

# 위상이 고려된 기하음향모델에 의한 내부음장 해석

## Acoustic Analysis of Interior Spaces by Using the Phased Geometric Acoustic Model

신 호 철\*, 이 정 권\*\*

(Ho Chul Shin\*, Jeong Guon Ih\*\*)

### 요 약

중주파수 대역은 내부 음향 모드의 공명 및 모드간 상호 간섭 특성을 완전히 무시할 수는 없으나 모드 밀도가 비교적 높기 때문에, 기존의 저주파수용 모드기법이나 고주파수에 대한 통계적 및 기하학적 해석방법과는 다른 기법이 필요한 구간이다. 본 논문에서는 위상을 포함한 기하음향모델을 이용하여 중주파수 특성을 고려하는 개념을 이용하여 해석기법을 확립하였으며, 삼각형빔법을 쓴 혼합법을 기초로 한 모델링을 하였다. 세 개의 서로 다른 특성을 지닌 대상 공간에 대해 음향 경계요소법 및 실험에 의한 음향 주파수응답함수와 본 연구 결과를 비교함으로써 유효성과 오차특성을 검토하였다. 이로부터 위상을 고려한 방법은 중주파수 대역에 잘 적용될 수 있음을 확인하였고, Schroeder의 차단주파수 이하의 저주파수에서는 내부구조에 의한 회절이, 차단주파수의 배 이상인 고주파수에서는 벽면에서의 산란이 간섭현상과 함께 고려되어야 함을 보였다. 이러한 해석기법은 중주파수대역에 있어서 청감특성을 고려한 내부공간의 음향설계에 매우 유용할 것으로 사료된다.

### ABSTRACT

In the mid-frequency range, new analysis methodologies are required that are quite different from the modal methods for low frequency range and the statistical or geometrical methods for high frequency range. This is because the modal density is relatively high in the frequency band, while the acoustic resonances of the interior space and the inter-modal interference cannot be totally disregarded in the analysis. In this paper, an analysis method for the mid-frequency range is established by utilizing the geometric acoustic model including the wave phase and the calculation method is based on the triangular beam method of the hybrid modeling technique. In order to investigate the effectiveness and the error characteristics of the present method, the predicted acoustic frequency response function by the present method is compared with that by the acoustic BEM and the experiment for three spaces having different acoustic and geometric characteristics. It is confirmed that the present phased geometric acoustic model is well applicable to the mid-frequency bands. The investigation results also reveal that the interference of sound ray tubes should also consider the diffraction due to the protruded internal structural configurations in the low frequencies below Schroeder's cutoff frequency  $f_c$  and the scattering from the walls for high frequencies above  $4f_c$ . The present analysis method would be very useful in the acoustic design of interior spaces considering the human perceptual characteristics of sounds in the mid-frequency range.

### I. 서 론

음향학에 있어 음장을 해석하는 방법으로는 파동음향학, 기하음향학, 그리고 통계음향학 등으로 크게

세 가지 분야로서 분류한다. 실내 공간의 크기가 고려하고자 하는 음파의 파장과 비슷할 때에는 소리의 파동성이 지배적이 되므로 파동음향학을 적용할 수 있다. 고려하고자 하는 음파의 파장이 공간에 비해 상대적으로 매우 작을 경우에는, 소리를 빛의 경우와 같이 다루는 기하음향학이나 통계적인 접근법을 사용하는 통계음향학을 적용할 수 있다. 그러나, 파장 또는 주

\* 현재, 삼성종합기술원 수퍼컴퓨팅Lab.  
\*\* 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터  
접수일자: 1998년 6월 26일

파수의 관점으로 이론 적용의 경계를 짓는다고 할 지라도, 아직 적절한 해석기법이 존재하지 않는 영역이 남아 있게 되는데, 파동음향학을 적용할 수 있는 저주파에서 기하음향학이나 통계음향학을 적용할 수 있는 고주파로 옮겨 가는 전이 영역인 중주파수 대역이 그 대표적인 대역이다. 중주파수 대역은 관련된 음향 모드의 공명 및 반사, 간섭 특성을 완전히 무시할 수는 없으나 모드 밀도가 비교적 높은 주파수 영역인 관계로, 기존의 저주파수의 모드기법(modal methods)이나 고주파수에 대한 통계적 및 기하학적 해석방법과는 다른 기법이 요구되는 구간이다.

이러한 문제의 해결을 위한 사도로서, 최근에는 시간 영역만을 다루던 기존의 기하음향학에서 주파수 영역까지 다루려는 노력이 이루어 졌다. Gocst와 Pactzold [1]의 연구는 소리의 파동성을 완전히 무시하던 기존의 기하음향학적 고찰에서 탈피하여 음파의 위상을 고려하여 소리의 파동성 중에서 간섭과 같은 현상을 반영할 수 있는 토대를 만들었다. 또, Suh와 Nelson [2]은 위상기하음향모델의 기본 개념을 보여 주는 일차 반사모델을 소개하였고, 간단한 직육면체의 공간에 대해서 실험 결과와 비교하여 방법의 우수성을 확인하였다.

본 논문에서는 이러한 위상기하음향모델(phased geometric acoustic model)의 기본 개념과 유효성에 대해 연구하였으며, 이를 실제 수행하기 위한 전산 알고리즘으로는 레이추적법[3](ray tracing method)과 영상음원법[4](mirror image source method)의 장점을 결합한 혼합법(hybrid method)의 하나인 삼각형빔법[5](triangular beam method)을 사용하였다. 이러한 위상기하음향모델에 대해 직접파, 회절파, 산란효과, 벽면흡음효과 등의 영향을 조사하는 실험과 시뮬레이션을 수행하여 그 유용성을 검토하였다. 이 연구의 목적은 전이주파수 영역에서의 효과적인 적용 가능성 여부와 아직 고려되지 못한 음향특성에 수반될 수 있는 오차의 발생 조건 및 오차 정도에 대한 고찰이다.

## II. 기본 개념 및 이론

### 2.1 주파수 범위

위상을 고려하는 기하음향모델은 주파수 영역의 해석을 가능하게 한다. 가청 주파수 영역은 16Hz부터 20kHz까지 대단히 넓은 대역에 걸쳐 있으므로, 한가지 해석기법으로써 모든 대역을 정확히 효율적으로 해석하는 것은 대단히 어려운 일이다. 그러므로, 주파수 대역에 따라 해석하는 방법들을 달리하여 왔는데, 그 대표적인 분할 방법으로는 공간내의 가청 주파수 대역을 네 개로 나누는 방법이 있다.[6] 기준 주파수들로서는 최초의 음향모드가 형성되는 주파수(fundamental frequency,  $f_0$ ), Schroeder의 차단주파수(cut-off frequency,  $f_c$ ), 또 이 차단주파수의 4배가

되는 값( $4f_c$ )의 세 가지를 들 수 있다. 여기서 Schroeder의 차단주파수는 아래와 같이 표현될 수 있다.[7]

$$f_c = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{T_{60} c^3}{V}} \text{ (Hz)}. \tag{1}$$

위식에서,  $c$ 는 음속(m/s),  $T_{60}$ 는 잔향시간(s),  $V$ 는 공간의 부피( $m^3$ )이다.

$f_0$ 이하의 주파수 영역은 매우 낮은 저주파수 대역으로서, 어떠한 공명현상도 나타나지 않는 영역이다.  $f_0$ 이상부터  $f_c$ 이하까지의 주파수 영역은 음장이 형성되는 공간의 크기와 고려하고자 하는 음파의 파장이 비슷한 대역으로서, 파동음향학의 고유 영역이다. 따라서 이 영역에서는 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM) 등과 같은 모드기법이 적용된다.  $4f_c$ 이상의 고주파수 대역에서는 고전적인 기하음향학이 적용될 수 있을 만큼 음의 파장이 충분히 짧은 영역이다. 여기서는 또한 통계적인 접근법도 가능하게 된다. 한편,  $f_c$ 부터  $4f_c$ 까지의 주파수 대역에서는 파동음향학이 적용되는  $f_c$ 이하의 부분과 기하음향학이 적용되는  $4f_c$ 이상의 부분 사이의 전이(transition) 영역이 된다. 즉, 기하음향학을 적용하기에는 음의 파장이 너무 길고, 파동음향학을 적용하기에는 음의 파장이 너무 짧아서, 어느 한 쪽에만 잘 적용되는 해석기법만으로는 효율적인 해석이 곤란하다. 따라서, 이에 대해 두 가지 개념을 절충한 새로운 방법이 제안되었는데 [1], 음향레이를 사용하는 기하음향학에 파동음향학의 한 요소인 음의 위상을 첨가하면 주파수 영역의 접근이 가능할 뿐만 아니라, 간섭과 같은 소리의 파동성을 고려할 수 있다. 여기서, 간섭 현상에만 국한시키는 이유는, 기하음향학의 출발점인 기하광학에서의 레이의 직진성을 그대로 유지하기 때문에 그 외의 회절이나 산란 현상 등을 고려할 수가 없기 때문이다.

### 2.2 위상을 고려한 기하음향모델

위상을 고려하지 않은 고전적인 기하음향모델은 시간에 따른 에너지의 변화인 에코그램(echogram)을 계산하는 것이 주요 목적이었다. 그러나, 위상을 고려할 경우에는 주파수 영역에서 음향 주파수 응답함수(acoustical frequency response function)를 산출하는 것이 일차적인 목적이 된다. 따라서, 위상기하음향모델에서 주파수 영역의 거동을 살펴보고자 할 때, 계산 알고리즘에 사용되는 관계식은 아래와 같은데, 본 논문에서는 사용한 삼각빔법 알고리즘이 수식의 구현에 적용 되었으며, 이 때 수음점에서의 음압 분포는 아래와 같은 식으로 표현된다:

$$p(\vec{r}) = p_{dir} + p_{refl}. \tag{2}$$

여기서, 음원으로부터 직접 영향을 받게 되는 직접파 음압  $p_{dir}$ 는 다음과 같다:

$$p_{dir} = \frac{p_0}{r_0} \exp(-jkr_0 - 0.5mr_0), \quad (3)$$

$$p_0 = \frac{\rho_0 \dot{q}(\omega)}{4\pi r_0}. \quad (4)$$

여기서,  $k$ 는 파수,  $m$ 은 매질인 공기의 감쇠계수 (nepers/m)인데, 상대습도  $h$ 가 0.2~0.7이고 주파수  $f$ 가 1.5~10 kHz 범위내에 있을 때, 아래와 같은 실험식에 의해서 계산되어질 수 있다[8]:

$$m = 2.18 \times 10^{-7} f^{1.7} / h \quad (\text{nepers/m}) \quad (5)$$

또,  $r_0$ 는 음원과 수용점 사이의 거리이며,  $q(\omega)$ 는 점음원의 크기로서 체적가속도 ( $m/s^3$ )이다. 한편, 반사파에 의한 음압  $p_{ref}$ 는 여러 영상음원 (image source)의 기여에 의해서 결정되므로,

$$p_{ref} = \frac{p_0}{r_n} \exp(-jkr_n - 0.5mr_n) \prod_{i=1}^n R_i(\theta_i) \quad (6)$$

이 된다. 여기서,  $n$ 은 음향레이(ray)의 총 반사회수를 의미하며,  $R$ 은 평면파가 각도  $\theta$ 로 입사될 때 무한 경계면에서의 음압 반사계수이다. 위상을 고려한 기하음향모델의 주요 결과인 음향 주파수응답함수는 음원이 단위크기를 가질 때 음압의 주파수응답으로 정의되어지므로, 위에서와 같이 점음원으로 체적 가속도를 사용한다면,  $q(\omega)=1$ 일 때의 계산 결과가 바로 음향주파수응답함수가 된다. 음압 반사계수  $R(\theta)$ 는 locally-reacting 거동을 하는 음향 재료인 경우에 평면의 비음향 임피던스 (specific acoustic impedance,  $\zeta$ )와 입사각에 의해 아래식과 같이 구해진다[9]:

$$R(\theta) = \frac{\zeta \cos(\theta) - 1}{\zeta \cos(\theta) + 1}. \quad (7)$$

### 2.3 삼각형빔법 (triangular beam method)

기하음향학의 수치 계산을 위한 알고리즘으로는 레이 추적법과 영상음원법의 장점을 결합한 혼합법이 사용되는 것이 바람직 한데, 혼합법은 다시 콘형빔법 [10](conical beam method)과 삼각형빔법으로 나뉜다. 본 연구에서는 후자를 사용하였는데, 이 삼각형빔법의 가장 큰 특징으로는 음원의 모델링을 들 수 있고, 그림 1(a)와 같이 단위구의 표면을 동일한 면적의 무수히 작은 구면 삼각형으로 나누어 레이튜브내의 에너지가 중첩되지 않게 공간을 분할할 수 있게 하는 것이다. 구면 삼각형으로 이루어지는 빔들이 공간상을 진행할 때에는 그림 1(b)와 같이 축추적

법을 사용하게 된다.

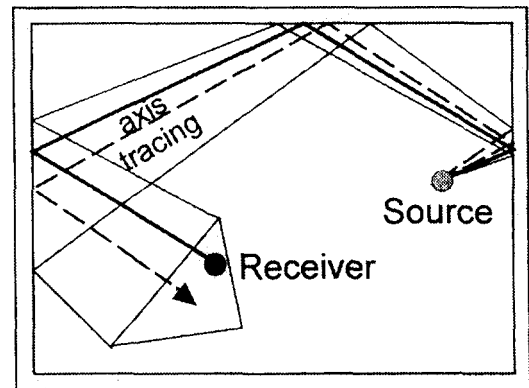
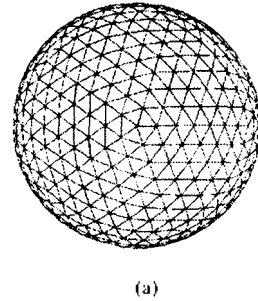


그림 1. 삼각형빔법의 개념도; (a)음원의 모델링, (b)축추적법  
Fig.1 Conceptual description of the triangular beam method; (a) Source modeling, (b) axis tracing.

## III. 시뮬레이션 및 실험 결과와의 비교

위상기하음향모델의 타당성 및 적용 가능성을 살펴보기 위한 절차로서, 본 논문에서는 크게 두 가지의 방법을 선택하였다. 먼저, 가상의 3차원 공간에 대한 적용 가능성 여부를 살펴보기 위해서 음향경계요소법에 의한 수치해석 결과와 비교하는 과정을 수행하였고, 두번째 단계로서는 실제 음장에 대한 실험을 시행하여 두 결과를 서로 비교하였다. 이러한 일련의 검증 절차를 통해서 위상기하음향모델의 적용시 관련되는 음파의 속성인 직접파, 반사파, 간섭의 특성에 대한 계산 결과가, 고려되지 않은 물리적 속성인 회절 및 산란 등의 효과에 의한 오차 요인에 비해 어느 정도의 정확도를 갖는지 검토할 수 있다.

### 3.1 음향경계요소법에 의한 예측치와의 비교

#### 3.1.1 사용된 BEM의 요소 크기에 따른 오차 해석

본 연구에서 사용된 BEM 해석 결과의 유효성을 확인하기 위해서, BEM 요소의 크기에 따른 오차 해석이 선행되었다. 해석 공간은  $1.5 \times 1.5 \times 1.5 m^3$ 의 정육면체를 선택하였으며, 벽면의 경계조건으로는 음향모드를 쉽게 계산

할 수 있는 강체 벽면을 설정하였다. 이때, 직접법의 BEM (direct BEM)으로 계산한 음향모드의 주파수들과 해석적 고유주파수들에 대한 비교 결과가 표1과 같다. 전체적으로 0.158%의 상당히 작은 오차를 보이고 있으므로, 계산에 사용된 BEM의 요소 크기는 사용 주파수 범위에 적합함을 알 수 있다.

표 1. 해석치와 경계요소해석에 의한 정육면체 공간의 공명 주파수의 상호 비교

Table 1. Comparison of resonance frequencies of the cube calculated by the analytical expression and the BEM.

Exact (Hz)	BEM (Hz)	Error (%)
114.3	114.6	0.262
161.7	162.0	0.186
198.0	199.0	0.505
228.7	229.0	0.131
255.6	255.8	0.078
280.0	280.4	0.143
323.4	323.6	0.062
343.0	343.0	0.000
361.6	361.9	0.083
379.2	379.7	0.132
Total error		0.158

3.1.2 간섭만이 지배적인 음장

해석 대상 공간은  $1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ m}^3$ 의 정육면체이며, 음원의 위치는 (0.3m, 0.3m, 0.3m)이고, 수음점의 위치는 (1.2m, 1.2m, 1.2m)이다. 모든 벽면의 임피던스는 주파수에 관계 없이 일정하게  $(4150 + 4150j) \text{ rayls}$ 로 설정하였으며, 이 값은 약 0.29의 흡음률에 상당하게 된다. 이때 BEM은 1350개의 사각형 이차요소를 사용하였다. 이 음장의

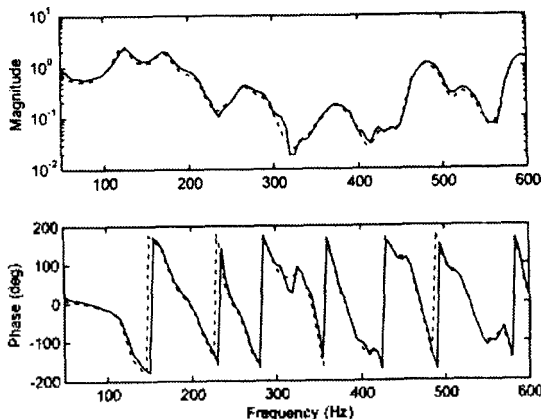


그림 2. 간단한 모델에서의 위상기하모델과 경계요소법 사이의 음향주파수 응답함수 비교

Fig. 2 Acoustic frequency response function obtained from the phased ray model and the BEM: ———, phased geometric model; - - - -, BEM.

Schroeder 차단주파수,  $f_c$ , 는  $389 \text{ Hz}$ 이며, 잔향시간은  $0.12 \text{ s}$ 이다. 그림 2에 두 가지 방법의 의한 해석 결과인 음향 주파수 응답함수를 보이는데, BEM과 위상기하음향해석 사이에 좋은 일치율을 보여 주고 있다. 한편, 대상 음장의 차단 주파수가  $389 \text{ Hz}$ 이므로, 이 주파수 이하에서는 기하음향학적 접근법에 의해서 해석하기에는 파동성의 영향이 너무 강하게 된다. 그렇다면,  $f_c$  이하에서는 위상기하음향모델이 좋은 예측치를 보여 주지 못하여야 하는데도 불구하고, 이 예제에서는 좋은 일치율을 보여 주고 있다. 이와 같은 결과를 나타내는 이유는 기법이 적용된 공간의 특수성에 있다고 할 수 있다. 위상기하음향해석기법이란 기하광학의 원리를 원용한 고전적인 기하음향학에 소리의 파동성 중의 하나인 간섭 현상만을 고려할 목적으로 음파의 위상을 첨가한 개념이다. 따라서, 소리의 파동성 중에서 간섭 현상이 지배적인 음장에 대해서는 주파수 범위에 관계없이 좋은 예측을 할 수 있으며, 여기서 사용된 정육면체나 직육면체의 형상이 이에 해당하는 대표적인 공간이기 때문에, 본 시뮬레이션에서는 비록  $f_c$ 보다 낮은 파동음향학 고유의 영역에서도 기하학적 접근법만으로도 음장을 정확히 예측할 수 있게 된다. 그러므로, 단순한 정육면체나 직육면체형의 공간은 위상기하음향모델의 적용에 있어서 일반적인 경우라고는 할 수 없다. 따라서, 간섭 이외의 소리의 파동성이 중요한 역할을 하는 음장에 대한 위상기하음향모델의 거동에 대해서 조사해 볼 필요가 있다.

3.1.3 간섭 이외의 소리의 파동성이 지배적인 음장

이미 사용된  $1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ m}^3$ 의 정육면체에 그림 3에서와 같이 내부에 높이와 너비가 모두  $0.5 \text{ m}$ 인 턱을 더한 불규칙 형상을 선택하였다. 이러한 공간을 선택하게 된 이유는 첨가된 턱에 의해서 음파의 진행 경로에 변화가 생겨, 회절 현상이 음파 간섭과 함께 음장의 특성을 결정하는 인자가 될 것으로 생각되었기 때문이다. 그러나, 턱

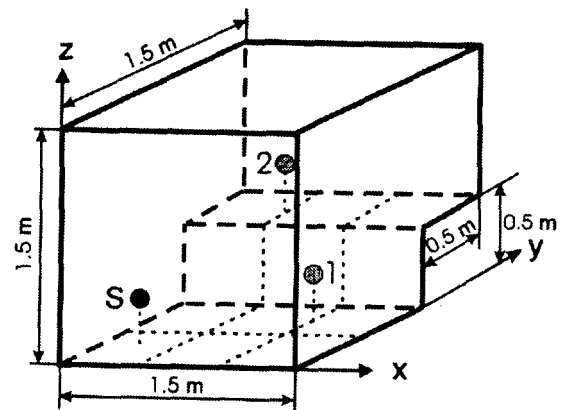


그림 3. 간섭과 회절 현상을 다루기 위한 기하형상

Fig. 3 Geometric model for testing the present method in the viewpoint of interference and diffraction ( S (0.3, 0.3, 0.3), R1 (1.0, 0.8, 0.3), R2 (0.5, 1.2, 0.7) ).

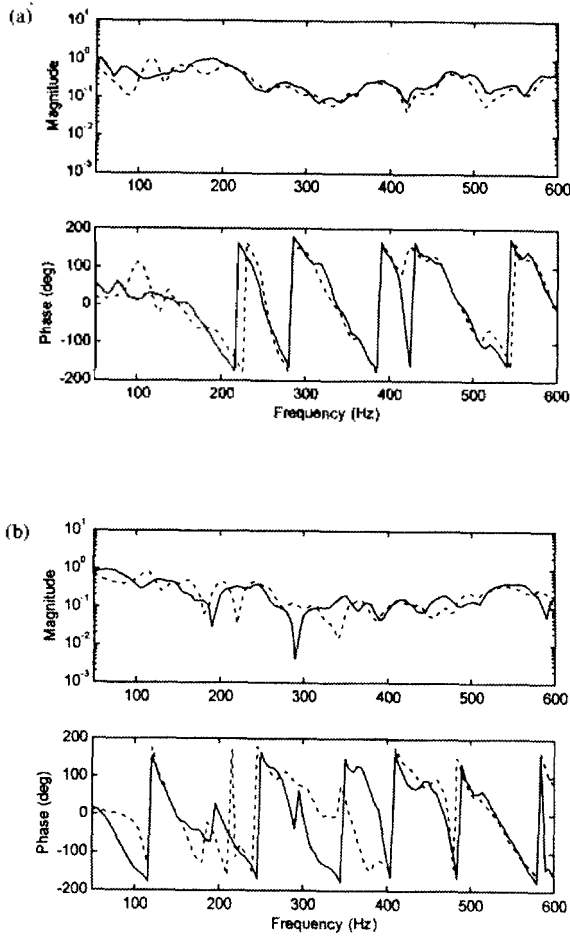


그림 4. 복잡한 공간에서의 위상기하모델과 경계요소법 사이의 음향주파수 응답함수 비교

Fig. 4 Comparison of the predicted acoustic frequency response functions: ———, phased geometric model; - - - -, BEM. The FRF's are estimated at the position of (a) R1, (b) R2.

을 첨가한 복잡한 형상만으로는 음파의 진행 경로를 분리해서 볼 수가 없기 때문에 위상을 도입한 취지를 확인하기에 불충분하다. 따라서, 음원으로부터의 경로를 쉽게 알아볼 수 있는 직접파가 지배적인 역할을 하도록, 흡음 특성이 강한 벽면을 설정하여야 한다. 이 개념에 부합하도록, 사용된 공간의 벽면 임피던스는 주파수에 관계없이 일정하게  $(4150 + 4150j)$  rayls 로 설정하였으며, 이는 약 0.29의 흡음률을 가지는 값이다. 음원과 두개의 수음점의 위치는 그림3에서 보이는 바와 같다. 사용된 공간의 잔향 시간은 0.11s이고, 차단주파수는 396Hz이다. 경계요소모델로서는 1350개의 사각형 이차요소를 사용하였는데, 위상기하음향모델과 BEM 계산에 의한 음향 주파수 응답함수의 특성을 비교해 보면 그림 4와 같다. 앞 단락의 정육면체 공간의 경우에 비해서는 정확성이 다소 떨어지는 것을 볼 수 있으나, 두개의 수음점 중에서도 R1의 경우는 고려하고 있는 거의 모든 주파수 영역에서 BEM의 전체적인 경향을 거의 따라 간다고 볼 수 있다. 그 이유는 음장이

0.29의 흡음률을 가지는 비교적 흡음 특성이 강한 공간이어서, 간섭이외의 현상이 큰 영향을 주지 못하고 있기 때문이다. 즉, 처음 도달되는 음파가 대단히 큰 영향을 갖게 되므로, R1 위치에서는 직접파가 도달되는 과정에서 턱이 음파의 진행을 방해하거나 진행 경로를 휘게 하는 역할을 하지 않기 때문이다. 한편, R2의 경우에는 차단주파수 이하에서 R1에 비해서 정확도가 많이 떨어지는 것이 관찰된다. 이는 음원으로부터 도달되는 음파가 턱에 의해서 영향을 많이 받기 때문이라고 볼 수 있다. 즉, 회절과 같은 소리의 파동성이 중요한 역할을 하기 때문이다. 그러나,  $f$  이상의 주파수 영역에서는 그 이하에서의 경우 보다는 좋은 예측치를 보여 주고 있음을 알 수 있는데, 이는 회절과 같은 소리의 파동성의 역할이 줄어들어 따라, 음향레이의 직진성에 의한 간섭 현상이 지배적이기 때문이다.

이상과 같은 결과로부터, 음장 내에서 간섭이외의 소리의 파동성이 그 지배적인 역할을 잃어 가기 시작하는  $f$  이상에서부터의 음장의 거동을 예측하는 도구로서의 가능성을 재확인할 수 있었고, 저주파수 까지 포함하는 총합적 해석을 위하여는 추후 회절에 대한 보정 연구가 필요함을 알 수 있다.

### 3.2 실제 음장에 대한 실험치와의 비교

이번에는 실제하는 음장을 선택하여, 실험 결과와 위상기하음향 해석의 결과를 비교하여 그 유효성을 검토하고, 실제 응용시에 나타나는 문제점을 파악하고자 한다. 대상 공간으로서는 그림5와 같이 어느 면도 서로 평행하지 않은 7개의 벽면으로 이루어진 구조물의 내부공간을 선정하였다.

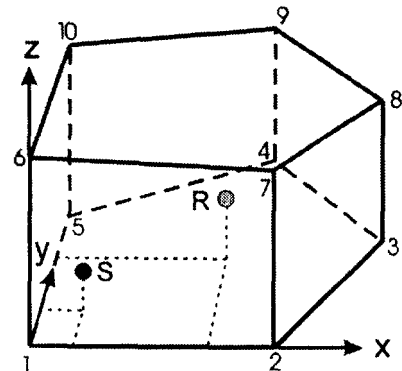


그림 5. 실제 음장 실험에 사용된 공간의 개략도  
Fig. 5 Schematic view of the test chamber.

#### 3.2.1 실험 공간 및 벽면의 음향 특성

다중 강철판으로 이루어진 총 7면 중에서 5개의 벽면에는 두께 25mm의 폴리우레탄 폼을 부착하고, 나머지 두 면은 원래 상태를 사용하였다. 폴리우레탄 폼이 사용되지

않은 두 벽면은 천정 (꼭지점 4, 8, 9, 10, 6)과 꼭지점 1, 5, 10, 6으로 이루어져 있는 면이다. 이때, 음원의 위치는 (0.20m, 0.20m, 0.35m)이고, 수음점의 위치는 (1.68m, 0.75m, 1.22m)이며, 임의로 지정된 점들이다.

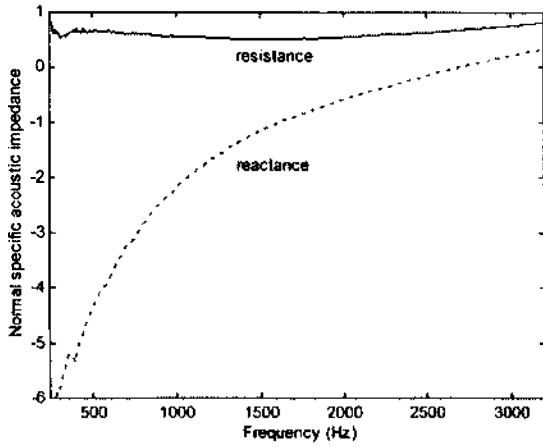


그림 6. 벽면에 부착된 폴리우레탄폼의 수직음향임피던스 측정값

Fig. 6 Measured normal specific acoustic impedance of the polyurethane foam attached to the chamber wall.

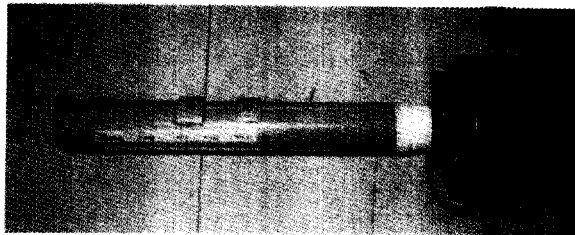


그림 7. 고주파수용의 휴대용 임피던스 측정기

Fig. 7 Portable impedance tube designed for the high-frequency measurement (ID  $\phi$  30mm).

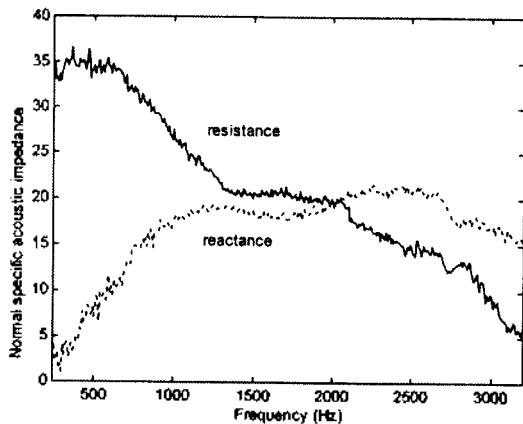


그림 8. 방의 벽면을 이루는 강철벽의 수직음향임피던스 측정값.

Fig. 8 Measured normal specific acoustic impedance of the steel wall of the chamber.

5개의 벽면에 사용된 폴리우레탄 폼의 음향 임피던스는 지름 45mm의 시편을 채취한 뒤 3개의 마이크로폰을 사용하는 방법에 의하여 수직입사로 측정된 값을 사용하였으며 [11], 측정치는 그림 6과 같다. 나머지 2개의 벽면의 경우는 시편을 채취할 수 없었기 때문에, 상기 3개의 마이크로폰 방법을 사용하나 휴대가 가능하도록 특별히 제작한 임피던스관 (portable impedance tube, 그림7)을 사용하여 측정하였는데, 측정된 음향 임피던스는 그림 8과 같다.

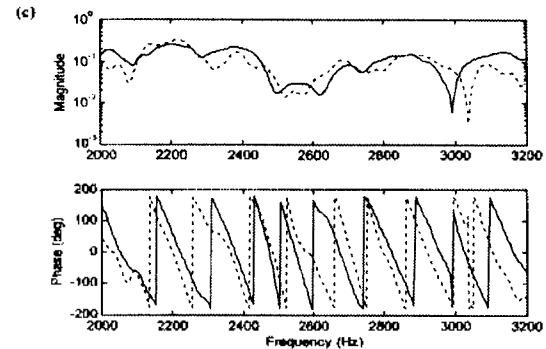
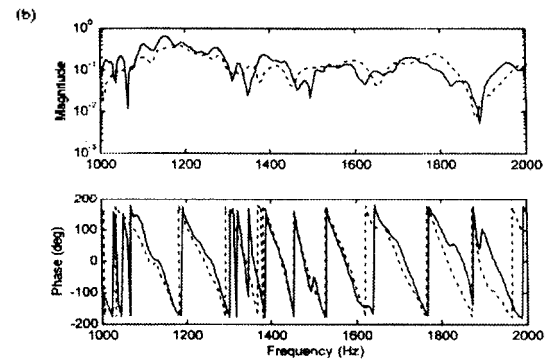
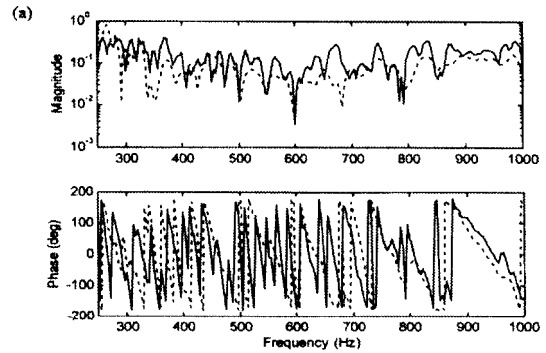


그림 9. 실제 음장에 대해 본 방법의 예측치와 실측치 사이의 음향 주파수응답함수 비교

Fig. 9 Comparison of the acoustic frequency response function of the irregular test chamber: ———, predicted by the present method; - - - - - , measurement.

### 3.2.2 음향 주파수응답함수

그림 9에서는 음향 주파수응답함수에 대한 실험과 본 연구의 시뮬레이션에 의한 음향주파수응답함수의 결과를 비교해서 보여 준다. 1000Hz 미만의 그림 9(a)의 경우는 두 경우가 대단히 상이한 결과를 보여 주고 있다. 음장의 차단주파수,  $f_c$ , 는 약 600Hz 정도가 되는데, 그림 9(a)에서 볼 수 있는 것과 같이  $f_c$  이상의 영역이 그 이하의 영역보다는 조금씩 더 비슷한 결과를 보여 주고 있다. 그림 9(b)의 1000Hz부터 2000Hz까지의 영역의 경우에는 두 방법간의 유사성을 확인할 수 있으며, 그림 9(c)의 2000Hz부터 3200Hz까지의 대역에서는, 주파수가 증가하기 시작하면서 차이가 서서히 증가함을 관찰할 수 있다. 이러한 오차의 주된 원인으로는 대략 4f<sub>c</sub>가 되는 주파수부터 중요해지기 시작하는 산란 현상을 들 수 있다. 그림 9(c)에서 2400Hz 정도가 대략 4f<sub>c</sub>에 해당하는 지점이다. 본 위상기하음향모델에서는 저주파수 대역의 회절 현상과 더불어 고주파수 대역의 산란 현상도 아직 고려하지 않고 있으므로, 그림 9(c)와 같은 주파수 대역을 효과적으로 표현하지 못한다고 하겠다. 따라서, 본 실험 결과에서도 역시 기하음향모델에 위상을 첨가했던 기본 발상의 한계를 재차 확인할 수 있다. 즉,  $f_c \sim 4f_c$  구간의 진이주파수 영역의 음향 문제에 대해서만 효과적인 예측이 가능하다는 점이다.

그러나, 이 예제에 대한 위상기하음향모델의 적용에 있어서, 중요한 오차의 원인 중 하나는 정확한 벽면의 임피던스 자료를 확보하는데 어려움이 있었다는 점이다. 두 개의 벽면에 대해서는 휴대용 임피던스관을 사용할 수 밖에 없었기 때문에 튜브 끝단에서의 밀봉이 제대로 이루어지지 않을 수 있고, 배후 공간이 연결되어 있는 벽면의 일부분의 부위만 측정했다는 점과, 원래 음향학적으로 단단한 벽면의 임피던스를 정도 높게 측정하기가 상당히 어렵다는 사실 등을 들 수 있다. 또, 나머지 5개의 벽면에 부착된 음향 재료의 임피던스를 가능한 한 정확하게 측정하였다고는 하지만, 실제로 벽면에 부착했을 때에는 임피던스가 다소 변경될 수 있다는 점이다. 즉, 임피던스 측정 시에 사용된 재료의 지지 조건과 실제 재료가 부착된 벽면 상태가 다르기 때문인데, 이것은 재료를 부착할 때 공기층이 형성될 수도 있고, 사용된 공간의 벽면의 배후 공간 및 내부 구조를 알기도 힘들며 또 전체적으로 일정하지도 않기 때문이다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 가청주파수 영역에서 파동음향학이나 고전적인 기하음향학으로는 효율적으로 해석할 수 없었던 부분인 Schroeder의 차단주파수로부터 그 4배에 이르는 주파수까지의 전이영역을 다루기 위해 고안된 위상기하음향모델의 완성 및 검증, 오차요인 분석, 응용 가능성

검토를 수행하였다. 사용된 알고리즘으로서는 현재까지 가장 효율적이라고 할 수 있는 삼각형방법을 선택하였고, 이러한 위상모델의 기본 개념에 대한 검증의 절차는 모두 3단계에 걸쳐 실시하였다. 가상의 3차원 음장에 대한 검증으로서 먼저 정육면체의 공간에 대한 경계요소법과 본 연구의 결과를 비교하여, 위상기하음향모델 본래의 취지에 부합하는 소리의 간섭현상을 잘 고려할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또, 내부에 노출된 단차가 있는 공간에 대한 해석의 결과로부터, 차단 주파수 이하의 공간에 대하여는 회절의 효과를 무시할 수 없음을 보였고, 내부 형상이 단순한 경우에는 차단 주파수 이하에서도 적용이 가능함을 보였다. 그 다음 단계로서 실제 음향 공간에 대해 음향 주파수응답함수를 예측한 결과를 실험과 비교하였는데, 전이 주파수 영역에서 서로 유사한 결과를 보임을 확인하였고, 차단 주파수의 4배 이상인 고주파수 영역에서는 산란을 고려하여야 오차를 줄일 수 있음을 확인하였다. 본 연구 결과, 중주파수 영역에서는 위상기하음향 해석 방법이 매우 훌륭한 예측 도구가 될 수 있음을 보였으며, 이러한 방법론은 앞으로 입체 음장 구현이나 건축 내부의 음향설계시 매우 잘 응용될 수 있다고 사료된다. 한편, 위상기하음향모델이 보다 더 좋은 예측 결과를 낼 수 있는 모델이 되기 위해서, 또, 적용할 수 있는 유효 주파수 범위를 확장 시키기 위해서는, 간섭만이 아니라 회절과 산란 같은 소리의 다른 현상까지 고려하여야 하며, 따라서 앞으로 이에 대한 심도 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. E. De Geest and H. Paetzold, "Comparison between room transmission functions calculated with a boundary element method and a ray tracing method including phase," Proc. Internoise 96, vol.6, 3177~3180, Liverpool, July 1996.
2. J. S. Suh and P. A. Nelson, "Measurement of transient response of rooms and comparison with geometrical acoustic models," submitted to J. Acoust. Soc. Am., 1997.
3. A. Krokstad, S. Storm, and S. Sorsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique," J. Sound Vib. 8, 118~125, 1968.
4. 이병호, 이희원, "연주자를 위한 무대공간의 최적화," 한국음향학회지, 1, 19~26, 1982.
5. T. Lewers, "A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics," Appl. Acoust. 38, 161~178, 1993.
6. F. A. Everest, *The Master Handbook of Acoustics* (TAB

- Books, New York), 3rd ed., pp. 271~272 .
7. A. D. Pierce, *Acoustics: an Introduction to Its Physical Principles and Applications* (Acoustical Society of America, New York, 1994), pp.293~294.
  8. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics* (John Wiley & Sons, 1982), 3rd ed., pp.317~319.
  9. H. Kuttruff, *Room Acoustics* (Applied Science Publishers Ltd., London, 1991), 3rd ed., pp.33~36.
  10. D. v. Maercke and J. Martin, "The prediction of echograms and impulse responses within the Epidauro software," *Appl. Acoust.* **38**, 93~114, 1993.
  11. S.-H. Jang and J.-G. Ih, "On the multiple microphone method for measuring in-duct acoustic properties in the presence of mean flow," *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 1520~1526, 1998.

▲신 호 철(Ho-Chul Shin)

1996년 2월:고려대학교 기계공학과 (학사)

1998년 2월:한국과학기술원 기계공학과 (석사)

1998년 3월~현재:삼성종합기술원 수퍼컴응용 Lab.

\*주관심분야: 기하음향학, 3차원음장제현

▲이 정 권(Jeong-Guon Ih)

한국음향학회지 제15권 5호 참조