

잔향실의 음장해석

권영필*, 0임정빈**, 이주원**, 이득웅***

Analysis of Sound field in a Reverberation room

Yong-Pil Kwon*, 0Jung-Bin Im**, Joo-Weon Lee**, Deuk-Yoong Lee***

1. 서론

소음문제에 대한 중요성이 점차로 높아짐에 따라 잔향실(reverberation room), 무향실(anechoic room) 등의 특수한 음향 공간에 대한 수요도 차츰 증가되고 있다.

잔향실과 무향실은 각각 확산음장(diffuse field)과 자유음장(free field)을 제한된 공간내에 재현한 것으로 각종 음향 실험의 장소로 사용되고 있다. 무향실이 음원의 방사특성 등을 측정하는데 적합한 공간인데 반하여 잔향실은 음원의 파워, 또는 시료의 흡음률 및 벽의 투과손실 등을 측정하는데 이용되는 공간으로 음향 실험을 위한 기본시설이라 할 수 있다. 특히 잔향실은 음장내 모든 위치에서 음의 에너지 밀도가 일정하도록 설계되어야 하므로 무향실 설계보다는 더욱 기술력을 필요로 한다.

현재 국내에서는 몇몇 업체에서 잔향실을 설계, 시공하고 있으나 대부분 어떤 기준 또는 정확한 이론에 따라 설계한다기 보다는 주로 경험에 의존하거나 외국의 것을 그대로 모방하고 있는 실정이다. 하지만 잔향실 설계에 대한 기술축적을 위해서는 시공전 설계단계에서 미리 공간내의 음장 분포를 예측하여 최적의 음향 성능을 갖추도록 하는 것이 그 무엇보다 중요하다. 이는 장기적

으로 볼 때 시공비용과 기간을 절약할 수 있다는 점에서도 상당히 중요한 의의를 갖고 있다.

잔향실의 음향성능평가는 음장내의 균일한 음압분포 여부와 잔향시간의 측정에 의해 가능하며 음향학적으로 최적의 성능을 갖추려면 실내의 모든 위치에서 음압레벨이 동일해야 한다. 하지만 이는 실제로 불가능한 일이며 최대한 이에 가깝게 하기 위해서는 실의 크기가 파장에 비하여 충분히 크고 벽면이 파장과 동일한 정도의 불규칙성(경사, 부정형, 요철 등)을 갖도록 해야 한다. 음향학적으로 보면 불규칙한 형상의 공간에서는 일정 주파수 대역내에 고유 진동수가 매우 많아지게 되어 모우드 밀도가 증가한다. 따라서 음원으로부터 발생된 음이 좁은 주파수 대역에 집중된 경우라도 각 벽면으로는 랜덤하게 입사되고 반사되는 과정을 반복함으로써 실내의 어느 위치에서도 모든 방향으로 음에너지가 전파되는 상태가 된다. 이 경우에 실내의 음압 분포는 음압의 편차가 적고 공간적으로 거의 균일한 확산음장에 가깝게 된다. 하지만 저주파음의 경우는 고주파음에 비해 모우드 밀도가 상대적으로 낮기 때문에 벽면의 반사율이 높더라도 음의 공간 분포가 불균일하게 된다.

본 연구에서는 저주파음에 대한 잔향실내의 음압분포 형태를 벽면의 경계조건 및 실의 형상에 따라 해석함으로써 잔향실 설계에 대한 참고자료로 삼고자 하였다. 수치해석은 SYSNOISE의 경계요소법 코드를 이용하였으며 잔향실 내에서의

* 숭실대학교 기계공학과

** 숭실대학교 대학원

*** (주)디비 엔지니어링

음향파워레벨 측정에 대한 국제기준인 ISO 3741, ISO 3742 및 국내기준인 KS A 0704에 따라 그 결과를 분석하였다.

2. 관련이론

2.1 임피던스와 흡음률

잔향시간의 측정에 의해 구한 흡음률은 벽면의 음향 임피던스와 상호 연관성을 가진다.

입사파의 복소진폭을 A, 반사파의 복소진폭을 B라 하면 벽면의 임피던스 Z와 흡음률 α 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Z = \rho_0 c \frac{A+B}{A-B} = \rho_0 c (r+jx) \quad (1)$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{B}{A} \right|^2 \quad (2)$$

따라서 식(2)와 식(3)으로부터 흡음률과 임피던스의 관계는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 - x^2} \quad (3)$$

윗 식에서 보면 흡음률의 변화에 따라 이를 만족하는 r과 x는 함수관계가 있음을 알 수 있다.

잔향실의 벽면이 완전반사체라면 벽면의 흡음률은 0이 되므로 수치해석시 경계조건으로 음향 임피던스의 허수항의 크기를 무한대, 즉 입자속도의 크기를 0으로 사용해야 한다. 하지만 실제로 모든 벽체는 어느정도의 흡음률을 갖고 있으므로 식(4)를 만족하는 임피던스 경계조건을 사용해야 한다.

2.2 잔향실 내에서의 음향파워레벨 측정 기준

ISO 3741, ISO 3742 그리고 KS A 0704는 모두 잔향실 내에서의 음향파워레벨 측정에 대한 기준으로서 실제의 측정에 앞서 스피커에 의한 예비측정을 통해 측정방법을 결정하는 내용을 포함하고 있다.

KS A 0704에는 ISO 3741, ISO 3742가 모두 포함되어 있으며 ISO 3741과 ISO 3742의 가장 큰 차이점은 예비측정시 사용하는 음원의 종류 및 분석방법에 있다. 즉, ISO 3741은 스피커에서 옥타브 밴드별로 음을 발생시켜 음압레벨을 측정하도록 되어 있고 ISO 3742는 해당 옥타브 밴드를 이루는 순음들을 약 1Hz 간격씩 발생시켜 각각 음압레벨을 측정한 후 각 옥타브 밴드별로 합산하도록 되어 있다.

실제 측정시 필요한 음원의 위치수 및 음압레벨의 측정위치수는 위에서 측정한 음압레벨에 의해 계산된 음장의 표준편차의 결과로서 정해진다. 즉, 예를 들어 중심주파수가 100Hz인 1/3 옥타브 밴드를 기준으로 했을 때 ISO 3741에 따라 측정한 결과의 표준편차가 1.5dB 이내일 경우는 음원의 위치 1곳, 측정위치는 3곳으로 하며 이는 ISO 3742에 따라 측정한 결과의 표준편차가 3.0dB 이내일 경우에 해당된다.

한편 두 기준 모두 음원의 위치는 바닥을 제외한 잔향실 내의 모든 벽면으로부터 해당 옥타브 밴드의 중심주파수에 따라 정해지는 파장의 1/2 이상 떨어져야 하며 각 측정위치 또한 모든 벽면, 음원, 그리고 인접 측정위치로부터 반파장 이상 떨어져 있도록 정하고 있다.

3. 잔향실내 음장해석

3.1 수치해석

잔향실의 모델링은 Fig. 1과 같은 5각 형태의 경우, 모 업체의 잔향실을 대상으로하여 실측치와 동일하게 하였고 Fig. 2와 같은 4각 형태의 경우는 5각 형태와 내부 체적이 같도록 각 변의 길이를 조정하여 수행하였다. 미국이나 유럽 등지에는 정방형 형태의 잔향실도 찾아 볼 수 있으나 현재 국내에 있는 잔향실은 모두 부정형, 특히 5각 형태로서 모델링 작업시 각 모서리의 길이가 정확치 않은 경우, 벽면과 벽면 사이의 기울임 각도가 실제와 다르게 되어 음장해석결과가 달라질 수 있으나 저주파 범위에서는 거의 변화가 없다고

가정하여 약간의 치수차는 무시하였다. 한편, 잔향실의 내부 경계면은 4각요소로 이산화하였고 해석결과의 신뢰도를 위하여 모든 요소의 각 변의 길이는 최대 관심 주파수의 1/6 파장 이내로 하였다.

계산은 SYSNOISE를 이용하였으며 ISO 3742에 따라 중심주파수 100Hz인 1/3 옥타브 밴드내의 주파수 성분 90Hz~112Hz에 대하여 1Hz 간격으로 계산한 후 음장내에 위치한 field point mesh에서 각 주파수 성분에 대해 구한 음압레벨을 1/3 옥타브 밴드값으로 에너지 합산하였다. 이때 경계조건으로는 입자속도가 0인 rigid 조건과 흡음률에 따른 임피던스 조건을 이용하였고 동일한 흡음률에 대해서 Table 1과 같이 임피던스의 실수항과 허수항을 변화시켰다. 또한 5각형과 4각형의 잔향실 형상에 대하여 동일한 경계조건을 사용함으로써 형상 변화에 대한 영향을 고찰하였다.

한편 음장 내부의 field point mesh 상에서 ISO 기준을 만족하는 임의의 3 point를 선택하여 음압레벨의 표준편차를 계산하였고 3 point의 조합을 점차 증가시킴으로서 평균 표준편차값이 일정한 값으로 수렴되도록 하였다.

3.2 해석결과

(1) 5각 형태의 잔향실

Fig. 3은 Fig. 1과 같은 5각 형태의 잔향실에 대하여 입자속도가 0인 경계조건을 사용하였을 때, 중심주파수 100Hz의 1/3옥타브 밴드로 합산된 내부 음장이고 Fig. 4는 Fig. 3의 음장에 대한 표준편차이다. 그림에서 약 1.6dB의 평균 표준편차를 볼 수 있고 이러한 결과는 ISO 3742 기준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 흡음률이 0.0024, 0.0091일 때 임피던스의 실수항과 허수항의 변화에 따른 내부 음장의 표준편차이다. 그림에서 보면 동일한 흡음률 상태에서 임피던스의 각 항에 따른 영향이 거의 없으며 흡음률의 변화에 따른 영향도 미미함을 알 수 있다. 또한 Fig. 4와 비교해보면 본 연구에서 대상으로 한 5각 형태의 잔향실

은 경계조건에 따른 내부음장 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

(2) 4각 형태의 잔향실

Fig. 7은 Fig. 2와 같은 4각 형태의 잔향실에 대하여 입자속도가 0인 경계조건을 사용하였을 때, 중심주파수 100Hz의 1/3옥타브 밴드로 합산된 내부 음장이고 Fig. 8은 Fig. 7의 음장에 대한 표준편차이다. 그림에서 약 2.5dB의 평균 표준편차를 볼 수 있는데 이로부터 4각 형태의 잔향실이 5각 형태의 잔향실에 비해 확산음장의 형태가 불균일해짐을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 흡음률이 0.0024, 0.0091일 때 임피던스의 실수항과 허수항의 변화에 따른 내부 음장의 표준편차이다. 그림에서 보면 동일한 흡음률 상태에서 임피던스의 각 항에 따른 영향은 거의 없으나 흡음률이 높아질수록 평균 표준편차값이 증가하고 있다.

4. 결론

잔향실의 내부 음장을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 벽면의 흡음률이 동일한 경우는 음향 임피던스의 실수항과 허수항의 변화, 즉 위상의 변화에 따른 음장의 변화가 없다.
- (2) 5각 형태의 잔향실은 벽면의 흡음률 변화에 따른 음장의 변화가 없다.
- (3) 4각 형태의 잔향실은 5각 형태의 잔향실보다는 음장이 불균일하며 벽면의 흡음률이 증가함에 따라 음압레벨의 표준편차가 커진다.

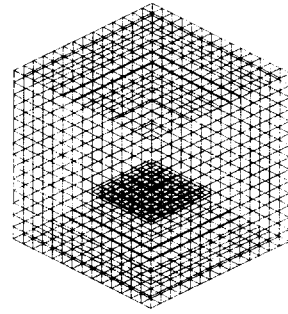
참고문헌

- 1) L. E. Kinsler, "Fundamentals of acoustics"
- 2) A. A. Becker, "The boundary element method in engineering"
- 3) International Standard 3741, 3742 (1988)
- 4) T. J. Schultz, "Sound power measurements"

in a reverberant room", J. Sound Vib. 16(1), pp. 119~129 (1971)

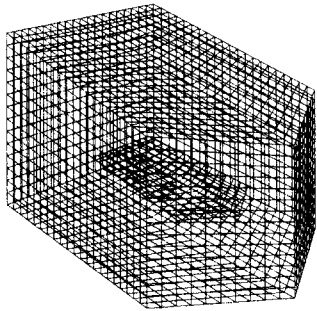
Table 1 Boundary conditions

α	x	r	Z	phase
0.0024	100	1658.6	677937.6	3.45
	500	1497.7	644214.5	18.46
	739.2	1204.3	576544.7	31.54
0.0091	40	433.87	177769.7	5.27
	100	413.37	173519.8	13.6
	200	307.46	149654.4	33.05



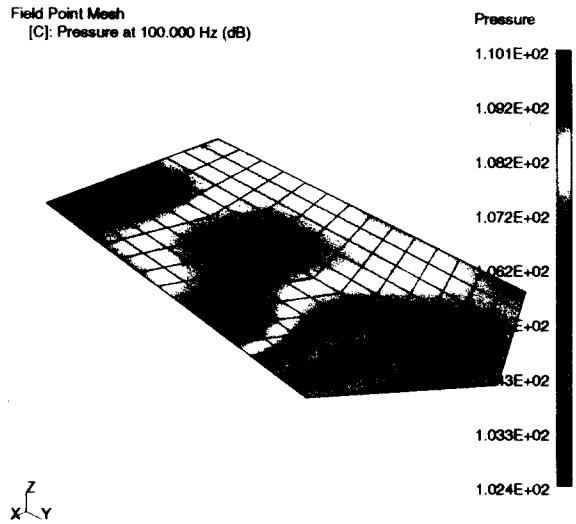
z
x - y

Fig. 2 Room model of rectangular type



z
x - y

Fig. 1 Room model of pentagonal type



z
x - y

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

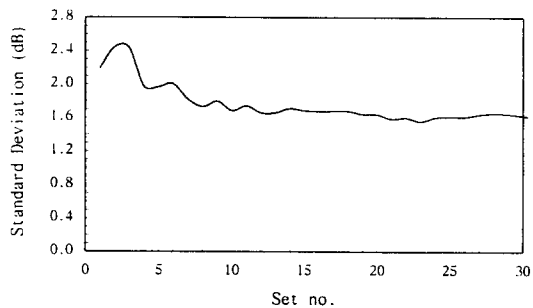


Fig. 4 Standard deviation of Fig. 3

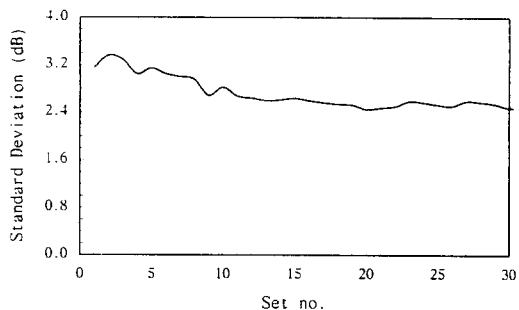


Fig. 8 Standard deviation of Fig. 7

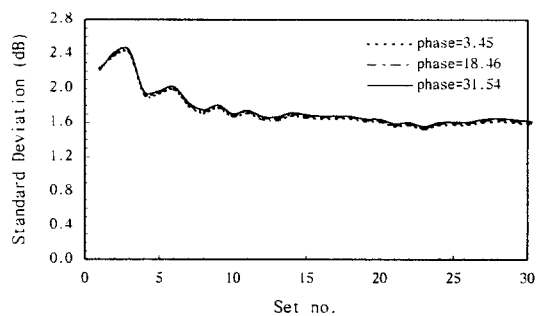


Fig. 5 Standard deviations of pentagonal room with $\alpha=0.0024$

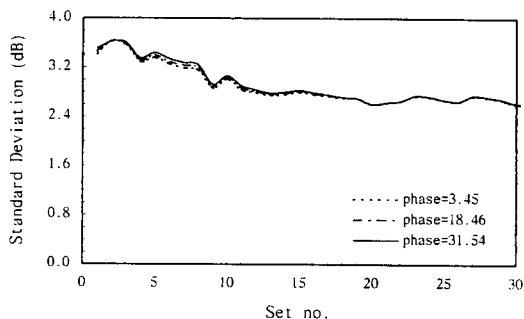


Fig. 9 Standard deviations of rectangular room with $\alpha=0.0024$

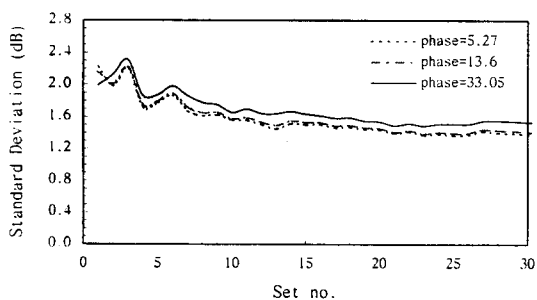


Fig. 6 Standard deviations of pentagonal room with $\alpha=0.0091$

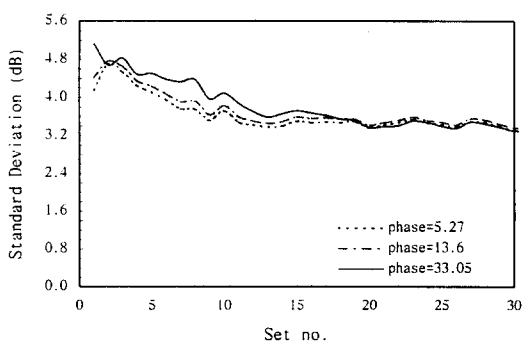


Fig. 10 Standard deviations of rectangular room with $\alpha=0.0091$

Field Point Mesh
[C]: Pressure at 100.000 Hz (dB)

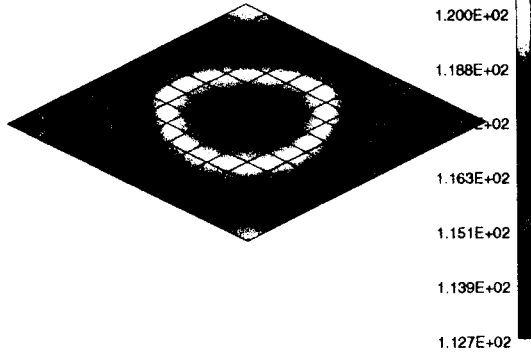


Fig. 7 Interior sound field of rectangular room
with $\alpha = 0$