

음향적으로 결합된 공간의 잔향특성변화에 관한 연구

A Study on the Reverberation Characteristics of Coupled Spaces

정 대 업*
Jeong, Dae-Up

김 지 영**
Kim, Ji-Young

최 영 지***
Choi, Young-Ji

요 약

본 연구는 개구부를 통해 음향적으로 결합된 공간에서의 잔향특성변화를 축소모형을 이용하여 살펴보았다. 대상공간의 음향적 결합은 정방형의 개구부를 통하여 이루어졌으며, 개구부의 크기, 부실의 흡음력 및 위치를 변화시켜가며 실의 음향특성변화를 측정·분석하였다. 연구결과 동일한 체적을 가진 부실을 통해 주실의 음향특성을 조절하는 경우 부실의 흡음력을 주실보다 현저하게 낮게 하는 것이 넓은 범위의 음향조절이 가능하며, 음향특성을 단계적으로 조절하고자 하는 경우 주실보다 높은 흡음력을 가진 부실을 이용하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 잔향부실의 경우 음원 측에 위치시키는 것이 효과적이며, 개구율이 6.25% 이상일 때부터 주실의 음향특성에 중요한 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 그러나 개구율이 25% 이상으로 증가되면 개구율 증가에 따른 주실의 유의적인 음향특성변화는 더 이상 나타나지 않았다. 흡음부실이 결합되는 경우 음원으로부터 멀리 위치시키는 것이 효과적이었으며, 개구율 3.13% 이상일 때부터 주실의 음향특성변화가 가능하였다.

Abstract

In this study, the reverberation characteristics of coupled spaces were investigated using a scale model. Two rooms were connected through an acoustically transparent opening known as an aperture. The acoustic characteristics of the coupled room by varying three parameters, the aperture opening size, the absorption ratio between the two rooms and the locations of the secondary room, were measured and analysed. The results indicated that a reverberant secondary room produced large variations of the acoustics in the main room and an absorptive secondary room was effective to provide systematic control of the acoustics in the main room. The reverberant secondary room should be located at the rear of the stage and the aperture opening ratio over 6.25% produced large variations of the acoustics in the main room. However, the aperture opening ratio over 25% had no effect on variations of the acoustics in the main room. The absorptive secondary room should be located at the rear of the audience areas and the aperture opening ratio over 3.13% produced large variations of the acoustics in the main room.

키워드 : 음향적 결합, 축소모형, 개구부, 잔향특성, 잔향부실, 흡음부실

Keywords : coupled spaces, scale model, aperture, reverberation characteristics, reverberant secondary room, absorptive secondary room

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 공연예술문화의 부각으로 인하여 국내 공연장에 대한 수요가 증대되고 있음은 물론 양질의 공

연장을 필요로 하고 있는 실정이다. 각 지역별로 공연장 건설에 박차를 가하고 있지만 예산확보와 관련하여 음악연주에서 강연에 이르기까지 여러 장르의 공연을 두루 수용할 수 있는 다목적 공연장의 건설이 현저하게 나타나고 있다. 다목적 공연장의 경우 공연의 종류가 다양한 만큼 여러 공연에 적합한 실의 음향적인 가변성확보가 필수적이다. 다목적 공연장은 연극이나 뮤지컬과 같은 공연에 필요한 무대장치를 수용하기 위한 플라이트타워(fly tower)공간

* 정희원 · 전북대학교 건축도시공학부 부교수

** 전북대학교 건축도시공학부 석사

*** 교신저자, 전북대학교 건축도시공학부 연구교수

Tel : 063-270-2278 Fax : 063-270-2285

E-mail : youngji@chonbuk.ac.kr

이 무대의 프로시니엄(proscenium)이란 개구부를 경계면으로 객석과 음향적 결합(acoustic coupling)을 형성하고 있다. 이와 같이 개구부를 통해 음향특성이 상이한 음장과 결합하는 공간에서의 음향특성은 일반적인 단일공간에서 일어나는 선형적인 음감쇠패턴(exponential decay patterns)과는 다른 이중 혹은 삼중의 비선형적인 음감쇠패턴(non-exponential decay patterns)을 보이고 있어 경계면의 조건변화에 따른 음향특성의 예측 및 분석이 필요하다. 특히 플라이트워의 규모는 공연장의 객석규모와 흡사하거나 큰 경우에는 객석의 1.5~2배에 달하고 있어 프로시니엄을 통한 객석과의 음향적인 결합이 객석의 음향에 미치는 영향은 초기 음향설계단계에서 검토해야 할 중요한 사항이다. 이에 본 연구에서는 축소모형을 이용하여 개구부를 통해 음향적으로 결합된 공간을 대상으로 개구부의 크기, 부실의 흡음특성 및 위치를 달리하여 세 가지 변수조건에 따른 물리적 음향특성의 변화를 예측하여 coupled space를 이용한 다목적 공연장의 음향설계 시 활용 가능한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

1.2 연구범위 및 방법

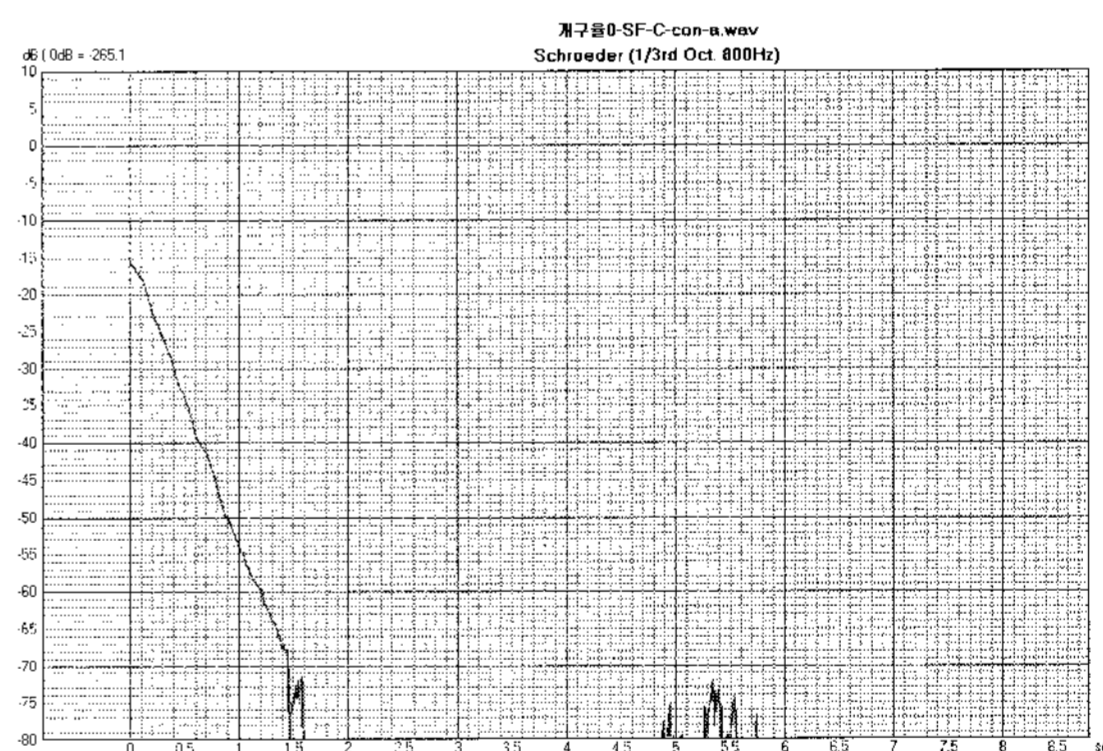
본 연구에서는 개구부를 통해 음향적으로 결합된 공간에서의 음향특성변화를 물리적 음향지표를 바탕으로 살펴보고자 하였다. 대상공간의 음향적 결합은 정방형의 개구부를 통하여 이루어졌으며, 개구부의 크기, 부실의 흡음특성 및 위치를 변화시켜가며 잔향특성을 측정·분석하였으며, 평가파라미터는 잔향시간(T30)과 초기감쇠시간(EDT)을 대상으로 하였다.

2. 기존연구사례

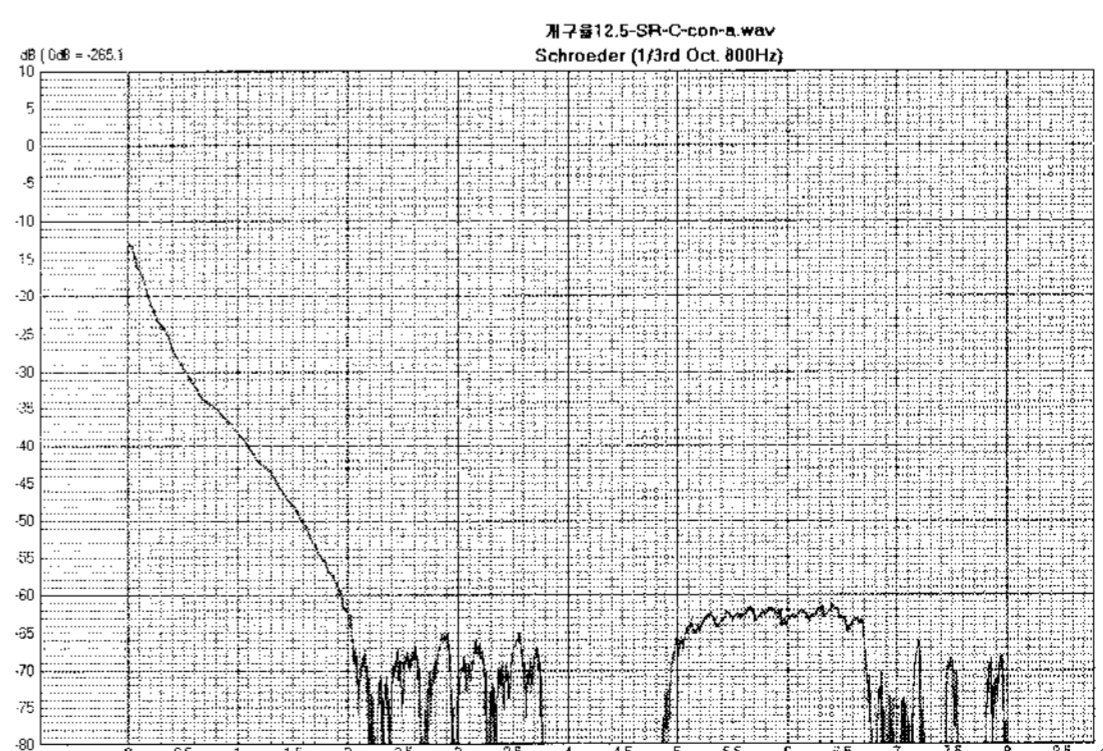
coupled space라 함은 음향적으로 상이한 두 공간이 개구부를 경계면으로 결합하는 공간을 일컫는 것으로 실외로 난 창, 객석과 플라이트워 간의 프로세니움 개구부, 발코니 그리고 가변음장의 조성을 목표로 설치된 부가잔향실 등을 대표적인 예로 들 수 있다. coupled space에서는 두 공간을 연결하는 개구부의 경계조건에 따라 단일공간에서 나타나는

음감쇠패턴과는 다른 이중 혹은 삼중의 감쇠곡선(double or triple decay curves)을 나타내게 되어 (<그림 1> 참조) 이상적인 확산음장을 가정한 기존의 음장예측방법으로는 정확한 예측에 한계가 있다. 또한 두 공간이 음향적으로 결합된 경우 주실과 부실의 크기, 개구부의 크기, 주실과 부실의 흡음력 그리고 음원과 수음점의 위치 등의 실의 여러 가지 건축적인 요소에 의해 공간의 음향특성이 달라지므로 이에 따른 정확한 연구결과가 필요하다. 따라서 coupled space의 비선형적인 음감쇠패턴을 보다 정확하게 예측할 수 있는 방법에 관한 연구가 지속적으로 진행되어 왔으며^{1~7)}, 최근에는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 coupled space의 음장예측에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다^{8~11)}.

초기 coupled space의 음장예측연구는 통계적 접근(statistical approach)을 이용한 연구가 주를 이루었는데 통계적 접근방법은 대상공간이 확산공간이며 모든 벽의 흡음률이 동일하다는 전제조건에서



(a) 단일 공간



(b) 두 공간이 결합된 공간

<그림 1> (a)단일공간과 (b)두 공간이 결합된 공간에서 나타나는 음감쇠패턴의 예

정확한 예측이 가능하다. Eyring¹⁾은 coupled space에서 주실과 부실의 흡음력, 개구부의 크기 그리고 음원과 수음점의 위치의 세 가지 변수가 주실의 음장변화에 미치는 영향에 관해 규명하였다. 그 결과, 흡음력이 높고 체적이 큰 주실과 상대적으로 흡음력이 작고 체적이 작은 부실이 음향적으로 결합하였을 경우 이중감쇠현상은 두드러지게 나타났다. 또한 주실의 흡음력을 고정하고 부실의 흡음력을 단계적으로 변화시킨 결과, 부실의 흡음력이 0.07 이하일 때 주실의 이중감쇠현상이 두드러지게 나타났다. 마지막으로 흡음력이 높은 실에서는 음원과 수음점이 동일한 공간에 위치할 때 이중감쇠현상이 나타났으며, 개구부의 크기가 작은 경우 주실의 이중감쇠에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다. Eyring은 coupled space에서 건축적인 요소가 공간의 음향특성에 미치는 영향에 관해 선두적인 연구를 시도하였으나 대상공간이 확산음장이고 모든 벽의 흡음률이 동일한 이상적인 공간이라는 전제하에 이루어진 연구에서 그 한계점이 있다. Cremer²⁾와 Kuttruff³⁾는 개구부의 크기를 변수로 주실의 음장변화를 통계적 기법으로 예측하고자 하였는데, 부실의 흡음면적이 개구부의 크기에 비해 상대적으로 작을 경우 이중감쇠는 두드러지게 나타난다고 보고하였다. Cremer²⁾는 단일공간과 음향적으로 결합된 두 공간을 구별하는 방법으로 음향적 결합계수(coupling factor)를 제안하였는데, 이것은 개구부와 부실의 면적비와 부실의 흡음계수를 토대로 한 것이다. 부실의 흡음면적이 개구부의 크기보다 클 경우 개구부는 열린 창문과 같이 간주되어 낮은 음향적 결합효과를 나타내며, 반대로 부실의 흡음면적이 개구부의 크기보다 작을 경우 두 실은 단일공간으로 간주되어 높은 음향적 결합효과를 나타내었다. Kuttruff³⁾는 부실의 면적에 비해 상대적으로 개구부의 크기가 작아야 이중감쇠를 생성시킬 수 있다고 보고하였는데, 이것은 Eyring¹⁾의 연구결과와 상반되는 것이다. 개구부의 크기가 주실의 이중감쇠현상에 미치는 영향에 관해서는 최근 Ermann⁴⁾에 의해 보다 자세하게 연구되었는데 Ermann은 주실에 대한 개구부의 크기가 0.1%~1.0%에서 이중감쇠가 높게 나타났으며, 개구부의 크기가 0.5% 일 때 최고의 이중감

쇠를 나타내며, 개구부의 크기가 3.5%를 초과하면 이중감쇠가 나타나지 않는다고 밝혔다. 이 결과는 본 저자들의 이번 연구결과에서도 비슷하게 나타나는데 주실에 대한 개구부의 크기가 0.25%~1.97% 일 때 이중감쇠가 나타나며, 개구부의 크기가 3.94%를 초과할 경우 단일공간에서 나타나는 선형적인 음감쇠패턴을 나타내었다. Eyring¹⁾과 Kuttruff³⁾의 연구결과가 상반되게 나타나는 이유는 이중감쇠를 발생시키는 개구부의 크기의 정의에 따른 문제라고 유추될 수 있다. 즉, Ermann⁴⁾과 저자들의 본 연구결과에서도 보고되었듯이 개구부의 크기가 너무 작거나 일정크기를 초과하는 경우 이중감쇠에 영향을 미치지 않으므로 이중감쇠를 발생시키는 적절한 개구부의 크기가 명확하게 규명되어야 한다.

기존의 통계적 접근방식이 저주파수대역, 비확산음장(non-diffuse sound fields), 개구부의 경계면에서 음의 파동성에 의한 공간적인 압력변화 등을 고려할 수 없어 coupled space의 정확한 음장예측에 한계가 있다고 보고하였다⁵⁻⁷⁾. Summers¹⁰⁾는 기존에 제시된 통계적 방법을 보완하여 그 예측결과를 컴퓨터시뮬레이션을 이용한 예측결과와 비교하였다. 비교 결과, 음향적 결합정도가 높을수록 (high levels of coupling) 두 예측결과의 편차는 증가하였으며, coupled space가 균일한 흡음력을 가진 확산음장의 단일음장이라 가정할 때 두 예측법에 의한 예측결과는 유사할 것이라 밝혔다. Ermann⁴⁾은 통계적 접근방식과 음선추적법(ray tracing method)을 토대로 한 기하학적 방법(geometrical approach)을 이용하여 coupled space의 음장결과를 예측하여 비교·분석하였다. Ermann은 통계적 접근방식과 기하학적 방법을 이용하여 실제 홀에서 개구부의 크기를 변화시켜가며 음장을 예측하여 비교한 결과, 개구부의 크기에 따른 실내음장의 음감쇠는 일치하지 않으며 통계법을 이용하여 예측한 음향적 결합계수(coupling constant: RT/T_{15})가 기하학적 방법을 이용한 예측결과보다 상회한다고 보고하였다. Bradley 외⁹⁾는 부실과 주실의 체적과 흡음력 그리고 개구부의 크기를 변화시켜가며 실의 coupling coefficient (T_{30}/T_{15})를 컴퓨터시뮬레이션과 Bayesian 방법을 이용하여 비교분석하였다. 물리적 음향특성

평가결과, 주실에 커플링 된 부실의 체적이 증가할 수록 그리고 흡음력이 감소할수록 coupling coefficient 가 높게 나타났다. 또한 주관적 평가 결과, coupled space에서 지각되는 잔향감은 커플링 된 부실의 체적, 개구율, 음에너지 감쇠비가 커질수록, 그리고 Δ dB값이 작을수록 잔향시간을 길게 인지하는 것으로 보고하고 있다.

Nijs 외¹⁰⁾는 반쯤 오픈된 사무실 공간과 전시실과 같이 공간이 영구적인 벽체로 나누어진 coupled space 음장의 음향예측방법으로 음선법(ray tracing techniques)을 이용한 컴퓨터시뮬레이션의 정확성을 검증하기 위해 음압레벨(sound pressure level)을 토대로 그 예측결과를 축소모형을 이용한 예측결과와 비교하였다. 비교 결과, 컴퓨터시뮬레이션을 이용하여 coupled space 음장의 음향특성을 예측하는 경우 벽체의 적절한 흡음계수의 선정이 예측결과의 정확성에 큰 영향을 미치며, 단일음장의 음장예측에 비해 훨씬 많은 음선수를 사용하여야 그 예측결과는 측정결과와 오차가 적어진다고 밝혔다. 비록 Nijs 외¹⁰⁾의 연구결과는 저자들이 평가하고자 하는 대상공간과 달라 그 연구결과가 직접적으로 비교될 수는 없지만 coupled space 음장예측기법으로써 컴퓨터시뮬레이션의 타당성을 제시하는 연구라고 할 수 있다. Bradley 외¹¹⁾는 실제 음향적으로 결합된 홀을 대상으로 측정치와 컴퓨터시뮬레이션에 의한 예측결과를 물리적 음향지표(T30, T15, C80)를 토대로 비교하였다. 비교 결과, 잔향시간의 경우 중주파수 대역, 특히 1kHz 에서의 실측치와 예측치와의 오차는 JND(just noticeable difference)보다 낮다고 보고하였고, 음악적 명료도의 경우 저주파수 대역에서 실측치와 예측치와의 오차는 JND의 8배에 달한다고 보고하였다. Bradley 외¹¹⁾의 연구결과는 실제 coupled space 음장을 측정하여 예측결과와 비교한 것으로 컴퓨터시뮬레이션에 의한 예측결과의 정확성을 검증한 것으로 이 결과에 의하면 컴퓨터시뮬레이션기법은 저자들이 연구하고자 하는 coupled space 음장의 기초적인 거동특성예측에 적합한 방법이 아니라고 할 수 있다.

Coupled space의 음향특성예측에 있어 기존연구 사례에서 이용된 통계학적 접근방법이나 컴퓨터 시

뮬레이션의 결과물은 정확도면에서 많은 검증을 필요로 하고 있다. 이에 본 연구에서는 실제공간에서 이루어지는 음향적 현상과 음의 거동을 가장 정확하게 재현하고 예측할 수 있는 축소모형법을 이용하여 음향적으로 결합된 공간의 잔향특성을 예측하여 그 결과를 분석하고자 한다.

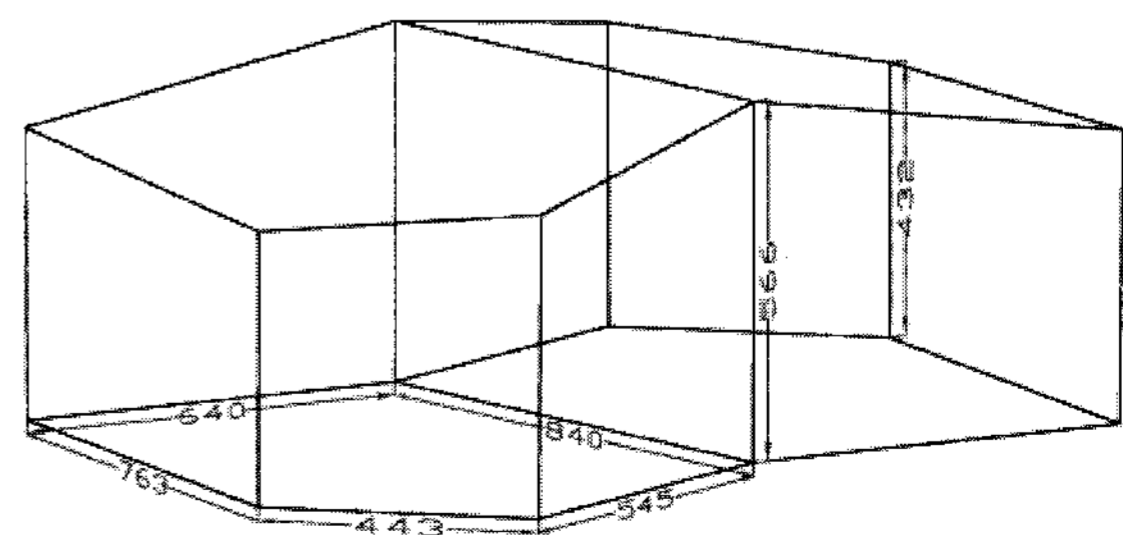
3. 실험개요

3.1 대상공간 및 실험내용

본 연구에서는 2 개실의 음향적 결합을 통한 가변음향조건 하에서, 두실의 경계면에 사용되는 개구부의 크기, 음원과의 관계에 따른 부실의 위치, 그리고 부실의 흡음력이 주실의 음향특성변화 및 분포에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 실의 규모나 형상차이에 따른 영향을 배제하기 위하여 본 연구에서는 동일규모와 형상의 확산음장 조건하에서 실험을 수행하고자 하였으며, 이를 위하여 국내에서 사용되고 있는 잔향실(체적: 300 m³)의 축소모형을 실험에 사용하였다. 실의 확산성확보는 확산체의 사용에 의해서도 이루어질 수 있으나 광대역 확산체의 사용은 본 연구목적에 맞는 흡음력의 조절에 어려움이 있어 고려하지 않았다.

<그림 2>는 본 연구에서 대상으로 한 공간의 형태 및 제원을 나타낸 것으로 국내 연구소 소재의 잔향실을 1/10 축적으로 축소하여 제작하였다. 축소모형의 주재료는 MDF 12mm로써 모든 내부표면은 바니스칠에 의해 균일한 반사면으로 마감되었으며 내부 흡음력의 변화는 내표면에 흡음재를 균일하게 부착하여 이루어졌다.

측정은 두 실 (주실과 부실)의 체적과 형상을 고정시킨 상태에서 개구부의 크기, 부실의 흡음력, 그



<그림 2> 대상공간의 형태 및 제원

<표 1> 개구부의 크기

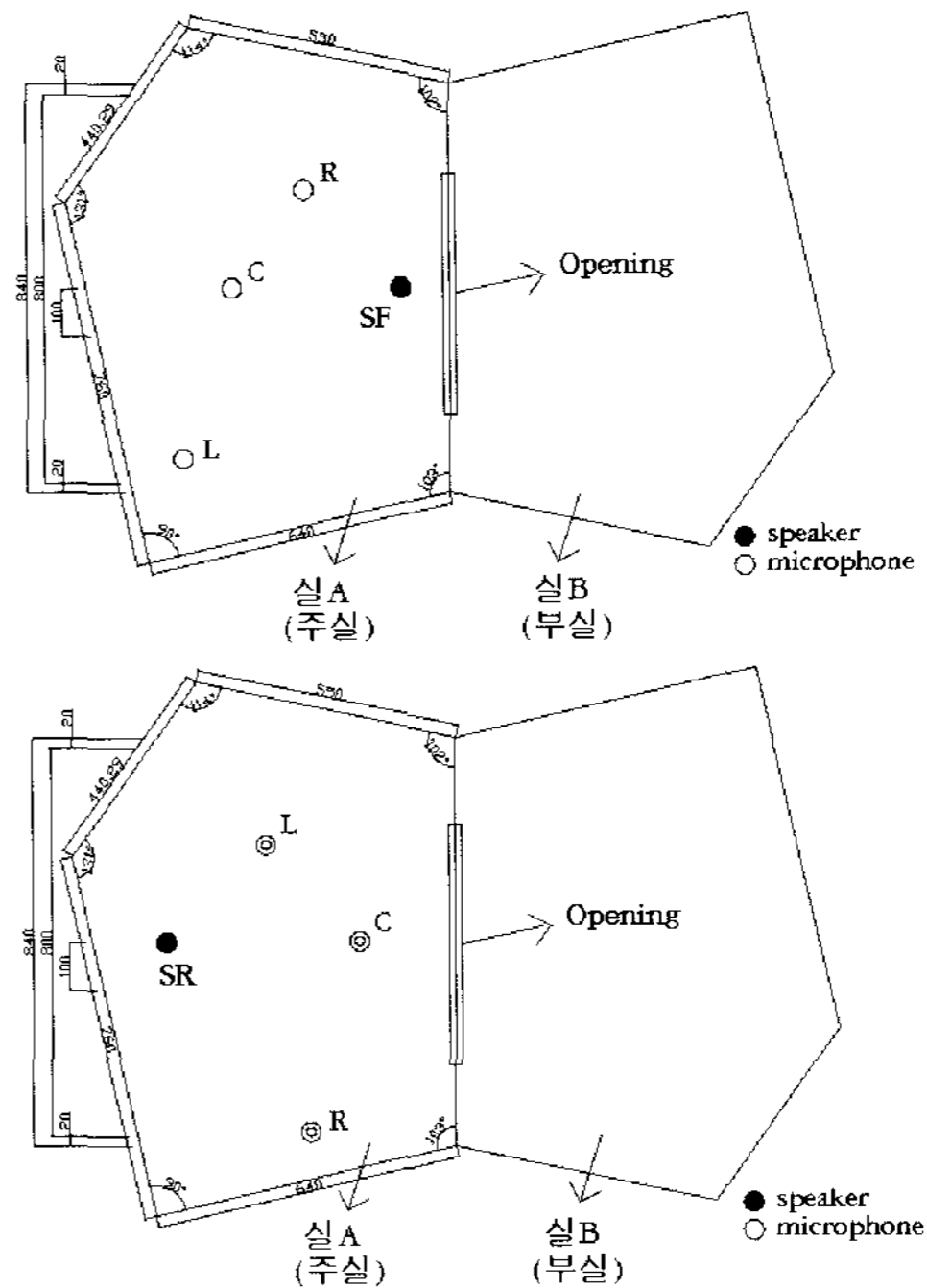
개구율	0%	1.56%	3.13%	6.25%	12.5%	25%	50%
개구부 면적 (실물환산시)	0m ²	0.74m ²	1.49m ²	2.99m ²	5.95m ²	11.90m ²	23.81m ²
주실면적대 비율	0%	0.25%	0.49%	0.99%	1.97%	3.94%	7.88%

리고 부실과 관련한 음원의 위치를 변화시킨 상태에서 주실에서의 물리적 잔향특성변화를 측정하였다. 개구율은 주실과 부실을 연결하는 정방형 개구부의 표면적을 나타내는 것으로 개구부의 전체표면적 47.62 m²(실물환산시)에 대한 백분율로 환산한 것이다. 주실과 부실을 연결하는 개구부는 주실의 표면적의 일부분이므로 개구율은 또한 주실의 전체표면적 302 m²(실물환산시)에 대한 백분율로 나타낼 수 있다. <표 1>에서 실험에 사용된 개구부의 크기를 개구부의 전체표면적으로 환산한 값과 주실의 전체표면적으로 환산한 값을 제시하였다. 기존연구⁴⁾에서 개구율을 주실의 전체표면적에 대한 비율로 표시하고 있어 기존연구와의 결과비교에서는 개구율을 주실면적대비율로 나타내도록 하였다. 개구율은 0%~50% 범위내에서 총 7개 경우 (0%, 1.5625%, 3.125%, 6.25%, 12.5%, 25%, 50%)를 대상으로 하여 측정을 실시하였다.

<그림 3>은 대상공간내의 음원 및 수음점의 위치를 나타낸 것이다. 음원은 개구부에 인접한 곳 (SF)과 멀리 떨어진 곳 (SR)의 2개소에 위치하였으며, 수음점은 잔향음장 (reverberant sound fields)내의 좌, 우, 중간 지점의 3개 지점을 선정하였다. 음원의 위치 변화는 부실의 위치변화로 동일시되어 간주될 수 있다. 직접음장과 잔향음장의 경계 (critical distance)는 식 (1)을 이용하여 산출하였다.

$$CD = \left(\frac{DF \cdot S \cdot \alpha}{16\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서, CD: critical distance
 DF: directivity factor
 S: 표면적
 α: 흡음계수



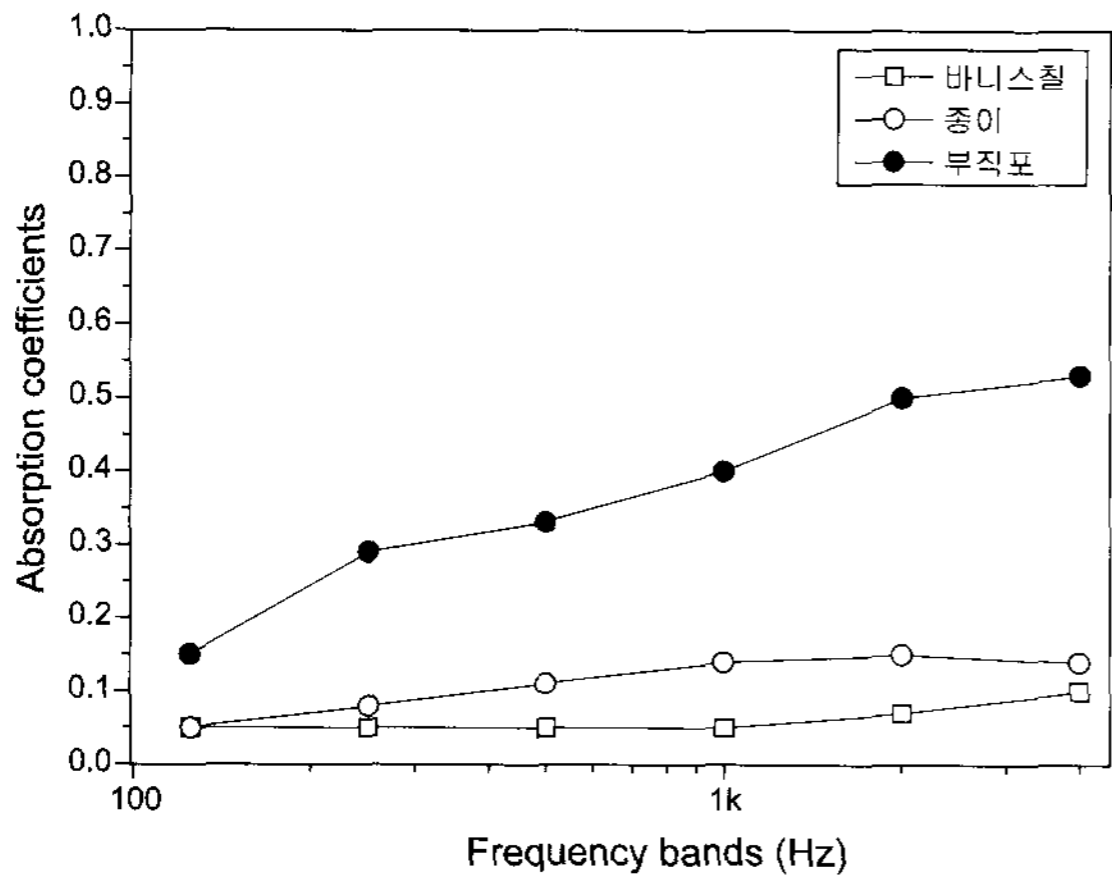
(SF: 개구부에 인접한 음원, SR: 개구부에서 먼 음원, L: 왼쪽 수음점, R: 오른쪽 수음점, C: 중앙 수음점)

<그림 3> 음원과 수음점의 위치

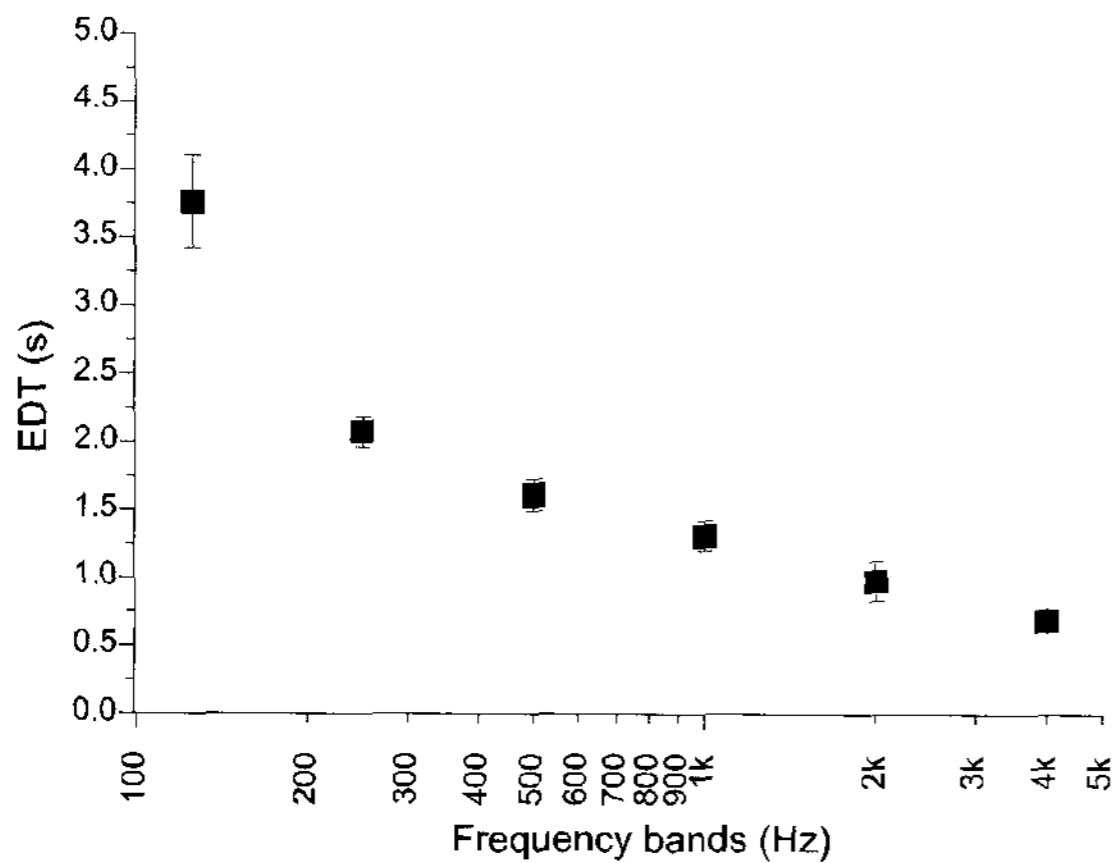
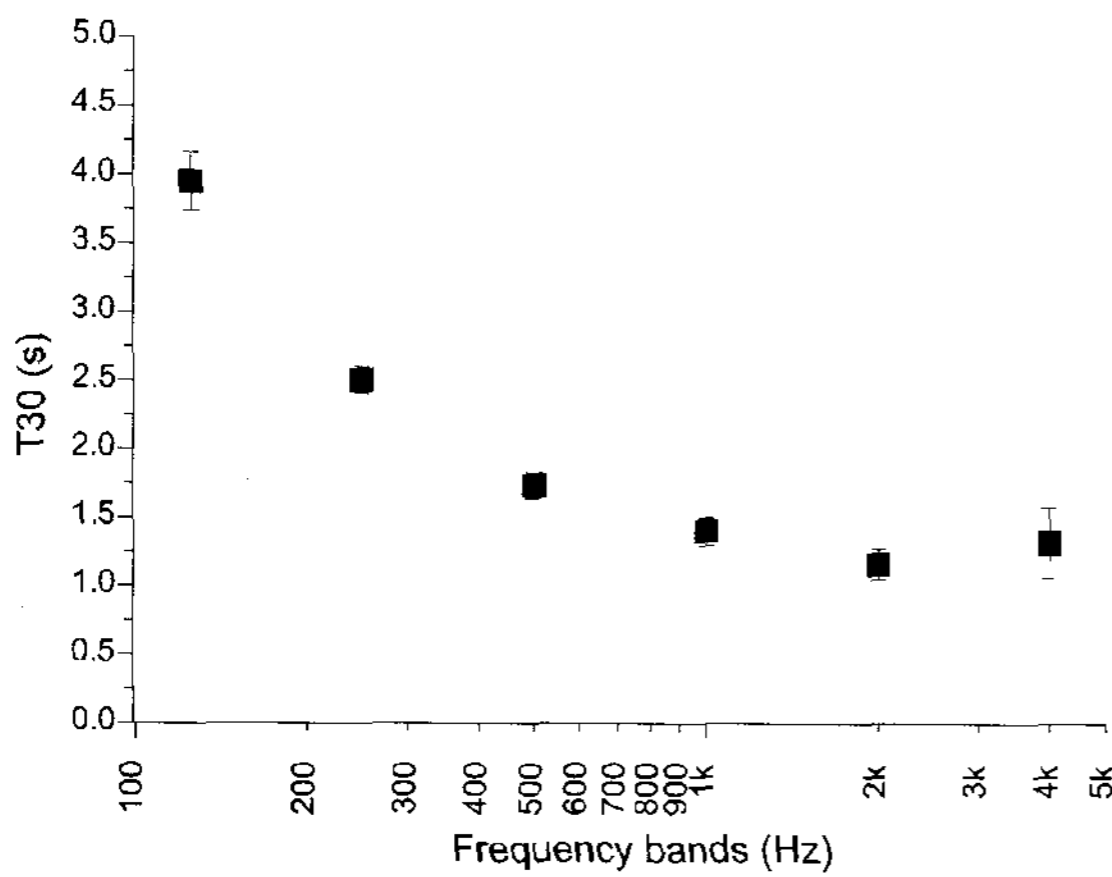
<표 2> 각 실의 잔향시간, 흡음력 비 및 마감재료

	잔향시간 (500Hz~1kHz)	흡음력 비	마감재료
주실	1.62 s	1	종이
잔향부실	3.73 s	0.43	바니스틸
흡음부실	0.53 s	3.06	부직포

음향적으로 결합된 두 공간에서 부실의 흡음력 변화에 따른 주실의 음향특성변화를 관찰하기 위해 부실의 흡음력이 주실보다 현저하게 작은 경우 (이하 잔향부실이라칭함)와 부실이 주실보다 높은 흡음력을 갖는 경우 (이하 흡음부실이라칭함)로 구분하여 각각의 조건에 따라 측정을 실시하였다. <표 2>는 각 실의 중주파수대역에서의 잔향시간, 흡음력 비 및 마감 재료를 제시한 것이다. 여기서 흡음력은 중주파수대역의 평균 흡음률을 표면적으로 곱한 것이며 흡음력 비는 주실의 평균 흡음률에 대한 각 부실의 평균 흡음률 비를 나타낸 것이다. 사용된 마감재의 평균흡음율은 1/10 축소잔향실에서 측정되었으며 <그림 4>에 나타내고 있다. <그림 5>은 부실과 음향적 결합이 없는 상태에서 주실의 음향특성을 측정·분석한 값을 주파수별로 평균하여 측



〈그림 4〉 1/10 축소잔향실에서 측정된 재료의 흡음률



〈그림 5〉 주실의 잔향특성분석결과 (공실상태)

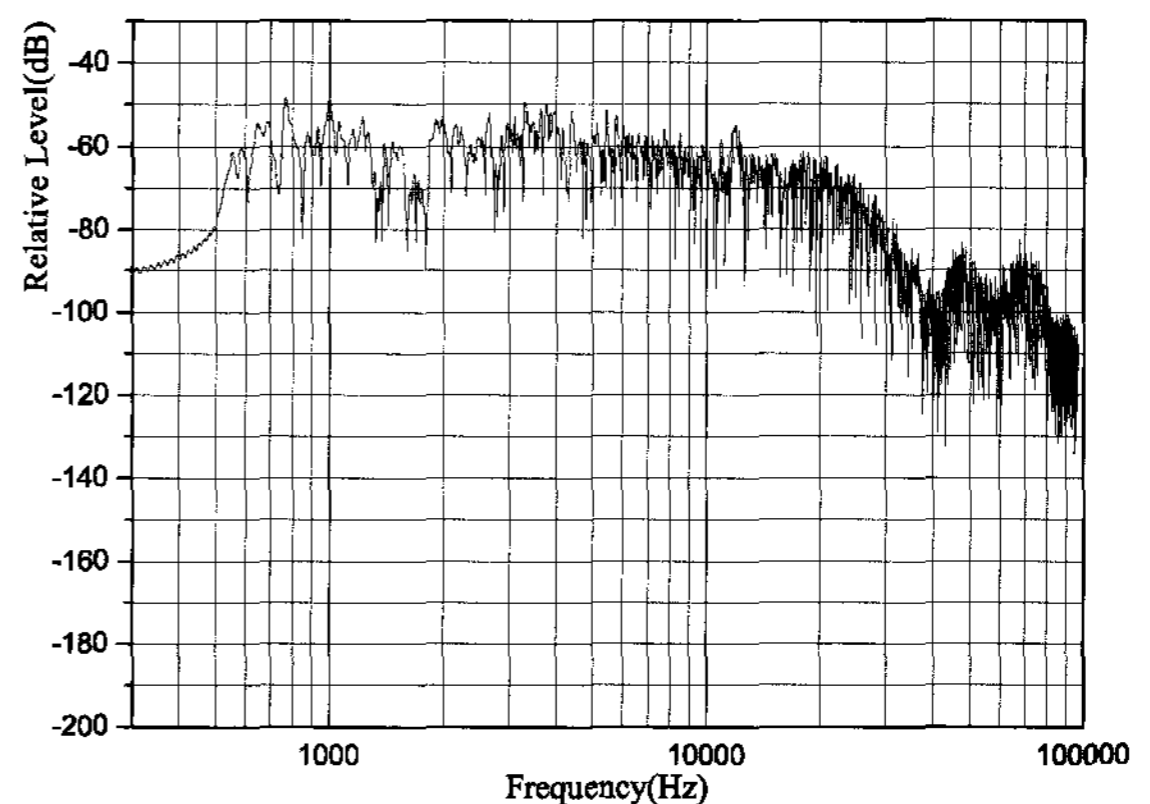
정위치별 표준편차와 함께 나타낸 것이다. 주실의 공실상태 잔향시간은 중주파수 기준으로 1.62초 정도로서 측정지점간의 편차는 거의 없는 것으로 나타났다으며, EDT는 중주파수 기준으로 1.62초 정도로서 잔향시간과 유사한 범위를 갖는 것으로 분석되었다.

3.2 실험방법

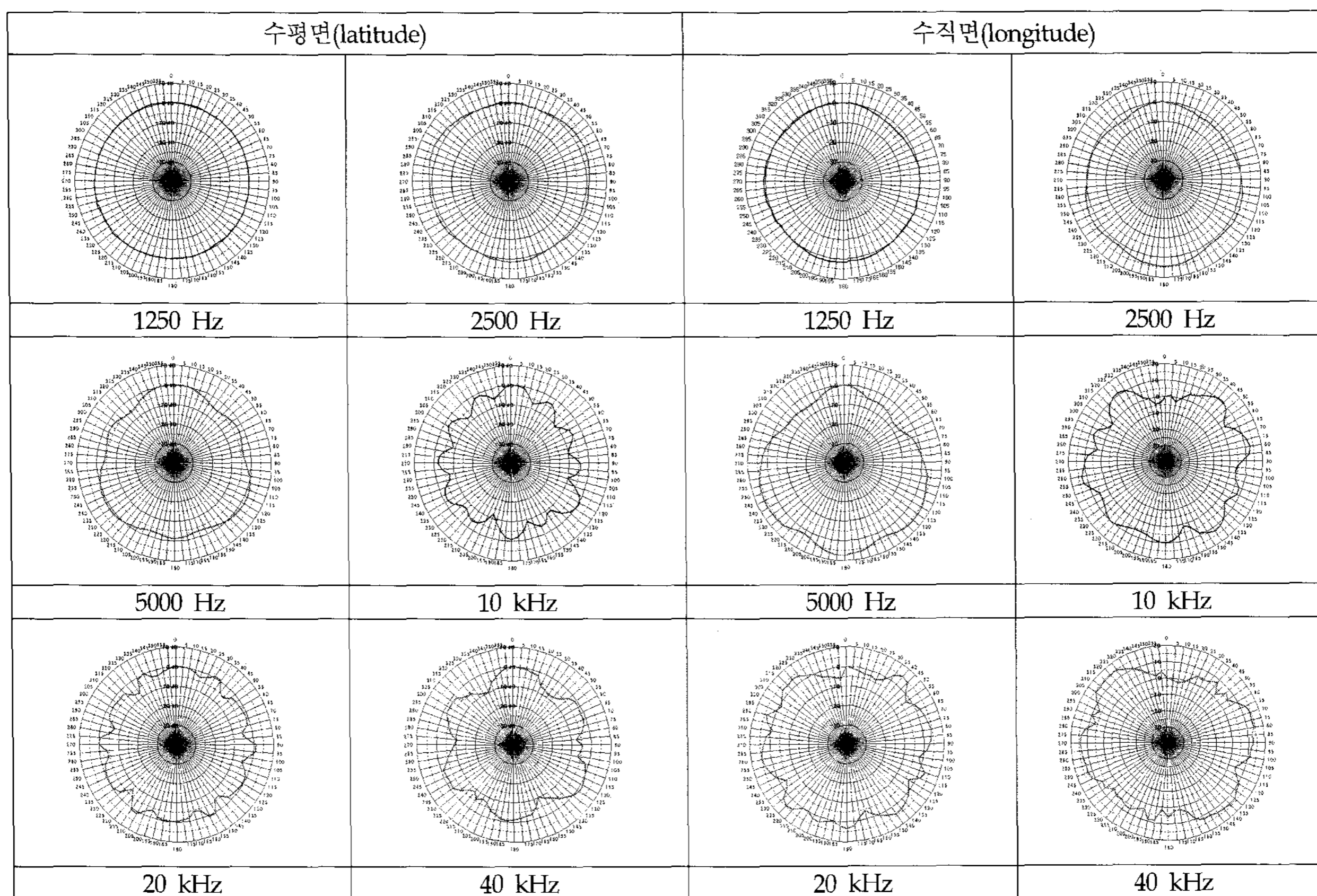
본 연구는 1/10 축적의 축소모형을 대상으로 한 축소모형실험에 의해 진행되었으며, 12개의 트위터(tweeter)와 3개의 서브우퍼(subwoofer)로 구성된 12면체 무지향성 스피커(dodecahedron omni-directional loudspeaker)를 자체 제작하여 음원으로 사용하였다. 〈그림 6〉과 〈그림 7〉은 각각 12면체 무지향성 스피커의 주파수 응답특성과 지향패턴을 보여주고 있다. 〈그림 8〉은 본 연구에서 사용된 축소모형측정시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 측정을 통해 얻어진 임펄스 응답은 공기흡음 보상¹²⁾과 시간영역에서의 후처리과정을 통해 실물스케일에서의 임펄스 응답으로 변환하였으며, 암소음의 영향을 최소화하기 위하여 차단주파수 500 Hz에서 필터(high-pass filter)를 적용하였다. 〈표 3〉은 축소모형측정에 사용된 장비를 나타내고 있다.

〈표 3〉 축소모형실험에 사용된 장비

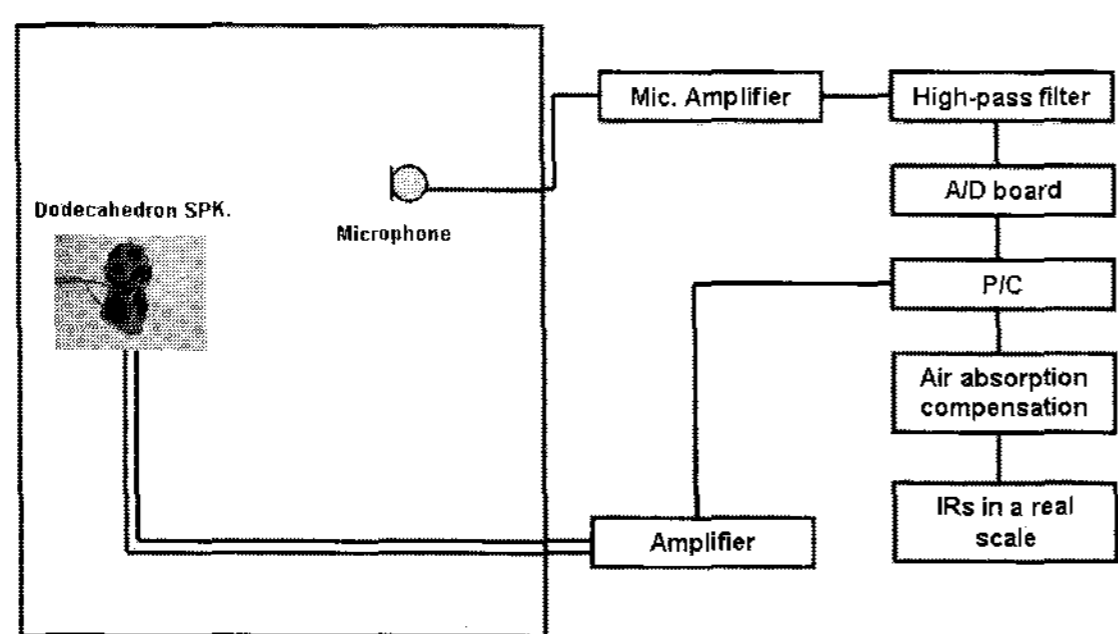
측정장비	모델명	제조사
Dodecahedron speaker	자체제작	전북대학교 음향연구실
1/4" microphone	Type 4939	B&K
Amplifier Dummy head	DH7046-6	Aco
A/D board	192X	EGOSYS
측정용소프트웨어	TYPE 7841	B&K
Conditioning amplifier	Type 2690	B&K



〈그림 6〉 12면체스피커의 주파수응답특성



〈그림 7〉 12면체 스피커의 지향패턴



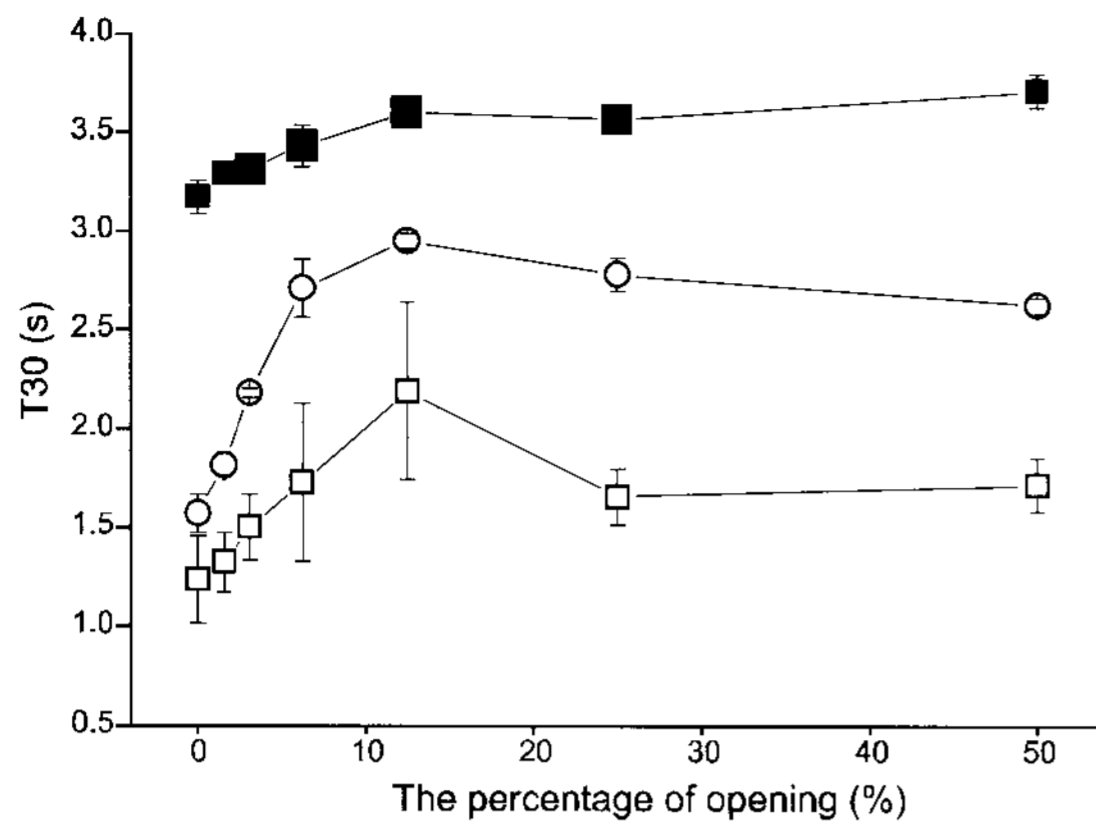
〈그림 8〉 축소모형측정시스템도

4. 음향적 결합에 의한 잔향특성변화

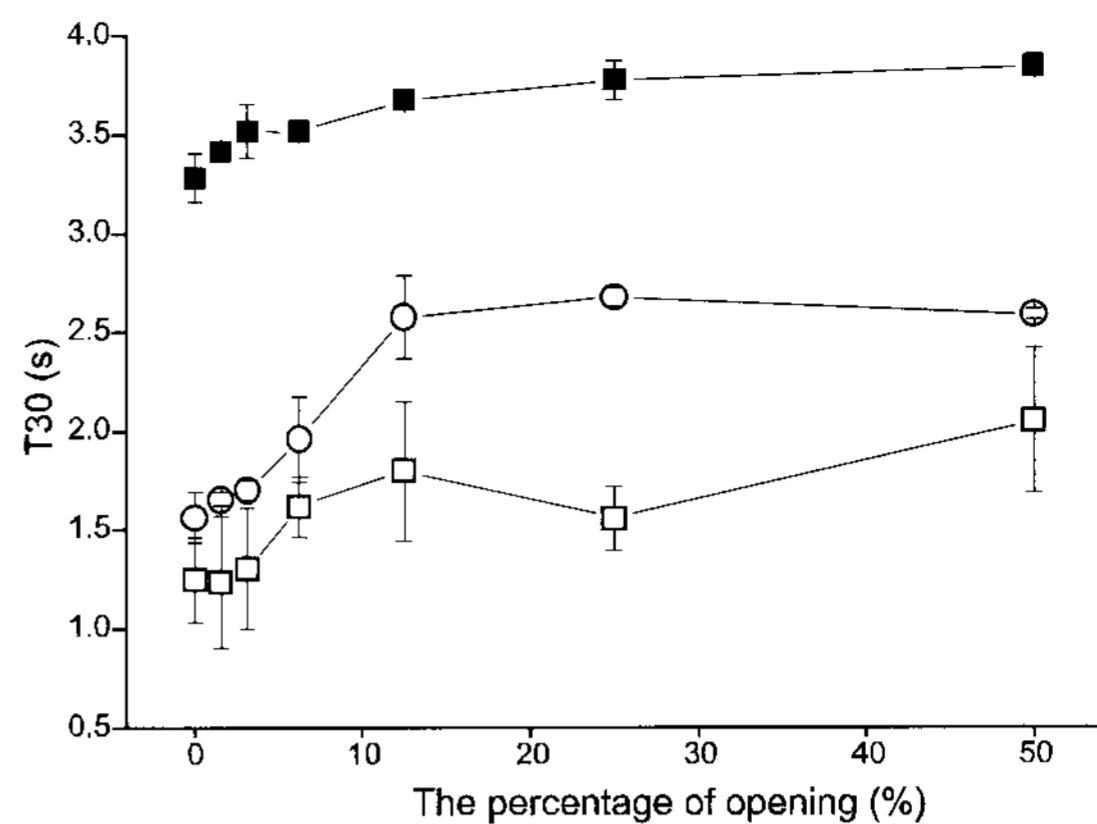
4.1 잔향시간(T30)

〈그림 9〉는 개구율 변화에 따른 잔향시간(T30)변화를 부실의 흡음력과 음원의 위치변화에 따라 주파수대역별로 평균하여 측정지점별 표준편차와 함께 나타낸 것이다. 〈그림 9〉의 (a)~(b)에서 부실의 흡음력이 주실보다 작은 경우 음원의 위치에 상관없이 개구율 증가에 따른 T30의 변화가 주로 중·

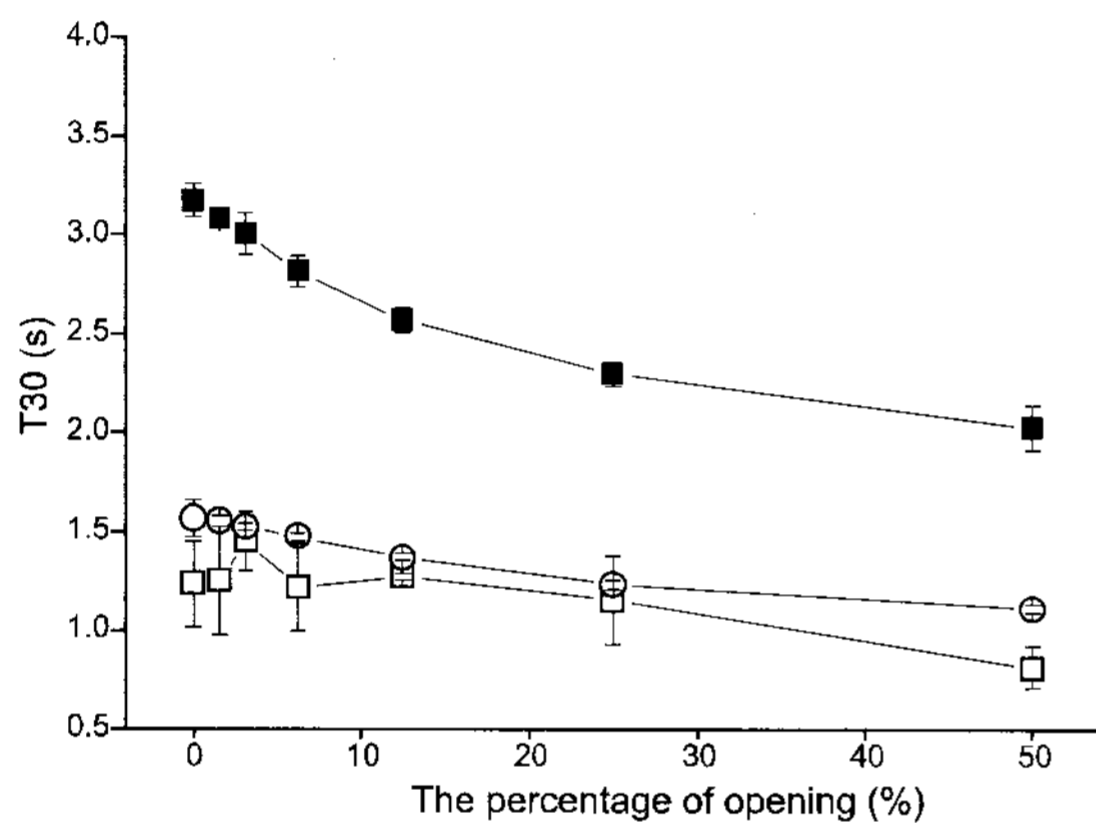
고주파수대역에서 현저하게 나타났다. 부실이 음원에 인접하여 위치한 SF 조건 하에서는 개구율이 12.5%에 이르기까지 개구율 증가에 따라 모든 주파수 대역에서 T30이 증가하였으며, 25%이상의 개구율에서는 중고주파수 대역에서 오히려 T30이 감소하는 것으로 나타났다. 음원과 멀리 위치한 SR 조건 하에서는 6.25%~25%의 개구율에서 개구율 증가에 따른 T30이 증가하나, 25%이상의 개구율에 대해서는 부실의 존재가 주실의 T30 변화에 거의 영향을 미치지 않고 있는 것으로 분석되었다. 개구율 변화에 따른 주파수대역별 T30 변화를 살펴보면 중·고주파수대역에서 T30의 변화가 현저하였으며, T30 변화폭은 각각 1.5~1.7s 과 0.8~0.9s의 범위인 것으로 나타났다. 이 결과는 개구부의 크기가 증가할수록 주실에 연결된 부실의 체적이 커지기 때문에 나타나는 현상으로 부실의 체적이 큰 경우 실의 공기흡음도 증가하므로 부실의 음에너지가 주실로 유입되는 시간과 양이 감소하게 된다. 그러므로 2장에서 전술한바와 같이 실에 잔향부실을 설치할 경우



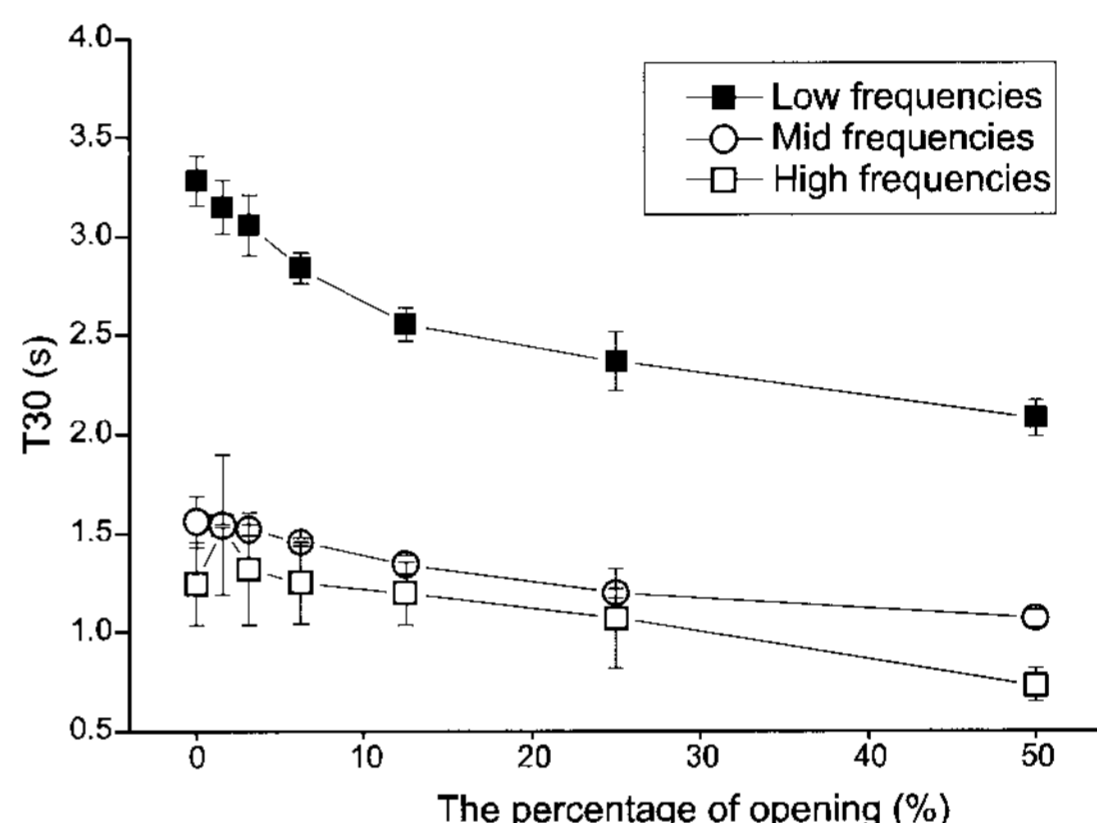
(a) 잔향부실 · 음원위치 개구부전면



(b) 잔향부실 · 음원위치 개구부후면



(c) 흡음부실 · 음원위치 개구부전면



(d) 흡음부실 · 음원위치 개구부후면

<그림 9> 개구율 변화에 따른 주파수대역별 평균 잔향시간(T30)과 표준편차

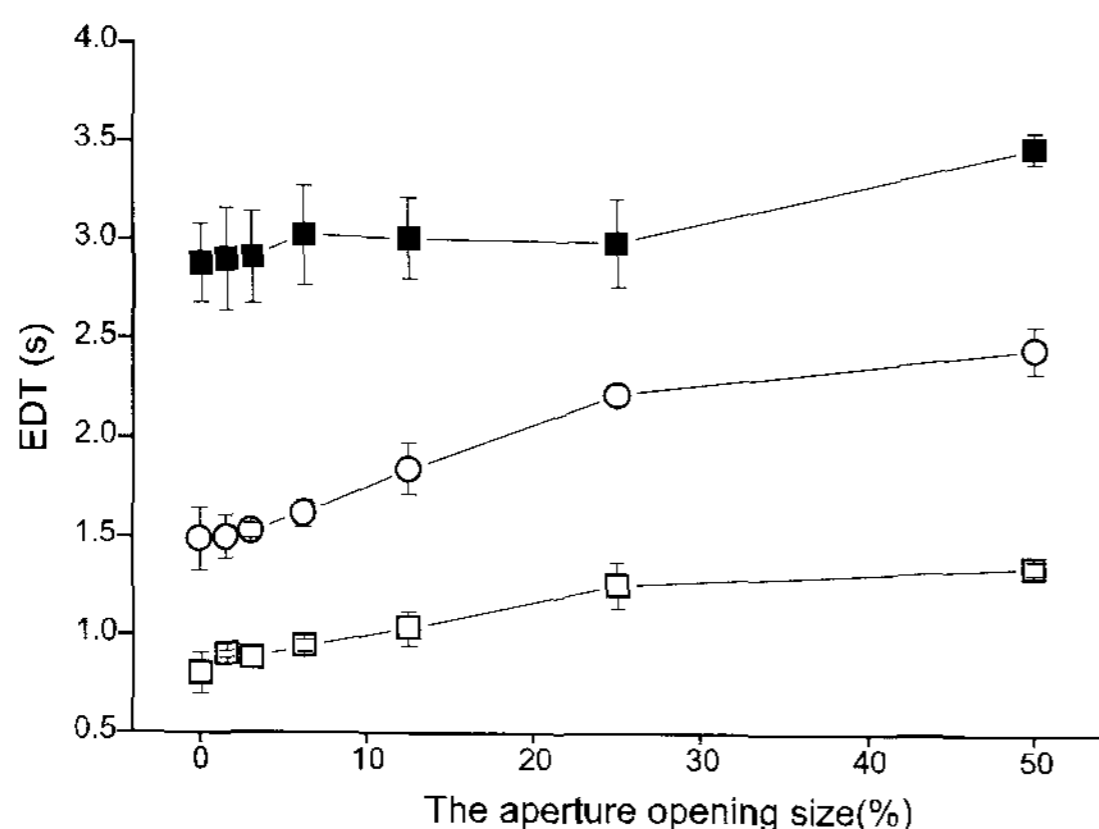
부실의 음에너지가 주실로 유입되기에는 개구부의 크기가 너무 작거나 혹은 부실의 체적이 증가하여 주실로의 음에너지의 유입이 적은 경우 주실의 음향특성에 영향을 미치지 못하게 된다. 본 연구에서는 주실의 체적에 대한 개구율의 크기가 3.94% 이상 일 경우 잔향부실은 주실에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

<그림 9>의 (c)~(d)는 각각 부실이 주실보다 높은 흡음력을 갖는 경우 음원이 부실에 인접하거나 멀리 떨어져 있는 경우 개구율 변화에 따른 T30의 변화를 측정·분석한 것이다. 분석결과, 음원의 위치에 관계없이 개구율 증가에 따른 T30의 변화가 주로 저주파수대역에서 현저하였으며, 1.0~1.4 s의 변화범위를 갖는 것으로 나타났다. 부실이 음원에 인접하는 SF 조건에서는 3.13%~50%의 개구율에서, 부실이 음원으로부터 멀리 위치한 SR 조건에서

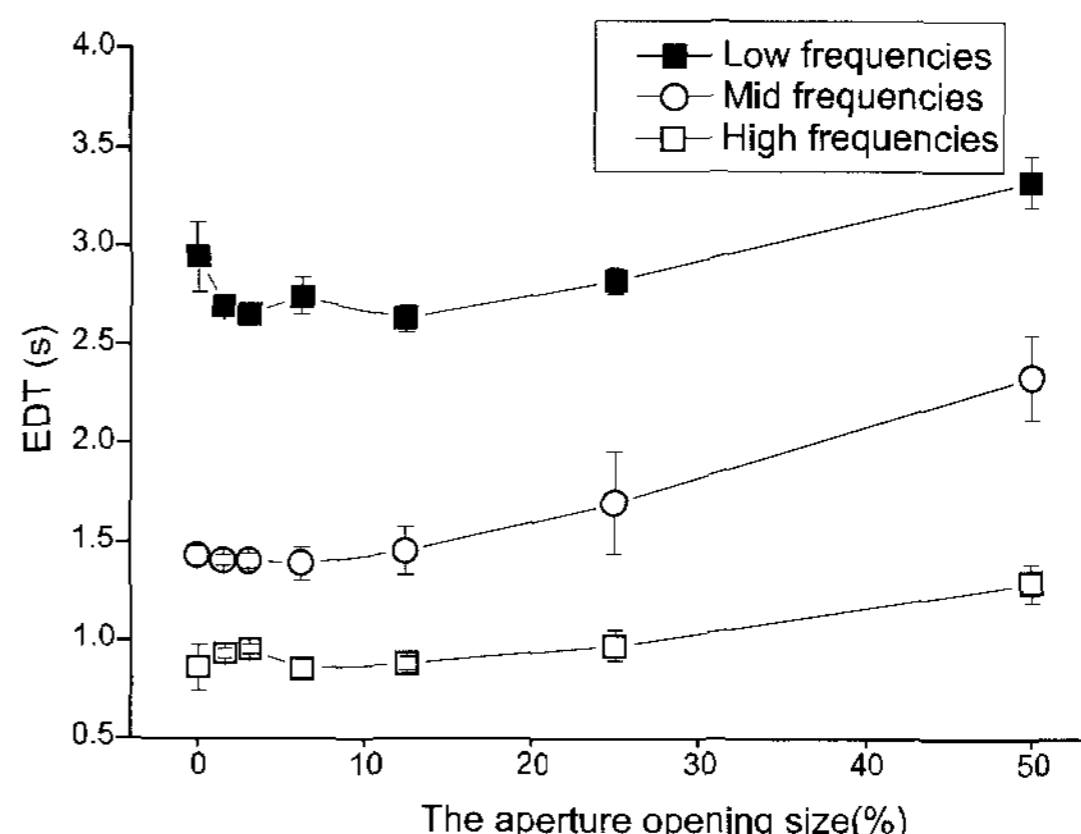
는 1.56%~50%의 개구율에서 개구율 증가에 따라 T30이 선형적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 이 결과는 부실의 흡음력이 증가하면서 나타나는 현상으로 개구율이 증가할수록 발생된 음에너지의 흡음 정도는 급속하게 증가되어 부실에서 주실로 되돌아가는 음에너지의 양이 현저하게 감소하게 된다.

4.2 초기감쇠시간 (EDT)

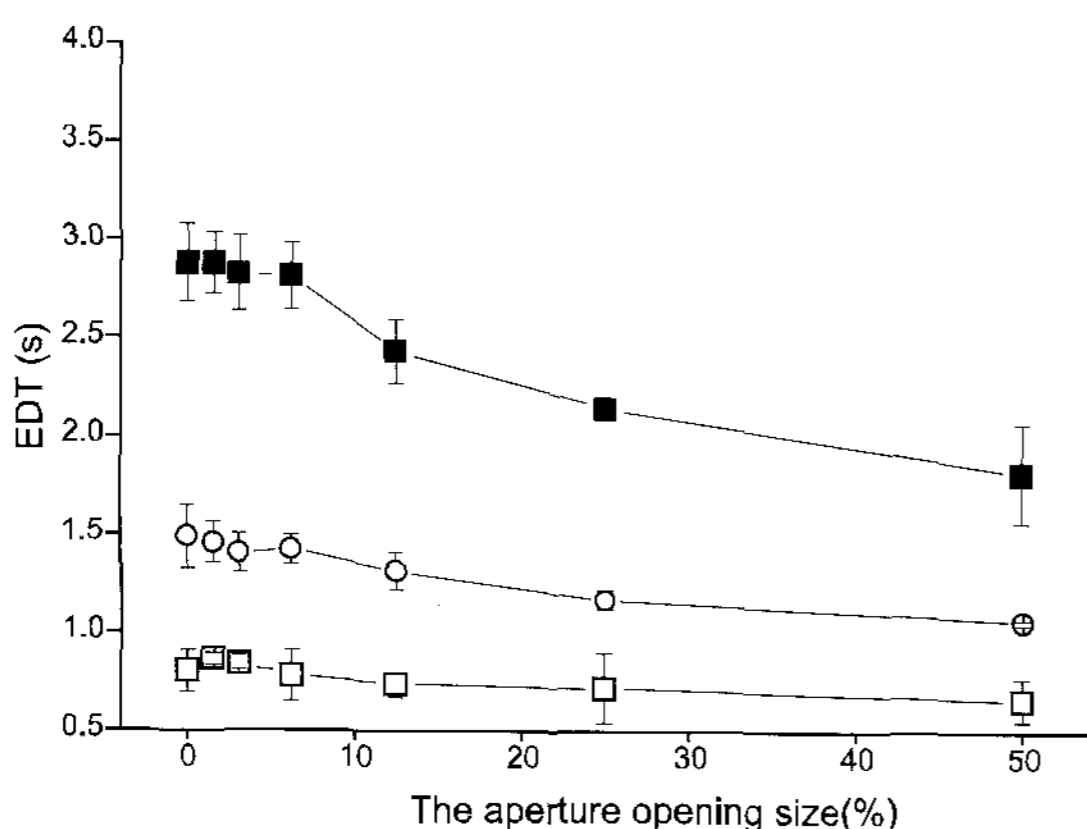
<그림 10>은 개구율 변화에 따른 초기감쇠시간 (EDT)변화를 부실의 흡음력과 음원의 위치변화에 따라 주파수대역별로 평균하여 측정지점들에 대한 실험평균 EDT 및 표준편차를 함께 나타낸 것이다. 부실의 흡음력이 주실보다 현저하게 작은 경우(<그림 10>의 (a) 및 (b)), 음원과 관련한 부실의 위치는 개구율 증가에 따른 EDT의 변화에 큰 영향을 미치지 않고 있으며 부실의 위치에 관계없이 유사한 변화



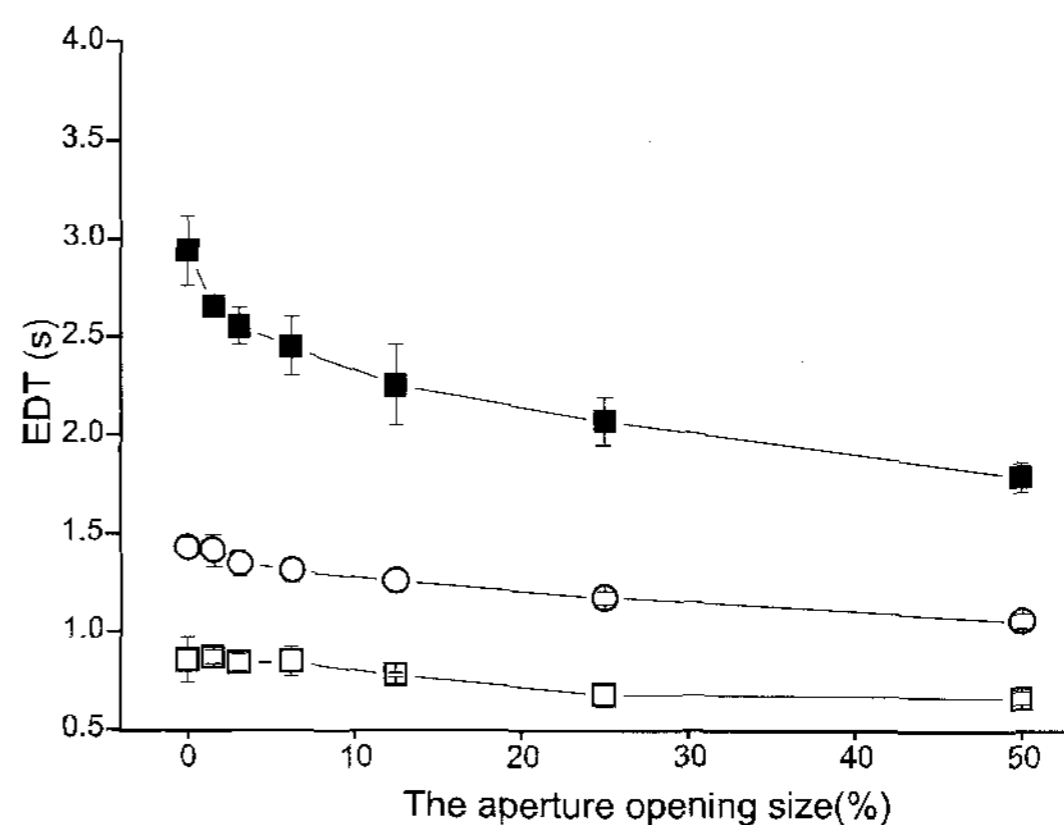
(a) 잔향부실 · 음원위치 개구부전면



(b) 잔향부실 · 음원위치 개구부후면



(c) 흡음부실 · 음원위치 개구부전면



(d) 흡음부실 · 음원위치 개구부후면

〈그림 10〉 개구율 변화에 따른 주파수대역별 평균 초기감쇠시간(EDT)과 표준편차

패턴을 나타내고 있다. 음원과 개구부가 인접한 SF 조건에서는 중고주파수대역에서 6.25% 이상의 개구율에서 개구율 증가에 따른 EDT 증가가 나타나고 있으며, 부실과 음원이 서로 멀리 떨어져 있는 SR 조건에서는 12.5% 이상의 개구율에서 개구율 증가에 따른 EDT 증가가 모든 주파수 대역에서 나타나고 있다. 개구율 변화에 따른 주파수대역별 EDT를 살펴보면 중·고주파수대역에서 EDT의 변화가 현저하였으며, 그 범위는 각각 0.7~1.2 s과 0.4~0.6 s 이었다. 잔향시간의 측정결과와 달리 EDT는 개구율이 25%와 50%에서도 증가하는 것으로 나타났는데 이는 초기에너지(0 dB~-10 dB)에 집중한 EDT의 산정에 따른 결과로 유추될 수 있다. 기존연구결과에 따르면 주관적인 잔향감이 EDT와 더 상관성이 높은 것으로 보고되었는데 이 결과가 이중감쇠가 나

타나는 음향적으로 결합된 공간에서 주관적인 잔향감을 평가하는 지표로 적합한지 향후 검토되어야 할 것이다.

부실이 주실보다 높은 흡음력을 갖는 경우 (<그림 10>의 (c) 및 (d)), 부실의 위치에 상관없이 개구율 증가에 따른 EDT 변화는 저주파수대역에서 현저하게 나타났으며, 그 변화폭은 1.0 s 이었다. SF 조건에서는 6.25% 이상의 개구율에서 개구율이 증가할수록 EDT가 감소하였고, SR 조건에서는 1.56% 이상의 개구율에서 개구율이 증가할수록 EDT가 감소하였다. 특히 저주파수 대역에서의 EDT 변화가 가장 크게 나타나고 있으며, 음원과 개구부가 서로 멀리 떨어져 있을수록 개구율 변화에 비례하여 선형적인 감쇠패턴을 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

5. 결론 및 종합토의

본 연구에서는 개구부를 통해 음향적으로 결합된 공간에서 개구부의 크기, 부실의 흡음특성 및 위치를 변화시켜가며 잔향시간(T30)과 초기감쇠시간(EDT)을 대상으로 잔향특성변화를 측정·분석하였다. 각 변수에 따른 음향적으로 결합된 공간의 잔향특성은 다음과 같이 정리될 수 있다.

5.1 개구율변화에 따른 잔향특성변화

<표 4>는 주실의 잔향특성변화가 시작되는 개구율을 부실의 흡음특성 및 위치별로 나타낸 것이다. 개구부의 개구율변화에 따른 주실의 잔향특성변화를 살펴보면 잔향부실을 적용할 경우, 부실이 음원측에 인접하여 위치한 SF에서는 SR조건보다 상대적으로 작은 개구율에서 잔향특성변화가 나타나기 시작하였다. 반면 흡음부실인 경우 부실이 음원과 멀리 떨어져 실 반대편에 위치한 SR에서 상대적으로 작은 개구율에서 잔향특성변화가 나타나기 시작하였다. 또한 초기감쇠시간보다는 잔향시간이 개구율의 변화에 의해 보다 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 coupled space에서 나타나는 이중감쇠패턴에 의한 것으로 판단되었다.

<표 4> 주실의 잔향특성변화가 시작되는 개구율

음향지표	잔향부실		흡음부실	
	SF	SR	SF	SR
T30	1.56%	6.25%	3.13%	1.56%
EDT	6.25%	12.5%	6.25%	

5.2 부실의 흡음력 및 위치에 따른 잔향특성변화

<표 5>는 부실의 흡음특성 및 위치에 따라 개구부의 개구율 변화에 따른 주실의 잔향특성의 최대 변화폭을 주파수대역별로 나타낸 것이다. 부실의 흡음특성이 잔향실인 경우, 저주파수 대역보다는 중·고주파수대역에서 개구부의 개구율 증가에 따른 변화폭이 크게 나타났다. 반면 부실의 흡음특성이 흡음실인 경우, 저주파수대역에서 변화폭이 중고주파수 대역보다 상대적으로 크게 나타났다. 부실의 흡음특성에 따라 상대적으로 잔향부실을 적용한 경우

<표 5> 부실의 흡음력 및 위치에 따른 주실의 잔향파라메타 변화범위

음향지표	주파수대역	잔향부실		흡음부실	
		SF	SR	SF	SR
T30(s)	125 Hz-250 Hz	0.7~0.8		1.3~1.4	
	500 Hz-1 kHz	1.5~2.7	1.3~1.4	0.5~0.9	0.6~1.2
	2 kHz-4 kHz				
EDT(s)	125 Hz-250 Hz	0.9		1.5~1.6	
	500 Hz-1 kHz	0.7~1.2	0.7~1.2	0.4~0.6	0.4~0.6
	2 kHz-4 kHz				

에 흡음부실 적용시보다 상대적으로 큰 변화폭을 갖는 것으로 분석되었다.

부실위치에 변화에 따른 주실의 잔향특성변화결과를 살펴보면, 부실의 흡음특성이 잔향실인 경우 부실이 음원측에 위치할 경우 T30의 변화폭이 상대적으로 크며, 부실이 흡음실인 경우에는 부실이 음원으로부터 멀리 위치한 경우에 변화폭이 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 반면 EDT의 경우는 부실의 위치에 따른 변화범위가 동일한 것으로 분석되었으며, 부실의 흡음력이 중요한 영향요소인 것으로 나타났다. 따라서 음향적으로 결합된 공간의 효율적인 음향성능제어를 위해서는 부실의 흡음특성에 따라 그 위치도 적절하게 배치되어야 한다.

본 연구에서는 개구부를 통해 음향적으로 결합된 공간에서 건축적인 요소를 변화시켰을 때 나타나는 공간의 잔향특성변화를 위주로 살펴보았다. 음향적으로 결합된 공간에서 나타나는 잔향특성변화를 보다 자세하게 분석하기 위해서는 청감실험을 통한 주관적인 평가가 병행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2006-353-D00041)과 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호 #06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. C. F. Eyring (1931), Reverberation time measurements in coupled rooms, J. Acoust. Soc. Am. 3, pp.181-206.

2. L. Cremer, H. A. Müller and T. J. Schultz, Principles and Applications of Room Acoustics (Applied Science, New York 1982), Vol. 1, pp.261-283.
3. H. Kuttruff, Room Acoustics (Spon, New York 2000), pp.142-145.
4. M. Ermann (2005), Coupled volumes: Aperture size and the double-sloped decay of concert halls, Building Acoustics, 12, pp.1-14.
5. C. M. Harris and H. Feshbach (1950), On the acoustics of coupled rooms, J. Acoust. Soc. Am. 22, pp.572-578.
6. C. Thomson (1984), On the acoustics of a coupled space, J. Acoust. Soc. Am. 75, 707-714.
7. J. E. Summers (2005), Technical note: Remark on the formal identity of two statistical-acoustics models of coupled rooms, Building Acoustics, 12, pp.41-50.
8. J. E. Summers, R. R. Torres and Y. Shimizu (2004), Statistical-acoustics models of energy decay in systems of coupled rooms and their relation to geometrical acoustics, J. Acoust. Soc. Am. 116, pp.958-969.
9. D. T. Bradley and L. M. Wang (2005), The effects of simple coupled volume geometry on the objective and subjective results from nonexponential decay, J. Acoust. Soc. Am. 118, pp.1480-1490.
10. L. Nijs, G. Jansens, G. Vermeir and M. van der Voorden (2002), Absorbing surfaces in ray-tracing programs for coupled spaces, Applied acoustics, 63, pp.611-626.
11. D. T. Bradley and L. M. Wang (2007), Comparison of measured and computer-modeled objective parameters for an existing coupled volume concert hall, Building Acoustics, 14, pp.79-90.
12. ISO 9613-1:1993, "Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors- part1: calculation of the absorption of sound by the atmosphere"