

콘서트홀에서 음향지표와 앙상블 연주와의 상관관계

Relation between Acoustical Parameters and Ensemble Performance on a Concert Hall Stage

○ 김용희* · 이평직** · 전진용***

Yong Hee Kim*, Pyoung Jik Lee**, Jin Yong Jeon***

Key Words : Stage Acoustics(무대음향), ST1, Subjective Evaluation(주관적 평가), Ensemble(앙상블), Concert Hall(콘서트홀)

ABSTRACT

This paper investigates stage acoustics in concert halls for ensemble performance in terms of stage support parameters. A concert hall with large stage area was selected. Objective measurements were carried out according to Gade's methods for investigating stage support (ST1). The sound field on the stage was evaluated using stage and audience acoustical parameters. According to the positions at stage, different acoustical characteristics were found. Higher ST1 and lower IACC_{E3} were measured near side and rear stage walls. In case of conductor/soloist vs. orchestra player, objective measurement of acoustical parameters shows that early sound fields depend on the source-receiver distance but late sound fields depend on the location of side and rear walls. In addition, in-situ evaluation of the trio instrumentalists was carried out. Results show that ensemble is favored by higher early reflection of sounds and sound diffusion affecting 'blending' of their performance.

1. 서론

건축음향의 관점에서 연주자의 청감을 고려하는 무대음향의 연구는 1970년대부터 Marshall 등[1]과 Barron[2]의 선구적 연구에서 시작하여, 1989년 Gade가 최초의 무대음향지표로서 ST1 (Stage support)를 제안하고[3], 이를 바탕으로 1990년대에는 무대 반사판 및 무대음향에 대한 연구가 진행되어 왔다[4-6]. 근 30여년간의 연구흐름에도 아직 무대음향의 연구는 초기단계로서 ST1을 제외하면, 무대음향을 정량적으로 평가할 수 있는 지표는 전무한 실정이다. 무대 위에서 직접음에 대한 100ms 이내의 초기음 비율을 나타내는 ST1은 측정의 간편성과 정의의 명료함으로 현재 무대음향의 평가에 가장 많이 사용되고 있다.

무대음향은 크게 독주 연주자의 관점과 앙상블 연주자의 관점에서 평가할 수 있는데, 이전 연구결과에서 나타난 앙상블에 관련된 내용을 정리[7-12]하면 앙상블에 선호되는 음장 조건으로 오케스트라 연주지역에서 충분한 반사음 레벨의 공급(각 섹션별 차이가 3dB 이내가 되도록), 연주자간 가까운 거리(7m 이내), 많은 수의 작은 형상의 천장반사판 설치와 서로간 직접음이 마스킹이 되지 않도록 하는 배치가 필요한 것을 알 수 있다. 이 중 앙상블을 정량적으로 평가하기 위한 지표는 ST1과

MTF가 제안되었는데, MTF는 공연장 설계 및 평가에 적용할 수 있는 실용적인 방법이 아니기 때문에 결국 앙상블에 대한 평가도 ST1 등의 Gade가 제안한 지표로 할 수 밖에 없다.

하지만 Gade의 방법론은 무향실 등의 실험실 조건에서 기악 연주자의 주관적 선호도를 바탕으로 하고 있기 때문에, 성악 등의 다양한 연주자의 청감반응까지 포괄적으로 포함하고 있지는 않다[13-14]. 또한 따라서 본 연구에서는 Gade가 제안한 무대음향 지표를 기준으로 실제 공연장 음장의 조건에서 앙상블의 주관적 평가를 진행하고자 한다. 현장 청감실험은 실험 조건변화가 쉽지 않은 단점이 있지만, 실제 무대음장을 피험자에게 제공할 수 있기 때문에 아직 가정화 평가가 어려운 무대음향 실험에 있어서 연주자들의 정확한 청감반응을 얻어내는 데 큰 장점이 있다.

본 연구에서는 충분히 큰 무대를 가지고 있는 한 콘서트홀에서 ST1값이 다른 5지점을 선정하여 물리적 측정결과와 현장 청감실험을 통해 도출된 주관적 평가결과와의 연관성을 평가하여, ST1의 앙상블 평가에 대한 유용성을 검증하며, 나아가 앙상블을 적합하게 평가할 수 있는 지표를 제안하고자 한다.

2. 평가 지표

Gade가 제안한 무대음향 지표는 ST1, ST2, ST_{Late}와 CS가 있다[7]. 각 지표는 무대 위에서 음원-수음원 거리가 1m인 상태에서 무지향 특성으로 측정된 임펄스 리스펀스로부터

* 한양대학교 건축환경공학과
E-mail : kimyonghee@gmail.com
Tel : (02) 2220-1795, Fax : (02) 2220-4794

** 한양대학교 건축환경공학과
*** 한양대학교 건축공학과 부교수

계산된다. ST1은 직접음(0-10ms)에 대한 100ms 이내의 초기 반사음(20-100ms)의 음압비를 대수비로 표현하였으며, ST2는 직접음에 대한 200ms 이내의 초기반사음(20-200ms)의 음압비를 대수비로 표현하였다. 한편 ST_{Late}는 직접음에 대한 후기잔향음(100ms-∞)의 음압비를 대수비로 표현하였고, CS는 80ms를 기준으로 후기음에 대한 초기음의 음압비를 대수비로 표현하였다. 다음 식 (1)-(4)는 무대음향지표에 대한 정의를 나타낸다.

$$ST1 = 10\log[E(20-100ms)/E(0-10ms)] \text{ [dB]} \quad (1)$$

$$ST2 = 10\log[E(20-200ms)/E(0-10ms)] \text{ [dB]} \quad (2)$$

$$ST_{Late} = 10\log[E(100ms-\infty)/E(0-10ms)] \text{ [dB]} \quad (3)$$

$$CS = 10\log[E(0-80ms)/E(80ms-\infty)] \text{ [dB]} \quad (4)$$

또한, 무대음장의 다양한 측면을 분석하기 위해 기존의 객석음향 지표도 측정하였다. 이 때 고려된 객석음향 지표는 RT(잔향시간, T30), Ts(center time), IACC_{E3}(초기음의 양이상관도)과 IACC_{L3}(후기음의 양이상관도)의 네 가지이다.

표 1. 대상 홀의 개요

이름	버브루겐 홀	치수 [m]	L:34 W:18 H:12.5
위치	시드니, 호주	용적 [m ³]	7,650
평면형상	Shoe-box	무대형상	Open type
좌석수	497	무대면적[m ²]	235 (무대폭:18.2m)
RT _{0.5-1 kHz} occupied [s]	1.9	특기사항	무대 천장반사판 없음 오케스트라 라이저 설치

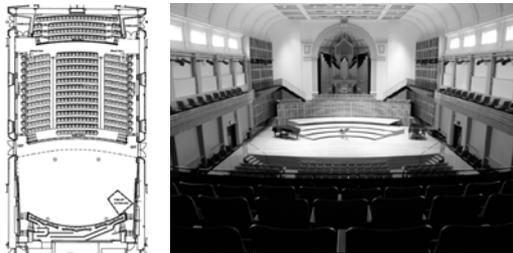


그림 1. 대상 홀의 평면과 무대부 전경

3. 무대음향 측정

3.1 대상 홀의 개요

본 연구는 호주의 Verbruggen hall에서 진행되었다. 이 홀의 무대는 공연장 규모에 비해 상당히 크기 때문에 다양한 무대음장 조건이 형성될 것으로 생각되었다. 표 1은 이 홀의 건축개요를 나타내며, 전형적인 슈박스 형태의 홀로서 만석시 객석의 중주파 대역 잔향시간이 1.9초이다. 무대는 Open type으로서 무대 후열에도 합창단 석과 파이프 오르간이 설치되어 있으며, 무대 천장의 반사판은 설치되어 있지 않았다. 한편 객석 2층 측면은 만석시의 음향조건을 위해 흡음커튼으로 가린 상태에서 측정을 진행하였다. 그림 1은 이 홀의 평면도와 무대부 전경 사진을 보여준다.

3.2 측정 설정

무대음향 측정을 위한 음원과 수음점의 위치는 그림 2와 같

이 설정하였다. P1-P5는 지휘자 위치로부터의 거리와 측벽에서 떨어진 거리를 고려하여 다양한 오케스트라 섹션을 대표하도록 설정하였고, 앙상블의 지휘자(C) 및 독주자(S)와 각 오케스트라 섹션의 영향을 평가하기 위해 C, S 위치를 설정하였다. 측정 프로세스는 두 가지 방법으로 진행하였다. 하나는 그림 3과 같이 P1-P5 지점에서 음원-수음원간 거리를 1m로 고정된 후에 측정하는 것이고(Gade의 방법론), 다른 하나는 앙상블 평가를 위해 P1-P5 위치에 음원을 두고, C위치에서 측정하는 것(Case 1; 지휘자가 듣는 오케스트라의 음향)과 반대로 S위치에 음원을 두고, P1-P5 지점에서 측정하는 것(Case 2; 오케스트라 연주자가 듣는 독주자의 음향)이다. 후자는 기존 실내음향을 이용하여 무대음향을 평가하기 위한 것으로 이전 연구를 통해 제안된 방법이다[15]. 음원은 12면체 무지향성 스피커를 이용하였으며, 수음원은 B&K사의 HATS(Head and Torso System) Type 4100을 이용하였다. 지휘자 및 독주자 위치에서는 음원과 수음원의 높이를 1.5m로 고정(서있는 상황)하였고, 오케스트라 연주자의 경우에는 1.2m로 고정(앉아있는 상황)하였다. 측정 시 연주자 의자는 47개, 보편대는 41개가 놓여 있었다.

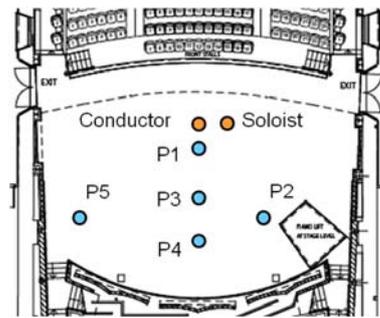


그림 2. 측정 위치

3.3 측정 결과

모든 음향지표는 250-2,000Hz대역의 평균값으로 계산하였다(IACC의 경우는 500-2,000Hz 평균). 표 2는 음원-수음점간 거리를 1m로 고정된 뒤 측정한 무대음향 및 객석음향 지표를 나타낸다. ST1은 -14.5dB에서 -8.6dB까지 약 6dB범위에서 약 1-2dB 간격으로 나타났으며, ST_{Late}와 CS는 각각 -16.2dB에서 -14.9dB와 14.6dB에서 16.1dB로 약 2dB의 범위를 보였다. 지휘자 바로 뒤에 위치한 무대 앞쪽 중앙부(P1)에서 가장 낮은 ST1을 보였으며, 무대 측벽과 가장 가까운 P5 지점에서 가장 높은 ST1을 보였다. 한편 음원과 수음점간 거리가 1m의 가까운 상태로 고정되었음에도 불구하고, 객석음향 지표도 측정지점별로 다양한 결과를 나타내었다. RT는 1.7에서 1.9초의 분포를 보였고, Ts는 16에서 18ms의 분포를 보였다. 한편 EDT는 0.10초에서 0.24초의 매우 짧은 분포를 보였는데 이는 ST1과 매우 유사한 경향으로 나타났다(R=0.99, p<0.01). 초기반사음의 양이상관도인 IACC_{E3}는 0.70에서 0.92의 분포를 보였고 이는 ST1과 유사한 경향으로 나타난 반면(R=-0.92, p<0.05), 후기반사음의 양이상관도인 IACC_{L3}는 0.11에서 0.18의 분포를 보였고 이는 명료도 지표인 CS와 유사한 경향을 보였다(R=-0.94, p<0.05).

표 2. 무대음향 측정결과 1 (음원-수음원간 거리: 1m)

측정 위치	무대음향 지표				객석음향 지표				
	ST1 [dB]	ST2 [dB]	ST _{late} [dB]	CS [dB]	RT [s]	EDT [s]	Ts [ms]	IACC _{E3}	IACC _{L3}
P1	-14.5	-13.2	-14.9	14.6	1.90	0.10	16	0.92	0.11
P2	-10.8	-11.4	-15.8	15.1	1.87	0.18	18	0.76	0.13
P3	-12.7	-14.1	-16.5	15.9	1.88	0.12	17	0.84	0.16
P4	-11.2	-12.3	-15.1	14.6	1.86	0.17	18	0.86	0.17
P5	-8.6	-9.7	-16.2	16.1	1.71	0.24	17	0.70	0.18
평균	-11.6	-12.1	-15.7	15.3	1.84	0.16	17	0.82	0.15

표 3은 지휘자/독주자와 오케스트라 연주자간의 상황을 설정하여 실내음향 지표를 측정된 결과이다. 앞의 Gade 방법론은 음원-수음원간 거리가 1m로 고정되어 있었지만 여기에서는 오케스트라 연주자 위치에 따라 다양한 음원-수음원간 거리가 적용되었다. Case 1과 같이 지휘자 위치에서의 측정결과 5지점의 평균 RT는 약1.9초, 평균 EDT는 약 1.7초, 평균 IACC_{E3}는 0.62, 평균 IACC_{L3}는 0.16으로 나타났다. 이것은 음원과 수음원간에 충분한 감쇠거리가 확보되어 ST1 측정시의 실내음향지표보다 잔향시간은 더 길게, 초기음의 IACC는 더 낮게 나타난 것을 알 수 있다. 다만 P1 지점의 경우 지휘자 위치 바로 뒤에 있었기 때문에 초기음의 음향지표가 다소 다른 경향을 보였다.

한편, 음원과 수음원을 바꿔 측정한 Case 2의 경우 실내음향 지표의 전체적인 평균값이 Case 1과 매우 유사한 것을 알 수 있었다. 특히 EDT, IACC_{E3}는 Case 1과 Case 2간에 0.98이상의 높은 상관관계를 보였다. 하지만 RT와 IACC_{L3}는 Case 1과 Case 2간에 낮은 상관관계를 보였다. 이것은 무대 위 연주자 서로의 거리와 위치가 정해지면 인지할 수 있는 초기음 요소는 일정하나, 후기음 요소는 수음점의 주변 무대환경에 따라 달라진다는 것을 의미한다.

표 3. 무대음향 측정결과 2 (지휘자와 P1-P5간 측정시, 독주자와 P1-P5간 측정시)

측정 위치	Case 1 수음:지휘자/음원:P1-P5						Case 2 수음:P1-P5/음원:독주자					
	거리 [m]	RT [s]	EDT [s]	Ts [ms]	IACC _{E3}	IACC _{L3}	거리 [m]	RT [s]	EDT [s]	IACC _{E3}	IACC _{L3}	
P1	1.0	1.87	0.75	25	0.90	0.21	1.4	1.90	0.66	0.90	0.11	
P2	6.1	1.92	1.95	131	0.50	0.08	5.8	1.91	1.92	0.43	0.12	
P3	4.0	1.87	1.83	106	0.66	0.20	4.1	1.93	1.88	0.60	0.13	
P4	7.0	1.91	1.82	125	0.64	0.18	7.1	1.92	2.00	0.52	0.12	
P5	8.5	1.92	1.90	138	0.42	0.11	8.9	1.89	2.06	0.29	0.13	
평균	5.3	1.90	1.65	105	0.62	0.16	5.5	1.91	1.70	0.55	0.12	

4. 주관적 평가

4.1 청감실험 절차

앞서 측정된 음향지표를 바탕으로 앙상블 연주에 도움이 되는 물리적 측면을 평가하기 위해 현장 청감실험을 실시하였다. 다양한 ST1 분포를 보였던 P1-P5의 다섯 지점을 동일하게 평가지점으로 선정하였고, 각 위치에서 연주자 3인이 합주 연주를 2회 진행

한 뒤 각 지점의 음향에 대해 평가하는 방식으로 진행하였다. 실험에는 플룻 연주자 2명과 첼로 연주자 1명이 피험자로 참여하였으며, 연주곡은 하이든의 두 개의 플룻과 첼로를 위한 합주곡(Op. 11, No. 4)을 선정하였다. 각 위치의 주관적 인상은 독주 연주에 대한 항목 10개와 합주 연주에 대한 항목 2개에 대해 5점 척도로 평가하였다. 각 평가항목은 표 4와 같다.

표 4. 주관적 인상 평가항목

구분	평가항목	설명
독주	Support	자신의 소리가 잘 들리는 정도
	Blending	자신의 연주가 잘 섞이는 정도
	Size	음향적으로 인지되는 홀의 크기
	Clarity	자신의 연주음의 명료도
	Directivity	연주음이 잘 뻗어나가는 정도
	Reverberance	자신의 연주음의 잔향감
	Envelopment	연주음이 주위를 둘러싸는 정도
	Warmth	자신의 연주음에서 느껴지는 저음비율
	Brilliance	자신의 연주음에서 느껴지는 고음비율
	Overall impression	독주 연주에 대한 전체적인 선호도
합주	Hearing each other	서로의 연주음이 잘 들리는 정도
	Ensemble	합주 연주가 잘 되는 정도

4.2 청감실험 결과

그림 5는 5점 척도로 평가한 독주 항목에 대한 평가결과와 합주 항목에 대한 평가 결과를 나타낸다. P4가 독주 항목에서 가장 좋은 점수를 받은 것으로 나타났으며, P3는 가장 낮은 것으로 나타났다. 두 지점 모두 무대 중앙에 위치해 있었으나 P4가 후벽과 더 가까운 거리에 있었기 때문에 피험자들은 후벽으로부터의 반사음을 긍정적으로 평가한 것으로 사료된다. 반면, P5는 측후벽과 매우 가까운 거리에 있었음에도 불구하고 P4보다 선호되지 않았는데 이것은 P5 지점에서의 과도한 반사음으로 인해 자신의 소리를 오히려 잘 구분하지 못했기 때문인 것으로 사료된다.

P2, P4, P5는 연주자 서로간의 소리가 매우 잘 들리는 것으로 나타났으며, 특히 P4와 P5는 앙상블이 가장 좋은 것으로 평가되었다. 반면 P1과 P3는 합주뿐만 아니라 독주 항목에서도 좋은 평가를 받지 못했다. 이것은 P2, P4, P5의 세 지점이 공통적으로 측후벽과 거리가 가까운 위치에 있어서 높은 ST1 분포를 보였고, 피험자가 기악 연주자였기 때문에 앙상블에 있어서 많은 초기반사음이 연주에 도움을 주었다는 사실을 알 수 있다.

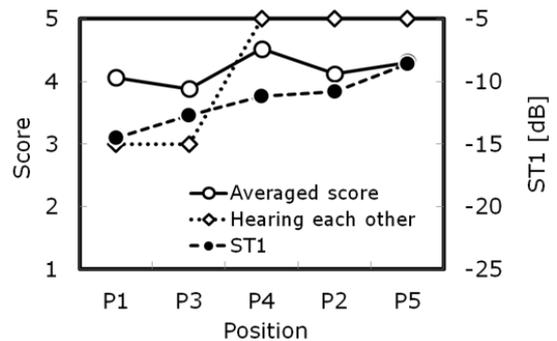


그림 5. 주관적 평가 결과 (○: 독주 항목, ◇: 합주 항목)

5. 토의

무대 위 연주자의 선호도 형성에 기여하는 주관적 평가 항목을 분석하기 위해 회귀분석 실시하였다. 각 독주 항목 9가지를 종속변수로, 독주의 'Overall impression'을 독립변수로 설정하였다. 그 결과 다음 (5)식과 같은 회식식이 도출되었다.

$$\text{Overall impression} \approx a_1(\text{Blend.}) + a_2(\text{Rever.}) + a_3(\text{Warm.}) + a_4(\text{Brill.}) + C \quad (5)$$

여기서 표준화 회귀계수는 $a_1=1.038$, $a_2=-0.779$, $a_3=1.704$, $a_4=-0.605$ 이며, 식의 결정계수는 $R^2=0.98(p<0.01)$ 이다. 이것은 소리의 블렌딩과 잔향감, 저음비율과 고음비율이 독주의 선호도 형성에 중요하다는 것을 의미하며, 블렌딩과 저음비율이 높을수록 선호되었고 나머지 요소는 낮은 것이 더 선호되었다. 따라서 독주의 선호도 향상을 위해서는 자신의 연주음이 블렌딩이 강하게 되도록 잔향과 고음을 억제하는 것이 좋으며, 저음의 반사음이 강하게 되도록 무대 주변 구조를 면밀도 높은 재료로 마감하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

표 5는 각 주관적 평가 항목과 측정된 음향지표간의 상관관계분석 결과를 나타낸다. 음향지표 중 ST1과 ST2가 유사한 경향을 보이고, ST_{late}와 CS가 유사한 경향을 보였기 때문에 ST1과 CS만 표시하였고, 객석음향 지표는 RT, EDT, IACC_{E3}만 표시하였다. 그 결과, 주관적 평가 항목 중 'Blending'만이 음향지표와 유의한 상관관계를 보였으며, 특히 ST1과 IACC_{E3}와 매우 높은 상관계수를 보였다. 따라서 무대 위에서 많은 초기반사음이 도달하도록 설계하는 것은 ST1을 높이고 초기음의 IACC를 낮출 수 있기 때문에 연주자의 Blending을 향상시킬 수 있으며, 이것은 결과적으로 전체적인 선호도 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

표 5. 주관적 평가 항목(Blending)과 음향지표간의 상관관계 분석결과 (* p<0.05, ** p<0.01)

상관계수	ST1	CS	RT	EDT	IACC _{E3}
Blending	0.99**	-0.90*	-0.04	0.82	-0.97**

6. 결론

본 연구는 Stage support 지표를 이용하여 무대음향 중 앙상블의 주관적 평가를 진행하였다. 무대 음장의 물리적 측면을 정량화하기 위해 ST1 등의 무대음향 지표와 더불어 잔향시간, 양이상관도 등의 객석음향 지표도 측정하였다. 또한 무대음향에 있어서 실험실에서의 청감평가 방법은 연주음 평가에 제약이 있기 때문에 현장에서의 연주음 평가를 진행하였다.

실험결과 동일한 무대라 하더라도 위치에 따라 다양한 음장 분포를 보였으며, 높은 ST1과 낮은 IACC_{E3}는 주로 측벽 및 후벽과 가까운 곳에서 발견되었다. Gade의 측정방법론은 음원-수음원간 거리를 1m로 가깝게 설정하여 직접음에너지를 일정하게 하는데 도움이 되지만 근접음장을 측정하기 때문에 일반적인 실내음향 지표를 적용하기에는 부적합하다. 한편 지휘자 및 독주자와 오케스트라 연주자의 관점에서 음원-수음원간 거리를 다양하게 설정하여 측정하였을 때는 충분한 감쇠거리를 확보하였기 때문에 잔향시간은 더 길게, 양이상관도는 더 낮게 나오는 것으로 나타났다.

다. 이 때 초기음에너지는 음원-수음원간의 거리에 주로 영향을 받지만, 후기음에너지는 측후벽과 관계된 수음원의 위치에 영향을 받는 것으로 나타났다.

앙상블의 선호도 형성에 기여하는 요소를 평가하기 위해 실시한 기악 연주자 대상의 현장 청감평가 결과 독주 및 합주의 전체적인 선호도는 ST1과 유의한 상관관계를 보이지 않았지만, 독주의 경우에는 너무 과다하지 않은 적절한 초기반사음 양이 도움이 되고, 합주의 경우에는 초기반사음이 많은 것이 서로 잘 들리는 정도에 도움을 준 것으로 나타났다. 이것은 기악 연주자의 선호도 평가에서 일반적으로 나타나는 경향이라 할 수 있다. 한편, 전체적인 주관적 선호도 형성에 기여하는 요소는 블렌딩, 잔향감, 저음비율과 고음비율인 것으로 나타났으며, 그중 블렌딩과 저음비율이 선호도와 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 또한 블렌딩은 측정된 음향지표와 가장 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났으며, 특히 높은 ST1과 낮은 IACC_{E3}는 블렌딩의 향상에도 도움을 주는 것으로 나타났다. 본 연구결과를 통해 앙상블 평가에 필요한 객관적 및 주관적인 선호도요소가 도출되었으며, 향후 더 많은 연주자의 주관적 평가를 통해서 앙상블에 대한 무대음향을 정량적으로 평가할 수 있는 지표가 확립될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (KRF-2006- 511-D00413)

참 고 문 헌

- (1) A. H. Marshall, D. Gottlob and H. Alrutz, "Acoustical conditions preferred for ensemble," J. Acoust. Soc. Am. 64, 1437-1442 (1978).
- (2) M. Barron, "The Gulbenkian Great Hall, Lisbon, II: An acoustic study of a concert hall with variable stage," J. Sound Vib. 59, pp. 481-502 (1978).
- (3) A. C. Gade, "Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part I: Method and laboratory experiments," Acta Acustica united with Acustica 65, pp. 193-203 (1989).
- (4) A. C. Gade, "Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part II: Field experiments and synthesis of results," Acta Acustica united with Acustica 65, pp. 249-262 (1989).
- (5) J. O'Keepe, "A Preliminary Study of Reflected Sound on Stages," 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway, pp. 601-604 (1995).
- (6) J. Y. Jeon and M. Barron, "Evaluation of Stage Acoustics in Seoul Arts Center Concert Hall by Measuring Stage Support," J. Acoust. Soc. Am. 117 (1), pp. 232-239 (2005).
- (7) A. C. Gade, "Subjective room acoustic experiments with musicians," Acoustics Lab. Technical University of Denmark, Report No. 32 (1982).
- (8) G. M. Naylor, "The achievement of ensemble," Appl. Acoust. 23 pp. 109-120 (1988).
- (9) J. H. Rindel, "Design of new ceiling reflectors for improved ensemble in a concert hall," Appl. Acoust. 34, pp. 7-17 (1991).
- (10) G. M. Naylor, "Some effects of signal and noise modulation on rhythm detection, and relations to musical performance in rooms," Acta Acustica united with Acustica 73 pp. 208-214 (1991).
- (11) J. Meyer, "The sound of the orchestra," J. Audio Eng. Soc. 41(4) 203-212 (1993).
- (12) J. Meyer, "Influence of Communication on Stage on the Musical Quality," 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway, pp. 573-587 (1995).
- (13) 김용희, 이창우, 서춘기, 전진용, "성악가 현장 청감실험을 통한 무대음향의 선호인자 평가." 한국음향학회 춘계학술발표대회 (2007).
- (14) Y. H. Kim, C. K. Seo, J. Y. Jeon, "Evaluation of stage acoustics in concert halls by investigating performer's preference" 19th International Congress on Acoustics, Madrid, Spain (2007).
- (15) 전진용, 이창우 "홀의 무대설계를 위한 음향요소연구," 대한건축학회논문집 계획계, 16권 4호 (2000).