

Auditoria Design

Acoustic Design

"많은 형태의 공연장(극장, 강의실, 교회, 콘서트 홀, 오페라 하우스, 영화관) 디자인은 실제의 현대 건축에서 미적, 기능적, 기술적, 예술적 경제적 요구에 따른 복잡한 문제점을 가지고 있다. 공연장은 전례가 없는 많은 청중을 수용하기 때문이다. 게다가, 현대 건축에서는 하나의 공간은 많은 다른 기능들로 이용되어야 하며, 실의 수용 능력은 필요에 따라 순간적으로 조절할 수 있어야 함을 기준으로 삼는다."

"이는 심각한 요구사항이며 청중들이 공연장에 들어갈 때, 그들이 쾌적, 안전, 즐거운 주변 환경, 좋은 조도, 적당한 조망과 알맞은 사운드를 매 순간 즐길 수 있도록 설계함을 잊어서는 안 된다."

- L. L. Doelle, Environmental Acoustics

Requirements for Good Acoustics

다음에 나오는 것은 근대 공연장의 좋은 음향에 대한 조향에 관한 기준이다. 자연에서 전반적인 일반사항에서부터 음향 디자인 최고의 기본틀을 제시한다.

- 공연장의 모든 부분에 충분한 음의 세기를 제공해야 한다.
- 음 에너지는 실에서 균등하게 분배되어야 한다.
- 공연장에서의 최적의 반향(reverberation) 특성은 기능적으로 무엇을 요구하느냐에 따라 기기 설비들을 제공해야 한다.
- 실은 음향 결함에 대해 자유로워야 한다.

여기서 음향 결함이란 뚜렷한 에코(distinct echoes¹⁾), 불규칙한 에코(flutter echoes²⁾), 뾰족한 장애 에코(picket fence echo³⁾), 음영(sound shadowing), 실의 공명(room resonance⁴⁾), 음의 집중(sound concentrations), 그리고 지나친 반향(excessive reverberation⁵⁾)을 말한다.

- 1) 에코 (echo, 반향(反響)) 음원으로부터의 직접음과 벽, 천장 등으로부터의 반사음이 구별하여 들릴 때 그 반사음을 말한다. 시간차 0.05초 이상, 노정차 17m 이상.
반향은 직접음에 연속하여 시간적으로 분리된 반사음이 존재하면 음이 이중으로 들리는 현상으로서, 반사음과의 지연시간이 50ms 이상되면 에코로 느낀다고 한다. 시간지연이 짧은 경우 직접음을 보강하기 때문에 오히려 듣기가 좋다. 에코는 잔향과는 다른 현상으로 명확히 분리하여 생각할 필요가 있다. 실내에서 에코가 발생하면, 음원이 사람인 경우는 명료도가 떨어지고, 연주인 경우는 리듬을 흐뜨리게 하는 원인이 된다.
- 2) 플러터 에코 (flutter echo) : 벽과 벽 또는 천장과 바닥사이 등 견고한 물체가 평행한 공간에서는 박수소리가 다중반사음으로 들리는 경우를 느낀다. 이와 같이 반사음이 시간적인 순차로 일정 간격을 두고 반복되는 현상을 말한다. 이는 음향 장애를 일으키는 큰 요인으로 작용한다.
플러터 에코는 명룡(鳴龍)이라고 하며, 평행한 두 반사면 사이에서 단음을 냈을 때 반사음이 여러번 반복하여 들리는 현상을 말한다.
- 3) picket fence echo ≒ sound focus (음의 초점) : 실내의 벽이나 천장에 반사성의 볼록면이 있는 경우 그 면으로부터의 반사음이 실내의 특정한 부분에 집중하여 그 점의 음압이 이상하게 커지는 현상.
- 4) resonance (공명(共鳴), 공진(共振)) : 어느 진동체가 다른 진동체의 진동에 유도되어서 다른 진동과 같은 진동수로 진동하는 현상. 즉 진동계의 강제 진동으로, 외력의 크기를 일정하게 해 두고 주파수를 변화시켰을 때 계의 고유 진동수 부근에서 변위, 속도, 압력 등이 극대값을 취하는 현상. 또는 그러한 극대값을 취한 상태. 구조물, 소리, 전기 진동 등에서 이 현상이 일어난다.

- 주변 소음과 진동은 음이 충돌하지 않도록 충분히 차단해야 한다.

Adequate Loudness

적당한 음의 크기⁶⁾를 제공할 때 문제는 주로 청중에게 음이 도달하기 전에 음이 감쇠되는 반비례 법칙과 청중에 의한 지나친 흡음의 결과로 발생한다. 이 음의 감소는 여러 가지 방법으로 최소화 할 수 있다.

- 공연장의 형태는 청중들이 가능한 음원으로부터 가까이에 앉도록 해야 한다. 더욱 큰 공연장의 경우 발코니의 이용은 음원에 더 가까운 좌석을 배치할 수 있도록 유도한다.

- 음원은 모든 청중들에게 직접음의 자유흐름(a free flow)을 획득하도록 하기 위하여 가능한 크게 증가해야 한다.

- 관객이 앉은 좌석의 바닥은 객석 너머로 입사되는 음이 발생할 때 그 음이 더욱 쉽게 흡수될 수 있도록 적당하게 음을 모아주어야 한다. 그러나 일반적인 법칙으로 경사진 공연장의 통로에 따른 경사도는 안전율에 의해 1:8보다 더 커서는 안 된다. 라이브 공연이 펼쳐지는 극장 관람석 바닥, 특히 오픈 스테이지⁷⁾나 아레나 스테이지⁸⁾는 계단형으로 해야 한다. (ECOTECH 지침서를 참조하여라 -appendix 1)

- 음원은 청중들이 인지하는 음에너지의 증가를 위하여 음의 반사율이 높은 표면으로 둘러싸며 가까워야 하고, 또한 풍부해야한다. 반사 표면 면적은 반사되는 음파와 비교해야 함을 기억해야 한다. 게다가 반사면은 직선음과 반사음 사이에 가능한 한 시간 지체가 짧은 방향으로 위치시켜야 한다. 보다 바람직한 것은 30msec를 초과해서는 안 되며, 절대로 80msec 이상은 안 된다.

-
- 6) reverberation (잔향, 殘響) : 실내 기타의 닫힌 장소에서 음이 벽, 바닥, 천장 등에 여러 번 반복하여 반사하기 때문에 음원이 정지한 다음까지 음이 남는 현상. 일반적으로 주위의 벽이 반사성이면 길어지고, 흡음성이면 짧다.
 - 6) loudness of sound (음의 크기) : 정상인의 청각으로 느끼는 음의 대소의 정도를 말한다. 따라서 물리적인 강약과는 다르다. 단위는 손(sones)이다.
loudness level of sound (음의 크기 레벨) : 모든 음은 그 물리적인 세기의 레벨과는 관계가 없고 정상적인 청각을 가진 사람에게 1,000Hz의 정현파로 그 세기의 레벨이 A dB의 음과 같은 크기로 들리는 경우에는 그것을 A 폰(phon)의 크기의 레벨음이라 한다.
 - 7) open stage (오픈 스테이지) : 무대와 객석을 구획하지 않는 형식. 관객과 연기자와의 일체감이 얻어지기 쉽지만 여러 가지 각도에서 보이기 때문에 연출의 제한을 받기 쉽다.
 - 8) arena stage (아레나 스테이지) : 무대 주위를 관객이 둘러싸는 형식의 홀로써 원형 모양을 한다. 아레나란 고대 로마의 원형 투기장을 말한다.

■ 바닥 면적과 공연장의 실용적은 음의 길을 최소화 할 수 있도록 합당하게 최소화 시켜야 한다. 다음에 오는 표는 변화하는 공연장에 따른 부피 대 좌석 면적에 대한 알맞은 비율을 보여준다.

TYPE OF AUDITORIUM	MINIMUM	OPTIMUM	MAXIMUM
Room for Speech	2.3 m ³	3.1 m ³	4.3 m ³
Concert Halls	6.2 m ³	7.8 m ³	10.8 m ³
Opera Houses	4.5 m ³	5.7 m ³	7.4 m ³
Catholic Churches	5.7 m ³	8.5 m ³	12.0 m ³
Other Churches	5.1 m ³	7.2 m ³	9.1 m ³
Multipurpose Halls	5.1 m ³	7.1 m ³	8.5 m ³
Cinemas	2.8 m ³	3.5 m ³	5.6 m ³

표 1 공연장에서 좌석에 따른 실용적(m³)

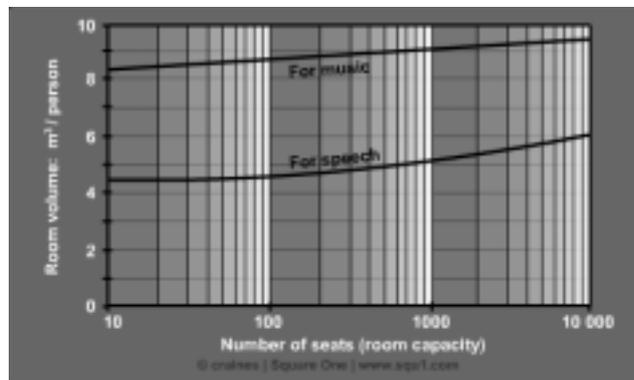


그림 3 공연장에서 좌석에 따른 실용적(m³) 그래프

실의 바닥면적과 용적은 합리적인 크기가 필요하다. 객석에 대한 최적용적은 실의 사용목적과 수용 인원수에 따라 다르며, 시각적, 미적 요구 외에 청중의 편안함 같은 환경심리적인 측면 등이 고려되어야 한다. 객석에 대한 용적의 비를 낮게 하면 건축비 절감과 조명, 공기조절 및 청소 관리 등의 유지비가 저렴하게 된다. 또한 음향적인 측면에서도 실의 용적이 작아지면, 소요 잔향시간을 얻기 위하여 필요한 흡음재의 사용량이 적어지고, 같은 음원 출력으로 높은 실내의 음압레벨을 유지할 수 있는 이점이 있다. 그러나 실의 크기가 너무 작으면 충분한 잔향시간을 얻기 힘들다. 좌석치수를 45×90 cm, 또는 50×90cm로 할 때 1석당 점유바닥 면적은 객석 통로를 포함하여 0.5~0.8m² (보통 0.7m²)로 계획한다.

실용적 300m³까지는 실의 표면을 특별하게 처리하지 않아도 음향적으로는 큰 문제가 발생되지 않는다. 그러나 실의 치수가 최저가청음의 1/2 파장(약 8.5m)보다 작은 경우에는 반향은 발생하지 않으나 평행된 표면 사이에는 정재파가 발생하여 공명의 원인이 될 수도 있다. 실의 크기가 300m³에서 3,000m³으로 점차 증가하게 되면 음원으로부터 멀리 떨어진 위치의 음압을 보강해야 하며, 반사음의 방향을 고려하여 실 표면의 형태를 기하학적 방법을 결정할 수 있다.

8,000~8,500m³보다 큰 실에서 단일 목소리를 들으려면, 음의 증폭장치가 필요하다. 큰 오디토리엄에서 정재파는 발생되기 어려우나 반향이 발생되기 쉬우므로 적절한 음의 확산과 정확한 잔향 시간을 구하는 것이 중요하다.

■ 마주보고 있으며 특히 음원에 가까운 반사 벽간의 평행은 바람직하지 않은 후면 반사와 불규칙적인 에코를 제거하기 위하여 피해야 한다.

■ 관객들은 오직 관람과 청취에 편리한 위치에 착석해야 하며, 일반적으로 두 가지 모두를 만족해야 한다. 지나치게 넓게 펼쳐진 좌석 배치는 피해야 한다. 게다가 통로는 관람이 제한되는 공연장의 측면에 위치시키는 것이 바람직하다. 관람과 청취에 가장 최적의 장소인 중앙부의 아래쪽에 두면 안 된다.

■ 청중들을 향한 직접음의 반사면 외에 또한 추가적으로 공연 중 무대에서 어떤 일이 발생 하는지 듣는 이들의 능력을 강화시키기 위하여 종종 음의 후면으로의 반사면이 필요하다.

중간 사이즈의 공연장에서 작은 음의 크기 측정을 적절하게 개선하는 동안, 그들은 기적적인 공연을 펼칠 수가 없다. 큰 공연장, 특히 야외 공연장의 경우, 음의 레벨은 청취를 만족 시키기에 여전히 너무 낮을 것이다. 이 경우, 긴밀한 음 증폭기기의 설치가 항상 필요하다.

Diffusion of Sound (음의 확산)

음의 확산으로 고음질을 제공하기 위하여 표면을 충분히 불규칙하게 공급하여 감싸며, 구조적 요소를 노출시키고, 천장 반자, 톱니모양의 울타리, 튀어 나온 상자, 표면의 조각 장식, 깊게 보이는 창문을 준비해야 한다. 이는 또한 모든 주파수에 영향을 미치기 위하여 여러 가지 크기로 해야 한다.

경제와 미학의 이유로, 작은 실의 경우 특별히 불규칙적인 표면의 설치는 어려울 수 있다. 이러한 경우 보다 적은 효율이지만 반사적이고 흡음적인 재료의 대안으로 흡수되는 재료를 일정하지 않게 배치하는 것을 대안으로 제시한다.

제공된 디퓨저의 이용은 콘서트 홀, 오페라 하우스, 라디오/녹음 스튜디오, 리허설 룸의 경우 특히 중요하다. 부정적인 에코와 지속되는 음파 효과로부터 청중을 위해 음의 질을 높이는 음향 디퓨저의 이로운 효과는 그들이 실에서 음 에너지를 계속 유지하는 것으로 구분한다.

Control of Reverberation

모든 강연자, 연기자, 음악가와 특히 가수는 적당한 잔향 시간(reverberation time)을 기대할 것이다. 그렇기에 그들은 너무 단호하거나 건조한 소리를 내지 않는다. 실의 최적 잔향 시간은 다음을 포함한다.

* 잔향 이론

실내에서는 음을 갑자기 중지시켜도 소리는 그 순간에 없어지는 것이 아니라 점차로 감쇠되다가 안 들리게 된다. 이와 같이 음 발생이 중지된 후에도 소리가 실내에 남는 현상을 잔향(reverberation)이라 한다. 잔향을 양적으로 표시하는 데는 잔향시간(reverberation time)을 사용한다. 이는 실내에 일정한 세기의 음을 제공하여 일정 상태가 되었을 때 음원으로부터 음의 발생을 중지시킨 후 실내의 에너지 밀도가 최초값보다 60dB 감쇠하는 데 요하는 시간을 말한다. 이것은 W.C. Sabine이 1895년에 연구발표한 이래 실내 음향 환경을 표시하는데 중요한 요소로 사용되고 있다.

잔향시간이 너무 길면 대화음의 이해도가 저하되며 빠른 연주음일 경우 각 악기의 분리가 명확하기

못하게 되어 혼란하게 느껴지는 반면, 잔향시간이 지나치게 짧아지면 음악의 풍부성이 없어지므로 실의 용도에 따라 알맞게 조절되어야 한다.

- 선호하는 RT 대 주파수 특성
- 직접 음이 청중에게 도달할 때의 알맞은 반사 비율
- 안정되고 부드러운 증가와 음 에너지의 쇠퇴

* 잔향계획

실의 사용목적과 체적에 따른 최적 잔향시간(optimum reverberation time)은 여러 가지 경험치나 이론치에 의해 제안되고 있다.

회화·강연·연극 등에서는 언어의 높은 명료도(clarity)가 요구되기 때문에 대체로 잔향시간이 짧아야 한다. 그러나 음악은 좋은 음질과 적당한 여운, 풍부한 음량이 요구되므로 다소 긴 잔향시간이 필요하다. 또한 실의 용도가 다목적인 경우는 잔향시간을 언어와 음악의 중간 정도로 하여 요구되는 목적에 따라 변경할 수 있도록 잔향시간을 가변장치(가변 흡음구조 등) 등을 설치할 필요가 있다.

잔향계획은 다음과 같은 순서로 진행한다.

- ① 잔향시간의 검토는 보통 125, 250, 500, 1,000, 2,000, 4,000 Hz의 주파수에 대하여 실시한다. 다만 전용 음악홀인 경우에는 63~8,000Hz까지 범위로 한다.
- ② 최적잔향시간을 결정한다.
- ③ 최적잔향과 실의 용적에서 필요한 흡음력을 구한다.
- ④ 실내의 흡음력을 계산한다. (이 때 실내의 표면재료 뿐만 아니라 사람, 가구 등의 흡음력을 고려한다.)
- ⑤ 수정하여야 할 흡음력을 계산한다.
- ⑥ 계획적으로 음향재료를 배치한다.
 - (a) 흡음특성에 맞는 재료를 선정한다. (중고음역, 저음역의 흡음재료)
 - (b) 일반적으로 무대 근처부분은 반사성 재료마감(live end), 객석 윗부분은 흡음성 재료마감(dead end)으로 처리하는 것이 바람직하다.
- ⑦ 공사중에 때때로 잔향시간을 측정하고 불합리한 설계나 설계와 시공의 엇갈림 등은 수시로 조사해서 개선토록 한다.

RT를 결정하면, 잔향 제어는 전체 실의 흡음을 정하고, 적당하게 제공되도록 구성하도록 이루어져 있다. 이는 거주자와 장치의 효과를 고려하는 것뿐만 아니라 실 표면의 정확한 음향마감재를 선택하는 것을 의미한다. 이는 일반적으로 이용되는 Sabine 공식⁹⁾에서 디자인된 가장 빠른 범위를 계산해야 한다.

이 공식을 보면 더 큰 실의 경우, 더 긴 잔향 시간과 더욱 탁월한 요구된 흡음력을 명확히 보여준다. 사실 RT는 같은 공연장에서도 체적의 확대나 감소로 변할 수 있다. (예, 들어 올리거나 낮추는 천장, 많은 발코니의 이용 등)

9) Sabine의 잔향식

실내음의 잔향 시간을 계산하는 방법은 기하음향학적이며, 통계적인 고찰에 의한 정량적(定量的)인 연구로서, Sabine이 다음과 같은 잔향식을 최초로 제안하였다.

$$T = K \cdot \frac{V}{A}$$

자세한 내용은 Appendix 2에 제시.

재료의 흡음력이 빈번하게 변화하기 때문에, RT를 원한다. 그러므로 들을 수 있는 범위에서 많은 주파수는 RT를 조건으로 지정하며 계산하는 것이 필수이다. 낮은 주파수에서 RT는 가장 곤란한 존재이다. 이 경우 다공성 흡음장치가 가장 낮은 효력이 있다. 사실 패널 흡음재와 저음의 트랩은 고려되어야 한다.

대부분의 모든 큰 공연장에서, 청중은 대부분의 흡음을 제공한다. (0.45 Sabine/person). 낮은 참석을 위한 가장 효과적인 (가장 고가의) 보상은 각각 한 사람 당 포괄적인 흡음재를 사용한 천을 씌운 좌석을 이용하는 것이다. 몇몇 관객은 접는 의자의 밑 부분에 흡음재를 이용한다. 사실, 시설을 이용할 때, 즉 관객이 없어서 접어 올려져 무대를 향한 경우 바닥을 면한 것처럼 그 흡음 효과는 감소한다.

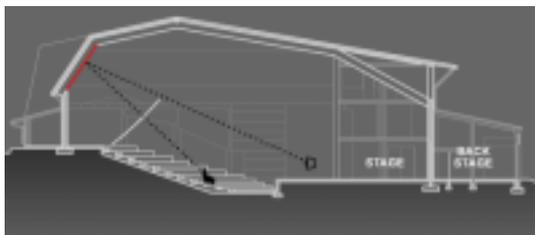
일반적인 법칙으로, 음의 흡음 재료는 음의 단점을 고려하여 생산되어지며 이러한 표면에 설치한다. 이는 배면의 벽을 처음 다뤄야 하며, 음원으로부터 측면에 있는 벽을 고려해야 한다. 공연장의 앞에 흡음재를 설치하거나 천장 중간에 위치하는 것은 변명이 아니다. 이러한 부분의 첫 번째 기능은 뒤에 있는 청중에게까지 음을 반사시키는데 있다.

Elimination of Defects

실의 평면에 기인하는 기본적인 결함인 에코의 존재와 음의 집중, 암음, 왜곡, 이중 공간과 공명에 대해서는 이전의 강의에서 언급하였다.

1. Echoes

에코는 가장 심각하고 가장 일반적인 결함이다. 이는 음이 충분한 크기로 경계에서 반사되거나 다음 음이나 명료한 직접 음을 감지하는 것이 늦을 경우 발생한다. 법칙으로써, 연설의 경우 지연이 1/25sec (14m), 음악의 경우 1/12sec (34m)보다 더 느린 경우, 반사는 문제가 된다.



Solution : 어긋나는 표면이나 흡음재를 적용하거나 반사(diffusion)시키도록 평면을 변경한다.

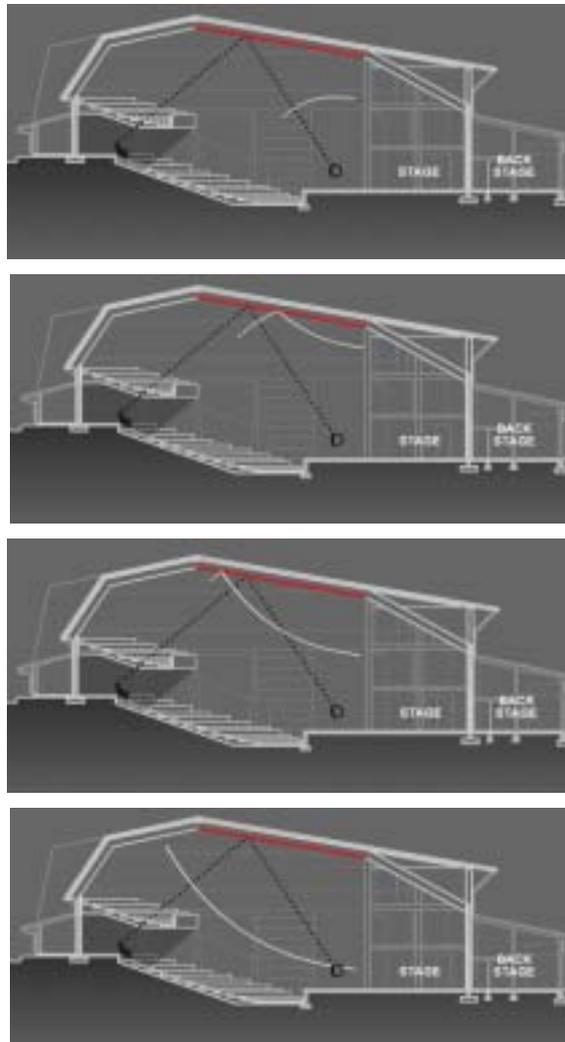
2. Sound Concentration

때때로 음은 하나의 점으로써 작용한다. 이는 오목한 표면에서 반사된 음들이 하나의 점으로 모이기 때문이다. 이렇게 초점¹⁰⁾으로 집중된 음은 부자연스럽게 높거나 항상 다른 손실을 발생시킨다.

Solution : 흡음재나 확산판을 설치한다. 더 좋은 방법은 음의 초점이 외부로 보내지거나 둘러싸이도록 재디자인 한다.

3. Sound Shadowing

발코니 아래에서 가장 두드러진 점은 직접적으로 반사된 음이 발코니에 가려져 청중에게까지 도달되지 못한다는 것이다. 일반적으로 2배의 높이를 초과하는 깊이의 발코니는 피한다. 이는 발코니 가장 뒤쪽에서 가장 큰 문제를 발생시킨다.



Solution : 음의 반사에 영향을 끼치는 좌석에 돌출된 표면으로 음이 반사되어 도달할 수 있도록 재배치시키거나, 돌출부분을 제거한다.

10) sound focus (음의 초점) ; 실내의 벽이나 천장에 반사성의 블록면이 있는 경우 그 면으로부터의 반사음이 실내의 특정한 부분에 집중하여 그 점의 음압이 이상하게 커지는 현상

4. Distortions

이는 다른 주파수대의 넓게 변화하는 흡음계수 효과에 의한 결과이다. 음질과 음색(주파수의 뒤틀림)에 바람직하지 못한 결과로 작용한다.

Solution : 전체 음향 범위에 설치하는 음향 마감재의 흡음계수에 균형을 맞춘다.

5. Coupled Spaces

공연장이 다른 RT를 갖는 적당한 공간과 연결되어 있을 때, 두개의 실은 두개의 공간을 구성할 것이다. 기류는 이 두 공간 사이에서 자유로울 것이며, 최고의 잔향 공간의 쇠퇴로 인해 가장 작은 잔향을 발생시킬 것이다. 이는 부분적으로 연결할 수 있는 실내 벽장 등으로 구분해야 한다.

Solution : 음향 분리대(스크린이나 문)를 설치하거나, 두 실의 RT를 조화시킨다.

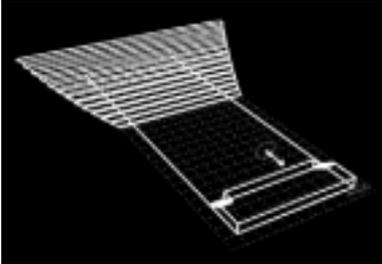
6. Room Resonance

실의 공명은 음의 뒤틀림과 비슷하다. 그러나 음의 공명은 정재파(standing wave)의 부분적 강조에 의한 결과이다. 보통 더욱 작은 실에서 발생한다. 이는 디자인적으로 제어되는 실이나 녹음 스튜디오에 상당한 관련이 있다.

Solution : 실의 전체적인 형태에 치밀한 변화를 가하거나, 표면으로 분배되도록 큰 음 디퓨저를 이용해야 한다.

Appendix 1

■ ACOUSTIC ANALYSIS -Designing Raked Audience Seating



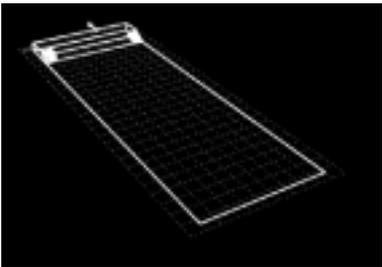
Creating Construction Lines

이 시간에 당신은 간단한 경사진 공연장 좌석 평면 계획에 관하여 작업할 예정입니다.

1. 'Raked Seating.eco'를 ECOTECT에 위치한 강의 폴더에서 불러오시오.

이 모델의 경우 다음과 같은 3개의 존이 있습니다.

: 오디토리움, 건축 라인, 디폴트¹¹⁾ 외부 존

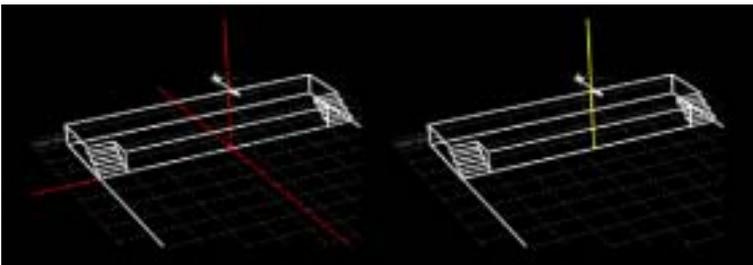


2. 처음으로 무대 중앙 앞부분에 수직 라인(약 5000mm 높이)이 필요합니다.

Construction Lines 존이 맞는지 확인하십시오. Line 툴  을 이용하여 무대 앞의 기본의 중간 포인트에 스냅을 잡아서 그리시오.

왼쪽을 클릭하여 첫 점을 잡은 후 Control 키를 이용하여 (Z 축으로) 마우스를 드래그하여 높이가 5000이 되도록 그리시오.

왼쪽을 다시 클릭하여 두 번째 점을 설정하고 라인이 끝난 후, Esc 키를 누르시오.



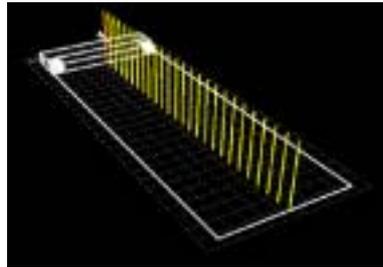
11) 컴퓨터에서 이미 예상한 설정이나 사전에 정한 데이터

3. 우리가 그린 첫 Construction Line에서 X 축 방향으로 간격은 1000mm로 하여 array를 시키시오. 이는 좌석간의 열 사이 간격입니다.

이 때 우리가 이용할 수 있는 가장 쉬운 방법은 Object Transformation을 이용하는 것입니다.



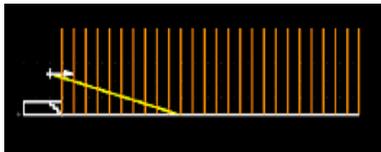
이미 그려진 수직 선이 정확히 선택되도록 주의하시오.
 왼쪽에 정확한 정보를 참조하시오.
 모든 값을 확인한 후 Apply 버튼을 클릭하시오.
 마지막 array는 17개의 수직 라인을 일렬로 배열해야 합니다.



4. 다음으로 그릴 선은 음원에서 시작하여 10번째 라인의 아래부분에서 끝이 나도록 합니다. 이 때 정면으로 설정하여 작업하면 편리합니다.(F7)

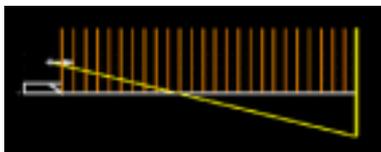
이 선은 우리의 equal-sight-angle 선의 기초가 될 것입니다.

우리는 10번째 선과 음원으로부터 원하는 경사를 구할 수 있습니다. 첫 번째 좌석은 매우 좋은 조망을 갖을 것입니다.



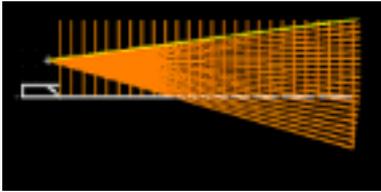
5. 지금 그린 선을 연장하여 마지막 수직선과 만날 수 있도록 조정하십시오.

두 선을 선택한 후, Modify 메뉴에서 Two Lines 아이템을 선택한다.



6. 마지막으로 음원으로부터 1° 간격으로 회전시키는 것이 필요하다.

가장 쉬운 방법은 이렇다. : Object Transformation 툴바에서 라인을 선택한 후, 패널의 Transform Type의 풀다운 리스트에서 Rotate-Axis를 선택한다. Y Angle을 1° 로 지정한 후, 20개의 객체로 회전 시킨다. 그리고 Create Array 버튼을 누른다.

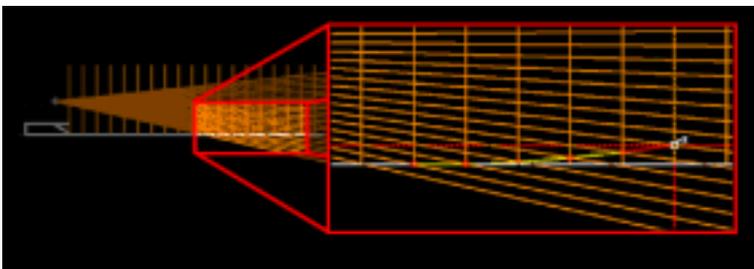


Starting the Seating Profile

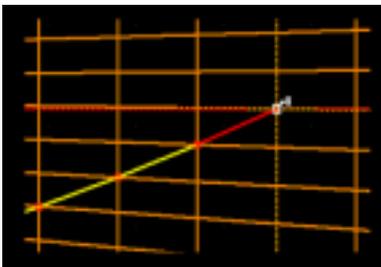
1. 다음 단계는 zoom을 하여서 첫 번째 교차점을 찾는다. 이미 그려진 라인의 교차점을 찾고, 그 교차점간의 새로운 라인을 그리기 시작한다.

교차점에서 벗어나지 않도록 스냅을 정확히 하라. 그리고 Auditorium zone이 생성된다.

좌석 측면도에서 이 선이 시작될 때 Construction Lines의 zone보다는 이 존이 더 필요하다.



2. 새로선 전부 각각에 이 선이 교차되도록 계속해서 작업한다. 이는 청중들의 공연장 평면의 뒷부분 까지 이른다.



3. Zoom out(ctrl + F)를 하고, Construction Lines 존으로 돌아간다.

이 좌석 측면도는 하나의 선으로 보여져야 한다.

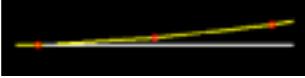


Creating Horizontal Steps

1. 측면도에서 처음에 높아지기 시작하는 점을 확대하라. 라인(Node mode)을 더블 클릭한 후, 첫 증가점을 선택하라.

만약 이 점이 100mm보다 더 낮게 위치한다면 Z=0으로 내리는 것이 좋다. 완벽한 계단을 만들기

이 높이는 불충분하기 때문이다.



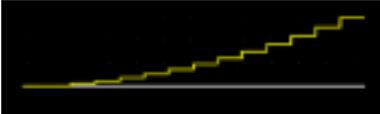
2. 다음 점으로 이동하라. 이 때 여전히 Node 모드여야 한다. 툴바에서 Add Node  버튼을 선택하라.

Align 스냅(이 때 다른 스냅들은 off 시키는 것이 좋다)을 on하고, 마지막 점과 처음에 선택한 증가하는 점의 선 왼쪽을 클릭해라. X축과 Y축의 새로운 점들을 일렬로 정리하라.(아래에 보여지는 것처럼) 그리고 다시 왼쪽을 클릭하여 새로운 점의 위치를 정하라.

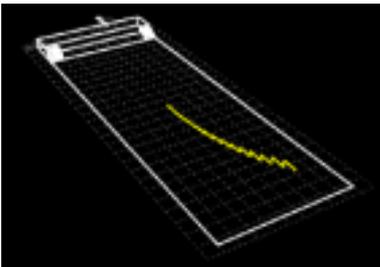


3. 새로운 일직선의 점들을 계속적으로 추가한다. 이 작업은 계단의 커브로부터 측면에 보이는 정도가 알맞을 때까지 진행한다.

마지막 커브는 다음에 보이는 것과 같이 보여야 한다. 계단 사이즈를 주고, 추후 몇 개의 계단을 더해 주어야 할 것이다.



4. 다음 단계에 가기 전에, 투시도로 계단을 체크하라.

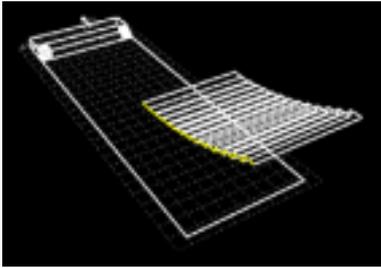


가장 빠른 방법으로는 Selection Information 패널을 이용하여 Y 방향으로 4500을 넣고, 이 섹션에 1 계단을 넣으면 된다. 이 때 패널 맨 아래에 위치한 Apply Changes를 클릭하는 것을 잊지 말라.

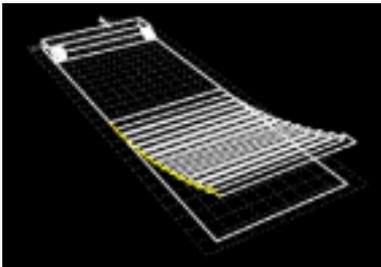
Extruding a Line

이번에 계단을 만들 것이다. 우리는 공연장의 총 넓이에 우리가 필요한 만큼 extrude 시킴이 필요하다.

1. Object 모드에서 선택된 라인에서 Selection Information 패널에서 Y Extrusion Vector에 9000을 넣어라. 아래에 있는 Apply Changes를 클릭하라.



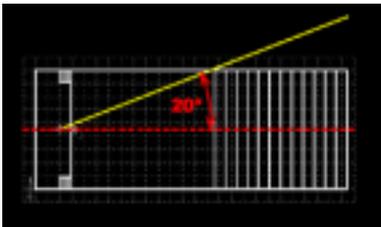
2. 이전의 선은 여전히 선택된 상태에서, Move  툴을 이용하여 좌석을 이동시켜라. Y 축으로 4500만큼 평면의 가장자리로 이동시켜라.



Cutting and Shaping the Seating

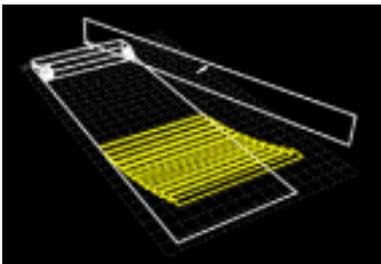
사각형의 좌석 배치 시에 바람직하지 않을 수도 있다. 이 경우 trim과 extend를 이용하여 평면을 절단할 수 있다. 예를 들어, 다음에서 우리는 무대의 각을 자를 것이다.

1. 평면에서 Partition  을 그려라. 음원으로부터 20°의 각으로 좌석에 향하도록 하라.

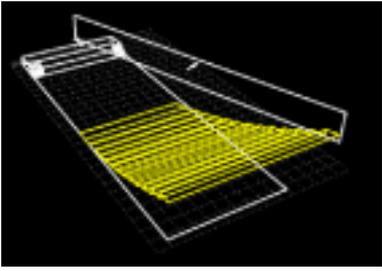


2. Cutting Plane(Ctrl +Q)를 이용하여 일직선으로 구분하라. 작은 화살표는 object의 중앙에 오도록 해야 한다.

파티션의 선택을 해제한 후, 좌석 평면 모두를 선택하라.



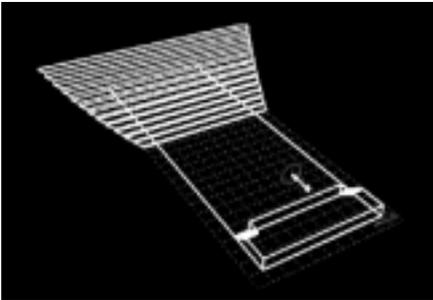
좌석이 선택되어 지고, Ctrl+E를 눌러서 Cutting Plane을 선택하여 연장시킨다.



3. 한쪽 면을 연장 시킨 뒤, 같은 방법으로 다른 쪽도 작업하면 된다.

Cutting Plane에서 중앙을 중심으로 Mirror의 방법으로도 가능하다.

마지막 좌석은 다음 아래에 보이는 이미지와 비슷하게 보여야 한다.



Appendix 2

■ 잔향시간의 계산식

1. Sabine의 잔향식

실내음의 잔향 시간을 계산하는 방법은 기하음향학적이며, 통계적인 고찰에 의한 정량적(定量的)인 연구로서 Sabine이 다음과 같은 잔향식을 최초로 제안하였다.

$$T = K \cdot \frac{V}{A}$$

여기서, T : 잔향시간 (초)

V : 실의 용적 (m³)

K : 비례상수 (0.16)

A : 실내의 총흡음력 (m²)

이 식은 잔향시간이 짧은 실 ($\alpha > 0.1$)이나 4000Hz 이상의 고음에서는 약간의 오차가 있으므로 Eyring 또는 Knudsen 식이 이용된다.

2. Eyring의 잔향식

음원에서 퍼져나간 음파가 벽면에 부딪힐 때마다 α 로 흡수되고 $(1-\alpha)$ 가 반사되는 것과, 반사된 음이 다른 벽면에 도착할 때까지는 흡음이 일어나지 않는 것을 근거로 하여 Eyring은 다음과 같은 잔향식을 유도하였다.

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

3. Knudsen의 잔향식

실용적이 큰 실에서는 공기의 점성저항에 의한 음의 감쇠를 무시할 수 없으므로 이를 고려한 것이 Knudsen 식이다.

$$T = \frac{K \cdot V}{S[-\log_e (1 - \alpha)] + 4mV}$$

여기서, m : 온습도에 따른 흡음계수, 1000Hz 이하인 경우 4mV는 0에 가까워지므로 무시된다.