

정상상태조건에서의 개구부로 연결된 커플룸의 음향 특성

Room Acoustic Properties of Coupled Rooms Connected by an Aperture in the Steady State Condition

나 혜 중* · 임 병 덕†

Hae Joong Na and Byoung-Duk Lim

(Received April 7, 2016 ; Revised April 7, 2016 ; Accepted May 2, 2016)

Key Words : Coupled Rooms(커플룸), Partition Wall(격벽), Aperture(개구부), Statistical Acoustics Model(통계적 음향모델), Acoustic Diffusion Model(음향확산 모델), Coupling Factor(커플링 인자), Sound Energy Density(음에너지 밀도), Sound Pressure Level Distribution(음압레벨분포)

ABSTRACT

Room acoustic properties of coupled rooms connected by an aperture has been analyzed using statistical acoustic model based on the diffused sound field assumption, which has limitation in dealing with the parameters such as room geometries and non uniform absorptivity of the boundary surfaces. In order to overcome these difficulties the acoustic diffusion model has been introduced, by which distribution of the acoustic energy density can be analyzed for various shapes and wall absorptivity. In this study acoustic properties of coupled rooms connected by an aperture(e.g. door) is analyzed using acoustic diffusion equation, which is solved numerically. The mean energy densities of two rooms obtained by the diffusion model are compared with those from the statistical model. The results show good agreement for various coupling aperture sizes and absorption coefficients. For a limiting case when the partition wall is substituted by an aperture and the two rooms eventually forms a single room, results of coupled room analysis using diffusion model show good agreement with those of a single room.

1. 서 론

일반적으로 사무실 또는 실험실 등과 같은 공간은 격벽에 서로 인접한 방과 그 방들을 연결하는 문이 설치되어 있는 경우가 많다. 이러한 구조는 음향학적으로 격벽을 가진 커플룸이라고 할 수 있는데

싱글룸의 음향특성과 달리 격벽의 개구부를 통한 음에너지의 흐름 때문에 내부 음원의 파워를 깎을 때를 기준으로 시간이 지남에 따라 음에너지가 비선형적으로 감소한다. 다시 말해서 개구부를 통해서 교환되는 음에너지의 영향에 의해 두 가지 형태의 초기 음에너지 감소곡선과 후기 음에너지 감소곡선을 가진다. 따라서 싱글룸에서의 음향특성을 분석하는

† Corresponding Author; Member, School of Mechanical Engineering, Yeungnam University
E-mail: bdlim@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

데 사용되는 방법들(고유진향시간 및 음압레벨분포 등)만으로는 커플룸의 음향특성을 파악하기 어렵다.

커플룸의 음향특성에 영향을 주는 조건으로는 각 방의 흡음특성, 그 방의 크기, 그리고 두 방을 연결하는 개구부의 크기인데 이에 대한 다양한 연구들이 수행되었다⁽¹⁾. 커플룸에 대한 모델식 및 방법론은 통계적 이론, 통계적 음향해석, 모드 이론, 유한요소법, 음선추적법 등이 있다⁽²⁻⁴⁾. 가장 보편적으로 사용하는 모델은 통계적 음향해석법으로서, 확산상장 조건으로 가정했을 때 실험과 수치해석적 방법이 모두 만족하는 결과를 보였다^(5,6). 그럼에도 불구하고 통계적 음향해석법(SA)으로는 여전히 다양한 형태의 구조 해석이 어려울 뿐만 아니라 그 실내공간의 평균된 에너지 값만을 제시하기 때문에 에너지의 공간적 변화와 에너지 흐름을 파악할 수 없다.

이러한 문제에 대해 최근에는 Valeau⁽⁷⁾ 등은 3차원 실내공간에 대한 확산모델을 제안하였다. 확산방정식을 이용한 해석법에서는 에너지 지배방정식이 정상상태조건에서 열전도방정식과 유사한 편미분방정식 형태로 유도되기 때문에 공간상의 음에너지분포와 에너지의 흐름을 예측할 수 있다⁽⁸⁾. 또한 유한요소기법과 같은 수치해석법을 기반으로 하는 음향해석 프로그램이 개발되어 음에너지밀도의 분포를 가시적으로 표현할 수 있는 신뢰할 만한 결과들도 보여주고 있다^(9,10).

이 연구에서는 커플룸에 대한 음향학적 특성을 파악하기 위해서 통계적 음향변수들을 이용하여 통계적 음향모델과 음향확산 모델을 비교·검토하였다.

정상상태 조건에서 크기가 같고 평균 흡음률이 일정한 커플룸의 평균 음압레벨 차를 개구부의 크기에 따라서 비교해 보았다.

그리고 개구부의 크기가 최대가 되어 싱글룸의 형태가 되었을 때 두 모델의 커플룸과 싱글룸의 공간평균 음압레벨을 비교해 보았다.

다음으로 음원실의 흡음률은 일정하게 유지하고 수음실의 흡음률의 변화를 주었을 때와 반대로 수음실의 흡음률은 일정하게 유지하고 음원실의 흡음률의 변화를 주었을 때의 두 모델의 음압레벨 차를 비교해 보았다.

마지막으로 음향확산 모델을 이용하여 앞의 흡음률 변화 조건을 적용한 후 위치별 음압레벨 분포를 확인하였다.

2. 이론적 모델 검토

2.1 음향모델

(1) 통계적 음향 모델(statistical acoustics model)
외부로의 음의 유출입이 없고 격벽의 개구부를 통해서만 음에너지의 흐름이 있을 경우, 이때 커플룸에서의 음에너지 흐름은 Fig. 1과 같다.

여기서 체적이 V_1 , 표면적이 S_1 이면서 음원파워 P 를 가진 음원실은 체적 V_2 , 표면적 S_2 를 가진 수음실과 격벽의 개구부 S_{12} 를 사이에 두고 분리되어져 있다. 개구부를 통한 음의 투과는 면적 S_{12} 와 흡음률 α_{12} 에 의해 결정되어지는데 흡음률 α_{12} ($\alpha_{12} = \tau = (10^{-R/10}) + \delta$)는 투과손실 R (transmission loss)와 내부 손실계수 δ 와 관계가 있다. 개구부가 완전 개방된 형태이면 입사된 음에너지가 내부 손실 없이 모두 투과되므로 흡음률 α_{12} 는 1이 된다⁽⁸⁾.

음원실에 음원 파워 P 가 있을 때의 격벽을 가진 커플룸에 대한 에너지 평형식은 다음과 같이 표현될 수 있다⁽⁵⁾.

$$P_1 - \frac{c}{4}(A_1 + S_{12}\alpha_{12})\bar{w}_1 + \frac{c\alpha_{12}S_{12}}{4}\bar{w}_2 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{c\alpha_{12}S_{12}}{4}\bar{w}_1 - \frac{c}{4}(A_2 + \alpha_{12}S_{12})\bar{w}_2 = 0 \quad (2)$$

c : 음속

$A_i = \sum_i \alpha_i S_i$: 각 방의 흡음력(개구부의 흡음력 제외) ($i = 1, 2$)

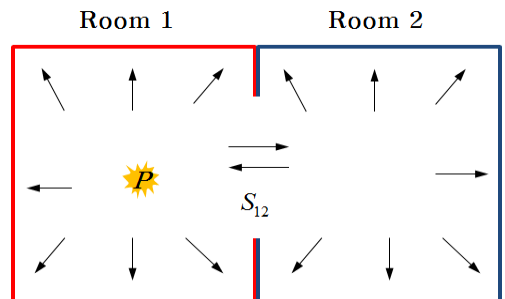


Fig. 1 Sketch of two coupled rooms connected by an aperture S_{12} : room 1 containing the source is called source room and room 2, receiving room

S_{12} : 개구부의 면적

α_{12} : S_{12} 의 흡음률

P_1 : 음원실의 음향파워

\bar{w}_i : 각 방의 음에너지 밀도

위 식 (1)과 (2)의 정상상태 조건에서의 음에너지 밀도는 아래와 같다.

$$\bar{w}_1 = \frac{4}{c} \left(\frac{A_{22}P_1}{A_{11}A_{22} - S_{12}^2} \right) \quad (3)$$

$$\bar{w}_2 = \frac{S_{12}}{A_{22}} \bar{w}_1 \quad (4)$$

$A_{11} = A_1 + S_{12}$, $A_{22} = A_2 + S_{12}$ 이다.

위 식으로부터 수음실에서의 음에너지밀도는 음원실에서의 음에너지밀도보다 $\frac{S_{12}}{A_{22}}$ 만큼의 차이가 나며 이를 커플링 인자(coupling factor) k_R 라고 한다. 또한, $\frac{S_{12}}{A_{11}}$ 은 k_S 이라고 하며 $k (= \sqrt{k_S k_R})$ 은 평균 커플링 인자로 음원실에서 수음실로, 수음실에서 음원실에 대한 커플링 정도를 표현하며 k 값은 0에서 1사이 이다.

정상상태 조건에서 통계적 음에너지 평형은 각 방의 음압레벨간의 관계로부터 알 수 있는데 수음실의 커플링 인자에 의존한다^(5,6,11).

$$L_1 - L_2 = -10 \log(k_R) \quad (5)$$

$k_R \approx 1$ 이면 커플링의 정도가 강하며 마치 두 방은 하나의 큰 방처럼 거동하게 되고, $k_R \approx 0$ 이면 커플링의 정도가 약해서 음원실에서 수음실로의 음에너지 흐름이 약함을 의미한다. 일반적으로 커플링의 정도가 강하다라도 통계적 음향 모델은 두 방간의 음압레벨차가 생기는데 아직까지도 커플링의 강약에 대한 기준은 잘 설정되어 있지 않다. 다만 Smith⁽¹²⁾ 등은 다양한 실험 결과를 통해 k_i 또는 $k_j > 0.5$ 일 때 커플링의 정도가 강하다고 보았다.

(2) 음향 확산 모델(acoustic diffusion model)

정상상태 조건에서의 음원을 포함한 커플룸의 음

에너지밀도 분포 및 음에너지 흐름은 2개의 확산방정식으로 표현할 수 있다⁽⁸⁾.

$$D_1 \nabla^2 w_1(\vec{r}) + P_1(\vec{r}) = 0 \quad \text{in } V_1 \quad (6)$$

$$D_2 \nabla^2 w_2(\vec{r}) = 0 \quad \text{in } V_2 \quad (7)$$

\vec{r} : 공간위치 벡터

$D_i = \frac{\lambda_i c}{3}$: 각 방의 확산계수($i=1,2$)

$\lambda_i = \frac{4V_i}{S_i}$: 각 방의 평균자유경로(mean free path) ($i=1,2$)

식 (6)은 음원실의 음에너지밀도, 식 (7)은 수음실의 음에너지밀도에 해당되는 확산방정식이다.

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

$$J_1 \cdot \vec{n}_1 = -D_1 \frac{\partial w_1(\vec{r})}{\partial n_1} = h_1 w_1(\vec{r}) \quad \text{on } S_1 \quad (8)$$

$$J_2 \cdot \vec{n}_2 = -D_2 \frac{\partial w_2(\vec{r})}{\partial n_2} = h_2 w_2(\vec{r}) \quad \text{on } S_2 \quad (9)$$

J_i : 음에너지 흐름벡터($i=1,2$)

h_i : 각 경계면의 교환계수(exchange coefficient) ($i=1,2$)

여기서 \vec{n}_1, \vec{n}_2 는 외부법선벡터이다. 부호가 마이너스인 것은 인접한 방에서 음에너지가 유입되는 것을 의미한다.

교환계수는 아래와 같이 흡음률 α 에 따라 3가지 유형의 표현식으로 나타낼 수 있는데, 흡음률이 0.2보다 작으면 새빈의 식(Sabin's formula)⁽⁹⁾

$$h = \frac{c\alpha}{4} \quad (10)$$

흡음률이 1보다 작으면 아이링의 식(Eyring's formula)⁽⁹⁾

$$h = -\frac{c \ln(1-\alpha)}{4} \quad (11)$$

흡음률 1에 대한 특이해 문제를 개선한 수식 (modified Eyring's formula)⁽⁹⁾

$$h = \frac{c\alpha}{2(2-\alpha)} \tag{12}$$

이 있다.

개구부를 통한 에너지 교환은 아래와 같은 경계 조건식으로 표현할 수 있다^(8,15).

$$D_1 \frac{\partial w_1}{\partial n_1} + h_{12} w_1 = \frac{\tau c}{4} w_2 \quad \text{on } S_{12} \tag{13}$$

$$D_2 \frac{\partial w_2}{\partial n_2} + h_{12} w_2 = \frac{\tau c}{4} w_1 \quad \text{on } S_{12} \tag{14}$$

h_{12} : 개구부의 교환계수

식 (6), (7)과 함께 경계조건식 (8), (9), (13), (14)를 이용하여 수치적으로 구할 수 있다.

2.2 에너지 평형 관계

정상상태에서 통계적 음향 해석으로 계산한 각 방의 평균 음에너지밀도와 음향 확산모델로 계산한 음에너지밀도를 비교하기 위해 음에너지밀도를 공간에 대해 평균하였다.

음향 확산 모델에서 정상상태 에너지 평형관계는 식 (7)을 수음실의 체적에 대해 적분하여 얻을 수 있다⁽⁸⁾.

$$\int_{V_2} D_2 \nabla^2 w_2(\vec{r}) dV_2 = 0 \tag{15}$$

가우스의 발산정리를 이용하여 위 식을 수음실의 각 경계에서 법선방향으로의 면적분으로 표현하면,

$$D_2 \int_{S_2} \frac{\partial w_2(\vec{r})}{\partial n_2} dS_2 + D_2 \int_{S_{12}} \frac{\partial w_2(\vec{r})}{\partial n_2} dS_{12} = 0 \tag{16}$$

가 된다. 여기서 새빈의 식을 적용한 식 (10)과 (14)를 식 (16)에 적용하여 정리하면,

$$-\frac{c\alpha_2}{4} \int_{S_2} w_2(\vec{r}) dS_2 - \frac{c\alpha_{12}}{4} \int_{S_{12}} w_2(\vec{r}) dS_{12} + \int_{S_{12}} \frac{\tau c}{4} w_1(\vec{r}) dS_{12} = 0 \tag{17}$$

가 되고, 위 식을 다시 간소화하면

$$\frac{c\tau S_{12}}{4} \widehat{w}_1 - \frac{c}{4} (\alpha_2 S_2 + \alpha_{12} S_{12}) \widehat{w}_2 = 0 \tag{18}$$

가 되며 격벽 내부의 음에너지 손실 없이 모두 투과 되면 $\tau=1$ 이 되어 위의 수식은 식 (2)로 귀결된다. 따라서 확산음향 모델을 이용한 공간평균 음압레벨의 수치해석 결과는 통계적 음향모델과 비교해 볼 수 있다.

3. 커플룸의 음향특성

3.1 수치해석 모델

정상상태조건에서 두 모델을 비교해보고 그 이상의 흡음 조건 및 개구부의 크기에 대한 통계적 음향 모델의 한계를 함께 검토해 보았다.

음향 확산 모델의 각 방의 공간 평균 음압레벨의 차와 식 (5)로 산출된 통계적 음향 해석 모델의 음압레벨 차를 2가지 조건하에 비교하였다.

수치해석에 사용된 공간은 가로 4m, 세로 6m, 높이 3.75m인 직육면체 모양의 2개의 동일한 방이 개구부로 연결된 형상을 갖고 있으며, 하나의 방에 점 음원을 두었다. 음원의 위치는 (2, 3, 1)m이고 파워는 0.01 W(100 dB)이다. 각 방마다 높이 1.8m의 평면상에서 각 경계면에서 1m 떨어져고 간격은 2m인 6개의 수음점을 설정하였다.

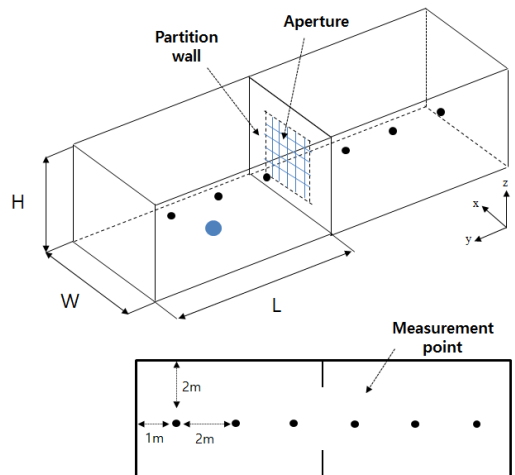


Fig. 2 Geometrical configuration of two coupled rooms connected by an aperture

3.2 개구부 크기에 대한 음향특성

격벽에 $(1 \times 1) \text{ m}^2$, $(2 \times 2) \text{ m}^2$, $(3 \times 3) \text{ m}^2$, $(4 \times 3.75) \text{ m}^2$ 인 4가지 개구부가 있는 경우에 대해 음향 확산모델과 통계적 음향 해석모델을 비교하였다. 이때 각 방의 평균 흡음률은 $\bar{\alpha} = 0.1$ 로 하였다.

Fig. 3에서 보듯이 정상상태 조건에서 각 방의 공간평균 음압레벨은 음향확산 모델이 통계적 음향모델보다 1 dB ~ 2 dB정도 높게 나타났으나 두 모델의 레벨차에 대한 경향은 비슷함을 알 수 있다⁽¹⁶⁾.

또한, 개구부의 크기가 최대가 되면 싱글룸의 형태가 된다. 만일 각 방의 크기 및 평균 흡음률이 같다면 커플룸의 공간평균 음압레벨은 두 방을 합친 크기의 싱글룸의 공간평균 음압레벨과 같아야 한다. 따라서 평균 흡음률을 0.01부터 0.8까지 변경하면서 두 모델을 싱글룸과 비교해 보았다.

3.3 싱글룸과의 비교

정상상태 조건에서의 싱글룸의 공간평균 음에너지밀도는 다음과 같다.

$$\bar{w} = \frac{4P}{c\bar{\alpha}S} \tag{19}$$

- \bar{w} : 싱글룸의 공간평균 음에너지밀도
- P : 싱글룸의 파워
- $\bar{\alpha}, S$: 싱글룸의 흡음률 및 표면적

여기서 커플룸 각 방의 크기 및 평균흡음률이 같고

두 방의 합친 체적이 싱글룸의 체적과 같다면 $A_{11} = A_{22}$, $V_1 = V_2$ 가 되어 커플룸의 공간평균 음에너지 밀도는 다음과 같이 각 방의 음에너지밀도의 산술평균으로 표현된다.

$$\bar{w}_T = \frac{1}{(V_1 + V_2)} \int_{V_1}^{V_2} (\bar{w}_1 + \bar{w}_2) dV = \frac{(\bar{w}_1 + \bar{w}_2)}{2} \tag{20}$$

\bar{w}_T : 커플룸의 공간평균 음에너지밀도

위 식에 식 (3)과 (4)의 음에너지밀도를 대입하면

$$\bar{w}_T = \frac{4P}{2c} \left(\frac{A_{11} + S_{12}}{A_{11}^2 - S_{12}^2} \right) = \frac{1}{2} \frac{4P}{cA_1} \tag{21}$$

가 된다.

식 (21)의 $2A_1$ 은 식 (19)의 $\bar{\alpha}S$ 와 같으므로 커플룸의 공간평균 음에너지밀도는 싱글룸의 공간평균 음에너지밀도와 같게 된다.

Fig. 4는 통계적 음향모델의 싱글룸과 커플룸, 음향확산 모델의 싱글룸과 커플룸의 공간평균 음압레벨을 나타낸 것이다.

4가지 모델의 공간평균 음압레벨은 흡음률이 높을수록 낮게 나타났다. 또한, 식 (19)와 (21)에 의해 통계적 음향 모델의 싱글룸과 커플룸은 평균 음압레벨이 같다. 평균흡음률이 0.01과 0.1에서는 편차가 거의 없고 0.8에서는 커플룸의 음향확산모델이 통계적 음향모델보다 3 dB 정도 낮게 나타났다.

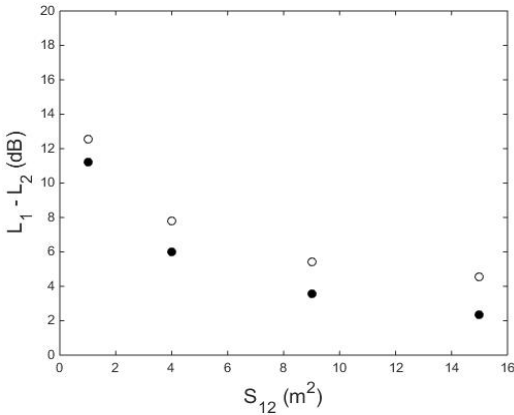


Fig. 3 SPL(sound pressure level) difference of the aperture S_{12} : statistical acoustics model (●) and acoustic diffusion model (○)

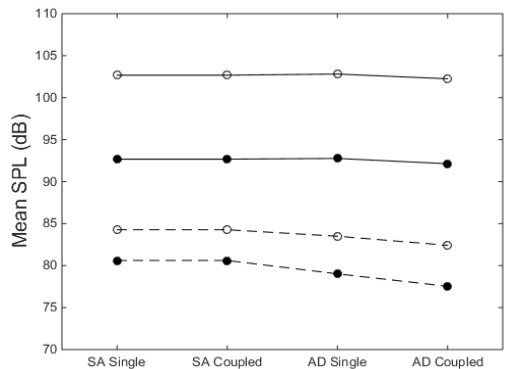


Fig. 4 Mean SPL(sound pressure level) of four models : $\bar{\alpha} = 0.01$ (○), $\bar{\alpha} = 0.1$ (●), $\bar{\alpha} = 0.5$ (⋯), and $\bar{\alpha} = 0.8$ (-·-·)

3.4 흡음률 변화에 대한 음향특성

각 방의 흡음률이 서로 다를 때 두 모델의 정상 상태조건에서의 음압레벨의 차이를 비교하였다. 먼저 격벽의 개구부는 $(2 \times 2) \text{ m}^2$ 으로 하고 $\bar{\alpha}_2 = 0.1$ 일 때 음원이 있는 방의 흡음률 $\bar{\alpha}_1$ 을 0.01, 0.1, 0.5, 0.8로 바꾸어 보았다. 다음에 $\bar{\alpha}_1 = 0.1$ 인 경우 $\bar{\alpha}_2$ 를 0.01, 0.1, 0.5, 0.8로 변화시켰다.

Fig. 5(a)의 경우, 식 (5)의 커플링 인자 k_R 이 수음

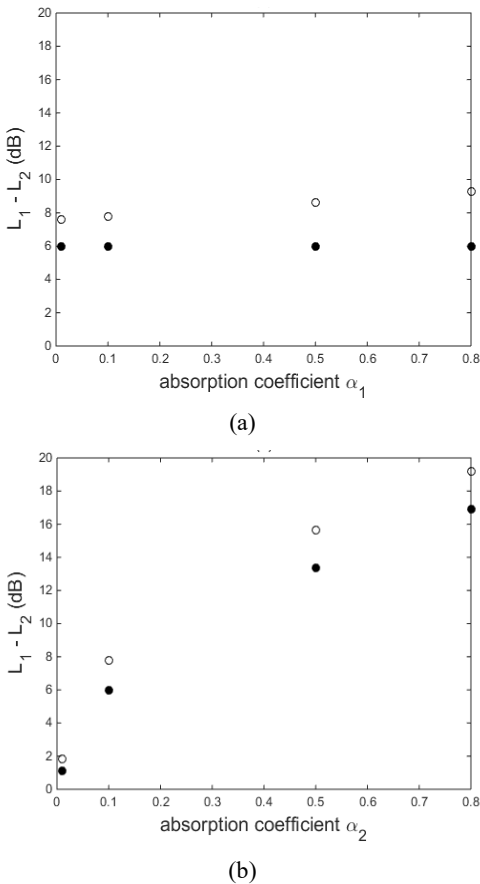


Fig. 5 SPL(sound pressure level) difference of the absorption coefficient : (a) the absorption coefficient of the receiving room is constant($\bar{\alpha}_2 = 0.1$) while the absorption coefficient of the source room varies from 0.01, 0.1, 0.5, 0.8. (b) the absorption coefficient of the source room is constant($\bar{\alpha}_1 = 0.1$) while the absorption coefficient of the receiving room varies from 0.01, 0.1, 0.5, 0.8.; statistical acoustics model (•) and acoustic diffusion model (◦)

실의 흡음률과 관계가 있기 때문에 음원실의 흡음률이 변경되어도 통계적 음향 해석 모델의 음압레벨 차는 일정하다. 음향 확산 모델은 두 방의 흡음률 차이가 커지면 음압레벨의 차도 커지지만 그 차이가 1.6 dB 정도로 크지 않다. Fig. 5(b)의 경우, 두 모델 모두 흡음률 차이가 커질수록 두 방의 음압레벨 차가 커짐을 알 수 있다.

위의 3가지 경우에 대해서 음향확산 모델이 통계적 음향모델과 비슷한 경향의 결과를 보임을 알 수 있었다. 그러나 통계적 음향모델과 달리 음향확산 모델은 흡음률이 높을수록 두 방의 음압레벨이 차이가 커졌다. 따라서 3.4의 조건에서 음향확산 모델에 대해서 위치별 음압레벨분포를 검토해 보았다.

3.5 위치별 음압레벨 분포

Fig. 6(a)의 경우, 음원실의 흡음률을 변화시키면 전체적인 음압레벨이 감소하고 위치별 음압레벨 차이는 비교적 작게 나타나서 일정하게 감소하는 경향을 보였다. 그러나 음원실의 흡음률이 수음실의 흡음률보다 크면 음원에서 멀어질수록 수음점의 음압

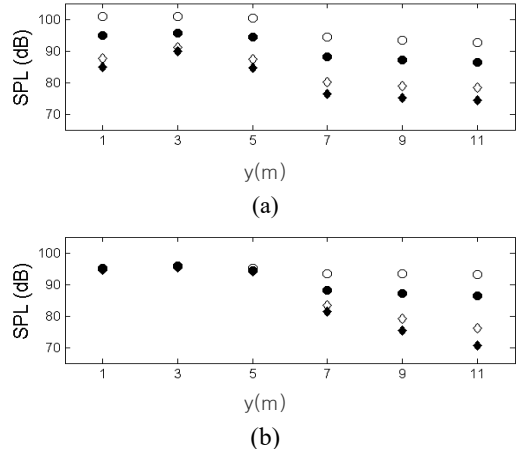


Fig. 6 SPL(sound pressure level) distribution of 6 points : (a) the absorption coefficient of the receiving room is constant($\bar{\alpha}_2 = 0.1$) while the absorption coefficient of the source room varies from 0.01, 0.1, 0.5, 0.8. (b) the absorption coefficient of the source room is constant($\bar{\alpha}_1 = 0.1$) while the absorption coefficient of the receiving room varies from 0.01, 0.1, 0.5, 0.8.; $\bar{\alpha} = 0.01$ (◦), $\bar{\alpha} = 0.1$ (•), $\bar{\alpha} = 0.5$ (◊) and $\bar{\alpha} = 0.8$ (◆)

레벨이 작아지고 각 위치별 음압레벨 차가 커진다. 그리고 음원에 가까운 수음점($y = 3 \text{ m}$)의 음압레벨이 6개의 수음점 중 가장 높게 나타났다. Fig. 6(b)의 경우, 음원실의 음압레벨은 수음실의 흡음률 변화에 상관없이 거의 일정한 값을 가진다. 수음실의 음압레벨은 일정하게 감소하나 음원실의 흡음률이 수음실의 흡음률보다 커지면 음원에서 멀어질수록 감소하는 경향을 보였다.

4. 결 론

격벽에 출입문 등의 개구부를 갖는 인접한 커플룸의 음향 특성을 통계적 음향모델과 음향확산 모델을 이용하여 검토해 보았다.

(1) 두 방의 평균흡음률이 같은 경우에 커플룸을 연결하는 개구부의 크기가 커질수록 음압레벨차는 두 모델에서 모두 작아진다.

(2) 두 방의 크기가 같은 커플룸이 싱글룸의 형태가 되면 커플룸의 공간평균 음압레벨은 싱글룸의 값과 같아져야 하는데 흡음률이 0.8 이상을 제외하고는 두 모델 모두 거의 일정한 값을 가진다. 또한, 통계적음향 모델의 싱글룸과 커플룸은 평균음압레벨이 같다.

(3) 음원실의 흡음률을 변화시키면 두 모델 모두 음압레벨 차는 거의 일정하다. 음원실의 흡음률을 일정하게 유지하고 수음실의 흡음률을 변화시키면 평균 흡음률이 커질수록 두 모델 모두 음압레벨 차는 커진다.

(4) 마지막으로 음향확산 모델을 이용한 위치별 음압레벨은 수음실의 흡음률은 일정하게 유지하고 음원실의 흡음률을 변화시키더라도 전체적으로 일정하게 감소한다. 그러나 음원실의 흡음률이 수음실의 흡음률보다 크면 음원에서 멀어질수록 음압레벨이 작아지고 위치별 음압레벨 차가 커진다. 또한 6개의 수음점 중 음원에 가까운 위치의 수음점의 음압레벨이 가장 높게 나타났다. 반대로 음원실의 흡음률을 일정하게 유지하고 수음실의 흡음률을 변화시키면 흡음률의 변화에 상관없이 음원실의 음압레벨은 거의 일정한 값을 가진다. 또한, 수음실의 음압레벨은 일정하게 감소하나 음원실의 흡음률이 수음실의 흡음률보다 커지면 음원에서 멀어질수록 감소하는 경

향을 보였다.

References

- (1) 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.
- (2) Eyring, C. F., 1931, Reverberation Time Measurements in Coupled Rooms, *Acoust. Soc. Am.*, Vol. 3, No. 2, pp. 181~206.
- (3) Lyle, C. D., 1981, Recommendation for Estimating Reverberation Time in Coupled Spaces, *Acoust. Lett.*, Vol. 5, pp. 35~38.
- (4) Kuttruff, K., 2000, *Room Acoustics*, 4th ed., Elsevier Science Ltd. London and New York.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Jing, Y. and Xiang, N., 2007, A Modified Diffusing Equation for Room-acoustic Prediction, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 121, No. 6, pp. 3284~3287.
- (10) 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.
- (11) Summers, J. E., 2012, Accounting for Delay of Energy Transfer between Coupled Rooms in Statistical-acoustics Models of Reverberant-energy Decay,

J. Acoust. Soc. Am., Vol. 132, No. 2, pp. 129~134.

(12) Smith, P. W., 1979, Statistical Models of Coupled Dynamical Systems and the Transition from Weak to Strong Coupling, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 65, No. 3, pp. 695~698.

(13) Billon, A., Valeau, V. and Sakout, A., 2006, On the Use of a Diffusion Model for Acoustically Coupled Rooms, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 120, No. 4, pp. 2043~2054.

(14) Valeau, V., Picaut, J., Sakout, A. and Billon, A., 2004, Simulation of the Acoustics of Coupled Rooms by Numerical Resolution of a Diffusion Equation, 18th ICA.

(15) 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>

(16) Picaut, J., Billon, A., Valeau, V. and Sakout, A., 2006, Sound Field Modeling in Architectural Acoustics Using a Diffusion Equation, INTER-NOISE Conference.



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.