

경계요소법에 의한 방음벽의 성능 평가

Evaluation of the Performance of the Noise Barrier Using the BEM

황 철 호†

Cheol-Ho Hwang

(2007년 11월 1일 접수 ; 2007년 11월 19일 심사완료)

Key Words : Traffic Noise(교통소음), Insertion Loss(삽입손실), Reflective Noise Barrier(반사형 방음벽), Absorptive Noise Barrier(흡음형 방음벽), T-shaped Noise Barrier(T자형 방음벽), Interference-type Noise Barrier(간섭형 방음벽), Boundary Element Method(경계요소법)

ABSTRACT

Noise barriers are being used more often to solve problems of noise pollution from traffic noise. Several types of noise barriers are being installed to increase the cost-effectiveness of noise barrier installation. In this study, the insertion loss is analyzed to evaluate the effectiveness of the noise barrier by using the BEM. In order to check the validity of the BEM, the BEM and Lam's theoretical analysis are compared with measurement, which is performed in the anechoic chamber for the 1/10 scale-down model, and good agreements are obtained. By using the two dimensional boundary element method, the insertion loss is calculated and analyzed for several typical noise barriers such as the vertical barrier, the barrier with an oblique edge on top, the T-shaped barrier and the barrier with interference device on top. With these analyses, it is possible to design more cost-effective noise barriers appropriate for a particular area.

1. 서 론

2006년 중앙환경분쟁조정위원회 보고서에 의하면, 소음진동민원 접수 건수는 전체 환경오염 피해 민원의 86%를 차지하고 있어 정은한 삶의 환경을 요구하는 현대 시민들에게 가장 큰 고통은 바로 환경소음임을 알 수 있다. 환경소음피해에 가장 영향력이 큰 소음원은 교통소음이며, 그 중에서도 가장 광범위하게 영향을 미치는 것은 도로교통소음이다. 도로교통소음의 변화추이는 도로의 총연장과 자동차 등록대수와 밀접한데, 도로의 총연장 증가는 소음의 공간적 확산을 의미하며, 자동차 등록대수의 증가는

소음총량의 증가를 의미하기 때문이다. 1990년 339만대였던 자동차 등록대수는 1997년 1000만대를 넘어 2007년 9월 현재 1633만대를 기록하며 환경소음의 총량을 증가시키고 있다. 한편 도로 총연장의 경우 1990년의 56.715 km에서 2005년 말 현재 102.293 km로 약 2배 증가하며 도로교통소음을 확산시키고 있다.

교통소음 피해를 줄이기 위한 방법으로는 자동차 소음저감과 저소음아스팔트 설치 등 소음원 대책이 근본적이지만, 기술적 한계와 비용 대비 효과 측면에서 현재까지 가장 효과적인 대책은 방음벽의 설치이다. 방음벽의 설치효과를 높이기 위한 여러 방안이 다양하게 시도되고 있는데, 방음벽의 설치효과는 방음벽의 설치 전·후 음압의 비교를 통해 평가할 수 있으나 설치 전·후의 측정 데이터가 불충분하여 방음벽에 따른 성능 평가가 어려운 실정이다.

† 교신저자: 정희원, 한남대학교 기계공학과
E-mail : cheolho@hnu.kr
Tel : (042)629-8277, Fax : (042)629-8293

이 연구에서는 방음벽의 설치효과를 2차원 경계요소법을 이용하여 수치해석적으로 구하고 무향실에서의 모형축척실험 및 Lam 모델에 의한 해석 결과와 비교하여 그 타당성을 검증한 후, Fujiwara 등이 개발한 간섭형 방음벽⁽¹⁾을 포함하여 전형적인 방음벽 형태에 대해 그 설치효과를 해석하였다. 설치효과는 방음벽 설치 전·후의 수음점에서의 음압레벨 차인 삽입손실(insertion loss)로 평가하였으며, 방음벽의 높이와 형태에 따른 삽입손실의 변화, 지향특성 등을 해석하였다.

2. 기본 이론

2.1 경계요소법에 의한 방음벽 해석

SYNOISE⁽²⁾를 이용하여 2차원 경계요소법으로 방음벽 설치효과를 해석하였다. 방음벽 삽입손실 해석은 3차원 해석이 바람직하나, 실제 현장에 설치되는 대부분의 방음벽은 높이에 비해 길이가 충분히 길기 때문에 2차원 해석으로도 만족할 만한 정확도를 얻을 수 있으므로 이 연구에서는 2차원 해석을 실시하고 그 타당성을 입증하였다.

Fig. 1은 2차원 경계요소법으로 계산할 음원과 방음벽, 수음점 영역에 대한 단면도를 나타낸 것이다. 위치 r_0 의 점 음원에 의한 방음벽 뒤 위치 r 의 수음점에서의 음압을 $p(r, r_0)$ 라고 하면, 음압 $p(r, r_0)$ 는 식 (1)의 경계적분방정식을 만족한다.

$$\epsilon(r)p(r, r_0) = G(r, r_0) - \int_s p(r_s, r_0) [jk\beta G(r, r_s) - \frac{\partial G(r, r_s)}{\partial n(r_s)}] ds \quad (1)$$

여기서 β 는 방음벽 표면과 지표면의 어드미턴스이며, r_s 는 방음벽 경계요소 ds 의 위치 벡터, n 은 ds 의 바깥쪽을 가리키는 단위 법선벡터이다. $\epsilon(r)$ 은 수음점의 위치에 의존하는 값으로 표면 s 를 제외한 전

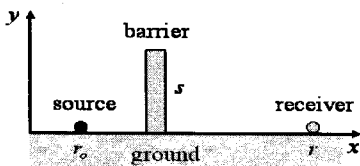


Fig. 1 Cross-section of two dimensional BEM model

파 매질에서는 1이며, 표면 s 상에서는 1/2이다. 또한, $G(r, r_0)$ 는 방음벽이 없는 경우 단단한 지면상의 수음점 r 지점에 대한 음압으로서 식 (2)와 같다.

$$G(r, r_0) = -iH_0^2(k|r_0 - r|)/4 \quad (2)$$

여기서 H_0^2 는 제 2차 0종 Hankel 함수이다.

경계적분식 (1)을 풀기 위해 방음벽 s 를 N 개의 요소로 나누고 각 요소에 대한 음압을 일정하다고 하면, N 개의 선형방정식으로부터 수음점의 음압을 구할 수 있다. 이 논문에서는 충분히 정확한 결과를 얻기 위해 요소의 최대 길이를 $\lambda/6$ 보다 작게 설정하였다.

2.2 Lam 모델에 의한 방음벽 해석

Fig. 2에서 i 번째 전파 경로의 회절음에 의한 수음점 음압은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$p_i = A_i Q_i e^{j\theta_i} e^{-jk d_i} \quad (3)$$

여기서 A_i 는 회절음의 크기, Q_i 는 i 번째 전파경로에서 지표면에 의한 반사 영향을 나타내는 구면파 반사계수, θ_i 는 회절에 의한 위상 변화, d_i 는 음의 전파경로 거리, k 는 음의 파수이다. 그림에 표시한 8개의 기본 전파경로를 모두 고려하면, 수음점에서의 음압 레벨은 다음 식과 같다.

$$p_t = 20 \log_{10} \left| \sum_{i=1}^8 p_i \right| = 20 \log_{10} \left| \sum_{i=1}^8 A_i Q_i e^{j\theta_i} e^{-jk d_i} \right| \quad (4)$$

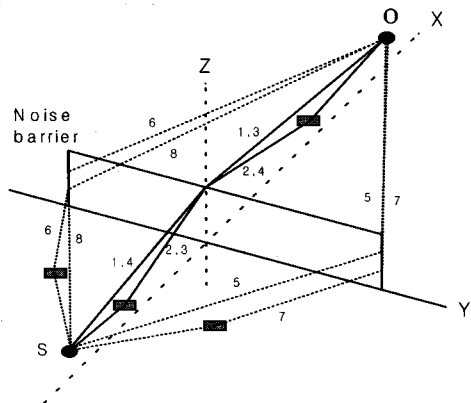


Fig. 2 Diffraction paths for a finite barrier

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

$$p_o = A_o e^{jk d_o} \left[1 + Q_o \frac{d_o}{d_r} e^{-jk(d_r - d_o)} \right] \quad (5)$$

일반적으로 회절음과 음원간의 위상 θ_i 는 같으며⁽³⁾, 지표면을 완전 반사형이라 가정하면 구면파 반사계수 Q_o 는 1로 대체할 수 있다. 이로부터 방음벽 설치 전·후의 음압 레벨의 차이로 정의되는 삽입손실 IL 은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다⁽⁴⁾.

$$IL = 10 \log_{10} \left| \frac{A_o}{A_1} \right|^2 + 10 \log_{10} \left| \frac{1 + Q_o (d_o/d_r) e^{-jk(d_r - d_o)}}{\sum_{i=1}^8 (A_i/A_1) Q_i e^{-jk(d_i - d_o)}} \right|^2 \quad (6)$$

위 식에서 A_i 는 감음량과 관련된 값으로 이 논문에서는 Yamamoto의 근사식⁽⁵⁾을 사용하였다.

3. 실험 및 해석결과의 검증

3.1 실험장치 구성

경계요소법에 의한 삽입손실 해석의 타당성 검증을 위해 1/10 축척모형에 대해 무향실(4.5 m × 7 m × 4.5 m)에서 실험을 하였다. 지표면을 딱딱한 시멘트

트 포장면으로 가정하여 무향실 바닥에 두께 20 mm의 압축나무를 4 m × 7 m의 크기로 설치하고 방음벽도 같은 재질을 사용하였다. 음원은 혼형 확성기의 출구에 두께 0.005 m, 내경 0.025 m, 길이 0.3 m인 원통형 플라스틱 관을 부착시켜 점음원으로 만들고, 주파수 분석기(B&K 3550)에서 발생된 백색잡음을 신호증폭기(B&K 2706)에서 증폭시킨 후 혼형 확성기로 소음을 발생시켰다. 방음벽 뒤 수음점에 1/2인치 마이크로폰(B&K 4165, 감음도: 50 mV/Pa)을 설치하여 측정된 음을 주파수 분석기로 분석하였다.

모형 방음벽의 크기는 길이 4.03 m, 높이 0.3 m로 하였으며, 음원과 수음점은 방음벽에 대해 수직선상에 놓이도록 하였다. 음원과 수음점의 높이는 바닥으로부터 각각 0.09 m와 0.16 m로 하였으며, 방음벽으로부터 음원과 수음점까지의 거리는 각각 0.48 m와 1 m로 설정하였다. 1/10 축척실험이므로 모형 방음벽의 크기는 실제로는 길이 40.3 m, 높이 3 m의 방음벽에 해당하며, 음원과 수음점의 높이는 바닥으로부터 각각 0.9 m와 1.6 m에 해당한다.

3.2 실험결과와 해석 결과의 비교

무향실에서의 삽입손실 측정 결과와 경계요소법 및 Lam 모델에 의한 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림으로부터 세 결과가 비교적 잘 일치하고 있으며 이로부터 경계요소법에 의한 삽입손실 해석 결과가 타당함을 확인할 수 있다.

4. 방음벽 형태에 따른 삽입손실 평가

국내에 설치된 전형적인 방음벽 형태에 대해 삽입손실을 해석함으로써 방음벽 형태와 방음벽 성능과의 관계를 분석하였다.

Fig. 4는 단단한 지면 위에 설치된 수직형 반사형 방음벽의 높이에 따른 삽입손실을 나타낸 것이다. 방음벽 높이를 2 m에서 3.2 m까지 0.4 m씩 증가시키면서 각각에 대한 삽입손실을 계산하였다. 음원과 수음점의 높이는 지면에서의 반사로 인한 간섭을 배제함으로써 방음벽 자체 특성만을 살펴보기 위해 지면 높이로 하였다. 계산 결과에서 방음벽이 0.4 m 증가할 때마다 약 1 dB 정도의 삽입손실 효과가 있음을 알 수 있다.

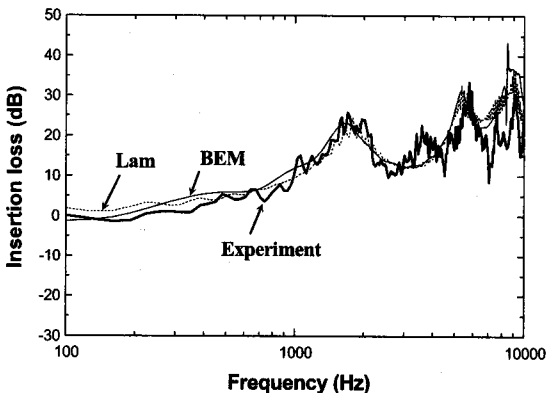


Fig. 3 Insertion loss spectra for the barrier

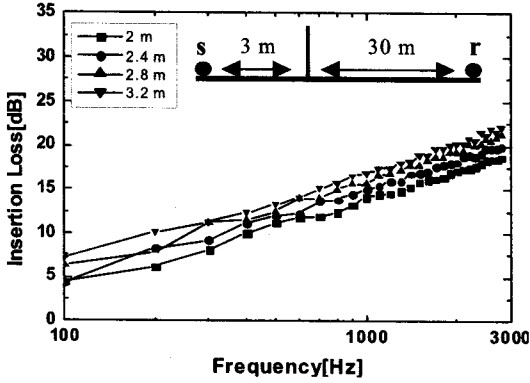


Fig. 4 Insertion loss spectra due to the changes in the heights of the reflective barrier

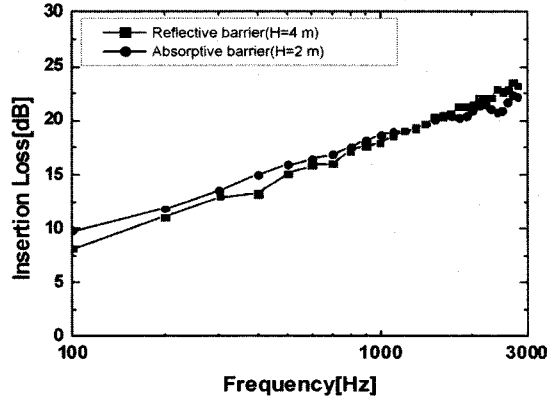


Fig. 6 Comparison of the reflective barrier with the absorptive barrier

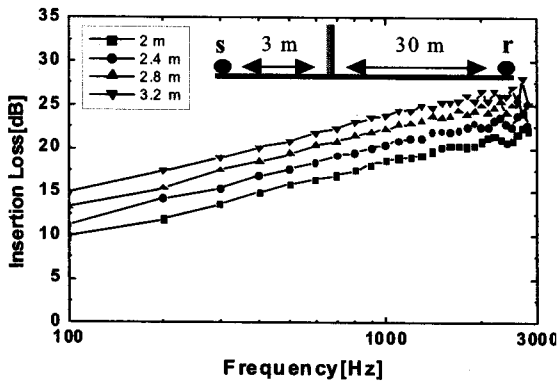
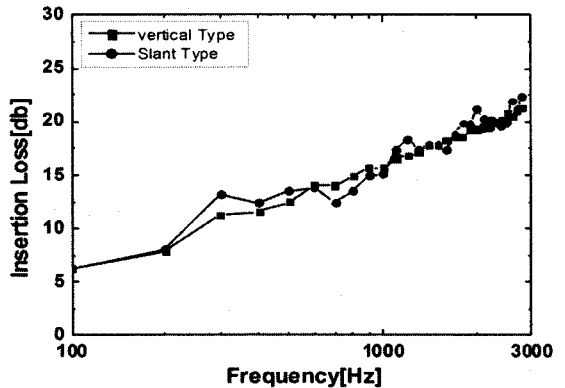
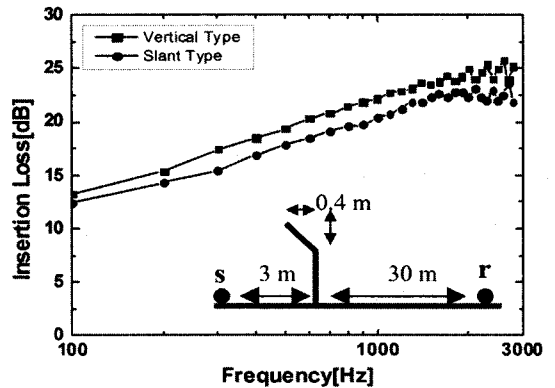


Fig. 5 Insertion loss of the absorptive barrier due to the changes in the heights of the barrier



(a) The reflective barriers



(b) The absorptive barriers

Fig. 7 Insertion loss spectra of the vertical type and the slant type barrier

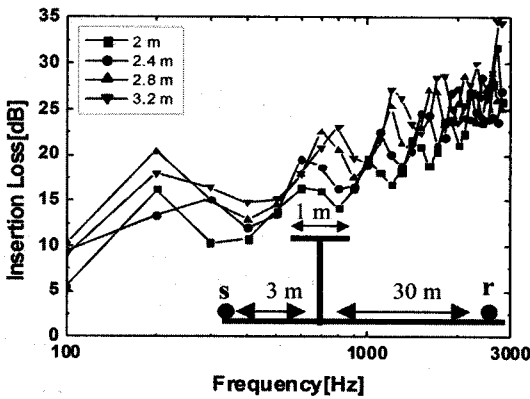
Fig. 5는 Fig. 4에서 음원 쪽의 수직형 방음벽 전면에 흡음처리를 한 경우, 즉 음향 임피던스 경계조건을 준 경우에 대해 삽입손실 해석을 한 결과이다. 임피던스는 Delany와 Bazley⁽⁷⁾의 식에서 유동비저항이 20 cgs rayl인 경우의 값을 사용하였는데, 이 유동비저항 값은 실제 흡음형 방음벽 내부에 설치되는 유리섬유의 유동비저항값에 해당된다. Fig. 5로부터 방음벽의 높이가 0.4 m 증가할 때마다 약 2 dB의 삽입손실 효과가 있으며 반사형에 비해 5 dB 정도의 성능향상이 있음을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5의 결과에서 유사한 삽입손실을 갖는 반사형 방음벽과 흡음형 방음벽의 경우를 Fig. 6에 나타내었다. 그림으로부터 4 m 높이의 반사형 방음벽이 2 m 높이의 흡음형 방음벽과 비슷한 성능을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 방음벽 상판이 음원 쪽으로 45° 기울어진 경사형 방음벽과 앞의 수직형 방음벽의 삽입손실

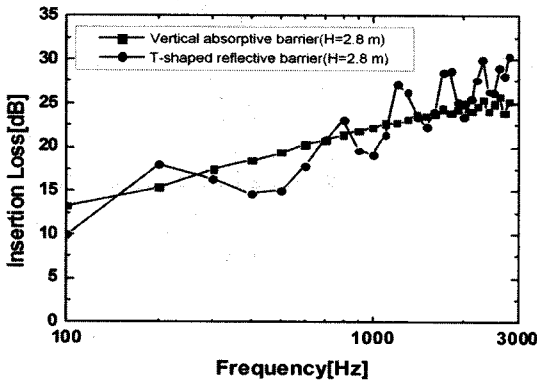
을 비교한 것이다. 방음벽 높이는 3.2 m로 하였으며, 음원과 수음점의 위치는 방음벽으로부터 각각 3 m, 30 m로 하였다. Fig. 7(a)는 두 방음벽이 반사형인

경우에 대한 결과로서 두 형상의 삽입손실은 별다른 차이가 없으나, 흡음형인 경우에 대한 해석 결과인 Fig. 7(b)에서는 경사형이 수직형보다 1.3 dB 정도 삽입손실이 더 크음을 알 수 있다. 추가 해석에 의하면, 흡음형인 경우 경사형과 수직형의 삽입손실 차이는 음원과 방음벽의 거리가 1m인 경우 약 2.5 dB, 3m인 경우 약 1.3 dB, 5m인 경우 약 0.4 dB로 경사형이 더 크며 음원이 방음벽으로부터 멀어질수록 경사형의 수직형에 대한 삽입손실 우위 효과는 저하되었다.

Fig. 8(a)는 길이 1m의 방음판을 수직형 방음벽 상단에 수평으로 설치한 T자형 반사형 방음벽의 높이 변화에 따른 삽입손실의 변화를 나타낸 것이며, (b)는 이 방음벽과 수직형 흡음형 방음벽의 삽입손실을 비교한 것이다. Fig. 8(a)에서 반사형 T자 방음



(a) Insertion loss of T-shaped barrier

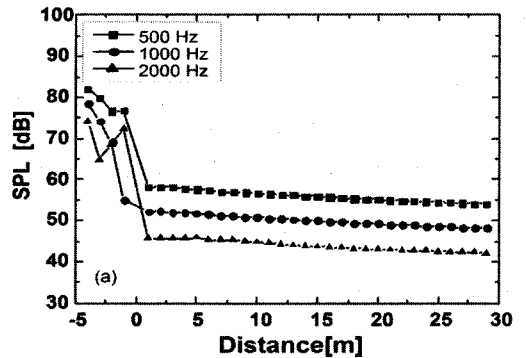


(b) Insertion loss of the two types of barriers, the vertical absorptive and the T-shaped reflective barrier

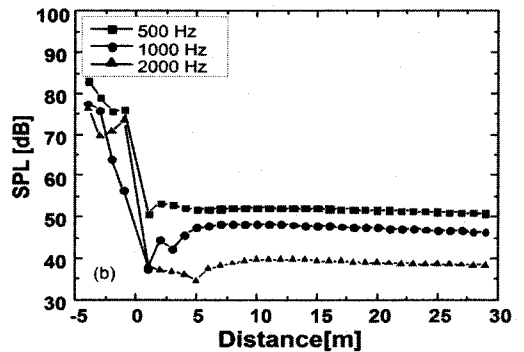
Fig. 8 Insertion loss spectra

벽의 수평 상판부분에 의한 반사음으로 인한 간섭현상 때문에 삽입손실이 변동성을 가지나 고주파 영역으로 갈수록 흡음형 수직 방음벽에 비해 삽입손실이 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 높이 2.8m의 반사형 T자 방음벽과 같은 높이의 흡음형 수직 방음벽의 삽입손실을 비교한 것으로 같은 높이에서는 반사형 T자 방음벽이 흡음형 수직 방음벽과 거의 비슷한 성능을 가짐을 알 수 있다. 그러나 반사형 수직 방음벽에 비해서는 반사형 T자 방음벽이 수직 방음벽의 높이가 2m 증가한 것과 같은 성능 우위를 가짐을 해석 결과로부터 알 수 있었다.

Fig. 9는 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz의 세 주파수에 대해 반사형 T자 방음벽과 반사형 수직 방음벽의 수음점 위치에 따른 음압레벨 해석 결과이다. 방음벽 위치를 원점으로 하여 음원을 -5m에 두고, 수음점을 -4m에서 30m까지 1m 간격으로 옮기면서 각 위치에서의 음압레벨을 해석하였다. 삽입손실 해석에서 알 수 있듯이 T자 방음벽이 수직 방음벽에 비



(a) The reflective vertical barrier



(b) The reflective T-shaped barrier

Fig. 9 Sound pressure level due to the distance from the noise source

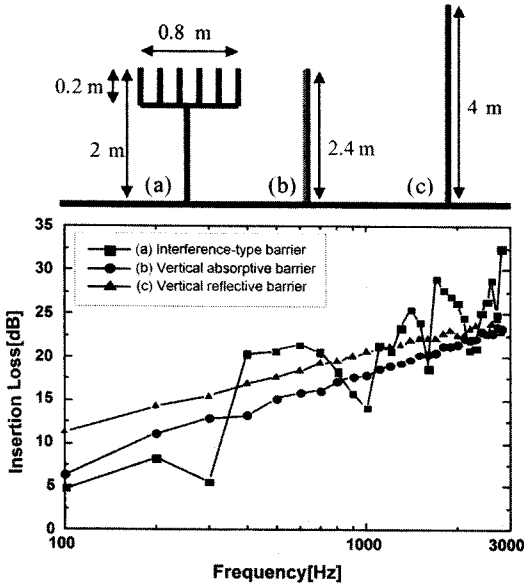


Fig. 10 Insertion loss of three different types of barriers: (a) the interference-type barrier, (b) the vertical absorptive barrier, and (c) the vertical reflective barrier

해 수음점에서의 음압레벨이 더 낮으며 고주파로 갈수록 그 격차는 커짐을 알 수 있다.

Fig. 10은 그림과 같은 간섭형 장치(0.8m 폭의 판에 설치된 0.2m 높이의 칸막이 여섯 개로 구성)를 가진 높이 2m의 간섭형 방음벽과, 높이 2.4m의 흡음형 방음벽, 높이 4m의 반사형 방음벽에 대한 삽입손실 해석결과이다. 간섭형 방음벽은 칸막이 사이의 공간에서 입사파와 바닥면에 의한 반사파의 위상차이로 인한 소멸간섭을 이용한 것이다. 그림으로부터, 저주파수 영역을 제외하면 특정 주파수 대역에서 간섭형 방음벽보다 높은 두 방음벽에 비해 훨씬 큰 삽입손실을 얻을 수 있으며 평균적으로는 높이 2.4m의 흡음형 방음벽과 비슷한 성능을 가짐을 알 수 있다. 이우섭 등⁽⁶⁾은 대상 소음원에 따라 칸막이의 개수와 높이를 조절하여 간섭효과를 충분히 높이는 연구를 하였다.

Fig. 11은 Fig. 10(a)의 높이 2m의 간섭형 방음벽과 높이 4m의 반사형 수직 방음벽에 대한 수직방향 지향특성을 해석한 결과이다. 음원은 방음벽으로부터 3m 거리에 위치하며, 음원과 방음벽을 잇는 직선과 방음벽의 교점을 중심으로 반경 30m 지점에서의 음압레벨을 200 Hz, 600 Hz, 1000 Hz, 2000

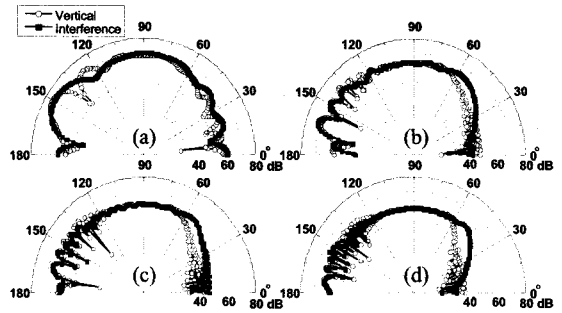


Fig. 11 Calculated directivity for the vertical reflective and the interference noise barrier: (a) 200 Hz, (b) 600 Hz, (c) 1000 Hz, and (d) 2000 Hz

Hz의 네 주파수에 대해 나타내었다. 200Hz의 경우 다른 주파수에 비해 회절의 영향이 커서 음압레벨이 상대적으로 높음을 알 수 있으며, 주파수가 높아짐에 따라 중심선으로부터 60° 이내의 범위에서 음압레벨이 많이 감소함을 알 수 있다. 또한 대략 15° 이내의 범위에서는 높이 2m의 간섭형 방음벽이 4m 높이의 일반 반사형 방음벽보다 음압레벨이 낮지만, 15°~60° 범위에서는 오히려 일반 방음벽의 경우가 더 낮음을 알 수 있다. 따라서 대상 지점의 높이에 따라 적절한 형태의 방음벽을 선정하는 것이 필요함을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 모형축척실험과 Lam 모델 해석에 의해 2차원 경계요소법에 의한 방음벽 설치효과 해석의 타당성을 검증한 후, 경계요소법을 이용하여 여러 형태의 방음벽에 대해 그 설치효과를 해석함으로써 형태에 따른 방음벽 성능을 상호비교하고 방음벽 높이가 삽입손실에 미치는 효과를 분석하였다. 수직형 방음벽의 경우, 반사형은 0.4m 높이 당 1 dB, 흡음형의 경우 2 dB 정도 삽입손실이 증가하였으며, T자형 방음벽의 경우 높이가 높아질수록 고주파수 영역에서 삽입손실이 증가하였다. 형상에 따른 특성으로는 흡음형인 경우, 경사형이 수직형에 비해 삽입손실이 더 컸으나 반사형인 경우에는 별다른 차이를 보이지 않았으며, T자형의 경우에는 반사형과 흡음형 모두에서 수직형에 비해 삽입손실이 더 컸다. 간섭형 방음벽의 경우 특정 주파수 대역에서 수

직형 방음벽에 비해 큰 삽입손실을 가짐을 확인하였다. 수직방향 지향특성 해석 결과, 수음점의 높이별 음압레벨이 방음벽 형태에 따라 영향을 받으므로 수음점 높이에 따라 적절한 형태의 방음벽 선정이 필요함을 알 수 있었다.

여러 형태의 방음벽에 대한 이 논문의 연구 결과를 바탕으로 추가적인 경계요소법 해석을 통해 주어진 환경에서 소음원 특성과 수음점의 위치를 고려한 최적 성능의 방음벽 설계 및 설치가 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 한남대학교 교비학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Fujiwara, Hothersall D. C. and Kim, C. H., 1998, "Noise Barriers with Reactive Surfaces", *Appl. Acoust.* Vol. 53, pp. 255~272.
- (2) SYSNOISE Rev. 5.3 (LMS/NIT, Belgium, 1996).
- (3) 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.
- (4) Lam, Y. W., 1994, "Using Maekawa's Chart to Calculate Finite Length Barrier Insertion Loss", *Appl. Acoust.* Vol. 42, pp. 29~40.
- (5) Yamamoto, K. and Takagi, K., 1992, "Expressions of Maekawa's Chart for Computation", *Applied Acoustics*, Vol. 37, pp. 75~82.
- (6) Lee, W. S., Jung, S. S., Suh, S. J. and Jun, O. S., 2000, "The Acoustical Characteristics of an Interference-type Noise Barrier", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 517~522.
- (7) Delany, M. E. and Bazley, E. N., 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials", *Appl. Acoust.* Vol. 3, pp. 105~116.