

콘크리트교를 지나는 철도 차량의 환경 소음 예측 연구

Prediction of the Environmental Noise Level of Railway Cars Crossing a Concrete Bridge

장승호[†]
(Seungho Jang[†])

한국철도기술연구원 교통환경연구팀

(접수일자: 2014년 9월 12일; 수정일자: 2014년 10월 21일; 채택일자: 2014년 11월 7일)

초 록: 국내 철도의 환경 소음 예측을 위해서 기존에는 총합 소음도의 거리별 경험식에 기초한 모델을 이용하였던 바, 교량 주변 소음도를 계산하는 데에도 거리만의 함수를 이용하였다. 그러나 콘크리트교에서는 수음점의 거리뿐만 아니라 위치에 따라라도 소음도가 변화한다. 본 논문에서는 철도 콘크리트교에서 교량 상판에 의한 회절 및 지면 효과를 고려한 소음전파 예측모델을 도출하였으며, 이때 ISO 9613-2의 소음 전파 모델을 이용하였다. 고속철도 콘크리트 교 주변 소음도에 대한 예측값을 실제 측정결과와 비교하였으며, 그 결과 본 예측 모델이 비교적 작은 오차를 냄을 확인하였다.

핵심용어: 철도 소음, 교량 소음, 환경 소음 예측, 통과 소음도, 소음원 모델

ABSTRACT: In the conventional model for the prediction of the railway environmental noise, one used an empirical formula of the total noise level at specific distances. Only a function of the distance to the source was also used to calculate the noise level near the railway bridges. However, the noise varies depending on the position of the receiver as well as the distance from the source especially at concrete bridges. In this paper, a noise propagation model in the railway concrete bridge was derived by considering the diffraction at the bridge deck and the ground effect and applying the ISO 9613-2 noise propagation model. We compared the predicted and measured values of environmental noise at a high-speed railway bridge, and it was confirmed that this prediction model gives relatively small errors.

Keywords: Railway noise, Bridge noise, Environmental noise prediction, Pass-by noise level, Noise source model

PACS numbers: 43.50.Rq

1. 서 론

철도 소음은 선로변에 환경공해 문제를 유발하므로 신선의 건설 또는 개량 시에는 환경영향평가를 수행하도록 되어있다. 또한 운영 중인 철도에서도 소음 민원 예방과 대책을 수립하기 위해서 철도 소음의 영향을 예측하여야 한다. 이때 모든 노선을 대상으로 하므로 철도 소음원과 수음점 사이의 모든 음장을 모델링하고 해석하는 것은 현실적으로 어렵다.

대신에 비교적 간단한 공학적 모델(engineering model)을 이용하여 수음점 소음도를 근사적으로 계산하는 방법이 이용되고 있으며 그 예로는 ISO 9613-2의 옥외소음전파모델 또는 소음지도 작성 프로그램들이 대표적이다.^[1] 국내에서는 철도 소음에 대하여 기존에 평지구간 거리별 측정값에 따른 경험식을 이용하는 방법이 이용되었으나, 총합 소음도를 기반으로 하고 있으며 소음 발생 및 전파의 주파수 특성을 고려하지 않아 다소 큰 오차가 발생할 수 있다.^[2,3] 독일 철도와 스위스 철도에서는 주파수별 소음원 및 전파 특성을 고려하는 Schall 03 2006^[4,5] 과 sonRAIL^[6,7] 모델을 각각 이용하여 개선한 바 있다. 국내에서는

[†]Corresponding author: Seungho Jang (shjang@krii.re.kr)
Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-Ro, Uiwang 437-757, Gyeonggi-Do, Republic of Korea
(Tel: 82-31-460-5761, Fax: 82-31-460-5279)

"이 논문은 2013년 한국음향학회 추계학술대회에서 발표하였던 논문입니다."

Jang *et al.*^[3,8]은 ISO 9613-2 전파모델을 적용하여 옥타브 밴드 주파수별 음원 특성과 전파 특성을 고려한 철도 환경 소음 예측 모델을 제안한 바 있다.

한편, 교량에 대해서는 소음원에 대한 보정항을 검토한 사례는 있으나, 교량 주변에서의 소음 전파 특성 연구는 미흡하였다. 예를 들면 Schall 03 2006에서는 강교량과 슬라브 궤도 교량 유형별로 소음원 강도에 주파수에 일정한 보정항을 정의하고 있으나 슬라브 궤도 교량 상판에 대한 회절 고려에 대해서는 언급되어 있지 않다.^[5] sonRAIL에서는 콘크리트 교와 강교량 유형별로 추가적인 1/3-옥타브 밴드 주파수별 파워 레벨 성분을 정의하고 궤도 소음원 강도에 에너지 합산하지만 역시 콘크리트교 상판에 대한 회절이 언급되어 있지 않다.^[7] 반면, 국내에서와 같이 철도 교량과 근접하거나 매우 가까운 지역에 주거 또는 상업 건물이 밀집해 있는 환경을 자주 볼 수 있으며, 이 때 교량과 가까운 지점에서 상판 회절에 의한 영향이 중요하게 된다.

본 논문에서는 철도 콘크리트교에서 교량 상판에 의한 회절 및 지면 효과를 고려한 소음전파 예측모델을 도출하였으며, 소음도 예측한 값을 고속철도 콘크리트교에서의 통과 시험 측정결과 비교하였다.

II. 철도 콘크리트교 소음전파 예측

플레이트 거더 또는 트러스 교량에서는 교량 상판이 음향학적으로 열려있어서 회절에 대한 고려 없이 궤도 및 차량의 소음원과 교량의 진동에 의한 추가적인 성분을 음향 파워로 하여 소음전파 특성을 계산할 수 있다. 그러나 콘크리트 교량에서는 상판이 소음 전파의 장애물이 되어 회절이 일어나고 교량 하부로 전파된다. 따라서 회절된 성분이 직접 전파되는 것과 지면에 반사되어 전파되는 것을 고려하여야 한다. 한편 교량 주변으로 방사되는 소음의 기여도는 차량과 궤도에서 발생한 소음 성분과 교량의 자체의 진동에서 발생하여 방사되는 성분이 있다. 기존 연구들에 의하면 환경 소음이 주요한 중고주파수 대역에서 차량과 궤도에서 발생한 소음 성분이 교량 진동에 의한 성분보다 10 dB 이상 크다고 알려져 있다.^[9] 본 논문에서는 콘크리트교의 소음에 대해

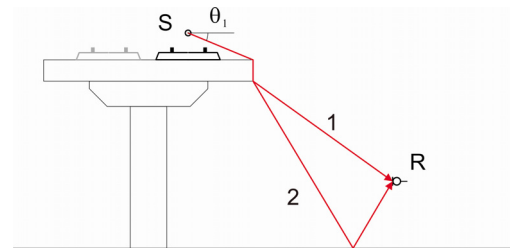


Fig. 1. Schematic of noise propagations at the concrete bridge.

서 다루므로 교량 자체의 진동 성분은 무시하였으며 차량 및 궤도에서 발생한 소음원만을 고려하였다.

Fig. 1과 같이 교량 선로 위의 음원 S에서 수음점 R까지의 소음 전파 경로를 생각할 수 있다. 여기서는 S와 R을 연결하는 선에 교량 상판이 있게 되는 경우이다. 상판에서 회절되어 직접 전파되는 경로(1로 표기)와 지면에 반사된 경로(2로 표기)를 고려하여 수음점의 음압을 구하였다. 이때 수음점에서 먼 쪽의 교량 상판에서 회절되어 돌아오는 소음 성분은 앞의 성분들보다 비교적 적어서 무시할 수 있다고 가정하였다. 수음점 R의 음압은 두 경로에 의한 성분을 합하여 다음과 같다.

$$p = p_1 + Q_r p_2, \tag{1}$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{p_1}{p_0} \left(1 + Q_r \frac{p_2}{p_1} \right), \tag{2}$$

여기서 Q_r 은 구면파 반사계수(spherical reflection coefficient)이고,^[10] p_1 과 p_2 는 경로 1과 2에 의한 음압 성분이다. 또한 p_0 는 교량과 지면이 없다고 할 때 자유 공간에서 S에 의한 R의 음압이다. Eq.(2)는

$$\Delta L = \Delta L_S + \Delta L_G, \text{ 또는 } L_p = L_{p0} + \Delta L_S + \Delta L_G \tag{3}$$

와 같이 음압 레벨들로 다시 쓸 수 있으며, 이때

$$\Delta L_S = 20 \log \left| \frac{p_1}{p_0} \right|, \tag{4}$$

$$\Delta L_G = 20 \log \left| \frac{p}{p_1} \right| = 20 \log \left| 1 + Q_r \frac{p_2}{p_1} \right| \tag{5}$$

이다. 여기서 ΔL_S 는 회절에 의한 효과, ΔL_G 는 지면 반사에 의한 효과를 의미한다. 본 연구에서는 회절 계산에 ISO 9613-2의 방음벽 회절에 의한 감쇠율 (barrier attenuation)을 이용하여 계산하였다.^[1] 즉, 회절된 음파 p_{diff} 는

$$p_{diff} = 10^{-0.05D_z} \frac{D(\theta)}{r} e^{ikr} \quad (6)$$

이다. 여기서 D_z 는 방음벽 회절에 의한 감쇠율, r 은 음원에서 수음점까지의 회절된 경로를 따른 거리, $D(\theta)$ 은 지향성 인자, k 는 파수이다. D_z 는 ISO 9613-2^[1]에 의하면

$$D_z = 10 \log \left[3 + \left(\frac{C_2}{\lambda} \right) C_3 z K_{met} \right] \quad (7)$$

이다. 여기서 C_2 는 지면 반사 영향을 포함하는 경우 20이며, 본 논문에서와 같이 이미지 음원에 의해 지면 반사의 영향을 고려할 경우에는 40이다. C_3 는 다중 회절을 고려하기 위한 값으로, 여기서는 한 번의 회절을 고려하므로 그 값은 1이며, λ 는 옥타브밴드 중심주파수의 파장, z 는 회절된 음파 직접 전파 음의 전파 경로 거리 차이를 나타내는 값, K_{met} 는 Eq.(8)로 주어진다.

$$K_{met} = \exp \left[- (1/2000) \sqrt{d_{ss} d_{sr} d / (2z)} \right], \quad (8)$$

여기서 d_{ss} 는 음원과 회절되는 물체 모서리까지의 거리, d_{sr} 은 회절되는 물체 모서리에서 수음점까지의 거리, d 는 음원에서 수음점까지 직접 연결한 거리이다. 따라서 Eq.(4)는 Eq.(6)을 이용하여 Eq.(9)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta L_S = -D_{z,1} + 20 \log \left| \frac{D(\theta_1)}{D(\theta_0)} \frac{r_0}{r_1} e^{ik(r_1 - r_0)} \right|, \quad (9)$$

여기서 $D_{z,1}$ 은 전파 경로 1에서 상판 회절 감쇠율, θ_1 은 음원과 상판 끝을 이은 직선이 수평선과 이루는 각도, θ_0 는 음원과 수음점을 직접 이은 직선이 수평

선과 이루는 각도, r_1 은 전파 경로 1을 따라서 S에서 R까지 이르는 거리, r_0 는 S에서 R까지 직접 잇는 선의 길이를 의미한다. 지면 반사에 의한 효과는 마찬가지로 다음과 같다.

$$\Delta L_G = 20 \log |F_G|, \quad (10)$$

여기서

$$F_G = 1 + Q_r 10^{-0.05(D_{z,2} - D_{z,1})} \frac{r_1}{r_2} e^{ik(r_2 - r_1)} \quad (11)$$

이고, $D_{z,2}$ 는 전파 경로 2에서 상판 회절 감쇠율, r_2 는 전파 경로 2를 따라서 S에서 R까지 이르는 거리이다.

만일, 음원과 수음점 사이를 연결한 선보다 교량 상판 끝이 아래에 있을 경우 Eq.(1)에 직접 전파된 p_0 성분이 더해져서 Eqs.(12) 또는 (13)과 같다.

$$p = p_0 + p_1 + Q_r p_2, \quad (12)$$

$$L_p = L_{p0} + 20 \log \left| 1 + 10^{-0.05D_{z,1}} \frac{D(\theta_1)r_0}{D(\theta_0)r_1} e^{ik(r_1 - r_0)} F_G \right| \quad (13)$$

지면에 대한 수음점 R의 이미지 수음점(image receiver) R'을 생각하였을 때, S와 R'을 연결한 선보다 교량 상판 끝이 아래에 있을 경우 Eq.(12)에 S와 R' 간에 전파된 성분 p_a 가 더해져서 다음과 같다.

$$p = p_0 + p_a + p_1 + Q_r p_2, \quad (14)$$

$$L_p = L_{p0} + 20 \log \left| 1 + Q_a \frac{D(\theta_a)r_0}{D(\theta_0)r_a} e^{ik(r_a - r_0)} + 10^{-0.05D_{z,1}} \frac{D(\theta_1)r_0}{D(\theta_0)r_1} e^{ik(r_1 - r_0)} F_G \right| \quad (15)$$

이다. 여기서 r_a 는 S와 R'을 직접 이은 거리이고, θ_a 는 S와 R'을 직접 이은 직선이 수평선과 이루는 각도를, Q_a 는 S와 R' 경로에서의 지면 구면파 반사계수이다.

수음점이 교량 상판 보다 위에 위치할 경우 교량 상판에 대한 이미지 음원 S'과 수음점 R을 연결한 선이 교량 상판을 지나게 되면, 교량 상판에 의한 반사

효과를 고려하여야 한다. 즉, 이때의 수음점 음압과 레벨은 다음과 같다.

$$p = p_0 + p_b + p_1 + Q_r p_2, \quad (16)$$

$$L_p = L_{p0} + 20 \log \left| 1 + Q_b \frac{D(\theta_b)r_0}{D(\theta_0)r_b} e^{ik(r_b-r_0)} + 10^{-0.05D_{z,1}} \frac{D(\theta_1)r_0}{D(\theta_0)r_1} e^{ik(r_1-r_0)} F_G \right|, \quad (17)$$

여기서 r_b 는 교량 상판에 대한 이미지 음원 S'과 수음점 R을 직접적으로 이은 거리이고, θ_b 는 교량 상판에 대한 이미지 음원과 수음점을 직접 이은 직선이 수평선과 이루는 각도를, Q_b 는 S'과 R 경로에서의 교량 상판의 구면파 반사계수이다.

교량에 방음벽이 설치된 경우 Fig 2와 같이 방음벽 끝단에서의 회절을 고려하여 수음점의 음압을 계산할 수 있다. 음향학적으로 투명하지 않은 난간도 방음벽과 마찬가지로 고려할 수 있다. 음원 S와 수음점 R을 연결한 선보다 방음벽 끝이 위에 있을 경우 Fig 2와 같이 4개의 전파 경로를 고려하여야 한다. 따라서 수음점에서의 음압은 Eqs.(18)과 (19)와 같이 구할 수 있다.

$$p = p_1 + Q_1 p_2 + Q_2 p_3 + Q_1 Q_2 p_4, \quad (18)$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{p_1}{p_0} \left(1 + Q_1 \frac{p_2}{p_1} + Q_2 \frac{p_3}{p_1} + Q_1 Q_2 \frac{p_4}{p_1} \right), \quad (19)$$

여기서 Q_1 과 Q_2 는 각각 교량 상판과 지면의 구면파 반사계수이다. Eq.(3)에서와 같이 방음벽 회절에 의

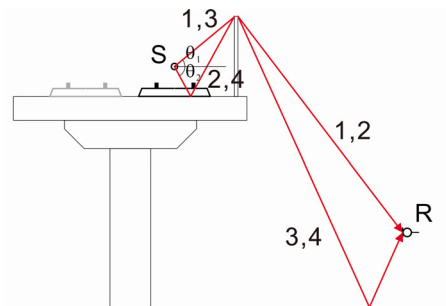


Fig. 2. Schematic of noise propagations at the concrete bridge with a barrier.

한 효과와 지면 반사에 의한 효과로 구분하여 나타낼 수 있으며, 회절에 의한 부분은 Eqs.(4)와 (7)과 동일한 수식을 적용할 수 있으나 지면 반사에 의한 효과는 Eq.(20)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta L_G &= 20 \log \left| \frac{p}{p_1} \right| \\ &= 20 \log \left| 1 + Q_1 \frac{p_2}{p_1} + Q_2 \frac{p_3}{p_1} + Q_1 Q_2 \frac{p_4}{p_1} \right|, \quad (20) \\ &= 20 \log |F_{G2}| \end{aligned}$$

여기서 F_{G2} 는 Eq.(21)과 같다.

$$\begin{aligned} F_{G2} &= 1 + Q_1 10^{-0.05(D_{z,2}-D_{z,1})} \frac{D(\theta_2)r_1}{D(\theta_1)r_2} e^{ik(r_2-r_1)} \\ &\quad + Q_2 10^{-0.05(D_{z,3}-D_{z,1})} \frac{r_1}{r_3} e^{ik(r_3-r_1)} \\ &\quad + Q_1 Q_2 10^{-0.05(D_{z,4}-D_{z,1})} \frac{D(\theta_2)r_1}{D(\theta_1)r_4} e^{ik(r_4-r_1)}. \end{aligned} \quad (21)$$

만일, 수음점의 높이가 높아서 음원 S과 수음점 R 사이를 연결한 선보다 방음벽 끝이 아래에 있을 경우 Eq.(18)에 직접 전파된 p_0 성분이 더해져서 Eq.(22)와 같이 된다.

$$p = p_0 + p_1 + Q_1 p_2 + Q_2 p_3 + Q_1 Q_2 p_4. \quad (22)$$

따라서 다음과 같이 음압 레벨을 구할 수 있다.

$$\frac{p}{p_0} = 1 + \frac{p_1}{p_0} \left(1 + Q_1 \frac{p_2}{p_1} + Q_2 \frac{p_3}{p_1} + Q_1 Q_2 \frac{p_4}{p_1} \right), \quad (23)$$

$$L_p = L_{p0} + 20 \log \left| 1 + 10^{-0.05D_{z,1}} \frac{D(\theta_1)r_0}{D(\theta_0)r_1} e^{ik(r_1-r_0)} F_{G2} \right|. \quad (24)$$

또한, 교량 상판에 대한 이미지 음원 S'과 수음점 R 사이를 연결한 선보다 방음벽 끝이 아래에 있을 경우 위의 결과에 다시 이미지 음원으로 부터 직접 전파된 p_b 성분이 더해져야 한다.

$$p = p_0 + p_b + p_1 + Q_1 p_2 + Q_2 p_3 + Q_1 Q_2 p_4, \quad (25)$$

또는

$$\frac{p}{p_0} = 1 + \frac{p_b}{p_0} + \frac{p_1}{p_0} \left(1 + Q_1 \frac{p_2}{p_1} + Q_2 \frac{p_3}{p_1} + Q_1 Q_2 \frac{p_4}{p_1} \right) \quad (26)$$

이고, 음압레벨로는 Eq.(27)과 같다.

$$L_p = L_{p0} + 20 \log \left| 1 + Q_b \frac{D(\theta_b) r_0}{D(\theta_0) r_b} e^{ik(r_b - r_0)} + 10^{-0.05 D_{s1}} \frac{D(\theta_1) r_0}{D(\theta_0) r_1} e^{ik(r_1 - r_0)} F_{G2} \right|, \quad (27)$$

여기서 r_b 는 S'과 R을 직접적으로 이은 거리이고, θ_b 는 S'과 R을 직접 이은 직선이 수평선과 이루는 각도를, Q_b 는 S'과 R 경로에서의 교량 상판의 구면파 반사계수이다.

III. 소음원 강도 추정 및 소음 측정

소음도 예측에 있어서는 전파 모델 이외에도 소음원 모델이 필요하며, 본 논문에서는 Jang *et al.*^[3,8]에 의한 소음원 모델을 이용하였다. 소음원은 선로에서 높이별 (0, 0.5, 3.5 m)로 3개의 성분을 가지고 있으며, 각 음원의 기준 강도 및 속도계수는 차종 및 궤도 조건별, 옥타브 밴드 주파수별로 정의된다. 음원에 대한 수식은 Eq.(28)과 같다.

$$L_{w,f,m} = E_{train,f} + c_{v,f} \log\left(\frac{v}{v_0}\right) + 10 \log n + C_{track,f,m} + C_{bridge,f,m}, \quad (28)$$

여기서 $E_{train,f}$ 는 차량 1편성이 기준속도 v_0 로 기준 조건의 궤도를 달릴 때 단위 길이의 선로에서 방출하는 옥타브 밴드별 음향강도의 등가 레벨(dB), $c_{v,f}$ 는 속도 계수, v 는 차량 속도, v_0 는 기준 속도 100 km/h, n 는 차량의 통과대수, $C_{track,f,m}$ 는 궤도 조건에 따른 보정값, $C_{bridge,f,m}$ 는 교량 종류에 따른 보정값이다. 기준조건의 궤도는 토공구간 자갈 도상 직선 궤도로 되어있다. 각 차량 및 궤도 조건에 대한 기준 강도 및 속도 계수 등은 토공구간 개활지에서 서로 다른 속도로 통과 시의 소음 측정과 전동 소음(rolling noise)

해석 모델을 이용하여 추정되었다.^[3,8,11] $C_{track,f,m}$ 은 슬라브 도상, 이음매, 분기기, 음향 조도 등의 궤도 조건 변화에 따른 음원 강도 보정값으로 측정을 통해서 구해졌다. $C_{bridge,f,m}$ 는 교량 상의 선로 하부의 지구조 변화에 따른 음원 강도 보정값으로 교량 유형별로 측정을 통하여 얻어졌다.^[3] 선로는 구획으로 나뉘며, 각 구획 중심에 점음원을 위치시켜 수음점까지의 전달감쇠를 고려한 소음도 성분을 계산한 후 총합 소음도를 계산하게 된다. Eq.(28)의 소음원 모델은 63 Hz부터 8 kHz까지의 8개의 주파수 밴드별로 정의되는 식으로 궤도 및 교량 보정항도 해당 주파수에 대하여 적용된다. 차종별 소음원 강도와 궤도 및 교량 조건별 보정항값은 Reference 3에 수록된 값을 이용하였다.

Eq.(2)에 나타난 자유 공간에서의 수음점 위치의 음압 p_0 는 Eq.(29)와 같이 구할 수 있다.

$$L_{p_0,eq,f,m} = L_{w,f,m} + D(\theta_0) + 10 \log\left(\frac{l_m}{l_0}\right) - A_{div,m} - A_{atm,f,m}, \quad (29)$$

여기서 $L_{p_0,eq,f,m}$ 은 m 번째 선로 구획 음원에 의한 p_0 성분의 등가 음압레벨, $D(\theta_0)$ 는 지향성 인자, l_m 은 m 번째 선로 구획의 길이, l_0 는 단위길이 1m이다. 또한 $A_{div,m}$ 는 기하학적 확장에 따른 감쇠항, $A_{atm,f,m}$ 는 대기 흡수에 따른 감쇠항으로 ISO 9613-2에 제시된 수식을 이용하여 계산할 수 있다.^[1]

고속철도 콘크리트 교량에서 KTX 및 HEMU(고속철 시험차량) 통과 시의 소음도를 앞 장의 이론으로 예측하고 측정값과 비교하였다. 고속철도 경부2단계 구간의 경산 부근 광석고가에서 시험하였으며 측정 위치와 모습을 Figs. 3과 4에 나타내었다. 교량 위의 선로는 복선이며 슬라브 도상으로 되어 있고, 레일 면의 지면에서의 높이는 18.8m이다. 모두 10개의 마이크로폰(PCB 378B02)을 거리와 높이별로 설치하였으며 Ch. 1의 마이크로폰은 선로보다 1.5m 높은 위치에 설치하기 위하여 고소작업차를 이용하였다. 주파수 분석은 MBBM사의 PAK MKII를 이용하였다.

측정한 소음도와 예측값을 Fig. 5에 나타내었다. KTX의 경우 T2 노선에서 속도 238 km/h로 통과하였

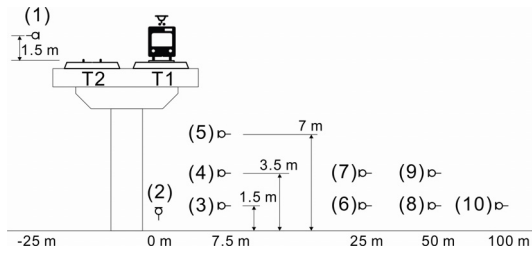


Fig. 3. Measuring points of pass-by noise at a concrete bridge.



Fig. 4. Measurements of pass-by noise at a concrete bridge.

으며, HEMU의 경우 T1 노선에서 속도 237 km/h로 통과하였다. Fig. 5(a)의 KTX 시험 결과에서는 교량 상판에 가려져 회절 성분만 도달하는 Ch. 2부터 7까지의 마이크론 위치까지 비교적 소음도가 작다가 직접 전파되는 성분이 영향을 주는 Ch. 8 마이크론에서 다소 커지는 경향은 측정값과 예측값이 유사하다. Ch. 8이후에서 예측값이 측정값보다 더 큰 것은 실제로 차체에 넓게 분포되어 있는 음원들(하부의 궤도, 차륜 소음원 제외)을 높이 3.5m로 집중하여 하나의 대표 음원으로 근사한 소음원 모델을 이용하였기 때문으로 여겨진다. 가장 큰 오차가 나는 Ch. 9 위치에서 오차는 4.6 dB이며 오차가 가장 작은 Ch. 7 위치에서는 1.4 dB이었다.

Fig. 5(b)의 HEMU 시험 결과에서 Fig. 5(a)의 결과와 유사하게 Ch. 6 위치에서는 다소 큰 오차를 보이지만 거리가 멀어질수록 오차가 줄어드는 경향을 보인다. 이것은 예측에서는 높이 3.5m에 집중되어 있는 대표 음원으로 인하여 직접 전파되는 성분 때문에 큰 소음도로 예측되지만, 실제에서는 낮은 위치의 일부 소음원 성분이 회절되어 수음점에 도달하기 때문으로 여겨진다. 수음점의 거리가 멀어질수록 대부분의 소음원이 시야에 들어오고 교량 상판에 회절

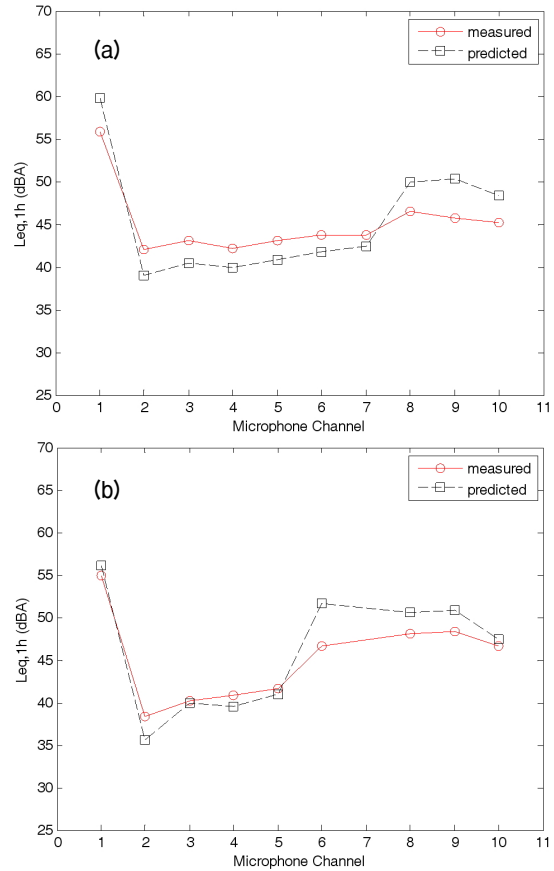


Fig. 5. Measured and predicted noise levels near a concrete bridge. (a) KTX (T2 line), (b) HEMU (T1 line).

없이 직접 전파되므로 측정값과 예측값의 차이가 줄어들 것으로 생각된다. 모든 측정 위치에서 측정값과 예측값은 Ch. 6을 제외하고 2.7 dB 이내의 오차를 보이고 있다. Ch. 7의 경우 측정 시에 오류가 있어서 데이터를 얻지 못하여 비교할 수 없었다. Fig. 6에는 Fig. 5(b)의 HEMU 시험 결과에서 Ch. 5와 9 지점의 옥타브 밴드 주파수별 소음도를 나타내었다. Fig. 6(a)의 Ch. 5 지점에서는 회절 성분들이 주요한 지점으로 그 효과가 적절히 고려되어 주요한 주파수들에서 소음도를 비교적 잘 예측하고 있음을 볼 수 있다. 다만 63 Hz의 저주파수 대역에서는 교량 자체의 진동이 영향을 주어서 예측값보다 큰 측정값을 보이지만, 전체 소음도에 주는 영향은 적다. Fig. 6(b)의 Ch. 9 결과에서는 대부분의 주파수에서 측정값보다 좀 더 높은 예측값을 보이고 있는데, 이것은 앞에서 언급한 높이 3.5m로 집중하여 가정한 소음원 모델 때문으로 여겨진다.

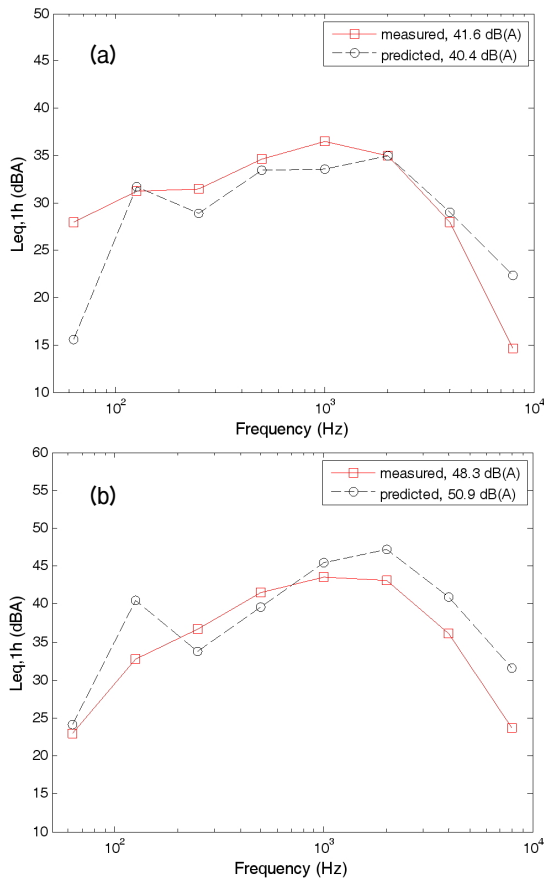


Fig. 6. Measured and predicted noise spectra near a concrete bridge. HEMU (T1 line). (a) Ch. 5, (b) Ch. 9.

Figs. 5와 6의 결과에서 그 밖의 오차 요인으로는 소음원 모델이 실제를 근사화하여 몇 개의 소음원으로 가정한 것, 동일 차종이라도 통과하는 차륜 및 궤도의 표면 조도(surface roughness)에 따라 편차가 발생하는 점,^[12] 전파 모델이 가지고 있는 오차 및 실제 지형을 근사적으로 모델링할 때 발생하는 오차들을 생각할 수 있다. 본 논문에서 이용한 전파모델 ISO 9613-2에서는 1 km 이내에서 3 dB 이내의 오차를 보인다고 제시하고 있다.^[1]

한편, 콘크리트교의 상판에 의한 회절을 고려하지 않는 기존 예측모델들에서는 거리 감쇠와 지면 효과만이 주요하게 작용하여 계산될 것이므로 위 측정 지점들의 소음도를 48 ~ 60 dB 범위 내의 값으로 예측하게 된다. 즉, T2 궤도에 대해서는 50m 이내, T1 궤도에 대해서는 25m 이내의 가까운 거리에서는 실제 측정값보다 큰 소음도를 예측하여 큰 오차를 보이다가 거리가 멀어질수록 오차가 작아지게 된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 철도 콘크리트교 주변의 환경소음 예측을 위해서 교량 상판 또는 교량에 설치된 방음벽에 의한 회절 및 지면 효과를 고려한 소음전파 예측모델을 도출하였다. 수음점의 위치에 따라서 소음원으로부터 회절된 경로, 상판 또는 지면에 반사된 경로, 직접 전파된 경로들을 고려하였으며 ISO 9613-2의 회절 계산식과 전파 모델을 이용하였다. 이때 환경 소음이 주요한 중고주파수 대역에서 차량과 궤도에서 발생한 소음원 성분이 주요하므로 콘크리트교 자체의 진동에서 발생하는 성분은 무시하였다.

철도 콘크리트교 주변 수음점의 소음도 예측값과 측정값에 대한 비교 검토를 수행하였다. 경부2단계 슬라브 궤도 구간의 콘크리트교에서 KTX 및 HEMU 차량 통과 시 소음도를 거리와 높이가 다른 여러 위치에서의 소음도를 측정하였으며, 본 논문의 이론으로 예측한 결과와 비교하였다. 특정 높이의 점음원으로 근사화한 소음원 모델이 가지는 오차 때문에 일부 위치에서 예측값이 측정값보다 더 컸으나, 교량 하부와 교량에서 먼 위치에서는 비교적 적은 오차를 내었다. 추후 실제 소음원과 더 유사한 소음원 모델이 적용될 경우 소음도 예측의 정확도는 더욱 개선될 수 있을 것이다. 또한 교량으로부터 거리 약 50m 이내에서는 상판의 회절에 의한 영향이 커지며, 그 이상의 거리에서는 대부분의 소음원이 시야에 들어오고 직접 전파하는 성분의 영향이 컸다. 본 논문에서 제시한 철도 콘크리트교 환경 소음 예측 모델은 많은 교량으로 이루어진 국내 철도 환경에서 정확한 환경 영향 평가와 효율적인 소음 저감 대책을 수립하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2014년도 미래창조과학부의 재원으로 한국철도기술연구원 주요사업 ‘철도 친환경성 향상 기술 개발’ 과제의 지원을 받아 수행한 연구과제 결과 중 일부이다. 교량 소음시험 부분은 (주)유신과 알엠에스테크놀러지(주)의 도움으로 수행되었다.

References

1. ISO 9613-2, *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation*, 1996.
2. Project Report, "Establishment of railroad noise monitoring network" (in Korean), National Institute of Environmental Research, 2002.
3. Project Report, "Study on the prediction of the environmental effects for planning the railway noise and vibration measures" (in Korean), Korea Railroad Research Institute, 2013.
4. U. Moehler, U. J. Kurze, M. Liepert, and H. Onnich, "The new German prediction model for railway noise "Schall 03 2006": an alternative method for the harmonized calculation method proposed in the EU directive on environmental noise," *Acta Acustica* **94**, 48-552 (2008).
5. Schall 03 2006, Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Eisenbahnen und Straßenbahnen (in German), Entwurf, Stand: 22.11.2006.
6. M. Hecht, J. M. Wunderli, T. Thron, and D. Schu, "sonRAIL- The new Swiss calculation model for railway noise," *Proc. of 10th International Workshop on Railway Noise*, 559-566 (2010).
7. sonRAIL, Projektdokumentation, Band 1: Dokumentation, externer Anhang (in German), BAFU, EMPA, TU Berlin, PROSE AG, LCC, 29. Marz 2010.
8. S. Jang and E. Jang, "Study on the noise source modeling and the source strength estimation of Mugungwha trains running on the conventional railway" (in Korean), *Trans. KSNVE*, **23**(11), 1020-1026 (2013).
9. J. G. Walker, N. S. Ferguson, and M. G. Smith, "An investigation of noise from trains on bridges," *J. Sound Vib.* **193**(1), 307-314 (1996).
10. K. Attenborough, K. M. Li, and K. Horoshenkov, *Predicting outdoor sound* (Taylor & Francis, New York, 2007), pp. 32-39.
11. S. Jang and J. Ryue, "A study on the rolling noise model using the analysis of wheel and rail vibration characteristics" (in Korean), *J. Kr. Soc. for Railway* **16**, 175-182 (2013).
12. S. Jang, W. Jeong, J. Ryue, and H. Koh, "Analysis of rolling noise using the measurement of acoustic roughness on the rail and wheel surfaces" (in Korean), *Proc. of Acoust. Soc. Kr*, 245-249 (2013).

저자 약력

▶ 장 승 호 (Seungho Jang)



1995년 2월: KAIST 기계공학과 학사
 1997년 2월: KAIST 기계공학과 석사
 2002년 2월: KAIST 기계공학과 박사
 2003년 4월 ~ 현재: 한국철도기술연구원
 선임연구원