

대공간 스피커 배치 방식의 주관적 평가 연구

Subjective Evaluation of Loudspeaker Layouts for a Large Dome

정 대 업*
Jeong, Dae-up

최 영 지**
Choi, Young-Ji

김 정 수***
Kim, Jeong-su

요 약

본 연구는 음향증폭시스템 중에서 청취자에게 가장 많은 영향을 미치는 스피커 시스템의 배치방식과 스피커 특성변화에 따른 청취자들의 주관적 반응을 명료도와 음향선호도 측면에서 측정하고 비교·분석함으로써 향후 대공간의 음향증폭시스템의 설계 시 활용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 하였다. 연구 결과, 전체적으로 실의 흡음률이 결정적인 영향을 미치며, 천장의 흡음률이 높을수록 지각된 명료도는 높아지는 것으로 나타났다. 스피커가 낮게 설치된 경우에는 적용된 스피커의 개수가 많고 지향각이 좁은 스피커들이 사용된 경우의 명료도가 가장 높게 평가되었다. 그러나 전체적으로는 스피커가 천장 흡음면에 가까울수록, 그리고 60도 이하의 좁은 지향각을 갖는 스피커를 사용할 때 높은 명료도를 얻을 수 있으며, 본 연구의 검토범위에서는 8~10개 정도의 스피커가 적용되었을 때 주관적인 명료도 및 선호도가 가장 높게 평가되었다.

Abstract

The present study tried to provide useful data for the acoustic design of sound amplification system with measuring and analyzing subjective preference and intelligibility by varying the number of speakers and their directivity. The results suggest that the room absorption plays a key role in subjective responses of listeners and the large sound absorption of ceiling contributes to the increase of intelligibility. Also, larger number of speakers with narrow directivity improves perceived intelligibility when speakers were installed at the lower height. However, the highest degree of intelligibility and preference were obtained when speakers were installed close enough to the sound absorptive ceiling. The highest intelligibility and preference were observed when 8 to 10 speakers with the directivity of 60 degree were used.

키워드 : 음향증폭시스템, 스피커배치, 건축음향, 명료도, 선호도

Keywords : sound reinforcement system, speaker layout, architectural acoustics, speech intelligibility, preference

1 서 론

최근 돐구조를 비롯한 대규모 체육시설의 건립계획이 활발하게 진행되고 있다. 특히 200미터 이상의 긴 스패스로 계획되고 있는 구조물에서 육성에 의한 음성정보전달은 불가능하며, 따라서 전기적인 음향증폭 시스템의 역할이 매우 중요하다.

효과적인 전기음향 시스템은 시스템을 구성하는 기기의 특성 및 성능이 많은 영향을 미치며, 시스템의 각 구성요소들을 효율적으로 조합하고 배분하는 작업이 매우 중요하다. 특히 스피커 시스템은 최종적으로 청취자들에게 음을 전달하는 창구의 역할을 하므로 가장 큰 영향을 미치는 구성요소이다. 대공간의 경우, 규모가 커짐에 따라 각 스피커들이 넓은 면적을 커버해야 하며, 스피커의 설치위치 및 지향 특성 및 지향각에 따라 설치되는 스피커의 개수가 증가하고 그에 따른 객석에서의 음향적 성능도 변화하게 된다.

일반적으로 전기적인 음향증폭 시스템을 적용하는 대공간의 경우, 설계단계에서 컴퓨터 시뮬레이션

* 정회원, 전북대학교 건축공학과 부교수, 공학박사
Tel: 063-270-2278 Fax:063-270-2285
E-mail : daeupj@jbnu.ac.kr

** 전북대학교 건축공학과 연구교수, 공학박사
E-mail : youngji@jbnu.ac.kr

*** 학생회원, 전북대학교 건축공학과 석사과정
E-mail : kjngsu@gmail.com

에 의한 음압 레벨과 언어명료도의 평가를 통해서 적용된 시스템의 적정성을 평가하고 있다. 그러나 MRIR (monaural room impulse response)을 기초로 하는 이들 평가변수는 두 귀로 청취하는 실제상황과 많은 차이가 있으며, 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 평가된 언어명료도가 실제 상황보다 과대 또는 과소평가되는 경향이 보고되고 있다[1]. 또한 실의 용적이 매우 크고, 균일한 흡음면의 분포가 어려운 대공간에서 나타나는 음에너지의 비선형 감쇠특성으로 인해 기존의 평가 파라메타에 의한 평가결과와 실제 청취자들이 경험하게 되는 음향 사이에는 많은 차이가 존재할 수 있다. 따라서 대공간의 음향 설계 시, 고려된 전기음향 시스템의 적정성 여부를 평가하고 설계 대안을 발전시켜 나가는 과정에서 단계별 청취실험의 수행과 그 결과의 피드백이 매우 중요하다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 음향증폭 시스템 중에서 청취자에게 가장 많은 영향을 미치는 스피커 시스템의 배치방식과 스피커 특성변화에 따른 청취자들의 주관적 반응을 명료도와 음향선호도 측면에서 측정하고 비교·분석함으로써 향후 대공간의 음향증폭 시스템의 설계 시 활용할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 하였으며, 공간의 건축 및 음향적 특성에 가장 적합하며 명료도 및 선호도를 극대화할 수 있는 스피커의 특성 및 배치방식을 도출하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 현재 계획이 진행 중인 S 돔구장의 계획안을 대상으로 선정하였으며, 스피커의 배치방식은 국내에서 사용빈도가 가장 높은 분산배치형을 고려하였다. 스피커의 배치 시 설계변수는 설치높이, 설치개수, 그리고 스피커의 빔 폭을 대상으로 하였으며 건축음향특성의 변화가 미치는 영향을 검토하기 위하여 천장흡음율을 3단계로 조정하였다.

2 청취실험방법 및 내용

2.1 컴퓨터 시뮬레이션 및 대상공간개요

본 연구에서는 현재 계획단계에 있는 S 돔구장의 계획안을 대상으로 하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시

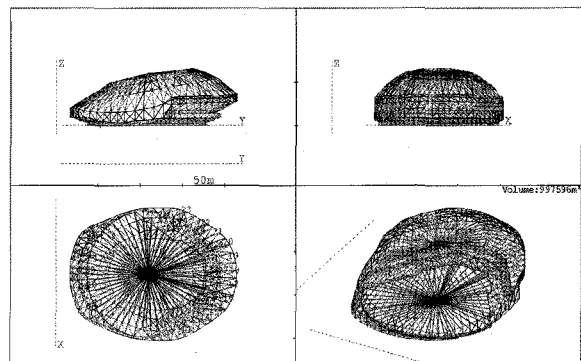
하였다. <표 1>은 대상공간의 건축적 제원을 나타낸 것이다. 컴퓨터 시뮬레이션은 Catt-Acoustics V8.0[7]을 이용하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션에 적용된 조건은 다음의 <표 2>와 같다.

<표 1> 대상공간의 건축제원

구분	체적(m ³)	길이(m)	폭(m)	높이(m)
내용	1,005,500	124.2	140.2	57.8

<표 2> 컴퓨터시뮬레이션에 적용된 조건

항목별	내용
온도(°C)	20
상대습도(%)	50
밀도(kg/m ³)	1.2
임피던스(kgs/m ³)	412
사용 음선 수	209,866
확산방법	Lambert model (1차 확산반사 고려)
흡소음레벨(dB)	45/ 38/ 32/ 28/ 25/ 23



<그림 1> 대상 공간의 3차원모델 및 평가대상지점

<표 3> 천장면에 적용된 흡음재의 흡음조건별 흡음율 (1/1 옥타브밴드 중심주파수)

흡음 조건	주파수별(Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC ⁽²⁾
A	0.36	0.42	0.36	0.22	0.17	0.17	0.29
B	0.31	0.56	0.67	0.80	0.69	0.54	0.68
C	0.96	0.99	0.99	0.99	0.95	0.79	0.98

경기장 천장의 흡음율은 3단계로 적용하였으며 천장면에 적용된 마감재의 흡음률은 <표 3>과 같다. 대공간의 경우, 음선경로가 길어지게 되어 긴 잔향시간을 갖는 반사음들이 발생하게 되고 이들은 에코(long-path echo)의 형태로 지각되어 명료도를 크게 저하시키는 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 실내의 여러 지점들에 대한 시뮬레이션 결과를 분석하고 에코의 발생이 없는 지점을 선정하여 평가의 대상으로 하였다. <그림 1>은 3차원으로 구성된 대상공간의 시뮬레이션 모델과 객석 내 평가대상 지점을 나타낸 것이다.

2.2 평가대상 증폭시스템 및 음장조건변화

본 연구에서는 국내에서 적용빈도가 가장 높은 것으로 조사된 분산배치방식을 대상으로 하였다. 일반적으로 스피커의 배치는 스피커의 커버 영역에서 출발하여 설치위치를 가정하고 스피커 시스템을 구성하여 명료도를 높일 수 있도록 설계한다[2]. 스피커의 커버영역은 스피커의 지향성과 설치높이에 의해서 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 객석에서 운동장으로서의 시선을 방해하지 않는 범위에서 스피커의 설치높이 2개 조건(45m 및 60m)과 지향성 3개 조건(45, 60, 그리고 90도)을 조합하여 총 6개의 스피커 배치시스템을 구성하였다(표 4).

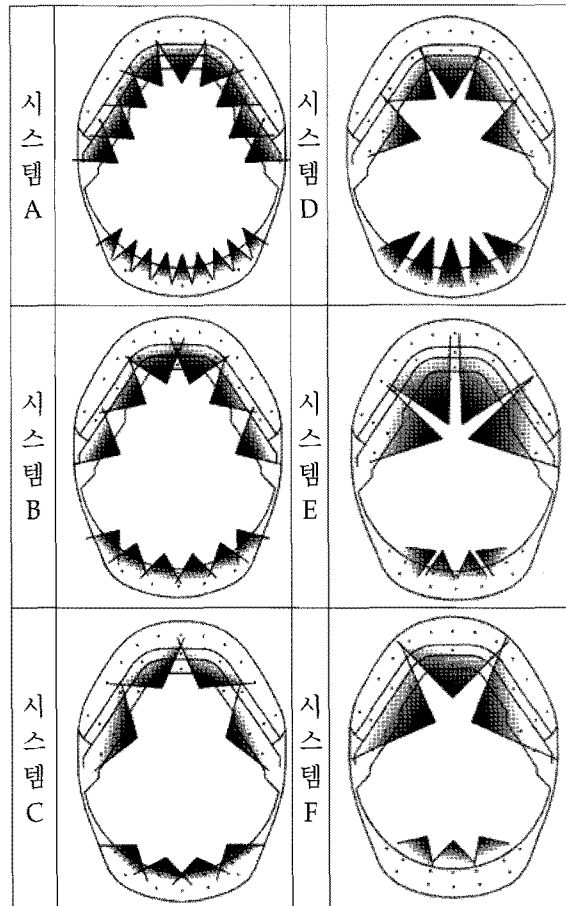
<표 4> 스피커변수의 조절

시스템 별	설치 높이(m)	스피커지향각(도)	스피커 갯수
A	45	45	18
B	45	60	12
C	45	90	8
D	60	45	10
E	60	60	8
F	60	90	6

<그림 2>는 이와 같은 조건변화에 의해서 얻어진

$$2) NRC = \frac{(\alpha_{250Hz} + \alpha_{500Hz} + \alpha_{1kHz} + \alpha_{2kHz})}{4}$$

각 배치 시스템별 커버 영역을 나타낸 것이다. 청취 평가는 스피커의 설치높이, 각 스피커의 지향각, 그리고 설치된 개수에 의해 구분된 6개 시스템을 대상으로 하였으며, 3단계의 실의 흡음력 변화(천장흡음율 변화)를 고려하여 총 18개 음향조건을 구성하였다.



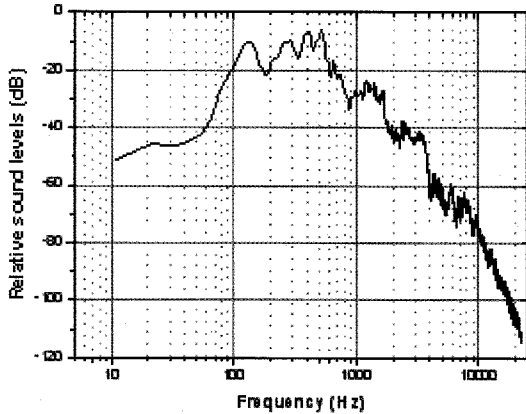
<그림 2> 검토대상 전기음향 시스템의 커버리지

2.3 청취실험개요

2.3.1 청취평가음원

청취평가음원은 전술한 18개 음향조건(스피커 배치방식과 실흡음력의 조합)을 컴퓨터 시뮬레이션 해서 얻어진 임펄스 응답과 남성대화음(male speech) 무향음원의 컨벌루션(convolution)에 의한 가청화를 통해 제작하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 Catt-Acoustics v8.0을 이용하였으며, 실내의 30여개 평가지점들 중에서 지연시간이 긴 에코(long-path echo) 등의 음향적 결함이 나타나지 않는 지점으로

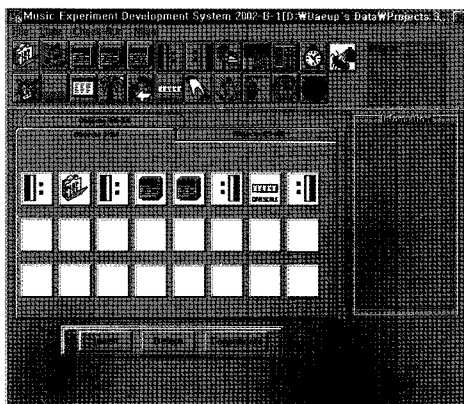
써 적용된 전기음향 시스템의 효과를 가장 잘 평가할 수 있는 지점을 선정하였다. <그림 3>은 사용된 무향음원의 평균 스펙트럼을 나타낸 것이다.



<그림 3> 청취실험에 사용된 남성대화음의 평균 스펙트럼

2.3.2 청취실험방법

청취평가는 Thurston의 비교판단법[3-4]에 기초하여 2AFC(alternative forced choice)의 paired comparison 방법으로 수행되었다. 비교판단법의 특성 상 평가대상음원의 수가 많아지게 되면 실험시간이 길어지고 비효율적이 되므로 이를 보완할 수 있는 incomplete method[5]를 활용하여 청취실험을 구성하였다.



<그림 4> MEDS

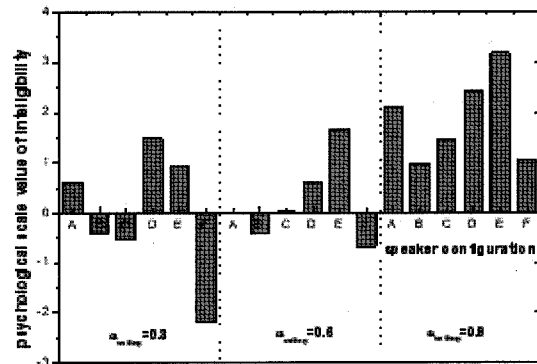
청취실험은 명료도 평가와 선호도 평가의 두 개 세션으로 구성되었으며, 각 세션에서 피험자는 헤드폰을 통해서 한 쌍의 비교음원을 청취하고 상대적으로 명료도가 높거나 또는 본인이 선호하는 음향

상태를 선택하여 컴퓨터 키보드로 입력하였다. 청취 실험에는 정상청력을 지닌 건축음향전공자 7명이 참여하였고, 전용 프로그램인 MEDS(music experiment development system)[6]를 이용하여 진행하였다(그림 4).

3 청취실험결과 및 분석

3.1 명료도

청취실험에 의한 명료도 평가결과는 직접비교가 가능한 스케일 값(psychological scale value of intelligibility)으로 환산되었으며 이는 그림 5와 같다. 각기 다른 천장의 흡음율 조건 하에서 얻어진 시스템별 스케일 값의 차이에 대한 신뢰도 검증은 chi-square(χ^2) test를 통해서 이루어졌으며, $\chi^2=0.673$ ($df=177.28, n=136, p<0.01$)로써 통계적으로 유의적인 차이가 있는 것으로 분석되었다.



<그림 5> 청취실험에 의한 명료도 평가결과

명료도 평가결과, 전체적으로 실의 흡음률이 결정적인 영향을 미치며, 천장의 흡음률이 높을수록 지각된 명료도는 높아지는 것으로 나타났다. 그러나 천장의 흡음율(NRC)이 0.9보다 적게 적용된 두 경우(NRC 0.3 및 0.6)간에는 유의적인 명료도 차이가 나타나지 않았다. 적용된 스피커 시스템별로는 D와 E 시스템이 모든 흡음율 조건에서 가장 높은 명료도를 나타내고 있으며 F 시스템을 적용한 경우 가장 명료도가 낮은 것으로 평가되었다. F 시스템은 고려된 시스템들 중 가장 적은 수의 스피커를 적용하였으며, 각 스피커의 지향각도가 크고(90도) 높은 설치위치로 인해 넓은 영역을 커버해야 하는 조건

이다. 반면 D 및 E 시스템은 시스템 F와 동일 높이에 스피커가 설치된 반면, 지향각이 상대적으로 좁고 적용된 스피커의 수도 보다 많다. A, B, 그리고 C 시스템은 D, E, 그리고 F 시스템보다 많은 수의 스피커들을 적용한 것으로써 설치높이를 낮추고 지향각을 조절한 것이다. 스피커가 낮게 설치된 경우에는 적용된 스피커의 개수가 많고 지향각이 좁은 A 시스템의 명료도가 가장 높게 평가되었으며, B와 C 시스템 간에는 유의적인 차이가 없는 것으로 분석되었다.

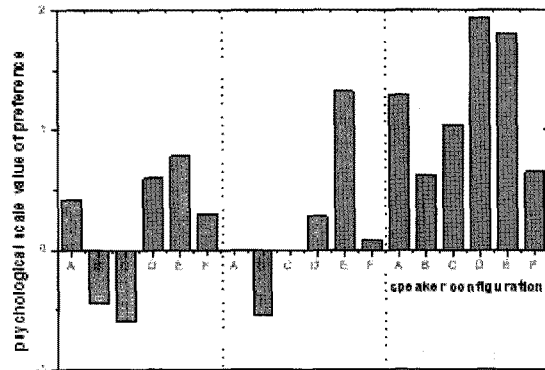
전체적으로 스피커의 설치위치는 천장 흡음면에 가까울수록 그리고 60도 이하의 좁은 지향각을 갖는 스피커를 사용할 때 높은 명료도를 얻을 수 있으며, 소수의 넓은 지향각 스피커보다는 좁은 지향각의 스피커를 다수 사용하는 것이 명료도를 높이는 데 효과적인 것으로 분석되었다.

3.2 음향선호도

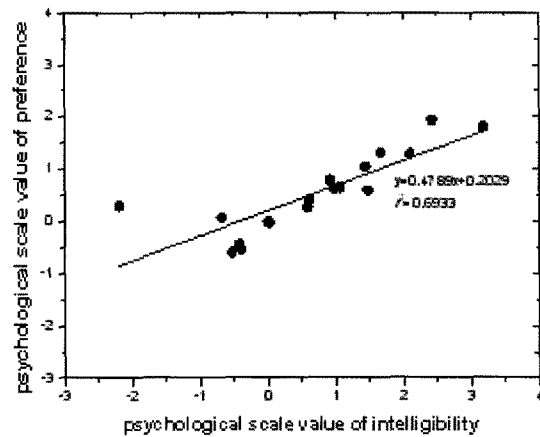
청취실험에 의한 선호도 평가결과는 스케일 값 (psychological scale value of preference)으로 환산되었으며 이는 <그림 6>과 같다. 각기 다른 흡음조건 하에서 얻어진 시스템별 스케일 값의 차이에 대한 신뢰도 검증은 chi-square(χ^2) test를 통해서 이루어졌으며, $\chi^2=0.684(df=177.28, n=136, p<0.01)$ 로써 통계적으로 유의적인 차이가 있는 것으로 분석되었다. 흡음조건별 각 시스템의 선호도 평가결과, 전반적으로 주관적인 명료도가 높은 시스템에 대한 선호도가 매우 높게 나타났다($r^2=0.6933, p<0.01$). 명료도를 평가하는데 사용되는 물리적인 지표들과의 상관관계를 분석한 결과, D50 및 RASTI는 주관적 명료도와 일정수준의 상관관계를 나타내고 있으나 각 시스템에 대한 청취자들의 선호도와는 거의 상관관계가 없는 것으로 나타났다(표 5).

특히 시스템 A의 경우에는 실의 흡음율과 관계가 낮게 나타났으며, 오히려 잔향시간이 긴 조건(NRC=0.3)에서 상대적으로 높은 명료도와 선호도를 나타내고 있다. 이는 기존의 잔향감 평가 파라메타인 잔향시간(T30)이 대공간과 같이 확산성이 부족한 공간에서 나타나는 비선형적인 음에너지 감쇠를 해석하

기에 부적합하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 명료도가 선호도에 가장 큰 영향을 미치는 요소이기는 하지만 이외에도 적정수준의 잔향감이나 음색 등의 요인들이 청취자들의 주관적인 선호도에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.



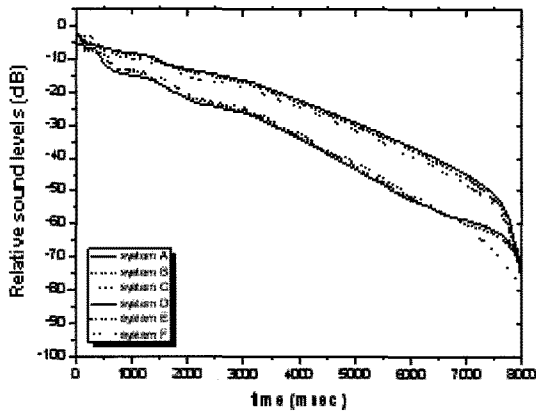
<그림 6> 청취실험에 의한 음향선호도 평가결과



<그림 7> 음향선호도와 명료도의 상관관계

<표 5> 주요음향 파라메타와 주관적 명료도 및 선호도와의 상관관계(상관계수, r)

	D50	RASTI	EDT _{MID}	T30
intelligibility	0.582	0.565	-0.323	-0.191
preference	0.306	0.355	-0.239	-0.160



〈그림 8〉 각 시스템 적용 시 실내에서의 음에너지 감쇠를 나타내는 Schroeder curve

4 결론

본 연구에서는 음향증폭 시스템 중에서 청취자에게 가장 많은 영향을 미치는 스피커 시스템의 배치 방식과 스피커 특성변화에 따른 청취자들의 주관적 반응을 명료도와 음향선호도 측면에서 측정하고 비교·분석함으로써 향후 대공간의 음향증폭 시스템의 설계 시 활용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

1) 전체적으로 실의 흡음률이 결정적인 영향을 미치며, 천장의 흡음률이 높을수록 지각된 명료도는 높아지는 것으로 나타났다.

2) 스피커가 낮게 설치된 경우에는 적용된 스피커의 개수가 많고 지향각이 좁은 스피커들이 사용된 경우의 명료도가 가장 높게 평가되었다. 그러나 전체적으로는 스피커가 천장 흡음면에 가까울수록, 그리고 60도 이하의 좁은 지향각을 갖는 스피커를 사용할 때 높은 명료도를 얻을 수 있으며, 본 연구의 검토범위에서는 8~10개 정도의 스피커가 적용되었을 때 주관적인 명료도 및 선호도가 가장 높게 평가되었다.

3) 일부 시스템의 경우, 오히려 잔향시간이 긴 조건에서 상대적으로 높은 명료도와 선호도를 나타내고 있으며, 적정수준의 잔향감이나 음색 등의 요인들이 청취자들의 주관적인 선호도에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구의 결과는 단일 돔 구장을 대상으로 한 것으로 본 연구결과의 일반화를 위해서는 보다 다양한 형태와 규모의 돔 구조물들을 대상으로 한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원 (과제번호 # '06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다. 컴퓨터시뮬레이션과 데이터 정리를 위해 수고해 준 이진학군에게 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

1. Peng, J. "Feasibility of Subjective Speech Intelligibility Assessment Based On Auralization," *Applied Acoustics*, 65(5), 591-601 (2004).
2. 강성훈, 음향시스템 이론 및 설계, 기전연구사, 1999.
3. Thurstone, L. L. "A law of Comparative Judgement." *Psychological Review*, 34, 273-289, 1927.
4. W. S. Torgerson, *Theory and Methods of Scaling*. New York, John Wiley & Sons, 1962.
5. F. Mosteller, "Remarks on the Method of Paired Comparisons: A Test of Significance for Paired Comparisons when Equal Standard Deviations and Equal Correlations are Assumed," *Psychometrika*, 16, 207-218. 1951.
6. Kendall, R.A. MEDS: Music Experiment Development System. Unpublished software available at meds.html, 1998.
7. B.-I. Dalenback, P. Svensson, M. Kleiner, "Prediction and Auralization Based on a Combined Image Source/Ray- Model," *Proc. 14th ICA*, F2-7 (1992).