

# 환경변화의 영향을 고려한 소음예측기법

°김동현 \*, 한상보 \*\*, 박성진 \*

## Prediction of Outdoor Sound Propagation under Environmental Change

Dong-Hyun Kim, Sangbo Han, Sung-Jin Park

### ABSTRACT

Sound propagation along the surface of the ground can be affected by the roughness of the ground surface and the direction of the wind. Noise Source parameter and ground factor are estimated using the measured results of two points under particular environmental condition, and the noise level of arbitrary points under the same environmental condition can be estimated. The results can be used for the prediction of the noise level from a source above a plain and homogeneous ground surface with no obstacles nearby. Upward and downward conditions are also addressed in addition to ground effect. The proposed method can be utilized to estimate the noise level of specific noise environment and its validity was confirmed with the results of actual field measurement.

### 1. 서론

쾌적한 환경에 대한 평가 기준으로서 환경소음의 크기는 여러 가지 평가 척도 중의 하나로 사용되고 있다. 산업현장에서 발생하는 소음으로 인하여 주변 환경이 느끼게 되는 환경소음의 크기는 소음원의 세기, 소음원의 형상, 주위 환경의 지리적 조건 등에 의해 결정된다.

특정 소음원에 의한 환경소음의 크기를 파악하고자 할 경우 바람의 방향과 같은 외부적인 조건의 변화로 인하여 이상적인 음장하에서의 소음전달 현상과는 다른 평가방법이 제시되어야 한다.<sup>(1)(2)(3)</sup> Makareweicz<sup>(4)</sup>는 환경소음의 크기에 영향을 미치는 여러 인자 중 측정 환경과 관련된 인자로 바람의 영향과 지표면의 거칠기 등 두가지를 고려하였고, 소음의 전파 경로를 대기가 안정할 때

와 바람의 영향으로 인하여 상향굴절 또는 하향굴절이 일어날 때로 구분하여 생각할 수 있다고 하였다. 바람의 영향과 지표면의 성질을 매개변수로 고려할 경우, 새로운 소음전달 현상에 대한 식을 생각할 수 있는데, 두 매개변수의 영향을 고려한 소음전달 현상에 대한 식을 완성한 뒤 소음원과 근접한 두지점의 소음도를 측정하여 특정 측정 환경 하에서의 음원매개변수(source parameter)와 지표면계수(ground factor)를 추정하고 그 결과를 바탕으로 임의의 위치에서의 소음도를 예측할 수 있다. 환경 소음의 평가에 대한 일반적인 식에서 음원 매개변수와 지표면계수는 포괄적인 의미의 과잉감쇠의 효과로 표현되고 있다. 그러나, 바람의 방향에 따라 과잉감쇠가 반드시 양의 값이 되지 않을 수도 있으므로 대기가 안정된 상태의 소음전달식에서 일정량의 크기를 감하여 주는 방법은 실제 소음도의 예측에 보편적으로 사용될 수 없다. 음원매개변수와 지표면계수를 고려한 Makareweicz의

\* 경남대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 경남대학교 기계자동화공학부

예측식은 주어진 계측 시간 동안 바람의 방향이나 지표면에서의 온도분포가 변하는 시간대의 영향을 고려하여 전체적인 평균의 개념으로 소음도를 예측하고자 하였다. 그러나 실제 계측 상황에서 풍향과 풍속이 변화하는 시간의 크기를 정확히 파악하는 것과 지표 온도의 변화에 대한 장시간에 걸친 측정은 평균 소음의 개념 외에는 별 용도가 없으므로 본 논문에서는 그의 이론적 기법을 인용하여 특정한 지표면 상태와 바람의 영향 하에서 소음도를 예측하는 방법으로 변환하고 이 방법의 유용성을 검증하고자 하였다.

## 2. 바람의 효과를 고려한 소음도

소음도는 식(1)과 같이 측정소음도와 암소음도의 합으로 표현이 된다.

$$L_T = 10 \log \{ (\tau/T)S + 10^{L_T/10} \} \quad (1)$$

여기서,  $L_T$ 는 암소음도를 의미하며  $S$ 는 기준음압에 대한 제곱평균음압의 비로 다음과 같다.

$$S = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{p^2(t)}{p_{ref}^2} dt, \quad p_{ref} = 2 \times 10^{-5} Pa \quad (2)$$

측정된 소음의 크기는 Fig. 1에서 보듯 음압을 총 측정시간  $T$ 동안  $\tau$ 의 시간에 걸쳐 세 개의 범주로 구분된 음압의 대수적 합으로 표현할 수 있다.

$$S = (\tau_0/\tau)S_0 + (\tau_1/\tau)S_1 + (\tau_2/\tau)S_2 \quad (3)$$

여기서,  $\tau_0$ 는 대기가 안정할 때,  $\tau_1$ 는 바람이 음

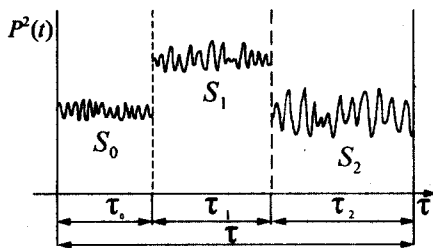


Fig. 1 Time duration of three categories of sound propagation

원으로부터 수음자쪽으로 불 때,  $\tau_2$ 는 바람이 수음자로부터 음원쪽으로 불 때의 시간이다.

### 2-1. 대기가 안정할 때 지표면 반사를 고려한 소음도

Fig. 2는 음원이 지표면에 반사된 후 수음자로 전파해 가는 과정을 그리고 있는데 이때 음이 전파해갈 때 지표면을 따라서 전달되어 가는 파만을 고려할 경우  $z + H \ll d$ 의 조건을 만족한다고 가정할 수 있고 이와 같은 조건을 만족할 때 지표면효과를 고려한 구면파 점음원 식은

$$p^2 = Wpc/4\pi r^2 \cdot G(d, z, H, Z) \quad (4)$$

$$G = \frac{1}{[1 + \gamma_0 \{ d^2 / (z + H)^2 \}]} \quad (5) \quad 0 \leq d \leq \infty$$

로 표현할 수 있다. 여기서,  $G$ 은 지표면계수<sup>(56)</sup>(ground factor),  $Z$ 은 지표면임피던스<sup>(7)</sup>(ground impedance)를 의미한다. 따라서 식(5)를 식(4)에 대입하고 등가 소음도로 표현하면 대기가 안정할 때 지표면 반사를 고려한 소음도 식이 된다.

$$L_{r_0} = 10 \log \{ Q_0 \} - 10 \log \{ 2\pi d^2 / d_0^2 [1 + \gamma_0 d^2 / (z + H)^2] \} \quad (6)$$

여기서,  $d_0$ 는 단위면적을  $1m^2$ 로 할 때의 단위 반지름  $1m$ 이다.

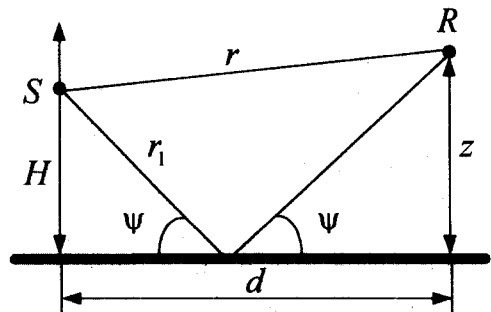


Fig. 2 Geometrical relationship between the source and the receiver

위의 식(6)을 Fig. 3과 같은 음원에 근접한 두 지점  $O_1(d_1, z_1)$ 와  $O_2(d_2, z_2)$ 에 대한 두 개의 식으로 표현한 뒤 실제 계측 결과를 이용하면 특정 소음 환경에 적용되는 다음과 같은 지표면계수 ( $\gamma_0$ )와 음원매개변수 ( $Q_0$ )식을 유도할 수 있다

$$\gamma_0 = \frac{(m-1)(z_1+H)^2(z_2+H)^2}{[(z_1+H)^2 d_2^2 - m(z_2+H)^2 d_1^2]} \quad (8)$$

$$Q_0 = 10^{(L_0^{(2)} + 10 \log\{2\pi d_2^2/d_0^2[1 + \gamma_0 d_1^2/(z_1+H)^2]\})/10} \quad (9)$$

$$m = (d_1/d_2)^2 10^{(L_1^{(1)} - L_1^{(2)})/10} \quad (10)$$

## 2-2. 하향굴절(downward refraction)시 소음도

하향굴절(downward refraction)시 측정된 소음도는 대기가 안정할 때의 경우보다 크고 수평거리  $d$ 에 의존하며 시간에 따라 변화한다. 따라서  $\gamma_0 \rightarrow \gamma(t)$ 로 변하는 랜덤변수로 가정되어야 한다. 그러므로 식(6)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$L(t) = 10 \log\{Q\} - 10 \log\{2\pi d^2/d_0^2[1 + \gamma(t)/\tilde{\gamma}]\} \quad (11)$$

여기서,  $\tilde{\gamma}$ 는 식(6)의  $(z+H)^2/d^2$ 을 대체하여 쓴 것이다. 식(11)을 시간에 따라 변하는  $\gamma$ 에 관한 변수로 기술하면

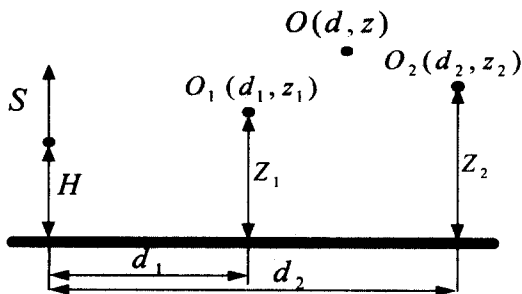


Fig. 3 Spatial relationship between the noise source and the receiver along the propagation of ground wave

$$S_1 = \frac{1}{z_1} \int_0^{r_1} \frac{p_1^2(t)}{p_{ref}^2} dt = \int_{-\tilde{\gamma}}^{\infty} \frac{p_1^2(\gamma)}{p_{ref}^2} f_1(\gamma) d\gamma \quad (12)$$

와 같이 표현되고

$$\int_{-\tilde{\gamma}}^{\infty} \left[1 + \frac{\gamma}{\tilde{\gamma}}\right]^{-1} f_1(\gamma) d\gamma = \left[1 + \frac{\gamma}{\tilde{\gamma}}\right]^{-1} \quad (13)$$

의 관계를 이용하면 하향굴절시 제곱평균음압 식은 다음과 같다.

$$S_1 = Q_1 \frac{d_0^2}{2\pi d^2} \left[1 + \frac{\gamma}{\tilde{\gamma}}\right]^{-1} \quad (14)$$

식(14)를 소음도에 대한 표현으로 변환시키면 다음과 같은 식이 얻어지는데

$$L_{r_1} = 10 \log\{Q_1\} - 10 \log\{2\pi d^2/d_0^2[1 + \gamma_1 d^2/(z+H)^2]\} \quad (15)$$

여기서  $\gamma_1$ 는 하향굴절에 대한 지표면계수로서 식(9)에 주어진 것과 같은 의미를 가지며  $m$ 에 관한 식 또한 식(8)과 동일하게 사용된다.

## 2-3. 상향굴절(upward refraction)시 소음도

상향굴절(upward refraction)시 소음도는 하향굴절(downward refraction)의 경우와 같으므로 지표면계수  $\gamma_1$ 를 랜덤변수로 잡으면  $\gamma$ 가 변하는 범위는  $-\gamma$ 에서  $+\infty$ 까지 이다. 그러나 하향굴절(downward refraction) 밀도함수(density function)  $f_1(\gamma)$ 가 상향굴절(upward refraction)의 밀도함수와 같은 것인지는 알 수가 없다. 그래서  $f_2(\gamma)$ 를 새롭게 정의한다.

$$S_2 = Q_2 \frac{d_0^2}{2\pi d^2} \int_{-\tilde{\gamma}}^{\infty} \left[1 + \frac{\gamma}{\tilde{\gamma}}\right]^{-1} f_2(\gamma) d\gamma \quad (16)$$

식(16)을 소음도에 대한 일반화 식으로 유도하면

$$L_{r_2} = 10 \log \{ Q_2 \} - 10 \log \{ (2\pi d^2 / a_0^2) [1 + \gamma_2 d^2 / (z + H)^2] \} \quad (17)$$

을 얻게된다. 여기서,  $\gamma_2$ 은 하향굴절에 대한 지표면계수로 식(9)과 같으며  $m$ 에 대한 식도 식(8)과 동일하다.

### 3. 측정 장치 및 방법

본 실험은 2000년 4월초 창원시 북면 논경지에서 실시하였으며 측정시각은 대체로 오후 1시부터 저녁 7시 30분까지였다. 사용된 소음원은 출력 8마력 짜리의 경운기가 최대 출력으로 작동할 때의 소음을 소음원으로 사용하였다.

소음원의 높이는 지표면에서 약 0.8m 위에 있고, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 남쪽 200m에는 국도1차선이 동서로 나있고, 서쪽 300m에는 생활주거지역과 도로가 남북으로 뻗어있으며, 또한 소음원이 있는 위치의 길옆으로 나란히 폭 10m의 농수로가 흐르고 있고, 서쪽 200m에는 독과 산이 있다. 그리고 소음원과 이들 외부환경 사이에는 모두 논경지로 형성되어 있는 평야이다.

소음 계측시 풍향과 풍속은 평균치를 이용하였고 측정점의 위치는 바람과 나란한 방향으로 배치하였다. 측정 도중 발생하는 불필요한 자동차소음이나 단발소음 발생시는 되도록 측정을 피하였으며 암소음의 크기가 40 dB(A)이하 일 때를 측정시간대로 하였다.

원거리 소음도의 측정을 위해 B&K 2236A 정밀적분형 소음계를 사용하여 높이 1m의 삼각대에 소음계를 설치하고 대기가 안정하다고 여겨질 때 소음원을 작동하지 않은 상태에서 남북으로 거리 10m, 20m, 30m, 50m에서 약 30초간 각각 6회 암소음도를 측정 한 뒤 같은 방법으로 소음원을 작동 시킨 후 소음도를 측정하였다. 또한 바람이 평균 2m/s로 남쪽에서 북쪽으로 일정하게 같은 방향으로 불 때를 택하여 대기가 안정할 때와 같은 측정 방법으로 지표면에서 높이 2m와 4m에서 남과 북의 암소음도와 측정소음도를 얻었으며, 반대로 바람이 북쪽에서 남쪽으로 평균 3.4m/s로 일정하게 한 방향으로 불 때를 선택하여 동일한 측정을 행하였다.

소음원에 대한 음향출력과 주파수성분을 파악하기 위해서 Fig. 5와 같이 B&K 2035 신호분석기에

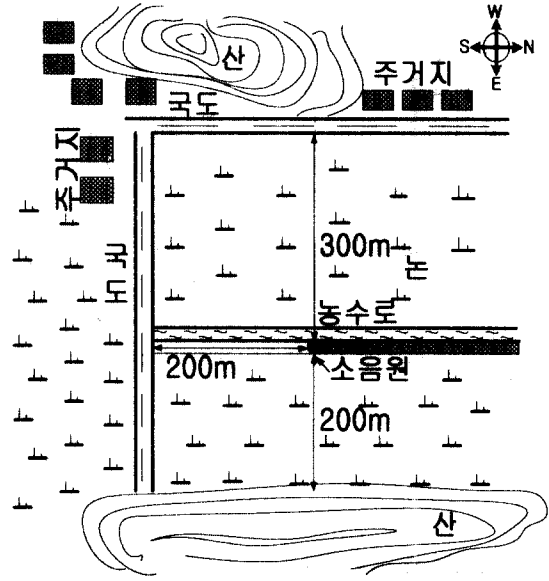


Fig. 4 The site map of the measurement

B&K 마이크로폰을 연결하여 반구면 표면에 해당하는 지점에서의 소음원 신호에 대한 측정을 하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4-1. 음원의 주파수 특성

Fig. 6은 소음원으로부터 동쪽 1m 떨어진 점에서 측정된 소음원 신호에 대한 PSD이다. 주파수 범위는 0 Hz에서 25.6 kHz까지이며, 주파수 분해능은 32 Hz이다. 736 Hz와 1472 Hz부근에서 특정주파수가 나타날 뿐 여타 다른 주파수에서는 특정주파수가 드러나지 않음을 발견할 수 있고 대부분의 에너지가 5 kHz 이하의 저주파수 대에 집중되어 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 측정 주파수범위가 0 Hz에서 3.2 kHz로 주파수 분해능을 4 Hz로 하여 주파수분석을 해본 결과로 소음원이 내는 주파수의 특징은 엔진에서 발생하는 금속 타격음과 마찰음에 기인한 기계의 대표적인 소음 예임을 알 수 있다.

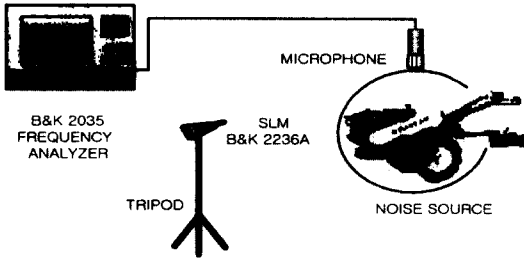


Fig. 5 Measurement setup for spectral analysis of the noise source

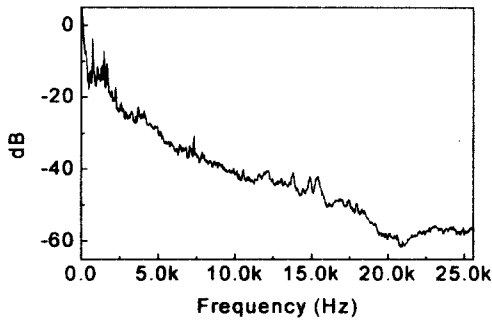


Fig. 6 PSD of noise source with frequency band of 25.6 kHz

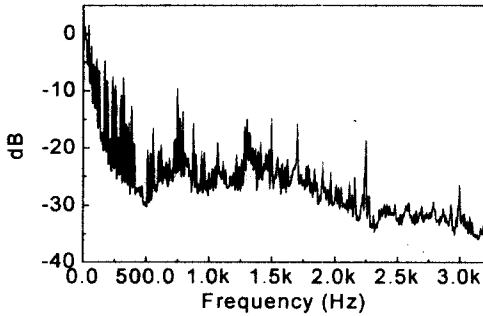


Fig. 7 PSD of noise source with frequency band of 3.2 kHz

#### 4-2 음원의 방향성

Fig. 8는 소음원을 중심으로 2m 반경의 반구면

표면에서 측정된 소음도에 대한 결과이다.

음향파위는 111 dB(A)로 추정되었고 남북 방향으로 약간의 방향성이 있는 것으로 밝혀졌다. 그러나 본 소음 측정 실험은 소음원의 방향성에 나란한 남북 방향의 측정 결과만을 이용하고 소음원으로부터 10m 이상의 원거리 수음점을 고려하므로 방향성의 효과가 실험 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단하였다.

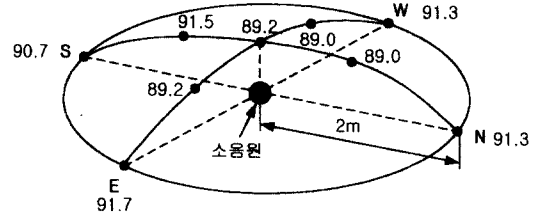


Fig. 8 Points of sound measurement to estimate the sound power of the noise source

#### 4-3. 실측 결과

Table 1과 Table 2는 거리에 따른 실측치와 이론치를 세 개의 범주에 대해서 각각 비교한 표이다. 특정 원거리에서의 소음도를 예측하기 위해 근거리 10m, 20m에서의 소음도 측정 결과를 이용하여 계산된 음원매개변수와 지표면계수를 추정하였다. 딱딱한 지표면에서의 측정 결과는 소음원에 대하여 측정점의 위치가 남쪽 방향이며 바람이 잔잔할 때의 경우  $Q_0=2.63 \times 10^{10}$ ,  $\gamma_0=3.73 \times 10^{-3}$ , 바람의 방향이 북풍일 때,  $Q_1=3.09 \times 10^{10}$ ,  $\gamma_1=7.11 \times 10^{-3}$ , 남풍일 때,  $Q_2=3.09 \times 10^{10}$ ,  $\gamma_2=3.34 \times 10^{-3}$  로 추정되었으며, 측정점의 지표상 높이가 4m 일 경우에는  $Q_1=4.57 \times 10^{10}$ ,  $\gamma_1=7.13 \times 10^{-3}$  이었다.

Table 2의 결과는 측정점의 위치가 소음원에 대하여 북쪽일 경우이며 지표면이 휴경지의 논으로 건초가 덮혀 있는 경우이다. 바람이 잔잔할 때의 경우  $Q_0=4.37 \times 10^{10}$ ,  $\gamma_0=2.31 \times 10^{-3}$ , 바람이 남풍일 때,  $Q_1=4.79 \times 10^{10}$ ,  $\gamma_1=6.02 \times 10^{-3}$ , 바람이 북풍일 때,  $Q_2=3.89 \times 10^{10}$ ,  $\gamma_2=6.93 \times 10^{-3}$ , 측정점의 높이가 지면으로부터 4m일 때, 그리고 바람이 북풍일

때  $Q_2=6.03 \times 10^{10}$ ,  $\gamma_2=7.43 \times 10^{-3}$  로 추정되었다. 위의 결과들로 미루어 볼 때 높이 1m에서는 비교적 작은 오차범위로 이론치와 실측치가 비슷한 결과를 보이고 있으나 높이 4m에서의 이론치와 실측치는 오차가 1m보다도 높게 나와 지표면의 효과가 작게 작용하고 있음을 볼 수 있다.

Table 1. Comparison of measured and predicted noise level on the hard ground

단위 : dB(A)

	Calm Atmosphere		downward refraction		upward refraction	
	M	P	M	P	M	P
	10m	78.1	78.1	78.1	78.1	-
20m	71.3	71.3	70.4	70.4	-	-
30m	65.5	66.7	64.3	65	63.7 (69.2)	63.7 (69.2)
50m	58.0	60.0	58.9	57.3	55.9 (63.3)	55.9 (63.3)
75m	-	-	-	-	47.5 (52.5)	49.3 (50.0)

Table 2. Comparison of measured and predicted noise level on the hard ground

단위 : dB(A)

	Calm Atmosphere		downward refraction		upward refraction	
	M	P	M	P	M	P
	10m	75.8	75.8	76.5	76.5	76.1 (78.5)
20m	68.6	68.6	69.4	69.4	68.2 (72.1)	68.2 (72.1)
30m	61.9	63.6	63.1	64.5	63.4 (67.1)	62.6 (68.0)
50m	55.3	56.4	59.9	57.3	58.2 (61.0)	54.8 (62.2)

## 5. 결론

본 연구는 지표면 효과와 바람의 영향을 고려한 근접지점의 소음도를 이용하여 원거리의 소음도를 예측하는 이론식을 제시하였으며 그 유용성을 실험적으로 파악하였다. 음원분석결과 미소한 지향성

이 관측되었으나 실제 계측 거리를 고려할 경우 그 효과가 그다지 크지는 않으리라는 가정을 하였으나 음원매개변수와 지표면계수의 추정시 약간의 오류가 있었을 것으로 판단된다.

지표면의 효과를 반영한 소음도 예측 식은 음원매개변수와 지표면계수의 값을 추정하기 위하여 사용되는 실제 계측 결과들이 측정점의 위치가 높은 경우에는 정확도가 떨어진다는 것을 알 수 있었다.

본 논문의 결과는 실제 환경 소음의 경우 소음원이 어느 정도의 방향성을 가지고 있으며 측정 시간에 걸쳐 바람의 방향이 일정하게 한쪽 방향으로 불지 않는다는 현실적 제약이 있음에도 불구하고 비교적 정확한 범위 내에서 특정 소음원에 의한 소음도를 예측할 수 있는 방법을 제시했다고 볼 수 있다.

## 6. 참고문헌

- (1) R. Makarewicz 1989, "Near Grazing Propagation above a Soft Ground," Journal of the Acoustical Society of America, 82, pp. 1706-1711
- (2) K. Attenborough, 1988, "Review of Ground Effects on Outdoor Sound Propagation from Continuous Broadband Noise," Applied Acoustics, 24, pp. 289-319.
- (3) K. Attenborough, et. al., 1995, "Benchmark Cases for Outdoor Sound Propagation Models, Journal of the Acoustical Society of America, 97, pp. 173-191.
- (4) R. Makarewicz, 1999, "Industrial Noise from a Point Source," Journal of Sound and Vibration, 220(2), pp.193-201
- (5) Douglas D. Reynolds, 1981, "Engineering Principles fo Acoustics : Noise and Vibration Control," Allyn and Bacon, Inc., pp. 542-547
- (6) G. S. Anderson and U. J. Kurze, 1992, "Outdoor Sound Propagation : Noise and Vibration Control Engineering," LEO. L. Berank and I. L. Ver, editors Wiely, New York, pp. 113-141
- (7) T. F. W. Embleton, 1996, "Tutorial on Sound Propagation Outdoor," Journal of the Acoustical Society of America, 100, pp. 31-48.