

오디토리움의 音響設計

孫章烈

漢陽大學校教授, 工學博士

Report/ Acoustics Design of Auditorium
by Son,Jang-Ryul



일반적으로 음향설계는 잔향시간의 계산만으로 완료된다고 오해하기 쉬우나 기본계획의 초기부터 종합적인 설계를 하여야 한다는 것을 강조하고 싶다. 음향설계는 매우 전문화된 기술분야에 속하므로 전문적인 지식과 경험을 요하는 것이다.

1. 머리말

하버드대학의 W. C. Sabine 이 이른바 Sabine 의 殘響理論을 발표한 것이 1895년으로 지금부터 90년 전의 일이다. 그후 건축음향학 및 건축음향 측정기술은 눈부시게 발전하고 있으나 室의 음향특성을 잔향시간으로 표시하는 Sabine 의 방법은 아직도 건축음향 설계에서 중요한 목표의 하나로 되어 있다.

실내 음향에 관한 측정기술이 크게 발달함에 따라 실내 음향상태가 명확하게 파악되고 이것이 설계에 응용되어 음향설계 기술도 많은 발전을 하고 있으나 측정기술의 진보결과 다음의 2가지 문제가 현재의 건축 음향학에서는 당면한 과제로 되어 있다. 하나는 室의 음향특성을 잔향시간으로 나타내고 있으나 많은 오디토리움에서의 측정결과, 같은 규모의 오디토리움에서 거의 같은 잔향시간을 갖는 경우에도 두 공간에서의 음향특성은 많은 차이가 있을 수 있다는 것이 밝혀졌다. 이것은 오디토리움의 음향특성이 잔향시간 만으로는 나타낼 수 없다는 것을 뜻한다.

따라서 여러나라에서 잔향시간과 함께 실의 음향특성을 표시하는 척도를 찾기위한 연구가 수행되고 여러가지 방법이 제안되고 있으나, 아직 이렇다할 척도는 발견되지 않고 있다.

다른 하나는, 현재의 건축음향학에서는 측정기술의 진보로 실내음향에 대한 물리적 특성은 쉽게 파악할 수 있으나 음향특성에 관한 인간의 주관적 평가는 매우 어렵다는 것이다.

최종적인 실의 음향특성은 사람의 귀에 의해 판단되어야 하는 것은 두말할 필요도 없으나 사람의 귀로 들은 결과는 개인차가 심하여 양적으로 이것을 표시하는 것은 매우 곤란하다. 현재까지는 심리적, 통계적으로 처리한 것에 의해 실의 음향특성에 관한 주관적 평가를 양적으로 표현하려는 연구가 진행되고 있다.

건축 음향 설계기술은 크게 발전되고 있지만 前述한 것과 같이 설계의 중심은 아직 잔향설계이고 기본계획에서 잔향설계에 이르기까지 고려하여야 할 음향설계의 원칙이란 것이 있다. 설계과정에서 이 원칙을 충실히 지켜나간다면 엄밀한 음향환경을 요구하는 특수한 건물을 제외하고는 무난한 음향효과를 얻을 수 있으리라 여겨진다.

2. 音響設計의 基本計劃

음향설계의 원칙은 적절한 음향환경을 기본으로하여 고려해야 한다.

음향환경은 음향설계의 기본계획, 즉 음향계획에서부터 영향을 받으며 음향계획은 건축설계의 기본계획과 병행하여 고려해야할 필요가 있다.

1) 부지의 선정과 외부소음

오디토리움은 많은 사람에게 이용되는 것이기 때문에 교통이 편리한 장소에 세워지는 것이 보통이다. 따라서 교통소음에 의한 피해를 받기 쉽기 때문에 부지의 선정에는 교통량이 많은 도로에 면한 장소는 피하는 것이 좋고, 특히 부지 부근에 문제를 일으킬만한 振動源이 있는 장소는 좋지않다. 이러한 소음원과 진동원에 대해서는 장래 이와같은 것의 예상 또는 계획의 여부에 관해서도 조사하여야 한다. 그러나 도시에서 외부소음의 영향을 완전히 받지않는 부지를 구하는 것은 쉬운일이 아니기 때문에 건물의 평면계획을 할때 오디토리움은 될 수 있는 한 부지안에서 소음원로부터 떨어진 위치에 배치하고 또한 단일벽체로 오디토리움을 외부소음으로부터 격리하는것 보다도 그 중간에 복도, 로비, 매점, 화장실 등의 공간을 두어 음을 차단하는 방법 (그림1의a) 이 경제적이고 효과적이다. [그림1 참조]

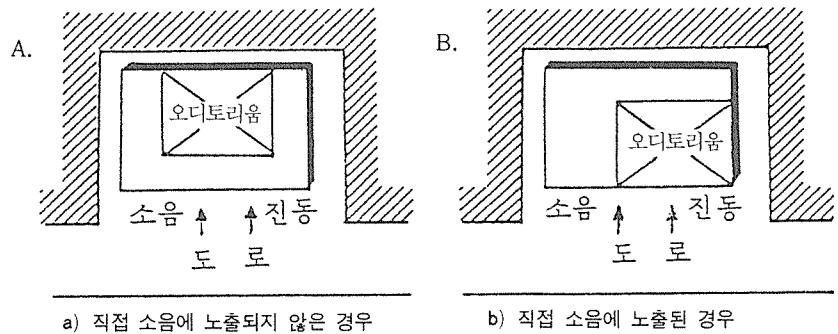
2) 換氣設備, 空調設備와 内部騒音

최근의 오디토리움에는 공기의 청정과 온습도의 조절을 위하여 환기설비, 혹은 공기조화 설비를 하고 있는데 이것을 위해서 기계실의 방음, 방진 덕트의 흡음처리 및 공기취출구, 흡입구의 발생소음 등에 주의하여야 한다. 이러한 환기 및 공기조화 설비의 방음, 방진의 문제는 기본계획 단계에서부터 충분한 검토를 하지않으면 완성후에 문제가 발생하기 쉽다. 만약 건물이 완성된 후에 공조설비 등의 기계류에 의한 내부소음의 문제를 발견해도 이미 때는늦은 것이며, 완성된 건물의 경우에는 소음문제에 대한 개수공사를 위하여서는 많은 경비가 소요될 뿐만아니라 그 문제를 완전히 해결하기는 거의 불가능하다. 더우기 공사를 위하여, 공사기간중에는 오디토리움을 사용하지 못하는 어려움이 발생하기도 한다. 또한, 화재가 발생한 경우에 연기가 객석에 충만되는 것을 막기 위해서는 음악당의 천장에 배연구를 설치하여야 하는데 이 배연구는 단면적이 크고 외부소음이 쉽게 들어오기 때문에 특히 주의할 필요가 있다.

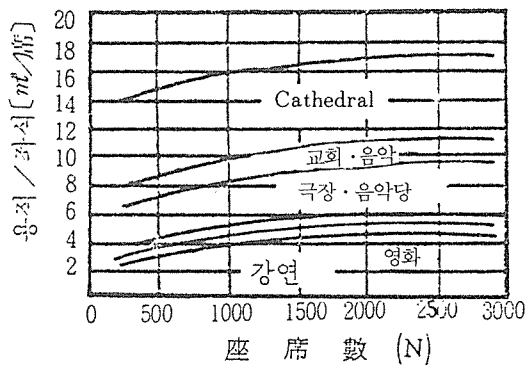
3) 오디토리움의 적절한 形態 및 容積

오디토리움이 양호한 음향상태가 되기 위해서는 그 사용목적에 알맞는 적절한 容積과 형태가 필요하다. 평면적으로는 무대에서 관객석을 향하여 적당히 펼쳐지는 형태, 즉 음향적으로 바람직한 부채꼴 형태의 평면이 가능한 넓이가 필요하다. 장방형, 또는 정방형 평면의 경우에도 숙련된 음향기술자가 충분한 검토를 하여 오디토리움에서도 좋은 음향상태를 얻는 列가 없지는 않지만 음향설계 원칙으로서는 부채꼴形 평면을 갖는것이 좋다. 단면형에서는 천장의 형태와 높이를 고려하여야 하는데 여기에서는 필요한 높이를 취할 수 있는 여유가 있어야 한다. 천장높이는 위에서 말한 容積과 밀접한 관계가 있다. 고층 건물의 경우, 일반적으로 層高는 4m이하이므로 오디토리움을 이와같은 빌딩안에 들 때에는 2 개층 만큼의 층고가 필요하게 된다. 오디토리움 용적의 기준이 되는 좌석당의 室容積을 [그림 2]에 나타낸다. 단, [그림 2]의 값은 방송

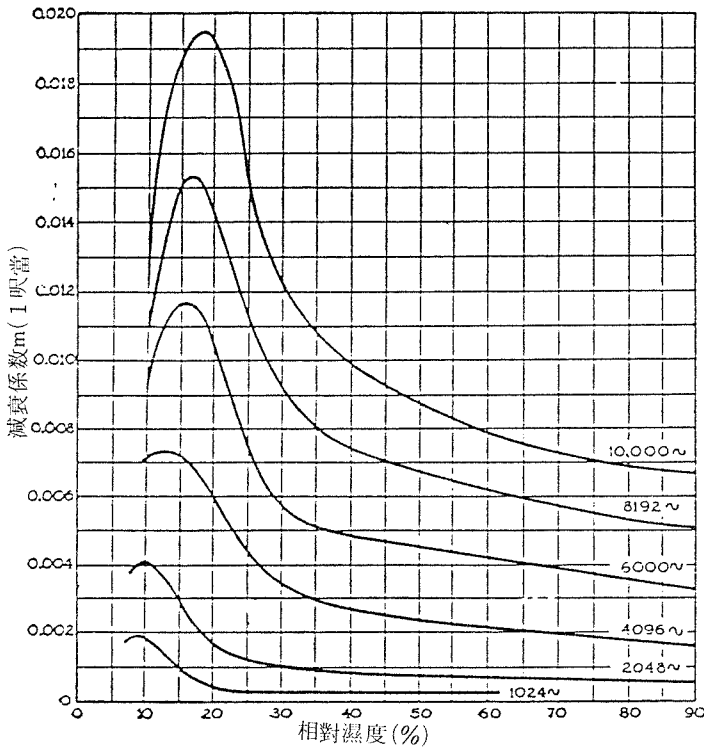
스튜디오 등과같은 특수한 경우에는 적용되지 않는 일반적인 오디토리움에 대한 값이다. 천장이 낮으면 客席後部까지 천장에 의한 반사음이 전달되기 어렵고, 용적이 작아지게 되어 짧은 잔향시간을 필요로 하게 된다. 그러나 이 경우에는 벽면등에 흡음재료를 사용할 여지가 적어 결국 잔향시간은 실내에 있는 관객수에 지배되어 버린다. 반대로, 천장높이가 너무 높아 室의 용적이 [그림 2]의 기준치를 훨씬 초과하게 되면 殘響時間은 실용적에 비례하기 때문에 길어지게 되고 적당한 잔향시간을 얻기 위해서는 흡음재료, 혹은 그밖의 마감재료를 넓은 벽에 필요 이상으로 사용하게 되므로 비경제적이다. 또한 냉난방의 부하도 크게 되기 때문에 이러한 점에서도 비경제적이 된다. 한편, 일반적으로 큰실에서는 용적이 크게 되므로, 高音域(2000Hz 이상)에서 공기에 의한 吸音이 발생하여 잔향시간이 짧아진다[그림3 참조]



(그림 1) 평면계획에 의한 소음방지



(그림 2) 좌석당 室容積



(그림 3) 공기중 상대습도에 의한 음파의 감쇄계수 (20°C)

3. 室形態의 設計

室의 형태는 실내음향상태에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 신중을 기하여야 한다. 기하학적으로 整形인 正方形, 長方形 혹은 이차곡선의 丹, 타원, 포물선 등의 평면형과 단면형은 피해야 한다. 正方形 혹은 長方形의 平面과 斷面을 가진 4각형 室에서 높이H, 폭W, 길이L이라 하면, 그 室에서는 다음 式과 같은 고유진동수 f가 존재한다. 이 식에서 알 수 있듯이 하나의 室에서는 p, q, r의 組合에 의해 무수한 고유진동수가 존재한다.

$$f = \frac{2}{C} \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} \dots \dots (1)$$

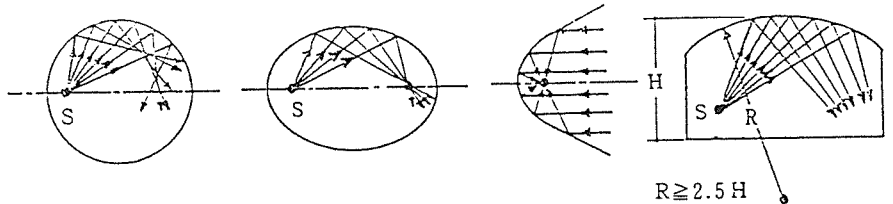
단, C : 음속

p, q, r : 자연수 0, 1, 2, \dots

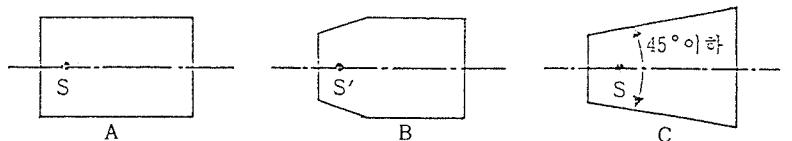
고유 진동수는 室의 크기에 의해 결정되는 것으로 높이H, 폭W, 길이L 3변의 길이의 비가 1 : 1 : 1, 1 : 2 : 4 와 같은 倍数比이면 어느 주파수 부근에 고유 진동수가 집중하기 때문에 3변의 비를 不等으로 하거나 倍数가 되지 않도록 선택하면 고유 진동수가 분산하게 된다. 고유 진동수가 존재하면 音源으로부터 나온

音중에서 그 고유진동수 부근의 음은 서서히 진동하면서 감쇄한다. 따라서 그 주파수의 잔향시간만이 길어지게 된다.

이것은 파동이론적으로 생각하면 室中央의 공기를 空氣기둥으로 생각하여 그 空氣기둥의 진동으로 생각할 수 있으며 前述의 (1)式은 파동이론으로부터 유도할 수 있다. 고유 진동수의 존재에 의한 음향장애를 피하는 방법은 뒤에 서술한다. 평면이나 단면이 원, 타원, 포물선 등의 2차곡선으로 구성된 경우는 (그림 4)와 같이 焦點, 焦曲面을 만들어 음의 분포가 불균일하게 된다. 이러한 凹曲面은 벽면의 일부일지라도 음의 집중이 일어나 좋지 않으며 반대로 凸曲面은 음의 확산에 유효하다.



(그림 4) 2차곡선에 의하여 발생하는 焦點, 焦曲面의 예



(그림 5) 오디토리움의 平面形

3. 1 平面形

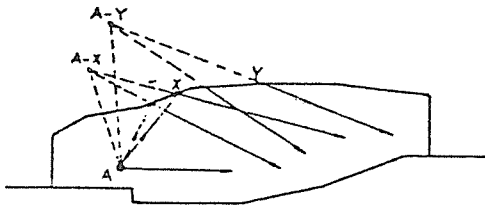
오디토리움의 平面形으로서 (a), (b), (c)와 같은 形이 많이 쓰인다. (a)는 앞에서 설명한 바와같이 음향적으로 좋은 形은 아니지만, 매우 일반적인 형태이며 사용되는 빈도가 가장 많다.

평행한 벽면이 마주보고 있기 때문에 고유진동수의 문제도 있고, 음향적으로 바람직한 형태는 아니지만 後述하는 바와같은 확산벽으로 처리함으로써 사용이 가능하다. (b)는 (a)를 음향적으로 개선한 形이기는 하나 아직도 평행면에 대한 고려는 할 필요가 있다.

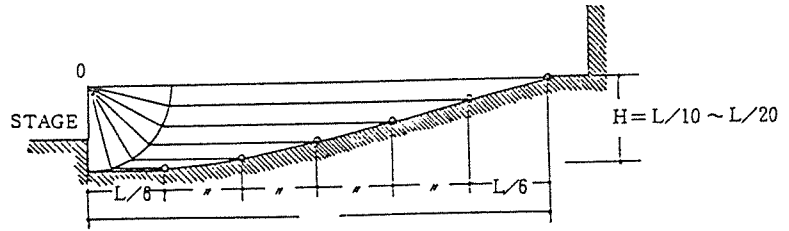
(c)는 가장 바람직한 形이나 부채꼴의 퍼짐이 너무 커지면 음이 확산하기 때문에 45° 정도 이내로 한다. 어느 경우에도 마주보고 있는 正面壁과 後壁의 형태와 처리에는 주의가 필요하다.

3. 2 斷面形

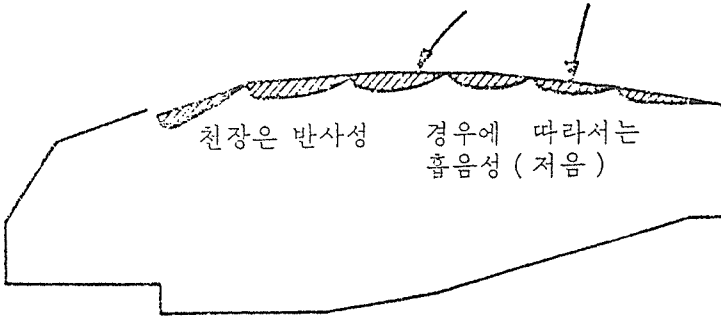
단면형이나 평면형은 모두 무대에서 발생한 음이 객석에 균일하게 분포하도록 고려해야 한다. 특히 단면형으로서 무대주변, 천장등의 반사면에 의해서 객석후방에 1회 반사음이 전달되어 직접음의 부족을 보충해야 되기 때문에 단면의 결정에는 충분한 검토가 필요하다. 평면형의 경우도 마찬가지이지만, 음은 빛과같이 입사각과 반사각이 같고 벽면에 대한 虛音源이 가능하다고 생각하여 기하광학의 수법을 이용한 작도에 의해서 음의 분포가 균일하도록 검토하여 단면형태를 정한다. (그림 6) (그림 4)도 음이 빛과 같다고 생각해서 작도한 것이다. 이 방법은 실용적인 방법으로서 오래전부터 실시되고 있다.



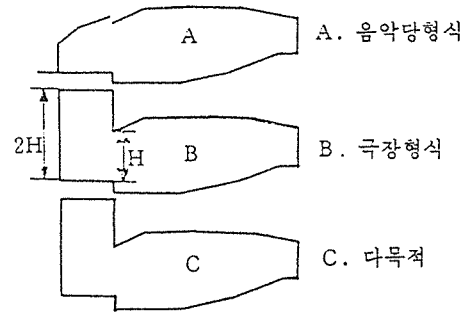
[그림 6] 기하학적 작도에 의한 반사음선도



[그림 7] 좌석곡선의 간이작도예(可視線의 경우)



[그림 8] 천장면의 확산체의 부착방법



[그림 9] 形式에 따른 무대부분

단, 이 경우 반사면의 크기는 음의 파장이상이 아니면 반사면으로서의 효과가 없다. 또한, 가능하면 2회 이상의 반사음에 대하여도 검토한다.

3. 3 各部の 設計

1) 바닥면(좌석곡선)의 결정

객석에 도달하는 직접음의 강도는 객석에서의 음질을 좌우하기 때문에 어떠한 위치에서도 직접음이 충분히 도달할 수 있도록 좌석곡선을 정한다. 일반적으로 음에 대해서 요구되는 좌석곡선과 시선에 대하여 요구되는 좌석곡선은 대체로 일치하고 있다. 시선에 관한 좌석곡선을 구하는 방법은 꽤 오래전부터 연구되어 무대의 인물과 물체가 앞사람의 머리로 인하여 시각적 장애를 받지 않도록 하기 위하여 좌석의 구배를 정하는 방법이 여러가지로 제안되고 있다. 이 중에는 簡便法이라 할 수 있는 것도 있다. [그림 7]에 이 예를 나타내고 있다. 그러나 음의 경우 聽衆面은 상당히 높은 吸音面이라고 생각할 수 있어 청중면을 따라 음파가 전달될 때에는 高音域에서 감쇄가 크므로 시선으로 구하여진 좌석곡선은 음향적으로 최저의 구배로 생각하고 될수 있는한 그보다 급한 구배로 하는 것이 좋다.

2) 天 障

천장의 형태는 이미 설명한바와 같으나 무대 부근에는 가능한한 반사성으로

하고, 후방은 잔향시간의 계산결과 차이가 없으면 어느 정도의 흡음성으로 하여도 좋으며, 가능한한 저음역을 흡음시키도록 하고, 일반적으로는 확산성을 지니도록 한다.

또 천장의 형태로서는 파형 등의 확산성으로 한 경우에 좋은 결과가 얻어지나, 이 경우는 기하학적 반사음선도의 作圖에 의한 천장의 형태를 흐뜨리지 않도록 한다.

3) 무대 주위

무대는 음원이 있는 장소로서 무대 전체를 음원이라고 생각하는 편이 좋다. 따라서 무대는 가능한한 반사성으로 하여 객석에 충분히 음이 전달될 수 있도록 확산체를 배치한다. 그러나 음악연주자는 자기의 음, 혹은 다른 연주자의 음을 들으면서 연주하므로 무대상부 또는 무대 옆벽의 반사를 이용하여 어느정도 무대에도 음이 남아 있도록 하는 것이 바람직하다. 연극등을 위하여 흡음성의 막을 많이 사용하면 객석에서의 음압은 저하된다. 또 연극에 지장을 주지 않기 위하여는 무대상부에 [그림 9]와 같이 상당한 공간이 필요하므로 반사판을 설치하기가 곤란하게 된다.

이 때문에 객석에서의 음압저하는 불가피하며, 일반적으로 극장의 음향설계는 이러한면에서 어려운 점이 있으며 음악과 연극병용의 홀은

음향적으로 어중간하여 쌍방에 좋은 음향상태를 얻기 위하여는 가동반사판과 가변 흡음장치 등이 필요하게 된다. 또 무대의 前端에서 무대벽까지의 깊이는 8m 정도로 하지 않으면, 객석내에서 에코우를 발생시키는 경우가 있다. 또 잔향시간을 計算할 때에는 일반적으로 무대부분의 용적은 제외하고 무대와 객석사이의 면(프로세니엄 아취부분)에 대한 흡음률을 가정한다.

4) 側 壁

측벽은 무대로부터의 음을 반사하는 무대근처 부분, 後壁에 근접한 흡음성의 부분과 양자의 중간에 있는 중간 정도의 흡음성을 가진 부분의 3가지로 나누어진다. 측벽은 평탄하게 넓은 면적을 가진 간단한 부분이며, 또한 後部를 제외하고는 흡음성도 낮으므로, 비록 측벽이 서로 평행하지 않은 부채꼴 형태인 평면의 경우에도 확산벽으로 하는 편이 좋다. 또 객석 後部에서는 고음역의 음압이 저하하며, 따라서 전반적으로 고음역은 흡음과다가 되기 쉬우므로, 측벽에서는 저음역을 흡수하고 고음역을 반사하는 유공판과 슬릿(Slit) 또는 판진동 등에 의한 공명형의 흡음벽으로 하는 것이 좋다. 물론, 그 흡음성은 다음에 서술할 잔향시간의 계산결과에 의하여 결정하여야 한다.

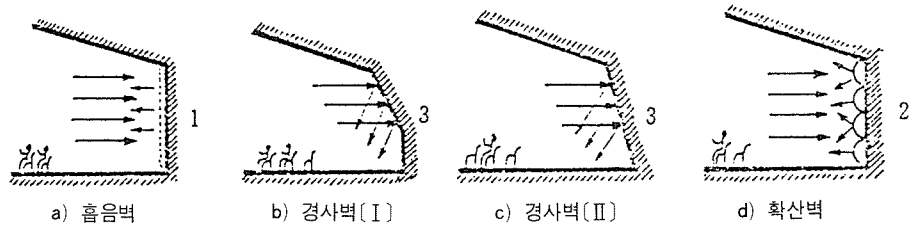
5) 後壁

후벽은 무대의 반대편에 있어 에코우 발생의 원인이 되기 쉬우므로 가능하면 고도의 흡음성으로 하고, 잔향시간의 계산결과 흡음성으로 하는 것이 불가능한 경우는, 그림10과 같이 경사벽으로 하든가 확산벽으로 하여 에코우가 발생하지 않도록 한다.

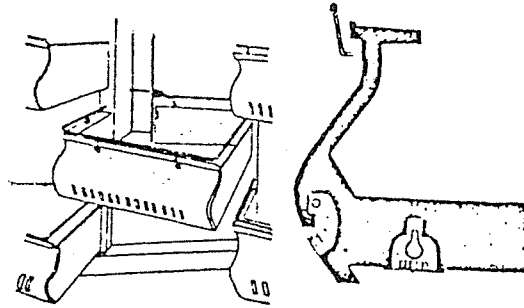
또 전체의 형태로서 凹곡면은 피하도록 한다. 이는 무대측이 반사성 재료이고 후벽을 凹곡면으로 할 경우 일반적으로 曲率의 중심이 무대보다 훨씬 후방으로 가게 되어 예상하지 못한 플러티에코우(多重反響)가 발생할 염려가 있기 때문이다.

6) 발코니

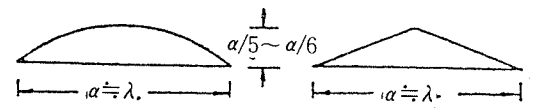
발코니는 수용인원을 증가시키는 장점이 있으나 음향적으로 그다지 바람직하지 않으며, 2층 객석 후방에서는 시각적으로도 바람직하지 않다. 또 2층객석의 아랫부분은 음향적으로는 조건이 가장 불량한 장소로 되기 쉽다. 따라서 1층 관람석 하부천정은 반사성으로 하여 음압이 저하되지 않도록 하며 이 부분에서는 가능한 한 돌출부를 짧게 하는 것이 좋다. 보통 발코니 하부는 홀 전체로부터 분리하여 개구부에서 흡음률을 가정하여 홀 전체의 잔향시간을 계산하거나 이 부분만 별개로 잔향시간 계산을 한다. 발코니 하부의 후벽부분의 처리도 앞에서 설명한 후벽에 준하여 실시한다.



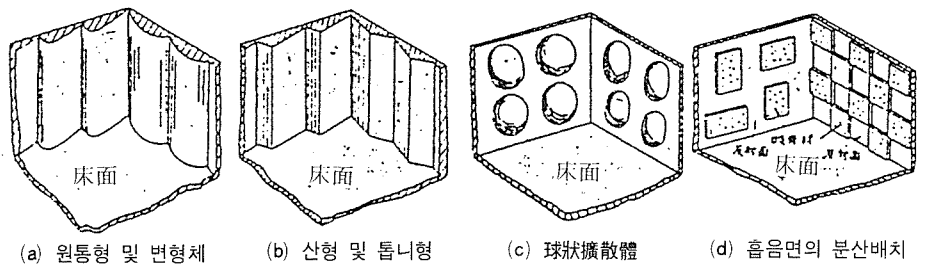
(그림10) 後壁의 처리



(그림11) 로열페스티벌 홀(Royal Festival Hall)의 박스(Box)席



(그림12) 확산체의 크기

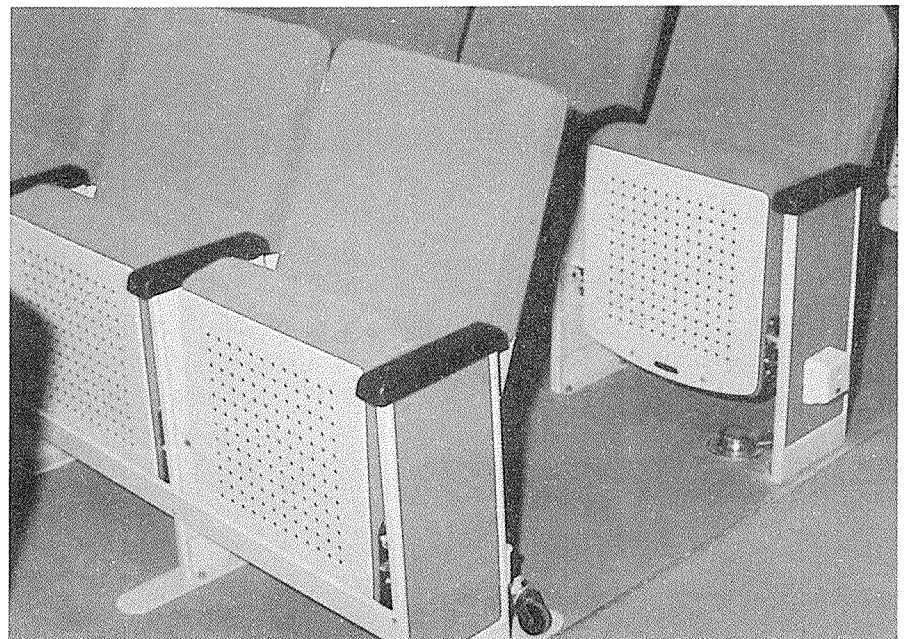


(그림13) 擴散體의 종류와 그 배치

7) 擴散體 効果와 配置

확산체는 고유 진동수의 분산과 에코우 방지 등의 목적으로 서로 평행한 2개의 벽면, 흡음성이 낮은 큰 벽면등에 사용되며 무대주변, 측벽, 천장, 후벽과 그밖의 모든면에 적당히 배치하는 것이 좋다. 그러나 너무 음을 확산시키면 오디토리움의 객석내에서 음의 방향감이 없어지게 되므로 확산면, 흡음면, 반사면과 각각의 배치에 충분히 주의하여야 한다. 확산체의 형태와 크기는 원통형, 山형, 톱니형, 球형등 여러가지가 있으며 흡음체의 작은 조각을 뿌려서 붙이는 방식도 있다. 또는 벽면에 조각을 하여 설치하기도 하며, Box席(캐노피)을 튀어 나오게 하는 경우도 있다.

경우에 따라서는 매달이 형태의 공간



(그림14) 흡음재 위 유공판으로 마감한 객석의자

확산체를 설치하는 경우도 있다. 크기는 [그림 12]와 같이 확산체의 기본크기를 확산하는 최저주파수의 파장정도로 하고 그 높이는 기본크기의 1/5~1/6정도로 한다. [그림 13]은 확산체의 종류와 배치 예를 나타낸다.

8) 의 자

객석용 의자는 오디토리움의 음향상태에 대단히 영향을 미친다. 의자가 목재로서 흡음성이 낮으면 청중의 증감에 의하여 室의 잔향시간이 변화하여 모처럼 잔향시간을 계산했다 하더라도 그다지 의미가 없어져 버린다. 의자를 사람의 흡음력에 맞추어서 설계하면, 실내의 잔향시간은 사람수에 따라 변화하지 않게 된다.

사람이 앉지않은 상태에서 의자의 座席이 세워져 있을때 좌석의 밑판에 유공판을 설치하고 가운데에 흡음재를 넣어 사람의 흡음력에 맞추는 것이 보통 실시되고 있는 방법이다. [그림 14참조] 두꺼운 천으로 감싸은 의자는 흡음성이 있으나, 레자로 감싸은 의자는 흡음력이 작으므로 주의하지 않으면 안된다.

이상에서 형태 및 기타 各部의 설계법에 관하여 서술하였으나 형태에 관하여는 기하광학적 작도법에 의하여 그 적부를 검토하지만 리플탱크 (Ripple Tank) 등의 2차원적인 모형실험이나 3차원의 모형실험 등을 하는 경우도 있다.

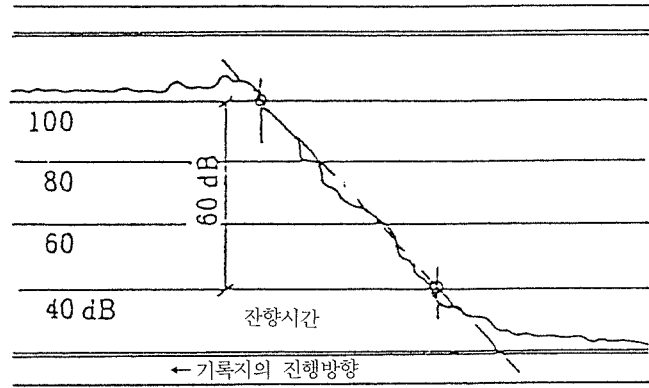
4. 殘響設計

건물 내외의 소음을 충분히 고려하여 음향적으로 양호한 오디토리움의 형태가 결정되면 잔향시간을 계산하고 흡음재료의 배치를 고려하여 음향설계를 완료한다.

1) 殘響時間

극장에서 음악이 아름답게 들리는 것은, 악기에서 나온음이 벽에 몇번씩이나 반사하여 연주가 끝난후에도 실내에 음이 남아있기 때문이다. 이와같이 음원에서 발성이 중지된 후에도 음이 실내에 남는 현상을 잔향

(Reverberation)이라 하고, 그 정도를 나타내기 위하여 잔향시간 (Reverberation Time)을 사용한다. 잔향시간이란, 실내의 음원으로부터



[그림 15] 잔향시간의 정의

소리가 끝난후, 실내에 음의 에너지 밀도가 그 백만분의 일이 될때까지의 시간, 즉 실내의 평균 에너지 밀도가 초기치보다 60dB 감소하는데 소요된 시간을 말한다. 이것은 실의 용적과 벽면의 흡음력에 따라 결정되며 실험상태와는 관계가 없다. 또한 주파수에 따라 그 값이 변화하고, 일반적으로 500Hz를 기준으로 한다. 실의 사용목적 및 용적에 맞는 적당한 크기의 잔향시간을 최적잔향시간 또는 설계목표 잔향시간이라고 하며 용도에 따른 최적잔향시간과 실용적과의 관계는 Knudsen-Harris, Beranek, Ingerslev Brüel 등에 의해 여러가지로 제안되고 있다.

2) 殘響設計의 順序

- ① 설계도로부터 오디토리움의 표면적과 室容積을 구한다.
단, 이때에 무대 부분은 별도로 계산하며, 무대와 객석부 사이의 경계면, 즉 프로세니움부분의 면적을 객석에서 본 무대의 면적으로 한다.
- ② 용적 V를 정원수 N으로 나누어 V/N이 [그림 2]에서 구하여진 값에 비례하여 타당한 것인지 검토한다.
- ③ [그림 16]은 500Hz에서 各室容積과

사용목적에 따라 결정되는 최적잔향시간을 나타낸다. 이것을 사용하여 이미 구한 용적V와 주어진 사용목적으로부터 최적잔향시간 T_0 를 구한다.

또 최적잔향시간의 주파수 특성을 구하기 위하여 [그림 16]에서 500Hz에서의 T_0 를 1로 한 잔향시간 비율 (또는 殘響時係數)을 주파수마다 구하여 이것에 T_0 를 곱하여 구한다.

[그림 17]에는 최적잔향시간의 주파수 특성은 500Hz 이상에서는 평탄하며, 500Hz 이하에서는 긴 것과 평탄한 것과의 폭을 갖고있다. 이것은 음악을 주로하는 경우는 저음역을 길게하고 강연등과 같이 회화를 주로 할 때는 평균적인 특성을 갖도록 구별하고 있는 것이다. 학교의 강당과 같이 다목적인 경우는 500Hz 이하에서 중간값을 취하면 된다.

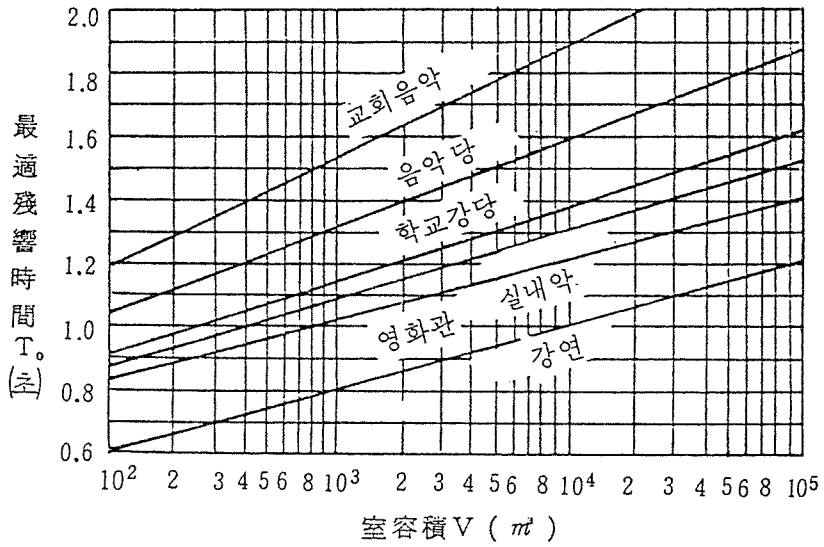
- ④ 최적 잔향시간에 필요한 흡음력 최적잔향시간을 얻는데 필요한 흡음력은 Eyring의 式에서 평균 흡음률을 구하고 이것에 표면적 S를 곱하여 구한다.
Eyring의 式은 다음과 같다.

$$T = \frac{0.161\bar{V}}{-2.3S \log_{10}(1-\bar{\alpha})} \dots\dots(2)$$

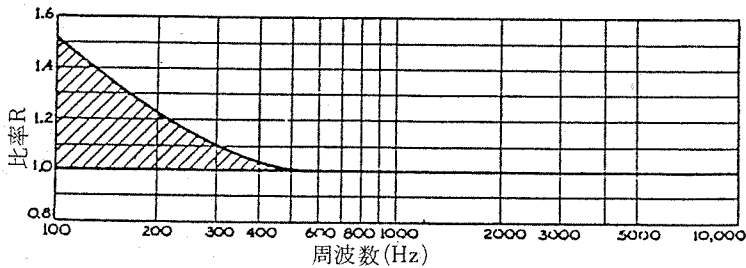
단, S = 실내표면적 = 실내 각 마감면의 합 [m^2] ($S = \sum S_i = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_i$)
V = 실내 전용적 (무대부분 제외) [m^3]
 $\bar{\alpha}$ = 평균 흡음률

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum S_i \alpha_i + \sum a_j}{\sum S_i} = \frac{1}{S} [(S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + \dots + S_i \alpha_i) + (a_1 + a_2 + \dots + a_j)] \dots\dots(3)$$

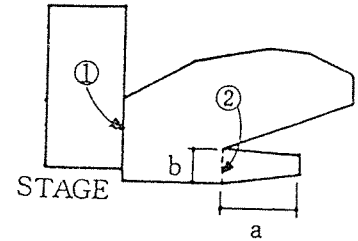
α_i = 면적 S_i 인 마감면의 흡음률
 a_j = 실내在室者, 의자등의 흡음력 (m^2)



(그림16) 500Hz 음에 대한 최적잔향시간과 실용적



(그림17) 최적잔향시간의 주파수특성



① 무대개구부 ② 발코니하부 개구부
(그림18) 무대 및 발코니하부 개구부

〈표 2〉 흡음률·흡음력 일람표

No.	場所 材料	면적 S_i, m^2	125Hz		250Hz		500Hz		1000Hz		2000Hz		4000Hz	
			a	S_a	a	S_a	a	S_a	a	S_a	a	S_a	a	S_a
1		□	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2		□	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3		□	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
計		$\sum S_i$	$\sum S_a$		$\sum S_a$		$\sum S_a$		$\sum S_a$		$\sum S_a$		$\sum S_a$	

〈표 3〉 흡음력·평균흡음률 일람표

청 중 (%)	125Hz		250Hz		500Hz		1000Hz		2000Hz		4000Hz	
	$S_a + N_a$	$\bar{\alpha}$	$S_a + N_a$	$\bar{\alpha}$	$S_a + N_a$	$\bar{\alpha}$	$S_a + N_a$	$\bar{\alpha}$	$S_a + N_a$	$\bar{\alpha}$	$S_a + N_a$	$\bar{\alpha}$
0												
66												
100												

〈표 4〉 무대 개구부의 흡음률

f (주파수)	125	500	2000
α	0.30	0.40	0.50

〈표 5〉 발코니하부 개구부의 흡음률

a/b	f (주파수)		
	125	500	2000
$2 \frac{1}{2}$	0.30	0.50	0.60
3	0.40	0.65	0.50

최적 잔향시간 T_0 와 S 및 V 를
(2)式에 대입하여 구한 \bar{a} 와 S 의
곱을 A 로서 나타내면 다음과 같다.

$$A = S\bar{a}$$

단, A 는 벽면만으로서 a_j 를
포함하지 않는 것이다.

- ⑤ 의자 및 청중의 흡음력
수용정원을 N 으로 하면 滿員인
때의 청중수는 의자의 수와 일치한다.
 a_1 및 a_2 를 각각 청중 1인 및 의자
1개당의 흡음력으로 하고, 또
청중이 의자에 앉았을 때는 의자의
흡음력은 청중의 흡음력으로 바꾸어
생각한다.
따라서 청중의 변화에 따라 청중과
의자의 흡음력은 <표 1> 과 같이
변화한다.

<표 1> 청중과 의자의 흡음력

	청중의 흡음력	의자의 흡음력
청중 0%	0	Na_2
청중 66%	$0.66Na_1$	$0.34Na_2$
청중 100%	Na_1	0

N; 좌석수
 a_1 ; 청중의 흡음력
 a_2 ; 의자의 흡음력

즉, 청중과 의자에 의한 흡음력은
<표 1> 의 흡음력의 합으로 된다.
이 합을 Na 로 나타내면,
 $\sum a_i = Na$ 로 된다.

- ⑥ 벽면에 필요한 흡음력
최적잔향시간 T_0 를 구하기 위하여
벽면에 필요한 흡음력은 다음과 같이
나타내어진다.

$$\left[\begin{array}{l} \text{최적 잔향시간에} \\ \text{필요한 흡음력} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{청중 66\%인 때의} \\ \text{흡음력} \end{array} \right] \\ = \text{벽면에 필요한 흡음력}$$

따라서 최적잔향시간을 구하기
위하여 벽면에 필요한 재료의 평균
흡음률은 다음과 같다.

$$\left[\begin{array}{l} \text{벽면에 필요한} \\ \text{평균 흡음률} \end{array} \right] = \frac{[\text{벽면에 필요한 흡음력}]}{[\text{전표면적}]}$$

- ⑦ 사용하는 흡음재료의 흡음률
위와같이 벽면에 필요한 평균
흡음률이 구해졌으나 이것은 바닥과
기둥, 혹은 반사면등의 경질
마감재료의 흡음률도 포함되어 있으며,

$$[\text{흡음재료의 흡음률}] = \frac{[\text{벽면에 필요한 흡음력}] - [\text{고정된 흡음력}]}{[\text{전 표면적}] - [\text{고정재료의 면적}]}$$

이들 재료의 흡음률은 대체로
일정하고 매우 작은 값이므로,
면적에 다소의 변동이 있어도 흡음력
자체로서 큰 변화는 없다.
따라서 실내마감의 면에서 변화하지
않는 고정된 재료의 고정된
흡음력이라고 할 수 있다. 이 때문에
잔향시간을 최적잔향시간으로
근사시키기 위하여 여러가지로
변화시키는 것이 가능한 흡음재료의
흡음률은 위와 같이 구할 수 있다.

- ⑧ 흡음재료의 결정과 계산
이 단계까지 계산이 진행된다면 꽤
구체적으로 사용재료의 흡음률을
알게 된다. 이 흡음률과 재료
면적으로부터 사용재료와 그
설치장소를 고려하여 <표 2> 와 같이
계산한다. 물론 <표 2> 의 계산은
실내의 전 마감면에 관한 것으로
 $\sum Si = S$ 로 된다.

<표 2> 에서 벽면에 의한 전 흡음력이
구해지므로 이것에 <표 1> 의
 Na 를 더하여 양자의 합을 전표면적
S 로 나누어 \bar{a} 를 구한다.
이 계산은 <표 3> 을 사용하여 할 수
있다.

- ⑨ 잔향시간의 계산
<표 3> 에서 구한 \bar{a} 에 의하여
Eyring 의 式으로 잔향시간을
계산한다. 계산결과를 최적잔향시간과
비교하여 차가 클 때는 일치하도록
재료 혹은 재료의 면적을 변화시켜
<표 2> 이하의 계산을 반복한다.
또 室의 용적이 클 경우는 공기에
의한 고음역 (200Hz 이상) 의 흡수를
검토한다.

$$T = \frac{0.161V}{-2.3S \log_{10}(1 - \bar{a}) + 4mv} \dots (4)$$

(4)식은 Kundsén 의 잔향식으로
(2)式과 다른점은 분모에 4mV 가
있는 것이며, m은 공기에 의한
1m 당 감쇄계수로 실내의
상대습도를 알아서 <그림 3> 으로
부터 구할 수 있다.

- ⑩ 흡음재료의 배치 및 기타

흡음재료는 앞에 서술한 바와같이
무대주변에는 반사성의 것을, 後壁
부근에는 흡음성의 재료를 배치하도록
한다. 무대 개구부 및 발코니하부
개구부의 흡음률은 <그림 18> 에
나타낸 위치에서 <표 4> 와 <표 5> 의
값을 사용한다. 중간 주파수는
직선적으로 보간법에 의하여 구한다.
설계 도중에서 다른 부분, 예를 들면
설비관계 및 구조관계와 긴밀히
협조하여야 하는 것은 물론이지만 특히
방송설비를 요하는 경우에는 전기관계의
기술자와 충분히 협의하여야 한다.
공사 도중에 음향설계 공사가 진행되고
있는지 어떤지, 또 음향설계에 큰
오류는 없는지를 검토하기 위하여
음향실험을 행하는 경우가 있으므로,
현장 관계자와도 충분히 연락할 필요가
있다.

5. 맺 음

오디토리움의 음향설계는, 지금까지
서술한 바와같은 방법이나 순서로
행하여진다. 일반적으로 음향설계는
잔향시간의 계산만으로 완료된다고
오해하기 쉬우나 기본계획의 초기부터
종합적인 설계를 하여야 한다는 것을
강조하고 싶다.
음향설계는 매우 전문화된 기술분야에
속하므로 전문적인 지식과 경험을
요하는 것이다. 그러나 여기에 서술한
사항을 충실히 지키면서 꾸준히 순서에
따라 실수없이 진행하여 가면, 특히
엄밀한 음향특성이 요구되는 경우
이외에는 비교적 만족할 만한 결과를
얻을 수 있으리라 여겨진다. 일반적으로
실시되지 않는 변칙적인 방식의 채용은
피하도록 하며 음향적으로 그 효과가
불명확한 형태와 재료를 선택하고
싶을 때는 전문가와 상의하여 신중하게
검토하여야 한다.