

난간 벽이 있는 고가선로를 운행하는 열차의 외부소음 해석

External noise prediction of train operating on the elevated structure with parapet wall

김종년* 박희준**
Kim, Jong Nyeun Park, Hee Jun

ABSTRACT

The dominant contributors to the wayside noise are wheel/rail interaction noise and propulsion noise when railway vehicles are running on the open ground. Although there are no big obstacles between source and receiver position for the running on typical open section track, parapet walls should be considered to estimate external noise when running on the elevated track. In that case the sound from the train can not directly be propagated and is therefore diffracted to the receiver position. Simple diffraction formulas have not fully described such complicated diffraction of the reflected noise in space between railway car and infrastructure. In this paper, simple modeling method using "virtual source" has been proposed to overcome the gap between the diffraction theory and practical situation. Virtual source can be defined a sound source positioned between railway car and parapet wall. Its source strength can be easily calculated by other commercial software using ray tracing technique. Reasonable agreement is achieved through the experimental validation of the proposed modeling method.

1. 서론

철도차량이 지상구간을 주행 할 때 발생하는 소음은 선로변 주위의 주민들의 쾌적성에 많은 영향을 주므로 대부분의 나라에서 환경소음규제를 통하여 엄격히 제한하고 있다. 따라서 차량의 제작이나 선로를 건설하기에 앞서 열차통과시의 선로변 소음을 정확히 예측하는 것이 중요한 문제로 대두되고 있으며 이에 대한 연구도 많이 진행되어 왔다.

열차가 개활지를 운행하는 경우의 외부소음 예측은 소음원과 수음점 사이에 장애물이 없다고 가정하여 해석하며 그 해석 기법 등이 비교적 많이 소개 되었고 타당한 수준의 결과를 보이고 있다. [1, 3] 그러나 열차가 고가선로를 운행할 때는 소음원과 수음점 사이에 난간벽(parapet wall)이 존재하여 직접음은 수음점에 전파되지 못하며, 회절음만이 수음점에 전파된다. 그러나 기존의 회절이론 만으로는 철도차량과 고가 구조물 사이의 공간에서 발생하는 복잡한 반사음의 회절현상을 제대로 해석하지 못하여 실제 측정치보다 그 결과가 지나치게 낮게 나오는 단점이 있다. 따라서 난간벽이 있는 고가선로의 외부소음을 보다 현실적으로 예측하기 위해서 새로운 예측기법이 필요하며, 본 연구에서는 가상음원을 이용한 외부소음 예측기법을 제안하고자 한다.

고가선로 주행시 고가 구조물에 따라 구조물이 차량의 통과에 의한 가진으로 소음을 방사하여 수음점에 직접 전달 된다. 여기서는 콘크리트 고가구조물을 대상으로 하므로 구조물의 진동에 의한 구조기인 소음의 영향은 미비한 것으로 가정한다. [2, 4]

* 주식회사 로템 응용기술연구팀 수석연구원, 정회원

** 주식회사 로템 응용기술연구팀 연구원, 비회원

2. 철도차량 외부소음 예측모델

2.1 지상 선로 주행시 외부소음 예측 모델

철도차량이 개활지를 주행할 때의 음원 모델은 Fig.1과 같이 점음원이 차량의 중심점에 위치하는 것으로 생각할 수 있다. i 번째 음원이 $\cos n_i \theta_i$ 의 지향성을 갖는 음원이라면 자유공간에서 거리 r_i^d 떨어진 수음점 R 에서의 직접음에 의한 음압 $\overline{p_{i,D}^2}$ 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

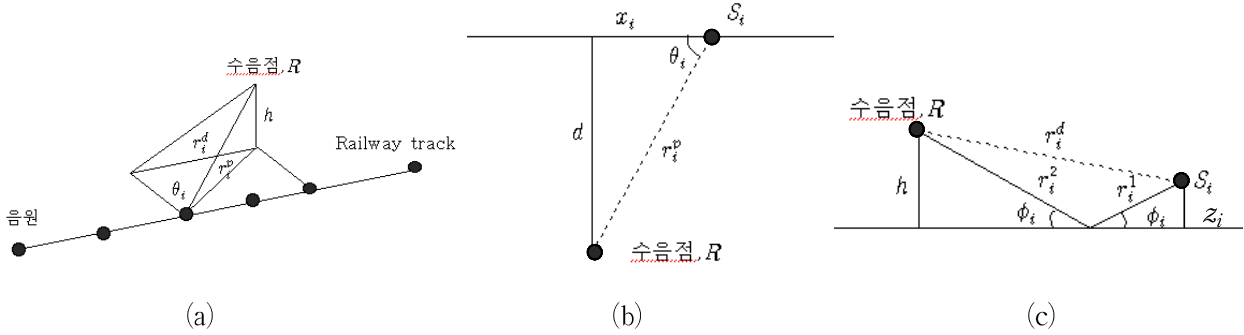


Fig. 1 Prediction model of exterior noise (a) Geometry, (b) Top view, (c) Side view

$$\overline{p_{i,D}^2} = \sum \frac{\rho c W_i}{4\pi r_i^d} \cos n_i \theta_i \quad (1)$$

여기서 W_i : 점음원의 음향파워
 r_i^d : 음원 i 와 수음점과의 거리
 n_i : 음원 i 의 지향계수

여기에 지면에 의한 반사음 $\overline{p_{i,R}^2}$ 은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\overline{p_{i,R}^2} = \sum \frac{\rho c W_i}{4\pi (r_i^1 + r_i^2)^2} \cos n_i \theta_i |R_g|^2 \quad (2)$$

여기서 $R_g = \frac{\sin \phi_i - \frac{Z_c}{Z_g}}{\sin \phi_i + \frac{Z_c}{Z_g}}$
 Z_c : 특성 임피던스
 Z_g : 지면 임피던스

식(1), (2)의 직접음과 반사음을 합하면 i 번째 음원에 의한 외부소음 예측모델 수음원에서의 음압을 구할 수 있다.

2.2 고가 선로 주행시 외부소음 예측모델

2.2.1 회절이론에 의한 예측모델

철도차량이 고가선로를 운행할 때는 음원과 수음점 사이에 난간벽(Parapet wall)의 존재로 인하여 직접 음은 수음점에 전달되지 않고, 난간벽에 의한 회절음만이 수음점에 도달하게 된다. Fig.2와 같이 음원에서 난간벽 상단까지의 직선거리를 a, 난간벽 상단에서 수음점까지의 직선거리를 b 음원과 수음점 사이의 직선거리를 d 라고 했을때, 난간벽에 의한 소음의 저감량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

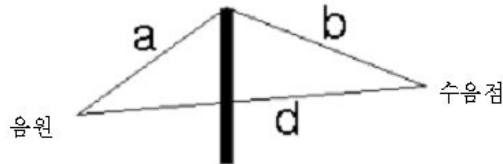


Fig. 2 Propagation of diffracted wave

$$\Delta L_B = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \quad (\quad 3 \quad)$$

여기서, $N = 2 \left(\frac{a+b-d}{\lambda} \right)$

ΔL_B = 회절에 의한 소음 저감량

N = Fresnel number

λ = Wavelength

그러나 이 회절 이론만으로는 회절이론 만으로는 철도차량과 고가 구조물 사이의 공간에서 발생하는 복잡한 반사음의 회절현상을 제대로 해석하지 못하여 실제 측정치보다 그 결과가 지나치게 낮게 나오는 단점이 있다.

2.2.2 가상음원을 이용한 예측모델

기존의 회절이론만으로는 복잡한 반사음의 회절현상을 제대로 해석하지 못하기 때문에 철도차량과 고가 구조물 사이의 공간에서 발생하는 반사음을 가상의 음원으로 가정하여 해석해 보고자 하였다. Fig. 3과 같이 철도차량이 고가구조물을 진행할 때 발생하는 음원은 철도차량과 고가구조물 사이에서 끊임없이 반사를 일으키고, 반사음들은 철도차량과 난간벽 사이의 공간을 통하여 외부로 전파된다. 따라서 철도차량과 난간벽 사이의 공간에 위치하는 소음을 하나의 가상의 음원으로 가정할 수 있게 된다. 가상음원의 위치는 난간벽의 끝에 위치하고 있다고 가정한다.

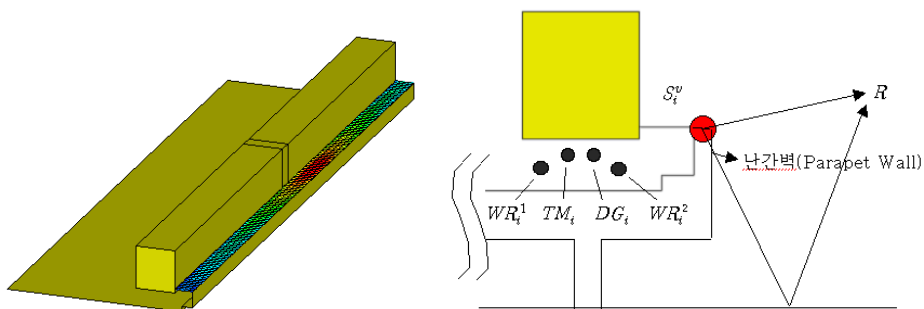


Fig. 3 Model of virtual source

여기서, S_j^v : j 번째 대차의 가상음원

다음장과 같이 S_j^v 의 음향파워는 기하음향학 소프트웨어인 Raynoise 등을 이용하여 계산하였으며, 가상 음원의 음향파워를 알고 있다면 식 (1), (2)를 이용하여 수음점에서의 음압을 쉽게 구할 수 있다.

3. 가상음원의 음향파워 계산

가상의 음원의 음향파워는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$PWL = 10 \log(\sum 10^{(PWL_j/10)}) \quad (4)$$

$$PWL_j = \overline{L}_{b_j} + 10 \log(s_j) \quad (5)$$

여기서, \overline{L}_{b_j} : j 번째 미소면적에서 실제음원의 음향파워를 이용하여 계산한 차량과 난간벽 사이의 평균음압
 s_j : 격자 하나의 면적

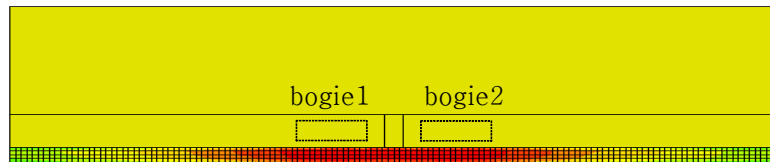


Fig.4 Power calibration model of virtual source

Fig. 4 와 같이 차체와 고가구조물의 난간벽 사이의 공간에 분포하는 음압을 계산하기위하여 기하음향학 기법을 이용한 Raynoise 모델을 수립하였으며 식 (5)에 의해 하나의 격자에 해당하는 음향파워가 각각 결정되고, 철도차량과 난간벽 사이의 면적에 해당하는 전체 음향파워가 결정된다. 모델링은 상용소음해석 프로그램인 Raynoise 3.1을 사용했고, 계산에 사용된 국내 전동차에 대한 장치 음향파워와 그를 통한 계산된 가상음원의 대차당 음향파워는 Table 1과 같다. 차량사이에 인접한 두 개의 대차의 경우를 해석 시, Fig. 5와 같이 가상음원의 음향파워가 110.6 dBA에 수렴함을 알 수 있다. 따라서 하나의 대차에 해당하는 음향파워는 107.6 dBA 가 된다.

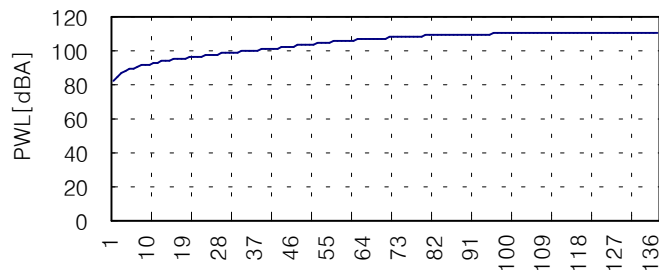


Fig.5 Calculated power level of virtual source in two neighboring bogies

| 장치명 | 실제음원의 음향과위[dBA] | 1대차당 가상음원의 음향과위[dBA] |
|----------------|-----------------|----------------------|
| Wheel/Rail | 107 | 107.6 |
| Traction Motor | 102 | |
| Driving Gear | 100 | |

Table 1 Input power level for actual source and calculated power level of virtual source

여기서 결정된 대차 하나에 의한 가상음원을 식 (1), (2)에 적용하여 외부소음을 예측할 수 있다.

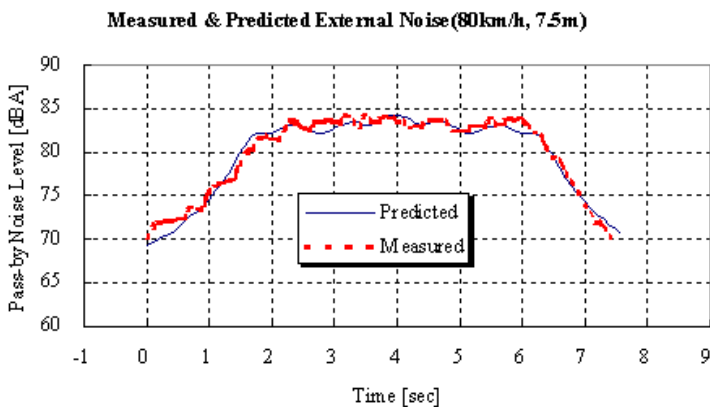
4. 수치해석 결과와 실차 시험 결과와의 비교

4.1 지상선로 주행 시

Fig. 6과 Table 3 은 철도차량이 지상선로 주행 시 소음의 실측치와 식 (1), (2)를 이용한 예측치를 비교한 결과이다. 결과에서 나타나듯이 기존의 철도차량 장치의 음원을 점음원으로 가정한 식 (1), (2)에 의한 외부소음 예측치는 각 장치의 음향과위만 정확하게 알 수 있다면 일반평지를 주행하는 철도차량의 외부소음 해석에 적합함을 알 수 있다. 시험 및 예측에 사용된 철도차량은 6량 1편성의 전동차이다. 이 차량의 주요 장치에 대한 음향과위는 Table 2 와 같다.

| 장치명 | 실제음원의 음향과위 (dBA) |
|----------------|------------------|
| Wheel/Rail | 105 |
| Traction motor | 99 |
| Driving Gear | 96 |
| HVAC | 93 |
| Compressor | 88 |

Table 2 Sound power level of the equipment for AM train



| Noise Level | Predicted (dBA) | Measured (dBA) |
|-------------|-----------------|----------------|
| Lmax | 84.1 | 84.3 |
| Leq | 80.4 | 80.5 |
| TEL | 82.6 | 82.7 |

Table 3 Measured & predicted external noise (ground track)

Fig. 6 Measured & predicted external noise of train running on the ground

4.2 고가선로 주행 시

4.2.1 회절이론을 이용한 외부소음해석

상용소음해석 프로그램인 Raynoise 3.1을 사용하여 난간벽의 회절의 효과를 예측하였다. 철도차량의 음원모델은 Table 1의 실제음원의 음향파워를 사용하였다. 그 결과 레일 중심에서 15m 거리, 레일 헤드에서 1.5m 높이의 수음점의 음압은 68.4dBA가 계산되어진다. Raynoise 해석 시 반사음의 회절은 고려되지 않기 때문에 실제 측정치보다 매우 낮은 값이 계산된다는 것을 알 수 있다. Fig.7은 Raynoise 3.1을 사용하여 난간벽의 회절효과를 해석한 결과이다.

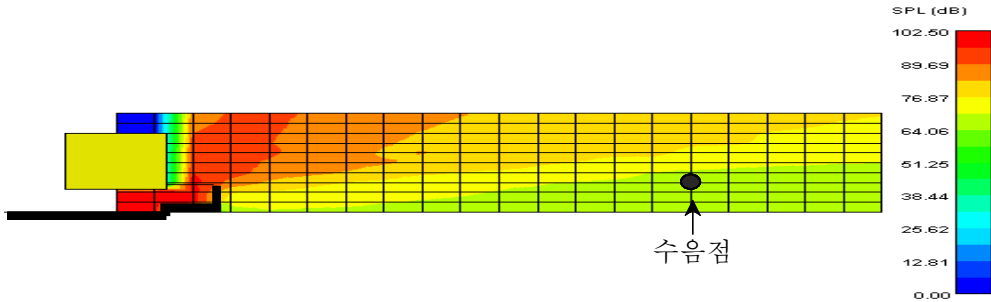


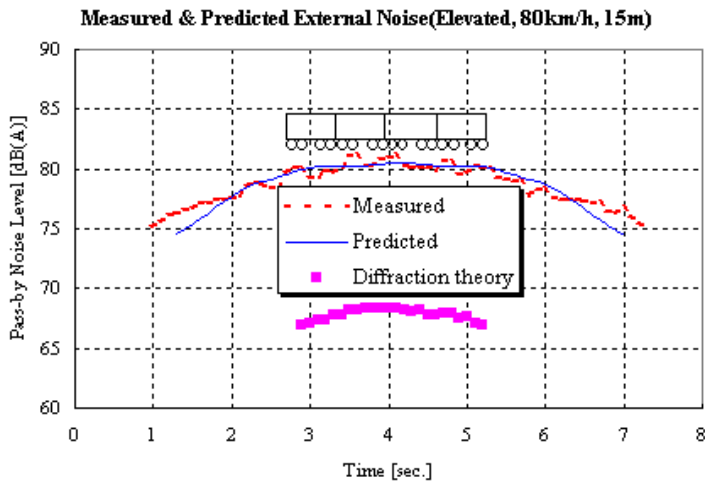
Fig.7 Predicted external noise of train running on the elevated track with parapet wall by raynoise 3.1

4.2.2 가상음원을 이용한 외부소음해석

Table 1의 가상음원의 음향파워를 이용하여 식 (1), (2)에 의한 거리감쇠에 의해 계산한 결과 레일 중심에서 15m 거리, 레일 헤드에서 1.5m 높이의 수음점의 음압은 80.5 dBA가 계산되어진다.

4.2.3 외부소음 측정결과와의 비교

제안한 가상의 소음원을 이용한 예측과 비교하기 위해 부산시 3호선에 위치한 고가구조물에서 철도차량이 운행할 때의 소음을 측정하였다. 이때 열차의 속도는 약 80km/h 이며, 측정위치는 궤도중심선에서 15m, 레일헤드에서 약 1.5m에서 측정하였다. 측정대상 차량은 4량 1편성의 전동차이다. 실측결과와 가상음원을 이용하여 예측한 결과를 비교 요약한 Fig.8과 Table 4에서 보여지듯이 두 결과가 거의 근접한 값을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 회절음만이 도달되는 고가구조물위를 주행하는 철도차량의 외부소음 예측으로 가상음원을 이용하는 방법이 타당함을 알 수 있다.



| Noise Level | Predicted (dBA) | Measured (dBA) |
|-------------|-----------------|----------------|
| Lmax | 80.5 | 81.1 |
| Leq | 79.1 | 79.3 |
| TEL | 80.2 | 80.2 |

Table 4 Measured & predicted external noise (elevated track)

Fig.8 Measured & predicted external noise of train running on the elevated track with parapet wall

5. 결론

이상으로 철도차량이 지상선로를 주행할 때와 고가 선로를 주행할 때를 예측하였다. 그 결과 열차가 지상선로를 주행 할 때는 기존의 이론만으로도 충분히 실측치에 근접한 결과를 나타내지만, 열차가 고가선로를 주행할 때는 기존의 회절이론에 의한 예측치와 실측치와는 상당한 차이를 보이며, 그 대안으로서 본 연구에서 제안한 가상음원을 이용한 예측방법이 실제의 측정치에 매우 근접한 결과를 나타낸다는 것을 확인하였다.

6. Reference

1. 주진수, "평탄부 선로에서 철도소음 전파예측에 관한 연구" , 한국소음진동공학회지 Vol. 8, No 1, 1998, pp. 187-194
2. 주진수, "고가 선로에서 철도소음 전파예측에 관한 연구" , 한국소음진동공학회지 Vol. 8, No 2, 1998, pp. 289-296
3. P. M. Nelson, Transportation Noise Reference Book, 1987, Butterworth
4. L. E. Witting, "Railway Elevated Structure Noise---A Review.", Journal of Sound and Vibration, 87(2), 1983, pp. 249-271
5. ISO 3095 Railway applications-Acoustics-Measurement of noise emitted by railbound behicles,2005
6. RAYNOISE Rev 3.0 User's Manual, LMS INTERNATIONAL