

실내공간의 부분적 개방에 따른 음향특성변화 II

-확산음장과 자유음장의 수직적 결합을 중심으로-

Acoustic Characteristics of Sound Field in Partially Opened Rooms

-Emphasis on Vertical Coupling of Diffuse and Free Field-

정 대 업* 최 영 지**
Jeong, Dae-Up Choi, Young-Ji

요 약

본 연구는 지붕개폐형 구조물에서 지붕을 개폐함으로써 나타나는 음장의 특성변화를 파악하기 위하여 1/20스케일의 축소모형을 제작하고 이를 대상으로 개폐율을 조절하면서 음장변화를 측정·분석하였다. 공간의 음향설계 시 사용되는 기존의 설계 및 평가파라미터들을 검토한 결과, 잔향음의 감쇠과정이 비선형적이며 기존의 잔향감 평가파라미터인 잔향시간에 의해서 적절한 설계 및 성능평가가 이루어지기 어려울 것으로 분석되었다. 특히 비선형적 감쇠구간에 대한 선형적 curve-fitting에 의해 실제 청감과는 거리가 먼 매우 긴 잔향시간이 도출되어 실질적인 효용성이 의심된다. 따라서 잔향시간(T30)을 음향설계 및 평가과정에서 중요설계변수로 활용 시 완공 후 얻게 되는 음장특성과 상이한 결과를 초래할 가능성이 있다. EDT의 경우 전체적으로 초기감쇠시간은 개폐율이 증가할수록 짧아지는 경향을 나타내었다. 주파수별로 저주파수대역에서의 감쇠율이 가장 높게 나타났으며 고주파수 대역으로 갈수록 감쇠율은 둔화되는 것으로 평가되었다. 명료도 관련 파라미터인 D50 또한 개폐에 따른 음장의 변화를 효과적으로 나타내고 있는 것으로 분석되었다. 객석부위별로는 지붕개폐면에 직접 노출되지 않는 객석에서 개폐율 증가에 따라 선형적인 감쇠현상이 나타나고 있으나, 직접 노출되는 객석의 경우에는 40%이상의 개폐율에서는 명료도와 잔향감에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다.

Abstract

The present work measured and analyzed changes in the acoustics of a sound field which has a retractable ceiling. An 1/20 scale model of an openable space was built and measurement was carried out by varying the opened area of a ceiling. The most widely used room acoustic and design parameters, RT, EDT, and D50 were investigated. The results suggest that the use of RT as an acoustic design parameter may not be proper in an openable space and further it is likely to mislead the initial acoustic design of such spaces. It is mainly due to the characteristics of RT in which non-exponential decay processes are linearly fitted. Early decay times were found to be decreased in proportion to increasing the ratio of opened area. D50, an index of speech intelligibility, was effectively shows the influence of openings on the acoustics. It is also found that EDT and D50 at the seats, not directly exposed to the opened part of a ceiling, were almost linearly decreased in proportion to the ratio of opened area, while little influence was found for the opening ratio larger than 40% at the directly exposed seats to the opened part of a ceiling.

키워드 : 대공간, 확산음장, 자유음장, 음향적 결합 축소모형, 감쇠율

Keywords : large-span spaces, diffuse fields, free fields, acoustic coupling, scale models, decay rate

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

스포츠 및 대중공연문화가 발달함에 따라 다수의

이용자들을 수용할 수 있는 대형시설물의 수요가 점증하고 있다. 특히 최근에는 시설물의 규모가 대형화되어 구조물의 스펠이 200~300m에 이르는 대공간의 계획이 구체화되고 있으며, 국내에서도 이와 같은 대공간의 계획을 본격적으로 추진 중에 있다.

근래에 건립되어 활용중이거나 계획 중인 대부분의 대공간 구조물들은 외부기후변동에 무관하게 전천후 활용을 목적으로 돔형 구조물로서 계획되고 있으며 대

* 교신저자, 정회원 · 전북대학교 건축도시공학부 연구교수, 공학박사
Tel : 063-270-2278 Fax : 063-270-2285

E-mail : daeupj@chonbuk.ac.kr

** 전북대학교 건축도시공학부 연구교수

부분 개폐가 가능한 개폐형 구조물로 계획되고 있다.

일반적으로 밀폐된 공간 내에서의 음향계획은 공간의 형상이나 내부흡음재의 위치 등에 따라서 다소간의 차이는 있으나 음의 감쇠가 비교적 선형적으로 이루어지며 위치별 음향의 편차가 적은 확산음장의 특성을 지니는 것으로 간주하여 음향계획에 접근하게 된다. 반면, 공간의 일부가 개폐되어 자유음장과 상호작용을 하게 되는 경우에는 이와 같은 확산음장의 특성이 사라지며, 개폐정도에 따라 실내음장의 특성에 변화가 있을 것으로 예상된다²⁻⁵⁾. 그러나 이와 같이 자유음장과 확산음장의 음향적 연결(acoustic coupling)에 따른 실내음장의 변화에 대한 연구결과는 거의 없어 향후 국내에서 유사시설의 음향계획 시 많은 어려움이 예상된다.

이와 같은 배경에서 본 연구진은 공간의 측면개폐에 따라 발생하는 자유음장과 수평적인 음향적 연결이 실의 음향에 미치는 영향을 축소실험을 통하여 검토한 바 있다¹⁾. 본 연구에서는 개폐형 대공간구조물 중 가장 일반적인 개폐형 지붕(retractable ceiling) 구조물을 대상으로 하였으며, 음향축소모형 실험을 통하여 확산음장과 자유음장이 수직적으로 음향적 연결이 되는데 따른 확산음장 내 음향특성의 변화를 검토하고 이를 토대로 향후 개폐식 공간의 음향계획 시 사용가능한 설계의 기초자료를 제공하고자 하였다.

자유음장과 음향적 결합은 지붕부위의 장방형 개폐부를 통하여 이루어졌으며, 개폐부의 크기 변화를 통한 개폐율의 변화에 따라 대상음장의 음향특성을 측정·분석하였다. 음향측정 및 평가파라미터는 잔향감 및 명료도 파라미터들을 대상으로 하였다.

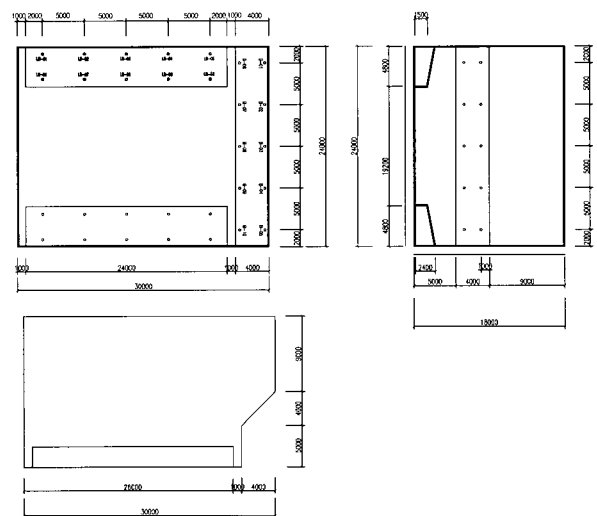
2. 실험개요

2.1 대상공간 및 실험개요

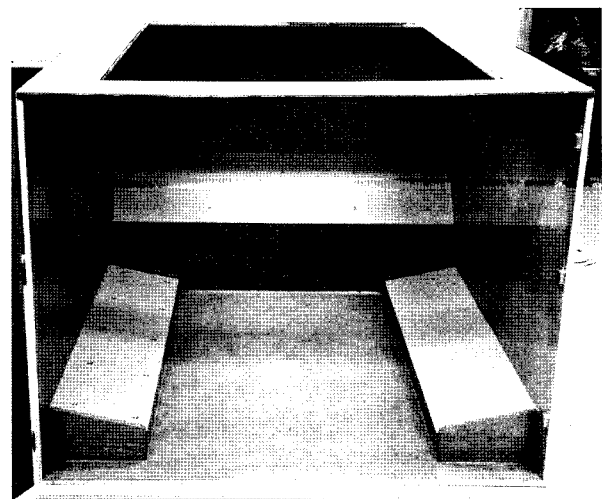
본 연구의 평가대상공간은 현재 건립 중인 중규모의 실내체육시설로서 체적 $12,288\text{m}^3$ ($L \times W \times H = 30 \times 24 \times 16\text{m}$)인 장방형 평면의 공간이며 실제 건립되고 있는 공간은 체육활동 및 공연의 다목적 용도로 계획되었다. 본 연구에서는 대상공간의 무대부분을 제외한 나머지 공간을 대상으로 단순화한 축소모형을 1/20의 스케일로 제작하였다. 실험용 축소모형은

MDF 15mm를 이용하여 제작되었으며, 객석부위를 제외한 모든 내부표면은 바니스칠에 의해 반사면으로 균일하게 마감되었으며 확산면들은 고려되지 않았다.

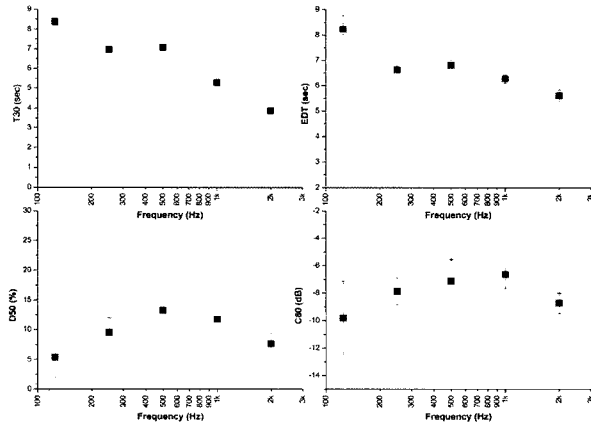
객석은 서로 마주보는 두 개의 측면객석(240m^2)과 후면객석(134m^2)으로 구성되며, 청중들이 착석시의 흡음력을 재현하기 위하여 객석부위는 패브릭으로 마감하였다. <그림 1>은 평가대상공간의 평면도 및 단면도를 나타낸 것이며, <그림 2>는 제작된 축소모형의 내부전경을 나타낸 것이다. 지붕면(720m^2)은 부분적으로 개폐를 통해 개폐면적을 조절할 수 있도록 제작되었으며, 지붕개폐부위는 장방형으로 전체 지붕면적의 0~60% 범위($72 \sim 432\text{m}^2$)에서 10% 간격으로 증가되었다.



<그림 1> 대상공간의 평·단면도



<그림 2> 평가대상공간 축소모형의 내부전경



〈그림 3〉 평가대상공간의 공실상태 음향특성 분석 결과 (개폐부가 없는 상태) (전체평가대상지점들의 평균값±표준편차)

〈그림 3〉은 평가대상공간의 축소모형을 대상으로 하여 개폐부가 없는 공실 상태에서 전체객석에서 측정된 대상실의 음향특성을 측정·분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림의 각 값들은 주파수별 평균치와 평가대상지점간의 표준편차를 나타내고 있다. 분석결과, 공실상태에서 잔향시간은 7.0초(500Hz 기준) 정도로서 객석간의 편차는 거의 없는 것으로 나타났으며 EDT는 6.0초(500Hz 기준) 정도로서 잔향시간보다 짧은 것으로 분석되었다. D50을 이용하여 분석한 언어명료도는 중주파수 기준으로 10~15% 범위이며, 음악적 명료도의 평가지표인 C80은 -8~-10dB 범위로 매우 낮은 명료도 수준을 나타내고 있다.

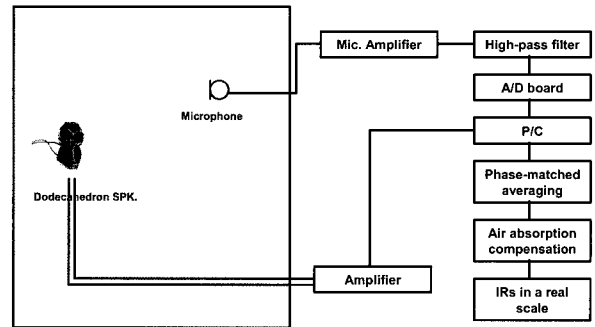
2.2 축소모형실험 개요

축소모형실험은 전북대학교 건축공학과 음향연구실의 무향실에서 이루어졌다. 측정대상지점은 공간의 형상이 좌우대칭인 점을 고려하여 등간격(5×3m)으로 총 20개 지점 (좌측객석부분에서 10개 지점, 후면객석부분에서 10개 지점)을 선정하였다 (그림 5 참조). 측정시 음원은 12면체 무지향성 스피커 (dodecahedron omni-directional loud-speaker)를 사용하였으며 음원은 실의 바닥면 중앙에 위치하였다. <표 2>는 축소모형실험에 사용된 장비들을 나타낸 것이다.

측정은 출입구부분으로부터 지붕면을 일정비율 간격으로 개폐하고 각 개폐율별로 이루어졌다. 측정용 신호음은 비가역적 로그사인신호음(logarithmically swept sine signal)을 사용하였으며, 각 측정지점별로

〈표 1〉 축소모형실험에 사용된 장비

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



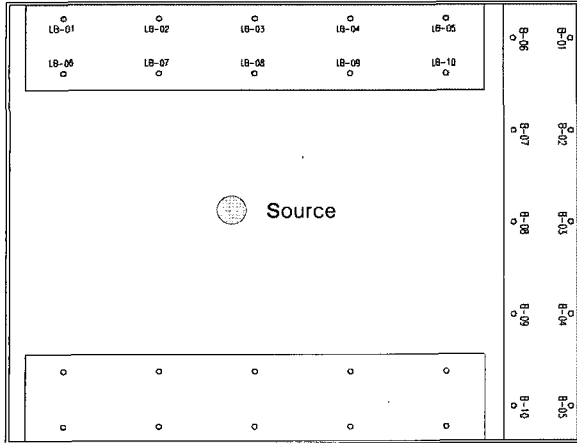
〈그림 4〉 자유음장과의 수직음향결합 측정시스템구성도

설치된 1/4인치 마이크론을 통하여 녹음을 한 후 PC에서 평균임펄스 (phase-matched averaging)를 추출하고 공기흡음보상을 통해 실물스케일에서의 임펄스 응답을 얻었다. 임펄스응답의 녹음 시 압소음의 영향을 최소화하기 위하여 차단주파수 500Hz에서 필터(high-pass filter)를 적용하였다. <그림 4>는 사용된 측정시스템의 구성도를 나타낸 것이며, 모든 측정과 분석은 ISO 기준²⁾에 준하여 이루어졌다.

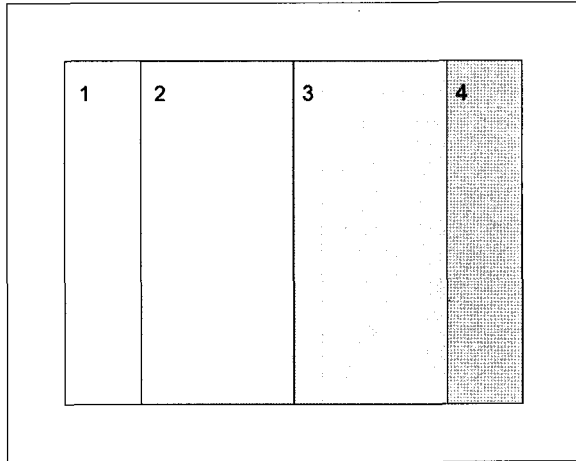
$$D_{50} = \frac{\int_{0ms}^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (1)$$

여기서, p(t)는 음압

본 연구에서 검토된 음향성능 평가파라메타는 잔향감 및 명료도와 관련된 변수들로서 잔향시간 (T30), 초기감쇠시간 (EDT) 그리고 초기 음에너지비 (D50)를 그 대상으로 하였다. T30과 EDT는 얻어진 임펄스 응답에 대해 슈레더적분 (Schroeder integration)을 적용하여 얻은 에너지감쇠 곡선으로부터 산출하였으며, 명료도 관련 평가파라메타는 식 (1)을 적용하여 산출하였다.



<그림 5> 대상공간내 음원 및 측정점 위치 (LB: 좌측객석, B: 후면객석)



<그림 6> 지붕면의 개폐부위 (좌측 1번부터 개폐하여 개폐율조절)

3. 공간의 부분개폐에 따른 음장특성변화

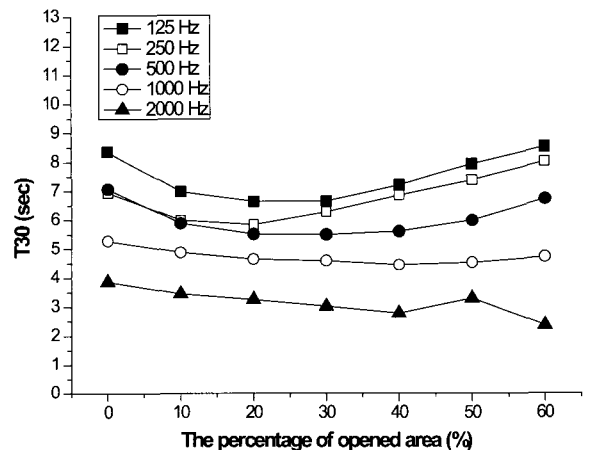
3.1 잔향시간

본 연구에서는 지붕개폐형 구조물에서 지붕을 개폐함으로써 나타나는 음장의 특성변화를 파악하기 위하여 1/20 축척의 축소모형을 제작하고 이를 대상으로 개폐율을 조절하면서 음장변화를 측정·분석하였다. 본 연구에 사용된 A/D 보드는 샘플링 주파수 192kHz (16 bit)로서 1/20스케일의 축소모형실험에서는 실물축척에서의 유효분석주파수가 2kHz로 제한되며, 이에 따라 2kHz까지의 파라메타 산출 결과만을 그 대상으로 하였다. 잔향시간은 충분한 S/N비의 확보를 고려하여, 60dB 감쇠 소요시간이

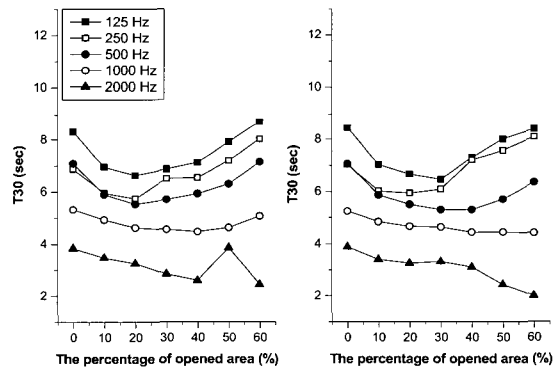
아닌 30dB 감쇠에 소요되는 시간인 T30을 산출하여 분석에 활용하였다.

<그림 7>은 개폐율을 0~60%까지 변화시키며 각 측정대상지점에서 얻은 잔향시간결과를 전체객석에서 평균하여 나타낸 것이다. 또한 <그림 8>은 개폐율변화에 따른 평균잔향시간을 1/1옥타브밴드의 중심주파수에 대하여 각 객석부위별로 나타낸 것이다.

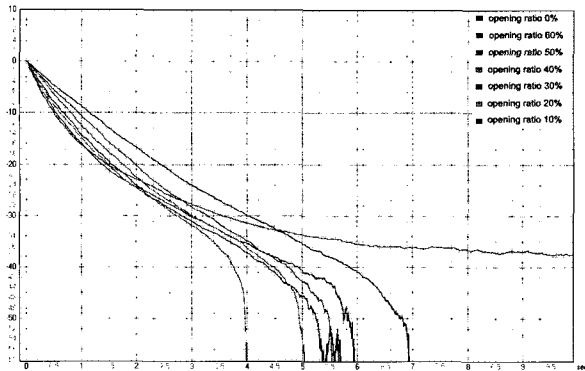
분석결과, 객석 전체의 평균잔향시간은 주파수별로 개폐율 변화에 따라 다른 특성을 나타내고 있다. 중심주파수 125~500Hz 영역의 주파수대역에서는 개폐율이 증가함에 따라 다소 잔향시간이 감소하는 경향을 나타내고 있으나 이후에는 개폐율 증가에 비례하여 잔향시간이 증가하는 결과를 나타내고 있다. 반면 1,000Hz 주파수 대역에서는 개폐율의 증가



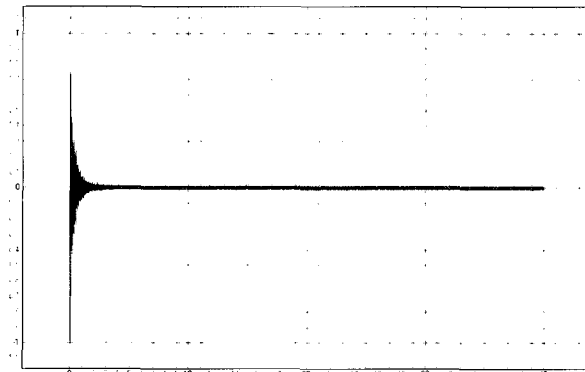
<그림 7> 개폐율 변화에 따른 전체 객석의 1/1옥타브 밴드 중심주파수별 평균잔향시간



<그림 8> 개폐율 변화에 따른 객석부위별 1/1옥타브 밴드 중심주파수별 평균잔향시간 (좌: 측면객석, 우: 후면객석)



<그림 9> 측면객석 LB05에서 개폐율 변화에 따른 감쇠율 비교



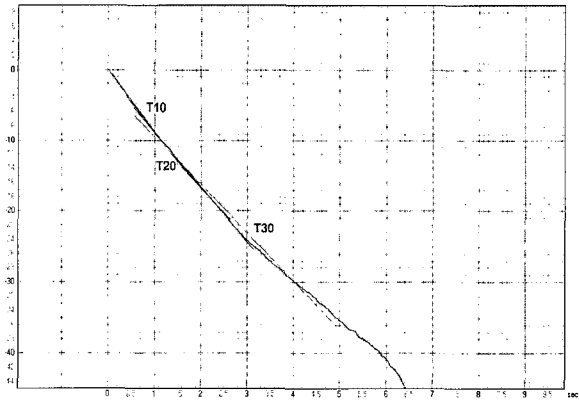
<그림 10> LB05 지점에서의 임펄스 응답

가 거의 잔향시간 변화에 영향을 미치지 않고 있으며 2,000Hz 대역에서는 개폐율 증가에 비례하여 지속적으로 잔향시간이 감쇠하는 것으로 분석되었다. 또한 개폐부에 인접한 측면객석과 항상 지붕반사면 하부에 위치하는 후면객석간의 잔향시간 변화를 비교·분석한 결과, 125~500Hz 주파수 범위에서는 전반적으로 개폐율이 증가함에 따라 비슷한 감쇠패턴을 보이고 있으나 1,000 및 2,000Hz 대역에서는 개폐율이 증가할수록 감쇠되다가 개폐율 50 및 60%에서 급격히 증가되는 비정상적인 패턴을 나타내고 있다.

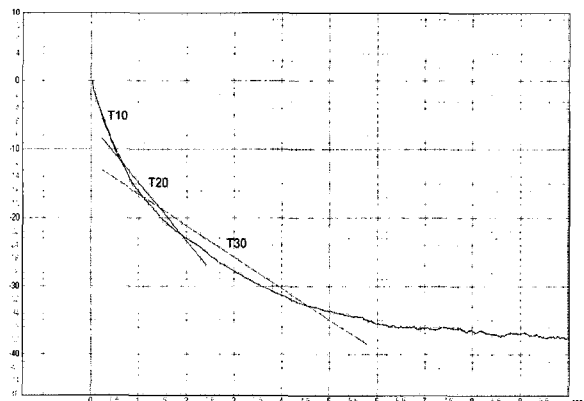
일반적으로 실외부와 연결되는 개폐부의 존재는 음에너지의 손실을 유발하여 실내 잔향시간의 감쇠를 초래한다. 따라서 개폐면적의 증가는 전반적으로 실내부에서의 잔향시간 감쇠를 초래할 것으로 예상되었으나 본 연구의 측정결과는 잔향시간이 거의 변화하지 않거나 오히려 특정개폐율에서는 증가되는 비정상적인 결과가 나타났다. 이는 실질적으로

잔향의 증가에 따른 결과가 아니고 잔향시간의 산출에 적용되는 방법에 따른 것으로 분석되었다.

<그림 11> 및 <표 3>은 측면객석 LB05 지점에서 지붕부위의 개폐면적을 달리하면서 측정된 임펄스 응답들을 슈레더적분 (Schroeder integration)에 의해 분석한 결과를 나타낸 것이다. 여기서, T10, T20 그리고 T30은 각각 잔향에너지가 10dB, 20dB 그리고 30dB 감쇠하는데 소요되는 시간을 의미하며, -5~-15dB, -5~-25dB 그리고 -5~-35dB 구간에 대한 선형 fitting을 통하여 산출된다. 개폐율이 0%인 경우, 감쇠과정이 거의 선형적이어서 T10, T20 그리고 T30간의 차이가 거의 없으나 개폐율이 60%인 경우 초기에너지의 급격한 감쇠에 의해서 T10과 T30의 차이가 거의 9초에 이르는 산출결과가 나타나고 있다. 이는 실의 일부가 성격이 다른 음장으로 개폐되는 경우 나타나는 비선형적 감쇠과정에 의한 것으로 T30이 30dB의 비선형적 감쇠과정을 선형적으로 적합성 검정(linear fitting)



(a) 개폐율 0%



(b) 개폐율 60%

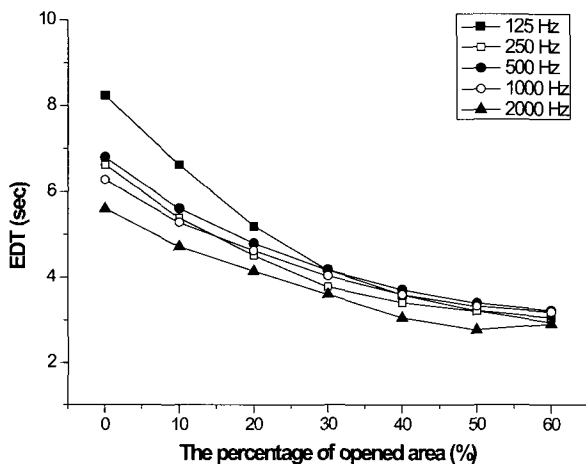
<그림 11> LB05 지점에서 개폐율변화에 따른 잔향 시간 산출결과

하는 과정에서 나타나는 오류이며, 실제 청중이 지각하게 되는 감쇠패턴과 큰 차이가 있을 것으로 판단된다. 또한 이와 같은 개폐형공간의 초기 음향계획 시, 유용한 설계변수로서 잔향시간의 활용한계를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

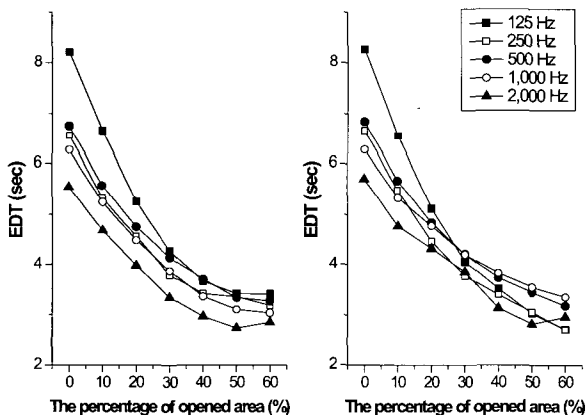
3.2 초기감쇠시간

<그림 12> 및 <그림 13>은 개폐율 변화에 따른 각각 전체객석과 측·후면객석에서의 초기감쇠시간을 측정·분석한 결과를 1/1옥타브 밴드의 중심주파수별로 나타낸 것이다.

전체적으로 초기감쇠시간은 개폐율이 증가할수록 짧아지는 경향을 나타내며 이는 개폐부위를 통한



<그림 12> 개폐율 변화에 따른 전체 객석의 1/1옥타브 밴드 중심주파수별 초기감쇠시간 (EDT)

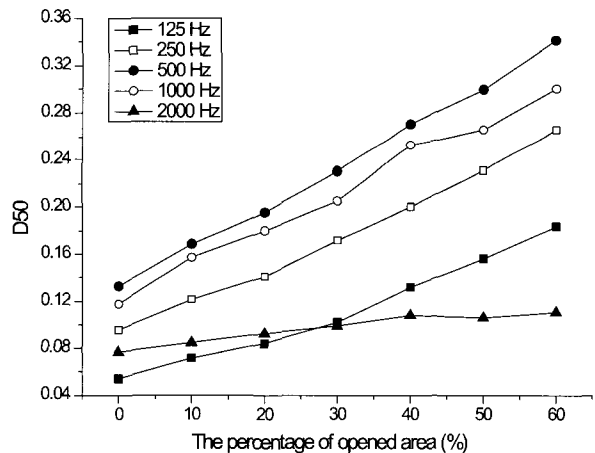


<그림 13> 개폐율 변화에 따른 객석부위별 1/1옥타브 밴드 중심주파수별 평균초기감쇠시간 (EDT) (좌: 측면객석, 우: 후면객석)

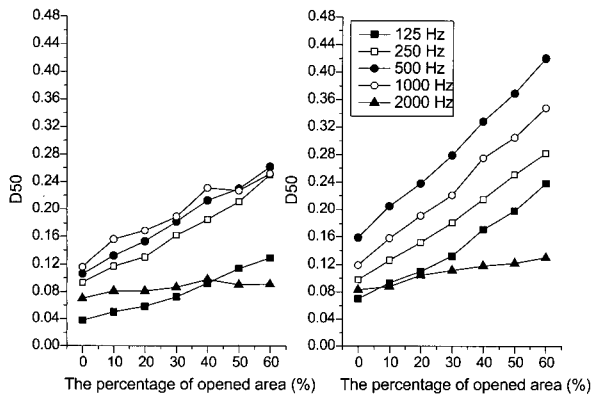
초기에너지의 손실에 따른 것으로 분석되었다. 또한 주파수별로 저주파수대역에서의 감쇠율이 가장 높게 나타났으며 고주파수 대역으로 갈수록 감쇠율은 둔화되는 것으로 평가되었다. 개폐율이 50%이상으로 유지되는 경우 초기감쇠시간은 주파수에 관계없이 모두 3초 부근에 도달하여 주파수별 특성이 사라지는 것으로 나타나고 있다. 감쇠패턴은 개폐율의 증가에 비례하여 개폐율이 30~40%에 이르기까지 거의 선형적으로 감쇠가 이루어지고 있으며, 그 이후 다소 감쇠율이 둔화되어 50% 이후에는 거의 변화가 없는 것으로 분석되었다. 객석부위별로는 개폐면에 직접 노출되는 측면객석에서 전술한 바와 같이 개폐율 40%부터 개폐정도에 따라 초기감쇠시간의 변화가 거의 없는 것으로 나타났으나, 지붕반사면 하부에 항상 위치하는 후면객석의 경우 개폐율의 증가에 비례하여 초기감쇠시간은 지속적으로 감쇠하는 것으로 분석되었다.

3.3 언어명료도

개폐율 변화에 따른 전체객석에서의 평균 언어명료도 변화를 1/1 옥타브 밴드의 중심주파수 별로 측정·분석한 결과(<그림 14>), 전반적으로 개폐율의 증가가 언어명료도를 향상시키는 것으로 분석되었다. 개폐율 증가의 영향은 125Hz~1kHz 영역에서 강하게 나타나고 있으며 이 영역에서는 개폐율 증가에 거의 선형적으로 비례하여 명료도가 증가하는 것으로 분석되었다. 반면, 고주파수 대역(2kHz)에서



<그림 14> 개폐율 변화에 따른 전체 객석의 1/1옥타브 밴드 중심주파수별 평균 언어명료도 (D50)



(그림 15) 개폐율 변화에 따른 객석부위별 1/1옥타브 밴드 중심주파수별 평균 언어명료도 (D50) (좌: 측면객석, 우: 후면객석)

는 개폐율의 증가가 거의 언어명료도에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

객석부위별로는 개폐면에 직접 노출되지 않고 지붕 반사면의 하부에 항상 위치하는 후면객석에서는 2kHz를 제외한 모든 주파수 영역에서 개폐율 증가에 거의 선형적으로 비례하여 명료도가 증가하고 있다. 반면 개폐면에 직접 노출되는 측면객석에서는 250~1,000Hz 영역에서 개폐율 증가에 비례하여 명료도가 증가하나, 후면객석에 비해서는 증가율이 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

4. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 음향축소모형 실험을 통하여 확산 음장과 자유음장이 수직적으로 음향적 연결상태를 이룰 때 확산음장 내 음향특성의 변화를 검토하고 이를 토대로 향후 개폐식 공간의 음향계획 시 사용 가능한 설계의 기초자료를 제공하고자 하였다.

공간의 음향설계시 사용되는 기존의 설계 및 평가파라미터들을 검토한 결과, 수평커플링의 경우와 마찬가지로 수직커플링에 의한 개폐형 공간의 경우도 잔향음의 감쇠과정이 비선형적이며 기존의 잔향감 평가파라미터인 잔향시간에 의해서 적절한 평가가 이루어지기 어렵다는 것이 확인되었다. 따라서 잔향시간(T30)을 개폐에 의해서 자유음장과 음향적으로 결합되는 개폐형 공간의 음향설계 및 평가과정에서 중요설계변수로 활용 시 완공 후 얻게 되는 음향특성과 상이한 결과를 초래할 가능성이 있다.

EDT의 경우 전체적으로 초기감쇠시간은 개폐율이 증가할수록 짧아지는 경향을 나타내며 주파수별로 저주파수대역에서의 감쇠율이 가장 높게 나타났으며 고주파수 대역으로 갈수록 감쇠율은 둔화되는 것으로 평가되었다.

또한 명료도 관련 파라메타인 D50의 경우도 전반적으로 개폐율의 증가는 언어명료도를 향상시키는 것으로 분석되었다. 개폐율 증가의 영향은 125Hz~1kHz 영역에서 강하게 나타나고 있으며 개폐율 증가에 거의 선형적으로 비례하여 명료도가 증가하는 것으로 분석되었다. 반면, 고주파수 대역(2kHz)에서는 개폐율의 증가가 거의 언어명료도에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 또한 수평커플링의 경우와 비교할 때, 개폐부위에 직접 대면하는 부위와 대면하지 않는 부위에서의 잔향감 및 명료도의 변화율 및 정도는 다른 것으로 나타났다.

향후 연구는 개폐형 공간에서 잔향감과 대역성이 높은 개선된 잔향설계파라미터를 도출하는데 집중할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#’06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 정대업 외, “실내공간의 부분적 개방에 따른 음향특성변화1,” 한국공간구조학회논문집, 제7권 제2호, 2007, pp.105~114.
2. ISO 3382 Acoustics -Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameter, International Organization for Standardization. 1997.
3. Cremer, L. and Muller, H.A., Principles and Applications of Room Acoustics, Applied Science Publishers, 1978.
4. Eyring, C. F., Reverberation time measurements in coupled rooms, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 3, 1931, pp.181~206.

5. Ermann, M., Coupled volumes: Aperture size and the double-sloped decay of concert halls, *Building Acoustics*, Vol. 12, 2005, pp.1~14.
6. Bradley, D.T. and Wang, L.M., The effects of simple coupled volume geometry on the objective and subjective results from nonexponential decay, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.118, 2005, pp.1480~1490.