

고속도로변 소음 발생과 전달특성(I)



문 성 호 | 정회원 · 한국도로공사 국제행사지원T/F팀 책임연구원 · 공학박사 · 편집위원
 서 영 국 | 정회원 · 한국도로공사 포장연구그룹 연구원 · 공학박사 · 편집위원

1. 들어가는 글

무수히 많은 원인에 의해서 발생하는 소음(noise)은 최근 관련 민원 증가 및 규제강화로 인하여 많은 사람들의 주요 관심대상이 되고 있다. 일반적으로 소음은 우리가 일상생활을 하면서 인식하게 되는 여러 가지 소리 중에서 신체적 혹은 심리적으로 부정적인 영향을 주는 불쾌한 소리를 의미한다. 특히 사회가 복잡해지면서 도로와 주거시설이 점점 가까워지고 도로를 주행하는 차량의 대형화, 고속화가 빠르게 진행되어가고 있는 현실을 고려하면 도로주변 소음은 갈수록 해결하기 어려운 사회문제로 거론될 것이다. 현재 여러 가지 소음(특히 도로소음)저감 공법들(방음벽, 저소음 포장, 등)은 대부분 소음의 발생원인과 전달 특성에 대한 근본적인 이해가 부족한 상태에서 무분별하게 적용되는 사례가 많아 소음저감 효과가 미비하거나 장기적인 소음억제효과를 기대하기 어려운 경우가 많다. 이에 본 기사는 우선 소음에 대한 일반적인 개념 정리를 통해 독자들의 소음전반에 대한 이해를 돕고 나아가 고속도로변 소음의 발생과 전달

특성을 소개하고자 한다.

2. 음향물리

2.1 소리와 소음

소리 혹은 음(sound)은 매개체(액체, 고체, 기체)를 통해 압력(pressure)의 파동형식으로 전달되며 인간에게는 청력기관을 통해 느껴지는 물리량을 의미한다. 소리를 표현하는 주요 세가지 요소로는 소리의 고저, 크기, 음색이 있으며 온도에 따른 공기중의 소리의 전달 속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$c = 331.5 + 0.6 \times t \quad (\text{식 1})$$

여기서, c : 공기중의 음파의 전파속도(음속),
 t : 공기의 온도(degree celsius)

소음은 일반적으로 크고, 불쾌하며, 원하지 않는 소리를 통칭하며 인간의 생리적 기능에 변화를 주기도 하고, 심한 경우 청력에 일시적 손상을 입히기도 한다.

2.2 소리의 일반적 특성

2.2.1 주파수, 파장 그리고 진폭

규칙성(주기)을 갖는 이상적인 연속음의 경우 소리는 주파수(frequency), 파장(wavelength), 진폭(amplitude)등으로 표현할 수 있다. 파장은 음압의 제일 높은 정점과 바로 다음에 인접한 제일 높은 정점간의 거리이며 이때 한 파장이 전달되는 시간을 주기(period)라고 한다. 주파수는 1초 동안 통과한 파형의 반복회수이고, 그 단위로 소음진동에서는 주로 Hertz(Hz)를 사용한다. 주기(T)와 주파수(f)는 서로 반비례 하며 주파수(f)와 파장(λ) 그리고 음의 속도(c)와의 관계는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\lambda = \frac{c}{f}, f = \frac{c}{\lambda} \text{ 혹은 } c = f\lambda \quad (\text{식 2})$$

위 식에서와 같이 음속이 일정한 경우 주파수가 높을 수록 소리의 파장은 짧아지고, 주파수가 작을 수록 파장은 길어진다.

2.2.2 음압수준(Sound Pressure Level)과 데시벨(dB-decibel)

소리는 시간과 거리에 따라 음파의 압력(sound pressure)은 변화한다. 이렇게 변하는 음압의 표현 단위로는 주로 $\mu\text{N}/\text{m}^2$ (혹은 μPa)을 사용한다. 인간이 인식 가능한 음압의 범위는 대기압과 같은 지역 특성에 따라 약간의 차이는 있지만 대개 $20 \sim 2 \times 10^8 \mu\text{Pa}$ 정도로 알려져 있다. 이와 같이 넓은 범위의 음압을 좀 더 다루기 용이하도록 음압수준(SPL)이라는 기준을 사용한다. SPL은 Alexander G. Bell의 이름을 따서 bel로 단위를 정의하며 10을 곱한 deciBel (dB)를 사용한다. SPL은 아래의 식 3과 같다.

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2 \text{ dB} \quad (\text{식 3})$$

여기서, P_1 : 측정음압, P_0 : 최소 가청음압으로 일반적으로 $20 \mu\text{Pa}$ 을 사용한다.

2.2.3 음파 에너지 평균(Root Mean Square)

그림 1과 같이 이상적인 sine곡선 형태의 음압파의 경우 SPL을 구하면 간단하게 최대값을 이용할 수 있지만, 도로 소음과 같이 음파의 형상이 불규칙적이고 그 주기를 판단하기 어려운 경우에는 각 절점에 있어 최대 절대치를 많이 사용한다.

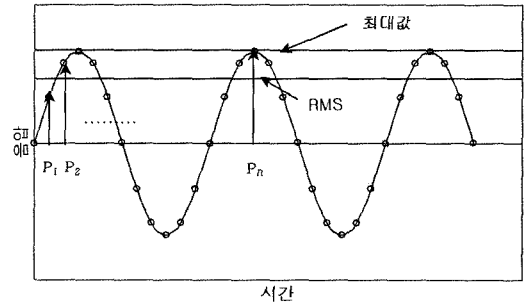


그림 1. 음파의 최대값과 음파 에너지 평균

음파의 에너지 평균이라는 물리량을 가지는 RMS 는 그림 1에서와 같이 각 음압(P_1, P_2, \dots, P_n)의 진폭을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$RMS = \sqrt{(P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_n^2)/n} = \sqrt{(\sum_{i=1}^n P_i^2)/n} \quad (\text{식 4})$$

그림 1과 같이 이상적인 sine곡선의 경우 최대값과 RMS의 관계는 $RMS = \frac{\text{최대값}}{\sqrt{2}}$ 이다. 도로소음에 있어서는 모든 SPL은 보통의 경우 RMS로 표현한다.

2.2.4 SPL, 상대에너지(relative energy), 상대압(relative pressure)

상대에너지, 상대압은 다음과 같이 정의 된다.

$$\text{상대에너지} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2 \text{ 그리고 상대압} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right) \quad (\text{식 5})$$

여기서, P_1 : 측정음압, 그리고 P_0 : 최소 가청음압 (혹은 참조음압, $20 \mu\text{Pa}$), 그리고 SPL과 상대에너지 및 상대압과 관계는 다음과 같다.

$$\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2 = 10^{SPL/10} \text{ 그리고 } \left(\frac{P_1}{P_0} \right) = \sqrt{10^{SPL/10}} \quad (\text{식 6})$$

예를 들어 SPL이 200dB일 경우 상대에너지는 10^{20} 이며, 상대압은 10^{10} 이다.

2.2.5 SPL의 덧셈과 뺄셈

데시벨은 로그단위로 표현되기 때문에 산술적으로 더하거나 뺄 수 없다. 예를 들어 SPL이 70dB인 소음을 발생하는 두 대의 차량이 동시에 지나갈 경우 두 소음의 합은 140dB이 아닌 73dB로 측정된다. 이 결과는 다음의 식을 통해 쉽게 구할 수 있다.

$$SPL = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2 + \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^2 \right] = 10 \log_{10} \left[2 \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2 \right] = 10 \log_{10} 2 + 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2 \quad (\text{식 7})$$

\log_{10}^2 의 값이 0.301이므로 10을 곱하며 약 3dB 정도 증가된다.

• 동등수준의 SPL에 있어 합과 뺄셈

위에서 살펴본 바와 같이 동등수준에 있어 SPL의 합은 총 차량의 대수(N)를 알면 다음의 식을 이용하여 합을 구할 수 있다.

$$SPL_{(Total)} = SPL_{(1)} + 10 \log_{10}^{(N)} \quad (\text{식 8})$$

여기서, $SPL_{(1)}$ 는 소음원 하나의 SPL, 그리고 N은 동등레벨의 총 개수. 예를 들어 13대의 차량이 동시에 63 dB의 소음을 발생시켰다면, 그 합 ($SPL_{(Total)}$)은 $63 + 10 \log_{10}^{13}$ 인 74.1 dB이다.

식 8은 뺄셈에서도 그대로 적용될 수 있다. 즉 다음 식은 동등레벨의 합인 $SPL_{(Total)}$ 을 알고 한 개의 소음원 $SPL_{(1)}$ 을 알고자 할 때 유용하게 쓸 수 있다.

$$SPL_{(1)} = SPL_{(Total)} - 10 \log_{10}^{(N)} \quad (\text{식 9})$$

예를 들면, 6개의 음원의 총합 ($SPL_{(Total)}$)이 68dB 일 경우 1개의 음원 ($SPL_{(1)}$)은 $68 - 10 \log_{10}^6 = 60\text{dB}$ 이다.

다양한 음압수준의 SPL에 있어 덧셈과 뺄셈

다음의 식은 각기 다른 음압수준의 합을 구하고자 할 때 이용된다.

$$SPL_{(Total)} = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2 + \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^2 + \left(\frac{P_3}{P_0} \right)^2 + \dots + \left(\frac{P_n}{P_0} \right)^2 \right] \quad (\text{식 10})$$

여기서, $SPL_1, SPL_2, SPL_3, \dots, SPL_n$ 은 각각 첫 번째, 두 번째, 세 번째, ..., n 번째의 소음원을 대표한다. 위의 식 10은 식 6의 상대에너지와 SPL의 관계를 이용하면 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$SPL_{(Total)} = 10 \log_{10} [10^{SPL_{(1)}/10} + 10^{SPL_{(2)}/10} + 10^{SPL_{(3)}/10} + \dots + 10^{SPL_{(n)}/10}] \quad (\text{식 11})$$

예를 들어 음의 레벨 82, 75, 88, 68, 79dB의 합은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$SPL_{(Total)} = 10 \log_{10} (10^{82/10} + 10^{75/10} + 10^{79/10} + 10^{82/10} + 10^{88/10}) = 89.6\text{dB}$$

식 11은 오른쪽 음원중 하나를 모르고 나머지와 합을 알 경우에도 유용하게 적용할 수 있다.

2.2.6 A-type 보정 소음수준

SPL 자체로는 우리가 듣는 소리의 지표로 이용하기에는 신뢰성이 없다. 즉 인간의 귀의 반응을 고려 선형음압수준(linear SPL)을 가칭 주파수대(1,000 Hz~5,000 Hz)에서 A-type으로 보정된 소음레벨을 도로소음에 활용한다. A-type로 보정된 소음수준 단위로는 dBA 혹은 dB(A)로 표기한다. 보정하는 방법은 American National Standards Institute(ANSI)에서 제시한 ANSI S1.4(1983)의 기준에 따라, 각 주파수별로 무보정의 음압레벨(Linear SPL)에 더하거나 빼주어 보정한다.

2.2.7 옥타브(octave) 및 1/3 옥타브 밴드, 주파수 스펙트럼

일반적으로 소리는 폭이 넓은 주파수 대역으로 이루어져 있다. 이를 효과적으로 소리특성을 분석하기 위해 국제적으로 통용되고 있는 옥타브 밴드를 사용한다. 피아노 건반과 같이 한 옥타브가 두 주파수 영역의 가운데 값으로 대표된다. 표 1은 한 국제표준의 예를 보여주고 있으며, 중심주파수에 따른 1/3 옥타브 대역 및 1/1 옥타브 밴드의 범위를 표기하고 있다.

표 1. 표준 밴드번호, 중심 주파수, 옥타브 밴드 범위

Band No.	중심 주파수, Hz	1/3 옥타브 밴드 범위, Hz	1/1 옥타브 밴드 범위, Hz
15	31.5	28.2-35.5	22.4-44.7
18	63	56.2-70.8	44.7-89.1
21	125	112-141	89.1-178
24	250	224-282	178-355
27	500	447-562	355-708
30	1,000	891-1,120	708-1,410
33	2,000	1,780-2,240	1,410-2,820
36	4,000	3,550-4,470	2,820-5,620
39	8,000	7,080-8,910	5,620-11,200
42	16K	14.1K-17.8K	11.2K-22.4K

옥타브는 1:2의 비율로 정의됨으로 수학적 표현은 아래와 같다.

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n \quad (\text{식 12})$$

여기서, f_2 는 중심 옥타브에서 위의 주파수, f_1 은 중심 옥타브에서 아래의 주파수, 그리고 n 은 옥타브의 번호(1/1 혹은 1/3)이다. 위에 표 1에서와 같이, 중심 주파수가 1,000 Hz의 경우, 1/3 옥타브에 있어 아래의 주파수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{1,000}{f_1} = 2^{1/6}$$

$$f_1 = \frac{1,000}{2^{1/6}}$$

$$f_1 = \frac{1,000}{1.12246}$$

$$f_1 = 891\text{Hz}$$

위의 계산에서 알 수 있듯이 n 은 1/3의 반인 1/6으로 산정되어야 한다.

2.2.8 White 소음 및 Pink 소음

White 소음은 전역의 가청주파수대에서 각각의 주파수의 진폭이 같을 경우를 말하며, Pink 소음은 옥타브 밴드 영역에 있어 똑같은 진폭일 경우를 말한다. White 소음은 특히 주파수 반응 측정 장비를 보정하

기 위해 주로 이용되며, Pink 소음은 1/1 혹은 1/3 옥타브 밴드 측정 장비를 검증하기 위해 사용된다.

3. 음의 전달

음원으로부터 계측기까지 소음은 크기와 주파수 스펙트럼에 있어 변화하며 전달된다. 또한 음원으로부터 먼 거리에 있으면 소음이 감소한다. 즉 다음과 같은 방법으로 거리에 따른 감소를 예측할 수 있다.

- 기하학적인 전달(예: 점 혹은 선 음원)
- 지표면 흡수
- 대기의 효과 및 굴절

3.1 기하학적인 전달

소음이 시점에서 방사할 때 어떤 형태로 시작되는가에 따라 점 혹은 선으로 표현되어 전달 될 수 있다. 점으로 출발하여 전달된다면 그림 2에서 보는 바와 같이 r 에서 $2r$ 로 거리가 늘어남에 따라 A_1 에서 A_2 로 면적이 증가된다.

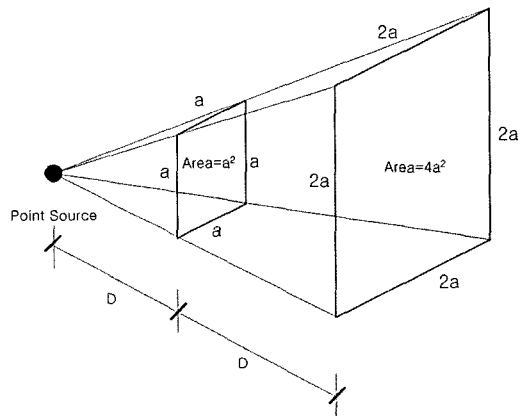


그림 2. Point source의 음원 전달형태

만약 정사각형인 A_1 에 있어 한 변이 a 라고 하면 면적은 a^2 이며, A_2 의 면적은 $4a^2$ 임을 알 수 있다. 음원의 에너지가 전파할 때 에너지 보존의 법칙에 따르게

되면 A1와 A2에 있어서 에너지는 같다. 위에서 본 경우에 있어 거리가 두 배가 됨으로서 면적이 4배의 차이를 보이게 된다. 그러므로 에너지형태인 SPL에 있어서는 $6dB(=10\log_{10}^{(1/4)})$ 이 감소됨을 알 수 있다. 이를 수식으로 표현한다면 다음과 같다.

$$dBA_2 = dBA_1 + 10\log_{10}^{(D_1/D_2)^2} \quad (\text{식 13})$$

여기서, dBA_1 은 D_1 에서의 SPL이며 dBA_2 는 D_2 에서의 SPL이다.

그러나 도로변 소음의 경우 한 개의 정지상태의 점원으로 보기 힘들고 동적인 차량이동을 모사하는 선의 형태인 음원(line source)에서 소음이 발생·전달된다. 그림 3에서 보는 바와 같이 거리가 두 배로 증가될 때 면적도 함께 두 배가 되는 것을 알 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$dBA_2 = dBA_1 + 10\log_{10}^{(D_1/D_2)} \quad (\text{식 14})$$

여기서, dBA_1 은 D_1 에서의 SPL이며 dBA_2 는 D_2 에서의 SPL이다.

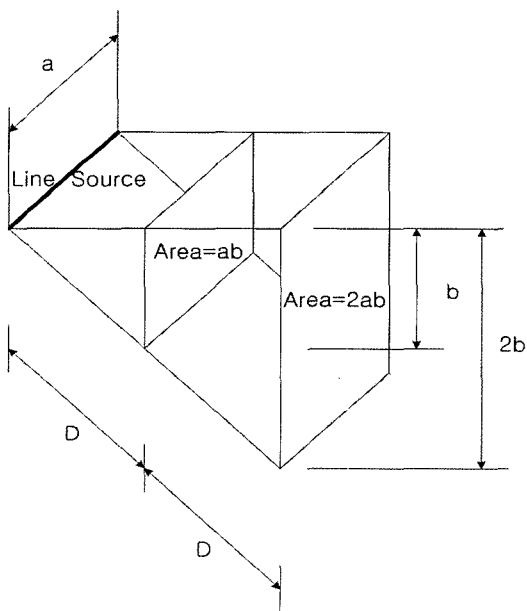


그림 3. Line source의 음원 전달형태

3.2 지표면의 흡수

절토도로변의 녹화사면, 일반도로변의 녹지대 혹은 콘크리트 바닥면 등을 도로 주변에서 종종 볼 수 있다. 여기서 소음전달경로의 지표면에 따라 소음의 감쇄효과가 있음을 알 수가 있는데 간단하게 탁탁한 표면(예: 주차장, 잔잔한 호수가 등)과 부드러운 표면(예: 녹지대, 숲 등)으로 나누어 전달 예측모형을 제시할 수 있다. 다음 식은 각각 점형태의 소음원 전달(point source propagation) 및 선형태의 소음원 전달(line source propagation)에 있어 지표면에 따른 소음감쇄 예측식을 보여주고 있다.

$$dBA_2 = dBA_1 + 10\log_{10}^{(D_1/D_2)^{2+a}} \text{(point source)} \quad (\text{식 15})$$

$$dBA_2 = dBA_1 + 10\log_{10}^{(D_1/D_2)^{1+a}} \text{(line source)} \quad (\text{식 16})$$

여기서, a 는 지표면에 따른 변수이며, 일반적으로 탁탁한 표면에는 0을 사용하며, 부드러운 표면은 0.5를 이용한다. 다양하게 차량(소음원)의 높이가 다르므로, 좀 더 정확한 소음예측을 위해서는 차종에 따라 달라지는 지표면 흡수율을 고려하여야 된다.

다음은 기하학과 지표면의 흡수를 고려한 소음전달감소의 계산 예로써 이동중인 소음원인 차량으로부터 25m에 위치한 관측점의 최대의 SPL이 83 dBA로 측정되었고, 이 때 소음원로부터 62m에 떨어진 곳에서의 예측 SPL를 구하는 문제이다. (단, 전달경로를 부드러운 표면으로 가정)

해 : 이동중인 트럭이므로 선형태의 소음전달 문제이며, a 는 0.5이다. 즉 62m에서 예측될 소음은 식 16을 이용해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$83dBA + 10\log_{10}^{(25/62)^{1+0.5}} = 83 + (-5.92) = 77.08dBA$$

3.3 대기현상과 소음의 굴절과 밀집

대기의 효과 및 반사에는 크게 바람, 난기류, 온도

변화, 온도 및 습도, 비 등의 예를 들 수 있다. 여기서 몇몇 경우를 살펴보면, 바람에 있어서는 역전풍(wind shear)현상을 볼 수 있는데, 이는 표면마찰에 의해 지표면에 가까이 있는 바람은 속도가 줄어들어 따라 발생하는 현상이다. 그림 4는 역전풍 현상에 따른 소음의 굴절(refraction)과 밀집(concentration)의 영향을 보여 주고 있다. 여기서 굴절은 그림 4에서 보는 바와 같이 소음전달이 위로 향하게 됨에 따라 소음이 퍼져 감쇄되는 효과이며, 밀집은 소음전달이 아래로 향하게 됨에 따라 소음이 집중되어 증가되는 현상을 말한다. 이런 현상 때문에 바람이 많이 부

는 현장실측에 있어 소음계측기 위치(아래 혹은 위에 설치)에 따라 측정값이 크게 달라질 수 있다. 이런 이유로 5m/sec 이상의 바람이 불 때 계측을 권장하지 않는다.

온도경사(temperature gradient)에 따른 영향은 그림 5에서 보여 주는 것과 같이 3가지 경우에 따라 각각 달라질 수 있다. 일반적으로 건조한 상태에서 온도변화는 약 100m 위로 올라갈 때 마다 1도씩(degree) 떨어진다. 즉 $-1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 이다. 바람의 속도와 온도의 관계는 비례하므로 온도가 올라감에 따라 속도는 증가한다. 이런 현상을 고려한 소음전달 형태는 그림 5의 (b)에서 볼 수 있다.

그림 5의 (a)는 아무런 온도변화가 없을 경우 음의 굴절 및 밀집의 현상을 볼 수 없으며, (b)의 경우에는 굴절 현상처럼 음이 위로 퍼짐에 따라 감쇄효과를 볼 수 있고, (c)는 일반적인 현상과 반대로 지표면에서 위로 올라 갈수록 온도가 증가하게 되어 바람의 속도로 증가하는 현상을 보여 주고 있다. 이 경우는 음의 밀집현상과 같이 아래로 음이 응집되는 모습을 보여줘 소음이 커짐을 알 수 있다. 다음호에는 고속도로변 소음 측정에 따른 고속도로변 소음의 발생과 전달특성에 대해 소개하고자 한다.

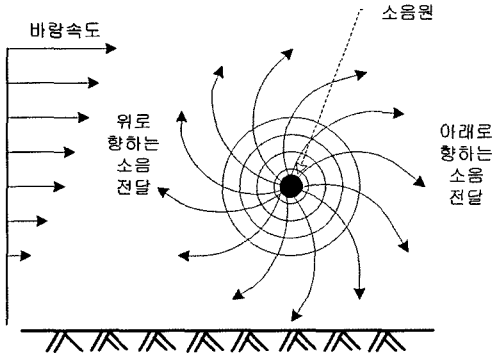


그림 4. 바람과 지표면의 영향에 따른 소음레벨

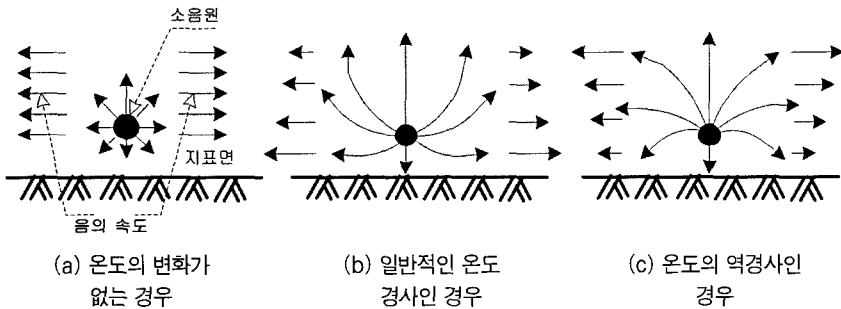


그림 5. 온도변화에 따른 소음전달 형태