

모형축척 실험에 의한 유한길이 방음벽의 음향특성 연구

°황철호* · 정성수*

A Study on the Acoustical Characteristics of the Finite Noise Barrier by a Scale Model Test

Cheol-Ho Hwang, Sung-Soo Jung

ABSTRACT

The pressure level and the insertion loss at the receiving point behind finite length noise barriers are measured in an anechoic room by scale model test. The measured sound pressure level which are conducted under the several experimental conditions such as the length of the noise barrier, the distance between the noise barrier and the receiving point, the number of noise barriers, and the existence of the reflective building behind receiving point) and the insertion loss of a noise barrier having simple shape are well agreed with theoretical calculation which is based on Lam's model.

1. 서론

육상 교통 수단에서 발생하는 소음을 저감하기 위해서는 근본적으로 소음원 자체인 차량에 대한 감음 연구가 1차적으로 이루어져야 가장 효과적이지만 여기에는 한계가 있기 때문에 2차적으로 소음의 전파경로를 적절히 차단하는 방법을 강구하게 된다. 2차적 소음 차단 방법으로 가장 대표적인 방법은 방음벽을 설치하는 것이다. 방음벽 뒤 수음점에서의 정확한 음장 예측을 위한 연구가 지난 반세기 동안 계속되어 왔으며, 그 결과 비교적 정확한 해석[1~5]이 가능해졌다. 그런데 정확한 음장 해석을 위해서는 복잡한

적분식을 풀어야 하기 때문에 계산 시간이 많이 소요되므로 광대역의 주파수 구간과 수음점이 많은 경우에는 적용하기가 곤란하다.

방음벽은 실제 유한한 길이임에도 불구하고 유한 길이 방음벽에 대한 회절음 연구는 그리 많지 않은 실정이다. Terai[3], L'Esperance[4] 그리고 Pirinchieva[5] 등은 유한 길이 방음벽에 대해 비교적 정확한 이론적 해석을 제시하였지만 이들 해석 역시 복잡한 적분을 포함하고 있다. 국내에서는 김동일 등[6]이 유한 길이 방음벽에 대한 연구를 하였는데, 수음점에서의 음압 측정을 1/3-옥타브 중심 주파수로 국한하였다.

실용적으로 가장 널리 활용되는 방음벽 감음량 해석 방법은 Maekawa[7]의 해석으로, 음향 에너지 측면에서는 실험치와 잘 일치하지만, 여

* 한국표준과학연구원 음향진동그룹

러 경로를 통하여 수음점에 도달하는 회절음 사이의 경로차에 의한 간섭 효과는 예측할 수 없다는 단점이 있다. 한편, 최근에 Lam[8]은 Maekawa 모델의 단점을 보완하여 각 경로간의 간섭 효과까지도 포함하는 간단하면서도 실용적인 새로운 모델을 제시하고 방음벽 설치 전·후의 삽입손실 양을 예측한 바 있다. 그러나 Lam의 결과는 방음벽의 길이, 방음벽으로부터 수음점까지의 거리, 실험 주파수 영역 등이 짧은 경우에 국한된 것이다.

본 연구에서는 방음벽에 의한 회절음의 음향 특성에 대한 Lam의 해석이 다양한 실험조건에까지 확대 적용될 수 있는지를 확인하기 위하여 방음벽 뒤 수음점에서의 음압레벨을 모형 측정 실험으로 측정하고 Lam의 모델을 응용한 이론적 예측치와 비교하였다. 광대역의 주파수 구간 100 Hz~20 kHz에 대해 방음벽의 길이, 방음벽과 수음점간 거리, 방음벽의 개수 변화 및 수음점 뒤에 반사형 구조물을 설치한 경우 등 다양한 조건에 대해 음압레벨을 측정하고 Lam의 모델을 응용한 이론적 예측치와 비교하였다. 또한 간단한 상단부 형상의 방음벽에 대해 방음벽 설치 전·후의 음압레벨 차인 삽입손실을 측정하고 이론치와 비교하였다.

2. 기본 이론

Fig. 1과 같이 점 음원 S에서 발생된 음이 유한 길이의 방음벽을 만나게 되면, 음은 방음벽의 상단부와 측면으로 회절하여 수음점 R에 도달하게 된다. 가장 기본적인 회절 경로로서 상단부 경우 경로 4개, 측면 경우 경로 4개 등 총 8개의 경로를 가정할 수 있다. 상단부로는 '1'의 경로처럼 지표면에 반사되지 않고 음원에서 방음벽 상단부 그리고 다시 상단부에서 수음점에 이르는 경로, '2'와 '3'의 경로처럼 음원 혹은 방음벽 뒤 수음점의 지표면에 한번씩만 반사되는 경우 그리고 마지막으로 음원과 수음점의 지표면에 모두 반사되는 '4'의 경로가 있게 된다. 비슷한 방

법으로 측면으로 경로 '5'와 '6'처럼 음원에서 방음벽의 측면에서 회절된 후 수음점에 직접 도달하는 경로와 '7'과 '8'의 경로처럼 음원 지표면에 한번 반사된 후 수음점에 도달하는 경로를 포함하여 모두 4개의 경로를 고려할 수 있다.

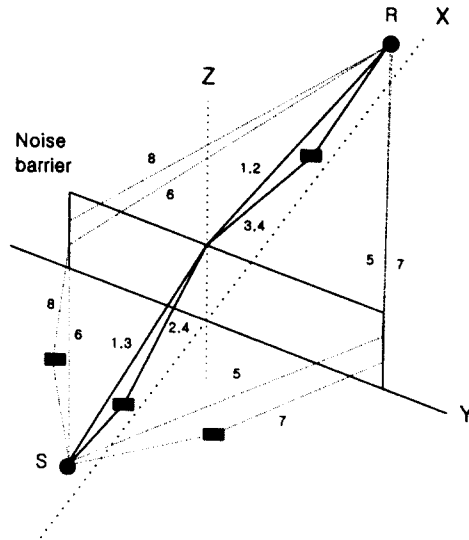


Fig. 1 Schematic diagram of the diffraction path geometry for a thin finite barrier.

한편, i 번째 경로로 회절되어 수음점에 도달하는 음압의 형태는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [8].

$$P_i = A_i Q_i e^{j\theta_i} e^{-jkd_i} \quad (1)$$

여기서 A_i 는 회절된 음의 크기, Q_i 는 i 번째 경로에서의 지표면에 의한 구면파 반사계수, θ_i 와 d_i 는 회절에 의한 위상변화와 경로의 길이를 각각 나타내며, k 는 음의 파수이다.

지표면의 상태를 고려한 수음점에서의 총 음압레벨은 8개의 회절경로에 의한 각각의 음압레벨의 합으로서 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} P_t &= 20 \log_{10} \left| \sum_{i=1}^8 P_i \right| \\ &= 20 \log_{10} \left| \sum_{i=1}^8 A_i Q_i e^{j\theta_i} e^{-jkd_i} \right| \end{aligned} \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

방음벽이 없는 경우, 수음점에서의 음압 P_o 는 음원에서 수음점으로 직접 전달되는 경로 d_o 의 직접파와 지표면에서 한번 반사된 후 수음점에 도달하는 경로 d_r 의 반사파의 합으로 구해지며, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_o = A_o e^{-jk d_o} \left[1 + Q_o \frac{d_o}{d_r} e^{-jk(d_r - d_o)} \right]. \quad (3)$$

Lam[8]은 A_i 를 Maekawa의 실험식에서 감음량(Attenuation, dB) M_i 와 관련지어 해석하였는데, 예를 들어 경로 '1'을 따라가는 회절음의 크기 A_1 에 대한 경로 i 의 회절음의 상대적인 크기는 경로 1의 회절음에 대한 감음량 M_1 과 경로 i 의 감음량 M_i 와 다음 관계가 있다.

$$\frac{A_i}{A_1} = \frac{10^{-M_i/20}}{10^{-M_1/20}}. \quad (4)$$

M_i 는 다음 식과 같은 Yamamoto[9]의 근사식을 사용할 경우 Maekawa의 실험치에 대해 최대 0.3 dB의 오차 이내로 정확하다.

$$M_i = \begin{cases} 10 \log N_i + 13 & N_i > 1, \\ 5 + 8N_i |N_i|^{-0.55 - 0.143|N_i|} & -0.3 < N_i < 1, \\ 0 & N_i < -0.3 \end{cases} \quad (5)$$

여기서 N_i 는 Fresnel 수(number)로서 i 번째 회절음의 경로인 d_i 와, 직접파의 경로인 d_o , 음의 파장 λ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$N_i = \frac{2(d_i - d_o)}{\lambda}. \quad (6)$$

일반적으로 회절음과 음원 사이의 위상 θ_i 는 같으며[1], 지표면이 모두 완전 반사형이라고 가정하면 구면파 반사계수 Q 를 1로 볼 수 있다. 이 경우 수음점에서의 음압레벨 P_{level} 과 방음벽 설치 전·후 음압레벨 차로 정의되는 삽입손실

(insertion loss) IL 은 다음 식으로 각각 나타낼 수 있다.

$$P_{level} = 20 \log_{10} \left| \sum_{i=1}^8 A_i e^{j\theta} e^{-jk d_i} \right| \text{ (dB)}, \quad (7)$$

$$IL = -20 \log_{10} |A_1| + 20 \log_{10} \frac{\left| 1 + \frac{d_o}{d_r} \exp[-jk(d_r - d_o)] \right|}{\left| \sum_{i=1}^8 \frac{A_i}{A_1} \exp[-jk(d_i - d_1)] \right|} \text{ (dB)}. \quad (8)$$

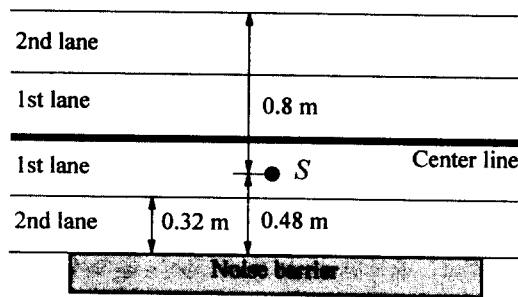
3. 실험 및 결과 분석

3.1 실험장치 및 방법

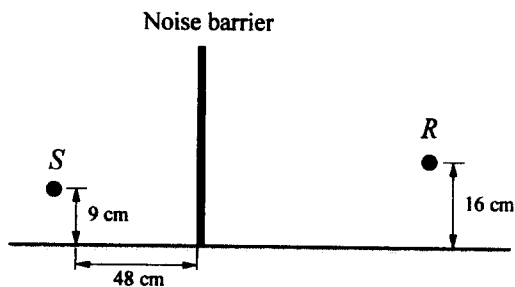
본 실험에서는 음원과 수음점의 지표면 상태를 아스팔트 혹은 시멘트 포장 도로처럼 딱딱하고 균일한 지표로 가정하고, 나무를 압축시킨(이하 '압축나무'로 칭함) 두께 0.02 m의 사각형 패널을 무향실(4.5×7×4.5 m³) 바닥에 4×7 m 크기로 설치하였다. 음원의 위치는 Fig. 2(a)에 나타낸 것과 같이 차선평이 3.2 m인 편도 2차선의 도로에서 방음벽 쪽 1차선 도로 중앙에 있는 것으로 설정하여 방음벽으로부터 0.48 m 떨어진 지점에 음원을 설치하였다. 기하학적 축척은 1/10로 하였다.

음원은 주파수 1,500 Hz에서 115 dB의 음압레벨을 출력할 수 있는 혼형(horn type) 확성기(SU-100EF, Sammi)를 사용하였으며, 점 음원의 특성을 나타내도록 하기 위해 출구에 내경이 2.5 cm이고, 두께가 0.5 cm인 길이 30 cm의 원통형 플라스틱 관을 부착하였다. 주파수 분석기(B&K 3550)와 증폭기(B&K 2706)를 사용하여 확성기에서 백색잡음을 발생시키고, 수음점에서 1/2 인치 마이크로폰(B&K 4165)을 사용하여 음압을 측정하고 주파수 분석기(B&K 3550)를 이용하여 100 Hz~20 kHz 대역에 대한 음압 스펙트럼을 구하였다.

방음벽은 일반적으로 높이 3 m를 기준으로 하기 때문에 본 실험에서는 높이를 0.3 m로 설정하고, 방음벽 길이는 1.61, 2.42, 4.03 m 등 세 가지로 하여 실험을 하였다. 본 연구에서는 반사형 방음벽을 대상으로 하므로 바다에 설치한 것과 같은 재질의 두께 2 cm 압축나무 패널로 모형 방음벽을 제작하였다. 음원은 소음도가 승용차에 비해 높은 중·대형차와 앞으로 운행 예정인 고속전철에 초점을 맞추어 등가 높이를 9 cm로 두고, 수음점의 높이는 사람 귀의 높이를 고려하여 16 cm로 하였다. 수음점은 편의상 방음벽 중앙 위치에서 방음벽으로부터 1 m 간격으로 떨어진 지점들로 하되, 무향실 크기 제약으로 인해 5 m 떨어진 지점까지만 수음점에서의 음압을 측정하였다. 본 실험은 1/10 축척이므로 이들을 실측치로 환산하면 방음벽의 높이는 3 m, 길이는 16.1, 24.2, 40.3 m이다. 음원과 수음점의 높이는 각각 90 cm, 160 cm이며, 수음점은 방음벽으로부터 최대 50 m 떨어진 지점에 해당된다.



(a)



(b)

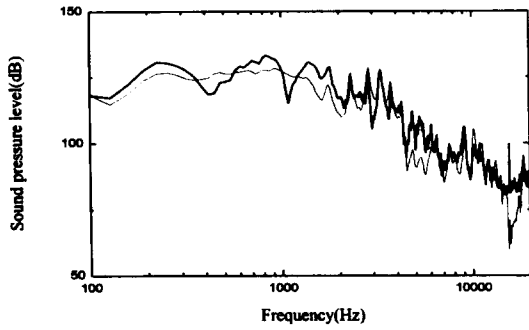
Fig. 2 Geometry for the point source S, noise barrier and receiver R. (a) Top view,

(b) Side view.

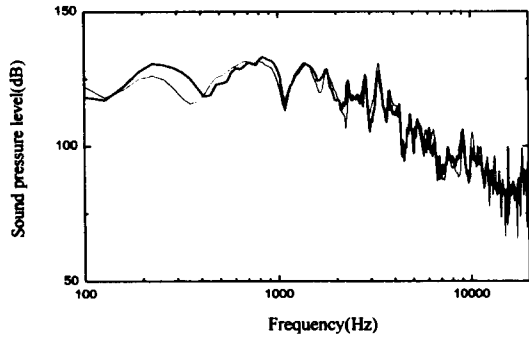
3.2 실험결과 및 분석

먼저 유한 길이의 방음벽이 설치된 경우에 대한 음의 전파 경로 해석을 위해 방음벽 길이를 변화시키면서 수음점에서의 음압레벨을 측정하고 이론 예측치와 비교하였다. Fig. 3(a)는 길이가 1.61 m이고, 높이가 0.3 m인 방음벽을 설치하고 방음벽으로부터 3 m 떨어진 수음점에서의 음압레벨 측정결과(굵은실선)와 이론 예측치(가는 실선)를 나타낸 것이다. 이 그림의 이론 예측치는 상단부로부터 음이 회절된다고 가정하여 네 개의 전파경로만을 고려하여 계산한 결과로서, 그림에서 저주파수 대역에서 음압레벨 이론치의 산과 골의 개수가 실험치에 비해 부족함을 알 수 있는데, 이것은 상단부를 경유하는 회절음 외에도 유한길이 방음벽의 양 측면을 경유하는 회절음의 영향을 무시할 수 없음을 나타내는 것이다. Fig. 3(b)는 동일한 조건에 대해 측면으로 회절되는 4개 경로의 음을 포함한 총 8개의 회절 경로를 고려하여 계산한 이론 예측치(가는 실선)와 측정치(굵은 실선)를 비교한 것으로 이제 실험치와 이론치가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 유한 길이의 방음벽 뒤 수음점에서의 음장은 기본적인 8개의 회절 경로를 고려하여 해석할 수 있음을 알 수 있다.

다음은 방음벽의 길이를 4.03 m로 더 길게 하고 Fig. 3과 같은 방법으로 3 m 떨어진 수음점에서 측정된 결과(굵은 실선)와 회절음을 고려한 이론 예측치(가는 실선)를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)의 이론치는 상단부에서의 회절음만을 고려하여 예측한 것으로 그림에 의하면 예측치가 실험치를 비교적 잘 기술하고 있음을 알 수 있는데 이것은 방음벽의 길이가 증가함에 따라 측면으로 회절한 음의 기여도가 상단부로 회절한 음에 비해 점점 줄어들게 되기 때문이다.

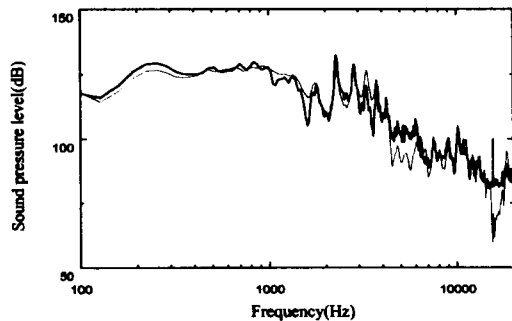


(a)

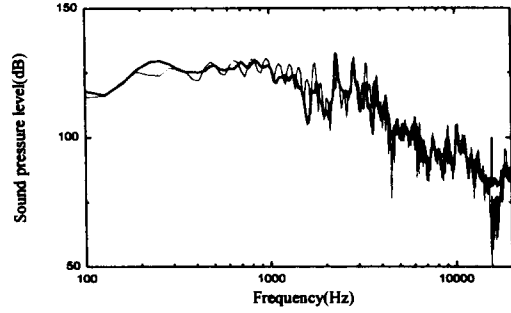


(b)

Fig. 3 Measured sound level(thick line) and predicted value (thin line) at a receiver 3 m away from the barrier. Barrier length=1.61 m, barrier height=0.3 m. The diffraction around the vertical barrier edges is considered in (b), but not in (a).



(a)



(b)

Fig. 4 Measured sound level(thick line) and predicted value(thin line) at a receiver 3 m away from the barrier(length= 4.03 m, height=0.3 m). The diffraction around the vertical barrier edges is considered in (b), but not in (a).

방음벽으로부터 수음점까지의 거리 변화에 따른 음압레벨의 변화를 보기 위해 길이 2.42 m, 높이 0.3 m인 방음벽을 설치하고, 방음벽으로부터 1 m 떨어진 수음점과 5 m 떨어진 수음점에서의 음압레벨 측정값(굵은실선)과 이론 예측값(가는 실선)을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 예측값은 상단부와 측면부의 8개 회절 경로를 모두 고려하여 계산하였다. 그림에서 실험치와 이론치가 모두 잘 일치함을 알 수 있다.

다음은 반사형 방음벽이 음원 양쪽에 설치되어 있는 경우에 대한 효과를 살펴보았다. 일반적으로 반사형 방음벽이 음원 양쪽에 설치되면, 실제 음원 외에 지표면과 방음벽에 의한 영상음원의 수가 증가함으로써 수음점에서의 음압레벨의 증가가 예상된다. Fig. 6(a)는 음원과 수음점 사이에 반사형 방음벽(길이 2.42 m, 높이 0.3 m)이 설치된 경우에 대한 결과이며, Fig. 6(b)는 음원 양쪽에 같은 종류의 방음벽이 설치된 경우에 대한 결과로서 이 때 수음점 반대쪽의 방음벽은 음원으로부터 0.8 m 떨어진 지점에 설치하였다.

그림으로부터 반사형 방음벽을 음원 양쪽에 설치한 경우가 한쪽에만 설치한 경우에 비해 수음점에서의 음압레벨이 거의 전 주파수 대역에

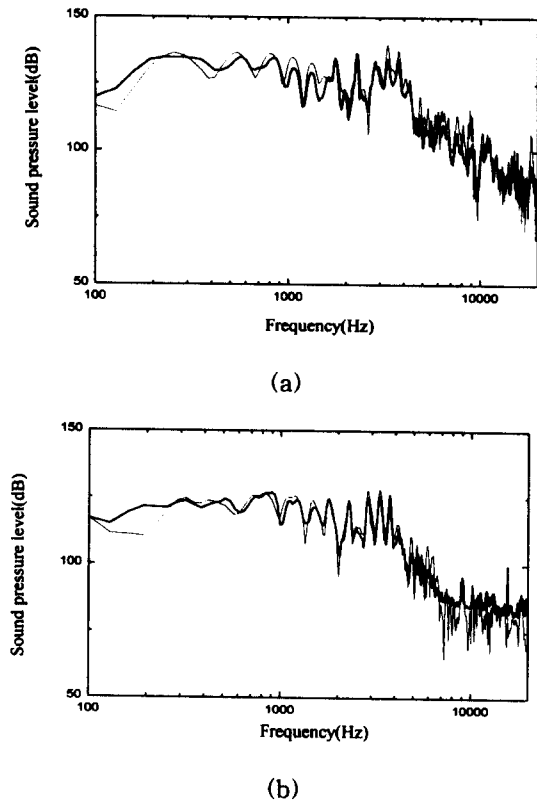


Fig. 5 Measured sound levels(thick line) and predicted values(thin line) at a receiver (a) 1 m away, (b) 5 m away from the barrier(length=4.03 m, height=0.3 m).

결쳐 증가함을 알 수 있으며, 따라서 음원 양쪽에 반사형 방음벽을 설치하는 것은 바람직하지 않음을 알 수 있다. 한편, Fig. 6(b)의 이론치(가느 실선)는 추가로 설치된 수음점 반대쪽의 방음벽에 의한 효과는 고려하지 않고 수음점 쪽의 방음벽만을 고려한 것이므로 이론치가 실험치를 잘 기술하지 못하고 있다. 특히 2 kHz 이하의 주파수 영역에서 실험치가 이론치보다 산과 골의 개수가 더 많음을 알 수 있는데 이것은 수음점 반대쪽 방음벽에서의 반사음에 의한 영향으로서, Fig. 6(a)에서 고려한 8가지 경로 외에 반사음에 의한 긴 회절경로가 발생함으로 인해 더 많은 산과 골이 발생하게 되기 때문이다. 따라서 음원 뒤에 반사형 방음벽이나 구조물이 있는 경

우 이들에 의한 반사음이 수음점 앞 방음벽에서 회절되는 경로를 추가로 고려해야 한다.

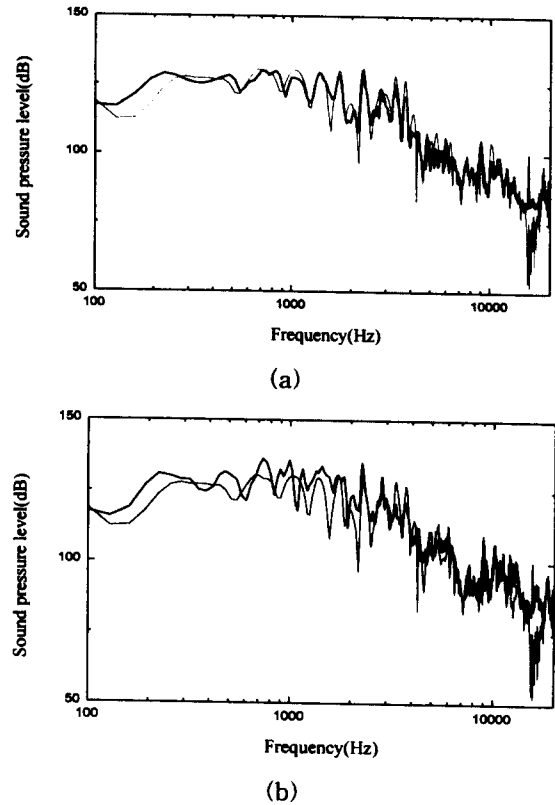
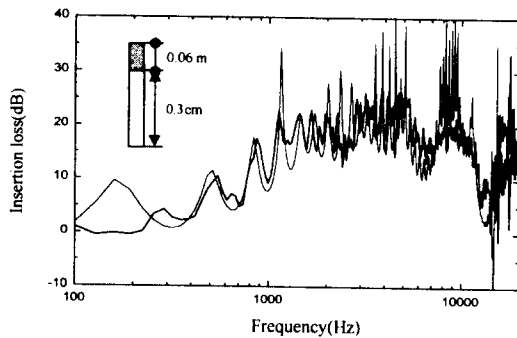


Fig. 6 Measured sound levels(thick line) and predicted values(thin line) at a receiver 3 m away from the barrier. (a) Single barrier in front of the receiver. (b) parallel barriers at both sides of the source.

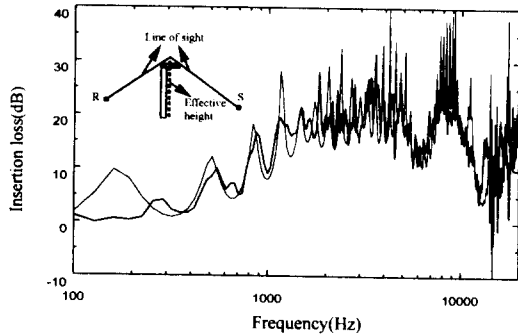
다음은 도심 지역에 대한 모델링으로서 수음점 뒤에 빌딩이 있는 경우를 고려하여 수음점 뒤에 압축나무 패널을 설치하여 그 효과를 살펴 보았다. 수음점 뒤에 빌딩같은 반사형 건물이 존재하는 경우 앞서의 8개 회절 경로 외에 Fig. 7과 같이 세 개의 추가 회절경로를 고려할 수 있다. 즉, 방음벽 상단부와 양쪽 측면의 두 점을 반사체에 대한 수음점의 영상점(IR)을 잇는 선이 반사체 표면과 만나는 점에서 반사되어 수음

다음은 길이 2.42 m, 높이 0.3 m인 방음벽에 두께가 2 cm, 폭 6 cm인 압축나무 패널을 수직 방향과 수평방향으로 추가 설치한 후, 3 m 떨어진 수음점에서 방음벽 설치 전·후의 삽입손실을 살펴보았다. 그림 9(a)는 폭 6 cm인 패널을 수직으로 세워 방음벽 높이가 0.36 m되게 한 경우에 대한 결과이며, 그림 9(b)는 패널을 수평으로 설치하여 음원 방향으로 상단부가 4 cm 가량 튀어나오게 한 경우에 대한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 굵은 실선은 삽입손실 측정치를 나타내며, 가는 실선은 식 (8)에 의한 이론 예측치를 나타낸다. 두 그림에서 볼 수 있듯이

실험치와 예측치가 잘 일치하고 있는데, 2~10 kHz의 주파수 구간에서 그림 9(b)의 삽입손실 측정치가 그림 9(a)보다 다소 높게 나오는 것을 알 수 있다. A-보정 음압레벨로 약 1 dB(A) 정도의 차이가 발생하는데 이것은 같은 크기의 패널을 추가로 설치하는 경우 높이를 높이는 방향보다는 수음점을 향하여 수평으로 설치하는 것이 수음점에서의 감음효과가 더 좋음을 나타내는 것이다. 그림 9(b)의 경우, Maekawa[7] 방법과 같이 방음벽 상단부의 수평패널 끝 부분과 수음점을 잇는 시야선(line of sight)을 고려하면, 수평패널은 방음벽의 높이를 실제 패널 높이보다 3 cm만큼 더 높이는 효과를 가지게 되므로 이론해석시 이러한 유효길이를 감안하여 계산하였으며, 측정치와 이론치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 방음벽 상단부 형상이 비교적 단순한 경우에도 패널 밑 부분에서의 음장분포가 복잡하기 때문에 상단부 회절음에 대한 정확한 해석은 어렵다. 이러한 경우 그림 9(b)와 같이 Maekawa의 시야선을 이용한 근사방법을 활용한 해석이 더 효과적이라 할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 9 Measured sound levels(thick line) and predicted values(thin line) at a receiver 3 m away from the barrier(length=2.42 m, height=0.3 m) with an extra pannel (a) vertically, (b) horizontally on the top of the barrier.

4. 결론

본 연구에서는 유한 길이의 방음벽이 설치된 경우 수음점에서의 음압레벨 및 삽입손실을 모형 축적 실험으로 측정하고 Lam의 모델을 응용한 이론치와 비교하였다. 실험결과 유한 길이 방음벽의 경우 상단부와 측면으로 회절되는 총 8개의 기본적인 경로만으로 수음점에서의 음압레벨을 충분히 기술할 수 있으며, 방음벽의 길이가 증가함에 따라 측면으로 회절되는 음의 효과는 무시할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 반사형 방음벽을 음원 앞·뒤에 동시에 설치하는 것은 음원 앞에만 방음벽을 설치하는 경우에 비하여 수음점에서의 음압레벨을 증가시키게 됨을 확인하였다.

수음점 뒤에 반사형 건물이 존재하는 경우는 반사체와 방음벽간의 다중 반사와 음 에너지의

확산효과로 인하여 수음점에서의 소음레벨이 반사체가 없는 경우보다 증가하였다. 방음벽 위에 추가적으로 패널을 설치할 경우 수직보다는 수평방향으로 설치하는 것이 더 효과적임을 삽입손실 측정치를 통하여 확인하였다. 본 실험을 통하여, Lam의 모델은 다양한 실험조건과 광대역의 주파수 영역에 걸쳐 유한 길이의 방음벽에 의한 회절음 특성 연구에 효과적임을 확인하였다.

참고문헌

- [1] A. D. Pierce, J. Acoust. Soc. Am. 55, 941 (1974).
- [2] U. J. Kurze, J. Acoust. Soc. Am. 55, 504 (1974).
- [3] T. Terai, J. Sound Vib. 69, 71 (1980).
- [4] A. L'Esperance, J. Acoust. Soc. Am. 86, 179 (1989).
- [5] R. Pirinchieva, J. Acoust. Soc. Am. 87, 2109 (1990).
- [6] 김동일, 강병용, 김예현, 장호경, 응용물리 9, 587 (1996).
- [7] Z. Maekawa, Appl. Acoust. 1, 157 (1968).
- [8] Y. W. Lam, Appl. Acoust. 42, 29 (1994).
- [9] K. Yamamoto and K. Takagi, Appl. Acoust. 37, 75 (1992).