

음향적으로 결합된 공간의 주관적 잔향감에 관한 연구

A Subjective Study on the Reverberation Characteristics of Coupled Spaces

정 대 업*
Jeong, Dae-Up

최 영 지**
Choi, Young-Ji

요 약

본 연구에서는 음향적으로 결합된 공간에서 개구부의 크기변화에 따른 주관적 잔향감의 평가를 청취실험을 통해 실시하고 주관적 잔향감을 예측할 수 있는 새로운 물리적 지표를 제시하고자 하였다. 대상공간의 물리적 음향특성은 물론 주관적 음향평가를 위하여 1/10 스케일의 모형을 제작하여 실험에 사용하였다. 주관적 잔향감평가를 위해 바이노럴 임펄스 리스펀스(binaural impulse response)를 더미헤드(dummy head)를 이용해 녹음하여 가정화작업(auralization)을 거쳐 청취실험에 음원으로 제시하였다. 청취실험결과, 주실이 흡음력이 낮은 잔향부실과 음향적으로 결합할 경우 개구율이 12.5%(주실면적대비 1.97%)일 때 주관적 잔향감이 가장 큰 것으로 나타났으며 개구율이 25%(주실면적대비 3.94%)이상일 때 주관적 잔향감이 감소하는 것으로 나타났다. 주실이 흡음력이 높은 흡음부실과 음향적으로 결합할 경우 개구율이 0%~6.25%까지(주실면적대비 0%~0.99%)는 주관적 잔향감이 변화하지 않다가 개구율이 12.5%에서부터 점차적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이중감쇠현상을 나타내는 물리적 지표 T30/T15는 개구율의 변화에 따른 주관적 잔향감과 상관도가 거의 없는 것으로 나타났으며 저자들이 제시한 새로운 지표 T30/Tbp이 주관적 잔향감과 높은 상관도를 보였다. 또한 개구율 변화에 따른 이중감쇠현상은 초기나 중기감쇠부분에서보다 후기감쇠부분에서 에너지가 현저하게 증가하는 것으로 나타나 T30/T15에 비해 LDT/EDT나 T3/T1이 주관적 잔향감과 상관성이 높은 것으로 나타났다.

Abstract

The present work deals with subjective assessments to propose the objective parameter related to the subjective attribute of reverberation in the coupled room varied the aperture opening size. A 1/10 scale model was built and used for the measurements and subjective assessments. For the subjective tests, binaural impulse responses(BIRs) were measured using a dummy head and the measured BIRs were convolved with anechoic recorded music for the presentation over the headphones. The results showed that the perceived reverberation was the largest in the aperture opening size 12.5%(1.97% of main room surface area)and decreased with increasing the aperture opening size over 25%(3.94% of main room surface area) in the main room coupled with the secondary reverberant room. In the main room coupled with the secondary absorptive room, there was no changes in the perceived reverberation up to the aperture opening size 6.25%(0.99% of main room surface area) and it gradually decreased with increasing the aperture opening size over 12.5%. The objective parameter, T30/T15, showed a very low correlation with the perceived reverberation in the coupled room varied the aperture opening size but showed a high correlation with a new objective parameter, T30/Tbp, proposed by the authors. Because the late part decay energy more rapidly increases with increasing the aperture opening size than the early and middle part decay energy, the LDT/EDT or T3/T1 is a better quantifier to measure double slopes in the coupled room than the T30/T15.

키워드 : 음향적으로 결합된 공간, 주관적 잔향감, 청취실험, 개구율, 이중감쇠현상, 축소 모형

Keywords : coupled room, perceived reverberation, subjective tests, aperture opening size, double decays, scale model

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

음향적으로 상이한 두 공간이 개구부를 경계면으

로 결합하는 공간을 coupled space라 일컫는데 그 대표적인 공간의 예로 실외로 난 창, 개폐 가능한 돔구장, 객석과 플라이트워 간의 프로세니움 개구부, 발코니 그리고 가변음장의 조성을 목표로 설치된 부가잔향실 등을 들 수 있다. 음향적으로 결합된 공간에서는 두 공간을 연결하는 개구부의 경계조건에 따라 단일공간에서 나타나는 음감쇠패턴과는 다른 이중 혹은 삼중의 감쇠곡선(double or triple

* 정회원 · 전북대학교 건축도시공학부 부교수
** 교신저자, 전북대학교 건축도시공학부 연구교수
Tel : 063-270-2278 Fax : 063-270-2285
E-mail : youngji@chonbuk.ac.kr

decay curves)을 나타내어 단일공간에서의 음장에 측방법으로는 정확한 예측에 한계가 있다. 특히 다목적 공연장에서는 가변음장을 조성하기 위해 객석의 측벽 혹은 전·후벽에 큰 규모의 부가잔향실을 설치하여 공연종류 부합하도록 음장을 조성하고 있다. 현재 부가잔향실이 설치된 공연장에서의 음장변화를 잔향시간을 위주로 평가하고 있는데 이중감쇠와 같은 비선형적인 음감쇠패턴을 가지는 공간에서 보다 적절한 음향평가를 위해 물리적 지표와 더불어 주관적인 평가를 실시하여 그 결과를 분석하여야 한다.

음향적으로 결합된 공간에서의 이중감쇠현상을 분석하기 위해 최근 연구결과를 통해 새로운 물리적 지표가 연구자들에 의해 제시되었지만 이들 지표와 주관적인 음향과의 관계는 아직 분명하게 밝혀지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 음향적으로 결합된 공간에서 개구율의 변화에 따른 주관적 잔향감의 평가를 청취실험을 통해 실시하고 주관적 잔향감을 예측할 수 있는 새로운 물리적 지표를 제시하는데 그 목적이 있다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구에서는 개구부를 통해 음향적으로 결합된 공간에서의 잔향특성변화를 주관적 청취실험을 바탕으로 분석하고자 하였다. 대상공간의 음향적 결합은 정방형의 개구부를 통하여 이루어졌으며, 개구부의 크기, 부실의 흡음특성 및 위치를 변화시켜가며 잔향특성을 측정·분석하였으며, 더미헤드를 이용해 측정된 바이노럴 임펄스 리스펀스를 가청화하여 주관적 잔향감을 평가하였다.

대상공간의 음향특성측정은 축소모형실험을 통해 이루어졌으며, 이런 축소모형법은 실제공간에서 이루어지는 음향적 현상과 음의 거동을 가장 정확하게 재현하고 예측할 수 있는 장점이 있다. 특히 기하음향학적인 가정을 토대로 하는 컴퓨터 시뮬레이션에서는 충분히 고려되지 못하는 음의 파동성에 의해 비롯되는 회절이나 확산과 같은 현상에 의한 실내음장에의 영향을 측정할 수 있다. 축소모형은 연구목적에 따라 1/10에서 1/50까지의 축척이 주로 사용되나 본 연구에서는 대상공간의 물리적 음향특

성은 물론 주관적 음향평가를 위하여 1/10 스케일의 모형을 제작하여 실험에 사용하였다.

2. 기존연구사례

개구부를 통해 음향적으로 연결된 공간에서의 물리적 음향특성은 주실과 부실의 크기, 개구부의 크기, 주실과 부실의 흡음력 그리고 음원과 수음점의 위치 등의 실의 여러 가지 건축적인 요소에 의해 공간의 음향특성이 변화하는 것으로 여러 연구결과 밝혀졌다^{1~6)}. 특히 저자들⁶⁾과 Ermann⁴⁾의 연구에서 보고되었듯이 물리적 음향특성평가결과, 개구부의 크기가 주실의 이중감쇠현상에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났으며 주실에 대한 개구부의 크기가 3.5%를 초과하면 이중감쇠현상이 일어나지 않는 것으로 나타났다. 이중감쇠현상이 크면 주실의 잔향시간이 길게 나타나는데 이 이중감쇠현상을 예측할 수 있는 물리적 지표로 coupling coefficient, T30/T15(Harrison과 Madaras, 2001)와 이와 유사한 coupling constant, RT/T15(Ermann, 2005)등이 제시되었다. 두 지표는 전체감쇠시간/초기감쇠시간의 비로 정의되는데 coupling constant의 경우 전체감쇠시간을 60 dB까지 감쇠하는데 걸리는 시간으로 정의하고 있어 현실적으로 측정하는데 어려움이 있다.

Bradley⁸⁾은 앞서 제시된 이중감쇠지표 T30/T15와 RT/T15는 감쇠비와 에너지가 변화하는 다양한 이중감쇠패턴의 이중감쇠현상을 나타내는 지표로써 적합하지 않다고 보고 새로운 이중감쇠지표인 LDT/EDT를 제시하였다. 이 지표는 후기감쇠시간/초기감쇠시간의 비로 나타나는데 이중감쇠가 발생되기 전을 초기감쇠구간으로 이중감쇠가 발생한 후를 후기감쇠구간으로 정의하고 있다. Bradley는 개구부의 크기를 0%~2%의 4단계로 변화시켜 얻어진 이중감쇠패턴과 T30/T15 그리고 LDT/EDT의 관계를 이중감쇠곡선을 이용해 시각적으로 분석하였다. 분석 결과, 개구부의 크기가 커질수록 후기감쇠구간은 급격하게 증가하는데 반해 T30은 전체적인 감쇠구간을 산정하므로 후기감쇠구간의 변화가 제대로 반영될 수 없어 T30/T15보다 LDT/EDT가 이중감쇠현상을 나타내는 지표로 더 적합하다고 밝혔다.

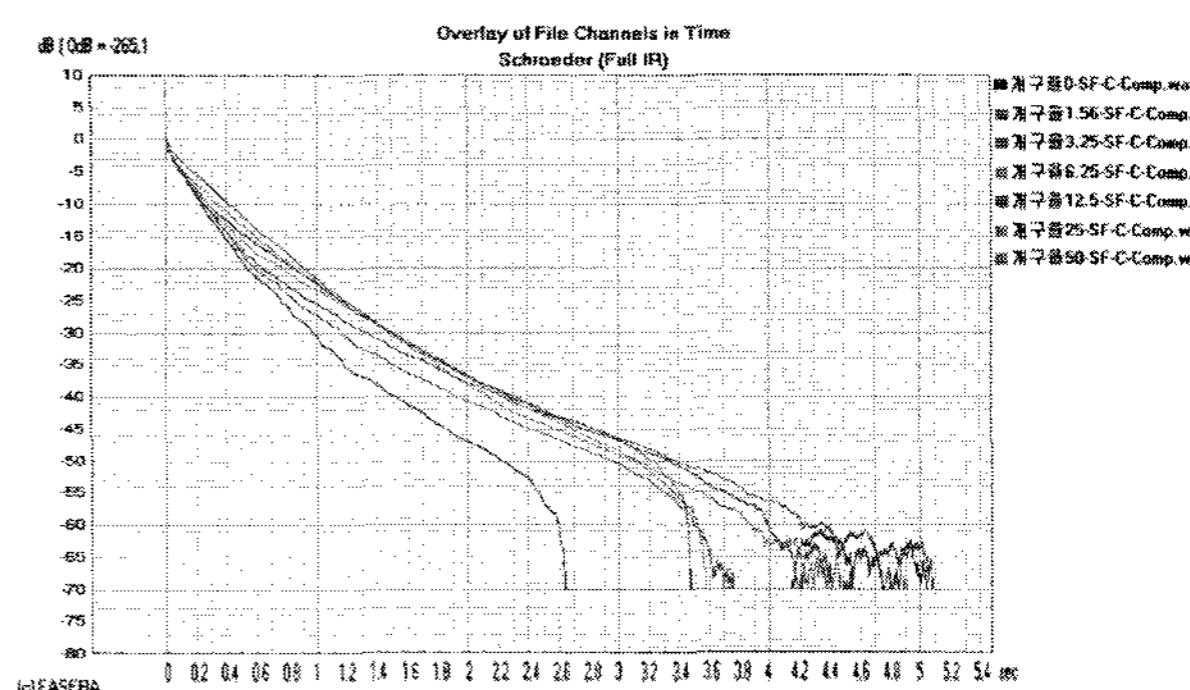
LDT/EDT의 경우 T30/T15보다 주관적 잔향감과 상관도가 높게 나타났지만 부실의 흡음특성에 따라 상관도는 달라지기 때문에 이중감쇠현상을 나타내는 완벽한 지표라고는 할 수 없다.

Ermann⁹⁾은 그의 또 다른 논문에서 이중감쇠와 단일감쇠를 피험자들이 구분할 수 있는지, 만약 구분이 가능하다면 어떤 감쇠현상을 선호하는지에 관해 청감실험을 통해 주관적인 평가를 실시하였다. 그의 연구결과에 따르면, 피험자들은 이중감쇠와 단일감쇠를 구분할 수 있으며 특히 감쇠구간의 후기부분이 증가할수록 이중감쇠와 단일감쇠를 정확하게 구분하였다. 이는 이중감쇠현상이 일어나는 공간에서의 특징으로 이중감쇠현상이 커지면 초기부분이 아닌 후기부분의 에너지가 증가하기 때문에 피험자들은 후기부분에너지를 기준으로 이중감쇠와 단일감쇠를 구분할 수 있다. 또, 이중감쇠와 단일감쇠의 선호도평가에서는 피험자들이 어느 쪽을 선호하는지 구분할 수 없다고 밝혔다.

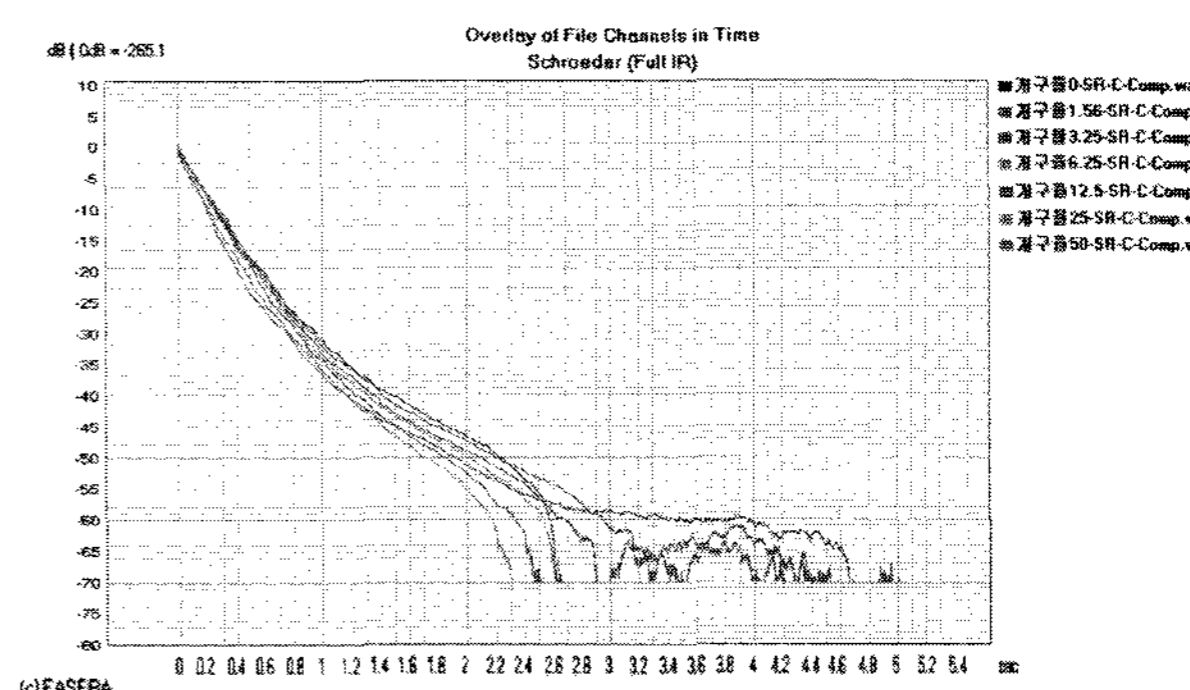
3. 실험개요

본 연구에서는 2 개실의 음향적 결합을 통한 가변음향조건 하에서, 두실의 경계면에 사용되는 개구부의 크기, 음원과 피험자의 위치에 따른 부실의 위치, 그리고 부실의 흡음률이 주실의 음향특성변화 및 분포에 미치는 영향을 주관적 평가를 통하여 살펴보고자 하였다. 대상공간의 물리적 특성측정에 관한 실험내용 및 방법에 관한 내용은 본 학회지에 앞서 게재한 논문 “음향적으로 결합된 공간의 잔향특성 변화에 관한 연구”에 자세하게 기술하고 있으므로 참고하길 바라며 본 장에서는 청취실험에 관한 내용에 관해 주로 서술하고자 한다. <그림 1>은 대상공간이 각각 다른 음향특성을 가진 두 부실과 음향적으로 결합되었을 때 개구부의 변화에 따른 음감쇠 패턴변화를 보여주고 있다. <그림 1>에 따르면 주실이 잔향부실과 음향적으로 결합된 경우 개구율이 6.25%에서 이중감쇠가 커지고 있으며 개구율이 25%~50%에서는 이중감쇠가 감소하는 것으로 나타났다. 주실이 흡음부실과 음향적으로 결합된 경우 개구율이 증가함에 따라 점차적으로 이중감쇠가 커

지는 것으로 나타났다.



(a) 주실과 잔향부실이 음향적으로 결합된 경우 (개구부에 인접한 음원 SF, 중앙 수음점)



(b) 주실이 흡음부실과 음향적으로 결합된 경우 (개구부에 멀리 위치한 음원 SR, 중앙 수음점)

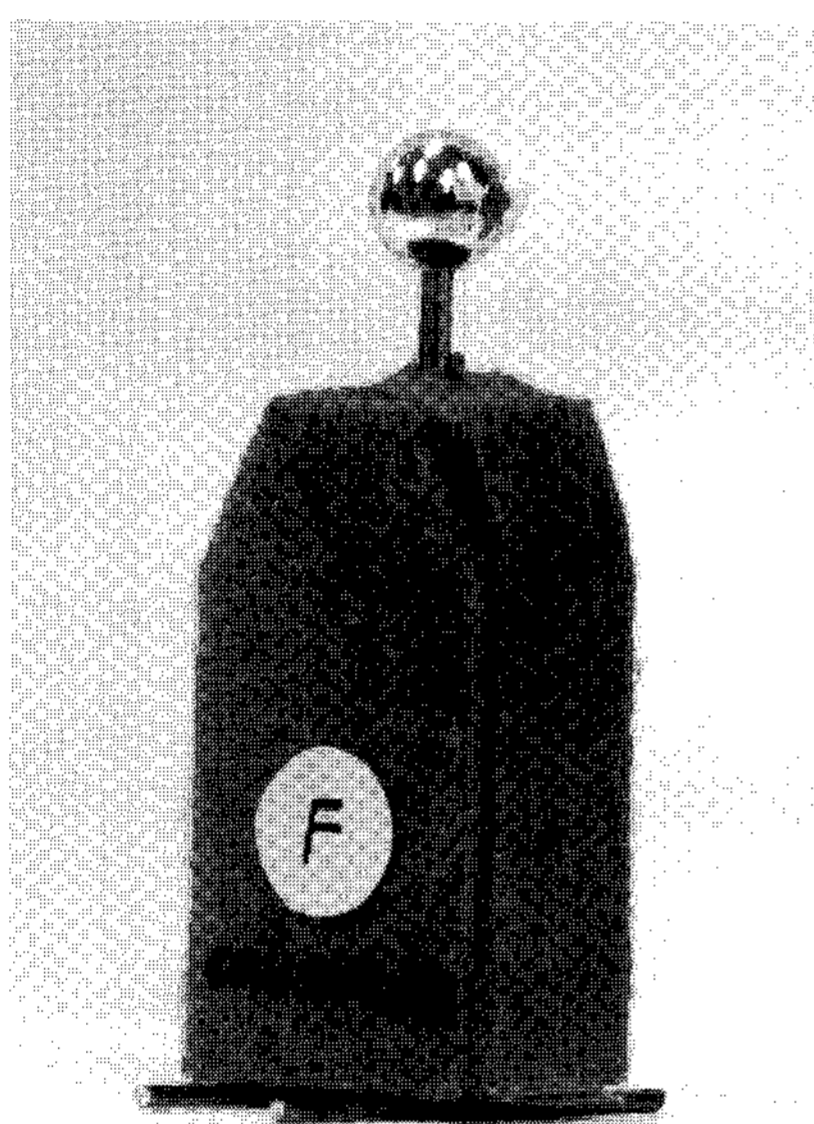
<그림 1> 개구율의 변화에 따른 음에너지감쇠패턴

3.1 청취실험

청취실험은 전북대학교 건축도시공학부의 학생 14명(남: 9명, 여: 5명)을 대상으로 실시하였으며, 피험자의 연령대는 19~29세 사이였다. 청취실험전 피험자의 청력을 테스트하였으며, 테스트결과 피험자 모두 정상청력을 가진 것으로 나타났다. 피험자 대부분이 과거 악기 연주경험이 있거나 현재 연주하고 있는 것으로 나타났으며, 정기적인(전문적인) 음악활동에는 참여하고 있지 않는 것으로 나타났다. 모든 피험자는 이와 같은 청취실험에 참여한 경험이 전혀 없는 것으로 나타났다.

음향적으로 결합된 공간에서의 주관적인 잔향감을 평가하기 위해 더미헤드로 녹음된 바이노럴 임펄스 리스펀스를 가청화하여 피험자에게 음원으로 제시하였다. <그림 2>에 바이노럴 임펄스 리스펀스 녹음에 사용된 축소더미헤드를 보여주고 있다. 주관

적인 평가를 위해 청취실험에서 사용될 stimulus는 잔향부실의 경우 개구부와 가까운 음원 SF에서 흡음부실의 경우 개구부와 멀리 위치한 음원 SR을 이용하였고, 수음점은 두 부실 모두 중앙 수음점을 이용하였다. 부실에 따라 음원점을 달리한 이유는 물리적 음향특성측정결과 잔향부실은 음원이 SF에서 흡음부실은 음원이 SR에서 잔향특성변화가 크게 나타나 이중감쇠현상의 주관적 잔향감을 평가하기에 용이할 것이라 판단되었다⁶⁾.



<그림 2> 축소더미헤드

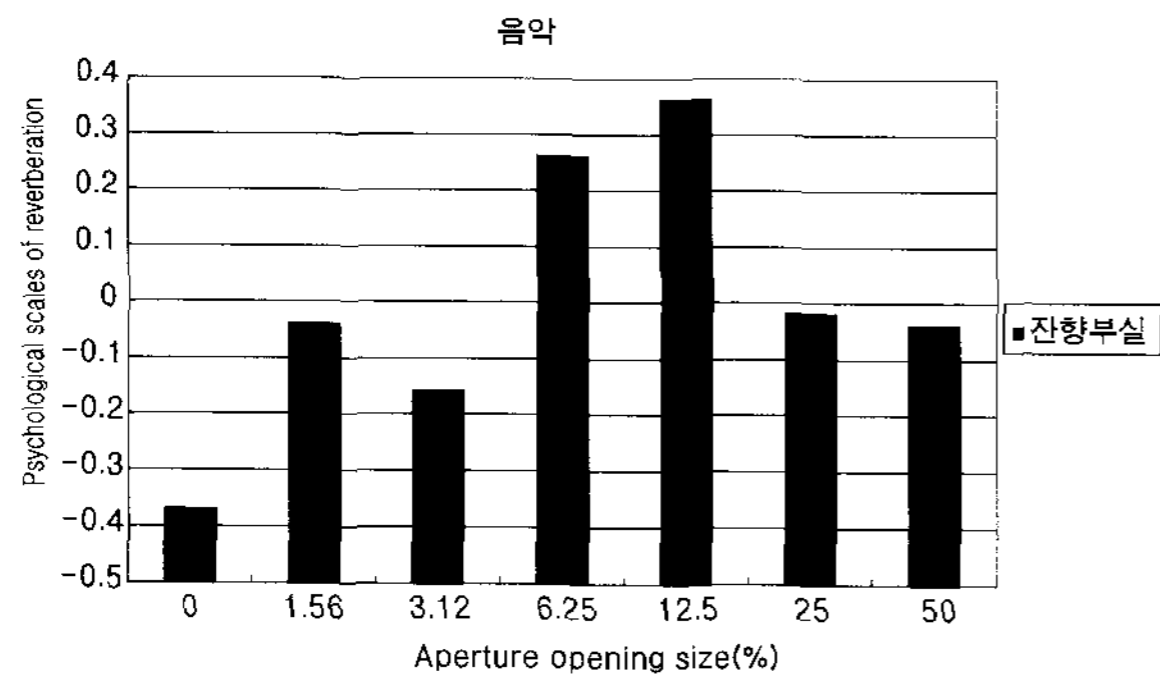
평가방법은 강제선택쌍대비교법(forced choice paired comparison method)을 이용하여 주어진 쌍의 두 stimulus중에 어느 stimulus가 잔향감이 크게 느껴지는지 선택하도록 하였다. 강제선택쌍대비교법은 stimulus를 가능한 모든 쌍으로 비교하여 각 stimulus의 순위를 정하는 방법으로 개별적으로 stimulus를 평가하는 척도법(scaling)에 비해 다양한 음원을 분별력 있게 평가할 수 있는 장점이 있다¹¹⁾. 피험자에게 청취실험의 이해를 돕기 위해서 본 실험 전에 주관적인 잔향감에 대한 구두설명과 더불어 잔향시간을 변화시킨 음악샘플로 간단한 예비실험을 실시하였다. 청취실험중에 음원은 1번씩만 들려주었고 부실별로 총 21쌍의 음원을 평가하였다. 음원은 PC를 통하여 재생되어 오픈타입헤드폰(Sennheiser HD600)을 통해 피험자에

게 들려주었으며, 가청화에 사용된 음원은 무향실 녹음원의 음악 20초(헨델의 수상음악)와 언어 6초(please listen for the word twin, the word twin)였다. 평가에 소요된 시간은 음원의 종류에 따라 10~20분 정도였으며 피험자들의 피로감을 덜기위해 각 부실별로 평가가 끝날 때마다 짧은 휴식시간을 취하도록 하였다.

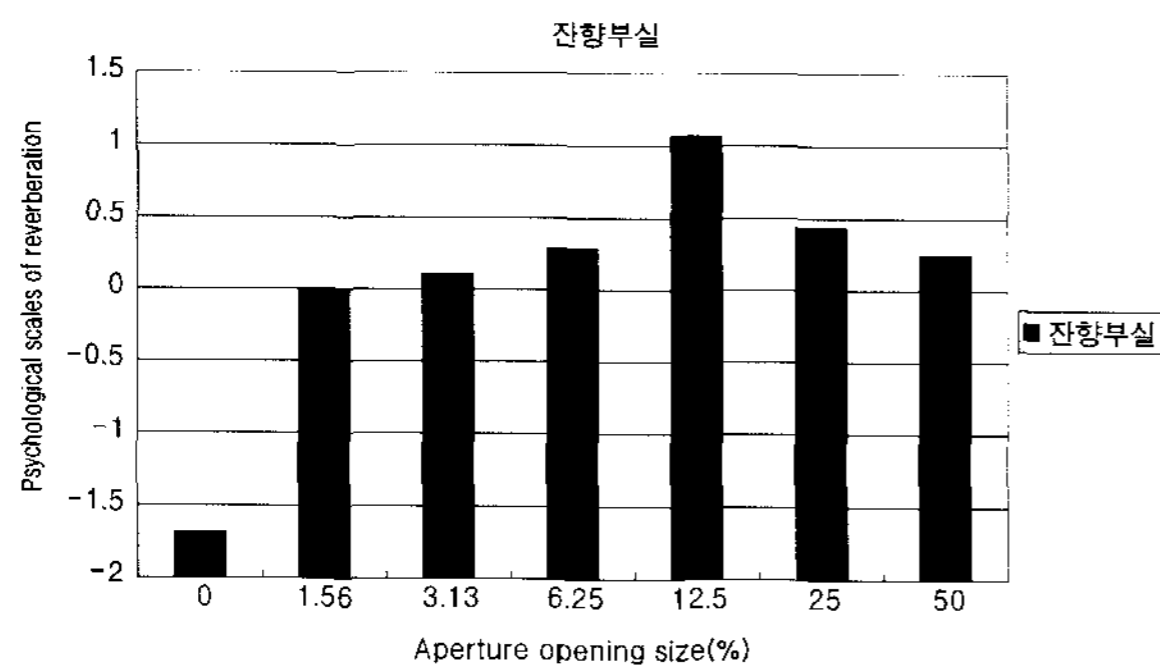
4. 음향적 결합에 의한 주관적 잔향감의 변환

4.1 잔향감 척도

피험자들이 평가한 주관적 잔향감은 Thurstone's Case V 법^{12,13)}을 이용해 심리척도로 환산하였다. 심리척도값은 stimulus 7개를 가능한 모든 쌍으로 비교해 주관적 잔향감을 평가하여 얻은 값으로 각 stimulus간에 느껴지는 주관적 잔향감을 이해하기 쉽게 수치로 환산하여 나타낸 것이다. 심리척도값은 두 stimulus간의 차이를 계산해 거리감을 표시하는데 예를 들어, 그 차이값이 0.68 이상(3명중 2명이 두 stimulus중 한 stimulus의 잔향감이 크다고 답하였을 때)이면 심리적으로 한 stimulus의 잔향감이 크다고 느끼는 것이다. 청취실험을 통해서 얻어진 심리척도값이 유의한지 검증하였고¹⁴⁾ 그 결과, 5% 이내에서 심리척도값이 유의한 것으로 나타났다. <그림 3>은 잔향부실일 때 개구율의 변화에 따라 피험자들이 평가한 주관적인 잔향감을 심리척도값으로 환산하여 나타낸 것이다. 음원이 음악인 경우 개구율이 12.5% 일 때 피험자들은 잔향감이 가장 크다고 평가하였으며 개구율이 0% 일 때 잔향감이 가장 작다고 평가하였다. 두 stimulus의 심리척도값을 보면 개구율이 12.5% 일 때 0.73이고 개구율이 0% 일 때 -0.37으로 두 stimulus의 심리척도차는 0.73으로 피험자들은 개구율이 0%에 비해 12.5%일 때 잔향감이 크다고 평가하였다. 심리척도값은 개구율이 25%일 때 감소하게 되는데 개구율이 25%일 때와 50%일 때 심리척도값은 각각 -0.02와 -0.04로 유의한 차이를 보이지 않고 있어 이런 경우 피험자들은 두 stimulus의 잔향감은 차이가 없다고 평가하였다. 음원이 언어인 경우 음악에 비해 stimulus간



(a) 잔향부실(음악)



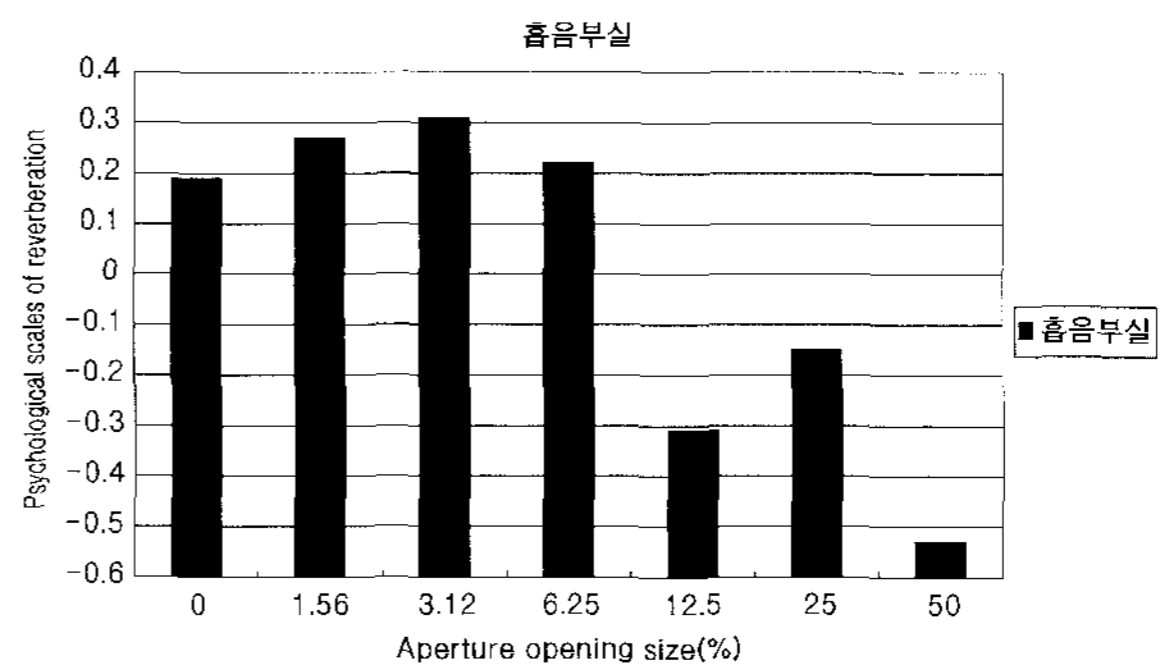
(b) 잔향부실(언어)

<그림 3> 개구율의 변화에 따른 주관적 잔향감의 심리척도값

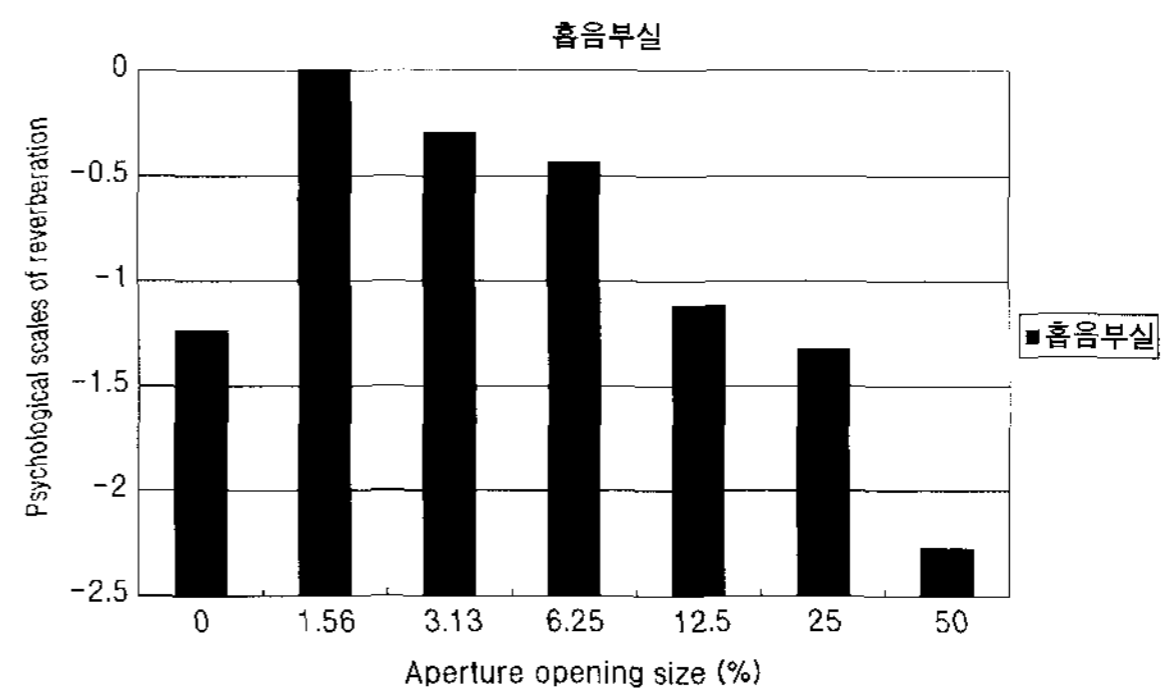
에 느껴지는 잔향감은 개구율의 변화에 따라 현저하게 큰 차이를 보이는데 피험자들은 개구율이 0% 일 때에 비해 개구율이 1.56%~50%일 때 잔향감이 크다고 평가하였으며 개구율이 1.56%~6.25%일 때 느껴지는 잔향감에는 차이가 없다고 평가하였다. 음원이 음악일 때와 동일하게 피험자들은 개구율이 12.5%일 때 느껴지는 잔향감이 가장 크다고 평가하였으며 개구율이 25%이상에서 잔향감은 감소한다고 평가하였다. 음원에 따라 각 개구율의 변화에 따른 잔향감에 대한 심리척도값이 다르게 나타나는데 그 이유로는 음원이 음악일 때 오케스트라 연주의 서로 다른 악기소리로 인해 정확한 잔향감의 판단이 어려웠으나 음원이 언어일 때 음악에 비해 훨씬 잔향감을 판단하기가 용이하였다고 청감실험 후 피험자들과의 인터뷰결과 밝혀졌다.

<그림 4>는 흡음부실일 때 개구율의 변화에 따라 피험자들이 평가한 주관적인 잔향감을 심리척도값으로 환산하여 나타낸 것이다. 흡음부실의 경우도 잔향부실과 마찬가지로 음원의 종류에 따라 잔향감의 심리척도값은 stimulus별 차이가 다르게 나타나

는데 음원이 음악인 경우에 비해 언어인 경우 개구율의 변화에 따른 잔향감의 심리척도값은 stimulus 간의 차이가 현저하게 나타난다. 음원이 음악인 경우 개구율이 0%~6.25%에서는 피험자들은 stimulus 간에 느껴지는 잔향감의 차이는 거의 없다고 평가하였고 개구율이 12.5%에서부터 잔향감이 줄어든다고 평가하였다. 개구율이 0%~6.25%일 때 개구율 크기가 증가함에 따라 잔향시간은 점차적으로 감소하였지만 피험자들이 평가하는 주관적 잔향감은 개구율의 크기에 따른 주관적 잔향감의 차이는 유의하지 않는 것으로 나타나 흡음부실의 경우 개구율이 6.25% 이하의 작은 개구율에서는 개구율의 크기가 주관적 잔향감에 미치는 영향은 거의 없다고 볼 수 있다. 개구율이 50%일 때 느껴지는 잔향감이 가장 작으며 잔향감이 가장 크게 느껴지는 개구율 3.12%와의 심리척도값의 차는 0.84이다. 음원이 언어일 때는 개구율이 1.56%일 때 피험자들은 잔향감이 가장 크다고 하였고 개구율이 50%일 때 잔향감이 가장 작다고 하였다. 개구율이 0%에 비해서 개구율이 1.56%~6.25%일 때 잔향감이 크다고 하였는데 이 결



(a) 흡음부실(음악)



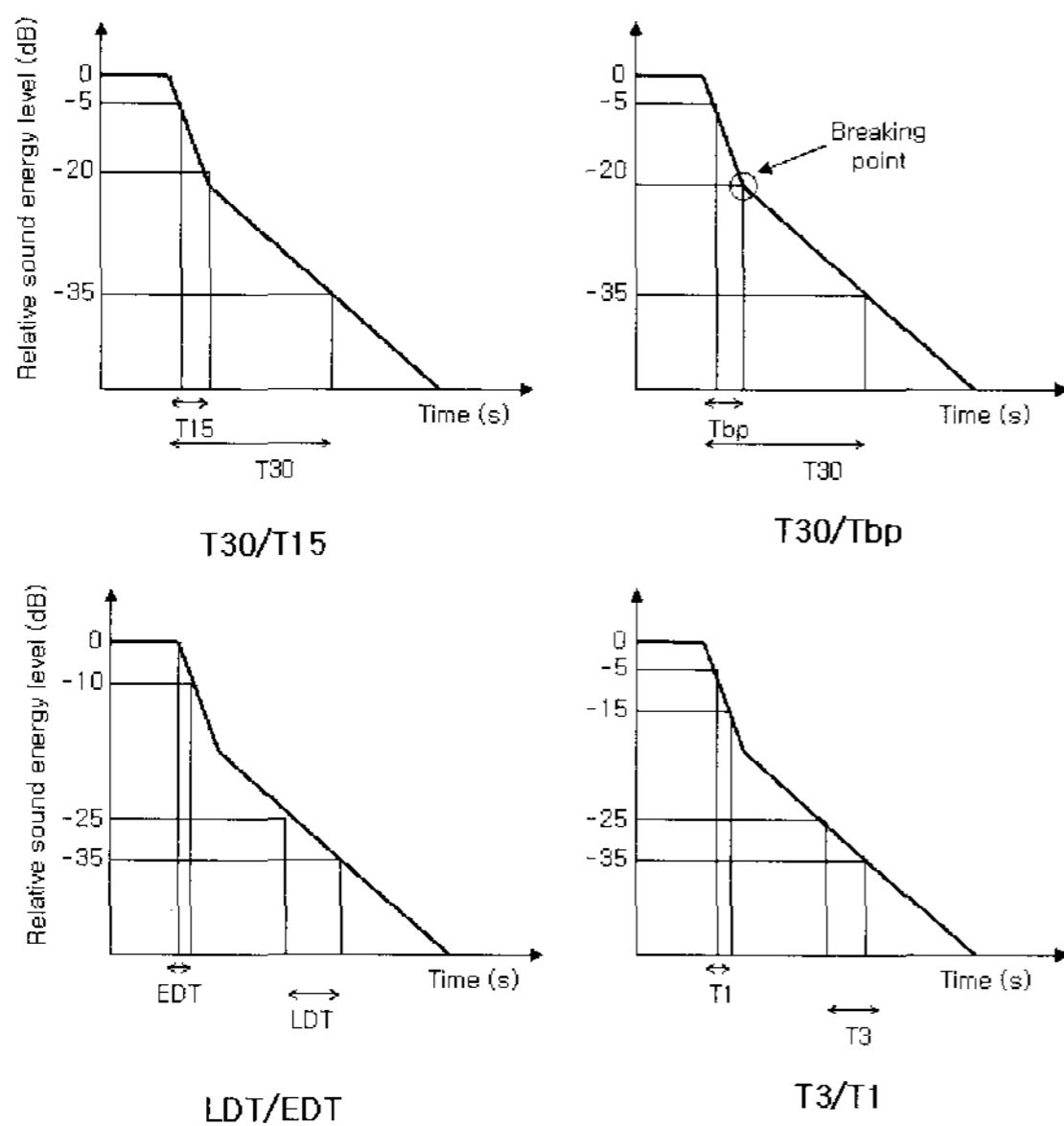
(b) 흡음부실(언어)

<그림 4> 개구율의 변화에 따른 주관적 잔향감의 심리척도값

과는 개구율이 증가함에 따라 단계적으로 잔향시간이 감소한다는 물리적 지표결과와 상이하게 나타나며 음원이 음악일 때와 비교해 개구율이 0%일 때와 1.56%일 때의 주관적 잔향감의 차이는 현저하였다. 하지만 음원이 음악일 때와 유사하게 개구율이 12.5%이상일 때 주관적 잔향감이 작아져 개구율이 50%일 때 가장 작게 나타난다.

4.2 주관적 잔향감과 물리적 지표와의 관계

음향적으로 결합된 공간에서의 이중감쇠현상을 나타내는 물리적 지표는 정의하는 구간에 따라 크게 두 가지로 분류될 수 있는데 첫 번째 지표는 전체감쇠시간/초기감쇠시간의 비로 나타낼 수 있으며 (예를 들어, T30/T15와 T30/Tbp), 두 번째 지표는 후기/초기감쇠시간의 비(예를 들어, LDT/EDT와 T3/T1)로 나타낼 수 있다. <그림 5>에 각 지표의 개념도를 보여주고 있다.



<그림 5> 이중감쇠를 나타내는 여러 가지 물리적 지표

Harrison과 Madaras⁷⁾에 의해 제안된 음향적 결합계수 T30/T15는 초기감쇠시간, T15(-5 dB~-20 dB),에 대한 전체감쇠시간, T30(-5 dB~-35 dB),의 비로 정의되는데 음향적 결합계수값이 높아지면 초기감쇠부분과 전체감쇠부분의 차이가 커져 이중감쇠가 크게 나타난다고 할 수 있다. 그러나 음향적

결합계수의 경우 감쇠시간의 산정구간이 일부 중복되어 있고 이중감쇠가 T15의 구간전에 발생하거나 구간후에 발생할 수 있어 정확한 지표라 할 수 없다. 정확한 초기감쇠구간의 산정을 위해 T15가 아닌 이중감쇠가 발생하기전까지의 구간을 초기감쇠구간으로 선정하여 계산한다면 더 정확한 지표가 될 수 있다. 이에 저자들은 새로운 지표 T30/Tbp을 제시하였는데 여기서 Tbp는 이중감쇠가 발생하기전까지의 초기감쇠시간을 말한다.

Bradley⁸⁾에 의해 물리적 지표 LDT/EDT가 제안되었으며 초기감쇠시간 EDT(0 dB~-10 dB)에 대한 후기감쇠시간 LDT(-25 dB~-35 dB)의 비로 정의된다. 그러나 EDT의 경우 초기감쇠부분에 비선형적인 감쇠패턴이 나타날 수가 있어 초기감쇠구간을 0 dB가 아닌 -5 dB에서 시작하는 것이 적절하다고 할 수 있다. 이에 저자들은 새로운 지표 T3/T1을 제시하였는데 여기서 T1은 -5 dB~-15 dB까지의 초기감쇠시간을, T3은 -25 dB~-35 dB까지의 후기감쇠시간을 각각 정의하고 있다. 본 연구에서는 음향적으로 결합된 공간에서의 주관적 잔향감과 상관성이 있는 물리적 지표를 알아보고자 잔향시간 T30을 비롯하여 음향적 결합계수 T30/T15, LDT/EDT 저자들이 제시한 새로운 지표 T30/Tbp, T3/T1과 주관적 잔향감의 상관관계에 관해서 조사하였다. <표 1>에서 주관적 잔향감과 물리적 지표와의 상관계수를 제시하였다.

<표 1> 주관적 잔향감과 물리적 지표와의 상관계수

부실	음원	물리적 지표와의 상관계수				
		T30	T30/T15	T30/Tbp	LDT/EDT	T3/T1
잔향부실	음악	0.911 (p=0.00438)	0.136 (p=0.77137)	0.684 (0.0899)	0.193 (p=0.67771)	-0.041 (p=0.93014)
	언어	0.788 (p=0.03516)	0.174 (p=0.70962)	0.263 (0.56843)	0.196 (p=0.67286)	0.038 (0.93488)
흡음부실	음악	0.607 (p=0.14875)	0.097 (p=0.83534)	-0.582 (p=0.17021)	-0.666 (p=0.1025)	-0.794 (p=0.03303)
	언어	0.323 (p=0.4794)	0.128 (p=0.78493)	-0.833 (p=0.01996)	-0.857 (p=0.0137)	-0.868 (p=0.01135)

잔향부실의 경우 음원의 종류에 따라 주관적 잔향감과 각 물리적 지표와의 상관계수와의 차이를 보였다. 음원이 음악일 때 주관적인 잔향감과 높은 상관도를 나타낸 물리적 지표는 T30과 T30/Tbp였

으며, 음원이 언어일 때 높은 상관도를 나타낸 물리적 지표는 T30이었다. 잔향부실에서는 기존에 제시된 T30/T15와 LDT/EDT는 주관적인 잔향감과 낮은 상관도를 나타내었다. 그 원인을 살펴보면 주관적인 잔향감은 개구율이 6.25%에서 상승하여 12.5%에서 가장 높게 나타나는데 비해 T30/T15와 LDT/EDT는 개구율이 3.12%에서 가장 높고 6.25%부터는 계수가 낮아지는 것으로 나타나 피험자들이 느끼는 주관적 잔향감과 다른 패턴을 보이고 있다. T30/T15와 LDT/EDT는 구체적으로 정의하는 구간은 다르지만 전체적으로 초기감쇠구간에 대한 전체 혹은 후기감쇠구간의 비로 나타나는데 초기감쇠구간을 T15(-5 dB~-20 dB)나 EDT(0 dB~-10 dB)가 아닌 실제로 이중감쇠가 시작되기 전까지의 구간으로 정의하여 주관적인 잔향감과 상관도를 살펴보았다. 그 결과, 음원이 음악일 때 주관적인 잔향감과 유의한 상관도를 보였으나 음원이 언어일 때는 낮은 상관도를 보였다. 잔향부실에서는 음원의 종류에 관계없이 주관적 잔향감과 가장 높은 상관관계를 나타낸 음향지표는 T30으로 나타났다.

흡음부실의 경우 음원에 상관없이 주관적 잔향감과 높은 상관도를 보이는 물리적 지표는 LDT/EDT, T3/T1 그리고 T30/Tbp로 나타났다. 음원이 음악인 경우 주관적인 잔향감은 T30과 유의한 상관도를 보였으나 잔향부실보다 낮은 상관도를 보여 잔향부실과는 다른 결과를 나타내고 있다. 잔향부실과 달리 흡음부실에서는 주관적인 잔향감과 LDT/EDT, T3/T1 그리고 T30/Tbp는 역관계를 나타내고 있는데 그 이유는 이들 지표의 계수가 높을수록 음향적 결합지수가 높은 것을 의미하는 것으로 흡음부실에서는 잔향부실과 반대로 음향적 결합지수가 높으면 잔향시간이 감소하기 때문이다.

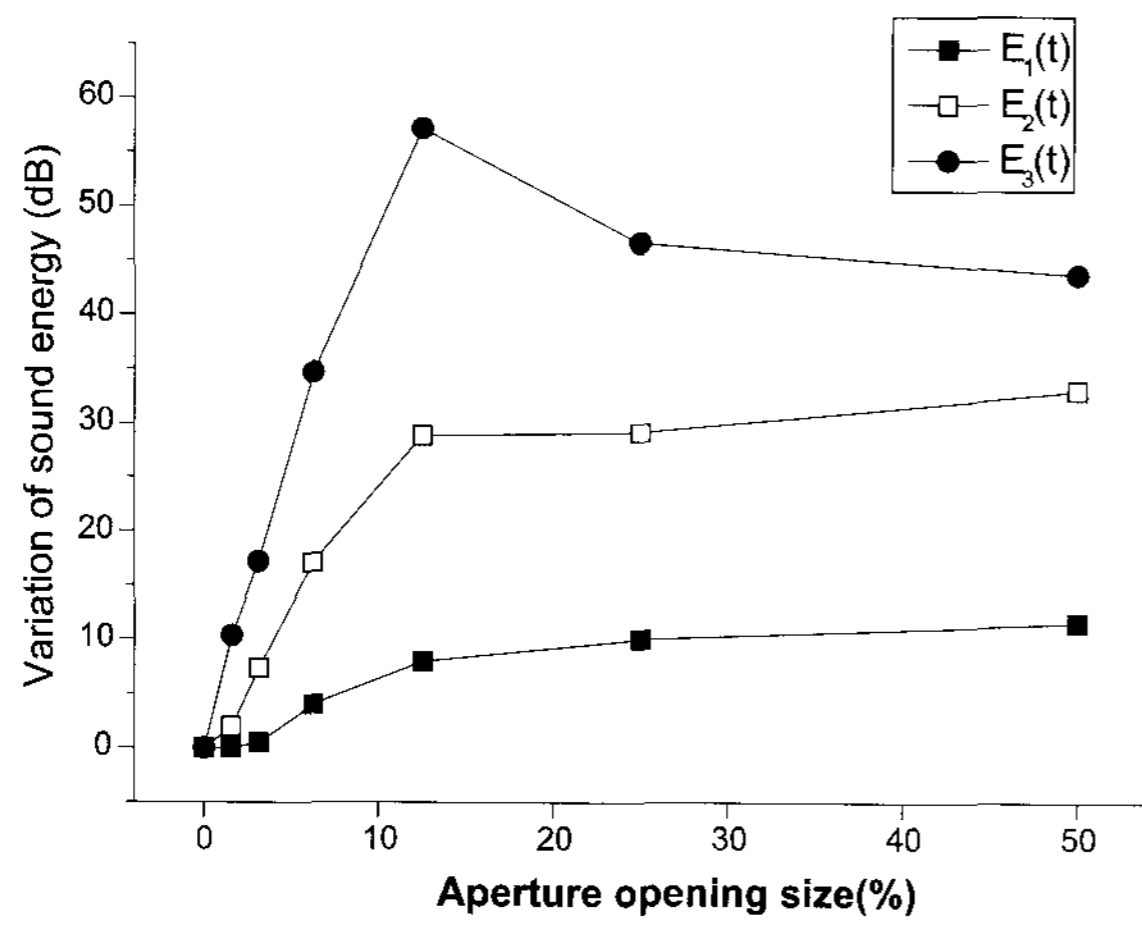
T30/T15는 두 공간의 결합정도를 나타내는 물리적 지표로써 주관적인 잔향감과 관계는 아직 밝혀진 바가 없으며 본 연구에서는 주관적인 잔향감과 상관도가 낮은 것으로 나타나 음향적 결합계수가 주관적인 잔향감을 나타내기에는 적합하지 않은 것으로 나타났다. 반면 T30/Tbp의 경우 잔향부실에서 언어를 음원으로 사용한 경우를 제외하고는 주관적 잔향감과 비교적 높은 상관계수를 나타내고

있어 초기잔향시간의 적절한 구간 선정이 이중감쇠가 나타나는 실의 잔향감을 나타내는데 중요하다고 할 수 있다. 후기/초기감쇠시간의 비인 LDT/EDT와 T3/T1은 흡음부실에서 주관적인 잔향감과 높은 상관관계를 보이고 있는데 그 이유는 흡음부실의 경우 잔향부실과 달리 개구율이 증가하면 잔향시간이 단계적으로 짧아지는 선형적인 패턴을 보이고 있기 때문이다. 잔향부실의 경우 개구율이 12.5% 이상일 때 잔향시간이 감소하는 것으로 나타나 이 같은 비선형적인 감쇠패턴을 후기/초기감쇠시간의 비로 주관적 잔향감을 나타내기에는 적합하지 않다. 본 연구결과에서 알 수 있듯이 부실의 잔향특성에 따라 주실의 잔향특성을 예측할 수 있는 물리적 지표는 각각 다르게 나타난다.

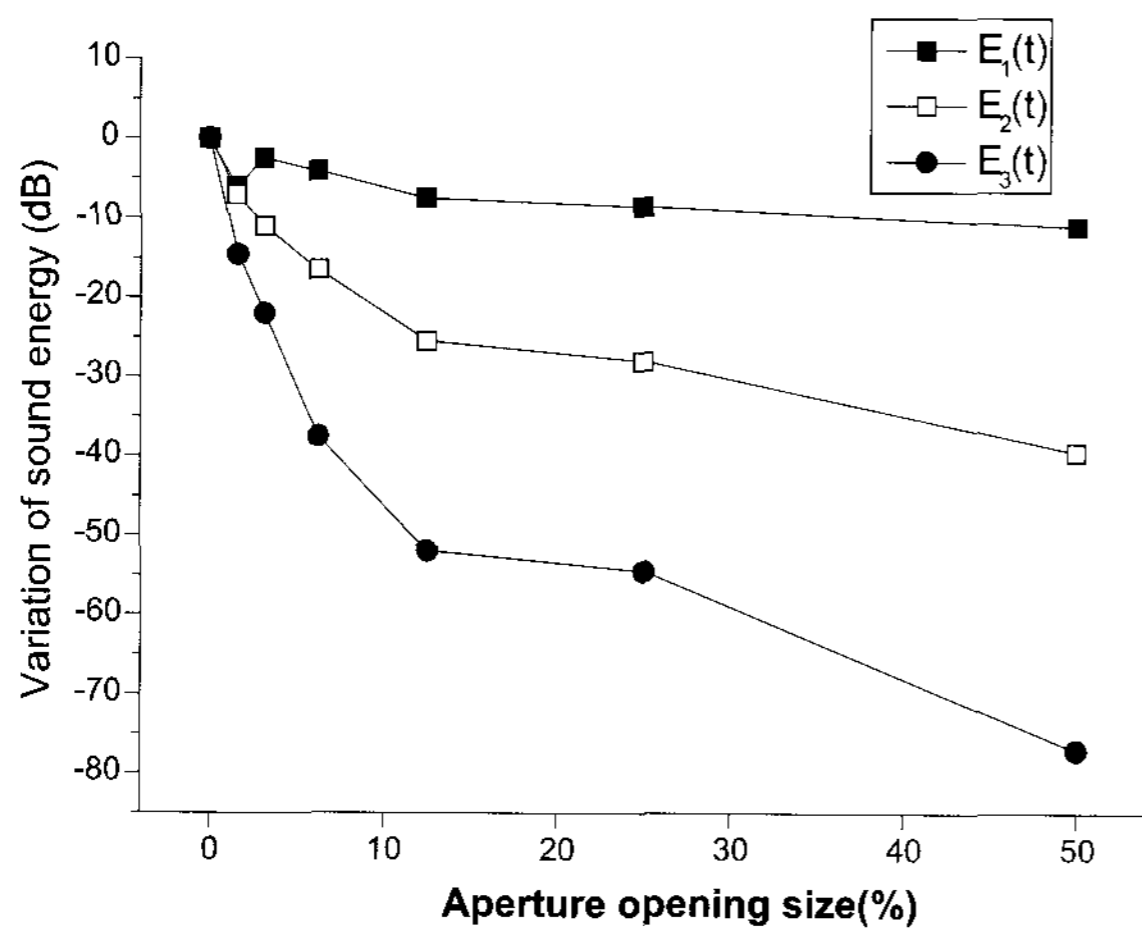
5. 결론 및 종합토의

본 연구에서는 음향적으로 결합된 공간에서의 주관적인 잔향감에 관해서 청취실험을 이용해 조사하였다. 음향적으로 결합된 공간에서 발생하는 이중감쇠의 정도를 알아보기 위한 물리적 지표로 T30/T15가 제시되었다. 하지만 본 연구의 청감실험결과 음향적 결합계수와 주관적인 잔향감과는 낮은 상관도를 보여 T30/T15는 이중감쇠정도를 나타내는 단순한 물리적 지표로써 주관적인 잔향감을 평가하기에는 적합하지 않은 것으로 나타났다. 초기감쇠시간에 대한 후기감쇠시간의 비로 나타낸 LDT/EDT와 T3/T1도 부실의 종류에 따라 주관적인 잔향감과 상관도는 다르게 나타났다. 초기감쇠시간을 이중감쇠가 시작되기 전까지의 구간으로 정의한 T3/Tbp의 경우 잔향부실에서 LDT/EDT와 T3/T1보다 좀 더 높은 상관도를 보여주었다.

음향적 결합계수나 초기감쇠시간에 대한 후기감쇠시간의 비로 나타낸 물리적 지표는 오히려 T30보다 주관적 잔향감과 낮은 상관도를 나타내어 음향적으로 결합된 공간에서 발생하는 이중감쇠의 경우 감쇠구간에 따른 음에너지의 변화를 조사하여 감쇠구간별 에너지 변화량과 주관적 잔향감과 관계를 분석하였다. <그림 6>에 음향적으로 결합된 공간에서의 이중감쇠에 따른 감쇠구간별 에너지 변화량을



(a) 잔향부실



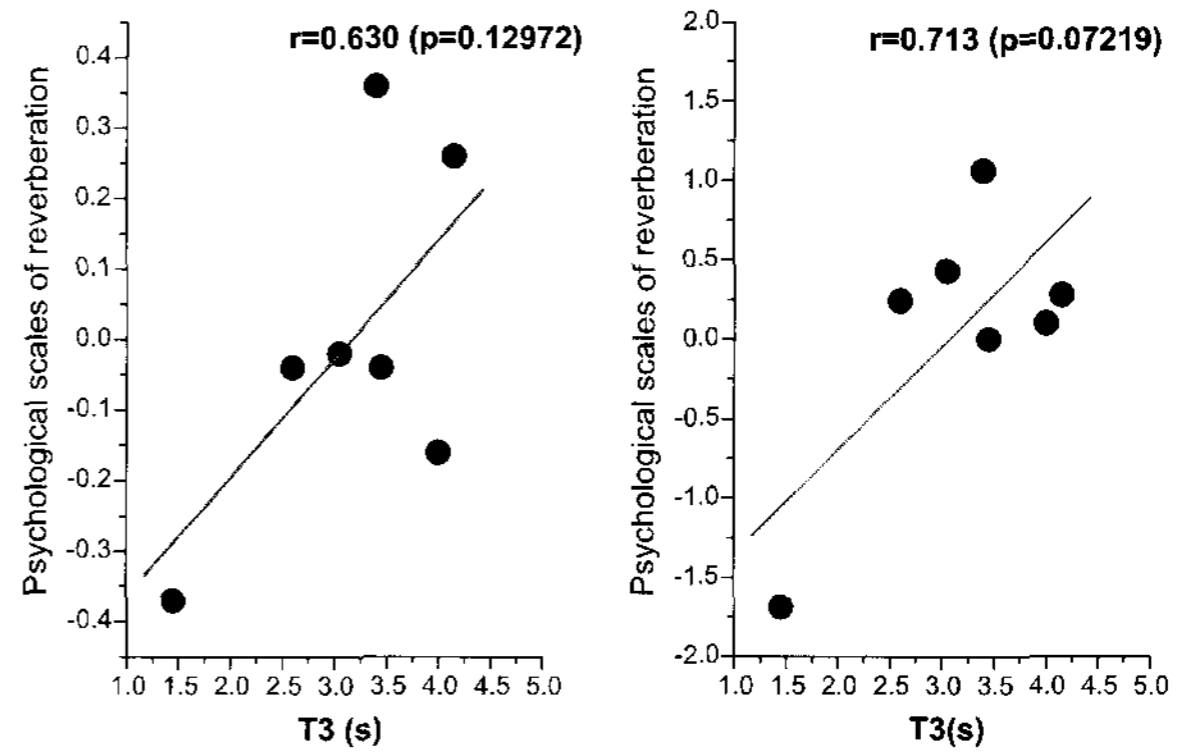
(b) 흡음부실

(E_1 : 초기감쇠부분 에너지 변화량, E_2 : 중기감쇠부분 에너지 변화량, E_3 : 후기감쇠부분 에너지 변화량)

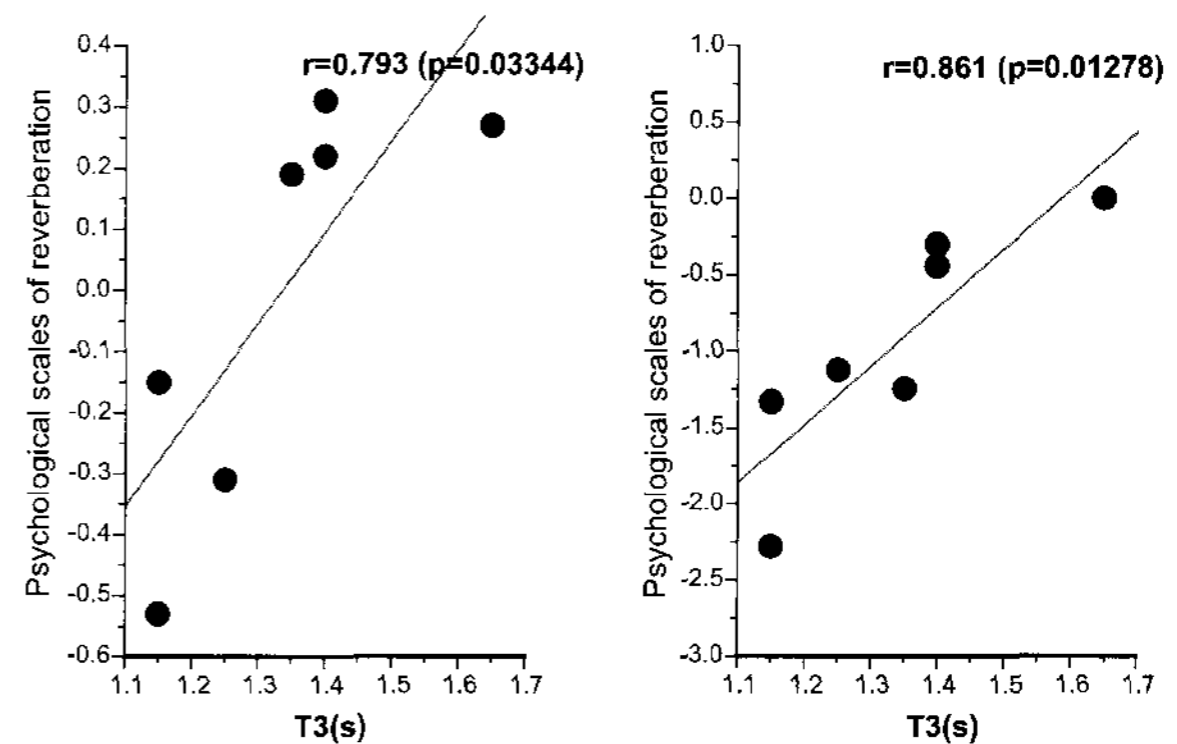
<그림 6> 이중감쇠에 따른 감쇠구간별 에너지 변화량

분석한 저자들의 이전연구결과를 보여주고 있다¹⁵⁾.

감쇠수간별 에너지 변화량은 감쇠구간을 초기(-5 dB~-15 dB), 중기(-15 dB~-25 dB), 후기(-25 dB~-35 dB) 부분으로 나누어 선형fitting을 통하여 각 구간별 음에너지 변화 값을 적분하여 나타내었다(자세한 적분과정은 참고문헌¹⁵⁾의 p. 48-50를 참조하기 바람). <그림 6>에 따르면 잔향부실의 경우 개구율이 12.5%일 때 이중감쇠에 의한 후기부분에너지가 가장 크게 나타났으며 개구율이 25%와 50%에서는 후기부분에너지가 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 흡음부실에서는 개구율의 증가에 따라 후기부분 에너지가 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 이에 음향적으로 결합된 공간에서 주관적인 잔향감에 영향을 주는 것은 이중감쇠발생전의 초기부분의 에너



(a) 잔향부실(좌: 음악, 우: 언어)



(b) 흡음부실(좌: 음악, 우: 언어)

<그림 7> 후기감쇠시간 T3(-25 dB~-35 dB)과 주관적인 잔향감과의 상관관계

지보다 이중감쇠발생후의 후기부분의 에너지의 기여도가 큰 것으로 나타나 이중감쇠발생후의 후기감쇠 시간 T3(-25 dB~-35 dB)과 주관적인 잔향감과의 상관관계를 분석하여 그 결과를 <그림 7>에 제시하였다.

그 결과, 기존에 제시된 물리적 지표보다 높은 상관도를 나타냄을 알 수 있었다. 잔향부실보다 흡음부실에서 주관적인 잔향감과 T3의 상관도는 더 높게 나타나는데 그 이유는 흡음부실의 경우 개구율의 증가에 따라 후기에너지가 점차적으로 감소하기 때문이다. 기존의 연구결과에 따르면 선형적인 음감쇠패턴을 나타내는 단일공간에서 주관적 잔향감에 영향을 미치는 것은 초기감쇠부분(0 dB~-10 dB)이라고 알려져 있다. 하지만 본 연구결과를 살펴보면 이중감쇠와 같은 비선형적인 음감쇠패턴을 나타내는 음향적으로 결합된 공간에서의 주관적 잔향감에 영향을 미치는 것은 초기 (-5 dB~-15 dB) 혹은 중기 감쇠부분(-15 dB~-25 dB)보다 이중감쇠발생후의 후기감쇠부분(-25 dB~-35 dB)이 크다고 밝혀졌다. 본

연구결과를 검증하기 위해서는 후기감쇠부분의 에너지를 단계적으로 변화시켜 피험자들이 느끼는 주관적 잔향감에 관한 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. 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.
6. 최영지, 김지영, 정대업 (2007), 축소모형을 이용한 coupled space의 음장변화에 관한 연구-음향특성변화를 위주로, 제14회 한국음향학회 영남지회 학술발표회.
7. B. Harrison and G. Madaras (2001), Computer modeling and prediction in the design of coupled volumes for a 1000-seat concert hall at Goshen college, Indiana, *J. Acoust. Soc. Am.* 109, 2388(A).
8. D. T. Bradley (2006), Analysis of parameter effects on sound energy decay in coupled volume systems, PhD dissertation, University of Nebraska, pp.102-104.
9. M. Ermann (2007), Double sloped decay: subjective listening test to determine perceptibility and preference, *Building Acoustics*, 14, pp.91-108.
10. ISO 9613-1:1993, "Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors-part1: calculation of the absorption of sound by the atmosphere"
11. E. Parizet, N. Hamzaoui, and G. Sabatie (2005), Comparison of some listening test methods: A case study, *Acta Acustica* 91, pp.356-364.
12. L. L. Thurstone (1927), A law of comparative judgement, *Psychological Review*, 36, pp.273-286.
13. H. Gulliksen (1956), A least squares solution for paired comparisons with incomplete data, *Psychometrika*, 21, pp.125-134.
14. F. Mosteller (1951), Remarks on the method of paired comparisons:3. A test of significance for paired comparisons when equal standard deviations and equal correlations are assumed, *Psychometrika*, 16, pp.207-218.
15. 김지영 (2007), 축소모형실험을 이용한 coupled space의 음장변화에 관한 연구, 석사학위논문, 전북대학교, pp.48-52.