

THE FUNDAMENTALS

Measurable Characteristics

음향은 주로 특정 종류의 마이크로폰으로 측정되며, 그러나 이것은 음파의 한가지 양상만을 측정할 수 있다. 소리의 측정가능한 물리적 특성은 다음과 같다.

Power(Watts) - 소리의 출력

음원에서 발생하는 소리에너지를 측정하는 것으로써, 소리에너지가 지닌 기본적인 특징이다.

Pressure(Pa) - 음압

소리에 의해 발생하는 대기압의 변동치를 측정한 것이다. 음압은 (+)와 (-)사이에서 계속하여 변화하므로 음압의 평균은 최대-최소압력치(peak-to-peak measures)로써 측정하기 보다는 실효치(root-mean-square)로써 측정한다.

Intensity(W/m²) - 음의 세기

음의 전파방향에 대하여 수직인 단위면적을 통과하는 음에너지의 총량을 말한다.

불행하게도, 소리의 출력이나 음압, 음의 세기와 같은 소리의 객관적인 측정치들은 사람의 청각의 반응을 정확히 반영하지 못하므로 많이 이용되지는 못하며, 이것이 모든 음향 측정의 주된 관심 포인트가 된다.

Human Response to Sound

여러 번의 경험적 실험을 통해서 소리에 대한 청각의 반응은 자극의 절대 값이 아니고, 가청한계에 대한 실제 소리 강도의 비율에 비례한다. 가청한계는 보통사람의 귀가 들을 수 있는 가장약한 소리를 말한다. 더 나아가, Fechner's law에 의하면 이러한 상관관계는 대수¹⁾로 표현된다.

$$\text{Response} = \text{Measured Intensity} / \text{Threshold Intensity}$$

소음 수준의 측정은 일반적으로 표준 가청 한계인 1000Hz를 기준으로 한다. 보통사람의 경우, 가청한계는 음의 세기로 측정할 때 다음과 같이 정의된다.

$$I_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{W/m}^2$$

혹은 음압으로 측정할 때 다음과 같이 정의된다.

$$P_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}$$

이러한 정의들이 최소한의 가청영역인 반면에, 아래의 [표 1]에 나와 있는 수치들은 사람의

1)대수(logarithm) : 1이 아닌 양수 a와 양수N이 주어졌을때, $N=a^b$ 라는 관계를 만족시킬 수 있는 실수 b를, a를 밑으로 하는 N의 대수라 하며, $b=\log_a N$ 으로 나타낸다. 데시벨에서는 상용대수를 사용하는데, 상용대수(Common logarithm)는 10을 밑으로 하는 로그로서 $b=\log_{10}N$, $N=10^b$ 으로 나타내어진다.

귀가 견딜 수 있는 소리의 범위를 나타낸다. 가장 위쪽의 한계치는 통증한계를 나타내며, 이러한 매우 강한 소리는 귀에 손상을 주며 물리적인 피해를 일으킬 수도 있다.

표 1 - Audible range of the human ear.

Frequency	20Hz - 20,000Hz
Intensity	10E - 12 to 10W/m ²
Pressure	2E - 5 to 200 Pa

위의 표에서 보시는 바와 같이, 보통사람의 음압 인지 범위는 20 ~ 200 Pascal 사이이다. 이것은 선형으로 변하는 동적 범위(즉, 1E7 혹은 10,000,000배)를 나타낸다. 이러한 이유와 귀의 작용 방법으로 인해, 1차에는 절대적인 측정법보다는 상대적인 측정법이 편리하고, 2차에서는 대수적으로 요약하는 것이 편리하다.

Decibels

데시벨의 비율을 측정하는데 사용되는 단위는 Alexander Graham Bell의 이름을 따, bel이라 칭한다. 서로 비교하고 있는 음의 차이가 10배이면 1bel에 의해, 또한 서로 비교하고 있는 음의 차이가 100배이면 2bel에 의해 두개의 변수는 달라진다. 벨의 단위는 여전히 매우 큰 척도이므로 1/10하여, 좀더 편리한 데시벨이라는 단위를 사용한다.

위에서 주어진 표준 가청한계 값은 정확히 0데시벨과 일치한다. 실제의 평균 가청한계인 1000Hz는 4데시벨과 좀더 가깝지만, 0데시벨으로 기준을 삼는것이 좀더 편리하다.

Logarithms and Decibels

대수를 이해하지 못하고 데시벨을 이해할 수는 없다. 대수는 지수(indices)와 같은 수를 그 수로 계속 곱하는 것에 기본바탕을 두고 있다. 지수는 거듭제곱으로 불리기도 하며, 10의 3승(10³)은 10을 3번 곱하는 것(10×10×10 = 1000)과 같다. 예를 들어 1000이라는 숫자가 주어졌다고 하면, 대수에서는 특정한 숫자를 몇 번 곱해야 그 결과가 나오는 지를 알려준다. 이것은 먼저 숫자를 선택하거나, 대수의 기수(base)를 선택해야하는 것을 의미한다. 음향에서는 10을 기수로 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 수학로그에서 기수 “e” 는 자주 사용되며, 흔히 자연 대수(natural logarithm)라 부른다.

- 예) $\log_{10}1 = 0$ 따라서 $10^0 = 1$
 $\log_{10}10 = 0$ 따라서 $10^1 = 10$
 $\log_{10}100 = 0$ 따라서 $10^2 = 100$
 $\log_{10}1000 = 0$ 따라서 $10^3 = 1000$
 $\log_{10}1,000,000 = 0$ 따라서 $10^6 = 1,000,000$

Basic Relationship

로그의 성질은 다음과 같다.

$$\log(MN) = \log M + \log N$$

$$\log(M/N) = \log M - \log N$$

$$\log(1/N) = -\log N$$

$$\log(N^N) = n \log N$$

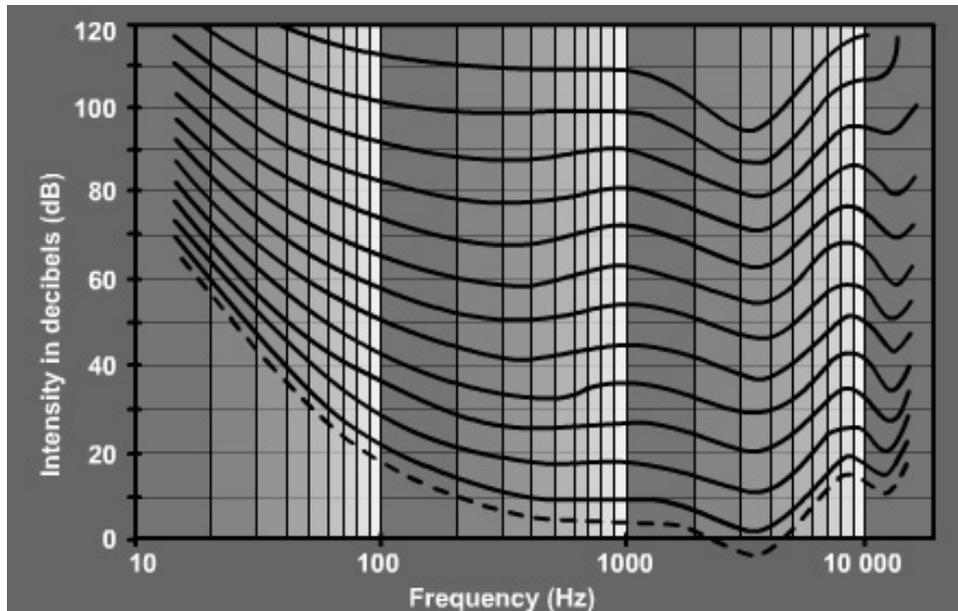
$$\log(N^{(m/n)}) = (m/n) \log N$$

$$\log_a(M) = \log_b(M) \times \log_a(b)$$

Loudness and Sound Levels

직접적으로 측정가능한 소리의 특성과 반대되어, 소리의 크기는 사람의 귀가 지각하는 소리의 강도를 나타내는 주관적인 용어이다. 이것은 직접적으로 음의 세기와 관계되지만, 결코 음의 세기와 동일시되지는 않는다. 음의 세기는 소리에 포함되어있는 특정 주파수에 대한 청각의 반응에 의해 결정되어진다. 이것은 사람의 청각 반응에 대한 소리의 등감 곡선 (equal loudness contours)에 포함되어 있는 정보에서 확인할 수 있는 것중의 하나이다.

그림 1 - Equal loudness contours showing the variation in sensitivity of the ear with both frequency and intensity.



또한, 증가하는 음의 세기에 반응하는 사람의 귀는 "10의 거듭제곱" 혹은 "대수 관계"를 반드시 고려해야한다. 이것은 음의 세기를 측정하는데 데시벨 단위를 사용하는데 대한 동기를 부여한다. 음의 크기에 대한 일반적인 "경험치"로는 소리를 두배로 크게 하기 위해서는 10

의 거듭제곱의 형태가 되어야 한다.

따라서, 음의 세기 혹은 음압조차도 직접적인 물리적 측정법은 가청한계 값으로 재구성되지 않는다면 감각적 조건으로써는 무의미하다. 데시벨은 상대적인 측정이고, 음압레벨과 세기 레벨 두가지 모두의 양을 측정하기 위해 사용되므로, 음압이나 음의 세기는 그 값들을 가청한계의 기준값과 비교함으로써 데시벨로 환산할 수 있다.. 소리 레벨은 감각적 조건으로써는 의미가 높다.

소리의 출력은 음원의 절대치로써 나타내지만, 소리의 출력 레벨은 기준출력과 상대적인 대소 관계로 나타낸다. 따라서 소리의 출력 레벨은 다음과 같이 구한다.

$$SWL = 10 \log_{10} (W / W_{ref}) \text{ dB}$$

여기에서 $W_{ref} = 1E-12W/m^2$ 이다.

이러한 상관관계를 실험해보기 위해 다음의 식을 이용할 수 있다.

$$\boxed{} = 10\log_{10}(\boxed{} W/m^2 / 1E-12)dB$$

ex) 120 - 1 , 130 - 10 , 140 - 100, 150 - 1000

유사하게, 음의 세기도 절대치로써 나타내지만, 음의 세기 레벨은 기준세기와의 상대적인 대소 관계로 나타낸다.

$$SIL = 10 \log_{10} (I / I_{ref}) \text{ dB}$$

여기에서 $I_{ref} = 1E-12W/m^2$ 이다.

평면파에서, 음장에서의 음의 세기는 음압변동(P^2)의 분산에 비례한다. 실제적인 상관관계는 $I = P^2/(poc)$ 이다. 따라서, 구면파는 음장의 아주 먼 곳에서는 평면파와 비슷해지므로, 음압 레벨은 다음과 같이 된다.

$$SPL = 10 \log_{10} (P^2 / P_{ref}^2) \text{ dB}$$

$$SPL = 20 \log_{10} (P / P_{ref}) \text{ dB}$$

여기에서 $P_{ref} = 2E-5Pa$ 이다.

이러한 상관관계를 실험해보기 위해 다음의 식을 이용할 수 있다.

$$\square = 20\log_{10}(\square \text{ Pa} / 2E-5)\text{dB}$$

ex) 93.979 - 1, 113.979 - 10, 133.979 - 100, 153.979 - 1000

물리적으로 음의 세기보다는 음압을 측정하는 것이 좀더 용이함으로, 음의 세기 레벨을 음압 레벨로 종종 표현하기도 한다. $I = P^2/(\rho c)$ 이므로, 로그를 이용하여 기준값을 치환하면 다음과 같이 정리된다.

$$\text{SIL} = \text{SPL} + 10 \log_{10} \left(\frac{(2E-5)^2}{(\rho c) * 1E-12} \right) \text{ dB}$$

밀도요소를 고려하게 되면, 마지막 식은 압력과 온도에 크게 영향을 받는다. 20℃와 1atm에서 위의 값은 0.1dB 정도로 계산된다(ρc 의 값이 410rayls 정도일때). 따라서 이와같은 경우 $\text{SIL} \sim \text{SPL}$ 이다.

Acoustic Power(음향 파워)

음향 파워의 개념은 스피커 설계자를 제외하고는 대부분의 사람들이 음압을 먼저 고려하므로, 일반적으로 고려하는 사항은 아니다. 간단히 말하면, 음압은 소리의 출력의 결과이다. 소리의 출력이 먼저이고, 그 영향으로 음압이 발생한다. 스피커 설계의 목표는 입력파워와 신호의 굴절을 최소로 하면서, 기구로부터 최대의 음향 파워를 이끌어 내는 것이다. 재래식 스피커들 중 대부분은 100 electrical watts로 1 acoustical watt를 생산하여, 거의 효율이 1% 정도였다. 원뿔모양의 변환기(transducer)는 3%정도의 효율을 지녔으며, 첨단 압전기장비(advanced piezoelectric devices)는 20-25%의 효율을 제공한다.

Spatial Directivity(공간 지향성²⁾)

최고의 음향 파워가 달성되면, 그 다음의 관심사는 음의 분배로 넘어간다. 음원으로부터의 모든 출력이 좁은 지역으로 집중될 수 있다면, 높은 음압이 발생하며 즉, 커다란 소리가 생성되는 것이다. 낮은 주파수에서 소리는 전방향성을 지니기 때문에 소리가 특정 지역으로 지향성을 지니는 것은 불가능하다. 그러나 높은 주파수의 소리는 강한 지향성을 지니며, 따라서 커다란 휴대용 확성기, 트럼펫, 호른 스피커의 모양은 특정방향으로 소리를 유도한다.

음향기구의 지향성은 "Q"라는 용어를 가지고 설명할 수 있는데, 이것은 기본적으로 더 작은 부분으로 제공되는 소리 에너지를 제한하는 능력을 일컫는다. 따라서 Q값은 전기적 변화기를 지니고 있지 않은 스피커와 그것을 둘러싸고 있는 재료의 변수가 된다. 변수 Q의 1은 음원이 점음원임을 뜻하며, 모든 방향에 음향에너지를 구의 형태로 분배한다. 변수 Q의 2는 반구형의 형태로 분배하는 것을 뜻한다. 음향기구에 의해 영향을 받는 공간에서 계수 2에 의해 그 공간의 1/2위쪽으로 향하는 똑같은 음향 에너지는 음의 세기와 음압을 증가시킨다. 이러한 현상은 음 에너지를 벽이나 천장보다는 관객에게로 집중시킴으로써 건축환경에서 매우 유용하게 사용된다.

2) 방향성(directionality) : 방향에 따라서 음의 감도에 변화가 있는 것. 주파수의 높낮이에 의한 변화가 크다.

Q값을 잘 알려진 지향 지수(Directivity Index³⁾)를 이용하여 dB로 변환하는 것이 일반적이다. 여기에는 다음과 같은 공식이 이용된다.

$$DI = 10 \log(Q)$$

Spectral Content

다른 음원으로부터의 출력은 매우 광범위하게 변한다. 상이한 음원은 매우 다양한 스펙트럼을 지닌 소리를 생산한다. 제초기에서 격렬한 가스가 새어 나올 때의 소음은 - 음색은 틀리지만 - 제초기 자체에서 나오는 소음과 거의 비슷한 출력이다. 나중에 소음레벨을 결정할 때 이러한 점을 어떻게 고려하는가를 보여줄 것이다.

Typical Sound Power Levels

*참고 : IAC Noise Control Reference Handbook, 1989 Edition by Martin Hirschorn.

표 2 - Sound power of a range of example sources.

Source	Sound Power in Watts	dB(Re 10E -12 Watts)
Saturn rocket	100,000,000	200
After burning jet engine	100,000	170
Centrifugal fan at 500,000 cfm (849,000 cu m/hr)	100	140
75 piece orchestra Vane axial fan at 100,000 cfm (169,900 cu m/hr)	10	120
Large chipping hammer	1	120
Blaring radio Centrifugal fan at 13,000 cfm (22,087 cu m/hr)	0.1	110
Auto on highway	0.01	100

3) 지향 지수(Directivity Index) : 지향 계수를 레벨 표시한 지표. 지향 계수의 값이 상용 대수를 10배한 양. 단위는 dB

Food blenders-upper range	0.001	90
Dishwashers-upper range	0.0001	80
Voice-conversational level	0.00001	70
Quiet-Duct silencer, self-noise at + 1000 fpm	0.00000001	40
Voice-very soft whisper	0.000000001	30
Lowest audible sound for persons with excellent hearing	0.000000000001	0