음향 반사판의 밀도별 흡음특성 및 무대음향에의 영향

Effect of Acoustic Reflector's Surface Density on Sound Absorption Characteristics and Stage Acoustics

김 영 선*. 정 정 호†. 전 진 용**. 김 명 석***

Youngsun Kim, Jeongho Jeong, Jinyong Jeon and Myeongseok Kim

(2012년 2월 17일 접수 ; 2012년 4월 24일 심사완료)

Key Words : Acoustic Reflector(음향 반사판), Sound Absorption(흡음), Surface Density(면밀도), Room Acoustics(실내음향), Stage Acoustics(무대음향)

ABSTRACT

In concert halls and auditoriums, acoustic reflector and stage enclosure is one of the main factors on the room and stage acoustic characteristics. As a stage enclosure and acoustic reflector honey comb based light-weight reflector is widely used, because it is easy to install. However, there was not enough research on the surface density effect on room and stage acoustics. In this study, sound absorption coefficient tests on three kinds of wooden acoustic reflectors with different surface density were conducted. Surface density of acoustic reflector was changed from 11 kg/m^2 to 41 kg/m^2 . For the low frequency excitation, sub-woofer was used with omnidirectional loud-speaker simultaneously. From the experiments, it was found that sound absorption coefficient below 250 Hz band was decrease by the increment of surface density. In order to check the influence of the surface density on room and stage acoustic parameters, room acoustic simulation was conducted with sound absorption coefficients, which were tested in reverberation chamber. By the increment of surface density of acoustic reflector, RT(reverberation time) and EDT(early decay time) were increased. Also, ST(stage support) was improved in low frequency bands.

1. 서 론

콘서트 홀 및 다목적 공연장의 실내 음향 및 음향 설계에서 가장 중요한 부분은 무대음향이다. 무대음향의 정량적 평가를 위해 ST(stage support)^(1,2)가 제안되었으며, 최근 ISO 3382-2 : 2008⁽³⁾에 규정 되었다. 무대 음향의 개선을 위해 연주자간 커뮤니케이션이 연주에 미치는 영향⁽⁴⁾, 스케일 모델을 활용한 무대음향 특성^(5,6) 및 음향 확산체가 무대음향에 미치는 영향⁽⁷⁾에 대한 연구가 수행되고 있다. 또한 무대음향에 대한 무대 반사판의 영향 및 배치 형태에 따른 영향에 대한 연구^(8,9)가 수행되었다.

그러나 무대 및 오케스트라 셸을 구성하는 음향 반사판 자체에 대한 연구 및 재질에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한 무대 음향 반사판을 선정하기 위한 밀도 등의 기준이 서로 상이하여, 이에 대한 연구가 필요하다.

이 연구에서는 무대 또는 오케스트라 셸을 구성하는 음향 반사판의 밀도(면밀도) 변화에 따른 흡음특성과 음향 반사판의 밀도 변화가 무대음향에 미

† 교신저자; 정회원, 방재시험연구원

E-mail : jhjeong@kfpa.or.kr

Tel : (031)887-6693, Fax : (031)887-6739

* 호서대학교

** 정회원, 한양대학교

*** (주)시공사

치는 영향을 조사하고자 한다.

2. 음향 반사판의 흡음특성

2.1 수직입사 흡음률

다목적 공연장 및 콘서트홀의 무대에 사용되는 음향 반사판의 면밀도별 흡음특성을 비교하기 위하여 목질계 음향 반사판 2종을 대상으로 수직입사 흡음률을 측정하였다. 수직입사 흡음률 측정은 음향 반사판 자체의 흡음 특성 및 아치 형태의 음향 반사판으로 구성되는 경우에 형성되는 음향 반사판 배후의 공기층의 영향을 조사하기 위하여 실시하였다. 수직입사 흡음률 측정 대상은 목질계 음향 반사판 2종으로 음향반사판의 단면은 Fig. 1과 같다. Fig. 1(a)은 일반적으로 다목적 공연장에 사용되고 있는 음향 반사판으로 면밀도는 약 11 kg/m^2 으로 합판, 차음시트 및 허니콤 구조로 구성되었으며, 두께는 18 mm이다. Fig. 1(b)의 음향 반사판은 면밀도가 41 kg/m^2 로 펠라민 판, 합판 및 MDF를 8겹 순대로 적층한 반사판이다. 적층형 반사판의 두께는 약 40.8 mm이었다.

수직입사 흡음률 측정은 KS F 2814-2:2002⁽¹⁰⁾의 전달함수법에 따라 측정하였다. Fig. 2는 수직입사 흡음률 측정을 위한 임피던스 튜브의 실험을 도식화하여 나타낸 것이다.

Fig. 1 Section detail of normal incidence sound absorption coefficient test specimens

Fig. 2 Normal incidence sound absorption coefficient test setup(KS F 2814-2)

음향 반사판의 수직입사 흡음률 측정은 배후 공기층의 유무 및 크기에 따라 3가지 경우를 대상으로 실시하였다. 배후 공기층을 고려하여 측정한 이유는 실제 음향 반사판이 설치되는 경우 Figs. 7~9에 서와 같이 아치형태의 곡면으로 제작되어 설치되어 동일한 음향반사판 재질이어도 곡면 형태에 의해 서로 다른 배후 공기층이 형성되기 때문이다. Figs. 3~5는 배후 공기층이 없는 경우와 배후 공기층이 각각 50 mm, 100 mm인 경우의 수직입사 흡음률을 비교하여 나타낸 것이다. 수직입사 흡음률의 측정은 측정주파수 대역별에 따라 대형 시험체(직경 100 mm)와 소형 시험체(직경 29 mm)를 각각 측정하여 통합한다. 그러나 이 실험에서는 중·저주파수 대역의 수직입사 흡음특성을 비교하기 위하여 대형 시험체만을 대상으로 50 Hz~1600 Hz 범위를 대상으로 측정하였다. 수직입사 흡음률은 2 Hz간격으로 측정한 결과를 1/3 옥타브밴드로 환산하여 비교하였다.

Fig. 3 Normal incidence sound absorption characteristics of acoustic reflector and laminated reflector(without air-space)

Fig. 4 Normal incidence sound absorption characteristics of acoustic reflector and laminated reflector(50 mm air-space)

Fig. 3은 배후 공기층이 없는 경우의 음향 반사판과 상대적으로 면밀도가 높은 적층형 반사판의 수직입사 흡음 특성을 비교한 것이다. Fig. 3에서와 같이 일반적인 음향 반사판과 면밀도가 높은 적층형 반사판의 흡음 특성을 비교하면 대부분의 주파수 대역에서 면밀도가 높은 적층형 반사판의 수직입사 흡음률이 낮은 것으로 나타났다. 일반적인 음향 반사판의 수직입사 흡음률 평균이 적층형 반사판의 50 Hz~1600 Hz 주파수 대역에서의 수직입사 흡음률 평균 보다 0.02 정도 높은 것으로 나타났다.

Fig. 4는 시험체 배후공기층이 50 mm인 경우의 수직입사 흡음특성을 비교한 것이다. 적층형 반사판의 경우 100 Hz와 125 Hz 대역에서 일반적인 음향 반사판보다 각각 0.09, 0.07 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. 100 Hz와 125 Hz 대역을 제외한 나머지 대역에서는 일반적인 음향 반사판의 흡음률이 더 높게 나타났다. 측정 주파수 대역의 평균 흡음률의 경우 일반형 음향 반사판은 0.18, 적층형 반사판은 0.14로 적층형 반사판의 흡음률이 0.04 정도 낮게 나타났다.

적층형 반사판이 100 Hz와 125 Hz 대역에서 높게 나타난 것은 배후 공기층에서 발생하는 공명현상으로 인한 흡음현상이 더 명확하게 나타났기 때문으로 사료된다. 일반형 반사판은 합판, 차음시트 및 허니콤으로 구성된 복합재료로 반사판 내부에도 허니콤에 의한 공간이 구성되어 특정대역에의 공명 흡음 현상이 덜 발생되며 전 주파수 대역에서 고르게 높은 흡음 특성을 갖는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 시험체 배후공기층이 100 mm인 경우의

Fig. 5 Normal incidence sound absorption characteristics of acoustic reflector and laminated reflector(100 mm air-space)

수직입사 흡음특성을 비교한 것이다. 적층형 반사판의 경우 63 Hz~100 Hz 대역의 흡음률이 일반형 음향 반사판 보다 높은 것으로 나타났다. 이는 공기층이 50 mm인 경우와 비교할 경우 100 Hz에서 80 Hz대역으로 공기층의 증가에 따라 변화된 것을 알 수 있다. 일반형 반사판의 경우 적층형 반사판보다 평균 0.03정도 흡음률이 높은 것으로 나타났다.

수직입사 흡음률 측정결과 일반형 반사판의 흡음특성이 적층형 반사판보다 전체적으로 높은 것으로 나타났다. 또한 배후 공기층이 증가에 따라 저주파 대역의 흡음률이 증가되는 것으로 나타났다. 음향 반사판이 실제 설치되는 경우 배후 공기층이 매우 큰 조건으로 적층형 반사판의 경우 가장 높은 흡음률을 갖는 주파수 대역이 Fig. 4와 Fig. 5의 결과보다 낮게 변화될 것으로 판단된다. 그러나 일반형 반사판의 경우 전주파수 대역에서 고른 흡음특성을 갖고 배후 공기층 변화에 따른 흡음특성변화가 적다.

이상의 수직입사 흡음률 측정 결과를 통해 적층형 반사판이 실제 공간에서 사용될 경우 저주파 대역에서도 낮은 흡음특성을 갖고 일반형 음향 반사판의 경우는 상대적으로 저주파 대역에서 높은 흡음특성을 갖을 것으로 판단된다.

3. 잔향실법 흡음률

음향 반사판의 밀도변화에 따른 수직입사 흡음특성 측정결과를 바탕으로 실제 공간에서의 특성을 조사하기 위하여 잔향실에서 랜덤입사 흡음률을 측정하였다. 잔향실법 흡음률 측정은 총 3종의 음향 반사판을 대상으로 실시하였다. 수직입사 흡음특성 조사에 사용된 일반형 음향 반사판(면밀도 11 kg/m²)과 이보다 면밀도가 다소 높은(면밀도 14 kg/m²) 일반형 음향 반사판 그리고 적층형 반사판(면밀도 41 kg/m²)을 대상으로 하였다. Fig. 6은 잔향실법 흡음률 측정 대상인 세 가지 종류의 음향 반사판의 단면 구성을 나타낸 것이다. 일반형 반사판은 멜라민판, 합판, 차음시트 및 허니콤으로 구성되어 있으며, 면밀도 변화를 위해 차음시트를 추가로 적용하였다. 적층형 반사판은 멜라민 판, 합판, MDF 적층 구조를 8겹 적층하여 구성하였다.

잔향실법 흡음률 측정은 KS F 2805⁽¹¹⁾를 적용하

여 실시하였다. 잔향실법 흡음률 측정에 사용된 음향 반사판의 크기는 수평투영면적으로 $2.4\text{ m} \times 1.12\text{ m}$ 3개, $0.6\text{ m} \times 1.12\text{ m}$ 3개를 Figs. 7, 8과 같이 배

Fig. 6 Section detail of test specimens(unit : mm)

Fig. 7 Installation of acoustic reflector for the measurement of random incidence sound absorption coefficient

Fig. 8 Installation of laminated reflector for the measurement of random incidence sound absorption coefficient

치하여 $3\text{ m} \times 3.36\text{ m}$ 의 시험체를 구성하였다. 단위 음향 반사판의 형상은 Fig. 9에서와 같이 아치형태를 갖도록 구성하였다. 각각의 음향반사판은 테두리에 알루미늄 재질의 틀로 마감되었다.

잔향실법 흡음률 측정시 80 Hz 이하 저주파 대역의 음을 서브 우퍼(velodyne)를 사용하여 충분히 발생시켜 음에너지가 20 dB ~ 30 dB이상 감쇠되도록 하였다.

Fig. 10은 음향반사판 3종에 대한 잔향실법 흡음률 측정결과를 나타낸 것이다. 잔향실법 흡음률 측정결과 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz 흡음률의 산술평균값인 NRC(noise reduction coefficient)는 각각 0.07, 0.06, 0.06으로 유사한 것으로 나타났다. 그러나 500 Hz 이하 대역의 평균 흡음률은 11 kg/m^2 인 음향 반사판은 0.12, 면밀도 14 kg/m^2 의 음향 반사판은 0.10 그리고 적층형 반사판의 저주파 대역 평균 흡음률은 0.08로 나타났다. 특히 100 Hz 대역의 경우 반사판의 면밀도 변화에 따라 최대 0.1 이상의 흡음률 변화가 발생하는 것으로 나타났다.

잔향실법 흡음률 측정결과에서도 수직입사 흡음률 측정결과와 마찬가지로 음향 반사판의 면밀도가 증가함에 따라 저주파대역의 흡음률이 감소되는 것으로 나타났다.

Fig. 9 Shape of acoustic and laminated reflectors

Fig. 10 Sound absorption characteristics of acoustic and laminated reflectors

4. 음향 반사판 밀도와 음향지표 변화

음향 반사판의 밀도 변화가 실내 공간의 음향 지표에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 실내음향 예측 프로그램을 이용하였다. 가상의 공연장을 대상으로 무대 측벽, 후벽 및 무대 상부 음향 반사판의 흡음률을 Fig. 10의 값들을 각각 입력하여 음향 반사판 밀도를 변화하였다. 이때 음향 무대 부위의 음향 반사판 흡음률 변화 이외에 모든 조건은 동일하게 유지하였다. Fig. 11은 음향지표 예측 대상 가상 공연장의 모습이다. 음향지표 예측은 무대부와 객석부로 나누어 각각 실시하였다. 객석부의 실내음향 지표로 잔향시간(reverberation time), 초기감쇄시간(early decay time), 명료도(clarity, C80), 요해도(D50)를 대상으로 실시하였으며, 무대부의 경우 실내음향 지표와 함께 무대음향지표(ST_{total} , ST_{early} , ST_{late})를 예측하여 비교하였다.

Fig. 12는 음향반사판 면밀도 변화에 의한 흡음률 변화를 적용한 경우의 객석부 실내음향지표 계산 결과이다. Fig. 12의 초기감쇄시간(EDT, early decay time)의 경우 250 Hz이하 대역의 경우 음향 반사판의 면밀도 증가에 따른 흡음률 감소에 반비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 1000 Hz와 2000 Hz 대역의 경우 적층형 반사판의 초기 감쇠시간이 낮게 나타났는데, 이는 Fig. 10의 잔향실험 흡음률 측정결과에서와 같이 적층형 반사판의 흡음률이 가장 높은 값을 갖기 때문이다. 잔향시간(RT, reverberation time)의 경우도 초기감쇄시간의 경우와 유사하게 250 Hz, 125 Hz 대역은 음향반사판의 밀도증가에 비례하여 증가되는 것으로 나타났으며, 1000 Hz와 2000 Hz

Fig. 11 Auditorium model used for prediction of room acoustic parameters

대역의 변화도 초기감쇄시간의 경우와 동일한 것으로 나타났다. 명료도(C80, clarity)의 경우도 음향반사판의 밀도 증가에 따른 흡음률 감소에 의해 125 Hz 이하 대역의 명료도가 감소되는 것으로 나타났다.

Fig. 12 Room acoustic parameters in audience seats

이상의 결과에서와 같이 음향반사판의 밀도 증가에 따라 125 Hz 이하 저주파수 대역의 잔향시간, 초기 감쇄시간은 증가되고 명료도는 감소되는 것으로 나타났다. D50의 경우 RT 및 C80의 경우와 유사하게 음향 반사판의 밀도 증가에 따라 저주파수 대역의

D50 값은 낮아지는 것으로 나타났다. 음향 반사판의 밀도 변화에 의한 D50변화는 적은 것으로 나타났다.

Fig. 13은 음향반사판 면밀도 변화에 의한 무대부 실내음향 지표의 변화를 나타낸 것이다. 객석부의 실내음향지표의 경우와 유사한 경향으로 변화되는 것으로 나타났다. 음향반사판의 밀도를 증가시키면 250 Hz 이하 대역의 초기감쇄시간 및 잔향시간이 증가되는 것으로 나타났다. 이는 음향반사판의 밀도 증가에 따라 음향반사판 표면에서 실내공간으로 반사되는 음에너지가 증가하기 때문으로 판단된다.

음향반사판의 면밀도 변화에 의한 객석부 및 무대부의 실내음질 변화를 분석하기 위하여 소리의 파듯한 정도를 나타내는 bass ratio(BR)와 소리가 맑게 들리는 정도를 나타내는 Brilliance⁽¹²⁾를 분석하여 Table 1에 나타내었다. Bass ratio와 brilliance는 다음 식으로 정의된다.

$$Bass\ Ratio = \frac{RT_{125Hz} + RT_{250Hz}}{RT_{500Hz} + RT_{1000Hz}} \quad (1)$$

$$Brilliance = \frac{EDT_{2000Hz}}{(EDT_{500Hz} + EDT_{1000Hz})/2} \quad (2)$$

Bass ratio는 약 1.1~1.25 또는 1.45가 적절한 것으로 알려져 있으며, Brilliance는 0.9이상인 적절한 것으로 알려져 있다. 소리의 파듯함을 나타내는 BR의 경우 Table 1에서와 같이 음향반사판의 면밀도 증가에 의해 객석에서는 0.92에서 0.98로, 무대에서는 0.90에서 0.97로 증가되었다. 이는 음향반사판에서 실내로 반사되는 250 Hz이하 주파수 대역의 음에너지가 증가하여 BR이 증가되는 것으로 나타났다. Brilliance의 경우도 음향반사판 밀도 증가에 의해 객석에서는 0.98에서 1.04로, 무대에서는 0.99에서 1.02로 증가되는 것으로 나타났다. 이상과 같이

Fig. 13 Room acoustic parameters in stage area

Table 1 Bass ratio and brilliance values at each cases

Case	Density	Base ratio	Brilliance
Audience	11 kg/cm ²	0.92	0.98
	14 kg/cm ²	0.94	1.02
	41 kg/cm ²	0.98	1.04
Stage	11 kg/cm ²	0.90	0.99
	14 kg/cm ²	0.89	0.97
	41 kg/cm ²	0.97	1.02

음향반사판의 면밀도를 증가되면 250 Hz 이하 대역의 흡음률이 낮아져 공간내부에서 풍성한 저음의 구현 및 명료하고 맑은 소리에도 도움이 되는 것으로 나타났다.

음향반사판은 객석 및 무대부의 실내음향지표 및 음질 개선에도 중요하지만 무대에서 연주하는 연주자들이 편안하게 연주할 수 있도록 무대음향을 개선하도록 하여야한다. 무대음향을 평가하는 음향 지표로는 ST(stage support)가 A. Gade에 의해 제안되어 사용되고 있다. ST는 전달되는 소리의 시간대역별로 초기, 후기 및 전체로 구분하여 활용되고 있으며, 위의 세 가지 ST는 다음 식으로 계산된다.

$$ST_{early} = \frac{E_{20 \sim 100}}{E_{0 \sim 10}} [\text{dB}] \quad (3)$$

$$ST_{late} = \frac{E_{100 \sim 1000}}{E_{0 \sim 10}} [\text{dB}] \quad (4)$$

$$ST_{total} = \frac{E_{20 \sim 1000}}{E_{0 \sim 10}} [\text{dB}] \quad (5)$$

여기서, E : 충격응답에서의 음에너지 합.

ST에 대한 권장치는 ST_{early} 의 경우 -13 dB 이상, ST_{total} 은 -12 dB 이상으로 알려져 있다. ST값이 낮은 경우 연주자가 자신의 연주음이나 동료의 연주음을 듣기 어렵게 됨을 의미한다. Fig. 14는 음향반사판의 면밀도 변화에 의한 ST변화를 나타낸 것이다. ST_{total} 의 경우 250 Hz 이하 대역의 값이 평균 0.7 dB 정도 개선되는 것으로 나타났다. ST_{early} 의 경우도 평균 0.3 dB 정도 개선되었다. ST_{late} 의 경우 250 Hz 이하 대역의 개선량 평균이 0.7 dB로 가장 큰 것으로 나타났다. 이상의 결과에서와 같이 음향반사판의 밀도를 증가시키는 경우 무대음향도 250 Hz 이하 저주파수 대역을 중심으로 개선되는 것으로 나타났다.

5. 결 론

최근 다목적 공연장 및 콘서트홀 음향에 대한 관심이 증가하고 있다. 콘서트홀에서의 실내음향 특성 중 가장 중요한 요소는 무대음향이다. 무대음향이 좋은 공연장의 경우 연주자가 최고의 기량을 발휘할 수 있도록 할 수 있기 때문이다. 무대를 구성하는 많은 요소 가운데 무대를 둘러싸는 음향 반사판 또는 오케스트라 쉘의 형태 및 재질이 전체적인 무대음향에 중요한 역할을 한다. 그러나 아직까지 무대를 구성하는 음향반사판에 대한 기준이 부족한 실정이다.

이 연구에서는 무대 음향 반사판의 특성 중 면밀도 변화에 따른 흡음특성을 조사하였다. 이를 위해 면밀도가 다른 3종의 음향 반사판에 대하여 수직입사 흡음률과 잔향실법 흡음률을 각각 측정하여 비교하였다. 잔향실법 흡음률 측정 시에는 저주파 대역의 충분한 음향에너지 재생을 위해 무지향성 스피커와 서브우퍼를 동시에 사용하였다.

Fig. 14 Stage support changed by the sound absorption of the acoustic reflector in stage enclosure

음향반사판의 면밀도 변화에 따라 흡음률이 변화되는 것으로 나타났다. 특히 250 Hz 이하 대역에서는 면밀도가 증가함에 따라 흡음률은 감소되는 것으로 나타났다. 그러나 500 Hz 이상의 대역에서는 면밀도 변화에 따른 흡음률의 변화는 적은 것으로 나타났다.

음향반사판의 밀도변화에 의한 흡음률 특성이 실내음향 및 무대음향에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가상의 공연장을 대상으로 음향반사판의 흡음률을 잔향실 측정결과를 각각 입력하여 음향시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 음향반사판의 밀도가 증가됨에 따라 흡음률이 낮아진 250 Hz 이하 대역의 초기감쇄시간(EDT), 잔향시간(RT)는 증가되고, 명료도는 낮아지는 것으로 나타났다. 무대음향의 경우도 250 Hz 이하 대역의 ST가 증가되어 연주자가 연주하기 좋은 환경으로 개선됨을 확인하였다.

이상의 연구결과에서 확인할 수 있는 것은 객석에서의 풍성한 저음 및 연주자가 연주하기 쉬운 무대를 만들기 위해서는 저주파수 대역의 흡음률을 낮게하거나 음향반사판의 밀도를 증가시키는 방안이 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

(1) Gade, A. C., 1989, Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls. Part 1 : Method and Laboratory Experiments, *Acustica*, Vol. 65, pp. 193~203.

(2) Gade, A. C., 1989, Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls. Part 2 : Field Experiments and Synthesis of Results, *Acustica*, Vol. 69, pp. 249~262.

(3) ISO 3382-2:2008, Acoustics - Measurement of

Room Acoustic Parameters - Part 2: Reverberation Time in Ordinary Rooms.

(4) Barron, M., 1993, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, E&FN SPON.

(5) Jeon, J. Y., 2000, Measurements of Stage Support on a 1/25 Scale Model of an Orchestra Platform, *The 140th Meeting*, Newport Beach, Vol. 108, No. 5, p. 2647.

(6) Jeon, J. Y., Ryu, J. K. and You, B. C., 2003, Using an 1:50 Scale Model for Predicting Acoustical Characteristics of Concert Hall, *Transactions of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 19, No. 1, pp. 217~224.

(7) Jeon, J. Y., Ryu, J. K. and Kim, Y. H., 2006, Objective and Subjective Evaluations of a Scattered Sound Field Using a Scale Model, *Transactions of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 22, No. 10, pp. 271~278.

(8) Kim, Y. H., Kim, S. Y. and Jeon, J. Y., 2003, The Effects of Stage Reflectors on Stage Acoustics in Concert Halls, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 87~91.

(9) Bradley, J. S., 1996, Some Effects of Orchestra Shells, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 100, No. 2, pp. 889~898.

(10) KS F 2814-2:2002, Acoustics-determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes - Part 2 : Transfer-function Method.

(11) KS F 2805-2:2004, Acoustics-measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room.

(12) Metha, M., Jhonson, J., Rocafort, J., *Architectural Acoustics Principles and Design*, Prentice Hall.