

머리전달함수를 이용한 영상 음원법에서 음장 제어 요소 결정

임정빈*, 강성훈**, 김천덕***

*해군사관학교 항해학과 조교수, **대전보건대학 방송학과 교수, ***부경대학교 전기공학과 교수

Selecting Sound-Field Control Factors in the Image Model Method Using Head-Related Transfer Function

Jeongbin Yim*, Seonghoon Kang**, Cheonduck Kim***

* Korea Naval Academy, Dept. of Navigation. E-mail JBYIM@chollian.dacom.co.kr

** Taejeon Medical College, Dept of Broadcast Production & Technology

*** Pukyung University, Dept. of Electric Eng.

요 약

머리전달함수(Head-Related Transfer Function, HRTF)를 이용한 영상 음원법(Image Model Method, IMM)을 적용하여 3차원 음장을 제어하기 위한 요소 결정 방법을 제안한다. 제어 요소들은 직방체 내부에서의 음 에너지에 관한 이론을 토대로 결정하였다. 각 제어 요소를 3차원 음장 모델에 적용하고, 헤드폰을 사용하여 청취자에 의한 심리음향 실험한 결과, 제어된 음장에는 음상의 두의 정위, 거리감, 공간감이 실내에서와 같이 자연스럽게 형성됨을 나타냈다.

1. 서 론

HRTF를 이용한 3차원 음장 제어 모델링 방법에는, 음선 추적법(Ray Tracing Model Method)과 영상 음원법(Image Model Method)이 있다. 음선 추적법은, 발생 가능한 모든 반사 경로를 추적하기 때문에 계산 과정이 복잡하고, 계산 량이 크다는 문제점이 있다. 영상 음원법은, 반사음파를 마치 빛이 반사되는 것과 같이 취급하므로 음선 추적법과 비교하여 단순하고, 계산 량을 적게 할 수 있는 장점이 있다. 그러므로, 빠른 계산 속도를 요구하는 3차원 음장 제어에는, 영상 음원법을 적용하는 것이 유리하다.

영상 음원법 적용에는, 음선 추적법과는 달리, 주어진 환경에서 발생하는 음파의 반사, 감쇠, 지연 등의 모든 음장 제어 요소를 유기적으로 분석하여 결정해야만 자연스러운 음장을 구현할 수 있다.

지금까지의 3차원 음장 구현에 관한 연구에서는, 각 음장 제어 요소들 사이의 상관 관계를 고려하지 않거나, 한가지 요소만을 고려하기 때문에 자연스러운 음장 구현에는 분제점이 있다.

이 연구에서는, 음장 제어 요소를 음-에너지에 관한

이론으로부터 결정하는 방법을 기술한다.

먼저, 실내와 같은 직방체에서의 음-에너지에 관한 이론을 음장 제어에 적용할 수 있도록 정립하고, 주어진 환경에 적합한 제어 요소를 선정하여, 3차원 음장 제어 모델을 구현하였다. 다음에는 결정한 제어 요소들을 모델에 적용하여 음장 제어 시뮬레이션을 하였다.

2. 영상 음원법에 의한 3차원 음장 모델

2.1 3차원 음장 제어

HRTF를 이용한 입체음은, 청취자의 귀 특성과 일치하도록 측정하거나 교정된 HRTF와 음원파를 콘볼루션 연산하여 재생한다. 이에 관한 상세한 내용은 저자의 논문[1]에 상세히 기술되어 있다.

음장 제어는, 그림 1(a)와 같은 실내에서 측정된 전형적인 임펄스응답(b)을 직접음, 초기반사, 후기반사로 분리하여, 이 3가지 음파를 적절히 조절하므로써 구현할 수 있다.

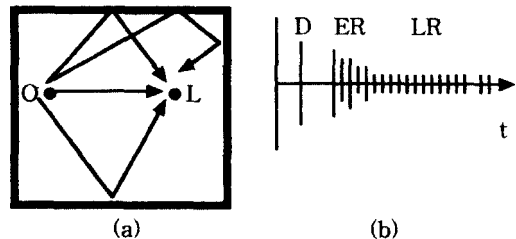


그림 1. 음원 O와 청취자 L의 공간 배치(a), O-L 경로 상에서 측정된 임펄스응답의 전형적인 형태(b). (D-Direct sound, ER=Early Reflections, LR=Late Reflections).

직접음파는 음원이 존재하는 방향과 거리감을 형성하고, 초기반사음파는 음원과 청취자의 실내 위치에 따른 방향 특성을 갖기 때문에, 두의 음상 정위(exterior-nalization)를 형성하여 직접음파의 인텐시티 증가와 함께 거리감에 영향을 미친다. 후기 반사음파는 청취자가 있는 공간의 느낌과, 거리감에 영향을 준다. 그러므로, 음장 제어 보덴은, 그림 1(b)와 같은 임펄스 응답의 감쇠와 지연 형태가 되도록 여러 개의 HRTF를 합성할 필요가 있다.

HRTF를 이용하여 음장제어 모델을 구성할 때, 고려해야 될 요소를 나열하면 다음과 같다.

1. 직접음파의 거리에 따른 감쇠
2. 직접음파와 반사음파의 공기에 의한 감쇠
3. 직접음파와 반사음파 사이의 지연
4. 반사음파의 도래 방향
5. 음원 O와 청취점 L 사이에 발생하는 반사 횟수와 이 공간에서의 진행 거리
6. 주어진 공간에서 발생 가능한 반사 횟수
7. 반사음파의 벽면 흡수에 의한 감쇠

위의 고려 요소 중에서, 3~5항은 다음에 기술하는 영상 음원법으로 결정할 수 있다.

2.2 영상 음원법에서의 반사 경로 추적

그림 2는 영상 음원법의 개념을 나타낸다. 영상 음원 위치 O_k ($k=1, 2, \dots, n$)는 음원 O가 벽면을 중심으로 대칭되는 형태로 나타나며, x, y, z 의 3차원 공간으로 확장하여 영상 음원 위치를 구하게 된다. 각 영상 음원의 위치는, 측정된 HRTF가 방위각 θ , 고각 ϕ 의 구-좌표계로 계산된 것이므로, HRTF를 영상 음원법에 적용하기 위해 O_k 의 위치를 구-좌표계로 변환한다.

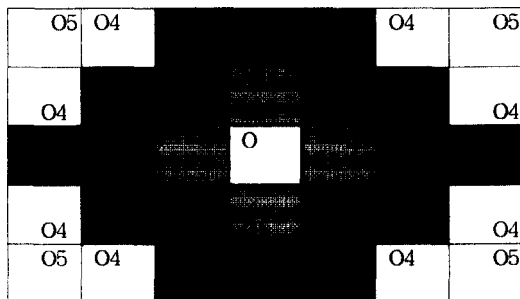


그림 2. 2차원 평면에 표시한 영상음원의 위치.(O:음원 위치, L:청취자의 위치, O1, O2, O3, ... O에 대한 1차, 2차, 3차... 반사음파의 영상 음원 위치).

그림 2에서, 청취자 위치로부터, 제 n 차의 i 번째 영상 음원까지의 거리 $r_{n,i}$, 고각 $\phi_{n,i}$, 방위각 $\theta_{n,i}$ 는

다음 식(1)~(3)으로 구한다. 이 때, 음원 O와 청취자의 위치 L의 좌표 중심은 $Lx/2, Ly/2, Lz/2$ 로 한다.

$$r_{n,i} = \sqrt{x_{n,i}^2 + y_{n,i}^2 + z_{n,i}^2}, \quad r_{n,i} \geq 0 \quad (1)$$

$$\phi_{n,i} = \sin^{-1} \frac{z_{n,i}}{r_{n,i}}, \quad -90 \leq \phi_{n,i} \leq 90 \quad (2)$$

$$\theta_{n,i} = \cos^{-1} \frac{y_{n,i}}{\sqrt{x_{n,i}^2 + y_{n,i}^2}}, \quad 0 \leq \theta_{n,i} \leq 180 \quad (3)$$

2.3 3차원 음장 모델링

그림 3은 영상 음원법을 이용하여 구성한 3차원 음장 모델이다.

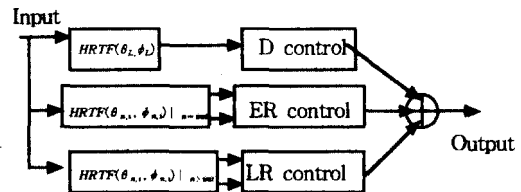


그림 3. 3차원 음장 모델.

이 모델의 구조는 3부분으로 구성된다. 먼저, $HRTF(\theta_L, \phi_L)$ 는, 직접음파를 구현하기 위하여 $O(x, y, z)$ 와 $L(x, y, z)$ 의 위치 관계로 계산된다. $HRTF(\theta_{n,i}, \phi_{n,i}) |_{n=init}$ 는, 초기 반사음파를 구현하기 위하여 $n=init$ 로 정하여 구성된다. $HRTF(\theta_{n,i}, \phi_{n,i}) |_{n>init}$ 는, $n > init$ 일 때의 후기 반사음파를 구현하기 위하여 구성된다.

그리고, 이 모델에는, D control, ER control, LR control 부분에, 거리에 따른 음파감쇠 $\alpha_{Distance}$, 공기 중에서 감쇠 α_{Air} , 각 벽면 재질에 따른 흡수에 의한 감쇠 $\alpha_{Absorption}$ 등의 제어 요소를 주어진 환경에 적합하게 적용한다. 여기서, $HRTF(\theta_L, \phi_L)$ 에 적용할 $\alpha_{Distance}$ 의 길정이 특히 문제가 된다. 일반 실내의 경우, 음-에너지는 반사파에 의하여 Inverse-square Law를 따르지 않기 때문에 자연 환경에서 이 요소가 변하는 특성을 파악하여 요소를 적용할 필요가 있다.

3. 음장 제어 요소의 결정

3.1 직방면체에서의 음-에너지 거동

점 음원에서 방사된 음파는 모든 방향으로 진행하고, 벽면 반사로 인하여 혼합 음장(diffuse sound field)을 형성하게 된다. 이 때, 청취자 위치에 마이크로폰을 두고 측정된 평균음압은 다음 식과 같이 음-에너지 밀

도(sound energy density)로 나타낼 수 있다.

$$D_{avg} = \frac{|P_{avg}|^2}{\rho_0 c^2} \quad (\text{watt-sec} / \text{m}^3) \quad (4)$$

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

음파는 입사각 θ_1 로 벽면에 입사하고, 입사각과 같은 반사각 θ_2 로 반사되며, 다시 제2, 제3의 반사파를 만들게 된다. 통계적 관점에서, 반사표면 사이에서의 반사파들 사이의 평균자유경로(Mean Free Path, MFP)는 Knudsen의 실험에 의하여 보고된 다음 식(5)로 나타난다.

$$MFP = \frac{4V}{S} \quad (m) \quad (5)$$

여기서, V : 방의 체적, S : 총 표면적.

음파가 벽에 부딪히는 횟수가 점점 증가하게 되면, 각 반사면에 동일한 확률로 음파가 입사된다. 따라서, 평균 흡수 계수 α'_{Abs} (철자 Abs는 Absorption의 의미)는 다음 식(6)과 같이, 반사 면적에 따라 무게 가중된 형태로 된다.

$$\alpha'_{Abs} = \frac{S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + \dots + S_n \alpha_n}{S} \quad (6)$$

여기서, $S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$, S_1, S_2, \dots, S_n : 각 반사 표면의 면적, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$: 각 반사표면의 흡수 계수. 음파가 MFP 거리를 이동할 때의 시간 (sec)은, $t_{MFP} = 4V/cS$ 이다. 초기의 음-에너지 밀도를 D' 로 두면, $n \cdot t_{MFP}$ 후의 음-에너지 밀도 $D(n \cdot t_{MFP})$ 는 $D(n \cdot t_{MFP}) = D'(1 - \alpha'_{Abs})^n$ 이 된다. t 초 후의 평균 반사 횟수 $n = t/t_{MFP}$ 이므로, $D(t) = D'(1 - \alpha'_{Abs})^{(cS/4V)t}$ 가 되고, 다음식(7)으로 나타낼 수 있다.

$$D(t) = D' e^{-(cS/4V) \log_e(1 - \alpha')} \quad (7)$$

여기서, $1 - \alpha' \approx e^{-\log_e(1 - \alpha')}$

식(7)을 SPL(Sound Pressure Level(dB))로 나타내면 다음과 같다.

$$SPL_{t=t} - SPL_{t=0} = 1.085 \frac{cS}{V} [-2.3 \log_{10}(1 - \alpha'_{Abs})] t \quad (8)$$

따라서, 반사파는 벽면에 의한 흡수로 식(8)에 따라 감쇠 된다. 또한, 음은 반사 표면에서 반사되면서 흡수될 뿐만 아니라 주행중 공기에 의해서도 흡수된다. 음파가 MFP 경과하는 동안, 공기에 의한 음 에너지 감소

를 고려하면, $D(t_{MFP}) = D' e^{-m \cdot MFP}$ 이다. 여기서, m 은 에너지 감쇠 상수 (m^{-1})이다. t 초 후, 음파는 $t \cdot MFP/t_{MFP}$ 만큼 경과하므로, 이 때의 $D(t)$ 는 식(9)가 된다.

$$D(t) = D' e^{(cS/4V) \cdot [-\log_e(1 - \alpha'_{Abs}) - 4Vm/S] t} \quad (9)$$

이 때, X(dB) 감소할 때까지의 잔향시간 T 는 식(10)이 된다.

$$T = \frac{XV}{1.085 c (\alpha'_{Abs} + 4mV)} \quad (\text{sec}) \quad (10)$$

위의 식(9),(10)의 에너지 감쇠상수 $m = m_1 + m_d$ 로 계산된다. 공기의 경우, $m_1 = 4.24 f^2 \times 10^{-11}$ (m^{-1})로 정해져 있고, m_d 는 1950년 Knudsen과 Harris에 의해 보고된 결과에 따른다. m_d 의 계산에는 주파수와 온도, 절대 습도, 대기압 등을 변수로 하는 복잡한 과정을 요한다. 이 연구에서는, 정상상태의 온도 ($22^\circ C$)와 상대 습도 ($R.H. = 60\%$)를 기준으로 주파수에 따른 m_d 값을 도표[2]로부터 구하여 모델에 적용하였다. 표 1은 주파수 f 에 따른 m_d 값이다.

표 1. f 에 따른 m_d

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

잔향 에너지의 정상상태값을 고려하면 다음과 같다. 제1차 반사 직후까지의 rms 평균 음압의 크기는 식(11)로 나타낼 수 있다.

$$|P_{avg}|^2 = \frac{4\rho c W}{k_R} \quad (11)$$

여기서, k_R 은 실내 상수로서,

$$k_R = \frac{S \alpha'_{TAbs}}{1 - \alpha'_{TAbs}} \quad \text{이고, } \alpha'_{TAbs} = \alpha'_{Abs} + \frac{4mV}{S}$$

그리고, 제2차 반사 이후의 모든 반사를 고려한 거리 r 점에서의 에너지 밀도는 식(12)가 된다.

$$D_r = \frac{|P_r|^2}{\rho_0 c^2} = \frac{W}{4\pi r^2 c} \quad (12)$$

여기서, W : 음원이 실내에 공급한 총 파워(watts).

P_r : r 점에서의 rms 음압의 크기.

위의 식(11)과 (12)를 합친, 모든 잔향에 대한 지승 평균 압력은 다음식(13)이 된다.

$$|P|^2 = W\rho_0 c \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{k_R} \right) \quad (13)$$

기준 거리를 r_{REF} 로 했을 때의 $SPL_{r_{REF}}$ 와 r 점에
서의 SPL_r 과의 차 SPL_{r_D} 는 식(14)가 된다.

$$\begin{aligned} SPL_{r_D} &= SPL_r - SPL_{r_{REF}} \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{k_R} \right) - \\ &\quad 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi r_{REF}^2} + \frac{4}{k_R} \right) \quad (dB) \end{aligned} \quad (14)$$

3.2 제어 요소

위의 식(14)에서, 모든 반사파를 고려한 거리 r 점
에서의 SPL_{r_D} 은 기준 거리 r_{REF} 와 실내 상수 k_R
로 결정되므로, $(1/4\pi r^2 \ll 4/k_R)$ 이 되는 거리 r 부
터는 거리에 의존하지 않는다. 따라서, r_{REF} 와 k_R 의
결정이 중요한 요소임을 알 수 있다.

또한, 초기 및 후기 반사음과의 거리에 따른 감쇠
요소로서, 식(14)를 적용하는 경우, $1/4\pi r^2 \ll 4/k_R$ 이
되는 거리 r 에 대하여 SPL의 변화가 발생하지 않으
므로, 식(14)를 제어 요소로 적용한 반사음파에는 잔향
에 의한 영향이 발생하지 않게 된다. 이 실험에서는, 잔
향 계산에는 k_R 을 고려하지 않은 다음 식(15)를 적용
하였다.

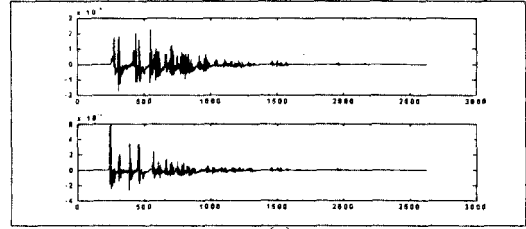
$$\begin{aligned} SPL_{r_D} &= SPL_r - SPL_{r_{REF}} \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi r_{REF}^2}{4\pi r^2} \right) \quad (dB) \end{aligned} \quad (15)$$

이 경우, r_{DREF} 를 적절히 조절하므로써 원하는 공
감감을 제어할 수 있다. 그리고, 이 연구에서는, 직접음
파 및 초기 반사음파와는 별도의 공간과, 다른 r_{DREF}
를 적용한 모델을 이용하여 후기 반사음파 모델을 구성
하였다. 이 것은 3차원 음장 재생에 관한 초기 연구 결
과들에서, 직접음파와는 별개의 잔향 임펄스응답을 고
려하는 원리와 같은 것이다.

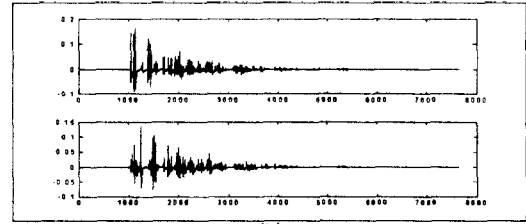
4. 실험

직접음파 및 초기 반사음파 모델에 적용한 환경은,
실내의 크기를 가로4.2m, 세로5.9m, 높이3.5m로 정하
고, 초기 반사음파의 차수는 3차로 제한하였으며, r_{REF}
=0.2(m)로 정하였다. 후기 반사음파 모델에 적용한 환
경은, 실내의 크기를 가로8.5m, 세로13.6m, 높이6.8m로
정하고, 후기 반사음파의 차수는 식(10)에서 계산한 잔
향시간 T 에 대한 $n = T/t_{MFP}$ 로 결정된 n 차까지로
정하였다. 그리고, r_{DREF} 은 1.0~3.0(m)로 하였다.

그림 4는 청취자의 방위각 60도, 고각 0도일 때의 초
기 반사음파 모델로부터 합성한 HRTF(a), 후기 반사음
파 모델로부터 합성한 HRTF(b)의 임펄스응답이다.



(a)



(b)

그림 4. 각 모델에 대한 임펄스응답. 초기 반사음파
모델로부터 합성한 HRTF(a), 후기 반사음파 모델로부
터 합성한 HRTF(b).

그림 4에서, 그림 1의 임펄스응답의 전형적인 형태
로 HRTF가 합성됐다. 따라서, 이 연구에서 제안한 모
델과 제어 요소가 실내에서의 음-에너지 현상과 일치
하게 결정되었음을 알 수 있다. 그리고, 거리 $r=0.4m$ 로
고정하고, 0도에서 360도까지의 방위각 변화에 대한 음
상정위 및 거리감용 평가한 결과, 두의 음상 정위 및
거리감이 자연스럽게 형성됨을 나타내었다.

5. 결론

HRTF를 이용한 3차원 음장 제어 모델에 적용할 요
소를 선정하기 위한 방법을 이론적으로 정립하고, 청취
자에 의한 심리음향 평가로 그 유용성을 평가하였다.
음-에너지 이론에 근거한 음장 제어 요소를 모델에 적
용한 결과, 음상의 두의 정위가 뚜렷하게 형성됨을 나
타내었고, 거리감은 자연스럽게 형성된 결과를 나타내
었다. 따라서, 이 연구에서 제안한 모델과, 음장 제어
요소 결정 방법이 유용함을 알았다.

앞으로 이 연구는, 제안한 이론에 대한 심리음향 평
가를 계속 진행하여 보완할 예정이다.

참고문헌

- [1]. 임정민, *머리전달함수 모델링에 의한 3차원 음장
재생에 관한 연구*, 부경대학교 박사학위논문, 1997. 2.
- [2]. Leo L. Beranek, *Acoustics*, Acoustical Society of
America, 1993 Ed., New York, 1996. pp.285-331.