

콘서트홀의 Sound Strength 현장 측정법 고찰

Investigation of an in-situ measurement method for Sound Strength in concert halls

정충일[†] · 유진* · 진진용**

Choong Il Jeong, Jin You, Jin Yong Jeon

Key Words : 음의 세기 (Sound strength), G 현장측정법 (G in-situ measurement method), ACF요소 (ACF parameters)

ABSTRACT

The accuracy of sound strength (G) measurement method in ISO 3382 has been questioned. One of the main reason is the difficulty in measuring a reference sound level in an anechoic chamber with the same set-up which was applied for the actual hall measurements. In the present paper, an in-situ measurement method for G was proposed by investigating the present G measurement method shown in ISO 3382. In addition, the sound radiation characteristics of typical omnidirectional loudspeakers were investigated and Phi (0) of auto correlation function (ACF) parameters was also calculated from an actual music excerpt to characterize the sound energy distribution in concert halls.

1. 서론

콘서트홀 등 공연장의 음향 및 음질 평가에 주요 영향을 미치는 요소로서 잔향감, 공간감 및 음의 세기 등을 들 수 있다. 이들 주관적 요소는 각각 reverberation time (RT), interaural cross-correlation coefficient (IACC) 및 sound strength (G) 등 측정 가능한 물리적 요소와 상관도가 높은 것으로 조사되고 있으며 [1-3], 적절한 RT, IACC 및 G값의 구현이 공연장의 음향설계 목표 및 완공 후 음향평가 척도로서 활용되고 있다.

이들 중 G의 경우 공간감 등 주요 음향 평가 요소에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 [4-5], 공연장 내부 음 에너지를 설명하는 가장 기본적인 물리적 요소이기 때문에 RT 및 Clarity Index (C_{80})와 더불어 공연장의 음향성능 예측에 활용될 수 있는 중요한 파라메타이다. Barron과 Lee [6]가 확산음장에서의 음 에너지 거리감쇠 이론을 공연장 내부에서 음의 반사현상을 적용하여 보정한 이래, 공연장의 에너지 분포를 설명하기 위한 연구들이 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔고 G에 대해 ISO 3382 [7]가 제정되기에 이르렀다. 그러나 Bradley [8] 등이 지적했듯이 ISO 3382에 규정된 G의 측정 및 계산법은 실제 공연장의 음 에너지 분포를 정확히

설명하지 못하는 한계를 나타내고 있다. 이에 Cirillo와 Martellotta [9] 등은 중주파수 대역의 결과를 활용한 Barron의 보정식을 개선하여 공연장 음 에너지 분포를 설명하고자 하였으며, Zamarreno 등 [10]은 시간에 따른 음의 감쇠특성을 추가적으로 조사하여 보정식을 제안기도 하였다.

그러나 G 예측치와 실제 측정값의 불일치 문제뿐만 아니라 측정장비와 세팅에 따른 편차 문제 역시 보완되어야 할 부분이다. 무향실과 실제 공연장에서 동일한 장비와 세팅으로 음 에너지를 측정해야하는 번거로움이 크며, 특히 무지향성 스피커의 지향패턴 및 성능 편차가 주요 관건이 되기도 한다. 따라서 Leishman 등 [11]이 언급한 바와 같이 스피커의 무지향성을 설명하는 "Omnidirectionality Coefficient"를 제안하여 편차를 해결하는 방안 등이 모색되어야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 공연장의 음 에너지 분포를 보다 정확하게 측정하고 계산하기 위해 무향실 측정을 생략하는 음 에너지의 현장측정 방법을 제안하며, impulse response를 분석에 활용하는 현행 G값 계산법을 실제 음원을 활용하는 계산법으로 개선하고자 한다. 이를 위하여 시간에 따른 변화 특성이 큰 음악음원의 에너지 분석을 위해 auto correlation function (ACF) 요소 중 음의 세기와 관련된 $\Phi(0)$ 요소가 활용되었다.

2. Sound strength를 통한 음에너지 표현

G는 공연장의 음 에너지 분포를 평가하기 위하여 대상 장소에서 녹음된 impulse response와 같은 측정 장비를 이용하여 무향실 조건의 10m 거리에서 측정된 impulse

† 한양대학교 건축환경공학과, 석사과정
E-mail : jci2000@hanmail.net
Tel : (02) 2220-1795, Fax : (02) 2220-4794

* 한양대학교 건축환경공학과, 박사과정
** 한양대학교 건축대학, 부교수

response의 대수적 비로 정의된다.

$$G = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} dB = L_{pE} - L_{pE10}$$

$$L_{pE} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T_o} \int_0^{\infty} \frac{p^2(t) dt}{p_0^2} \right] dB$$

$$L_{pE10} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T_o} \int_0^{\infty} \frac{p_{10}^2(t) dt}{p_0^2} \right] dB$$

이때, $p(t)$ 는 측정점의 순시 음압 레벨을, $p_{10}(t)$ 는 자유음장의 10m거리에서 측정된 레벨이다. 식에서의 기준 레벨 p_0 는 $2\mu\text{Pa}$, $T_0 = 1\text{s}$ 이며, L_{pE} , $L_{pE,10}$ 는 각각 측정점과 자유공간에서 측정된 $p(t)$, $p_{10}(t)$ 의 음압 레벨이다.

G값으로는 중음대역을 평균한 값 G_{mid} (500Hz, 1kHz)이 주로 이용되며, 125Hz에서 G값은 콘서트홀의 음향 선호도와 상관도가 높은 것으로 알려졌다 [12].

2.1 측정 및 계산 방법

G값의 측정에는 무지향성 음원과 이를 수음할 수 있는 무지향성 마이크로폰이 이용된다. G값의 계산 시 음압 레벨 비교 기준이 되는 $L_{pE,10}$ 은 그림 1과 같이 자유음장 조건에서 무지향성 음원(S_0)을 설치하고 음원으로부터 10m 떨어진 거리에서 무지향성 마이크로폰(M_0)으로 수음하게 된다.

측정하고자 하는 공간에서의 음압레벨 L_{pE} 는 각 측정점에서 녹음된 음원을 통해 계산된다. 이때 무지향성 음원은 1.5m, 마이크로폰은 1.2m 높이에 설치한다.

이때 사용되는 무지향성 음원으로는 재생될 최대음압레벨에서 최소음압레벨까지의 다이내믹 레인지 안에서 왜곡이나

잡음이 없는 스피커가 필요하며, 스피커의 지향특성을 보정하기 위하여 자유음장에서 12.5° 간격으로 음압레벨을 측정하여 이를 에너지 평균한다. 무지향성 마이크로폰은 가급적 작은 것을 사용하되, 평탄한 주파수 응답을 위하여 직경 1인치 이하의 것을 사용한다.

$L_{pE,10}$ 의 측정 시 무향실의 환경적 조건으로 인하여 음원으로부터 10m 이격된 거리에서 측정이 어려울 때에는 음원으로부터 일정거리 (d) 떨어진 곳에 마이크로폰을

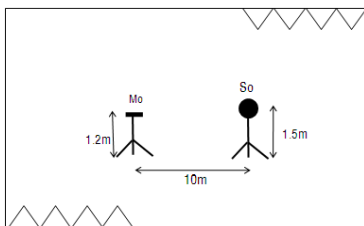


Fig. 1 G measurement set-up

설치하고 그 지점에서 측정된 음압레벨 $L_{pE,d}$ 를 통해 아래 식에서 $L_{pE,10}$ 를 구하게 된다.

$$L_{pE10} = L_{pEd} + 20 \log(d/10) dB$$

또한 $L_{pE,10}$ 는 잔향실 조건에서 음압레벨 L_{pE} 를 측정하고 아래 식을 통해서도 계산 할 수 있다.

$$L_{pE10} = L_{pE} + 10 \log(A/S_0) dB - 37 dB$$

A는 잔향실 공간에서의 단위 등가 흡음력을 나타내며, S_0 는 단위 면적이다.

2.2 현 측정 및 계산방법의 제한점

G값을 구하기 위한 현재의 측정법에서 자유음장 조건 하에 측정되는 기준 음압 레벨 $L_{pE,10}$ 및 $L_{pE,d}$ 는 무지향성 음원 중 직접음 성분만의 음에너지를 나타내는 것으로 G값 계산에 매우 중요한 요소로 작용한다. 그러나 무향실 조건 측정 시 음원의 무지향 성능이나 수음점의 위치 선정에 따라 기준 음압 레벨이 달라 질 수 있으며 기준 음압 레벨의 오차는 모든 실제 공간의 G값 계산에 영향을 미치게 된다.

G값의 측정 시 사용되는 무지향성 스피커의 지향특성을 살펴보기 위하여 3가지 무지향성 스피커에 대해서 그림 2와 같이 일정 간격으로 수음점을 선정하고 주파수 대역별 음압 레벨을 조사하는 실험을 진행하였다.

실험은 Adobe사의 Audition 2.0 프로그램을 이용하여 컴퓨터에서 음원을 재생하고, 오디오 인터페이스를 거쳐 스피커 파워앰프에서 증폭된 신호가 무지향성 스피커로 재생되도록 하였다. 무지향성 스피커는 2종류의 12면체 스피커와 1종류의 공진형 실린더 스피커를 사용하였다. 수음점은 모두 12지점으로 그림 2와 같이 기준 수음점에서 수직 및 수평적으로 6지점씩을 선정하여 음원과 일정 각도의 간격을 갖도록 하였다.

기준 수음점에서 각 주파수 대역에 대한 음압레벨을 살펴보면 공진형 실린더 스피커에 비하여 12면체 스피커가 전 대역에서 비교적 높은 음압레벨을 나타내었다. 그리고

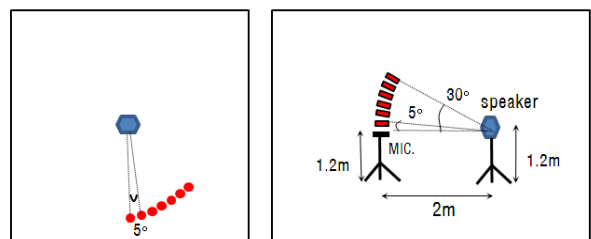


Fig. 2 Omni-directional speaker directivity measurement set-up

3종류 스피커 모두 8kHz 이상의 고주파 대역에서 재생 음압레벨이 현저히 저하되었으며, 12면체 스피커의 경우 배열된 각 드라이버의 간섭현상으로 고주파 대역에서 dip이 발생하는 것으로 나타났다.

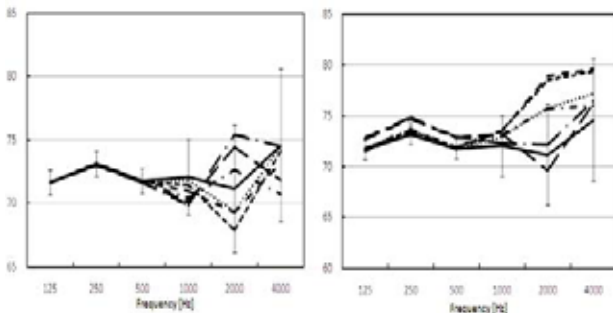
수평적으로 측정위치를 이동하였을 때 12면체 스피커의 경우 저주파대역에서는 위치에 따른 음압레벨의 편차가 작았으나, 스피커의 중심축으로부터 일정 지향각도로 소리가 방사되는 중·고주파 대역에서는 측정위치에 따른 음압레벨 편차가 증가하였다. 반면 실린더 형태 무지향 스피커는 수평적 위치변화에 따른 주파수 대역별 음압레벨의 편차가 비교적 작았다.

수직적으로 측정위치를 이동한 경우, 12면체 스피커는 수평적으로 측정위치를 이동한 경우와 같이 저주파대역에서 음압레벨의 편차가 작았으나, 중·고주파 대역에서는 스피커 드라이버의 중심축에 가까울수록 음압레벨이 높아지는 것으로 나타났다. 실린더 형태 스피커의 경우, 전 주파수 대역에서 수직적 위치에 따른 음압레벨의 차이가 수평적 위치에 따른 레벨 차이보다 크게 나타났다. 이것은 실린더 형태 스피커의 개구부가 상부를 향하고 있어 스피커의 위쪽으로 방사되는 음 에너지가 더 크기 때문인 것으로 사료된다.

각 스피커의 주파수 대역별 음압레벨을 나타내는 그림 3 및 4의 오차막대는 ISO 3382에서 정하는 무지향 스피커의 허용 음압 편차이며, 주파수 대역별 편차를 표 1에 나타내었다. 무지향 스피커의 종류와 측정 위치에 따라 소리의 방사 특성이 달라지므로 무지향 스피커를 사용한 측정 시 스피커의 지향특성을 고려하여 측정해야 한다.

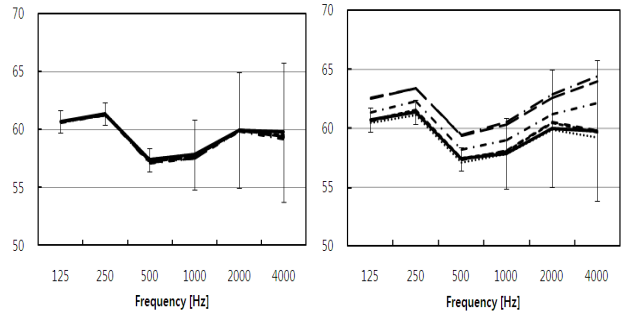
Table 1 Maximum allowed directional deviations of the source in decibels for excitation with octave bands

Frequency [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Max. Deviation [dB]	±1	±1	±1	±3	±5	±6



(a) horizontal (b) vertical

Fig. 3 Results of the measurement for dodecahedron speakers



(a) horizontal (b) vertical

Fig. 4 Results of the measurement for a cylinder shaped speakers

또한 현재의 G값 측정법은 기준 음압 레벨을 자유음장이라는 특정 조건에서 측정하고, 동일한 장비와 측정 셋업을 유지하여 측정하고자 하는 실제 공간에서 음압 레벨을 측정하는 방법이 사용되고 있어 공간과 장비사용에 대하여 큰 제약을 갖는다.

G값의 계산에는 각 측정점에서 녹음된 음원을 통해 추출된 impulse response가 사용된다. 즉, 공연장에서 실제적으로 듣게 되는 연주나 성악음원을 통해서는 G값을 계산할 수 없고, 공연 시에는 impulse response를 추출하기 위해 사용되는 특정 음원을 재생할 수 없어 실제 공연 조건 공간의 음에너지를 측정하기 어렵다.

3. 음에너지 표현의 개선

3.1 G값 측정법 개선

현행 G값 측정법은 자유음장이라는 공간적 제한과 측정 장비 동일 상태 유지라는 제약 조건을 지닌다. 따라서 무향실과 실제 공연장이라는 상이한 두 조건에 대해 동일한 측정 장비와 세팅을 유지해야하는 번거로움이 존재한다. 이러한 측정상의 문제점에 대하여 G값의 측정 시 무향실이 아닌 실제 측정 현장에서 기준 음압 레벨을 측정할 수 있는 새로운 측정 및 계산법이 제안된다. 이 경우 무향실 측정이라는 시간적, 경제적 필요를 줄인다면, 측정 장비의 이동이나 결선방식에 따른 오차 또한 줄일 수 있는 효과적인 측정법이 될 것이다.

세종체임버홀(476석)의 1층 8좌석에서 ISO 3382에 규정된 방법대로 계산된 G값과 현장 측정법에 의해 계산된 G값을 비교하였다. 현장 측정법에 의한 G값의 계산 시 음원으로부터 가장 가까운 좌석(3.62m)의 음압 레벨을 기준 음압 레벨로 정하였다. 분석 결과를 표 2에 나타냈으며 현행 방법으로 계산된 값과 현장 측정법에 의해 계산된 값 사이에 1.0dB의 차이를 나타냈다. 음원으로부터 가까운 거리에서 측정된 Impulse response는 공간의 특성 즉, 반사음 성분을 매우 적게 포함하고 있어 현장 측정법의 기준

음압 레벨로서 적합할 것으로 사료되며, 현장 측정법에 의해 도출된 G값과 ISO 3382에 규정된 방법에 의해 도출된 결과 사이의 차이는 적은 것으로 나타났다.

Table 2 Comparison of the results from two calculation methods (ISO 3382 and in-situ measurement method)

Distance from the source [m]	3.62	6.39	9.95	9.69	12.34	12.17	15.80	17.24
ISO 3382 [dB]	7.8	6.9	5.0	4.7	4.3	4.0	3.4	2.9
In-situ measurement method [dB]	8.7	7.9	6.0	5.6	5.3	5.0	4.3	3.9
Deviation [dB]	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0

3.2 ACF 요소를 이용한 음에너지 표현

실제 공연장에서 관객들이 듣게 되는 연주나 성악은 임의의 연속적인 소리로서 공간의 음에너지를 표현하는 G값의 측정 및 계산법을 통해서도 공연 현장에서 녹음된 음원의 음에너지를 계산할 수 없다. 따라서 impulse response를 활용하는 G값보다는 실제 음악음원을 활용하는 물리요소가 더 요구되며, ACF 요소가 그 대안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

$$\Phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} p(t) p(t+\tau) dt$$

ACF는 임의의 신호 (p(t))와 그 신호를 임의의 시간 (τ) 만큼 지연시킨 신호 (p(t+τ)) 사이의 상관관계를 설명하는 함수로 상기 식과 같이 정의된다. ACF는 공연장에서 연주되는 음악과 같이 시간변동 특성이 강한 음원의 세기 (loudness), 음고 (pitch) 및 음색 (timbre) 등을 설명하는 데 효과적인 것으로 알려져 있어 연구 활용도가 높다. 상기 ACF 식에서 지연시간이 0일 때의 ACF를 F(0)로 정의할 수 있는데 이것은 신호의 에너지 레벨을 나타낸다. ACF 함수에서 첫 번째 peak의 지연시간과 크기를 각 t₁과 f₁으로 정의하며, 주관적인 음고와 세기 (pitch strength)를 각각 설명한다. 또한 ACF envelope의 지속시간을 t_e로 정의하는데, 이상의 F(0), t₁, f₁ 및 t_e 중 Φ(0)를 제안한다.

세종체임버홀의 1층 8개 좌석에서 수음한 바이올린 연주 녹음원을 활용하여 음원의 Leq 및 Φ(0)를 분석한 결과, Leq와 Φ(0)는 0.96의 유의한 상관관계를 갖는 것으로 나타나 (p<0.01), 시간변동 특성이 강한 음원 평가 시 Leq를 대체할 수 있는 음에너지 표현 방법이 된다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 ISO 3382에 규정된 무향실 레퍼런스 값을 활용한 G 측정 및 계산법의 한계점을 고찰하고,

무지향성 스피커의 방사특성을 고려한 G의 현장 측정법을 제안하였다. 무지향성 12면체 스피커와 실린더 형태 스피커의 수직적, 수평적 방사특성이 상이한 것으로 나타나 향후 공연장의 음 에너지 계산 시 스피커별 방사패턴에 대한 보정이 요구되며, impulse response 외 실제 음악음원을 활용한 Φ(0)를 음 에너지 레벨에 활용 가능할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] Ando Y., 2002, "Correlation factors describing primary and spatial sensations of sound fields," J. Sound Vib. 258 (3), pp.405-417.
- [2] Barron M., 2001, "Late lateral energy fractions and the envelopment question in concert halls," Appl. Acoust. 62, pp.185-202.
- [3] Hidaka T., Beranek L. L., Okano T., 1995, "Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low- and high-frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls," J. Acoust. Soc. Am. 98 (2), pp.988-1007.
- [4] Bradley J. S., Reich R. D., Norcross S. G., 2000, "On the combined effects of early- and late-arriving sound on spatial impression in concert halls," J. Acoust. Soc. Am. 108 (2), pp.651-661.
- [5] You J., Sato S., Jeon J. Y., 2007, "Subjective evaluations of the acoustical qualities of Sejong Chamber Hall," ISRA 2007, Sevilla, Spain.
- [6] Barron M., Lee L.-J., 1988, "Energy relations in concert auditoriums. 1," J. Acoust. Soc. Am. 84 (2), pp.618-628.
- [7] ISO 3382: 1997, "Acoustics-Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters,"
- [8] Bradley J. S., 2005, "Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls," Acoust. Sci.& Tech. 26 (2), pp.170-178.
- [9] Cirillo E., Martellotta F., 2005, "Sound propagation and energy relations in churches," J. Acoust. Soc. Am. 118 (1), pp.232-248.
- [10] Zamarreno T., Giron S., Galindo M., 2007, "Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches," J. Acoust. Soc. Am. 121 (1), pp.234-250.
- [11] Leishman T. W., Rollins S., Smith H. M., 2006, "An experimental evaluation of regular polyhedron loudspeakers as omnidirectional sources of sound," J. Acoust. Soc. Am. 120 (3), pp.1411-1422.
- [12] Beranek L.L., 2003, "Subjective rank-orderings and acocal measurements for fifty-eight concert halls", Acta Acustica united with Acustica, 89 (3), pp.494-508