

다중 유리창의 음향투과손실에 관한 연구

o김현실*, 강현주*, 김재승*

(An Analysis of Sound Transmission Loss of Multiple Window Partitions)

(Hyun Sil Kim, Hyun Joo Kang and Jae Seung Kim)

1. 서론

거주지와 사무실을 비롯한 모든 생활 환경에서 소음이 중요한 문제로 대두됨에 따라 점차 설계 및 시공에서 소음에 대한 비중이 커지고 있다. 유리창, 벽, 칸막이 등 건축자재의 차음성능은 재질을 통과하면서 발생하는 음에너지의 손실(Sound Transmission Loss: STL)로 표시하며 dB로 나타낸다. STL은 주파수별로 변화를 보이며 재질의 차음성능을 단일 숫자로 나타내기 위하여 각 주파수대의 변화를 고려한 STC(Sound Transmission Class), 또는 Ia(Sound Reduction Index) 값이 널리 사용된다.

차음재의 STL값은 제작 및 시공상의 다양함때문에 이론적인 예측보다는 잔향실 등을 이용한 측정에 의존하나 동일한 시편의 경우라도 측정하는 실험실의 조건 및 설치방법에 따라 커다란 차이를 보일 수도 있다. 이론적인 STL의 예측은 해석상의 단순함때문에 실제 차음재의 연결부위, 보강재, 설치조건 등 복잡한 상황의 대부분을 고려할 수 없다는 단점이 있지만 차음의 원리를 이해하고 물리적인 현상 등을 설명할 수 있으므로 새로운 차음재의 개발시 계속과 더불어 매우 중요한 해석수단으로 활용된다.

단일 부재(Single Panel)의 경우 질량법칙(mass-law)은 단순하지만 중요한 초기 예측치로 활용되나 저주파수대에서의 낮은 예측과 임계주파수(Critical frequency)부근에서의 값을 예측할 수 없다는 점에서 사용이 제한적이다. Sewell[1]은 주위가 무한한 강체

벽(Infinite rigid baffle)에 설치된 직사각형 단일 판넬에 대해 파동방정식의 해를 구하여 이론적인 STL을 예측하였으며 임계주파수(critical frequency)이전의 영역에 대해서는 비교적 계속치와 잘 맞는 결과를 얻었다. Sewell[2]은 같은 방법을 이중판의 경우에 적용하였으나 해석상의 복잡함때문에 실질적으로 유용한 결과를 얻지는 못하였다. Brekke[3]는 통계적에너지법(Statistical Energy Analysis: SEA)을 적용하였으나 일부 결합손실계수는 Sewell의 방법 등 다른 결과에 의존해야 한다는 점에서 적용대상은 매우 제한적이다.

다중 판을 무한한 판의 연속된 적층으로 가정하고 김의간[4]은 음향 4단자 행렬법을, Byrne[5]과 Trochides[6]는 각 층의 임피던스의 조합을 이용하여 STL을 예측하였는데 두 방법은 근본적으로 동일한 방법이며 흡음재가 포함된 일부 경우에 계속치와 잘 맞는 결과를 보였다. 그러나 내부에 공기만 포함하는 다중 유리창의 경우에는 위 방법을 적용하면 계속치보다 매우 낮은 값을 얻는다. Byrne[5]은 내부 공기층을 밀도가 작은 흡음재로 가정하였으나 특정한 예제에만 잘 맞을 뿐 일반화시킬 수는 없다.

본 논문에서는 다중 유리창의 STL값을 예측하는 방법에 대해 연구하였다. 유리창의 크기는 무한하다고 가정하였으며 음향 4단자방법을 이용하였으나 기존의 모델과는 달리 음파의 입사는 완전한 확산음장이 아닌 각도에 따른 변화가 있다고 가정하였으며 또한 지지부의 댐핑도 고려하였다. 본 연구에서 제시된 방법을 사용하여 이중 및 삼중창의 여러가지 경우에 대해 계속

* 한국기계연구원 음향연구그룹

치와 비교하였다. 본 방법은 유리가 아닌 강판, 석고 보드 등 일반적인 탄성체와 흡음재가 배열된 경우에도 적용이 가능하나 여러 계층치와의 비교를 통해 문제점 및 응용성에 대해서 언급하였다.

2. 이론

Fig. 1과 같이 유리와 공기층이 임의의 순서로 N개 배열된 다중 창에 음파가 각도 θ 로 입사하고 있다. 중간에 j번째 층의 좌우에서의 음압과 속도를 각각 (P_{j-1}, V_{j-1}) , (P_j, V_j) 라고 하면 이들 변수는 다

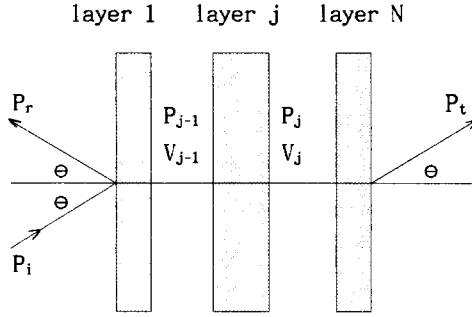


Figure 1. Multiple window partitions

음과 같은 관계식을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} P_{j-1} \\ V_{j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_j & B_j \\ C_j & D_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_j \\ V_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

유리의 경우 두께가 파장에 비해 대단히 작은 경우 양면의 속도는 같으며

$$P_{j-1} - P_j = Z_G V_j, \quad V_{j-1} = V_j \quad (2)$$

단, 유리판의 임피던스는

$$Z_G = Z_M [1 - D_j (1 + i\eta_s) \omega^2 \sin^4 \theta / c^4] \quad (3)$$

여기서,

$$Z_M = i\omega m_j$$

주파수가 작아 유리의 탄성을 무시할 경우 임피던스는 Z_G 대신 Z_M 을 사용할 수 있으며 이는 질량효과만 고려함을 의미한다. 식 (3)에서 c 는 공기내의 음파의 전달속도이며 D_j 와 m_j 는 굽힘강도 및 면밀도로 유리창의 두께가 h_j 인 경우 다음과 같이 주어진다

$$D_j = E_j h_j^3 / 12(1 - \nu_j^2)$$

$$m_j = \rho_j h_j$$

임계주파수(critical frequency) f_c 는 다음과 같이 주어진다

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi h_j} \sqrt{\frac{12\rho_j(1 - \nu_j^2)}{E_j}}$$

식 (3)에서 유리창의 구조감쇠(structural damping) η_s 는 복소수 굽힘강도 $D_j(1 + i\eta_s)$ 를 사용하여 고려하였다. 식 (2)를 (1)의 형태로 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{j-1} \\ V_{j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_G \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_j \\ V_j \end{bmatrix}$$

공기층의 경우에 두께방향으로의 좌표를 x_j , 길이방향으로의 좌표를 y 라고 하면 내부에서의 음파의 변화는 다음과 같이 쓸 수 있다

$$P = [T_1 \exp(ik_1 x_j) + T_2 \exp(-ik_1 x_j)] \exp(ik_2 y)$$

단, $k_1 = (\omega/c) \sin \theta$, $k_2 = (\omega/c) \cos \theta$.

공기층의 두께를 d_j 라고 하고 양 끝단에서의 압력과 속도와의 관계를 이용하여 미지수 T_1 , T_2 를 소거하고 관계식

$$V_j = P_j / Z_0$$

를 이용하면(공기의 임피던스, $Z_0 = \rho_0 c / \cos \theta$, 단 ρ_0 는 공기의 밀도) 식 (1)의 형태로 다음과 같이 쓸

수 있다

$$\begin{bmatrix} P_{j-1} \\ V_{j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kd_j & iZ_0 \sin kd_j \\ i \sin kd_j / Z_0 & \cos kd_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_j \\ V_j \end{bmatrix}$$

N 개의 층에 대한 매트릭스를 곱하면

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_N \\ V_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

단,

$$\begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_N & B_N \\ C_N & D_N \end{bmatrix}$$

식 (4)에서 (P_0, V_0) , (P_N, V_N) 은 음파가 입사되는 면과 투과되는 면의 음압과 속도이다. 입사음 및 반사음의 절대값을 각각 P_i , P_r 이라고 하면 다음 관계식을 얻는다

$$P_0 = P_i + P_r = A_T P_N + B_T V_N$$

$$V_0 = (P_i - P_r) / Z_0 = C_T P_N + D_T V_N$$

두 식에서 P_r 을 소거하면 투과음과 입사음의 파워의 비는 다음과 같이 주어진다

$$\tau = \left| \frac{P_i}{P_N} \right|^2 = \frac{4}{|A_T + B_T / Z_0 + C_T Z_0 + D_T|^2} \quad (5)$$

투과율 τ 는 각도 및 주파수의 함수로 특정 주파수보다는 밴드에 대한 평균값이 중요하며 음파의 입사가 모든 방향에서 동일하게 이루어진다고 가정하면 평균 투과율은 적분을 취하여 다음과 같이 된다.

$$\tau_{avg} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} \int_0^{\pi/2} \tau(f, \theta) \sin \theta \cos \theta d\theta df}{(f_2 - f_1) \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta} \quad (6)$$

음향투과손실 STL은

$$STL = 10 \log (1 / \tau_{avg}) \quad (7)$$

이중창의 차음

면밀도가 각각 h_1 , h_2 인 유리창이 거리 d 만큼 떨어져 있고 내부에는 공기로 채워져 있을 때 음파의 수직입사시($\theta=0$) 식 (5)의 투과율 τ 를 최대화하는 공진주파수 f_0 가 존재한다

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

(위의 공진주파수는 주파수가 양 유리창의 임계주파수보다 매우 작고 또한 간격이 크지않다는($kd \ll 1$) 가정 아래 유도된다.) 공진주파수 f_0 는 양 유리창이 강체 운동하고 중간의 공기는 스프링작용을 하므로 발생한다. 입사각도가 θ 라면 공진주파수는 $f_0 / \cos \theta$ 로 주어지므로 각도 θ 가 0에서 $\pi/2$ 까지 변하는 동안 공진주파수는 f_0 보다 큰 모든 영역에 대해 존재한다. Fig. 2는 양 유리창의 두께가 3mm, 공기층의 두께가 19mm인 이중창(이하 3+(19)+3으로 표시함)의 STL을 식 (6)을 이용한 예측치(prediction A)와 측정치[7]를 비교한 것으로 주파수는 각 1/3 octave 밴드에 대해 평균한 값이다.

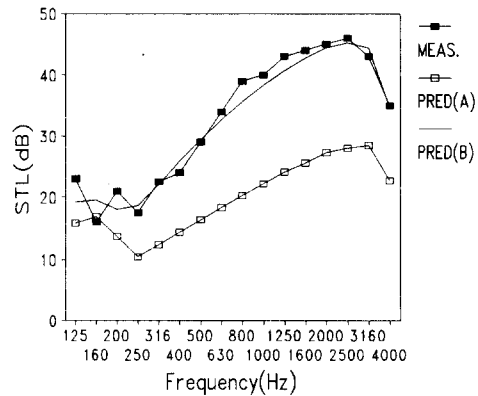


Figure 2. Double window partitions, 3+(19)+3.

유리창의 경우 물성치는 $E=6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0.3$, $\eta_s=0.01$ 을, 공기의 밀도는 $\rho_0=1.2 \text{ kg/m}^3$, 음파의 전달속도는 $c=340 \text{ m/s}$ 를 사용하였다. Fig. 2의 경우 공진주파수는 $f_0 = 214 \text{ Hz}$ 이며 예측치(prediction A)는 전 주파수 영역에 대해 공진의 과도한 영향으로 측정치[7]에 비해 대단히 작은 값을 보임을 알 수 있다. 단판의 경우 각도가 $\pi/2$ 에 가까운 영역에서는 음파의 입사가 매우 적다는 사실에 근거하여 각도에 대한 적분을 90° 가 아닌 78° 까지 수행하면 측정치와 비슷한 결과가 얻어지는데 Byrne[5]는 이중창의 경우에도 이를 적용하여 적분각도를 제한하였으나 단일 창과의 경우는 달리 두 유리창의 간격, 질량 등에 따라 투과율 τ 가 각도에 따라 변화하는 양상이 달라지므로 일반적인 다중창에 적용할 수는 없다.

이론적인 해석의 경우 유리창은 무한한 평판이며 입사하는 음파도 완전한 확산음장으로 가정하여 모든 각도에서 동일한 확률로 입사하는 것으로 간주하였기 때문에 공진주파수 $f_0/\cos\theta$ 의 영향이 과도하게 나타난다. 그러나 측정치는 유한한 유리창의 크기, 지지부에서의 댐핑 및 불균일한 확산음장때문에 예측치와 많은 차이를 보이는데 이와같은 요소를 모두 설명할 수 있으며 사용하기 편리한 이론적인 해석모델의 개발은 사실상 불가능하다.

3. 다중 유리창의 해석

본 논문에서는 다중 유리창의 STL예측시 해석의 단순함을 위하여 무한 평판의 기본 가정을 유지하며 위와 같은 불확실한 요소들을 경험적인 변수를 도입하여 나타내는 방법을 연구하였다. 이를 위하여 다음과 같은 변수를 도입하였다.

입사확률의 Gauss 분포

각도에 따른 음파의 입사확률이 균일하지 않고

90° 에 가까울수록 Gauss분포를 따라 작아진다고 가정하여 각도에 대한 투과율의 적분식 다음과 같은 값을 주었다

$$\tau_{avg} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} \int_0^{\pi/2} \tau(f, \theta) \exp(-\alpha \theta^2) \sin \theta \cos \theta d\theta df}{(f_2 - f_1) \int_0^{\pi/2} \exp(-\alpha \theta^2) \sin \theta \cos \theta d\theta}$$

여기서 α 는 Gauss 분포계수를 나타낸다.

지지부에서의 댐핑

주변 지지부에서의 댐핑을 나타내기 위하여 유리창의 임피던스 중 질량효과를 나타내는 Z_M 을 복소수 주파수를 사용하여 다음과 같이 표시하였다

$$Z_G = \hat{Z}_M [1 - D_j (1 + i\eta_s) \omega^2 \sin^4 \theta / c^4]$$

단, $\hat{Z}_M = i\omega(1 - i\eta_B)m_j$

여기서 η_B 는 지지부의 댐핑값이다.

변수 α , η_s , η_B 는 예측치와의 비교를 통해 결정하였다. Gauss 분포계수 α 는 공진주파수의 존재를 f_0 부근에만 제한하는 효과를 얻을 수 있으며 STL곡선의 전체적인 레벨의 향상과 기울기의 증가를 가져온다. 유리창의 구조감쇠계수 η_s 는 임계주파수 f_c 에서의 골(dip)의 높이를 조절하며 지지부의 감쇠계수 η_B 는 공진주파수 f_0 부근에서의 STL값을 변화시키는데 STL값에 가장 큰 영향을 주는 것은 Gauss 분포계수 α 이다. 문헌에 발표된 여러가지의 측정치와의 비교를 통해 다중 유리창의 경우 다음과 같은 값을 얻었다.

$$\alpha = 1.5/\text{rad}^2, \eta_s = 0.01, \eta_B = 0.2$$

측정치와의 비교

Fig. 2의 이중 창외의 경우 본 연구에서 제시된 방법을 사용하여 얻은 결과(prediction B)는 측정치[7]와 좋은 일치성을 보인다. Fig. 3에는 3*(6)+3*(6)+3의 삼

중창의, Fig. 4에는 3+(3)+3+(10)+3의 삼중창에 대한 측정치[7]와 예측치와의 비교를 보였으며 잘 일치함을 알 수 있다.

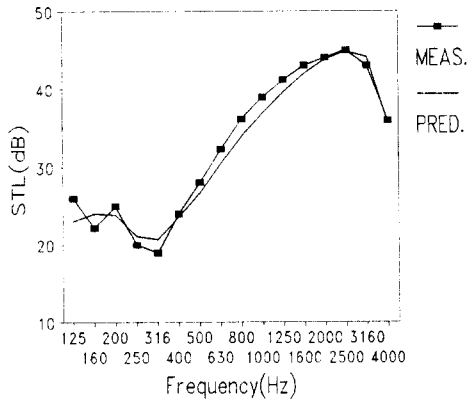


Figure 3. Triple window partitions, 3+(6)+3+(6)+3.

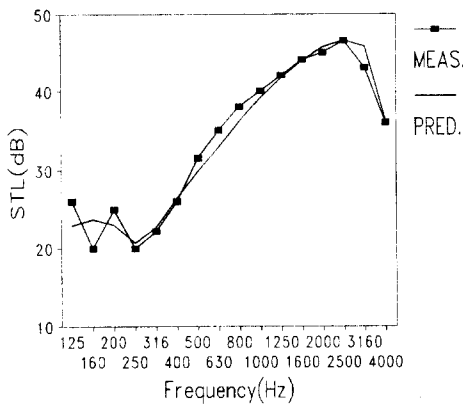


Figure 4. Triple window partitions, 3+(3)+3+(10)+3.

본 논문에서 제시된 방법은 공기층이 아닌 흡음재나 방화창에 사용되는 Gel 등 액체가 있는 경우에도 적용이 가능한데 흡음재(porous material)의 경우에는 복소수 파수를 사용한다. Fig. 5에는 석고보드 7mm + 공기층 25mm + rock wool 50mm + 공기층 25mm + 석고보드 7mm 인 5중 구조물에 대한 STL값[4]을 예측치와 비교하였다 ($\alpha=1$, $\eta_S=0.2$, $\eta_B=0.2$).

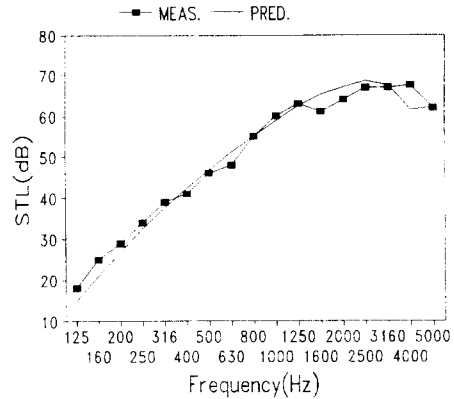


Figure 5. Sound absorbing panel with porous materials and air gaps.

석고보드의 물성치는 $E=4 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ (추정), $\rho=10^3 \text{ kg/m}^3$ 를, rockwool은 $\rho=25 \text{ kg/m}^3$, flow resistivity $R=1500 \text{ Ns/m}^4$ 를 사용하였다. 흡음재내에서의 복소수파수는 참고문헌[6]의 식을 이용하였다. 흡음재의 경우 투과율 τ 는 입사각도에 대한 변화가 공기만 있는 경우보다 대단히 둔감하여 상대적으로 Gauss 분포계수 α 의 변화에 큰 영향을 받지 않는다. 그러나 흡음재내의 음파의 전파에 관한 이론적인 모델은 유체흐름저항치(flow resistivity)만 고려할 뿐 흡음재의 밀도는 고려하지 않으므로 흡음재의 면밀도가 주위의 판의 면밀도와 대등한 값을 갖는 경우 측정치와 예측값은 큰 차이를 보인다.

Fig. 6에는 12+(160)+4의 이중창의 경우를 보였는데 ($\alpha=1.5$, $\eta_S=0.01$, $\eta_B=0.2$) 고주파수에서는 예측치는 급격히 증가하여 측정치와 일치하지 않음을 알 수 있다. 단일 판의 경우 이론적인 해석에 의하면 STL은 임계주파수보다 큰 영역에서는 18 dB/Octave의 기울기로 증가한다. 이중 창 의 경우 두께가 다르다면 두 개의 임계주파수가 존재하며 각 임계주파수에서의 골(dip)은 다른 창 의 18 dB/Octave의 증가때문에 상쇄되어 잘 나타나지 않으며 전체적으로 급격히 증가한다. 그러나 대부분의 측정치는 임계주파수이후의 영역에서

대체로 완만한 증가추세를 보이며 18 dB/Octave의 증가와는 큰 차이를 보인다.

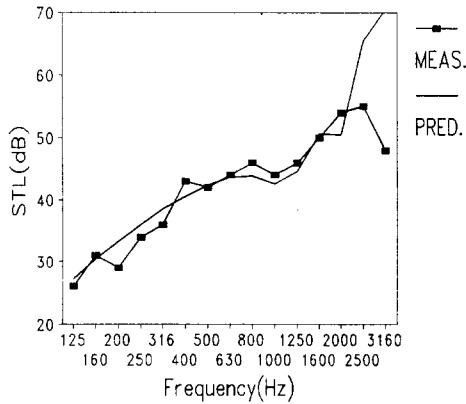


Figure 6. Double window partitions, 12+(160)+4.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 이중 유리창의 STL을 예측하는 방법을 제시하였다. 유리창은 무한 평판으로 가정하고 각 층의 좌우의 음압과 속도와의 관계를 음향 4단자법으로 표시하였다. 공진주파수의 과도한 영향을 제거하기 위하여 벽면에 근접할수록 음파의 입사확률은 Gauss 분포를 따라 작아진다고 가정하였으며 또한 공진주파수부근에서의 지나친 골을 제거하기 위하여 지지부에서의 댐핑을 도입하였다. 대부분의 방음문이나 방음판넬은 두 개의 강판이나 gypsum board 사이에 흡음재를 채운 구조로 되어있는데 흡음재는 공진주파수에서의 STL값을 올리는데 중요한 역할을 한다. 본 연구에서 사용한 지지부에서의 댐핑도 같은 역할을 하며 질량효과를 나타내는 임피던스에만 지지부 댐핑의 영향이 있으므로 임계주파수에서의 골은 기존의 모델과 같이 우리의 구조감쇠(structural damping)에 의해서만 영향을 받는다.

본 연구에서 제시된 방법은 흡음재나 gel과 같이 액체로 채워져 있는 경우에도 적용이 가능하나 유사한 구조의 측정값과 비교하여 Gauss 분포계수, 지지부 댐핑, 구조댐핑의 적절한 값을 추정하여야 한다. 여러가

지 이중창의 경우에 측정치와 비교해서 좋은 결과를 얻었으나 유리창의 두께가 다른 경우 임계주파수보다 큰 주파수 영역에서 측정치에 비해 지나치게 높은 예측(18dB/Octave)은 앞으로 지속적인 연구가 필요하다. 또한 대부분의 방음벽이 흡음재를 사용하고 있으므로 다양한 경우의 흡음재에 대한 비교검토도 수행되어야 한다.

참고 문헌

1. E. C. Sewell, "Transmission of Reverberant Sound through a Single Leaf Partitions in an Infinite Rigid Baffle", J. Sound Vib. Vol.12, 21-32, 1970.
2. E. C. Sewell, "Two-Dimensional Solution for Transmission of Reverberant Sound through a Double Partition", J. Sound Vib. Vol.12, 33-57, 1970.
3. A. Brekke, "Calculation Methods for the Transmission Loss of Single, Double and Triple Partitions", Applied Acoustics, Vol. 14, 225-240, 1981.
4. 김의간, 차음구조물의 차음평가 및 대책, '92 소음계측 및 제어기술강습회 교재, pp. 23-57, 한국소음진동공학회, 1992.
5. K. P. Byrne, "Calculating the Acoustical Properties of Plane Uniform Constructions", Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 111, 343-350, 1989.
6. A. Trochides, "Improvement of Partition Airborne-Sound Transmission Loss using Sound-Absorptive Coverings", Applied Acoustics, Vol.30, 115-120, 1989.
7. J. D. Quirt, "Sound Transmission Through Windows II. Double and triple Glazing", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 74, 534-542, 1983.
8. Handbook of Noise Control, edited by C. M. Harris, 22-17, McGraw-Hill, 1979.