실내음향 파라미터 추정 시뮬레이터

유재헌, *염태선, **김인철
서울시립대학교 멀티미디어신호처리 연구실
ujaeheon@gmail.com, *xotjs0504@uos.ac.kr, **rin@uos.ac.kr

A Simulator for Estimating Room Acoustic Parameters

JaeHeon Yu, *TaeSun Yeum, *RinChul Kim
Multimedia Signal Processing Lab., University of Seoul

요 약

본 논문에서는 Matlab 공개 toolbox 인 k-wave 를 사용하여 실내 음향 파라미터를 측정하는 방법을 제시한다. 첫째, 본 논문에서 제시한 k-wave 를 이용한 방법의 유효성을 검증하기 위해, k-wave 로 얻은 실험값과 [1]에서 제시한 실제 실내에서 마이크를 통하여 측정된 값을 비교하였다. 그 결과 k-wave 를 사용하였을 때 잔향 시간은 [1]과 매우 유사하게 측정이 되었고 D_{50} 값의 오차는 평균 5.2%로 측정되었다. 따라서 k-wave 를 이용하면 실제 측정값을 대체할 수 있는 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

1. 서론

실내 음향 측정을 처음 시도한 사람은 19 세기 후반 Sabine[2]이란 사람으로 하버드 대학에서 실험을 시작하였다. Sabine 은 파이프 오르간과 초시계를 사용하여 잔향시간을 측정하였다. 이처럼 초기의 실내음향 측정은 사람의 귀와 초시계로 이루어졌지만 컴퓨터의 소형화, 오디오 장비의 개발 등 기술 향상으로 측정이 간편해지고 측정 결과의 정확도 또한 높아지고 있다. 또한 잔향 시간뿐만 아니라 다양한 평가 파라미터들이 생겨나고 있다.

현재에는 직접적인 실내 음향 측정 방법으로 국제 규격인 ISO 3382[3]가 제정되었고 우리나라에도 이에 따른 KS 규격인 KS F 2864[4]가 제정되었다. 여기에는 측정 음원부터 시작하여 측정 위치, 측정 주파수, 측정 거리, 잔향시간 등과 같은 실내 음향 평가 파라미터들을 규정하고 있다.

실내 음향 파라미터를 직접적으로 측정하는 방법 외에도 컴퓨터를 사용하여 실내의 음향 환경을 모의실험을 할 수 있는 도구들이 많이 개발 되어있다. 이 중 가장 대표적인 것이 EASE[5]와 ODEON[6]이라는 음향 측정 도구이다. 이 도구들은 음선 추적법(ray-tracing)[5][6]이라는 방법을 사용한다. 이는 실내에서 전파되는 음의 상태를 재현하기 위한 방법으로써 음원 위치에서는 전 공간에서 수십 수백가닥의 음선을 방사한 후, 음선의 반사되는 상황을 시간, 에너지, 입사방향에 대한 정보를 순차적으로 추적해가는 계산법이다.

본 논문에서는 matlab 을 사용한 컴퓨터 모의실험으로 실내 음향 파라미터들을 측정하고자 한다. 음향에 관련된 matlab toolbox 중 2009 년에 Breadley Treeby 외 2 인이 배포한 open source toolbox 인 k-wave[7]가 있다. k-wave 는 주로 광음향(photoacoustic), 초음파(ultra-sound)등을 연구하기 위하여 만들어진 toolbox 이다. k-wave 를 이용한 파라미터 추정 방법의 유효성을 확인하기 위해, 본 논문에서 k-wave 로 얻은 실험값과 [1]에서 얻은 실제 측정값과 비교한다. 본 실험에서는 잔향시간(reverberation time)과 음성 명료도를 판단할 수 있는 D_{50} 을 음향 평가 파라미터로 사용하였다.

2. 실내 음향 측정 요소

실내 공간의 잔향 시간 및 관련 음향에 관련된 측정 방법은 ISO 3382 [3]에 의거하여 규정하고 있고 우리나라의 KS 규격은 KS F 2864[4]가 이에 대응한다.

실내에서 음원을 방사시키면 벽, 천장, 그리고 바닥 등에서 음이 반사되며 이 반사음이 서로 중첩되어 아주 복잡한 파형이 형성된다. 음원 발생 후에 청취자에게 제일 먼저 직접음(direct sound)이 도래하고, 계속해서 천장과 벽면으로부터 1 차반사음, 2 차 반사음 등이 도래한다. 반사음 패턴에서 직접음 도래 후 50ms 까지 도달하는 반사음을 초기 반사음(early reflections)이라고 한다. 초기 반사음은 직접음을 보강하여 명료도와 음량감을 높이는 역할을 한다. 초기 반사음 후 도달하는 음을 잔향음(reverberation sound)이라고 한다. 잔향시간은 음원이 정지된 후에 정상 상태의 음의 에너지가 10^{-6}까지 떨어질 때까지의 시간 또는 음압 레벨이 −60dB 떨어질 때까지의 시간으로 정의된다. 대표적인 잔향시간을 계산하는 공식은 Sabine 이 제안한 것이다. Sabine 에 의하면 잔향시간은 실내 체적 V(단위: m^3) 에 비례하고 실내의 표면적의 합 S(단위: m^2)에 반비례하게 다음과 같이 표현된다.

$$RT = \frac{0.161V}{S\bar{\alpha}} \quad (1)$$

여기서 $\bar{\alpha}$는 평균 흡음률(absorption ratio)이다.

명료도는 직접음과 잔향음 간의 에너지 비로 나타낸다. 이 중 직접음 도달 후 50ms 까지의 에너지와 전체 에너지의

비를 취해, Deutlichkeit(Definition)라고 하는 D 를 다음과 같이 정의 한다.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \quad (2)$$

여기서 무한대까지의 적용은 실제로는 측정된 잔향시간 RT 에 $RT/5$ 를 더한 값까지의 적분으로 근사화된다. D_{50} 에서 50ms 까지의 초기 반사음은 음향 효과상 직접 음의 크기를 보강하고 명료도를 높여주는 작용이 있다고 한다. 따라서 D_{50} 이 좋아지기 위해서는 짧은 지연 반사음이 많아야 하는데, 즉 잔향시간이 짧고, 실의 체적이 비교적 작고, 청취자들이 음원에 충분히 가까워야 한다. 실내의 바람직한 D_{50} 값은 연극이나 강연 등의 경우는 55~60%, 음악회장에서 30~40% 정도이다.

4. 실험 및 결과

본 절에서는 k-wave 라는 matlab toolbox 를 소개하고 k-wave 로 얻은 실험값 [1]에서 제시한 실측 값과 비교한다. 이 과정을 통해 k-wave 를 이용한 실내음향 측정방법의 유효성을 검증한다.

k-wave[7]는 음파 방정식을 이용하여 음파 필드(acoustic wave field)를 계산하는 matlab toolbox 이다. k-wave 는 1 차원부터 3 차원까지 세 가지의 시뮬레이션 함수들을 사용한다. 본 논문에서 사용하는 k-wave 방법의 실효성을 검증하기 위해 [1]에서 제시된 학교교실에서의 D_{50} 의 실측 값과 비교하겠다. [1]에서 실험이 적용된 실내 공간의 제원 및 측정환경은 표 1 에 제시한 바와 같다.

표 1. 교실의 제원 및 측정환경.

폭	7m	음압(1m)	90(W)
길이	9m	음원위치	교실천정 중앙
높이	2.5m	RT(1kHz)	0.78(sec)

표 1 을 참조하면 [1]의 실험이 적용된 실내 공간은 앞면의 길이 7[m], 옆면의 길이 9[m], 높이가 2.5[m]인 전형적인 중,고교 교실이다. 참고문헌[1]에서 음원은 실내 공간의 정중앙의 천장(높이 2.5[m])에 위치한다. 그리고 측정 위치 20 곳에서 D_{50} 값을 기록하였다. 본 논문에서는 편의상 전면에서 후면으로 가면서 각각 1 열, 2 열, 3 열, 4 열로 분류하고, 측정 위치 각 열에서 왼쪽에서 오른쪽으로 가면서 1, 2, 3, 4, 5 번으로 지정한다. 각 측정 위치는 열과 열 사이가 1.5[m], 행 과 행 사이는 1.2[m]이다. 그리고 측정 위치의 첫 번째 열은 전면에서 3.1[m] 떨어져 있고, 첫 번째 행은 왼쪽 측면에서 0.9[m] 떨어져 있다. 각 측정 위치에서는 1.2[m]높이에 무지향성 마이크가 설치되어 소리를 수집한다.

1 kHz 신호에 대해 비교논문에서의 RT 값은 0.78[s]이었고 k-wave 로 실험하였을 때의 RT 값은 0.8[s]로 측정되어 두 방법에서의 RT 값이 거의 같았다. 표 2 는 실측된 D_{50} 과 k-wave 의 D_{50} 의 평균값을 나타낸 것이다. 오차는 약 5.2%로 측정되었다. 만약 교실에 대한 환경을 보다 정확히 알 수 있었다면 더 작은 오차를 얻을 수 있었을 것으로 기대된다. 그러나 오차의 크기 및 D_{50} 값의 각 열에서의 패턴 등을 비교해보면, 본 논문에서 얻은 D_{50} 의 실험값은 [1]에서 얻은 실험값과 유사함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 수행한 k-wave 를 이용하여 측정한 D_{50} 값은 실제 값과 매우 유사한 값인 것으로 판단된다.

표 2. [1]의 D_{50} 과 측정된 D_{50} 비교.

	[8]	k-wave 실험값	오차 (%)
1 열	75.8	80.5	6.2
2 열	81.0	85.1	4.9
3 열	77.0	80.5	4.5
4 열	70.8	74.3	4.6
전체	76.2	80.1	5.2

5. 결론

본 논문에서는 matlab 공개 tool box 인 k-wave 로 실내 음향 환경을 평가 할 수 있음을 보인다. k-wave 의 검증을 위하여 실측 값이 기술되어있는 비교 논문[1]을 바탕으로 k-wave 를 통해 얻은 결과값의 유효성을 검증하였다. 비교 논문[1]의 20 곳의 측정 위치에 대한 D_{50} 값을 k-wave 에서 얻은 실험값이 유사함을 알 수 있다. 이에 본 논문에서 수행한 D_{50} 값은 실제 값과 매우 유사한 값인 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 주문기, 오양기, “학교 교실에서 스피커의 위치 및 출력 변화에 따른 청취환경 변화에 관한 연구”, 한국건축친환경설비학회논문집, 5 권 4 호, 217-223 쪽, 2011.

[2] 강성훈, 음향기술총론, 사운드미디어, 경기도, 2013.

[3] ISO 3382, Acoustics-Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, 1997.

[4] KS F 2864, 실내 공간의 잔향시간과 음향변수 측정 방법, 2002.

[5] EASE Version 4.3, User’s Guide & Tutorial, Renkus-Heinz, 2009.

[6] ODEON Version 12, User manual, 2013.

[7] k-wave, A MATLAB toolbox for the time domain simulation of acoustic wave fields User Manual, 2012.