

철도차량의 전동음 예측에 관한 연구
- 지표면 효과 및 침목에서 방사되는 소음 계산 -
A Study on Prediction of Rolling Noise for Railway
- Calculation of Ground Effect and Noise Radiated by Sleeper -

김재철[†] · 정현범^{*} · 이재응^{**}
Jae Chul Kim, Hyun Bum Jung and Jae Eung Lee

(2002년 8월 31일 접수 ; 2002년 12월 11일 심사완료)

Key Words : Railway Noise(철도소음), Rolling Noise(전동음), Wheel/Rail Interaction(차륜/레일의 상호작용), Ground Effect(지표면 효과), Roughness(거칠기)

ABSTRACT

The major noise source for the conventional train is the rolling noise caused by the interaction of the wheels and rails during the train passage on the tangent track. In order to control the rolling noise, the noise radiated from wheels, rails and sleepers should be analyzed and predicted. In this paper, a prediction method of wheel/rail rolling noise generated by the roughness of the wheel/rail surface is described, where the method is considering the effect of noise radiated by sleepers and the effect of ground. The method is applied to the Korean railway system, and the sound pressure level (SPL) predicted by the proposed method is compared with the measured SPL. Overall, the result shows good agreement between the predicted and measured values.

1. 서론

현재 국내에서 주행중인 철도차량의 주요한 소음원은 차륜과 레일에 의한 전동음과 동력장치에서 발생되는 소음이다. 또한 향후 운행 예정인 한국형 고속전철(KTX)와 동일한 프랑스의 TGV-A도 약 300 km/h까지 전동음의 영향이 큰 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 이러한 차륜과 레일의 접촉에 의해서 발생하는 전동음을 저감시키기 위해서는 차륜, 레일 및 침목에서 방사되는 소음에 대한 기여도 분석이 매우 중요하다.

전동음에 관한 연구는 철도 선진국에서 많은 연구

가 수행되었으며, 특히 유럽의 ERRI(european rail research institute)는 전동음 예측프로그램(TWINS)을^(2,3) 개발하여 전동음 저감방안에 활용하고 있다. 국내에서도 철도소음이 사회적 문제로 인식되면서 전동음에 대한 관심이 점차 높아져 전동음 예측방법에 관한 기초적 연구가 수행되었다.^(4,5)

본 논문의 주저자는 Remington의 예측방법을 이용하여 차륜과 레일에서 방사되는 소음의 기여도 분석에 대한 기초적 연구를 수행한 바 있다.⁽¹⁾ 그러나 전동음은 차륜과 레일에서 뿐만 아니라 침목에서도 소음이 방사되며, 또한 소음 전파시 지표면 반사는 소음레벨에 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 침목으로부터 방사되는 소음의 크기를 고려하고, 지표면 효과가 소음레벨에 미치는 영향을 고려하여 국내 철도 시스템의 전동음을 예측할 수 있는 방법을 구축하였다. 또한 이 방법을 이용하여 예측한 전동음의 값과 실제 국내 전동차에서 측정된 값을 비교하여 방법의 타당성을 검증하였다.

[†] 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원 차량기계연구본부
E-mail : jckim@krrri.re.kr
Tel : (031) 481-8531, Fax : (031) 461-8561

^{*} 정회원, 중앙대학교 대학원(현 : 현대모비스 연구개발부)

^{**} 정회원, 중앙대학교 기계공학부

2. 전동음 예측방법^(4, 6, 7)

2.1 전동음 예측순서

차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음에 대한 예측방법은 Fig. 1의 순서도와 같이 차륜과 레일표면의 거칠기로부터 차륜과 레일에 관한 운동방정식을 세운 후, 차륜과 레일의 임피던스를 이용하여 각각의 평균속도를 계산하고 방사되는 소음을 계산한다. 이때 차륜과 레일에서 방사되는 소음을 계산 하는 경우에는 지표면 효과를 고려한다. 그러나 침목은 지표면 위에 위치하기 때문에 침목에서 방사되는 소음 계산에는 지표면 효과를 고려하지 않는다.

2.2 차륜과 레일로부터 방사되는 소음

본 연구에서는 철도차량을 선음원으로 모델링하여

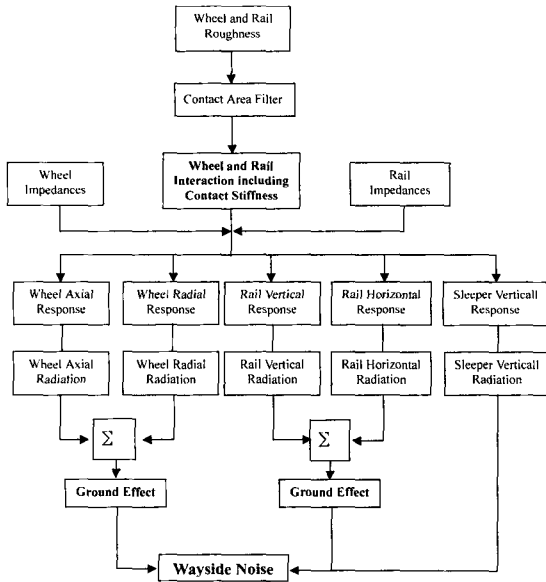


Fig. 1 Block diagram on prediction of rolling noise

Table 1 Parameters for the wheel and the rail

Parameter	Value
Rail head width : r_h	0.127 m
Rail foot width : r_f	0.065 m
Rail height : r_{ht}	0.153 m
Radial area of wheel : A_{wr}	0.55 m^2
Axial area of wheel : A_{wa}	0.58 m^2

차륜과 레일로부터 방사되는 소음을 식 (1)과 식 (2)와 같이 차량 통과시간(T 초)에 대한 평균음압으로 계산하였다.^(4, 6)

$$S_{pw}(\omega) = 10 \log \left\{ \frac{N}{2dVT} \left(\frac{\rho_c}{p_o} \right)^2 \left[\sigma_{wr} A_{wr} S_{ywr}^{avg}(\omega) + \sigma_{wa} A_{wa} S_{ywa}^{avg}(\omega) \right] D(\omega, d) \right\} \quad (1)$$

$$S_{pr}(\omega) = 10 \log \left\{ \frac{N}{2d} \left(\frac{\rho_c}{p_o} \right)^2 \left[\sigma_{rv} (r_f + r_h) S_{yrv}^{avg}(\omega) + \sigma_{rh} (r_{ht}) S_{yrh}^{avg}(\omega) \right] D(\omega, d) \right\} \quad (2)$$

여기서, P_o 는 기준음압(2×10^{-5} Pa)이고, ρ_c 는 음향임피던스, A_{wa} , A_{wr} 은 차륜의 방사방향과 차축방향의 방사면적, V 는 열차속도, N 는 차축의 수, d 는 열차로부터 수음점까지의 수직거리, r_h 는 레일두부의 폭, r_f 는 레일밑면의 폭, r_{ht} 는 레일의 높이, σ_{rh} 와 σ_{rv} 는 레일의 수평방향과 수직방향의 방사효율, σ_{wr} 과 σ_{wa} 는 차륜의 방사방향과 차축방향의 방사효율, S^{ave} 는 차륜과 레일의 공간평균 속도의 스펙트럼 밀도를 나타내며, $D(\omega, d)$ 는 지표면 효과를 나타내는 항이다.

위의 식에서 차륜과 레일의 방사효율의 값은 Remington이 실험을 통해서 제안한 식 (6)으로부터 구할 수 있으며, 차륜과 레일에 대한 값은 Table 1과 같다.

3. 궤도 모델 및 침목 소음

3.1 레일의 임피던스

저자는 Remington의 예측방법을 토대로 차륜을 링으로 모델링하고 레일은 무한보로 모델링하여 임피던

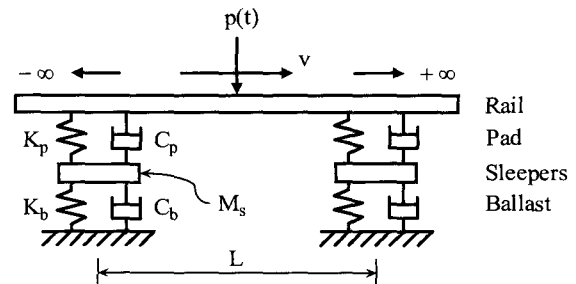
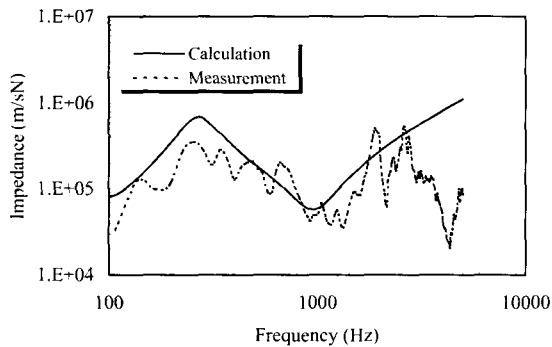


Fig. 2 Model of track

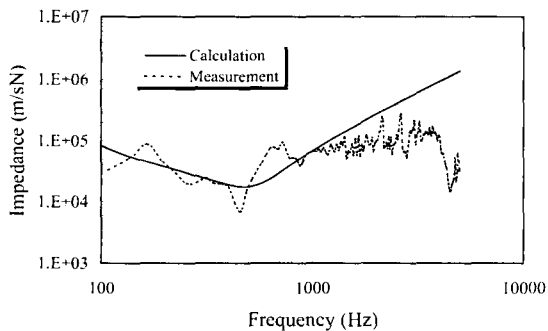
스를 계산하였다.⁽⁴⁾ 그러나 레일은 이를 지지하고 있는 침목, 방진패드 및 자갈의 영향에 의해서 고유진동수가 존재하는 것으로 알려져 있다.^(8,9) 따라서 본 연구에서도 이러한 영향을 고려하기 위해서 Fig. 2와 같이 레일을 무한 보로 모델링하고, 레일과 침목사이의 방진패드와 침목하부의 자갈을 스프링과 감쇠기로 모델링하여 레일의 임피던스를 계산하였다.⁽¹⁰⁾

Table 2 Specification for the pad and the ballast

	Specification	Value
Pad	Vertical stiffness	200 E6 (N/m)
	Lateral stiffness	50 E6 (N/m)
	Vertical damping	20 E3 (Ns/m)
	Lateral damping	10 E3 (Ns/m)
	Vertical stiffness	80 E6 (N/m)
Ballast	Lateral stiffness	5 E6 (N/m)
	Vertical damping	40 E3 (Ns/m)
	Lateral damping	20 E3 (Ns/m)



(a) Vertical direction



(b) Horizontal direction

Fig. 3 Comparison of measured and predicted rail impedances

레일의 임피던스 계산에 필요한 방진패드와 침목하부 구조에 대한 스프링 강성과 감쇠계수의 물성치는 Table 2와 같이 설정하였다.⁽¹¹⁾

Fig. 3은 레일의 임피던스에 대한 계산결과와 측정 결과이다. 수직방향은 약 900 Hz부근, 수평방향은 약 450 Hz부근에서 공진주파수의 영향에 의해서 임피던스가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

3.2 레일의 손실계수

레일의 손실계수는 식 (3)과 같이 차륜/레일의 접촉점에 대한 레일의 속도로부터 공간평균속도 계산 시 필요한 값으로서 일반적으로 실험을 통해서 구할 수 있다.⁽⁶⁾

$$S_{rv}^{avg}(\omega) = \frac{N[1 - \exp(-\eta_{rv} k_{rv} VT)]}{2\eta_{rv} k_{rv} VT} S_{rv}^{pc}(\omega) \quad (3)$$

여기서, $S_{rv}^{pc}(\omega)$ 는 접촉점에서 레일의 수직방향 속도, η_{rv} 는 레일의 수직방향에 대한 손실계수, k_{rv} 는 수직방향에 대한 굽힘 파수(bending wavenumber)를 나타낸다.

레일의 손실계수에 대한 실험방법은⁽¹²⁾ Fig. 4와 같이 KS 50 kgN 레일측면에 1.5m 간격으로 3축 가속도계를 설치하고 임팩트 해머로 가진하여 각 점의 진동레벨을 측정 후, 주파수별 거리에 따른 감쇠량의 결과로부터 진동레벨의 감쇠 기울기를 구해서, Remington이 제안한 식 (4)에 대입하여 레일의 손실계수를 계산하였다.

$$\eta_{rv} = \frac{-\Delta_v}{2k_{rv}}, \eta_{rh} = \frac{-\Delta_h}{2k_{rh}} \quad (4)$$

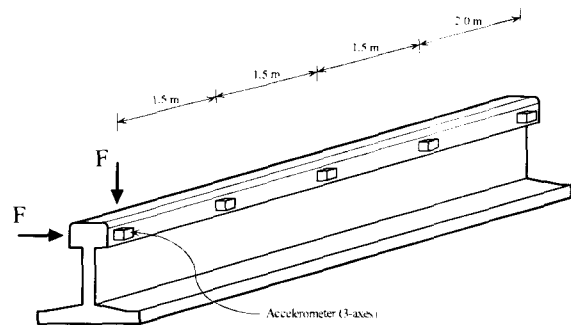


Fig. 4 Measuring of vibration decay for the rail

여기서, Δ_v 와 Δ_h 는 거리에 따른 수직방향과 수평방향의 진동감쇠에 대한 기울기[dB/m]를 나타내며, η_{rh} 는 레일의 수평방향에 대한 손실계수, k_{rh} 는 수평방향에 대한 굽힘 파수를 나타낸다.

Fig. 5는 위의 방법으로 측정된 레일의 수직방향과 수평방향의 손실계수이다. 대체적으로 수평방향보다 수직방향의 손실계수가 큰 것을 알 수 있으며, 약 800 Hz이상의 주파수 영역에서는 수평방향의 손실계수가 상당히 작은 것을 알 수 있다.

3.3 침목의 평균속도와 방사소음

전동차 주행 시 침목의 진동 가속도는 Fig. 6과 같이 수직방향에 비해서 수평방향의 레벨이 약 5 dB이상 작기 때문에 수평방향은 무시하고 수직방향에서 방사되는 소음만을 고려하였다.

침목의 수직방향 평균속도는 Fig. 2로부터 유도한 침목에 대한 운동방정식으로부터 식 (5)와 같이 레일의 평균속도와의 관계를 구할 수 있다.

$$S_{jsr}^{avg} = \left[\frac{\left(\frac{k_p}{j\omega} + c_p \right)}{j\omega M_s + (c_p + c_b) + \frac{1}{j\omega} (k_p + k_b)} \right]^2 S_{jrv}^{avg} \quad (5)$$

여기서, S_{jsr}^{avg} 는 침목의 수직방향 속도의 스펙트럼 밀도, S_{jrv}^{avg} 는 레일의 수직방향 속도의 스펙트럼 밀도를 나타낸다.

Remington은 침목에서 방사되는 음압의 계산식인 식 (2)에서 레일의 음압 계산식에 방사면적에 대한 보정계수를 삽입하여 식 (6)과 같이 제안하였으며,⁽⁷⁾ 침목의 방사효율(σ_{sv})은 실험으로부터 식 (7)과 같이 제안하였다.⁽¹³⁾ 이 식에 위에서 계산한 침목의 평균속도를 대입하여 침목으로부터 방사되는 소음을 계산할 수 있다.

$$S_{ps}(\omega) = 10 \log \left\{ \frac{N}{2d} \left[\frac{\sigma_{sv} (\rho c)^2 A_T}{4L_T P_o} \right] S_{jsv}^{avg}(\omega) \right\} \quad (6)$$

$$\sigma_{sv} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{500}{f} \right)^3 \right)} \quad (7)$$

여기서, A_T 는 침목의 상부의 면적, L_T 는 침목 간격, $S_{ps}(\omega)$ 는 침목에서 방사되는 음압의 스펙트럼 밀도, f 는 주파수를 나타낸다.

4. 전동음 측정 및 예측결과

4.1 전동음 측정

본 연구에서는 전기동차(electric multiple unit)를 측정차량으로 선택하였다. 일반적으로 전기동차에서 발생하는 소음은 크게 차륜/레일에 의한 소음과 모터 소음으로 분류되기 때문에 모터소음과 레일의 이음매 등에서 발생하는 충격음 등의 영향을 작게 하기 위해서 차량이 60 km/h 이상의 속도로 주행할 수 있고 레일의 이음매가 없는 개활지를 선택하여 측정하였다. 궤도는 KS 50 kgN 레일이 콘크리트 침목으로 지지 되는 자갈도상이다.

Fig. 7은 전동음을 측정하기 위한 마이크론의 위치와 레일 및 침목의 가속도를 측정하기 위한 가속도

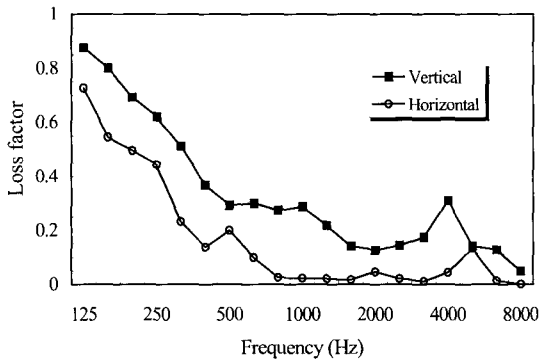


Fig. 5 Loss factor of the rail

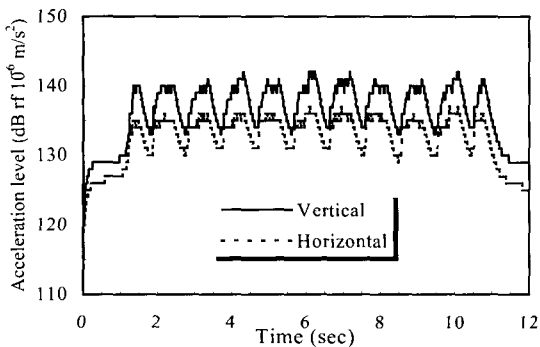


Fig. 6 Acceleration levels of sleeper

계의 위치를 나타낸 것이다. 지표면의 효과 및 특성을 파악하기 위해서 5 m 지점에 측정높이가 다른 두 개의 마이크로폰을 설치하였으며, 측정거리에 따른 소음의 감쇠를 파악하기 위해서 10 m 지점에 다른 마이크로폰을 설치하였다. 또한 레일과 침목의 진동레벨을 분석하기 위해서 레일과 침목에 가속도계를 설치하였다.

4.2 차륜과 레일표면의 거칠기

차륜과 레일표면의 거칠기는 차륜/레일의 접촉에 의한 운동방정식으로부터 접촉점에 대한 차륜과 레일의 속도를 구하는데 필요한 입력조건으로⁽⁶⁾ 시험에 의해서 측정된 값을 사용한다.⁽⁷⁾ 그러나 본 연구에서는 차륜과 레일의 거칠기를 측정할 수 있는 장치가 없기 때문에 레일의 수직방향에 대한 진동가속도의 측정치를 이용하여 거칠기를 계산하였다.⁽⁴⁾ Fig. 8은 이와 같은 방법으로 계산한 차륜과 레일표면의 거칠기이다.

4.3 지표면 효과

음의 전파시 지표면 효과는 초과감쇠(excess attenuation : A_e)를 사용하여 평가된다. 초과감쇠는

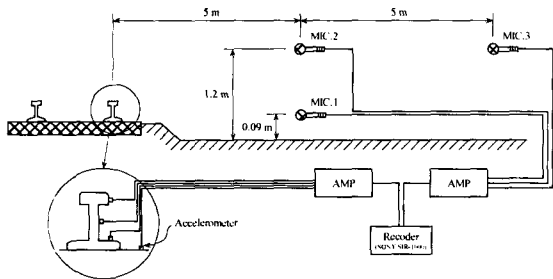


Fig. 7 Test site and schematic of experimental set-up for noise and vibration

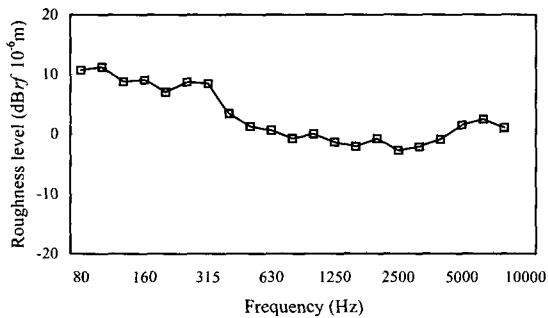


Fig. 8 Roughness of wheel and rail

자유공간에서 직접파와 반사파를 포함한 중첩파의 음압레벨의 차로 정의되며 식 (8)을 이용해서 계산할 수 있다.^(14, 15)

$$A_e = 10 \log_{10} \left| 1 + Q \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \exp(ik_1 \Delta r) \right|^2 \quad (8)$$

여기서, k_1 은 음의 파수, r_1 은 직접음의 경로, r_2 는 반사음의 경로, Q 는 허상음원의 강도를 나타내며, Δr 는 $r_1 - r_2$ 이다.

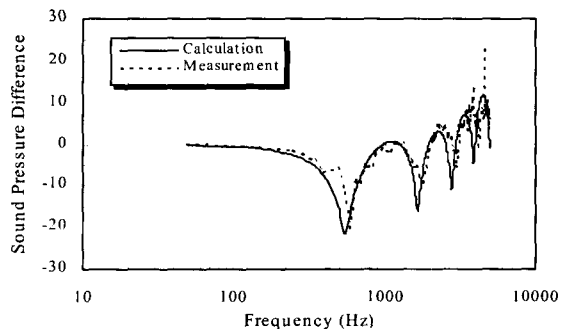
일반적으로 초과감쇠는 지표면과 대기의 온도차와 바람에 의해서도 영향을 받지만, 본 연구에서는 온도차와 바람의 영향은 무시하고 지표면만을 고려하였다.

식 (8)에서 허상음원의 강도를 계산하기 위해서는 지표면의 음향학적 특성이 필요하기 때문에 식 (9)와 같이 유동저항(α)으로 지표면의 임피던스(Z_2)와 파수(k_2)를 나타내는 Delany의 식을⁽¹⁶⁾ 사용하였다.

$$\begin{aligned} Z_2/Z_1 &= 1 + 9.08(f/\alpha)^{-0.75} + i11.9(f/\alpha)^{-0.73} \\ k_2/k_1 &= 1 + 10.8(f/\alpha)^{-0.70} + i10.3(f/\alpha)^{-0.59} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, Z_1 은 공기에서의 음향 임피던스, f 는 주파수를 나타낸다.

Fig. 9는 위의 방법을 확인하기 위해서 지표면이 다른 흙인 경우 음원으로부터 2.5 m 떨어진 곳에서 두 개의 마이크로폰(높이차 : 0.425 m)으로 측정된 음압레벨의 차와 계산결과를 비교하였다. 대체적으로 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.



(Distance : 2.5 m, flow resistivity (α) = 2000 cgs rayles)

Fig. 9 Comparison of measured and calculated sound pressure difference for clay

본 연구에서는 철도차량을 선음원으로 모델링하였기 때문에 식 (1, 2)의 지표면 효과를 나타내는 항은 식 (10)과 같이 적분형태로 나타나게 된다.

$$D(\omega, d) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left| 1 + Q \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \exp(ik_1 \Delta r) \right|^2 d\theta \quad (10)$$

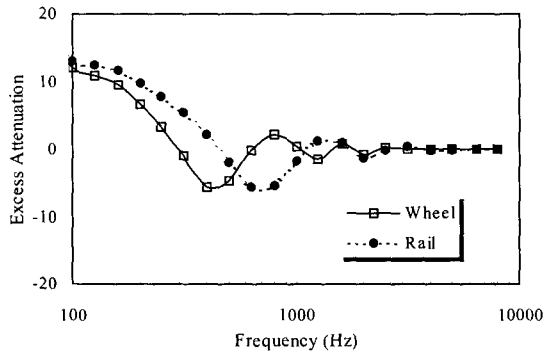


Fig. 10 Excess attenuation for wheel and rail (flow resistivity (α) = 150 cgs rayles)

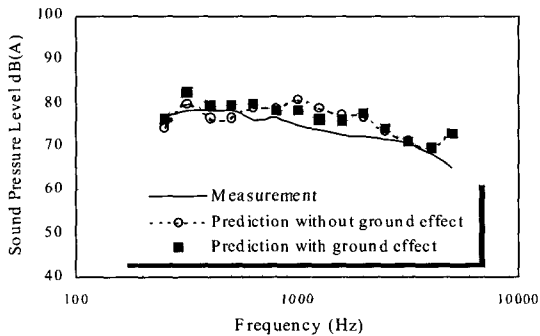


Fig. 11 Comparison of measured and predicted sound pressures with ground effect

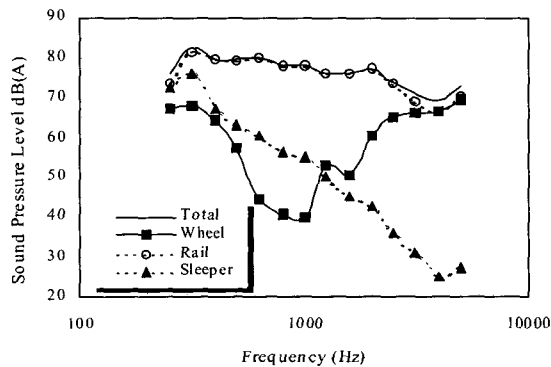


Fig. 12 Sound pressures radiated from wheels, rail and sleepers

Fig. 10은 식 (10)에 차륜과 레일을 음원으로 각각의 높이를 0.88 m, 0.43 m로 설정하여 계산한 초과감쇠의 결과이다. 유동저항의 값은 Fig. 7에서 측정높이가 다른 두개의 마이크로폰으로부터 측정된 결과와 계산결과를 비교하여 추정하였으며, 그 결과 초지에 대한 유동저항의 값 150(cgs rayles)으로 설정하였다.

대체적으로 저주파 영역에서 초과감쇠가 크게 나타나지만, 주파수가 증가할수록 변동폭이 약간씩 작아지면서 약 2 kHz정도이상에서는 초과감쇠가 0에 근접하는 것을 볼 수 있다. 따라서 주파수가 증가할수록 지표면 효과에 의한 영향이 점차 적어진다는 것을 의미한다.

4.4 전동음의 측정 및 예측결과

전동음의 예측결과와 비교하기 위해서 전동차 10량이 약 78 Km/h의 속도로 주행 시 측정된 결과를 분석하였다. Fig. 11은 전동음의 측정치와 예측치에 대한 결과이며, 또한 예측결과는 지표면 효과에 대한 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하였다. 대체적으로 예측결과가 측정결과에 5 dB(A)이내 있는 것을 알 수 있으며, 지표면 효과를 고려하면, 500 Hz 이하의 영역에서는 약간 증가하지만, 800 Hz ~ 2 kHz의 영역에서는 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 Fig. 11의 지표면 효과를 고려한 경우의 예측결과에서 차륜, 레일 및 침목 각각에서 방사되는 소음의 크기를 나타내고 있다.

전체적으로 레일에서 방사되는 소음레벨이 가장 크며, 315 Hz 부근에서 침목으로부터 방사되는 소음이 큰 것을 알 수 있고, 차륜에서 방사되는 소음은 약 3 kHz 이상의 영역에서 큰 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 차량 주행 시 지표면 효과와 침목에서 방사되는 소음을 고려하여 차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음을 예측할 수 있는 방법을 구축하였으며, 이를 국내 전동차에 적용하여 실제 측정 값과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 국내 전동차에서 사용되는 KS 50 kgN 레일은 연속적으로 지지되는 침목의 영향으로 레일의 임피던스가 수직방향의 경우 약 900 Hz부근에서 급격히 감소하고, 수평방향의 경우에는 500 Hz부근에서 감소하

는 것을 알았다. 또한 레일의 손실계수 측정결과 수평방향보다 수직방향의 손실계수가 크며 대체적으로 주파수가 증가할수록 손실계수는 작아진다. 그리고 수평방향의 손실계수는 약 800 Hz 이상에서는 상당히 작게 나타나는 것을 알았다.

(2) 일반적으로 소음전파에 대한 지표면 효과는 지표면의 음향학적 특성에 의해서 좌우되지만 약 2 kHz 이하의 영역에서 크게 영향을 미치는 것을 알았으며, 지표면이 초치인 경우 전동음의 소음레벨은 지표면 효과에 의해서 약 800 Hz 이하에서는 증가하고, 800 Hz 이상의 영역에서는 감소하는 것을 알았다.

(3) 국내 전동차에서 사용되는 콘크리트 침목의 진동레벨은 수직방향에 비해서 수평방향의 진동레벨이 5 dB 정도 작게 나타나며, 침목의 수직방향에서 방사되는 소음은 약 315 Hz 부근에서 가장 큰 것을 알았다.

참 고 문 헌

- (1) Mauclair, M. B., 1990, "Noise Generated by High Speed Trains," Inter-Noise '90, pp. 371~374.
- (2) Thomson, D. J., 1996, "Experimental Validation of the TWINS Prediction Program for Rolling Noise Part 1: Description of the Model and Method," J. Sound, Vib., Vol. 193, No. 1, pp. 123~135.
- (3) Thomson, D. J., 1996, "Experimental Validation of the TWINS Prediction Program for Rolling Noise Part 2: Results," J. Sound, Vib., Vol. 193, No. 1, pp. 137~147.
- (4) 김재철, 구동희, 2000, "철도차량의 전동음 예측에 관한 연구 - 차륜과 레일의 소음 기여도 분석-", 한국소음진동공학회논문집, 제 10 권, 제 3 호, pp. 486~492.
- (5) 양윤석, 김관주, 2000, "유한요소법과 경계요소법을 이용한 한국형 고속철도의 전동소음 예측", 한국소음진동공학회논문집, 제 10 권, 제 3 호, pp. 444~450.
- (6) Remington, P. J., 1987, "Wheel/Rail Rolling Noise : I Theoretical Analysis" J. Acoust. Soc. Am. Vol. 81, No. 6, pp. 1805~1823.
- (7) Remington, P. J., 1987, "Wheel/Rail Rolling Noise : II Validation of the Theory" J. Acoust. Soc. Am. Vol. 81, No. 6, pp. 1824~1832.
- (8) Wolde, T. T., 1983, "Sources and Mechanisms of Wheel/Rail Noise : State-of-the-art and Recent Research", J. Sound, Vib., Vol. 87, No. 2, pp. 147~160.
- (9) Munjal, M. L., 1982, "Vibrations of a Periodic Rail Sleeper System Excited by an Oscillation Stationary Transvers Force", J. Sound, Vib., Vol. 81, No. 4, pp. 491~500.
- (10) 이현엽, 1998, "레일의 상하방향 불규칙성에 의한 차륜과 레일의 동 접촉력", 한국소음진동공학회 논문집, 제 8 권, 제 4 호, pp. 616~622.
- (11) Pandrol Report, 1994, "Railway Noise and Vibration", No. 1931.
- (12) Remington, P. J., 1976, "Wheel/Rail Rolling Noise-Part I: Characterization of the Wheel/Rail Dynamic System", J. Sound, Vib., Vol. 46, No. 3, pp. 359~379.
- (13) Remington, P. J., 1985, "Prediction of the Effectiveness of Noise Control Treatment in Urban Rail Elevated Structures" J. Acoust. Soc. Am. Vol. 46, No. 3, pp. 359~379.
- (14) Chessell, C. I., 1977, "Propagation of Noise Along a Finite Impedance Boundary," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 62, No. 4, pp. 825~834.
- (14) 황철호, 정성수, 1997, "지표면에 의한 음의 초과 감쇠 특성 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 7 권, 제 3 호, pp. 401~409.
- (15) Delanny, M. E. and Bazley, E. N., 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials," Appl. Acoust. Vol. 3, pp. 105~116.