

소음과학과 그 이해

이 수 갑

A Brief Review of Noise Science

Soogap Lee



● 이수갑(서울대 항공우주공학과)
● 1960년생
● 유체, 소음 공학을 전공하였으며,
현재 공력 및 연소 소음, 헬리콥터
등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

소음 공해의 문제는 수세기에 걸쳐 지속되어왔고, 현대 사회는 인간과 기계에 의한 소음으로 조용하고 평온한 삶을 영위하기가 점점 더 힘들어지고 있다.

소음은 일반적으로 원하지 않는 소리라고 정의된다. '원하지 않는'이란 말이 소음(noise)을 물리화적인 소리(sound)와 구별하는 것이다. 아름다운 음악도 어떤이에게는 청각적 혼돈 상태로 느껴질 수 있듯이 어떠한 주어진 소리를 '소음'이라 서술하는 것에는 심리 음향학(psychoacoustics)적인 요소가 강하므로 소음에 대한 연구는 그저 단순한 과학이 아니지만 그럼에도 불구하고 이는 음향학에 단단히 기초하고 있고 그 전문가들을 이용한다. 따라서 음향학의 기초적인 이론과 심리음향학에 대하여 간단히 살펴보고 소음의 영향과 소음 환경을 이해한 뒤, 소음의 제어에 대한 예를 보는 것으로 소음 과학에 대한 개략적인 이해를 돕고자 하는 것이 이 글의 목적이다.

2. 음향학적 기초 이론

음파의 생성은 음원으로부터 매질을 통한 에너지의 전달이 필요하며 또한 역으로 청각적 경험은 음파로부터 귀로의 에너지 전달이 필요하다. 귀는 가장 뛰어난 오디오 시스템으로 리시버와 증폭기, 그리고 좁은 밴드의 파장 분석기 등과 과부하에 대한 보호 장치, 그리고 주위 압력 변화에 대한 조절기 등으로 이루어져 있다. 귀에 들어간 음 에너지는 연속적인 자극과 반응의 복잡한 시스템을 거쳐 속귀(내이)에 유체의 운동을 야기시키고 이것이 그곳에 위치한 솜털들을 자극하게 된다. 솜털들은 실질적인 계측변환기로 자극을 받으면 청각 신경을 활성화시키는 전기적 신호를 만들어낸다. 이 청각 신경은 뇌의 청각 중추를 자극하게 된다.

평균적인 귀의 민감도는 매우 뛰어나다. 귀는 주위 압력의 10^{-8} 퍼센트 정도에 해당하는 압력 섭동에도 반응할 수 있는데 이는 1평방 센티미터당 1와트의 10^{-16} 의 강도에 해당한다. 이에 해당되는 고막의 변형은

10^{-8} 밀리미터이고 이는 수소 원자 크기보다 몇 배 정도 작은 것이다. 그 민감도와는 별도로 귀는 아주 큰 강도 영역에 적용될 수 있다. 역에 들어오고 있는 지하철에 의한 소음은 약 1평방 센티당 10^{-4} 와트 정도로 이는 한계점인 10^{-16} 보다 몇 조배나 더 큰 값이지만 귀는 이를 간단히 다룰 수 있다. 귀는 1평방 센티당 1와트 정도의 음향 출력 레벨까지도 견딜 수 있다. 이렇게 엄청나게 크거나 아주 작은 출력에 반응이 가능한 귀의 능력은 귀가 베버-페크너의 정신적 감각법칙 (the Weber-Fechner psychological law of sensation)을 잘 따르는 데서 기인한다.

단약 자극 S_1 가 감각 L_1 을 만들었다면 감각에 있어서 작은 변화인 L_2 은 자극의 작은 부분적 변화인 S_2/S_1 에 비례한다. 다시 말해 S_1 에서 S_2 까지의 변화에서 감각의 변화인 $L_1 - L_2$ 는 로그식인 $L_1 - L_2 = \log(S_1/S_2)$ 를 따르게 된다. 음향학적 응용에서는 $L_1 - L_2$ 를 데시벨이라 부르는 단위로 표시하는 것이 편리한데 이는 위의 로그 항에 10을 곱할 필요가 있다.

$$L_1 - L_2 (\text{데시벨}) = 10 \log(S_1/S_2) \quad (1)$$

이것은 소리나 소음 레벨을 나타낼 때 널리 쓰이는 공식이다. 특정한 주파수를 다른 주파수보다 더 잘 들을 수 있는 귀의 능력과 관계해서 또 다른 중요한 관점이 있다. 인간의 청력은 일반적으로 20 Hz에서 20,000 Hz 까지 이른다. 그러나 그 최대 민감점은 2,000~4,000 Hz 근방에 존재한다. 그러므로 4,000 Hz 근방에 중심이 있는 70-dB의 소리는 125 Hz 근방에 중심이 있는 70-dB의 소리보다 더 크게 들린다. 소음-레벨 수준에 따른 귀의 반응을 모사하기 위해서 소음계 제작자가 귀와 유사한 주파수 반응을 하는 기기를 설계한다면 그러한 기기에서 4,000 Hz의 70-dB의 소리는 71 dB로 읽힐 것이고 125 Hz에서의 같은 소리는 54 dB나 그 비슷한 값으로 읽힐 것이다. 이렇게 변경된 기준을 A-scale(또는 A-weighting)이라 하고

밤과 낮의 소음 레벨(dB)

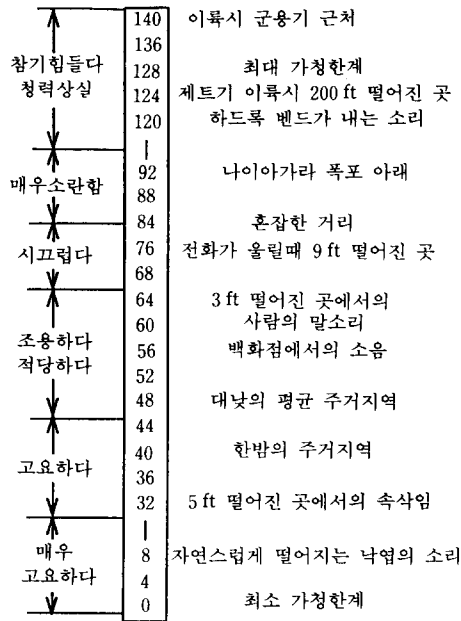


그림 1 소음 레벨 수치표

A-scale의 기기로 측정된 데시벨 값을 dBA라고 표시한다. 그림 1은 넓은 범위의 데시벨 값을 갖는 익숙한 음원에 의한 소리의 압력 레벨을 보여주는 소음 레벨 수치표이다. 이 소음 레벨 수치표는 단지 음의 크기에 따른 정보만을 주기 위한 것일 뿐 특정한 주파수에 따른 불쾌감은 고려하지 않고 있으며 이는 심리 음향학적인 이해를 필요로 하므로 이를 살펴보기로 한다.

3. 심리 음향학 (psychoacoustics)

우리는 '큰 소리'라는 말을 높은 소리 레벨에 대한 이해를 표현하는데 사용하며 '너무 큰 소리'라는 말로 소음을 표현한다. 측정된 dB레벨로부터 큰 소리나 소음 감지에 대한 주관적 이해로 넘어 가려면 우리는 심리 음향학의 영역으로 들어갈 수 밖에 없다. 이번 논의에서 '소음'이란 말은 과도하게 큰 소리

에서부터 기분나쁘게 들리는 다양한 종류의 소리들까지도 적용되는 것으로 생각한다. 예를 들어 강도(intensity)가 계속 변동하는 소리는 비슷하지만 지속적인 소리보다 시끄럽게 느껴진다. 높은 주파수의 소리나 특정한 주파수의 콤비네이션(손톱으로 칠판을 긁는 소리와 같은)은 일반적으로 짜증나는 소리라고 여겨진다. 무기를 발사할 때 나는 소리같은 폭발음은 특히 짜증을 불러 일으키며 특히 듣는 사람이 인식하지 못한 상태에서 갑자기 폭발한 경우 더 심해진다. 그리고 특정 시간에서의 행동과 소리의 관계도 곤혹스러움의 정도에 영향을 준다. 원래는 듣는 사람이 능동적으로 관련되었을 때는 무시할 수 있는 소리도 그가 잠을 청하려고 할 때는 괴롭게 느껴질 수도 있다. 듣는 이가 좋아하는 사람에 의해 나는 큰 소리는 그가 싫어하는 사람이 내는 똑같은 소리보다 별로 짜증스럽지 않을 수도 있다. 한편, 무시될 수 있는 소리 레벨이라도 그것이 듣는 이가 다른 소리를 들으려는 시도를 방해하게 된다면 이는 몹시 짜증나는 것이 된다. 이와 같이 소리의 절대적인 강도뿐만 아니라 개인의 심리적인 요소를 고려하는 것을 심리음향학적 요소라 부르며 소음의 정의와 제어에 있어서 중요한 역할을 한다.

4. 소음과 건강

소음은 원하지 않는 것이라는 말이 자동적으로 소음이 누군가의 건강에 해를 입힌다는 뜻은 아니다. 원치 않는 소음은 일반적으로 건강에 무해한 불쾌한 향기와 같다. 그러나 여러가지 연구들이 우리의 현재 문화와 관련된 많은 소음환경이 육체적, 혹은 정신적으로 악영향을 끼친다는 것을 입증하고 있다.

귀 그 자체가 강한 소음의 가장 큰 피해자이다. 고막은 강한 폭발파에 의해 파열될 수도 있지만 지나친 고영역의 소음에 노출될 때는 속귀의 피부 조직, 특히 뇌에 신호를

전달하는 신경 전달체가 상처를 입게 된다. 그러한 상처는 수술이나 재생에 의해 복구될 수가 없다. 이러한 청각 감도의 손실을 소음에 의한 영구적인 한계 변형(PTS : permanent threshold shift)이라고 부른다. 이는 덜 심각한 노출에 의해 야기되는 일시적인 한계 변형(TTS : temporary threshold shift)과 구별된다. TTS는 노출의 정도에 따라 대개 한 시간에서 심할 경우 하루까지 지속된다. 심각한 경우 TTS에 PTS가 겹쳐지는 경우도 있다. 높은 주파수에 반응하는 신경조직은 가장 민감한 부분으로 록밴드 연주자나 비행사, 풍동 기술자 등의 경우 4,000 Hz 이상에 대한 청각 감도에 이상이 있는 경우가 많이 있다. 특정한 페턴의 소음에 대해 오랜 기간 동안 노출된 노동자들은 청력 상실로 고통받고 있으며 그 정도는 예상대로 음의 강도에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 예를 들어 한 조사에서는 96 dBA가량의 레벨에서 10년간 일을 한 사람들의 경우 전형적으로 4,000 Hz의 주파수 영역대에 30 dB의 청력 상실을 겪고 있음을 보여주고 있다. 이때 30 dB의 PTS란 그가 보통의 청력을 가진 사람이 인식할 수 있는 소리보다 30 dB이상의 강도가 아니라면 소리를 인식할 수 없다는 것을 뜻한다. 다양한 연령층의 개인에 대한 청력 한계 시험의 결과를 보면 나이를 먹으면서 높은 주파수에서 청력 한계가 점차 나빠진다는 것을 보여주고 있으며 이 효과는 남성의 경우가 여성보다 더 심하게 나타나는데 이러한 현상을 노인성난청(presbycusis)이라 한다. 결정적인 것은 아니나 가정을 포함한 우리의 "문명화"된 사회 환경에서의 소음 레벨이 노인성 난청의 강력한 요인이라고 알려져 있다. 한편, 신경 인식, 행동 그리고 사고의 과정에 대한 소음의 제한된 영향을 보여주는 다른 여러가지 연구들이 있다. 예를 들어 소음은 방직기에서 실이 끊어지는 것을 감시하는 일과 같이 특별히 주의를 요하는 작업 수행에 있어서 악영향을

끼친다. 또한 높은 레벨의 소음이 눈의 초점 능력을 떨어뜨린다는 것도 알려져 있다. 90 dB 이상의 소음 레벨은(추상적인 사고 시험에서) 정신적 능력과 (반응시간 시험에서) 근육 활동의 민첩성에 영향을 준다는 것도 보여져 왔다.

5. 우리 주위의 소음

우리의 도시 혹은 준도시 환경은 소음원으로 가득차 있다. 사람들과 가축들의 소음뿐만 아니라 기계적·전기기계적 기구들이 내는 소리가 우리 주위 소음의 주된 부분을 차지한다. 현대 사회에서 가장 널리 퍼진 소음은 운송 과정으로부터 발생한다. 따라서 이 글에서도 이에 대한 예를 간단히 살펴보고자 한다.

자동차에서 가장 주요한 소음 요소는 타이어 소음과 엔진 소음이며 그들은 속도에 매우 의존적이다. 타이어 설계는 고속에서의 소음 생성에 있어서 매우 중요한 요소가 된다. 승용차의 경우 새로운 타이어 설계가 개발되어져 왔고 현재 심리음향학적인 효과를 개선시키기 위해 사용되고 있다. 예를 들어, alternate pitch sequencing이라는 기술은 타이어 홈의 간격을 불규칙적으로 바꾸는 데 이는 홈과 도로의 접촉 주파수에 해당되는

날카롭고 높은 시끄러운 음대신 그 음이 많이 약화된 넓은 영역의 여러 주파수를 만든다. 비록 전체 음향 에너지는 그리 많이 차이나지 않지만 그 음은 훨씬 덜 짜증스럽게 된다. 가속하는 차의 소음레벨은 차의 속도에 상관없이 10 dB 정도 더 높게 나타나며 따라서 소리가 두 배 정도 크게 들린다. 교통이 혼잡할 때는 차의 집적에 의한 영향이 중요하며 이는 참을성이 부족한 운전자들의 가속 운행에 의해 더 증가되기도 한다.

또 다른 운송 소음원으로 비행기를 들 수 있다. 아음속 비행의 경우 주요한 소음원은 엔진이다. 고속에서의 유체 운동은 특히 난류의 경우 연소가 일어나지 않아도 매우 시끄러울 수 있다. 여기에 엔진의 연소에 의한 소음의 추가는 소음 레벨을 훨씬 더 증가시킨다. 그림 2는 일반 707형 터보 제트가 이륙 혹은착륙할 때의 소위 '소음 영향 범위'를 나타내고 있다. 곡선은 등음레벨선을 나타낸다. 안쪽에 이륙점을 감싸고 있으며 유효 가청 소음 레벨(EPNL : effective perceived noise level)이 120 dB 이상되는 영역이 존재하고 있고 같은 점에서부터 5해리 떨어진 곳위를 날고 있는 동안 EPNL이 100이상이 된다는 것을 알 수있다.

비행기가 음속 이상으로 날아갈 때 발생하는 소닉붐(sonic boom)은 마하수가 1을 넘

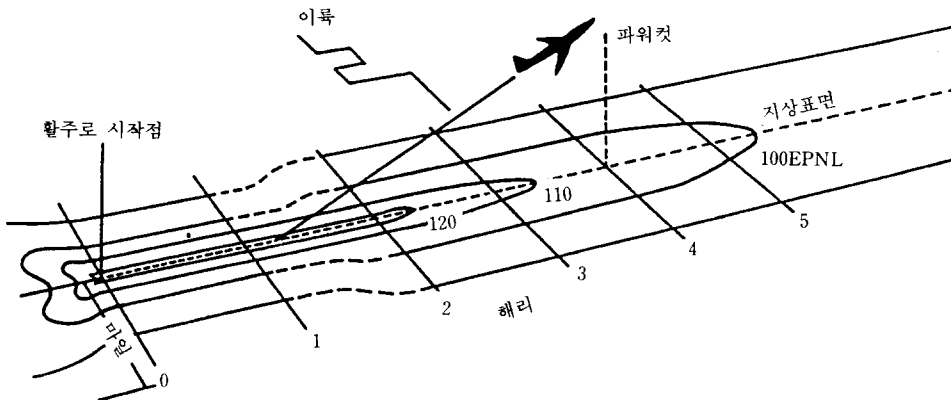


그림 2 항공기의 소음 영향 범위

어갈 경우 공기역학적인 기본 성질의 변화에 의해 생성된다. 아음속의 경우 비행기의 움직임에 의한 압력파는 비행기로부터 음속으로 전파되어 간다. 초음속의 경우 비행기는 그 자신이 내는 압력파를 따라 잡게 되고 그것이 충격파로 모이게 된다. 비행기로부터 멀리 떨어진 충격파는 특성 방향으로 경사지 소음은 줄어들게 된다. 710,000 lb의 747기는 최대 이륙 중량이 707이나 DC-8에 비해 두 배 정도 되지만 활주로에서부터 1해리 떨어진 곳에서의 접근 소음은 707이나 DC-8보다 6-11dB 정도 작으며 그 이륙 소음은 대략 10dB 정도 작게 나타난다.

소리 경로에서 완화시키는 방법으로는 근원과 청자 사이의 거리를 증가시키거나 사이에 적절히 설계된 장애물을 삽입하는 것 등이 있다. 여기서, 소음 제어 기술자는 앞서 언급한 파동 간섭의 특성을 주로 이용한다. 공기 중에서 전파되는 실외의 소리는 장벽이나 나무 혹은 대기중의 수분과 같은 광범위한 장애물을 이용하여 완화시킬 수 있다. 실내의 소음은 청자를 둘러 싸고 있는 면들에 흡음재를 사용하거나, 반사하고 흡수하는 판을 이용하여 소음원을 둘러 싸는 방식으로 제어할 수 있다. 만약 이러한 것들을 모두 사용할 수 없을 경우는 주위의 벽면에 흡음재를 놓거나 천정에 흡음성의 횡단막을 널어 놓아서 반향음을 제어하는 방법을 사용하는 데 이 경우 소음원으로부터 직접적으로 오는 소리는 여전히 문제가 된다.

벽면재의 소리 투과 능력은 소리가 벽의 관성 질량을 극복할 수 있는가와 관계가 있다. 재질이 무거울수록 소리에 대한 벽 앞면의 진동이 줄어들어 반대편으로 전파되는 소리의 강도가 줄어들게 된다. 소리의 압력 변화에 의해 전체 벽이 움직이지만 그 움직임은 벽 자체 내부에서 파의 전파가 일어나는 것이 아니므로 탄성적인 것은 아니다. 예를 들어 우리가 1센치 두께의 합판 대신 같은 두께의 콘크리트 벽을 사용한다면 콘크리트

의 경우 거의 다섯배 정도 무거우며 음의 투과는 55 Hz에서 14 dB까지 줄어들 것이다. 다른 접근 방법으로 이중벽을 들 수 있다. 이러한 기술을 이용한 창문을 이중 창문이라 하며 소음 제어에 매우 효과적이지만 모서리 주위의 기밀이 완벽하지 않거나 벽이나 창문에 작은 구멍이 뚫려 있을 경우 누출의 문제가 심각해질 수 있다. Yerges는 통과 손실이 40 dB 정도인 8×12 foot 짜리 벽에서 1 in²의 구멍은 100 in²의 벽에 해당하는 소리 에너지를 통과시킬 것이고 폭 0.01 in, 길이 12 foot인 홈은 같은 크기의 50-dB짜리 벽을 10 dB가량 나쁘게 만든다고 보았다.

진동하는 기계나 유동에 의해 구조물을 통하여 소리가 전달될 때는 진동하는 파동을 탄성적이고 순응적인 재료(약한 스프링이나 고무패드, 혹은 덜 부풀린 공기 쿠션처럼 잘 비틀어지고 휘는 부드럽고 탄성적인 종류들)를 사용하여 방해하거나 독립시키는 방법으로 제어한다. 때때로 진동하는 부품에 하중을 가하면 공진현상을 가청 영역 아래로 낮출 수 있다. 또 다른 접근법으로 댐핑을 증가시켜 진동 에너지를 감쇄시키는 방법이 있다. 댐핑은 그것이 마찰에 의한 열로 전체 에너지를 줄인다는 면에서 다른 제어 메카니즘과는 차이가 있다. 음향학적 흡수체도 같은 원리로 작용한다. 그것은 불규칙한 길이와 방향의 많은 작은 틈새들로 된 미로 형상의 다공성 물질이다. 음파를 이러한 물질을 통해 강제로 통과시키려 할 경우 견고한 마찰 저항과 만나게 되어 음에너지가 열로 바뀌게 된다. 그러나 이렇게 얻어진 온도의 증가는 그리 크지 않다. 이와 같은 원리가 환기구 배관에 이용된 경우 이러한 구성을 머플러라고 부를 수 있다. 흡음체가 부적절한 경우는 낮은 주파수의 소리를 막을 때이다. 흡음체는 일반적으로 다공성이고 가벼운 반면 앞에 언급하였듯 좋은 장벽은 일반적으로 거대하기 때문이다. 흡음체는 짧은 파장에서 더 효과적이다. 유리 섬유나 비닐 우레탄폼

합성체를 사용한 포장이나 배관 혹은 조절기는 매우 높은 피치의 경적 소리나 비명소리 등에는 특히 효과적이지만 낮게 웅얼거리는 소리에는 효과가 없다.

게 되고 결국 땅에 닿게 되며 이러한 섭동들이 모여 소닉붐을 이루게 된다. 궁극적으로 비행기의 무게를 지탱하는 것은 지표이므로 땅은 이런 저런 방식으로 압력 증가를 인식해야 한다. 문제는 초음속 유동은 압력 증가가 충격과 때문에 급작스럽게 일어나기 쉽다는 점이다. 이러한 현상은 아음속으로 비행 중인 비행기 아래에서 압력 증가가 확산적으로 일어나서 인식할 수 없는 사실과 비교된다. 상당한 연구 노력에도 불구하고 이러한 붐효과를 제거할 수 있도록 설계하는 데에는 실패하였다.

6. 소음 제어

위에서 살펴본 바와 같이 소음이 인간 생활에 끼치는 영향이 커지면서 이의 제어가 많은 엔지니어들에게 중요한 문제로 떠오르게 되었으며 많은 이론과 방법들이 개발되었다. 여기서는 소음 제어에 관련된 간단한 이론과 예를 살펴보기로 한다.

소음은 음원으로부터 시작되어 하나 혹은 그 이상의 경로를 따라 결국 청자에게, 즉 소음에 노출된 개인의 귀에 도달한다. 이 간단한 음원-경로-청자의 모델은 비록 실제적으로는 소음 제어과정이 이러한 범주로 명백히 나눌 수 없음에도 불구하고 소음 제어 기술자에게 적절한 기준선이 되고 있다.

음원에서의 적절한 제어는 기계적 소음의 경우 특히 바람직하다. 음원에서의 제어를 통한 소음 저감에 있어서 아마도 가장 놀라

운 진보는 보잉 747이나 더글러스 DC-10, 록히드 L-1011 등에 사용되는 높은 바이패스 비의 팬제트 엔진의 개발일 것이다. 비행기의 추력은 몸체에 대한 공기 흐름의 모멘텀 변화를 통해 얻어진다. 높은 바이패스 엔진의 경우, 같은 추력이 더 많은 양의 공기를 흘러보냄으로써 얻어지므로 엔진을 통과하는 공기의 속도가 크지 않아도 된다. 소음은 공기의 속도에 민감한 함수이므로 전체

7. 맺음말

위에서 우리는 소음 과학의 이해를 위한 기초적인 이론들을 살펴 보았다. 이를 위하여 음향학적인 이론과 심리 음향학 등에 대하여 언급하였고 소음이 건강에 미치는 영향을 살펴본 뒤, 소음 제어의 전형적인 예들을 몇 가지 살펴보았다. 물론 소음 과학은 이보다 훨씬 복잡하고 어려운 학문이다. 특히 소음의 측정이나 주파수 분석 등에 관련된 이론과 소음의 제어에 관련된 이론들을 자세히 언급하는 것은 이 글의 성격에서 벗어나는 것으로 생각되므로 간단한 예들만으로 쉽게 소음 과학에 대한 개략적인 이해를 돕고자 하였다. 위에서 살펴보았듯이 소음이 끼치는 영향은 매우 심각하며 국민 소득이 증가하면서 이에 대한 관심이 점점 커져가고 있는 실정이다. 또한 소음의 중요도가 늘어나면서 그 제어를 위한 여러가지 방법들이 고안되어 산업 전반에 걸쳐서 광범위하게 응용되고 있으며, 세계 각국에서는 이에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 따라서 보다 많은 우리의 공학도들도 소음 과학에 대하여 관심을 갖게 되기를 기대한다. 