

실내음향의 확산성에 대한 실험적 연구

박계균, 한찬훈

충북대학교 공과대학 건축공학과

An Experimental Study on the Surface Diffusivity of Room Acoustics

Park Kye-Kyun, Haan Chan-Hoon

Dept. of Architectural Engineering, Chungbuk National University

mazeltov@trut.chungbuk.ac.kr chhaan@cbucc.chungbuk.ac.kr

요약

본 논문은 1997년 Haan과 Fricke이 발표한 논문¹⁾에서 제시한 확산성의 중요성에 대한 조사에 기초하여 실제 홀에서 표면확산성이 실내음향성능에 미치는 영향을 분석해 보았다. 실의 규모가 비슷하고 각기 확산성이 다른 3개의 홀을 선정하였으며, 두 개의 홀은 장방형 평면이며 한 개는 부채꼴평면을 가지고 있다. 각각의 홀에 대해서 한 개의 음원과 8개의 수음점을 설정하여 현장실험과 시뮬레이션을 수행하였고 RT와 SPL의 두 가지 음향평가요소를 사용하여 분석하였다. 분석결과 확산성이 좋을수록 잔향시간이 길어지고 음압레벨이 높아진다.

Cross-correlation Coefficient)나 SDI(Surface Diffusivity Index)와 같은 공간적 평가요소를 접목시키려는 움직임이 두드러진다. 특히 SDI처럼 표면확산성(表面擴散性, Surface Diffusivity)에 관련된 평가요소는 홀의 전반적인 음향성능을 평가하는데 아주 유용할 것으로 보인다. 확산(擴散, Diffusion)이 실의 음향성능에 필요하다는 것은 널리 알려진 사실이다. 그러나 확산에 대한 연구는 활발히 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 실제 적용대상홀에서 현장측정과 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 표면확산성의 영향을 평가하고 두 결과를 비교함으로써 마감재의 표면확산성이 실내음향성능에 미치는 영향을 분석하는 데 있다.

2. 확산성 이론

1. 서론

실내음향성능(室內音響性能, room acoustics quality)을 구명하기 위해 수많은 음향평가요소가 개발되어지고 제시되어 왔다. 그러나 아직도 실내음향성능의 구명은 불분명한 상태이다. 건축음향이 물리학의 한 분야임에도 불구하고 다른 물리학 분야의 발전에 비해 상대적으로 더딘 것은 실내음향성능의 평가가 객관적이 물리적 수치가 아닌 청취자의 주관적인 평가에 의해 만족되어야 하는 것에 있다.

객관적인 평가요소를 주관적인 평가에 접목시키려는 움직임은 오래 전부터 이루어 졌는데, 최근에는 잔향시간(殘香時間), 명료도(明瞭度, Clarity)나 초기지연시간(初期遲延時間, ITDG, Initial Time Delay Gap)과 같은 시간적 평가요소보다 측벽효과(側壁效果, LF, Lateral Fraction), 양이효과(兩耳效果, IACC, Interaural

관서트홀에서는 소리가 되도록 많은 방향에서 청취자에게 도달할수록 확산음장(擴散音場)을 이룰 수 있음으로 좋은 소리로 간주된다. 소리의 확산이 홀의 음향에 영향을 미치는 중요한 요소라고 믿으면서도 그 역할에 대한 증명은 매우 미미하였다. 그 이유는 확산성을 측정하기가 기술적으로 어려웠고 Meyer²⁾가 발전시킨 확산성의 측정방법에도 불구하고 실 표면에서의 확산요소의 역할을 계량화하기가 어려웠기 때문이었다.

확산은 한 점에 도달하는 소리에너지의 방향적 분포의 척도로 정의할 수 있다. 확산성을 측정하고 잔향실에서 확산의 정도를 평가하기 위한 몇 가지 방법이 제시되긴 했지만 홀의 음향을 평가하기에는 만족스러운 것은 없었다.

Schultz³⁾는 1971년에 실내에 확산체를 사용하고, 격자로 벌어진 벽표면을 적용하고, 흡음을 추가함으로써

확산을 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 잔향실에서의 확산음장에 관한 연구⁴⁵⁾로부터 흡음성이 높은 재료가 많은 큰 공간에서 효과적인 확산음장을 만들기 위하여 불규칙한 방향으로 설정된 많은 양의 확산패널을 설치하는 것이 필수적이라고 밝혀졌다. 이것은 청중으로 가득 찬 객석이 높은 흡음성을 갖는 음악당과 같은 홀에서도 동일한 조건의 상태가 됨을 의미한다. 이는 또한 확산음장을 만들기 위해서는 확산체를 공간 전체에 여기 저기 흩어져서 설치하는 것이 필요함을 나타낸다.

Beranek⁶⁾은 벽과 천장의 불규칙성에 근거하여 음 확산에 대한 평가척도(rating scale)를 제시하였다. 그는 소리의 좋은 확산을 위한 두 개의 요구조건을 제시하였다. 첫 번째는 실의 잔향이 짧을 경우 작은 반사회수 이후에 소리가 빨리 소멸되므로 잔향시간이 상당히 길어야만 한다는 것이다. 이것은 소리가 실에서 확산되기 위해서는 많은 반사를 거듭해야만 함으로 긴 잔향시간은 확산에 도움이 되기 때문이다. Beranek의 두 번째 요구치는 홀의 천장과 벽이 소리의 파장이 표면으로부터 반사될 때 확산할 수 있도록 불규칙적이어야 한다는 것이다.

Strom⁷⁾은 청중이나 음악가에게 인상되어지는 홀의 음상(sound picture)은 좌석의 위치와 반사면의 지향성, 실의 모양, 실의 규모, 그리고 실내표면의 반사특성 및 확산정도에 의하여 강하게 영향받는다 하였다. 증거가 충분하지는 않지만, 훌륭하다고 평가된 콘서트홀은 측벽, 발코니 전면, 천장, 무대 위의 벽에 확산면을 가지고 있다고 인식된다. 확실한 것은 19세기에 지어진 음향적으로 뛰어난 많은 홀들은 격자무늬의 깊은 천장과 벽에 노출된 기둥과 회랑 및 조각들을 가지고 있다. 종종 확산체는 3차원상의 정형화된 플라스틱나 실내표면에 새겨진 나무로 된 장식으로 나타나고 있다. 여기서 요구되는 것은 이런 확산 요소의 중요성이 정량화 되는 것일 것이다.

음악당에서 음의 확산에 영향을 미치는 반사체와 확산체의 효과를 알기 위한 몇 개의 연구가 실행되었다. Somerville⁸⁾은 음악당의 무대 위에 설치된 대형의 canopy나 반사판이 주관적으로 뛰어난 음감(tonal quality)을 제공하고 음원의 수직적인 상승의 효과를 제공한다고 주장하였다. Schroeder⁹⁾는 4분적 확산체(quadratic-residue diffuser) 이론에 따른 천장 디자인을 제시하였는데, 이것은 측면의 확산음을 증가시킴으로써 음악당내에서 청취되는 양이음(兩耳音, binaural sound)의 차이를 극대화 할 수 있게 하고 있다.

Strom은 실내표면의 불규칙한 요소가 객석과 무대의 음에너지 분포를 얼마나 변화시키는지에 대하여 조사하였다. 그는 무대 위에서 확산체의 유무에 따른 음의 세

기를 측정하였다. 조사 결과 소리의 확산성은 천장과 벽에 확산체를 부여함에 따라 증가하였다. 이 결과는 무대위의 확산체는 연주자를 위한 음에너지 분포를 개선시키고 객석을 향한 초기에너지의 방출을 증가시킨다는 것을 의미한다. Strom은 또한 큰 홀에서 확산체를 변화시키기 위하여 3차원의 음선추적(ray-tracing) 모델을 사용하였다. 그 결과 확산체의 사용은 무대에서 뿐만 아니라 객석에서도 초기반사음의 보다 평탄한 시간 분포를 발생하였다. 이 결과는 또한 실내표면을 변화시키는 것이 객석에서의 음분포를 수정할 수 있다는 것을 의미한다.

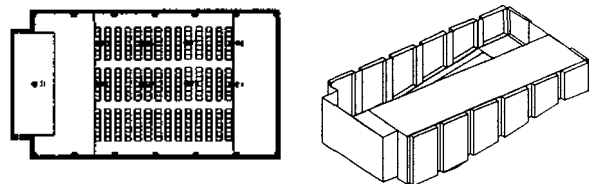
3. 현장실험

3.1 적용대상홀의 선정

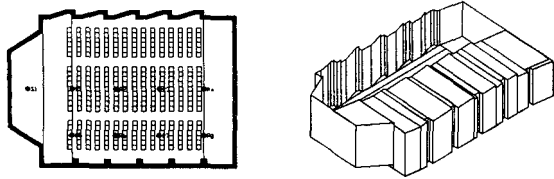
실제 적용대상홀은 충북대학교 안에 있는 규모와 용도가 비슷한 합동강의실 3개를 선택하였다. 표면의 확산성을 고려하여 측벽과 천장이 거의 평면을 이루고 있어 확산성이 적은 홀 A, 벽과 천장이 불규칙하여 홀 A에 비해 더 많은 확산성을 가진 홀 B, 양쪽 측벽에 확산체를 가지고 있는 홀 C를 선택하였다. 적용대상홀의 제원은 아래의 <표 1>과 같고, 각 홀의 평면 및 3D모델과 측정위치는 (그림 1)~(그림 3)과 같다.

<표 1> 적용대상홀의 제원

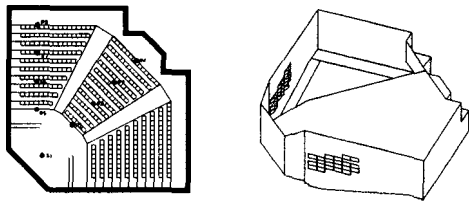
구 분	홀 A	홀 B	홀 C
소 속	공과대학	자연대학	사회대학
사용목적	강의	강의	강의
용 적(m ²)	1135	1416	1555
좌석수(석)	294	315	350
바닥면적(m ²)	254.4	289.2	282.8
평면형식	장방형	장방형	부채꼴형



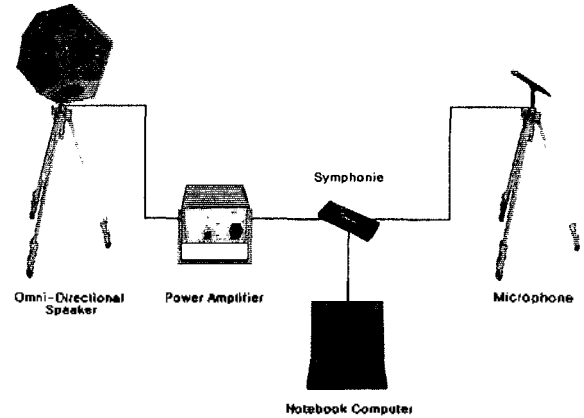
(그림 1) 홀 A의 평면 및 3D모델과 측정위치(수음점)



(그림 2) 홀 B의 평면 및 3D모델과 측정위치(수음점)



(그림 3) 홀 C의 평면 및 3D모델과 측정위치(수음점)



(그림 4) 측정기가 구성 및 배열

3.2 음원과 측정위치(수음점)

음원(S1)은 무대의 중앙점을 선정하였다. 측정위치는 3개의 적용대상홀이 무대 중심선을 따라 대칭-홀 B에서는 양쪽 측벽이 약간의 차이가 있으나 거의 대칭을 이룬다-을 이루기 때문에 무대중심선을 따라 4개의 측정위치(수음점, R1~R8)와 한쪽에 4개의 측정위치를 설정하여 측정하였다. 각각의 대상 홀의 규모가 비슷하기 때문에 측정위치의 개수는 모두 8개로 같이 적용하였다. 음원과 측정위치(수음점)는 (그림 1) ~ (그림 6)과 같다.

3.3 측정방법 및 측정기기

측정방법은 각각 홀의 음원에서 같은 레벨(90dB)의 화이트 노이즈(white noise)를 발생시켜서 각각 측정위치에서 5번씩 측정하여 평균값을 취하였다.

측정기기는 노트북에 연결하여 사용하는 01dB사의 Symphonie중에서 건축음향 전용 프로그램인 dBBA1I를 사용하였다. Symphonie는 여러 가지 음향평가요소중에서 잔향시간과 음압레벨만을 측정할 수가 있다. 그러므로 현장측정과 컴퓨터 시뮬레이션 모두 잔향시간과 음압레벨 두 가지 음향평가요소만을 분석할 것이다.

음원으로는 12면체 무지향성 스피커(omni-directional speaker)를 사용하고 파워앰프로는 Norsonic사의 NOR-260을 사용하였다.

측정기기의 구성은 아래의 (그림 4)와 같다.

4. 시뮬레이션

4.1 분석 프로그램의 개요

본 연구에서 사용한 프로그램인 ODEON program은 음선추적법(ray-tracing method)과 허상법(image model method)을 동시에 사용하고 있다¹⁰⁾. 즉, 음감쇠 특성에 많은 영향을 미치는 초기반사음에 대해서는 정확한 반사음을 얻을 수 있는 허상법을 사용하였으며, 그 이후의 반사에 대해서는 음선법을 이용하여 허상법이 가지고 있는 복잡한 알고리즘을 단축하여 빠른 시뮬레이션이 가능하도록 했다. 본 프로그램의 정확도나 검증은 이미 많은 연구에 의하여 발표되었으며 현재 구주에서 가장 광범히 사용되어지고 있다¹¹⁾¹²⁾¹³⁾.

음원에서 방사되는 음선은 모든 방향으로 균등히 방사되며 음원에서 동일 거리만큼 떨어진 지점에서의 소리의 세기(sound intensity)는 동일하다. 설정된 수음점에서의 음에너지량의 산출은 시간량의 변수로 계산되므로 각 음향인자의 정의에 따라 실내음향치를 분석하게 된다.

4.2 프로그램 설정 및 분석방법

음원과 수음점은 실측에서와 같은 위치를 입력하였으며 음원의 음압레벨도 같은 값을 입력하였다. 프로그램 설정은 3개의 홀 모두 같은 값을 적용하였으나 음선의 개수만은 프로그램에서 권장하는 음선수로 적용하였다. 시뮬레이션 수행시 입력한 마감재료는 실제 마감재료를 사용하였으며 마감재료는 앞의 <표 2>와 같다.

<표 2> 적용대상홀의 주파수별 마감재의 흡음률

마감재료		주파수(Hz)					
		125	250	500	1k	2k	4k
홀 A	베니어합판	0.42	0.21	0.10	0.08	0.06	0.06
	천마감의자	0.44	0.60	0.77	0.89	0.82	0.70
	마루	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
	음향플라스터	0.15	0.25	0.40	0.55	0.60	0.60
	화강석	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
	코펜하겐리브	0.23	0.71	0.89	0.54	0.29	0.34
홀 B	콘크리트워 리노름	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05
	화강석	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
	음향플라스터	0.15	0.25	0.40	0.55	0.60	0.60
	천마감의자	0.44	0.60	0.77	0.89	0.82	0.70
	마루	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
	패이트마감 콘크리트	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
홀 C	코펜하겐리브	0.23	0.71	0.89	0.54	0.29	0.34
	화강석	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
	음향플라스터	0.15	0.25	0.40	0.55	0.60	0.60
	천마감의자	0.44	0.60	0.77	0.89	0.82	0.70
	카펫	0.03	0.09	0.20	0.54	0.70	0.72
	803	0.50	0.30	0.10	0.05	0.05	0.05

5. 분석

5.1 현장실험

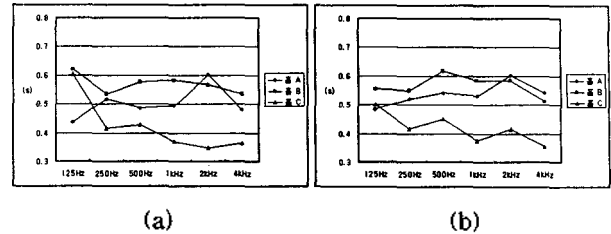
5.1.1 잔향시간

대체적으로 3개의 홀 모두 잔향시간은 목표 잔향시간 보다 짧게 나왔다. 이는 전체적으로 반사재보다는 흡음재를 많이 사용했기 때문이다.

전체적인 잔향시간은 홀 B가 가장 길고 그 다음으로 홀 A, 홀 C순으로 나왔다. 2kHz 이상의 고주파에선 홀 A가 홀 B보다 약간 긴 잔향시간을 보였다.

홀 C는 가장 짧은 잔향시간을 보이고 있는 데, 이는 평면형과 마감재료 때문인 것으로 사료된다. 다른 두 건물은 장방형인데 반해 홀 C는 부채꼴형의 평면을 가지고 있다. 부채꼴형의 평면은 음원을 중심으로 옆으로 넓게 퍼져 있는 형태이므로 측벽반사음을 감소시키므로 잔향을 짧게 만든다. 이런 이유에서 홀 C의 측벽에 설치된 확산체는 큰 효과를 내지 못한다. 마감재료에 있어서 홀 C는 흡음성능이 좋은 재료를 많이 사용하였다. 무대에서 가까울수록 반사성능이 좋은 재료를 사용하고 뒷벽에 가까울수록 흡음력이 좋은 재료를 사용해야 하는 건축음향계획의 기본을 따르지 않았다. 무대바닥도 카펫으로 마감을 하여 초기반사음을 저하시키고 있다.

(그림 5)는 적용대상홀별 잔향시간을 측정지점에 따라 나타낸 것이다.

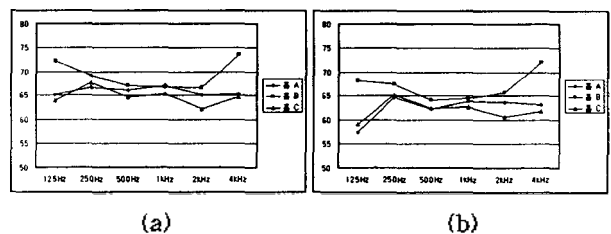


(그림 5) 적용대상홀별 현장측정 잔향시간(2, 3번)

5.1.2 음압레벨

음압레벨은 전체적인 음향 인상(overall acoustic impression)에 직접적인 영향을 주는 요소는 아니지만¹⁴⁾ 음압레벨이 기대이상으로 낮다면 명료도에 악영향을 미치므로 중요 음향성능 평가인자로 간주된다¹⁵⁾. 그러므로 적정 수준 이상의 음압레벨과 전체적으로 고른 음압레벨 분포를 보여야 한다.

전체적인 음압레벨도 잔향시간의 결과와 마찬가지로 홀 B, 공대, 홀 C순으로 높은 음압레벨을 나타냈다. 이는 확산성이 증가할수록 공간 내에서 음의 체류시간이 길어지므로 자연스럽게 음압레벨도 높아지게 된다. (그림 6)은 측정대상건물별 음압레벨분포를 측정위치에 따라 나타낸 것이다.



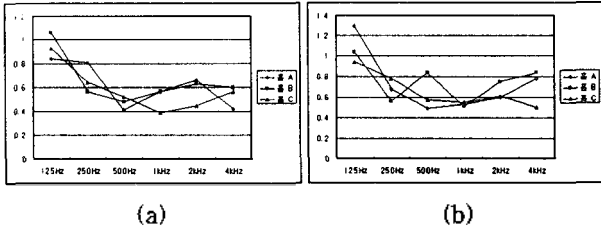
(그림 6) 적용대상홀별 현장측정 음압레벨(2, 7번)

5.2 시뮬레이션

5.2.1 잔향시간

시뮬레이션에서의 3개의 대상건물 모두 저주파에선 길고 고주파에선 짧은 잔향시간을 가진다. 시뮬레이션에서도 500Hz 이상의 중·고주파에선 잔향시간이 0.4초에서 0.7초 사이로 짧은 잔향시간을 보인다. 시뮬레이션의 결과는 측정결과가 홀 B가 가장 길고 홀 C가 가장 짧게 나온 것에 비해 각 대상건물의 차이가 거의 없었다. 통상적으로 홀의 음향성능을 나타낼 때 500Hz+1kHz/2의 값을 사용함으로써 전체적으로 그 차이는 작지만 실

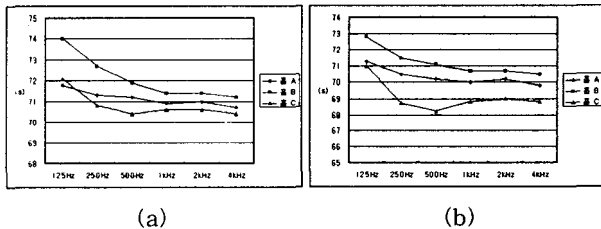
측정결과와 마찬가지로 홀 B, 홀 A, 홀 C의 순서로 잔향 시간이 감소한다.



(그림 7) 적용대상홀별 시뮬레이션 잔향시간(3, 6번)

5.2.2 음압레벨

음압레벨도 잔향시간과 마찬가지로 저주파에서 높고 고주파에서 낮은 값을 보인다. 이는 잔향시간이 길면 음의 체류시간이 길어지므로 자연스럽게 음압레벨도 높게 나타나게 된다. 전체적으로 홀 B, 홀 A, 홀 C의 순서로 감소하는 데, 수음점 3, 7에선 홀 C, 홀 A, 홀 B의 순서로 감소하는 특이한 결과를 보여준다. 이는 앞의 측정결과와 차이를 보이는 부분이다. 측정점 별로 음압레벨의 양상이 다르게 나타나는 이유는 음이 천장에 반사하여 수음점 3번, 7번에 도달하는 음선거리가 짧기 때문이다. 음선의 길이가 짧으면 그만큼 음의 손실도 적어지기 때문이다.



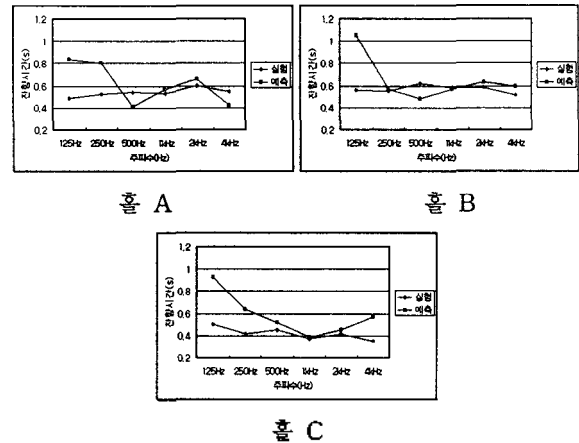
(그림 8) 적용대상홀별 시뮬레이션 음압레벨(1, 5번)

5.3 현장실험과 시뮬레이션 결과비교

5.3.1 잔향시간

잔향시간은 전 주파수대역에서 홀 A는 0.09, 홀 B는 0.09, 홀 C는 0.16의 오차를 보였다. 전 주파수대역에서의 오차는 모두 시뮬레이션에 의한 계산치가 더 많이 나왔다. 시뮬레이션의 알고리즘상 저주파에서 오차가 많이 발생하는 것을 고려해 볼 때 각홀의 500Hz이상의 중·고주파수에서의 오차는 홀 A는 0.03이 측정값이 시뮬레이션의 계산값보다 크게 나왔고, 홀 B와 홀 C는 각각 0.003, 0.08이 측정값보다 시뮬레이션의 계산값이 더 크게 나왔다. 그리고 중·고주파수대역에서의 오차가 3개의 홀 모두 전 주파수대역에서의 오차보다 적게

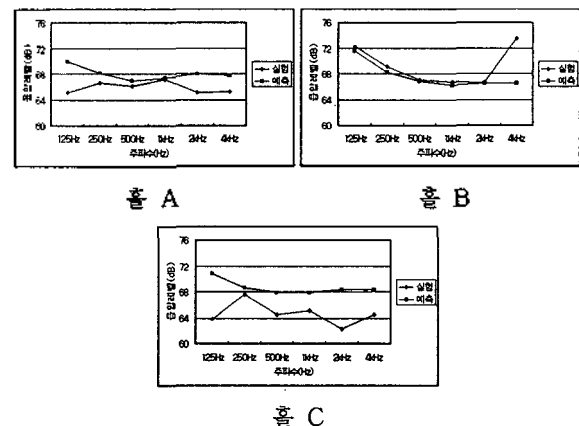
나왔다. 홀 A와 홀 B는 오차의 값이 거의 같았고 홀 C는 홀 A와 홀 B에 비해 많은 오차를 보였다. 각 홀의 주파수별 측정과 시뮬레이션의 오차는 (그림 9)와 같다.



(그림 9) 각 홀의 측정과 시뮬레이션의 잔향시간 비교(3번)

5.3.2 음압레벨

음압레벨은 일정하게 전체적으로 시뮬레이션의 계산값이 측정값보다 크게 나타난 잔향시간과는 다르게 약간 복잡하게 나타났다. 그러나 음압레벨은 잔향시간이 측정값과 계산값이 같은 홀에서 다른 양상-같은 홀에서 측정값과 계산값사이에서 반전이 이루어 짐-을 보이는 것과는 달리 같은 홀에선 같은 양상을 보여준다. 전 주파수대역에서 홀 A는 계산값이 2.1dB크게, 홀 B는 측정값이 1.6dB크게 마지막으로 홀 C는 계산값이 4dB크게 나타났다.



(그림 10) 각 홀의 측정과 시뮬레이션의 음압레벨 비교(2번)

6. 결론

분석 결과를 종합해 볼 때 실내 확산성의 증가는 많은 문헌에서 지적한 바와 같이 대체로 실의 음향성능을 높여주는 것으로 나타났다. 현장실험 시뮬레이션의 결과 모두 확산성이 증가할수록 잔향시간은 길어지고 음압레벨은 더 높은 값을 보여주고 있다. 이는 확산성의 증가로 소리가 무수히 많은 음선으로 나뉘어 공간내에서 채류하기 때문에 잔향시간의 증가를 가져온다. 특히 개인적인 분석에 의하면 확산성의 증가는 잔향시간중에서도 초기잔향시간인 EDT에 더 긍정적인 영향을 주고 있다. 잔향시간의 증가로 자연히 음의 공간내 채류시간이 길어지므로 음압레벨도 확산성의 증가에 의해서 더 높은 값을 보여주고 있다.

홀 C의 경우는 잔향시간이나 음압레벨 모두 가장 적은 값을 보여주고 있는 데, 이는 평면형에 가장 큰 이유가 있다. 다른 두 홀이 장방형인것에 비해 홀 C는 부채꼴형의 평면을 가지고 있으므로, 초기충격반사에너지가 상대적으로 약하며 이것으로 인해 위와 같은 결과를 보여주고 있다. 부채꼴형의 평면을 가지는 경우는 홀 C의 경우처럼 측벽에 의한 확산을 유도하기 보다는 천장에 의한 확산을 유도하는 것이 더 효과적일 것으로 사료된다.

현장실험과 시뮬레이션의 결과가 약간의 오차가 발생하고 있다. 가장 큰 이유는 실제홀을 3D모델링하는 작업에서의 오차때문으로 사료된다. 3D모델링에서는 실제홀과 다르게 창문이나 커튼과 같은 요소들을 배제시킨 채 단순화하여 작업을 했기 때문이다. 또 한가지 이유는 시뮬레이션의 알고리즘상의 차이이다. 시뮬레이션의 알고리즘은 실제 소리의 반사·확산과 차이를 보이는 것이 사실이며 특히 저주파대역에서 중고주파대역보다 상대적으로 많은 오차를 보이는 것은 일반적으로 알려진 사실이다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 음악당을 비롯한 실내 공간의 확산성을 증가시킬 경우 상대적으로 긴 잔향시간과 높은 음압레벨을 얻을 수 있을 것으로 판단 된다.

참고문헌

- 1) Haan, C. H., Fricke, F. R., An Evaluation of the Importance of Surface Diffusivity in Concert Halls, Appl. Acoust., 1997, 51, pp.53-69
- 2) E.Meyer, "Definition and diffusion in rooms", J.Acoust.Soc.Am. 26(5), p.630-636 (1954).
- 3) T.J.Schultz, "Diffusion in reverberation rooms", J.Sound Vib. 16(1), p.17-28 (1971).
- 4) C.W.Kosten "International comparison

- measurements in the reverberation room", Acustica 10, p.400-411 (1960).
- 5) C.G.Balachandran and D.W.Robinson, "Diffusion of the decaying sound field", Acustica 19(5), p.245-257 (1967/68).
- 6) L.L.Beraneck, Music, Acoustics and Architecture, John Wiley, pp.445 (1962).
- 7) S.Strom, "The influence of diffusing elements on the sound distribution in large halls", ELAB Report, Trondheim' pp.18-24 (1987).
- 8) T.Somerville, et al, "Recent work on the effects of reflections in concert halls and music studios", J.Sound Vib. 3(2), 127-134 (1966).
- 9) M.R.Schroeder, "Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls : more lateral sound diffusion", J.Acoust.Soc.Am. 65(4), p.958-963 (1979).
- 10) G. Naylor, J. H. Rindel, "ODEON room acoustics program, Version 2.5, User manual", The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby, 1994, pp.16-24.
- 11) J. H. Rindel, & G.M.Naylor, "Predicting room acoustical behaviour with the ODEON computer model," 124th ASA Meeting, New Orleans, 3aAA3, (1992).
- 12) G. M. Naylor, Ibid, p.131-143.
- 13) M. Volander, "International round robin on room acoustical computer simulations," 15th ICA, Trondheim, 1995.
- 14) M. Barron, Questionnaires for Subjective Assessment of Concert Spaces, 15th International Congress on Acoustics, 1995, pp. 373-376
- 15) H. Kuttruff, Room Acoustics, Third Edition, Elsevier Applied Science, 1991