

개구부로 연결된 3중 커플룸의 음향특성

Acoustic Properties of Three-room Coupled System by Connected Two Apertures

나 혜 중* · 임 병 덕†
Hae Joong Na and Byoung-Duk Lim

(Received April 15, 2016 ; Revised May 25, 2016 ; Accepted May 25, 2016)

Key Words : Coupled Room(커플룸), Aperture(개구부), Statistical Acoustics Model(통계적 음향모델), Acoustic Diffusion Model(음향확산 모델)

ABSTRACT

A coupled room system consists of adjacent rooms and apertures where the sound energy is exchanged between the two rooms. Acoustically, a coupled room system shows a non-exponential decay profile. Most of the related researches have been to analyze the acoustic properties of two-room coupled system so far whereas three-room coupled system were seldom studied. In this regard, this paper aims to analyse the distribution of sound pressure level, sound decay curve of three-room coupled system and sound energy flow between them by using the acoustic diffusion model and to further verify them through experiments. Firstly, the sound pressure level distribution and mean sound pressure level in the steady-state condition are analyzed at various frequencies and source locations. Good agreements are observed in both experiments and analysis results. Secondly, two double slope effect quantifiers of sound attenuation, LDT/EDT and LDT/T10 are compared at various frequencies and for different source locations. The result indicates that LDT/T10, less affected by the early reflection patterns than LDT/EDT, is more suitable to the analysis and experiments of a multi-slope sound decay curve. Lastly, the sound energy flow in each room is analyzed based on the acoustic diffusion model. After the early decay stage, the sound energy is observed to flow from the room with a long reverberation time to the room with a short one.

1. 서 론

보통 아파트, 사무실, 학교 내 실험실 등은 긴 복도를 통해 연결된 여러 개의 방으로 이루어져 있다. 이와 같은 구조물은 인접한 두 개의 방과 그 방을 연결하는 격벽을 가진 커플룸의 확장형이라고 볼 수

있는데⁽¹⁾ 이때 음에너지는 여러 개의 방과 복도를 연결하는 개구부를 통해서 흐른다. 따라서 각 방마다 음압레벨분포 및 음의 감쇠곡선의 형태가 다르게 나타나는데 음향특성을 표현할 수 있는 모델식은 Davis⁽²⁾가 처음 거론한 통계적 음향모델이 있다. 이 모델식은 Summers⁽³⁾, Cremer와 Müller⁽⁴⁾ 등에 의해 좀 더 구체화되었다. Kuttruff⁽¹⁾는 이 커플룸의 모델

† Corresponding Author; Member, School of Mechanical Engineering, Yeungnam University
E-mail: bdlm@yu.ac.kr

* Member, Graduate School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

‡ Recommended by Editor Myung Jun kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

식을 이용하여 N개의 감쇠계수 및 감쇠모드를 가진 비선형감쇠곡선으로 표현할 수 있는 수식을 일반화하였다. 통계적 음향모델은 가장 보편적으로 사용되고 있음에도 불구하고 임의의 형상을 가진 구조물은 해석하기 어렵고 특정 위치의 음향정보는 파악할 수가 없다. 이에 Valeau⁽⁵⁾ 등은 공간상의 음에너지 분포와 에너지 흐름을 예측하고 가시적으로 표현할 수 있는 확산방정식을 이용한 수치적 방법을 제안하였다. 최근에는 Luizard⁽⁶⁾, Xiang⁽⁷⁾ 등은 3개 방으로 구성된 커플룸에 대해 수치해석 프로그램을 이용하여 연구하였다. Summers⁽⁸⁾ 또한 음선추적법과 통계적 해석법을 이용하여 개구부의 크기에 따른 음압레벨차를 검토하였다.

이 연구에서는 3개의 방으로 구성된 커플룸에 대해 음원 위치가 각 방의 음에너지밀도 변화에 미치는 영향에 대해 음향확산 모델을 이용하여 해석하고 실험결과와 비교해보았다.

우선 음원 위치에 따른 음에너지밀도를 이론적 모델에 대해 검토하였다. 다음 단계는 실제 3중 커플룸으로 된 건물에서 잔향시간을 측정하고 각 방마다 흡음률을 산출하였다. 그리고 정상상태 조건에서 음원의 위치를 변경하여 각 방마다 측정점별 음압레벨을 파악하고 음 감쇠상태 조건에서 정량적 평가인자를 통해 음 감쇠 곡선의 형태를 확인하였다. 마지막 단계에서는 실험을 통해 구한 각 방의 흡음률을 음향 확산모델의 경계조건에 적용한 후 실험에서 구한 결과들과 비교하고 음에너지 흐름을 검토하였다.

2. 이론적 모델 검토

2.1 통계적 음향 모델

외부로부터 음에너지 유입이 없는 인접한 3개의 방을 가진 커플룸은 음향학적으로 개구부(뚫린 벽)을

통해 에너지 교환이 이루어지는 구조물을 의미한다.

Fig. 1과 같이 체적이 V_1 , 표면적이 S_1 인 Room 1은 체적 V_2 , 표면적 S_2 를 가진 Room 2와 개구부 S_{12} 를 사이에 두고 분리되어 있고 체적 V_3 , 표면적 S_3 를 가진 Room 3은 Room 2의 개구부 S_{23} 를 사이에 두고 분리되어 있다.

개구부로 연결된 3중 커플룸은 Kuttruff⁽¹⁾의 N개 커플룸에 대한 에너지 평형식으로부터 표현될 수 있다⁽⁹⁾.

$$\frac{d\bar{w}_i}{dt}(t) = \frac{P_i}{V_i} - \left(\frac{cA_i}{4V_i} + \frac{c \sum_{j=1, j \neq i}^N S_{ij}}{4V_i} \right) \bar{w}_i(t) + \frac{c}{4V_i} \sum_{j=1, j \neq i}^N S_{ij} \bar{w}_j(t) \quad (i=1, \dots, N) \tag{1}$$

여기서 c 는 음속, \bar{w}_i 는 i 번째 방의 공간평균 음에너지 밀도, A_i 는 i 번째 방의 흡음력(개구부의 흡음력 제외), V_i 는 i 번째 방의 체적, P_i 는 i 번째 방의 음원 파워, S_{ij} 는 i 번째와 j 번째 방의 개구부 면적, 그리고 N 은 방의 총 개수를 나타낸다.

만약 Room 1에 음원 파워 P_1 만 있다면 식(1)의 정상상태 조건에서의 공간평균 음에너지 밀도는 아래와 같다.

$$\bar{w}_1 = \frac{4P_1}{c} \left(\frac{A_{22}A_{33} - S_{23}^2}{A_{11}A_{22}A_{33} - A_{11}S_{23}^2 - A_{33}S_{12}^2} \right) \tag{2}$$

$$\bar{w}_2 = \frac{4P_1}{c} \left(\frac{A_{33}S_{12}}{A_{11}A_{22}A_{33} - A_{11}S_{23}^2 - A_{33}S_{12}^2} \right) \tag{3}$$

$$\bar{w}_3 = \frac{4P_1}{c} \left(\frac{S_{12}S_{23}}{A_{11}A_{22}A_{33} - A_{11}S_{23}^2 - A_{33}S_{12}^2} \right) \tag{4}$$

여기서 $A_{11} = A_1 + S_{12}$, $A_{22} = A_2 + S_{12} + S_{23}$, $A_{33} = A_3 + S_{23}$ 이다.

위 식으로부터 Room 2의 음에너지밀도는 Room 1의 음에너지밀도보다 $\frac{A_{33}S_{12}}{A_{22}A_{33} - S_{23}^2}$ 만큼의 차이가 나고 Room 3의 음에너지밀도는 Room 1의 음에너지밀도보다 $\frac{S_{12}S_{23}}{A_{22}A_{33} - S_{23}^2}$, Room 2의 음에너지밀도

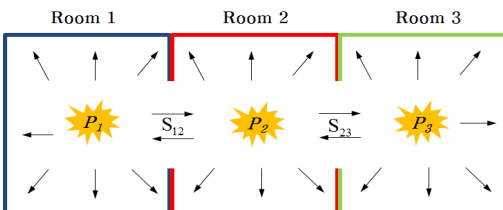


Fig. 1 Sketch of three-room coupled system connected by two apertures, S_{12} and S_{23}

보다 $\frac{S_{23}}{A_{33}}$ 만큼 차이가 난다.

Room 2에 음원 파워 P_2 가 있을 경우, 정상상태 조건에서의 Room 2의 음에너지밀도는 Room 1의 음에너지밀도보다 $\frac{A_{11}}{S_{12}}$ 만큼의 차이가 나고 Room 3의 음에너지밀도는 Room 1의 음에너지밀도보다 $\frac{A_{11}S_{23}}{A_{33}S_{12}}$, Room 2의 음에너지밀도보다 $\frac{S_{23}}{A_{33}}$ 만큼 차이가 난다.

Room 3의 경우는 Room 1의 평균 음에너지밀도 분포와 서로 반대일 뿐 대칭되기 때문에 음압레벨차가 같은 경향을 보인다.

다음은 음원 파워가 $P_i = 0$ 일 때, 식(1)은 상수계수 ψ_{ij} 를 갖는 N 계 제차상미분방정식(homogeneous ordinary differential equation)⁽⁹⁾으로 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{W}} = \Phi \mathbf{W} \tag{5}$$

식(5)의 해는 고유벡터, 고유치를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{W} = \sum C_k \mathbf{p}^{(k)} \exp(-\delta_k t) \quad (k = 1, \dots, N) \tag{6}$$

여기서 δ_k , $\mathbf{p}^{(k)}$ 는 $\Psi \mathbf{p}^{(k)} = \delta_k \mathbf{p}^{(k)}$ 를 만족하는 고유치, 고유벡터이고, C_k 는 k 번째 임의의 상수이다.

식(6)의 계수 C_k 는 정상상태조건에서의 음에너지 밀도에 의해 결정되고 식(6)의 일반해로부터 경계조건과 초기조건을 만족하는 음에너지밀도의 해를 얻을 수 있다.

2.2 음향확산 모델

음원을 포함한 3개의 방을 가진 커플룸의 음에너지 밀도 분포 및 음에너지 흐름은 아래의 확산방정식으로 표현할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$\frac{\partial w_i(\vec{r}, t)}{\partial t} - D_i \nabla^2 w_i(\vec{r}, t) = P_i(\vec{r}, t) \quad \text{in } V_i \tag{7}$$

($i = 1, 2, 3$)

여기서 \vec{r} 은 공간변수, $D_i = \frac{\lambda_i c}{3}$ 는 각 방의 확산계수, 그리고 $\lambda_i = \frac{4V_i}{S_i}$ 은 각 방의 평균자유경로를 나

타낸다.

각 방의 경계면(흡음벽)에서의 음에너지 교환은 다음과 같은 형태의 혼합경계조건식으로 표현할 수 있다.

$$J_i \cdot \vec{n}_i = -D_i \frac{\partial w_i(\vec{r}, t)}{\partial n_i} = h_i w_i(\vec{r}, t) \quad \text{on } S_i \tag{8}$$

($i = 1, 2, 3$)

여기서 h_i 는 각 경계면의 교환계수(exchange coefficient)이고 \vec{n}_i 는 외부법선벡터이다. 부호가 마이너스인 것은 인접한 방에서 음에너지가 유입되는 것을 의미한다.

교환계수는 아래와 같이 흡음계수 α 에 대한 3가지 유형의 표현식으로 나타낼 수 있는데, 흡음률이 0.2보다 작으면 새빈의 식(Sabin's formula)⁽⁵⁾

$$h = \frac{c\alpha}{4} \tag{9}$$

흡음률이 1보다 작으면 아이링의 식(Eyring's formula)⁽¹¹⁾

$$h = -\frac{c \ln(1-\alpha)}{4} \tag{10}$$

흡음률 1에 대한 특이해 문제를 개선한 수식(modified Eyring's formula)⁽¹²⁾

$$h = \frac{c\alpha}{2(2-\alpha)} \tag{11}$$

이 있다.

개구부를 통한 에너지 교환은 아래와 같은 경계조건으로 표현할 수 있다⁽¹³⁾.

$$D_1 \frac{\partial w_1}{\partial n_1} + h_{12} w_1 = \frac{\tau c}{4} w_2 \quad \text{on } S_{12} \tag{12}$$

$$D_2 \frac{\partial w_2}{\partial n_2} + h_{12} w_2 = \frac{\tau c}{4} w_1 \quad \text{on } S_{12} \tag{13}$$

$$D_2 \frac{\partial w_2}{\partial n_2} + h_{23} w_2 = \frac{\tau c}{4} w_3 \quad \text{on } S_{23} \tag{14}$$

$$D_3 \frac{\partial w_3}{\partial n_3} + h_{23} w_3 = \frac{\tau c}{4} w_2 \quad \text{on } S_{23} \tag{15}$$

여기서 h_{12} 와 h_{23} 는 개구부의 교환계수이다.

식 (7)의 음원 파워를 켜고 음에너지밀도 감소는 아래의 초기 조건을 적용한 후,

$$w(\vec{r}, 0) = w_0 \tag{16}$$

식 (7)과 함께 경계조건식 (8), (12)~(15)를 이용하여 수치적으로 구할 수 있다.

여기서 식 (16)은 식 (7)의 정상상태 조건에서의 음에너지밀도 분포를 $t=0$ 인 초기조건으로 적용했을 때를 의미한다.

3. 3중 커플룸의 음향특성

2개의 개구부를 가진 3중 커플룸에 대해 실험을 수행하고 음향확산 모델을 이용하여 정상상태 조건에서의 음압레벨 분포 및 감쇠상태조건에서의 음 감쇠곡선과 음에너지흐름을 검토해보았다.

3.1 실험 대상 및 고유잔향시간 측정

(1) 실험 대상

이 실험 대상의 정보는 Fig. 2와 같다. 3개의 방을 가진 커플룸은 각각 Room 1, Room 2, Room 3이라고 하고, 음압레벨 분포 및 음에너지 흐름을 확인하기 위해서 Fig. 3과 같이 Room 1과 Room 2를 연결하는 문, Room 2와 Room 3을 연결하는 문은 열어두었다. 이때 Room 1과 Room 2를 연결하는 문의 크기는 1.25 m × 2.6 m이고, Room 2와 Room 3을 연결하는 문의 크기는 2.5 m × 2.6 m이다. 무지향성 스피커는 Room 1과 Room 3의 경우 정가운데(바닥면으로부터 1 m 높이)에 두고, Room 2는 오른쪽 끝의 가운데(바닥면으로부터 1 m 높이)에 두었으며 최대 파워출력 120 dB인 백색잡음 신호를 사용하였다. 또한, 각 방마다 높이 1.2 m 평면상에서 각 벽면에서 1 m 떨어지고 2개의 마이크로폰을 두었다. 첫 번째 방과 두 번째 방의 높이는 3.75 m이고, 복도는 7 m이다.

실험대상의 고유잔향시간은 KS F 2864⁽¹⁴⁾의 방법을 적용하여 측정하였다. Table 1은 음원중단법에 의해 측정된 각 방의 주파수별 평균잔향시간과 새빈의 이론식으로부터 얻은 평균 흡음률을 나타낸 것이다.

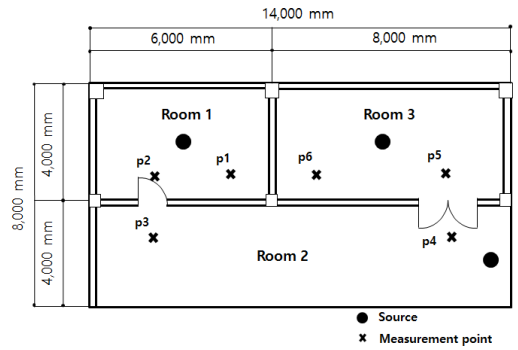


Fig. 2 Plan view of the office with three-room coupled system. Measurement points are indicated by crosses(X). Source locations are indicated by ●



Fig. 3 Photograph of the Room 1(left) and Room 2(right). Room 3 is similar to Room 1

Table 1 Mean absorption coefficient obtained from the Sabine formula and reverberation times measured in each room

Freq. (Hz)	Room 1		Room 2		Room 3	
	$T_{60}(s)$	$\bar{\alpha}_1$	$T_{60}(s)$	$\bar{\alpha}_2$	$T_{60}(s)$	$\bar{\alpha}_3$
500	1.14	0.103	4.64	0.040	1.38	0.091
1 k	1.10	0.107	4.12	0.046	1.39	0.090
2 k	0.98	0.120	2.75	0.068	1.11	0.113

3.2 정상상태 조건에서의 비교

(1) 주파수대역별 음압레벨 분포

실험을 통해서 구한 주파수대역별 각 방의 평균 흡음률을 음향 확산 모델식의 경계조건에 적용한 후 실험과 동일한 조건하에 해석을 수행하였다. 이때 스피커는 Room 1에 있는 조건으로 설정하였다.

Fig. 4를 살펴보면 주파수대역별 평균 음압레벨은 음원이 있는 Room 1이 가장 높고 Room 3이 가장 낮게 나타났다. 또한, 측정점별 음압레벨은 음원이 있는 p1이 가장 높고 음원에서 가장 멀리 떨어져 있는 p6가 가장 낮다. 이것은 음에너지가 Room 1에서 Room 2를 지나서 Room 3로 흐르기 때문이

다. 또한 실험과 해석 결과에 대한 음압레벨 차이는 2 dB 미만이다.

(2) 음원 위치별 음압레벨 분포

음원의 위치를 변경하여 500 Hz 대역에서 음압레벨 분포를 확인해 보았다.

Fig. 5를 살펴보면, 음원이 Room 1에 있을 때 평균음압레벨은 Room 1이 가장 높고 Room 3이 가장 낮다. 음원이 Room 2에 있을 때는 Room 2가 가장 높고 Room 1이 가장 낮다. 이와 같은 결과는 Room 3이 Room 1보다 흡음률이 낮고 방의 크기가 크기 때문이다. 마지막으로 음원이 Room 3에

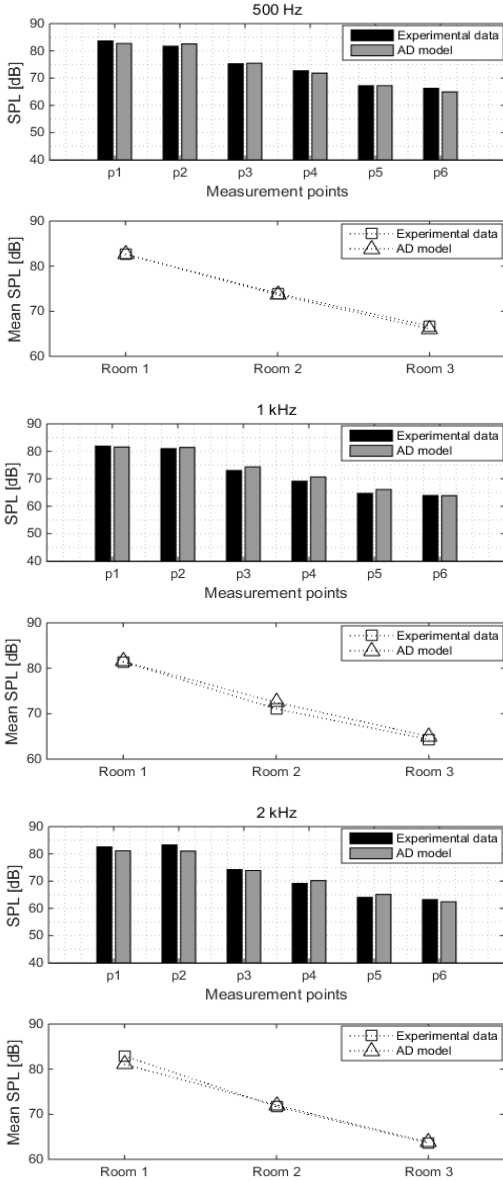


Fig. 4 Comparison of steady-state sound pressure level distributions and mean values for 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz. Positions of the 6 points are shown in Fig. 2

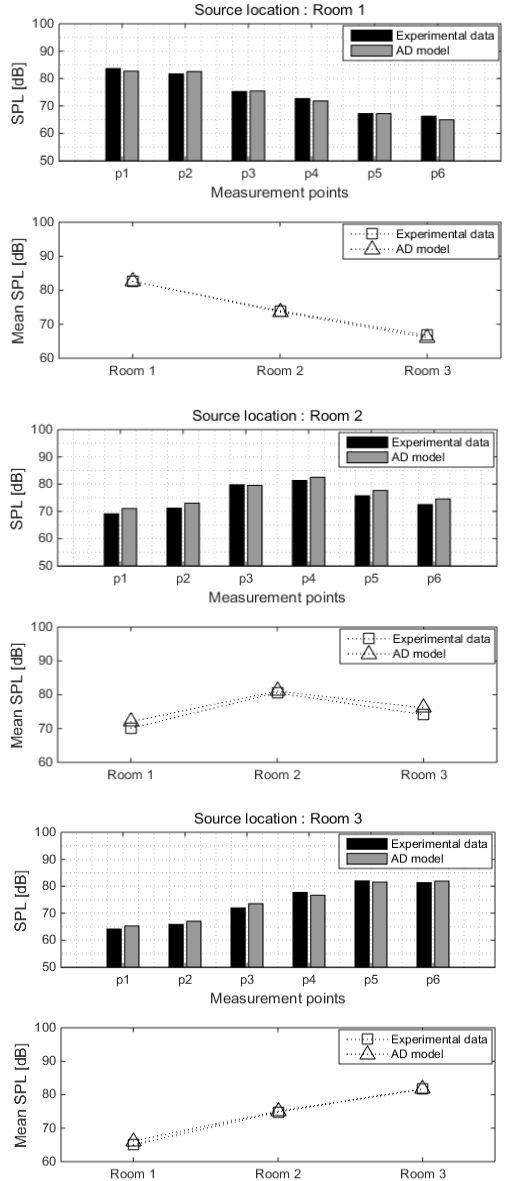


Fig. 5 Comparison of steady-state sound pressure level distributions and mean values for source location

있으면 Room 3이 가장 높고 Room 1이 가장 낮다. 음원의 위치가 Room 1에 있는 경우와 반대의 결과를 보인다. 통계적 음향모델의 음원위치에 따른 각 방의 공간평균 음에너지밀도와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 또한, 음원 위치에 따른 실험과 해석 음압레벨 차이는 2 dB 미만이다.

3.3 감쇠상태 조건에서의 비교

실내의 음에너지가 충분히 정상상태조건이 되었을 때 음원의 파워를 끄면 각 방의 음에너지는 비선형적으로 감쇠한다. 이러한 비선형 감쇠곡선은 각 방의 크기, 벽면의 흡음특성 및 개구부의 크기에 따라서 달라진다. 따라서 실내의 감쇠곡선 효과를 정량적으로 평가하기 위한 다양한 방법들이 Bradley와 Wang⁽¹⁵⁾ 등에 의해 소개되었는데 대표적 평가인자로는 T30/T10, LDT/EDT, 감쇠율, ΔdB 등이 있다. 그 중에서도 감쇠곡선의 형태를 잘 표현해주는 인자는 LDT/EDT와 LDT/T10⁽¹⁶⁾가 있다. EDT는 음에너지밀도 감쇠곡선의 최고 레벨값을 0 dB로 했을 때 -10 dB까지 감쇠하는데 걸리는 시간이고, EDT는 -25 dB에서 -35 dB까지 감쇠하는데 걸리는 시간을 의미한다. 그리고 T10은 -5 dB에서 -15 dB까지 감쇠하는데 걸리는 시간이다. 평가인자의 값이 1보다 작으면 초기 감쇠 시간이 후기 감쇠 시간보다 길고, 1보다 크면 그 반대이다. 그리고 1이 되면 선형적으로 감쇠한다.

(1) 주파수대역별 음에너지 감쇠곡선

Fig. 6은 음원이 Room 1에 있을 때의 실험과 해석의 감쇠곡선으로부터 LDT/EDT, LDT/T10을 구하고 평균치(mean ratio)를 비교한 것이다. 실험과 해석결과 모두 Room 1이 가장 크고 나머지 방은 거의 1에 가깝다. Room 1은 초기에 음에너지가 급격히 감소하다가 음에너지가 완만하게 감소한다. 나머지 두 방은 직선에 가까운 형태이다. 또한 고주파수대역으로 갈수록 측정점별 편차가 작다.

(2) 음원 위치별 음에너지 감쇠곡선

음원이 Room 2에 있는 경우를 제외하고 실험과 해석결과 모두 음원이 있는 방의 정량적 평가 인자 값이 가장 높고 나머지 방들은 거의 1에 가깝다.

음원이 Room 2에 있는 경우는 실험과 해석결과

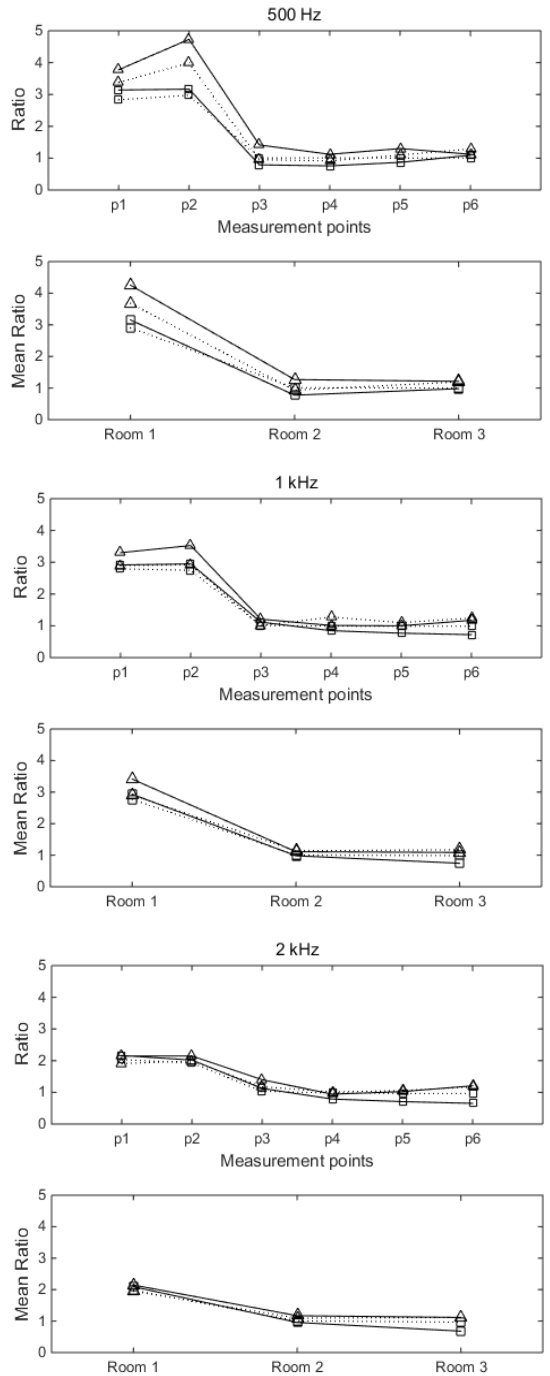


Fig. 6 LDT/EDT and LDT/T10 ratio of measurement points and mean ratio for 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz : LDT/EDT of experimental data (□△), LDT/EDT of diffusion model (□), LDT/T10 of experimental data (△), and LDT/T10 of diffusion model (△)

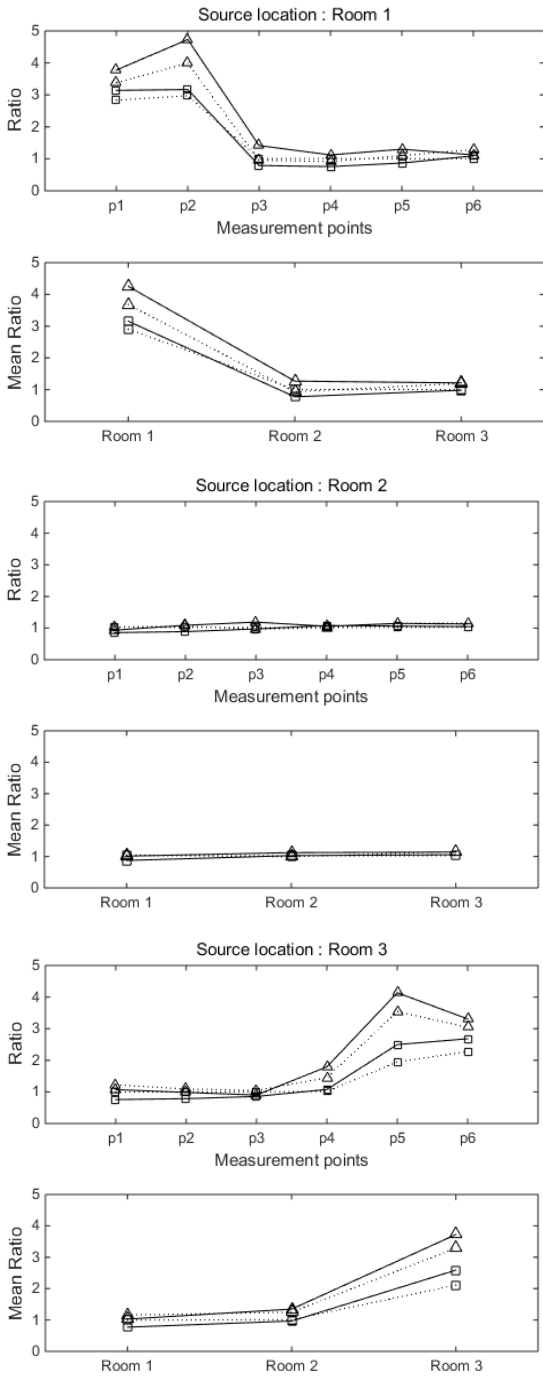


Fig. 7 LDT/EDT and LDT/T10 ratio of measurement points and mean ratio for source position: LDT/EDT of experimental data (\square, \triangle), LDT/EDT of diffusion model (\square), LDT/T10 of experimental data (\triangle), and LDT/T10 of diffusion model (\triangle)

모두 거의 1에 가깝다. Room 2의 잔향시간이 나머지 방보다 길어서 음에너지가 두 방으로 흐른다. 각 방의 음에너지는 시간에 따라서 일정하게 감소한다. 또한, LDT/EDT와 LDT/T10값을 비교해 보았을 때 Room 2는 거의 일치하고 나머지는 차이가 크지 않다.

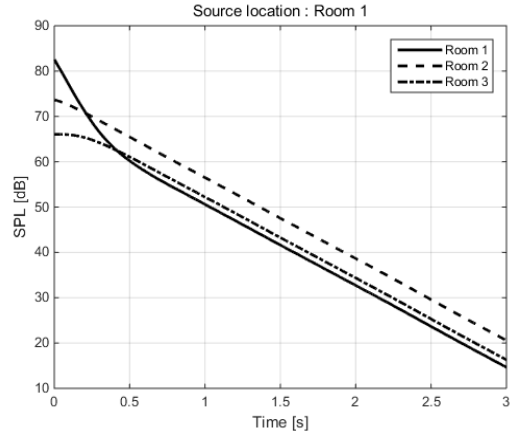


Fig. 8 Mean sound decay curve of acoustic diffusion model. The source is located at the center of Room 1

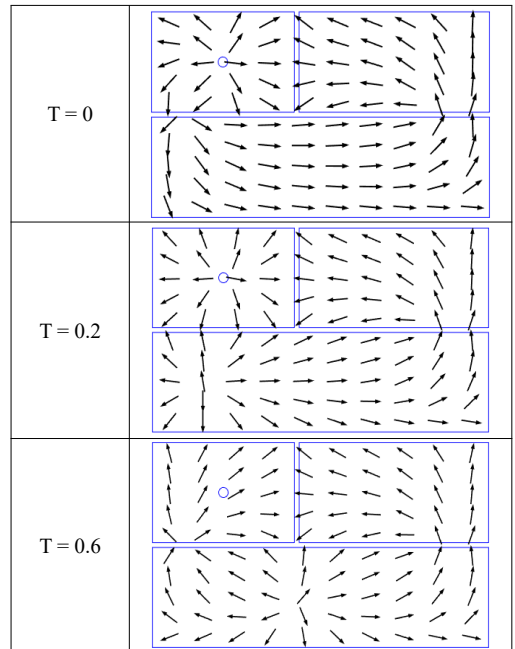


Fig. 9 Sound energy flow on $x-y$ plane at $z = 1$ m. The source is located at the center of Room 1

(3) 음원 위치별 음에너지흐름

음원의 위치를 변경하고 500 Hz 대역에서의 음에너지 흐름을 확인해 보았다.

음원이 Room 1에 있을 때 음에너지 감쇠곡선⁽¹⁶⁾은 Fig. 8과 같다. Room 1은 급격하게 감쇠하다가 어느 시점에서는 완만하게 감쇠하는 곡선의 형태,

Room 2는 거의 직선에 가까운 곡선의 형태, Room 3은 Room 1과 반대의 형태를 가진다.

Fig. 8의 감쇠곡선에 대한 음에너지 흐름(Fig. 9)^(17,18)를 살펴보면, 초기에는 음에너지가 음원이 있는 Room 1에서 Room 2, 그리고 Room 3로 흐르다가 0.6초가 지나면 Room 2에서 Room 1과 Room 3로 흐른다. 이것은 Room 2의 잔향시간이 나머지 방보다 길어서 음에너지가 잔향시간이 짧은 곳으로 이동하기 때문이다.

다음은 음원이 Room 2에 있는 경우다. Fig. 10을 살펴보면 3개의 곡선이 겹쳐지지 않고 음에너지가 일정하게 감쇠한다. Fig. 11의 음에너지 흐름을 살펴보면 t 가 0일 때부터 음에너지는 Room 2에서 양방향으로 흐른다.

마지막으로 음원이 Room 3에 있으면 음 감쇠곡선의 형태는 음원이 Room 1에 있는 경우와 유사하다. 음에너지 흐름도 초기에는 음원이 있는 Room 3에서 Room 2, 그리고 Room 1로 흐르다가 Room 2에서 나머지 방으로 흐른다.

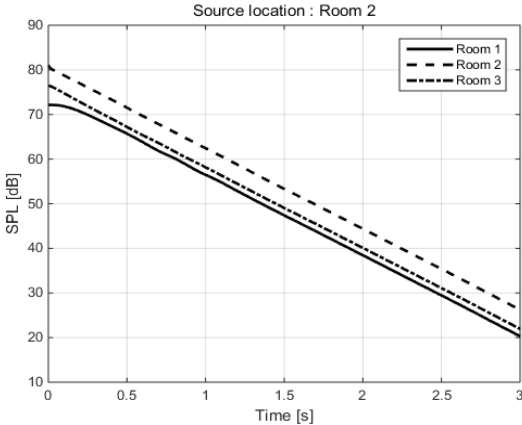


Fig. 10 Mean sound decay curve of acoustic diffusion model. The source is located at the right end of Room 2

4. 결 론

3중 커플룸의 음향 특성은 정상상태조건 및 음 감쇠상태조건에 대해 실험과 해석결과를 비교해 보았다.

(1) 정상상태조건에서는 실험과 해석의 음압레벨이 음원이 있는 방이 가장 높고 멀어질수록 낮다. 주파수 대역별 음압레벨 차이는 2 dB 미만이다.

(2) 음 감쇠상태조건에서 주파수대역별 감쇠곡선은 음원이 있는 방의 음에너지가 급격히 감소하다가 완만해지고 다른 방은 거의 직선의 형태를 보였다. 정량적 평가인자는 음원이 있는 방의 값이 가장 크고 나머지 방은 거의 1에 가깝다. Room 2의 경우 감쇠곡선이 겹쳐지지 않는 일정한 형태를 보임으로써 정량적 평가인자가 1에 가까운 값을 가졌다.

(3) 음원 위치에 따라 음에너지 흐름을 살펴보면 음원이 Room 1에 있으면 에너지가 Room 2를 지나 Room 3로 흐르다가 일정시간이 지나면 Room 2에서 양방향으로 흐른다. 이것은 Room 2의 잔향시간이 나머지 방보다 길어서 음에너지가 잔향시간이 짧은 곳으로 이동하기 때문이다. 음원이 Room 3에 있는 경우도 초기에 음에너지 흐름의 방향만 반대일

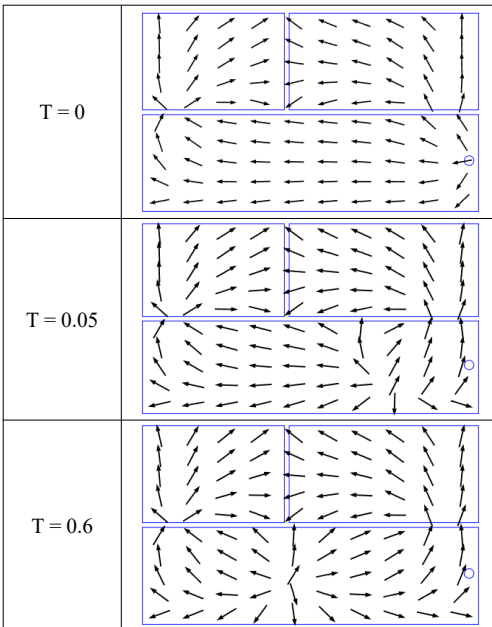


Fig. 11 Sound energy flow on $x-y$ plane at $z = 1$ m. The source is located at the right end of Room 2

뿐 음원이 Room 1에 있는 경우와 유사한 결과를 보였다. 음원이 Room 2에 있는 경우 3개의 곡선이 겹쳐지지 않고 음에너지가 일정하게 감소하고, 음에너지는 Room 2에서 양 방향으로 흐른다. 결국 음원의 위치에 상관없이 일정시간이 지나면 모든 음에너지는 잔향시간이 긴 Room 2를 통해서 잔향시간이 짧은 방으로 흐름을 알 수 있다.

위의 결론을 통해 실 간의 평균 음에너지 밀도만을 평가할 수 있는 통계적 음향모델과는 달리 음향 확산 모델은 음압레벨분포와 음원 위치별 음에너지 흐름을 파악할 수 있었다. 따라서 향후 다양한 형태의 3중 커플이상의 방에 대해서 음압레벨분포와 음에너지 흐름을 파악하는데 음향확산 모델이 적합할 것으로 판단된다.

References

- (1) Kuttruff, K., 2000, Room Acoustics, 4th Ed., Elsevier Science Ltd., London and New York.
- (2) Davis, A. H., 1925, Reverberation Equations for Two Adjacent Rooms Connected by an Incompletely Sound-proof Partition, *Philos. Mag.*, Vol. 50, No. 297, pp. 75~80.
- (3) Summers, J. E., 2005, Technical Note: Remark on The Formal Identity of Two Statistical-acoustics Models of Coupled Rooms, *Build. Acoust.*, Vol. 12, No. 1, pp. 41~50.
- (4) Cremer, L. and Müller, H. A., 1982, Principles and Applications of Room Acoustics, Trans. T. J. Schultz Applied Science, New York.
- (5) Valeau, V., Picaut, J. and Hodgson, M., 2006, On the Use of a Diffusion Equation for Room-acoustic Prediction, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 119, No. 3, pp. 1504~1513.
- (6) Luizard, P., Xiang, N., Polack, J. D. and Katz, B. F. G., 2012, Coupled Volumes and Statistical Acoustics : Preliminary Results of an Improved Analytical Model, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 131, No. 4, pp. 129~134.
- (7) Xiang, N., Goggans, P., Jasa, T. and Robinson, P., 2010, Bayesian Characterization of Multiple-slope Sound Energy Decays in Coupled-volume Systems, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 129, No. 2, pp. 741~752.
- (8) Summers, J. E., Torres, R. R. and Shimizu, Y., 2004, Statistical-acoustics Models of Energy Decay in System of Coupled Rooms and Their Relation to Geometrical Acoustics, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 116, No. 2, pp. 958~969.
- (9) Summers, J. E., 2012, Accounting for Delay of Energy Transfer between Coupled Rooms in Statistical-acoustics Models of Reverberant Decay, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 132, No. 2, pp. 129~132.
- (10) Billon, A., Foy, C., Valeau, V., Picaut, J. and Sakout, A., 2008, Modeling the Sound Transmission Between Rooms Coupled through Partition Walls by Using a Diffusion Model, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 123, No. 6, pp. 4261~4271.
- (11) Billon, A., Picaut, J. and Sakout, A., 2008, Prediction of the Reverberation Time in High Absorbent Room Using a Modified-diffusion Model, *Appl. Acoust.*, Vol. 69, No. 1, pp. 68~74.
- (12) Jing, Y. and Xiang, N., 2008, On Boundary Conditions for the Diffusion Equation in Room-acoustic Prediction : Theory, Simulations, and Experiments, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 123, No. 1, pp. 145~153.
- (13) Fortin, N., Picaut, J., Billon, A., Valeau, V. and Sakout, A., 2009, Sound Field Modeling in Architectural Acoustics Using a Diffusion Equation Based Model, *Proceedings of the COMSOL Conference*, <http://hdl.handle.net/2268/32707>
- (14) KS F 2864: 2012, Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to the Other Acoustical Parameters.
- (15) Bradley, D. T. and Wang, L. M., 2009, Quantifying the Double Slope Effect in Coupled Volume Room Systems, *J. Building. Acoust.*, Vol. 16, No. 2, pp. 105~123.
- (16) Bradley, D. T. and Wang, L. M., 2010, Optimum Absorption and Aperture Parameters for Realistic Coupled Volume Spaces Determined from Computational Analysis and Subjective Testing Results, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 127, No. 1, pp. 223~232.
- (17) Jing, Y. and Xiang, N., 2008, Visualizations of Sound Energy Across Coupled Rooms Using a Diffusion Equation Model, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 124, No. 6, pp. 360~365.
- (18) Xiang, N., Jing, Y. and Bockman, A. C., 2009, Investigation of Acoustically Coupled Enclosure Using a

Diffusion-equation Model, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 126, No. 3, pp. 1187~1198.



Hae Joong Na received her B.S. and M.S. degree in textile engineering from Yeungnam University. From 2004 to 2014 she had worked with Korea Textile Machinery Institute. She is working towards her Ph.D. degree in mechanical

engineering at Yeungnam University.



Byoung-Duk Lim received his B.Eng. degree from Seoul National University, M.S. and Ph.D. degrees from KAIST all in mechanical engineering. From 1985 to 1993 he had worked with Korea Research Institute of Standards and Science.

From 1993 he has been with School of Mechanical Engineering at Yeungnam University.