

## Histoty of Acoustic Design

건축음향 디자인의 역사의 기원은 아마도 훨씬 더 이전이었겠지만, 고대 그리스와 로마의 원형극장 건설에서부터가 실제적인 기원이라고 할 수 있다. 그리스와 로마인들은 군중들 앞에서 웅변을 하거나 연극을 할 수 있는 장소가 필요했고, 때때로 2000명이상의 군중들은 한명의 웅변가나 소수의 배우가 내는 소리를 명확히 들을 수 있어야 했다.



Figure 1 - A Roman amphitheatre at Palmyra, Syria, dating from the 2nd century AD.

인간이 내는 목소리의 가청도에는 한계가 있다. 아무리 큰 목소리일지라도 가청한계가 50-100m까지임에 반하여, 연설에서의 복잡한 문장들은 알아듣기가 힘들며, 대부분의 사람들은 단지 몇분 동안만 가청레벨을 유지할 수 있다. 따라서, 원형극장은 무대위의 배우들의 대사를 자연적으로 강화하고 증폭시키는 역할을 하며, 주위의 청중들 전체로 소리를 분배한다. 이러한 점은 건축구조물이 음향전달의 역할을 할 수 있음을 보여준다.

19세기말까지도 강당의 음향설계는 경험상의 데이터와 시행착오를 거치면서 이루어졌다. 1895년에 완공된 강당인 Fogg Art Museum은 심각한 음향상의 문제점들이 발견되었다. 하버드의 젊은 물리학자인 Wallace C. Sabin이 이 문제를 해결하기 위해서 고용되었다. 강당을 검사하는 중에, Sabin은 가장 큰 문제는 강당의 실내벽면들 사이에서 음의 과도한 반사로 인해서 말을 알아들을 수 없다는 점이라는 것이라고 생각했다. Sabin은 극장주의에 쿠션을 넣어서 이점을 테스트해본 결과 즉각적인 개선이 이루어지는 것을 알았다.

Sabin의 프로젝트는 음향적으로 우수한 실의 근본적인 변수를 결정하는 가장 중요한 과학적인 시도로 여겨진다.

이후에, 음향설계는 물리학자와 건축공학자들 사이의 실질적인 연구분야가 되었다. 음향설계는 전화통신이나 ‘강연과 명료도에 관한 정신생리학적 연구’와 같은 관련분야의 발전에서 상당한 이득을 보았으며, 음향적으로 디자인이 잘된 콘서트홀과 강당에서 청중들의 요구를 충족시키기 위한 고성능의 원음 재생시스템의 개발 같은 분야에서 발전해왔다. 이러한 결과로, 음향설계에는 연구를 위한 방대한 분야의 서적과 저널이 있으며, 모든 분야에 대한 방대한 양의 정보가 있다. 그러나 건축 설계자에게는 어떤 공간의 음의 특징에 영향을 줄 수 있는 디자인적 결정권이 거의 없다. 따라서, 음향설계분야의 실직적인 지식이 필수적

이다.



Figure 2 - The CUBE Concert Hall of Shiroishi City, 1997.

## Sound Behaviour in Rooms

닫힌 공간안에 있는 음원을 생각해 보면, 소리가 발생했을 때, 음파는 실의 경계면에 부딪칠 때 까지 음원으로부터 전달되며, 일반적으로, 음파의 에너지중 일부는 흡수되고, 일부는 전달되고 나머지는 실 주위로 반사된다. 이런 현상은 실의 모든 표면에서 발생하고, 육조에서 물의 2차원적인 파동과 매우 유사한 방식으로, 3차원적인 압력 파가 실안에서 반사되는 복잡한 상태가 된다.

실내에서 어떤 특별한 점에 도달하는 음은 두 가지 부분으로 생각할 수 있다. 첫째로는 음이 음원으로부터 수음점까지 직접 도달하는 것인데, 이런 작용을 직접음부로 하고, 실의 형태나 재료는 영향을 미치지 않으나, 음원과 청취자사이의 거리와 영향이 있다.

직접음이 도달한 후에, 실의 표면으로부터 반사음이 도달한다. 주어진 실의 형상에서, 반사음중 일부는 직접음 도달후 거의 바로 도달하게 되고, 반사되는 표면이 음원과 청취자로부터 떨어져 있을 경우 상당한 지연이 있을 수 있다. 그 후에 수반되는 수많은 표면으로부터의 반사음들은 간접음부를 형성하며, 음원과 청취자와의 거리와는 무관하며, 실의 특성에 상당한 영향을 받는다.

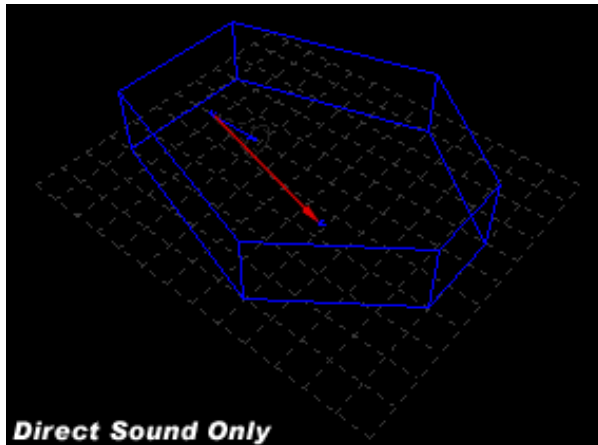


Figure 3 – The direct sound from the source and indirect reflections from surfaces within the room.

### The Growth and Decay of Sound

실내에서 음원이 음을 발생하기 시작할 때, 특정 점에서 측정된 음의 세기는 직접음의 도달에 의해 갑자기 증가하고, 연속되는 간접음에 의해 음의 세기가 계속 증가되며, 이런 작용들은 총 음레벨을 나타낸다. 결국에는 실의 표면에 흡수되는 음에너지가 음원에서 방출되는 에너지와 같아질 때 평형이 이루어진다. 이런 평형은 일반적으로 매우 빠르게 일어나는데, 그것은 대부분의 건물 재료의 흡음이 음의 세기에 비례하기 때문이다. 따라서 음의 레벨이 증가할수록, 흡음 역시 증가하게 된다.

연속 음원이 갑자기 꺼진다면, 어떤 점에서의 음의 세기는 갑자기 사라지지 않는다, 그러나 간접음이 사라지기 시작함에 따라서 음의 세기도 점차 줄어든다. 이런 현상은 직접음과 많은 반사음사이의 경로차이 때문이다. 음원이 꺼진 상태에서도, 음의 에너지 중 일부는 여전히 복잡한 반사경로에 따라서 반사되기 때문이다. 표면에 많이 반사될수록, 더 많은 에너지가 소멸되고, 반사는 점점 약해지게 된다. 이런 음의 감쇠율은 실의 형상과 흡음재의 양과 위치에 좌우된다. 흡음률이 매우 높은 곳의 음의 감쇠는 그리 오래걸리지 않는다, 반면에, 반사가 많은 실들은 음의 감쇠하는데 많은 시간이 걸리게 된다.

이런 음 에너지의 점차적인 감쇠는 잔향이라고 알려져 있으며, 음의 세기와 흡음 사이의 이런 비례적인 관계의 결과는 시간으로 표현된다. 감쇠하는 잔향부의 음압레벨(dB)이 시간에 대한 그래프로 그려진다면, 비록 정확한 형태는 음의 주파수 스펙트럼과 실의 형상과 같은 많은 요인들에 영향을 받지만, 일반적으로 직선에 가까운 잔향 곡선이 그려진다,

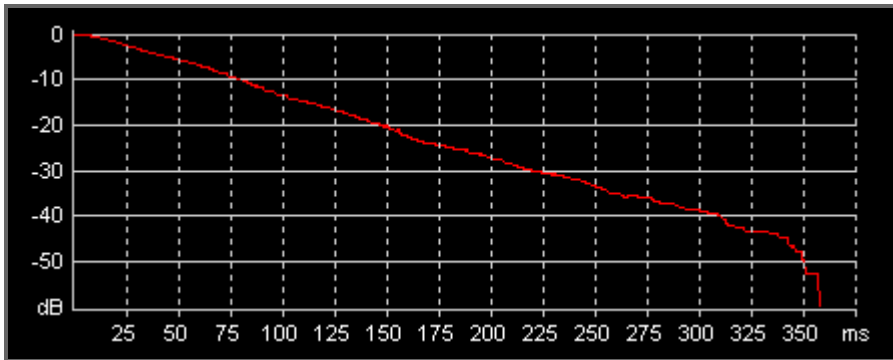


Figure 4 – Reverberant Decay of sound in a small absorbent enclosure.

### Reverberation Time

W.C. Sabine은 잔향시간에 대한 수많은 연구를 해하였으며, 강당의 크기와, 흡음재의 량과과의 관계를 실험적인 관계를 밝혀냈는데, 그것을 잔향시간(Reverberation Time. RT)라고 하였다.

Sabine의 정의에 따르면, RT는 연속음이 갑자기 꺼진 후에 60dB까지 떨어질때 까지 걸린시간을 말하며, 그 식은 다음과 같다.

$$RT = \frac{(0.161V)}{A}$$

where:  
 $V$  = the volume of the enclosure ( $m^3$ ) and  
 $A$  = the total absorption within the enclosure (sabine).

$A$  는 실의 표면적의 합에 실표면에 사용된 각 재료의 흡음률( $\alpha$ )을 곱한 값이다.

특정 물질의 흡음률은 Sabine의 의해서 처음으로 정해졌으며, 열린 창이 유효면적과 그 재료에서 흡음되는 소리의 비율을 말한다. 따라서, 완벽한 흡음재는 흡음률 1을 가지며, 1sabine의 흡음유닛은  $1m^2$ 의 열린창 면적에서 흡음할 수 있는 만큼의 흡음재를 말한다.

이런 간단한 식을 사용하면, 표면적과 실의 사용된 흡음재의 흡음률을 알면, 실의 잔향시간은 디자인 단계에서 간단한 스프레드시트를 사용하는 것으로 결정할 수 있다.

### Optimum Reverberation Times

이런 Sabine의 식은 특정 잔향시간에 대한 실의 가장 효율적인 용적을 구하는데 특히 유용할 것이다. 특정 목적에 대해서 RT의 범위를 알고 있다면, 우리는 실의 용적과 내부 표면적 사이의 관계를 결정할 수 있다. 또한 이런 특성을 통해서, 일반적인 강당의 건설 재료의 사

용을 결정할 수 있을 것이다. 분명한 것은, 만약 당신이 실내마감을 대리석으로 선택했을 경우, 적어진 흡음량에 대한 추가적인 조치가 필요할 것이다.

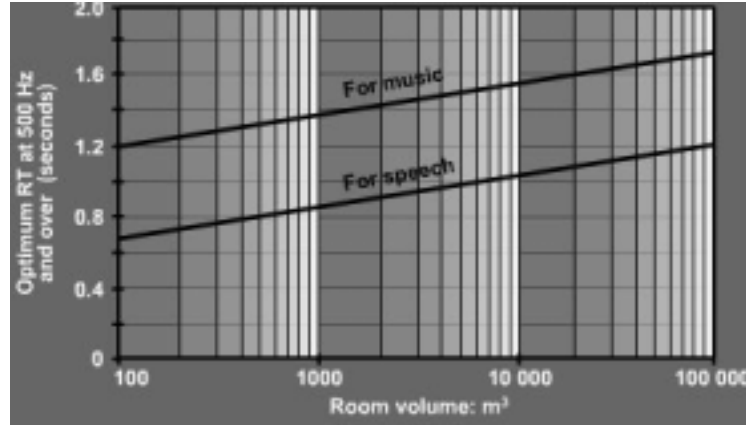


Figure 2 - An empirical relationship between room volume and the optimum reverberation time based on standard materials and field measurements.

위 그래프의 비율에 따라서, 강당안에서 청중 각자는 흡음량을 증가시킨다. 실의 용적은 한 사람에 대한 m³ 으로 표현할 수 있으며, 이 실 용적은 초기 디자인 단계에서 매우 유용한 특징이다.

### Improving the Accuracy of Sabine's Equation

Sabin의 식은 단일 흡음재를 가진 잘 반사되는 실에서 예상된 값을 잘 보여주는 식이다. Sabin은 잔향의 감쇠가 연속적으로 이루어진다고 가정하였기 때문이며, 이런 가정은 실의 표면에서 변동이 크지 않은 균질하고 확산된 음을 가정하고 있다. 실내에서 흡음량이 증가할수록 식의 의한 결과의 정확성이 떨어진다. 울림이 없는 완벽한(무향실)실에 한하여, 실 경계의 흡음율은 1.0 이되고, 잔향시간은 분명. 0.0이어야 한다. Sabin의 식은 한정된 RT값을 가진다.

반사가 적은 실에서 측정값에 잘 일치되는 잔향시간 예측식을 이끌어내기 위한 몇 가지 다른 접근방법이 있는데 그 중 하나가 Norris-Eyring 의 식으로 평균흡음율이 매우 높을 때 사용하는 식으로 점점 감소되는 음의 반사에 따른 간헐적인 감쇠를 가정하고 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$RT = \frac{(0.161V)}{-S \ln(1 - a)}$$

where:

$S$  = the total surface area (m²) and  
 $a$  = the average absorption coefficient.

이 식은 완벽한 무향실에서 0.0의 정확한 값을 보이지만, 좀더 복잡하고, 모든 표면재의 a (평균흡음률)값이 같은 실에만 유효한 식이다.

Millington-Sette equation 흡음율의 범위는 재료에 따라서 매우 범위가 넓다. 이 식은 더 효과적인 흡음률인  $a_e = \ln(1 - a_i)$  대체함으로써 가장 정확한 잔향시간의 예측이 가능하다.

$$RT = \frac{(0.161V)}{\sum -s_i \ln(1 - a_i)}$$

where  
 **$s_i$**  = the surface area of the *i* material,  
 **$A_i$**  = the actual absorption coefficient and  
 **$\ln()$**  = the natural logarithm to the base *e*.

Note: 이 식은 흡음률이 높은 재료에서 잔향시간에 예상보다 영향을 많이 미칠때 사용된다. 예를들면, 실제 흡음률이 0.63보다 클 때 유효흡음률은 이 값보다 훨씬 크다.

#### The Validity of Statistical formula

이러한 잔향시간 예측식들은 순수히 통계적인 의미를 가지며, 실의 기하학적 정보(실의 형상, 흡음재의 위치, 반사재의 사용 등)을 고려하지 않는다. 따라서 위의 예측식들은 잔향시간의 예측만이 가능하며 실내에서 다른 음향의 변칙적 특성을 예측할 수는 없다.