

이중판의 차음손실

⁰강현주*, 김현실*, 김재승*, 김상렬*

Sound Transmission Loss of Double Walls

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

ABSTRACT

This paper presents the feasibility of the assumption that incident sound to panels might have a Gaussian distribution, instead of the well-known uniform distribution in the analysis of sound transmission loss of panels. Being compared with the latter, it seems that the former is physically more concrete. To prove the assumption, the problems with diffuse fields in reverberation room are considered by case study and comparisons of the prediction with the measurement of sound transmission loss of walls are performed. The results 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, 도어등을 들 수 있다.

한편, 이러한 차음판의 성능 예측에 관한 연구는 1950년대 London⁽¹⁾에 의해서 해석 모델이 제시된 이후로 수 많은 연구가 수행되어 왔다. 해석 방법 으로서는 London⁽¹⁾이 파동방정식을 이용한 고전적 방법과 이 방법에 근거를 두고 다중판의 해석을 편리하게 하기위한 전달행렬법등이 있으며, 또한 Crocker⁽²⁾등이 통계적 에너지 해석법을 이용한 방법이 있으나 이 방법은 차음판의 성능해석 보다는 실내의 음압 산정에 주안점을 둔 것이다.

파동 모델과 판의 음향 임피던스(Wave impedance)에 기초한 고전적 해석 모델은 크게 세 가지의 가정이 있는 데 첫째는 음파를 평면파

(Plane wave)로 보는 것이며 둘째로, 판을 무한판으로 간주하고 있고, 세 번째로, 실내의 음장을 확산음장(Diffuse field)으로 가정하는 것이다. 이러한 가정들 중에서 첫 번째와 두 번째의 가정은 소음원과 판의 거리 및 잔향실의 요건, 주요 판심주파수 대역의 파장과 판의 칫수의 비교등으로 부터 타당성이 있다고 생각한다. 그러나 세 번째의 가정은 입사각의 영향이 비교적 둔감한 단일판에서는 큰 문제가 없지만, 다중판의 경우에는 중간 공기층과 판의 상호작용 때문에 입사각 특히, 면입사(Grazing incidence)에 수직적으로 매우 민감하게 되므로 철저한 검증이 필요하다고 생각한다.

따라서 본 연구에서는 전보⁽³⁾의 유리창에 대한 차음성능 해석법에서 제안 하였던 입사음의 각도에 대한 분포를 Gauss 분포라는 가정에 관하여 실제 현상에 대한 고찰과 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 중간층이 공기층이 아닐

* 한국기계연구원 구조시스템연구부

경우, 즉 파수가 복소수이며, 중간층의 거리, d 가 무한대로 가는 경우에는 수학적으로 불완전하며, 또한 판의 임피던스 산정시, 보정계수 성격의 계수를 두고 있는 약점이 있다. 본 논문에서는 해석모델로서 파동모델을 근거로 하여 다음과 같은 정식화 과정⁽⁴⁾을 수행한다.

Fig. 1과 같이 평면파가 첫 번째 판에 경사 입사하는 경우의 정식화 과정은 다음과 같다.

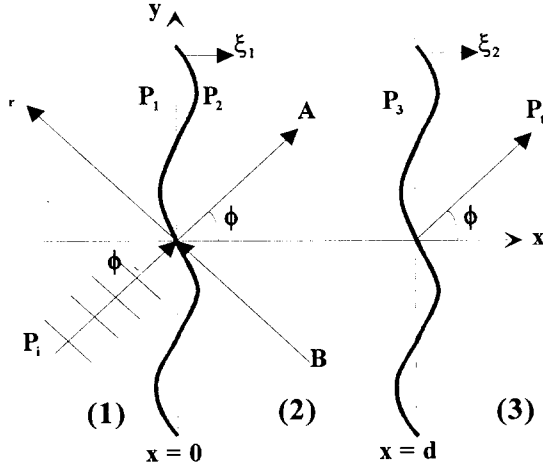


Fig.1 Transmission of obliquely incident sound through an unbounded double panel

Fig. 1에서 P_1, P_2, P_3 는 각 경계면 전후에서의 음압을 나타내며, 시간항을 생략한 각 영역에서의 음압은 다음과 같이 주어진다.

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

여기서, $k = \frac{\omega}{c}$; 파수, $\omega =$ 각진동수, $c =$ 음속을 나타낸다. 또한 각 파수 사이의 관계는 다음식으로 주어진다.

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

그리고 유체입자 속도와 음압과의 관계는 Euler 방정식 ($\rho_0 \frac{\partial U_x}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x}$)으로 부터 유도되며, 영역 (2)의 경우, 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, $\rho_0 =$ 공기의 밀도

경계조건으로서, y 에 관한 항을 생략하면 경계면에서의 음압은 다음과 같다.

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

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

또한 경계면에서 유체입자 속도와 판의 속도가 같다고 가정할 수 있고, 즉 $u_p = j\omega \xi_1 = U$ 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,

$$P_1 = 2P_i - j\omega \rho_0 c \sec \phi \xi_1 \quad (7, 8)$$

$$P_t = j\omega \rho_0 c \sec \phi \xi_2$$

이상의 식들을 이용하여 투과음압과 입사음압의 진폭비를 구하면 다음과 같다.

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

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

여기서, $kd \cos \phi \ll 1$ 인 경우, 즉 저주파수 영역인 경우에 (9)식은 다음과 같이 근사화 되며,

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{-2j(\rho_0 c \sec \phi)^2 / (kd \cos \phi)}{[Z_1 + \frac{\rho_0 c}{\cos \phi} - \frac{j\rho_0 c}{kd \cos^2 \phi}] \times [Z_2 + \frac{\rho_0 c}{\cos \phi} - \frac{j\rho_0 c}{kd \cos^2 \phi}] + [\frac{\rho_0 c}{kd \cos^2 \phi}]^2} \quad (10)$$

또한 수직입사인 경우, 즉 $\phi = 0$ 이면 (10)식은 (11)식이 되며 투과계수, τ 및 전달손실 (Transmission Loss, TL)의 정의는 다음과 같다.

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{-2j(\rho_0 c)^2/(kd)}{[Z_1 + \rho_0 c - \frac{j\rho_0 c}{kd}]} \quad (11)$$

$$\tau \equiv \left| \frac{P_t}{P_i} \right|^2 \quad (12)$$

$$TL = 10 \log (1/\tau) \quad (13)$$

2.2 판의 임피던스

보통 평판의 임피던스는 다음식⁽⁵⁾과 같이 각 성분들이 직렬 및 병렬로 구성된다.

$$Z = Z_M + Z_k + \frac{Z_B Z_s}{Z_B + Z_s} \quad (14)$$

각 성분들은 (15)식으로 표시되며, 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 효과⁽⁵⁾로서 강성에 대한 영향을 나타내기 위한 것이다. Z_s 는 Mindlin판 이론에 근거한 것으로서 전단 변형의 영향을 나타내고 있다.

$$Z_M = j\omega m$$

$$Z_B = -\frac{j\omega^3 D \sin^4 \phi}{c^4} \quad (15)$$

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

$$Z_s = -\frac{jGh\omega \sin^2 \phi}{c^2}$$

단, $m = \text{surface density}(\text{kg}/\text{m}^2)$

$$D = B(1 + j\eta)$$

$$B = \text{Bending stiffness}(\text{Nm}^2/\text{m}),$$

$$\eta = \text{Loss factor of the panel}$$

$$a, b = \text{Dimensions of the panel}(m)$$

$$G = \text{Shear modulus}(Pa)$$

$$h = \text{Panel thickness}(m)$$

Fig. 2에는 강판에 대한 예로서 각 임피던스 성분들의 주파수별 영향을 보여 주고 있는데, 차음성

능의 주요 관심 주파수 대역이 100 Hz - 4,000 Hz 임을 감안하면, Z_k 는 약 40Hz 까지 영향이 보이고 있으나 거의 무시할 수준이며, Z_M 은 대략 1k Hz 까지 주요성분이 되고 있으며, 1 kHz 근처에서 Z_M 과 Z_B 과 교차하고 있다. 1 kHz 이상에서는 Z_B 성분이 주를 이루고 있다. Z_s 의 경우는 여기서는 나타나고 있지 않지만 후판($\lambda_B \leq 6h$, $\lambda_B = \text{굽힘파장}$)이며, 고주파수 대역에서는 중요하게 된다.

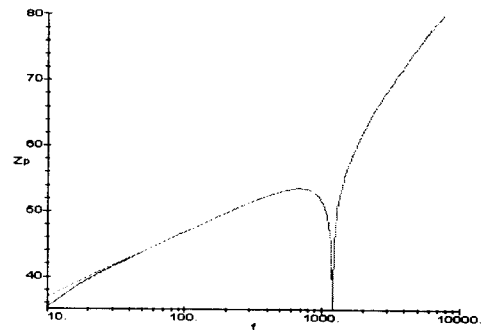


Fig. 2 Impedance of steel panel : $h = 10 \text{ mm}$

보통 차음판의 경우는 Z_M 과 Z_B 만을 포함하여도 무방하므로 다음과 같이 주어진다.

$$Z = Z_M + Z_B = j(\omega m - \frac{\omega^3 D \sin^4 \phi}{c^4}) \quad (16)$$

(16)식에서 판의 임피던스로서, Z_M 만을 고려했을 때의 차음성능 계산식을 질량법칙(Mass law)이라 하며, 다음식으로 표현된다.

$$TL = 20 \log(m) + 20 \log(f) - 47, \text{ dB} \quad (17)$$

(17)식은 면밀도가 2배 혹은 주파수가 한 옥타브 증가할 때마다 차음성능이 6 dB씩 증가됨을 의미한다.

한편, 차음성능의 예측이나 계측시 나타나는 현상으로서 특정 주파수 대역에서 골(dip)이 발생하여 차음성능이 (17)식의 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)⁽⁴⁾는 (16)식으로부터 다음식이 유도되며,

$$f_{co} = \frac{c^2}{2\pi \sin^2 \phi} \sqrt{\frac{m}{B}} \quad (18)$$

f_{co} 들 중에서 첫 번째 발생하는 주파수를 임계주파수, f_c 라고 하며, 이것은 다음과 같다.

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

두 번째로 Mass-air-mass 공진주파수, $f_o^{(4)}$ 이며 (9)식 혹은 (10)식에서 분모가 0이 될 때이다. (10)식으로부터 유도되는 Mass-air-mass 공진주파수는 경사입사인 경우는

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

이 되며, 수직입사인 경우에는 다음식이 된다.

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

3. 입사각의 영향

3.1 평균 투과계수, τ_{avg}

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

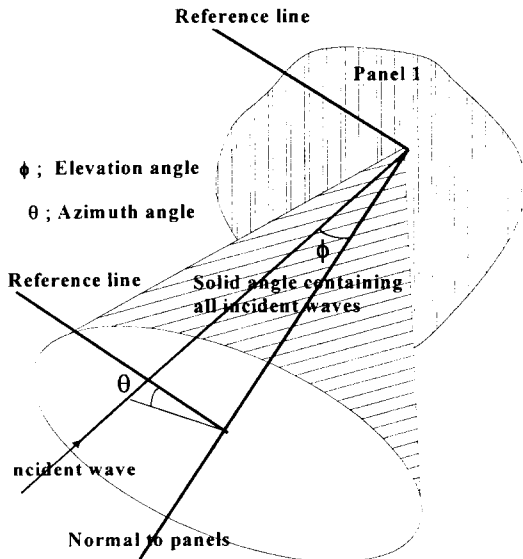


Fig. 3 Angle definition

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), θ 와 ϕ 의 적분범위는 $0 \leq \theta \leq 2\pi$, $0 \leq \phi \leq \pi/2$ 이 된다. 따라서 각도에 대한 평균투과계수, τ_d (d=diffuse field)는 반구적분형태로서 다음 식으로 표현한다.

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

$$= \int_0^{\pi/2} \tau(f, \phi) \sin 2\phi \, d\phi$$

한편, 이방성판(Orthotropic plate)인 경우 투과계수는 θ 와 ϕ 모두에 종속되지만, 등방성판(Isotropic plate)일 때의, 투과계수는 ϕ 만의 함수가 되므로 따라서 (22)식의 두 번째식 처럼 쓸 수 있다.

다음으로 주파수에 대한 평균을 포함하면 임의의 중심주파수 f 에 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 상하한 주파수를 의미한다.

3.2 입사각과 차음성능

Fig. 4는 이중창에 대하여 (9)식등을 이용하여, 차음손실(TL)을 구한 계산치와 측정치를 보여주고 있다.

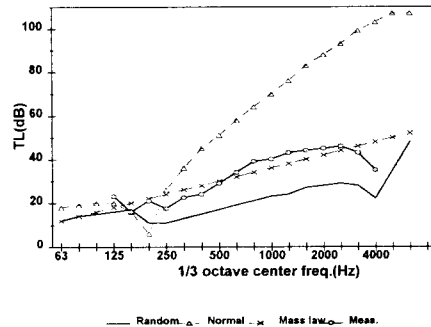


Fig. 4 Comparison of the predicted and measured TL for a double glass window

여기서 Random은 랜덤입사를 의미하며, (22)식

의 적분구간을 $0 \leq \phi \leq \pi/2$ 로 설정한 경우이고, Normal은 수직입사만을 고려한 경우이다.

Fig. 4의 결과로서 랜덤입사를 고려한 예측치는 계측치에 비하여 전체적으로 약 10 dB 이하의 낮은 값을 보이고 있으며, 심지어 질량법칙에 의한 계산결과 보다도 정확도가 더 떨어지고 있다. 또한 수직입사만을 고려한 경우는 (11)식에 의한 18 dB/oct가 되는 경향 때문에 과장되게 나타나고 있다. 이러한 현상으로부터 이중판의 차음손실 계산에 있어서 입사각의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과를 야기하는 원인들 중 가장 중요한 것이 (21)식에서 언급한 Mass-air-mass 공진주파수, f_0 의 영향이 과도하게 나타나기 때문이다.

Fig. 5에서 보는 것처럼 수직상으로는 대상 주파수 f 가 $f > f_0$ 인 모든 주파수 대역에 걸쳐서 f_0 가 발생하게 되며, 공기층에서의 흡음효과등 감쇠의 영향이 무시된다면 이 주파수에서의 차음손실은 0이 된다. 따라서 (23)식의 주파수 평균값은 작아지게 된다.

이러한 문제점에 대한 해결책으로서, 지금까지의 거의 모든 연구가들이 공통적으로 취한 방법은 경험 혹은 직관적인 생각으로 입체각(Solid angle)에 제한을 주는 수단을 강구하였다.

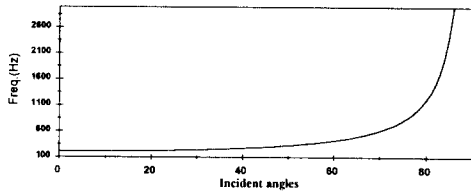


Fig. 5 Mass-air-mass resonance frequency vs incidence angle

Beranek⁽⁶⁾은 단일판에 관한 질량법칙을 유도할 때에 랜덤입사하는 경우의 예측치와 실제 계측치 사이의 오차를 줄이기 위하여 Field 입사 개념(즉, $0^\circ \leq \phi \leq 78^\circ$)을 도입하여 (17)식을 제안하였고, Mulholland⁽⁷⁾등은 입사각에 따른 음장모드 밀도의 변화에 대한 실험결과로부터 면입사(Grazing incidence)하는 모드는 없다고 간주하여 입사각을 $0^\circ \leq \phi \leq 82^\circ$ 로 제안하였다. 또한 Byrne⁽⁸⁾역시 판의 흡/차음 계산 결과와 계측치의 비교를 통하

여 $0^\circ \leq \phi \leq 80^\circ$ 를 제안하였다. 이러한 경험적 방법들은 단일판의 계산에서는 f_0 가 없으므로 별다른 차이를 보이지 않는다.

그러나 다중판의 경우는 Fig. 6 및 (24)식에서 보는 바와 같이 적분한계를 인위적으로 제한하는 경우, ϕ_{lim} 이상에서 발생하는 f_0 의 영향을 배제하기 때문에 많은 차이를 보일 수 있다.

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

단, ϕ_{lim} ; 한계각

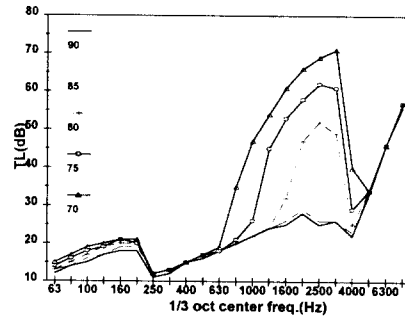


Fig. 6 Variations of TL due to limiting angles

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

3.3 확산음장 및 입사음압의 분포

전절에서 나타난 오차들은 근본적으로 입사음장이 완전한 확산음장(Diffuse field)이란 가정에 발생하고 있다. 이 가정은 수학적으로는 매우 편리하지만 실제적으로는 구의 형태가 아니면 구현하기 어려운 가정이다.

여기서 이 가정의 모순점을 알아보기 위해서 확산음장의 개념과 실제 잔향실의 현상을 살펴본다. 확산음장(Diffuse field)을 만족하는 조건은 개략적으로 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)⁽⁹⁾ 등이 있으며, 실제 잔향실에서는 확산판(diffuser)을 이용하여 어느 정도까지의 조건은 충족시키고 있다. 그러나 조건 iii)의 경우는 다음 이유들로 인하여 실현이 어렵다.

경계면에서의 입사 및 반사파의 간섭효과 : Waterhouse⁽¹²⁾에 의해서 밝혀진 것으로서, 실내의 경계면, 즉 음파의 파장과 비교될 만한 반사면에서의 음 에너지 분포는 균일 분포가 아니라 입사 및 반사파의 간섭형태(Interference patterns)에 따라서 분포 형태가 결정되게 된다. 이것은 음원(Sound source)의 위치에 따른 방향지수(Directivity index)를 결정하는 방법을 생각하면 쉽게 유추할 수 있는 것이다. 그러므로 경계면에서의 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 수용실 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 mm 정도)을 갖게 된다. 따라서 시편에 입사하는 음파는 후레임의 형상 및 후레임상의 시편의

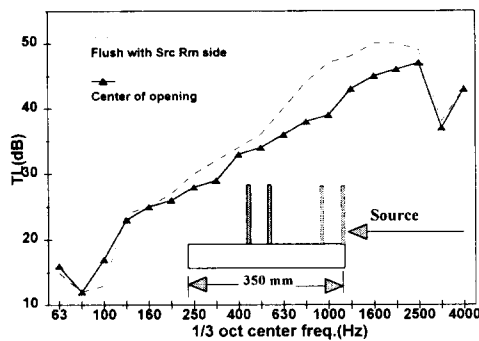


Fig. 7 The effect of specimen positions on the frame : double window

위치에 따라 다르게 되며, 예를 들어 Fig. 7에서처럼 시편이 후레임의 중간에 위치하는 경우, 소위 터널효과로서 면입사각에 가까운 음파가 입사될

확율은 적어지게 된다.

이러한 영향에 대하여, Guy⁽¹¹⁾, 및 Halliwell⁽¹²⁾ 등이 실험적 연구를 수행하였다. Guy⁽¹¹⁾의 연구 결과로서 Fig. 7에서는 시편의 위치에 따른 차음성능의 영향을 보여주고 있으며, 특히 고주파수 대역에서 그 차이가 벌어지고 있는 사실에 유념할 필요가 있다.

3.4 입사음압에 대한 Gauss 분포 가정

전절에서 언급하였듯이 소음원실이 완전한 확산 음장(Diffuse field)으로 가정하여 모든 각도에서 동일한 확률로 음이 입사하는 것으로 간주하면 그에 대한 입사음압의 분포는 균일분포(Uniform distribution)가 되겠지만, 상기한 이유들로 인하여 균일분포로 보기는 어렵다. 따라서 입사음압에 대한 분포를 물리적으로 설득력이 있는 분포로서 Gauss 분포(Normal distribution)로 가정하는 것이 타당하다고 생각한다. 두가지 분포에 대한 그림이 Fig. 8에 보이고 있다.

이러한 가정이 갖는 의미는 다음과 같다.

- i) 수직입사에 가중치를 두고, 면입사(Grazing incidence)의 가중치를 줄임으로서 Mass-air-mass 공진 주파수의 과도한 영향을 배제시킬 수 있다.
- ii) 인위적으로 입사각을 제한하는 것보다는 이런 분포를 가정하는 것이 수학적으로나 물리적으로 좀더 자연스럽다.

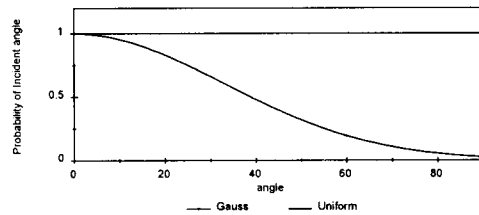


Fig. 8 Probability distribution of incident angles

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

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

단, $\alpha =$ Coeff. of Gauss distribution

.....(24)

4. 계산 예

3.4절의 가정의 타당성을 조사하기 위하여 여러 가지 판에 대한 차음성능의 예측치와 계측치와의

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

비교를 수행하였다. Table 1에는 계산에 사용된 주요 물성치들이 수록되어 있다. 그리고 (24)식에서의 $\alpha=1$ 을 취하였다.

단일판의 차음성능 : 단일판의 차음 예측에서 입사각의 영향은 공기의 특성 임피던스가 $\sec \phi$ 만큼 증가하는 것과 (18)식의 일치주파수, f_{co} 에 대한 것이다. Fig. 9에는 강판에 대한 계측 및 예측치에 대한 비교를 보이고 있다. 비교 결과는 질량법칙이 지배하는 주파수 영역에서 약 2 dB의 오차와 f_c 가 발생하는 주파수가 약간의 차이가 보이고 있다. 이러한 차이는 부정확한 물성치에 기인하는 것으로 생각되며, 전체적인 비교 결과는 양호한 편이다.

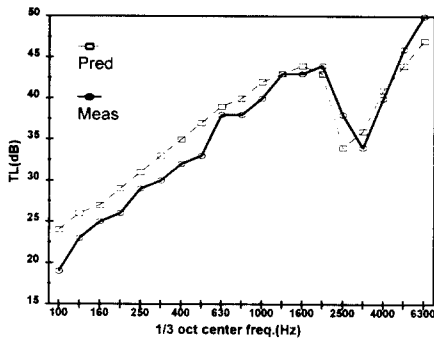


Fig. 9 Comparison of predicted and measured values : Steel 4.5 mm

이중판의 차음성능 : 이중판의 차음 예측에서 입사각의 영향은 단일판의 경우의 공기의 특성 임피던스, 일치주파수, f_{co} 와 (21)식의 Mass-air-mass 공진주파수, f_o 이며, 앞에서 언급한 대로 f_o 의 영향이 가장 크다. (9, 10, 11)식에 의하면 $f = f_o$ 일 때에는 차음성능은 0이 되지만 실제적으로는 감쇠

의 영향을 받는다. 이때의 거동이 강체 거동이므로 공기층의 흡음효과는 물론, 시편의 경계면과 후레임상이 마찰등에 의한 감쇠효과⁽¹³⁾를 η_B 로 표현하고 이것을 판의 질량에 유효질량의 개념을 도입하여 다음식으로 고려하고 있다.

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

본 계산에서는 $\eta_B=0.2$ 로 간주하였다. Fig. 11 및 Fig. 10 및 11에는 알루미늄 이중판에 대한 계측 및 예측치에 대한 비교를 보이고 있다. 비교 결과는 f_o 가 발생하는 주파수 대역에서 약 3 dB의 오차를 보이고 있다. 이러한 차이는 좀더 정확히 η_B 값이 산정된다면 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 12에는 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.

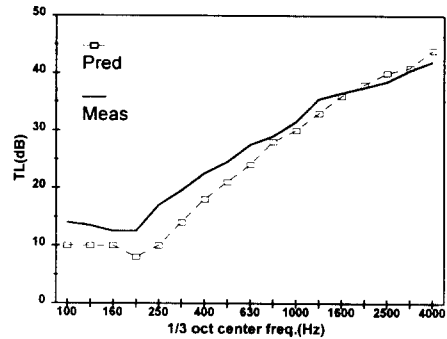


Fig. 10 Comparison of predicted and measured values : Alum(1.2)+Air-gap(60)+Alum(1.2)

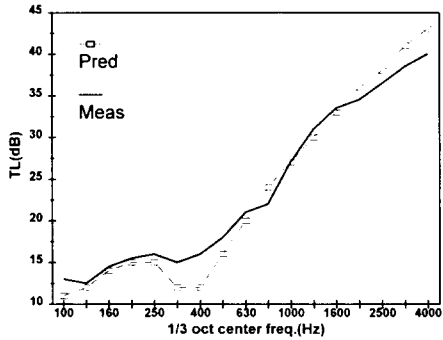


Fig. 11 Comparison of predicted and measured values :
Alum(1.2)+Air-gap(20)+Alum(1.2)

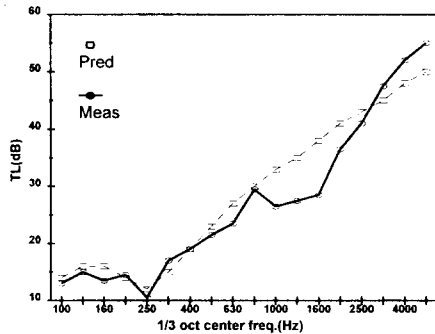


Fig. 12 Comparison of predicted and measured values :
Steel(0.7)+Air-gap(25)+Steel(0.7)

5. 결 론

본 연구에서는 이중판의 차음 해석 모델을 설정하기 위한 목적으로, 이중판의 차음 해석에서 가장 근본적인 문제가 되는 입사각에 대한 문제를 고찰하였고 그에 대한 해결책으로서 입사각의 Gauss 분포 가정에 대한 가능성을 입증하기 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 갖는 잇점은 수직입사에 가중치를 두고, 면입사(Grazing incidence)의 가중치를 줄임

으로서 Mass-air-mass 공진 주파수의 과도한 영향을 배제시킬 수 있다.

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

참 고 문 헌

- [1] Albert London, "Transmission of Reverberant Sound through Double Walls", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 22(2), 1950
- [2] M. J. Crocker and A. J. Price "Sound Transmission Using Statistical Energy Analysis", J. Sound and Vib. Vol. 9(3), 1969
- [3] 김현실, 강현주, 김재승, "다중 유리창의 음향투과손실에 관한 연구", 소음진동공학회, '94 추계학술대회, p126-131, 1994.
- [4] Frank Fahy, *Sound and Structural Vibration : Radiation, Transmission and Response*, Academic Press, 1985
- [5] Ben H. Sharp, "A study of Techniques to Increase the Sound Insulation of Building Elements", Report No. WR 73-5, WYLE Laboratory, June 1973.
- [6] Leo L. Beranek, *Noise and Vibration control*, ch. 11, McGraw-Hill, Inc., 1971
- [7] K.A. Mulholland, H.D. Parbrook and A. Cummings, "The Transmission Loss of Double Panels", J. Sound Vib. Vol. 6(3), 1967.
- [8] K.P. Byrne, "Calculating the Acoustical Properties of Plane Uniform Constructions", J. Vib., Acous., Stress, and Reliability in Design, Vol. 111, July 1989.
- [9] M.R. Schroeder and K.H. Kuttruff, "On Frequency Response Curves in Rooms. Comparison of Experimental, Theoretical, and Monte Carlo Results for the Average Frequency Spacing between Maxima", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 34(1), Jan. 1962.
- [10] Richard V. Waterhouse "Interference Patterns in Reverberant Sound Fields", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 27(2), March 1955.
- [11] R.W. Guy and P. Sauer, "The Influence of Sills and Reveals on Sound Transmission Loss", Applied Acoustics, Vol.17, 1984.
- [12] R.E. Halliwell and A.C.C. Warnock, "Sound Transmission Loss : Comparison of Conventional Techniques with Sound Intensity Techniques", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 77(6), June 1985.
- [13] W.A. Utley and B.L. Fletcher "The Effect of Edge Conditions on the Sound Insulation of Double Windows", J. Sound and Vib. Vol. 26(1), 1973.