

# 3D 모델의 구체성이 건축음향 시뮬레이션 및 가청화시재에 미치는 영향

## Effects of the Complexity of 3D Modeling on the Acoustic Simulations and Auralized Sounds

박 찬 재\*, 한 찬 훈\*

(Chan-Jae Park\*, Chan-Hoon Haan\*)

\*충북대학교 건축공학과

(접수일자: 2010년 7월 21일; 수정일자: 2010년 10월 12일; 채택일자: 2011년 1월 12일)

본 논문은 건축음향 설계에 있어서 가장 많이 활용되고 있는 컴퓨터 시뮬레이션의 정밀도 향상을 위한 3차원 모델의 구체성에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 건축음향 시뮬레이션 프로그램인 odeon 6.5에서 제시하고 있는 transition order의 단계를 기준으로 3D 모델의 구체성을 총 4단계로 구분하였다. 각 실내마감재의 흡음률은 도면에 표기된 재료를 odeon의 material library 및 시험성적서를 참고해 입력하였으며 확산률은 odeon의 마감의 표면형태에 따른 권장치를 입력하였다. 또한 room setup 설정시 사용음선수를 동일하게 입력하였으며, transition order는 각 모델의 유효표면수에 맞게 입력하였다. 실제 공연장에서 측정한 현장음향실험 결과를 기준으로 시뮬레이션 결과와 비교하여 물리적 음향인자 (음압레벨, 잔향시간, 명료도 등)의 오차를 분석하였다. 또한 가청화시재를 제작하여 현장에서 녹음한 음원과 청감실험을 통해 비교하여 주관적 음향인자 (잔향감, 명료함 등)별 유사 정도를 평가하였다. 물리적 음향인자 분석결과, 가장 구체적인 3D모델의 잔향시간 오차가 가장 작게 나타났으며 명료도의 경우 단순한 모델의 오차가 가장 작았다. 그러나 단순한 모델은 저주파수 대역의 오차가 상대적으로 매우 크게 나타남에 따라 3D 모델을 구체적으로 작성할수록 보다 정밀한 음향예측이 가능할 것으로 판단된다. 또한 주관적 청감실험 결과, 물리적 오차가 작을수록 가청화시재가 원음과 가장 유사하게 들린다고 응답함으로써 3D 모델의 구체성이 가청화시재 제작에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

**핵심용어:** 3D 모델, 구체성, 건축음향 시뮬레이션, 가청화시재, 주관적 청감실험

**투고분야:** 건축음향 분야 (7.1)

The present study examined the effects of the complexity of the 3D models on the results of acoustic simulation which is the predominant tool of the acoustical design of buildings. Also, the effects of the 3D model on the auralized sounds were investigated. In order to carry out the study, four 3D models with different levels of complexity were introduced for a real auditorium which have different numbers of surfaces in the pursuit of the guidance of odeon room acoustic software. The set-up of models was also based on the level of transition order of the program. And the acoustic experiments were performed measuring room acoustic parameters including SPL, RT, C80, D50. Acoustic computer simulations were performed using four different models. Then, the results of the computer modeling were compared with the measured acoustical parameters. In addition, sound sources were recorded in the field and auralized sounds were made in convolution with the impulse source made from acoustic modeling. Then, subjective tests were undertaken using auralized sounds. As the results, it was found that the result of the acoustic simulation were closer to the real room acoustic properties when 3D model was more particularly made. For the subjective test, the listening materials were acknowledged as similar with the real sound source when more complex 3D model was used. Then, it could be concluded that the complexity of the 3D model affects the results of the acoustic modeling as well as subjective tests.

**Keywords:** Acoustic 3D Modeling, Complexity of 3D Model, Computer Simulation, Auralized Sounds, Subjective Test

**ASK subject classification:** Architectural Acoustic (7.1)

## I. 서론

컴퓨터를 이용한 건축음향 시뮬레이션은 분석기간이 짧고 효율성이 높아 건축음향설계에 광범하게 사용되고 있다. 또한 건축음향 시뮬레이션을 통한 음향분포도 작성, 임펄스 리스펀스 및 가청화시재 제작이 가능해 시공 전 공간의 음환경을 시각 및 청각적으로 미리 파악할 수 있는 장점으로 인하여 그 중요성이 점차로 높아지고 있는 실정이다. 그러나 컴퓨터 시뮬레이션의 특성상 저주파수 대역의 오차가 클 뿐만 아니라 음의 회절 및 확산과 같은 다양한 음의 전달현상을 구현하기 어렵다는 단점이 있다 [1]. 그리고 컴퓨터상의 가상공간에 3차원 음장을 입력하기 위하여 Auto CAD 등의 프로그램을 이용해 3D 모델을 제작할 때, 시뮬레이션 프로그램에서는 곡선면을 입력할 수 없기 때문에 이를 평면으로 분할하여야 하며 이 과정에서 정확한 음의 전달 양상이 구현되지 못하다는 단점을 가지고 있다. 특히 건축음향 시뮬레이션은 컴퓨터상에 3차원 가상공간을 입력한 뒤 그 안에서의 소리의 이동 및 음향 성능을 파악하는 것이므로, 3D 모델의 정밀도가 시뮬레이션 결과에 영향을 미치게 된다. 그러나 외국에서 연구된 몇 건의 사례 [2-3] 이외에는 3D 모델의 정밀도가 시뮬레이션 결과 및 가청화시재의 정밀도에 미치는 영향에 대한 연구가 국내에서는 매우 부족한 실정이다.

공간의 음향성능을 예측하는 수단으로는 인공신경망 이론 및 축척모형실험법 등이 있으며 [4], 컴퓨터를 이용한 건축음향 시뮬레이션에 대한 연구는 1984년 Kirszenstein의 논문에 의해 허상법 (image source)을 사용한 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 연구결과 [5]가 발표된 후 흡음률 및 확산률, 음선수의 사용에 대한 연구가 지속적으로 수행되어왔다 [2-8]. 특히 Bork는 2000년 논문을 통해 건축음향 시뮬레이션 프로그램의 결과에 영향을 미치는 다양한 입력변수를 분류하였으며, 두 번째 round robin test를 통해 건축음향 시뮬레이션의 결과에 영향을 미치는 요인은 실내 표면의 흡음률 및 확산률임을 입증한 바 있다 [2]. 그러나 본 연구의 논지와는 달리 Bork는 3D 모델의 표면 형상이 시뮬레이션 결과에 큰 영향을 미치지 않는다고 제시한 바 있는데, 이는 7개의 면으로 이루어진 매우 단순한 구조의 스튜디오에서 확산체의 표면수를 증가시키에 따른 결과를 비교한 것 [3,7]으로써 공연장과 같이 곡선형의 복잡한 실내표면을 가진 공간의 3D 모델 제작에 대한 구체성을 연구한 것은 아니다.

반면에 본 논문은 기존의 연구와는 달리 공연장과 같이 곡선형 표면을 가진 복잡한 형태의 공간을 3D 모델로 구

현함에 있어서 그 구체성이 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 조사하고 보다 정밀한 결과 예측을 위한 3D 모델의 구체성을 제시하고자 한다.

이를 위해 완공된 공연장을 대상으로 건축음향 시뮬레이션을 수행하고 가청화시재를 제작하였으며, 시뮬레이션 수행시 입력하는 3D 모델의 구체성을 총 4단계로 제작하여 입력하였다. 시뮬레이션 결과는 잔향시간 및 음압레벨 등과 같은 물리적 음향인자를 통해 현장음향실험 결과와 비교하였고, 가청화시재와 현장음향능음 음원을 청감실험을 통해 주관적 음향인자로 비교하여 3D 모델의 구체성이 음향시뮬레이션에 미치는 영향을 분석하였다.

## II. 연구의 방법

건축음향 시뮬레이션의 3D 모델의 구체적이어야 시뮬레이션의 정밀도 및 효율성을 향상시킬 수 있는지 알아보기 위하여 건축음향 시뮬레이션을 수행하였으며 현장음향실험을 통해 물리적 음향인자 기준을 수립하였다. 또한 각 모델에서 추출한 임펄스 리스펀스를 이용해 가청화시재를 제작한 뒤 청감실험을 통해 현장에서 녹음해온 음원과 비교함으로써 실제 현장에서 듣는 것과 가장 유사한 시재를 제작 가능한 모델을 찾고자 하였다.

본 연구는 2006년에 개관한 A문화회관의 대공연장을 대상으로 하였다. 대상공간인 A 문화회관 대공연장은 약 1,750명을 수용할 수 있는 다목적홀로써 부채꼴형 평면

표 1. A문화예술회관 대공연장의 건축계획상 제원  
Table 1. Architectural measures of the A art center main hall.

제 원	길이	폭	높이
평 균 치 수	30.5 m	28.5 m	17.5 m
체 적 (V)	약 33,830 m <sup>3</sup>		
실내표면적 (S)	5,146 m <sup>2</sup>		
바닥 면적 (F)	1,580 m <sup>2</sup>		
좌 석 수 (N)	1,750 석		
객석당 점유체적 (V/N)	8.29 (m <sup>3</sup> /석)		

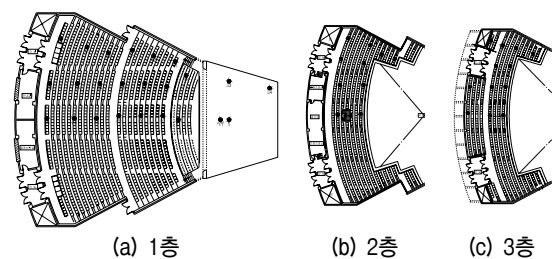


그림 1. A 문화회관 대공연장의 층별 객석의 측정점 위치  
Fig. 1. Measurement positions in the A art center main hall.

과 프로세니움 형태의 무대를 취하고 있다. 대공연장의 건축계획상 제원은 표 1에 나타난 바와 같으며 음향실험과 시뮬레이션에 사용된 대공연장의 측정점과 수음점은 그림 1의 층별 평면도에 나타난 바와 같다 [9-10].

**2.1. 현장음향실험**

대상공간의 실제 음환경을 평가하기 위하여 실내음향 측정기기를 이용해 물리적 음향인자를 측정하였다. 현장음향실험결과는 이후에 수행될 구체성이 서로 다른 3D 모델의 음향시뮬레이션 결과를 분석함에 있어서 실제 음환경에 대한 기준으로써 사용된다.

현장음향실험에 있어 실험일시 및 측정기기의 선택, 음원의 특성 등은 사전에 현장사정을 감안하여 조사·선택되었으며 모든 실측은 ISO와 ASTM의 규준에 따라 시행하였다. 수음점은 총 40개로 바닥에서 1.2 m 높이에 설정하였으며, 음원은 무지향성 스피커를 사용하여 무대 바닥에서 1.5 m 높이로 설치하였다. 음원신호는 일정한 음압의 MLS signal을 사용하였고 객석에서 1/3 옥타브밴드로 측정하였다. 컴퓨터와 동기화된 Generator에서 발생된 음은 Power Amplifier에서 증폭된 뒤 방사되어 지정된 측정점에서 측정하였다. 다음의 그림 2는 현장음향 실험에 사용된 장비의 기기구성도를 나타내고 있다.

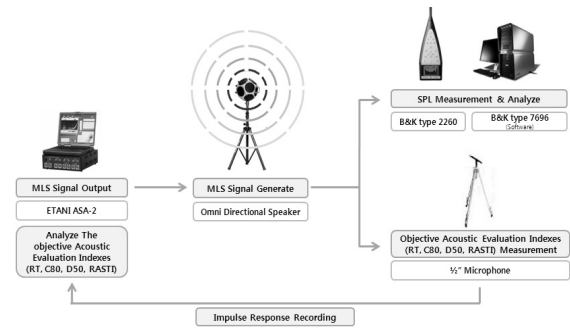


그림 2. 현장음향실험의 기기구성도  
Fig. 2. Set-up of acoustic measurement devices.

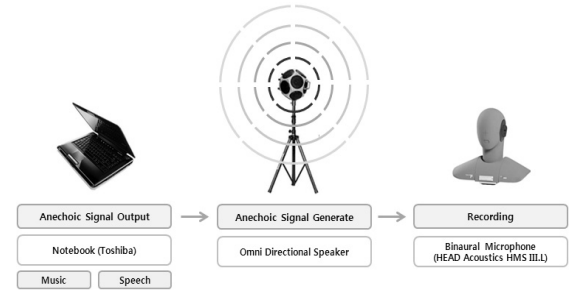


그림 3. 현장음향녹음의 기기구성도  
Fig. 3. Set-up of acoustic recording devices.

**2.2. 현장음향녹음**

3차원 모델의 구체성이 가청화시재에 미치는 영향을 분석하기 위한 현장음향녹음을 실시하였다. 현장음향녹음은 시뮬레이션을 통해 제작한 가청화시재를 이용하여 청감실험을 수행할 때 실제 음환경에 대한 기준으로 사용된다 [11].

현장음향녹음 위치는 현장음향실험 및 음향 시뮬레이션시 설정된 측정점 중 5개를 선정하였다. 녹음에 사용된 음원소스는 무향실에서 녹음된 무향음원 (Anechoic sound)을 사용하였으며 음악과 강연을 각 1곡씩 녹음하였다. 녹음시 사람의 머리전달함수 (HTRF)와 귀의 지향특성을 적용하기 위해 Head Acoustic사의 양이 녹음 시스템 (Binaural Recording System)인 HMS III.L을 사용하였다. 다음의 그림 3은 현장음향녹음에 사용된 장비의 기기구성도를 나타내고 있다.

**2.3. 음향시뮬레이션**

3차원 모델을 어느 정도로 구체적으로 작성하여야 보다 정확한 실내 음환경 예측이 가능한지를 조사하기 위하

표 2. Transition order의 설정기준

Table 2. Criteria of transition order in Odeon 6.5 manual.

TO	유효표면수	내 용
0	3,000 이상	모스크 성당과 같은 곡선형 실내 매우 많은 유효표면수를 가진 모델
1	1,000 ~ 3,000	오페라 홀이나 부채꼴형의 모델
2	50 ~ 1,000	비교적 단순한 형태의 모델
3	20 ~ 50	장방형에 가까운 모델
4	0 ~ 20	정육면체 형태의 매우 단순한 모델

여 구체성에 따라 총 4단계로 구분하여 3D 모델을 작성하였으며 건축음향 시뮬레이션 프로그램인 Odeon 6.5 Combined를 사용하였다. 시뮬레이션 수행시 각 모델의 시뮬레이션 결과를 비교하기 위하여 음원의 위치 및 출력레벨, 수음점의 위치 및 개수와 설정값 (room set-up) 중 사용음선수는 동일하게 입력하였으며 transition order는 각 모델에 맞게 0에서 3으로 구분하여 입력하였다.

**(1) Transition order**

Transition order란 본 연구에 사용된 시뮬레이션 프로그램인 odeon의 room setup 설정값 중 하나로 3D 모델의 표면수에 따른 확산성능을 나타낸다. Transition order는 3D 모델의 표면수 및 실내 표면상태에 따라 0, 1, 2,

3, 4의 총 5단계로 구분되는데 작은 숫자를 입력할수록 실내 확산능이 높게 계산된다. 다음의 표 2는 odeon 6.5에서 제시한 transition order의 입력기준인 3D 모델의 유효표면수에 따라 0부터 4까지 정리한 것이다 [12].

본 연구에서 transition order는 3D 모델의 구체성 단계를 구분하는 기준으로 사용되며, 정육면체형의 소규모 공간을 의미하는 TO-4를 제외한 TO-0, 1, 2, 3을 기준으로 사용하였다. 시뮬레이션 적용시 3D 모델의 구체성에 의한 영향만을 판단하기 위하여 표면수와 관계없이 transition order를 동일하게 적용한 경우와 각 3D 모델의 표면수에 적합하도록 상이하게 설정하였을 때를 모두 수행하였다.

반면 가청화시재 제작시에는 3D 모델의 표면수에 적합한 TO값을 입력하였다. 그 이유는 각 모델의 특성에 맞지 않은 TO값을 적용할 경우 시뮬레이션의 정밀도를 저감되기 때문이다 [13]. 따라서 각 구체성의 단계별로 가장 정확한 시뮬레이션 결과가 계산되는 mode에서 가청화시재를 제작하였다.

**(2) 구체성 (complexity)**

모델의 구체성은 3D 모델의 유효표면수 (number of surface)로 분류하였다. 즉 동일한 공간을 3D로 제작할 때 천정과 같은 곡선면의 분할정도 등에 따라 유효표면수가 증가하게 되므로 유효표면수가 클수록 구체적으로 작성된 3D 모델이라고 할 수 있다. 3D 모델의 구체성 단계 설정에는 transition order의 입력기준을 사용하였다. 즉 3D 단계별 모델의 유효표면수 기준은 odeon 메뉴얼에서 제안한 각 TO 단계별 유효표면수 기준의 평균에 가깝게 제작하였다. 특히 3D 모델의 구체성이란 실제 음향성과 과 음선추적에 영향이 없을 만큼 작은 부분 (걸레받이 등)이나 모델 제작의 편의성을 위해 동일한 마감재료의 평면을 분할하여 유효표면수만을 증가시키는 것을 의미하는

것이 아니라, 곡선형 천정이나 곡선형 확산체 등의 곡면을 구현함에 있어서 여러 개의 면으로 분할하는 정도를 통해 실제 곡물에 유사하게 작성하는 것을 말한다. 특히 공연장의 경우 객석열 및 곡면 천정, 확산체, 무대음향반사판 등 확산이 이루어지는 곡선면을 중심으로 세밀하게 분할함으로써 음선 계산에 유효한 면을 증가시키고자 하였다. 예를들면 가장 구체적인 a-model의 경우 각 곡선면을 10등분하였으며 b-model은 8등분, c-model은 6등분함으로써 각각 구체성을 달리하였다. 반면 가장 단순한 d-model은 실내 곡선면을 분할하지 않고 평면으로 작성하였다. 또한 a, b-model은 무대음향반사판 및 객석면을 확산면으로 작성하였으며 c, d-model은 평면으로 작성하여 구체성을 다르게 하였다. 또한 본 논문에서는 각 모델의 구체성을 유효표면수로 나타내고 있으므로, 3D 모델을 odeon으로 변환할 때 인접한 점들을 합쳐 유효표면수를 감소시키는 “Glue surfaces” 기능 [12,14,15]을 사용하지 않았다.

시뮬레이션시 입력된 설정값 (Room setup)은 표 3에

표 3. 건축음향 시뮬레이션의 설정값  
Table 3. Room setup of computer modeling.

Classification	Name of 3D model			
	(a)	(b)	(c)	(d)
Transition order	0	1	2	3
Number of surfaces (개)	4,123	2,222	547	44
Volume of rooms (m <sup>3</sup> )	37,923	40,133	40,177	25,736
Calculation time of multi response	89s	56s	28s	23s
Number of rays (개)	51,536			
Max. number of reflections (회)	2,000			
Impulse response length (ms)	2,500			
Impulse Response Resolution (ms)	10			
Sound power level	94.2 dB			
Background Noise Level	500 Hz : 26 dB, 2 kHz : 19 dB			

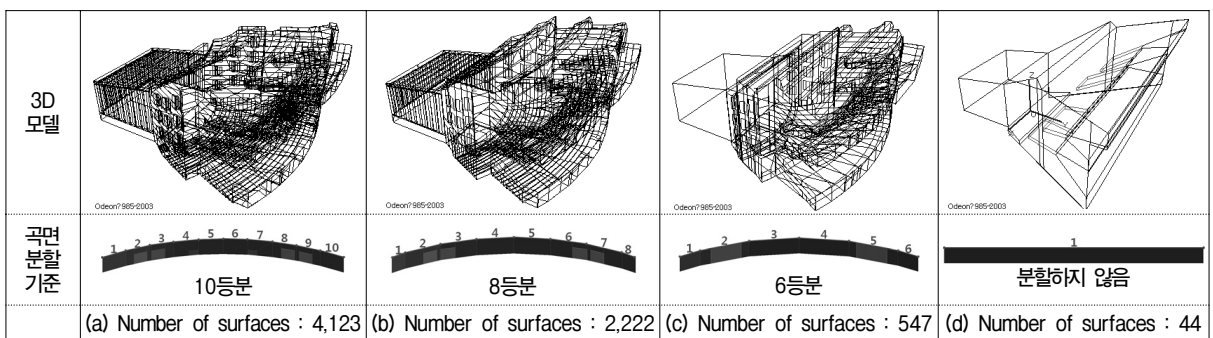


그림 4. 구체성에 따라 제작한 3D 모델  
Fig. 4. 3D models with different levels of complexity.

정리하였으며, 그림 4에는 시물레이션에 사용된 3D 모델을 구체성의 단계별로 나타내었으며, 객석 뒷벽을 모델링 한 모습을 각 모델별로 제시함으로써 구체성을 다르게 작성한 기준을 설명하고자 하였다.

**(3) 사용음선수 (number of rays)**

시물레이션에 사용되는 음선의 개수를 입력하는 설정 값인 사용음선수는 3차원 모델의 표면수에 따라 적정 수치가 자동 계산되어 입력되며 room setup 설정에서 변경할 수 있다. 본 연구에서는 시물레이션 수행시 3D 모델의 유효표면수에 대한 영향만을 파악하기 위하여 시물레이션의 정밀도에 영향을 주지 않고 적절한 수준의 사용음선수로 통일하여야만 한다. 이를 위해 선행 연구를 수행한 결과 사용음선수가 많을수록 시물레이션의 정밀도가 높아짐을 알 수 있었다 [16-19]. 따라서 매 시물레이션 시 가장 구체적으로 작성함으로써 인하여 사용음선수가 가장 많이 산출된 a모델의 수치를 동일하게 입력하였다.

**(4) 흡음률 (absorption coefficient)**

흡음률은 체적과 함께 잔향시간을 결정짓는 요소로서 실의 형상과 더불어 건축음향 시물레이션 결과의 정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 본 연구에서는 A 문화회관에 대한 면밀한 도면검토를 바탕으로 각 부에 적용된 실내마감자재를 조사하였다. 이를 바탕으로 odeon의 material library에 공개된 재료의 흡음률을 입력하였으며 일부 재료의 경우 시험성적서 등을 통해 흡음률을 입력하였다. 또한 구체성이 다른 모델을 시물레이션할 때 모두 동일한 흡음률을 입력하였다.

**(5) 확산률 (scattering coefficient)**

재료의 확산성을 나타내는 확산률은 흡음률과 함께 실내음향성능 예측에 매우 큰 영향을 미치는 요소이지만 각 재료별 확산성능에 대한 자료가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 odeon 매뉴얼의 확산률에 대한 제안값을 사용하였다. 매뉴얼에 제안된 기준에 따라서 확산성능이 매우 높은 객석은 0.7로 입력하였으며 곡선형 벽체 및 천정과 같이 표면 형상에 의해 확산 성능을 가진 표면의 경

표 4. 음향인자 별 JND 기준  
Table 4. Room acoustical parameters and Just noticeable difference.

Parameter	JND	Parameter	JND
음압레벨 (SPL)	1 dB	잔향시간 (RT)	0.1초 (100ms)
음악명료도 (C80)	1 dB	음성명료도 (D50)	0.5 (5%)

우 0.3을 입력하였다. 이 외에도 평평한 판넬로 이루어진 벽체 및 천정, 바닥에는 0.1의 확산률을 입력하였다 [14].

**(6) JND (Just noticeable difference)**

JND란 어떠한 현상의 변화에 있어서 사람이 인지할 수 있는 최소한의 차이를 말하며, 음향측정결과와 시물레이션 결과 간의 차이에 대한 평가에 사용된다. 본 연구에서 사용된 음향인자별 JND는 다음의 표 4와 같다 [2, 20,21].

**2.4. 가청화시재 제작**

건축음향 시물레이션을 통해 산출한 물리적 음향인자가 가청화시재 제작에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시물레이션을 통해 각 모델에서 측정된 양이충격 응답음 (Binaural impulse response)과 음향데이터를 구하고 머리전달함수 (HRTF)를 적용한 바이노럴 신서시스 (binaural synthesis)를 구하였다. 그리고 현장음향녹음 시 사용된 무향음원 (anechoic sound)과 동일한 소리음원을 콘볼루션 (convolution)하여 가청화시재를 만들었다. 본 연구에서는 음악 및 음성에 대한 일반인 및 전공자의 청감반응을 조사하기 위하여 서양 음악과 강연시의 음성을 가청화시재로 제작하였다.

**2.5. 청감실험**

가청화시재의 연주순서는 청감실험 대상자들이 인지할 수 없도록 무작위로 정하였으며 현장에서 녹음한 음원과 함께 반복해서 들려주었다. 현장녹음음원 및 가청화

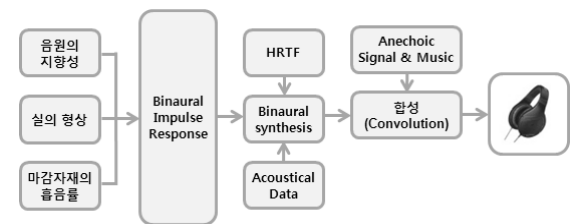


그림 5. 가청화시재 제작의 구성도  
Fig. 5. Procedure of auralized sounds.

표 5. 가청화시재의 연주순서와 재생시간  
Table 5. Play list and play time of subjective test.

재생 순서	음악 (Handel, Water Music Suite)		강연 (여자 아나운서, 일기예보)	
	구분	재생시간	구분	재생시간
1	현장녹음음원	25초	현장녹음음원	44초
2	d (TO=3, SN=44)	25초	c (TO=2, SN=547)	44초
3	b (TO=1, SN=2222)	25초	b (TO=1, SN=2222)	44초
4	c (TO=2, SN=547)	25초	a (TO=0, SN=4123)	44초
5	a (TO=0, SN=4123)	25초	d (TO=3, SN=44)	44초

시재의 연주시간은 음악의 경우 25초, 강연의 경우 44초로 설정하였다. 다음의 그림 5는 가청화시재 제작과정을 도식화 한 것이며, 표 5는 청감실험시 가청화시재의 연주 순서와 재생 시간을 나타내고 있다.

피실험자들은 각 문항의 주관적 평가인자별로 현장녹음과 가장 유사한 음원을 순서대로 선정하도록 하였다. 청감실험 응답시 현장녹음 음원과 가장 유사한 가청화시재에는 4점을 매기고 유사하지 않은 가청화시재에 1점을 매기도록 하였다. 청감실험의 대상자는 음향전공자 8인, 일반인 34인으로 총 42명을 대상으로 하였다.

### III. 물리적 (객관적) 음향인자 평가

3D 모델의 구체성과 시뮬레이션 결과의 정밀도를 비교하기 위하여 총 2회의 시뮬레이션을 수행하였다. 첫번째는 transition order를 포함한 설정 값을 동일하게 적용한 뒤 구체성이 서로 다른 3D model을 이용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 3D 모델의 구체성이 시뮬레이션 결과에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 두번째는 각 model의 구체성 즉, 유효표면수에 따라서 Odeon 소프트웨어에서 기본적으로 권고하는 transition order를 다르게 적용하여 분석하였다.

#### 3.1. 동일한 Transition order를 적용하였을 때

##### (1) 잔향시간

그림 6에 도식화된 잔향시간 측정결과와 현장음향실험을 비교한 결과 모델이 구체적일수록 보다 정밀한 음향예측이 가능한 것으로 나타났다. 특히 가장 단순한 d-model의 RT\_mid 값 (500 Hz~1 kHz에서의 잔향시간 평균)의 최대 편차가 약 0.27초로 매우 크게 나타났다. 한편 가장 복잡하게 제작한 a-model의 편차가 약 0.07초, b,

c-model의 편차가 0.11초로 나타남에 따라 3D 모델의 구체성이 시뮬레이션의 정밀도에 크게 영향을 미침을 알 수 있었다. 이는 잔향시간의 JND가 0.1초임을 감안할 때, 실제 음향실험 결과와 시뮬레이션 결과 간에 차이를 청각적으로도 인지할 수 있음을 나타낸다. 이것은 특히 저주파수 대역에서 나타나고 있으며 125 Hz를 제외한 주파수 대역의 오차를 비교한 결과 대부분의 모델의 시뮬레이션 결과가 음향성능 측정결과와의 차이가 약 0.1초 내에 존재한다는 것을 알게 되었다. 다만, d-model의 경우에는 약 0.24초 정도의 차이를 보여주고 있어서 모델이 지나치게 단순한 경우 저주파수 대역뿐만 아니라 고주파수 대역에서의 오차도 커짐을 알 수 있다.

##### (2) 명료도 (C80, D50)

음악명료도 (C80)의 경우 3D 모델의 구체성에 따른 특별한 경향성을 나타내진 않지만 b, d-model의 오차의 평균이 각각 2.3 dB, 2.1 dB로 가장 작게 나타났다. 그러나 오차가 가장 작은 d-model의 경우도 음악명료도에 대한 최소 인지범위인 1 dB을 벗어나고 있어서 실제 음향경과는 다소 다른 음향경을 이루고 있음을 알 수 있다.

음성명료도 (D50)에 있어서 최소 오차의 평균이 약 0.6으로 d-model에서 나타났다. 그러나 음성명료도 또한 마찬가지로 모든 시뮬레이션 결과가 실제 음향경과 0.5 이상의 오차가 나타났다.

#### 3.2. 상이한 Transition order를 적용하였을 때

##### (1) 음압레벨 (SPL)

현장음향실험에서 측정된 음압레벨과 시뮬레이션에 의하여 산출된 음압레벨의 객석 전체 평균값을 그림 7에 나타내었다. 현장음향실험 결과 음압레벨은 500 Hz를 기준으로 65.6 dB로 측정되었으며 시뮬레이션 결과 각 모델

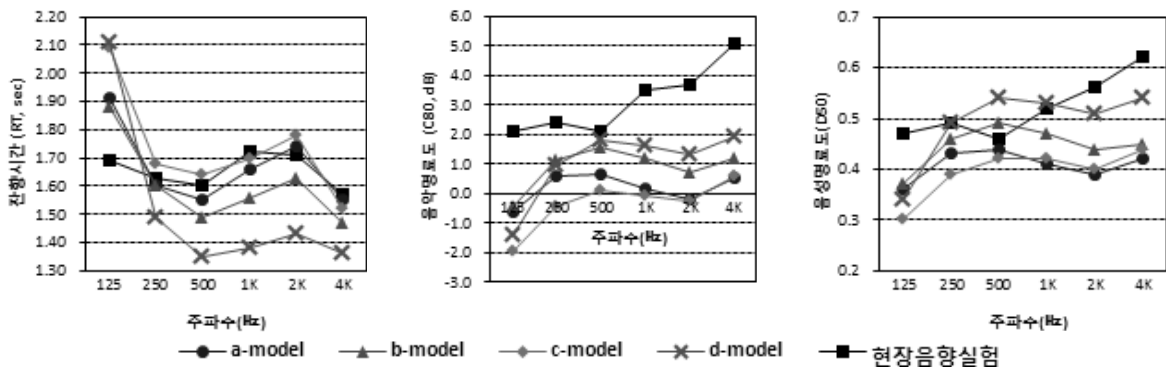


그림 6. 3D 모델의 구체성별 시뮬레이션 결과와 현장음향실험 결과의 비교  
Fig. 6. Result of acoustic simulation and acoustic measurement.

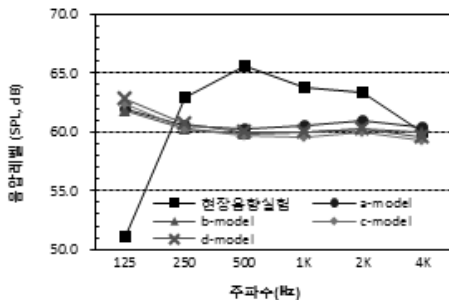


그림 7. 음압레벨 결과 비교 (dB)  
Fig. 7. Comparison of SPL (dB).

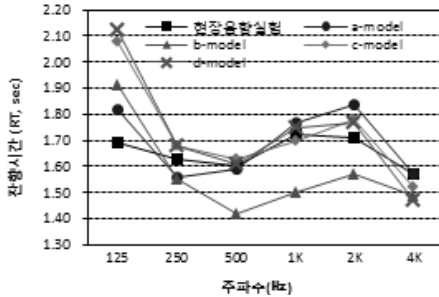


그림 8. 잔향시간 결과 비교 (초)  
Fig. 8. Comparison of RT (sec).

별로 59.7 dB에서 60.3 dB에 걸쳐서 나타났다. 현장음향 실험 결과와 시뮬레이션의 음압레벨 오차는 최소 5.3 dB에서 최대 5.9 dB로 나타났다. 주파수 대역별 분석결과 500 Hz 이상에서 고주파수대역으로 갈수록 오차의 평균이 약 5.7 dB, 3.8 dB, 3.0 dB, 0.2 dB로 작아지고 있음을 알 수 있었다. 반면 125 Hz 대역에서는 오차의 평균이 최대 11.7 dB로 다른 주파수대역에 비하여 월등히 높게 나타남으로써 모델의 구체성과는 상관없이 저주파수 대역에서의 음압레벨 예측에 큰 오류가 있음을 알 수 있었다. 이는 컴퓨터 시뮬레이션의 음선추적법 (ray tracing)에 의한 영향으로 해석된다. 또한 각 모델별 시뮬레이션 결과와 현장음향실험 결과의 차이를 평균에 있어서 가장 구체적인 a-model이 4.1 dB로 가장 작게 나타났으며, b, c, d-model은 각각 4.3 dB, 4.7 dB, 4.5 dB로 나타났다. 위 결과를 종합해 볼 때 음압레벨 예측에 가장 적합한 모델은 실제 음압레벨과의 오차가 가장 작은 a-model임을 알 수 있다. 그러나 각 모델간 음압레벨 차이는 사람이 음압레벨의 크기 차이를 인지할 수 있는 범위 (JND)인 1 dB 내에 존재하는 값으로써 실제로는 모델별 결과의 차이를 인지 할 수 없을 것으로 판단된다.

(2) 잔향시간 (RT)

그림 8에는 현장음향실험과 음향시뮬레이션에 의해

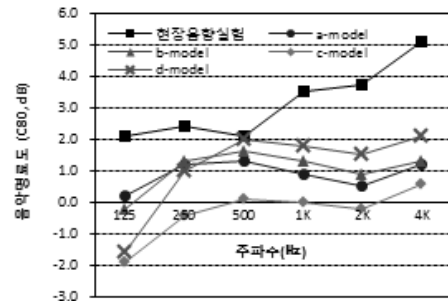


그림 9. 음악명료도 결과 비교 (dB)  
Fig. 9. Comparison of C80 (dB).

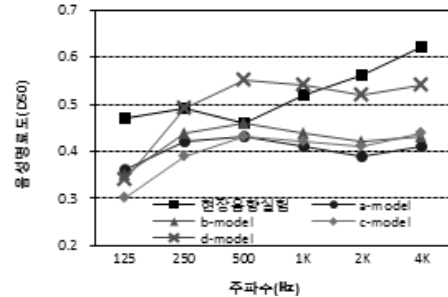


그림 10. 음성명료도 결과 비교  
Fig. 10. Comparison of D<sub>50</sub>.

측정한 각 수음점별 잔향시간의 평균을 비교하여 주파수 별로 나타내었다. b-model을 제외한 모든 3D model의 시뮬레이션 결과가 125 Hz를 제외하고 전주파수 대역에서 현장에서 측정한 실제 잔향시간과 유사함을 알 수 있었다. 그러나 주파수 대역 전체의 오차 평균을 비교한 결과 a-model에 의한 주파수대역별 잔향시간의 평균이 실제 잔향시간과 약 0.07초로 가장 작은 오차를 나타냈다. 반면 b, c, d-model의 경우 각각 0.15초, 0.10초, 0.11초의 오차가 발생하고 있는데, 이는 사람이 인지할 수 있는 잔향시간의 차이가 0.1초를 초과하고 있다. 따라서 a-model을 제외한 모든 3D model의 잔향시간은 실제와 매우 유사하게 예측됨을 알 수 있었다. 특히 a-model은 저주파수 대역인 125 Hz의 오차가 가장 작게 나타난 모델이다.

(3) 명료도 (C80, D50)

현장음향실험과 시뮬레이션에 의한 평균 음악명료도를 그림 9와 그림 10에 비교하여 나타내었다. 음악명료도 (C80) 분석결과 현장음향실험 결과와의 오차가 각각 2.3 dB, 2.1 dB, 3.5 dB, 2.0 dB로 나타났으며, 가장 오차가 작은 3D 모델은 d모델로 조사되었다. 그러나 c-model을 제외한 a, b, c-model의 오차가 약 0.1 Hz에서 0.3 Hz로 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 음성명료도

(D50) 또한 음악명료도와 마찬가지로 d-model의 오차가 0.06으로 가장 작은 것으로 나타났으며, 최대 오차는 a-model에서 0.12로 나타났다. 음성명료도의 JND값이 0.5 (5%)임을 감안할 때 모든 시뮬레이션 결과가 실제 음환경과 구별되지만 그 중 d-model의 시뮬레이션 결과가 실제와 가장 가깝게 나타나는 것으로 나타났다.

#### IV. 주관적 음향인자 평가

3D 모델의 구체성이 음향시뮬레이션에 미치는 영향을 주관적 음향인자를 통해 분석하기 위하여 현장에서 녹음한 음원과 가청화시재를 청감실험을 통해 비교하였다. 청감실험 응답결과는 음향전공자 그룹 (8인)과 일반인 그룹 (34인)으로 구분하였으며 표시하였으며, 평균에는 총 42인의 응답결과의 평균값을 나타낸 것이다. 주관적 음향인자별 응답결과가 2.5점 이상일 때 피실험자는 가청화시재가 실제 음원과 청각적으로 유사하다고 느낀 것을 의미한다.

물리적 음향인자의 평가 결과 transition order를 동일하게 하거나 다르게 하였을 때 모두 3D모델의 구체성이 높을수록 실제값과의 오차가 작게 나타났다. transition order를 동일하게 설정할 경우 모델의 구체성에 의한 물리적인 오차를 객관적으로 판단할 수 있지만 실제로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하는 경우 3D모델의 표면수에 따라 Transition order가 권고됨으로 주관적 음향인자의 평가에서는 Transition order를 3D 모델의 구체성에 따라 권고한 값을 사용한 시뮬레이션의 결과를 사용하였다.

##### 4.1. 음악 (Music)

음악공연시의 음환경을 비교하기 위해 Handel의 No.6 Water Music Suite의 무향음원을 이용하여 현장에서 녹음하고 가청화시재를 제작해 청감실험을 수행하였다. 서양악의 청감실험 결과는 음악에 대한 주관적 평가지표인 명료함 (Clarity), 잔향감 (Reverberance), 따뜻함 (Warmth), 음의 밝기 (Brilliance)와 함께 종합적인 평가 (Overall Impression)를 통해 분석하였다.

###### (1) 명료함 (clarity)

명료함 (Clarity)은 음악연주시 음이 깨끗하고 뚜렷하게 들리는 정도를 나타내는 주관적 음향인자를 말한다. 이는 물리적 음향인자인 음악명료도 (C80)와 밀접한 관계를 맺는다. 다음의 그림 11은 청감실험 결과를 나타내고 있다.

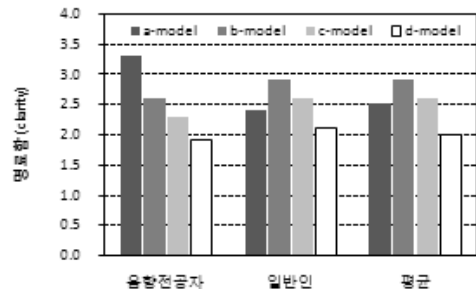


그림 11. 명료함에 대한 청감실험 결과  
Fig. 11. Result of clarity.

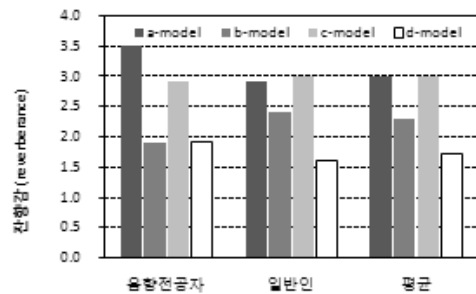


그림 12. 잔향감에 대한 청감실험 결과  
Fig. 12. Result of reverberance.

음향전공자의 경우 가장 구체적으로 작성한 a모델의 가청화시재가 실제 음과 가장 유사하다고 응답하였으며, 모델의 구체성이 떨어질수록 가청화 시재의 청각적 유사성 또한 떨어지는 것으로 평가하였다. 일반인의 경우 모델간의 유사성에 대한 응답결과가 크게 차이가 없음을 알 수 있는데, 이는 일반인 그룹이 가청화시재와 실제 음원의 차이점을 구분하기 어려웠다는 것을 의미한다.

###### (2) 잔향감 (reverberance)

잔향감 (Reverberance)이란 공간내의 음이 울리는 정도를 나타내는 주관적 음향지표로서, 물리적 음향지표인 잔향시간 (RT)의 영향을 받는다. 그림 12에 나타난 청감실험 결과, 모델별 오차의 물리적인 편차가 JND 내인 0.1초 내에 존재하지만 잔향시간의 오차가 가장 작은 a-model이 현장 음원과 가장 유사한 것으로 응답하였으며, 그 다음으로 오차가 작은 c-model의 음원이 실제와 두번째로 유사하다고 응답하였다. 또한 b, d-model의 경우 오차의 차이에 응답결과가 일치하는 경향이 나타나지는 않았지만, 둘 다 2.5점 이하로 매우 낮은 점수를 보임으로 인해 현장 음원과는 매우 다른 결과를 나타내고 있다. 특히 음향전공자의 경우 b, d model, 일반인 그룹의 경우 d model의 가청화시재가 실제 음과 가장 다르게 느낀 것으로 나타났다. 그 중 b와 d model의 잔향시간 오차가 0.11초에서 0.15초로 가장 큰 것을 감안하면 피실험자들



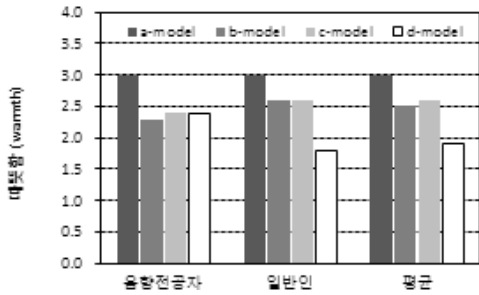


그림 13. 따뜻함에 대한 청감실험 결과  
Fig. 13. Result of warmth.

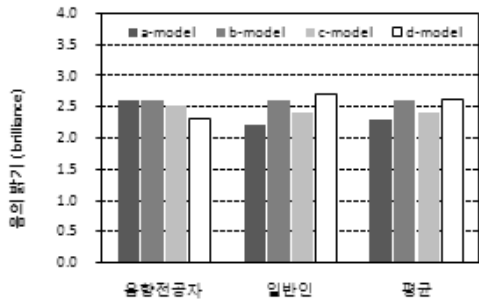


그림 14. 음의 밝기에 대한 청감실험 결과  
Fig. 14. Result of brilliance.

은 가청화시재를 통해 이 편차를 느낀 것으로 해석된다.

**(3) 따뜻함 (warmth)**

음의 따뜻함 (Warmth)은 저주파수대역의 잔향감이 풍부하거나 중주파수 대역에 비해 저음의 톤이 더 비중있게 들리는 것을 말한다. 이는 물리적 음향인자인 저음비 (BR)과 밀접한 관계를 맺는다. 그림 13에 나타난 바와 같이 가청화 시재를 청감실험을 통해 실제 음과 비교한 결과 따뜻함 면에 있어서 모든 피실험그룹은 모두 a-model의 가청화 시재가 실제와 가장 유사하다고 응답하였다. 이는 a-model의 저음비 오차가 0.01로 매우 작은 것에 반하여 기타 모델의 저음비 오차는 0.13에서 0.18로 큰 것을 감안하면 피실험자들이 이 물리적 차이점을 청각적으로 느낀 것으로 판단된다.

**(4) 음의 밝기 (brilliance)**

음의 밝기 (Brilliance)는 음색이 밝고 깨끗하며 고음에 울림이 있으며 풍부한 음을 이야기한다. 음의 밝기는 물리적 음향지표인 고음비 (TR, 2k) 및 초기시간지연차 (ITDG)에 영향을 받는다. 다음의 그림 14는 음의 밝기에 대한 청감실험 결과를 고음비 (TR)과 비교하여 나타난 것이다. 청감실험결과 음향전공자 및 일반인그룹 모두 가청화시재별 유사성에 대한 응답결과가 유사한 것으로

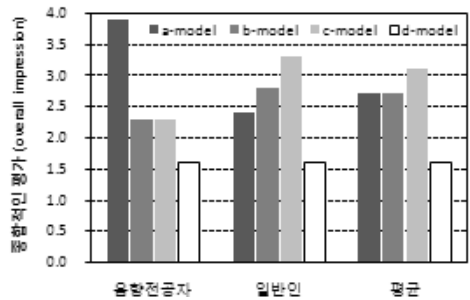


그림 15. 종합적인 평가에 의한 청감실험 응답결과  
Fig. 15. Result of overall impression.

나타났다. 이는 피실험자들을 실제 음과 가청화시재간의 차이점을 구분하지 못한 것으로 해석해 볼 수 있는데, 이는 시뮬레이션 결과 중 고음비의 물리적 오차가 0.14에서 0.23으로 큰 영향으로 보인다.

**(5) 종합적인 평가 (overall impression)**

다음의 그림 15는 청감실험을 통해 가청화시재를 듣고 전반적인 음의 느낌이 실제 음과 유사하다고 느낀 순서대로 나열한 것이다. 그 결과 음향전공자의 경우 3D 모델의 구체성이 높아질수록 가청화시재의 정확도도 향상되는 것으로 판단하였다. 일반인 그룹의 응답결과를 분석한 결과 a, b, c model의 가청화시재의 유사성을 판단하기에 다소 어려움이 있으나 d model의 가청화시재와 실제 음과 상당한 차이점을 느낀 것으로 응답하였다.

**4.2. 강연 (speech)**

스피커를 통한 음성이나 강연시의 음성전달에 대한 음환경 평가를 위하여 여성 아나운서의 말소리 무향음원을 현장에서 녹음한 음원과 가청화시재를 이용하여 청감실험을 하였다. 강연의 경우 음성에 대한 주관적 평가지표인 명료함 (Definition), 잔향감 (Reverberance)과 함께 종합적인 평가 (Overall Impression)를 통해 분석하였다.

**(1) 명료함 (definition)**

다음의 그림 16은 강연과 같은 음성전달시 깨끗하고 뚜렷하게 들리는 정도에 대한 청감실험 결과이다. 음향전공자의 명료함에 대한 청감실험결과를 살펴보면 가장 단순하게 작성한 모델이면서 물리적인 오차가 가장 작은 d모델의 가청화시재가 현장의 음환경과 가장 유사하다고 느낀 것으로 응답했다. 반면 일반인 그룹의 경우 응답결과에 큰 편차가 없는 것으로 볼 때 음성의 명료도에 있어서 가청화시재와 실제음의 차이를 느끼지 못한 것으로 나타났다.

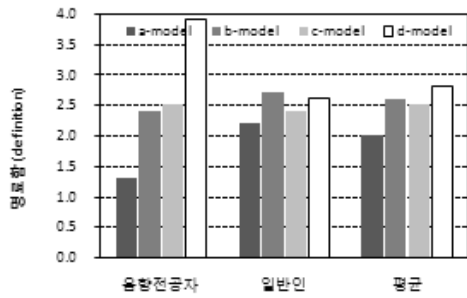


그림 16. 명료함에 대한 청감실험 결과  
Fig. 16. Result of definition.

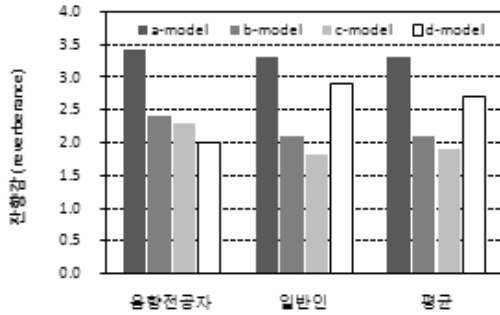


그림 17. 잔향감에 대한 청감실험 결과  
Fig. 17. Result of reverberance.

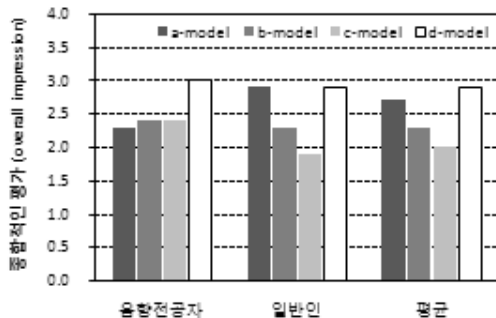


그림 18. 종합적인 평가에 의한 청감실험 응답유형  
Fig. 18. Result of overall impression.

(2) 잔향감 (reverberance)

다음의 그림 17은 음성 전달시 음이 울리는 정도에 대한 평가지표인 잔향감에 대한 청감실험 결과이다. 잔향감의 청감실험 결과 음향전공자 및 일반인 그룹과 그 합계 모두 가장 구체적으로 제작한 a모델의 잔향감이 실제 음원과 가장 유사하다고 응답했다.

(3) 종합적인 평가 (overall impression)

청감실험을 통해 가청화시재를 듣고 종합적인 인상을 평가한 결과 현장녹음 음원과 전반적인 특성이 유사하다고 느낀 순서대로 그림 18에 나타내었다. 종합적인 평가를 살펴보면 음향전공자 및 일반인 그룹과 그 합계 결과를 살펴보면 모두 d모델의 가청화시재가 현장녹음음원과

가장 유사하게 느낀 것으로 나타났다. d모델은 음성명료도 (D50) 오차가 가장 작으며 가장 단순하게 제작한 3D 모델이다.

V. 결론

본 논문은 건축음향 시뮬레이션 수행시 입력되는 3D 모델의 구체성이 음환경 예측의 정밀도에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 각 실험결과를 종합하여 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 물리적 음향인자를 분석한 결과, 음압레벨 및 잔향 시간은 가장 구체적으로 작성한 a-model의 오차가 가장 작은 것으로 나타났으며 명료도 (C<sub>80</sub>, D<sub>50</sub>)의 경우 가장 단순하게 작성한 d-model의 오차가 가장 작게 발생하였다. 그리고 전체적으로 중고주파수 대역 (500 Hz~4 kHz)의 오차보다 저주파수 대역 (125 Hz~250 Hz)의 오차가 큰 것을 확인할 수 있었으며, 특히 3D 모델을 단순하게 제작할수록 저주파수 대역의 오차도 커지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 전 주파수대역의 오차를 줄이기 위해 모델을 보다 구체적으로 작성해야 할 것으로 판단된다.
- (2) 주관적 음향인자 평가결과 피실험자들은 음악을 들었을 때 음의 잔향감과 따뜻함 면에 있어서 구체적으로 제작한 a-model의 가청화시재가 현장녹음 음원과 가장 유사하다고 응답하였다. 이는 물리적 음향평가에서 a-model의 잔향시간 및 저음비의 오차가 가장 작게 나타난 것과 일치하는 결과이다. 또한 음성을 이용한 강연시의 청감실험 결과 명료함은 d-model, 잔향감은 a-model이 현장녹음 음원과 가장 유사하게 느낀 것으로 나타났다. 이는 d-model의 음성명료도 (D<sub>50</sub>)의 오차가 가장 작게 나타난 결과 및 a-model의 잔향시간 오차가 가장 작게 나타난 결과와 동일하다. 그 밖에도 고음비와 같이 각 모델의 오차가 거의 없었던 경우 음의 밝기에 대한 청감실험에서 피실험자들은 현장녹음 음원과 유사한 가청화 시재를 찾기 어려웠던 것으로 나타났다.

본 논문의 결과, 3D 모델의 유효표면수 즉, 구체성이 건축음향 시뮬레이션 결과에 영향을 미치며, 이 물리적 오차는 가청화 시재에도 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 따라서 건축음향 시뮬레이션의 수행에 있어서 잔향 시간 예측시 3D 모델을 최대한 구체적으로 제작해야 할

것으로 판단된다. 또한 명료도 지수에서는 단순한 모델의 평균오차가 가장 작게 나타났는데 이 경우 저주파수 대역의 오차가 상대적으로 매우 크게 발생함을 알 수 있었다. 3D모델의 구체성에 따라 시뮬레이션의 계산시간은 크게 문제가 되지 않기 때문에 결국, 구체성을 더한다는 것은 3D 모델의 제작과정의 시간과 노력이 소요 된다는 것이다. 결론적으로 3D 모델을 구체적으로 작성하여야 실내음향지수에서 제일 중요한 잔향시간의 예측을 보다 정밀하게 하고, 실제 음환경에 가까운 가정화 시재의 제작이 가능할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 보다 정밀한 건축음향 시뮬레이션 결과 산출을 위한 3D 모델의 구체성에 대해 조사하고, 실의 목적을 두 가지로 나누어 시뮬레이션 수행에 적합한 3D 모델의 구체성을 제안하였다. 그러나 본 연구에 있어서 시뮬레이션의 설정값 및 변수에 의한 영향을 완전히 배제할 수 없는 한계를 가지고 있다. 또한 한 공연장을 대상으로만 연구를 수행하였기 때문에 결과의 일반화에 큰 어려움이 있다. 그러나 이를 토대로 연구를 지속적으로 수행한다면 음향시뮬레이션의 오차를 줄이기 위한 3D 모델의 구체성을 정량화 할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 논문에서 사용된 연구방법을 사용해 지속적으로 연구할 경우 공간의 사용 목적에 알맞은 3D 모델링의 방법론이 정리 될 것으로 보인다.

### 감사의 글

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참고 문헌

1. J.J.Sendra, *Computational Acoustics in Architecture*, WITpress, 1999.
2. I.Bork, "A comparison of room simulation software – The 2nd round robin on room acoustical computer simulation", *Acustica – Acta Acustica*, vol. 86, pp. 943–956, 2000.
3. I.Bork, "Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation – Part II: Calculations", *Acustica – Acta Acustica*, vol. 91, pp. 753–763, 2005.
4. C.H.Haan and F.R.Fricke, "Predicting the Acoustics of Concert Halls Using an Artificial Neural Network", *Acoustics Australia*, vol. 23, no. 3, pp. 87–95, 1995.
5. J. Kirszenstein, "An image source computer model for room acoustics analysis and electroacoustic simulation", *Applied Acoustics*, vol. 17, no. 4, pp. 275–290, 1984.
6. Michael Vorländer, "International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulations", *ICA 15*, 1995.

7. I.Bork, "Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation – Part I measurements", *Acustica – Acta Acustica*, vol. 91, pp. 740–752, 2005.
8. Jens Holger Rindel, Claus Lyngge Christensen, "Room Acoustic Simulation and Auralization –How Close Can We Get To the Real Room?", *WESPAC 8*, April 2003.
9. 한찬훈, "안산시 문화예술회관 건축음향 설계보고서", 충북대학교, 건설기술연구소, 2004.
10. C.H.Haan, "Comparison of Predicted Acoustics with the Measured Acoustic Properties of a Multi-purpose Hall", *한국 음향학회지*, vol. 25, no. 3E, pp. 95–100, 2006.
11. 한찬훈, 신직수, "청감실험에 의한 국악당의 음향설계조건 설정", *한국 음향학회지*, 제26권 제7호, 343–352쪽, 2007.
12. Claus Lyngge Christensen, "Odeon Combined Version 6.5, User manual", Odeon, Technical University of Denmark, Lyngby, 2003.
13. 박찬재, 한찬훈, "건축음향 시뮬레이션의 설정값이 시뮬레이션 결과에 미치는 영향", *한국음향학회 학술발표대회논문집*, 29권, 2(s)호, 356–361쪽, 2010.
14. Claus Lyngge Christensen, "ODEON Import of CAD files in the DXF format – problems and solutions", Odeon Technical note, www.odeon.dk, 2007.
15. www.odeon.dk
16. 박찬재, 한찬훈, "3-D모델의 구체성이 음향시뮬레이션의 정확도에 미치는 영향", *한국음향학회 학술발표대회 논문집*, 27권, 1(s)호, 2008.
17. 박찬재, 한찬훈, "청감실험에 의한 3차원 음향모델의 구체성 검증", *한국음향학회 학술발표대회 논문집*, 27권, 2(s)호, 2008.
18. 박찬재, 한찬훈, "가정화기법을 이용한 음향시뮬레이션 3D 모델의 적합성 조사", *한국음향학회 학술발표대회논문집*, 28권, 1(s)호, 130–135쪽, 2009, 5.
19. C.J.Park, C.H.Haan, "Correlation between concreteness of 3D Model and the Accuracy of the Acoustic Simulation Using Subjective Listening Tests", *제10차 서태평양지구음향학회논문집 (10th WESPAC Conference)*, Beijing, 9, 2009.
20. M. David Egan, *Architectural Acoustics*, McGraw-Hill, pp. 21, 1988.
21. M.Mehta, J.Johnson, J.Rocafort, *Architectural Acoustics*, Prentice Hall, pp 12, 1999.

### 저자 약력

#### •박찬재 (Chan-Jae Park)



2006년: 충북대학교 건축공학과 (공학사)  
 2009년: 충북대학교 건축공학과 (공학석사)  
 2010년 ~ 현재: 충북대학교 건축공학과 (박사과정)  
 ※ 관심분야: 건축음향

#### •한찬훈 (Chan-Hoon Haan)



1983년: 홍익대학교 건축학과 (공학사)  
 1985년: 연세대학교 건축공학과 (공학석사)  
 1993년: University of Sydney (건축학박사)  
 1994년 ~ 현재: 충북대학교 건축공학과 교수  
 ※ 관심분야: 건축음향, 소음 · 진동 제어기술