용적변화와 흡음력조절에 의한 잔향시간 설계법 비교

Comparison of reverberation time designing methods by controlling room volume and surface absorption

김용희† · 송국곤* · 이철승*

Yong Hee Kim, Guk Gon Song and Cheol Seung Lee

1. 서 론

실내음향 설계에 있어서 최우선 과제는 적절한 잔향시간의 확보이다[1]. 공간의 용도에 따른 최적 잔향시간은 다양하게 분포하며, 동일한 잔향시간(reverberation time, RT)이라도 사용자의 요구에 따라 주파수 특성 및 시간 특성이 다양한 음환경으로 설계될 수도 있다[2]. 특히, 음악 연주를 위한 공연장과 같은 경우에는 잔향감과 더불어 음악의 명료성을 확보하기 위해 잔향시간도 길고 명료도도 높도록 설계하며, 건축음향적으로 공간의 용적과 표면 흡음력의 조절을 통해 목표하는 음향특성을 구현하고 있다. 본 연구에서는 동일한 잔향시간을 구현하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 단일공간의 용적변화와 흡음력조절을 각각 진행하였으며, 이에 따른 음향특성 변화양상에 대해 고찰하였다.

2. 시뮬레이션 모델링

2.1 공간 기본형상 설정

통제된 실내음장 조건에 따른 잔향시간 변화를 구현하기 위해 Ray-tracing 방식의 실내음향 시뮬레이션 프로그램(Odeon 11.2)을 이용하였다.

공간의 형상은 일반적인 직방형으로 구성하였다. 용적변화를 적용하는 공간(Room A)의 경우, 공간 치수비는 유지한 채 순수 용적의 변화로만 목표 잔향시간을 확보하도록 계획하였고, 이에 따라 용적증가에 따른 측면 반사음의 손실을 최소화하고, 용적의 감소시 음원과 수음점간의 최소 거리를 확보하기 위해 길이방향으로 긴 형상을 기본형으로 설정하였다. 한편, 흡음력조절을 적용하는 공간(Room B)의 경우 Room A의 기본형상과 동일한 용적을 확보하도록 계획하였고, 보스턴 심포니홀의 공간 치수비를 적용하였다[3]. Fig. 1과 Table 1은 Room A와 Room B의 기본형상을 비교하였다.

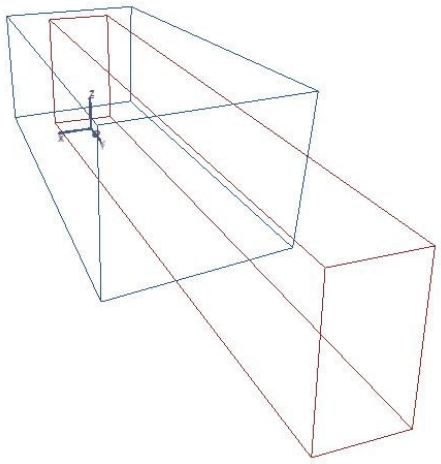

Figure 1 Comparison of basic room shapes between rooms A and B

Table 1 Basic interior dimension of rooms A and B

Room	Width, W [m]	Length, L [m]	Height, H [m]	Volume, V [m^3]	Surface area, S [m^2]
A	6.520	14.110	5.310	488.51	403.09
B	3.113	28.026	5.605	488.98	523.55

2.2 음원 및 수음점 설정

일반적인 무대-객석간의 관계를 고려하여 음원과 수음점을 길이방향 중간에 8 m 간격으로 설정하였다. 음원의 높이는 1.6 m, 수음점의 높이는 1.2 m로 설정하였다. Fig. 2는 Room A와 Room B의 기본형상에 배치된 음원과 수음점 위치를 나타낸다.

† 교신저자; 정회원, 한국건설생활환경시험연구원
E-mail : yhkim@kcl.re.kr
Tel : 043-210-8922, Fax : 043-210-8929
* 한국건설생활환경시험연구원

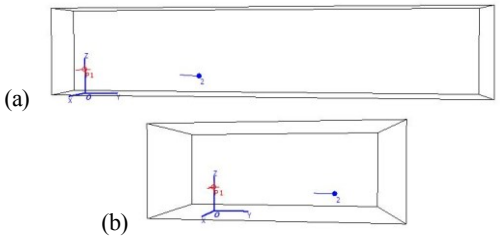

Figure 2 Source and receiver positions for (a) room A and (b) room B (Red mark: sound source, blue mark: receiver)

2.3 시뮬레이션 설정

공간의 각 표면의 흡음율을 부위에 따라 다르게 설정하지 않고, 평균흡음율로 동일하게 변화하도록 설정하였다. Room A의 경우 용적만의 변화로 목표 잔향시간을 구현하도록 계획하였고, 이에 따라 일반적인 공연공간의 평균흡음율을 고려하여 각 표면의 흡음율을 0.35로 설정하였다[3]. Room B의 경우, 흡음율조절에 따른 목표 잔향시간을 구현하도록 계획하였기 때문에, 공간 치수를 고정시키고 각 표면의 흡음율을 동일하게 변화하도록 계획하였다. 또한 흡음율의 주파수 대역별 차이는 없도록 계획하였다.

시뮬레이션 진행에 필요한 입력값으로 표면의 확산계수(scattering coefficient)는 0.30으로 설정하였고, 허상법을 이용한 반사음선 계산차수는 2로 설정하였다. Ray-tracing에 사용된 음선의 개수는 초기음의 경우 2,000개, 후기음의 경우 10,000개를 적용하였다. 목표 잔향시간은 0.1 s에서 8 s까지 21단계로 설정하였고, 세부 목표 잔향시간은 Table 2에 표시하였다. 음장분석을 위해 시뮬레이션 후 임펄스 리스펀스를 wav 형식으로 만들었다.

임펄스 리스펀스의 음장특성은 AURORA 4.3 plug-in을 이용하여 ISO 3382-1에 대한 음향지표를 분석하였다. 시뮬레이션 피팅은 500 Hz 대역의 T30을 기준으로 에서 설정한 공간의 용적 또는 흡음력 변화에 따라 도출된 임펄스 리스펀스의 잔향시간과 목표 잔향시간을 비교하며 진행하였다.

Table 2 Target reverberation time (RT) values

Step	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
RT [s]	0.1	0.125	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6
Step	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
RT [s]	0.7	0.8	0.9	1	1.25	1.5	1.75
Step	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**
RT [s]	2	2.5	3	4	5	6	8

3. 잔향시간 변화양상

3.1 용적변화에 의한 잔향시간 설계

목표 잔향시간 확보를 위해 Room A의 용적을 일정하게 변화하였고, 그 결과 도출된 공간의 정보는 Table 3 및 Fig. 3과 같다.

Table 3 RT comparison at 500 Hz of room A with various room volumes (absorption coefficient: 0.35)

Target RT [s]	**Simulated RT [s]**	**Sabine's RT [s]**	**V [m^3]**
0.1	0.1	0.138	16.2
0.125	0.125	0.152	21.6
0.25	0.25	0.346	254.5
0.3	0.2965	0.430	489.0
0.4	0.3995	0.509	813.9
0.5	0.5005	0.584	1,223.9
0.6	0.599	0.687	1,993.8
0.7	0.6985	0.767	2,775.8
0.8	0.796	0.858	3,883.1
0.9	0.8995	0.921	4,810.9
1	1.0005	1.008	6,301.1
1.25	1.25	1.203	10,702.1
1.5	1.502	1.419	17,601.0
1.75	1.749	1.660	28,131.5
2	1.9915	1.811	36,565.8
2.5	2.5	2.160	61,993.4
3	2.998	2.690	119,862.3
4	3.9995	3.565	278,799.2
5	5.0025	4.442	539,593.1
6	6.007	5.313	923,139.6
8	8.0255	6.951	2,067,330.6

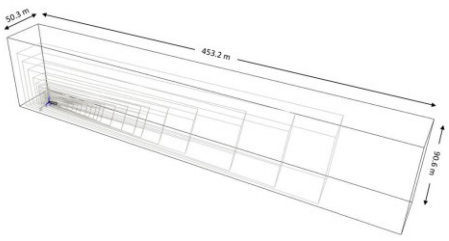

Figure 3 Variation of room volume for room A

3.2 흡음율조절에 의한 잔향시간 설계

한편, Room B는 목표 잔향시간 확보를 위해 흡음율을 일정하게 변화하였고, 그 결과 도출된 공간의 정보는 Table 4 및 Fig. 4과 같다.

Table 4 RT comparison at 500 Hz of room B with various absorption coefficients (room volume: 488.5 m^3)

Target RT [s]	Simulated RT [s]	Sabine's RT [s]	Absorption coefficient
0.1	0.101	0.197	0.99
0.125	0.1245	0.247	0.789
0.25	0.2495	0.317	0.6167
0.3	0.2995	0.369	0.5295
0.4	0.4	0.454	0.43
0.5	0.4995	0.578	0.338
0.6	0.5995	0.710	0.2748
0.7	0.7	0.819	0.2383
0.8	0.8	0.932	0.2095
0.9	0.9	1.046	0.1867
1	1	1.148	0.1701
1.25	1.25	1.413	0.1382
1.5	1.501	1.711	0.1141
1.75	1.7485	1.988	0.0982
2	2	2.286	0.0854
2.5	2.499	2.838	0.0688
3	2.9995	3.382	0.05773
4	4	4.509	0.0433
5	4.9995	5.759	0.0339
6	5.9965	7.100	0.0275
8	7.996	9.921	0.01968

3.3 Sabine 잔향식과의 관계

Sabine 잔향식에 따른 간단한 잔향시간의 계산결과와 임펄스 리스펀스의 감쇠곡선을 도출을 통해 계산한 잔향시간을 비교해보았다.

Fig. 4와 같이 용적변화를 이용한 Room A의 경우 1 s를 기준으로 1 s 보다 짧은 잔향시간으로 설계한 경우에는 시뮬레이션 잔향시간보다 Sabine 잔향시간이 길게 도출되었고, 1 s 보다 긴 잔향시간으로 설계한 경우에는 그와 반대로 Sabine 잔향시간이 짧게 도출되었다. 특히 0.1 s로 설계한 경우 그 차이가 +38%였으며, 8 s로 설계한 경우 그 차이가 -13%로 나타났다.

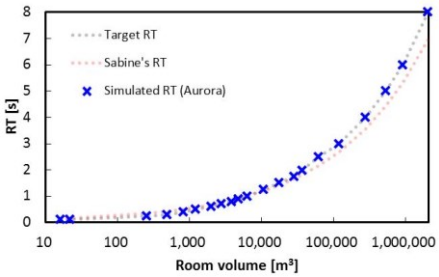

Figure 4 Simulated RT values as a function of room volume in room A

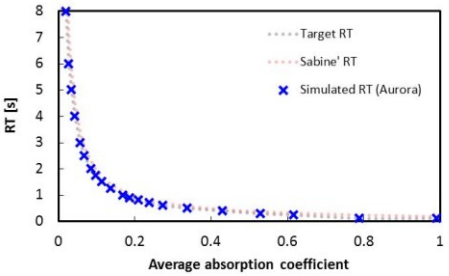

Figure 5 Simulated RT values as a function of absorption coefficient in room B

한편, Fig. 5와 같이 흡음율조절을 이용한 Room B의 경우 모든 모델에서 Sabine 잔향시간이 시뮬레이션 잔향시간보다 13~27% 정도 길게 나타났다. 특히 0.1 s와 0.125 s로 설계한 경우 Sabine 잔향시간은 각각 +97%와 +98%로 두 배에 가까운 값을 나타냈고, 1.25 s로 설계한 경우 그 차이가 +13%로 가장 작게 나타났다.

4. 동일 잔향시간에 대한 음장특성 변화양상

500 Hz의 T30을 기준으로 동일하게 설계된 Room A와 Room B에 대해 잔향시간을 제외한 다른 실내음향 지표를 비교하였다.

4.1 음압레벨

Fig. 6은 두 공간의 잔향시간에 따른 A가중 음압레벨(sound pressure level, SPL) 분포를 나타낸다. 그림에서 나타나는 바와 같이 용적을 증가시켜 잔향시간을 길게 설계할 경우 음압레벨은 감소하는 추세를 보이지만, 흡음율을 감소시켜 잔향시간을 길게 설계하는 경우에는 잔향시간의 증가에 따라 음압레벨도 증가하는 경향을 보인다. 이것은 음원의 파워레벨이 일정하기 때문에 용적 증가에 따라 음

에너지 손실량이 많아지기 때문에 나타나는 자연스러운 경향으로 볼 수 있다. 따라서, 음압레벨 증가를 위해서는 흡음율을 최대한 억제하여 목표 잔향시간을 구현할 필요가 있다.

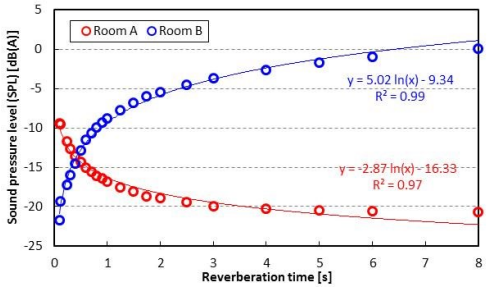

Figure 6 A-weighted SPL values as a function of simulated RT for rooms A and B

4.2 초기감쇠시간

Fig. 7은 두 공간의 잔향시간에 따른 초기감쇠시간(early decay time, EDT) 분포를 나타낸다. EDT는 주관적인 잔향감과 RT보다 유사한 지표로서, 용적을 증가시키는 경우 2.5 s까지는 같이 증가하다가 3 s 이후로 설계된 경우에는 오히려 감소하여 6 s나 8 s의 경우에는 EDT가 거의 0에 가깝게 나타났다. 한편, 흡음율을 감소시켜 잔향시간을 증가시키는 경우 EDT는 RT에 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 SPL의 변화양상과 유사하게 EDT의 증가를 위해서는 흡음율 조절이 더 유리하다 할 수 있다.

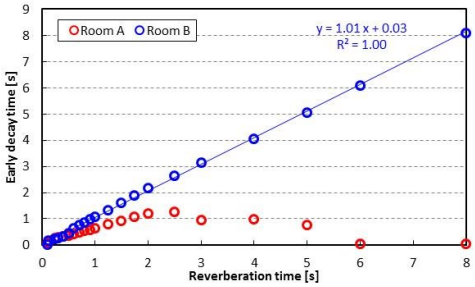

Figure 7 EDT values as a function of simulated RT for rooms A and B

4.3 명료도 및 요해도

Fig. 8~10은 음성명료도 관련 지표의 두 공간의 잔향시간에 따른 분포를 나타낸다. Fig. 8은 음성전달지수(speech transmission index, STI), Fig. 9는 요해도(definition, D50), Fig. 10은 음성명료도(clarity, C50) 분포를 나타낸다. 기본적으로 명료도 관련 지표는 잔향시간의 증가에 반비례하여 감소하는 관계가 있다. 특히, 흡음율조절을 통해 구현된 다양한 잔향시간 분포를 보면 잔향시간의 로그값 증가에 비례하여 유의하게 감소하는 경향이 나타났다. 그러나, 용적변화의 경우 1 s의 잔향시간까지 명료도지표 모두 감소하는 경향을 보이다가 잔향시간이 더 길어지는 경우 오히려 증가하는 경향을 보였다. 특히 8 s로 설계한 경우 0.9 이상의 STI를 보였으며, D50도 0.9 이상으로 나타났다. 이것은 반사음의 경로 증가로 잔향시간이 증가와 더불어 음에너지의 감소가 병행되어 나타나는 결과로 사료된다.

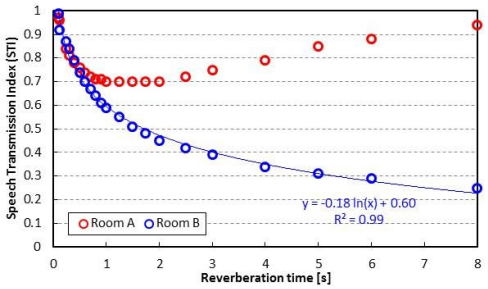

Figure 8 STI values as a function of simulated RT for rooms A and B

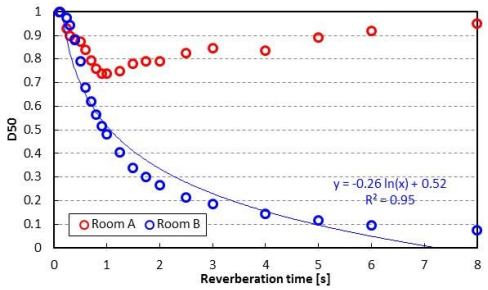

Figure 9 D50 values as a function of simulated RT for rooms A and B

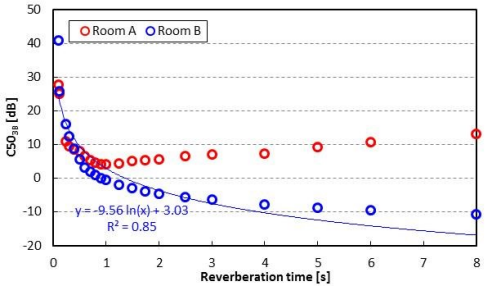

Figure 10 $C50_{3B}$ values as a function of simulated RT for rooms A and B

4.4 양이상관도

Fig. 11은 두 공간의 잔향시간에 따른 양이상관도(inter-aural cross-correlation, IACC)의 1에 대한 역수값(1-$IACC_{E3}$) 분포를 나타낸다. 1-$IACC_{E3}$는 공간의 공간감 및 확산감을 나타내는 지표[4]로 사용되는데, 용적변화를 통해 잔향시간을 증가시키는 경우 1-$IACC_{E3}$는 0.5 s까지 증가하다 급격히 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 흡음율 조절을 통해 잔향시간을 증가시키는 경우 1-$IACC_{E3}$는 1 s까지 급속도로 증가하다 1 s 이후에는 값의 큰 변화 없이 0.85 이상의 높은 수치를 보였다. 따라서, 주관적인 공간감의 증진을 위해서도 용적보다는 흡음율을 억제하는 설계법이 바람직하다.

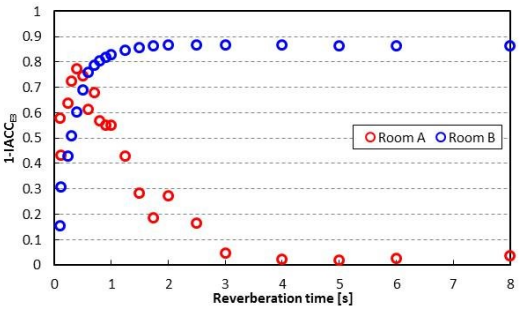

Figure 11 1-$IACC_{E3}$ values as a function of simulated RT for rooms A and B

5. 소 결

본 연구에서는 목표 잔향시간 구현을 위해 사용할 수 있는 용적변화와 흡음율조절 설계법에 대해 단순화된 박스 형상의 공간에서 컴퓨터 시뮬레이션 방법을 이용하여 음장변화 양상을 살펴보았다. 그 결과, Sabine 잔향식에 따른 잔향시간과 시뮬레이션에 따른 잔향시간이 설계법에 따라 차이가 발생함을 알 수 있었다. 특히, 흡음율 조절에 의한 경우 Sabine 잔향식은 시뮬레이션에서 도출된 잔향시간을 과대평가하는 경향이 나타났다. 한편, 용적변화를 통해 구현된 잔향시간보다 흡음율 조절을 통해 구현된 잔향시간이 음압레벨, 초기감쇠시간 및 양이상관도 측면에서 보다 이점이 많은 것으로 나타났다. 용적변화에 의한 잔향시간의 증가는 음성명료도 측면에서는 흡음율 변화 방법보다 유리한 것으로 나타났다. 따라서, 설계하고자 하는 공간의 목적에 따라서 긴잔향과 큰 소리 또는 높은 공간감을 추구할 때는 흡음율을 억제하는 설계방법을 이용할 필요가 있고, 긴잔향과 더불어 적절한 명료도의 확보가 필요한 경우는 용적의 증가를 통한 설계법을 적용할 필요가 있다. 본 연구에서 이용한 시뮬레이션 모델은 단순한 박스형 형상으로 평가에 사용한 음원 및 수음원도 한 지점이라는 한계가 있다. 향후, 보다 실제적인 설계모델에의 적용을 통해 적절한 잔향시간과 더불어 그에 따르는 음장 특성을 예측하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

(1) M. D. Egan, *Architectural acoustics* (McGraw-Hill, Inc., 1988).

(2) M. Long, *Architectural acoustics* (Elsevier Academic Press, 2006)

(3) L. L. Beranek, *Concert halls and opera houses – Music, acoustics, and architecture* (Springer, 1996)

(4) Y. Ando, *Architectural acoustics – Blending sound source, sound fields, and listeners* (Springer-Verlag New York, 1998)