

< 논 문 >

이중판의 차음손실(I) : 중공 이중판

Sound Transmission Loss of Double Panels(I) : A Double Wall with Air Cavity

강 현 주* · 김 현 실* · 김 재 승* · 김 상 렬*

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

(1997년 5월 22일 접수 ; 1997년 7월 14일 심사완료)

Key Words : Sound Transmission Loss(차음 손실), Double Panels(이중판), Incidence Angle(입사각), Diffuse Sound Field(확산 음장)

ABSTRACT

This paper shows the feasibility of the suggestion that the angle distribution of incident sound to panels might be Gaussian, instead of the conventional uniform distribution in the analysis of transmission loss of panels. To prove the suggestion, the problems with the diffuse sound field in a reverberation room are examined by case studies and the comparison of the prediction with the measurement of sound transmission loss of walls are performed. The results of the comparison show good agreement between the two values.

1. 서 론

공기소음 전파를 방지하는 대표적인 방음재로서 차음판은 도로, 건축물 및 교통수단 등에서 광범위하게 사용되고 있다. 차음판의 성능을 높이기 위한 효과적인 방법으로서 이중 혹은 다중판을 이용한 구조물들이 있으며, 그 예로서 이중창, 다중벽, 문짝 등을 들 수 있다.

차음판의 성능 예측에 관한 연구는 첫째로, 1950년대 London⁽¹⁾에 의해서 해석 모델이 제시된 이후로 수 많은 연구가 수행되어 왔다. 해석 방법으로서 London⁽¹⁾의 파동방정식을 이용한 고전적 방법과 파동방정식에 근거를 두고 다중판의 해석을 편리하게 하기위한 전달행렬법등이 있다. 둘째로, Crocker⁽²⁾등에 의한 통계적 에너지 해석법을 이용한 방법이 있다. 그러나 이 방법은 기본적으로 음파

와 판 사이에서 공진이 발생하는 고주파수 대역만 해석 가능하기 때문에 차음판의 성능해석 보다는 실내의 음압 산정에 주안점을 둔 것이다. 셋째로, 유한판을 모델로 하여 모드해석법을 이용한 연구⁽³⁾도 많이 수행되고 있다.

파동 모델과 판의 임피던스(wave impedance)에 기초한 고전적 해석 모델은 크게 세가지의 가정이 있는데 첫째는 음파를 평면파(plane wave)로 보는 것이며 둘째로, 판을 무한판으로 간주하고 있고 셋째로, 실내의 음장을 확산음장(diffuse sound field)으로 가정하는 것이다. 이러한 가정들 중에서 첫 번째와 두 번째의 가정은 소음원과의 거리 및 잔향실의 요건, 주요 관심주파수 대역의 파장과 판의 칫수의 비교등으로 부터 타당성이 있다고 보여진다. 그러나 세 번째의 가정은 입사각의 영향이 비교적 둔감한 단일판에서는 큰 문제가 없지만, 다중판의 경우에는 중간층과 판의 상호작용 때문에 입사각 특히, 수평입사(grazing incidence)에 수직적으로 매우 민감한 영향을 보이게 되므로 이에 대한 자세한

* 정희원, 한국기계연구원 음향연구그룹

연구가 필요하다고 생각한다.

따라서 본 연구에서는 전보⁽⁴⁾의 유리창에 대한 차음성능 해석법에서 처음 시도하였던 것으로서 입사각에 따른 음의 분포를 Gauss 분포로 가정하는 것에 관한 배경으로서 확산음장 및 실제 현상에 대한 고찰과 더불어 일반 이중판에 대한 예측 및 계측치의 비교를 통하여 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 이중판의 차음해석

London⁽¹⁾의 해석 모델은 다중판의 해석을 위한 기본 모델이 되고 있지만 이 모델에는 중간층이 공기층이 아닐 경우, 즉 파수가 복소수이며, 중간층의 거리 d 가 무한대로 가는 경우에는 수학적으로 불완전하며, 또한 계측치와의 오차를 줄이기 위하여 판의 임피던스 산정시 보정계수를 두고 있는 약점이 있다.

본 논문에서는 해석모델로서 파동모델을 근거로 하여 다음과 같은 정식화 과정⁽⁵⁾을 수행한다.

이중판에 대한 해석 모델이 Fig. 1에 보이고 있다. 여기서, P_1, P_2, P_3 는 각 경계면 전후에서의 음압, ξ_1, ξ_2 는 각 판의 변위를 의미한다. 시간항을 생략한 각 영역에서의 음압은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} P_{(1)}(x, y) &= P_i e^{-j(k_x x + k_y y)} + P_r e^{j(k_x x - k_y y)} \\ P_{(2)}(x, y) &= A e^{-j(k_x x + k_y y)} + B e^{j(k_x x - k_y y)} \\ P_{(3)}(x, y) &= P_t e^{-j(k_x x + k_y y)} \end{aligned} \quad (1)$$

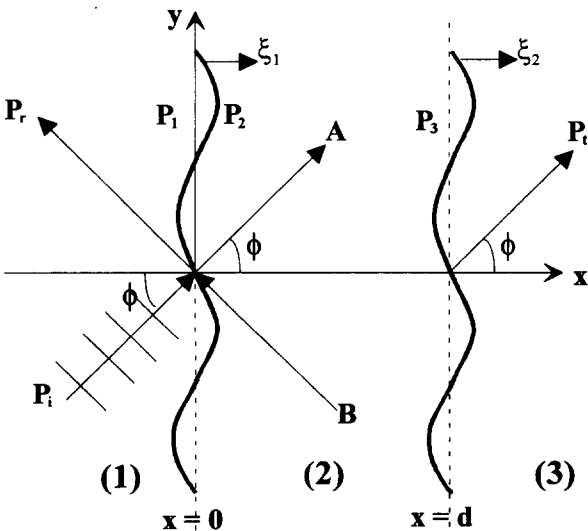


Fig. 1 The analytical model of an unbounded double panel.

여기서 $k = \omega/c$: 파수, ω = 각진동수, c = 음속을 나타낸다. 또한 각 파수 사이의 관계는 다음식으로 주어진다.

$$k_x = k \cos \phi, \quad k_y = k \sin \phi \quad (2)$$

유체입자 속도와 음압과의 관계는 Euler 방정식 ($\rho_0 \frac{\partial U_x}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x}$)에 의하여 결정되며, 영역 (2)에서 x 방향의 유체입자속도는 다음과 같다.

$$U_x = \frac{\cos \phi}{\rho_0 c} [A e^{-j(k_x x + k_y y)} - B e^{j(k_x x - k_y y)}] \quad (3)$$

단, ρ_0 = 공기의 밀도

첫 번째 경계조건으로서 경계면에서의 음압은 다음과 같다.

$$P_2 = A + B, \quad \text{at } x = 0 \quad (4)$$

$$P_3 = A e^{-jk_x d} + B e^{jk_x d}, \quad \text{at } x = d$$

두 번째 경계조건으로서 경계면에서 수직방향($\phi = 0^\circ$)의 유체입자 속도 = 판의 속도(u_p), 즉 $u_p (= j\omega \xi_1) = U_x$ 가 되며 각 경계면에서의 판의 속도는 다음과 같다.

$$j\omega \xi_1 = \frac{(A - B)}{\rho_0 c \sec \phi}, \quad \text{at } x = 0 \quad (5)$$

$$j\omega \xi_2 = \frac{(A e^{-jk_x d} + B e^{jk_x d})}{\rho_0 c \sec \phi}, \quad \text{at } x = d$$

한편 각판의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$j\omega \xi_1 Z_1 = P_1 - P_2$$

$$j\omega \xi_2 Z_2 = P_3 - P_t \quad (6)$$

단, Z_1, Z_2 ; 각 판의 임피던스

또한, P_1, P_t 는 다음식으로 표현되며,

$$P_1 = 2P_i - j\omega \rho_0 c \sec \phi \xi_1 \quad (7)$$

$$P_t = j\omega \rho_0 c \sec \phi \xi_2 \quad (8)$$

이상의 식들을 이용하여 투과음압과 입사음압의 진폭비를 구하면 다음과 같으며, 참고문헌 (5)에는 약간의 오류가 있는 것으로 보인다.

$$\frac{P_t}{P_i} = -\frac{2j(\rho_0 c \sec \phi)^2 \sin(kd \cos \phi)}{Z_{11} Z_{22} \sin^2(kd \cos \phi) + (\rho_0 c \sec \phi)^2} \quad (9)$$

단, $Z_{11,2} = Z_{1,2} + \rho_0 c \sec \phi [1 - j \cot(kd \cos \phi)]$

여기서 $Z_{11,2}$ 는 판의 음향 임피던스를 의미한다.

한편 $kd \cos \phi \ll 1$ 인 경우, 즉 저주파수 영역인 경우에 식 (9)는 다음과 같이 근사화되며,

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{-2j(\rho_0 c \sec \phi)^2 / (kd \cos \phi)}{[Z_1 + \frac{\rho_0 c}{\cos \phi} - \frac{j\rho_0 c}{kd \cos^2 \phi}]}$$

(10)

$$\times [Z_2 + \frac{\rho_0 c}{\cos \phi} - \frac{j\rho_0 c}{kd \cos^2 \phi}] + [\frac{\rho_0 c}{kd \cos^2 \phi}]^2$$

또한 수직입사이면 식 (10)은 식 (11)이 된다.

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{-2j(\rho_0 c)^2 / (kd)}{[Z_1 + \rho_0 c - \frac{j\rho_0 c}{kd}]}$$

(11)

$$\times [Z_2 + \rho_0 c - \frac{j\rho_0 c}{kd}] + (\frac{\rho_0 c}{kd})^2$$

정의에 의하여, 투과계수, τ 및 전달손실(Transmission Loss, TL)은 다음과 같다.

$$\tau \equiv \left| \frac{P_t}{P_i} \right|^2$$

(12)

$$TL = 10 \log (1/\tau)$$

(13)

2.2 판의 임피던스

보통 평판의 임피던스는 다음 식⁽⁶⁾과 같이 각 성분들의 직렬 및 병렬의 합으로 구성된다.

$$Z = Z_M + Z_k + \frac{Z_B Z_s}{Z_B + Z_s}$$

(14)

각 성분들은 식 (15)로 표현되며, 각각의 의미는 Z_M 은 판의 면밀도에 대한 영향으로서 차음성능에 가장 중요한 영향을 끼치며, Z_B 는 굽힘모멘트에 대한 항이고, Z_k 는 단순지지된 유한판의 효과로서 강성에 대한 영향을 나타내기 위한 것이다. Z_s 는 Mindlin판

이론에 근거한 것으로서 전단변형의 영향을 나타내고 있다.

$$Z_M = j\omega m, \quad Z_k = \frac{-j\pi^4 D}{\omega} (\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2})^2,$$

$$Z_B = -\frac{j\omega^3 D \sin^4 \phi}{c^4}, \quad Z_s = \frac{-jGh\omega \sin^2 \phi}{c^2}$$

(15)

여기서, m = 면밀도 (kg/m^2), $D = B(1+j\eta)$ 로서 B =굽힘강성 (Nm^2/m), η =판의 손실계수, 또한 G =전단계수 (Pa), a, b, h =판의 폭과 길이 및 두께 (m)를 표시한다.

Fig. 2에는 강판에 대한 예로서 각 임피던스 성분들의 주파수별 영향을 보여 주고 있는데, 차음성능의 주요 관심 주파수 대역이 100 Hz ~ 4,000 Hz 임을 감안하면, Z_k (Fig. 2의 점선)는 약 40 Hz 까지 영향을 주고 있으나 거의 무시할 수준이며, Z_M 은 대략 1 kHz 까지 주요성분이 되고 있으며, 1 kHz 근처에서 Z_M 과 Z_B 과 교차하고 있다. 1 kHz 이상에서는 Z_B 가 주성분이 되고 있다. Z_s 의 경우는 여기서는 나타나고 있지 않지만 후판 ($\lambda_B \leq 6h$, λ_B = 굽힘파장) 혹은 고주파수 대역에서는 그 기여도가 커지게 된다. 따라서 보통의 경우는 Z_M 과 Z_B 만을 포함하여 다음과 같이 근사화 한다.

$$Z \cong Z_M + Z_B = j(\omega m - \frac{\omega^3 D \sin^4 \phi}{c^4})$$

(16)

식 (16)에서 Z_M 만을 고려했을 때의 차음성능 계산식을 질량법칙(mass law)이라 하며, 다음식으로 표현된다.

$$TL = 20 \log(m) + 20 \log(f) - 47, \text{ dB}$$

(17)

차음성능의 예측이나 계측시 나타나는 현상으로서 특정 주파수 대역에서 골(dip)이 발생하여 차음성능이 식 (17)의 질량법칙 이하로 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향을 보이는 주파수는 여러 가지가 있지만 대표적인 것으로서 다음의 두 경우를 들 수 있다. 첫째로서, 임계주파수(critical frequency, f_c)는 식 (16)으로 부터 Z 의 허수부가 0이 되는 경우로서 다음식으로 표현되며,

$$f_\omega = \frac{c^2}{2\pi \sin^2 \phi} \sqrt{\frac{m}{B}}$$

(18)

f_ω 들 중에서 첫 번째 발생하는 주파수를 임계주파수, f_c 라고 하며, 이것은 다음과 같다.

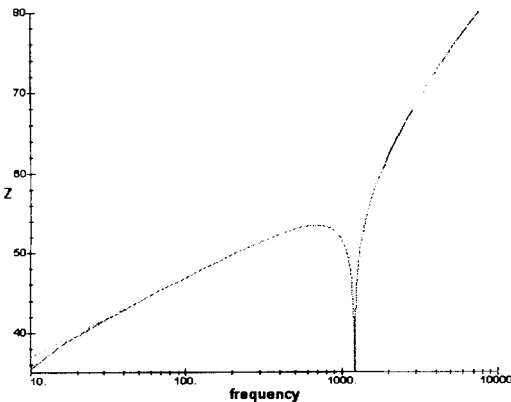


Fig. 2 Impedance of a steel panel : $h = 10$ mm.

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \quad (19)$$

두 번째로 Mass-air-mass 공진주파수, f_0 이며 식 (9) 이나 식 (10)에서 분모가 0이 될 때이다. 식 (10)으로부터 유도되는 Mass-air-mass 공진주파수는 경사 입사인 경우는

$$f_{0,i} = \frac{1}{2\pi \cos \phi} \left(\frac{\rho_0 c^2}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)^{1/2} \quad (20)$$

이 되며, 수직 입사인 경우에는 다음식이 된다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\rho_0 c^2}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)^{1/2} \quad (21)$$

3. 입사각의 영향

3.1 평균 투과계수, τ_{avg}

식 (12)에서 정의된 투과계수는 주파수와 입사각의 함수로서 평균 투과계수를 구하기 위해서는 주파수와 입사각에 대한 적분을 수행해야 한다.

먼저 각도에 대한 평균을 고려하여 입사각을 Fig. 3과 같이 정의한다. 입사하는 음파가 완전한 확산음장(diffuse field)으로 가정하여 모든 각도에서 동일한 확률로 입사하는 것으로 간주하면, 입체각(solid angle)에 대한 평균투과계수, τ_d 는 반구적분 형태로서 다음식으로 표현한다.

$$\begin{aligned} \tau_d(f) &= \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \tau(f, \theta, \phi) \sin \phi \cos \phi \, d\phi \, d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \phi \cos \phi \, d\phi \, d\theta} \\ &= \int_0^{\pi/2} \tau(f, \phi) \sin 2\phi \, d\phi \end{aligned} \quad (22)$$

한편, 이방성판(orthotropic plate)인 경우 투과계

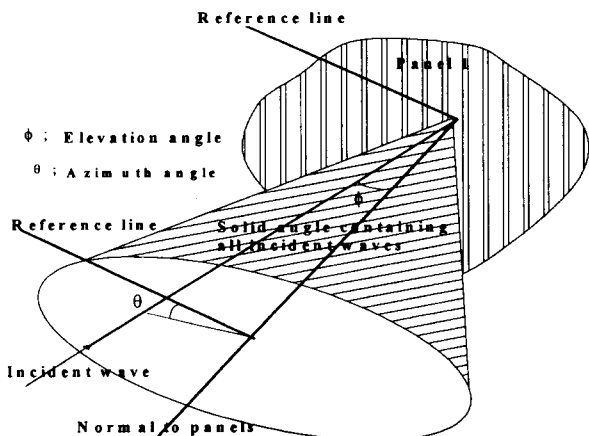


Fig. 3 Angle definition.

수는 θ 와 ϕ 모두에 종속되지만, 등방성판(isotropic plate)일 때의 투과계수는 ϕ 만의 함수가 되며 식 (22)의 두 번째식과 같이 된다.

다음으로 주파수에 대한 평균을 포함하면 임의의 주파수 대역폭에 대한 평균투과계수, τ_{avg} 는

$$\tau_{avg} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} \tau_d(f) \, df}{f_2 - f_1} \quad (23)$$

이 된다. 여기서 f_1 과 f_2 는 보통 1/3 옥타브 밴드의 상·하한 주파수를 의미한다.

3.2 입사각과 차음성능

Fig. 4는 이중창에 대하여 식 (9)등을 이용하여, 차음손실(TL)을 구한 계산치와 예측치를 보여주고 있다. 여기서 Random은 랜덤입사($0 \leq \phi \leq \pi/2$)를 의미하며, Normal은 수직입사만을 고려한 경우이다.

Fig. 4의 결과로서 랜덤입사를 고려한 예측치는 예측치에 비하여 전체적으로 약 10 dB 이하의 낮은 값을 보이고 있으며, 심지어 질량법칙에 의한 계산 결과 보다는 오차가 크다. 또한 수직입사만을 고려한 경우는 식 (11)에 의한 18 dB/oct가 되는 경향 때문에 높은 값을 보이고 있다. 이러한 현상으로부터 이중창의 차음손실 계산에 있어서 입사각의 영향

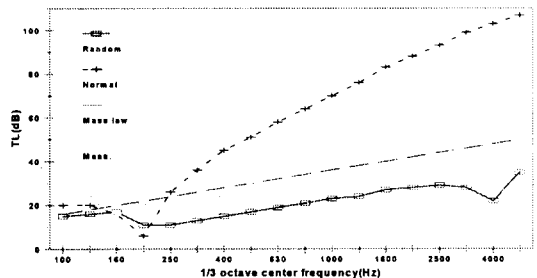


Fig. 4 Comparison of the predicted and measured TL for a double glass window.

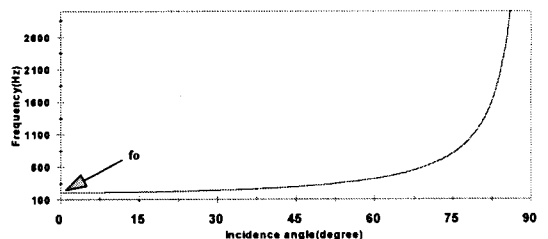


Fig. 5 Mass-air-mass resonance frequency vs incidence angle.

이 매우 크다는 것을 알 수 있으며, 주요 원인은 식 (21)에서 언급한 mass-air-mass 공진주파수, f_0 로 인한 공진효과가 과도하게 나타나기 때문이다.

Fig. 5와 식 (20)에서 보는 것처럼 대상 주파수 f 가 $f > f_0$ 인 모든 주파수 대역에 걸쳐서 f_0 가 발생하게 되며, 공기층에서의 흡음효과등 감쇠의 영향이 무시된다면, $f=f_0$ 에서의 차음손실은 0이 된다. 따라서 식 (23)의 주파수 평균값은 작아지게 된다. 이러한 문제점에 대한 해결책으로서, 지금까지의 거의 모든 연구가들이 공통적으로 취한 방법은 경험적인 생각으로 수평입사에 기인한 영향을 배제하기 위하여, 입체각(solid angle)에 제한을 주는 방법을 택하였다. Beranek⁽⁷⁾은 단일판에 관한 질량법칙을 유도할 때에 예측치와 실제 계측치 사이의 오차를 줄이기 위하여 Field 입사 개념(즉, $0^\circ \leq \phi \leq 78^\circ$)을 도입하여 식 (17)을 제한하였고, Mulholland⁽⁸⁾등은 입사각에 따른 음장모드 밀도의 변화에 대한 실험결과로부터 수평입사하는 모드는 없다고 간주하여 입사각을 $0^\circ \leq \phi \leq 82^\circ$ 로 가정하였다. 또한 Byrne⁽⁹⁾역시 판의 흡·차음 계산 결과와 계측치의 비교를 통하여 $0^\circ \leq \phi \leq 80^\circ$ 를 사용하였다. 이러한 경험적 방법들은 단일판에서는 f_0 가 발생하지 않으므로 계산상으로 큰 영향은 없다. 그러나 이중판의 경우는 Fig. 6 및 식 (24)에서 보는 바와 같이 적분한계를 인위적으로 제한하는 경우, ϕ_{lim} 이상에서 발생하는 f_0 의 영향을 배제하기 때문에 많은 차이를 보이고 있다.

$$\tau_d(f) = \int_0^{\phi_{lim}} \tau(f, \phi) \sin 2\phi \, d\phi \quad (24)$$

단, ϕ_{lim} ; 한계각

즉, Fig. 6에서 보면 ϕ_{lim} 가 $90^\circ \sim 85^\circ$ 까지는 비슷하지만 ϕ_{lim} 가 80° 이하에서는 커다란 차이를 보이고 있다. 더욱이 이러한 차이는 차음판의 종류나

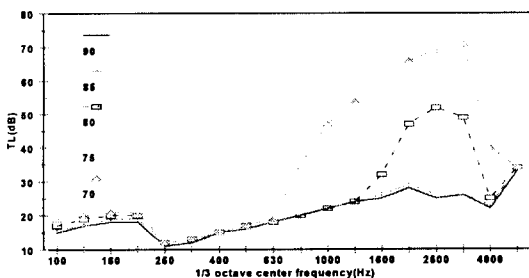


Fig. 6 Variations of TL due to limiting angles

구조에 따라서 각기 다른 차이를 보일 수 있기 때문에 경험적 방법으로 일관된 ϕ_{lim} 를 정의하기는 사실상 불가능하다.

3.3 확산음장 및 입사음압의 분포

전 절에서 나타난 오차들은 근본적으로 입사음장이 확산음장(diffuse field)이란 가정 때문에 발생하고 있다. 이 가정은 수식화에는 매우 편리하지만 실제적으로는 구현하기 어려운 가정이다.

여기서 이 가정의 모순점을 알아보기 위해서 확산음장의 개념과 실제 잔향실의 현상을 살펴본다. 확산음장을 만족하는 조건을 개략적으로 살펴보면 다음과 같다.

- (i) 실내의 모든 위치에서 음압이 동일.
- (ii) 실내의 모든 위치 및 방향에서 음의 강도 (sound intensity)가 동일.
- (iii) 실내의 임의 지점에 유입되는 음선(sound ray)들 사이의 위상은 랜덤.

조건 (i)과 (ii)에 대한 척도로서는 f_{sch} (schroeder cutoff frequency)⁽¹⁰⁾등이 있으며, 실제 잔향실에서는 확산판(diffuser)을 이용하여 어느 정도까지의 조건은 충족시키고 있다. 그러나 실내의 경계면에 대하여 조건 (iii)를 만족시키기에는 다음의 이유들로 인하여 실현이 어렵다.

경계면에서의 입사 및 반사파의 간섭효과 : Waterhouse⁽¹³⁾에 의해서 밝혀진 것으로서(실내의 음압 측정시 벽면에서 1 m 이상 떨어져야 하는 조항에 대한 근거) 실내의 경계면, 즉 음파의 파장과 비교될 만한 반사면에서의 음 에너지 분포는 균일 분포가 아니라 입사 및 반사파의 간섭형태(Interference patterns)에 따라서 그 분포 형태가 결정되게 된다. 즉 Fig. 7에서 보는 바와 같이 경계면에서의 음 에너지는 일정하지 않으며, 이로 인하여 경계면에서

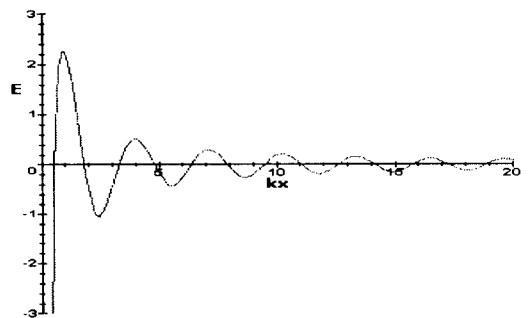


Fig. 7 Distribution of sound energy in front of a rigid wall: $E = \log(E(kx)/E(\infty))$.

의 음선(sound ray)들 사이의 위상은 랜덤이 아니고 전적으로 입사 및 반사파의 간섭형태에 따라서 결정된다.

터널 효과(Tunnelling effect) : 한편, 잔향실에서 시편의 차음성능 측정은 소음원실과 수음실 사이의 공동벽의 개구부에서 수행하게 된다. 보통 공동벽은 높은 차음성능을 보장하기 위해서 두꺼운 이중벽 구조를 두기 때문에 개구부의 후레임(Frame : 시편을 적재하는 구조) 역시 상당한 폭(300 ~ 500 mm 정도)을 갖게 된다. 따라서 시편에 입사하는 음파는 후레임의 형상 및 후레임상의 시편의 위치에 따라서 소위 터널효과(일종의 덕트음장)가 발생하게 되고, 이 음장모드가 차음성능에 영향을 끼치게 된다.

이러한 영향에 대하여, Guy⁽¹²⁾, 및 Halliwell⁽¹³⁾ 등이 실험적 연구를 수행하였다. Guy⁽¹²⁾의 연구 결과로서 Fig. 8에서는 시편의 위치에 따른 차음성능의 영향을 보여주고 있으며, 특히 중·고주파수 대역에서 뚜렷한 차이를 보이고 있다.

3.4 입사음압에 대한 Gauss 분포 가정

전 절에서 언급하였듯이 소음원실을 완전한 확산음장으로 가정하여 모든 각도에서 동일한 확률로 음이 시편에 입사하는 경우, 입사각에 대한 음선의 분포는 균일분포(uniform distribution)가 되겠지만, 전 절의 이유들 때문에 균일분포로 보기는 어렵다. 따라서 입사음압에 대한 분포를 물리적으로 가능성이 있는 분포로서 Gauss 분포(Gaussian distribution)로 가정하는 것이 바람직하다. 두가지 분포에 대한 그림이 Fig. 9에 보이고 있다. 이러한 가정이 갖는 의미는 다음과 같다.

(i) 수직입사에 가중치를 두고, 수평입사(Grazing incidence)의 가중치를 줄임으로서 Mass-air-mass 공진 주파수의 과도한 영향을 감소시킬 수 있다. 이것은 Sewell⁽³⁾이 언급한 것으로서 입사각에 대한 유한판의 방사효율은 입사각이 커질 수록 감소한다는

주장과도 일치하고 있다.

(ii) 인위적으로 입사각을 제한하는 것보다는 이런 분포를 가정하는 것이 좀더 합리적이라고 생각한다. 그 이유로서 Field 입사각은 단지 보정계수의 의미일 뿐 뚜렷한 근거를 갖고 있는 것은 아니며, 음선(sound ray)이 잔향실에서의 거동을 고려할 때, 수직 입사와 수평입사의 가능성을 동일하게 보는 것은 무리가 있다고 생각한다.

입사음압의 분포를 Gauss 분포로 가정했을 때 식 (22)는 다음과 같이 된다.

$$\tau_a(f) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} e^{-\alpha\phi^2} \tau(f, \theta, \phi) \sin\phi \cos\phi d\phi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} e^{-\alpha\phi^2} \sin\phi \cos\phi d\phi d\theta}$$

단, $\alpha = \text{Coeff. of Gauss distribution}$ (24)

4. 계산 예

3.4절의 가정의 타당성을 조사하기 위하여 여러 가지 판에 대한 차음성능의 예측치와 계측치와의 비교를 수행하였다. Table 1에는 계산에 사용된 주요 물성치들이 수록되어 있다. 그리고 식 (24)에서의 $\alpha = 1.5$ 로 가정하였다.

단일판의 차음성능 : 단일판의 차음 예측에서 입사각의 영향은 공기의 특성 임피던스가 $\sec\phi$ 만큼 증가하는 것과 식 (18)의 일치주파수, f_{∞} 에 대한 것이다. Fig. 10에는 강판에 대한 계측 및 예측치에 대한 비교를 보이고 있다. 비교 결과는 질량법칙이 지배하는 주파수 영역에서 약 2 dB의 오차와

Table 1 Material properties of specimens

Name	ρ (kg/m ³)	E(N/m ²)	ν	η
Steel	7800	2.1e11	0.3	0.1
Alumi.	2700	7.0e10	0.34	0.2

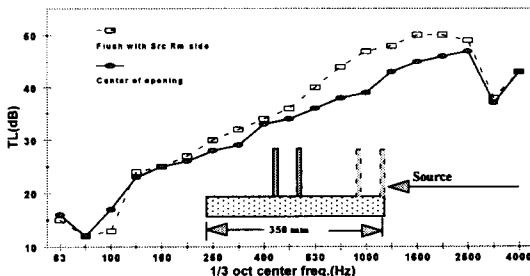


Fig. 8 The difference of TL due to the positions of specimens on the frame.

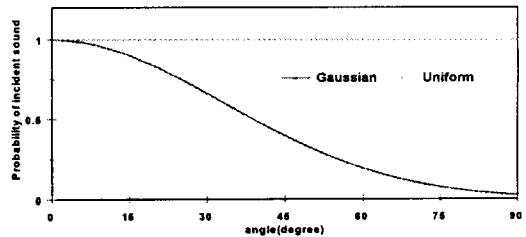


Fig. 9 Probability distributions of incident sounds.

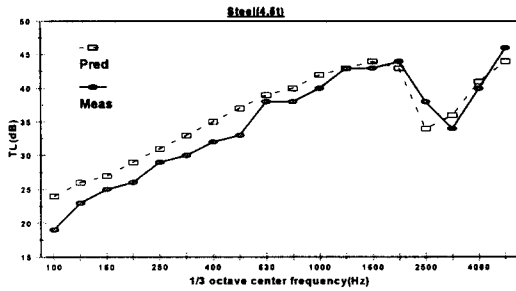


Fig. 10 Comparison of predicted and measured values.

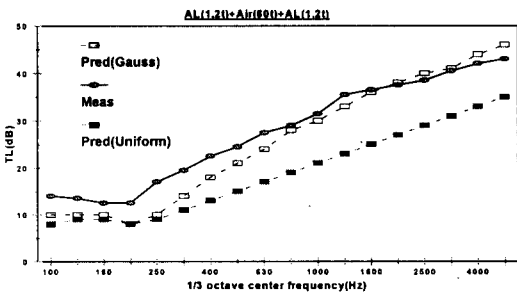


Fig. 11 Comparison of predicted and measured values.

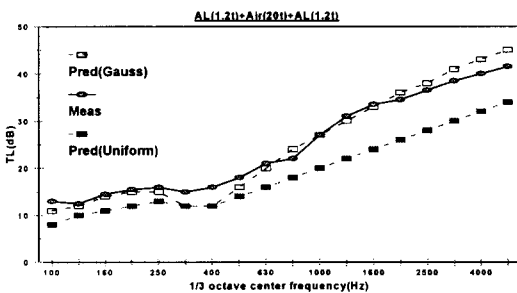


Fig. 12 Comparison of predicted and measured values.

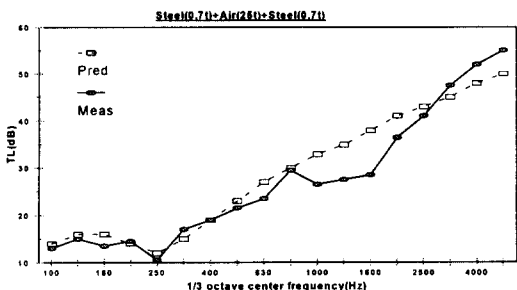


Fig. 13 Comparison of predicted and measured values.

f_c 가 발생하는 주파수가 약간의 차이를 보이고 있지만, 전체적인 비교 결과는 양호한 편이다.

이중판의 차음성능 : 이중판의 차음 예측에서 입사각은 단일판의 경우에서처럼 일치주파수, f_∞ 와 더불어 이중판의 특성인 식 (21)의 mass-air-mass 공진주파수, f_0 에 영향을 주게되며, 앞에서 언급한 대로 f_0 의 영향이 가장 크다. 식 (9),(10),(11)에 의하면 $f = f_0$ 일 때, 감쇠를 무시하면 차음성능은 0이 된다. 실제적인 감쇠를 고려하기 위하여, $f = f_0$ 일 때 각 판의 거동이 강체 거동이므로 시편의 경계면과 후레임상이 마찰 및 공기층의 밀봉효과 등에 따른 감쇠효과^(14,15)를 η_B 로 정의하고, 이를 표현하기 위한 수단으로서 유효질량의 개념을 도입하여 다음식으로 표시한다.

$$m' = m(1 - j\eta_B) \quad (25)$$

본 계산에서는 $\eta_B = 0.2$ 로 간주하였다.

Fig. 11 및 12에는 알루미늄 이중판에 대한 계측 및 예측치에 대한 비교를 보이고 있다. 비교 결과는 f_0 가 발생하는 주파수 대역에서 약 3 dB의 오차를 보이고 있다. 이러한 차이는 좀더 정확히 η_B 값이 산정된다면 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 13에는 이중철판에 대한 계측 및 예측치에 대한 비교를 보이고 있다. 특이한 비교 결과는 주파수 대역(1 kHz ~ 2 kHz)에서 약 5 dB의 오차를 보이고 있다. 이것은 샌드위치판에서 표면재와 중심재의 굽힘강성이 매우 적을 때 흔히 발생하는 양쪽판의 대칭모드(dilatational mode)에 기인하는 것으로 추측된다.

5. 결 론

본 연구는 이중판의 차음 해석 모델을 설정하기 위한 목적으로, 이중판의 차음 해석에서 가장 근본적인 문제가 되는 입사각에 대한 문제를 고찰하였고 이에 대한 해결책으로서 입사각의 분포를 Gauss 분포로 가정하였으며, 이 가정의 타당성을 살펴보기 위하여, 해석모델의 확산음장 가정에 대한 문제점을 고찰하였고, 이중판에 대한 예측 및 계측치의 비교를 수행하였다.

입사각의 분포를 현재 까지 사용되고 있는 균일 분포 모델 보다는 Gauss 분포 모델로 가정하는 것이 실제의 물리적 현상과 일치하는 것으로 생각되며, 이 가정의 장점은 수직입사에 가중치를 두고, 수평입사의 가중치를 줄임으로서 Mass-air-mass

공진 주파수의 과도한 영향을 감소시킬 수 있다.

또한 이러한 해석 모델은 비단 차음문제 뿐만 아니라 흡음성능의 해석에도 직접적으로 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) A. London, 1950, "Transmission of Reverberant Sound through Double Walls", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 22, pp. 270~279.
- (2) M. J. Crocker and A. J. Price, 1989, "Sound Transmission Using Statistical Energy Analysis", J. Sound and Vib. Vol. 9, pp. 663~693.
- (3) E.C. Sewell, 1970, "Transmission of Reverberant Sound through a Single-leaf Partition Surrounded by an Infinite Rigid Baffle", J. Sound and Vib. Vol. 12, pp. 21~32.
- (4) 김현실, 강현주, 김재승, 1994, "다중 유리창의 음향 투과손실에 관한 연구", 한국소음진동공학회, '94 추계학술대회, pp. 128~131.
- (5) F. Fahy, 1985, *Sound and Structural Vibration : Radiation, Transmission and Response*, Academic Press, chap. 4.
- (6) B.H. Sharp, 1973, "A Study of Techniques to Increase the Sound Insulation of Building Elements", Report No. WR 73-5, WYLE Laboratory.
- (7) L.L. Beranek, 1971, *Noise and Vibration control*, McGraw-Hill, Inc., chap. 11.
- (8) K.A. Mulholland, H.D. Parbrook and A. Cummings, 1987, "The Transmission Loss of Double Panels", J. Sound Vib. Vol. 6, pp. 324~334.
- (9) K.P. Byrne, 1989, "Calculating the Acoustical Properties of Plane Uniform Constructions", J. Vib., Acous., Stress, and Reliability in Design, Vol. 111, pp. 343~350.
- (10) M.R. Schroeder and K.H. Kuttruff, 1962, "On Frequency Response Curves in Rooms: Comparision of Expermental, Theoretical, and Monte Carlo Results for the Average Frequency Spacing between Maxima", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 34, pp. 76~80.
- (11) R.V. Waterhouse, 1955, "Interference Patterns in Reverberant Sound Fields", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 27, pp. 247~258.
- (12) R.W. Guy and P. Sauer, 1984, "The Influence of Sills and Reveals on Sound Transmission Loss", Applied Acoustics, Vol. 17, pp. 453~476.
- (13) R.E. Halliwell and A.C.C. Warnock, 1985, "Sound Transmission Loss : Comparision of Conventional Techniques with Sound Intensity Techniques", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 77, pp. 2094~2110.
- (14) W.A. Utley and B.L. Fletcher, 1973, "The Effect of Edge Conditions on the Sound Insulation of Double Windows", J. Sound and Vib. Vol. 26, pp. 63~72.
- (15) M. Heckl, 1981, "The Tenth Sir Richard Fairey Memorial Lecture: Sound Transmission in Buildings", J. Sound and Vib. Vol. 77, pp. 165~189.