

〈논 문〉

경계요소법을 이용한 방음벽의 삽입손실 해석

Analysis on the Insertion Loss of a Noise Barrier by the Boundary Element Method

이 우 섭* · 정 성 수* · 황 철 호**

Woo Seop Lee, Sung Soo Jung and Cheol-Ho Hwang

(1999년 11월 29일 접수 : 2000년 4월 21일 심사완료)

Key Words : BEM(유한요소법), Noise Barrier(방음벽), Insertion Loss(삽입손실), Reduced Scale Model Test(축척 모형실험)

ABSTRACT

This paper investigates the use of boundary element method(BEM) to analyze the insertion loss of a noise barrier. To begin with, the validity of the BEM for the analysis of noise barrier insertion loss is checked by both Lam's theoretical method and the measurements in the anechoic chamber for the scale-down models. Through simulation it is shown that using 2D BEM model is sufficient to the analysis for the barrier with large ratio of length to height. By using 2D BEM model, the insertion losses are predicted for the real noise barriers in several cases, which are the case that they are built parallel on both roadsides, the one that there are multiple sound sources, and the one that there is a gap between a concrete structure and a barrier plate.

1. 서 론

교통소음으로 인한 환경소음 저감 대책으로 여러 가지 다양한 시도가 계속되고 있으나, 현재까지도 투자 대 효과가 가장 높고, 구현하기가 가장 쉬운 방법은 역시 방음벽에 의한 소음저감 대책이며, 방음벽에 대한 다양한 연구가 지속되고 있다^(1~3). 방음벽의 설치 효과를 극대화하기 위해서는 방음벽 뒤 수음자 위치에서의 정확한 음장 해석이 선행되어야 하며, 이를 통해서 최적의 방음벽 사양을 도출할 수 있다. 방음벽에 의한 설치 효과를 평가하기 위한 다양한 해석 방법들이 시도되었는데, 아직까지 가장 실용적으로 널리 사용되고 있는 것은 Maekawa의 실험식⁽⁴⁾이다. 그러나 Maekawa의 실험식은 에너지 관점에서는 실험값과

잘 일치하나, 회절음 간의 경로 차에 의한 간섭효과를 기술할 수 없는 단점을 가지고 있다. Lam⁽⁵⁾은 이러한 Maekawa 실험식의 단점을 보완하여 각 경로간의 간섭 효과를 포함하는 간단하고 실용적인 새로운 모델을 제시하고, 방음벽 설치 전·후의 삽입손실을 예측하였다. 그러나 Lam 모델은 방음벽 상단부에서의 회절음 감소를 위해 부착하는 다양한 형상들에 대한 삽입손실 해석은 불가능하다. 최근들어 컴퓨터의 고성능화에 따라 음의 파동이론에 기초한 경계요소법(BEM : boundary element method)의 방음벽 해석 적용^(6~8)이 활발해지고 있다. 경계요소법을 이용한 방음벽 삽입손실 해석은 다양한 형상과 음향특성을 가진 복합 방음벽까지도 해석할 수 있다는 점에서 적용이 활성화될 것으로 기대되나 아직 국내에서는 경계요소법을 이용한 방음벽 해석은 드문 실정이다.

본 연구에서는 방음벽의 삽입손실을 경계요소법을 이용하여 해석하였다. 먼저 경계요소법 적용의 타당성을 위해, 1/10 축척 모형을 선정하고 이 모형에 대해 삽입손실 측정

* 정희원, 한국표준과학연구원 음향·진동그룹

** 정희원, 한남대학교 기계공학과

값과 이미 타당성이 입증된⁽⁹⁾ Lam 모델 적용 결과를 함께 비교하였다. 그리고 실제적인 방음벽 설치환경을 고려하여 몇 가지 전형적인 설치환경에 대해 2차원 경계요소법을 적용하여 삽입손실을 계산하고 분석하였다.

2. 기본 이론

2.1 Lam 모델

점 음원 S에 의한 수음점 O에서의 음압계산을 위해서는 Fig. 1과 같이 점음원 S에서 유한길이 방음벽을 거쳐 수음점 O에 이르는 기본적인 8개의 기하학적 경로를 고려하게 된다. 전파 경로 i 를 따르는 회절음에 의한 수음점에서의 음압은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$p_i = A_i Q_i e^{j\theta_i} e^{-jk d_i} \quad (1)$$

여기서 A_i 는 회절음의 크기, Q_i 는 음의 전파 경로 i 에서 지표면에 의한 반사 영향을 나타내는 구면파 반사계수, θ_i 는 회절에 의한 위상 변화, d_i 는 음의 전파 경로 거리이며, k 는 음의 파수이다.

Fig. 1에 나타난 8개의 전파경로를 모두 고려하면, 수음점에서의 음압 레벨은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} p_i &= 20 \log_{10} \left| \sum_{i=1}^8 p_i \right| \\ &= 20 \log_{10} \left| \sum_{i=1}^8 A_i Q_i e^{j\theta_i} e^{-jk d_i} \right| \end{aligned} \quad (2)$$

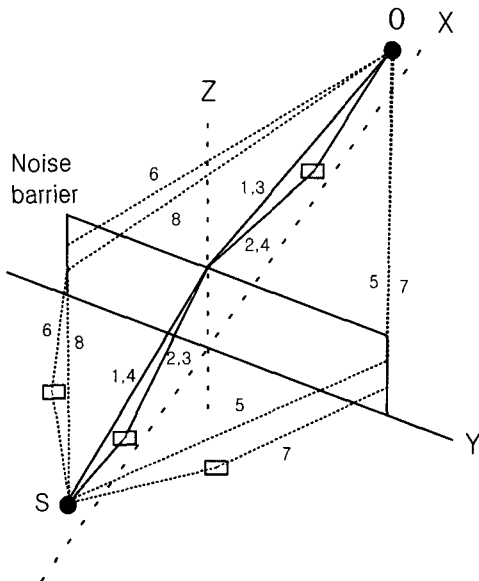


Fig. 1 Diffraction paths for a finite barrier geometry

방음벽이 없는 경우에는 음원에서 대기 중으로 수음점에 직접 전파되는 직접음과 지표면에서 반사된 후 수음점에 도달하는 반사파의 합에 의해 수음점에서의 음압이 결정된다. 음원과 수음점 사이의 최단 거리를 d_o , 반사파의 경로 거리를 d_r 이라 하면, 수음점에서의 음압은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

일반적으로 회절음과 음원간의 위상 θ_i 는 같으며⁽¹⁰⁾, 지표면을 완전 반사형이라 가정하면 구면파 반사계수 Q_o 는 1로 대체할 수 있다. 이로부터 방음벽 설치 전·후 음압 레벨의 차이로 정의되는 삽입손실(insertion loss) IL 을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다⁽⁵⁾.

$$\begin{aligned} IL &= 10 \log_{10} \left| \frac{A_o}{A_1} \right|^2 \\ &+ 10 \log_{10} \frac{\left| 1 + Q_o \left(\frac{d_o}{d_r} \right) e^{-jk(d_r - d_o)} \right|^2}{\left| \sum_{i=1}^8 \left(\frac{A_i}{A_1} \right) Q_i e^{-jk(d_i - d_o)} \right|^2} \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서 A_i 는 감음량과 관련된 값으로 본 논문에서는 Yamamoto의 근사식⁽¹¹⁾을 사용하였는데, 이것은 직접음과 회절음 사이의 경로차와 음의 파장과의 관계적인 Fresnel 수의 함수이다⁽⁵⁾. 사용의 편의성으로 인해 공학적으로 널리 사용되어 온 Maekawa 모델이 주파수에 따른 회절음 사이의 간섭효과를 고려하지 못하는 데 비해, 위의 식 (4)는 주파수에 따른 간섭효과를 포함하고 있다.

2. 경계요소법(BEM)

위치 r_o 의 점 음원으로부터 r 만큼 떨어진 수음점에서의 음압 $p(r, r_o)$ 는 식 (5)와 같이 Helmholtz 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 p + k^2 p = -q \cdot \delta(r - r_o) \quad (5)$$

여기서 q 는 점 음원의 세기이며, $\delta(r - r_o)$ 는 Dirac 함수이다.

식 (5)의 Helmholtz 방정식의 해는 Green 함수 G 로서, 3차원 점 음원의 경우 $G(r, r_o) = e^{-jk|r - r_o|} / 4\pi|r - r_o|$ 이며, 2차원 선 음원의 경우 $G(r, r_o) = -jH_0^{(2)}(k|r - r_o|) / 4$ 이다. 여기서 $H_0^{(2)}$ 는 제 2차 0종 Hankel 함수이다.

음원과 수음점 사이에 방음벽이 있는 경우, 수음점에서

의 음압은 음원에 의한 직접파와 방음벽 표면으로부터의 기여도에 대한 경계 적분 방정식으로 Helmholtz 방정식을 재구성하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon(r)p(r, r_o) = G(r, r_o) \\ - \int_s \left[G(r, r_s) \frac{\partial p(r_s, r_o)}{\partial n(r_s)} \right. \\ \left. - p(r_s, r_o) \frac{\partial G(r, r_s)}{\partial n(r_s)} \right] ds \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 r_s 는 방음벽 경계 요소 ds 의 위치 벡터이며, n 은 ds 의 바깥으로 향하는 단위 접선 벡터, $\epsilon(r)$ 은 수음점의 위치에 의존하는 값이다⁽⁶⁾.

만일 방음벽의 표면 임피던스가 수직 방향으로의 임피던스만으로 나타낼 수 있는 국소적 반작용(locally reacting) 표면이라면, 위의 식 (6)에서 괄호 안의 첫 번째 항 $\partial p(r_s, r_o) / \partial n(r_s)$ 는 $jk\beta p(r_s, r_o)$ 로 간단히 쓸 수 있다. 여기서 β 는 방음벽 표면의 어드미턴스이다. 따라서 식 (6)은 다음 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} \epsilon(r)p(r, r_o) = G(r, r_o) \\ - \int_s p(r_s, r_o) \left[jk\beta G(r, r_s) - \frac{\partial G(r, r_s)}{\partial n(r_s)} \right] ds \end{aligned} \quad (7)$$

이제 식 (7)의 면 적분을 수치적으로 계산하기 위해 m 개의 요소들로 나누고 이들 각 요소들에 대한 음압이 상수라고 가정하면 m 개의 선형 방정식으로부터 수음점에서의 음압을 구할 수 있다.

3. 방음벽 삽입손실 해석

3.1 축척 모형에 대한 삽입손실 해석

방음벽 삽입손실 해석을 위한 경계요소법 적용의 타당성을 검토하기 위해 축척 모형을 대상으로 경계요소법 해석 결과와, Lam 모델에 의한 해석 결과, 축척 모형 실험에 의한 측정 결과 등 세 값을 비교, 검토하였다. 축척 모형 실험은 한계 주파수가 70 Hz인 무향실($4.5 \times 7 \times 4.5 \text{ m}^3$)에서 1/10 축척을 적용하여 수행하였다. 지표면은 딱딱한 시멘트 포장이라고 가정하여 잔향실 바닥에 두께 20 mm인 압축 나무를 면적 $4 \times 7 \text{ m}^2$ 이 되도록 설치하였고 방음벽 모형도 같은 재질을 사용하였다. 음원은 점음원으로 만들기 위해 혼형 확성기(SU- 100EF, Sammi, 감음도: 1 W/m)의 출구에 내경이 25 mm인 길이 30 cm의 원통형 프라스틱 관(두께 5 mm)을 부착하였다. 실험에 사용한 소음은 주파수

분석기(B & K 3550)에서 발생된 백색잡음을 신호증폭기(B & K 2706)에서 증폭시킨 후 확성기를 통해 출력시켰다. 방음벽 뒤 수음점 위치에 설치된 1/2-인치 마이크로폰(B & K 4165, 감음도: 50 mV/Pa)에서 측정된 신호는 주파수 분석기를 이용하여 음압 스펙트럼을 분석하였다.

Fig. 2에 나타낸 것처럼 편의상 음원의 높이 S_h 는 상대적으로 소음이 심한 대형트럭을 가정하여 9 cm로 하고, 수음점의 높이 O_h 는 귀의 높이를 고려하여 16 cm로 설정하였다. 방음벽 모형은 높이 B_h 가 30 cm이고, 길이 b_L 이 1.61 m와 4.03 m인 두 경우를 대상으로 하였다. 또한 방음벽 모형과 음원 사이의 거리 S_d 를 47 cm로 하고, 수음점은 방음벽으로부터 1 m인 지점과 5 m인 지점을 대상으로 하였다.

이론 모델은 상용 프로그램인 SYSNOISE(rev. 5.3)⁽¹²⁾와 ANSYS(rev. 5.4)⁽¹³⁾를 이용하여 충분한 개수의 요소로 방음벽을 분할하고, 방음벽과 지표면은 단단한 경계조건을 가정하여 속도의 법선 성분이 0인 Neumann 경계조건을 갖도록 하였으며, 흡음형 방음벽에서는 흡음처리 부분의 어드미턴스 계수를 1로 설정하였다.

Fig. 3은 방음벽 모형의 길이가 4.03 m일 때 두 수음점 위치에서의 삽입손실을 세 가지 방법으로 구하여 비교한 것이다. 그림에서 축척 모형 실험에 의한 측정값은 굵은 실선으로, 2 차원 경계요소법(BEM) 해석에 의한 계산 결과는 가는 실선으로, Lam 모델에 의한 해석결과는 점선으로 나타내었으며, Maekawa에 의한 삽입손실은 점(●)으로 표시하였다. 그림으로부터 경계요소법과 Lam 모델에 의한 계산결과가 측정값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다.

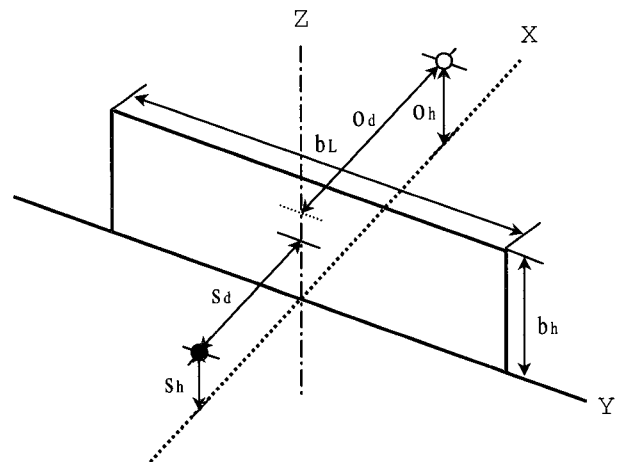


Fig. 2 Geometrical parameters for a finite noise barrier

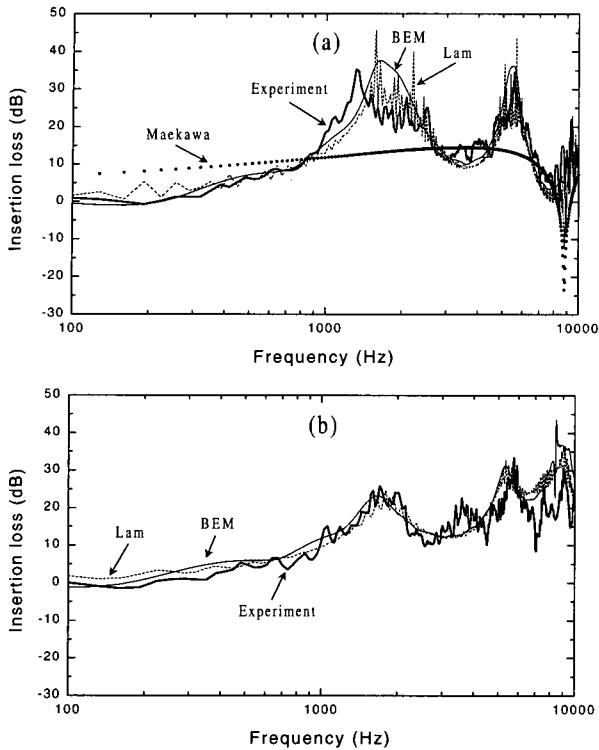


Fig. 3 Measured(thick solid line) and calculated (2-D BEM: thin solid line, Lam: dotted line, ●: Maekawa) insertion loss spectra for the noise barrier ($b_L=4.03$ m, $b_h=0.3$ m, $S_h=0.09$ m, $S_d=0.47$ m, $O_h=0.16$ m). (a) $O_d=1$ m, (b) $O_d=5$ m.

경계요소법과 Lam 모델의 이론 예측치를 비교하면, 경계요소법에 비해 Lam 모델이 주파수에 따른 삽입손실 변화를 더 잘 나타내고 있는데 이것은 Lam 모델이 3 차원 모델인데 비해 경계요소법 결과는 2 차원 해석으로 하였기 때문이다. 즉, 2 차원 경계요소법 해석은 방음벽의 길이가 높이에 비하여 충분히 긴 경우에 해당되므로 방음벽 측면에서의 회절은 무시되고 상단부에서의 회절음만 고려되어 회절음간의 간섭효과가 줄어들게 되기 때문이다. 그러나 실제 옥외에서 설치되는 방음벽은 높이에 비하여 길이가 상대적으로 충분히 긴 경우가 대부분이므로 2 차원 모델의 적용이 타당하다고 할 수 있다. Fig. 3(a)에서 Maekawa의 모델은 세부적인 주파수에 따른 삽입손실 변화를 기술하지 못하는 단점을 가지고 있지만 전반적인 평균치를 따라감을 확인할 수 있다. Fig. 3 에서 2차원 경계요소법 모델을 사용한 이유는 3 차원 모델이 2차원에 비해 모델링 요소 수가 크게 증가함에 따라 광대역의 주파수 스펙트럼을 구하기 위해서는 상당한 계산시간과 컴퓨터 저장 용량이 필요하기 때문이다.

3차원 경계요소법의 적용을 위해 방음벽 모형의 길이를 1.61 m로 짧게 하고, 주파수 스펙트럼의 범위를 100 Hz~5 kHz로 축소하고 주파수 간격을 100 Hz 로 크게 하여 해석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 3차원 경계요소법 해석결과는 점(●)으로 표시하였는데 Fig. 3에 비해 주파수에 따른 변화량을 잘 기술하고 있음을 알 수 있다. 즉, 경계요소법 모델에 의한 방음벽의 삽입손실 해석이 적절함을 확인해 주는 결과이다.

일반적으로 도로변에 설치되어 있는 방음벽은 높이에 비해 길이가 충분히 길어서 방음벽 상단부로의 회절음에 비해 측면으로부터의 회절음은 무시할 수 있는 경우가 대부분이다. 이와같이 방음벽 길이가 높이에 비해 충분히 긴 경우에 대한 2차원 경계요소법 모델의 적용 타당성을 입증하기 위해 일반적으로 도로변에 설치되는 방음벽의 기하학적인 값들을 고려하여 해석하고, Lam에 의한 계산결과와 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 방음벽의 길이를

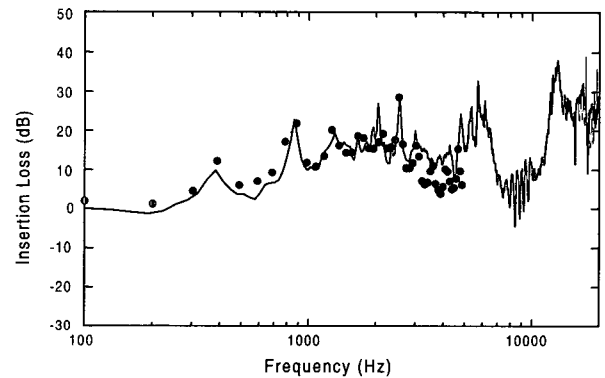


Fig. 4 Measured(thick solid line) and calculated(3-D BEM: ●) insertion loss spectra for the noise barrier ($b_L=1.61$ m, $b_h=0.3$ m, $S_h=0.09$ m, $S_d=0.47$ m, $O_h=0.16$ m, $O_d=1$ m).

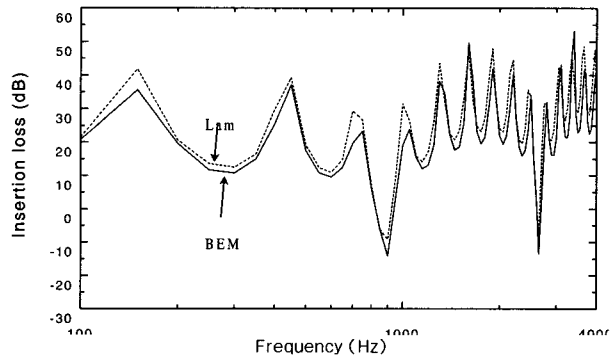


Fig. 5 Comparison the insertion loss spectra calculated by 2-D BEM (solid line) and Lam's model (dotted line) for the noise barrier ($b_h=4$ m, $S_h=0.9$ m, $S_d=4.7$ m, $O_h=1.6$ m, $O_d=10$ m, $b_L=100$ m).

100 m로 길게 하고, 높이는 4 m로 하였으며, 나머지 조건은 앞의 축척 모형 실험과 같은 조건으로 음원은 방음벽으로부터 4.7 m, 높이 90 cm에 위치하며, 수음점은 방음벽으로부터 10 m 거리에 높이 1.6 m로 설정하였다. 그림에서 실선으로 표시한 2차원 경계요소법 계산 결과가 점선으로 표시한 Lam 모델의 계산결과와 잘 일치함을 알 수 있으며, 이로부터 방음벽이 높이에 비해 충분히 긴 경우 2차원 경계요소법 해석으로 다양한 조건하에서의 방음벽 삽입손실 예측이 타당함을 알 수 있다. 한편, Lam의 모델은 방음벽이 흡음형이거나 상단부에 복잡한 형상을 가진 부착물이 있는 경우 적용할 수 없는데 비해 경계요소법 모델은 적용상 제한점이 없어 다양한 조건에 대해 해석이 가능하다.

3.2 2차원 경계요소법에 의한 다양한 방음벽 설치조건에 대한 삽입손실 해석

앞 절에서 경계요소법을 이용한 방음벽의 삽입손실 해석에 대한 타당성을 Lam에 의한 해석과 축척 모형실험을 통해 입증하였으며, 현장에 설치되고 있는 일반적인 방음벽의 경우 높이에 비해 길이가 충분히 길어 2차원 경계요소모델링을 이용한 해석이 적절함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 이용하여 실제 방음벽 설치 상황을 고려하여 몇 가지 경우에 대해 경계요소법을 적용하여 방음벽 설치에 대한 삽입손실을 해석하였다.

Fig. 6은 흡음형 방음벽과 반사형 방음벽에 2차원 경계요소 모델을 적용하여 삽입손실을 해석한 결과이다. 1 m 높이의 콘크리트 방호벽 위에 방음벽을 3 m 높이로 설치하는 것이 일반적인 경우임을 고려하여 해석시 방음벽의 높이는 4 m로 설정하였다. 수음점의 위치는 대부분의 도심지역에서 도로와 수음점 사이의 거리가 가까운 점과 삽입손

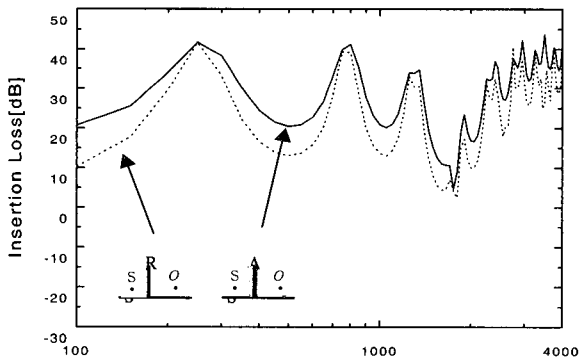


Fig. 6 The insertion loss spectra calculated by BEM for a reflective (R:dotted line) and an absorptive (A:solid line) noise barrier ($b_h=4$ m, $S_h=0.9$ m, $S_d=9.8$ m, $O_h=1.6$ m, $O_d=20$ m).

실 효과를 고려하여 방음벽으로부터 10 m 되는 지점으로 설정하였다. Fig. 6의 해석 결과는 흡음형이 반사형에 비해 전반적으로 삽입손실이 더 클 것이라는 물리적인 예측을 뒷받침하고 있다.

Fig. 7은 음원 양쪽에 반사형과 흡음형 방음벽을 세 가지로 조합하여 설치한 각 경우에 대해 경계요소법을 이용하여 삽입손실을 해석한 결과를 나타낸 것이다. 기하학적 구조는 Fig. 6과 동일하며, 음원과 방음벽 사이의 거리는 9.8 m로 설정하고, 흡음형은 A로, 반사형은 R로 표시하였다. 해석 결과는 양쪽 방음벽이 모두 흡음형인 경우가 전반적으로 삽입손실이 가장 크고, 양쪽 모두 반사형인 경우가 가장 작음을 나타내고 있으며, 흡음형 방음벽을 한 개만 설치한 Fig. 6의 경우에 비해 삽입손실이 더 나빠졌음을 알 수 있다. 이것은 물론 수음점의 위치에 따라 다소 차이는 있겠지만, 근본적으로 음원 양쪽에 방음벽을 세우는 경우 두 방음벽 사이에서 발생된 반사음이 추가로 회절되기 때문이다. 실제로 도로 양변에 흡음형 방음벽을 설치하는 경우, 흡음형 방음벽 전면의 알루미늄 다공판에서의 반사로 인해 방음벽 사이에서 다중 반사가 일어나게 되고 이 반사음이 방음벽 상단부로 회절되면서 방음벽의 삽입손실 효과를 감소시키게 된다. 따라서 소음 피해 대상 지역이 한쪽에만 위치하는 경우, 맞은편에 도심 지역에서의 빌딩 등과 같은 반사체가 존재하는 경우가 아니라면 한쪽에만 방음벽을 설치하는 것이 삽입손실 측면에서 더 효과적이다.

실제 도로에서의 상황을 고려하여 음원이 여러 개 존재하는 경우에 대한 방음벽의 삽입손실을 경계요소법으로 해석하였다. Fig. 8은 Fig. 6과 동일한 조건하에서 음원의 위치와 개수를 바꾸어 해석한 결과로서, 왕복 4차선 도로에서 각 차선에 음원이 모두 있는 경우에 대한 삽입손실을

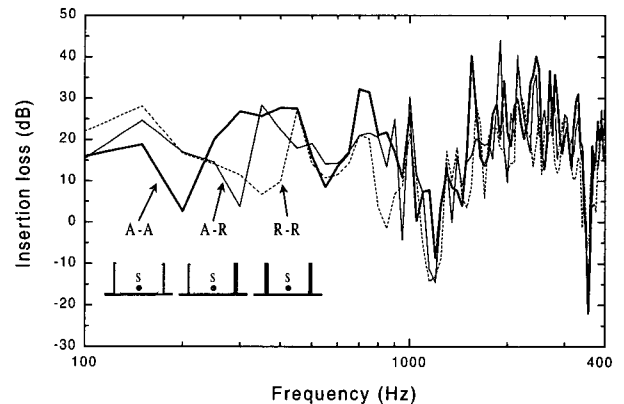


Fig. 7 The insertion loss spectra calculated by BEM for a double noise barrier ($b_h=4$ m, $S_h=0.9$ m, $S_d=9.8$ m, $O_h=1.6$ m, $O_d=10$ m). A-A: thick solid line, A-R: thin solid line, R-R: dotted line)

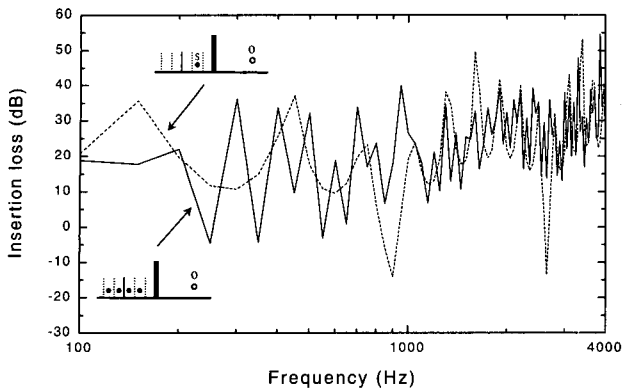


Fig. 8 Calculated insertion loss spectra by varying the number of sound source with geometrical parameters of $b_h=4$ m, $S_h=0.9$ m, $O_h=1.6$ m, $O_d=10$ m. Solid line : 4 sound sources, dotted line: 1 sound source.

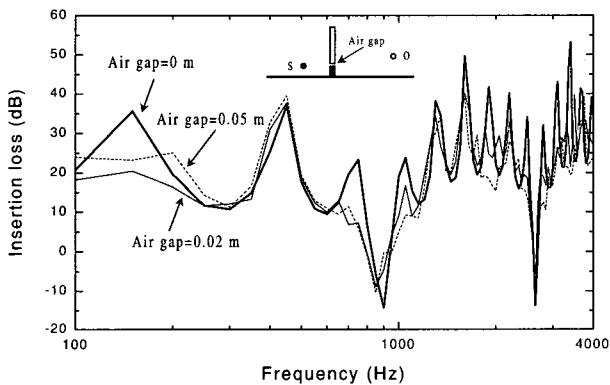


Fig. 9 Calculated insertion loss spectra for three different air-gaps between a barrier panel and a concrete structure. The geometrical parameters are $b_L=100$ m, $b_h=4$ m, $S_h=0.9$ m, $S_d=4.7$ m, $O_h=1.6$ m, $O_d=10$ m.

실선으로, 방음벽 쪽에 가까운 한 개 차선에만 음원이 있는 경우에 대해서는 점선으로 표시하였다. 도로의 차선 폭은 3.4 m로, 갓길의 폭은 3 m로 가정하였다. 그림에서 도로에 음원이 4 개 있는 경우에 대한 삽입손실 그래프가 한 개인 경우보다 주파수에 따른 산과 골의 변화가 많은 것을 알 수 있는데, 이것은 음원간의 경로 차에 따른 위상 간섭 현상이 많이 발생하였기 때문이다.

일반적으로 방음벽을 시공하는 경우 콘크리트 방호벽을 1 m 정도 높이로 먼저 시공한 후, 이 방호벽 위에 방음판을 설치하게 되는데, 이 때 방음판과 방호벽 사이의 경계 부분에 틈새가 있는 경우가 많다. 이러한 틈새가 방음벽의 삽입손실에 어떠한 영향을 미치는 지 경계요소법을 이용하여 해석하였다. Fig. 9는 Fig. 5와 같은 조건하에서 2 cm와

5 cm 폭의 틈새가 존재하는 경우에 대한 삽입손실 계산결과를 나타낸 것으로, 틈새가 클수록 삽입손실이 낮아짐을 알 수 있다. 일부 주파수 대역에서 틈새가 0.05 m인 경우 틈새가 없는 경우에 비해 삽입손실이 높게 계산된 것은 방음벽 상단부로 회절된 음이 특정 위치에서 틈새와 파장의 관계에 따라 일으킨 간섭효과 때문인 것으로 해석된다. Fig. 9의 결과로부터 방음벽 시공 후 코킹 처리 등을 통해 틈새가 없도록 마무리 작업을 철저히 하는 것이 방음벽의 설치 효과를 높이는데 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 경계요소법을 이용한 방음벽의 삽입손실 해석의 타당성을 검증하고, 2차원 모델을 이용하여 여러 가지 방음벽 설치 상황에 대해 삽입손실을 해석하였다. 경계요소법 적용의 타당성 검증을 위해 1/10 축척 방음벽 모형에 대해 경계요소법을 이용하여 삽입손실을 계산하고, Lam 모델에 의한 계산 결과와 무향실에서 실험에 의한 측정값을 비교하였다. 방음벽의 높이에 비해 길이가 짧은 경우에 대해서는 3차원 모델을 적용하고, 길이가 긴 경우에는 2차원 모델을 적용하였는데 두 가지 경우 모두 다른 방법들에 의한 해석 결과와 잘 일치하였다. 실제 환경에 사용되는 방음벽은 높이에 비해 길이가 충분히 긴 경우가 대부분이므로 2차원 경계 요소 모델을 몇 가지 방음벽 설치 조건에 대한 삽입손실 해석에 적용하였다. 즉, 흡음형 방음벽과 반사형 방음벽을 설치하는 경우, 음원 양쪽에 흡음형과 반사형 방음벽을 설치하는 경우, 그리고 방음판과 콘크리트 방호벽 사이에 틈이 존재하는 경우 등에 대해 삽입손실을 해석하였다. 본 연구를 통하여 방음벽 삽입손실 해석에 경계요소법의 적용이 유용함을 확인하였으며, 회절음 감소를 위해 복잡한 형상의 장치를 방음벽 상단에 설치한 경우에 대한 적용을 통하여 효율적인 방음벽 설계에 응용할 계획이다.

참고문헌

- (1) Watts, G. R. and Morgan, P. A., 1996, "Acoustic Performance of an Interference-Type Noise-Barrier Profile," Applied Acoustics, Vol. 49, No. 1, pp. 1~16.
- (2) Li, K. M. and Wang, Q., 1998, "A BEM Approach to Assess the Acoustic Performance of Noise Barriers in a Refracting Atmosphere," Journal of Sound and Vibration, Vol. 211, No. 4, pp. 663~

681.

(3) Fujiwara, K., Hothersall, D. C. and Kim, C-H, 1997, "Noise Barriers with Reactive Surfaces," *Applied Acoustics*, Vol. 53, No. 4, pp. 255~272.

(4) Maekawa, Z., 1968, "Noise Reduction by Screens," *Applied Acoustics*, Vol. 1, pp. 157~173.

(5) Lam, Y. W., 1994, "Using Maekawa's Chart to Calculate finite Length Barrier Insertion Loss," *Applied Acoustics*, Vol. 42, pp. 29~40.

(6) Hothersall, D. C., Chandler-Wilde S. N. and Hajmirzae M. N., 1991, "Efficiency of Single Noise Barriers," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 146, No. 2, pp 303~322.

(7) Cremers, L. and Fyfe, K. R., 1995, "On the Use of Variable Order Infinite Wave Envelope Elements for Acoustic Radiation and Scattering," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 4, pp. 2028~2040.

(8) Muradali, M. and Fyfe, K. R., 1998, "A Study of 2D and 3D Barrier Insertion Loss using Improved Diffraction-based Methods," *Applied Acoustics*, Vol. 53, pp. 49~75.

(9) 정성수, 황철호, 이승현, 성연수, 1998, "축척 모형 실험에 의한 방음벽 뒤 회절음의 음향특성 연구," *응용물리*, Vol. 11, No. 3, pp. 272~278.

(10) Pierce, A. D., 1974, "Diffraction of Sound Around Corners and over Wide Barriers," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 55, pp. 941~955.

(11) Yamamoto, K. and Takagi, K., 1992, "Expressions of Maekawa's Chart for Computation," *Applied Acoustics*, Vol. 37, pp. 75~82.

(12) SYSNOISE Rev. 5.3, 1996, LMS / NIT, Belgium.

(13) ANSYS Rev. 5.4. 1997, Swanson Analysis Systems.