

# 헤드폰을 이용한 자유 음장 청취에서의 최적 반사 음파 전달 특성을 갖는 머리 전달 함수 모델링

## Modeling of the Head-Related Transfer Functions with Optimum Reflection Wave Transfer Characteristics in Free-Field Listening over Headphones

임 정 빈\*, 김 천 덕\*\*, 강 성 훈\*\*\*  
(Jeong-Bin Yim\*, Chun-Duck Kim\*\*, Seong-Hoon Kang\*\*\*)

### 요 약

이 연구에서는, 반사 음파 전달 특성에 의한 공간감 효과를 이용하여 음상 정위를 개선할 수 있는 HRTF 모델링 방법을 제안하였다. 실험 결과, 최적으로 평가된 반사 음파 전달 특성을 갖는 HRTF 모델은, 직접 음파 전달 특성만으로 구성된 HRTF 모델과 비교하여 음상 정위가 약 23% 이상 개선되었다. 그리고, 적절한 공간감이 음상 정위의 정확도를 증가시킬 수 있는 요소임을 알았다.

### ABSTRACT

A new method to model the HRTF's(Head-Related Transfer Functions), which could give improvement of the sound localization accuracy using the spatial effects by the reflected sound wave transfer characteristics, is proposed. When using the HRTF model having reflected sound wave transfer characteristics, the accuracy of sound localization was quite improved up to about 23%, compared with using the direct wave transfer characteristics only. Furthermore, it is verified that the spatial impression could be a factor to enhance the ability of sound localization.

### I. 서 론

청취자에 대한 자유 음장 음원의 전달 특성은 머리 전달 함수(Head-Related Transfer Function, HRTF)로부터 구할 수 있다. HRTF는 구동 스피커에서 방사된 음원을 청취자의 두 귀를 이용하거나 의사 머리 마이크로폰(Dummy Head Microphone, DHM)이라는 장치를 이용하여 임펄스 응답 형태로 측정한다. 이러한 HRTF의 임펄스 응답을 이용하면, HRTF를 측정했던 시간과 공간에서의 음장(sound-field)을 임의 공간과 시간에 재생할 수 있다. 그리고, HRTF를 측정했던 장소에서와 같은 자연스러운 음을 듣기 위해서는, 재생 음장에 구동 음원의 방향을 느낄 수 있는 음상 정위(sound localization)가 형성되어야 하고, 측정 공간의 특성에 대한 공간감(spatial impression)이라는 느낌이 포함되어야 한다[1]~[4].

잔향 시간이 긴 실내에서 측정한 HRTF에는 구동 음원과 DHM 사이의 직접 음파 전달 특성과 천정, 바닥, 벽 등에 의한 반사 음파 전달 특성이 혼합된다. 직접 음파 전달 특성은 구동 음원에 대해서 DHM의 두 귀가 향하고 있는 방향 특성을 갖게 되고, 반사 음파 전달 특성에는 반사파의 지연 시간 및 크기, 잔향 시간, 반사파의 수 등 측정 공간의 특성이 포함된다. 따라서, 반사 음파 전달 특성이 포함된 HRTF를 사용하여 재생한 음에서는 공간감을 느낄 수 있다. 이러한 공간감이 재생 음장에 적절하게 포함될 경우, 음상 정위가 향상되기도 하지만, 반면 과도한 공간감은 재생 음의 명료도를 감소시켜서 오히려 음상 정위를 악화시키는 결과로 나타나기도 한다[5]. 또한, 반사 음파 전달 특성이 HRTF에 포함되면, 반사 음파로 인하여 측정한 HRTF의 정확도가 낮아지고, 임펄스 응답의 수렴 속도가 느리게 되어 HRTF를 필터에 적재할 때 많은 탭 수가 필요한 문제점이 있다. 따라서, 현재까지의 음장 재생에 관한 연구에서는, 주로 무향실에서 HRTF를 측정하여 사용하고 있다. 이 경우, 측정한 HRTF는 구동 음원과 DHM 사이의 직접 음파 전달 특성만을 포함하기

\*해군사관학교 항해학과  
\*\*부경대학교 전기공학과  
\*\*\*대전보건전문대학 방송제작 기술과  
접수일자: 1996년 9월 11일

때문에 HRTF로부터 재생한 음장에서 음상 정위는 가능하지만, 반사 전달 특성을 포함하지 않기 때문에 공간감이 없다. 그리고, 직접 음파 전달 특성만을 갖는 HRTF를 사용한 음상 재생에서는 전면과 후면 방향에 대해서 음상 정위가 관련한 문제점이 현재까지의 연구 결과[4, 7]에 보고되고 있다.

이 연구에서는, 음상 정위의 정확도가 개선되면서 동시에 적절한 공간감을 줄 수 있는 최적의 반사 음파 전달 특성을 HRTF 모델 구성에 사용하는 방법을 제안하였다. 실험 방법은, 전향을 갖는 실내에서 측정된 HRTF의 직접 음파 전달 특성과 반사 음파 전달 특성을 캡스트럼 분석을 통하여 독립된 전달 함수로 분리 구성한 후, 음상 정위의 정확도와 공간감을 최적으로 만족할 수 있는 직접 음파 전달 함수와 반사 음파 전달 함수를 구하였다. 실험 결과, 최적의 반사 음파 전달 함수를 갖는 HRTF 모델은 청감적으로 적절한 공간감을 준 결과, 전·후면 음상 정위의 정확도가 크게 증가되었다. 그리고, 이 연구로부터, 적절한 공간감이 헤드폰을 이용한 양이 청취에서의 음상 정위를 개선할 수 있는 요소임을 알았다.

## II. 일반 실내에서의 HRTF

그림 1은 구동 스피커에서 방사된 음파가 DHM의 두 귀에 입력될 때까지 실내의 바닥이나 천정, 벽면 등에서 반사되는 전달 경로를 나타낸다.

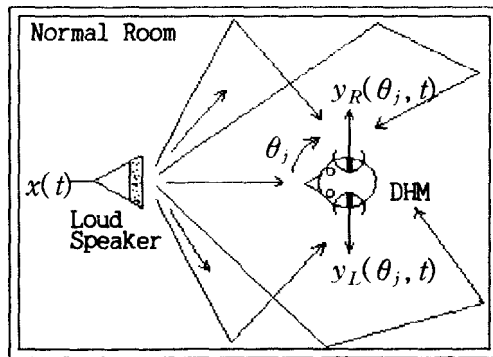


그림 1. 실내에서의 구동 음원과 DHM 사이의 다중 음향 전달 경로.

Fig. 1. Multiple acoustic paths between a source and the DHM in a room.

그림 1에서, 구동 음원  $x(t)$ 에 대하여 DHM이  $\theta_j (j=1, 2, \dots, N)$  방향으로 향하고 있을 때, DHM 두 귀의 출력  $y_L(\theta_j, t)$ 과  $y_R(\theta_j, t)$ 에는  $x(t)$ 가 직접 전달되는 직접 음파와 다중 음향 경로를 통한 반사 음파가 합성된다. 이러한 다중 경로를 갖는 실내에서의 음향 전달계를 선형 시불변 시스템(LTIS)으로 간주하면,  $\theta_j (j=1, 2, \dots, N)$  방향에 주목한 구동 음원  $x(t)$ 에 대한 DHM의 출력쌍  $y_L(\theta_j, t)$ 과

$y_R(\theta_j, t)$ 은 다음 식(1)과 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_L(\theta_j, t) = \sum_{i=0}^{\infty} x(t) * \alpha_{Li} h_L(\theta_j, t - \tau_{Li}) \quad (1)$$

$$y_R(\theta_j, t) = \sum_{i=0}^{\infty} x(t) * \alpha_{Ri} h_R(\theta_j, t - \tau_{Ri}) \quad (2)$$

여기서,

첨자 L과 R: 왼쪽 채널 및 오른쪽 채널.

$\theta_j$ : 구동 스피커에 대한 DHM의 방향,  $j=1, 2, \dots, N$ .

$h_L(t), h_R(t)$ : 구동 스피커와 DHM 왼쪽 귀와 오른쪽 귀 사이의 직접 음파 전달 경로에 대한 임펄스 응답.

$\alpha_{Li}, \alpha_{Ri}$ :  $i$ 번째 경로에 대한 왼쪽 채널 및 오른쪽 채널의 반사 음파의 감쇠 계수,  $\alpha_{L0} = \alpha_{R0} = 1, 0 \leq \alpha_{Li}, \alpha_{Ri} \leq 1$ .

$\tau_{Li}, \tau_{Ri}$ :  $i$ 번째 경로에 대한 왼쪽 채널 및 오른쪽 채널의 직접 음파와 반사 음파 사이의 시간차,  $\tau_{L0} = \tau_{R0} = 0, 0 < \tau_{L1} < \tau_{L2} < \dots < \tau_{L\infty}, 0 < \tau_{R1} < \tau_{R2} < \dots < \tau_{R\infty}$ .

$i$ : 음향 전달 경로,  $i=0, 1, \dots$ .

\*: 컨볼루션 연산.

식(1)과 식(2)에서,  $x(t), y(t), h(t)$ 에 대한 이산적 표현을  $x(n), y(n), h(n)$ 으로 나타낸다. 그리고, 음향 전달 경로  $i$ 를  $M$ 개의 유한 경로로 제한하고, 시간차  $\tau_i$ 를  $n_i (0 < n_1 < n_2 < \dots < n_M)$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$y_L(\theta_j, n) = x(n) * g_L(\theta_j, n) \quad (3)$$

$$y_R(\theta_j, n) = x(n) * g_R(\theta_j, n) \quad (4)$$

여기서,

$$g_L(\theta_j, n) = \sum_{i=0}^M \alpha_{Lji} h_L(n - n_{Lji}) \quad (5)$$

$$g_R(\theta_j, n) = \sum_{i=0}^M \alpha_{Rji} h_R(n - n_{Rji}) \quad (6)$$

윗식의 첨자  $ji$ 에서  $j$ 는 임의의 각도 방향,  $i$ 는 반사파의 경로이다. 이산 신호  $x(n), y(n), g(n), h(n)$ 에 대한 각각의  $z$ 변환 표기는  $X(z), Y(z), G(z), H(z)$ 이다. 따라서, 식(3)과 (4)의  $z$ 변환 식은 다음과 같다.

$$Y_L(\theta_j, z) = X(z)G_L(\theta_j, z) \quad (7)$$

$$Y_R(\theta_j, z) = X(z)G_R(\theta_j, z) \quad (8)$$

여기서,  $z = e^{j\omega}$

HRTF는 식(9)와 식(10)과 같이  $\theta_j (j=1, 2, \dots, N)$  방향에 대한 구동 음원  $X(\theta_j, z)$ 와 DHM의 출력  $Y_L(\theta_j, z)$ 과  $Y_R(\theta_j, z)$ 에서 구한다.

$$G_L(\theta_j, z) = \frac{Y_L(\theta_j, z)}{X(z)} = H_L(\theta_j, z) \sum_{i=0}^M \alpha_{Lji} z^{-n_{Lji}} \quad (9)$$

$$G_R(\theta_j, z) = \frac{Y_R(\theta_j, z)}{X(z)} = H_R(\theta_j, z) \sum_{i=0}^M \alpha_{Rji} z^{-n_{Rji}} \quad (10)$$

위의 두 식에서  $\alpha_l$ 와  $n_l$ 을 고려하므로써, 직접 음과 전달 함수  $H_L(\theta_j, z)$ 과  $H_R(\theta_j, z)$ 을  $G_L(\theta_j, z)$ 과  $G_R(\theta_j, z)$ 에서 분리 측정할 수 있다. 또한, 위의 두 식 중에서, 어느 한쪽 채널의  $G(\theta_j, z)$ 를 고려하면,  $G(\theta_j, z)$ 는 다음 식(11)과 같이 최소 위상 함수  $G_{\min}(\theta_j, z)$ 와 전 대역 통과 함수  $G_{ap}(\theta_j, z)$ 로 구성할 수 있다[8].

$$G(\theta_j, z) = G_{\min}(\theta_j, z)G_{ap}(\theta_j, z) \quad (11)$$

만약, HRTF가  $G_{\min}(\theta_j, z)$ 으로 구성되면, 이산 힐버트 변환 관계를 적용할 수 있기 때문에 HRTF의 크기와 위상과의 관계는 간단히 계산될 수 있다. 그리고,  $G_{\min}(\theta_j, z)$ 으로부터 최소 위상 수열을 구하여 HRTF 모델을 구성하면, 측정된 HRTF의 진폭 스펙트럼에 대한 포락선 근사와 HRTF 왼쪽과 오른쪽 임펄스 응답 사이의 두 귀 시간차(Interaural Time Difference, ITD)를 단순 지연으로 근사하므로써 HRTF 모델을 정확하게 구성할 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 다음과 같은 가정을 기초로 HRTF를 모델링 하였다.

가정1). HRTF는 최소 위상 전달 함수이다.

가정2). HRTF 모델의 위상 특성은 ITD에 대한 단순한 지연으로 모델링하고, 음장 재생 실험은 헤드폰을 이용한다.

### III. HRTF의 모델링 원리

#### 3.1 분리 모델링

HRTF의 임펄스 응답을  $z$  변환한 두 전달계 중, 구동 음원과 DHM 왼쪽 귀 사이의  $G_L(\theta_j, z)$ 에 대해서만 고려한다. 식(9)에서  $G_L(\theta_j, z)$ 의 파워 스펙트럼은 식(12)와 같다.

$$|G_L(\theta_j, z)|^2 = |H_L(\theta_j, z)|^2 \left( \sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \alpha_{Ljl} \alpha_{Ljm} z^{n_{jl} - n_{jm}} \right), l \neq m \quad (12)$$

여기서, 첨자  $jl$ 과  $jm$ 에서  $j$ 는 측정 방향이고,  $l$ 과  $m$ 은 음파 전달 경로이다. 식(12)의 양측에 대수(logarithm)를 적용하면 식(13)과 같다.

$$\log |G_L(\theta_j, z)| = \log |H_L(\theta_j, z)| + \frac{1}{2} \log \left[ \sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \alpha_{Ljl} \alpha_{Ljm} z^{n_{jl} - n_{jm}} \right], l \neq m \quad (13)$$

따라서, 식(13)으로부터 HRTF의 임펄스 응답  $g_L(\theta_j, n)$ 에 대한 대수 크기 스펙트럼  $G_L(\theta_j, z)$ 은, 직접 음과 전달 함수  $H_L(\theta_j, z)$ 의 대수 크기 스펙트럼과,  $\alpha_l$ 과  $n_l$ 로 구성된 반사 음파 전달 특성에 대한 대수 크기 스펙트럼으로 분리할 수 있음을 알 수 있다. 식(13)을 켈스트럼 표시로써, 좌변 항을  $G_L(\theta_j, z)$ 로 표기하고, 우변 첫 번째 항을  $H_L(\theta_j, z)$ , 두 번째 항을  $\hat{P}_L(\theta_j, z)$ 로 표기하여 식(14)와 같이 간단하게 나타낸다.

$$\hat{G}_L(\theta_j, z) = \hat{H}_L(\theta_j, z) + \hat{P}_L(\theta_j, z) \quad (14)$$

$\hat{G}_L(\theta_j, z)$ ,  $\hat{H}_L(\theta_j, z)$ ,  $\hat{P}_L(\theta_j, z)$ 에 대한 각각의 역 이산 푸리에 변환을  $\hat{g}_L(\theta_j, n)$ ,  $\hat{h}_L(\theta_j, n)$ ,  $\hat{p}_L(\theta_j, n)$ 으로 나타내면, 식(14)는 식(15)와 같이 켈스트럼 형태의 함수로 된다.

$$\hat{g}_L(\theta_j, n) = \hat{h}_L(\theta_j, n) + \hat{p}_L(\theta_j, n) \quad (15)$$

위의 식에서  $\hat{h}_L(\theta_j, n)$ 은 식(14)에서의 직접 음과 전달 함수에 대한 켈스트럼이고,  $\hat{p}_L(\theta_j, n)$ 은 식(14)에서의 반사 음파 전달 함수에 대한 켈스트럼이 된다. 이 연구에서는 측정된 HRTF의 임펄스 응답  $g_L(\theta_j, n)$ 에 대한 켈스트럼  $\hat{g}_L(\theta_j, n)$ 에서 다음 절차에 따라  $\hat{h}_L(\theta_j, n)$ 과  $\hat{p}_L(\theta_j, n)$ 을 분리 구성하여 HRTF 모델링 실험에 사용하였다.

먼저, 식(16)과 식(17)과 같이 데이터의 시간 창에 대한 길이를  $N_{LP}$ 으로한 저역 시간창(low-time window)  $w_{LP}(n)$ 과, 길이를  $N_{LP} \sim N_{HP}$ 로한 고역 시간창(high-time window)  $w_{HP}(n)$ 을 구성한다[9].

$$w_{LP}(n) = \begin{cases} 1, & n < N_{LP} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$w_{HP}(n) = \begin{cases} 1, & N_{LP} \leq n \leq N_{HP} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

다음에는, 위의 두 식의 저역 시간창과 고역 시간창을 식(15)의  $\hat{g}_L(\theta_j, n)$ 에 걸므로써 식(18)과 식(19)의 켈스트럼 모델  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 과  $\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n)$ 을 구성한다.

$$\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n) = \hat{g}_L(\theta_j, n) w_{LP}(n) \quad (18)$$

$$\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n) = \hat{g}_L(\theta_j, n) w_{HP}(n) \quad (19)$$

위의 두 식에서 분리한  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 과  $\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n)$ 은 식(20)으로 정의된 창함수[10]를 이용하여 식(21)과 식(22)에 나타낸 HRTF의 분리 모델에 대한 임펄스 응답  $h_{Lm}(\theta_j, n)$ 과  $p_{Lm}(\theta_j, n)$ 을 구한다.

$$w(n) = \begin{cases} 0, & n < 0 \\ 1, & n = 0 \\ 2, & n > 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$h_{Lm}(\theta_j, n) = F^{-1} [\exp \{ F[\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n) w(n)] \}] \quad (21)$$

$$p_{Lm}(\theta_j, n) = F^{-1} [\exp \{ F[\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n) w(n)] \}] \quad (22)$$

여기서,  $F$  : 이산 푸리에 변환.

$F^{-1}$  : 역 이산 푸리에 변환.

이와 같은 DHM 왼쪽에 대한 HRTF의 분리 모델링 과정은 DHM 오른쪽 HRTF의 분리 모델링 과정에 대해서도 동일하게 적용되므로,  $g_R(\theta_j, n)$ 로부터  $p_{Rm}(\theta_j, n)$ 과  $h_{Rm}(\theta_j, n)$ 의 유도 과정은 생략하였다.

3.2 캡스트럼 시간창 길이의 결정

식(18)의  $g_L(\theta_j, n)$ 에서  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 을 구하기 위한 적역 시간창  $w_{LP}(n)$ 의 최적 길이  $N_{LP}$ 는 식(23)에 의해 정한다.

$$Ef(\theta_j) = \frac{\sum_{n=0}^{N_{LP}-1} |\hat{g}_L(\theta_j, n)|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |\hat{g}_L(\theta_j, n)|^2} \quad (23)$$

식(23)에서, 분모 항은 HRTF 임펄스 응답의  $\hat{g}_L(\theta_j, n)$ 에서  $n=0$ 에서  $n=N-1$ 까지  $N$ 개의 캡스트럼 수열이 갖는 전체 에너지이다. 그리고, 분자 항은  $\hat{g}_L(\theta_j, n)$ 에서  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 에 이용된  $n=0$ 에서  $n=N_{LP}-1$ 까지의  $N_{LP}$ 를 제외한  $n=N_{LP}$ 로부터  $n=N-1$ 까지의 부분 캡스트럼 수열이 갖는 에너지이다. 이 식에서,  $Ef(\theta_j)$ 는 HRTF의 캡스트럼 모델  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 을 구성하는 수열이 차지하는 부분 에너지가 증가할수록  $Ef(\theta_j) \approx 0$ 로 수렴하게 된다.  $w_{LP}(n)$ 의 최적 길이  $N_{LP}$ 는  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 의 부분 수열이 갖는 에너지의 효율성을  $Ef(\theta_j)$ 로 평가하여 구하였다.

식(19)의  $g_L(\theta_j, n)$ 에서  $\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n)$ 을 구하는데 사용하는 고역 시간창  $w_{HP}(n)$ 의 최적 길이  $N_{HP}$ 는 다음과 같이 정한다.

$\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 와  $\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n)$ 의 합성 캡스트럼 모델을  $\hat{g}_{Lm}(\theta_j, n)$ 으로 나타낸다.  $\hat{g}_{Lm}(\theta_j, n)$ 의 대수 크기 스펙트럼  $\hat{G}_{Lm}(\theta_j, k)$ 는 식(24)의 이산 푸리에 급수에 의해 구한다. 이 때,  $\hat{g}_{Lm}(\theta_j, k)$  수열의 길이는  $n=0$ 에서  $n=N_{LP} + N_{HP} - 1$ 까지로 써,  $N_{LP} + N_{HP}$ 이다.

$$\hat{G}_{Lm}(\theta_j, k) = \sum_{n=0}^{N_{LP} + N_{HP} - 1} \hat{g}_{Lm}(\theta_j, n) \cos(2\pi nk/N) \quad (24)$$

식(24)에서, 최종 수열 번호  $n = N_{LP} + N_{HP} - 1$ 에서  $N_{LP}$ 를 일정한 값으로 설정한다. 그리고,  $N_{HP}$ 를 0부터 수열 번호를 증가시킬 때의  $\hat{G}_{Lm}(\theta_j, k)$ 과, 실제 측정된 HRTF 임펄스 응답의 대수 크기 스펙트럼  $\hat{G}_L(\theta_j, k)$ 에 대한 오차를 식(25)으로 계산한 후, 전체 에너지에 대한 오차 비율이 최소가 되는  $N_{HP}$ 를 정한다.

$$\epsilon_L(\theta_j) = \frac{\|\hat{G}_L(\theta_j, k) - \hat{G}_{Lm}(\theta_j, k)\|^2}{\|\hat{G}_L(\theta_j, k)\|^2} \times 100\% \quad (25)$$

여기서,  $\hat{G}_L(\theta_j, k)$ : 측정된 왼쪽 HRTF의 대수 크기 스펙트럼.

그리고, 그림 1의 음향 전달계에서 측정된 HRTF 왼쪽  $g_L(\theta_j, n)$ 과 오른쪽  $g_R(\theta_j, n)$  사이의 ITD( $\theta_j$ )는, 식(26)과 같이 주파수 영역에서의 상호 상관 함수에서 최대 지연차를 구하고,

$$ITD(\theta_j) = \arg \max_n F^{-1} \{ L(\theta_j, j\omega) R^*(\theta_j, j\omega) \} \quad (26)$$

여기서,  $L(\theta_j, j\omega)$ ,  $R(\theta_j, j\omega)$ :  $g_L(\theta_j, n)$ ,  $g_R(\theta_j, n)$ 에 대한 이산 푸리에 변환.

\*: 공역 복소수.

$g_L(\theta_j, n)$ 이  $g_R(\theta_j, n)$ 과 비교하여 지연된 경우에는 왼쪽 HRTF 모델에 삽입하고, 반대인 경우에는 오른쪽 HRTF 모델에 삽입한다. 따라서, 측정된 왼쪽과 오른쪽 HRTF 사이의 전체 ITD와 최소 위상 수열로 재구성한 HRTF 모델의 ITD와 근사하도록 하였다.

IV. HRTF 모델의 구성 및 평가 결과

4.1 HRTF 측정 실험 장치

실내에서 HRTF 측정을 위한 실험 장치의 구성도는 그림 2와 같다.

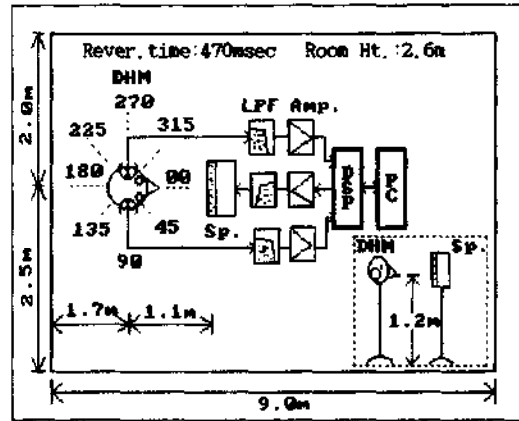


그림 2. 실내(4.5m x 9.0m x 2.6m)에서 HRTF 측정을 위한 실험 장치의 구성도.

Fig. 2. Configuration of experimental setup for HRTF measurement in a room(4.5m x 9.0m x 2.6m).

실험 장소는 4.5m(가로) x 9.0m(세로) x 2.6m(높이)의 해군사관학교 교수 연구실이고, 잔향 시간은 470msec (RT-60)이다. 신호원인 구동 스피커와 DHM의 설치 위치는 그림과 같이 벽면에 가깝게 설치하였다. 이것은 측정된 HRTF의 임펄스 응답에 반사파의 영향이 포함되도록 고려했기 때문이다. HRTF의 임펄스 응답을 측정할 때, 데이터 획득은 신호 처리 전용 보드(DSP 16+, Ariel 사)를 이용했다. 저역 통과 필터의 차단 주파수는 4kHz이다. A/D 변환시 샘플링 주파수는 12kHz로하고, 데이터는 8192점을 샘플링하여 683msec(=8192/12kHz)의 데이터 창으로 측정했다. HRTF의 임펄스 응답을 측정하기 위한 구동 음원은 의사 랜덤 M계열 신호를 사용하였다. 그리고, 측정된 HRTF의 임펄스 응답은 외부 잡음에 의한 측정 오차를 감소시키기 위하여 100회 평균하였다. HRTF는 구동 스피커를 기준으로 하여 시계 회전 방향으로 45도 마다 수평면을 따라 8방향에서 측정했다. 따라서,  $\theta_1 = 00^\circ$ ,  $\theta_2 = 45^\circ$ , ...,  $\theta_8 = 315^\circ$ 이다.

4.2 HRTF의 분석

그림 3은  $\theta_j(j=1, 2, \dots, 8)$ 방향에서 측정된 HRTF 왼쪽의 임펄스 응답  $g_L(\theta_j, n)$ 에 8192점의 영점을 덧붙여서 계산한 실수 캡스트럼  $\hat{g}_L(\theta_j, n)$ 에서 양수 시간 영역의 수열을 제공한 값이다. 그림은, 0msec에 나타난 최대 피크를 전폭이 작은 수열이 표시될 수 있는 적당한 크기로 절단하고, 100msec까지 나타낸 것이다.

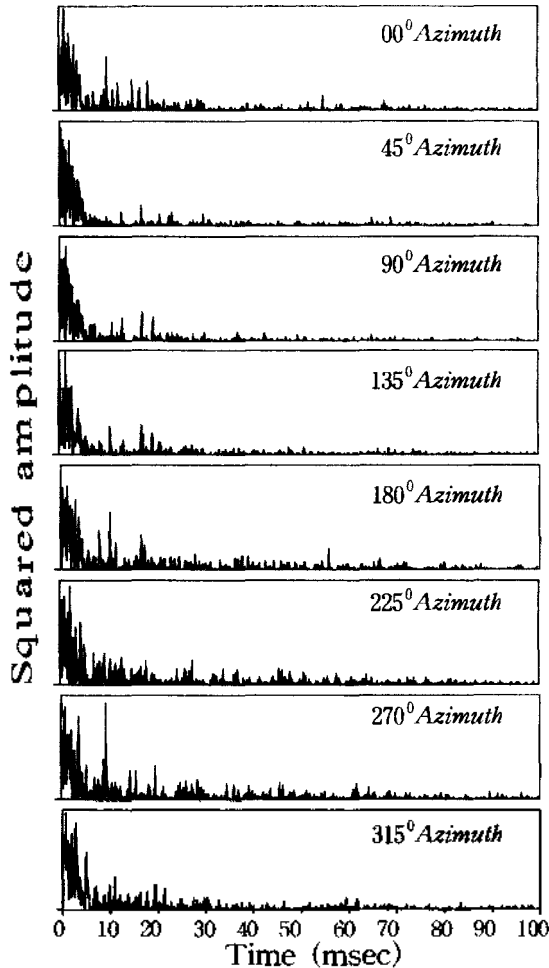


그림 3.  $\hat{g}_L(\theta_j, n)(j=1, 2, \dots, 8)$ 의 정수 시간 영역에서의 제공 값.

Fig. 3. Squared values of  $\hat{g}_L(\theta_j, n)(j=1, 2, \dots, 8)$  in the positive time domain.

그림 3에서, 0msec에서 6msec까지는 제공 값이 큰 수열이 공통적으로 나타난다. 6msec 이상에서는 8방향 모두 공통적으로 9, 18, 27msec 부근에 제1차 반사 음파 전달 특성으로 보이는 피크가 주기적으로 나타난다. 이러한 반사 음파 전달 특성은 청각적으로 중요한 공간감을 준다[11]. 따라서, 직접 음파 전달 특성에 대한 캡스트럼 모델  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 은 0msec에서 6msec까지의 수열로 구성하고, 반사 음파 전달 특성에 대한 캡스트럼 모델  $\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n)$ 은 6msec 이상의 수열을 평가하여 구성하였다.

4.3 최적 시간창 길이의 결정

그림 4는 그림 3에 표시한  $\hat{g}_L(\theta_j, n)(j=1, 2, \dots, 8)$  중에서 00도 방향에 대한  $\hat{g}_L(\theta_1, n)$ 의 효율성  $Ef(\theta_1)$ 을 식 (23)으로 계산한 것이다.

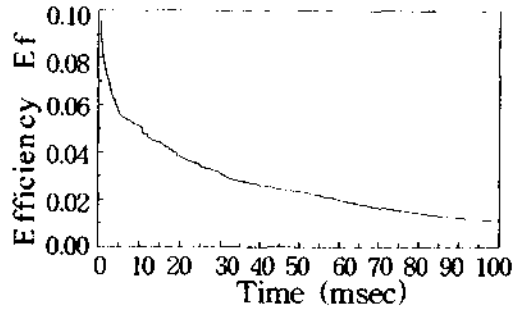


그림 4. 그림 3의 실수 캡스트럼  $\hat{g}_L(\theta_j, n)$ 에 대한  $Ef(\theta_1)$ .  
Fig. 4. Efficiency  $Ef(\theta_1)$  of  $\hat{g}_L(\theta_j, n)$  in Fig. 3.

그림 4는, 시간 축을 100msec까지 나타냈고,  $Ef(\theta_1)$ 는 0.1 이하만 나타냈다. 0msec에서  $Ef(\theta_1)$ 는 1.0이다. 구동 스피커로부터 DHM까지의 직접 음파 전달 특성으로 고려한 6msec 부근의  $Ef(\theta_1)$ 는 0.06(6%) 이하이다. 이 결과는 0msec에서 6msec까지의 캡스트럼 수열이 차지하는 에너지가 0msec에서 680msec까지의 캡스트럼 전체 수열이 갖는 에너지의 94%(100%-6%) 이상을 차지하고 있음을 나타낸다. 따라서, 직접 음파 전달 특성의 캡스트럼 모델  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 을 구성하기 위한 시간 창 길이가  $N_{LP}$ 는 72 (6msec  $\times$  12kHz)로 정하는 것이 가장 효과적인 값으로 평가된다.

그림 5는, 식(24)에서 계산한 캡스트럼 수열의 길이  $N_{LP} + N_{HP}$ 를 갖는 합성 캡스트럼 모델  $\hat{g}_{Lm}(\theta_j, n)$ 과  $\hat{g}_{Rm}(\theta_j, n)$  각각에 대한 대수 크기 스펙트럼과, 측정된 HRTF 임펄스 응답의 대수 크기 스펙트럼에 대한 오차를 식(25)에서 계산한 결과이다. 그리고, 이 결과는  $N_{LP} + N_{HP}$ 에서,  $N_{LP}$ 는 72로 고정하고  $N_{HP}$ 를 0부터 증가할 때의  $\theta_j(j=1, 2, \dots, 8)$ 방향에 대한 것이다.

그림 5(a)는  $\theta_j(j=1, 2, \dots, 8)$ 방향의 왼쪽 합성 캡스트럼 모델  $\hat{g}_{Lm}(\theta_j, n)$ 의 오차  $\epsilon_L(\theta_j)$ 을 나타내고, 그림 5(b)는  $\theta_j(j=1, 2, \dots, 8)$ 방향의 오른쪽 합성 캡스트럼 모델  $\hat{g}_{Rm}(\theta_j, n)$ 의 오차  $\epsilon_R(\theta_j)$ 을 나타낸다. 그림에서, 고역 시간창의 길이  $N_{HP}$ 에 대한 오차와 측정 방향  $\theta_j$  각각에 대한 오차를 계산한 결과 중에서  $\theta_j$ 에 대한 오차를 먼저 검토한다. DHM의 왼쪽 귀와 오른쪽 귀가 구동 스피커와 반대 방향으로 되는 그림 (a)의 225도 전후와 그림 (b)의 135도 전후에서 오차가 가장 크다. 다음으로, 고역 시간창의 길이  $N_{HP}$  증가에 대한 오차는, 그림 (a)와 그림 (b)에서 모두  $N_{HP}=500$  부근까지는 오차가 줄어들고,  $N_{HP}=500$  이상의 오차는 일정한 경향을 보인다. 그러나, 그림 (a)의 225도와 그림 (b)의 135도에서는  $N_{HP}=1000$  이상에

서 오차가 증가하고 있다.

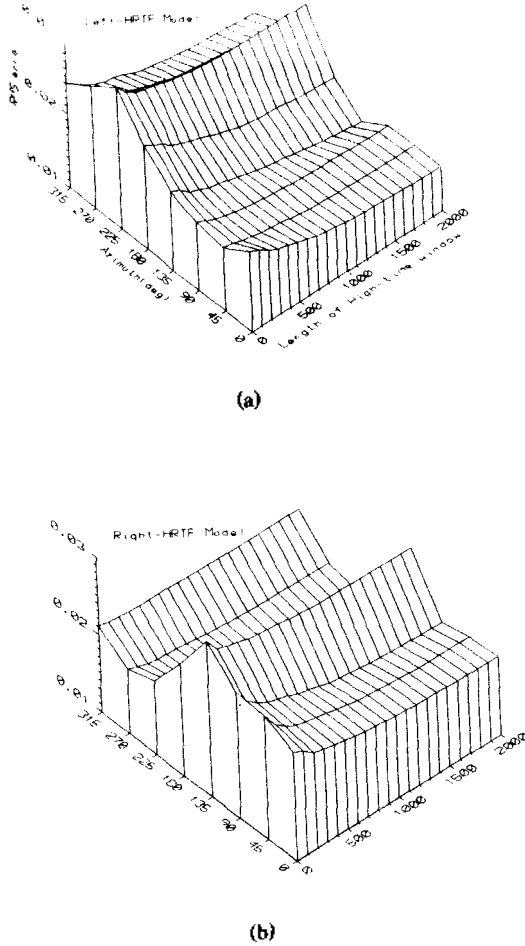


그림 5.  $\hat{g}_{Lm}(\theta_j, n)$ ,  $\hat{g}_{Rm}(\theta_j, n)$ 의  $N_{HP}$  증가에 따른 대수 크기 스펙트럼 오차. (a)  $\epsilon_L(\theta_j)$ , (b)  $\epsilon_R(\theta_j)$ .  
 Fig. 5. Log-magnitude spectral errors of  $\hat{g}_{Lm}(\theta_j, n)$ ,  $\hat{g}_{Rm}(\theta_j, n)$  with various length of  $N_{HP}$ : (a)  $\epsilon_L(\theta_j)$ , (b)  $\epsilon_R(\theta_j)$ .

그림 6의 (a)는  $\theta_1(00^\circ)$ 방향에서 실제 측정된 HRTF 임펄스 응답의 대수 크기 스펙트럼  $\hat{G}_L(\theta_1, k)$ 이고, 그림(b)는 지역 시간 창 길이  $N_{LP} = 72$ 를 사용한 직접 음파 전달 특성에 대한 캡스트럼 모델  $\hat{h}_{Lm}(\theta_1, n)$ 의 대수 크기 스펙트럼  $\hat{H}_{Lm}(\theta_1, k)$ 이다. 그리고, 그림(c)는 고역 시간 창 길이  $N_{HP}$ 의 증가에 따른 반사 음파 전달 특성에 대한 캡스트럼 모델  $\hat{p}_{Lm}(\theta_1, n)$ 의 대수 크기 스펙트럼  $\hat{P}_{Lm}(\theta_1, k)$ 을 나타낸다.

그림 6(a)의  $\hat{G}_L(\theta_1, k)$ 은 실내의 반사파로 인하여 주파수 스펙트럼에 깊은 덩과 피크가 중첩되고 있으나, 그림 6(b)의  $\hat{H}_{Lm}(\theta_1, k)$ 은 주파수 스펙트럼에 단순한 덩과 피크로 되어 있다. 그림 6(c)의  $\hat{P}_{Lm}(\theta_1, k)$ 은  $N_{HP}$ 의 증가에 따라서 고차의 반사 음파 전달 특성의 영향으로 인하여 주파수 스펙트럼의 덩과 피크만이 점차 중첩되는 현상을 나타내고 있다. 그림 6(b)의 결과로부터,  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 의 시

간창 길이를  $N_{LP} = 72$ 로 하는 것이  $\hat{g}_L(\theta_1, n)$ 로부터 직접 음파 전달 특성의 캡스트럼 모델을 분리할 수 있는 조건임을 확인할 수 있다.

따라서, 그림 4와 그림 5 및 그림 6의 평가 시험 결과를 고려할 때, 직접 음파 전달 특성으로 고려한 캡스트럼 모델  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 은 길이  $N_{LP} = 72$ 의 지역 시간창을 걸고, 반사 음파 전달 특성으로 고려한 캡스트럼 모델  $\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n)$ 은 고역 시간창의 길이를  $N_{HP} = 500$ 에서  $N_{HP} = 1000$ 까지의 범위에서 정할 때 최적으로 평가된다.

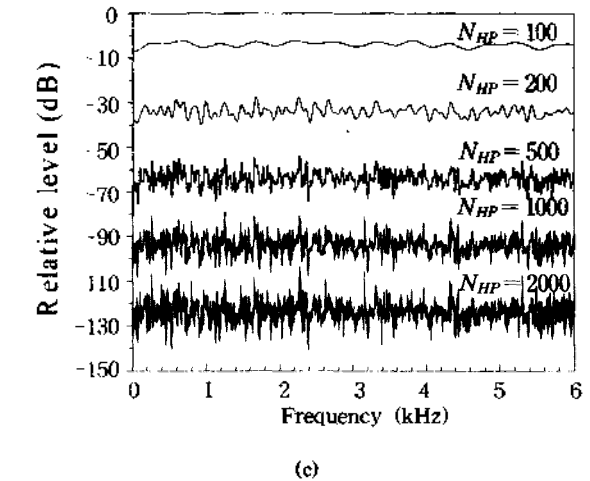
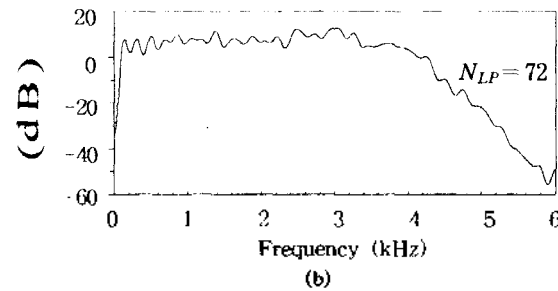
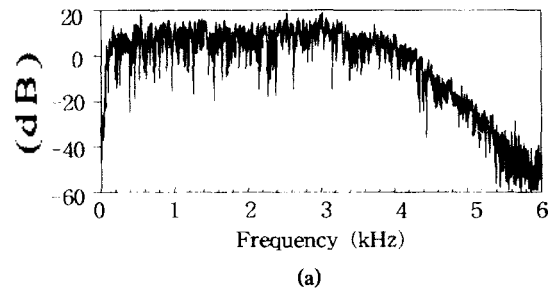


그림 6. 시간창 길이에 따른 캡스트럼 모델의 대수 크기 스펙트럼. (a)  $\hat{G}_L(\theta_1, n)$ ,  $N_{LP} = 72$ 의  $\hat{H}_{Lm}(\theta_1, k)$ . (c)  $N_{HP} = 100, 200, 500, 1000, 2000$ 일 때의  $\hat{P}_{Lm}(\theta_1, k)$ .  
 Fig. 6. Log-magnitude spectra with various length of the time windows: (a)  $\hat{G}_L(\theta_1, n)$ ; (b)  $\hat{H}_{Lm}(\theta_1, k)$  with  $N_{LP} = 72$ ; (c)  $\hat{P}_{Lm}(\theta_1, k)$  with  $N_{HP} = 100, 200, 500, 1000, 2000$ .

4.4 HRTF 모델의 구성

그림 7(a)는 그림 6의  $N_{LP}=72$ 의  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ 을 식(21)을 이용하여 재구성한  $h_{Lm}(\theta_j, n)$ 이다. 그림 7(b)는  $N_{HP}=100, 200, 500, 1000, 2000$ 일 때의  $\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n)$ 을 식(22)를 이용하여 재구성한  $p_{Lm}(\theta_j, n)$ 이다. 청취자를 대상으로 하는 심리 음향 실험에는 이와 같이 구한  $h_{Lm}(\theta_j, n)$ 과  $p_{Lm}(\theta_j, n)$ 을 사용했다.

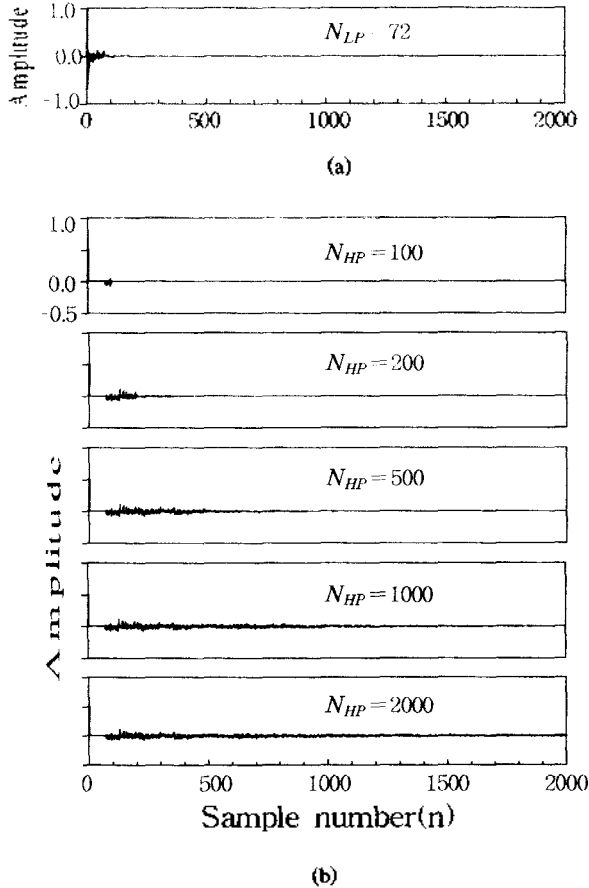


그림 7. 그림 6의 첵스트럼 모델에서 구한 임펄스 응답. (a)  $N_{LP}=72$ 에 대한  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$ , (b)  $N_{HP}=100, 200, 500, 1000, 2000$ 에 대한  $\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n)$ .  
 Fig. 7. Impulse response sequences calculated from the cepstrum models in Fig. 6: (a)  $\hat{h}_{Lm}(\theta_j, n)$  with  $N_{LP}=72$ ; (b)  $\hat{p}_{Lm}(\theta_j, n)$  with  $N_{HP}=100, 200, 500, 1000, 2000$ .

V. 심리 음향 평가 실험

5.1 평가 방법

다수 청취자에 의한 심리 음향 평가는 음상 정위의 정확도를 측정하는 실험과 반사 음파 전달 특성의 증가에 따른 공간감 실험으로 하였다. 그림 8은 심리 음향 실험에 이용한 자극 신호의 재생 실험 장치이다.

그림 8에서, 왼쪽 귀에 대한 자극 신호는 음원  $u(m)$ 과  $h_{Lm}(\theta_j, n)$  및  $p_{Lm}(\theta_j, n)$ 을 콘볼루션하여 재생하고, 오른

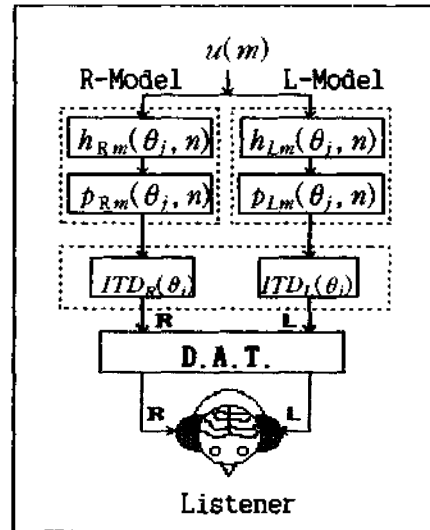


그림 8. 자극 신호 재생을 위한 실험 장치의 구성도.  
 Fig. 8. Configuration of experimental set-up for the stimulus-signal reproduction.

쪽 귀에 대한 자극 신호는 음원  $u(m)$ 과  $h_{Rm}(\theta_j, n)$  및  $p_{Rm}(\theta_j, n)$ 을 콘볼루션하여 재생한다. 그리고, 왼쪽과 오른쪽 자극 신호에는 위의 식(26)으로부터 계산한 왼쪽  $ITD_L$ 과 오른쪽  $ITD_R$ 을 삽입하였다. 재생한 자극 신호는 디지털 오디오 레코더(Digital Audio Tape-Recorder, TCD-D10, Sony 사)에 녹음한 후, 청취자에게 헤드폰으로 들려 주었다. 청취자는 10명으로, 20세에서 35세 사이의 남자 7명과 여자 3명이다. 여기서, 모든 청취자는 실험 전에 음상 정위 능력이 정상인지 여부를 검증하고, 청취자가 공간감을 느낀다는 평가 시험을 할 수 있도록 반복 학습시켜 실험에 잘 적응하게 했다. 음상 정위 및 공간감 평가를 위한 실험 조건은 다음과 같다.

- 실험에는  $N_{LP}=72$ 를 갖는 직접 음파 전달 특성 모델에  $N_{HP}=0, 100, 200, 500, 1000, 2000$ 의 반사 음파 전달 특성 모델을 더한 6가지 종류의 합성 모델을 이용.
- 음원  $u(m)$ 은 백색 잡음(white noise).
- 500msec 동안 자극, 200msec 동안 휴지.
- 청취자 총원이 안락하게 느낄 수 있는 청취 레벨 유지:  $\sim 65\text{dB SPL}(10\text{dB 전후})$ .

음상 정위 평가를 위한 실험 방법은 다음과 같다. 6가지 종류의 합성 모델 중에서 하나의 합성 모델을 정한다. 합성 모델에서 재생된 8방향의 자극 신호를 불규칙한 방향 순서로 청취자 1인당 2회 반복하여 들려주고, 인지한 방향을 측정한다. 그리고, 이와 같은 과정을 6가지 종류의 모든 모델에 적용하여 반복 실험한다.

다음으로, 공간감 평가를 위한 실험 방법은 다음과 같다. 8방향 중에서 한 방향만을 정한다. 정해진 한 방향에 대해서 6종류 모델의 자극음을  $N_{HP}$  증가와 같은 순서로 청취자 1인당 2회 반복하여 들려주고 공간감의 확산 정도를 응답지에 기록한다. 이와 같은 과정을 8방향 모두에

적용하여 반복한다.

여기서, 공간감을 평가하는 방법은, 우선  $N_{HP}=72$ 와  $N_{HP}=0$ 으로 구성된 직립 음파 전달 특성만의 합성 모델에 대한 공간감을 기준으로 정한다. 그리고,  $N_{HP}=72$ 를 고정하고  $N_{HP}$ 를 증가시킨 합성 모델을 이용하여 공간감의 증가 정도를 6단계 평가 척도로 측정한다. 측정된 평가 척도는 수량화하여 평가한다. 이러한 평가 방법은 음향 심리학에서의 의미 미분화 척도법을 이용한 것으로, 느낌이라는 심리 효과를 몇 개의 세분화된 의미로 측정된 후 양적으로 파악하기 위한 하나의 방법이다[12], [13]. 그림 9에 6단계 평가 척도로 구성된 응답지를 나타낸다.

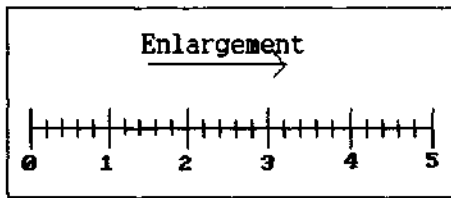


그림 9. 6단계 의미 미분화 척도로 작성한 공간감 평가 응답지.  
Fig. 9. Response-sheet for the assessment of spatial impression.  
The sheet was composed of semantic differential scales with 6 steps.

그림 9의 6단계 평가 척도는 0에서 5까지의 숫자를 이용하고, 0에서 5로 증가할 수록 공간감의 정도가 증가함을 의미한다. 6단계 평가 척도의 의미는, 기준과 비교하여 공간감이 ‘적다’는 척도 0, ‘같다’는 척도 1, ‘느낄 수 있을 정도다’는 척도 2, ‘충분하게 느낄 수 있다’는 척도 3, ‘크게 느낄 수 있다’는 척도 4, ‘가장 크게 느낄 수 있다’는 척도 5로 정했다.

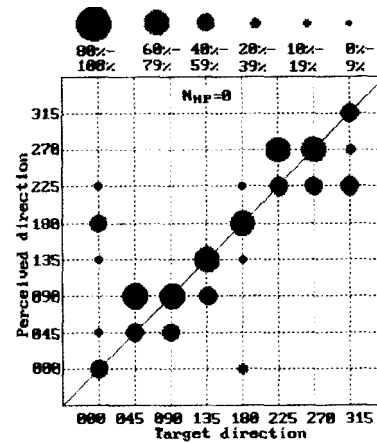
### 5.2 심리 음향 평가 결과

그림 10은 음상 정위 평가 결과를 나타낸다. 이 평가 결과는 주어진 방향의 자극 신호에 대하여 10명의 청취자가 인지한 방향을 평균한 후 20% 이하, 20~39%, 40~59%, 60~79%, 80% 이상의 5단계로 구분하였다. 5단계로 구분한 결과는 인지율의 성도에 따라 원의 크기로 표시하고, 주어진 방향에 대한 인지율의 총합이 100%가 되도록 하였다.

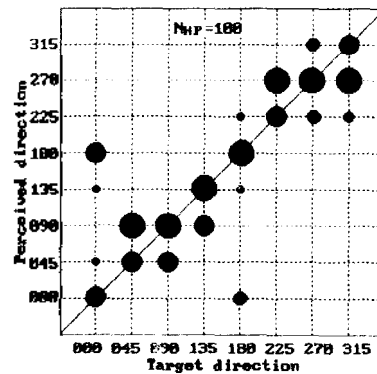
그림 10에서, 음상 정위의 정확도는  $N_{HP}$  증가에 따라 점차 증가하다가  $N_{HP}=500$ 에서 가장 크고,  $N_{HP}=500$  이상부터는 낮아진다. 8방향에 대한 음상 정위의 평균 정확율(%)을 계산하면, 이 실험에서 평가 기준으로 정한 그림 10(a)의  $N_{HP}=0$  모델은 최대 약 70%이고, 음상 정위 정확도가 가장 큰 그림 10(d)의  $N_{HP}=500$  모델은 최대 약 93%가 된다. 이 결과는 켈스트럼 모델 오차를 평가한 그림 5의  $N_{HP}=0$ 에서  $N_{HP}=1000$ 까지의 범위에서 오차가 작아지는 현상과 일치하게 나타난 것으로, HRTF 모델에

대한 주파수 스펙트럼의 근사 정도를 평가하는 객관적 평가 결과와 청취자에 의한 심리 음향적인 주관적 평가 결과가 유사함을 나타낸다.

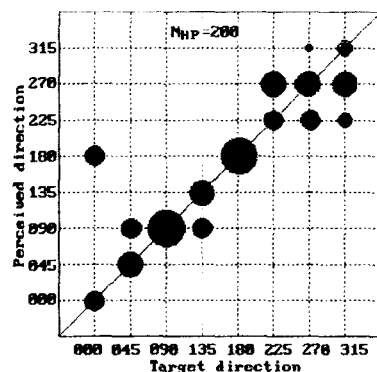
저-후면 방향(0도와 180도)에 대한 음상 정위의 정확도를 계산하면, 그림 (a)의  $N_{HP}=0$  모델이 00도에서 최대 약 60%이고 180도는 최대 약 80%인 반면, 그림 (d)의  $N_{HP}=500$  모델은 00도에서 최대 약 80%이고, 180도에서는 최대 약 100%까지 정확도가 크게 개선되는 결과를 나타낸다.



(a)

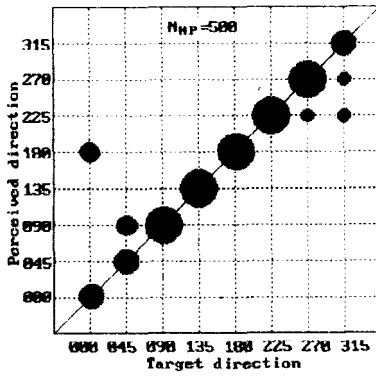


(b)

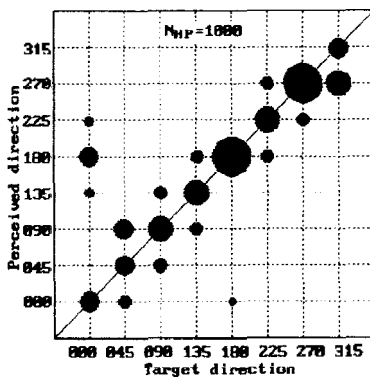


(c)

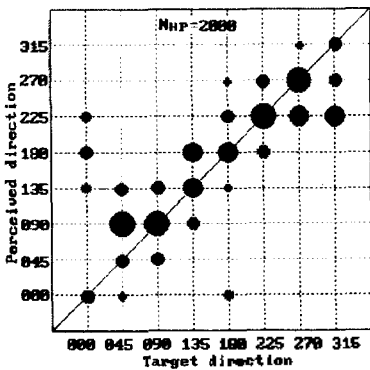




(d)



(e)



(f)

그림 10.  $N_{HP}$  증가에 따른 음상정위 평가 결과. (a)  $N_{HP}=0$ , (b)  $N_{HP}=100$ , (c)  $N_{HP}=200$ , (d)  $N_{HP}=500$ , (e)  $N_{HP}=1000$ , (f)  $N_{HP}=2000$ . 이 결과는 주어진 방향에 대한 인지한 방향을 평균한 것이다.

Fig. 10. Results of the assessment of sound localization according to the increase of  $N_{HP}$ : (a)  $N_{HP}=0$ ; (b)  $N_{HP}=100$ ; (c)  $N_{HP}=200$ ; (d)  $N_{HP}=500$ ; (e)  $N_{HP}=1000$ ; (f)  $N_{HP}=2000$ . The results represent the averaging rates of perceived azimuths versus target direction.

그림 11은  $N_{HP}$  증가에 따른 공간감 평가 결과를 나타낸다. 이 결과는 자극 신호에 대한 청취자 10명의 평균 척

도를 연결하였다.

그림 11의 N0에서 N5까지의 표시는  $N_{HP}=0$ 에서 2000까지의 6종류 모델을 간단하게 나타낸 것이다. 그리고, N0 모델은 기준이기 때문에 평가 척도 '1'로 표시된다. 그림 11의 공간감 평가 결과는 전반적으로 N0에서 N5로 증가할 수록 기준 모델과 비교하여 공간감이 계속 증가하는 형태로 나타났다.

그림 10의 음상 정위 평가 결과와 그림 11의 공간감 평가 결과를 함께 살펴보면, 음상 정위의 정확도가 가장 양호한 그림 10의  $N_{HP}=500$  모델의 경우, 그림 11에서는 공간감을 충분히 느낄 수 있는 척도에 대한 N3 모델이 된다. 따라서, 공간감을 충분히 느낄 수 있는 평가 척도 '3' ( $N_{HP}=500$ )에 대한 모델이 음상 정위의 정확도를 최대로 개선할 수 있는 최적 모델임을 알 수 있다.

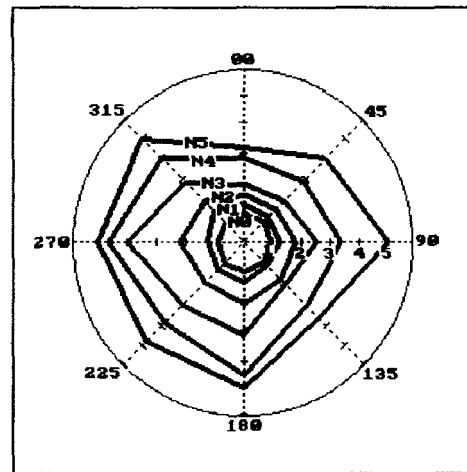


그림 11.  $N_{HP}$  증가에 따른 공간감 평가 결과.  $N_{HP}=0, 100, 200, 500, 1000, 2000$ 의 결과는 N0, N1, N2, N3, N4, N5로 간단히 표시.

Fig. 11. Results of the assessment of spatial impression according to the increase of  $N_{HP}$ . The results for the models with  $N_{HP}=0, 100, 200, 500, 1000, 2000$  denoted by the simple notations of N0, N1, N2, N3, N4, N5.

## VI. 결 론

잔향이 있는 실내의 반사 음파 전달 특성을 HRTF 모델에 부가하므로써 공간감을 재생하고, 이 공간감이 음상 정위의 정확도를 증가시킬 수 있는 HRTF 모델 구성이 가능하였다. 다수 청취자에 의한 심리음향 실험결과, 청감적으로 적절한 공간감은 음상 정위의 정확도를 증가시키는 결과를 나타내었다. 이 결과는 헤드폰을 이용한 양이 시스템(binaural system)에서의 '전-후면 음상 정위 곤란 현상'을 개선할 수 있는 하나의 요인이 될 것으로 기대된다. 또한, 제안한 모델링 방법은 반사 음파 전달 특성

의 영향을 시간차 길이의 변경만으로 간단하게 증감할 수 있기 때문에 초기 반사파의 크기와 지연 시간 등을 독립된 파라미터로 이용하여 공간감을 만드는 기존 음장 재생 방법과 비교하여 간편한 장점을 갖는다.

앞으로 이러한 연구는 반사 음파 전달 특성을 적은 수의 모델 계수로 구성하기 위한 연구와 음상 정위와 공간감 사이의 일반적 원리를 규명하기 위한 연구가 지속되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. H. Moller, "Reproduction of Artificial-Head Recordings through Loudspeakers," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol.37, No.1/2, pp.30~33, 1989.
2. H. Moller, "Fundamentals of Binaural Technology," *J. Applied Acoustics*, Vol.36, pp.171~218, 1992.
3. H. W. Gierlich, "The Application of Binaural Technology," *J. Applied Acoustics*, Vol.36, pp.219~243, 1992.
4. D. Griesinger, "Equalization and Spatial Equalization of Dummy-Head Recordings for Loudspeaker Reproduction," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol.37, No.1/2, pp.20~29, 1989.
5. I. J. Blauert, *Spatial Hearing*, Orion Press, Tokyo, 1986, 127~178.
6. K. Okabe, "Sound Field Reproduction by Using Dummy Head Microphones," *J. Acoust. Soc. Jpn.*, Vol.46(8), pp. 650~656, 1990.
7. E. M. Wenzel, M. Arruda, D. J. Kistler and F. L. Wightman, "Localization using nonindividualized Head-Related Transfer Functions," *J. Acoust. Am.*, Vol.94, No.1, pp.111~123, 1993.
8. J. B. Yim, C. D. Kim and S. H. Kang, "Lower-order ARMA Modeling of Head-Related Transfer Functions for Sound-Field Synthesis System," *J. Acoust. Soc. Korea*, Vol. 15, No.3(E), pp.35~41, 1996.
9. J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing*, Macmillan, New York, 1992, pp.376~377.
10. A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, New Jersey, 1989, pp.807~825.
11. F. Asano, "Role of Spectral Cues in Median Plane Localization," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.88(1), pp.159~168, 1990.
12. 이영일, 임정빈, 김천덕, "TV 광고의 음향과 영상과의 효과적인 합성을 위한 분석," *한국음향학회 학술발표회 논문집*, 제14권, 제1호, pp.53~56, 1995.
13. S. Inoguchi, "Kansei Information Processing in Audio-Visual Media," *Technical Report of IEICE Jpn.*, pp.25~27, 1993. (in Japanese)

#### ▲임 정 빈(Jeong-Bin Yim)

1962년 5월 1일생



현재:해군사관학교 항해학과 전임 강사

1996년 15권 3호 참조

#### ▲김 천 덕(Chun-Duck Kim)

1946년 5월 3일생

현재:부경대학교 전기공학과 교수

1994년 13권 6호 참조

#### ▲강 성 훈(Seong-Hoon Kang)

1956년 6월 15일생

현재:대전보건전문대학 방송제작기술과 교수

1990년 9권 1호 참조