

잔향실 경계면에서 입사각에 따른 음에너지 분포

강현주*, 이정권**, 김현실*, 김재승*, 김상렬*

Sound Energy Distributions according to Incident Angles on the Bounding Surfaces in the Reverberation Room

Hyun-Ju Kang, Jeong-Guon Ih, Hyun-Sil Kim, Jae-Seung Kim, Sang-Ryul Kim

요약문

본 논문에서는 실내 경계면에서 확산음장 이론 적용에 대한 타당성을 고찰하였으며, 구 및 잔향실의 경계면에서 입사각에 대한 에너지 분포를 Ray tracing 기법을 이용하여 계산하였다. 계산 결과는 경계면에서의 입사각에 대한 에너지 분포는 확산음장 이론에 의한 균일 분포가 아니라 Gaussian 분포와 유사한 경향을 보여 주었다.

ABSTRACT

In this paper, the validity for the application of the diffuse sound field theory to the real sound field, especially on the bounding surfaces of the rooms, was studied. Numerical simulations using ray tracing technique for two models, namely spheres and a reverberant room, were performed. Calculation results show that the distribution of the incident sound energy vs incident angles is approximated to Gaussian distribution, not to the uniform distribution.

1. 서론

실음향학 문제를 다룰 때 실내에 형성되는 음장을 보통 확산음장(diffuse sound field)으로 취급한다. 실내의 경계면이 아닌 위치에서 음향학적인 양(음압, 속도, 에너지등)을 계산할 때에는 큰 오차 없이 사용할 수 있다.

그러나 실내의 경계면과 경계면이 아닌 다른 위치에서의 음향학적 양들 사이에서 차이가 발생할 수 있다는 것은 이론적으로나 실험적으로 잘 알려진 사실이다. 이러한 사실은 실내의 경계면에서는 완전한 확산음장이 이루어지지 않고 있다는 것을

간접적으로 나타내고 있다. 따라서 실내의 경계면에 대한 음향학적인 양들을 계산하는 흡·차음 문제 등 입사각의 영향이 민감한 경우에는 상당한 오차를 발생할 소지를 안고 있다.

한 예로서, Beranek 등[1, 2, 3]은 단일판의 차음 손실을 계산할 때에 확산음장의 적용으로 인하여 발생하는 계측치와의 차이를 보정하기 위한 수단으로 Field incidence를 제안하였다. 이 제안은 단일판에서는 큰 문제가 없지만, 다중판의 경우에는 중간 층에 의하여 공진계가 형성되기 때문에 입사각, 특히 수평 혹은 면입사(grazing incidence)에 계산 결과가 매우 민감하게 된다.

본 논문에서는 전보[4, 5, 6]에 이어서 실내의 경계면에서 입사각에 따른 입사에너지 분포에 대하여 이론적 고찰 및 수치해석을 수행하였다.

* 한국기계연구원 음향연구 그룹

** 한국과학기술원 기계공학과

2. 확산음장

2.1 확산음장의 정의

실음향학(room acoustics)문제를 다룰 때 기본적인 가정은 확산음장이다. 확산음장의 정의[7]는 “실내의 임의의 위치에 입사하는 음은 모든방향으로 동일한 음의 강도(sound intensity)와 랜덤 위상을 갖는 음장”이라고 표현되며, 가장 단순한 척도로서 실내의 음압이 모든 위치에서 동일할 때라고 말할 수 있다. 실내의 음장을 확산음장으로 가정하면 실내의 고유모드에 의한 음압 및 위상차이, 음의 사각지대(shadow zone)의 영향등을 무시할 수 있기 때문에 수식화에 아주 편리하다.

2.2 확산음장에 대한 척도

완전한 확산음장은 실제로 구현하기 어려운 이상적인 음장이기 때문에 수학적 모델로 사용하기에는 편리하지만 실제음장과는 상당한 차이가 있게 된다. 따라서 어떤 음장을 확산음장으로 가정하기 위한 전제조건으로서 다음과 같은 기준을 두고 이를 어느 정도 만족할 때 확산음장으로 가정한다.

Schroeder 주파수[8], f_{sh} : 저주파수에서 음장의 주파수 응답은 실의 고유모드에 기인하여 특정 위치에서 peak들이 발생하게 된다. 그러나 주파수가 증가할수록 모드의 수는 급격히 증가하게 되고 각 모드의 peak들은 서로 겹쳐(modal overlap)지게 되어서 각 모드의 특성들은 의미가 없어지고, 통계학적인 양으로 실내의 주파수 응답 특성을 표현할 수 있게 된다. 이때의 주파수를 Schroeder 주파수, f_{sh} (혹은 Schroeder cut off frequency)라고 불리우며 잔향실등에서 확산음장으로 가정이 가능한 하한 주파수가 된다. Schroeder가 제안한 계산식은 $f_{sh} = 2000 (T_{60} / Vol.)$ 이며, 예로서 $Vol. = 250 \text{ m}^3$, $T_{60} = 5 \text{ sec}$ 이면 $f_{sh} = 282 \text{ Hz}$ 가 된다.

음장의 공간 분산(spatial variation of the sound field)[9], σ^2 : 통계적인 양으로서 분산, σ^2

은 실음장에서 음압의 공간 편차에 대한 척도로 사용된다. 따라서 음압에 대한 σ^2 이 크면 실내의 공간평균 음압을 구하기 위해서는 측정점의 수가 대폭 증가하여야 한다. Lubman[9]이 제안한 약산식은 $\sigma^2 = (1 + B T_{60}/6.9)^{-1}$ 이며 여기서 B는 주파수 밴드폭을 의미한다.

2.3 잔향실의 음장

이상적인 음장으로서 확산음장을 실제적으로 구현하기 위한 음장이 잔향실이다. 확산음장을 구현하기 위하여 잔향실을 훌륭하게 만들어서 위에서 언급한 척도들을 만족하더라도 확산음장 이론에서의 조건을 실제음장의 모든 위치에서 전부 만족할 수 없다는 사실들이 밝혀졌다. 그 중 대표적인 것이 실내 경계면에서의 음장 분포이다. 그 이유는 다음과 같다.

경계면에서의 입사 및 반사파의 간섭효과 : Waterhouse[10]에 의해서 밝혀진 것으로서, 저주파수인 경우에 실내의 경계면에서의 음 에너지 분포는 확산음장 이론에 의한 균일 분포(uniform distribution)가 아니라 입사 및 반사파의 간섭형태(interference patterns)에 따라서 분포 형태가 결정된다. 그러므로 경계면에서의 음선(sound ray)들 사이의 위상은 랜덤이 아니고 전적으로 입사 및 반사파의 간섭형태에 따라서 결정된다. 이러한 간섭효과로 인하여 경계면에서의 음향학적인 물리량(음압, 속도, 에너지등)은 실내의 다른 위치에서의 값들과는 차이가 있게 된다. 한 예로서, 경계면에서의 음압이 경계면과의 거리에 따른 변화량을 Fig. 2.1에 보이고 있다.

이 그림에서 보인 음압의 차이는 경계면의 수, 주파수 밴드폭등에 따라 달라지지만, 개략적으로 말하면 경계면과 실내 중앙에서의 음압의 차이는 6 dB 이상 발생할 수도 있다. 이런 이유로 인하여 ISO 등의 규정에는 실내음압 측정시 반드시 경계면으로부터 1 m 이상 떨어질 것을 요구하고 있다.

경계면에서의 입사음의 에너지 분포 : 잔향음장에서 실내의 임의의 경계면에 입사하는 음은 타 경계면으로부터 반사된 음이다. 이 입사음의 각도 분포가 모든 방향으로 동일, 즉 균일 분포가 될려

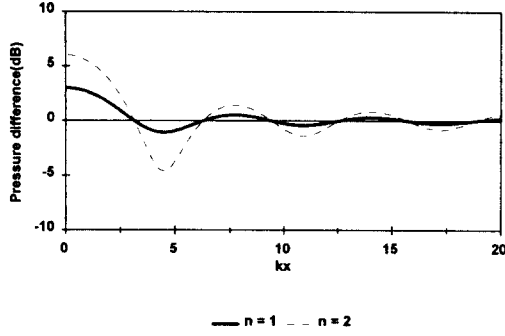


Fig. 2.1 Sound pressure differences between the bounding surface and the center of a room. ;
 $n =$ the no. of the bounding surfaces

면 타 경계면에서의 반사가 완전한 난반사(diffuse reflection)를 이루거나, 혹은 정반사(specular reflection)가 대부분이라면 실내의 형상이 매우 불규칙적인 다면체로 이루어져야 한다. 이러한 조건들은 앞에서 언급한 척도들과 상반되는 경우(예 : T_{60} 이 증가하면 f_{sh} 는 증가, σ^2 은 감소)가 발생하며 특히 관심 주파수 모두에 대하여 이 조건들을 만족시키는 사실상 불가능하다. 그러므로 실제 잔향실에서는 실내의 중앙부분에서는 어느 정도 확산음장의 조건을 만족할 수 있지만 실내의 경계면에서는 이 조건들(특히 수평입사의 가능성등)을 만족시키는 대단히 어렵다.

그러나 기하 음향학(geometrical acoustics)과 관련된 문제들 중 실내의 경계면을 대상으로 음향학적 물리량을 결정하는 것들이 있다. 대표적인 것으로 흡·차음 시험 및 예측은 실내의 경계면을 대상으로 이루어지고 있기 때문이다. 이 경우에 대하여 확산음장의 적용은 수학적으로는 매우 편리하지만 물리적으로는 다소 무리가 있다고 생각되며 이에 대한 적절한 보정이 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

3. 입사각의 에너지 분포

3.1 Paris 공식[7]

실내의 경계면을 확산음장으로 가정한 경우, 즉 인텐시티가 모든 방향으로 동일할 때, Fig. 3.1에서 보이는 것처럼 경계면의 미소면적 dS 에 대하여

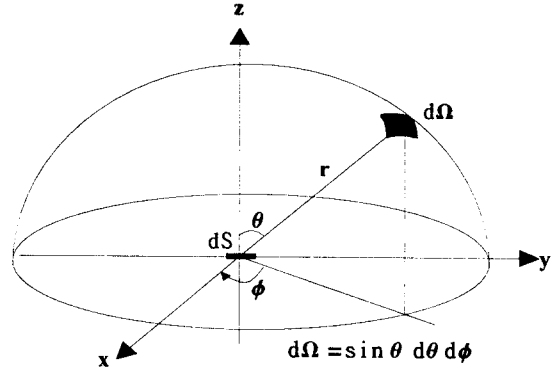


Fig. 3.1 The definition of the solid angle

입체각 $d\Omega$ 로부터 음이 입사할 때, 경계면, dS 에 수직입사하는 에너지(단위시간당)는 $I dS \cos \theta d\Omega$ 가 될 것이며, 여기서 I 가 ϕ 와 θ 에 독립이면, dS 에 입사하는 전체에너지는 다음과 같다.

$$E_{inc} = I dS \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta = \pi I dS \quad (3.1.a)$$

흡음계수, $\alpha(\theta)$ 에 대해서 살펴보면, 전체 흡수되는 에너지는 다음과 같다.

$$E_a = 2\pi I dS \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (3.1.b)$$

따라서 균일분포, 즉 확산음장에 대한 흡음계수, α_d 는 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_d = E_a / E_{inc} = \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \sin 2\theta d\theta \quad (3.1.c)$$

윗식을 Paris formular[7]라고 부른다.

같은 방법으로 균일분포에 대한 전달손실계수, τ_d 는 다음과 같다.

$$\tau_d = E_{trans} / E_{inc} = \int_0^{\pi/2} \tau(\theta) \sin 2\theta d\theta \quad (3.2)$$

(3.1) 또는 (3.2)식은 앞에서 언급한대로 경계면에서는 확산음장 조건을 충족시킬 수가 없기 때문에 이 식을 이용하여 흡·차음 해석을 수행하면 심각한 오차가 발생할 수도 있다.

3.2 Paris 공식에 대한 보정

Paris 공식을 이용하여 페널의 차음손실을 해석하면 잔향실에서의 측정치와 많은 차이가 발생한다는 사실은 잘 알려져 있다. 이러한 차이를 극복

하기 위한 방편으로 Paris 공식에 대한 보정이 다음과 같이 이루어 졌다.

입사각의 제한 : Beranek 등[1, 2, 3]은 잔향실의 경계면에 입사하는 각도가 확산음장의 조건(즉, random incidence)이 되는 수직입사($\theta=0^\circ$)에서 수평입사($\theta=90^\circ$)까지 균일입사하는 것으로 가정할 때 이론값과 측정값과의 차이점을 보정하기 위하여 적분 각도를 제한하였다. 즉, (3.2)식을 다음과 같이 수정하고 이를 Field incidence라고 규정하였다.

$$\tau = \int_0^{\theta_{lim}} \tau(\theta) \sin 2\theta d\theta \quad (3.3)$$

여기서 θ_{lim} 는 한계각을 말하며 이 한계각은 Fig. 3.2에서 보는 것 처럼 연구자에 따라 여러 가지 각도를 가정하고 있다.

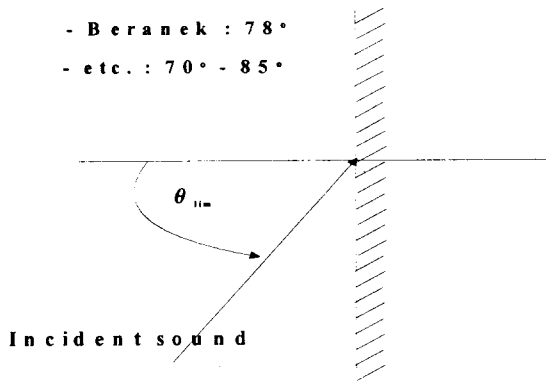


Fig. 3.2 Definition of the limiting incident angle

입사에너지 분포의 가정 : 본 저자등[4, 5, 6]은 잔향실의 경계면에서 확산음장의 정의[7], 즉 단위 체적 및 단위 입체각(solid angle)당 에너지를 $f(\theta)$ 라고 할 때 이 $f(\theta)$ 가 모든 각도에서 동일 즉 균일분포라는 가정을 수정하여 $f(\theta)$ 가 정규분포(Gaussian distribution)라고 가정하였다. 즉, (3.2)식에 입사음의 각도에 대한 에너지 분포를 고려하기 위하여 분포함수, $f(\theta)$ 를 도입하여 고쳐쓰면,

$$\tau_d = \frac{\int_0^{\pi/2} f(\theta) \tau(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} f(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta} \quad (3.4)$$

가 될 것이며 여기서 $f(\theta) = 1$ 은 균일 분포, 즉 확산음장을 의미한다.

문헌[4, 5, 6]에서 가정한 $f(\theta)$ 는 다음식과 같다.

$$f(\theta) = \text{Exp}(-\beta\theta^2) \quad (3.5)$$

여기서 β 는 잔향실의 형상에 대한 보정계수로서 1 ~ 2 사이의 값이다.

3.3 Ray tracing을 이용한 Numerical simulation

실제 잔향실의 경계면에 입사하는 음의 각도에 따른 에너지 분포를 보기 위하여 Ray tracing 기법 [11]을 이용하여 Numerical simulation을 수행하였다. 계산에 사용된 프로그램은 SoundRay[11]로서 실내의 잔향시간등을 계산하기 위하여 개발된 프로그램이다. 계산에 이용된 모델은 구 모델과 실제 잔향실 모델이다.

계산 과정 : 계산에 사용된 가정과 계산절차는 다음과 같다.

가정 :

- 음원은 점음원으로서 모든 방향으로 단위 에너지를 방출한다.
- 경계면에서 입사음과 반사음은 정반사(specular reflection) 법칙을 따른다.
- 수음면에서 입사음은 ϕ (azimuth angle)에 독립이며, 입사각의 정의는 Fig. 3.2에 보이고 있다.

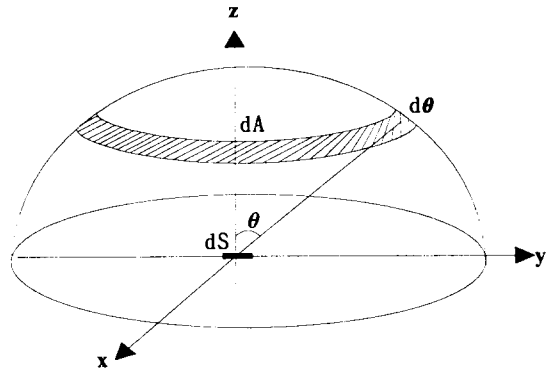


Fig. 3.3 The definition of the incident area

절차 :

- 실내 임의의 경계면에 단위면적을 갖는 수음면을 설정한다.
- 실내 임의의 위치에 점음원을 둔다.
- 점음원으로부터 충격음원을 주고 반사가 충분히 이루어진 후 단위시간 동안 일정한 각도로 입사되는 에너지를 합산한다.
- 단위 입체각(solid angle)당 에너지, E 는 다음

과 같이 정의된다.

입사각, θ 에 해당하는 에너지를 E_θ 라고 하면 E_θ 는 다음과 같다.

$$E_\theta = \sum E_{inc}, \text{ for } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (3.6)$$

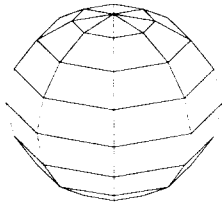
따라서 단위 입체각당 에너지, E 는 다음과 같다.

$$E = E_\theta / dA \quad (3.7)$$

여기서 dA 는 Fig. 3.3에 보이고 있으며, 다음과

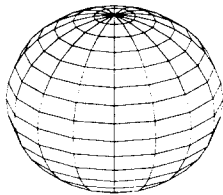
$$dA = \int_0^{2\pi} d\phi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = 2\pi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta \quad (3.8)$$

같이 된다.



Model = sphere 1

Fig. 3.4 The test model



Model = sphere 2

Fig. 3.5 The test model

구 모델 : 이상화 된 음장으로서 구를 선택하였다. 구 모델의 갖는 장점은 다음과 같다.

- 면입사의 확률이 다각형 모델에 비해서 크다.
- 음의 사각지대(Shadow zone)가 없다.
- 모델링이 간단하다.

선정된 구 모델은 반경=5 m, 용적= 500 m³, 표면적=292 m²이며, Fig. 3.4 및 4에 나타나 있다.

잔향실 모델 : 실제 음장으로서 잔향실을 선택하였다. 선정된 모델은 용적= 225 m³, 표면적=223 m²이며, Fig. 3.6에 나타나 있다.

계산결과 : 계산에서는 경계면에 입사하는 에

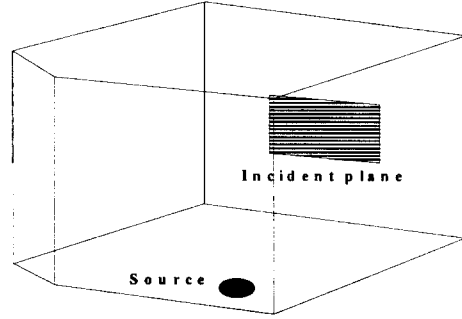


Fig. 3.6 A model of the reverberant room

너지외에도 계산의 신빙성 및 실내 공간의 확산음장의 정도를 보기 위하여 모델의 잔향시간과 여러 위치(경계면이 아닌)에서의 에너지를 계산하였다.

Fig. 3.7은 실공간의 각 위치에서의 에너지 비를 나타내고 있으며 대략 0.5 dB 이내의 차이로서 실내의 공간은 확산음장이 되고 있음을 보인다.

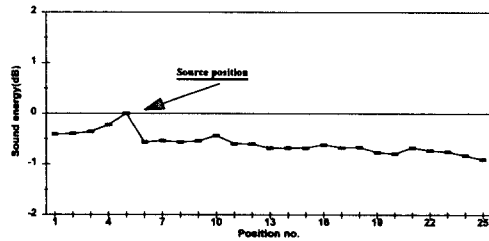
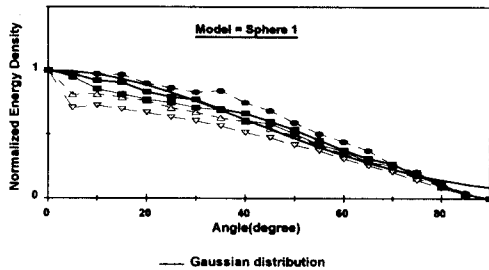


Fig. 3.7 Energy differences among positions

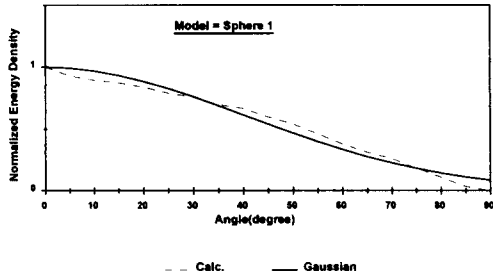
Fig. 3.8은 첫 번째 구 모델에 대한 입사각에 따른 에너지 분포를 나타낸다. 그림의 a)에는 음원의 위치에 따른 에너지 분포를 보이고 있다. 또한 b)에는 평균 분포를 보이고 있다. Gaussian 분포도



a) According to source positions.

Fig. 3.8 Energy distributions vs incident angles

비교를 위해서 함께 나타내고 있다.



b) Averaged.

Fig. 3.8 Energy distributions vs incident angles

Fig. 3.9는 두 번째 구 모델에 대한 입사각에 따른 에너지 분포이며, Fig. 3.9 및 Fig. 3.10의 비교 결과를 보면 계산된 분포와 Gaussian 분포는 비교적 좋은 일치를 보이고 있다.

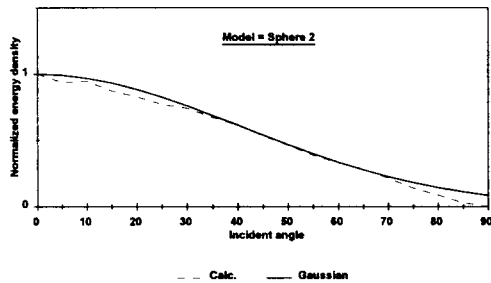


Fig. 3.9 Energy distributions vs incident angles

Fig. 3.10은 잔향실 모델에 대한 에너지 분포를

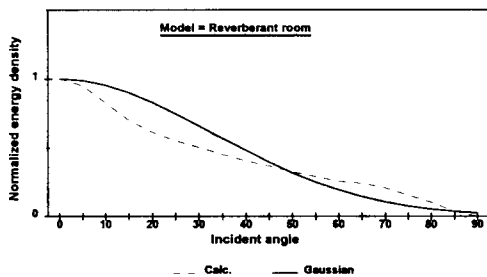


Fig. 3.10 Energy distributions vs incident angles

나타낸다. 계산된 분포와 Gaussian 분포는 부분

적으로 약간의 차이를 보이고 있지만 전체적으로는 양호한 일치를 보이고 있다.

4. 고찰 및 결론

실제음장과 확산음장에 대한 고찰 및 시험 모델들에 대한 입사각의 에너지 분포 계산결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

모델들에 대한 수치해석 결과는 경계면에서의 입사 에너지 분포는 Gaussian 분포와 유사함을 보이고 있다.

Fig. 3.11은 잔향실의 경계면에 대한 입사 에너지 분포, 확산음장 이론에 의한 균일 분포 및 Beranek[1, 2, 3]등이 제안한 Filed 입사 가정에 의한 분포와 Gaussian 분포를 보여주고 있다. 그림으로부터 잔향실의 경계면에 대한 입사 에너지 분포는 Gaussian 분포로 가정하는 것이 가장 타당하다고 생각한다.

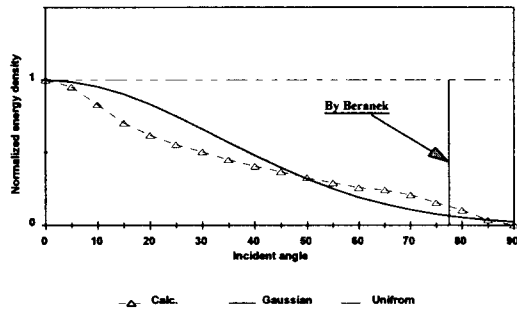


Fig. 3.11 Various distribution curves

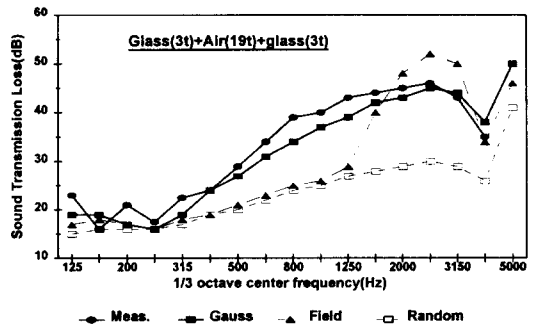


Fig. 3.12 An calc. example of sound transmission loss using various distributions

이를 뒷받침하기 위한 계산 예로서 Fig. 3.12는 앞에서 언급한 각각의 분포를 이용하여 이중판의 차음손실을 계산한 결과를 보이고 있다. 그림에서 보면 균일 분포에 의한 계산치는 측정치와 상당한 차이를 보이고 있으며 Gaussian 분포로 가정한 계산치가 측정치와 가장 잘 일치하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Leo L. Beranek, "Noise and Vibration control", ch. 11, McGraw-Hill, Inc., 1971
- [2] K.A. Mulholland, H.D. Parbrook and A. Cummings, "The Transmission Loss of Double Panels", J. Sound Vib. Vol. 6(3), 1967.
- [3] K.P. Byrne, "Calculating the Acoustical Properties of Plane Uniform Constructions", J. Vib., Acous., Stress, and Reliability in Design, Vol. 111, July 1989.
- [4] 김현실, 강현주, 김재승, "다중 유리창의 음향투과 손실에 관한 연구", 소음진동공학회, '94 춘계학술대회, p126-131, 1994.
- [5] 강현주, 김현실, 김재승, 김상렬, "이중판의 차음손실", 소음진동공학회, '97 춘계학술대회, p473-480, 1997.
- [6] 강현주, 이정권, 김현실, 김재승, 김상렬, "샌드위치판의 차음성능에 관한 고찰", 한국음향학회 '97 하계학술대회, p149-154, 1997.
- [7] Heinrich Kuttruff, "Room Acoustics", ch. 2, Applied Scienc Publishers LTD, 1973
- [8] M.R. Schroeder and K.H. Kuttruff, "On Frequency Response Curves in Rooms. Comparision of Experimental, Theoretical, and Monte Carlo Results for the Average Frequency Spacing between Maxima", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 34(1), Jan. 1962.
- [9] Lubman, "Spatial Averaging in Sound Power Measurement.", JSV, 16(43), 1971
- [10] Richard V. Waterhouse "Interference Patterns in Reverberant Sound Fields", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 27(2), March 1955.
- [11] 김현실, 강현주, 김재승, 김상렬, "잔향실의 음압 분포해석 및 계측치와의 비교", 소음진동공학회, '97 춘계학술대회, p669-674, 1997.