

국악음원의 방사특성을 고려한 국악원의 음향 성능 예측

Prediction of the Acoustic Performance of a Music Hall Considering the Radiation Characteristics of Korean Traditional Musical Sources

정 철 호*, 이 정 권*, 연 철 호**, 한 찬 훈**,
(Cheol-Ho Jeong*, Jeong-Guon Ih*, Chul-Ho Yoen**, Chan-Hoon Haan**)

*KAIST 기계공학과, **충북대학교 건축공학과
(접수일자: 2004년 1월 15일; 채택일자: 2004년 2월 9일)

기존의 국악원 설계에 있어서 국악 음원의 음향 방사 특성을 고려하지 않아, 공연장의 음향 목표설정 및 음향조정에 어려움이 있었다. 본 연구에서는 대표적인 국악 음원인 가야금 (현악기), 장고 (타악기), 대금 (관악기), 판소리 창 (성악) 등 4종에 대한 음향 방사 특성을 상세히 측정하여, 그 결과의 적용성을 살펴보았다. 음원을 반무향실의 중앙에 위치시키고, 매 10° 간격으로 음압 레벨을 측정함으로써 지향성을 파악 하였다. 측정 결과, 가야금의 경우에는 주파수가 증가함에 따라 무지향성 으로부터 지엽이 많아지는 형태로 순차적으로 지향성이 변하였다. 대금의 주요 방사 방향은 위쪽이었고, 장고는 저주파수에서 왼쪽 지향성이 오른쪽보다 더 크게 나타난다. 창 의 경우에는 주파수가 증가함에 따라 뒤쪽으로는 소리가 거의 전파되지 않는 지향성을 나타낸다. 측정된 국악 음원의 지향성을 이용하여 건설중인 부산 국립 국악원의 음향 인자 들을 예측하였다. 대표적인 두 수음점 들에서 잔향시간, 음압 레벨, C80, LF, STI와 같은 주요 건축 음향 인자들이 음선 추적 기법에 의해 계산되었으며, 무지향성 음원과 국악 음원을 사용하였을 때 음향 인자들 사이에 큰 차이를 보였다. 본 연구에서 제시된 데이터와 실제 방법론 등은 향후 국악원의 설계에 있어서 기본적인 자료로 활용될 수 있다고 사료된다.

핵심용어: 국악, 국악원, 국악 음원, 음향 방사 특성, 건축 음향 인자

투고분야: 음악음향 및 심리음향 분야 (8.1), 건축음향 분야 (7.2)

There have been always some difficulties in target setting and conditioning of acoustic performances of the Korean traditional music hall due mainly to the lack of the information on the sound radiation characteristics of Korean musical sources. In this study, the radiation characteristics of four typical Korean traditional musical sources were investigated in precision and their usage was demonstrated: The selected musical sources were Gayageum (string), Daegeum (woodwind), Jango (drum), and Pansori Chang (vocal performance). Each sound source was located at the center of a semi-anechoic chamber and the directivity was determined by the measured sound pressure levels in every 10° angular position, for both vertical and horizontal directions. The directivity pattern of Gayageum varies from a uniform to a complex pattern having many side lobes with the increase of frequency. The main radiation of Daegeum is toward the upward direction. The directivity pattern of Jango is clearly a side-oriented one and the left direction intensity is sharper than its right side at low frequencies. For the Chang, the directivity pattern change from a uniform pattern to a frontally directed one as the frequency goes high. Measured directional and spectral characteristics of traditional Korean music sources were implemented into the computation of architectural acoustic measures for the Busan National Korean Traditional Music Hall which is under construction. Parameters such as RT, SPL, C80, LF, STI were calculated at two receiver positions by using a ray tracing technique. Significant differences in the acoustic measures at receiver positions were observed between the results in using the omni-directional source and the directional one. It is thought that the suggested source data and design method can be used as a basic reference in the future acoustic design of performance halls for the Korean traditional music.

Keywords: Korean traditional music, Concert hall, Musical sources, Radiation characteristics, Architectural acoustic measures

ASK subject classification: Musical acoustics and psychoacoustics (8.1), Architectural acoustics (7.2)

I. 서론

건물 내부 공간에서의 음향 특성을 예측하는 과정은 공연장의 음향 설계에 있어서 매우 중요하다. 공연장에서의 음의 분포 및 음향 특성을 예측하기 위해서는 건물의 내부 형상, 건축 자재의 물성 및 배치 등이 일차적인 고려 대상이 되겠지만, 음원의 지향성에 따라라도 음의 분포 및 음향 특성이 달라지기 때문에, 최근 들어 음원의 방사 특성을 함께 고려하여야 한다고 제안되고 있다 [1-5]. 트럼펫, 바이올린 등의 양악기의 경우 각 음원의 특성이 측정되어 공연장 설계에 이용되는 반면 [3-8], 국악기의 경우에는 각 악기에 따른 음원 특성에 대한 연구가 많지 않은 실정이다 [9-12]. 국악의 음원 역시 각 음원에 따라서 소리를 내는 원리가 다르고, 소리의 방사 특성이 다르기 때문에, 국악원의 최적 설계를 위한 변수의 하나로써 국악 음원의 지향성 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 방사 특성을 측정할 국악 음원으로는 현악, 관악, 타악, 성악의 대표적인 음원인 가야금, 대금, 장고, 판소리 창의 4종을 선정하여 시험하였다. 주파수 대역은 1 kHz를 기준으로 한 옥타브 밴드로서, 250 Hz~4 kHz의 범위로 제한하였다. 125 Hz 이하의 저주파수는 전방향성 (omnidirectionality)로 간주할 수 있으며 또 측정에 사용된 반무향실의 차단주파수에 해당하므로 제외하였고, 6.3 kHz 이상의 범위는 측정시의 신호대 잡음비가 좋지 않고, 또 소리가 주로 나는 부분에서 전방으로의 지향성이 우세하기 때문에 측정에 의미를 부여하지 않았다. 지향성 측정 실험은 배경 소음 및 잔향, 반사음의 영향을 무시할 수 있는 무향실이나 자유 음장에서 행하여 지는 것이 일반적이지만 [13], 본 연구에서는 실제 연주환경과 비슷한 반무향실에서 측정을 수행하였다. 측정된 지향성을 고려하여 건설중인 국립부산국악원의 내부 형상에 대해 모의 실험을 수행한 결과, 무지향성인 음원에 비해 음향 인자들이 현저히 다른 값을 나타내었으며, 이는 국악원의 설계시 국악 음원의 지향성을 고려하는 것이 매우 중요하다는 것을 의미한다.

II. 대표적인 국악 음원 들의 특성

일반적으로 가장 많이 쓰이는 악기의 분류법은 Sachs-Hornbostel 분류법이다 [14, 15]. 이 분류법에 따르면 악기는 Chordophones, Aerophones, Membranophones, Idiophones로 나뉜다. Chordophones은 현악기 (string instru-

ment), Aerophones는 관악기 (wind instrument), Membranophones은 막을 쓰는 타악기 (drum instrument), Idiophones은 일반 타악기 (percussion instrument)로 나뉜다. 지향성을 측정할 국악기는 Idiophones를 제외한 Chordophones에서는 가야금, Aerophones에서는 대금, Membranophones에서는 장고를 선택하였다. 악기는 아니지만 국악원에서는 판소리나 그 밖의 성악이 자주 연주되는 관계로, 한국 전통 성악의 대표적인 판소리를 시연할 때의 음의 방사 특성도 측정하였다.

2.1. 가야금

가야금은 거문고와 함께 한국의 전통악기를 대표하는 발현 악기로, 손가락으로 뜯거나 통겨서 타는 악기이다 [16-18]. Sachs-Hornbostel 악기분류법에 의하면 가야금은 Chordophones 중 Heterochord half-tube zither에 해당한다. 본래 전통음악의 연주에 쓰이던 가야금은 정악 가야금과 산조 가야금의 두 가지 종류로 12현을 지니고 있으나, 최근에는 현이나 음역이 다양해진 18현이나 25현 개량 가야금도 있다. 가야금은 좁고 긴 장방향의 오동나무 공명판 위에 명주실로 끈 12개의 줄을 걸고, 그 줄을 받치면서 이동이 가능한 작은 나무 기둥인 안쪽을 세운 악기이다. 뒷판에는 1개의 올림 구멍이 있어 이곳으로 소리가 방사된다. 일반적인 연주 방법은 오른손의 손가락으로 줄을 튕기거나 뜯어 소리를 내고, 왼손으로는 안쪽 아래 부분의 현을 누르거나 떨어서 소리를 조절한다. 가야금의 주법은 정악 가야금의 경우, 우수법 8가지와 좌수법 6가지이며, 산조 가야금의 경우에도 14가지 주법이 존재한다고 한다.

2.2. 대금

대금은 신라시대의 대표적 악기인 삼죽 중의 하나로서 대나무로 만든 한국의 대표적 관악기 중의 하나이다 [17]. 대금에는 취구 하나, 청공 하나, 지공 여섯, 그리고 숫자가 일정하지 않은 칠성공이 있고, 청을 보호하고 음색의 조절을 위한 청가리개가 있다. 이 중에서 취구는 입김을 불어 넣는 곳이며, 청공은 일종의 펄림판 역할을 하는 청 (갈대의 속 껍질로 제작)을 붙이는 곳이다. 지공은 손가락을 막고 땀으로써 음정을 조절하며, 칠성공은 전체 음정을 미세하게 조절하는 역할을 한다. 연주법은 입김을 넣는 강도에 따라서 저취, 평취, 역취의 법이 있는데, 부드러운 저취, 청아한 평취, 갈대청의 진동을 결들인 장쾌한 역취 등의 다양한 음색을 낼 수 있다. 대금의 음역은 약 두 옥타브 반에 이르며 이것을 저음부, 중음부, 고

음부로 나누기도 한다. 대금의 재료로서는 예전에는 오래 묵은 황죽을 사용했으나, 지금은 쌍골죽을 선호한다. 예로부터 전해 내려온 대금은 정악 대금 한 가지였으나 후대에 산조 대금이 개량되어 만들어졌다. 민속악은 정악에 비해 악곡의 전체 음정이 보통 단 3도 정도 높는데, 이러한 민속악의 연주에 적합하도록 악기를 개량한 것이 산조 대금이다.

2.3. 장고

장고는 한국의 북 계통의 타악기를 대표하는 매우 중요한 장단 연주 악기이다[16,17]. 장고는 오른손에 채를 들고 치고 왼손으로는 북 면을 직접 친다. 공명통의 양쪽 머리는 크고 중간 허리는 가는 형태로 되어 있다. 장고의 가죽은 노루가죽과 개가죽을 사용한다. 좌편(북편, 궁편)은 노루가죽 등의 두꺼운 가죽을 사용하여 소리가 낮고, 우편(채편)은 개가죽 등의 얇은 가죽을 사용하여 높은 소리를 낸다. 장고의 통은 일반적으로는 오동나무를 선호 한다.

2.4. 판소리 및 창

판소리는 소리하는 사람이 혼자 서서 몸짓을 해 가며 노래와 말로 긴 이야기를 엮어 나가는 한국 전통 음악의 한 갈래이다[18]. 한국 전통음악에서의 발성법은 서양 음악에서의 발성법과 많이 다르다. 서양 음악의 가곡이나 오페라 발성법에서는, 이른바 벨칸토 창법이라 하여, 목을 등글게 열고, 머리와 가슴이 울리게 하고, 배에서 숨을 올려 내는 맑은 소리를 선호한다. 이에 비해 판소리의 발

성법은, 배에서 숨을 올려 지르는 것 입에서는 서양 발성법과 같으나, 목을 다스려서 약간 거칠고 텅텅한 소리를 질러 내며 (통성이라 함), 코의 울림보다는 입과 가슴의 울림에 더 힘쓰는 점이 다르다. 판소리에 쓰이는 장단은 크게 나누어 진양, 중몰이, 중중몰이, 잣은몰이, 휘몰이, 엇몰이, 엇중몰이가 있다. 이 장단들은 박자, 빠르기, 북치는 법이 서로 다른데, 판소리 사설의 내용에 맞추어, 한가하거나 긴박한 상황에 따라 느린 것이나 빠른 것을 각각 가려 써서 소리를 엮어 나간다. 판소리는 고수와 창자가 같이 공연한다.

III. 국악 음원 들의 음향 방사 특성 측정

국악기의 지향성 측정은 음원의 기하 중심을 기준으로 하여 이를 둘러싸는 가상의 반구 면에서 수평방향과 수직 방향 모두 10° 간격으로 그림 1과 같이 측정하였다. 그림 1(a)는 고정구 (jig)의 위쪽에서 바라본 마이크로폰의 배치이고, 그림 1(b)는 고정구 상에 10° 간격으로 배치된 마이크로폰을 나타내며 각 마이크로폰 어레이 (array)의 위쪽에는 기준 1번 마이크로폰을 설치하였다. 모든 음원의 기하학적인 중심은 그림 1(a)와 같이 수평면에서 봤을 때 기준 1번 마이크로폰과 일치시키고, 그림 1(b)와 같이 10번 마이크로폰의 높이와 일치시켰다. 연주자는 실제 무대에서의 연주시와 동일하게 모두 전방 (0°)을 바라보며 반복 연주를 수행하였다. 그러므로 대금의 경우 악기의 구조적인 앞쪽이 관객을 향하지는 않는다. 연주자는 모

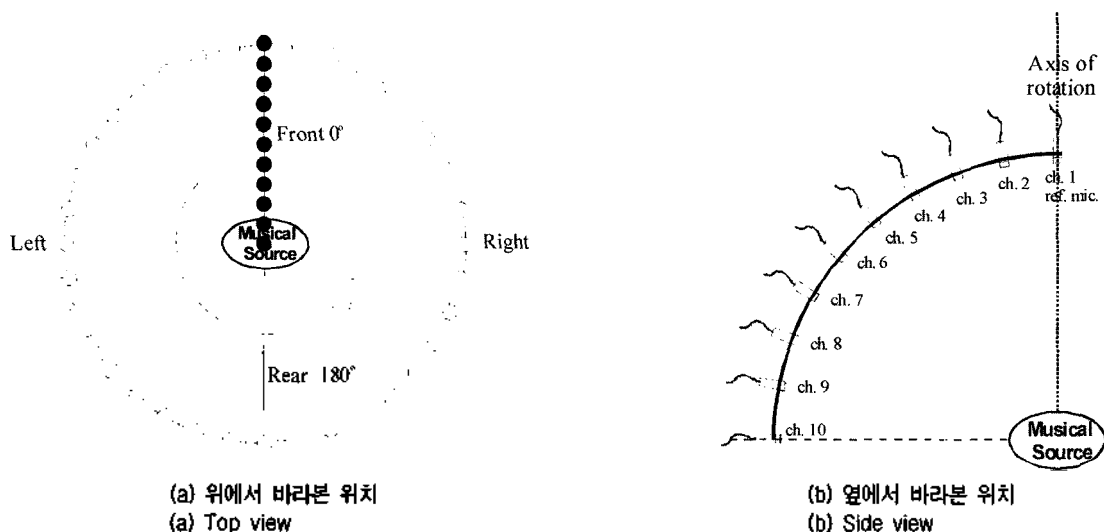


그림 1. 마이크로폰 위치
Fig. 1. Positions of microphones.

두 대전시립 연정국악원의 상임단원으로서 15년 이상 경력의 숙련된 전문가들로 섭외하였다. 숙련된 연주자는 같은 연주를 최대한 재현성이 있게 여러번 반복 연주를 하며, 각 연주마다 고정구에 설치된 마이크로폰 어레이에서 음압 레벨을 측정함으로써 각 음원에 대한 지향특성을 파악한다. 기준 마이크는 연주자가 실제 연주하는 경우 때면 정확히 동일한 음향 파워를 내는 연주를 할 수 없기 때문에, 재현성 확보 및 음압 레벨의 보정을 위한 것이다.

지향성 측정 실험은 배경 소음 및 잔향, 반사음의 영향을 무시할 수 있는 무향실이나 자유 음장에서 행하여 지는 것이 일반적인데[13], 본 연구에서는 실제 연주자의 환경과 비슷한 반무향실에서 측정을 수행하였다. 음원의 지향성이란 원거리 특성이므로, 원거리 조건을 만족하기 위하여는 음원과 측정 마이크로폰의 거리가 최소한 가장 낮은 관심 주파수의 한 파장 이상 떨어져 있어야 한다. 측정에 사용된 무향실의 차단 주파수가 120 Hz 임을 감안하여 250 Hz 옥타브 밴드를 가장 낮은 관심 주파수 범위로 결정하였을 때, 상온에서의 음파의 파장은 1.37 m 이므로 고정구의 곡률 반경은 1.5 m로 설정하였다. 지향성 측정의 주파수 대역은 1 kHz를 기준으로 한 옥타브 밴드로서, 250 Hz~4 kHz의 범위로 제한하였다. 125 Hz 이하의 저주파수는 전방향성으로 간주할 수 있으며 또 위에 언급한 바와 같이 측정에 사용된 반무향실의 차단주파수에 해당하므로 제외하였고, 6.3 kHz 이상의 범위는 측정

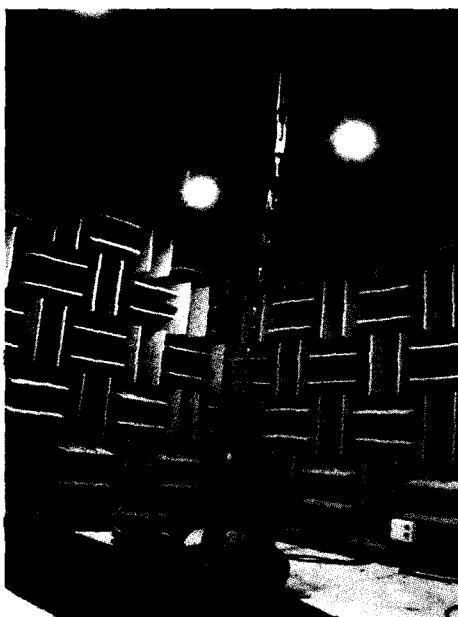
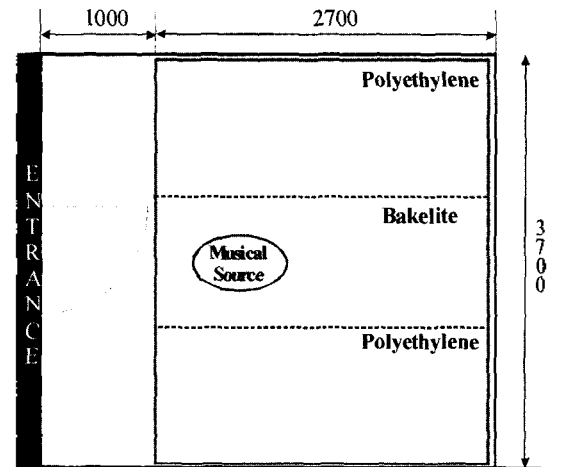


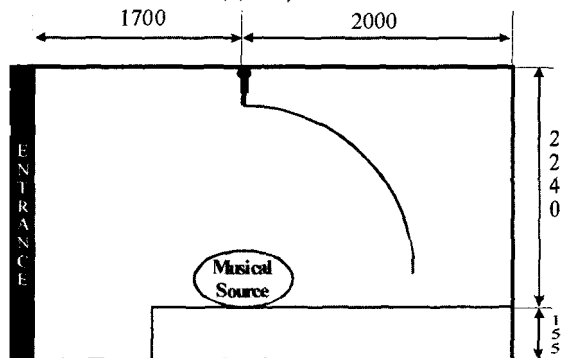
그림 2. 반무향실에 장착된 측정 고정구
Fig. 2. Measurement jig in the semi-anechoic chamber.

시의 신호 대 잡음비가 좋지 않고, 또 소리가 주로 나는 부분에서 전방으로의 지향성이 우세하기 때문에 측정에 의미를 부여하지 않았다. 측정 고정구를 이용하여 지향성을 측정하는 사진은 그림 2, 고정구를 장착한 반무향실의 개략도는 그림 3에 보여진 것과 같다. 측정은 KAIST에 설치되어 있는 전무향실 (full anechoic chamber)에서 행하여 졌는데, 반무향실 조건을 만들기 위하여 바닥에 베이크라이트 및 폴리에틸렌 수지로 된 20 mm 두께의 판을 설치하였다.

그림 3의 실험장치에 있어서 바닥이 음향학적으로 단단하고 무한한 배플 (rigid infinite baffle) 조건을 만족함을 검증하기 위하여, 배플이 설치된 상태와 배플이 없는 전무향 상태에서 음압을 측정하였다. 그림 4는 무한 배플로 가정된 바닥면에 대해 조사한 실험 결과를 보여 준다. 배플된 경우와 배플이 없는 경우를 비교하면, 같은 음원에 대하여 음압은 이론상 2배의 차이가 나야 한다. 배플된



(a) 평면도
(a) Ttop view



(b) 측면도
(b) Side view

그림 3. 반무향실의 개략도
Fig. 3. Semi-anechoic chamber with measurement jig.

경우에 대한 측정치는 배플이 없는 상태보다 음압 레벨이 6 dB 만큼 높음을 볼 수 있고 (1.25 kHz에서 -2 dB 차이를 제외한 모든 주파수 대역에서 ± 1 dB 이내에서 맞음), 따라

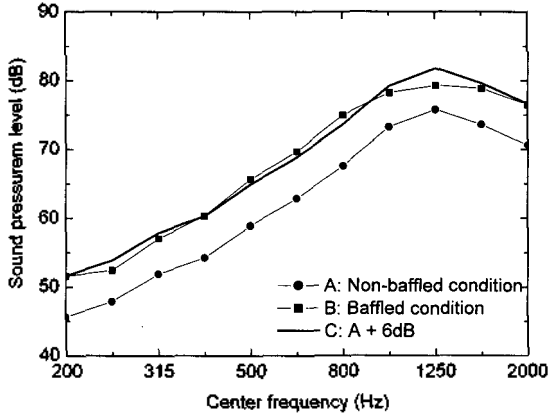


그림 4. 바닥면에 대한 무한 배플 가정의 검증 실험 결과
Fig. 4. Experimental check of the rigid infinite baffled condition assumed for the floor panel.

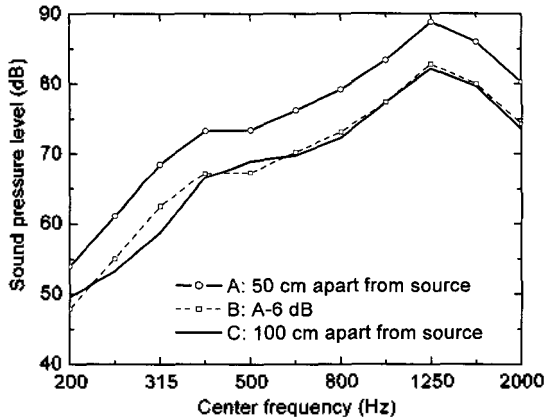


그림 5. 반무향실에서의 구면파 검증 실험 결과
Fig. 5. Verification of spherical wave in the semi-anechoic chamber.

서 사용된 합성수지 판의 바닥면을 음향학적으로 단단하고 무한한 배플로 간주하여도 무방함을 보였다.

음원의 지향성은 자유음장에서 측정되어야 하며, 이러한 음장에서는 거리가 두 배가 될 때마다 6 dB 씩 감소하는 구면파의 역자승법칙이 성립하여야 한다. KAIST 무향실에서 소형 음원으로부터 거리가 50 cm와 100 cm일 때의 음압 레벨을 측정을 수행하였고, 그 결과는 그림 5와 같이 630 Hz 이상의 대역에서는 ± 0.5 dB 이내에서, 250~500 Hz 대역에서는 ± 2 dB 이내의 오차 범위에서 자유 음장 조건을 만족하는 것으로 측정되었다. 오차의 원인으로서의 벽면에서의 반사, 음원의 약한 지향성, 음원의 크기, 측정 위치의 작은 오차, 측정기 자체의 오차, 측정 장치 및 측정자의 존재로 인한 음의 반사 등을 들 수 있다.

실험에 사용된 장치는 그림 6과 같다. 어레이 마이크로폰 (B&K 4935) 10개, 전치증폭기로서 8 채널 ICP 형 signal conditioner (PCB 482A18) 1개와 1 채널 ICP 형 signal conditioner (PCB 480E09) 2개를 사용하였다. 측정된 신호는 32 채널 PCM 녹음기 (Sony SIR-1000)에 저장하였는데, 샘플링 주파수는 20 kHz로서 최대 관심 주파수인 4 kHz 대역의 해석이 가능하였다. 녹음된 신호는 자체 개발된 신호 처리 전용 프로그램을 이용하여 옥타브 밴드로 분석되었다. 신호 처리 과정에서 샘플링 시간은 2 ms, 샘플링 주파수는 20 kHz, 중첩은 66.7%이었으며, Hanning 윈도우를 적용하였다.

판소리의 경우에는 그 발음 기제상 좌우 대칭을 가정하여도 무방하므로, 창자의 왼쪽 방향의 음압 레벨만을 측정하였다. 나머지 세 가지의 음원 들은 그 구조 형태 혹은 연주 형태상 대칭성을 이용할 수 없으므로, 고정구를 360° 회전하여 모든 방향의 지향성을 측정하였다. 가야금은

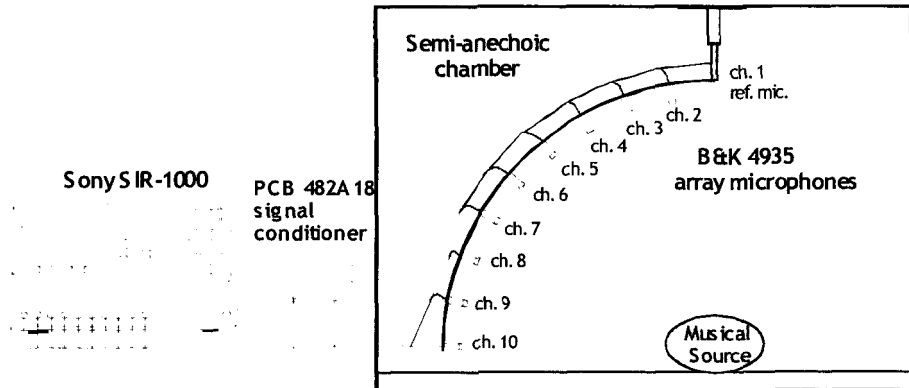


그림 6. 실험 장치의 개략도
Fig. 6. Measurement setup.

“김죽파류 가야금 산조” 부분 중 진양조와 중모리를 제외한 중중모리-자진모리-취모리-새산조 순서로 연주되었고, 대금은 “원장현류 산조” 중 진양조 부분을 연주하였다. 장고는 표 1과 같은 순서로 연주하였고, 창은 “홍보가” 중 제비 노정기 대목을 행하였다.

IV. 국악 음원의 음향 방사 특성

음향 방사 특성 측정시 연주자의 전방각을 0°로 정의하였다. 수평방향에 대하여는 연주자의 좌측(9시 방향)이 90°, 후방을 180°, 우측(3시 방향)을 270°로 나타내었으며, 수직방향에 대하여는 전방을 0°, 머리 위쪽을 90°, 후방을 180°로 각각 정의하였다. 본 연구의 결과로서의 음의 지향성은 음원을 둘러싼 반구의 형태에서 매 입체

각 10° 마다 주어지지만, 본 논문에서는 이해와 표현의 편의상 수직방향 지향성과 수평방향 지향성의 두 가지 2차원의 결과만을 표시한다. 수평방향 지향성은 매 연주마다 10번 마이크로폰 (음원과 같은 높이의 마이크로폰)의 신호를 분석한 결과이며, 수직방향 지향성은 음원의 전방인 0°와 후방인 180°의 음압 레벨로서 표현하였다.

4.1. 가야금

기준 마이크로폰에서 측정된 가야금의 신호의 누적적(cumulative) 1/3 옥타브 대역 스펙트럼은 그림 7과 같다. 가야금 소리는 400~500 Hz의 중주파수 대역에서 가장 큰 소리를 방사한다. 그림 8은 측정된 가야금의 지향성이며, 가야금의 수평방향 지향성은 주파수에 따라서 크게 변한다. 먼저 250 Hz에서는 거의 지향성이 없지만, 연주

표 1. 장고의 연주 순서
Table 1. Contents of Jango performance.

Play No.	Play contents
1	Gagok 16 rhythm (가곡 16박 오른쪽=변죽 연주, 왼쪽=손)
2	Dodri Jangdan (도드리 장단 오른쪽=변죽 연주, 왼쪽=손)
3	Dodri Jangdan (도드리 장단 오른쪽=북판 연주, 왼쪽=손)
4	Taryong (타령: 오른쪽=북판 연주, 왼쪽=손)
5	Jungmori (중모리: 오른쪽=변죽 연주, 왼쪽=손)
6	Gutgori (굿거리: 오른쪽=북판 연주, 왼쪽=손)
7	Jajinmori (자진모리: 오른쪽=북판 연주, 왼쪽=손)
8	Jinsoesangdan (진쇠장단: 오른쪽=북판 연주, 왼쪽=궁체)
9	Jajin Gutgori (자진 굿거리: 오른쪽=북판 연주, 왼쪽=궁체)
10	Dangak (당악: 오른쪽=북판 연주, 왼쪽=궁체)

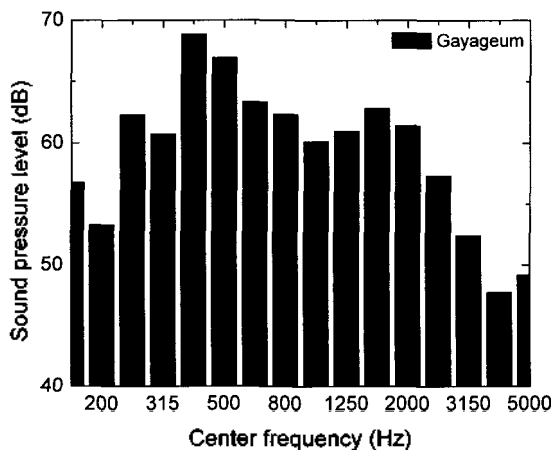


그림 7. 기준점에서 녹음된 가야금 소리의 누적 스펙트럼
Fig. 7. A cumulative spectrum of recorded Gayageum sound at the reference position.

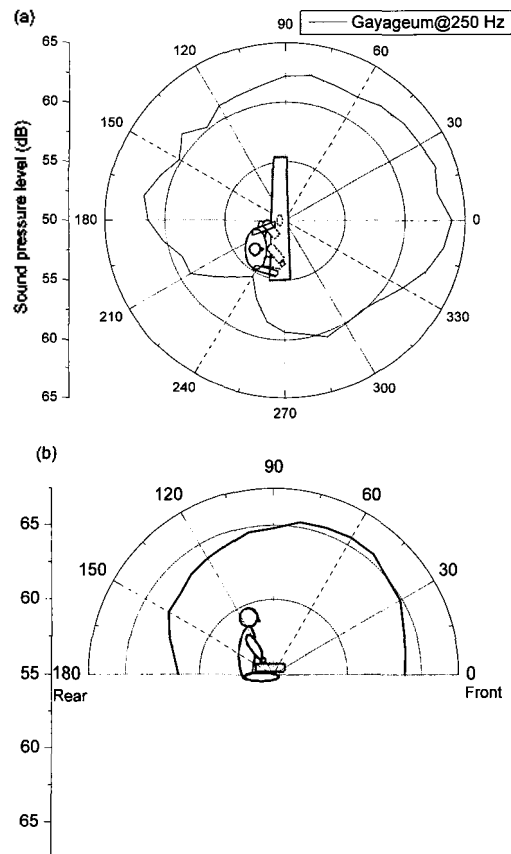


그림 8. 측정된 가야금의 지향성: (a), (c), (e), (g), (i) 수평방향 지향성; (b), (d), (f), (h), (j) 수직방향 지향성
(a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz
Fig. 8. Measured directivity pattern of Gayageum: (a), (c), (e), (g), (i) top view; (b), (d), (f), (h), (j) side view. (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz. (Continued)

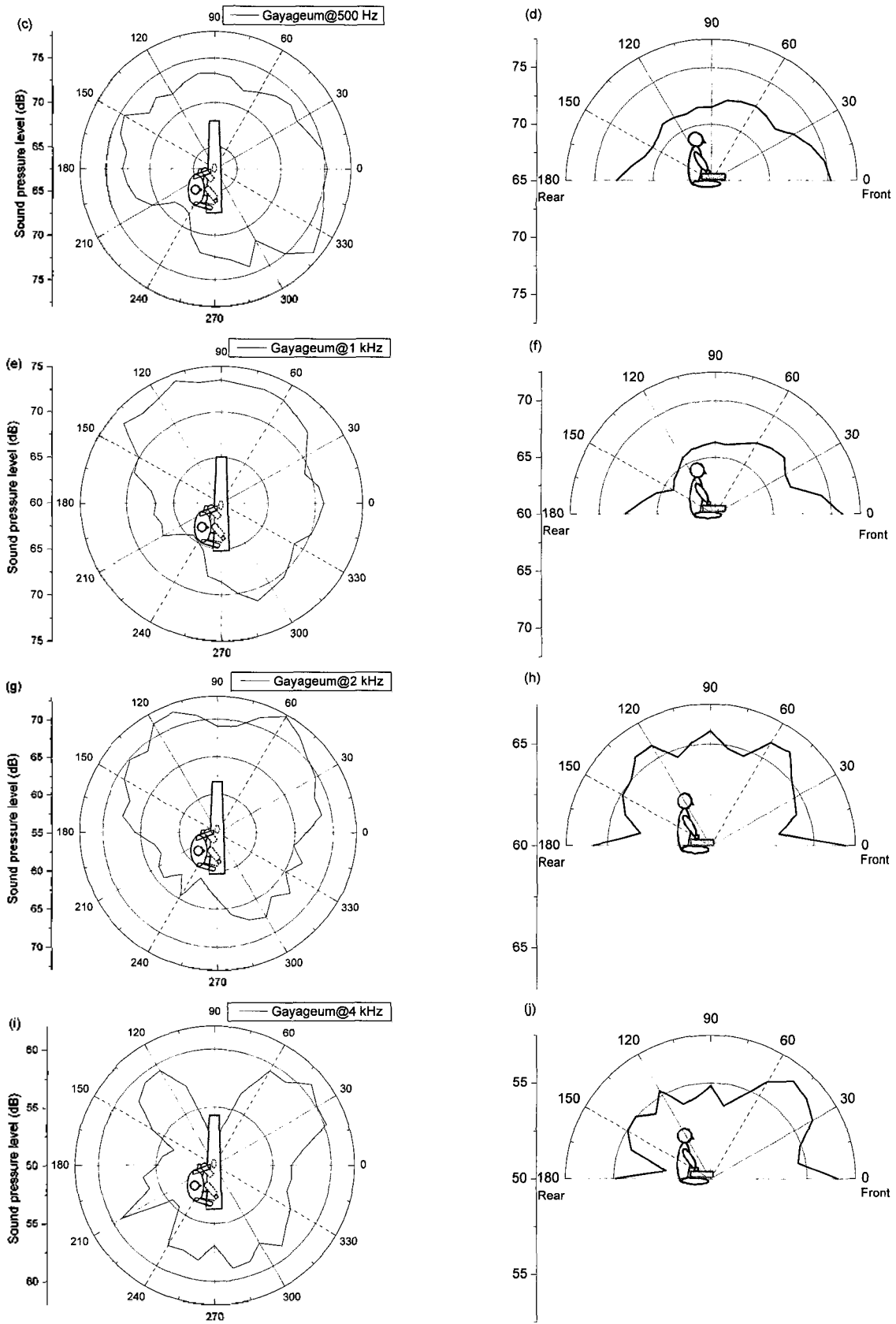


그림 8. 측정된 가야금의 지향성: (a), (c), (e), (g), (i) 수평방향 지향성; (b), (d), (f), (h), (j) 수직방향 지향성
 (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz
 Fig. 8. Measured directivity pattern of Gayageum: (a), (c), (e), (g), (i) top view; (b), (d), (f), (h), (j) side view.
 (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz.

자의 위치 때문에 240° 방향의 방사 음압은 상대적으로 작다. 500 Hz에서의 방사 특성은 가야금 앞쪽과 뒤쪽으로 퍼져나가는 쌍극자형 (dipole) 지향성으로 변하며 역시 연주자로 인하여 240° 방향 근처의 음압은 낮게 나타난다. 1 kHz에서는 옆쪽으로 방사되는 쌍극자형 지향성을 나타내며, 2 kHz이상에는 60°와 120° 방향의 음압이 크게 나타나는 형상으로 연주자가 위치한 240° 방향 근처를 제외하면 사극자 음원 (lateral quadrupole)에서의 방사와 같은 형태로 나타나게 된다. 이와 같은 지향 특성은 기타와 같이 울림통을 가지는 현악기의 특성과 거의 동일하다[6,7]. Fletcher와 Rossing에 의하면 기타의 지향성은 저주파수에서는 울림통이 호흡하므로 소리가 무지향성으로 방사되다가, 기타 울림통의 (0,1) 또는 (1,0)모드에 의하여 쌍극자 형태의 지향성을 가지게 된다. 주파수가 더 증가하면 사극자형 지향성과 유사하게 변화한다. 수직 방향의 지향성을 살펴 보면 저주파수에서는 무지향성의 방사 특성을 가지나, 500 Hz이상에서는 전/후방에 강한 지향성을 나타낸다. 2 kHz이상에서는 위쪽으로의 방사도 효율적이며, 4 kHz에서는 40°~50° 방향의 지향성이 커진다. 수직방향 지향성은 전 주파수 대역에서 전후방향의 지향성이 나타나며, 이러한 지향성은 가야금 밀면의 울림 구멍을 통하여 방사된 음파가 바닥면을 따라 전파되는 것을 의미한다.

4.2. 대금

그림 9는 대금 방사음의 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼으로 대금은 1.25 kHz 대역에서 가장 큰 소리를 방사한다. 대금

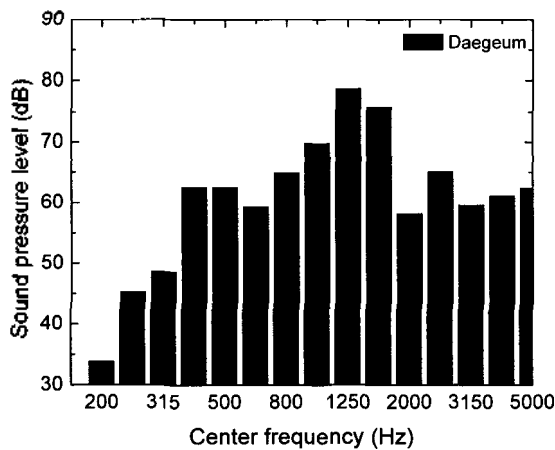


그림 9. 기준점에서 녹음된 대금 소리의 누적 스펙트럼
Fig. 9. A cumulative spectrum of recorded Daegeum sound at the reference position.

의 지향성은 그림 10에서 보이는 바와 같이, 수평방향으로는 전체적으로 40°~60° 부근에서 최대값을 가진다. 그 이유는 대금은 연주자가 무대에서 관객 쪽을 바라볼 경우, 대금의 위치가 좌측으로 50° 정도 기울어 지기 때문이다. 대금의 지향 특성은 대금의 전후로는 방사가 비교적 잘 되나 옆쪽으로는 거의 방사되지 않는다. 저주파수에서도 뚜렷한 지향성을 가지는 것이 대금의 지향 특성 중 하나이다. 수직방향의 경우 앞쪽 (0°)과 뒤쪽 (180°)을 제외한 방향으로는 비교적 잘 방사되며, 특히 최대 음압을 나타내는 방향은 위쪽 80°~100° 방향이다. 대부분의 관악기에서의 소리의 방사는 막히지 않은 지공을 통한 방사이므로 지공이 위치한 위쪽 방향에서 음압이 크게 나타난다. 1 kHz이상의 고주파수 대역에서는 전방으로의 지향성도 나타난다. 전체적으로 위쪽 80°~100° 방향에서 최대 음압이 측정되었고, 주파수가 높아지면 전방 30° 방향의 지향성도 나타난다.

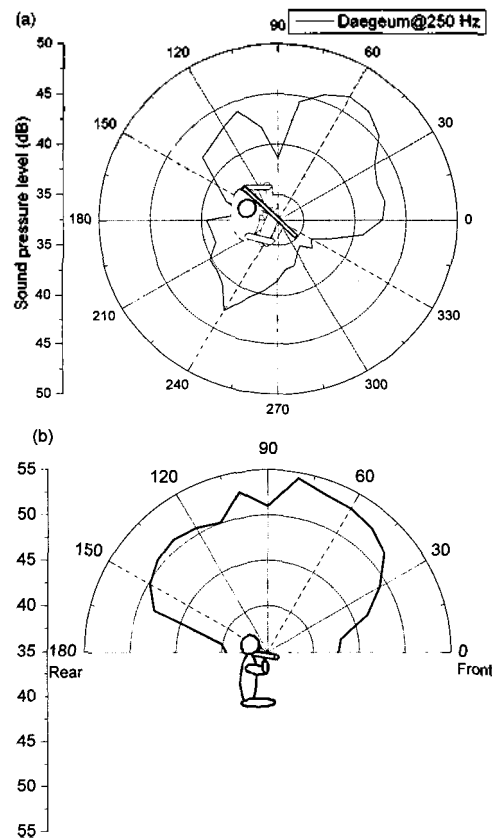


그림 10. 측정된 대금의 지향성: (a), (c), (e), (g), (i) 수평방향 지향성; (b), (d), (f), (h), (j) 수직방향 지향성
(a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz
Fig. 10. Measured directivity pattern of Daegeum: (a), (c), (e), (g), (i) top view; (b), (d), (f), (h), (j) side view. (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz. (Continued)

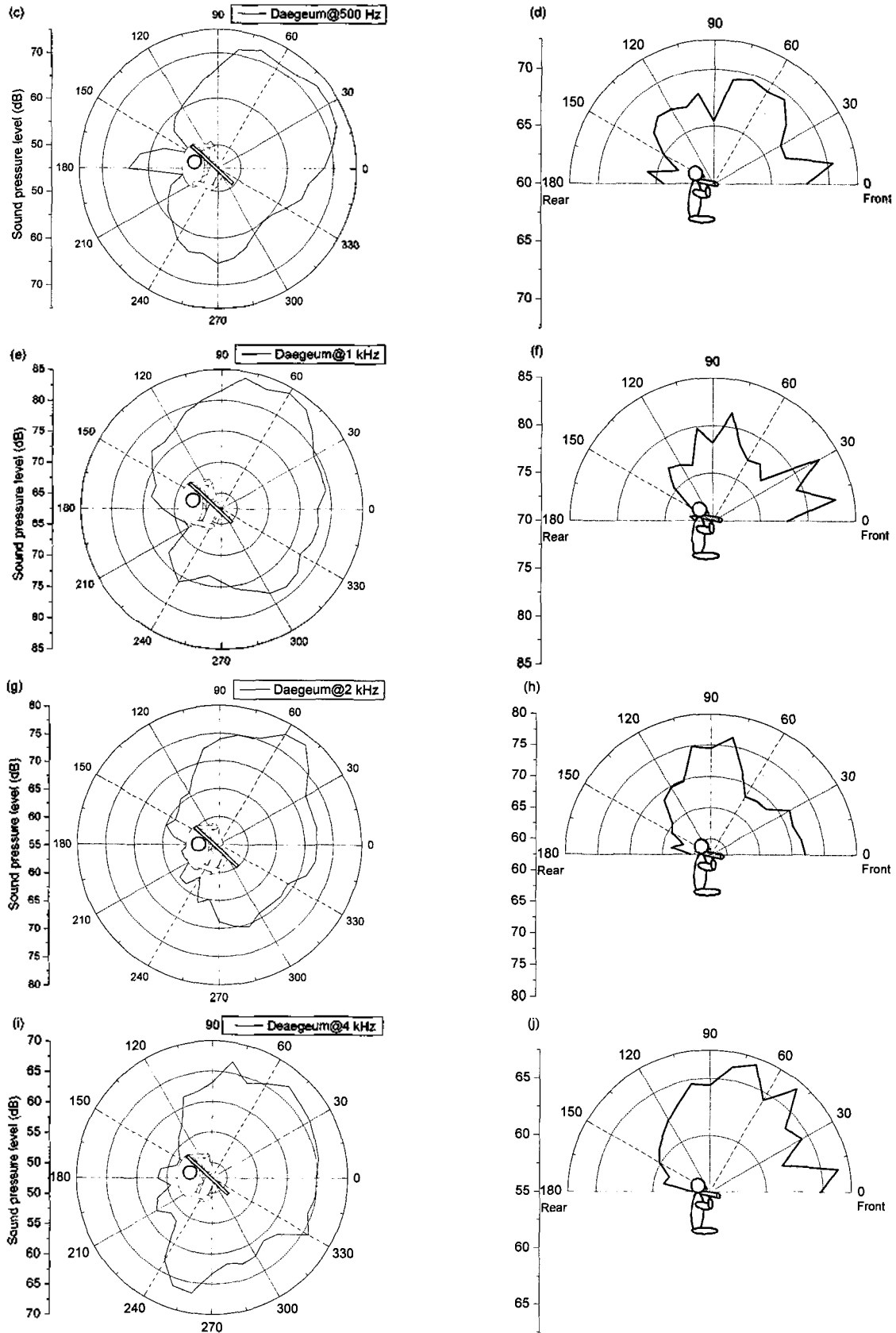


그림 10. 측정된 대금의 지향성: (a), (c), (e), (g), (i) 수평방향 지향성: (b), (d), (f), (h), (j) 수직방향 지향성
 (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz
 Fig. 10. Measured directivity pattern of Daegeum: (a), (c), (e), (g), (i) top view: (b), (d), (f), (h), (j) side view.
 (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz.

4.3. 장고

장고는 국악기 중 가장 큰 소리를 내는 악기 중 하나이다. 장고의 양 옆 가죽은 서로 다른 재질과 두께로 되어 있고, 가진 하는 방법도 상이하어, 양쪽의 지향성이 확연히 다르게 된다. 그림 11은 기준점에서 측정된 장고 소리의

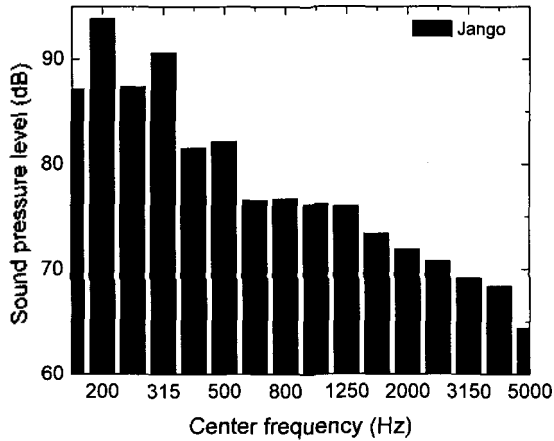


그림 11. 기준점에서 녹음된 장고 소리의 누적 스펙트럼
Fig. 11. A cumulative spectrum of recorded Jango sound at the reference position.

1/3 옥타브 밴드 스펙트럼 분석 결과이다. 장고는 주로 저주파수에서 큰 소리를 방사한다. 장고의 수평방향 지향성은 그림 12와 같이 좌우 지향성을 가진다. 왼쪽 (90°)의 가죽이 오른쪽 (270°)보다 더 두껍기 때문에 500 Hz 미만의 저주파수에서는 왼쪽 지향성이 나타나고, 500 Hz 이상의 고주파수에서는 오른쪽 지향성을 가진다. 수직방향으로는 500 Hz 까지는 전방 지향성을 보이며, 1 kHz에서는 상방과 전방으로 지향성이 나타난다. 즉, 저주파수에서 전방 지향 특성을, 고주파수에서는 전방 및 상방으로 음이 잘 방사된다. 이와 같은 지향 특성은 장고의 연주 특성상 장고를 치는 고수의 존재가 후방으로의 음향 전달을 차단하는 효과가 큰 것이 원인이라고 사료된다.

4.4. 판소리 및 창

현재 판소리를 포함한 창은 여성 창자가 70~80%정도로 많이 활동하기 때문에 여성 창자의 지향성을 측정하였다. 그림 13은 기준 마이크론에서 측정된 판소리의 1/3 옥타브 스펙트럼 분석 결과로, 1 kHz 근처에서 가장

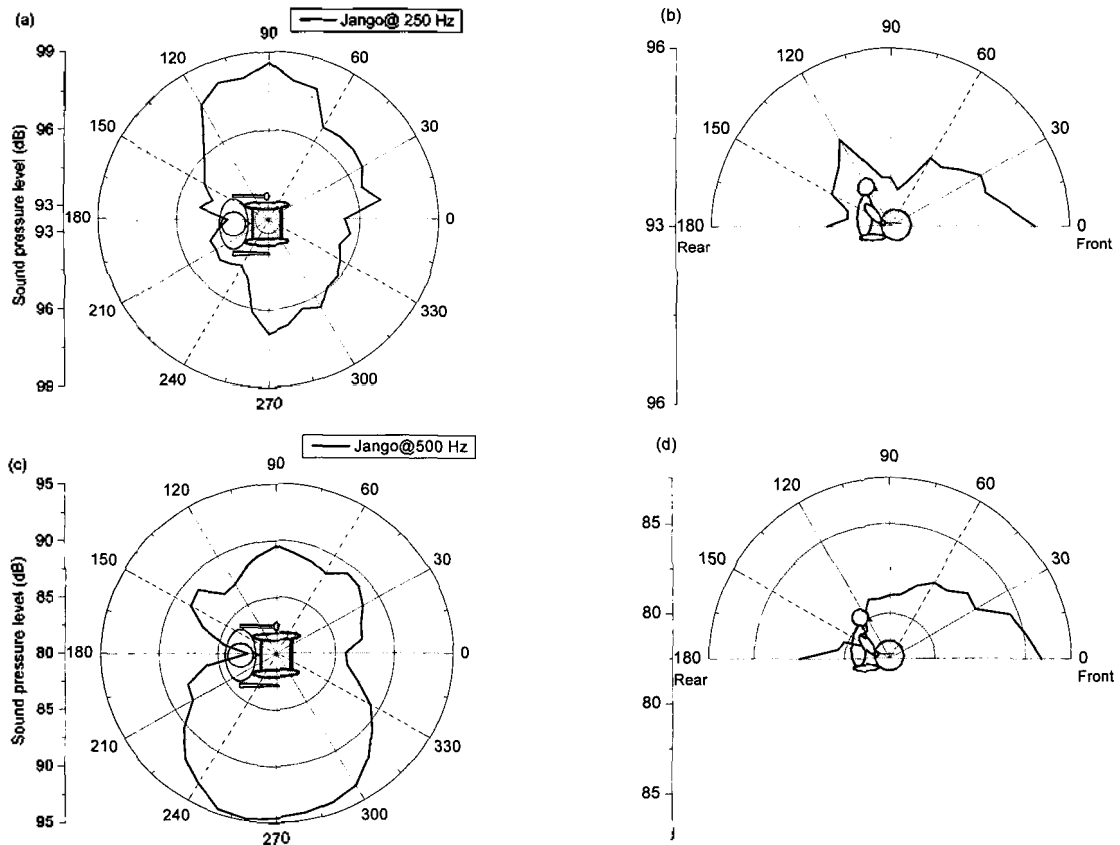


그림 12. 측정된 장고의 지향성: (a), (c), (e), (g), (i) 수평방향 지향성; (b), (d), (f), (h), (j) 수직방향 지향성
(a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz
Fig. 12. Measured directivity pattern of Jango: (a), (c), (e), (g), (i) top view; (b), (d), (f), (h), (j) side view.
(a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz. (Continued)

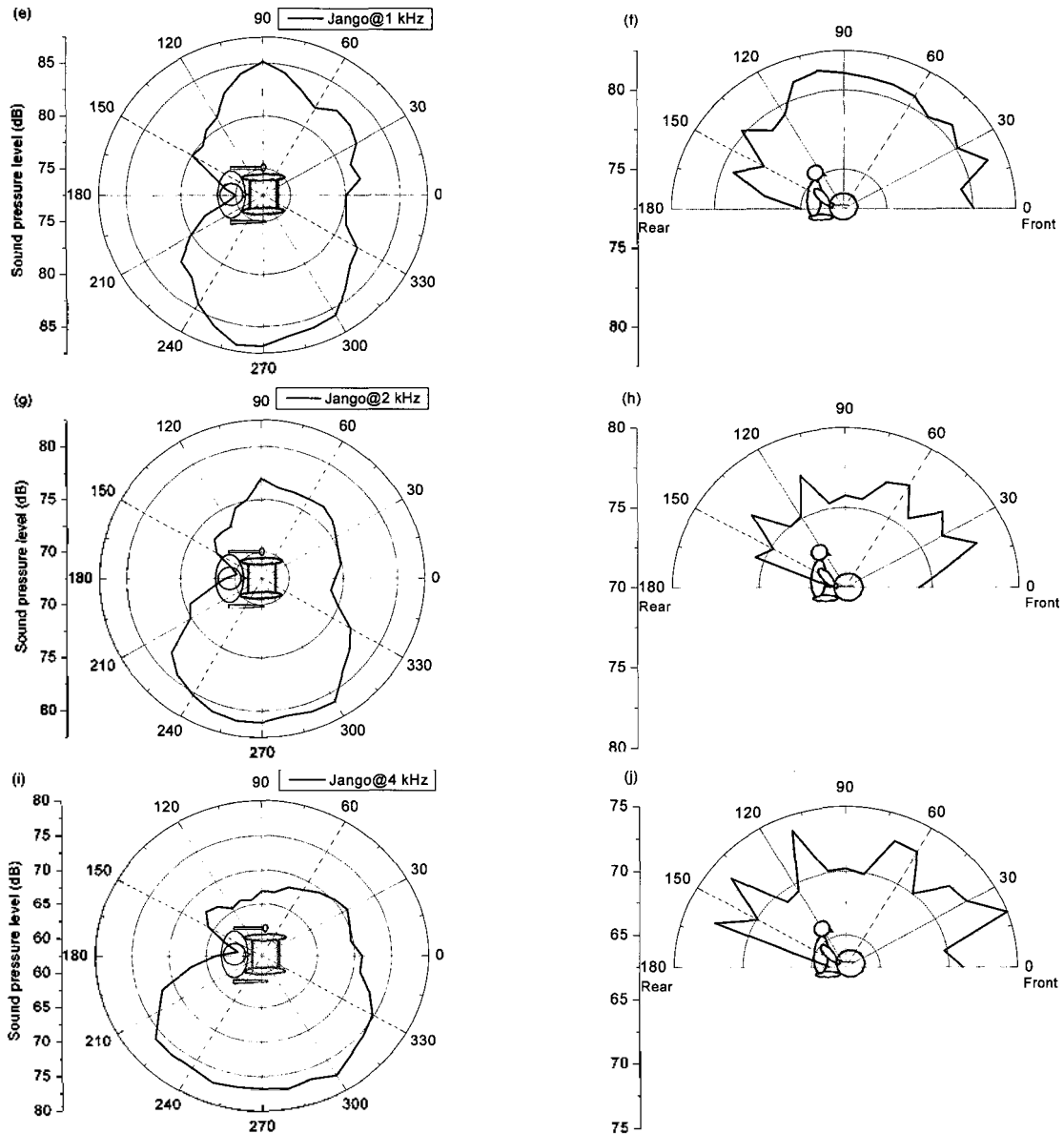


그림 12. 측정된 장고의 지향성: (a), (c), (e), (g), (i) 수평방향 지향성: (b), (d), (f), (h), (j) 수직방향 지향성
 (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz
 Fig. 12. Measured directivity pattern of Jango: (a), (c), (e), (g), (i) top view: (b), (d), (f), (h), (j) side view
 (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz.

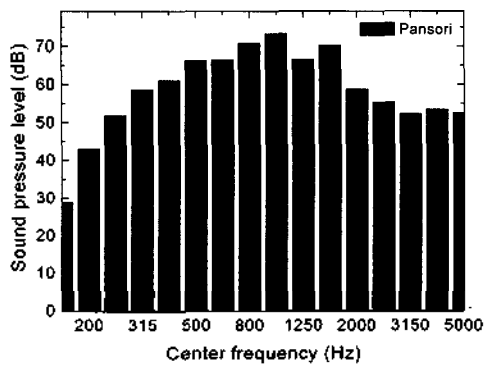


그림 13. 기준점에서 녹음된 판소리의 누적 스펙트럼
 Fig. 13. A cumulative spectrum of recorded Pansori sound at the reference position.

소리가 크게 방사된다. 지향성의 측정에서는 고수없이 창자의 소리만을 녹음하였으며 결과는 그림 14와 같이 나타난다. 저주파수 대역에서 판소리의 수평 방향 지향성은 무지향성이지만, 500 Hz 이상의 주파수 대역에서는 후방으로는 잘 소리가 방사되지 않으며, 전방으로 반원형태 (-90° ~ 90°)로 방사된다. 수직방향에서 대해서는 0° ~ 60° 방향으로 강한 지향성을 보인다. 250 Hz 저주파 대역의 경우, 30° 부근에서 최대로 나타나고, 500 Hz 대역에서는 10° ~ 30° 지향성이 나타난다. 1 kHz 이상에서는 0° ~ 60° 부근의 음압이 거의 비슷하게 나타난다.

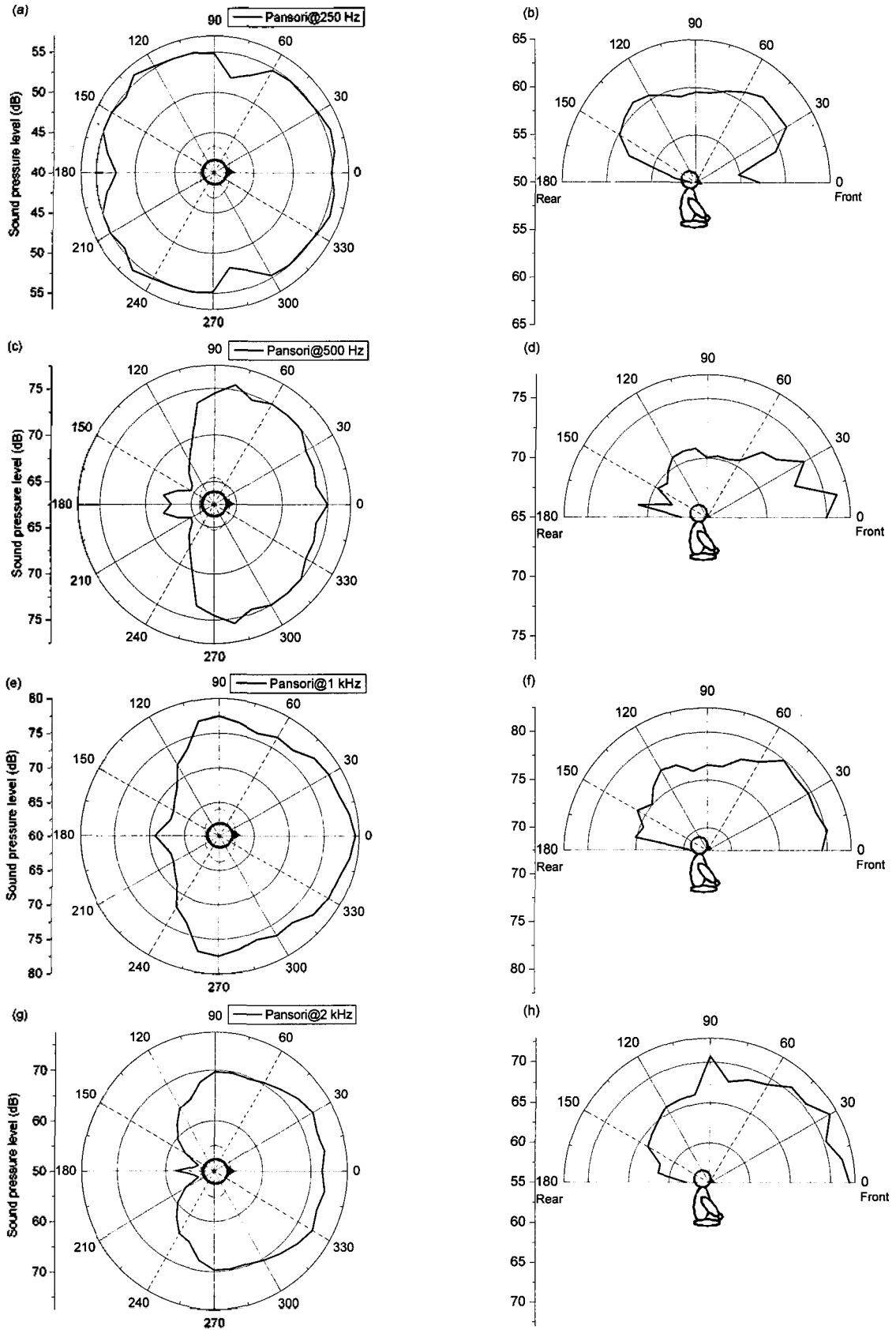


그림 14. 측정된 판소리의 지향성: (a), (c), (e), (g), (i) 수평방향 지향성; (b), (d), (f), (h), (j) 수직방향 지향성
 (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz
 Fig. 14. Measured directivity pattern of Pansori: (a), (c), (e), (g), (i) top view; (b), (d), (f), (h), (j) side view.
 (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz. (Continued)

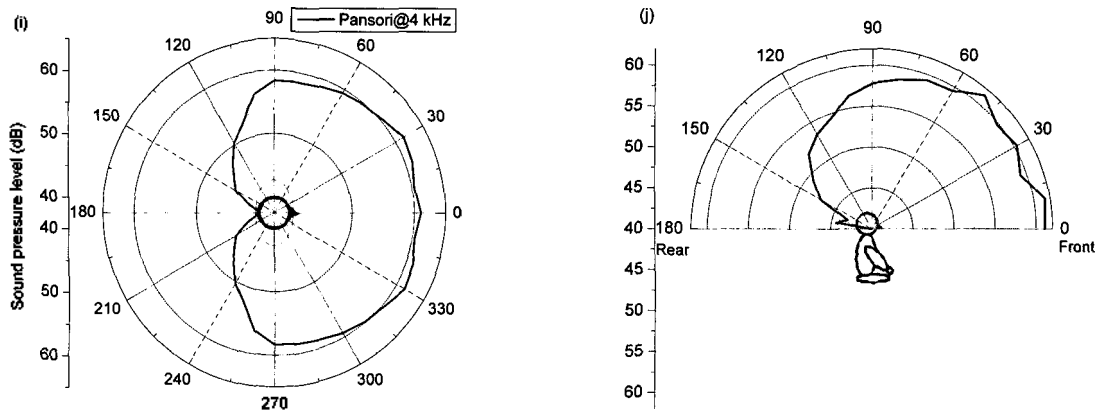


그림 14. 측정된 판소리의 지향성: (a), (c), (e), (g), (i) 수평방향 지향성; (b), (d), (f), (h), (j) 수직방향 지향성
 (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz
 Fig. 14. Measured directivity pattern of Pansori: (a), (c), (e), (g), (i) top view; (b), (d), (f), (h), (j) side view.
 (a), (b) 250 Hz; (c), (d) 500 Hz; (e), (f) 1 kHz; (g), (h) 2 kHz; (i), (j) 4 kHz.

표 2. 전산 모사에 사용된 3차원 공간 모델의 크기
 Table 2. Dimensions of the 3-dimensional CAD model employed in the simulation.

Classification		Size		
Hall	Dimensions	Length	Width	Height
	Average size	38.33 m	27.49 m	14.30 m
Volume (V)		7425.15 m ³		
Surface area		3046.33 m ²		
Floor area	Total	610.15 m ²		
Number of seats (N)	Total	728		
V/N (Occupied volume per seat)		10.2		

소리를 하는 경우, 청자는 0°에서 위쪽 30° 방향사이에서 머리를 움직이기 때문에 이러한 지향성이 나타나는 것이라고 생각된다.

V. 음원의 지향성을 고려한 국악 전용 공연장의 음향 성능 예측

최근 들어 각종 문화예술 전용 공간의 필요성과 함께 공연장 음향의 질적 향상에 대한 관객의 기대가 점차 높아지고 있다. 특히 전용 공연장이라는 개념은 기존의 공연장을 다목적으로 사용하였던 것과는 달리, 정해진 장르의 음악의 공연만으로 국한하므로, 공연 내용 전달의 질적인 향상을 얻을 수 있고, 따라서 관객의 만족을 충분히 얻을 수 있다. 현재 건설중인 국립부산국악원도 국악만을 위한 전용 공연장으로, 이렇게 목적이 정해진 경우에는 건축물의 음향 설계 단계에서 지향성을 포함하는 음원의 특성들을 고려하여야 한다. 이에 관련하여, 공간에서의 음의 분포

및 음향 인지를 예측하는 경우에 있어서, 음원의 지향성에 따라서 그 결과가 달라진다는 사실이 기존의 연구자들에 의하여 밝혀진 바 있다[1-5,11]. 그러므로, 국악 전용 공연장의 설계 단계에서도 국악 음원의 지향성을 고려한 예측을 통하여 효율적인 설계 및 수정이 가능할 것이다.

본 연구에서는 현재 건설 중인 국립부산국악원의 3차원 공간 모델을 이용하여 국악 음원의 지향성을 고려한 건축 음향 인자들의 예측을 수행하였다. 무대에서 연주되는 국악 음원의 지향성을 고려한 경우와 기존의 컴퓨터 모의실험에서 널리 이용된 무지향성 음원을 사용한 경우의 음향 인자들의 차이를 살펴보았다. 음향 인자들은 건축음향에서 널리 사용되는 음선 추적 기법을 이용하여 계산되었으며, 사용한 상용 프로그램은 ODEON (v.6.0)이었다. 국악 음원은 무대 중앙에 위치되었으며, 각 음원에 따라 측정된 지향 특성을 변경하며 모의 실험을 수행하였다.

국립부산국악원의 크기는 표 2와 같고 이에 대한 3차원 CAD 도면 모델은 그림 15와 같다. 수음점은 그림 15에서 원형 점으로 나타나 있으며, 각각 1층과 발코니의 높이 1.2

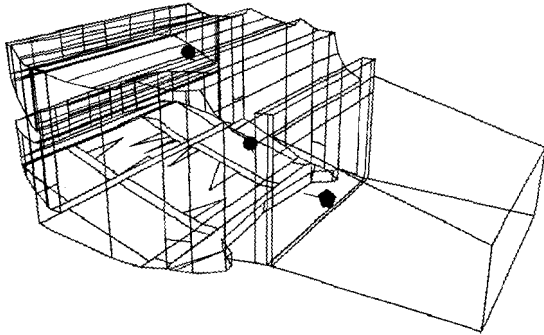
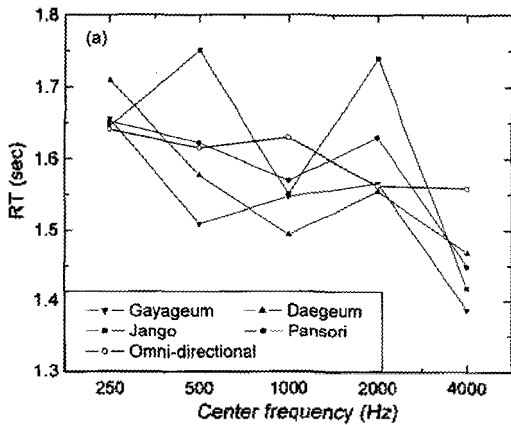


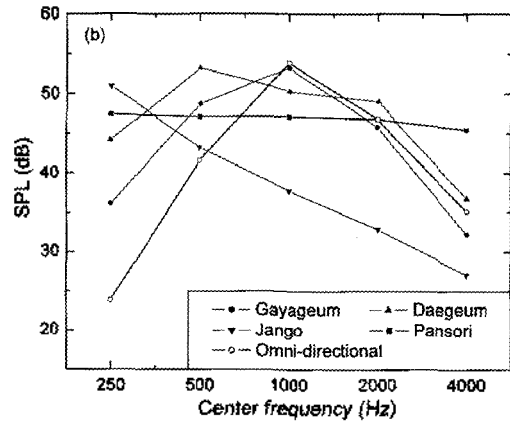
그림 15. 국립부산국악원의 3차원 모델 ●지점은 전산 모사에 사용된 음원의 위치, ●로 표시된 2개의 지점 들은 수음점 들을 나타낸다.

Fig. 15. Three-dimensional CAD model of Busan National Korean Traditional Music Hall ●denotes the source position and two ● signify the receiver positions in the simulation.

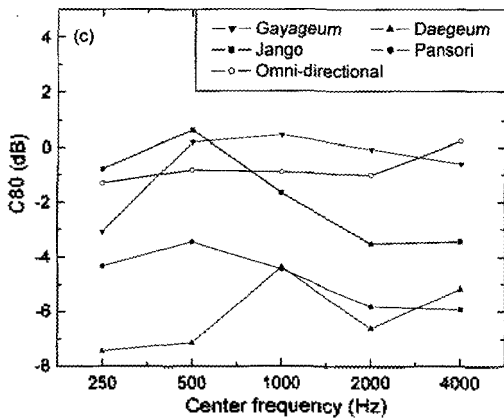
m에 위치하고 있다. 모의 실험에서는 최대 3000개의 음 선을 이용하였고, 음선의 최대 반사 횟수는 200회이다. 측정된 건축 음향 인자들은 잔향시간 (T30), 음압 레벨 (SPL), C80 (clarity), LF (lateral energy fraction), 및 STI (speech transmission index)이다. 그림 16은 모의 실험에서 계산된 음향 인자의 결과를 나타내고 있다. 그림 16(a)에서, 지향성이 고려된 음원을 사용하였을 경우의 잔향시간과 무지향성 음원을 사용한 경우의 잔향시간의 차이는 모두 0.2초 내외로 그 변동량이 크지 않고, 뚜렷한 경향도 나타나지 않는다. 그림 16(b)는 예측된 음압 레벨인데, 음원에서 같은 크기의 음향 파워를 방사시킨 경우를 모사한 것으로, 무지향성 음원의 경우 주파수에 관계없이 일정한 값을 나타내고 있지만, 판소리와 대금의 경우 1 kHz 에서 최대값을 가지나, 가야금은 500 Hz~ 2 kHz대역 사이에서 최대값을, 장고는 저주파수인 250



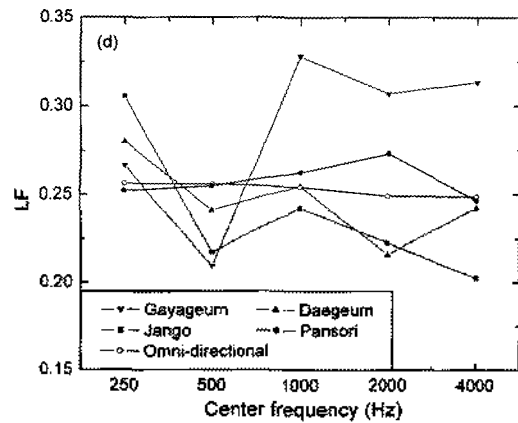
(a) 잔향 시간
(a) RT



(b) 음압 레벨
(b) SPL



(c) C80
(c) C80



(d) LF
(d) LF

그림 16. 국악 음원에 따라 예측된 주요 건축 음향 인자들

Fig. 16. Predicted major architectural acoustic measures according to the traditional music sources.

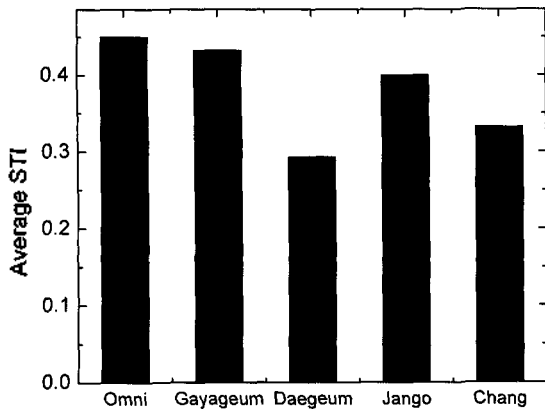


그림 17. 국악 음원들과 무지향성 음원의 예측된 평균 STI
 Fig. 17. Predicted average STI for the traditional Korean music sources and an omni-directional source.

Hz에서 최대값을 가진다. 소리의 명료도를 나타내는 C80를 예측한 결과, 대금의 C80값이 전 주파수 범위에서 가장 낮고, 장고는 500 Hz대역에서 최대값을, 그리고 가야금의 경우에는 주파수가 높아짐에 따라 C80값도 높아진다. LF는 연주장의 공간감과 관련된 인자로서 모든 방향에서 수음점으로 입사되는 음향 에너지에 대한 옆 방향에서 들어오는 에너지의 비로 정의된다. 무지향성 음원의 LF가 주파수에 관계없이 일정한 값을 나타내며, 판소리가 무지향성 음원과 가장 비슷한 LF값을 가진다. 반면 가야금은 1 kHz이상의 대역에서 다른 음원들 보다 큰 값의 LF를 나타낸다. 그림 17에서 보여 지는 STI 예측치는 연주장의 명료도를 나타내는 인자로서, 국악 음원 중 가야금이 무지향성 음원과 가장 비슷한 STI값을 보이며, 이 값은 국악 음원 중 가장 큰 값으로 가야금 소리가 가장 명료하게 청취된다는 것을 의미한다. 예측된 음향 인자들로부터 볼 때 C80값과 STI, 그리고 저주파수 대역에서의 음압 레벨이 작은 대금이 국립부산국악원에서 다른 악기들과 함께 연주될 때에는 대금의 소리를 추가적으로 보강시켜주는 구조적 혹은 전기음향적 장치가 필요할 것으로 예상된다.

VI. 결론

본 연구는 국악 전용 연주장의 음향 설계에 있어서 중요한 인자가 되는 국악의 음원에서의 음향 방사 특성을 파악하고 그 설계 효과에 대해 분석하고자 하였는데, 대표적인 국악기인 가야금, 대금, 장고, 판소리의 주파수와 공간적인 지향성을 조사하였다. 측정 결과, 가야금의 경

우에는 주파수가 증가함에 따라 전방향 방사에서 몇 개의 방사 부엽 (side lobe)을 가지는 다극형 (multi-pole) 음원 형태의 지향성으로 변함을 관찰하였다. 대금은 위쪽 방향으로의 지향성이 가장 크게 나타났으며, 대금의 앞쪽과 뒤쪽의 지향성도 측정되었다. 장고는 옆쪽 가측에서 방사되는 음압이 가장 크게 나타났으며, 좌우의 지향성의 크기가 주파수에 따라 틀려서, 저주파수에서는 왼쪽, 고주파수에서는 오른쪽으로 강한 지향성을 보였다. 창은 저주파수에서는 무지향성으로 방사되다가 주파수가 증가할수록 앞쪽과 30° 위쪽으로 지향성을 나타내며, 창자의 뒤쪽으로는 거의 소리가 방사되지 않는다. 측정된 국악 음원의 지향특성을 고려하여 국립부산국악원의 음향 성능을 음선 추적 기법에 의해 수치적으로 예측해 보았다. 계산된 주요 건축 음향 인자 중 잔향 시간은 음원의 지향성에 크게 영향을 받지 않았지만, 음압 레벨, C80, LF, STI 등은 음원의 지향성에 따라서 큰 차이를 보였다. 이러한 음향 인자들을 분석한 결과 대금의 C80과 STI, 저주파수 음압 레벨이 작기 때문에, 다른 악기와 같이 연주될 경우 음의 보강이 필요한 것을 알 수 있었다. 이와 같이 음원의 지향성에 따라서 공간에서의 음향 특성이 달라지기 때문에 더 많은 국악 음원에 대한 연구가 필요하다고 생각되며, 본 연구 결과는 향후 건설될 국악원들의 음향 설계에 기초적이고 중요한 참고자료가 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 BK21과 NRL, 국립부산국악원 음향 설계 위탁 과제에서 일부 재정 지원을 받았습니다. 연주에 참여하여 주신 대전 연정국악원의 강은아 (가야금), 한창덕 (대금), 박준형 (장고), 김미숙 (창)씨와 신호 처리 과정에 도움 주신 KAIST의 신성한 씨에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. B. I. Dalenback, M. Kleiner, and P. Svensson, "Audibility of changes in geometric shape, source directivity, and absorptive treatment - experiments in auralization," *Journal of the Audio Engineering Society*, 41, 905-913, 1993.
2. M. Kleiner, B. I. Dalenback, and P. Svensson, "Auralization - An overview," *Journal of the Audio Engineering Society*, 41, 861-874, 1993.
3. F. Otondo, J. H. Rindel, R. Causse, N. Misdarilis, and P. de la

Cuadra, "Directivity of musical instruments in a real performance situation," *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*, 312-318, 2002.

4. F. Otondo and B. Kirkwood, "Perceived influence of changes in musical instrument directivity representation," *Proceedings of the Stockholm Musical Acoustics Conference*, CD-ROM, 2003.
5. L. Parati and F. Otondo, "Comparison of directional sources in simulating a soprano voice," *Proceedings of the Stockholm Musical Acoustics Conference*, CD-ROM, 2003.
6. N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments* (Springer-Verlag, New York, 1997), Parts III, IV, V.
7. T. D. Rossing, *The Science of Sound* (Addison-Wesley, 1990), Chapter 11, 208-209.
8. 강성훈, 방송음향 (기전연구사, 1997), 26, 73-82.
9. 신성환, 정철호, 이장권, 연철호, 한찬훈, "국악음원의 음향방사 특성에 관한 연구," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 22 (1(s)), 489-492, 2003.
10. 신적수, 연철호, 한찬훈, "청감실험에 의한 국악음악당 음향설계의 기준설정에 관한 연구," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 22 (1(s)), 497-500, 2003.
11. C.-H. Jeong, J.-G. Ih, C.-H. Yeon, and C.-H. Hann, "Modeling of Sound Fields Considering the Acoustical Characteristics of Korean Traditional Musical Instruments," *Proceedings of Inter-Noise 2003*, CD-ROM, 2003.
12. 신적수, 한찬훈, "청감실험에 의한 국악음향의 선호도 조사," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 22 (2(s)), 221-224, 2003.
13. L. L. Beranek and I. Ver (eds), *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications* (Wiley, New York, 1992), 107, 434-434.
14. 음악 대사전 (세광출판사, 서울, 1984), 1081.
15. Anon., *The New Encyclopedia Britannica*, 24 (Encyclopedia Britannica Inc., Chicago, 1985).
16. 장사훈, 국악의 전통적인 연주법: 거문고, 가야금, 양금, 장고편 (I) (세광출판사, 서울, 1982), 21-28, 33-41.
17. 장사훈, 국악 총론 (정음사, 서울, 1983), 108-109, 125-126, 141.
18. 장사훈, 한국 음악사 (정음사, 서울, 1976), 19, 320-326.

저자 약력

● 정 철 호 (Cheol-Ho Jeong)



2000년 2월: KAIST 기계공학과 (공학사)
 2002년 2월: KAIST 기계공학과 (공학석사)
 2002년 3월~현재: KAIST 기계공학과 박사과정
 * 주관심분야: 구조음향, 건축음향, 실내음향, 고주파수 방법

● 이 정 권 (Jeong-Guon Ih)

한국음향학회지 제22권 제2호 참조

● 연 철 호 (Chul-Ho Yoen)



1998년 2월: 충북대학교 건축공학과 (공학사)
 2000년 8월: 충북대학교 건축공학과 (공학석사)
 2001년 3월~현재: 충북대학교 건축공학과 박사과정
 * 주관심분야: 건축음향, 실내음향, 음장시뮬레이션

● 한 찬 훈 (Chan-Hoon Haan)



1983년 2월: 홍익대학교 건축학과 (공학사)
 1985년 2월: 연세대학교 건축공학과 (공학석사)
 1994년 6월: Univ. of Sydney 건축과학과 (Ph.D)
 2000년~2001년: 영국 Salford Univ. 연구교수
 1994년 9월~현재: 충북대학교 건축공학과 부교수
 * 주관심분야: 건축음향, 실내음향, 음장시뮬레이션, 공연장음향