

규준화 바닥충격음레벨 측정시 잔향시간의 편차요인 분석

Analysis of the Deviation Factor in a Reverberation Time to Measuring the Normalized Impact Sound Pressure Level

이주원*·홍병국**·이동훈***·권영필****

J.W. Lee, B.K. Hong, D.H. Lee, Y.P. Kwon

Key Words : Reverberation Time(잔향시간), Normalized Impact Sound Pressure Level(규준화 바닥충격음레벨)
Room Natural Mode(실내 모드)

요약

규준화 바닥충격음레벨 평가시 잔향시간은 흡음력 보정을 위해서 필수적으로 고려해야 할 사항이다. 그러나, 잔향시간의 측정 편차가 심하기 때문에 이로인해 규준화 바닥충격음레벨이 5dB 이상씩 변동하는 경우가 생긴다. 잔향시간 측정 편차의 원인은 실의 형상에 따른 고유모드 분포로 설명할 수 있으며, 측정시 계측기에서의 원인, 특히 동특성에 따라 측정 편차가 심하다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 또한, 잔향곡선은 직선적인 형태일 경우에 정확한 측정이 가능하나, 저주파수 대역에서는 잔향곡선에 요철이 많이 생기므로 측정 데이터들을 이용하여 잔향시간을 산출할 때 세심한 주의가 요구된다.

1. 서론

건축물 실내공간에서의 흡음력은 소리의 전달 과정이나 음성의 명료성 측면에서 중요한 요소로 작용한다. 그래서, 실내 마감재에 의한 흡음력의 변화에 따라 소음레벨의 증감 정도는 거주자가 잔향감을 통해서 충분히 인지할 정도인데, 실내의 소음도 평가시 이러한 흡음력의 고려와 보정은 중요한 사항이 된다.

공동주택에서의 상하층간 바닥충격음 평가시에도 경량충격음의 경우 수음세대의 흡음력을 음압레벨에 보정하도록 규정되어 있는데, 이 때 실내의 흡음력을 평가하기 위해 일반적으로 채용되는 방법이 잔향시간의 측정이다. 잔향시간의 개념은 실내에서 음원이 가동되다 순간적으로 음원을 끈 상태에서 실내의 음에너지 밀도가 100 만분의 1 만큼(음압레벨로 60dB 만큼) 떨어지는 시간으로 설명된다. 최근의 계측장비는 장비에 내장된 프로그램에 의해 잔향시간의 측정이 음원 발생, 수음, 계산, 값 출력에 일련의 자동과정으로 이루어지게끔 되어있어 측정자가 손쉽게 잔향시간을 계산할 수 있는만큼 잔향시간 측정의 어려움이나 중요성에 대해 별로 생각을 하지 않는다. 그러나, 잔향

시간의 측정은 생각만큼 그리 쉬운 것이 아니며 측정값의 편차를 유발하는 요인이 많이 존재한다.

층간소음 평가시 경량충격음레벨에 흡음력 보정값을 취해주면 경우에 따라 5dB 이상까지 편차가 발생할 수 있는데, 이러한 5dB 차이는 바닥구조에 소음 저감층을 적용했을 때의 저감효과와도 같을 정도이기 때문에 단순히 오차범위라고 귀결짓기에는 무리가 따른다.

본 논문에서는 잔향시간 측정시 충분히 발생할 수 있는 편차 요인들을 실내 고유모드 관점에서 이론적으로 검토하고, 측정 조건들에 의한 편차 요인을 분석하고자 한다.

2. 규준화 바닥충격음레벨

2.1 흡음력을 보정한 규준화 바닥충격음레벨

공동주택 층간소음 평가 중 경량충격음은 규준화 바닥충격음레벨¹⁾이라 하여 다음 식(1)처럼 측정된 음압레벨에 실내 흡음력 보정을 취하도록 되어 있다.

$$L'_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (1)$$

여기에서 A_0 는 일반적인 주택거실의 잔향시간 0.5 초를 적용하여 실제적이거나 주파수에 관계없이 일괄적으로 10[m²]을 사용하도록 KS 규정에 명시되어 있다.

* 서울산업대학교 소음진동연구센터 연구원
E-mail : jwlee@jwl.pe.kr
Tel : (02) 979-7331, Fax : (02) 979-7331
** 서울산업대학교 기계공학과 대학원
*** 서울산업대학교 기계공학과
**** 숭실대학교 기계공학과

¹⁾ KS F 2810-1 : 2000 바닥충격음 차단성능 현장측정방법

2.2 잔향공식의 적용

실내의 흡음력은 일반적으로 세이빈의 잔향공식(Sabine's equation)을 이용하여 계산한다.

$$A = \frac{0.161 V}{T} \quad (2)$$

세이빈의 잔향공식은 기하음향학에 기초를 두고 있으며 실내를 확산음장으로 가정하고 있기 때문에 흡음재료를 실내 어느 위치에 놓아도 그 결과에는 변함이 없다. 즉, 음원과 수음 위치가 어디에 있거나 잔향시간은 변하지 않게 된다. 그러나, 실제의 실내는 벽, 바닥, 천장 등에 흡음성 마감재가 산재되어 있기 때문에 완전한 확산음장으로 보기 어렵고, 따라서 음원과 수음 위치에 의해 그 값이 변동될 수밖에 없다.

이 외에 중요한 것이 실내의 고유모드 분포에 의해서 잔향시간이 변한다는 것이다. 이는 실내를 파동음향학 형태로 해석함으로써 설명할 수 있는데 다음 장에서 논한다. 파동음향학적인 해석은 이론적으로도 난해하고 실제 현상과 부합시키기에 쉽지 않기 때문에, 전술한 것처럼 세이빈의 잔향공식은 실내를 기하음향학적으로 단순화시켜 해석하려고 한다.

복합적인 원인들로 인해 정확한 잔향시간의 도출은 실제적으로 쉽지 않으며, 측정 편차가 다소 발생한다. 잔향시간의 편차는 흡음력 계산의 편차를 유발하며, 이는 곧 관심 사항인 표준화 바닥층격음레벨에 영향을 주게 된다.

3. 실(室)의 고유모드 분포 해석

3.1 이론적 배경

건축물 공간에서 실(room)은 다수의 고유주파수(natural frequency)를 갖는 진동계로서, 음원에서 어떤 주파수의 음이 방출되는 경우 강제(強制)진동을 하는 것이 된다. 그런데, 음원이 정지되어 과도상태가 되면 음원 주파수는 급속히 소멸되며, 진동에너지는 음원 주파수에 근접한 고유주파수로 옮겨져 잔향이 된다고 설명할 수 있다.

잔향과정에 있어서는 여러 개의 고유진동이 여진(餘震)하여 서로 간섭을 일으키면서 감쇠하기 때문에 잔향곡선에는 진폭변화가 생긴다. 또한, 고유진동 각각의 감쇠율이 다르기 때문에 상대적으로 감쇠율이 작은 고유진동만 남아 잔향곡선이 찍어지고 대수감쇠를 하지 않는 것이 된다.

저주파수의 영역에서는 고유진동수가 적기 때문에 변동이 크고 구배가 크게 나타나는 경우가

많으나, 고주파수의 범위에서는 고유진동수가 많아지고 밀도가 높기 때문에 직선에 가까운 구배를 갖는 감쇠를 하게 된다.

3.2 실의 고유모드 해석

실내에 분포하는 3 차원 공간의 음파에 대한 파동방정식에 의해 고유주파수를 구하면

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (3)$$

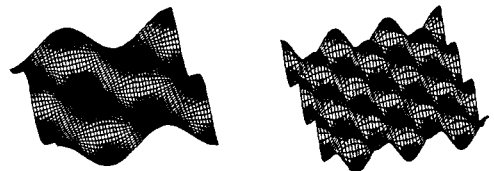
과 같이 얻어진다. 여기서, n_x, n_y, n_z 는 모드의 차수를 나타낸다.

식(3)을 이용하여 1.5m×1.5m×1.0m 치수의 실내에 존재하는 옥타브밴드 125Hz 내의 고유주파수를 계산한 결과 예를 Table 1에 나타내었다.

모드	주파수(Hz)	모드	주파수(Hz)
(1,0,0)	114.7	(0,1,0)	114.7
(1,1,0)	162.2	(0,0,1)	172.0

Table 1의 결과는 계산값의 일부이며 고유주파수는 총 32 개가 존재한다. 또한, 옥타브밴드 500Hz 내에 존재하는 고유주파수 개수를 구해보면 총 106 개가 얻어진다.

즉, 주파수가 높아질수록 실내에 존재하는 고유주파수의 개수는 급속도로 증가하여 모드밀도가 높아지게 된다. 이를 3 차원 형상으로 표현하면 Fig. 1과 같다. 저주파수 영역에서는 고유주파수가 적어 즉, 모드밀도가 낮아 잔향곡선의 굴곡이 심해진다. 반면, 고주파수 영역에서는 모드밀도가 높아서 근접하는 고유진동수들이 서로 간섭을 일으키면서 잔향곡선이 직선에 가까운 구배를 나타내고, 측정의 재연성이 보장된다.



(a) Low frequency (b) High frequency

Fig. 1 실내의 고유모드 분포 해석 예

4. 잔향시간의 측정 편차 검출실험

4.1 실험 개요

잔향시간 측정에 관계되는 편차 요인들의 검출을 위해 가로×세로×높이가 7.27m×6.96m×2.55m 인 장방형 실에서 측정 조건을 변화시키며 잔향시간을 측정하였다.

음원 조건으로는 다음 세 가지를 고려하였는데, 주파수 전대역 레벨이 일정한 백색잡음(white noise)을 무지향성 스피커를 이용하여 노이즈 단속법(interrupted noise method)으로 방출하였다. 그리고, 대표적인 잔향시간 측정 기구인 권총(pistol)을 이용하여 임펄스 응답적분법(integrated impulse response method)에 의해 측정하였다. 마지막으로 배경소음의 영향이 심한 조건일 때 주로 사용하는 옥타브밴드 주파수별 음원을 이용하였다.

수음 조건으로는 계측기의 동특성을 조절하여 측정 분석하였다. 계측기에서 신호를 수집하는 동특성(sampling time)이 잔향시간 결과에 큰 영향을 미칠 것으로 판단하고 통상적으로 소음측정에 적용하는 0.125(1/8)초(fast)를 비롯한 다음과 같은 5 단계의 동특성으로 조절하면서 동일 위치에서 동일한 음원을 이용하여 측정하였다. 수음점의 위치는 실내 모드분포를 고려하여 실내 모서리를 피하고 모든 벽면에서 1.5m 이상 이격된 위치로 선정하였다.

Table 2 FFT Analyzer 의 동특성 조절

동특성(sec)	1/8	1/16	1/64	1/128	1/512
* 음원은 pistol 사용					

마지막으로 잔향곡선의 기울기 형태로부터 잔향시간을 산출하는 방법상의 문제점에 대해서 검토하였다.

4.2 실험결과 및 분석

(1) 음원 조건에 따른 잔향시간 비교

무지향성 스피커를 이용한 백색잡음과 옥타브밴드 음원 출력, 그리고 pistol 을 이용한 음원 출력에 의한 잔향시간 측정결과는 다음 Table 3 과 같다. 3 회 측정에 의한 평균값을 취하였으며 수음 위치는 동일하게 하였다. 세 경우의 결과가 거의 유사하였으며, 500Hz 와 1kHz 에서 최대 0.2 초 정도의 편차가 나타나긴 했으나 이 정도의 편차는

규준화 바닥충격음레벨로 1dB 정도의 차이므로 큰 영향을 끼친다고는 볼 수 없다.

이러한 결과는 실의 형상에 영향이 있다고 판단된다. 본 실험 대상의 실은 일반적인 거주공간보다 큰 체적이고 형상 자체가 장방형이며, 또한 실내면이 대부분 반사성이라 잔향시간이 비교적 길고 음의 파동성에 영향을 주는 조건이 적다는 점에서 음원 조건에 따른 잔향시간 편차가 작았다. 그러나, 본 실험에서는 음원 조건 하나의 요인만에 대한 평가이므로 실 형상과 같은 다른 요인들의 영향을 최대한 배제한다고 보면, 음원 조건에 의한 잔향시간 편차는 무시할 수 있을 정도로 작다고 평가할 수 있다.

Table 3 음원 조건별 잔향시간 측정결과
(단위 : 주파수 Hz, 잔향시간 sec)

	125	250	500	1k	2k	4k
음원 1	1.8	1.9	2.1	1.8	1.9	1.9
음원 2	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8
음원 3	1.8	1.9	1.9	2.0	1.9	1.8

* 음원 1 : speaker white noise
음원 2 : pistol impulse noise
음원 3 : speaker octaveband noise

(2) 계측기의 동특성 조절에 따른 잔향시간 비교
동특성은 음압의 측정이나 진동 가속도의 측정 등에 따라 적절하게 조절해야 하며, 의도하는 신호 분석과 상이한 동특성을 선정할 경우 잘못된 측정결과를 초래할 수 있다.

잔향시간은 불과 수 ms 에서 수 초밖에 안되는 시간내에 신호 수집이 되어야 하므로 계측기의 동특성 선정은 무엇보다도 중요한 의미를 지니고 있으리라 판단한다.

5 단계의 동특성 조절에 따른 잔향시간 측정값은 Table 4 와 같다. 일반적으로 사용하는 1/8 초, 즉 0.125 초의 경우 전 주파수 대역에서, 상대적으로 빠른 동특성에서 측정한 잔향시간보다 길게 나왔다. 대략 0.5 초 내외의 긴 잔향시간이 측정되었으며, 이는 규준화 바닥충격음레벨 2~3dB 정도의 차이이다. 전 주파수 대역에서 모두 이러한 차이를 보이고 있으므로 역 A 곡선에 의한 경량충격음 평가에서는 상당한 차이가 나타날 수 있음이 확인되었다.

1/512 초의 경우는 잔향곡선의 구배에 많은 요철이 발생하여 적합한 잔향시간 평가가 불가능하였다. 이 이유는, 음원이 소멸됨과 동시에 직접음은 없어지고 실내에 남아있는 반사음과 무수히 존

재하는 고유주파수의 여진에 의한 반응이 아주 짧은 동특성에 의해서 계속적으로 수집이 되므로 잔향곡선에 순간적인 꺾임이나 상승 등 요철이 반복되는 것이다. 이 결과는 음의 파동성을 잘 표현해주는 것으로 1/128 초의 동특성에서도 저주파 대역에서 이러한 현상이 다소 발생하였으며, 1/64 초부터는 직선적인 잔향곡선 형태를 보여주었다.

Table 4 계측기의 동특성 조절에 따른 잔향시간 측정결과 (단위 : 동특성, 잔향시간 sec)

동특성	125	250	500	1k	2k	4k
1/8	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8
1/16	1.2	1.6	1.6	1.7	1.5	1.3
1/64	1.2	1.7	1.4	1.8	1.5	1.2
1/128	1.2	1.5	1.5	1.5	1.6	1.2
1/512	-	-	-	-	-	-

* 음원은 pistol 사용

(3) 잔향곡선에 의한 잔향시간 산출 편차

Fig. 2 는 1/64 초의 동특성 설정 상태에서 주파수별 잔향곡선을 도시한 그래프이다. 고주파수 대역에서는 실내의 고유모드가 무수히 많이 존재하므로 잔향곡선 형태가 직선적으로 나타나 잔향시간 산출에 문제가 없으나, 저주파수 대역으로 갈수록 잔향곡선의 구배에 요철이 발생하게 된다. 이는 저주파수 대역에서 실내 고유모드가 적어짐에 기인하는 것으로 이러한 경우, 잔향시간 산출에 편차가 발생할 수 밖에 없다.

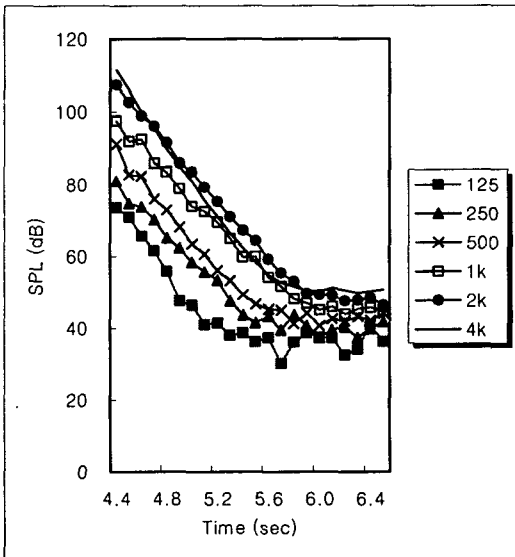


Fig. 2 주파수별 잔향시간 곡선 예

최고 레벨에서 -5dB 되는 지점에서부터 최소한 -25dB 까지 감소되는 지점의 시간을 획득하여 잔향시간을 계산하게 되는데, 직선적인 그래프 형상이 아니기 때문에 얻어진 데이터들로부터 직선회귀와 같은 방법을 통해서 잔향시간을 계산한다. 이 과정에서 오차를 포함하여 누적된 오차만큼 잔향시간의 편차를 유발하게 되는 것이다.

보통의 계측기들은 그 중간과정을 생략한 채 최종 잔향시간만을 디스플레이하기 때문에 프로그램의 알고리즘에 어떠한 문제점이 포함되어 있는지 알 수 없다. 따라서, 측정에 사용한 계측기가 바뀌게 되면 잔향시간도 아울러 변하게 되는 것이다.

5. 결론

본 논문은 공동주택의 규준화 바닥충격음레벨 평가시 고려되는 잔향시간의 편차 요인에 대해서 검토한 것으로 다음과 같은 사항을 확인할 수 있었다.

1) 실내에 존재하는 고유모드 분포에 의해서 잔향시간은 변동하게 되며 주파수에 따라서도 저주파수로 갈수록 고유모드의 밀도가 낮아져 잔향시간의 편차는 심해진다.

2) 무지향성 스피커에 의한 백색잡음, 옥타브 밴드별 노이즈, 권총 등의 음원조건에 따라서 잔향시간을 측정 비교해 본 결과 편차는 거의 없음을 확인하였다.

3) 계측기의 동특성 조절에 따라서 잔향시간을 비교해 본 결과 통상 사용하는 0.125 초의 경우가 다른 동특성 결과보다 전주파수 대역에서 0.5 초 내외의 긴 잔향시간이 검출되어 동특성에 따라 규준화 레벨에 상당한 영향을 끼칠 수도 있다.

4) 잔향곡선은 직선적인 형태일 경우에 정확한 측정이 가능하나, 저주파수 대역에서는 곡선에 요철이 많이 발생하므로 측정 데이터들을 이용하여 잔향시간을 산출할 때 세심한 주의가 요구된다.

참고 문헌

(1) Leo L. Beranek, McGraw-Hill, Noise and Vibration Control
 (2) Lawrence E. Kinsler & Austin R. Frey, John Wiley & Sons, Fundamentals of Acoustics
 (3) Randall F. Barron, Marcel Dekker Inc., Industrial Noise Control and Acoustics
 (4) 前川純一, 技文堂, 建築音響
 (5) KS F 2810-1 : 2000 바닥충격음 차단성능 현장측정 방법