

## 잔향실의 음압분포해석 및 계측치와의 비교

<sup>0</sup>김현실\*, 김재승\*, 강현주\*, 김상렬\*

### An Analysis of Sound Pressure Distribution in a Reverberation Room and Comparisons with Measurements

Hyun-Sil Kim, Jae-Seung Kim, Hyun-Joo Kang, and Sang-Ryul Kim

#### ABSTRACT

A sound field in a reverberation room is analyzed by using numerical methods and the SPL distributions are compared to the measurements. In numerical predictions, the BEM is employed in the low frequency range, while sound ray tracing method is used for the high frequency range. In the BEM analysis, the surfaces of the empty reverberation room are assumed as rigid boundaries and the damping coefficients are estimated from the measured absorption coefficient. The comparisons with measurements for 100Hz shows good agreement. In the sound ray tracing analysis, the predicted energy decay are in excellent agreements with theoretical results. It is shown that the energy absorption by air damping plays an important role as frequency becomes higher.

#### 1. 서 론

잔향실은 균일한 음장이 생성되도록 설계되어 시편의 흡음률/투과손실계수측, 소음원장비의 음향파워계측 등 음향해석에 필요한 기본시설로 활용된다. 국내에도 이미 여러 연구기관에서 잔향실을 설치하여 이용하고 있는데 잔향실이 갖추어야 할 기본 성능으로 ISO 3741/3742[1]는 적절한 체적과, 표준편차, 흡음률을 들고 있다. 일반적으로 측정하고자 하는 주파수가 낮을수록 요구되는 잔향실크기는 커지는데 이는 저주파수대에서는 특정 모드의 형성으로 인해 음의 불균일성이 심화되기 때문이다. 그러나 체적이 커지면 공기의 흡음효과가 문제가 되며 고주파수에서는 오히려 음장의 불균일성이 증가되므로 이용할 수 있는 상한 주파수대역이 제한된다.

잔향실은 특성상 기하학적으로 잘 정의된 형상을 하고 있으며 실내표면의 균일한 흡음률, 가구나 다른 시설이 없는 등 음장해석대상으로 매우 적합하다. 본 연구에서는 당 연구원이 보유하고 있는 잔향실을 대상으로 수치해석방법을 사용하여 음압분포를 구하고 이를 계측과 비교하였다. 이론적인 해석으로 저주파수대역은 BEM(경계요소법)을, 고주파수대역에는 음선추적법(sound ray tracing method)을 사용하였으며 흡음률은 측정을 통해 얻어진 값을 사용하였다. BEM 해석시 실내표면은 강체(rigid surface)로 가정하였고 음선추적방법은 바닥에 흡음재가 없는 경우와 있는 경우를 고려하여 흡음률 증가에 의한 효과도 살펴보았다.

#### 2. 잔향실 음압계측

당 연구원이 보유한 잔향실은 5각 기둥의 형상

\* 한국기계연구원

으로 체적은 225m<sup>3</sup>, 표면적은 219m<sup>2</sup>이며 대략적인 형상을 Fig. 1에 나타냈다. 천정은 약간 경사졌으며(기울기 2.3°) 가장 낮은 곳의 높이는 6.4m이다. 바로 옆에는 소잔향실이 있으며 개구부(opening)의 크기는 2.5m×2.5m로 문은 삼각형 돌출구조로 되어있다.

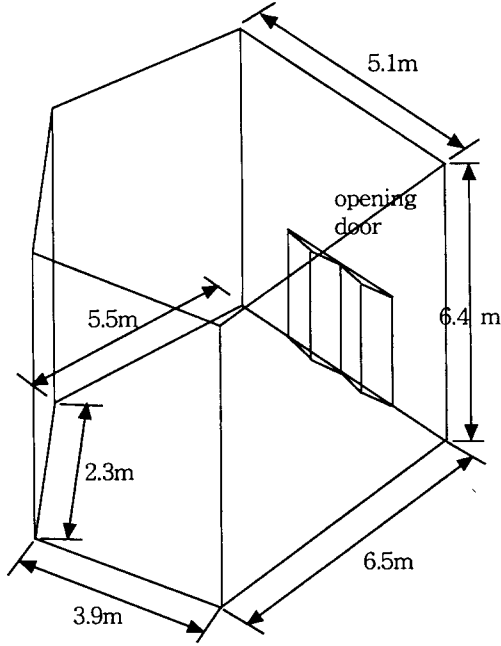


Figure 1. Reverberation Room

Figure 2에는 위에서 본 계측위치 및 스피커위치를 나타냈다.

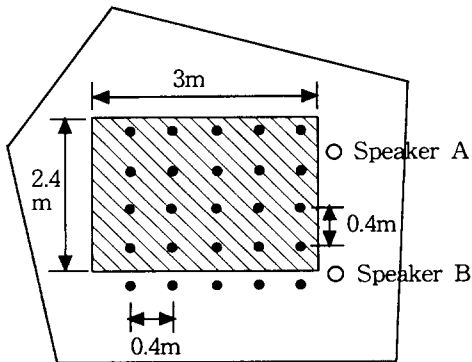


Figure 2. Measurement points of SPL.

계측점은 간격이 0.4m이며 가로 세로 5x5인 격자 형태로 모두 25점이며 마이크로폰은 바닥에서 1.6m 높이에 설치하였다. 소음원은 B&K 무지향성 스피커를 사용하였다. 스피커위치는 A, B 두 군데로 변화시켰으며 높이는 바닥에서 0.24m이다. 음압계측은 잔향실 내부에 아무 것도 없는 경우 및 바닥에 흡음재를 설치한 경우에 수행하였는데 흡음재의 구성은 다음과 같다.

Polimide form board 50t(density: 9.6kg/m<sup>3</sup>) + 0.32t glass cloth

흡음재의 크기는 0.6m×1.2m로 바닥에 10장을 붙여 3m×2.4m의 면적으로 설치하였으며 위치는 Fig.2에 빗금친 부분으로 표시하였다. 음압계측시 온도와 습도는 각각 8℃, 40%이다.

### 흡음률

잔향시간 계측에 의해서 구한 빈 잔향실의 흡음률과 polimide 흡음재의 흡음률을 Figure 3에 나타냈다.

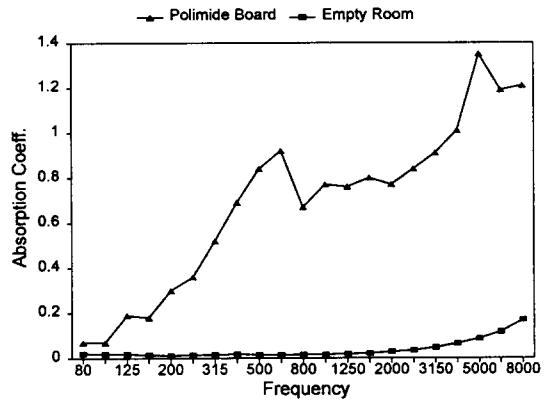


Figure 3. Absorption coefficient of empty room and polimide board.

잔향시간과 흡음률은 다음 관계를 만족하는데

$$\alpha_T = \frac{55.3V}{CT_{60}} \quad (1)$$

여기서 V는 체적, C는 음파의 속도, T<sub>60</sub>은 잔향시간, α<sub>T</sub>는 흡음률이며 Fig. 3에 보인 빈 잔향실

의 흡음률은 식 (1)에 의해서 구한 값이다. 식 (1)의 흡음률은 전파거리에 따른 감쇠가 포함된 양으로 감쇠비율은 온도와 습도 및 주파수에 따라 변화하며 특히 고주파수 및 체적이 큰 경우 영향은 매우 크다. 이를 보정해 주기 위해서는 다음과 같은 관계[2]를 고려해 주어야 하는데

$$a_T = a + 4mV/A \quad (2)$$

여기서  $A$ 는 실내 표면적,  $m$ 은 단위거리당 흡음되는 양을 나타내며 음향에너지는 다음과 같이 거리에 따라 감쇠된다.

$$E = E_0 \exp(-mx) \quad (3)$$

계수  $m$ 은 고주파수로 갈수록 급격히 증가하는데 온도 10℃, 습도 40%인 경우 8000Hz에서 음파는 100m 전파하는데 18dB 감소하나 5℃, 습도 10%인 경우 4dB 감소한다.

### 3. BEM 해석

본 연구에서는 잔향실 음장해석을 위하여 Helmholtz Integral Equation에 근거한 BEM 프로그램을 자체 개발하였다. 사용한 요소는 8절점을 갖는 사각형 quadrilateral 요소로 BEM 정식화 과정 및 요소에 대한 설명은 참고문헌[3]에 나와 있다. BEM 프로그램에서 가장 문제가 되는 부분은 표면적분과정에서 나타나는 다음과 같은 특이적분(singular integration)으로

$$\int dS / |\vec{X} - \vec{X}'|, \text{ as } \vec{X} \rightarrow \vec{X}' \quad (4)$$

식 (4)를 수치적으로 해결하는 몇가지 방법이 제안되었다. 본 연구에서는 참고문헌 [4]의 "collapsed rectangular element" 방법을 사용하였는데 이는 사각형 요소의 매핑(mapping)시 변형된 함수(shape function)을 사용하여 식 (4)의 singularity를 소거하는 방법이다.

BEM을 이용한 실내음장 해석시 경계조건과 댐핑계수는 매우 불확실한 부분으로 이론적인 경계

조건으로는 표면의 복소수 임피던스를 입력하여야 하나 대부분의 재질에 대해 사실상 얻기가 불가능하다. 임피던스 튜브를 이용하여 복소수 임피던스를 계측할 수 있으나 이는 수직방향 입사에 대한 값이며 잔향실 환경에의 적용여부는 아직 미지수이다. 본 연구에서는 흡음재가 없는 경우만 BEM 해석을 하였으며 표면은 rigid surface로 가정하였다.

식 (3)은 전파거리에 따른 에너지 감쇠이며 시간에 따라서는 다음과 같이 주어진다[5].

$$E = E_0 \exp(-t/\tau) \quad (5)$$

식 (5)를 복소수 주파수를 사용하여 표현하면 다음과 같이 되며

$$E = E_0 \exp(-2\omega\eta t) \quad (6)$$

잔향시간에서 주어지는 관계  $\tau = 4V/CAa_T$ 를 이용하여 댐핑계수는 아래와 같이 주어지며 이 값을 BEM에 이용하였다.

$$\eta = \frac{1}{2\tau\omega} = \frac{1}{2\omega} \frac{CAa_T}{4V} \quad (7)$$

BEM 모델링은 ANSYS를 이용하였고 해석은 80, 100, 125Hz의 세가지 저주파수대역에 대해 수행하였는데 측정결과는 1/3 Octave 밴드 중심주파수에 주어졌으므로 BEM 해석도 밴드영역에 대해 1Hz 단위로 수행하여 중심주파수에 대해 평균을 취하였다.

### 4. 음선추적법을 이용한 해석

제 3항의 BEM해석은 저주파수대역에만 가능하므로 고주파수영역은 음선추적법(Sound Ray Tracing Method)을 사용하여 해석하였다. 음선추적법은 자체 개발한 프로그램 "SOUNDRAY"를 이용하여 수행하였는데 실내 표면을 사각형 및 삼각형 평면요소를 사용하며 모델링하며 ANSYS 또는 NASTRAN 용 Pre/Post Processor인 XL 프로그램을 이용하여 생성이 가능하다. 각 요소의 흡음률

데이터로는 제 2항의 계측에서 구한 흡음률  $\alpha_T$ 를 이용하였다. 프로그램 "SOUNDRAY"는 먼저 식 (1)을 이용하여  $T_{60}$ 을 구한다음  $T_{60}/2$ 의 시간까지 반사횟수의 제한없이 음선을 진행시키며 각 수음점(receiving point)에서는 반경 0.4m의 가상 구(sphere)를 통과하는 음선을 고려하여 그 위치에서의 평균에너지를 구하였다.

Figure 4에는 시간에 따른 에너지의 감소를 나타낸 것으로 빈 잔향실에 대해서 식 (5)와 음선추적법을 이용하여 구한 에너지 감소를 비교하였다. 발생시키는 음선수(No. of rays)는 세가지(N=510, 2042, 4586)를 고려하였는데 음선수가 작으면 에너지가 충분치 못하여 감소가 불규칙하나 음선수가 커질수록 정확성이 커지며 이론 식 (5)와 잘 일치함을 알 수 있다.

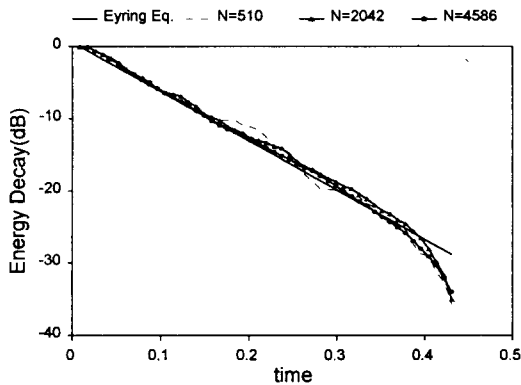


Figure 4. Energy decay

각 위치에서의 에너지는 시간이 증가함에 따라 커지다가 일정 값에 도달하며 발생시킨 음선수에 따라 절대적인 에너지량은 증가하나 각 위치별로 상대적인 에너지비는 일정하다. 음압은  $10\log(\text{에너지})$ 를 취하여 상대적인 분포를 알 수 있다.

## 5. 계측 및 해석결과의 비교 및 검토

계측된 음압분포와 BEM 및 음선추적법을 이용한

예측결과를 Fig. 5와 6에 비교하였는데 음압은 스피커에 가장 근접한 위치를 0dB로 하고 각 위치의 상대적인 음압차이(dB)를 contour plot으로 나타냈다. Fig. 5a, 5b는 80Hz에서 스피커위치 B일때, Fig. 6a, 6b는 100Hz에서 스피커위치 A일때 BEM과 계측값을 각각 비교한 결과로 전반적인 형태는 매우 흡사하나 BEM 결과가 계측보다는 값의 분포 차이가 더 크며 이는 식 (7)에 의한 댐핑계수가 실제보다는 작게 추정됨을 의미한다.

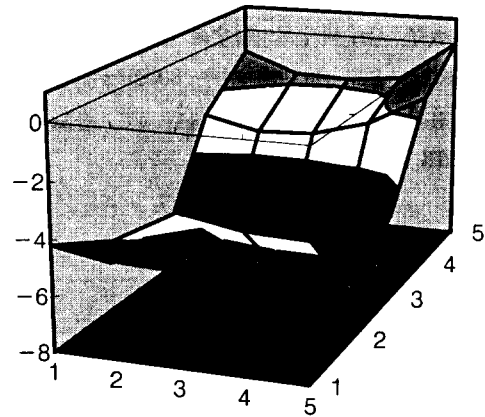


Figure 5a. BEM(Speaker position B, f=80Hz)

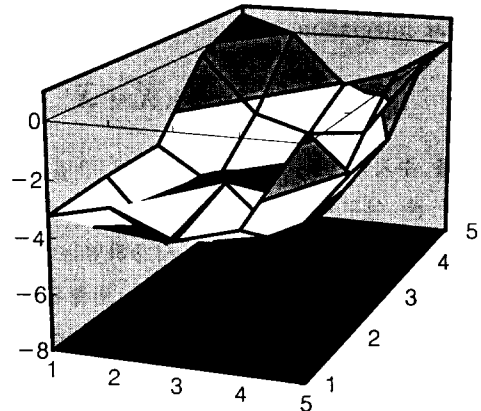


Figure 5b. Meas.(Speaker Position B, f=80Hz)

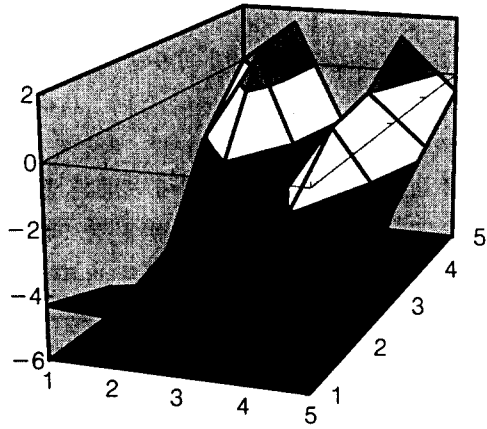


Figure 6a. BEM(Speaker Position A,  $f=100\text{Hz}$ )

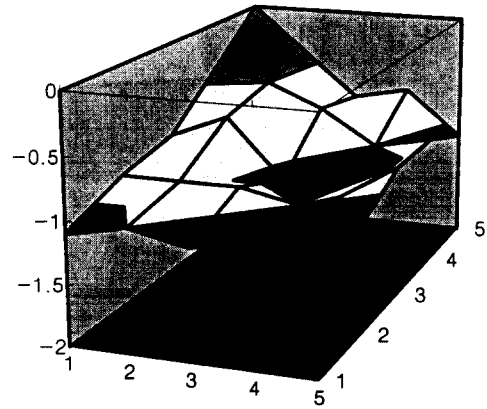


Figure 7a. Sound Ray Method( $f=4000\text{Hz}$ , empty room).

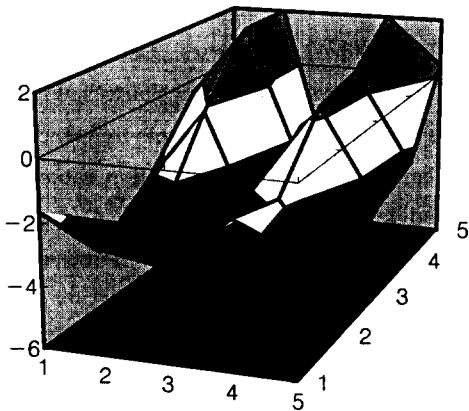


Figure 6b. Meas.(Speaker Position A,  $f=100\text{Hz}$ )

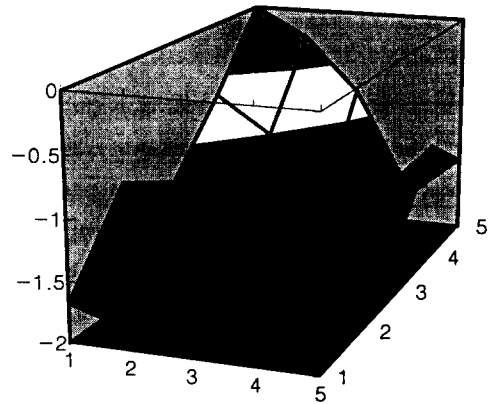


Figure 7b. Measurement( $f=4000\text{Hz}$ , empty room)

Figure 7에서 8까지는 음선추적법과 계측에 의한 음압분포를 비교하였으며 스피커위치는 모두 A로 고정하였다. Fig. 7a, 7b에는  $f=4000\text{Hz}$ 일 때 빈 잔향실에 대해 계측과 음선추적법에 의한 음압분포를 나타냈고 Fig. 8a, 8b에는 바닥에 흡음재가 있는 경우를 비교하였다. 전반적으로 음원으로부터 멀어짐에 따라 음압레벨이 감소함을 알 수 있고 바닥에 흡음재가 있는 경우 이 경향은 더욱 심화됨을 보여준다.

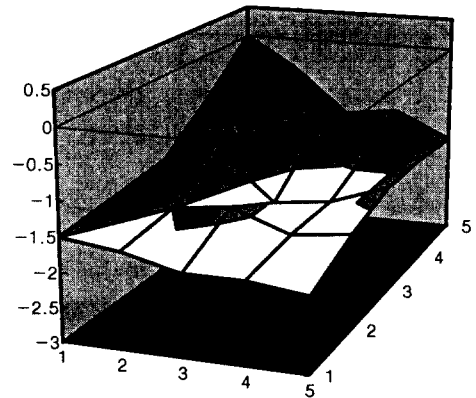


Figure 8a. Sound Ray Method( $f=4000\text{Hz}$ , with

absorbing material).

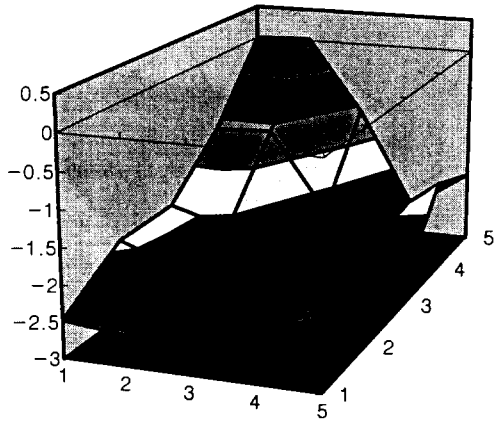


Figure 8b. Meas.(f=4000Hz, with absorbing material).

Figure 9에는 빈 잔향실과 바닥에 흡음재가 있는 경우에 대해 25점의 음압분포의 표준편차를 보였다. 저주파수대역에서는 특정 모드의 존재로 인해 불균일한 분포를 보이지만 중간주파수 대역에서는 매우 균일한 분포를 보인다. 그러나 고주파수가 되면 오히려 균일하지 못하게 되는데 이는 식 (3)의 거리에 따른 흡음손실이 커져서 소음원로부터 멀어짐에 따라 음압이 점점 작아지는 현상이 두드러지게 되기 때문이다.

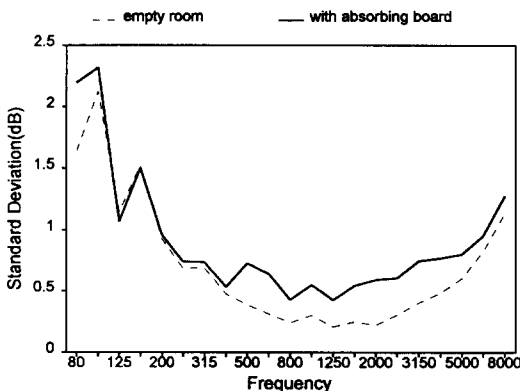


Figure 9. Standard deviation(dB)

흡음재가 있으면 바닥에서의 흡수로 인해 음압의

분포가 더 불균일해짐을 알 수 있다. Figure 7a와 7b, 8a와 8b의 비교에서 음선추적법에 의한 수치해석과 계측결과는 음압분포형상이 매우 유사함을 보여주지만 음압의 상대적인 차이는 계측치가 더 큼을 알 수 있다. 이는 음선추적법에 사용된 흡음률보다 더 큰 흡음률을 사용해야 실제 분포형상과 같게됨을 의미하며 BEM과 계측결과의 비교에서도 이미 확인된 사항이다.

본 연구결과 BEM과 음선추적법은 잔향실과 같이 기하학적 형상과 음향학적 특성이 잘 정의된 경우 매우 유용한 해석수단으로 활용되어 실용적인 결과를 얻을 수 있고 추후 형상변경 등 설계수단으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1]. ISO 3741/3742, Acoustics, Determination of Sound Power Levels of Noise Sources, Precision Methods for Broad-band/Discrete-frequency and narrow-band sources in reverberation rooms.
- [2] Edited by L. L. Beranek, Noise Control and Vibration Control, Revised Ed., Published by INCE, 1988.
- [3] A. F., Seybert, B. Soenarko, F. J. Rizzo, and D. J. Shippy, "An Advanced Computational Method for Radiation and Scattering of Acoustic Waves in Three Dimensions", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 77, 362-368, 1985.
- [4] R. A. Jeans and I. C. Mathews, "Solution of Fluid-Structure Interaction Problems Using a Coupled Finite Element and Variational Boundary Element Technique", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 88, 2459-2466, 1990.
- [5] A. D. Pierce, Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, Pub. by ASA, 1989.