

# BEM에 의한 고속전철용 방음벽의 설치 효과 예측

이우섭\*, 정성수\*, 나희승\*\*, 양신추\*\*

## The Prediction of the Efficiency of High-Speed Railway Noise Barriers by BEM

Woo Seop Lee\*, Sung Soo Jung\*, Hee Seung Na\*\*, Sin Chu Yang\*\*

### ABSTRACT

In this study, the insertion losses of various track-side railway noise barriers are analyzed by using a two-dimensional numerical boundary element method(BEM). The BEM is implemented using two out-of-phase monopole sources for each track to represent dipole source. All model for this study is based on actual size built in Test Line of KTX. And the results suggest that vertical absorptive barrier provide as effective screening as rigid barrier which is more 0.4 m than the height of those.

### 1. 서론

육상교통의 발달로 인해 얻는 혜택만큼 환경 피해 또한 증가하고 있다. 특히 고속전철의 등장으로 인해 철로선로 주변의 소음이 그 어느 때보다 큰 우려와 주목을 받고 있다. 고속전철이 운행되는 선진국에서는 이와 같은 소음피해를 최소화하기 위하여 오래전부터 다양한 조건의 환경으로부터 상당한 경험과 데이터화가 된 실정이다.

선진국에서는 도로 및 철로 주변의 소음억제를 위해 여러 종류의 방음벽 장치들을 폭 넓게 연구하였으며, 경험적, 기하학적 그리고 수치해석적으로 다양한 방법들이 개발되고 있다.<sup>(1,4)</sup> 이미 대표적인 방음벽 모델인 수직형과 기하학적인 변형을 한 여러 종류의 방음벽 효율에 관한 이론과 실험들이 연구되었다.<sup>(5,7)</sup> 이와 같은 방음벽의 성능 평가를 위한 수치해석에 주로 이용되는 경계요소법(BEM)은 복잡한 형상의 모델과 음향 임피던스를

지닌 모델에 유용한 해석 방법이다.

본 연구에서는 2 차원 경계요소법을 이용하여 다양한 형태의 고속철도 방음벽의 효과를 수치해석 하였다. 계산 모델은 국내에서 운행될 한국형 고속전철 모델을 기준으로 하여 다양한 종류의 방음벽에 대한 효율을 예측하였으며, 또한 방음벽에 임피던스 특성을 적용하여 보다 실제적인 환경에 대한 이론적 예측을 하였다.

### 2. 경계요소법(BEM)

경계요소법은 다양한 분야에 적용할 수 있는데 복잡한 형상과 음향 임피던스를 가지는 방음벽을 해석하는데 유용한 방법으로서 궁극적으로 파동방정식의 해를 푸는 것이다. 본 연구에서는 2차원으로 모델을 하였기 때문에 레일과 방음벽에 수직인 면상에서 2차원 헬름홀츠 방정식을 계산하면 된다. 모든 경계조건은 국소 반작용(locally reacting)으로 가정하였으며, 방음벽 표면은 어드미턴스  $\beta(r_s)$ 로 정의하였다. 임의의 위치  $r_0$ 에 있는 점 음원으로 부터  $r$ 만큼 떨어진 수음점에서의 음압을  $p(r)$ 이라 할 때, 음압은 식 (1)처럼 경계적분방정식을 만

\* 한국표준과학연구원 음향·진동 그룹

\*\* 한국철도기술연구원

족한다.

$$\epsilon(r)p(r) = p_0(r) + \int_s \left( \frac{\partial G_\beta(r, r_s)}{\partial n(r_s)} - ik\beta(r_s)G_\beta(r, r_s) \right) p(r_s) ds \quad (1)$$

여기서  $p_0(r)$ 은 지면만 있을 경우, 수음점에서의 음압으로  $p_0(r) = G_\beta(r, r_0)$ 이며,  $k$ 는 파수, 그리고  $\epsilon(r)$ 은 수음점의 위치에 의존하는 값으로서 입체각(solid angle)을 의미한다. 또한  $r_s$ 는 방음벽 경계 요소  $ds$ 의 위치 벡터 그리고  $n$ 은  $ds$ 의 바깥으로 향하는 단위 접선 벡터이다.  $G(r, r_0)$ 는 방음벽이 없을 경우 수음점  $r$  지점의 음압으로 식 (2)와 같다.

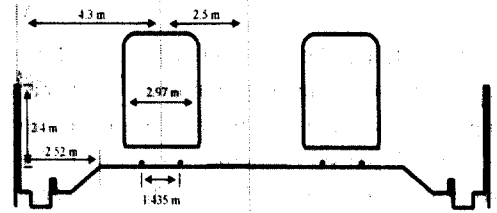
$$G(r, r_0) = -iH_0^1(k|r_0 - r|)/4 + H_0^1(k|r_0 - r|) \quad (2)$$

여기서  $H_0^1$ 는 제 1차 0종 Hankel 함수이다. 경계 적분식 (1)을 풀기 위해서 경계요소법을 이용하였다. 방음벽  $s$ 를  $n=1, 2, 3, \dots, N$ 개의 요소들로 나누고,  $p(r, r_0)$ 가 일정하고 표면  $s$ 상의  $r$ 에 대해  $p(r_n, r_0)$ 과 같다면 식 (3)과 같이  $m$ 개의 선형 방정식으로부터  $p(r_1, r_0), p(r_2, r_0), \dots, p(r_N, r_0)$ 을 구할 수 있다. 따라서  $p(r, r_0)$ 가 구해지면 각각의 요소에서 계산된 음압을 식 (3)에 대입하여 수음점에서의 음압을 구할 수 있다. 본 논문에서는 충분히 정확한 결과를 얻기 위해서 요소의 최대 길이를  $\lambda/6$  보다 작게 설정하였다. 대략 1m의 모델을 2.8 kHz 까지 계산하기 위해서는 50 개의 선 요소가 필요하다.

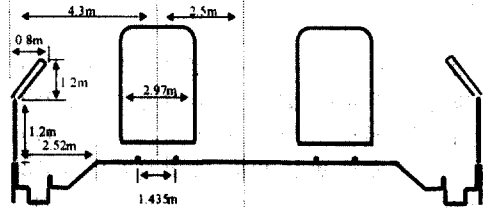
$$\epsilon(r)p(r, r_0) = G(r, r_0) - \sum_{n=1}^N p(r_n, r_0) \int_s \left[ ik\beta(r_s)G(r, r_s) - \frac{\partial G(r, r_s)}{\partial n(r_s)} \right] ds \quad (3)$$

### 3. 음원의 특성 및 계산 모델

철도 운행에서 발생하는 3가지 주요 소음은 철로와 바퀴의 상호작용, 기차 본체와 판토그래프에서 발생된 공력소음 그리고 엔진 소음을 들 수 있다. 고속 전철에서 엔진은 기차의 끝에 위치하기 때문에, 기차의 중심부가 수음점을 지나갈 때, 엔진 부분의 소음은 수음점이 방음벽에 가까이 있을 경우 전체 소음레벨에 큰 영향을 미치지 못한다. 또한 공력소음은 매우 높은 속도일 때, 기차의 선두부분과 판토그래프에서 크게 발생되지만, 240 km/h 이하 속도에서는 공력소음의 영향은 작다.<sup>(8)</sup>



(a) 수직형 방음벽



(b) 경사형 방음벽

그림 1. 고속전철과 방음벽 단면도.

본 연구에 사용된 수치해석은 상용 프로그램인 SYSNOISE(rev. 5.3)<sup>(9)</sup>와 ANSYS(rev. 5.4)<sup>(10)</sup>를 이용하였다. 그림 1과 같이 국내에서 운행될 고속전철의 레일과 차량 크기를 기준으로 하여, 방음벽의 위치는 고정시키고 방음벽의 높이, 상단부 형상 및 임피던스 변화에 따른 2차원 수치해석을 경계요소법으로 수행하였다. 여기서 방음벽을 제외한 모든 경계조건은 0의 어드미턴스 값을 주었으며, 방음벽의 음향 임피던스는 Delany-Bazley의 모델을 이용

하였다.<sup>(11)</sup> 바퀴와 레일의 상호작용으로 인한 소음원이 주요 소음원인데 이것은 잘 알려진 바와 같이 쌍극자 음원 특성을 가진다.<sup>(12)</sup> 따라서 쌍극자 음원을 나타내기 위해 레일 위에 위상이 상호 반대인 단극자 음원을 설정하였다. 이때 두 단극자 사이의 간격은 레일 폭만큼 두었다.

## 4. 계산 및 결과 분석

### 4.1 차량 유·무에 따른 방음벽의 삽입손실효과

선로 위에 차량이 있는 경우와 없는 경우에 대해 방음벽 설치효과를 그림 2 와 3에 나타냈다. 결과에서 (a)는 그림 1(a)와 같이 수직형 방음벽을 그리고 (b)는 그림 1(b)와 같이 경사형 방음벽을 설치한 경우에 해당된다. 이때 방음벽은 모두 반사형으로 가정하였다. 수음점은 방음벽으로부터 20 m와 50 m 떨어져 있으며, 높이는 지면상에 두었다. 이것은 지표면에 의한 음 간섭효과를 줄이고 순수하게 방음벽과 기차의 몸체에서 회절 및 반사된 음의 효과를 분석하기 위해서이다.

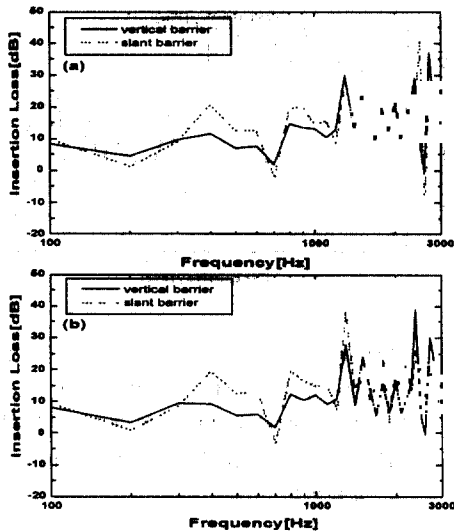


그림 2. 기차가 없는 경우, 쌍극자 음원을 수음점에서 먼 지점의 레일에 두었을 때 방음벽으로부터 20 m와 , 50 m 떨어진 수음점에서의 삽입손실. (a) 수직형 방음벽, (b) 경사형 방음벽.

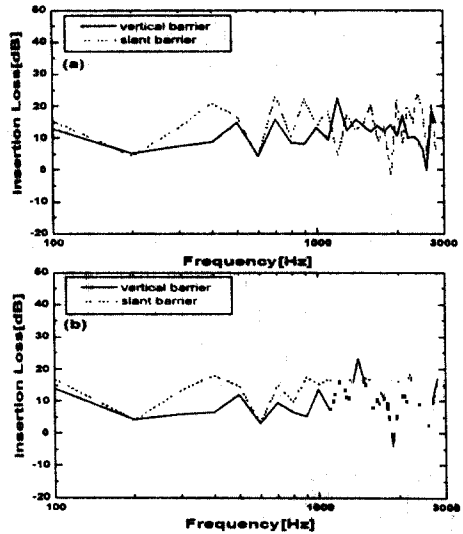


그림 3. 기차가 있는 경우, 쌍극자 음원을 수음점에서 먼 지점의 레일에 두었을 때 방음벽으로부터 20 m와 , 50 m 떨어진 수음점에서의 삽입손실. (a) 수직형 방음벽, (b) 경사형 방음벽.

그림 2의 결과를 보면 방음벽 상단부가 선로 쪽으로 기울어진 경사형 방음벽이 수직형보다 전반적으로 큰 삽입손실 효과를 가짐을 알 수 있다. 이것은 수직형에 비해 저주파수에서는 큰 차이가 없으나, 고주파수 영역에서 쌍극자의 지향성이 지표면에 수평한 방향으로 크게 나타나기 때문에 좀더 큰 감음효과를 가지게 된다. 그러나 방음벽 가까이 음원이 위치할 경우에는 위와는 반대의 결과를 얻게 된다.

그림 3처럼 기차가 있을 경우에는 음원에서 수직 방향은 기차의 하부에서 반사되기 때문에 단지 지표면에 수평한 방향의 소음 전파만 고려할 수 있다. 이 경우도 경사형이 수직형보다 높은 삽입손실을 가진다. 하지만 그림 2의 경우와 비교하면 차량 때문에 많은 양의 음이 차량 바닥면에서 차단되어 차량 옆면으로 나오는 음에 대해서만 방음벽 뒤로 회절되므로 전반적으로 삽입손실이 감소함을 확인할 수 있다. 지금은 모두 방음벽 자체가 반사형 재질로 구성된 경우이고 다음은 흡음형 방음벽에 대해 살펴보겠다.

#### 4.2 흡음형 방음벽의 삽입손실 비교

기차를 수음점 가까운 레일에 있는 경우, 선로 양쪽에 흡음형 방음벽을 설치한 경우 삽입손실을 그림 4에 나타냈다. 이때 수음점은 방음벽으로부터 20 m와 50 m 떨어진 지점에 위치한다. 방음벽의 유동비저항( $\sigma$ )은 20,000 mks rays/m로서 이 값은 대략 유리섬유(glass wool)에 해당된다. 결과에서 보듯이 경사진 형이 역시 수직형 방음벽 보다는 효과적임을 확인할 수 있다. 그림 3의 경우인 반사형 방음벽에 비해 주파수에 따라서 다르지만 전반적으로 삽입손실이 약간 증가하였다. 이것은 음원이 좀더 방음벽에 가깝기 때문이다.

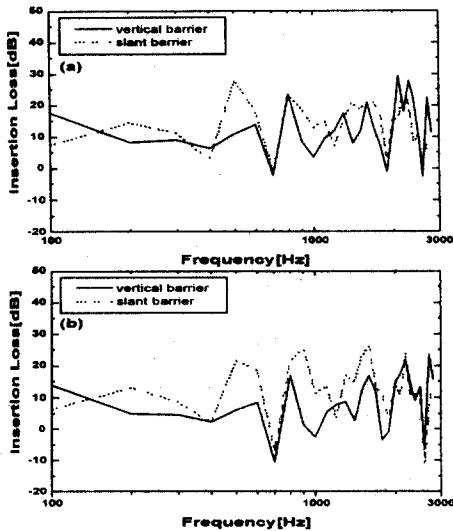


그림 4. 음원을 수음점에서 가까운 지점의 레일에 둔 경우 흡음형 방음벽( $\sigma=20,000$  mks rays/m)에 의한 삽입손실. (a) 수음점이 방음벽으로부터 20 m 떨어진 경우, (b) 수음점이 방음벽으로부터 50 m 떨어진 경우.

#### 4.3 방음벽의 높이 변화에 따른 삽입손실 비교

다음은 수직형 반사형 방음벽이 설치된 경우 방음벽 증가에 따른 삽입손실과 실제 흡음형 방음벽이 반사형 방음벽에 비해 어느 정도의 효과를 가지는 지에 대해 살펴보았다. 반사형 방음벽의 높이를 2.4 m, 2.8 m 그

리고 3.6 m로 증가 시킨 경우 얻은 삽입손실을 그림 5(a)에 비교하였다. 결과를 보면 방음벽의 높이 증가에 따라 삽입손실이 높아짐을 볼 수 있다. 방음벽 높이가 2.8 m인 반사형 방음벽의 설치효과와 비슷하게 흡음형 방음벽의 높이를 변화시킨 결과 그림 5(b)처럼 높이 2.4 m인 흡음형 방음벽이 가장 유사한 삽입손실을 나타냈다. 이것은 곧 높이 2.4 m의 흡음형 방음벽의 효과는 높이 2.8 m의 반사형 방음벽의 설치효과를 나타냄을 뜻한다. 현재 시험선 구간에 설치되는 방음벽은 모두 흡음형인데, 실제 본선 구간에 설치되는 방음벽에 대한 사항은 현재 마련 중이다. 따라서 좀더 다양한 방음벽의 설치를 위해 그리고 시야 확보라는 근본 취지를 고려할 때 반사형 방음벽에 대한 높이는 흡음형 방음벽과 같아서는 안됨을 의미하게 된다.

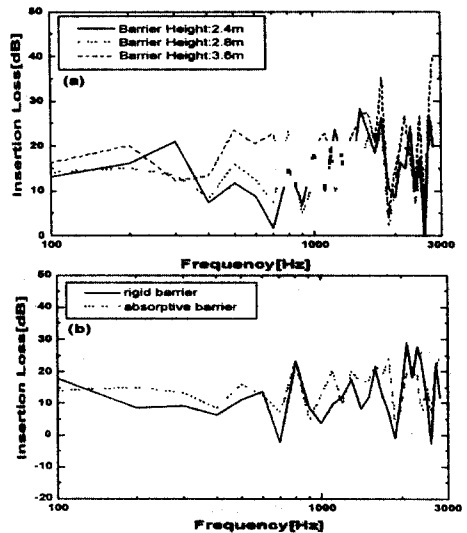


그림 5. 차량이 있는 경우 음원을 수음점 가까운 레일에 설치할 때 방음벽 설치효과. (a) 방음벽의 높이에 따른 영향, (b) 높이 2.8 m인 반사형 방음벽과 높이 2.4 m인 흡음형 방음벽의 비교

### 5 결론

본 논문에서는 고속전철의 주요 소음원 중 쌍극자 음원 특성을 가지는 바퀴와 레일 사이의 상호작용에 의한 소음원을 대상으로 현재 시험선 구간에

설치 중인 방음벽에 대한 영향을 BEM 모델로 2차원 해석을 하였다. 쌍극자 지향 특성의 음원을 만들기 위해 서로 반대 위상을 가지는 두 개의 단극자를 이용하였다.

예측 결과를 보면 단극자 음원을 사용할 때와 마찬가지로 음원쪽으로 경사진 상단부 형상을 가지는 경사형 방음벽이 수직형 방음벽 보다 좋은 효과를 가짐을 알 수 있었다. 단지 음원의 모델화에 있어 차량을 음원 위에 실제 둔 경우와 그렇지 않은 경우는 삽입손실의 차이가 있기 때문에 차량을 실제 모델화 하는 것이 필요함을 확인하였다. 현재 시험선에 설치 중인 흡음형 방음벽은 높이를 2.4 m를 기본으로 하는데 만약 반사형을 도입할 경우는 최소한 2.8 m의 높이가 필요함을 간접적으로 예측할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) D. C. Hothersall, S. N. Chandler-Wilde and N. M. Hajmirzae, 1991, "Efficiency of Single Noise Barriers," J. Sound and Vib., Vol. 146, pp. 303-322.
- (2) S. N. Chandler-Wilde and D. C. Hothersall, 1995, "Efficient Calculation of the Green's Function for Acoustic Propagation above a Homogeneous Impedance Plane," J. Sound and Vib., Vol. 180, pp. 705-724.
- (3) E. M. Salomons, 1996, "Sound Propagation Over a Barrier computed with the Parabolic Equation Method," Proceedings of Inter-noise 96, pp. 813-818.
- (4) Y. Gabillet, P. Jean and J. Defrance, 1997, "A Boundary Element Formalism for the Study of Noise barriers," Proceedings of Inter-noise 97, pp. 437-440.
- (5) P. A. Morgan, D. C. Hothersall and S. N. Chandler-Wilde, 1998, "Influence of Shape and Absorbing Surface-A Numerical Study of Railway Noise Barriers," Appl. Acoust. Vol. 217, pp. 405-417.
- (6) P. HouTave and J. P. Clairbois, 1997, "Specific designs of noise barriers for trains. Part I: Theoretical Study Forms and Materials," Proceedings of Inter-noise 97, pp. 421-424.
- (7) J. P. Clairbois and P. HouTave, 1997, "Specific Designs of Noise Barriers for Trains. Part II: In-situ Verification of Effectiveness," Proceedings of Inter-noise 97, pp. 425-428.
- (8) W. F. King III, 1977, "On the Role of Aerodynamically Generated Sound in Determining the Radiated Noise Levels of High Speed Trains," J. Sound and Vib., Vol. 54, pp. 361-378.
- (9) SYSNOISE Rev. 5.3 (LMS/NIT, Belgium, 1996).
- (10) ANSYS Rev. 5.4. (Swanson Analysis Systems, 1997).
- (11) M. E. Delany and E. N. Bazley 1970, "Acoustic properties of fibrous absorbent materials," Applied Acoustics, Vol. 3, pp. 106-116.
- (12) D. Hohenwarter, 1990, "Railway Noise Propagation Models," J. Sound and Vib., Vol. 141, pp. 17-41.