공학석사 학위논문

# 다목적 문화공연장의 리모델링을 통한 실내음향개선에 관한 연구

2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

음 향 진 동 공 학 협 동 과 정

김 동 욱

공학석사 학위논문

# 다목적 문화공연장의 리모델링을 통한 실내음향개선에 관한 연구

지도교수 배 동 명

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2012년 2월

부경대학교 대학원

음향진동공학협동과정

김 동 욱

# 김동욱의 공학석사 학위논문을 인준함.

2012년 2월

주 심 공학박사 하 강 렬 (인)

위 원 공학박사 배 성 용 (인)

위 원 공학박사 배 동 명 (인)

# 목 차


1. 서론 ····· 1
1.1 연구의 배경 및 목적 ····· 1
1.2 연구의 방법 및 범위 ····· 2

2. 건축음향이론 ····· 3
2.1 건축음향설계 ····· 3
2.2 실내음향 평가지수 ····· 4
2.3 잔향시간 ····· 6
2.4 음성명료도 ····· 7
2.5 음악명료도 ····· 8

3. 건축음향 성능평가 방법 ····· 10
3.1 대상 문화공연장의 음향개선목표 ····· 10
3.2 건축음향 측정 ····· 11
3.2.1 측정기기 ····· 11
3.2.2 수음점 위치 선정 ····· 12
3.3 음향 시뮬레이션 ····· 13
3.4 대상공연장의 음향개선 ····· 14
3.4.1 공연장 벽체 개선 ····· 14
3.4.2 공연장 천장 개선 ····· 16
3.4.3 공연장 마감재료의 음향특성 ····· 17

4. 리모델링에 따른 건축음향 성능평가 및 고찰 ····· 21
4.1 리모델링 전 대상공연장의 건축음향 특성평가 ····· 21
4.1.1 잔향시간 ····· 21
4.1.2 음성명료도 ····· 22
4.1.3 음악명료도 ····· 24
4.2 음향 시뮬레이션을 이용한 음향성능 예측 ····· 26
4.2.1 잔향시간 ····· 26
4.2.2 음성명료도 ····· 27

4.2.3 음악명료도 ····· 27
4.3 리모델링 후 대상 공연장의 건축음향 특성평가 ····· 29
4.3.1 잔향시간 ····· 29
4.3.2 음성명료도 ····· 30
4.3.3 음악명료도 ····· 32
4.4 고찰 ····· 33
4.4.1 잔향시간 ····· 33
4.4.2 음성명료도 ····· 35
4.4.3 음악명료도 ····· 36

**5. 결 론** ····· 38

**참고문헌** ····· 40

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

# 표 목 차

표 2.1 실내 음향 평가 파라메타 ····· 5
표 2.2 음악명료도($C_{80}$)의 평가 ····· 9
표 3.1 대상 문화공연장의 제원 ····· 10
표 3.2 측정기기의 상세내역 ····· 11
표 3.3 대상 공연장의 개선 전 마감재료 및 흡음률 ····· 17
표 3.4 대상 공연장의 개선 후 마감재료 및 흡음률 ····· 18
표 3.5 대상 공연장의 개선 전 흡음력 산정 ····· 19
표 3.6 대상 공연장의 개선 후 흡음력 산정 ····· 19
표 3.7 실의 종류와 최적 평균흡음률 ····· 20
표 4.1 개선 전 주파수별 잔향시간($RT_{60}$) ····· 21
표 4.2 개선 전 주파수별 음성명료도($D_{50}$) ····· 23
표 4.3 개선 전 주파수별 음악명료도($C_{80}$) ····· 24
표 4.4 개선 후 주파수별 잔향시간($RT_{60}$) ····· 29
표 4.5 개선 후 주파수별 음성명료도($D_{50}$) ····· 31
표 4.6 개선 후 주파수별 음악명료도($C_{80}$) ····· 32
표 4.7 수음점별 500 *Hz* 잔향시간($RT_{60}$) 고찰 ····· 34
표 4.8 수음점별 500 *Hz* 음성명료도($D_{50}$) 고찰 ····· 35
표 4.9 수음점별 500 *Hz* 음악명료도($C_{80}$) 고찰 ····· 36

# 그 림 목 차

그림 2.1 실의 용적 및 목적에 따른 최적 잔향시간 ····· 7
그림 3.1 음향 측정시스템 구성도 ····· 12
그림 3.2 대상 공연장의 수음점 위치 ····· 12
그림 3.3 대상 공연장의 3D모델링 ····· 13
그림 3.4 대상 공연장의 음상(Acoustical Image) ····· 14
그림 3.5 공연장의 측벽 개선도면 ····· 15
그림 3.6 공연장의 후벽 개선도면 ····· 15
그림 3.7 공연장의 천장 개선도면 ····· 16
그림 4.1 개선 전 주파수별 잔향시간($RT_{60}$) ····· 22
그림 4.2 개선 전 주파수별 음성명료도($D_{50}$) ····· 23
그림 4.3 개선 전 주파수별 음악명료도($C_{80}$) ····· 25
그림 4.4 리모델링 조건에 대한 잔향시간($RT_{60}$) 음향 시뮬레이션 결과 ····· 26
그림 4.5 리모델링 조건에 대한 음성명료도($D_{50}$) 음향 시뮬레이션 결과 ····· 27
그림 4.6 리모델링 조건에 대한 음악명료도($C_{80}$) 음향 시뮬레이션 결과 ····· 28
그림 4.7 개선 후 주파수별 잔향시간($RT_{60}$) ····· 30
그림 4.8 개선 후 주파수별 음성명료도($D_{50}$)) ····· 31
그림 4.9 개선 후 주파수별 음악명료도($C_{80}$) ····· 33
그림 4.10 수음점별 잔향시간($RT_{60}$) 고찰 ····· 34
그림 4.11 수음점별 음성명료도($D_{50}$) 고찰 ····· 35
그림 4.12 수음점별 음악명료도($C_{80}$) 고찰 ····· 37

# A Study on the Improvement of Room Acoustic through the Remodeling of Multipurpose Cultural Performance Hall

Dong-Uk Kim

*Interdisciplinary Program of Acoustic and Vibreation Engineering*

*Graduate School*

*Pukyong National University*

## Abstract

People of all social stratum and generations of human beings get to have cultural demand that only the privileged class could have thanks to material affluence from economic development and rapid growth. This expansion of cultural demand led to the rise of status of multi-purpose performing arts centers where people can communicate directly each other. Hence, multi-purpose performing arts centers became an important space as a bridge that gathers organizations, locals, students, and residents together. However, the lack of recognition for professional sound design in the centers led to sound design that is not appropriate for the characteristics of the space, so the centers can't provide performing arts environments appropriate for various performing arts.

Therefore, this study aimed at providing solutions for architectural and acoustic problems of multi-purpose performing arts centers by measuring architectural sound before construction, predicting the improvement of sound by using sound simulation, carrying out comparative analysis of sound performance by critical sound elements through measuring architectural sound after construction, taking the Community Center of J.

The center could not provide sufficient the sense of volume because sound could not be delivered evenly to seats due to the indiscreet construction of sound

absorption and the narrow reflection part of the ceiling. In order to these problems, we attached diffusion panels to the walls to intensify reflection sound and plan to the construction of sufficient reflection section on the ceiling, and carried out sound simulation in order to examine the suitability of our plan and the attainment of our goal for architectural sound after measuring sound.

(1) In terms of time of the reverberation time, we measured architectural sound, and this suggested that the echo continued in 2.09 seconds. This result was similar with the result of our simulation, and showed us that the center became the performing arts center appropriate with sufficient echo.

(2) In terms of the definition, the definition went down as 30~35 % in our simulation and after the construction from 40 % that was the measurement before the construction. This is appropriate for a music hall.

(3) In terms of clarity, the measured after the construction was -0.65 dB. In other words, the B grade music hall became the A grade music hall with -4~0 dB and with the sufficient and filled sound environment.

There were differences between the sound simulation data and the data measured after the construction due to parameters like temperature, humidity, measured conditions, and implementing methods of 3D modeling. Especially, indexes of articulation like sound articulation and music articulation had a high degree of error, so we may improve sound more precisely if we have more precise parameters.

If the results of our study are utilized for sound improvement of similar spaces with multi-purpose performing arts centers of our study, the results can be so useful for the construction of professional performing arts with the sufficient sense of sound and diffusion.

# 1. 서론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

오늘날 인류는 경제의 발전과 고도성장에 의하여 물질적인 풍요를 얻게 되어 일부계층만이 대상이던 문화적 요구가 각 계층과 세대로 널리 확산되고 있다. 그러한 문화적 요구의 확산은 사람과 사람의 직접적인 커뮤니케이션을 행할 장소로서의 다목적 문화공연시설의 의미를 더욱 부각시키는 계기가 되었다. 이 때문에 다목적 문화공연시설은 소속단체 뿐만 아니라 지역, 학생과 주민을 자연스럽게 연결하여 주는 매체로서 중요한 공간이 되었다. 그러나 해당시설에 대한 전문적인 음향설계에 대한 인식부족으로 인해 초기 단계에서부터 공간의 특성에 맞는 음향설계가 제대로 수행되지 않아, 다양한 공연활동에 적합한 환경을 제공하지 못하고 있는 실정이다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 기존의 많은 연구에서는 복합문화센터의 대공연장, 소규모 다목적 홀, 대형 실내체육관등의 다양한 공간에서의 건축음향설계 및 문제해결 방안을 모색하고 있으나,[1~3] 본 연구에서는 다목적 문화공연시설의 리모델링에 따른 실내음향개선의 방안을 제시하고자 한다.

다목적 문화공연시설은 공간의 특성상 무대 위의 음원에서 발생하는 음파가 모든 객석에 충분히 고르게 분포되어야 하고, 객석 어디에서나 장시간지연이나 반사음이 집중하는 음향적 결함이 없어야 하며, 관객은 쾌적하게 들리고 출연자는 가장 효과적으로 연출이 되게끔 조절도록 잔향특성이 조절되어야 한다.

본 연구에서는 1993년에 개관되어 노후화된 다목적 문화공연시설인 J 공연시설의 리모델링을 통하여 시민을 대상으로 하는 사회, 문화예술, 교육의 장으로서의 공연위주의 문화공간을 계획할 수 있도록 음향학적 문제점을 고찰하고 음향시뮬레이션을 통한 공간의 특성과 목적에 부합하는 최적의 음향설계를 모색하여 그에 대한 리모델링 공사의 시행과 결과에 대한 비교분석을 통해 향후 이와 유사한 다

목적 문화공연시설의 리모델링 시 환경·관객 친화적이며 미래 지향적인 종합 공연장을 구성하기 위한 유용한 자료로 사용 될 수 있는 기초자료로 제공하고자 한다.

## 1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 기존 건축음향성능평가[4]를 기초로 하여 다목적 문화공연장의 리모델링을 통한 실내음향개선을 목적으로 진해시민회관을 선정하여 리모델링 전의 음향 문제점을 고찰하고 시뮬레이션을 통한 최적의 음향설계를 수행하여 리모델링 공사를 시행한 후 음향성능을 측정하여 그 특성을 파악하였다.

음향성능을 평가하기 위하여 선행 연구들에서 제시된 최적잔향시간, 음성명료도, 음악명료도의 제안값들을 이용하여 비교 분석하였으며, 음향성능의 측정을 위하여서는 실내음향측정 기준인 ISO 3382에 준하여 음향성능을 측정하였고, 음향시뮬레이션 프로그램인 RAY-NOISE R3.1을 이용하여 공간의 목적과 용도에 맞는 최적의 음향설계를 수행하였다.

이를 토대로 다목적 문화공연장인 진해시민회관의 리모델링 전후의 음향성능 측정값을 비교분석하였을 뿐만 아니라 실내공간의 개선사항에 대한 음향결과의 비교도 수행하였으며, 컴퓨터시뮬레이션을 통한 음향설계의 예측값의 오차도 분석하여 다목적 문화공연장의 리모델링이 시행할 시에 참고할 수 있는 중요한 자료가 될 수 있도록 하였다.

# 2. 건축음향 이론

## 2.1 건축음향설계

건축음향설계는 공간형태의 설계와 잔향시간의 설계가 기본이 된다. 공간형태의 설계는 공간의 사용 목적에 적합한 특성을 살려 경제성, 시공성, 의장성을 고려하여 건축음향에 적합한 공간형태와 크기를 결정하는 것을 말한다. 다중반사, 음의 집중에 의한 초점 등 음향장해 현상은 주로 공간의 형태에 기인한다. 여운을 나타내는 잔향시간의 설계는 건축물의 음향특성을 평가하는 중요한 요소이다. 음의 효과적인 반사는 실내 음압 분포를 고르게 하고, 음의 적당한 확산은 음성이나 음악에 적당한 여운을 주어 건축물에 생동감을 더 할 수 있다. 모든 건축물은 그 음과 소리의 다스림이 중요하며 그 처리가 어떻게 되었느냐에 따라서 건축물의 평가가 달라지게 된다.

음원으로부터 수음점(청취자)까지 직접 도달되는 직접음과 공간의 표면에 반사되어 전달되는 제1차 반사음의 과정을 기하학적으로 분석 조사하고, 실 마감 표면의 흡음특성과 음향적 영향을 검토하는 것은 건축음향계획의 기본이 된다. 이러한 건축음향계획에 요구되는 기본적인 기준은 다음과 같다.

① 실내 전체에 충분한 음악이 고르게 분포되도록 한다.

② 말이 명확하게 들리고, 음악이 아름답고 풍부하게 들리도록 조절한다.

③ 실내 어디서나 장시간 지연 반사음, 반향, 음의 집중, 음의 그림자, 실의 공명 등 음향적 결함이 없어야 한다.

④ 방해가 되는 소음과 진동이 없도록 하여야 한다.

⑤ 객석은 가급적 무대의 음원 가까이 배치되도록 설계함으로써 음원으로부터의 거리를 가능한 짧게 한다.

⑥ 음원 근처에 반사체를 두어 초기반사를 최대한 이용하고, 반사체 크기는 반사되는 음원의 파장 이상으로 한다.

⑦ 객석바닥은 시각적인 이유와 만족할만한 직접음을 받도록 경사지게 하는 것이 유리하며, 부득이 수평일때는 무대 음원의 위치를 가급적 높이는 것이 좋다.

⑧ 실 바닥면적과 용적은 합리적인 최소치로써 직접음과 반사음의 거리를 짧게 한다.

## 2.2 실내음향 평가지수

실내음향 평가지수는 울림 길이와 관계된 잔향시간($RT_{60}$), 초기 감쇠시간(EDT), 직접음과 반사음 에너지 비를 이용하여 음성 및 음악의 명료 정도를 나타내는 음성명료도($D_{50}$), 음악명료도($C_{80}$) 등의 시간 파라메타와 반사음에 의한 공간감을 나타내는 LF, LE, RR, IACC 등의 공간 파라메타로 나눌 수 있다.

실내 음향특성 표현을 위한 파라메타를 크게 4가지로 분류하면 다음과 같다.

① 청취음량에 관한 것

② 울림의 양에 관한 것

③ 울림의 명료도에 관한 것

④ 공간인상에 관한 것

이들 파라메타를 세부적으로 살펴보면 표 2.1과 같다.

실내음향 평가기법은 실에서 측정한 물리적인 파라메타와 인간의 감각 및 생리적 반응인 주관적 평가를 비교 분석해 최적의 값을 찾아내는 과정이라고 할 수 있다. 이와 같은 평가방법들에 대한 지속적인 연구는 음향효과를 최종적으로 판단하는 것이 인간의 귀에 어떻게 들리느냐의 문제에 귀결되므로, 물리적인 파라메타 값과 주관적 평가를 동시에 고려해야 한다. 따라서 이러한 물리적인 값들에 대하여 주관적 평가와의 대응을 위해 여러 가지 평가기법과 평가척도가 제시되고 있

표 2.1 실내음향 평가 파라메타[5]

| 구 분 | 파 라 메 타 | 정 의 |
|---|---|---|
| 청취 음량 | SPL (Sound Pressure Level) | $SPL = 20\log\frac{p}{p_o}\ [dB]$ |
| | $G_{10}$ (Overall Strength) | $G_{10} = 10\log\frac{\int_0^{\infty} P^2(t)dt}{\int_0^{\infty} P_A^2(t)dt}\ [dB]$ |
| 울림의 양 | $RT_{60}$ (Reverberation Time) | 음원이 정지한 후 60 $dB$ 감쇠할 때까지 소요되는 시간 |
| | EDT (Early Edcay Time) | 음원이 정지한 후 10 $dB$ 의 감쇠를 대상으로 60 $dB$ 이 감쇠할 때까지 소요되는 시간 |
| 명료도 | $D_{50}$ (Definition) | $D_{50} = 100 \times \frac{\int_0^{50ms} P^2(t)dt}{\int_0^{\infty} P^2(t)dt}\ [\%]$ |
| | $C_{80}$ (Clarity) | $C_{80} = 10\log\frac{\int_0^{80ms} P^2(t)dt}{\int_{80ms}^{\infty} P^2(t)dt}\ [dB]$ |
| | $T_s$ (Center Time) | $T_s = \frac{\int_0^{\infty} tP^2(t)dt}{\int_0^{\infty} P^2(t)dt}\ [ms]$ |
| | STI (Speech Transmission Index) | 변조주파수(Modulation Frequency)를 이용하여 음성전달성능을 평가하기 위한 지수 |
| 공간 인상 | LF (Lateral Energy Fraction) | $LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} P_L^2(t)dt}{\int_0^{80ms} P^2(t)dt}\ [dB]$ |
| | LE (Lateral Efficiency) | $LF = \frac{\int_{25ms}^{80ms} P_L^2(t)dt}{\int_0^{80ms} P^2(t)dt}\ [dB]$ |
| | RR (Room Response) | $RR = 10\log\frac{\int_{25ms}^{80ms} P_L^2(t)dt + \int_{80ms}^{160ms} P^2(t)dt}{\int_0^{80ms} P^2(t)dt}$ |
| | IACC (Interaural Crosscorrelation) | $IACC = \left\| \frac{\phi_{lr}(\tau)}{\sqrt{\phi_{ll}(0) \bullet \phi_{rr}(0)}} \right\|_{\max} \quad \lvert\tau\rvert \le 1ms$<br>$\phi_{lr}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f'_l(t) f'_r(t+\tau)dt$<br>$\phi_{ll}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} f_l^2(t)dt$ |

지만 음향 효과와 그 연관성을 설명하기에는 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서 사용된 실내 음향 파라메타는 울림의 양에 관한 잔향시간, 초기 울림의 명료도에 관한 음성명료도, 음악명료도이고 각각의 파라메타에 관한 상세 내용은 2.3절, 2.4절, 2.5절과 같다.

## 2.3 잔향시간

W. C. Sabine[6]에 의하여 도입된 잔향이론은 가장 오래된 물리적인 측면의 음향환경변수이다. 20세기 초 수년간은 음의 본질적인 속성이나 반향, 요해도(了解度) 등의 음향인자들과 실내음장상태간의 상호관련성에 관한 연구의 부족으로 잔향시간이 실내음향을 대표하는 것으로 받아들여졌다. 그리고 현재까지도 파동적으로 해석하기 어려운 실내음장상태를 이론적으로 단순, 명쾌하게 해석할 수 있다는 이유로 잔향이론의 기본적인 정의는 그대로 지켜지고 있다.

Sabine의 잔향식은 잔향시간이 긴 실(Live Room)에서는 실험치와 일치하지만, 잔향시간이 짧은 실(Dead Room)에서는 실제보다 크게 나오게 된다. 이러한 결점을 보완하기 위하여 C. F. Eyring은 실내표면으로부터의 반사음이 허상(Image Source)으로부터 나오는 것으로 가정하였다.

따라서 무한히 계속되는 반사는 무한히 먼 곳까지 허상이 존재하므로 음원이 정지한 후에도 음에너지는 계단식으로 감쇠한다는 추론에 의하여 Sabine의 결점을 보완한 C. F. Eyring의 식 2.1이 쓰여지고 있다.[7]

$$T = \frac{K \cdot V}{-S \cdot \log_e (1-\alpha)} \qquad (2.1)$$

$T$ : 잔향시간 $[s]$ $K$ : 상수 $V$ : 실의 용적 $[m^3]$

$S$ : 실의 표면적 $[m^2]$ $\alpha$ : 실내의 평균 흡음률

최적잔향시간(Optimum Reverberation Time)은 가청주파수 범위에서의 잔향시간과 실내에서 음의 성장이나 감쇠특성 그리고 청취자에게 도달하는 직접음과 잔향음의 적절한 비율에 대한 개념을 포함하고 있다. 따라서 목표잔향시간의 선정은

음향계획상에서 중요한 과정이며, 이론적으로나 경험적으로 많은 지식이 필요하다.

실의 사용목적과 용적에 따른 최적잔향시간은 여러 가지 경험치나 이론치에 의해 아래의 그림 2.1과 같이 제안되고 있으며, 각 용도에 따라 실의 규모가 증가할수록 상대적으로 최적잔향시간도 길어지는 것을 알 수 있다.

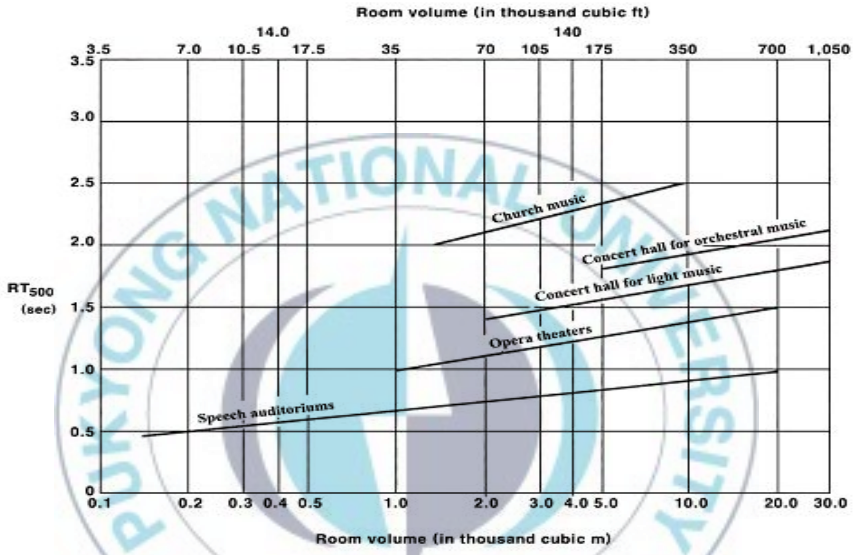



그림 2.1 실의 용적 및 목적에 따른 최적 잔향시간[8]

## 2.4 음성명료도

음의 명료한 청취는 연설이 중요한 실내 체육관과 같은 용도의 공간에서는 중요한 음향조건이다. 또한 음악 연주에서도 각 악기의 위치가 명료하게 분리됨과 동시에 시간의 흐름 중에서도 윤곽이 명료한 것이 바람직하다.

긴 지연시간으로 청취자에게 도달한 반사음은 바람직하지 못한 경우 반향으로 인식되며 바람직한 경우에는 실제 잔향을 더해주게 된다. 잔향은 회화의 명료성을 저해하기 때문에 긴 지연반사는 회화전달의 관점에서 해롭게 생각되어 진다. 따라서 반사음 중 직접음을 보강하는 유용한 반사음의 한계범위를 결정하기 위한

연구와 그에 따른 기준이 연구되어지고 있다. 이러한 기준들을 확인하기 위해서는 회화 명료도를 직접적으로 측정해야 할 필요가 있다. 이러한 객관적인 기준을 위한 최초의 시도의 하나로 R. Thiele은 이것을 음성명료도라고 하였다.[9]

초기 및 후기영역의 임펄스응답에 관한 변수로 지연시간이 50 $ms$를 초과하지 않는 범위에 도달되는 초기 반사음 및 그 뒤에 계속되는 반사음들은 청취자들에게 매우 잘 지각될 수 있으며 이와 같은 현상을 지각의 한계라 하고 여기에 착안하여 유용한 음이라 불리는 직접음 및 초기반사음과 전체음에너지와의 비 음성명료도를 제안하였다. 음성명료도를 표현하면 식 2.2와 같다.

$$D_{50} = \frac{\int_{0ms}^{50ms} E(t)dt}{\int_{0ms}^{\infty} E(t)dt} \times 100\,[\%] \tag{2.2}$$

음성명료도는 짧은 지연반사음이 많을수록, 잔향시간이 짧고 비교적 실의 체적이 작을 수록, 청취자들이 음원에 충분히 가까울 때 좋아진다. 음성명료도 값과 음의 충만성은 역함수적인 관계로 음성명료도 값이 높은 실은 보통 잔향시간이 짧고 반대로 잔향시간이 짧은 실은 음성명료도 값이 높다. 음악당에서의 적정 음성명료도 값은 30~40 % 이며, 다목적 홀에서의 적정 음성명료도 값은 50~60 % 이다.

## 2.5 음악명료도

음성명료도와 개념상 유사하지만 콘서트홀에서의 음악에 대한 명료도를 나타내기 위해 명료도지수인 음악명료도 값이 Reichart 등[10]에 의해 제안되었다. 음성명료도 값의 50 $ms$ 비해 80 $ms$를 지연시간의 한계로 하는데 음악에서는 반사가 회화음보다 덜 인지되기 때문에 이러한 허용치를 두게 된다. 초기음은 직접음이 도달한 후 80 $ms$ 이내에 도달하는 음을 지칭하며 그 이후에 도달되는 음은 잔향음으로 간주한다. 음악명료도를 표현하면 식 2.3과 같다.

$$C_{80} = 10\log \frac{\int_{0ms}^{80ms} P^2(t)dt}{\int_{80ms}^{\infty} P^2(t)dt} [dB] \quad (2.3)$$

잔향이 없는 경우 음악은 매우 명료하게 들릴 것이며, 이 경우 음악명료도는 아주 큰 양의 값을 갖게 된다. 잔향시간이 긴 실의 경우, 음악의 명료도는 매우 저하되며 음악명료도는 아주 큰 음의 값을 갖게 된다. 0 *dB*의 음악명료도는 초기음에너지와 잔향음에너지가 동일한 경우에 얻게 된다. Jordan[11]은 음악적 명료도를 확보하기 위해서는 음악명료도는 ±2 *dB*의 범위에 들도록 계획하는 것이 바람직하다고 제안하고 있다. Beranek[12]은 전 세계 35개 유명 홀들을 대상으로 음악명료도를 분석하였다. 음악명료도는 A+ 및 A등급에 해당되는 홀들은 0～-4 *dB*의 범위에, 그리고 B+등급의 홀들은 -2～2 *dB*의 범위에 존재한다. 이와 함께 보편적으로 사용되는 연주악기 및 음악에 대한 음악명료도의 평가는 표 2.2와 같다.

표 2.2 음악명료도($C_{80}$)의 평가

| $C_{80}$ | 평 가 |
|---|---|
| 0～-2 *dB* | 오르간 등의 느린 템포의 Blown 악기 연주에 이상적<br>오르간 음악, 낭만파 음악에서 필요한 명료도 값 |
| +2～-2 *dB* | Bowed 악기 연주 및 클래식 or 심포니 악기 음악에 이상적,<br>전통교회 음악에도 적합 |
| +4～-2 *dB* | Plucked 악기에 이상적, 속도가 빠른 현대 음악에 적합, 포크<br>음악, 현대 교회음악, 대중 음악, 재즈에서도 적합함 |
| +6～-2 *dB* | Percussive 악기에 이상적<br>Rock and Poll에서도 적당함 |

# 3. 건축음향 성능평가 방법

## 3.1 대상 문화공연장의 음향개선목표

대상 J공연장은 1990년에 착공되고 1993년에 완공되어 지역사회의 시민들에게 다양한 문화예술의 공연과 행사의 공간으로 활용되어 왔다. 그러나 당초 설계 시 공연장의 크기와 목적에 맞는 건축음향학적인 측면을 고려하지 않았었고, 20여년의 시간이 흐르면서 공연장의 시설물들이 노후화 되어 그 사용목적에 부합하는 건축음향적인 환경을 제공하지 못하고 있다. 이에 진해시민회관의 건축음향적인 문제점을 개선하기 위하여 리모델링 계획을 수립하였으며, 해당 문화공연장의 주요 목적을 음악공연을 위한 장소로 정하였다.

대상 공연장의 구조와 형태에 따른 제원은 표 3.1과 같다.

표 3.1 대상 문화공연장의 제원

| 구 분 | | 내 용 | | |
|---|---|---|---|---|
| 실 용 적 (V) | | 7016.4 $m^3$ | | |
| 전 표 면 적 (S) | | 3119.4 $m^2$ | | |
| 실의 형태 | 평 면 | 육각형 | | |
| | 단 면 | 경사형 | | |
| 실의 크기 | 최 대 치 | 길이 | 폭 | 높이 |
| | | 18.6 $m$ | 28.5 $m$ | 10.3 $m$ |
| 객 석 부 | 바닥면적 | 398.6 $m^2$ | | |
| | 좌석수 | 390 seat | | |
| | 좌석당 점유면적 | 0.9 $m^2$/seat | | |
| | 좌석당 점유용적 | 15.8 $m^3$/seat | | |
| 무 대 부 | 무 대 면 적 | 273.3 $m^2$ | | |

대상 공연장의 실의 용적과 사용목적, 실의 형태에 따라 해당 공연장의 잔향시간은 2.0 초 내외, 음성명료도는 음악당의 적정 범위인 30~40 %, 음악 명료도는 A등급의 범위인 -4~0 $dB$로 목표하였다.

## 3.2 건축음향 측정

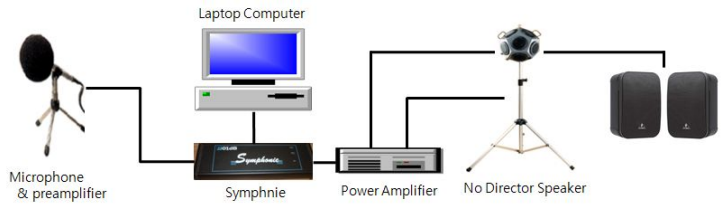
### 3.2.1 측정기기

시공 전·후 대상 문화공연장의 실내음향 측정은 ISO 3382에 준하여 실시하였다. 측정기기는 01dB사의 2채널장비인 Symphonie를 사용하였으며, Symphonie에 포함된 dBBATI 프로그램을 이용하여 MLS(Maximum-Length Sequence)음원으로 음파를 발생시키고 측정하였다. dBBATI 프로그램의 음원은 무대부중앙에 설치된 1.5 $m$ 높이의 무지향성스피커(SP-600)를 통해 발생시켜 측정하였으며, 마이크로폰의 높이는 1.2 $m$로 하였고. 각 수음점에서 2번씩 측정을 실시하여, 평균값을 사용하였다.

대상 측정기기의 상세내역과 음향 측정시스템의 구성도는 표 3.2와 그림 3.1로 나타내었다.

표 3.2 측정기기의 상세내역

| | 측정기기명 | 제작사 |
|---|---|---|
| 1 | Microphone & preamplifier | 01dB-STEEL |
| 2 | Laptop Computer | Samsung |
| 3 | Symphonie | 01dB-STEEL |
| 4 | Power Amplifier | InterM |
| 5 | No Director Speaker | SP-600 |




1. Microphone & preamplifier 2. Laptop Computer 3. Symphnie 4. Power Amplifier
5. No Director Speaker 6. PA System

그림 3.1 음향 측정시스템 구성도

### 3.2.2 수음점 위치 선정

대상 문화공연장의 객석부를 대상으로 하여 공연장의 평면이 대칭 형태를 이루고 있으므로 실의 중심을 기준으로 그리드를 설정하여 리모델링 시공 전후 총 8개소를 수음점으로 선정하였다. 그림 3.2는 리모델링 시공 전·후 건축음향 수음점 위치를 나타낸 것이다.

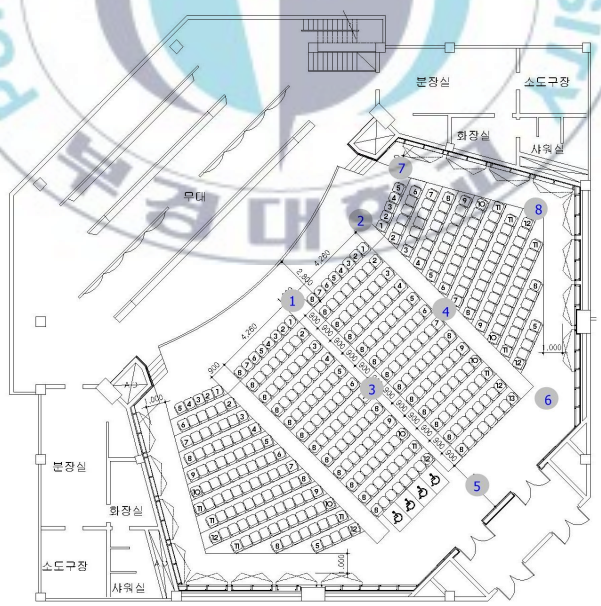



그림 3.2 대상 공연장의 수음점 위치

## 3.3 음향 시뮬레이션

실내음장을 분석하고 각종 음향인자의 예측 및 계산을 위하여 최근에는 기하음향학에 기초를 둔 음향 시뮬레이션을 하게 되는데 본 연구에서 사용한 프로그램은 벨기에의 RAY NOISE R 3.1이다.

RAY NOISE R 3.1은 음선추적법(RTM; Ray Tracing Method)과 허상투영법(MISR; Mirror Image Source Method)을 조합한 원추형과 삼각형광선모델(TBM; Triangle Beam Method)을 이용하고 있다. 이 프로그램은 AutoCAD와 연계하여 편리하게 모델링할 수 있고, 잔향시간 및 명료도, 음선경로를 다양한 형태로 출력할 수 있으며, 건물 형태, 내장재, 음원 등의 변화에 따라 발생음의 전달과 주위 영향 등 실내 음장특성을 예측할 수 있다. 대상 공연장의 3D 모델링의 결과는 그림 3.3과 같다.

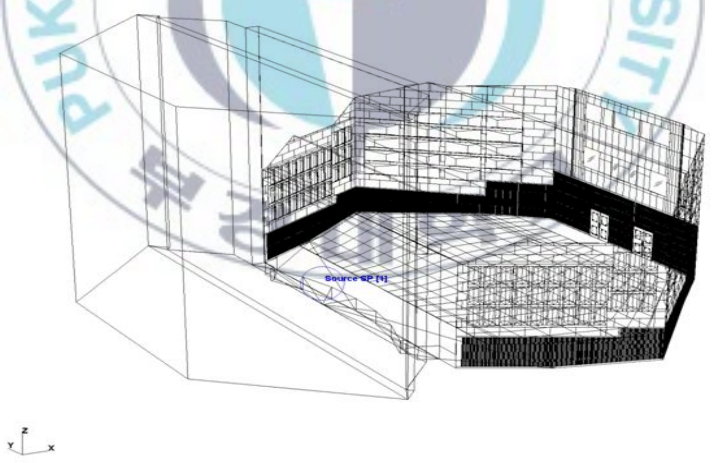


그림 3.3 대상 공연장의 3D모델링

시뮬레이션 시 몇 차 반사음까지 고려할 것인지는 프로그램 사용자가 조절할 수 있으며, 본 연구에서는 2048 반사음까지 고려하였다. 이때 시뮬레이션의 변수

로서는 음선 수는 2,000개, Time Window는 2,000 $ms$로 하였으며, 에코그램 파라메타로서 에코그램의 반사차수는 20차, 음선 경로의 반사차수는 10차로 하였으며, 시뮬레이션 시 확산을 고려하였다. 대상 공연장의 시뮬레이션에 따른 음상의 결과는 그림 3.4와 같다.

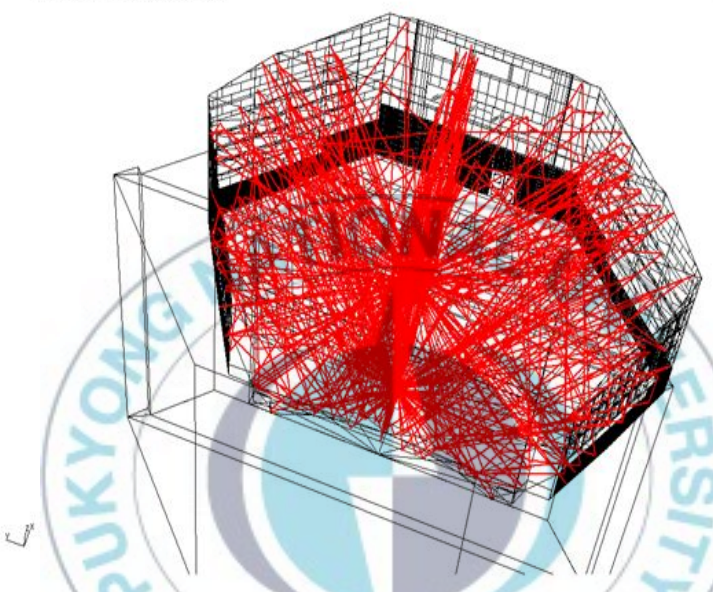


그림 3.4 대상 공연장의 음상(Acoustical Image)

## 3.4 대상공연장의 음향개선

### 3.4.1 공연장 벽체 개선

공연장에서의 벽체는 객석에 고르게 음을 보내어 줄 수 있도록 반사의 효과뿐만 아니라 음을 풍부하게 하고 적정 실내 음향을 유지하기 위하여 확산의 효과도 동시에 지니어야 한다. 그러나 리모델링 전의 공연장은 흡음률이 높은 흡음재로만 측벽이 구성되어 객석에 고르게 풍부한 음을 전달하기 어려우므로 이를 개선하기 위한 구조변경내용은 그림 3.5와 그림 3.6과 같다.

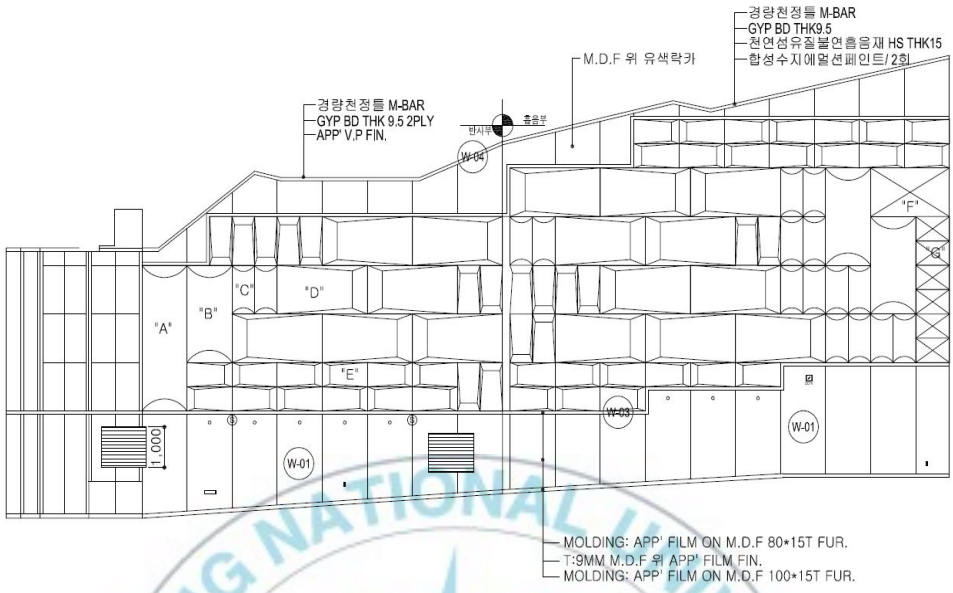



그림 3.5 공연장 측벽 개선도면

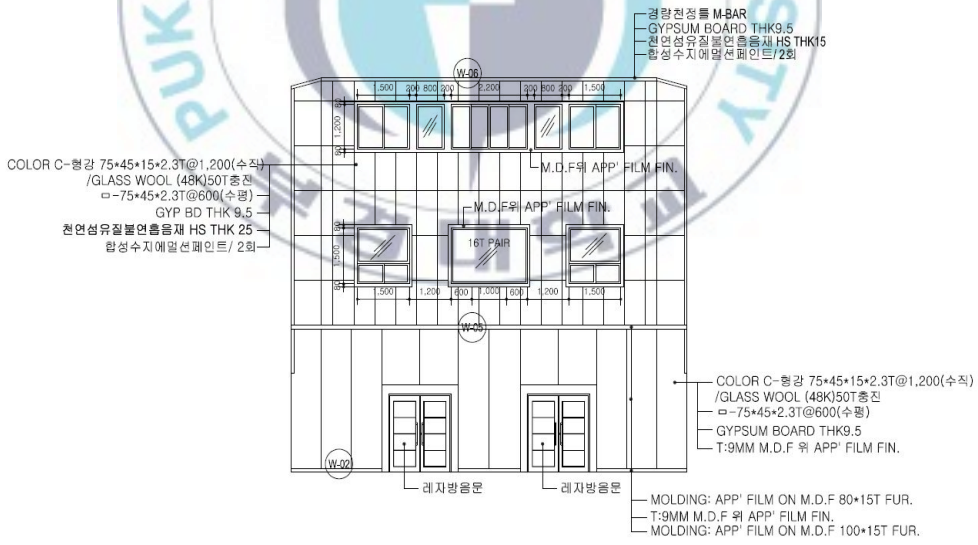



그림 3.6 공연장 후벽 개선도면

기존의 흡음벽체로 구성되어진 측벽을 철거하여 확산판을 설치하고 상부의 일

부구간만을 흡음재로 시공함으로써 모든 객석에 음의 확산되도록 하여 음장감을 더욱더 살리게 하였다.

음의 확산을 강화하는 리모델링에 의해 발생할 수 있는 반향을 최소화하여 불필요한 음을 제거하기 위해 후벽에 흡음구역을 두어 최후방의 객석에서도 명료한 음의 청취를 할 수 있게 하였다.

### 3.4.2 공연장 천장 개선

공연장의 천장은 무대에서 방사된 음이 공연장에 유효하게 전달되도록 구성되어져야 하나 리모델링 전의 천장은 모든 면이 일률적으로 구성되어져 음의 전달에 문제점이 노출되었다. 이를 개선하기 위해 그림 3.7과 같이 공연장 천장 전면은 객석에 음의 전달이 효과적으로 될 수 있게 석고보드 + VP로 시공하였고, 에코발생의 저감을 위하여 후면의 천정은 섬유질흡음재로 교체 시공하였다

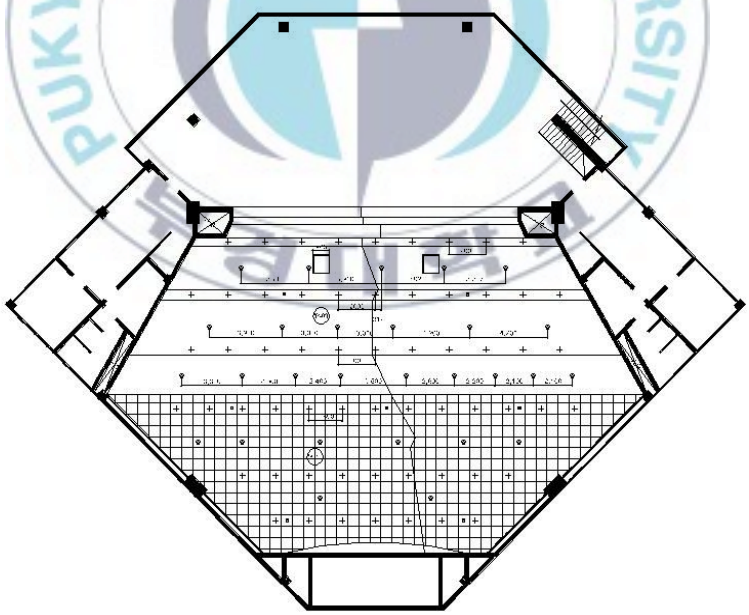


그림 3.7 공연장 천장 개선도면

### 3.4.3 공연장 마감재료의 음향특성

개선 전 대상 공연장은 벽체와 천장의 무분별한 흡음시공과 전 좌석으로 고루 확산시킬 수 있는 벽체 확산체의 부족으로 인하여 공연장의 목적에 부합하는 음환경이 구성되어 있지 못한 것으로 표 3.3과 같이 나타나고 있다.

표 3.3 대상 공연장의 개선 전 마감재료 및 흡음률

| 구 분 | 마감재료 | 주파수 ($Hz$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 125 | 250 | 500 | 1 $k$ | 2 $k$ | 4 $k$ |
| 바닥 | 비닐카페트 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| 벽체반사판 | 유리섬유 50$T$ + 패브릭 | 0.20 | 0.65 | 0.90 | 0.85 | 0.80 | 0.85 |
| 벽체(반사) | 석고보드 9.5$T$ + 패브릭 | 0.18 | 0.10 | 0.07 | 0.11 | 0.18 | 0.22 |
| 벽체(흡음) | 유리섬유 50$T$ + 패브릭 | 0.20 | 0.65 | 0.90 | 0.85 | 0.80 | 0.85 |
| 벽체(하부) | 코펜하겐 리브 | 0.03 | 0.06 | 0.07 | 0.18 | 0.33 | 0.18 |
| 객석 | 극장용 비통기성 의자 | 0.15 | 0.19 | 0.22 | 0.39 | 0.38 | 0.30 |
| 천정(반사) | 석고보드 9.5$T$ + 패브릭 | 0.18 | 0.10 | 0.07 | 0.11 | 0.18 | 0.22 |

대상 공연장에서 벽체는 객석에 고르게 음을 보내어 줄 수 있도록 반사의 효과뿐만 아니라 음을 풍부하게 하고 적정 실내 음향을 유지하기 위하여 표 3.4와 같이 확산의 효과도 동시에 가질 수 있도록 확산판을 많은 구역에 두었으며, 천장도 개선전의 일부 반사부분을 전면부 전반에 걸쳐 시공함으로써 객석에 보다 풍부한 음향을 제공하게 하였다. 반향을 최소화하기 위하여 불필요한 음을 제거하기 위해 후벽에 흡음구역을 두어 최후방의 객석에서도 명료한 음의 청취를 할 수 있게 하였다.

표 3.4 대상 공연장의 개선 후 마감재료 및 흡음률

| 구 분 | 마감재료 | 주파수 ($Hz$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 125 | 250 | 500 | 1 $k$ | 2 $k$ | 4 $k$ |
| 바닥 | 비닐카페트 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| 벽체확산판 | 철판 1.2$T$ 절곡 | 0.14 | 0.11 | 0.10 | 0.06 | 0.05 | 0.05 |
| 벽체(흡음) | Heraklith 25$T$ | 0.15 | 0.50 | 0.95 | 0.90 | 0.80 | 0.90 |
| 벽체(하부) | M.D.F + 필름 | 0.15 | 0.11 | 0.10 | 0.07 | 0.06 | 0.06 |
| 객석 | 극장용 통기성 의자 | 0.15 | 0.25 | 0.40 | 0.45 | 0.45 | 0.40 |
| 천정(반사) | 석고보드9.5$T$<br>지정색도장 | 0.29 | 0.10 | 0.05 | 0.04 | 0.07 | 0.09 |
| 천정(흡음) | Heraklith 15$T$ | 0.10 | 0.45 | 0.90 | 0.95 | 0.80 | 0.85 |

흡음력의 산정에 따른 평균 흡음률에 대한 공식은 식 3.1이므로 개선 전·후 대상 공연장의 평균 흡음률 비교를 위한 벽체 및 천장의 재료마감과 시공면적에 따른 공연장의 흡음력 산정결과는 표 3.5과 표 3.6와 같다.

$$\overline{\alpha} = \frac{\Sigma S_i \alpha_i}{\Sigma S_i} = \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \cdots S_n\alpha_n}{S_1 + S_2 + S_3 + \cdots S_n} \quad (3.1)$$

$\overline{\alpha}$ : 평균 흡음률 $\alpha_i$ : 각 재료의 흡음률 $S_i$ : 재료 별 면적 $[m^2]$

$\Sigma S_i \alpha_i$ : 실내 총 흡음력 $[m^2 - sabin]$

표 3.5 대상 공연장의 개선 전 흡음력 산정

| 구 분 | 마감재료 | 시공면적 $(m^2)$ | NRC | 흡음력 $(m^2-sabin)$ |
|---|---|---|---|---|
| 바닥 | 비닐카페트 | 425 | 0.02 | 8.5 |
| 벽체반사판 | 유리섬유 50$T$ + 패브릭 | 252 | 0.80 | 201.6 |
| 벽체(반사) | 석고보드9.5$T$ + 패브릭 | 33 | 0.12 | 3.9 |
| 벽체(흡음) | 유리섬유 50$T$ + 패브릭 | 105 | 0.80 | 84 |
| 벽체(하부) | 코펜하겐 리브 | 150 | 0.16 | 24 |
| 천정 | 석고보드9.5$T$ + 패브릭 | 425 | 0.12 | 51 |
| TOTAL | | 1,390 | | 373 |

표 3.6 대상 공연장의 개선 후 흡음력 산정

| 구 분 | 마감재료 | 시공면적 $(m^2)$ | NRC | 흡음력 $(m^2-sabin)$ |
|---|---|---|---|---|
| 바닥 | 비닐카페트 | 425 | 0.02 | 8.5 |
| 벽체확산판 | 철판 1.2$T$ 절곡 | 250 | 0.08 | 20 |
| 벽체(흡음) | Heraklith 25$T$ | 121 | 0.80 | 96.8 |
| 벽체(하부) | M.D.F + 필름 | 169 | 0.09 | 15.2 |
| 천정(반사) | 석고보드9.5$T$ 지정색도장 | 197 | 0.07 | 13.7 |
| 천정(흡음) | Heraklith 15$T$ | 228 | 0.75 | 171 |
| TOTAL | | 1,390 | | 325.2 |

대상 공연장의 바닥, 천정, 벽체의 총 표면적은 1,390 ㎡이고, 개선 전 실의 총 흡음력은 표 3.5와 같이 373 $m^2-sabin$, 개선 후 총 흡음력은 표 3.6과 같이 325.2 $m^2-sabin$로서 실 전체의 평균 흡음률이 개선 전 0.27에서 개선 후 0.23으

로 되었다. 이는 표 3.7에서와 같이 평균 흡음률이 0.20 ~ 0.23의 범위로서 콘서트 홀에 적합하게 개선되어졌다.

표 3.7 실의 종류와 최적 평균흡음률[13]

| 구 분 | 실 종류 | 평균흡음률 |
|---|---|---|
| 홀 | 콘서트홀 | 0.20 ~ 0.23 |
| | 오페라 하우스 | 0.25 |
| | 다목적 홀 | 0.25 ~ 0.28 |
| | 대중음악용 홀 | 0.25 ~ 0.30 |
| 극장 | 극장 | 0.30 |
| | 국악당 | 0.20 ~ 0.25 |
| | 강당 | 0.30 |
| 스튜디오 | 텔레비전 스튜디오 | 0.40 |
| | 라디오용 음악 스튜디오 | 0.25 |
| | 라디오용 일반 스튜디오 | 0.25 ~ 0.35 |
| | 라디오용 아나운서 스튜디오 | 0.35 |
| | 녹음 스튜디오 | 0.35 |
| 기타 | 체육관 | 0.30 |
| | 학교교실 | 0.25 ~ 0.30 |
| | 사무실 | 0.30 |
| | 회의실 | 0.25 ~ 0.30 |
| | 음악 감상용 청취실 | 0.25 |
| | 거실 겸용 청취실 | 0.30 |
| | 연회장, 집회장 | 0.35 |

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

# 4. 리모델링에 따른 건축음향 성능평가 및 고찰

## 4.1 리모델링 전 대상 공연장의 건축음향 특성평가

당해 문화공연장의 실내 음향 평가를 위하여 사용된 파라메타는 잔향시간, 음성명료도, 음악명료도이다. 측정된 데이터는 무지향성스피커(SP-600)의 음원에 대하여 주파수별, 수음점 위치별 분석을 하였고, 같은 장소에서 2회씩 측정한 데이터 값의 평균값을 사용하였다.

### 4.1.1 잔향시간

리모델링 전에 측정된 대상 문화공연장의 각 수음점에서의 잔향시간은 표 4.1과 같다.

표 4.1 개선 전 주파수별 잔향시간($RT_{60}$)

| 주파수 ($Hz$) | 수음점별 잔향시간($s$) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 평균 |
| 125 | 1.72 | 1.57 | 1.54 | 1.67 | 1.75 | 1.69 | 1.61 | 1.55 | 1.64 |
| 250 | 1.33 | 1.40 | 1.31 | 1.28 | 1.43 | 1.36 | 1.29 | 1.34 | 1.34 |
| 500 | 1.21 | 1.19 | 1.23 | 1.17 | 1.20 | 1.25 | 1.22 | 1.18 | 1.21 |
| 1 $k$ | 1.05 | 1.08 | 1.10 | 1.11 | 1.01 | 1.08 | 1.13 | 1.04 | 1.08 |
| 2 $k$ | 0.93 | 0.89 | 0.94 | 1.03 | 1.02 | 1.05 | 0.91 | 0.96 | 0.97 |
| 4 $k$ | 0.71 | 0.67 | 0.73 | 0.78 | 0.65 | 0.72 | 0.81 | 0.68 | 0.72 |

리모델링 전의 공석 시 음향측정의 결과는 500 $Hz$에서 평균적으로 1.2 초의 잔

향시간이 나타나며, 이는 실의 목적과 용적에 따른 잔향시간 목표인 2.0 초에 비해 짧은 결과로서 대상공간의 문화공연 시 음이 건조하게 들리며, 풍부한 음으로 공연을 감상하기 어려움이 있다.

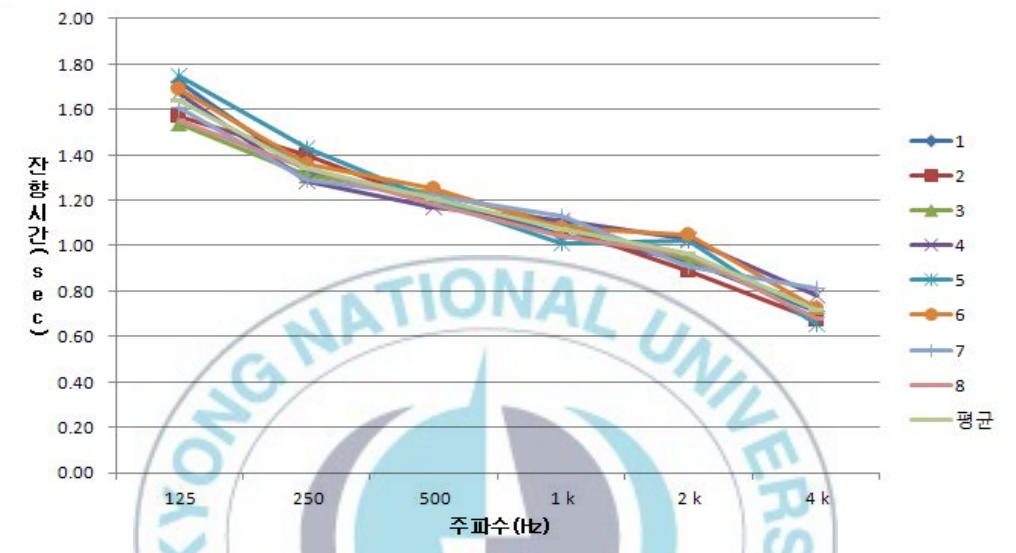



그림 4.1 개선 전 주파수별 잔향시간($RT_{60}$)

리모델링 전의 공석 시 잔향시간에 대한 음향측정의 결과는 그림 4.1과 같이 저주파수대의 잔향시간이 1.5~1.7 초로 다소 높게 나타났으며 고주파수로 갈수로 잔향시간이 저감하고 있다. 수음점 별 잔향시간은 주파수 대역별로 크게 변동폭이 크지 않으며, 이는 실내의 흡음면적이 폭넓게 시공되어져 있기 때문이다.

### 4.1.2 음성명료도

리모델링 전에 측정된 대상 문화공연장의 각 수음점에서의 주파수별 음성명료도는 표 4.2와 같다..

표 4.2 개선 전 주파수별 음성명료도($D_{50}$)

| 주파수 ($Hz$) | 수음점별 음성명료도(%) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 평균 |
| 125 | 28.24 | 30.21 | 20.35 | 35.21 | 32.27 | 24.56 | 33.20 | 37.64 | 30.21 |
| 250 | 47.23 | 40.22 | 31.58 | 38.34 | 27.24 | 30.21 | 34.30 | 35.12 | 35.53 |
| 500 | 44.08 | 47.12 | 38.78 | 48.23 | 46.33 | 47.62 | 38.13 | 45.21 | 44.44 |
| 1 $k$ | 59.78 | 50.23 | 42.21 | 53.22 | 45.23 | 49.37 | 48.31 | 52.98 | 50.17 |
| 2 $k$ | 47.77 | 50.37 | 45.64 | 51.64 | 55.67 | 45.23 | 58.12 | 51.22 | 50.71 |
| 4 $k$ | 67.23 | 60.34 | 41.97 | 60.47 | 55.48 | 53.22 | 57.23 | 46.21 | 55.27 |

리모델링 전의 공석 시 음향측정의 결과는 500 $Hz$에서 평균적으로 44.44 %의 음성명료도가 나타났다. 이는 해당 공연장의 음성명료도 목표인 30~40 %를 상회하는 값으로서 음성명료도는 아주 좋은 값임을 알 수 있다.

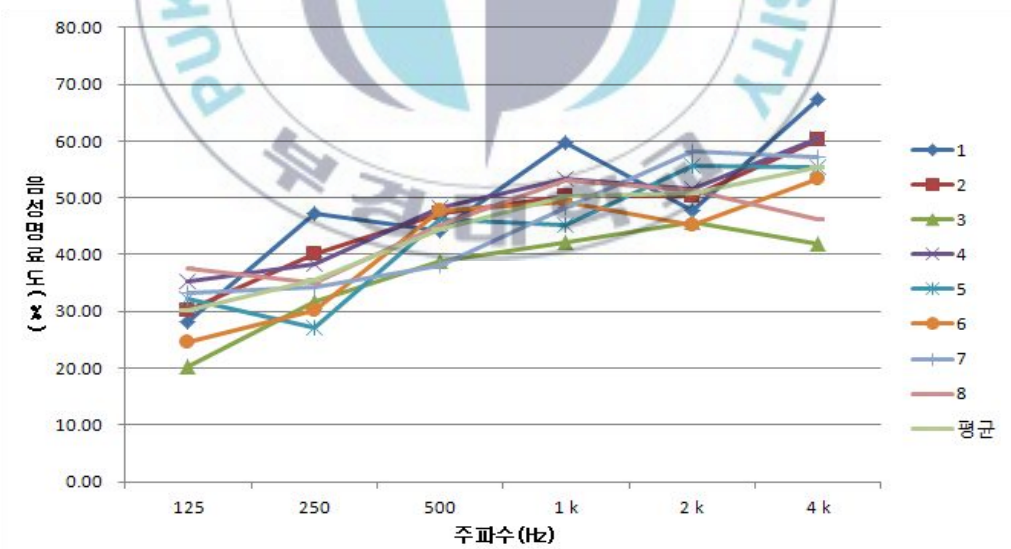



그림 4.2 개선 전 주파수별 음성명료도($D_{50}$)

리모델링 전의 공석 시 음성명료도에 대한 음향측정의 결과는 그림 4.2와 같이

저주파수대의 음성명료도가 20~37 %로 나타났으며 고주파수로 갈수로 음성명료도가 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이는 잔향시간과 역함수의 관계가 성립됨을 알 수 있다. 수음점 별 음성명료도은 벽체와 다소 떨어진 수음점 1과 수음점 3의 다소 큰 변동폭을 제외하고는 변동 폭이 크지 않는 것을 알 수 있은데, 이는 벽체의 높은 흡음력에 의한 것으로 판단된다.

### 4.1.3 음악명료도

리모델링 전에 측정된 대상 문화공연장의 각 수음점에서의 주파수별 음악명료도는 표 4.3과 같다.

표 4.3 개선 전 주파수별 음악명료도($C_{80}$)

| 주파수 ($Hz$) | 수음점별 음악명료도($dB$) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 평균 |
| 125 | -2.10 | 0.12 | -4.31 | 3.12 | -3.84 | -2.41 | -1.95 | -1.22 | -1.57 |
| 250 | 1.34 | 0.19 | -2.91 | -1.76 | -1.42 | 0.26 | 0.31 | -2.31 | -0.79 |
| 500 | 2.56 | 2.40 | 2.63 | -0.54 | 1.22 | 0.31 | -0.95 | -0.23 | 0.93 |
| 1 $k$ | 3.45 | 3.13 | 2.67 | 2.79 | 0.38 | 0.61 | 0.13 | 0.02 | 1.65 |
| 2 $k$ | 3.42 | 1.23 | -0.35 | 0.96 | 2.65 | 0.95 | 1.27 | 1.14 | 1.41 |
| 4 $k$ | 5.24 | 2.34 | 1.76 | 3.45 | 2.45 | 1.43 | 3.91 | 2.86 | 2.93 |

리모델링 전의 공석 시 음향측정의 결과는 500 $Hz$에서 평균적으로 0.93 $dB$의 음악명료도가 나타났다. 이는 해당 공연장의 음악명료도는 B등급인 -2~2 $dB$의 범위에 포함되는 값이고, 일부 수음점(1, 2, 3)에서 그 범위를 초과하고 있어 전 객석에 고르고 풍성한 음의 전달에 어려움이 있다.

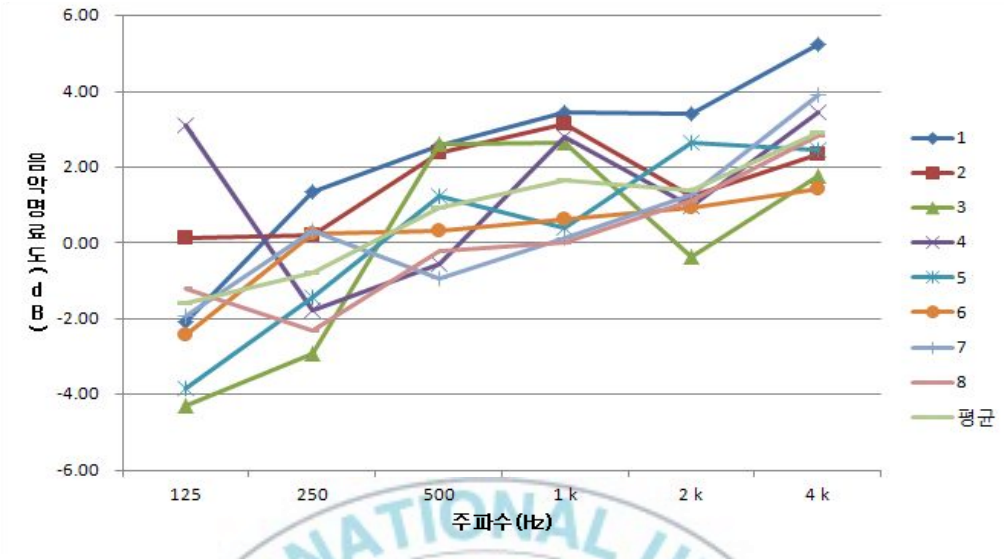



그림 4.3 개선 전 주파수별 음악명료도($C_{80}$)

리모델링 전의 공석 시 음악명료도에 대한 음향측정의 결과는 그림 4.3과 같이 수음점 4의 특이한 경우를 제외하고 저주파수대의 음악명료도가 -4~0 $dB$로 나타났으며 고주파수로 갈수록 음악명료도가 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이는 잔향시간과 역함수의 관계가 성립됨을 알 수 있다.

## 4.2 음향 시뮬레이션을 이용한 음향성능 예측

당해 문화공연장의 리모델링 시공에 앞서 음향 시뮬레이션을 통하여 잔향시간, 음성명료도, 음악명료도 등의 음향조건이 목표로 하는 적정수준에 만족하는 지를 예측하였다.

### 4.2.1 잔향시간

공석 시 500 $Hz$에서 잔향시간 시뮬레이션 값은 그림 4.4와 같이 전 좌석에서 1.9~2.1 초, 평균 2.0 초로 나타났다. 이는 공석 시 음악연주공간의 최적잔향시간에 부합하는 값으로서 당해 문화공연장의 목적인 각종 공연과 음악연주에 적합한 결과임을 알 수 있다.

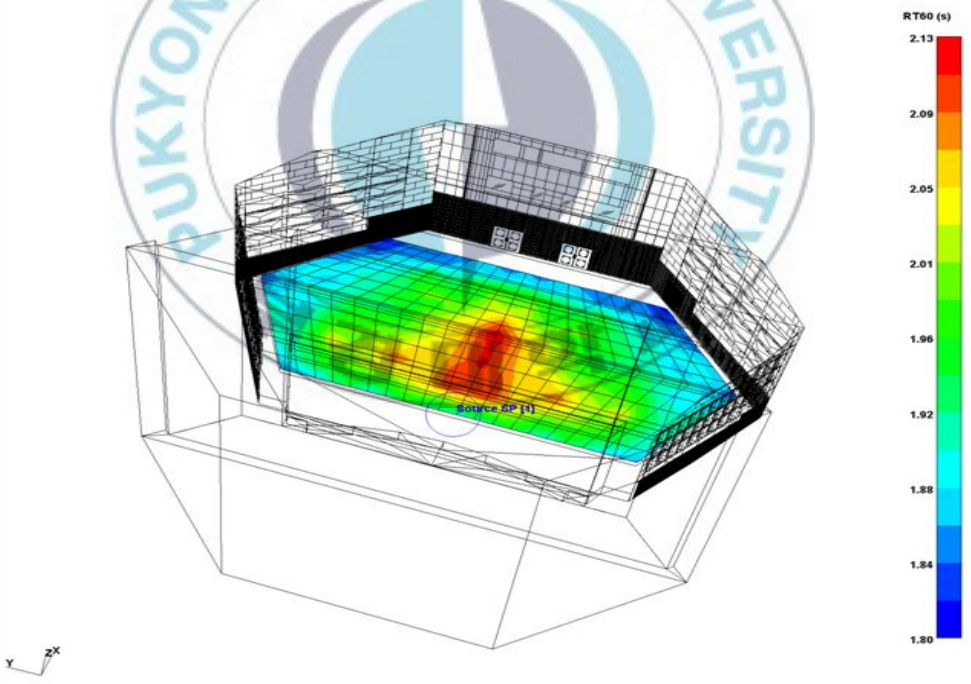



그림 4.4 리모델링 조건에 대한 잔향시간($RT_{60}$) 음향 시뮬레이션 결과

### 4.2.2 음성명료도

500 $Hz$에서 음성명료도의 시뮬레이션값은 그림 4.5와 같이 30~35 %, 평균 32 %로 나타났다. 이는 대부분의 좌석에서 고른 음성명료도를 보이고 있음을 알 수 있으며, 음악공연의 목적에 적합한 범위의 음성명료도를 가지고 있다.

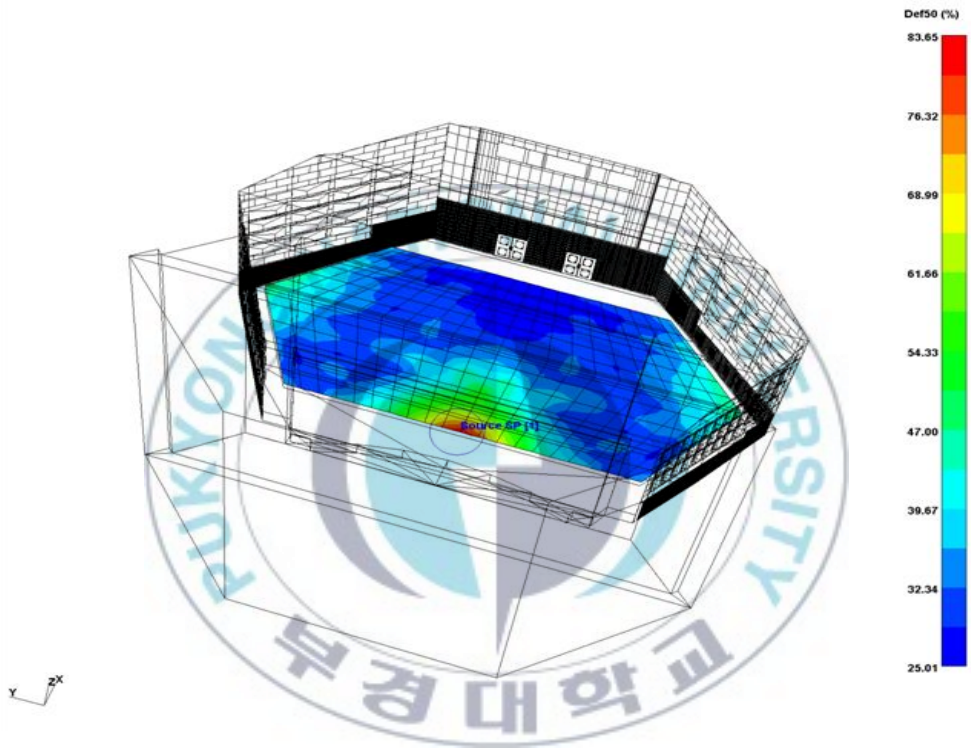



그림 4.5 리모델링 조건에 대한 음성명료도($D_{50}$) 음향 시뮬레이션 결과

### 4.2.3 음악명료도

500 $Hz$에서 음악명료도 출력값은 그림 4.6과 같이 전 좌석에서 -1.7~-1.5 $dB$, 평균 -1.6 $dB$로 나타났다. 이는 음악당의 음악명료도 범위인 -4~0 $dB$의 범위를 만족하고 있으므로 음악연주 및 음악공연 시 풍성한 음색을 감상할 수 있다.

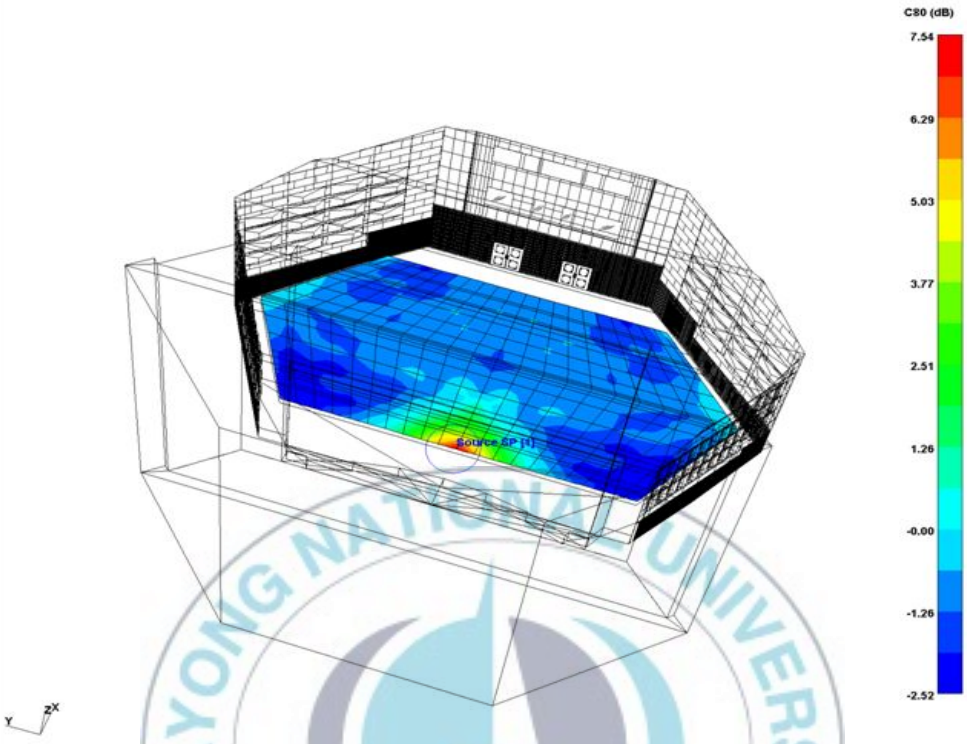



그림 4.6 리모델링 조건에 대한 음악명료도($C_{80}$) 음향 시뮬레이션 결과

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

## 4.3 리모델링 후 대상 공연장의 건축음향 측정평가

당해 문화공연장의 실내 음향 평가를 위하여 사용된 파라메타는 잔향시간, 음성명료도, 음악명료도이다. 측정된 데이터는 무지향성스피커(SP-600)의 음원에 대하여 주파수별, 수음점 위치별 분석을 하였고, 같은 장소에서 2 회씩 측정한 데이터 값의 평균값을 사용하였다.

### 4.3.1 잔향시간

리모델링 후 현장 측정된 대상 문화공연장의 각 수음점에서의 주파수별 잔향시간은 표 4.4와 같다.

표 4.4 개선 후 주파수별 잔향시간($RT_{60}$)

| 주파수 ($Hz$) | 수음점별 잔향시간($s$) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 평균 |
| 125 | 2.55 | 2.69 | 2.21 | 2.61 | 2.63 | 2.36 | 2.44 | 2.17 | 2.46 |
| 250 | 2.16 | 2.52 | 1.98 | 2.22 | 2.31 | 2.03 | 2.12 | 1.96 | 2.16 |
| 500 | 2.04 | 2.31 | 1.99 | 2.17 | 2.28 | 1.92 | 2.14 | 1.87 | 2.09 |
| 1 $k$ | 1.88 | 2.20 | 1.77 | 2.05 | 1.89 | 1.75 | 1.96 | 1.66 | 1.90 |
| 2 $k$ | 1.76 | 2.01 | 1.61 | 1.97 | 1.90 | 1.72 | 1.74 | 1.58 | 1.79 |
| 4 $k$ | 1.54 | 1.79 | 1.40 | 1.72 | 1.53 | 1.39 | 1.64 | 1.30 | 1.54 |

대상 공연장의 음향 리모델링 시공 후 측정된 잔향시간의 결과는 500 $Hz$에서 평균 2.09 초로서 시뮬레이션 값과 유사한 결과가 나타났으며, 이는 당초 목표인 최적 잔향시간에 부합하는 결과가 도출되었음을 알 수 있다. 따라서 개선 전의 짧은 잔향시간에 의하여 대상공간의 문화공연 시 음이 건조하게 들리며, 풍부한 음으로 공연을 감상하기 어려움을 해결하였고 충분한 울림으로 공연을 더욱 깊이 감상할 수 있게 되었다.

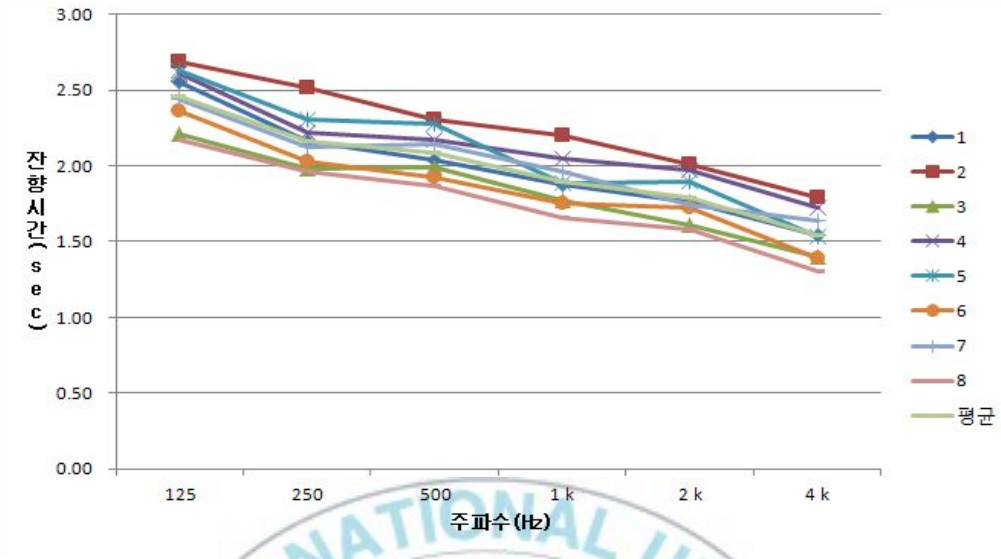



그림 4.7 개선 후 주파수별 잔향시간($RT_{60}$)

실내음향개선 후의 공석 시 잔향시간에 대한 음향측정의 결과는 그림 4.7과 같이 개선 전에 비교해 전 주파수대역 별로 잔향시간이 고르게 증가되었음을 알 수 있다. 개선 후의 잔향시간은 개선 전의 잔향시간보다 수음점 별의 변동폭이 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 반사음을 보강하는 확산판의 영향 때문이다.

### 4.3.2 음성명료도

리모델링 후 현장 측정된 대상 문화공연장의 각 수음점에서의 주파수별 음성명료도는 표 4.5와 같다

표 4.5 개선 후 주파수별 음성명료도($D_{50}$)

| 주파수 ($Hz$) | 수음점 별 음성명료도(%) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 평균 |
| 125 | 18.48 | 19.93 | 11.01 | 26.49 | 20.51 | 16.45 | 25.22 | 27.47 | 20.70 |
| 250 | 37.47 | 29.94 | 22.24 | 29.62 | 15.48 | 22.10 | 26.32 | 24.95 | 26.02 |
| 500 | 34.32 | 36.84 | 29.44 | 39.51 | 34.57 | 39.51 | 30.15 | 35.04 | 34.92 |
| 1 $k$ | 50.02 | 39.95 | 32.87 | 44.50 | 33.47 | 41.26 | 40.33 | 42.81 | 40.65 |
| 2 $k$ | 38.01 | 40.09 | 36.30 | 42.92 | 43.91 | 37.12 | 50.14 | 41.05 | 41.19 |
| 4 $k$ | 57.47 | 50.06 | 32.63 | 51.75 | 43.72 | 45.11 | 49.25 | 36.04 | 45.75 |

대상 공연장의 음향 리모델링 시공 후 측정된 음성명료도의 결과는 500 $Hz$에서 평균 35 %로 나타나 해당 공연장의 음성명료도 목표인 30~40 %를 부합하는 결과가 도출되었음을 알 수 있다. 음성명료도가 리모델링 전에 비해 시공 후 결과값이 다소 떨어지는 것은 음의 충만성을 확보하기 위해 반사판을 늘려 잔향시간이 늘어 난 결과 때문이다.

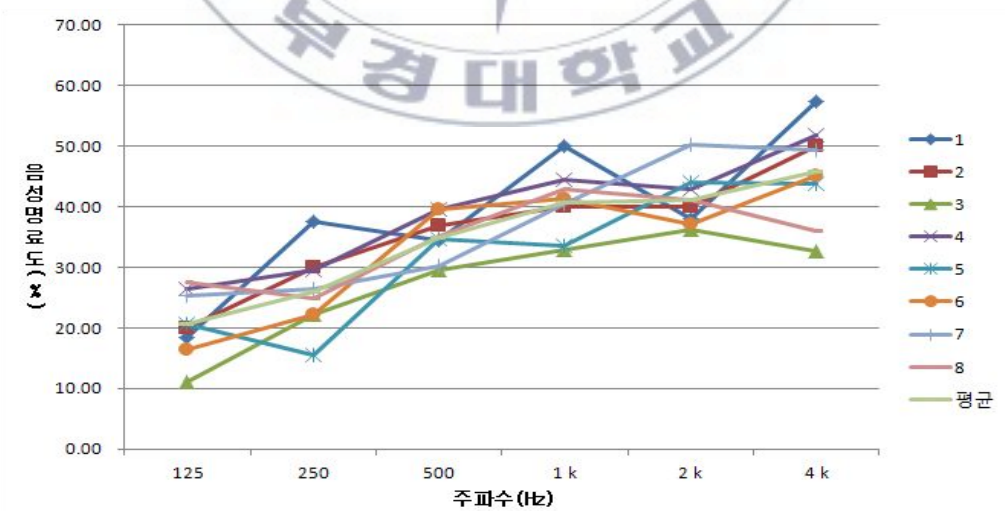



그림 4.8 개선 후 주파수별 음성명료도($D_{50}$)

실내음향개선 후의 공석 시 음성명료도에 대한 음향측정의 결과는 그림 4.8와 같이 저주파수대의 음성명료도가 11~27 %로 나타났으며 고주파수로 갈수록 음성명료도가 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이는 잔향시간과 역함수의 관계가 성립됨을 알 수 있다. 개선 후의 수음점 별 음성명료도은 개선 전의 수음점 별 음성명료도의 특성과 비슷하게 벽체와 다소 떨어진 수음점 1과 수음점 3의 다소 큰 변동폭을 제외하고는 변동 폭이 크지 않는 것을 알 수 있다.

### 4.3.3 음악명료도

리모델링 후 현장 측정을 통하여 알아본 대상 문화공연장의 각 수음점에서의 주파수별 음악명료도는 표 4.6과 같다.

표 4.6 개선 후 주파수별 음악명료도($C_{80}$)

| 주파수 ($Hz$) | 수음점 별 음악명료도($dB$) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 평균 |
| 125 | -1.37 | 0.99 | -3.64 | 4.06 | -2.71 | -1.56 | -1.07 | -0.43 | -0.72 |
| 250 | 2.07 | 1.06 | -2.24 | -0.82 | -0.29 | 1.11 | 1.19 | -1.52 | 0.07 |
| 500 | 1.12 | -1.12 | -1.43 | -0.87 | -1.14 | -0.04 | -1.26 | -0.42 | -0.65 |
| 1 $k$ | 4.18 | 4.00 | 3.34 | 3.73 | 1.51 | 1.46 | 1.01 | 0.81 | 2.51 |
| 2 $k$ | 4.15 | 2.10 | 0.32 | 1.90 | 3.78 | 1.80 | 2.15 | 1.93 | 2.27 |
| 4 $k$ | 5.97 | 3.21 | 2.43 | 4.39 | 3.58 | 2.28 | 4.79 | 3.65 | 3.79 |

대상 공연장의 실내음향개선 시공 후 측정된 음악명료도의 결과는 500 $Hz$에서 평균 -0.65 $dB$로 나타나며, 이는 목표 음악명료도의 범위인 -4~0 $dB$의 범위를 만족하는 결과일 뿐만 아니라 개선 전의 음악명료도에서 음악의 청취 성능이 향상되었음을 알 수 있다.

그림 4.9 개선 후 주파수별 음악명료도($C_{80}$)

실내음향개선 후의 공석 시 음악명료도에 대한 음향측정의 결과는 그림 4.9와 같이 수음점 4의 특이한 경우를 제외하고 저주파수대의 음악명료도가 -4~1 $dB$로 나타났으며 고주파수로 갈수록 음악명료도가 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이는 잔향시간과 역함수의 관계가 성립됨을 알 수 있다.

## 4.4 고찰

대상 다목적 문화공연장의 리모델링 전·후 건축음향 측정 데이터와 건축음향시뮬레이션을 통한 예측 데이터를 비교, 분석으로 바람직한 다목적 문화공연장의 실내음향개선에 대하여 제시하고자 한다.

### 4.4.1 잔향시간

리모델링 전·후 현장 건축음향측정과 건축음향시뮬레이션의 대상 문화공연장의 각 수음점에서의 500 $Hz$에서의 잔향시간은 각각 표 4.7과 그림 4.10와 같다.

표 4.7 수음점 별 500 $Hz$ 잔향시간($RT_{60}$) 검토

| 수음점 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 평균 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 개선 전 | 1.21 | 1.19 | 1.23 | 1.17 | 1.20 | 1.25 | 1.22 | 1.18 | 1.21 |
| 시뮬레이션 | 2.08 | 2.04 | 2.07 | 2.02 | 1.96 | 1.95 | 1.94 | 1.92 | 2.0 |
| 개선 후 | 2.04 | 2.31 | 1.99 | 2.17 | 2.28 | 1.92 | 2.14 | 1.87 | 2.09 |

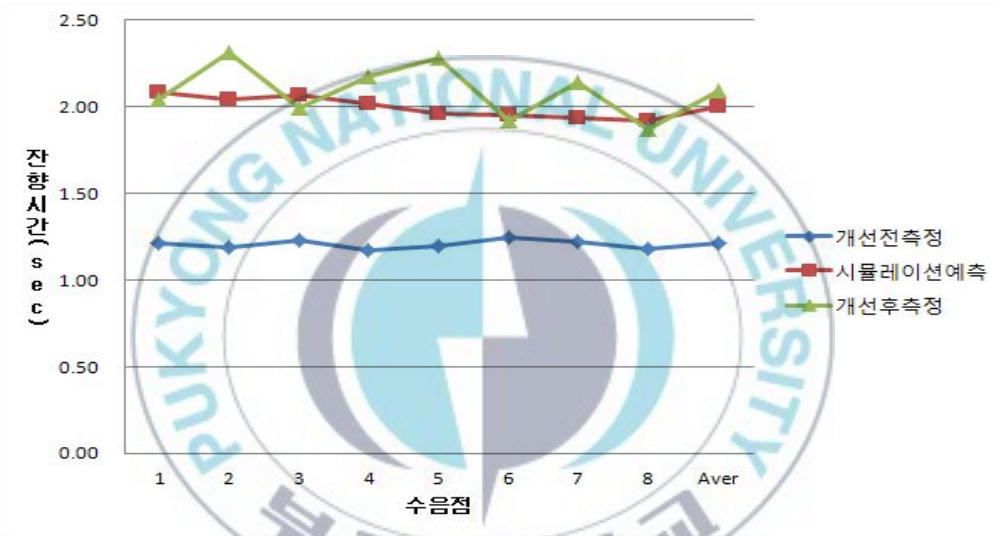



그림 4.10 수음점 별 잔향시간($RT_{60}$) 검토

개선 전과 개선 후의 수음점 별 500 $Hz$에서의 잔향시간을 비교해 보면 개선 전에 비해 개선 후 각 수음점에서 일정하게 잔향시간이 증가되었음을 알 수 있으며, 특히 벽과 근접한 수음점에서 개선 후 잔향시간이 평균 잔향시간에 비해 높게 나타나는 것은 벽체 확산판이 벽체부근 구역에 잔향을 크게 보강하기 때문이다. 음향시뮬레이션과 개선 후의 수음점 별 500 $Hz$에서의 잔향시간을 비교해 보면 오차가 발생하는데 이는 입력 흡음률 데이터와 실제 흡음률의 차이와 입력 유효표면적의 한계와 같은 음향시뮬레이션의 입력매개변수의 오차에 기인하고 특히 확산판의 시공형태를 시뮬레이션에 정확히 적용하지 못하여 벽체 부근에서 더욱 큰

오차 값을 나타났다. 그러나 음향시뮬레이션과 개선 후의 잔향시간 평균값은 거의 비슷한 수준이며 각 수음점에서의 변동폭은 0.1~0.3 초 내외로 그 폭이 작아 신뢰 할 수 있는 예측결과이다.

### 4.4.2 음성명료도

리모델링 전·후 현장 건축음향측정과 건축음향시뮬레이션의 대상 문화공연장의 각 수음점에서의 500 $Hz$에서의 음성명료도는 각각 표 4.8과 그림 4.11와 같다.

표 4.8 수음점 별 500 $Hz$ 음성명료도($D_{50}$) 검토

| 수음점 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 평균 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 개선 전 | 44.1 | 47.1 | 38.8 | 48.2 | 46.3 | 47.6 | 38.1 | 45.2 | 44.4 |
| 시뮬레이션 | 34.8 | 33.2 | 31.2 | 33.8 | 32.1 | 30.8 | 31.6 | 31.1 | 32.3 |
| 개선 후 | 34.3 | 36.8 | 29.4 | 39.5 | 34.5 | 39.5 | 30.1 | 35.0 | 34.9 |

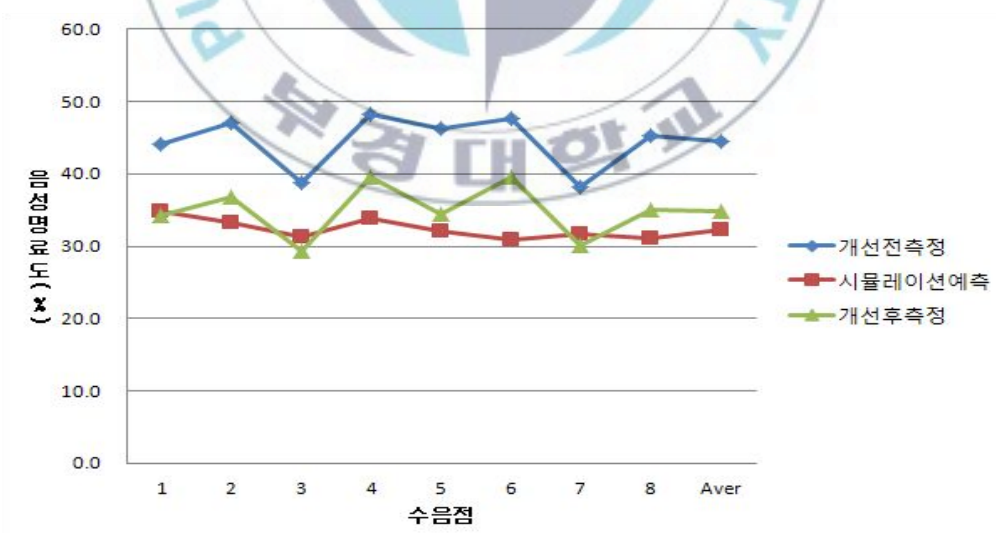



그림 4.11 수음점 별 음성명료도($D_{50}$) 검토

개선 전과 개선 후의 수음점 별 500 $Hz$에서의 음성명료도를 비교해 보면 개선 후 전체 수음점 별로 개선 전과 대비하여 일정한 차이로 음성명료도가 줄어들었으며 수음점별로 음성명료도가 차이를 보이고 있는 것은 수음점 별 공간적 특성에 기인한다. 음향시뮬레이션과 개선 후의 수음점 별 500 $Hz$에서의 음성명료도를 비교해 보면 오차가 발생하는데 사용된 측정매개변수와 입력매개변수의 오차에 기인한다. 음성명료도 평균은 비슷한 수준의 명료도가 나타나나 일부 수음점에서 6~9 %의 큰 폭의 오차가 나타나고 있어 보다 정확한 음성명료도를 예측하기 위하여서는 음향시뮬레이션 시 입력매개변수의 구체화 할 필요가 있다.

### 4.4.3 음악명료도

리모델링 전·후 현장 건축음향측정과 건축음향시뮬레이션의 대상 문화공연장의 각 수음점에서의 500 $Hz$에서의 음악명료도는 각각 표 4.9와 그림 4.12와 같다.

표 4.9 수음점 별 500 $Hz$ 음악명료도($C_{80}$) 검토

| 수음점 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 평균 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 개선 전 | 2.56 | 2.40 | 2.63 | -0.54 | 1.22 | 0.31 | -0.95 | -0.23 | 0.93 |
| 시뮬레이션 | -1.40 | -1.50 | -1.60 | -1.70 | -1.50 | -1.40 | -2.10 | -1.90 | -1.60 |
| 개선 후 | 1.12 | -1.12 | -1.43 | -0.87 | -1.14 | -0.04 | -1.26 | -0.42 | -0.65 |

그림4.12 수음점별 음악명료도($C_{80}$) 검토

개선 전·후의 수음점 별 500 *Hz*에서의 음악명료도를 비교해 보면 개선 전 음악명료도는 0.93 *dB*, 개선 후 음악명료도($C_{80}$)는 -0.65 *dB*로서 음향성능은 향상되었으나, 벽체 부근의 일부 수음점(6, 7, 8)에서 개선의 효과가 미비한 것으로 나타나는데 이는 벽체 확산판의 난반사에 의해 해당 구역의 음악명료도가 떨어지기 때문이다.

음향시뮬레이션과 개선 후의 수음점 별 500 *Hz*에서의 음악명료도를 비교해 보면 오차가 발생하는데 이는 시뮬레이션 시 사용된 측정매개변수와 입력매개변수의 오차에 기인하며, 음악명료도는 오차의 폭이 다른 음향인자에 비해 가장 크므로 음향시뮬레이션 시 입력매개변수의 구체화가 가장 필요하다.

# 5. 결 론

본 연구는 다목적 문화공연장 리모델링 시에 건축 음향적 문제점을 해결하기 위해 실제로 리모델링을 시행한 J공연장을 대상으로 하여 시공 전 건축음향측정과 시뮬레이션을 통한 음향개선예측, 시공 후 건축음향측정을 통한 중요 음향인자 별 음향성능을 비교 분석하여 다목적 문화공연장의 건축음향학적 문제해결 방법을 제안하였다.

대상공연장은 벽체에 무분별한 흡음시공과 천정의 협소한 반사구간에 의하여 객석에 고르게 음이 전파되지 못하고 음의 울림이 충분하지 못해 문화공연장으로서 풍부한 음량감을 주지 못한 문제점이 도출되었다. 이에 따라 충분한 울림을 주기 위해 벽체에 반사음을 보강할 수 있는 확산판을 설치하고 천정을 충분한 반사구간의 조성한 후, 음향 시뮬레이션을 통하여 계획에 대한 적합성을 검토하고 이를 시행하였으며, 시공 후 적합성을 건축음향에 대한 음향측정을 통하여 목표달성을 확인하였다.

(1) 잔향시간의 경우 공석 시 500 *Hz* 기준 개선 전을 측정하여 본 결과 1.2 초의 짧은 잔향시간이 나타났으며, 이를 개선하기 위한 계획을 수립하여 음향시뮬레이션의 계획을 수립한 결과는 잔향시간이 2.0 초로 증가되어 문화공연장의 적정잔향시간을 만족하는 값을 나타났으며, 건축음향 개선 후 건축음향측정을 하여 본 결과도 2.09 초로서 시뮬레이션과 비슷한 결과가 나타나 충분한 울림을 가지는 공연공간으로 조성되었음을 알 수 있다.

(2) 음성명료도의 경우 음의 충만성을 위하여 잔향시간을 늘린 결과 시공 전 음향측정결과 46 %에서 시뮬레이션 결과와 시공 후 측정결과는 30~35 %로 떨어지는 결과가 나타나고 있고, 이는 음악공연을 위주로 하는 음악당의 범위에 적합한 결과가 나타났다.

(3) 음악명료도는 시공 전 측정결과와 시뮬레이션 결과, 시공 후 측정결과가 각각 0.93 *dB*, -1.6 *dB*, -0.65 *dB*로 개선전의 B등급의 음악당에서 음악명료도의 목

표 범위인 -4~0 $dB$에 만족하는 A등급의 음악공간으로 개선을 이루어 내어 보다 충만하고 풍부한 음향조건으로 향상된 결과가 나타났다.

본 연구의 결과 음향시뮬레이션에서 예측한 값과 실제 시공 후 측정한 값 사이에는 오차가 발생하는데, 이는 온도, 습도, 측정조건, 3D 모델링의 구현방법 등의 매개변수에 의해 나타나는 것이며, 특히 음성명료도와 음악명료도와 같은 명료도에 관한 지수는 그 오차 범위가 크므로 이를 줄이기 위한 매개변수의 정확성을 높이면 보다 정확한 음향개선을 이룰 수 있다.

본 연구에서 도출한 결과를 향후 대상 다목적 공연장과 비슷한 목적의 실내공간에서 실내음향개선 시 고려한다면 충분한 음향감과 잔향감 및 확산감을 확보하는 전문 공연공간의 조성하는데 있어 유용한 자료로 활용될 수 있다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

# 참고문헌


1. 윤재현, 주덕훈, 김재수 (2007), “복합문화센타 대공연장의 건축음향설계”, 한국소음진동공학회 추계학술연구발표회 논문집, pp.216～220.
2. 윤재현, 주덕훈, 김재수 (2007), “음향성능 개선을 위한 소규모 다목적홀의 건축음향성능 평가”, 한국소음진동공학회 추계학술연구발표회 논문집, pp.226～230
3. 윤재현, 김재수 (2008), “음향시뮬레이션을 이용한 대형 실내체육관의 건축음향성능 개선에 관한 연구”, 한국주거학회 논문집 19권 4호, pp.41～48.
4. 조경호, 김남돈 (2010), “공연공간의 리모델링을 통한 실내음향개선에 대한 연구”, 한국문화공간건축학회 논문집 30권, pp.67～74.
5. 김재수 (2003), 건축음향설계, 세진사, p.193.
6. W. C. Sabine (1922), Collected Paper Acoustics, Cambridge Mass Harvard Univ. Press.
7. C. F. Eyring (1930), “Reverberation Time in Dead Rooms”, The Journal of the Acoustical Society of America Vol, pp.217～241.
8. 김재수 (2003), 건축음향설계, 세진사, p.280.
9. Heinrich Kuttruff (1991), Room Acoustics, Elsevier Applied Science.
10. W. Reichardt, W. Schmit (1967), Detectability of changes in sound field parameters for music, Acoustica 18.
11. V. L. Jordan(1980), Acoustical Design of Concert Halls and Theatres, Applied Science Publisher.
12. Leo L. Beranek(1996), “Concert and opera Halls: How they sound”, Acoustical Society of America.
13. 김재수 (2003), 건축음향설계, 세진사, p.93.
14. 김태훈, 김동욱, 박광진, 공정철, 배동명 (2011), “입력매개변수에 따른 시뮬레이션 오차에 관한 연구”, 한국소음진동공학회 춘계학술연구발표회 논문집,

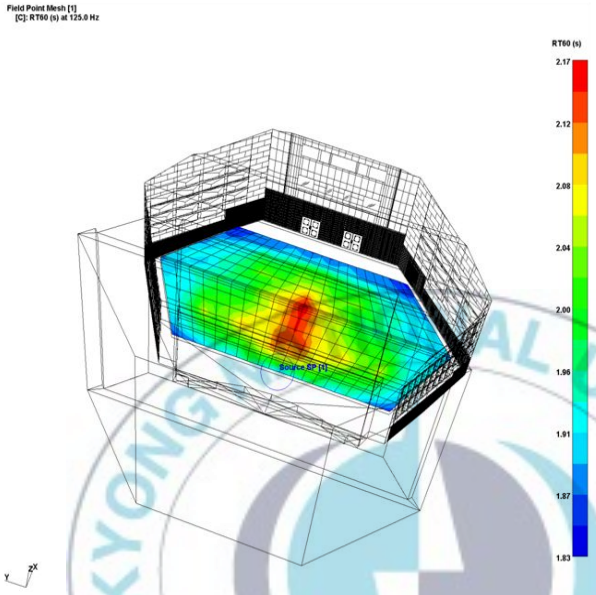
pp.308～314.

15. 김태훈, 공정철, 조은경, 정근주, 임영빈 (2009), “시사실 음향시공 사례에 의한 음향시뮬레이터 오차에 관한 연구”, 대한건축학회지회연합회 논문집 11권 3호, pp. 177～185.
16. 김동욱, 김태훈, 박광진, 공정철, 양보석 (2011), “음향시뮬레이션을 이용한 다목적 공연장의 실내음향개선에 관한 연구”, 한국소음진동공학회 춘계학술연구발표회 논문집, pp.177～178.

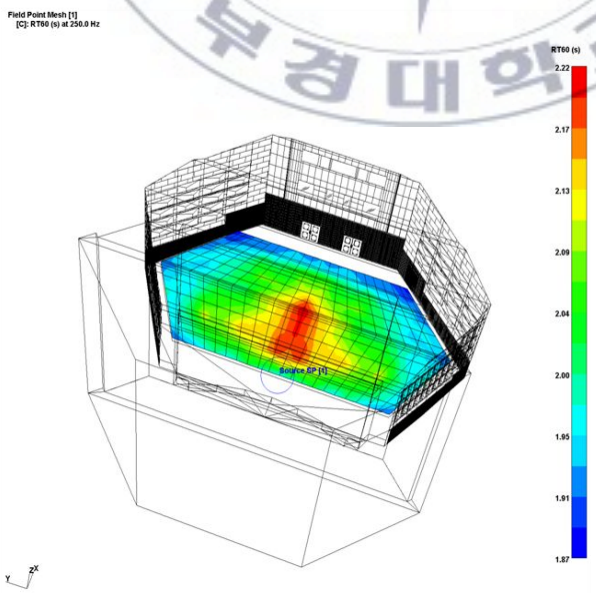
PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

# 부록. 음향 평가지수 별 시뮬레이션 결과

## 1. 공석 시 125 $Hz$ 잔향시간

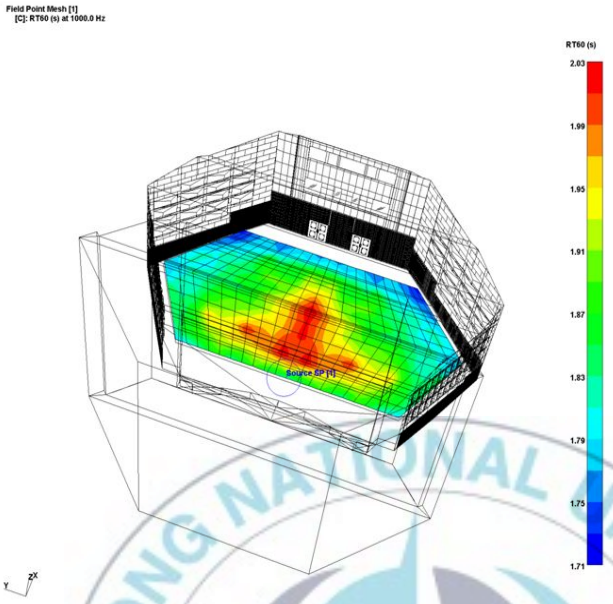



## 2. 공석 시 250 $Hz$ 잔향시간

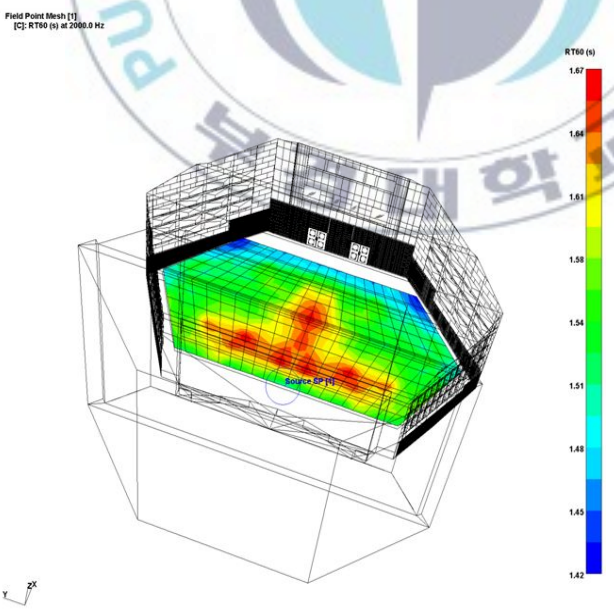



PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

3. 공석 시 1,000 $Hz$ 잔향시간

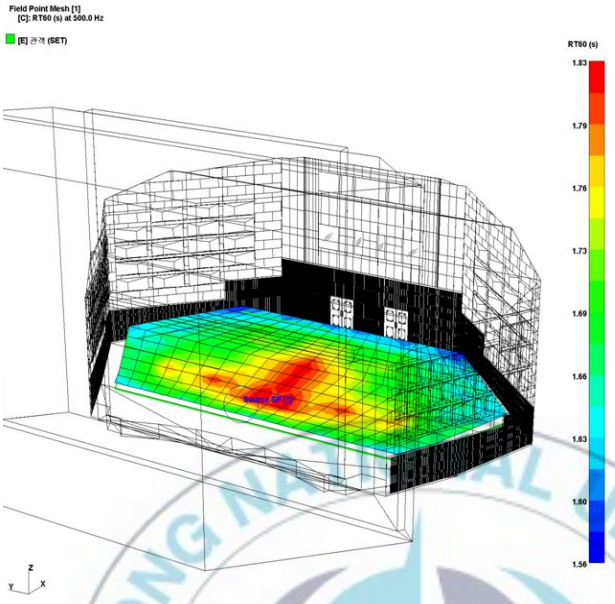



4. 공석 시 2,000 $Hz$ 잔향시간

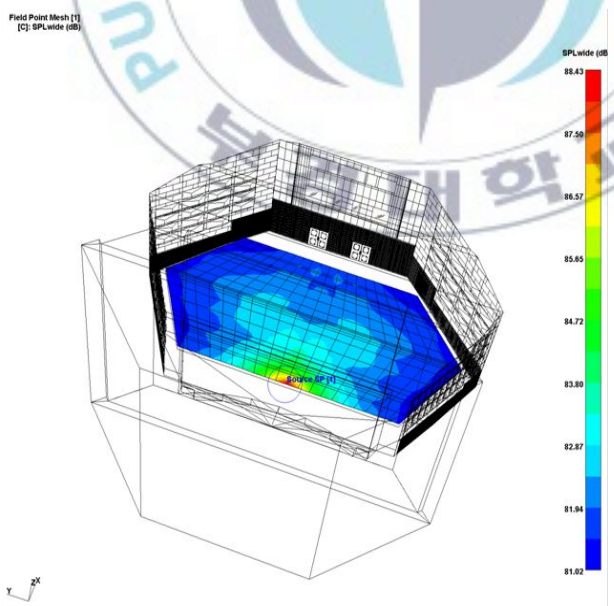



PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

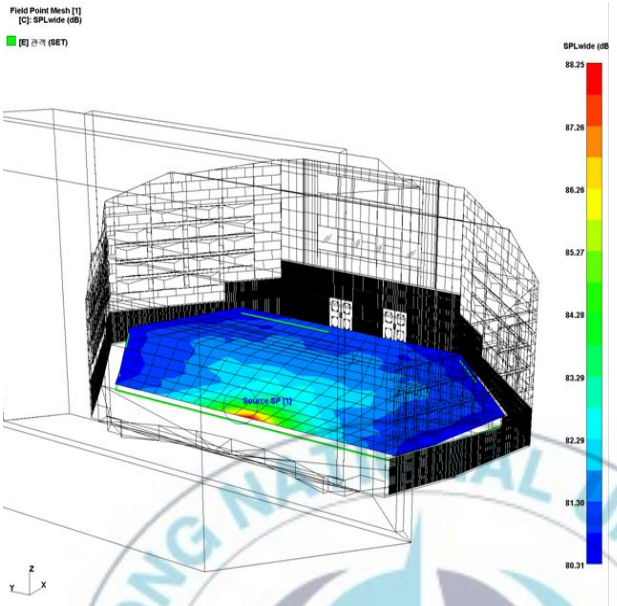
5. 만석 시 500 $Hz$ 잔향시간



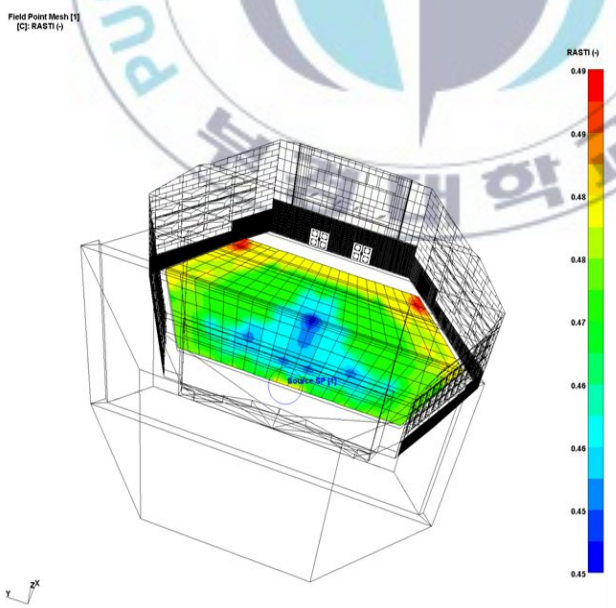

6. 공석 시 음압분포



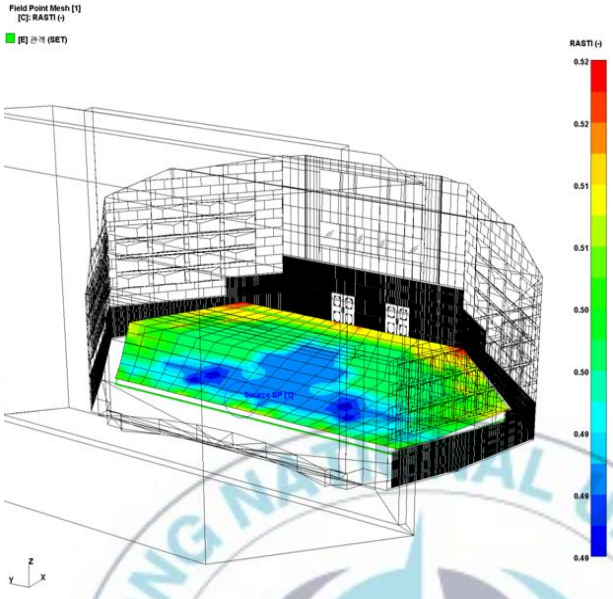
7. 만석 시 음압분포



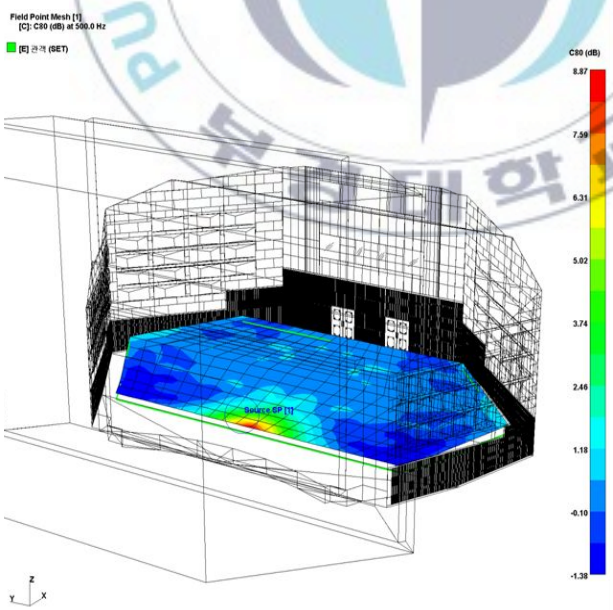

8. 공석 시 RASTI



9. 만석 시 RASTI

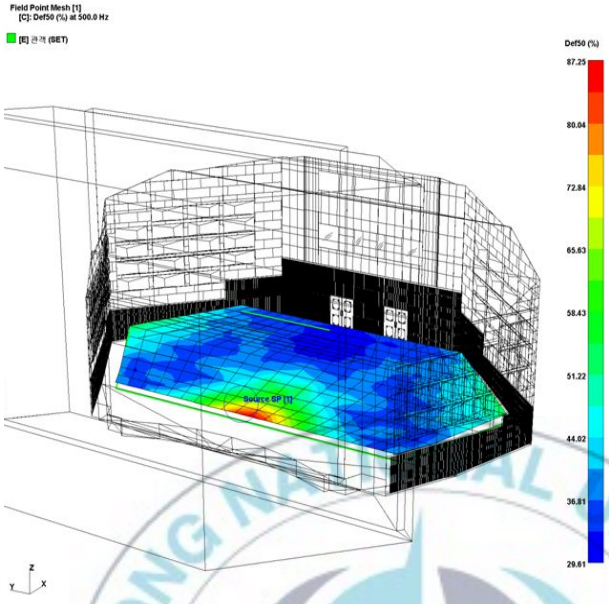



10. 만석 시 500 $Hz$ 음악명료도

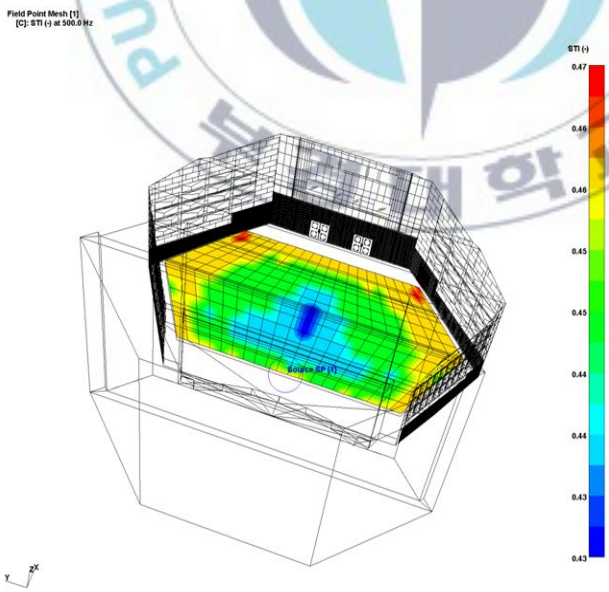



PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

11. 만석 시 500 $Hz$ 음성명료도

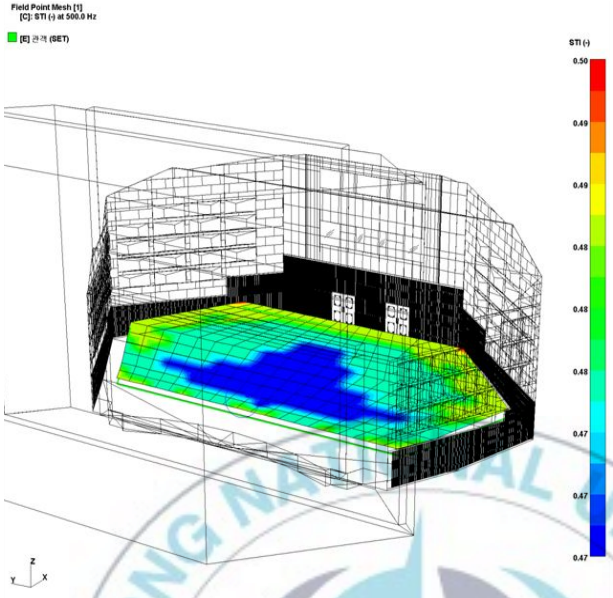



12. 공석 시 500 $Hz$ STI




PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

13. 공석 시 500 $Hz$ STI




PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

# 감사의 글

본 논문이 오늘의 결실을 맺도록 변함없는 사랑과 격려로 학문의 길로 정진하도록 인도하고 보살펴주신 배동명 지도교수님께 진심으로 감사합니다.

논문이 완성되기까지 부족한 점을 지적해 주시고 본 논문을 지도 심사하여 주신 하강렬 교수님, 배성용 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 학문의 부족함을 채워주시고, 관심을 가져주신 양보석 교수님, 윤종락 교수님, 김무준 교수님, 박규칠 교수님께 끝없는 존경과 감사의 마음을 드립니다.

논문의 마지막 부분까지 살펴주시고, 지도와 격려를 아끼지 않으신 티엘엔지니어링(주) 김태훈 사장님과 어려운 시기에 학업에 정진할 수 있도록 많은 지원을 해주신 공정철 부장님 이하 티엘엔지니어링(주)의 직원분들에게도 진심으로 감사드립니다.

어렵고 힘든 여건에서도 지금의 제가 있기까지 한결같은 사랑으로 묵묵히 지켜봐주시고 지원해주신 부모님과 여기까지 올 수 있도록 힘을 준 여동생과 남동생에게도 감사하다는 말을 전해 드리고 싶습니다.

끝으로 저를 도와주신 많은 고마운 분들이 계셨다는 것을 항상 생각하면서 나를 아는 모든 분들께 진심으로 감사의 마음을 전하고자 합니다.

2012년 2월

논문을 마치며...

김 동 욱 올림