

잔향실의 음장해석 (II)

°임정빈* · 권영필**

Analysis of the Sound Field in a Reverberation Room(II)

°Jung-Bin Im* · Young-Pil Kwon**

ABSTRACT

The objective of this study is the numerical analysis about the sound pressure distribution in reverberation rooms. In order to obtain the effect of the boundary conditions of the wall, the sound field was computed for various absorption coefficients and impedances. And the effect of the room shape was investigated by dealing with pentagonal type as well as the rectangular type. In addition an experiment was performed for the sound pressure distribution in a reverberation room and the result was compared with the analysis.

1. 서론

잔향실은 음원의 음향동력, 재료의 흡음률 및 투과손실 등을 측정하기 위한 음향공간으로서 충분한 잔향시간과 균일한 음압분포를 얻을 수 있도록 설계하는 것이 중요하다. 잔향시간은 실의 체적과 벽면의 흡음률에 의해 대략 예측할 수 있으나 실내의 음압분포는 내부형상에 따라 크게 영향을 받으므로 미리 예측하기란 매우 어려운 일이다. 하지만 목적에 부합한 잔향실을 위해서는 시공전 설계 단계에서 미리 공간내의 음장분포를 예측하여 최적의 음향성능을 갖게하는 것이 필요하다. 이론적으로는 벽면이 완전 반사체이고 서로 평행인 면이 없을 때 공간내의 모든 위치에서 음압이 균일하게 된다. 즉, 실의 크기가 파장에 비하여 충분히 크고 벽면이 파장과 동일한 정도의 불규칙성(경사, 부정형, 요철 등)을 갖는 경우는 음원으로부터 발생된 음이 각 벽면으로 불규칙하게 입사되고 반사되는 과정을 반복함으로써 실내에 모우드밀도가 증가하게 되어 어느 위치에서도 모든 방향으로 같은 크기의 음에너지가 전파되는 확산음장 상태가 된다. 그러나 실제로는 완전한 확산음장은 불가능하며 또한 저주파음은 고주파음에 비하여 상대적으로

모우드 밀도가 낮기 때문에 벽면의 반사율이 높더라도 음의 공간분포가 불균일하게 된다.

잔향실과 같은 음향공간의 음장분포를 이론적으로 예측하기 위해 가장 널리 쓰이고 있는 방법으로는 음선법(ray-tracing method)이 있으며 이를 상용화한 프로그램으로 NIT사의 RAYNOISE가 있다. 그러나 이 방법으로 잔향실의 음장을 해석하는 경우, 저주파대역의 신뢰성이 떨어지는 문제점이 발생하게 된다. 따라서 저주파대역에 대해서는 경계요소법에 의해 Helmholtz 방정식을 푸는 일반적인 음향해석방법이 유용하며 이를 상용화한 프로그램의 하나로서 SYSNOISE가 있다. 일반적으로 저주파대역에서 충분히 균일한 음장분포를 얻을 수 있다면 주파수가 높은 경우는 더욱 균일한 음장을 나타내게 된다.

경계요소법에 의해 해석을 하는 경우, 비록 저주파대역이라고 하더라도 잔향실의 체적이 크기 때문에 경계면을 이산화한 요소수가 많아지게 되어 연산시간이 많이 소요되며 또한 경계조건의 변화에 따라 계산결과가 다르게 되므로 정확한 경계조건을 결정하는 것이 중요하다. 특히 잔향실의 벽면은 반사율이 매우 높고 음파가 난입사되기 때문에 정확한 흡음률 및 임피던스를 측정하기가 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용되고 있

* 숭실대학교 기계공학과 대학원

** 숭실대학교 기계공학과

는 5각형 잔향실에 대하여 경계조건(입자속도, 임피던스 조건)의 변화에 따른 저주파음의 음압분포를 해석하고 실제 측정결과와 비교함으로써 적절한 경계조건 및 경계조건의 영향에 대해 고찰하고자 한다. 또한 잔향실의 형상변화에 따른 영향을 고찰함으로써 기존의 5각 형태가 아닌 4각 형태의 잔향실 모델을 제시하고자 한다. 수치해석은 SYSNOISE의 직접경계요소법 코드를 이용하였으며 잔향실내 음압분포의 표준편차를 계산하여 결과를 비교하였다.

2. 경계조건

흡음률 α 는 입사되는 음향파워 W_i 에 대한 흡음되는 음향파워 W_a 의 비로서 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} = \frac{W_i - W_r}{W_i} = 1 - R^2 \quad (1)$$

윗 식에서 W_r 은 반사음의 음향파워이고 R 은 음향 반사계수로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R^2 = \frac{W_r}{W_i} = |\bar{R}|^2 = \left| \frac{\bar{\zeta} - 1}{\bar{\zeta} + 1} \right|^2 \quad (2)$$

여기서 $\bar{\zeta}$ 는 비음향 임피던스로서 음향 임피던스 \bar{z} 를 복소수로 가정하면 공기중에 대해서는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{\zeta} = \frac{\bar{z}}{\rho c} = x + jy \quad (3)$$

따라서 식 (2)와 식 (3)을 이용하면 식 (1)에서의 흡음률은 다음과 같이 비음향 임피던스의 크기와 위상의 함수임을 알 수 있다⁽¹⁾.

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 - \frac{(x-1)^2 + y^2}{(x+1)^2 + y^2} = \frac{4x}{2x + x^2 + y^2 + 1} \quad (4) \\ &= \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4 \cos \phi} [\zeta + 1/\zeta]} \end{aligned}$$

여기서 $\cos \phi = x/\zeta$

흡음률이 매우 클 경우는 음향임피던스의 실수부와 허수부의 비는 주파수에 무관하다.

Fig. 1은 비음향 임피던스의 크기 및 위상과 흡음률과의 관계를 나타낸 것으로서 흡음률은 $\zeta=1$, $\phi=0$ 일 때, 즉 임피던스의 실수항이 ρc 이고 허수항이 0일 때 최대값 1을 갖는다. 그러나 임피던스의 크기가 일정하더라도 위상이 증가할수록 흡음률은 낮아지게 되며 이러한 위상에 따른 흡음률의 변동폭은 임피던스가 클수록 작아지게 된다. 특히

임피던스가 무한대가 될 경우는 흡음률은 0으로 수렴하고 임피던스의 위상은 고려할 필요가 없게 된다. 한편 흡음률이 일정할 경우에는 임피던스의 크기와 위상은 여러 조합이 있으며 흡음률이 낮아질수록 임피던스의 크기와 위상의 변화폭이 커지게 된다. 하지만 잔향실과 같은 밀폐계를 해석할 때, 벽면이 완전반사체라면 임피던스의 크기와 위상의 변화폭은 크지만 음장에 미치는 영향은 작으며, 흡음률이 높아질수록 비록 임피던스의 크기와 위상의 변화폭은 작지만 음장에 미치는 영향은 매우 크게 된다.

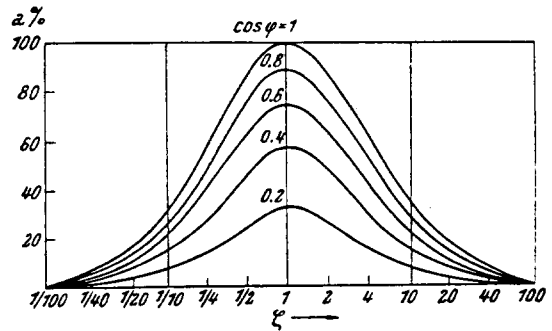


Fig. 1 Absorption coefficient as a function of the magnitude of the normalized impedance for the same phase angles

3. 수치해석

본 연구에서는 잔향실의 내부음장 분포를 구하기 위한 field point mesh를 모든 벽면으로부터 1/3옥타브밴드 중심주파수의 반파장 이상 떨어진 곳에 위치하도록 하였고 일정한 파워의 점음원을 모든 벽면으로부터 해당 중심주파수의 반파장 이상 떨어진 바닥면에 위치하도록 하였다.

ISO 3741⁽²⁾에 따라 잔향실의 음압분포를 1/3옥타브밴드레벨로 100Hz 중심주파수 대역의 값을 구하였다. 따라서 수치해석은 90~112Hz까지 1Hz간격으로 수행하였지만 음압분포를 계산하기 위해서 23개의 각 주파수에 대한 음압을 에너지합산하였다. 실제로 각 주파수에 대한 field point mesh의 음장분포는 매우 불균일하지만 1/3옥타브화 할 경우 전체적으로 균일한 형태가 된다. 따라서 이와 같이 에너지합산된 field point mesh 상의 points 중에서 각각 중심주파수의 반파장 거리 이상 떨어

진 세점을 선택하여 그 평균레벨을 구한 다음 다시 이러한 세점의 조합을 증가시켜가면서 3점 평균 음압레벨의 표준편차를 구하였다.

3.1 잔향실의 경계조건 변화

잔향실의 벽면이 매우 단단하여 흡음률이 0에 가깝다면 잔향실의 음장을 해석하기 위해서는 다음과 같이 2가지 형태의 경계조건을 이용할 수 있다. 즉, 첫 번째는 벽면의 입자속도가 0이라는 경계조건을 사용하는 것이고 두 번째는 벽면의 입피던스값이 매우 크다는 경계조건을 사용하는 것이다. 이 때, 벽면이 약간의 흡음특성을 갖고 있다면 식 (4)의 흡음률과 입피던스와의 관계를 이용하여 Table 1과 같이 다수의 입피던스 경계조건들의 조합을 결정할 수 있다.

Table 1 Impedance boundary conditions for some absorption coefficients.

α	$ \bar{z} $	$\cos \varphi$
0.01	83721.3	1.0
	50225.7	0.6
	16739.1	0.2
0.05	32482.8	1.0
	19483.9	0.6
	6472.4	0.2
0.1	15814.5	1.0
	9479.5	0.6
	3111.3	0.2
0.2	7472.0	1.0
	4460.7	0.6
	1375.5	0.2

본 연구에서는 현재 시공되어 있는 체적 305m³인 D사의 5각 형태의 잔향실에 대하여 Table 1의 경계조건들에 대한 음장해석을 수행하였고 실제 측정결과와 비교하였다.

Fig. 2는 해석대상으로 선정된 기존 잔향실의 경계면을 다수의 4각 요소로 이산화한 형태로서 각 요소의 변의 길이가 최소한 해석하고자 하는 최대 주파수의 1/6과장 이내가 되도록 하였다.

Fig. 3은 field point mesh상의 몇 몇 주파수에 대한 음장과 1/3옥타브밴드로 합성된 음장을 비교한 것이다.

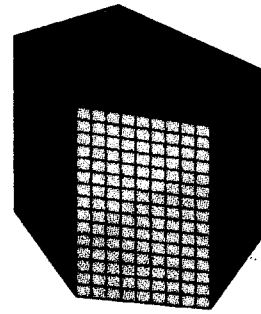
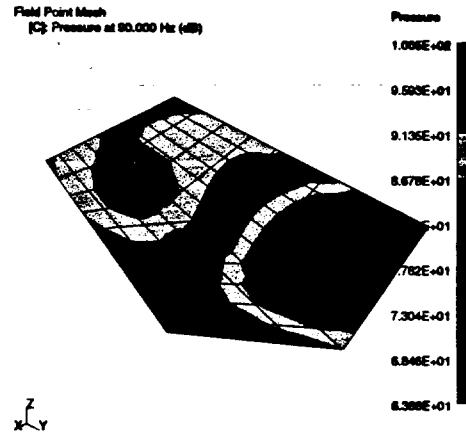
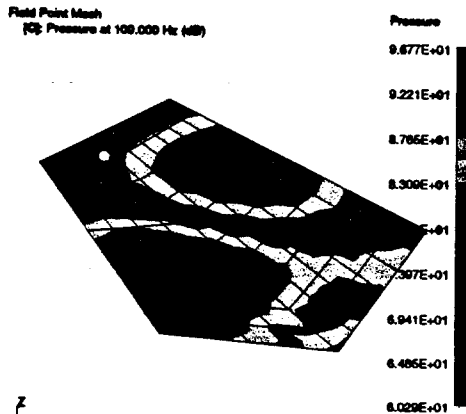


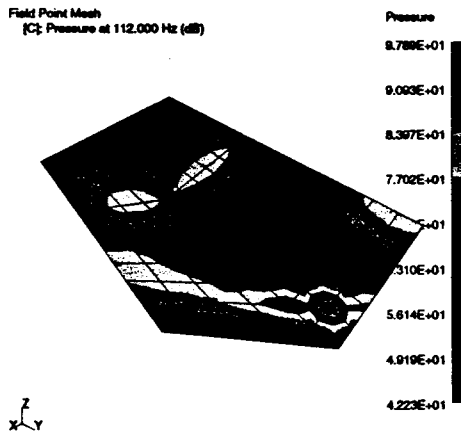
Fig. 2 Room model of pentagonal type



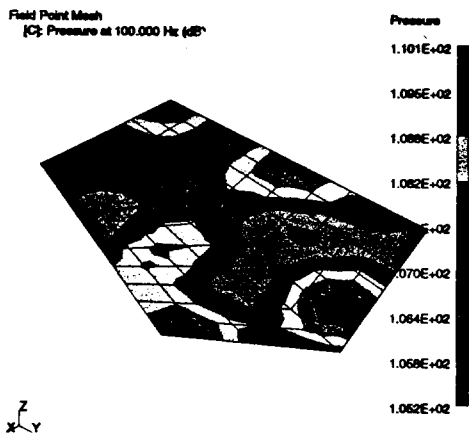
(a) 90Hz



(b) 100Hz



(c) 112Hz



(d) 1/3 octave band (fc=100Hz)

Fig. 3 Interior sound fields of a pentagonal room with $\alpha=0$

경계조건에 따른 음장의 편차를 구한 결과는 Table 2에 정리하였다. 표에서 보면 흡음률이 동일한 상태에서도 위상이 높아질수록 전체적으로 표준편차값이 증가하고 있으며 따라서 음장의 균일도가 떨어지고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는

흡음률이 일정하더라도 위상이 높아질수록 임피던스값이 작아지기 때문이다. 그러나 흡음률이 0.01인 경우는 약간 다른 수치를 보이고 있으며 오히려 표준편차가 다른 경우보다 높게 나타나고 있는데 이는 입력된 임피던스값이 매우 크기 때문에 발생하는 수치오차라고 사료된다. 따라서 흡음률이 매우 낮은 경우는 임피던스 경계조건 적용이 곤란하며 이때는 입자속도가 0이라는 속도경계조건을 사용하는 것이 더 정확한 계산이 된다고 본다. 한편 위상이 일정하고 흡음률이 변하는 방향으로 고찰해보면 역시 흡음률이 증가할수록 음장의 편차가 증가하고 있음을 알 수 있고 이 경우 역시 흡음률이 0.01인 경우는 전체적인 경향에서 벗어나고 있음을 알 수 있다.

Table 2 Standard deviations for some absorption coefficients and phases.

(unit : dB)

α \ $\cos \varphi$	1.0	0.6	0.2
0.0	0.59		
0.01	1.01	1.19	1.11
0.05	0.54	0.76	0.74
0.1	0.57	0.63	0.84
0.2	0.80	0.86	0.94

Fig. 4는 해석대상 잔향실에서 ISO 3741의 방법에 따라 음압레벨을 측정할 위치이며 Table 3은 그 결과를 나타낸 것이다.

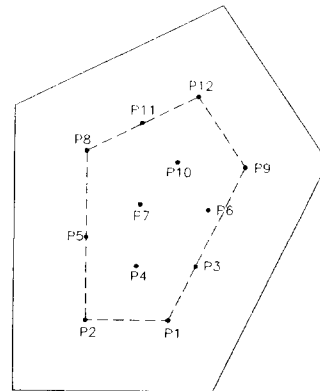


Fig. 4 Measuring positions of a pentagonal room

Table 3 Measured SPL in a pentagonal room

position no.	SPL (dB)	position no.	SPL (dB)
1	89.60	7	89.04
2	87.28	8	88.57
3	87.93	9	89.27
4	86.47	10	88.45
5	88.52	11	88.97
6	85.58	12	87.57

Table 3의 결과로부터 구한 표준편차값은 약 0.52dB로서 Table 2의 결과와 비교하면 해석대상 잔향실 벽면의 실제 흡음률은 0에 가깝다고 할 수 있다.

3.2 잔향실의 형상 변화

본 연구에서는 기존의 5각형 잔향실 대신 4각형 잔향실에 대해 수치해석을 수행하였다. 이 때 경계조건으로는 흡음률이 0인 rigid body condition을 사용하였고 기존의 5각형 잔향실의 해석결과와 비교하였다.

Fig. 5는 3종류의 4각형 잔향실에 대한 모델링으로서 모델 1과 2의 체적은 기존 잔향실과 같은 305m³이고 모델 3의 체적은 346m³이다. 각 모델은 모든 면이 서로 평행하지 않도록 하였고 모든 측벽은 바닥면과 서로 수직이 되게 하였다.

Fig. 6은 Fig. 5의 4각형 잔향실의 내부음장분포로서 1/3옥타브밴드로 합성한 그림이다.

Table 4는 Fig. 6의 음장결과로부터 계산된 표준편차값의 변화를 기존잔향실에 대한 결과와 비교한 것이다. 표에서 보면 모델 1과 2의 표준편차값은 기존잔향실보다 다소 높지만 체적을 증가시킴으로서 표준편차값이 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 체적이 같을 경우는 5각 형태의 잔향실이 4각 형태보다 다소 유리함을 알 수 있으나 형상 뿐 아니라 체적을 적절히 조정한다면 4각 형태의 잔향실도 충분히 균일한 음장분포를 얻을 수 있다.

Table 4 Calculated results for the effect of shapes

model		SD (dB)
pentagonal		0.59
rectangular	model 1	0.96
	model 2	1.01
	model 3	0.60

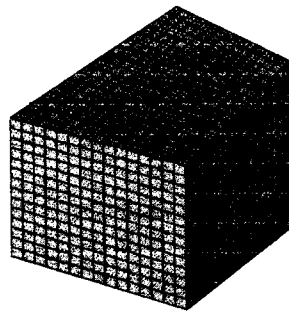
4. 결론

본 연구에서는 기존의 5각형 잔향실에 대하여 경계조건(입자속도, 임피던스 조건)의 변화에 따른 잔향실 내부의 저주파음의 음압분포를 해석함으로써 경계조건의 영향에 대해 고찰하였고 실제 측정결과와 비교하였다. 그 결과 흡음률이 증가할수록 그리고 흡음률이 동일하더라도 위상이 커질(임피던스값이 작아질)수록 음장의 균일성이 떨어지는 것으로 나타났다. 특히 흡음률이 작을 경우는 임피던스 경계조건을 사용할 때 수치오차가 커지게 되므로 이 경우는 입자속도경계조건을 사용하는 것이 바람직하다.

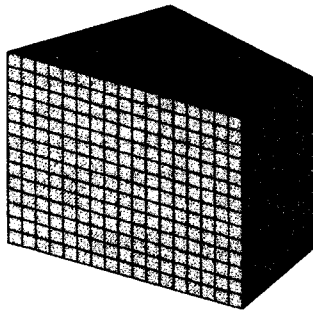
또한 본 연구에서는 잔향실의 형상변화에 따른 영향을 고찰하기 위해 기존의 5각형 잔향실이 아닌 4각형 잔향실에 대해 수치해석을 수행하였고 그 결과 체적이 같을 경우는 5각형 잔향실이 4각형보다 다소 유리하지만 형상 뿐 아니라 체적을 적절히 조정한다면 4각형의 잔향실도 충분히 사용가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

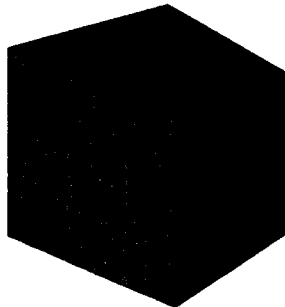
- (1) Eugen Skudrzyk, 1971, The Foundations of Acoustics, Springer-Verlag, New York, pp. 300-304
- (2) International Standard ISO 3741, 1988
- (3) 임정빈, 권영필, 이주원, 이득용, 1996, "잔향실의 음장해석", 한국소음진동공학회 1996년도 추계 학술대회논문집, pp. 124-129



(a) model 1

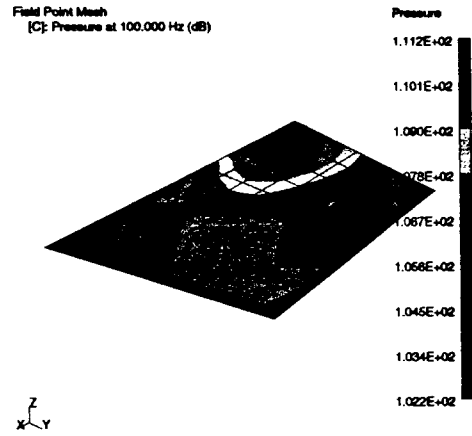


(b) model 2

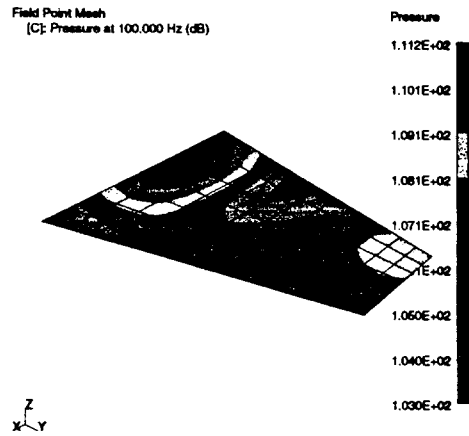


(c) model 3

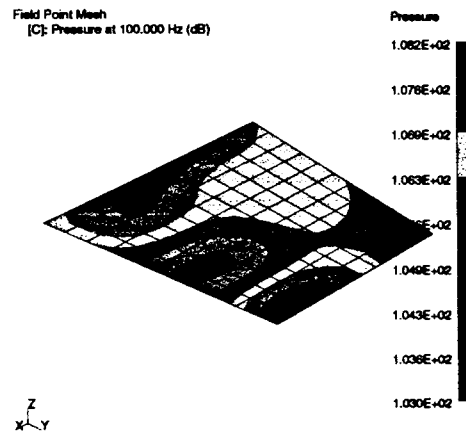
Fig. 5 Room models of rectangular type



(a) model 1



(b) model 2



(c) model 3

Fig. 6 Interior sound field of rectangular rooms with $\alpha=0$