를 나타내고, 그 외의 방위각에 대해서는 A_{SL} 이 80~100%로 높게 나타나고 있다. 그림(아래)의 경우는, 고각 $\psi=+90^\circ$ 부근을 제외하고, A_{SL} 이 90% 이상 높게 나타나고 있다.

이상의 평가 결과에서, $\theta=0^\circ$ 과 $\theta=180^\circ$ 부근 및 $\psi=+90^\circ$ 부근에서 A_{SL} 이 낮은 이유는, 인간이 전-후면 방향을 잘 인지하지 못하는 근본적인 원인과, 전면과 후면 및 머리 위 부근에서의 HRTF는 왼쪽과 오른쪽 HRTF가 동일하기 때문에 발생하는 원인으로 설명할 수 있다. 이러한 현상을 전-후면 음상정위 혼란 현상(Front-Rear Confusion in Sound Localization)으로 부르고 있으며[9], 이 현상에 대해서는 이 연구 대상에서 제외한다. 그리고, 고각에 대한 음상정위의 정확도가 방위각 보다 높은 것은, 인간의 머리 구조가 방위각 변화보다는 고각 변화에 대하여 보다 잘 인지할 수 있는 구조로 되어 있기 때문으로 생각된다.

지금까지의 HRTF 측정에 관한 연구에서, $\theta=0^\circ$, $\theta=180^\circ$, $\psi=+90^\circ$ 부근을 제외한 A_{SL} 이 평균 80%~90%로 보고되어 있는 점을 고려하면, 이 연구에서 제안한 HRTF 측정 이론과 측정 방법이 유용함을 확인할 수 있다.

4.3 고찰

VRSHS에 적용하기 위한 3차원 음장 재생에는, 방향의 정확도에 대한 음상정위 외에 공간감(Spatial Impression)이라는 요소가 필요하다. 예를 들어, 청취자가 함교에 있는 경우, 함교 내에서 발생하는 정보 또는 전화 벨 등은 함교 외에서 발생하는 다른 선박의 기적음이나, 소음 등과는 다른 공간과 거리에서 발생하게 된다. 따라서, 생생한 현장감이 청취자에게 전달되기 위해서는, 음이 재생되는 공간 환경을 임의로 제어할 수 있는 음장 제어 방법이 필요하다. 이러한 음장 제어는 이 연구에서 제안한 HRTF에 여러 가지 제어 요소를 부가하므로써 구현할 수 있다. 음장 제어에 관한 연구는 두 번째 논문에서 기술한다.

5. 결론

가상 현실 선박 조종 시뮬레이터(VRSHS)의 구현을 목적으로, VRSHS에서의 3차원 음장 재생에 관하여 검토하고, HRTF 측정에 관한 이론을 확립하여, 이에 대한 유용성을 평가하였다.

먼저, 방향 정보의 손실을 억제하면서, HRTF의 임펄스응답 길이를 효과적으로 단축할 수 있는 최적 근사화 이론을 제안하였다. 제안한 이론 식을 적용하여 HRTF를 측정하고, 3차원 선박 기적음을 재생 후, 5명의 청취자를 대상으로 심리 음향 실험한 결과, $\theta=0^{\circ}$, $\theta=180^{\circ}$, $\phi=+90^{\circ}$ 부근을 제외한 음상정위의 정확도는 평균 80% 이상 높게 나타났다. 따라서, 이 연구에서 제안한 HRTF 측정 방법과 3차원 음장 재생 방법이 VRSHS의 3차원 음향 재생 기술에 적용 가능함을 알았다.

그리고, 3차원 음향 재생에는, 임의의 공간에 대한 공간감을 청취자에게 줄 수 있는 음장 제어 방법이 필요하다.

참고문헌

- 1) ATLAS Elektronik GMBH, 'Training Equipment for Nautical Ship-Handling,' 1992.
- 2) 임정빈, 이상집, "인공현실 기술을 응용한 선박 조종 시뮬레이터 구현에 관한 기초 연구," *해양안전학회 학술발표회 논문집*, pp.5~18, 1997. 5.
- 3) G. Bylinsky, "The Marvels of Virtual Reality," *Fortune*, pp.94~100, June 3, 1991.
- 4) M. Bajura, H. Fuchs, and R. Ohbuchi, "Merging Virtual Objects with in Real World," *Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp.203~210, July 1992.
- 5) A. Stettner and D. P. Greenberg, "Computer Graphics Visualization for Acoustic Simulation," *Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp.195~206, July 1989.
- 6) S. S. Fisher, E. M. Wenzel, C. Coler and, M. W. McGreevy, "Virtual Interface Environment Workstations," *Proc. of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting*, pp.91~96, 1988.
- 7) AV. Oppenheim and Ronald W. Shafer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, New York, 1989, pp.781~815.
- 8) 임정빈, 김천덕, 강성훈, "헤드폰을 이용한 자유 음장 청취에서의 최적 반사 음파 전달 특성을 갖는 머리전달함수 모델링," *한국음향학회지*, 제 16권, 제2호, pp.16~25, 1997.
- 9) J. B. Yim, S. H. Kang and C. D. Kim, "Approximations of FIR Inverse-filter in OSS Equalizer by Median Moving Average," *WESTPRAC-V 1994 Conf. Proc.*, pp.96~99, 1994.