

시뮬레이션과 청감실험을 통한 공연장 형태별 음향성능 비교분석

Comparison of the acoustical performance of auditoria by shapes using acoustic simulation and listening tests

강찬우,¹ 한찬훈[†]

(Chanwoo Kang¹ and Chan-Hoon Haan^{1†})

¹충북대학교

(Received January 12, 2023; revised May 1, 2023; accepted May 15, 2023)

초 록: 본 연구에서는 홀의 건축형태에 따른 음향성능을 분석하였다. 홀에는 4가지 건축 형태가 있다. 장방형, 말발굽형, 서라운드형(Surround), 부채꼴형이다. 음향성능을 분석하는데 RT₆₀, EDT, C₈₀, BQI, LF, G_{mid}, G₁₂₅, ITDG 총 8개의 음향인자를 사용하였으며 건축형태에 따른 음향성능을 연구하기 위해 두 가지 접근 방식을 사용하였다. 첫째 전 세계 유명 콘서트홀의 측정 데이터를 분석하였다. 설문조사로 조사한 홀의 주관적 선호도와 측정된 음향인자 사이의 관계를 회귀 분석해 상관계수 R을 얻었으며 각 공연장 형태별 음향인자 측정데이터 평균을 구하였다. 각각의 음향인자에 대한 가중치로 상관계수 R을 사용해 각 형태별 음향성능을 계산하였다. 그 결과 장방형 홀과 말발굽형 홀이 좋은 음향성능을 보였으나 부채꼴형 홀의 음향성능은 좋지 않았다. 둘째, 각 건축형태별 3D 모델을 만들어 음향 시뮬레이션을 수행했다. 동일한 체적과 흡음계수를 가지는 장방형, 말발굽형, 서라운드형, 부채꼴형 3D 모델을 만들어 시뮬레이션을 진행해 음향인자 값을 산출하였다. 또한 형태별 3D 모델의 임펄스 응답을 사용해 가청화 시제를 만들어 청감실험을 진행하였다. 그 결과 장방형 홀과 말발굽형 홀이 가장 좋은 음향성능을 나타냈으며 서라운드형과 부채꼴형은 상대적으로 떨어지는 음향성능을 나타내었다.

핵심용어: 공연장 형태, 음향성능, 음향인자, 장방형, 말발굽형, 서라운드형, 부채꼴형

ABSTRACT: In this study, the acoustic performance was analyzed by architectural shapes of the hall. There are four architectural shapes of halls. They are rectangular, horseshoe, surround, and fan-shape. Eight acoustic parameters were used to determine the acoustic performance. These are RT₆₀, EDT, C₈₀, BQI, LF, G_{mid}, G₁₂₅ and ITDG. First, measurement data of famous concert halls around the world were analyzed. The correlation coefficient R was obtained by regression analysis of the relationship between the subjective ranking of the halls and the acoustic parameters. It was found that BQI, G, and ITDG have higher correlation coefficients R. Also the average of acoustic parameters for each architectural shape were obtained. The total acoustic performance for each shape was calculated by using the correlation coefficient R as a weight for each acoustic parameters. As a result, rectangular halls and horseshoe halls showed good acoustical performances. Second, 3D models of each architectural shape were created and acoustic simulation had been performed. The simulation was performed by creating 3D models of each four shapes of concert halls with the same volume and sound absorption coefficient. Listening test was carried out using the sound source which is created from impulse responses of 3D model. As a result, rectangular hall and horseshoe hall showed the best performance however surround hall and fan-shaped hall showed relatively poor performance.

Keywords: Auditoria shape, Acoustic performance, Acoustic parameter, Rectangle, Horseshoe, Surround, Fan-shape

PACS numbers: 43.55.Fw.

†Corresponding author: Chan-Hoon Haan (chhaan@chungbuk.ac.kr)

Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea

(Tel: 82-43-261-2438, Fax: 82-43-260-2438)



Copyright©2023 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

공연장의 음향성능은 공간의 형태, 체적 그리고 마감재의 흡음계수에 따라 달라진다. 특히 공연장의 전체적인 음향성능을 결정하는 것은 공연장의 형태이다. 이는 공연장의 형태가 공간의 전체적인 반사패턴을 결정하기 때문이다. 같은 잔향시간을 갖는 공연장이라도 형태에 따라 다른 반사패턴을 가지며, 이에 따라 체감되는 음향성능도 달라진다.

따라서 공연장 형태에 근본적인 문제가 있다면, 공연장의 세부적인 모양과 마감재를 잘 사용하여도 음향성능의 문제를 극복하기 어려울 수 있다. 건축 설계 단계에서부터 최적의 음향성능을 얻기 위해 어떤 공연장 형태를 채택해야 하는지는 이미 기존의 여러 선행연구를 통해 밝혀져 있지만, 본 연구를 통해 형태별 음향성능에 대해 통계적인 방법, 청감실험을 통한 방법으로 연구해 이를 다시 확인하였다.

특히 4개 공연장 건축 형태의 시뮬레이션 3D 모델을 사용해 체적, 흡음계수 등의 요소는 일치시키고 형태만 다르게 만들어 이를 가청화시제로 제작해 청감실험을 수행하였다.

시대별로 다양한 형태의 공연장이 유행하였다. 19세기에는 장방형이라 부르는 직육면체 형태의 콘서트홀이 유행했으며 같은 시기에 오페라 공연을 위한 말발굽 형태의 홀이 유행하였다. 20세기 초반부터 클래식 콘서트와 다목적으로 사용하기 위한 부채꼴 형태가 유행하기 시작했으며, 20세기 중반에는 서라운드 형태와 같은 복잡한 홀이 만들어지기 시작하였다. 본 연구에서는 장방형, 서라운드형, 말발굽형, 부채꼴형 4가지로 공연장의 건축형태를 분류해 연구하였다.

또한 음향성능 분석에 사용하기 위해 본 연구에서는 8개의 다양한 음향상태를 나타내는 음향인자를 사용하였다. 사용한 음향인자는 Reverberation Time (RT_{60}), Early Decay Time (EDT), Clarity (C_{80}), Binaural Quality Index (BQI), Lateral Fraction (LF), Strength (G_{mid}), Bass Strength (G_{125}), 그리고 Initial Time Delay Gap (ITDG)이다.

II. 선행연구 조사

2.1 Somerville와 Gilford 연구

Somerville과 Gilford^[1]는 음악 홀에 적합한 디자인 기준을 얻기 위해 9개 콘서트홀을 조사하였다. 홀의 여러 위치에서 사운드 레벨과 잔향시간을 비교하여 콘서트홀의 형태와 음향의 영향을 조사하였다. 그들은 오래된 장방형 콘서트홀이 오늘날 무대 위에 반사판이 있는 부채꼴 형태의 홀보다 더 나은 음향을 가지고 있다고 결론을 내렸다. Somerville과 Gilford는 현대 콘서트홀이 예전 콘서트홀만큼 좋지 않은 이유는 후면 벽의 높은 흡음계수가 특히 저음 잔향을 감소시키기 때문이라고 말한다.

2.2 Barron의 연구

Barron^[2]은 영국의 11개 콘서트홀에서 설문지를 통한 주관적인 조사와 객관적인 음향측정을 진행하여 주관적 선호도와 객관적 측정결과에 대한 상관성을 밝히려 하였다. 그는 설문조사를 통해 전체 음향인상(Overall Acoustic impression)은 잔향(Reverberance), 공간감(envelopment), 친밀함(Intimacy), 소리크기(Loudness)와 연관성이 높다는 것을 발견하였다. 또한 친밀함(Intimacy)은 소리크기(Loudness)와 높은 연관성이 있음을 새롭게 발견하였다. 한편 명료도(Clarity)는 전체적인 음향인상과 연관성이 높지 않았는데, 이는 콘서트홀에서 오케스트라 음악을 들을 때 명료한 소리보다 잔향이 충만한 소리를 선호하기 때문에 나타난 결과로 보인다.

2.3 Bradley의 연구

Bradley^[3]는 초기 반사음, 음악 명료도, 측벽 반사, 강도 등 다양한 측면에서 공연장의 성능을 판단할 수 있는 방법을 분석하였다. 그의 연구는 기존 독일의 Gottlob, Lehman & Wilkens 연구와 Barron의 연구를 종합하여 콘서트홀을 평가하기 위한 중요한 주관적 음향인자 리스트를 제시하였는데, 이는 Table 1에 나타나 있다. 또한 유럽과 북미에 위치한 11개 콘서트홀에서 C_{80} , EDT, G 값의 공간에 따른 변화를 조사하여 표준편차를 홀 내부의 균질성을 평가하기 위한 요소로 사용하였다.

Table 1. Five subjective attributes of auditorium acoustics by J.S Bradley.

Subjective attributes	Parameters
Strength or loudness	G, Strength
Reverberance	Early Decay Time, EDT
Clarity	C ₈₀ , clarity
Envelopment	Lateral energy fraction, LF
	Binaural Quality Index, BQI
Timbre	EDT(f)

2.4 Beranek의 연구

Beranek^[4]은 100여 개의 콘서트홀과 오페라 하우스의 음향특성과 선호도를 조사하였다. 그는 인터뷰와 설문조사를 통해 홀의 순위를 매긴 후, 이것이 홀의 객관적인 측정값과 어떠한 연관성이 있는지 조사하였다.

그의 조사에서 상위에 링크된 15개 홀 중 2/3가 장방형 형태였다. Beranek은 홀을 과도하게 넓게 만들지 않는 한 장방형 형태가 안정적인 음향설계라고 말한다. 장방형의 평행한 측벽은 필요한 초기반사를 청중들에게 보장하는데, 이는 공간감을 가지기 위해서 필수적인 요소라고 이야기한다.

Beranek은 홀의 순위와 측정된 음향인자의 관계를 제시할 때 통계적 방법을 사용하지 않고 단순한 그래프로 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 그의 연구를 보완하는 차원에서 회귀분석을 사용하여 홀의 순위와 음향인자의 관계를 조사하였다.

2.5 한찬훈의 연구

Haan^[5]은 홀의 건축적인 요소인 체적, 표면적, 깊이, 각도 등을 사용하여 홀의 성능을 판단하는 연구를 하였는데 홀의 형태에 따른 음향성능에 관한 연구도 진행하였다. 그는 음악전문가들이 경험적으로 체험한 공연자의 음향을 주관적으로 얼마나 좋게 생각하는지 Acoustical Quality Index(AQI) 지수로 정의하고 AQI 지수가 건축 형태별로 어떻게 분포하는지 파악하였다. AQI는 사람들이 주관적으로 음향을 평가한 것을 수치화시킨 것으로 1이 가장 좋고 0이 가장 낮은 값이다. AQI 지수를 얻기 위해 다양한 사람들에게 설문조사를 진행하였는데, 이는 주관적인 평

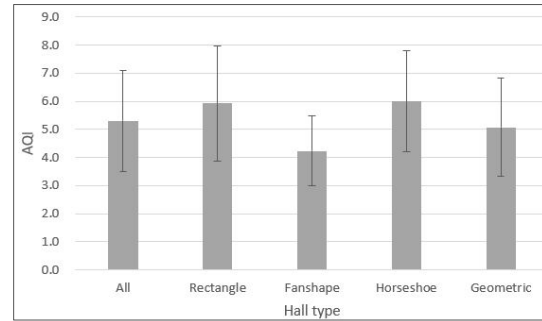


Fig. 1. AQI distribution of each hall shape.^[5]

가를 기반으로 홀의 음향성능을 정량화하려는 시도였다. Fig. 1의 그래프는 각 공연장 형태별 AQI 지수이다. 장방형(Rectangular) 형태와 말발굽(Horseshoe) 형태의 점수가 높게 분포되어 있으며, 부채꼴(Fan) 형태의 점수는 낮게 분포되어 있다.

2.6 선행연구 분석 요약

Somerville & Gilford, Beranek, 그리고 Haan의 연구에서 장방형 홀의 음향성능이 가장 우수하며 부채꼴형 홀의 음향성능이 좋지 않음을 알 수 있다. 이는 장방형은 평행한 측벽에서 친밀감과 공간감 형성에 필요한 초기반사음이 원활하게 만들어지지만 부채꼴형은 뒤로 갈수록 측벽 초기반사음 생성이 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 Beranek의 연구를 보완하는 차원에서 보다 통계적인 방법인 회귀분석을 사용해 홀의 순위와 음향인자의 관계를 조사할 것이며 통계적 방법과 시뮬레이션을 사용한 청감실험을 통해 건축형태별 주관적 음향성능을 연구할 것이다.

III. 음향성능에 영향을 미치는 음향인자

3.1 측정된 음향인자와 주관적 선호도

Beranek은 그의 저서 ‘Concert Hall and Opera House; How They Sound’에서 흥미로운 연구를 진행하였다. 전 세계 유명 콘서트홀과 오페라 하우스의 음향인자를 측정하고, 객관적인 측정 데이터가 사람들이 느끼는 주관적인 홀의 평가와 어떤 연관성이 있는지 조

사하였다. 그의 저서에는 여러 홀의 측정 데이터뿐 아니라 설문조사를 통해 산출된 홀의 순위가 명시되어 있다. 그는 총 58개의 콘서트홀을 조사했으며 지휘자, 음악 비평가, 음악 애호가들에게 설문조사를 실시하여 홀의 주관적 순위를 산출하였다. Beranek은 그의 연구에서 상위 20개와 하위 19개 홀의 순위는 정하였으나 중위 19개 홀은 순위를 정할 수 없어 동일한 순위로 설정하였다.

본 연구에서는 Beranek이 조사한 58개의 콘서트홀 중 RT, EDT, ITDG 측정 데이터가 존재하는 42개 홀의 데이터를 사용하여 분석을 진행하였다.

첫 번째로 주관적 선호도와 측정된 음향인자의 관계분석을 위해 Beranek이 수집한 객관적 음향측정 데이터와 설문조사를 통해 얻은 주관적 선호도 결과 사이의 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 기반으로 음향인자와 주관적 선호도 사이의 상관관계를 파악하여 주관적 음향성능에 영향을 미치는 음향인자가 무엇인지 파악하였다.

두 번째로 Barron과 Bradely의 선행연구에서 밝혀진 음향속성 분류를 종합하여 본 연구에서 사용할 음향속성을 결정하였으며, 회귀분석을 통해 도출된 중요도에 따라 음향인자를 선별하였다.

3.2 주관적 순위 정규화

Beranek이 설문조사를 통해 도출한 주관적 순위를 그대로 회귀분석에 사용할 수는 없다. 회귀분석을 진행하기 전 주관적 순위를 0과 1 사이의 값으로 만들어야 하는데, 이를 정규화라고 한다. 정규화는 다음 방법으로 진행하였다.

- 1) Beranek의 순위는 1등부터 39등까지이다.
- 2) 상위권일수록 표준화된 수치가 높아야 하기 때문에 1등은 39, 2등은 38, ..., 39등은 1로 만든다.
- 3) 0과 1 사이의 값으로 정규화하기 위해 최소-최대 정규화 방법⁶⁾을 사용하며 Eq. (1)을 적용한다. 여기서 x_{\min} 은 최소값, x_{\max} 는 최대값이다.

$$X = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

- 4) 홀의 순위가 높을수록 1에 가깝고 낮을수록 0에 가까운 0과 1 사이의 값으로 정규화되었다.

3.3 음향인자와 주관적 순위 회귀분석

음향인자와 정규화된 순위를 회귀분석 하였다. 총 8개의 음향인자를 각각 선형회귀분석 하였다. 8개의 모든 음향인자들은 유의수준 p 값이 0.05보다 작아 유의한 통계 분석으로 분류 되었다. Table 2는 각각의 음향인자와 정규화된 순위를 회귀분석한 상관계수 R과 결정계수 R^2 그리고 유의수준 p 값을 보여준다.

Fig. 2는 각 음향인자와 주관적 순위를 회귀분석하여 산출한 상관계수 R을 절대값으로 나타낸 그래프이다. 상관계수 값이 클수록 해당 음향인자와 주관적 순위의 상관관계가 높다고 볼 수 있다. BQI가 0.82($p < .05$)로 가장 높으며 ITDG는 0.68($p < .05$), C_{80} 은 0.67($p < .05$), G_{mid} 는 0.56($p < .05$), EDT는 0.52($p < .05$), LF는 0.51($p < .05$)의 값을 갖고, RT와 G_{125} 는 0.4($p < .05$)로 비교적 낮은 값을 갖는다. 본 연구에서는 상관계수 값이 0.5 이상인 BQI, ITDG, C_{80} , G_{mid} , EDT, LF

Table 2. Regression result of sound parameters and subjective rankings.

	R	R^2	p value
RT ₆₀	0.4	0.16	0.008
EDT	0.52	0.27	0.004
C_{80}	-0.67	0.45	0.0037
G_{mid}	0.56	0.3	0.0007
G_{125}	0.4	0.16	0.01
BQI	0.82	0.68	0.0005
LF	0.51	0.27	0.0005
ITDG	-0.51	0.27	0.0002

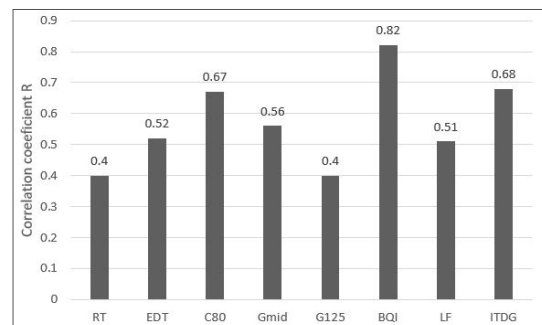


Fig. 2. Correlation coefficient R of acoustic parameter and subjective rankings.

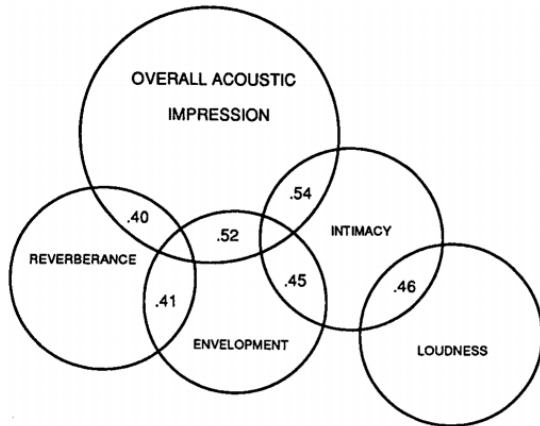


Fig. 3. Relationship of overall acoustic impression and subjective attributes.^[7]

라는 6개의 음향인자를 사용하여 음향성능을 분석하였다.

G_{125} 는 상관계수 값이 낮아 분석에 사용되지 않고 G_{mid} 만 분석에 사용되었기 때문에 지금부터 G_{mid} 를 편의상 G라고 표현하겠다.

3.4 주관적 평가에 영향을 미치는 음향속성

Barron은 그의 논문 ‘Subjective Study of British Symphony Concert Halls’에서 전체적인 음향인상(Overall Acoustic Impression)이 잔향(Reverberance), 공간감(Envelopment), 친밀함(Intimacy), 소리크기(Loudness)와 높은 연관성이 있음을 밝혔다. 또한 명료도(Clarify)는 콘서트홀 평가에 있어 전체적인 음향인상에 영향을 미치지 못함을 발견하였다. Fig. 3은 Barron의 연구에서 밝힌 전체적 음향인상과 다른 음향속성 사이의 상관관계를 나타낸다.

Bradley^[8]는 그의 논문 ‘Contemporary approaches to evaluating auditorium acoustic’에서 실내 음향성능 평가를 위한 음향속성을 음의 크기, 잔향감, 명료함, 공간감, 음색 5가지로 분류하였다.

본 연구에서는 Barron과 Bradely 연구의 공통적인 3가지 음향속성인 음의 크기, 잔향감, 공간감을 음향속성 분류로 사용하였다. 또한 ITDG로 측정 가능한 친밀감을 추가하여 총 4가지로 음향속성을 분류하였다. 친밀감은 초기반사음과 관련하여 60년대 Beranek의 연구부터 매우 중요한 음향속성으로 간주되어왔기 때문에 분류에 포함하였다.

Table 3. Subjective attributes and related sound parameters used in study.

Attributes	Parameter	R
Reverberance	EDT	0.52
Intimacy	ITDG	0.68
Loudness	G	0.56
Envelopment	BQI	0.82
	LF	0.51

Table 3은 본 연구에서 사용한 음향속성 분류와 대응하는 음향인자를 나타낸다. 3장 회귀분석 결과, 상관성이 비교적 낮았던($R < 0.5$) RT와 G_{125} 는 본 연구의 음향성능 분석에 사용하지 않았다.

IV. 음향측정 데이터 통계분석

4.1 공연장 형태 분류

시대별로 다양한 형태의 공연장이 유행하였다. 19세기에는 장방형이라 부르는 직육면체 형태의 콘서트홀이 유행했으며 같은 시기에 오페라 공연을 위한 말발굽 형태의 홀이 유행하였다. 1910년 이후에는 클래식 콘서트와 다목적으로 사용하기 위한 부채꼴 형태가 유행하기 시작했으며, 20세기 중반에는 서라운드 형태와 같은 복잡한 홀이 만들어지기 시작하였다.

Beranek은 콘서트홀 설계를 위한 4가지 기본 형태를 제안하였다.^[9] 장방형, 부채꼴형, 분할된 비대칭 서라운드형, 아레나형이다. 서라운드형은 빈야드(포도밭) 형태라고도 하는데 공연장 중앙에 있는 무대를 객석이 단차를 두고 둘러싸는 형태로 배치된다. 아레나형은 가운데 무대가 있고 이를 객석이 둘러싸고 있는 원형극장 같은 형태이다.

본 연구에서는 Beranek이 제안한 4가지 기본 형태 중 건축 빈도가 적은 아레나형을 제외한 장방형, 부채꼴형, 서라운드형에 오페라 하우스에 많이 사용되는 말발굽형을 추가하여 총 4가지 건축형태를 분석하였다. 현대의 공연장은 두 개 이상의 건축형태가 섞여 한 종류로 분류하기 어려운 경우가 있다.

4.2 공연장 형태에 따른 음향성능 분석

각 공연장 형태별 음향성능을 살펴보기 위해 Beranek이 수집한 장방형 공연장 11개, 서라운드형

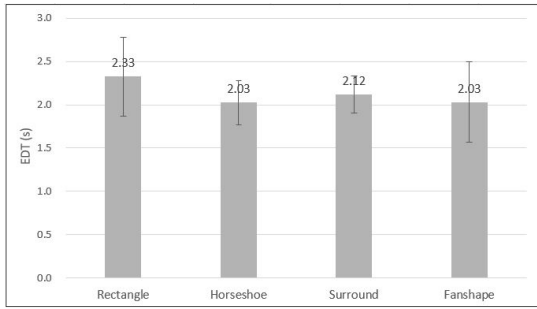


Fig. 4. Average EDT value by shape.

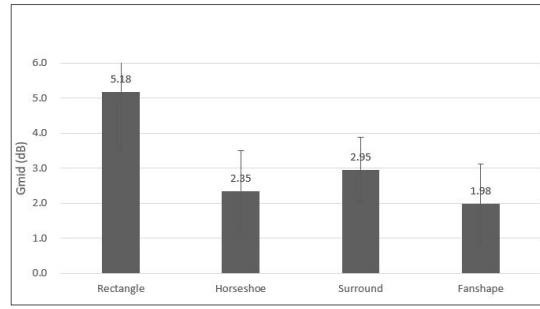


Fig. 6. Average G value by shape.

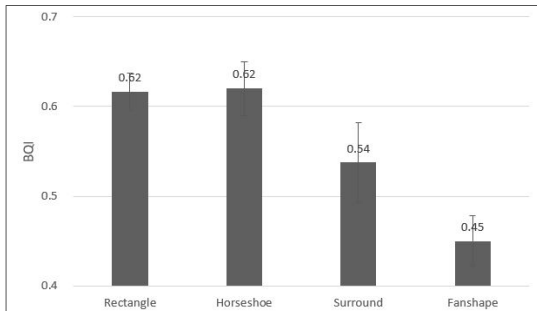


Fig. 5. Average BQI value by shape.

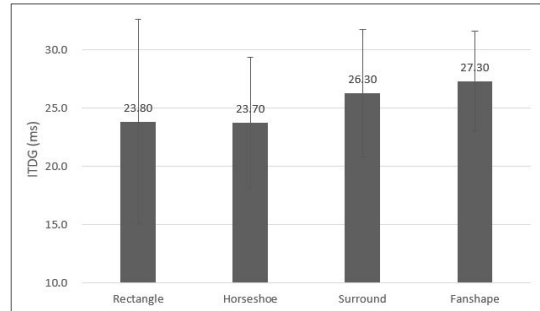


Fig. 7. Average ITDG value by shape.

공연장 7개, 말발굽형 공연장 5개, 부채꼴형 공연장 6개의 측정 데이터를 정리하여 각 음향인자별 평균을 도출하였다.

Fig. 4는 잔향의 풍부함을 나타내는 EDT의 평균값과 표준편차를 공연장 형태별로 보여준다. EDT는 주관적 선호도와 0.52($p < .05$)의 상관관계를 가지는 음향인자이다. EDT 값은 장방형 2.33s, 말발굽형 2.03s, 서라운드형 2.12s, 부채꼴형 2.03s를 보인다. 장방형을 제외한 홀의 EDT는 약 2s 정도인 반면, 장방형 홀은 2.33s로 비교적 높은 값을 보인다.

Fig. 5는 공간감을 나타내는 BQI의 평균값과 표준편차를 공연장 형태별로 보여준다. BQI는 주관적 선호도와 매우 높은 상관관계($R = 0.82, p < .05$)를 갖는 인자이다. 장방형 공연장과 말발굽 공연장의 경우 0.62로 높은 BQI 값을 가진다. 서라운드형 공연장은 0.54의 값을 갖고, 부채꼴형 공연장은 0.45로 가장 낮은 BQI 값을 가진다. BQI 값으로만 판단하면 장방형과 말발굽형이 우수하며 다음으로 서라운드형과 부채꼴형 순임을 알 수 있다.

Fig. 6은 소리의 강도를 나타내는 G의 평균값과 표준편차를 공연장 형태별로 보여준다. G는 주관적 선

호도와 0.56($p < .05$)의 상관관계를 가지는 음향인자이다. G 값은 장방형 5.18 dB, 말발굽형 2.35 dB, 서라운드형 2.95 dB, 부채꼴형 1.98 dB로 장방형이 가장 크며 부채꼴형이 가장 낮은 강도를 가지고 있다. 강도만을 기준으로 보면 장방형 공연장이 가장 우수한 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 소리의 친밀감을 나타내는 ITDG 값을 공연장 형태별로 보여준다. ITDG와 주관적 선호도는 상관계수 0.68($p < .05$)을 보이며 ITDG 값이 짧을수록 선호도가 높게 나타났다. 장방형은 23.82 ms, 말발굽형은 23.75 ms로 짧고 서라운드형은 26.29 ms, 부채꼴형은 27.33 ms로 비교적 길다. 장방형과 말발굽형이 친밀감이 가장 좋으며 다음으로 서라운드형, 부채꼴형임을 알 수 있다.

Table 4는 공연장 형태별 음향성능을 종합적으로 나타낸다.

종합적인 음향성능 점수를 산출하기 위하여 각 음향인자별 음향성능이 가장 우수한 형태는 4점, 두 번째로 우수한 형태는 3점, 세 번째로 우수한 형태는 2점, 가장 좋지 않은 형태는 1점을 부여하였다. 각 인자별 주관적 순위와의 상관계수 R을 가중치로 여긴

Table 4. Acoustic performance by shape.

	Rev.	Env.	Loud.	Int.
	EDT (s)	BQI	G (dB)	ITDG (ms)
Rectangle	2.33	0.62	5.2	23.8
Horseshoe	2.03	0.62	2.4	23.7
Surround	2.12	0.54	3	26.3
Fanshape	2.03	0.45	2	27.3

(Rev. = Reverberance, Env. = Envelopment, Loud. = Loudness, Int. = Intimacy)

Table 5. Acoustic score by shape.

	Rectangle	Horse shoe	Surround	Fan shape	Weight
EDT	4	2	3	2	0.52
BQI	4	4	3	2	0.82
Gmid	4	2	3	1	0.56
ITDG	4	4	3	2	0.68

뒤 부여한 점수와 가중치를 곱하여 종합적인 점수를 산출하였다. 예를 들어 장방형의 경우 $4 \times 0.52(EDT) + 4 \times 0.82(BQI) + 4 \times 0.56(G) + 4 \times 0.68(ITDG)$ 를 계산하여 종합적인 점수를 산출하였다. 4가지 형태의 종합적인 점수를 구한 후 가장 높은 장방형의 점수를 100%로 여겼을 때 나머지 형태의 점수를 상대적인 백분율로 산출하였다. Table 5는 공연장 형태별 음향점수와 가중치를 나타낸다.

상대적 백분율로 계산했을 때 장방형이 100점으로 가장 뛰어난 음향성능을 가지며 다음으로는 말발굽형이 79점, 서라운드형이 75점, 부채꼴형은 45점의 음향성능을 보인다. 여러 선행연구와 마찬가지로 장방형은 가장 뛰어난 음향성능을 가지며 부채꼴형은 가장 낮은 음향성능을 나타내고 있다. 말발굽형과 서라운드형은 성능 점수에서 큰 차이가 없었다.

4.3 형태별 음향성능 점수와 주관적 선호도 점수 비교

설문조사를 사용하여 도출한 주관적 순위를 0~1 사이의 값으로 정규화하여 형태별 평균을 구하면 장방형 0.68, 말발굽형 0.61, 서라운드형 0.5, 부채꼴형 0.27의 값을 갖는다. 선호도가 가장 높은 장방형 공연장을 100%로 놓고 나머지 형태의 백분율을 상대적

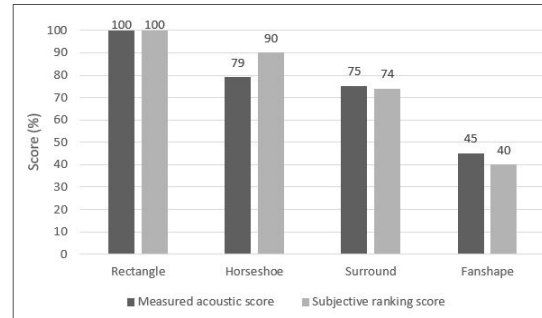


Fig. 8. Comparison of measured acoustic score and subjective ranking score by shape.

으로 구하여 점수를 산출하였다. 주관적 선호도 백분율 점수는 장방형이 100점, 말발굽형이 90점 서라운드형이 74점 부채꼴형이 40점이다.

Fig. 8은 Beranek이 설문조사를 통해 얻은 주관적 선호도 백분율 점수를 가중치를 적용하여 산출한 형태별 백분율 점수와 비교한 그래프이다.

가중치를 적용한 본 연구의 음향성능 계산법은 주관적 선호도 점수와 비교하여도 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

V. 시뮬레이션에 의한 음향성능 분석

5.1 시뮬레이션 방법

본 장에서는 4개의 다른 형태를 가진 공연장의 3D 모델을 제작해 음향 시뮬레이션을 실시하여 공연장 형태별 음향성능을 파악하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 추출된 공연장 형태별 임펄스 응답을 기반으로 가청화시제를 제작하고 청감실험을 진행해 형태별 주관적 음향성능을 분석하였다.

장방형, 서라운드형, 말발굽형, 부채꼴형 총 4개 형태의 모델을 제작하였다. 모든 모델의 체적은 20,000 m³이고 Sabine의 잔향시간 공식으로 계산한 경우 2.0 s의 잔향시간을 갖도록 제작하였다.

장방형 홀은 비엔나 뮤직베라인잘(Musikverein saal), 서라운드형 홀은 도쿄 산토리홀(Santory Hall), 말발굽형 홀은 에든버러 어셔홀(Usher Hall), 부채꼴형 홀은 부다페스트 패트리아홀(Patria Hall)을 기준으로 3D 모델을 제작하였다. 어셔홀은 2개의 발코니를 갖고 있기 때문에 1개의 발코니를 갖도록 수정하여 제

Table 6. Information of each 3D models.

	Rectangle	Horseshoe	Surround	Fanshaped
Volume (m ³)	20,000	20,000	20,000	20,000
Area (m ²)	5,718	5,350	5,374	5,672
Absorption rate	0.28	0.3	0.3	0.28
RT60 (s) 125 Hz	2.2	2.2	2.2	2.2
RT60 (s) 1,000 Hz	2.0	2.0	2.0	2.0
RT60 (s) 4,000 Hz	1.8	1.8	1.8	1.8

작하였다. 따라서 시뮬레이션에 사용된 모든 모델은 1개의 발코니를 갖는다. Table 6은 시뮬레이션에 사용된 4개 모델의 체적, 표면적, Sabine의 공식에 의한 잔향시간을 나타내며 Table 7은 시뮬레이션에 사용된 3D 모델의 모습을 보여준다.

3D 모델의 무대 끝에서부터 5m 안쪽 중앙 지점에 무지향 음원을 위치시키고 객석을 향해 방사시켰다. 수음점은 총 4개를 설정하였다. 첫 번째 수음점은 무지향 음원에서 10m 떨어진 지점에 위치하며 이는 강도 G를 계산하기 위함이다. 두 번째 수음점은 모델의 정중앙에 위치하며 이는 임펄스 응답을 통해 ITDG 값을 산출하기 위함이다. 세 번째 수음점은 음원에서 20m 떨어진 좌측 객석 중간지점에 위치하며 임펄스 응답을 추출해 청감실험을 진행하는 데 사용된다. 네 번째 수음점은 좌측 발코니 객석 중앙지점에 위치한다.

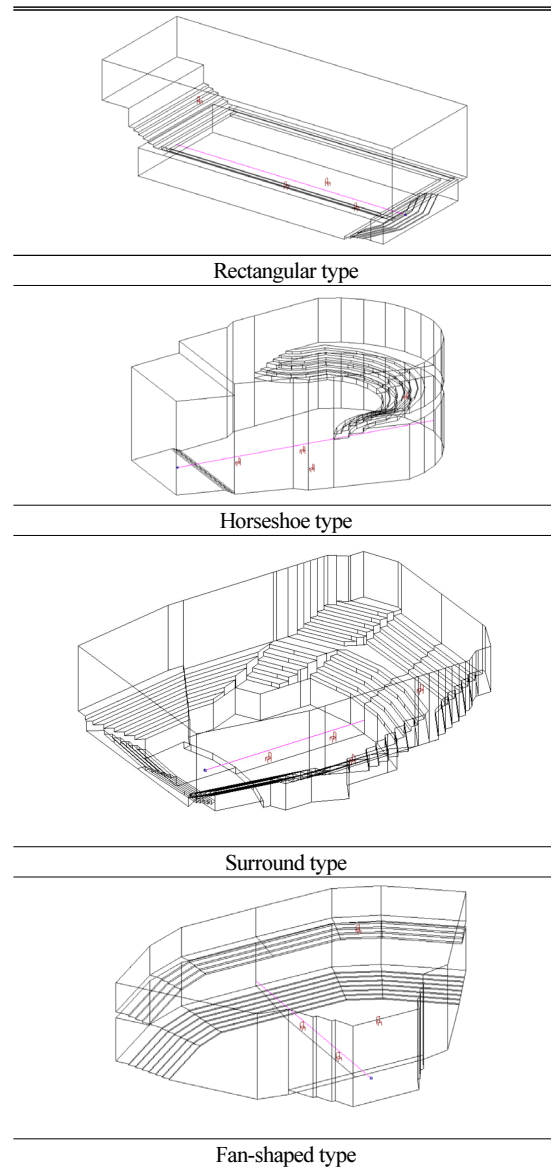
음향 시뮬레이션 프로그램은 독일 Acoustic Design Ahnert(ADA)사의 EASE v4.3.6(2009)을 사용했다. 또한 BQI를 추출하는 데는 같은 회사의 프로그램 EASERA 1.1.3을 사용했다.

5.2 시뮬레이션에 의한 음향성능 분석

시뮬레이션을 통해 각 공연장 형태별 EDT, G, ITDG, BQI를 산출하여 음향성능을 분석하였다.

Fig. 9는 공연장 형태별로 잔향의 풍부함을 나타내는 EDT를 보여준다. EDT는 각 형태별 모델의 좌측 중앙 좌석의 임펄스 응답 특성을 추출해 10 dB 감쇠하는 시간을 구한 후 6을 곱하여 산출하였다. Sabine

Table 7. 3D models used in simulation.



의 잔향시간 공식이 아닌 시뮬레이션을 통한 임펄스 특성을 사용하였다. EDT는 중음 500 Hz와 1 kHz 값을 평균하여 산출하였다.

장방형이 1.8 s, 말발굽형은 2.1 s, 서라운드형은 1.8 s, 부채꼴형은 2.0 s의 EDT를 나타낸다. 말발굽형이 가장 긴 EDT 값을 갖고 장방형이 가장 짧은 EDT 값을 갖는다. 이는 주관적으로 느껴지는 잔향감이 말발굽형에서 가장 길고 장방형에서 가장 짧을 수 있음을 의미한다.

Fig. 10은 공간감을 나타내는 BQI를 시뮬레이션으로 구하였다. EASE 시뮬레이션 프로그램으로 각 형

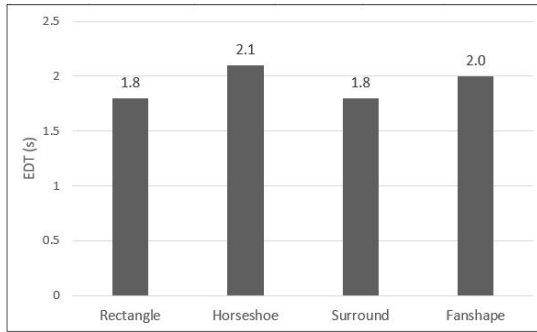


Fig. 9. Simulation EDT value by shape.

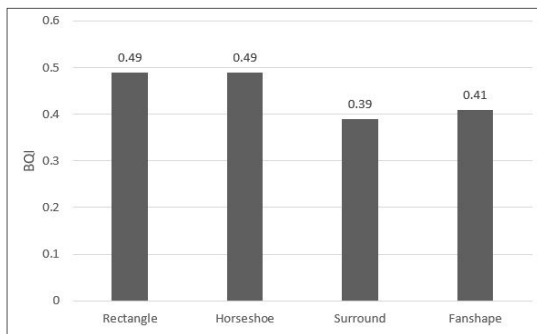


Fig. 10. Simulation BQI value by shape.

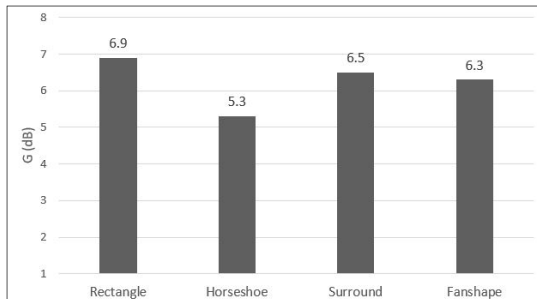


Fig. 11. Simulation G value by shape.

태별 모델의 좌측 중앙 좌석의 임펄스 응답을 구하고 이의 Binaural response를 산출해 저장한 뒤, EASERA로 불러와 BQI를 산출하였다. 500 hz, 1 Khz, 2 Khz, 4 khz의 평균을 구하여 산출하였다.

장방형과 말발굽형, 서라운드형, 부채꼴형은 각각 0.49, 0.49, 0.39, 0.41의 값을 가진다. BQI 값으로만 판단하면 장방형과 말발굽형의 성능은 우수하며 서라운드형과 부채꼴형의 성능은 조금 떨어진다.

Fig. 11은 공연장 형태별로 소리의 강도를 나타내는 G 값을 보여준다. G는 음원에서 10m 떨어진 수음점에서 구하였다. 반사음이 포함된 전체 음압레벨과

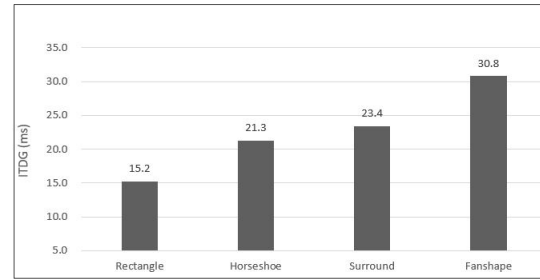


Fig. 12. Simulation ITDG value by shape.

Table 8. Simulation acoustic performance by shape.

	EDT (S)	BQI	G(dB)	ITDG (ms)
Rectangle	1.8	0.49	6.9	15.2
Horseshoe	2.1	0.49	5.3	21.3
Surround	1.8	0.39	6.5	23.4
Fanshape	2.0	0.41	6.3	30.8

반사음이 없는 직접음의 음압레벨의 차이가 G이다.

장방형은 6.9 dB, 말발굽형은 5.3 dB, 서라운드형은 6.5 dB, 부채꼴형은 6.3 dB의 G 값을 보여준다. 장방형이 가장 높은 G 값을 가지며 말발굽형은 상대적으로 낮은 G 값을 보인다. 이는 장방형 홀에서 느껴지는 음악의 강도에 비해 말발굽형 홀에서는 상대적으로 약한 강도로 느껴질 수 있음을 의미한다.

Fig. 12는 공연장 형태별로 소리의 친밀함을 나타내는 ITDG 값을 보여준다. ITDG는 직접음과 초기반사음 사이의 시간차를 의미하며, 값이 짧은 경우 소리가 더 친밀하고 선명하게 들리는 것으로 알려져 있다. ITDG는 공연장 중앙 수음점에서 얻은 임펄스 응답을 사용하여 직접음과 초기반사음의 시간차를 구해 산출하였다.

장방형 홀이 15.2 ms로 가장 짧았으며 말발굽형 홀이 21.3 ms, 서라운드형 홀이 23.4 ms이고 부채꼴형 홀이 30.8 ms로 가장 길게 나타났다. 이는 장방형 홀에서는 소리가 가깝게 들리지만 부채꼴형 홀에서는 소리가 멀게 느껴질 수 있음을 의미한다. Table 8은 시뮬레이션을 통해 산출된 음향성능을 종합하여 보여준다.

3장에서 구한 각 음향인자별 측정값과 주관적 순위와의 상관관계수 R을 가중치로 사용하여 시뮬레이션을 통해 구한 음향인자 값을 형태별 음향성능 점

Table 9. Acoustic score by shape.

	Rectangular	Horseshoe	Surround	Fanshaped	Weight
EDT	1	4	3	2	0.52
BQI	4	4	2	3	0.82
G	4	2	3	3	0.56
ITDG	4	3	2	1	0.68

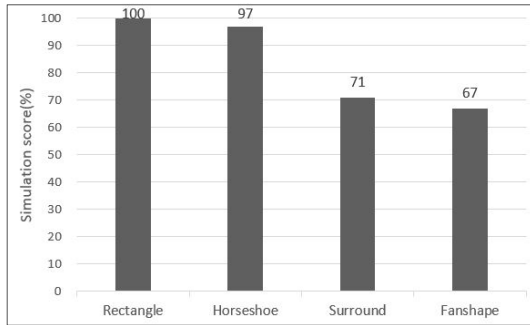


Fig. 13. Simulation acoustic score by shape.

수로 환산하였다.

각 인자별 음향성능이 가장 우수한 형태는 4점, 두 번째로 우수한 형태는 3점, 세 번째로 우수한 형태는 2점, 가장 좋지 않은 형태는 1점을 부여하였다. 4장에서 사용한 각 인자별 상관계수를 가중치로 사용하여 부여한 점수에 가중치를 곱해 종합적으로 점수를 산출하였다. 점수가 가장 높은 형태를 100%로 여긴 후 나머지 형태의 점수를 상대적인 백분율로 산출하였다. Table 9는 각 형태별 점수와 가중치를 나타내며 Fig. 13은 시뮬레이션을 통해 산출된 형태별 음향성능의 백분율 점수를 보여준다.

5.3 청감실험에 의한 음향성능 분석

제작된 가청화시제를 통해 청감실험을 수행하여 공연장 형태별 음향성능을 주관적으로 평가하였다. 가청화시제는 무향실에서 녹음된 J.S Bach의 무반주 바이올린을 위한 파르티타 2번(BWV 1004) 1악장과 시뮬레이션을 사용해 추출된 임펄스 응답을 사용해 제작되었으며 처음 25 s를 재생하였다. 청감실험은 2022년 6월 3일 C 대학교 일반 강의실에서 진행되었으며 총 20명으로 이루어진 피실험자 집단은 20대의 대학생과 대학원생으로 구성되어 있다. 외부소음에 의한 간섭을 최소화하기 위해 문과 창문을 모두 닫고 실험을 진행하였으며 실험 당시 배경소음은 28 dB로

Table 10. Equipment list used in listening test.

Category	Model
Player	Laptop, Foobar Player
Audio interface	Sounddevice USB PRE 2
Distributor	Behringer Powerplay Pro8
Distributor	Desco (5 Ch)
Headphone	Senheiser HD280
Analyzer	NTi-Audio XL2

측정되었다. 청감실험은 20명의 피실험자를 2팀으로 나누어 10명씩 진행하였다.

헤드폰 10개와 분배기를 사용하여 공연장 형태별 가청화시제를 10명의 피실험자에게 동시에 들려주었다. 헤드폰의 출력레벨은 55 dB(A)로 설정하였는데 이는 헤드폰을 착용한 상태에서 편안하게 바이올린 연주를 들을 수 있는 레벨이다. 10개의 헤드폰에서 출력되는 음압을 동일하게 설정하기 위해 정밀측정소음계 NTi를 사용하여 헤드폰에서 출력되는 음원 크기를 조정하였다. Table 10은 청감실험에 사용한 장비 목록이다.

피실험자는 헤드폰을 통해 출력되는 음원을 공연장 형태별로 약 15s씩 듣고 각각의 음향 척도를 평가하도록 하였다. 개별 음향 척도에 대해 형태별 공연장 소리를 비교하여 평가할 수 있도록 한 번에 한 개의 음향 척도만 평가하도록 하였다.

먼저 잔향감에 대한 평가를 안내한 후 형태별 공연장의 가청화시제를 들려주었다. 공연장 형태별 상대적인 평가를 할 수 있도록 한번 더 반복하여 가청화시제를 들려주었다. 이후 공간감에 대한 평가를 안내한 후 형태별 공연장의 가청화시제를 들려주었으며, 마찬가지로 반복하여 들려주었다. 이어서 친밀감, 강도에 대한 평가를 진행하였다. 전체적 인상에 대한 평가는 가장 마지막에 진행하였다.

잔향감, 공간감, 친밀감, 강도는 5점 척도를 사용하여 1점에서 5점 사이의 점수를 부여하도록 하였고 전체적 인상은 7점 척도를 사용하여 1점에서 7점 사이의 점수를 부여하도록 하였다. 청감실험을 시작하기 전, 피실험자에게 각 음향 척도가 의미하는 바에 대해 다음과 같이 설명하였다.

“잔향(Reverberance)은 공간의 울림을 나타내며 공간에서 소리가 소멸하는데 걸리는 시간을 의미합니



Fig. 14. (Color available online) Listening test scene.

다. 공간감(Envelopment)은 소리에 둘러싸이는 느낌의 정도를 의미합니다. 친밀감(Intimacy) 연주의 소리가 음향적으로 가까이 들리는지 멀리서 들리는지를 의미합니다. 강도(Loudness)는 음악에 충분한 힘이 전달되는지를 나타냅니다. 마지막으로 전체적인 상(Overall Impression)은 본인이 주관적으로 느껴지는 홀의 음향성능을 평가해 주시면 됩니다.”

Fig. 14는 청감실험을 진행하는 모습이다.

5.4 설문조사 검증

설문조사를 두 가지 방법으로 검증하였다. 첫 번째는 각 음향척도에서 유의한 차이가 관찰되었는지 검증하였다. 두 번째는 피실험자들이 평가한 각 척도의 종속변수로 ‘전체적 인상’을 사용하였는지를 검증하였다.

음향척도에서 유의한 차이가 관찰되었는지 검증하기 위해 공연장 형태와 음향척도를 기반으로 두 개 요인 분산분석(Two Factor ANOVA)을 사용하였다. 이는 하나의 측정 변수와 두 개의 명목 변수가 있을 때 사용이 가능하다. 설문조사 점수는 측정 변수이며 음향척도와 공연장 형태는 두 개의 명목 변수로 보고 Two Factor ANOVA 통계검증이 가능하다.

Table 11은 Two Factor ANOVA 통계검증 결과이다. 공연장 형태의 p 값은 0.05 이하로 통계적으로 유의하다. 즉 공연장 형태는 개별 설문 점수에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 음향척도의 p 값도 0.05 이하이기 때문에 통계적으로 유의하다. 즉 음향척도는 개별 설문의 점수에 영향을 미친다.

Table 11. Two factor ANOVA validation.

	F ratio	P value
Shape	23.17	8.54E-14
Attribute	34.98	6.97E-25

Table 12. Correlation matrix between acoustic attribute.

	Rev.	Env.	Int.	Loud	OI.
Rev.	1.00				
Env.	0.39	1.00			
Int.	0.17	0.25	1.00		
Loud.	0.35	0.16	0.38	1.00	
OI.	0.50	0.32	0.31	0.4	1.00

(Rev. = Reverberance, Env. = Envelopment, Int. = Intimacy, Loud. = Loudness, OI. = Overall Impression)

개별 척도의 독립성 여부와 종속변수로 전체적 인상을 사용하였는지를 검증하기 위해 상관분석을 진행하여 각 음향척도 사이의 상관관계를 파악하였다. Table 12는 음향척도 사이의 상관관계이다.

전체적 인상은 잔향감과 0.5($p < .05$), 공간감과 0.32($p < .05$), 친밀감과 0.31($p < .05$), 강도와 0.44($p < .05$)의 상관관계를 갖는다. 또한 다른 음향인자들 사이의 상관관계와 비교했을 때 더 높은 상관관계를 가진다. 이는 전체적 인상을 다른 개별 척도의 종속변수로 볼 수 있음을 의미한다.

5.5 청감실험 평가결과

Table 13은 공연장 형태별 피실험자의 청감실험 평균값을 보여준다. 전체적 인상은 장방형과 말발굽형이 가장 높게 나왔으며 다음으로 부채꼴형이 높고 서라운드형이 가장 낮은 것으로 나타났다. 4장에서 Beranek의 선호도 조사를 분석하였을 때 부채꼴형의 선호도가 가장 떨어지는 것으로 나왔으나 청감실험에서는 서라운드형의 선호도가 가장 떨어지는 것으로 나타났다.

청감실험 점수와 시물레이션을 통해 산출된 음향인자 EDT, BQI, ITDG, G 값을 비교하였다. 정확한 비교를 위해 청감실험에서 사용한 중앙 좌측 객석의 임펄스 응답을 사용해 시물레이션 값을 도출해 이를 청감실험 점수와 비교하였다.

Fig. 15는 시물레이션을 통해 산출된 EDT 값과 청

Table 13. Average result of listening test.

	Rev.	Env.	Int.	Loud.	OI.
Rectangular	3.85	3.7	3.9	4.05	5.65
Horseshoe	4.25	4.1	3.5	3.75	5.45
Surround	2.8	2.75	3.25	3.25	4.15
Fanshaped	3.75	3.35	2.95	3.15	4.75

(Rev. = Reverberance, Env. = Envelopment, Int. = Intimacy, Loud. = Loudness, OI. = Overall Impression)

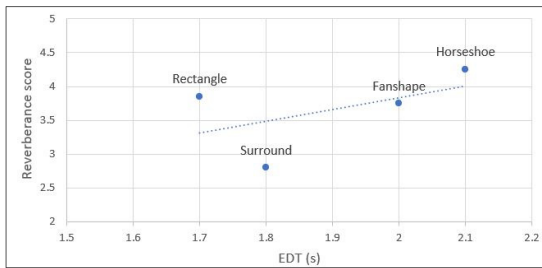


Fig. 15. Comparison of listening test reverberance score and simulation EDT value.

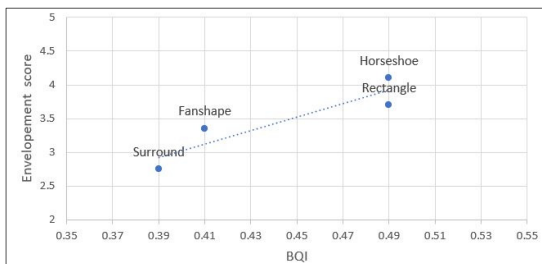


Fig. 16. Comparison of listening test envelopment score and simulation BQI value.

감실험 잔향감 점수를 비교하여 보여준다. EDT 값은 초(s)로 X축에 나타내고 잔향감 점수는 Y축에 나타내었다.

3장의 회귀분석을 통해 EDT가 높을수록 주관적 선호도가 높다는 결과를 도출하였다. 청감실험 점수와 시뮬레이션 값을 비교하였을 때 EDT가 높을수록 잔향감 점수가 높게 나오는 것을 알 수 있다. 서라운드형, 부채꼴형, 말발굽형은 EDT가 높을수록 잔향감 점수가 높게 나왔으나 장방형의 경우 EDT가 낮음에도 불구하고 잔향감 점수가 비교적 높게 나왔다.

Fig. 16은 시뮬레이션을 통해 산출된 BQI 값과 청감실험 공간감 점수를 비교하여 보여준다. BQI 값은 X축에 나타내고 공간감 점수는 Y축에 나타내었다.

3장의 회귀분석을 통해 BQI가 높을수록 주관적

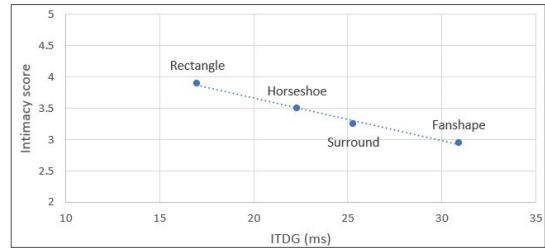


Fig. 17. Comparison of listening test intimacy score and simulation ITDG value.

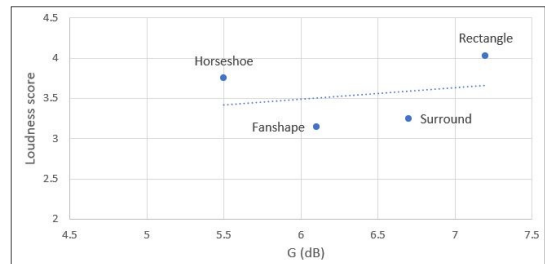


Fig. 18. Comparison of listening test loudness score and simulation G value.

선호도가 높다는 결과를 도출하였다. 청감실험 점수와 시뮬레이션 값을 비교하였을 때 BQI가 높을수록 공간감 점수가 높게 나오는 것을 알 수 있다.

Fig. 17은 시뮬레이션을 통해 산출된 ITDG 값과 청감실험 친밀감 점수를 비교하여 보여준다. ITDG 값은 밀리초(ms)로 X축에 나타내고 잔향감 점수는 Y축에 나타내었다.

3장의 회귀분석을 통해 ITDG가 낮을수록 주관적 선호도가 높다는 결과를 도출하였다. 청감실험 점수와 시뮬레이션 값을 비교하였을 때 ITDG가 낮을수록 친밀감 점수가 높게 나오는 상관관계임을 알 수 있다. 장방형, 말발굽형, 서라운드형, 부채꼴형 모두 ITDG가 낮을수록 친밀감 점수가 높게 나타났다.

Fig. 18은 시뮬레이션을 통해 산출된 G 값과 청감실험 친밀감 점수를 비교하여 보여준다. G 값은 데시벨(dB)로 X축에 나타내고 잔향감 점수는 Y축에 나타내었다.

3장의 회귀분석을 통해 G가 높을수록 주관적 선호도가 높다는 결과를 도출하였다. 청감실험 점수와 시뮬레이션 값을 비교하였을 때 G와 강도 점수 사이의 관계는 명확하지 않았다. 이는 시뮬레이션을 통해 산출된 G 값의 범위가 6.1 dB~7.2 dB이며 가장 높

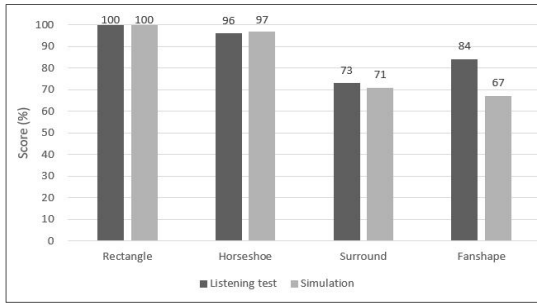


Fig. 19. Score comparison of listening test and acoustic simulation by shape.

은 값과 가장 낮은 값의 차이가 1.1 dB로 매우 작기 때문에 청감실험으로 그 차이를 분별하기가 어려워 나타난 결과로 판단된다.

청감실험에 사용한 가청화시계는 시뮬레이션으로 얻은 임펄스 응답을 사용하여 제작한 것이기 때문에 만약 피실험자들이 음향적도를 잘 분별할 수 있는 음향전문가라면 시뮬레이션을 통해 산출된 음향인자 값과 청감실험 점수의 관계가 명확하게 나올 수도 있다. 본 실험은 대학생과 대학원생들을 대상으로 실시하였기 때문에 전문가 수준의 신뢰도를 기대하기는 어렵지만 잔향감과 친밀감, 공간감 점수는 시뮬레이션을 통해 산출된 음향인자 값과 매우 유의미한 상관관계를 보여주었다. 강도의 경우 음향인자와 청감실험 사이의 관계가 명확하지 않았는데 이는 시뮬레이션을 통해 산출된 형태별 G 값 편차가 작아 청감실험으로 차이를 분별하기 어려워 나타난 결과이다. 청감실험과 시뮬레이션 값을 비교해 보았을 때 피실험자들은 일정 수준의 음향을 판단할 수 있는 분별력을 가지고 있다고 볼 수 있으며, 따라서 피실험자들이 평가한 ‘전체적 인상’ 점수도 유의미한 결과로 사용될 수 있다고 판단된다.

Fig. 19에서 청감실험 ‘전체적 인상’의 백분율 점수와 5.2장에서 시뮬레이션을 통해 산출된 공연장 형태별 백분율 점수를 비교하였다. 장방형과 말발굽형은 청감실험과 시뮬레이션 모두 높은 점수를 보인다. 서라운드형은 시뮬레이션 점수는 세번째로 높으나 청감실험에서는 가장 낮은 점수를 보인다. 즉 청감실험의 경우 부채꼴형이 서라운드형보다 높은 점수를 얻어 성능이 더 좋은 것으로 평가되었다.

Fig. 20은 연구결과를 종합하여 보여준다. 4장에서

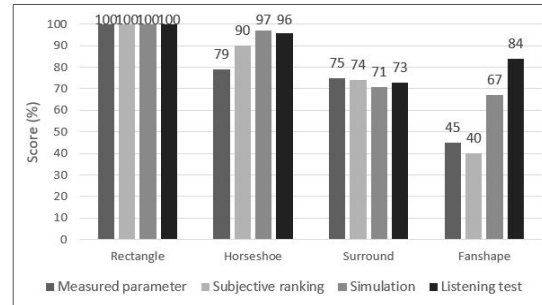


Fig. 20. Total score comparison by shape.

도출된 측정 데이터를 사용한 백분율 점수 및 주관적 선호도 백분율 점수와 5장에서 도출된 시뮬레이션과 청감실험의 백분율 점수를 종합한 그래프이다. 장방형은 모든 경우에서 가장 높은 점수를 보였으며 말발굽형은 2번째로 높은 점수를 보였다. 서라운드형은 3번째로 높은 점수를 보였으며 부채꼴형은 가장 좋지 않은 점수를 나타내었다. 그러나 청감실험에서는 부채꼴형이 서라운드형 보다 높은 점수를 나타낸다. 청감실험에서의 서라운드형 홀과 부채꼴형 홀의 역전 현상은 낮은 선호도로 인해 시뮬레이션과 비교하여 일관된 결과를 보이지 않은 것으로 사료된다.

VI. 결 론

본 연구에서는 공연장의 형태별로 음향성능을 분석하기 위해 다양한 방법으로 접근하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 주관적 선호도와 측정된 음향인자 사이의 회귀분석 결과, 공간감을 나타내는 BQI는 0.82($p < .05$), 친밀감을 나타내는 ITDG는 0.68($p < .05$), 강도를 나타내는 G는 0.56($p < .05$), 잔향감을 나타내는 EDT는 0.52($p < .05$)의 상관관계를 가졌다. 이 연구를 통해 각 음향속성에 대응하는 음향인자가 주관적 음향성능에 얼마나 영향을 미치는지 알 수 있다.
- 2) Beranek의 저서 「Concert Halls and Opera houses」의 측정 데이터를 활용하여 이를 홀 형태별로 분류, 평균을 구하고 3장의 가중치를 사용하여 형태별 음향성능을 점수화하였다. 장방형의 점수가 가장 높고 말발굽형, 서라운드형, 부채꼴형 순이었다.
- 3) Beranek의 주관적 선호도를 형태별로 분류해 점수

- 화하였다. 장방형의 점수가 가장 높았으며 말발굽형, 서라운드형, 부채꼴형 순이었다.
- 4) 형태별 3D 모델 시뮬레이션을 통해 음향성능을 분석하였다. 잔향감, 친밀감, 강도에 대응하는 EDT, BQI, ITDG, G 값을 산출하여 전체적인 음향성능을 분석해 이를 점수화하였다. 장방형의 순위가 가장 높고 말발굽형, 서라운드형, 부채꼴형 순이었다.
- 5) 시뮬레이션을 통해 산출된 임펄스 응답 사용해 청화시제를 제작, 청감실험을 진행해 주관적 음향성능을 조사하였다. 그 결과 장방형과 말발굽형이 유사하게 높았으며 다음으로 부채꼴형, 서라운드형 순이었다. 하지만 청감실험은 부채꼴형이 서라운드형 보다 높은 점수를 얻었다.

본 연구는 통계적 분석과 시뮬레이션, 청감실험을 통해 기존 선행연구의 결과를 통계적·객관적·주관적으로 확 변 더 확인하고 증명한 것에 의의가 있다고 할 수 있겠다.

결론적으로 장방형과 말발굽형의 음향성능이 가장 우수하며 서라운드형은 중간 음향성능을 보이고 부채꼴형의 음향성능이 가장 떨어진다. 또한 음향인자 측정값과 주관적 선호도를 회귀분석 했을 때 ITDG와 BQI는 높은 상관관계를 보였는데 이는 ITDG와 BQI 수치가 좋은 공연장을 만들면 전체적인 음향성능이 올라간다는 의미이다. ITDG를 좋게 하기 위해서는 짧은 초기 반사음을 형성할 수 있는 반사면이 있어야 하며 공간감을 나타내는 BQI를 좋게 하기 위해서는 홀 내부 반사음이 청취자의 두 귀와 적절한 차이를 가지며 결합되어야 하는데 이를 위해서는 불규칙한 벽면들이 많아야 한다.^[10]

본 연구를 통해 도출된 음향인자와 주관적 음향성능 사이의 상관관계를 고려하여 음향적으로 유리한 건축형태로 공연장을 설계한다면 좋은 공연장을 건축할 수 있을 것이다.

References

1. T. Somerville and C. L. S. Gilford, "Acoustic of large orchestral studios and concert halls," J. Audio Eng.

- Soc. 7, 160-172 (1959).
2. M. Barron, "Subjective study of british symphony concert halls," Acta Acust united Ac. 66, 1-14 (1988).
3. J. S. Bradley, "Contemporary approaches to evaluating auditorium acoustics," Proc. AES 8th International Conf. 59-69 (1990).
4. L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture* (Springer, Berlin, 2003), pp. 492-552.
5. C. H. Haan, *Geometry as a measure of the acoustic quality of auditoria*, (Ph.D. thesis, Sydney University, 1993).
6. A. Artasanchez and P. Joshi, *Artificial Intelligence with Python* (Hanbit Media, Seoul, 2021), pp. 113.
7. M. Barron, "Subjective study of british symphony concert halls," Acta Acust united Ac. 66, 3 (1988).
8. J. S. Bradley, "Contemporary approaches to evaluating auditorium acoustics," Proc. AES 8th International Conf. 66 (1990).
9. L. L. Bernek, "Music, Acoustics and Architecture," American Academy of Arts & Sciences, Stated Meeting Rep., 1992.
10. L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture* (Springer, Berlin, 2003), pp. 29.

저자 약력

▶ 강 찬 우 (Chanwoo Kang)



2008년 2월 : 아주대학교 전자공학 학사
2022년 8월 : 충북대학교 건축공학 석사
2018년 11월 ~ 현재 : 인강오디오 음향시
스템 설계 총괄팀장

▶ 한 찬 훈 (Chan-Hoon Haan)



1983년 2월 : 홍익대학교 건축학과 학사
1985년 2월 : 연세대학교 건축공학과 석사
1994년 6월 : University of Sydney 박사
1999 ~ 2000년 : Salford Univ. 연구교수
1994년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 건축공학
과 교수