

Research Paper

ISO 9613-2를 이용한 철도 환경소음 예측 모델 개선에 관한 연구

장승호 · 고효인 · 홍지영

한국철도기술연구원

Study on the improvement of prediction model for the railway environmental noise using ISO 9613-2

Seungho Jang · Hyo-In Koh · Jiyoung Hong

Korea Railroad Research Institute

요약 : 철도 소음의 환경영향평가 업무에 있어서 소음도에 대한 정확한 예측이 중요하지만, 국내에서는 overall 소음도의 거리별 측정을 통한 경험식이 근사적으로 이용되고 있다. 본 논문에서는 소음원과 소음 전파의 주파수 특성을 고려하여 철도 소음의 예측 정확도를 향상할 수 있는 예측 모델을 제안하였다. 먼저 철도 소음원을 궤도(레일 및 침목), 차륜, 동력, 공력 성분으로 구분하여 각각의 옥타브 밴드 주파수별 음향파워와 속도계수를 정의하고 음향 조도와 궤도/교량 특성을 반영할 수 있는 보정항을 도입하였다. 소음원에서 수음점까지의 전파 특성은 ISO 9613-2를 적용하여 기하학적 확산, 대기 흡음, 지면 효과, 장애물의 회절에 따른 감쇠 및 지향특성을 반영하여 계산하였다. 소음원 음향파워와 지향인자를 추정하기 위하여 전동 소음원 해석 모델 및 수치해석 결과와 통과 소음도 측정값을 이용하였다. 본 철도 소음 예측 모델을 이용하여 여러 철도 차량과 궤도 유형에 따라서 예측한 소음도를 측정값과 비교하여 정확도를 검증하였으며 기존 예측 모델보다 비교적 정확한 예측이 가능하였다. 따라서 본 결과는 철도 환경 소음의 정확한 영향 예측과 효율적인 소음 저감 대책 수립에 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 철도 소음, 예측 모델, 소음원 특성, 전파 특성

Abstract : Approximate empirical equations obtained by measuring overall noise levels at different distances have been used to evaluate environmental influence of the railway noise though the accurate prediction of noise levels is important. In this paper, a noise prediction model considering the frequency characteristics of noise sources and propagation was suggested to improve the accuracy of noise prediction. The railway noise source was assorted into track, wheel, traction and aerodynamic components and they were characterized with the source strength and speed coefficient at each octave-band frequency. Correction terms for the acoustic roughness and the

First Author, Corresponding Author: Seungho Jang, Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute, 16105, Korea, Tel:+82-31-460-5761, E-mail: shjang@krii.re.kr

Co-Authors: Hyo-in Koh, Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute, 16105, Korea, Tel:+82-31-460-5207, E-mail: hikoh@krii.re.kr

Jiyoung Hong, Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute, 16105, Korea, Tel:+82-31-460-5374, E-mail: hongjy@krii.re.kr

Received : 11 October, 2016. Revised : 8 December, 2016. Accepted : 30 December, 2016.

track/bridge condition were introduced. The sound attenuation from a source to a receiver was calculated taking account of the geometrical divergence, atmospheric absorption, ground effect, diffraction at obstacles and directivity of source by applying ISO 9613-2. For obtaining the source strength and speed coefficients, the results of rolling noise model, numerical analysis and measurements of pass-by noise were analyzed. We compared the predicted and measured noise levels in various vehicles and tracks, and verified the accuracy of the present model. It is found that the present model gives less error than the conventional one, so that it can be applied to make the accurate prediction of railway noise effect and establish its countermeasures efficiently.

Keywords : railway noise, prediction model, noise source property, propagation property

I. 서론

철도 교통은 안전성, 고속성, 정시성 및 에너지 효율성과 같은 많은 장점으로 인하여 새로운 부흥의 시대를 맞고 있으나, 철도변 소음과 같은 환경 공해 문제를 유발할 수 있다. 철도 소음에 대한 대책으로서 사전 예방적인 정책 추진은 사후에 그 영향을 평가하고 관리하는 것보다 경제적이고 효율적이므로 소음의 영향을 사전에 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다.

국내 철도 소음의 환경영향평가에는 2002년 국립환경과학원에서 제시한 예측모델(이하 '기존 모델')이 이용되고 있다(NIER 2002; NIER 2009). 기존 모델은 평지구간에서 거리별 측정을 통하여 구한 경험식으로서 overall 소음도(overall sound pressure level)를 기반으로 하고 있으나, 소음의 전파 중에 발생하는 흡음, 반사, 감쇠, 회절은 소음의 주파수 성분에 의존하므로 다양한 소음 전파 경로를 거치는 환경 조건에서는 적합하지 않을 수 있다. 국외에서는 종전에 이용하던 overall 소음도에 기반한 모델을 ISO 9613-2(1996) 등의 옥외 소음 전파모델을 이용하여 주파수 특성을 고려하고 여러 지형 조건을 고려할 수 있도록 개선하는 추세이며, 그 예로는 독일의 Schall03-2006, 스위스의 sonRAIL, 유럽연합의 Harmonoise 모델이 최근 개발되고 적용된 것들을 들 수 있다(Moehler 2008; Hecht et al. 2010; Beek & Verheijen 2003; Talotte et al. 2006).

본 논문에서는 옥타브 밴드 주파수별 철도 소음원 음향파워와 ISO 9613-2에 제시된 옥외소음전파 특성을 고려할 수 있는 철도소음 예측모델을 적용하여

국내 철도 소음의 예측 정확도를 향상할 수 있는 방안에 대하여 검토하였다. 이를 위하여 전동 소음원 모델과 통과 소음도 측정값을 활용하여 대표 소음 성분인 레일 및 침목, 차륜, 동력, 공력 성분별 음원 음향파워 특성을 추정하였으며, 다양한 궤도 및 교량 조건을 고려할 수 있는 보정항을 추정하였다. 최종적으로 예측한 소음도와 실제 선로변에서 열차 통과 시 측정된 소음도를 비교하여 기존 모델과 본 연구에서 제안하는 예측 모델의 정확도를 살펴보았다.

II. 철도 소음 예측 모델 및 소음원 음향파워 추정

1. 철도 소음 예측 모델

Overall 소음도에 기반한 소음 예측 모델들에서는 소음 전파에서 주파수별 특성을 고려하지 않기 때문에 차량 또는 궤도 특성에 따라 상이한 주파수 특성을 반영하지 못하였다. 이 경우 서로 다른 환경 조건에 대한 소음 전파 수식을 수립하거나 여러 상황에 적용할 하나의 근사적인 수식을 이용하여야 하였다(Leeuwen 2000). 그러나 실제로는 소음의 전파 특성은 소음 발생원 종류가 아닌 주파수의 함수로 주어지며, 소음원의 주파수 특성을 알면 공통된 소음 전파 모델로 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 본 논문에서는 국제 규격인 ISO 9613-2를 주파수별 소음 전파 모델로 이용하였다. ISO 9613-2 음향 전파 모델은 크게 다음과 같은 형태를 가진다.

$$L_{fT} = L_w + D_e - A_{div} - A_{atm} - A_{gr} - A_{bar} - A_{misc} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

여기서, L_{rT} 는 옥타브밴드별 등가음압레벨, L_w 는 소음원의 옥타브밴드별 음향파워, D_c 는 소음원의 지향지수(directivity correction), A_{div} 는 기하학적 확산 효과에 의한 감쇠, A_{atm} 는 대기 흡수에 의한 감쇠, 는 지면 효과에 의한 감쇠, A_{bar} 는 방음벽, 장애물 등에 의한 감쇠, A_{mics} 는 기상 등의 기타 효과를 의미한다. 식 (1)은 중심주파수가 63Hz부터 8000Hz까지인 8개의 옥타브 밴드 주파수에 대해서 정의된다.

본 연구에서 제안하는 예측 모델에서는 위 ISO 9613-2의 음향 전파 수식을 이용하기 위하여 8개의 옥타브 밴드 주파수별 소음원 음향파워를 정의하되 차량 및 궤도 조건에 따른 특성을 반영하였다. 선로의 길이는 단위 길이로 구획을 나누어 계산하도록 하였으며, 이를 통하여 선로가 모두 동일하지 않고 일부 구간이 연속적이지 않은 경우와 일부 구간을 설계 변경할 때 효과를 예측할 수 있도록 하였다. 차량이 선로를 따라서 이동하는 경우를 고려하므로 선로의 길이방향으로 소음원이 분포하되, 정확한 소음 전파 예측을 위하여 소음원을 높이별로 구분하고 각 소음원별로 음향파워를 별도로 정의하였다. 일반적으로 주요한 철도 소음원은 전동 소음원(rolling noise source), 동력 소음원(traction or engine noise source), 공력 소음원(aerodynamic noise source)으로 구분될 수 있음이 알려져 있다(Thompson 2009). 전동소음의 경우 차륜과 레일 및 침목의 진동에 의한 소음원이므로 다시 차륜 소음원과 궤도(레일 및 침목) 소음

원으로 구분할 수 있다. 또한 일반적으로 철도 소음의 음향파워가 차량 속도의 n 승에 비례하며(n 은 임의의 수), 궤도 또는 교량 조건에 따른 전달함수를 고려하면, 식 (1)의 소음원 음향파워를 각 선로 구획에 대해서 각 소음원별로 다음과 같이 가정할 수 있다 (KR 2013; Jang & Jang 2013).

$$L_{w,f,m,i} = E_{train,f,i} + c_{v,f,i} \log\left(\frac{v_i}{v_0}\right) + 10\log n_i + C_{track,f,m} + C_{bridge,f,m} \text{ (dB)} \quad (2)$$

여기서, $E_{train,f,i}$ 는 차종 i 차량 1편성이 기준속도 v_0 로 기준조건인 궤도를 달릴 때 단위 길이의 선로에서 방출하는 옥타브밴드별 음원 음향파워의 등가 레벨, $c_{v,f,i}$ 는 차량 속도 인자, v_i 는 차량 속도, n_i 는 통과 대수, $C_{track,f,m}$ 은 기준조건인 궤도와 상이한 궤도일 때 음원 음향파워 차이를 고려하기 위한 보정항, $C_{bridge,f,m}$ 는 교량 조건일 때 음원 음향파워 차이를 고려하기 위한 보정항이다. 여기서 $C_{track,f,m}$ 은 음향 조도 레벨(acoustic roughness level) 차이에 의한 보정항을 포함한다. 기준속도 v_0 는 임의의 값일 수 있으며 본 논문에서는 100km/h로 정의하였다. 통과 차량에 대한 소음원 음향파워를 식 (2)를 통하여 얻은 후 수음점 위치에서의 소음도 예측값 L_{eq} 는 식 (3)과 (4)를 통하여 최종적으로 얻어진다.

$$L_{eq,f,m,i} = L_{w,f,m,i} + D_c + 10\log\left(\frac{L_m}{l_0}\right) - A_{div,m} - A_{atm,f,m} - A_{gr,f,m} - A_{bar,f,m} \text{ (dB)} \quad (3)$$

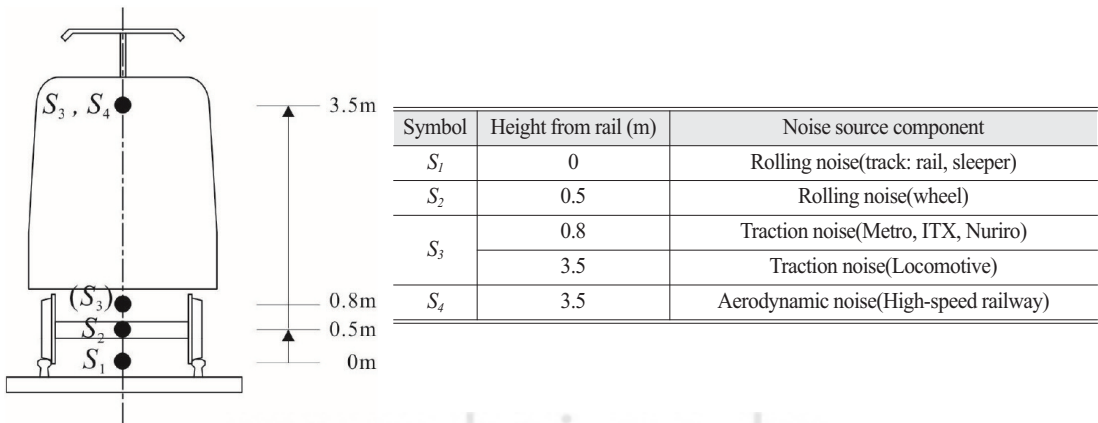


Figure 1. Heights of railway noise sources

$$L_{eq} = 10 \log \left\{ \sum_f \sum_i \sum_m 10^{0.1(L_{eq,f,m,i} + A_f)} \right\} \text{ (dBA)} \quad (4)$$

여기서 L_m 은 m 번째 선로 구획의 길이, l 는 단위 길이로 1m이고 A 는 A-가중치(A-weighting)이다. 철도 소음원의 높이별 가정은 Figure 1에 나타난 바와 같고, 주요 소음 발생 부품의 대표적 위치를 적용하였다. 특히 공력 소음원 위치에 대해서는 마이크로폰 어레이를 이용한 고속열차의 통과 소음원 위치를 파악한 결과로부터 공력 소음이 열차 상단에서 가장 크게 나타나는 것을 참조하였다(Koh et al. 2013).

2. 철도 소음원 특성값 추정

식 (1)과 (2)에서 예측 모델은 음원 음향파위를 나타내는 부분과 음향 전파를 나타내는 부분으로 구분되며 각각의 정확도에 따라서 전체 예측 모델의 정확도가 결정될 수 있다. 음향 전파와 관련한 ISO 9613-2의 경우에는 추정오차가 수음점 거리 1000m, 높이 30m 이내에서 ± 3 dB임이 해당 규격에 언급되어 있다(ISO 9613-2:1996). 따라서 전체 예측 모델의 정확도를 이러한 정도로 높이기 위해서는 음원 음향파위의 추정이 정확하여야 함을 알 수 있다. 선로 변에 설치된 마이크로폰으로 음압을 측정하는 경우 여러 소음원 성분에 의해 발생되고 여러 경로를 통하여 전파된 음파가 모두 합하여 측정되므로, 각 음원 성분들의 음향파위를 직접적으로 알 수 없다. 먼저, 식 (1)에서 알 수 있듯이 측정 마이크로폰이 있는 수음점 위치에서의 음압은 음원에서 방출된 음압이 지향성, 공간 확산, 대기 흡음, 지면 효과, 장애물 등에 의한 감쇠가 이루어진 후의 음압이다. 따라서 이미 알고 있는 제어된 환경에서 음압을 측정하고 해당 감쇠 효과를 역으로 소거하면 음향 파위를 산출해낼 수 있다. 또한 Figure 1에 나타난 여러 소음원 성분들로부터 발생한 소음이 합해져서 측정되기 때문에 각 성분들을 분리하여야 각 성분들의 음향파위를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 먼저 궤도(레일 및 침목, S_1)와 차륜(S_2)의 음원 음향파위의 추정을 위하여 Figure 2에 나타난 전동 소음원 모델(Thompson 2009; Jang & Ryue 2013)을 이용하였다.

전동 소음은 차륜과 레일 표면의 수직 방향의 불규칙성에 의해 발생하는 접촉력(contact force) 변동성분으로 차륜과 레일이 진동하면서 발생된다. 여기서 소음 발생과 관련한 파장 범위의 차륜과 레일 표면의 불규칙성 또는 거칠기를 음향 조도(acoustic roughness)라고 정의하며, 차륜 또는 레일 표면에 접촉식 센서를 이용하여 측정할 수 있다. 차륜과 레일이 접촉할 때 그 접촉점에서 국부적인 탄성 변형이 발생하고 타원의 접촉 영역을 이룬다. 이때 이러한 접촉 영역의 크기와 음향 조도의 파장이 차륜/레일을 가진하는 효과에 영향을 주게 되며, 이러한 효과를 계산하기 위하여 접촉 필터(contact filter)를 적용하였다. 또한 접촉력을 계산하기 위해서 차륜과 레일의 모빌리티와 함께 접촉 강성 또는 접촉 모빌리티가 필요하며, 해당 값을 얻는 데에는 선형 Hertzian 접촉 역학을 이용하였다(Thompson 2009). 차륜 및 레일의 접촉점에서의 접촉력과 속도는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{Bmatrix} F_h \\ F_v \end{Bmatrix} = [Y_{rwc}]^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ i\omega r \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} v_{rh} \\ v_{rv} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Y_{rh} & Y_{rvh} \\ Y_{rvh} & Y_{rv} \end{Bmatrix} [Y_{rwc}]^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ i\omega r \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} v_{wa} \\ v_{wr} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} Y_{wa} & Y_{wra} \\ Y_{wra} & Y_{wr} \end{Bmatrix} [Y_{rwc}]^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ i\omega r \end{Bmatrix},$$

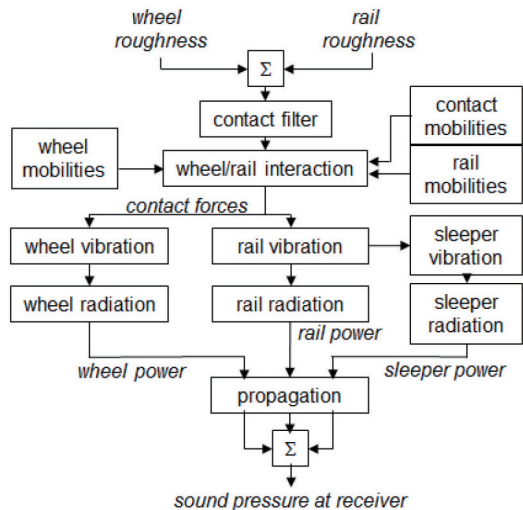


Figure 2. Model for rolling noise generation and propagation

여기서,

$$[Y_{rwc}] = \begin{bmatrix} Y_{rh} & Y_{rth} \\ Y_{rth} & Y_{rv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{wa} & Y_{wra} \\ Y_{wra} & Y_{wr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{ch} & 0 \\ 0 & Y_{cv} \end{bmatrix} \quad (7)$$

이고, F_h 와 F_v 는 수평 및 수직 접촉력, ω 는 각주파수, r 은 음향 조도, Y_{rv} 은 레일의 수직방향 모빌리티이고 Y_{rh} 는 레일의 수평방향 모빌리티이다. Y_{rth} 는 레일의 교차 모빌리티(cross mobility)이다. Y_{wr} 는 차륜의 반지름 방향(radial) 모빌리티이고 Y_{wa} 는 차륜의 차축 방향(axial) 모빌리티이다. Y_{wra} 는 차륜의 교차 모빌리티이다. Y_{ch} 와 Y_{cv} 는 수평 및 수직방향의 접촉 모빌리티이다. 레일의 모빌리티는 이산지지 티모센코보(discrete-supported Timoshenko beam) 모델을 이용하여 해석적으로 구하였고, 차륜의 모빌리티는 유한요소(FEM) 해석프로그램 ANSYS를 이용하여 계산하였다. 레일의 접촉점에서의 수직 및 수평 방향 진동의 평균속도의 스펙트럼 밀도함수를 S_{rv}^{avg} 와 S_{rh}^{avg} 라고 하면,

$$S_{rv}^{pc}(\omega) = E[|v_{rv}|^2] \quad (8)$$

$$= \left| \frac{Y_{rh}(Y_{rh} + Y_{wa}) - Y_{rv}(Y_{rh} + Y_{wa} + Y_{ch})}{D_{rwc}} \right|^2 \times \omega^2 |H(k)|^2 [S_r(k) + S_{\omega}(k)]$$

$$S_{rh}^{pc}(\omega) = E[|v_{rh}|^2] \quad (9)$$

$$= \left| \frac{Y_{rh} Y_{wa} - Y_{rth}(Y_{wa} + Y_{ch})}{D_{rwc}} \right|^2 \times \omega^2 |H(k)|^2 [S_r(k) + S_{\omega}(k)]$$

로 구할 수 있다. 여기서 $|H(k)|^2$ 는 접촉 필터로서 차륜과 레일의 접촉 영역의 크기에 의하여 더 작은 음향 조도의 파장 대역에서 가진 영향이 줄어드는 것을 고려하기 위하여 적용되며, $S_r(k)$ 와 $S_{\omega}(k)$ 는 차륜 조도 스펙트럼이며, k 는 파수(wave number)이다. 또한

$$D_{rwc} = (Y_{rh} + Y_{wa} + Y_{ch})(Y_{rv} + Y_{wr} + Y_{cv}) - (Y_{rth} + Y_{wra})^2 \quad (10)$$

이다. 레일의 수직 방향 평균 속도의 스펙트럼 밀도 함수를 S_{rv}^{avg} 라고 할 때 하나의 차륜이 지나갈 때 단위 길이당 평균 진동 스펙트럼 밀도함수로

$$S_{rv}^{avg}(\omega) = \frac{1 - \exp(-\beta_v VT)}{\beta_v VT} S_{rv}^{pc}(\omega) \quad (11)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 β_v 는 차량 통과 속도가며, Δ_v 는 계산이나 실험으로 구한 decay rate (dB/m)로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta_v = 20 \log(e^{\beta_v}) = 8.686 \beta_v \text{ dB/m} \quad (12)$$

또는 $\beta_v = \frac{\Delta_v}{8.686}$.

레일의 수평 방향 진동 스펙트럼은 수직 방향의 것과 유사하게 구할 수 있으며, 결국 레일 진동에 의한 소음원의 음향파워 $L_{w,r}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$L_{w,r} = 10 \log \left[\frac{2(\rho_0 c_0)^2}{p_0^2} (\sigma_{rv}(r_f + r_i) S_{rv}^{avg} + \sigma_{rh}(2r_h) S_{rh}^{avg}) \right] \quad (13)$$

여기서, p_0 는 기준 음압(20×10^{-6} Pa)이고, σ_{rv} 는 레일의 수직방향의 방사효율, σ_{rh} 는 레일의 수평 방향의 방사효율, r_f 와 r_i 는 레일의 아래 면과 윗면의 폭(rail foot & head widths)이며, r_h 는 레일의 높이이다. ρ_0 는 공기 밀도, c_0 는 공기 중 음파속도(speed of sound)이다.

한편, 자갈 도상 궤도에서는 침목의 진동에 의한 소음 성분이 발생하며, 침목에서 방사되는 음향 음향 파워 $L_{w,s}$ 는

$$L_{w,s} = 10 \log \left[N_a \frac{(\rho_0 c_0)^2}{p_0^2} \left(\sigma_s \frac{A_s}{d} S_s^{avg} \right) \right] \quad (14)$$

이다. 여기서 N_a 는 통과한 차량의 차축 수, σ_{wa} 은 침목의 방사효율, A_s 는 침목의 윗면 표면적의 1/2, d 는 침목 간격이다. S_s^{avg} 는 침목 평균 속도의 스펙트럼 밀도함수이다.

차륜에서 방사되는 음향 음향파워는 앞에서의 레일 진동에서와 유사하게 도출될 수 있으며, 반지름(radial) 방향의 진동과 차축(axial) 방향의 진동을 모두 고려하고 차륜의 음향 음향파워 $L_{w,w}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$L_{w,w} = 10 \log \left[\frac{2}{VT} \frac{(\rho_0 c_0)^2}{p_0^2} (\sigma_{wr} A_{wr} S_{wr}^{avg} + \sigma_{wa} A_{wa} S_{wa}^{avg}) \right] \quad (15)$$

여기서 σ_{wr} 은 차륜의 반지름 방향의 방사효율, σ_{wa}

는 차륜의 차축 방향의 방사효율, A_{wr} 와 A_{wa} 는 각각 차륜의 반지름 방향 및 차축 방향의 음향 방사하는 표면적이다.

식 (1) 및 (3)의 D_c 는 소음원의 지향지수로서 전동 소음원의 경우는 각 진동 성분으로부터 방사되는 음향의 지향성을 검토하여 결정할 수 있으며, 해당 정보는 기존 문헌들(Thompson 2009; Ryue & Jang 2012)을 참고할 수 있다. 예를 들어 궤도 소음원 특성을 파악하고자 할 때 침목 진동에 의한 소음원의 경우는 단극자 음원모델로 근사할 수 있으며, 레일의 수직방향 진동은 단극자 선음원, 레일의 수평방향 진동은 쌍극자 선음원으로 근사할 수 있다. 레일에서 일정 거리의 수음점에서의 궤도 소음은 이들 진동 성분에 의한 음압의 에너지 합으로 주어진다. 궤도 소음원 각 성분 중에서 일반적으로 저주파수 대역에서는 침목 성분, 500Hz 이상 주파수에서는 레일 수직 방향 진동 성분이 주요하다고 알려져 있다. 따라서 전체 궤도 소음은 500Hz 이상의 주파수에서 다른 소음원보다 주요하므로 궤도 소음은 단극자 성분으로 근사하는 것이 적절하다. 한편, 차륜에 의한 음원의 경우 차륜의 반지름 방향 및 차축 방향 진동 성분으로 구성되며, 각각 단극자 및 쌍극자 지향 특성을 가진다고 알려져 있다. 일반적으로 차륜 소음원 성분은 2-8kHz의 고주파수 영역에서 레일 소음원 성분보다 주요하게 되므로 해당 주파수 영역에서의 차륜 진동 성분들의 비율을 식 (15)의 각 성분에 대하여 해석적으로 검토하여 차륜 소음원의 지향지수를 결정하였다(Jang & Ryue 2013).

앞에서 정의한 하부 소음원 성분 S_1 및 S_2 의 크기는 각각 궤도(레일, 침목) 및 차륜의 소음원 음향파워로부터 얻어진다. 하부 소음원 성분 S_1 및 S_2 은 전동 소음원으로서 그 음향파워는 차륜과 레일의 음향 조도 레벨에 의해서 영향을 받는다(Thompson 2009). 음향 조도 레벨은 음향 조도 크기를 기준 조도 크기 $1\mu\text{m}$ 에 대하여 Log로 나타낸 것으로 단위는 dB이다. 따라서 각 차량에서의 기준 궤도에서 소음원 파워를 결정하는 데 있어서 해당 음향 조도 레벨도 함께 명시되어야 한다. 식 (8)과 (9)에서 볼 수 있듯이 전동 소음원의 경우 음향 조도 레벨에 따라서 선형적으로

변화하므로, 소음 예측에 있어서 예측 대상의 음향 조도와 기준 음향 조도의 차이만큼 S_1 및 S_2 의 소음원 음향파워에 보정이 되어야 한다. 이때 다소 복잡한 것은 음향 조도 레벨이 일반적으로 하나의 값으로 대표되는 것이 아니라 파장의 함수로 표현된다는 것이며, 각각의 파장은 속도와 관련한 소음 발생 주파수와 관련이 있다. 하부 소음원이 주요한 주파수 대역은 약 500Hz에서 4kHz까지라고 할 수 있으며 그러한 주파수 대역과 연관된 음향 조도의 파장 대역에 대해서 음향 조도의 레벨을 비교하고 하부 소음원 S_1 및 S_2 에 보정을 가하는 것이 타당하다. Figure 3에는 해당 주파수 대역에 해당하는 음향 조도의 파장 대역에 대하여 나타내었다. 이러한 파장 대역은 차량 통과 속도에 따라서 변화하며, 통과 속도가 낮을 수록 음향 조도의 파장이 작은 대역이, 통과 속도가 높을 수록 음향 조도의 파장이 큰 대역이 전동 소음원 발생에 주요하다.

본 논문에서는 실용적인 면을 고려하여 Figure 4 에서와 같이 음향 조도 레벨을 각 5dB 차이나는 6개의 등급으로 나누고 각 등급 차이마다 소음도 5dB의 보정을 가하는 방안을 제시하였다(Beek & Verheijen 2003). Figure 4에서 class C는 ISO 3095:2005에 제시된 음향 조도 레벨 한계값을 나타낸다. 다른 등급에서는 class C를 기준으로 한 등급 증가 또는 감소할 때 음향 조도 레벨이 5dB씩 증가하거나 감소되는 것을 나타낸다. 즉, class A는 class C보다 10dB 낮다. 주어진 음향 조도가 해당 클래스에

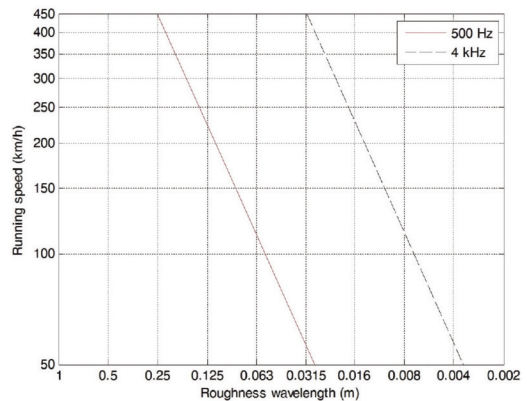


Figure 3. Main roughness wavelength range for each running speed of vehicle

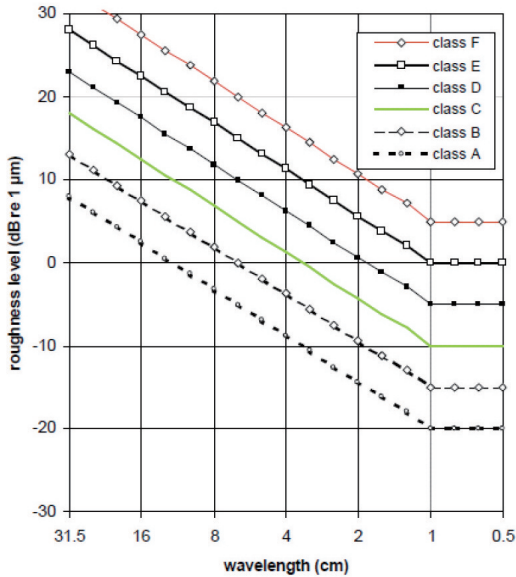


Figure 4. Roughness levels for each class of the rail and wheel surface condition (Beek & Verheijen 2003)

속하기 위해서는 1/3 옥타브 밴드 조도 스펙트럼에서 단일 밴드의 경우 6dB, 3개의 연속한 밴드의 경우 3dB 또는 이 두 개의 조합을 넘지 않아야 한다. 만일 나타난 모든 클래스에 대해 만족하지 않으면 가장 높은 조도 레벨을 나타내는 class F로 하도록 가정하였다. 예를 들어 차종별로 해당 소음원 음향파워를 계측한 차륜 및 레일의 음향 조도 등급을 기본 음향 조도 등급으로 정의하되, 차륜 및 레일의 유지보수 정도에 따라서 유지보수 후에는 한등급 낮은 -5dB를 보정하고, 유지보수가 미흡한 차륜 및 레일의 경우에는 +5dB를 보정하는 방식이다. 또한 차륜 및 레일의 음향 조도 레벨을 측정할 수 있는 경우라면 기본 등급과 비교하여 그 차이 등급만큼 보정할 수 있다.

고속철도가 아닌 일반철도에서는 차량 속도가 180km/h이하로 낮아서 공력 소음원 성분이 무시되기 때문에 앞의 S_1 및 S_2 에 추가로 S_3 성분의 음향파워를 결정하면 된다. 이것은 측정된 소음도에서 S_1 및 S_2 성분의 기여도를 제외하고 S_3 성분의 기여도를 구한 후 추정할 수 있다(Talotte et al, 2006). 먼저, 임의의 소음 레벨 L_1 , L_2 에 대하여 두 레벨의 에너지 합(energy sum) 및 에너지 차(energy minus)를 다

음과 같이 정의한다.

$$L_1 \oplus L_2 \equiv 10\log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}) \quad (16)$$

$$L_1 \ominus L_2 \equiv 10\log(10^{L_1/10} - 10^{L_2/10}) \quad (17)$$

여기서, L_1 , L_2 은 dB 단위의 레벨이다. 선로변 측정점에서 측정된 overall 등가 소음도 (total equivalent sound pressure level) $L_{eq,tot}$ 에서 S_1 , S_2 , S_3 성분의 음원에 의한 기여분을 $L_{eq,s1}$, $L_{eq,s2}$, $L_{eq,s3}$ 로 하면

$$L_{eq,tot}(f) = L_{eq,s1}(f) \oplus L_{eq,s2}(f) \oplus L_{eq,s3}(f) \quad (18)$$

이다. L_1 , L_2 는 레일 및 차륜의 소음원 음향파워로부터 다음과 같다.

$$L_{eq,s1}(f) = L_{w,r}(f) + 10\log I_{A,s1}(f) \quad (19)$$

$$L_{eq,s2}(f) = L_{w,w}(f) + 10\log I_{A,s2}(f) \quad (20)$$

여기서, $I_{A,s1}$ 과 $I_{A,s2}$ 는 각각 S_1 및 S_2 소음원에서 수음점까지의 전달 손실에 해당하는 값으로

$$I_A = \int_{-\infty}^{\infty} 10^{0.1(D_t(x) - A_{dir}(x) - A_{amb}(x) - A_{at}(x))} dx \quad (21)$$

로 정의될 수 있다. 즉, S_3 성분의 기여도 및 소음원 음향파워는 다음과 같다.

$$L_{eq,s3}(f) = L_{eq,tot}(f) \ominus \{L_{eq,s1}(f) \oplus L_{eq,s2}(f)\} \quad (22)$$

$$L_{w,s3} = SEL - 10\log(T) - 10\log I_{A,s3} \quad (23)$$

여기서, SEL 은 측정된 single event level이고, T 는 등가소음도 측정 시의 측정 시간이며 단위는 초이다. 예를 들어 1시간 등가소음도의 경우 3600이다. S_3 성분의 지향지수에 대해서는 실제 차량이 비교적 저속으로 통과할 때 해당 성분이 주요한 저주파수 대역의 시간 이력 분석을 통하여 결정하였다.

예를 들어 무궁화 열차(디젤전기기관차 1량 및 객차 8량)의 S_1 - S_3 소음원 음향파워 추정에서는 서로 다른 열차 속도에서 측정된 소음도 데이터와 전동 소음원 성분 S_1 , S_2 추정값을 이용하였으며, 속도에 따른 변동값을 통하여 속도 계수를 결정하였다. Figure 5는 자갈도상 궤도에서 속도 100과 135km/h로 열차 통과 시 측정된 소음도와 전동 소음원 모델로부터 계

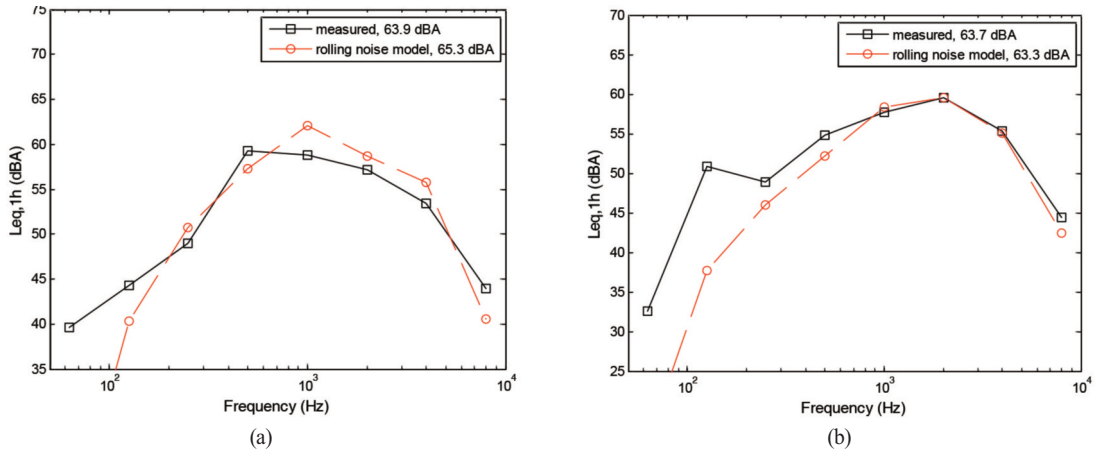


Figure 5. Comparison of the measured noise levels and the predicted rolling noise levels of Mugungwha train. (a) train speed 100km/h, distance 7.5m, (b) train speed 135km/h, distance 13.5m

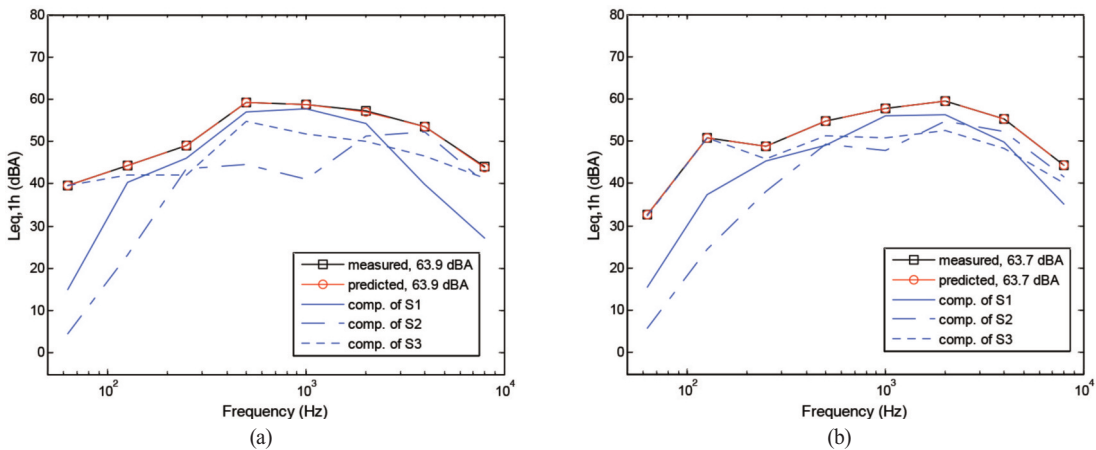


Figure 6. Comparison of the measured noise levels and the predicted noise levels using estimated S1-S3 source strengths of Mugungwha train. (a) train speed 100km/h, distance 7.5m, (b) train speed 135km/h, distance 13.5m

산된 전동 소음 레벨을 나타내었다. 측정지점은 선로로부터 7.5m, 높이 1.2m이었으며, 조도레벨은 class E이었다. 주로 저주파수 대역에서 동력 소음원(S₃) 성분에 의한 차이가 발생하고 있음을 알 수 있으며, 식 (22)과 (23)에 의하여 구해진 S₃ 성분의 기여도를 포함하여 표시하면 Figure 6의 결과를 얻을 수 있다.

결국 기준 속도 100km/h에서의 무궁화 열차(디젤 전기기관차 1량 및 객차 8량)의 각 소음원 음향파워와 속도계수를 정리하면 Table 1과 같다.

공력 소음원 성분의 경우 차량 속도가 낮을 때는 다른 성분들에 비교하여 무시할 수 있으나 고속철도에서와 같이 차량 속도가 증가할수록 공력 소음원 성

분이 커지는 것이 알려져 있다(Thompson 2009). 반면에 공력 소음은 유체 유동 현상과 관계하며 비선형 유체 역학 문제를 해결하여야 특성을 파악할 수 있어서, 정확한 소음원 음향파워를 해석적으로 알아내는 것은 매우 어렵고 속도에 따른 경향을 파악하는데 주로 활용되고 있다. 본 논문에서는 기존의 고속철도 공력 소음에 대한 수치해석 연구 결과를 이용하여 차량 속도에 따른 변화 경향을 나타내는 인자로서 식 (2)의 차량 속도 인자를 추정하였다. 고속 주행 시에 저주파수 대역에서 공력 소음이 다른 소음 성분(전동 소음이나 동력 소음)보다 주요하다고 알려져 있다. 따라서 공력 소음원 음향파워는 고속으로 주행하는

Table 1. Source strength and speed coefficient of a Mugungwha train(9 vehicles)

	Reference source strength of a Mugungwha train (dB)							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S1	52.5	69.3	70.8	74.2	70.7	67.3	58.1	48.1
S2	44.3	56.2	71.2	66.2	57.7	66.9	69.4	59.8
S3	86.4	70.1	64.2	72.4	66.0	63.7	60.6	58.6
	Speed coefficient of a Mugungwha train							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S1	18.1	10.0	31.0	17.1	36.2	27.4	39.3	22.1
S2	19.9	10.8	29.6	19.2	37.1	21.4	41.5	22.3
S3	-80.7	127.3	50.2	4.1	11.8	43.8	40.6	19.7

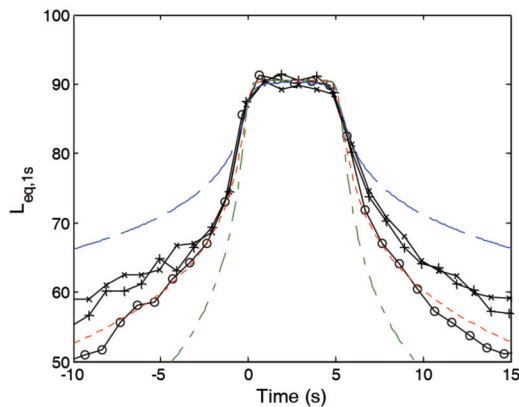


Figure 7. Comparison of time histories of the 63Hz-band noise levels from the measurements and the various source models when KTX passing at the speed of 269km/h. The receiving point: distance 25m, height 1.2m from the railway line. ○, ×, +: measured values; ----, monopole source model; - · - · -, cosine source model; - · - · -, dipole source model

차량에 대한 저주파수 대역의 소음 측정값을 이용하여 추정하였다. S4 공력 소음원 성분의 지향지수의 결정은 실제 차량이 고속으로 통과할 때 해당 성분이 주요한 저주파수 대역의 시간 이력 분석을 통하여 결정하였다. 한 예로 Figure 7에 KTX 차량이 속도 269km/h로 통과할 때 선로에서 거리 25m와 높이 1.2m인 지점에서 측정된 63Hz 밴드 소음도의 시간 이력을 나타내었으며, 동일한 SEL 크기를 가지도록 하되 서로 다른 지향성 선음원 모델 가정을 이용하여 계산한 소음도 시간 이력을 비교하였다. 단극자, 코사인, 쌍극자 선음원 모델 가정과 비교하였으며, 코

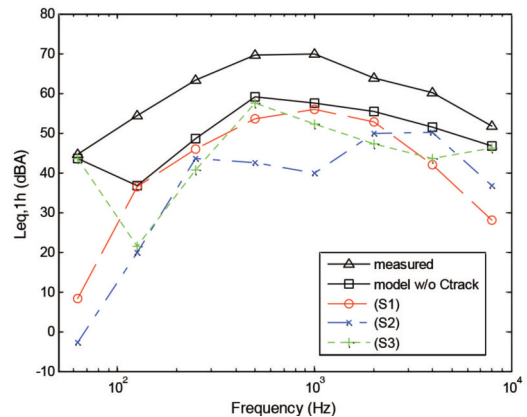


Figure 8. Comparison of the measured noise levels and the predicted noise levels before considering C_{track} or C_{bridge} when a Mugungwha train passing on a steel bridge(plate girder)

사인 선음원 모델 가정이 측정값과 가장 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

식 (2)의 $C_{track, f, m}$ 과 $C_{bridge, f, m}$ 는 기준 조건의 궤도와 상이한 조건일 때의 조건을 반영하기 위한 값들로 기준 조건의 궤도에서 구한 소음원 음향파워와 해당 조건에서 구한 소음원 음향파워 차이를 분석하여 얻을 수 있다. 이때 소음원에서 수음점까지의 지면 조건 등이 상이함에 따라서 전달 손실값도 달라지므로 동일 거리에서 측정된 소음도의 차이가 아니라 계산된 소음원 음향파워의 차이를 이용하여야 한다. 이때 각 지점의 거리와 지면 조건 등을 고려한 전달감쇠를 식 (1)의 ISO 9613-2를 이용하여 구하였다. Figure 8에 무궁화 열차(전기기관차 1량 및 객차 8량)이 강교량(플레이트 거더)를 통과할 때 측정된 소음도와

Table 2. Estimated $C_{bridge,f,m}$ values for the steel bridge(plate girder)

	Correction values for each octave-band frequency (dB)							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S1	0	18	17	15	13	10	0	0
S2	0	0	0	0	0	0	9	13
S3	0	0	0	0	0	0	0	0

$C_{track,f,m}$ 또는 $C_{bridge,f,m}$ 을 아직 고려하지 않은 경우의 예측 모델에서 계산한 소음도를 비교하였다. 무궁화열차의 통과 속도는 97km/h 이었으며 교량 높이는 6.7m 이고 수음점은 교량 궤도로부터 7.5m 수평 거리, -2.1m 수직 거리에 위치하였다. $C_{bridge,f,m}$ 는 측정된 소음도와 교량 조건이 반영되기 전의 예측 모델에 의하여 계산된 소음도 차이로 할 수 있으며 overall 소음도가 측정값과 같도록 각 소음원 성분의 보정값을 결정하였다. Figure 8과 같은 경우는 $C_{bridge,f,m}$ 를 Table 2와 같이 결정할 수 있다.

앞에서 언급한 방법으로 여러 측정지 및 차량들을 대상으로 구한 각 철도 차량 및 궤도 조건별 소음원 특성값과 ISO 9613-2의 주파수별 소음 전파 특성 계산식을 환경영향평가 업무에 쉽게 이용할 수 있도록 마이크로소프트 엑셀(Microsoft corp. 2010)에서 수행할 수 있는 비주얼 베이직 매크로 프로그램 KRNoise를 작성하였다. KRNoise는 국내의 각 차종별 음원 음향파위와 속도계수, 궤도 조건 인자, 지향성 인자, 기본 조도 레벨들을 모두 엑셀 시트로 포함하고 있으며 향후 신규 도입되는 차종이나 궤도에 대해서 쉽게 추가 및 확장할 수 있도록 하였다. 각각의 단추를 이용하여 차종을 선택하거나 궤도 조건을 선택하여 입력할 수 있으며, 계산 단추를 눌러 계산을 수행하거나, 저장 단추를 눌러 계산된 값을 표에 저장하는 기능을 수행할 수 있다. 또한 방음벽의 치수 및 설치 조건을 입력하면 방음벽 설치 전후의 소음도

레벨을 계산하여 표출하도록 하였다. 입력된 데이터와 표출된 차트 등 모든 데이터는 엑셀 고유의 저장하기 또는 인쇄하기 기능을 통하여 저장 및 출력할 수 있다. 본 철도 소음 예측 모델(KRNoise)은 환경영향평가 단계에서의 정보만으로 철도 소음 예측이 가능하도록 하였으며, 현재까지 수록되어 적용할 수 있는 대상 차량 및 궤도 조건은 다음과 같다(Jang et al 2013).

- 대상 차량: KTX, KTX-산천, 디젤전기기관차, 전기기관차, 여객차 (무궁화, 새마을 포함), 화물차, ITX-청춘, 누리로, 전철
- 대상 궤도: 기존선(자갈도상, 슬라브도상, 강교량 (플레이트거더, 트러스교), 콘크리트 교량, 분기기, 용접 이음매), 고속선(자갈도상, 슬라브도상, 콘크리트 교량, 분기기), 터널 주변, 방음벽 설치 궤도

III. 소음 예측값과 측정값의 비교

본 논문에서 제안된 철도 소음 예측 모델에 대한 검증용을 위하여 철도 차량 및 궤도에 대한 소음원 모델 및 특성값으로부터 예측한 소음도와 선로변에서 철도 차량이 통과할 때 측정된 소음도를 비교하였다.

선로에서 떨어진 거리별 소음도에 대한 예측 정확도를 살펴보기 위해서 경부선 81.8KP 하행 지점에 Figure 9과 같이 소음계를 설치하여 측정하였다. 해

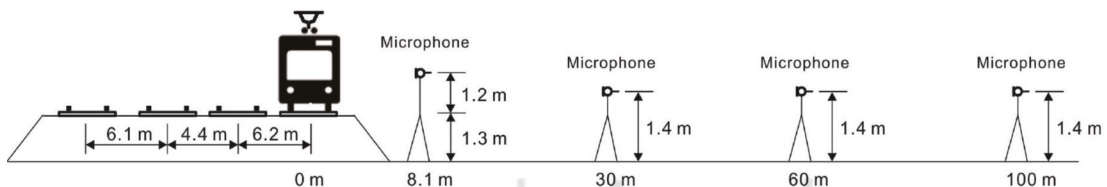


Figure 9. Test condition for measuring the railway noise at a flat land

Table 3. Source strength and speed coefficient of a metro vehicle

	Reference source strength of a metro vehicle (dB)							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S1	34.8	50.2	55.6	61.5	63.1	55.8	39.6	30.3
S2	26.2	37.2	56.1	54.5	51.1	51.5	53.7	43.0
S3	62.2	64.8	70.4	61.6	56.5	56.3	58.8	54.1
	Speed coefficient of a metro vehicle							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S1	-0.6	21.5	-30.3	22.5	53.5	71.8	2.5	16.0
S2	-1.0	21.2	-38.5	34.1	81.1	54.7	5.7	15.8
S3	20.0	20.0	7.1	65.0	54.5	-2.4	53.2	46.6

Table 4. Directivity index of a metro vehicle

S1	S2	S3
0	$10\log(0.13 + 0.87\cos^2\psi)$	if $f = 63\text{Hz}$, 0 if $f = 125\text{Hz}$, $10\log(\cos^2\psi)$ else, $10\log(\cos^2\psi)$

당 지점은 복복선 노선이며, 자갈도상, 콘크리트 침목의 기존선 구간이다.

앞 절에서 언급한 절차대로 구해진 전철의 소음원에 대한 기준 음향파워와 차량 속도 인자를 Table 3에 나타내었으며, 전철의 지향지수를 Table 4에 나타내었다. 속도 200km/h이하의 일반철도에서는 공력소음원 성분에 대해서는 고려하지 않아도 되므로 S4성분은 대상에서 제외하였다.

예측에 이용한 전파모델 (ISO 9613-2)의 계산에

있어서 지면효과의 지면 조건은 해당 지면의 재질 조건에 따라서 다음과 같이 주었다.

$$\begin{aligned} \text{Source region: } G &= 0.6, \\ \text{Middle region: } G &= 0.4, \\ \text{Receiver region: } G &= 0.4 \end{aligned} \quad (24)$$

이것은 해당 지역의 자갈 도상, 풀이 나있는 지면, 콘크리트 길, 논밭 지면의 비율에 따른 근사값이다. 속도 100km/h로 지나는 전철에 대해 예측되어진 거리별 소음도의 주파수 특성을 측정값과 비교하면 Figure 10과 같다. 주파수 성분의 경향과 overall 소음도를 비교하면 비교적 작은 오차를 내고 있음을 볼 수 있다.

한편, 기존의 예측모델(NIER 2002; NIER 2009)에 의한 수식

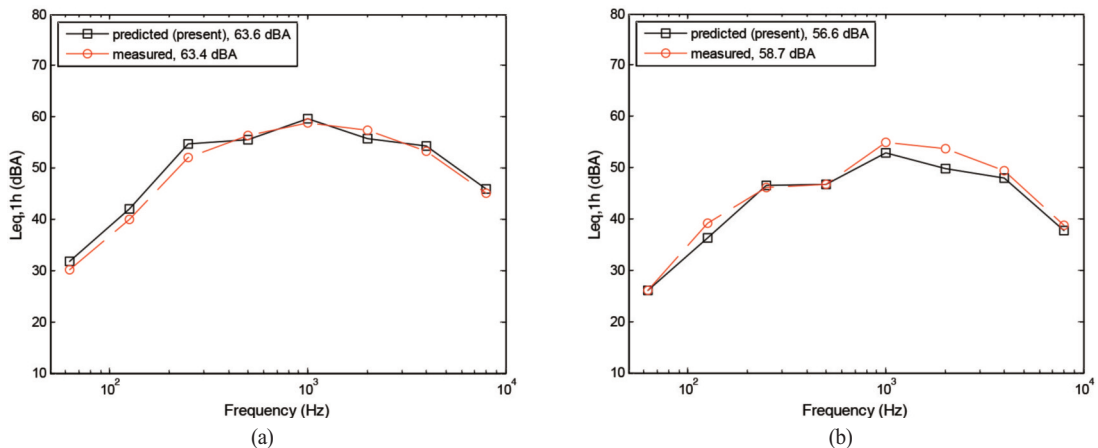


Figure 10. Comparison of predicted and measured noise levels of a metro train (10 vehicles). Train speed: 100km/h. Distance of microphones: (a) 8.1m, (b) 30m, (c) 60m, (d) 100m

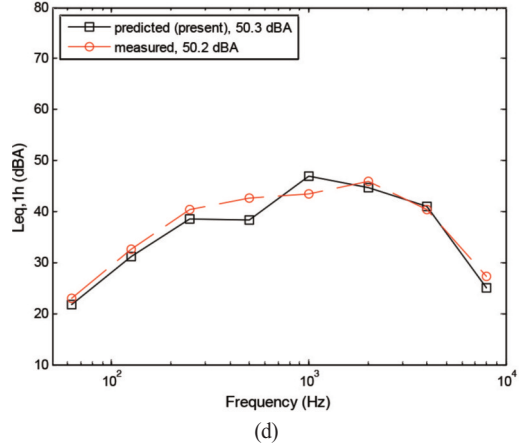
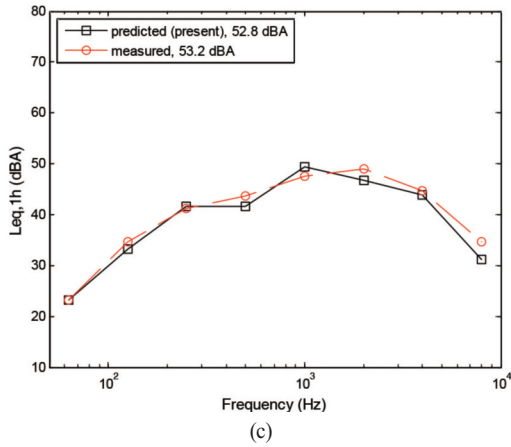


Figure 10. Continued

$$L_{eq,1h} = \overline{L_{max}} + 10\log\left(\frac{nT_e}{T}\right) - 10.3\log r_a \text{ (dBA)} \quad (25)$$

으로부터 전철의 경우인

$$L_{max} = 33.1\log(v) + 26.7 \quad (26)$$

와 $n = 1$ (한 편성), $T_e = 5$ (경부선 복복선 구간의 값), $T = 3600\text{sec}$ 을 입력하여 계산한 값을 비교하면 다음과 같다. 여기서 v 는 통과 속도, r_a 는 거리이다.

Table 5. Comparison of predicted and measured overall noise levels of a metro train (10 vehicles). Train speed: 100km/h

Distance (m)	Measured value	Predicted value	
		Present model	Conventional model
8.1	63.4	63.6	64.0
30	58.7	56.6	58.1
60	53.2	52.8	55.0
100	50.2	50.3	52.7

Table 6. Comparison of predicted and measured overall noise levels of a metro train (10 vehicles). Train speed: 89.7km/h

Distance (m)	Measured value	Predicted value	
		Present model	Conventional model
8.1	61.3	61.8	62.4
30	56.1	54.7	56.6
60	49.0	50.8	53.5
100	45.2	48.3	51.2

Table 5에서 거리 30m의 경우를 제외하고 대체적으로 본 예측 모델이 좀 더 정확한 결과를 내고 있음을 볼 수 있다. 또한 속도 89.7km/h로 통과한 전철(10량)에 대하여 측정값, 본 연구의 제안 모델 예측값, 기존 모델 예측값을 Table 6에 비교하였다. 앞서서와 마찬가지로 측정값과의 오차가 본 연구에서 제안된 모델이 대체적으로 더 작음을 알 수 있다.

한편, 선로변 근처의 20층 높이 공동주택(경부선 36.8KP 지점)에서 높이별 소음도를 검토하였으며, Figure 11에 선로의 위치와 수음점의 개략적인 위치를 나타내었다. 가까운 선로에서 9m 거리에 높이 4.5m의 방음벽이 설치되어 있으며, 대상 공동주택은 방음벽으로부터 65m에 위치해 있다.

수음지에서 보았을 때 2번째 선로를 무궁화열차(전기기관차1량+여객차9량)가 104km/h 속도로 통과한 경우 각 층별 소음도에 대한 측정값과 예측값 비교를 Table 7에 나타내었다. 방음벽의 효과가 커서 철도 소음의 영향이 도로 소음 등의 배경 소음보다 작은 저층의 측정값은 철도 소음만의 본 예측 모델과 비교가 적절하지 않으므로 배제하였다. 본 예측 모델은 측정값과 2dB 내외의 오차를 보였으며, 기존 모델은 4-7dB의 오차를 내고 있음을 알 수 있다.

고속철도에서의 소음 예측값과 측정값의 비교를 위하여, 고속선 경부선 305.6KP 지점에서 방음벽 설치 전과 후의 각각의 경우에 대하여 소음도를 측정하였다. 선로는 슬라브 궤도이었으며 Figure 12에 선

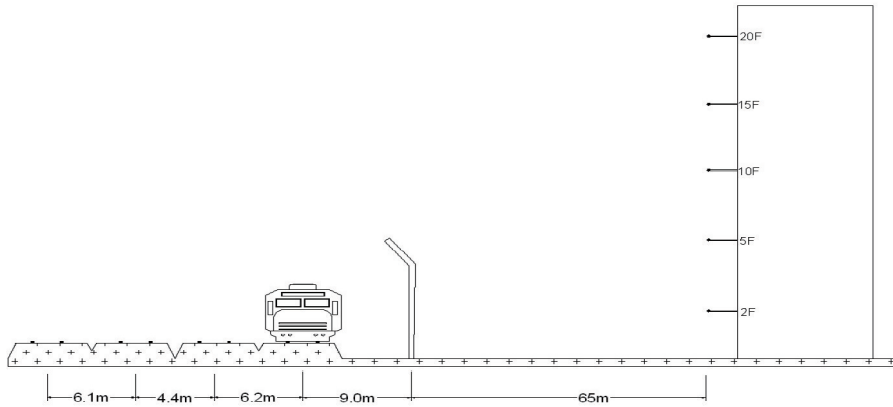


Figure 11. Test condition for measuring the railway noise at an apartment house

Table 7. Comparison of predicted and measured overall noise levels of a Mugungwha train. Train speed: 104km/h

Dim.: $L_{eq,1h}$ (dBA)

Floor (Height, m)	Measured value	Predicted value	
		Present model	Conventional model
10 (24.8)	49.8	51.6	56.8
15 (41)	52.5	50.5	56.4
20 (55)	51.7	49.8	56.0

로 위치와 마이크로폰 설치 위치를 나타내었다. 가까운 선로 중심에서 25m 거리에, 레일 면에서 높이 1.2와 3.5m에 마이크로폰을 설치하였다. 선로에서 거리 6.4m 위치에 지면에서 3m 높이의 방음벽이 설치되기 전과 후에 동일한 위치에서 통과 소음도를 측정하였다.

본 논문의 예측 모델에서 지면효과 계산 시의 조건은 슬라브 도상에서의 콘크리트 면, 풀이 나있는 지

면과 콘크리트 도로의 비율에 따른 근사값으로 다음과 같이 주었다.

$$\begin{aligned} \text{Source region: } G=0, \\ \text{Middle region: } G=0.2, \\ \text{Receiver region: } G=0.1 \end{aligned} \quad (27)$$

방음벽 설치 전에 KTX 열차(1편성 20량)가 속도 267km/h로 통과 시의 소음 예측값과 측정값을 비교하여 Table 8에 나타내었다. 본 예측 모델은 높이 1.2m의 측정점에서는 0.3dB의 오차를 보였으며 높이 3.5m의 측정점에서는 0.5dB의 오차를 보였다. 반면에 기존 모델의 경우 각각 10과 10.2dB의 오차를 보였다. 또한 방음벽 설치 후에 KTX 열차가 속도 262km/h로 통과할 때 측정된 소음도는 Table 9에 나타내었다. 이때 음파의 회절을 고려한 방음벽의 삽입손실 계산에서는 본 예측 모델의 경우 주파수별 특성을 고려한 ISO 9613-2의 방음벽 계산 절차를 따

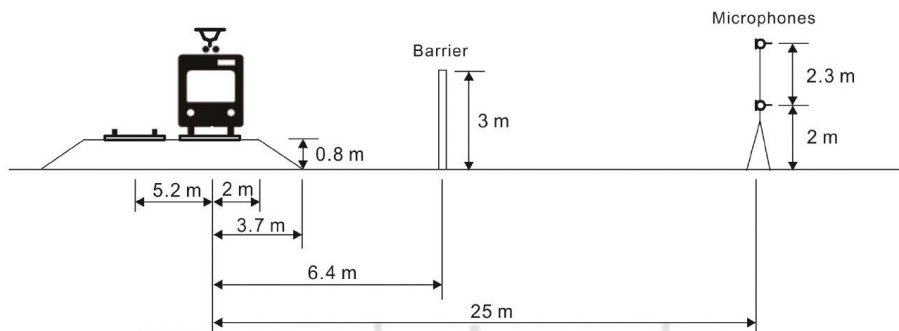


Figure 12. Test condition for measuring the railway noise of a high-speed train with the noise barrier

Table 8. Comparison of predicted and measured overall noise levels of a KTX train without the noise barrier. Train speed: 267km/h

Dim.: $L_{eq,1h}$ (dBA)

Distance (Height) (m)	Measured value	Predicted value	
		Present model	Conventional model
25 (1.2)	70.5	70.2	60.5
25 (3.5)	70.7	70.2	60.5

Table 9. Comparison of predicted and measured overall noise levels of a KTX train with the noise barrier. Train speed: 262km/h

Dim.: $L_{eq,1h}$ (dBA)

Distance (Height) (m)	Measured value	Predicted value	
		Present model	Conventional model
25 (1.2)	60.3	56.8	52.9
25 (3.5)	57.7	57.1	55.3

랐으며, 기존 모델의 경우 overall 소음도를 기반으로 하므로 Fresnel Number를 이용한 방음벽 삽입 손실 계산법을 이용하였다. 측정값과 비교하면, 본 예측 모델은 높이 1.2m의 측정점에서는 3.5dB, 높이 3.5m의 측정점에서는 0.6dB의 오차를 보였다. 기존 예측모델의 경우는 각각 7.4dB와 2.4dB의 오차를 나타내었다.

한편, 기존의 상용 소음지도 프로그램인 CadnaA와 비교를 위하여 위 고속선 경부선 지점에서 하행 KTX 4대 및 상행 KTX 2대가 각각 평균속도 265 및 289 km/h로 통행하였을 때의 등가 소음도를 예측하고 측정값과 비교하였다. 거리 25m, 높이 1.2 및 3.5m 지점의 등가 소음도를 비교한 결과는 Table 10에 나타내었다. 본 예측 모델에 의한 예측값은 0.9dB, CadnaA는 4.7dB의 오차가 발생하고 있음을 볼 수 있다. CadnaA에서는 철도 소음 예측 모델로 독일의 Schall03을 이용하고 있으며, 고속철도 모델로 ICE 차량에 대한 특성값을 활용하고 있다. 따라서 다른 차종인 ICE의 소음원 음향파워 특성이 KTX와 서로 다르므로 본 예측 모델보다 큰 오차를 보이고 있다고 여겨진다. 이와 같이 기존 상용 소음지도 프로그램 CadnaA 또는 SoundPLAN에서는 2차원 또는 3차원 소음지도 작성을 통하여 넓은 영역의 소음

Table 10. Comparison of predicted and measured overall noise levels of KTX trains. Train speed: (T1 line, 4 cars/h) 265km/h, (T2 line, 2 cars/h) 289km/h

Dim.: $L_{eq,1h}$ (dBA)

Distance (Height) (m)	Measured value	Predicted value	
		Present model	CadnaA (Schall03)
25 (1.2)	78.3	77.8	83.0
25 (3.5)	78.7	77.8	83.0

특성을 함께 검토할 수 있는 장점이 있으나, Schall03 모델과 같은 국외 소음 예측 모델과 국외 철도 차량 및 궤도의 특성값이 수록되어 소음 예측을 수행하므로 국내 차량 및 궤도 특성값 예측 시에 다소 차이를 보일 수 있는 단점이 있다. 본 예측 모델은 수음점을 기반으로 소음 예측을 수행하는 수식으로 이루어져 있으며, 이들은 소음지도 프로그램 내의 계산 수식으로 활용하여 소음지도 작성이 가능하다.

이상의 측정 이외에도 본 예측 모델에 의한 예측값을 실제 측정값과 비교하는 다수의 검증 시험을 수행하였으며 그 결과를 Figure 13에 요약해서 나타내었다. 궤도와 차종이 서로 다른 경우들로 41회에 대한 비교 데이터이며, 예측값이 측정값과 일치할 경우 실선으로 표시한 직선상에 위치하고 직선에서 벗어날 수록 오차가 큰 것을 의미한다. 통계처리를 해보면, 기존 예측모델의 표준편차는 8.3dB이고, 본 개발 예측모델의 표준편차는 1.5dB이다. 따라서 95%의 신뢰도에서 기존 예측모델의 오차는 ±16.3dB로 기대

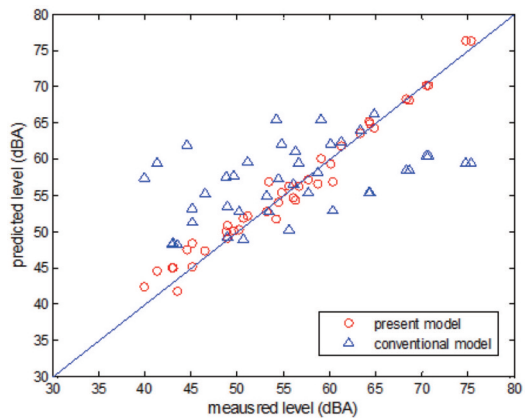


Figure 13. Comparison of predicted and measured noise levels by using the present and conventional models

되고 본 연구에서 제안된 모델의 오차는 ± 3.0 dB로 기대된다. 본 결과는 ISO 9613-2의 옥외소음전파모델에서 수음점이 거리 1000m, 높이 30m 내일 때 추정오차가 3dB로 제시하고 있는 사항과 유사한 것이다. 본 연구에서 제안된 예측모델의 정확도는 소음원 음향파워 추정 시의 정확도와 전파 모델의 정확도에 의존하므로 전체 모델의 정확도는 전파 모델의 정확도를 능가할 수 없다. 따라서 전체 모델의 추정 오차가 전파 모델의 추정 오차와 유사하므로 소음원 음향파워 추정의 정확도는 비교적 적절하다고 여겨진다.

IV. 결론 및 고찰

철도소음에 의한 환경영향평가에 있어서 예측의 정확도 향상을 위하여 ISO 9613-2 옥외 소음 전파 모델을 이용하여 철도 소음원과 전파 시의 주파수 특성을 고려할 수 있는 철도소음 예측 모델을 제시하였다. 철도 소음원의 경우 음향파워와 속도계수, 궤도 특성 보정항에 대해서 옥타브 밴드 주파수별 값을 정의하였으며, 선로에서 비교적 가까이 설치되는 방음벽의 효과와 선로변 민원지의 소음 예측의 정확도를 향상하기 위해서 높이별 소음원 성분을 고려하였다. 또한 소음원 음향파워를 단위 선로 길이당 값으로 설정하고 선로 구획별로 계산이 가능하도록 하여 불연속적인 선로 구성, 즉 분기기 및 이음매, 터널 또는 교량이 선로 일부에 있는 상황과 유한한 연장의 방음벽에 대해서 소음 예측이 가능하도록 하였다. 소음원 성분은 궤도(레일 및 침목), 차륜, 동력, 공력 소음원의 4개로 구성되었으며 각 발생원의 대표적인 높이로 설정하였다. 궤도 및 차륜 소음원은 레일 및 차륜 간의 접촉역학 및 각 진동 특성을 고려한 전동 소음원 해석모델을 이용하여 음향파워와 지향특성을 고려하였다. 또한 레일 및 차륜 표면의 음향 조도에 의한 소음원 음향파워 변화를 반영하였다. 궤도 및 차륜 소음원에서는 자갈도상 궤도 상태에서의 값을 기준으로 하되 슬라브 궤도, 교량 등에서는 궤도 특성에 따른 소음원 음향파워 보정항을 추가하도록 하였다. 동력과 공력 소음원의 경우는 철도 차량의 통과 소음도 측정값을 기반으로 음향파워, 속도계수 및 지

향성 인자를 추정하였으며, 공력 소음원의 속도계수 추정 시 수치해석으로 얻은 속도별 음향파워 증가 추세를 참조하였다.

소음원으로부터 수음점까지의 소음 전파 특성은 ISO 9613-2에서 제시된 기하학적 확산, 대기 흡음, 지면 효과, 방음벽을 A가중치를 취한 후 합산하여 overall 소음도를 구하였다.

본 철도 소음 예측 모델을 이용하여 여러 철도 차량과 궤도 유형에 따라서 예측한 소음도를 측정값과 비교하여 정확도를 검증하였다. 기존에 이용되어오던 예측모델들과 비교를 위하여 NIER 국내 예측 모델과 Schall03 국외 예측 모델의 2중 모델의 예측결과와도 검토하였으며, 거리별, 높이별 소음도 비교에서 기존 예측 모델보다 더 정확한 예측이 가능하였다. 따라서 본 논문의 결과는 철도 소음의 환경 영향 예측 시의 정확도를 향상하는데 이용될 수 있으며, 소음원 성분과 주파수 성분별로 소음도에 대한 기여도를 검토할 수 있는 특성으로 인하여 효율적인 소음 저감 대책 수립에 활용될 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 한국철도시설공단 연구용역 '철도 소음·진동 저감대책 수립을 위한 영향예측 방안 연구', 국토교통부 연구과제 '400km/h 고속철도 소음원 모델 구축 및 소음원 기여도 분석기술 개발', 국토교통부 연구과제 '철도 선로변 지속가능 저소음화 기술개발(16RTRP-B072484-04)'의 일환이었으며, 현장 측정의 일부는 (주)유신과 공동으로 수행되었습니다.

References

- Beek AV, Verheijen E. 2003. Definition of track influence: roughness in rolling noise. Report of the HARMONOISE project. HAR12TR-020813-AEA10, Netherlands.
- Hecht M, Wunderli JM, Thron T, Schu D. 2010. sonRAIL-The new Swiss calculation model

- for railway noise. Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Noise(IWRN). 559-566.
- ISO 3095:2005. Railway applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by railbound vehicles.
- ISO 9613-2:1996. Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation.
- Jang SH, Jang EH. 2013. Study on the noise source modeling and the source strength estimation of Mugungwha trains running on the conventional railway. Transactions of the KSNVE. 23(11): 1020-1026. [Korean Literature]
- Jang SH, Jang EH, Park B, Choi W. 2013. Study on the improvement of prediction model for railway environmental noise. Proceedings of the Conference of the Korean Society of Environmental Impact Assessment; 2013 Oct 25; Seoul: 107-108. [Korean Literature]
- Jang SH, Ryue JS. 2013. Study on the rolling noise model using an analysis of wheel and rail vibration characteristics. Journal of the Korean Society for Railway. 16(3): 175-182. [Korean Literature]
- Janssens MHA, Dittrich MG, Beer FG, Jones CJC. 2006. Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay. Journal of Sound and Vibration. 293: 1007-1028.
- Koh HI, Nordborg A, Rho HM. 2013. A study on the measurement technology of noise sources of the high speed train, Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Nois(IWRN).
- KR: Study on the impact prediction for the establishment of countermeasure against the railway noise and vibration. 2013. Korea Rail Network Authority. [Korean Literature]
- Lecuwen HJAV. Railway noise prediction models: a comparison. Journal of Sound and Vibration. 2000. 231(3): 975-987.
- Microsoft corp. 2010. Microsoft Office 2010 Excel.
- Moehler U, Kurze UJ, Liepert M, Onnich H. 2008. The new German prediction model for railway noise “Schall 03 2006”: An alternative method for the Harmonoise calculation method proposed in the EU Directive on environmental noise. Acta Acustica united with Acustica. 94: 548-552.
- NIER: Establishment of railroad noise monitoring network. 2002. National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- NIER: Improvement of environmental impact assessment of noise(II) - on Prediction of railway noise. 2009. National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Ryue JS, Jang SH. 2012. Comparison of track vibration characteristics for domestic railway tracks in the aspect of rolling noise. Journal of the Korean Society for Railway. 16(2): 85-92. [Korean Literature]
- Talotte C, Stap P, Ringheim M, Dittrich M, Zhang X, Stiebel D. 2006. Railway source models for integration in the new European noise prediction method proposed in Harmonoise. Journal of Sound and Vibration. 293: 975-985.
- Thompson DJ. 2009. Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control. Oxford, UK: Elsevier Ltd.