

# 서로 다른 매질을 갖는 격실사이의 음파전달해석

## An Analysis of the Sound Propagation between Rooms with Different Mediums

김현실<sup>†</sup>, 김재승, 이성현, 서윤호

(Hyun-Sil Kim<sup>†</sup>, Jae-Seung Kim, Seong-Hyun Lee, and Yun-Ho Seo)

한국기계연구원 음향소음팀

(접수일자: 2012년 4월 19일; 채택일자: 2013년 6월 18일)

**초 록:** 본 논문은 인접한 두 격실의 매질이 다를 때 공통 벽을 통한 음파의 전파를 해석한 내용을 다루었다. 통계적 에너지해석법(statistical energy analysis)을 사용하여 두 격실의 음향에너지와 벽의 진동에너지간의 에너지 평형을 고려하였으며 소음원실의 음압이 벽을 투과하는 성분 외에 벽의 구조소음으로 인한 음의 방사(radiation)가 수음원실의 음압에 미치는 영향을 검토하였다. 예제로 선박의 엔진실과 물탱크가 크기  $8.4 \times 4$  m인 강판을 사이에 두고 접한 경우를 해석하였다. 강판의 임계주파수(critical frequency)가 관심주파수대역보다 큰 경우 63 Hz 이하의 저주파수대역을 제외하고 음파의 전달은 강판을 투과하는 성분에 의해 주로 결정되며 강판의 구조소음에 기인한 방사소음은 무시할 정도로 기여도가 작음을 확인하였다.

**핵심용어:** 음향투과계수, 통계적에너지 해석법, 음의 방사, 구조소음

**ABSTRACT:** In this paper, an analysis of sound propagation between two rooms with different mediums is discussed. Statistical energy analysis (SEA) is used to consider energy equilibrium among subsystems associated with the sound pressure levels in two rooms and the vibration level of the wall between rooms. Effect of the sound radiation from the structure-borne noise of the wall on sound pressure level of the receiving room is investigated. For a numerical example, sound propagation between engine room and water tank joined by a steel plate whose size is  $8.4 \times 4$  m, is considered. It is found that when the critical frequency of the plate is above the frequency range of interest, the sound pressure level in the water tank is dominated by sound transmission through the plate, while sound radiation from the structure-borne noise of the plate is negligible except low frequency range below 63 Hz.

**Keywords:** Sound transmission coefficient, Statistical energy analysis, Sound radiation, Structure-borne noise

**PACS numbers:** 43.40. At, 43.55. Rg

### 1. 서 론

서로 인접한 격실에서 공통 벽을 통한 음파의 전달현상은 실음향학(room acoustics)에서 가장 기본적인 문제이며 벽체의 차음성능에 관한 실험실 측정법은 KS F 2808<sup>[1]</sup>과 ISO 10140-2<sup>[2]</sup>에 나와있다. 측로전파(flanking transmission)가 없다고 가정할 경우 수음원실에서 발생하는 음압이 수음원실에 도달하는 경로는 두 가지로 구분되는데 첫 번째는 벽을 투과하

는 경로가 있으며 두 번째는 스피커가 벽을 가진하여 발생한 구조소음(structure-borne noise)이 음의 방사(sound radiation)를 통해 수음원실에 음을 발생하는 경로가 있다. 판넬의 간편한 차음성능예측방법으로 알려진 질량법칙(mass law)<sup>[3]</sup>은 첫 번째 경로에서 주파수가 벽체의 임계주파수(critical frequency)보다 작은 경우에만 적용이 가능하다. Crocker와 Price<sup>[4]</sup>는 통계적에너지 해석법(SEA: Statistical Energy Analysis)<sup>[5]</sup>을 이용하여 두 가지 경로의 기여도를 연구하였으며 임계주파수 부근에서는 구조소음에 의한 음의 방사가 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. Price와 Crocker<sup>[6]</sup>

<sup>†</sup>Corresponding author: Hyun-Sil Kim (hskim@kimm.re.kr)  
Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-343, Republic of Korea  
(Tel:82- 42-868-7461; Fax: 82-42-868-7440)

는 참고문헌 [4]의 내용을 확장하여 중간에 공기층이 있는 이중판넬의 차음성능을 SEA를 이용하여 예측하였다.

건축음향에서는 격실내부 매질이 공기가 아닌 경우를 찾아보기가 어렵지만 선박에서는 엔진실과 물탱크(또는 연료탱크)가 인접하는 경우가 종종 발생한다. 해양조사선이나 함정과 같이 수중소음이 중요한 선박에서는 엔진이나 발전기같은 장비소음이 수중소음에 미치는 영향이 매우 중요한데 Kim 등<sup>[7]</sup>은 엔진실이 선체의외판에 붙어있는 경우 엔진 공기소음이 선체의외판을 통해 수중소음에 미치는 영향을 해석하였다. 선체 외판과 엔진실 사이에 물탱크 또는 연료탱크가 존재하는 경우 먼저 엔진실소음이 강판벽을 투과하여 물탱크 소음에 어떤 영향을 주는지 파악해야 한다.

본 논문에서는 위와 같은 상황을 일반화하여 인접한 두 격실의 매질이 다른 경우 공통 벽체를 통한 음파의 전달을 SEA를 이용하여 해석한 내용을 다루었다. Fahy<sup>[3]</sup>는 무한 평판의 양쪽의 매질이 다른 경우에 대해 평면파입사를 가정하여 해석적으로 판넬의 음향투과계수(sound transmission coefficient)를 유도하였다. Ver<sup>[8]</sup>는 두 격실의 내부음장이 확산음장일 경우 벽에 입사하는 음향파위와 수음실에 형성되는 음향파위의 비로부터 음향투과계수를 유도하였는데 이는 양쪽 격실의 매질이 다른 경우에도 응용이 가능하다. 본 논문에서는 Fay<sup>[3]</sup>의 결과를 SEA 모델에 필요한 계수로 입력하여 벽체의 구조소음으로 인한 음파방사가 수음실 소음에 미치는 영향을 검토하였다. 본 해석에서 중요한 변수는 벽체의 방사효율(radiation efficiency)인데 매질이 기체인 경우는 Maidanic의 식<sup>[4]</sup>을 이용하였고 물인 경우는 Kim 등<sup>[9]</sup>의 식을 이용하였다.

## II. SEA 모델링

Fig. 1과 같이 인접한 두 개의 격실의 매질이 서로 다른 경우 음파의 전달을 해석하기 위해 SEA 모델을 세웠는데 세부요소로 방 1과 2의 음향에너지  $E_1$ ,  $E_3$ 와 중간 벽의 진동에너지  $E_2$ 를 고려하였다.

$$E_1 = \langle p_1^2 \rangle V_1 / \rho_1 c_1^2, \tag{1}$$

$$E_2 = \langle v^2 \rangle Ah \rho_p, \tag{2}$$

$$E_3 = \langle p_2^2 \rangle V_2 / \rho_2 c_2^2. \tag{3}$$

여기서  $\langle p_1^2 \rangle$ ,  $V_1$ ,  $c_1$ ,  $\rho_1$ 과  $\langle p_2^2 \rangle$ ,  $V_2$ ,  $c_2$ ,  $\rho_2$ 는 각각 격실 1과 2의 음압, 체적, 매질의 음속과 밀도이며  $\langle v^2 \rangle$ ,  $A$ ,  $h$ ,  $\rho_p$ 는 중간 벽의 진동레벨, 면적, 두께와 밀도를 나타낸다.  $\langle (\dots)^2 \rangle$ 는 물리적 양의 공간(또는 면적) 및 주파수대역 평균값(mean square level)을 의미한다. Fig. 1에서  $\langle v^2 \rangle$ 는 중간 벽이 방 1의 음향에너지에 의해 강제가진되는 구조소음을 나타낸다. SEA 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$(\eta_1 + \eta_{12} + \eta_{13})E_1 - \eta_{21}E_2 - \eta_{31}E_3 = W_0/\omega, \tag{4}$$

$$-\eta_{12}E_1 + (\eta_2 + \eta_{21} + \eta_{23})E_2 - \eta_{32}E_3 = 0, \tag{5}$$

$$-\eta_{13}E_1 - \eta_{23}E_2 + (\eta_3 + \eta_{31} + \eta_{32})E_3 = 0. \tag{6}$$

여기서  $\eta_i$ 는  $i_{th}$  세부시스템의 손실계수(loss factor),  $\eta_{ij}$ 는  $i_{th}$  세부시스템에서  $j_{th}$  세부시스템으로의 에너지전파와 관련된 결합손실계수(coupling loss factor)를 나타내며  $W_0$ 는 스피커의 음향파위,  $\omega$ 는 주파수이다. 아래첨자  $i$ 에서 1은 격실 1, 2는 벽, 3은 격실 2를 나타내며  $\eta_i$ 와  $\eta_{ij}$ 의 자세한 표현은 참고문헌 [4]에 나와있다. 주의할 점은 참고문헌 [4]에서는 식(7)과 같은 상호법칙(reciprocity principle)이 성립한다고

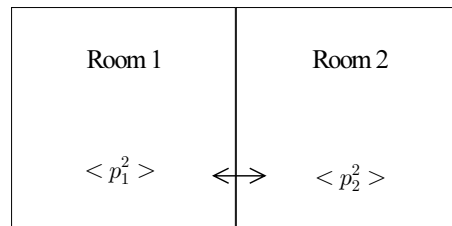


Fig. 1. Sound transmission between two rooms with different mediums.

가정하였으나 이는 직접 연결된 세부시스템 사이에만 성립한다.

$$\eta_{ij}n_i(\omega) = \eta_{ji}n_j(\omega). \quad (7)$$

세부시스템 1과 3은 직접적인 연결이 없으며 상호 법칙은 두 매질의 음속이 동일하지 않으면 다음과 같이 성립하지 않음을 알 수 있다.

$$\frac{\eta_{13}n_1}{\eta_{31}n_3} = \frac{c_2^2}{c_1^2} \neq 1. \quad (8)$$

식(4)-(6)을 정리하면 두 격실의 음압의 비는 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\langle p_2^2 \rangle}{\langle p_1^2 \rangle} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \left( \frac{\rho_2 c_2^2}{\rho_1 c_1^2} \right) \frac{(\eta_{13}B_1 + \eta_{12}\eta_{23})}{\Delta}. \quad (9)$$

여기서

$$B_1 = \eta_2 + \eta_{21} + \eta_{23}, \quad (10)$$

$$B_2 = \eta_3 + \eta_{31} + \eta_{32}, \quad (11)$$

$$\Delta = B_1B_2 - \eta_{23}\eta_{32}. \quad (12)$$

벽의 임계주파수  $f_c$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$f_{ic} = \frac{c_i^2}{2\pi h} \sqrt{12\rho_p(1-\nu^2)/E} \quad (i=1,2). \quad (13)$$

단,  $E$ ,  $\nu$ 는 벽의 탄성계수와 포와송 계수이다. 만일 임계주파수가 관심 주파수대역보다 위에 있다면 식(10)-(12)는 다음과 같이 단순화된다.

$$B_1 \approx \eta_2, \quad (14)$$

$$B_2 \approx \eta_3, \quad (15)$$

$$\Delta \approx \eta_2\eta_3, \quad \eta_{13}\eta_2 \gg \eta_{12}\eta_{23}. \quad (16)$$

또한 식(9)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\langle p_2^2 \rangle}{\langle p_1^2 \rangle} \approx \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \left( \frac{\rho_2 c_2^2}{\rho_1 c_1^2} \right) \left( \frac{\eta_{13}}{\eta_3} \right). \quad (17)$$

식(17)의 물리적 의미를 파악하기 위해 식(6)을 다음과 같이 정리하였다.

$$\begin{aligned} E_3 &= \frac{1}{(\eta_3 + \eta_{31} + \eta_{32})} (\eta_{13}E_1 + \eta_{23}E_2) \\ &= \frac{\eta_{13}}{(\eta_3 + \eta_{31} + \eta_{32})} (1+r)E_1. \end{aligned} \quad (18)$$

식(18)에서  $\eta_{13}E_1$  항은 격실 1의 음압이 판넬을 투과하여 전파하는 항을 나타내며  $\eta_{23}E_2$  항은 판넬의 진동에 의한 음향방사 항을 나타낸다. 무차원 변수  $r$ 은 음향방사에 의한 기여도와 투과에 의한 기여도 비를 나타낸다.

$$r = \left( \frac{\eta_{23}}{\eta_{13}} \right) \left[ \frac{\eta_{12}B_2 + \eta_{13}\eta_{32}}{\Delta} \right]. \quad (19)$$

식(14)-(16)의 단순화가 성립하면  $\eta_{23}E_2$  항을 무시할 수 있으며( $r \ll 1$ ) 식(19)는 다음과 같이 단순화할 수 있고 식(17)로 환원됨을 알 수 있다.

$$E_3 \approx \frac{\eta_{13}}{\eta_3} E_1. \quad (20)$$

$\eta_{13}$ 과  $\eta_3$ 의 정의를 식(17)에 대입하여 정리하면 투과계수  $\tau$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = \frac{\rho_1 c_1 \langle p_2^2 \rangle S_2}{\rho_2 c_2 \langle p_1^2 \rangle A}. \quad (21)$$

식(21)의 의미에 대해 Ver<sup>[8]</sup>에 의하면 다음과 같은 해석이 가능하다. 격실 1의 인텐시티는  $\langle p_1^2 \rangle / 4\rho_1 c_1$ 이

면적  $A$  인 벽에 입사하는 음향파워는  $A < p_1^2 > / 4\rho_1 c_1$  가 된다. 벽의 구조소음으로 인한 음의 방사는 무시할 때 격실 2에 전달되는 음향파워는  $S_2 < p_2^2 > / 4\rho_2 c_2$  로 두 음향파워의 비가 전달계수이며 식(21)과 같다. 식(21)의 양변에  $\log$ 를 취하면 다음과 같이 된다.

$$TL = 10\log\left(\frac{1}{\tau}\right) = L_1 - L_2 + 10\log\left(\frac{A}{S_2}\right) + 10\log\left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}\right). \quad (22)$$

단,  $L_1, L_2$ 는 격실 1과 2의 음압이며 매질이 같다면 식(22)의 마지막 항은 사라지고 기존 식으로 환원된다.

그러나 임계주파수가 관심 주파수대역내에 있다면 식(14)-(16)의 가정은 성립하지 않으며 판넬의 구조소음으로 인한 음의 방사도 무시할 수 없는 기여도를 갖는다. 식(19)에서  $r$ 은 방사효율 제공 항을 포함하는데 방사효율은 주파수가 커질수록 증가하며 임계주파수에서 가장 큰 값을 갖는다. 본 논문에서는 공기 중 방사효율 값은 Maidanic<sup>[4]</sup>의 식을 사용하였고 수중에서의 방사효율 값은 Kim 등<sup>[9]</sup>의 식을 사용하였다. 본 논문에서 고려한 방사효율 값은 유한한 판에 대해서 유도된 값인데 참고문헌 [8]의 무한 판의 방사효율 공식은 임계주파수 이상에만 정의되며 유한한 판의 공식과 같다. 임계주파수 이하에서 무한 판의 음의 방사는 제로인데 이는 본 논문의 식(14)-(16)의 가정과 일치하며 식(19)에서  $r = 0$ 임을 의미한다.

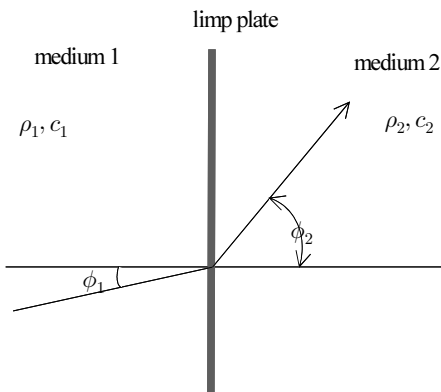


Fig. 2. Transmission of an obliquely incident sound wave through an unbounded plate.

### III. 음향투과계수

Fig. 2처럼 매질 1과 2가 무한 판으로 구분되고 매질 1에서 평면파가 입사할 경우 투과계수  $\tau$ 는 다음과 같이 주어진다.<sup>[3]</sup>

$$\tau = \frac{|p_2|^2 / \rho_2 c_2}{|p_1|^2 / \rho_1 c_1} = \frac{4|\tilde{z}_{wf2}|^2 \cos\phi_2 \left(\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}\right)}{|\tilde{z}_{wf1} + \tilde{z}_{wf2} + \tilde{z}_{wp}|^2 \cos\phi_1}. \quad (23)$$

여기서  $\phi_2$ 는 Snell의 법칙  $\sin\phi_1/c_1 = \sin\phi_2/c_2$ 에서 결정된다. 매질 1과 2의 임피던스와 판의 임피던스는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\tilde{z}_{wf1} = \rho_1 c_1 / \cos\phi_1, \quad (24)$$

$$\tilde{z}_{wf2} = \rho_2 c_2 / \cos\phi_2, \quad (25)$$

$$\tilde{z}_{wp} = -\frac{j}{\omega} (Dk_1^4 \sin^4\phi_1 - m\omega^2) + \frac{1}{\omega} Dk_1^4 \sin^4\phi_1 \eta_2. \quad (26)$$

단,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ ,  $m = \rho_p h$ ,  $k_1 = \omega/c_1$ .

음파의 입사각도는  $\sin\phi_1 \leq c_1/c_2$ 에 의해 제한된다. 매질 1과 2가 각각 공기와 물이라면  $c_1 = 340 \text{ m/s}$ ,  $c_2 = 1500 \text{ m/s}$ 라고 할 때 임계각도는  $\phi_c = 13.1^\circ$ 로 주어지며 이보다 큰 각도로 입사하는 음파는 에너지전파가 불가능하다.

### IV. 예제해석

예제로 선박에서 엔진실과 물탱크가 강판을 사이에 두고 연결된 경우를 고려하였으며 강판 벽을 제외하고 다른 소음전파경로는 없다고 가정한다. 엔진실의 크기는  $8.4 \times 14 \times 4 \text{ m}$ , 물탱크의 크기는  $8.4 \times 2 \times 4 \text{ m}$ 이며 중간 벽의 크기는  $8.4 \times 4 \text{ m}$ 이며 두께는  $1 \text{ mm}$ 와  $5 \text{ mm}$  두 가지를 고려하였다. 강판의 댐핑값은  $0.05$ 를 가정하였다. 두께  $1 \text{ mm}$  또는  $5 \text{ mm}$  강판의 경우 식(26)에서 강판의 탄성이 임피던스에 미치는 영향은 무시할 수 있으며<sup>[7]</sup> 식(26)은 림프 판

으로 가정할 수 있다.

$$\tilde{z}_{wp} \approx jm\omega. \tag{27}$$

음파의 전달률은 입사각도에 대해 적분해야 되나 여기에서는 수직입사시 값에서 5 dB를 빼준 값을 사용하였다.<sup>[7]</sup>

Table 1과 2에는 두께 1 mm와 5 mm인 경우에 대해 식(16)의  $\eta_2\eta_3/\Delta$ ,  $\eta_{12}\eta_{23}/\eta_{13}\eta_2$ 와 식(19)의  $r$ , 식(9)의 두 격실 음압의 비,  $\langle p_2^2 \rangle / \langle p_1^2 \rangle$ 를 나타냈다. 두께가 1 mm인 강판의 임계주파수는 공기와 수중에서 각각  $f_c^{air}=11,700$  Hz,  $f_c^{water}=228,000$  Hz이며 주파수가

커질수록 식(16)의 가정과  $r \ll 1$ 의 관계가 성립함을 알 수 있다. 그러나 두께 5 mm의 강판은 임계주파수가 각각  $f_c^{air}=2,340$  Hz,  $f_c^{water}=45,600$  Hz이며 주파수가 커질수록  $r$ 이 감소하는 경향은 두께 1 mm 경우에 비해 둔화됨을 볼 수 있다. 식(19)의  $r$ 이 작을수록 벽체 구조소음에 기인한 음향방사는 벽체를 통한 음의 투과보다 기여도가 작다는 것을 의미한다. STL을 측정하는 ISO 잔향실 측정법<sup>[2]</sup>은 100 Hz 이상에서 측정하도록 되어있으며 모드 개수로 볼 때 SEA 적용 하한주파수는 대략 125 Hz가 된다. Figs. 3과 4에는 각각 강판의 두께가 1 mm와 5 mm인 경우에 대해  $r$ 값과  $10\log(\langle p_2^2 \rangle / \langle p_1^2 \rangle)$ 을 비교하였다.

Table 1. Coefficients in Eqs. (16) and (19), and ratio of sound pressure levels in Eq. (9) when  $h=1$  mm ( $f_c^{air}=11,700$  Hz,  $f_c^{water}=228,000$  Hz).

Hz	$\frac{\eta_2\eta_3}{\Delta}$	$\frac{\eta_{12}\eta_{23}}{\eta_{13}\eta_2}$	$r$	$\frac{\langle p_2^2 \rangle}{\langle p_1^2 \rangle}$
31.5	6.2E-03	3.3E+00	3.3E+00	4.0E-03
63	1.5E-02	8.6E-01	8.7E-01	4.1E-03
125	3.4E-02	2.4E-01	2.5E-01	6.3E-03
250	7.7E-02	7.0E-02	7.7E-02	1.2E-02
500	1.7E-01	2.1E-02	2.6E-02	2.5E-02
1000	3.2E-01	6.5E-03	1.0E-02	4.8E-02
2000	5.2E-01	2.2E-03	4.2E-03	7.8E-02
4000	7.2E-01	8.7E-04	1.9E-03	1.1E-01
8000	8.6E-01	6.9E-04	1.1E-03	1.2E-01

Table 2. Coefficients in Eqs. (16) and (19), and ratio of sound pressure levels in Eq. (9) when  $h=5$  mm ( $f_c^{air}=2,340$  Hz,  $f_c^{water}=45,600$  Hz).

Hz	$\frac{\eta_2\eta_3}{\Delta}$	$\frac{\eta_{12}\eta_{23}}{\eta_{13}\eta_2}$	$r$	$\frac{\langle p_2^2 \rangle}{\langle p_1^2 \rangle}$
31.5	9.3E-03	5.0E+00	5.0E+00	8.3E-03
63	2.2E-02	1.3E+00	1.3E+00	7.6E-03
125	5.0E-02	3.8E-01	4.1E-01	1.0E-02
250	1.1E-01	1.2E-01	1.4E-01	1.9E-02
500	2.3E-01	4.0E-02	5.6E-02	3.5E-02
1000	4.0E-01	1.8E-02	2.8E-02	6.1E-02
2000	6.1E-01	3.4E-02	3.9E-02	8.6E-02
4000	7.7E-01	8.6E-02	8.7E-02	8.8E-02
8000	8.7E-01	3.9E-02	3.9E-02	5.0E-02

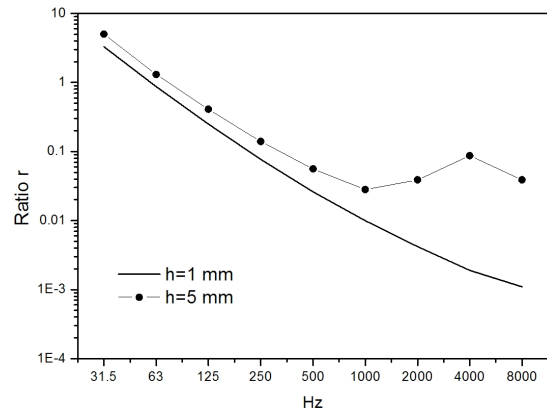


Fig. 3. Value of  $r$  in Eq. (19) representing the ratio between acoustic energy by radiation of the plate and the one by direct transmission through the plate.

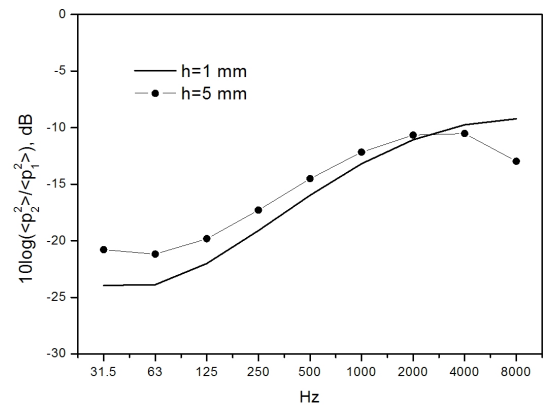


Fig. 4. Ratio of sound pressure levels between rooms when  $h=1$  mm and 5 mm.

## V. 검토 및 결론

벽체의 임계주파수가 관심주파수대역에 비해 큰 경우, 주파수가 커질수록 수음원실의 음압은 주로 벽체를 투과하는 성분에 의해 결정되며 벽체 구조소음에 기인한 방사소음은 영향이 무시할 정도로 작아짐을 확인하였다. 이는 두 격실의 매질과 관계없이 성립하는 현상으로 벽체의 음향투과공식은 기존의 공기 중 벽체의 음향투과공식에 두 격실의 임피던스비를 고려한 항만큼 차이가 남을 보였다. 그러나 확산음장가정이 성립하지 않은 저주파수대역이나 벽체의 임계주파수가 관심주파수대역 안에 있는 경우 벽체 구조소음에 기인한 방사소음은 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.

## 감사의 글

본 논문은 2013년도 한국기계연구원 임무형 사업과제의 지원을 받아 수행한 연구과제 결과 중 일부이다.

## References

1. KS F 2808:2011, *Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements*.
2. ISO 10140-2:2010, *Acoustics - Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements, Part 2: Measurement of Airborne Sound Insulation*.
3. F. Fahy, *Sound and Structural Vibration* (Academic Press, San Diego, 1985), pp. 155-157.
4. M. J. Crocker and A. J. Price, "Sound transmission using statistical energy analysis," *J. Sound Vib.* **9**, 469-486 (1969).
5. R. H. Lyon and R. G. DeJong, *Theory and Application of Statistical Energy Analysis*, 2<sup>nd</sup> Ed. (Butterworth-Heinemann, Boston, 1995), pp. 117-134.
6. A. J. Price and M. J. Crocker, "Sound transmission through double panels using statistical energy analysis," *J. Acoust. Soc. Am.* **47**, 683-693 (1970).
7. Hyun-Sil Kim, Jae-Seung Kim, Bong-Ki Kim, Sang-Ryul Kim, and Seong-Hyun Lee, "Effect of airborne noise from ship machinery on underwater noise" (in Korean), *J. Soc. Naval Archit. Kr.* **48**, 569-574 (2011).
8. I. L. Ver, "Interaction of sound waves with solid structures," in *Noise and Vibration Control Engineering*, edited by I.L. Ver and L. L. Beranek, 2<sup>nd</sup> Ed. (John Wiley & Sons Inc., New

Jersey, 2006), pp. 117-134.

9. Hyun-Sil Kim, Jae-Seung Kim, Bong-Ki Kim, Sang-Ryul Kim, and Seong-Hyun Lee, "An analysis of radiation efficiency of the simply supported rectangular plate in water with consideration of low order cross modes" (in Korean), *Trans. Kor. Soc. Noise Vib. Eng.* **22**, 800-807 (2012).

## 저자 약력

### ▶ 김 현 실(Hyun-Sil Kim)



1980년: 서울대학교 기계공학과 학사  
1982년: KAIST 기계공학과 석사  
1989년: Georgia Tech 기계공학과 박사  
1991년 ~ 현재: 한국기계연구원 책임연구원

### ▶ 김 재 승(Jae-Seung Kim)



1976년: 서울대학교 조선공학과 학사  
1980년: 서울대학교 조선공학과 석사  
1984년: MIT Ocean Engineering 박사  
1984년 ~ 현재: 한국기계연구원 책임연구원

### ▶ 이 성 현(Seong-Hyun Lee)



1999년: KAIST 기계공학과 학사  
2006년: KAIST 기계공학과 박사  
2009년: 삼성물산 건설부문  
2010년 ~ 현재: 한국기계연구원 선임연구원

### ▶ 서 윤 호(Yun-Ho Seo)



2003년: 연세대학교 기계공학과 학사  
2009년: KAIST 기계공학과 박사  
2012년: 현대중공업 기술개발본부  
2012년 ~ 현재: 한국기계연구원 선임연구원