

연주홀 특성을 적용한 악기 무대 배치 시뮬레이션 소프트웨어 제작

김완중[†], 유원대^{**}, 김근형^{***}, 이기범^{****}, 여운승^{*****}

요 약

본 연구에서는 연주홀 특성에 맞는 무대 위에서의 악기 배치를 가상적으로 구현하는 문제를 다룬다. 악기 배치에 따른 소리의 변화를 예상하기 위한 모델로는 위치기반 잔향 효과 이론을 적용하였다. 이를 위하여 우선 무대 위 여러 지점에서 발생된 임펄스 응답을 측정 한 후, 각 악기가 배치된 곳에 해당하는 임펄스 응답과 악기 음원을 컨볼루션하고 이를 무대 위 모든 악기에 적용하는 알고리즘을 구현하였다. 또한, 사용자가 무대에서의 악기 위치를 지정함에 따라 실시간 분할 컨볼루션 엔진을 기반으로 이를 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 국립국악원 내 공연장에서 측정된 임펄스 응답과 국악기 음원을 사용하여 본 프로그램의 효용성을 확인하기 위한 청취 평가 실험을 진행하였으며, 그 결과 시뮬레이션 된 잔향효과가 악기 무대 배치에 따른 위치의 느낌을 잘 나타냄을 확인할 수 있었다.

Simulation Software for Instrument Placement on Stage Based on the Acoustic Properties of Concert Halls

Wanjung Kim[†], Wondaee Yoo^{**}, Keunhyung Kim^{***},
Kibeom Lee^{****}, Woon Seung Yeo^{*****}

ABSTRACT

In this paper, we present a software for placing instruments on stage based on the acoustic properties of the concert hall. In order to simulate the changes in sound depending on the positions of the instruments, we incorporated the idea of location-based reverberation effect which can be realized through the convolution of instrument sounds with the impulse responses from the respective instrument positions. And we developed a software with a real-time convolution engine which enables the user to conveniently simulate the resulting sound of various instrument placements. The software was tested with the impulse response data measured at two concert halls of the National Center for Korean Traditional Performing Arts and Korean traditional instrument sounds. Results of these experiments show that simulated reverberation effects properly represent the spatial placement of instruments on stage.

Key words: impulse response(임펄스 응답), location-based reverberation(위치기반 잔향), real-time partitioned convolution(실시간 분할 컨볼루션), FFTW

* 교신저자(Corresponding Author): 여운승, 주소: 대전광역시 유성구 구성동 373-1 카이스트 문화기술대학원 (305-701), 전화: 042-350-2902, FAX: 042-350-2910, E-mail: woony@kaist.edu

접수일: 2009년 11월 27일, 수정일: 2010년 2월 22일
완료일: 2010년 3월 5일

[†] KAIST 문화기술대학원 석박사통합과정
(E-mail: aura0314@kaist.ac.kr)

^{**} KAIST 문화기술대학원 석사과정

(E-mail: wd.letter@gmail.com)

^{***} KAIST 문화기술대학원 박사과정
(E-mail: doiluvu@gmail.com)

^{****} KAIST 문화기술대학원 석사과정
(E-mail: leekibeom@gmail.com)

^{*****} KAIST 문화기술대학원 조교수

* 본 연구는 국립국악원 연구(N04090029)지원으로 수행되었음

1. 서론

실내악, 오케스트라 등 서양 음악의 공연 예술은 오랜 시간동안 축적된 실제적 연주 경험을 바탕으로 음악에 알맞은 공연장의 형태부터 악기의 배치 방법에 이르기까지 다양한 부분에서 정형화 되어왔다. 현대에 이르러서는 공연장 형태의 음향학적 분석, 설계 등으로 그 연구의 영역이 넓어지고 있으며[1-5], 특히 공연장에서의 조화로운 음악 소리를 얻기 위한 시도로써 가청화(auralization) 음향 시뮬레이션이나 음향 홀로그래피(acoustic holography) 기술, 3차원 가상 입체 음향기술 등을 이용하여 공연장에서의 음향을 미리 예측하고 설계에 적용하는 연구가 진행되어왔다[6-9]. 또한 공연장의 형태나 음향 설계와 더불어 무대에서의 악기 배치에 따라서도 청중에게 음악이 전달되는 느낌이 달라지는데, 기존의 연구에서는 악기 배치에 따른 음향의 변화에 큰 초점을 두지 않았다.

새로운 형태의 실험적 공연이나 현대적 공연 환경에서 형태가 정형화 되지 않은 국악의 경우 악기의 배치에 관한 연구가 필수적이다[5]. 실제적으로 최적의 악기 배치를 찾기 위해서는 악기 연주자들을 무대 위 여러 위치에 배치하고 연주를 듣는 과정을 여러 번 반복하여 소리의 차이를 비교해야한다. 그러나 이러한 방법은 악기 편성의 규모가 커질수록 최적의 배치를 찾기까지 많은 시간과 노력이 필요하며, 각 공연장의 음향적 특성에 따라 각각 다른 결과를 얻게 될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 공연장에서의 악기 배치에 따른 소리의 변화를 가상으로 시뮬레이션함으로써 시간과 노력을 절감할 수 있다.

무대에서의 위치나 각 공연장의 음향 환경에 따른 소리의 변화를 예측하는 방법으로는 가상의 공간감을 시뮬레이션하여 악기 소리에 잔향을 넣어주는 방법을 많이 사용한다[10,11]. 일반적으로 음반 녹음에서도 악기 음원에 정위감, 공간감을 주기 위하여 소리에 좌우 패닝(panning)을 적용하고 인공적인 잔향을 적용시키는 방법들이 사용되는데, 이 방법들은 음향 심리적으로 현실적인 공간감을 느끼는데 어려움이 많다[12]. 따라서 더 현실감 있는 인공적인 잔향을 만들기 위해서 연주홀 자체의 임펄스 응답(impulse response)을 이용한 컨볼루션 잔향(convolution reverb)기법이 개발되었으며[13,14], 실제적으

로 Waves Audio 사의 IR-1, Audio Ease 사의 Altiverb 등의 소프트웨어에 적용되어 사용되고 있다. 하지만 위의 경우 음향 공간의 한 지점에서의 임펄스 응답만을 이용하여 공간의 특성을 반영하는데 그치는 한계가 있었다. 최근 Haines 등 [12]은 무대 위 서로 다른 두 지점에서 측정한 임펄스 응답을 가지고 각 지점의 위치기반 잔향 효과(location-based reverberation)를 악기 음원에 적용하여 악기 위치에 따른 소리의 변화를 보다 현실적으로 시뮬레이션하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 위치기반 잔향효과를 이용하여 무대 위 악기 배치에 따른 소리의 변화를 시뮬레이션할 수 있는 소프트웨어를 구현하고자 하였다. 먼저 무대 위 여러 지점의 임펄스 응답을 얻기 위하여 사인 스위프 신호를 이용한 임펄스 응답 측정방법[15]을 이용하였고, 각 악기가 배치된 곳에 해당하는 임펄스 응답과 악기 음원을 컨볼루션하여 위치기반 잔향 효과를 시뮬레이션하는 알고리즘을 구현하였다. 컨볼루션 연산 알고리즘은 실시간 분할 컨볼루션(real-time partitioned convolution) 방법[16]을 이용하였고, 사용자가 손쉽게 무대 위 악기 배치를 지정하고 그에 따른 시뮬레이션 결과를 들을 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 국립국악원 내 공연장(우면당, 예악당) 무대에서 임펄스 응답을 측정하여 위 공연장에서 국악기를 가상으로 배치한 시뮬레이션 결과를 얻고 이에 대한 평가 청취 실험을 진행하여 시뮬레이션 결과에 대한 검증은 하였다.

본 논문에서는 서론에 이어서 2장에서 본 연구의 이론적 배경을 기술하였다. 3장에서는 실제 공연장에서 임펄스 응답을 측정하고 분석한 결과를 기술하고 4장과 5장에서는 악기 무대 배치 시뮬레이션 소프트웨어 구현과 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션 결과에 대하여 논의하였다. 끝으로 6장에서 결론 및 향후 연구 과제에 대해서 기술한다.

2. 이론적 배경

2.1 임펄스 응답을 이용한 잔향효과 구현

임펄스 응답은 어떤 시스템에 임펄스(impulse) 또는 델타 함수(delta function)와 같이 매우 짧은 입력 신호를 주었을 때 발생하는 시스템의 출력을 의미한다[17,18]. 특히 특정 음향 공간에서의 임펄스 응답은

공간 안의 한 지점에서 임펄스 신호를 발생하였을 때 다른 지점에서 측정되는 결과이다. 어떤 음향공간에서 발생하는 소리의 음파는 수많은 벽과 천장, 바닥 등에 반사되면서 에너지의 크기나 주파수 특성 등의 성질이 서로 다른 패턴으로 변화되어 사람의 귀에 서로 다른 시간 간격을 가지고 도달하게 되는데, 임펄스 응답은 이러한 공간의 음향학적 특성을 잘 반영하게 된다. 특정 음향공간에서의 임펄스 응답은 해당 음향공간 안에서 소리의 반사 및 감쇠 정보를 담고 있으며, 공간의 기하학적 구조 및 벽면 재질 등 다양한 요소를 포함한 음향학적 특성을 반영한다. 이때, 만일 임펄스의 발생 위치가 변화하면 그에 따라 소리가 녹음 지점에 이르는 경로의 기하학적인 정보가 바뀌게 되며, 이는 소리의 변화로 나타난다.

위와 같이 임펄스 응답은 해당 공간의 음향학적 특성을 반영하는데, 특히 잔향 특성을 나타내는데 용이하게 쓰일 수 있다. 음향공간의 특성 중 공간감을 나타내기 위해서 잔향 효과를 많이 사용하는데, 잔향을 시뮬레이션하기 위해 컴퓨터를 이용한 디지털 방식의 구현방법을 사용한다. 초기의 디지털 방식의 잔향 구현 기법은 Manfred Schroeder에 의해 제안되었으며 IIR 빗살 필터(infinite impulse response comb filter)와 전역통과 필터(all pass filter)의 조합으로 딜레이 라인을 구현하여 잔향을 구현하였다[2,19]. 이후에도 피드백 딜레이 네트워크를 이용하여 초기 반향과 피드백을 모델링 하여 구현하는 방법이 잔향 구현 방법으로 많이 사용되었다[20,21]. 이들은 효율적인 계산과 컨트롤이 용이한 장점이 있으나 임펄스 응답으로 얻어진 공간의 특성과 같이 정확한 모델링은 아니라는 단점이 있다[11]. 따라서 최근에는 음향공간의 특성을 반영하기 위한 방법으로서 그 공간의 임펄스 응답을 직접 이용한 컨볼루션 잔향(convolution reverberation)이 많이 쓰이고 있다. 컨볼루션 잔향은 실제 (또는 가상) 음향공간의 잔향 효과를 시뮬레이션하기 위한 기법으로, 임펄스 응답 신호와 소리 음원을 컨볼루션해서 얻어진다[12,13,22]. 특정 음향 공간의 임펄스 응답과 인위적인 잔향이 없는 악기 소리의 컨볼루션을 구하면 그 음향공간에서의 악기 소리를 예측할 수가 있다.

2.2 위치기반 잔향효과

기존 컨볼루션 잔향 효과 연구들은 공간 내부 임펄

스의 발생 지점이 무대의 한 지점인 경우로, 이러한 방법으로는 잔향 및 주파수 응답 등 공간의 전체적인 음향학적 특성이 반영된 음향 효과를 얻을 수 있다. 하지만 하나의 임펄스 응답을 가지고는 공간 안에서 소리의 위치 정보를 줄 수 없고, 따라서 무대에서의 악기 위치 이동에 따른 변화를 소리로 확인할 수는 없다. 가상 음원의 위치정보를 주어 공간감을 주기 위해서는 스테레오 패닝, 벡터 기반 패닝 방식을 주로 많이 사용하지만 이러한 방식들은 음향 공간이 가지고 있는 고유한 특성을 나타내기에는 적절하지 않다[10].

최근에는 둘 이상의 임펄스 응답을 이용하여 보다 현실적인 음장감을 재현할 수 있는 위치 기반 잔향을 이용한 연구가 수행된 바 있다[12]. 위치 기반 잔향 이론은 무대 위의 여러 장소에서 발생한 임펄스에 대한 응답을 측정된 후 악기의 소리와 무대 위의 악기의 위치에 해당하는 임펄스 응답을 컨볼루션 한다. 그 결과로 얻어진 소리에서는 음향 공간의 전체적인 느낌과 함께 각 악기별 위치의 차이를 모두 느낄 수 있다. 2채널 스테레오 오디오 입/출력 시스템의 경우, 위치 기반 잔향 효과를 수학적으로 표현하면 식 (1), (2)와 같다.

$$y_L(t) = (\sum_i x_i(t) * h_{i,L}(t)) \tag{1}$$

$$y_R(t) = (\sum_i x_i(t) * h_{i,R}(t)) \tag{2}$$

여기서 x_i 는 i 번째 입력 신호, $h_{i,L}$ 과 $h_{i,R}$ 은 각각 i 번째 입력 신호가 놓인 지점에 해당하는 스테레오 임펄스 응답의 좌/우 채널을 의미하며, y_L 과 y_R 은 각각 최종 출력의 좌/우 채널에 해당한다.

위치 기반 잔향 효과를 이용하여 무대 위 악기의 물리적인 위치와 동일한 지점에서 발생한 임펄스 응답을 각 악기별로 적용하면 각 악기의 무대 위에서의 위치 정보까지 포함하는 잔향 효과를 얻어낼 수 있다. 이렇게 구현된 가상 음향 환경에서는 각각의 악기를 더 쉽게 인지할 수 있을 뿐 아니라, 기존의 단순한 스테레오 패닝 방식에 비하여 실제와 더 유사한 경험을 할 수 있다[12].

2.3 음향공간에서의 임펄스 응답 측정

악기 음원과 임펄스 응답의 컨볼루션을 이용하여

공간의 잔향을 시뮬레이션하여 실제와 동일한 현장감을 구현하기 위해서는 임펄스 응답을 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다. 지금까지 실내 음향학 연구에서 임펄스 응답을 측정하고 분석하는 다양한 기술들이 연구되었다. 일반적으로 특정 음향 공간에서 가진 신호(excitation signal)를 발생시키고 이를 녹음 분석하는 방법을 많이 사용한다[14,15,23]. 이러한 임펄스 응답 측정에서 주로 임펄스 신호, M-계열 신호(M-sequence signal, 또는 maximum length sequence-MLS), 처프 신호(chirp signal)가 많이 사용된다.

임펄스 신호를 이용한 분석 방법은 직접 음향 공간에 권총 소리나 박수 소리 같이 짧고 에너지가 큰 소리를 직접 음향공간에 발생시키고 녹음하여 이를 임펄스 응답으로 사용한다. 하지만 콘서트홀같이 큰 공간인 경우에는 충분한 에너지를 공간 전체에 전달하기가 어렵고, 이상적인 임펄스 신호는 이론적으로만 가능하므로 재생하는 것이 불가능하다. M-계열 신호의 경우는 의사 난수(pseudo-random) 방식에 의해 생성된 비선형 신호를 재생하는데, 이를 재생할 때 충분한 에너지를 전달하려면 갑작스런 큰 신호가 발생되기 때문에 음향 시스템에 손상을 가할 수 있는 단점이 있다. 처프 신호는 시간에 따라 주파수가 증가하거나 감소하는 신호로서 모든 주파수 성분을 포함하는 선형적인 신호이다. 각각의 주파수에 따라서 충분한 에너지를 가지며 또한 측정에 사용되는 음향 장비에 손상을 줄 가능성도 상대적으로 낮아 큰 공간의 임펄스 응답 측정에 적합하다[23].

본 연구에서는 처프 신호의 한 종류인 '사인 스위프(sine sweep)' 신호를 사용하여 공연장의 임펄스 응답을 측정하였다. 사인 스위프 신호란 그 주파수가 지수함수적으로 변하는 사인 신호(sinusoid)를 말한다. 사인 스위프 신호를 음향공간 내에서 입력 신호로 재생하고 이를 녹음한 후, 이 측정 결과를 역컨볼루션(deconvolution) 처리하면 시스템의 선형 임펄스 응답을 구할 수 있다[15,24]. 사인 스위프 신호를 이용한 임펄스 응답 측정 방식은 다른 방식에 비해 보다 신뢰도 높은 시스템 응답을 얻을 수 있다. 이론적으로 완벽한 선형 시불변 시스템을 가정하므로 시스템의 비선형성에 아주 민감한 성향을 보이는 M-계열이나 임펄스 신호 기반의 측정 방식과 달리, 사인 스위프 신호를 이용하면 작은 비선형성이나 외란 등에 강인한 장

점을 가진다[15].

2.4 실시간 분할 컨볼루션

음향 공간의 임펄스 응답을 이용하여 잔향 효과를 구현하려면 음원과 임펄스 응답의 컨볼루션 연산을 수행하여야 한다[13]. 음향신호의 컨볼루션은 두 음향 신호를 푸리에 변환(Fourier transform)을 통하여 각 신호의 스펙트럼을 구하고, 주파수 영역에서 단순한 곱셈 연산을 수행한 후 다시 시간 영역으로 역 푸리에 변환하여 결과 음향신호를 얻어내는 과정이다. 수학적으로 단순한 구조를 가지고 명료하게 정의되어 있으나, 많은 경우 실제 구현에 있어 연산 수행의 속도 및 효율성이 큰 문제로 대두된다. 특히 연산 수행 대상 신호의 길이가 길 경우 매우 많은 시간이 소요되는데, 이는 지연 시간이 없거나 짧아야 하는 실시간 오디오 처리 프로그램 제작에 있어 가장 큰 걸림돌이 된다[16,25].

컨볼루션 연산을 빠르게 수행하기 위한 방법으로 여러 가지 알고리즘이 개발되었고 그 중에서도 음성 신호와 같이 연속적으로 입력되는 신호를 처리하기 위한 블록 컨볼루션, 또는 분할 컨볼루션 방법을 많이 사용한다. 이는 무한의 입력 신호를 더 작은 부분(블록)으로 나누어서, 각 부분을 푸리에 변환을 이용하여 처리하고 출력신호를 종합하는 연산과정을 거친다. 본 연구에서는 A. Torger가 제안한 실시간 분할 컨볼루션 알고리즘을 사용하였다[16]. 이 알고리즘에서는 오디오 신호를 작은 블록으로 나누어 컨볼루션하므로 전체적인 컨볼루션 연산 횟수는 증가하나 각 조각에 대한 컨볼루션 연산의 크기는 작다. 따라서 각 조각에 대한 푸리에 변환이 이루어지는 처리 속도가 빨라지며 전체적인 연산의 속도도 일반적으로 빨라지는 장점이 있다. 그리고 알고리즘의 최적화가 용이하고 컴퓨터의 중앙 처리 장치(CPU)에 부담을 덜 주면서도 효율적이다.

빠른 컨볼루션 연산을 위해서는 푸리에 변환을 수행하는 연산과정 또한 중요하다. 컨볼루션 연산은 푸리에 변환을 통하여 신호의 스펙트럼을 구하고, 그 결과에 대하여 단순한 곱셈 연산을 수행한 후 다시 시간 영역으로 역 푸리에 변환하는 과정이다. 이 연산을 빠르게 수행하기 위하여, 본 연구에서는 이산 신호의 고속 푸리에 변환을 수행하는 소프트웨어 라이브러리인 FFTW를 사용하였다[26]. FFTW는 이

산 푸리에 변환(discrete Fourier transform, DFT)을 위해 MIT의 Matteo Frigo와 Steven G. Johnson에 의해 개발된 무료 소프트웨어 라이브러리이다.

FFTW의 푸리에 변환은 크게 두 과정으로 나뉘는데, 알고리즘을 해당 컴퓨터에 적용 시키는 계획 과정(planning)과 실제 푸리에 변환을 수행하는 실행과정(execution)으로 나뉜다. 계획 과정에서는 정해진 데이터 구조를 미리 구현된 다양한 알고리즘으로 실행하여 가장 빠른 알고리즘을 선택한다. 이렇게 선택된 알고리즘으로 작은 프로그램의 조각들인 플랜(plan)을 생성하고 실행과정에서는 이 플랜에 따라 푸리에 변환을 수행한다. 이러한 플랜은 프로그램 내에서 여러 번 사용 가능하며 연산 알고리즘이 고정되어 있지 않고 자동적으로 수정할 수 있어 시스템에 종속적이지 않고 하드웨어의 성능을 최대한 사용할 수 있다. 일반적으로 이산 푸리에 변환 연산은 샘플 수 n 에 대하여 $O(n^2)$ 의 시간에 수행되는데 비해, 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform) 알고리즘은 $O(n \log(n))$ 의 시간에 처리할 수 있다. FFTW는 데이터 구조에 따라 특화된 알고리즘을 선택하여 고속 푸리에 변환을 수행하므로, 고속 푸리에 변환 알고리즘과 같거나 더 빠른 시간에 연산을 수행할 수 있다.

3. 임펄스 응답 측정 및 분석

3.1 임펄스 응답 측정

임펄스 응답 측정은 2.3에서 설명한 처프 신호의 일종인 사인 스위프 신호를 이용한 임펄스 응답 분석 방법으로 이루어졌다. 객석에 마이크론을 설치하고 무대 위 한 지점에 스피커를 배치한 후, 스피커를 통하여 출력되는 신호를 녹음하는 방식으로 측정을 진행하였다. 측정에 사용된 사인 스위프 신호는 20초에 걸쳐 20~20,000[Hz] 범위의 주파수가 지수함수 적으로 증가 발생하는 신호를 사용하였다. 발생하는 사인 스위프 신호는 두 번 연속으로 출력하고 이를 녹음하였고, 이 과정을 무대 위 정해진 모든 지점에 대하여 반복적으로 수행하였다. 사용된 장비 및 소프트웨어의 목록은 다음과 같다:

- 스피커: Mackie MR-8 Studio Monitor
- 마이크론: RODE NT4 X/Y Stereo Multi-Power Studio and Location 1/2" Condenser Microphone

- 오디오 인터페이스: MOTU Traveller (mk3) FireWire Audio Interface
- 레코딩 소프트웨어: Apple Logic Studio 8

우면당의 경우 그림 1에 표시된 바와 같이 소리 발생 지점 사이의 간격을 1[m]로 하여 총 77 지점을 설정하였으나, 무대의 대칭성을 감안하여 좌측 절반과 중앙에 해당하는 42 지점에 대하여 측정을 시행하였다. 마이크론의 위치는 객석의 '나'열 48번 좌석 근처로, 무대의 가장 앞부분과 마이크론 사이의 거리는 약 4[m]이다.

예악당에서는 그림 2에 표시된 바와 같이 소리 발생 지점 사이의 간격을 2[m]로 하여 총 59 지점을 설정하였다 (역시 공연장의 대칭성에 따라 실제로는 34 지점에서의 결과를 측정하였다). 마이크론의 위치는 객석의 '나'열 15번 좌석과 '다'열 8번 좌석 사이로, 무대로부터의 거리는 약 6[m]이다.

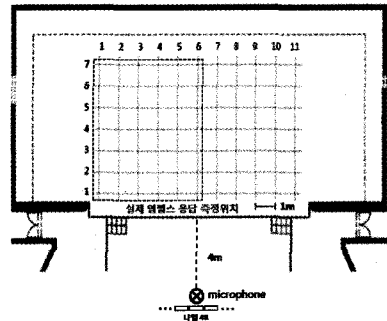


그림 1. 우면당 임펄스 응답 측정 무대 도면 및 측정 지점 좌표

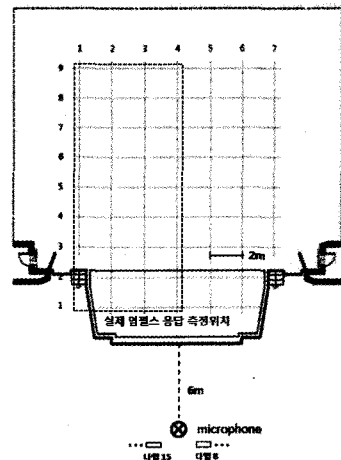


그림 2. 예악당 임펄스 응답 측정 무대 도면 및 측정 지점 좌표

우면당에서 스피커를 통한 음원 재생에 있어 Logic Studio에서의 재생 레벨은 -12.0[dB]로 설정하였다. 이때 오디오 인터페이스의 마이크론 프리앰프(preamp) 게인은 +24[dB]로 설정하여, Logic Studio에서의 녹음 신호 레벨이 -12~-6[dB] 범위가 되도록 하였다.

예악당에서는 공연장의 규모가 더 크다는 점을 감안하여 Logic Studio의 재생 레벨을 -6.0[dB]로 상대적으로 높게 설정하였고, 마이크론 프리앰프 게인은 +30[dB]로 설정하여 녹음 신호 레벨이 -12~-6[dB] 선이 되도록 하였다.

그림 3은 각각 우면당과 예악당에서의 측정 모습이다.

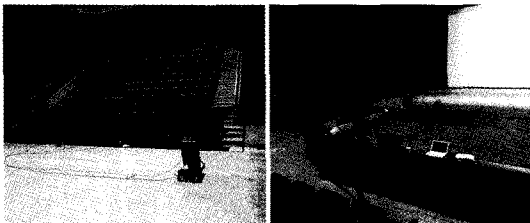


그림 3. 측정 모습 (좌측 : 우면당, 우측 : 예악당)

3.2 임펄스 응답 분석

무대 위 여러 지점에서 발생한 사인 스위프 신호를 녹음한 결과는 역콘볼루션 과정을 통하여 임펄스 응답으로 변환된다. 이 작업은 수치 해석 및 연산 언어인 Octave 프로그램으로 수행되었으며, 역시 유사한 프로그램인 Matlab에서도 실행 가능하다. 임펄스 응답 추출에 사용된 Octave 함수는 Berdahl의 프로그램을 수정/보완하여 사용하였다[24].

그림 4는 사인 스위프 신호 녹음 결과 중 우면당 1행 6열 좌측채널에서 추출한 임펄스 응답 결과와 임펄스 응답을 주파수 영역에서 분석한 결과, 임펄스 응답을 가지고 에너지 감쇄 곡선으로 분석한 예를 나타낸다.

그림 5는 우면당에서 측정된 여러 지점에서의 임펄스 응답 결과의 예이다. 그림 5의 (a)와 (b)의 경우는 우면당 1행 1열에서 발생한 사인 스위프 신호를 각각 마이크론 좌측채널과 우측채널을 통하여 녹음한 결과를 분석한 임펄스 응답이다. 이 두 임펄스 응답은 무대 맨 앞쪽 좌측에서 신호발생을 한 결과로서 임펄스 응답의 피크 크기가 좌측 채널이 우측 채널보다 더 큰 결과를 보여준다. 이는 좌우측 공간을 잘 구분할 수 있는 임펄스 응답을 얻었다고 볼 수 있다. 그림 5의 (c)에서 나타낸 7행 1열의 임펄스 응답의 경우 (a)의 위치인 1행 1열보다 무대 뒤쪽으로 거리가 더 멀기 때문에 임펄스 응답의 피크 크기가 작고 임펄스의 초기 도달 시간이 더 늦게 나타나는 결과를 보여준다. 따라서 무대에서의 상대적인 거리를 잘 구분할 수 있는 임펄스 응답 측정 결과를 얻었다고 볼 수 있다. 무대 좌우측 위치와 앞뒤 위치에 따라 임펄스 응답이 분포하므로 무대의 위치에 따른 공간감을 잘 나타내어 우면당의 무대 공간의 음향특성에 맞는 타당한 결과를 얻었다고 볼 수 있다.

그림 6은 예악당에서 측정된 다중 임펄스 응답 결과로서 무대 앞 좌측인 3행 1열에서의 좌우측 채널에 따른 임펄스 응답의 피크 크기가 좌측 채널에서 더 크게 분석되었다. 그리고 무대 맨 뒤쪽인 9행의 임펄스 응답은 거리에 따라 피크 크기와 잔향의 에너지가 작은 결과를 보여주면 딜레이 시간도 길게 나타났다.

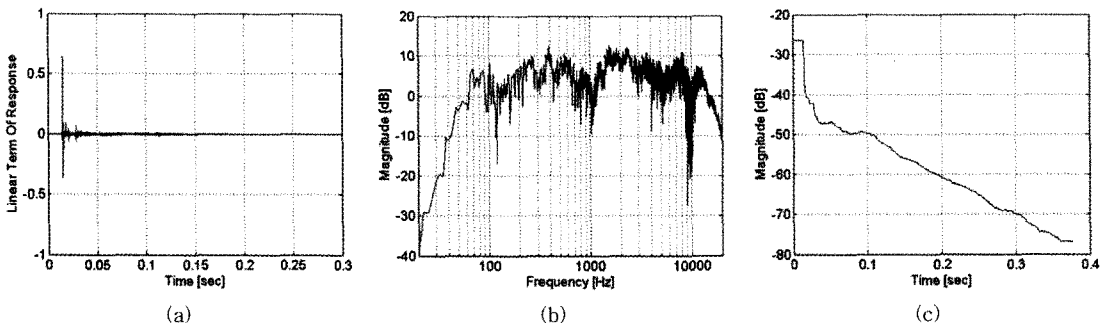


그림 4. (a) 임펄스 응답, (b) 주파수 응답 분석, (c) 에너지 감쇄 곡선

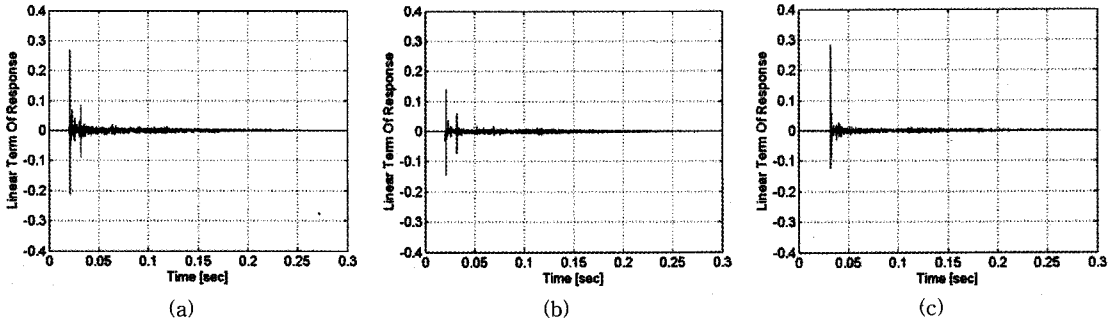


그림 5. (a) 우면당 1행 1열 좌측 채널, (b) 우면당 1행 1열 우측 채널, 우면당 (c) 7행 1열 좌측 채널

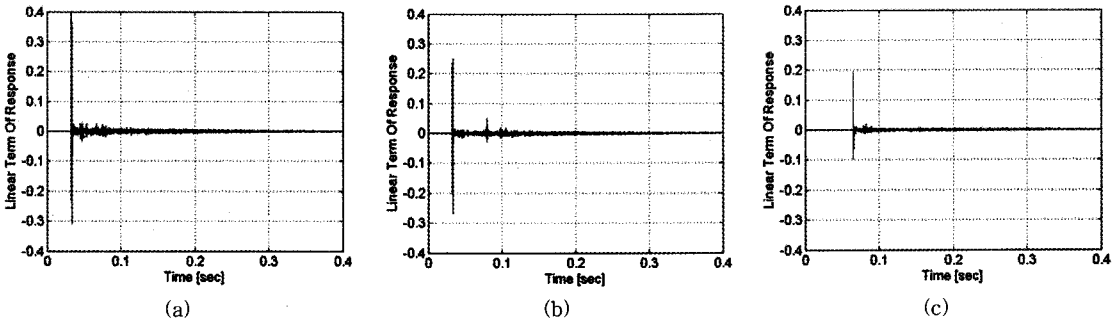


그림 6. (a) 예약당 3행 1열 좌측 채널, (b) 예약당 3행 1열 우측 채널, (c) 예약당 9행 1열 좌측 채널

4. 악기 무대 배치 시뮬레이션 소프트웨어

4.1 소프트웨어 개발 및 구성 요소

시뮬레이션 소프트웨어는 사용자가 공연장, 악기 정보와 악기의 위치를 선택, 입력하는 인터페이스와 선택된 정보를 입력받아 시뮬레이션을 실행하는 실시간 분할 컨볼루션 엔진으로 구성되어 있다. 그림 7 사용자가 인터페이스를 통해 조건들을 선택한 후 렌더링을 실행하면, 컨볼루션 엔진은 선택된 악기 음원과 악기의 위치의 임펄스 응답 데이터를 로드하며, 실시간 분할 컨볼루션 알고리즘을 이용해 컨볼루션을 수행한다. 위 2장에서 설명한 대로 컨볼루션 엔진은 FFTW 라이브러리를 이용하여 푸리에 변환/역변환을 수행한다. 엔진은 로드된 음원을 실시간으로 처리할 수 있을 정도로 작은 조각으로 분할하고, 각 분할된 조각들을 푸리에 변환, 컨볼루션, 푸리에 역변환의 과정을 거쳐 실시간으로 컨볼루션한다. 그리고 컨볼루션한 각 조각 파일을 다시 합성하여 시스템의 오디오 장치로 출력하며, 컨볼루션이 완료될 때 전체 결과를 파일로 저장한다.

악기 음원은 국립국악원에서 제공받은 음원 데이터를 이용하였다. 제공받은 자료는 정대업 작품의 녹음 자료 중 악장, 대금, 편종 등 각 노래 및 악기를 무향실에서 녹음하여 악기 별로 분류해놓은 자료이다. 이들 중에서 분리도가 높고 잔향이 적은 악기를 고르고, 동일한 시점에서 약 1분 30초 정도 구간을 선택하여 음원으로 사용하였다. 임펄스 응답 신호는 위 3장에서 분석한 임펄스 응답 웨이브 파일로 사용한다. 악기 음원, 임펄스 응답, 출력 파일은 모두 32비트 2채널의 웨이브 파일을 사용하고 악기 음원의 경

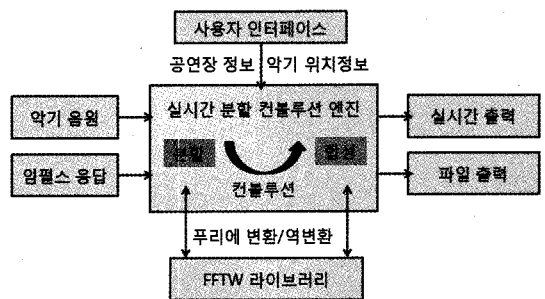


그림 7. 악기 무대 배치 시뮬레이션 소프트웨어 구성요소

우 사용자가 원하는 대로 변경 및 추가할 수 있다.

4.2 사용자 인터페이스

사용자 인터페이스는 공연장을 설정하고, 악기 음원을 프로그램으로 불러오고 악기의 위치 정보를 정하여 시뮬레이션하는 동작을 수행하는 환경을 제공한다. 그림 8은 사용자 인터페이스 화면의 모습으로, 다음과 같이 구성되어 있다.

- ① 불러오기(Load Instruments) : 시뮬레이션에 사용할 악기 설정 파일을 불러온다. 여기에는 사용할 악기의 이름, 이미지, 음원 파일의 경로 정보가 들어있다.
- ② 무대 선택 : 무대 선택 버튼을 이용해 ‘예악당’과 ‘우면당’ 중 하나를 선택할 수 있다.
- ③ 시뮬레이션 (Render / Stop) : 악기 배치 후 Render 단추를 누르면 실시간 시뮬레이션이 시작되고, Stop 단추를 누르면 중단된 후 대기 상태로 돌아가게 된다. 시뮬레이션 결과는 프로그램 폴더에 result.wav 로 저장된다.
- ④ 악기 목록 : 악기 설정 파일에 설정된 악기의 목록이 표시된다. 이곳에서 임의의 악기를 마우스로 끌어 무대에 배치할 수 있다.
- ⑤ 무대 배치 : 이 영역에는 무대 그림 위에 악기 배치가 가능한 위치임을 의미하는 격자가 표시된다. 사용자는 이들 중 원하는 자리에 악기를 놓을 수 있다. 특정 악기의 배치를 취소 또는 수정하고 싶을 경우, 마우스를 이용하여 배치된 악기를 무대 밖으로 옮겨 없애거나 다른 위치로 이동할 수 있다. 그림 9는 악기 배치가 이루어진 화면의 예를 보여준다.

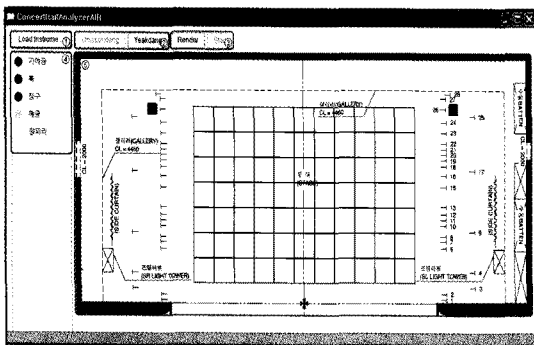


그림 8. 사용자 인터페이스 화면의 구성 (우면당)

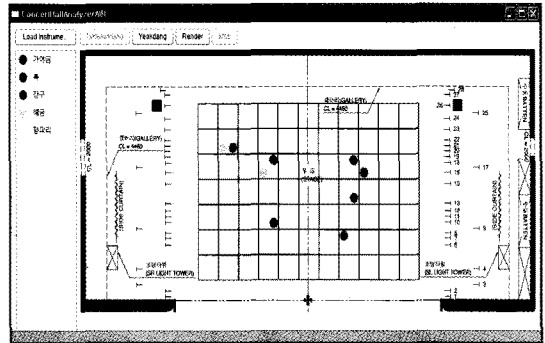


그림 9. 악기 배치가 이루어진 사용자 인터페이스 화면의 예

4.3 실시간 분할 컨볼루션 엔진 알고리즘

실시간 분할 컨볼루션 엔진은 사용자가 선택한 정보를 입력받아 시뮬레이션을 수행한다. 실시간 분할 컨볼루션 엔진은 컨볼루션에 소요되는 시간을 줄이기 위해 로드된 음원을 실시간 분할 알고리즘을 통해 실시간으로 처리할 수 있을 정도로 작은 조각으로 분할하고, 각 분할된 조각들을 푸리에 변환, 컨볼루션, 푸리에 역변환을 거치는 과정으로 연산을 수행한다. 그리고 컨볼루션한 각 조각 파일을 다시 합성하여 시스템의 오디오 장치로 출력하여 사용자에게 즉각적인 시뮬레이션 결과를 보여주며, 컨볼루션이 완료될 때 전체 결과를 파일로 저장한다.

실시간 분할 컨볼루션 엔진이 오디오 파일을 실시간으로 컨볼루션 및 재생하기 위해서는 오디오 파일을 작은 조각으로 나누어 처리해야 한다. 본 프로그램에서는 A. Togar가 제안한 실시간 분할 컨볼루션 알고리즘을 적용하였다[16]. 실시간 분할 컨볼루션 알고리즘 다음과 표 1과 같다.

실시간 분할 컨볼루션 알고리즘에서 오디오 샘플 데이터와 임펄스 응답 데이터에 대해 65536개의 샘플 조각으로 나누어 사용하도록 하였다. 임펄스 응답 데이터의 경우는 대해 32768개의 샘플에 32768개의 영삽입(zero-padding)을 사용하여 65536개의 조각으로 만들어 분할 컨볼루션을 시행한다. 컨볼루션 연산을 수행할 때 사용하는 푸리에 변환은 자바 언어로 FFTW를 활용할 수 있는 Java FFTW Interface (JFFTW)를 사용하였다. FFTW는 Microsoft Windows의 동적 링크 라이브러리(dynamic link library, DLL) 형태로 제공되고 있다. 컨볼루션 엔진은 65536개 샘플 크기로 분할된 조각을 FFTW 라이브러리에

표 1. 실시간 분할 컨볼루션 알고리즘

1. 오디오 샘플 데이터와 임펄스 응답 데이터를 각각 일정한 크기의 조각으로 나눈다.
2. 오디오 샘플 데이터의 i 번째 조각에 대해서
 - 2.1 임펄스 응답 데이터의 j 번째 조각에 대해서
 - 2.1.1 오디오 샘플 데이터의 i - j 번째 조각과 해당하는 임펄스 응답 데이터의 j 번째 조각을 컨볼루션한다.
 - 2.1.2 2.1.1을 $j=0$ 부터 $j=\min(i, \text{임펄스 응답 데이터의 전체 조각 개수})$ 까지 반복한다.
 - 2.1.3 2.1.2의 각 결과를 모두 더한다.
 - 2.2 2.1을 각 오디오 샘플 파일별로 반복한다.
 - 2.3 2.2의 각 결과를 모두 더한다.
 - 2.4 2.3의 결과를 출력한다.
3. 2를 $i=0$ 부터 $i=(\text{샘플 데이터의 전체 조각 개수})$ 까지 반복한다.

전달하며 이산 푸리에 변환을 실행하도록 한다. FFTW 라이브러리의 기본 인터페이스(basic interface)를 사용하여 푸리에 변환/역변환을 실행하도록 하였다.

각 음원의 분할된 조각의 크기는 알고리즘의 속도를 결정하는 주요한 요인이다. 각 조각의 크기가 클 경우 전체 컨볼루션 횟수가 줄어들고 음의 변형이 적은 반면 푸리에 변환을 위한 초기 준비 시간 및 각각의 컨볼루션 시간이 증가한다. 조각의 크기가 작을 경우 푸리에 변환을 위한 초기 준비 시간 및 각각의 컨볼루션 시간이 감소하는 반면 전체적인 컨볼루션 횟수가 증가하고 음이 상대적으로 크게 변형된다. 본 프로그램에서는 실험을 통해 조각의 크기를 65536 샘플로 설정했으며, 사용자의 필요에 따라 변경할 수 있도록 하였다.

5. 시뮬레이션 평가 청취 실험 및 결과

5.1 시뮬레이션 결과 음원의 비교 청취 실험

간향 시뮬레이션 알고리즘의 올바른 구현 여부 및 결과의 사실성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 프로그램으로 얻어낸 결과 음원에 대한 청취 실험을 진행하였다. 시뮬레이션 프로그램에 사용된 악기 음원을 무대에서 재생하고 객석에서 녹음한 소리를 비교청취 대상으로 하였다. 공연자의 무대 연주를 직접 녹음하여 비교하는 방법은 시뮬레이션에 사용된 음원과 실제 연주 소리가 완벽하게 일치하지 않으므로, 공정한 비교를 위해서는 적합하지 않다고 판단되어 배제하였다. 스피커에서의 음원의 재생 레벨은 -3 [dB], 마이크로폰 프리앰프의 게인은 +24[dB]로 설정하였다. 청취 실험 대상은 카이스트 대학생, 대학원생 23명을 대상으로 하였다. 연령 분포는 22세~32

세이며, 남자의 비율은 약 70%이다.

표 2에 표시된 대로 악장 음원을 우면당 무대 각 위치에서 재생하고 녹음한 샘플 1, 2, 3, 4 음원을 피 실험자에게 들려주었다. 무대 도면 및 사진을 보여주면서 샘플 음원을 들려주어 각 음원 샘플에서 느껴지는 음원의 위치와 공간감을 느끼게 한 후, 시뮬레이션 프로그램으로 얻어진 테스트 음원과 비교 청취를 진행하였다. 테스트 음원은 샘플 1과 같은 위치 2x2에서의 시뮬레이션 결과를 사용하였다. 샘플 음원들과 테스트 음원의 비교 청취 후 테스트 음원과 같은 위치라고 느껴지는 샘플 음원의 번호를 택하게 하였다. 그 후 택한 샘플 음원과 테스트 음원에 대해서 위치감과 잔향의 느낌에 대해 비교하는 질문을 하였다.

실험 결과 표 3에서와 같이 23명의 응답자 중 20명의 응답자가 샘플 1 음원에서 느껴지는 위치가 테스트 음원의 위치와 비슷하다고 대답하여 87%의 응답자가 시뮬레이션 음원의 위치를 제대로 느끼는 결과를 얻었다. 또한 잔향의 느낌의 경우 14명의 응답자가 비슷하다고 응답하였고 9명의 응답자는 다르다거

표 2. 샘플 음원 재생 위치 및 재생음원

샘플 음원 번호	1	2	3	4
음원 재생 위치 (우면당)	2x2	2x10	2x6	5x6
재생음원	악장음원 (0~19초)			

표 3. 시뮬레이션 결과 음원과 녹음 음원 비교 청취 실험 결과

	비슷하다	조금 다르다	다르다	잘모르겠다
위치	20 (87%)	1 (4.3%)	0 (0%)	2 (8.7%)
잔향의 느낌	14 (61%)	7 (30%)	1 (4.3%)	1 (4.3%)

나 모르겠다는 응답을 하였다.

시뮬레이션 결과와 무대에서 재생한 음원을 녹음한 결과를 비교해보았을 때 응답자들은 위치는 대체로 비슷하게 느껴진다고 대답한데 반해 잔향의 느낌은 61%의 응답자만이 비슷하다고 대답하였다. 비교 청취 실험 결과 시뮬레이션 결과 음원이 잔향감이 조금 부족한 느낌을 주지만 느껴지는 위치나 잔향의 느낌은 직접 녹음한 음원과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 청취 비교를 통하여 확인하였으며, 이로서 시뮬레이션에 사용된 알고리즘이 적합하다는 사실을 보였다.

위 비교 청취 실험에서 잔향의 느낌의 차이는 주로 시뮬레이션 결과 음원의 잔향의 시간이 조금 짧게 느껴진다고나 공간감이 더 작게 느껴진다는 응답을 얻을 수 있었다. 이는 무대에서 음원을 재생하고 녹음한 sample 음원의 경우 현장에서의 초기잔향, 반사음이 더 크게 녹음될 수 있어 공간감의 차이가 느껴질 있다. 그리고 사인 스위프 신호를 발생하고 녹음하는 과정과 여기서 임펄스 응답을 뽑아내기 위한 역컨볼루션 계산에서 오차가 발생하여 잔향의 차이가 발생할 수 있으며, 분할 컨볼루션 연산 수행 과정에서 푸리에 변환/역변환 과정에서 음원 손실이 있으므로 잔향의 차이가 날 가능성이 있다.

5.2 악기 무대 배치 시뮬레이션 청취 실험

무대 배치 소프트웨어를 이용하여 악기의 무대 배치를 정하고 시뮬레이션을 수행하였을 때 무대 배치에 따른 소리의 변화를 사용자가 느낄 수 있는 지에 대한 청취 실험을 하였다. 실험 대상은 위 비교 청취 실험에 참여한 응답자들을 대상으로 실시하였다. 실험 방법은 표 4와 같이 두 악기의 음원에 대하여 우면당 무대에 각각 다르게 배치한 시뮬레이션 결과들을 참고음원으로 응답자에게 들려주어 악기가 배치된 결과에서 느낄 수 있는 악기의 위치, 상대적인 악기 위치의 차이 등을 학습하게 하였다. 참고음원 1~5에서 아쟁의 위치는 5×10 위치에 고정되어 있고 악장(노랫소리)만 여러 다른 위치에 배치하여 아쟁과 악장의 상대적인 위치를 파악하게 하였다. 그 후 아쟁의 위치는 참고음원과 같은 5×10 위치이고 악장의 위치를 임의로 바꿔 시뮬레이션한 테스트음원을 들려준 후 무대 위에서 악장 위치를 응답자에게 지정하

표 4. 참고음원 1~5 악기 배치 (우면당)

참고음원 번호	1	2	3	4	5	
악기	악장	2×6	2×2	2×10	5×2	5×10
위치	아쟁	5×10				

표 5. 악기 위치 지정 실험 결과

	평균 [m]	표준편차
좌표 차이 거리	1.77	1.3
앞뒤거리	0.7	1.0
좌우거리	1.3	1.3

도록 하였다.

응답자가 지정한 위치와 테스트 음원의 악장 위치의 좌표 차이를 종합한 결과는 아래 표 5와 같다. 실험 결과 응답자들은 평균적으로 1.77[m] 떨어진 곳의 위치를 지정하였고, 앞뒤거리의 차이는 평균 0.7[m], 좌우거리의 차이는 1.3[m]로 나타났다.

실험 결과 응답자들은 대체적으로 악장이 배치된 위치를 잘 지정할 수 있었다고 보인다. 지정한 위치의 앞뒤거리의 차이보다는 좌우거리의 차이가 조금 더 크게 나타났는데 이는 우면당이 좌우 폭이 무대 앞뒤 깊이보다 긴 형태를 가지고 있어 이러한 경향이 나타났으리라 생각한다. 대체적으로 응답자들은 2칸 이내의 위치를 지정하였으며 응답자의 청취 능력에 따라 악기의 소리를 분리해서 듣고 위치를 파악하는데 차이가 나는 것도 확인 할 수 있었다. 그리고 참고음원을 더 오랜 시간 비교 청취 한 후 test를 다시 진행하는 경우엔 위치를 지정하는 것이 더 수월하다고 응답하였다. 이는 악기 배치 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 악기가 다르게 배치된 차이를 느끼는 것이 가능하고 실제와 유사한 경험을 할 수 있다고 보인다.

6. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구의 목표는 악기의 무대 배치에 따른 소리의 변화를 쉽고 정확하게 예측할 수 있는 소프트웨어를 구현하는 것이었다. 연구 과정을 통하여 임펄스 응답 측정 및 이를 이용하여 잔향 효과를 구현하기 위한 배경 이론을 정리하고 실제적인 소프트웨어를 구현하였다. 이 소프트웨어를 이용하여 사용자가 공연장의 음향 특성을 바탕으로 무대 위에서의 공간감

과 잔향을 시뮬레이션한 가상의 무대 배치 결과를 미리 들어볼 수 있도록 하여 무대 배치 연구를 효율적으로 수행할 수 있는 기초를 마련하였다. 본 연구에서는 국립 국악원 내 우면당과 예악당을 모델로 하여 국악기의 배치를 시뮬레이션할 수 있도록 소프트웨어를 구현하여 다양한 형식의 국악 공연에 대한 연구를 수행할 수 있는 기반을 구축하였다.

추후 이어질 연구 과제로는 본 연구로 구현한 소프트웨어의 유용성을 검증하고, 시뮬레이션의 정확성을 높이는 연구를 진행하여야 할 것으로 사료된다. 먼저 본 소프트웨어의 시뮬레이션 결과에 대해 평가 청취실험을 진행할 때 실제 음악 분야에 종사하고 청각적인 훈련이 된 사람들을 대상으로 세분화된 청취 문항을 이용하여 보다 전문적인 프로그램으로서 검증할 필요가 있다. 이를 위하여 음원의 위치감이나 잔향의 느낌에 대하여 평가할 수 있는 객관적 기준을 조사하고 이에 대하여 MOS(mean opinion score) 등을 이용하여 청취실험을 진행하여야 한다. 그리고 새로운 무대 배치를 시도하거나 새로운 형태의 공연에 대한 연구를 직접 진행하는 사람들이 이 소프트웨어를 이용하여 가상의 악기 배치 결과를 얻고 실제로 무대에 악기를 배치하여 연주한 결과를 비교하여 유용성을 검증하는 과정이 필요하다. 이를 위해서는 사용자가 필요한 공연장 환경과 악기 음원을 선정하고 소프트웨어에 적용시켜야 유용성을 높일 수 있다.

시뮬레이션 소프트웨어의 정확성과 효율성을 높이기 위해서는 보다 정확한 임펄스 응답 측정을 통하여 시뮬레이션의 정확성을 높이는 연구와 연산에 사용되는 알고리즘의 최적화에 관한 연구가 진행되어야 한다. 임펄스 응답 측정 시 무대 위에서 사인 스위프 신호를 발생시킬 때 무대 공간 전체에 소리를 전달하기 위해서 12면체 스피커를 사용하는 것이 바람직하며, 녹음 시에 더미 헤드, 측정용 마이크 등 전문 측정장비를 사용하여야 보다 정확한 임펄스 응답을 얻을 수 있다. 정확한 임펄스 응답 측정이 이루어짐과 동시에 시뮬레이션에 사용되는 악기 음원을 잔향이 없고 분리도 높게 녹음해 사용해야 시뮬레이션의 정확성을 높일 수 있기 때문에 보다 질 좋은 악기 음원의 확보도 중요하다. 또한 소프트웨어에 사용되는 컨볼루션 연산 알고리즘의 최적화에 대한 연구를 통해 연산의 효율을 높이는 것도 중요한 과제이다.

참고 문헌

- [1] M. R. Schroeder, D. Gottlob, and K. F. Siebrasse, "Comparative Study of European Concert Halls: Correlation of Subjective Preference with Geometric and Acoustic Parameters," *J. Acoust. Soc. Am*, Vol.56, pp. 1195-1201, 1974.
- [2] V. L. Jordan, "A Group of Objective Acoustical Criteria for Concert Halls," *Applied Acoustics*, Vol.14, pp. 253-266, 1981.
- [3] M. R. Schroeder, "Progress in architectural acoustics and artificial reverberation: Concert hall acoustics and number theory," *J. Audio. Eng. Soc*, Vol.32, pp. 194-203, 1984.
- [4] L. L. Beranek, "Concert Hall Acoustics," *J. Acoust. Soc. Am*, Vol.92, pp. 1-39, 1992.
- [5] 정대업, 최석원, "한국전통음악공연장의 건축 음향특성에 관한 연구 I," 대한건축학회 논문집, 제21권, 제3호, pp. 181-189, 2005.
- [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*, Vol.117, No.1, pp. 232-239, 2005.
- [7] K. K. Heinrich, "Auralization of Impulse Responses Modeled on the Basis of Ray-Tracing Results," *J. Audio. Eng. Soc*, Vol.41, pp. 876-880, 1993.
- [8] A. J. Berkhout and D. de Vries, "Acoustic Holography for Sound Control," *86th Audio, Eng. Soc. Convention*, preprint 2801, 1989.
- [9] 임태성, 윤철환, 홍완표, 류대현, "ARM720T core를 이용한 실시간 입체음향 변환기 구현," 한국멀티미디어학회 추계학술발표논문집, pp. 421-424, 2002.
- [10] JM. Jot, "Real-time Spatial Processing of Sounds for Music, Multimedia and Interactive Human Computer Interfaces," *Multimedia Systems*, Vol.7, pp. 55-69, 1999.
- [11] V. Pulkki, "Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning," *J. Audio. Eng. Soc*, Vol.45, pp. 456-466, 1997.

- [12] W. D. Haines, J. R. Vernon, and R. B. Dannenberg, "Placement of Sound Sources in the Stereo Field Using Measured Room Impulse Responses," *CMMR 2007*, pp. 276-287, 2008.
- [13] Wikipedia, Convolution Reverb, http://en.wikipedia.org/wiki/Convolution_reverb.
- [14] Y. Li and P. F. Driessen, "Spatial Sound Rendering Using Measured Room Impulse Responses," *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, pp.432-437, 2006.
- [15] A. Farina, "Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-sine Technique," *J. Audio. Eng. Soc.*, Vol.48, p. 350, 2000.
- [16] A. Torger and A. Farina, "Real-time Partitioned Convolution for Ambiophonics Surround Sound," *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, pp. 195-198, 2001.
- [17] J. O. Smith, *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) - with Audio Application Second Edition*, W3KPublishing, 2007.
- [18] Wikipedia, ImpulseResponse, http://en.wikipedia.org/wiki/Impulse_response.
- [19] M. R. Schroeder and B. F. Logan, "Colorless artificial reverberation," *IRE Transactions*, vol.AU-9, pp. 209-214, 1961.
- [20] J. Stautner and M. Puckette, "Designing Multi-channel Reverberators," *Computer Music Journal*, Vol.6, No.1, pp.52-65, 1982.
- [21] J. O. Smith, "A New Approach to Digital Reverberation Using Closed Waveguide Networks," *Proc. 1985 ICMC*, pp. 47-53, 1985.
- [22] J. O. Smith, *Physical Audio Signal Processing for Virtual Musical Instruments and Audio Effects*, W3KPublishing, 2008.
- [23] J. Edwards, "Acoustic Room Response Analysis," *TechOnline*, <http://www.techonline.com/showArticle.jhtml?articleID=192200393>
- [24] E. Berdahl and J. O. Smith, "Swept Sine Impulse Response Measurement," *Connexions*, 2008, <http://cnx.org/content/m15945/latest/>
- [25] WG. Gardner, "Efficient Convolution without Input-output Delay," *J. Audio. Eng. Soc.*, Vol. 43, pp. 127-136, 1995.
- [26] M. Frigo and S. G. Johnson, "The Design and Implementation of FFTW3," *Proceedings of the IEEE*, Vol.93, No.2, pp. 216-231, 2005.



김 완 중

2004년 KAIST 생명과학과 학사
2004년~현재 KAIST 문화기술
대학원 석박사통합과정
관심분야: 음성/음향 신호 처리,
청각화 기술



이 기 범

2008년 KAIST 전산학과 학사
2008년~현재 KAIST 문화기술
대학원 석사과정
관심분야: 음성/음향 신호처리,
인터넷 응용, 멀티미디어
컨텐츠 응용기술



유 원 대

2006년 한동대학교 기계제어공학
부 학사
2008년~현재 KAIST 문화기술
대학원 석사과정
관심분야: HCI, 음성/음향 신호
처리, 미디어 아트



여 운 승

1995년 서울대학교 전기공학과
학사
1999년 서울대학교 전기공학과
석사
2002년 University of California
at Santa Barbara, Media
Arts and Technology
Program, M.S



김 근 형

2008년 KAIST 산업공학과 학사
2010년 KAIST 문화기술대학원
석사
2010년~현재 KAIST 문화기술
대학원 박사과정
관심분야: 이미지 청각화

2008년 Stanford University, Department of Music,
Center for Computer Research in Music and
Acoustics, Ph.D.
2008년~현재 KAIST 문화기술대학원 조교수
관심분야: 이미지 청각화, 멀티미디어 컨텐츠 응용기술,
음성/음향 신호처리