

〈논 문〉

철도차량의 전동음 예측에 관한 연구 — 차륜과 레일의 소음 기여도 분석 —

A Study on Prediction of Rolling Noise for Railway
— Noise Contribution of Wheels and Rail —

김 재 철* · 구 동 회*

J. C. Kim and D. H. Koo

(2000년 2월 10일 접수 ; 2000년 5월 20일 심사완료)

Key Words : Railway Noise (철도소음), Rolling Noise (전동음), Wheel/Rail Interaction (차륜/레일의 상호작용), Roughness (거칠기), Radiation Efficiency (방사효율).

ABSTRACT

The major source of railway noises is rolling noise caused by the interaction of the wheels and rails. This rolling noise is generated by the roughness of the wheel /rail surface on tangent track in the absence of discontinuities, such as wheel flats or rail joints. These roughness cause relative vibrations of the wheel and rail at their contact area. The vibrations generated at the contact area are transmitted through the wheel and rail structures, exciting resonances of the wheel and travelling waves in the rail. Then these vibrations radiate noise to the wayside. In this paper, we predict the rolling noise radiated from radial/axial motion of the wheel and vertical/lateral motion of the rail using Remington's analytical model and then compare of the predicted sound pressure and measured one. Although there are some inaccuracy in our prediction, these results show in good agreement between 500 Hz and 3150 Hz.

1. 서 론

철도차량 주행 시 발생하는 소음의 주된 요인은 크게 차륜과 레일의 상호작용에 의해서 발생하는 소음과, 차량 추진장치에 의한 소음, 공력소음 등으로 분류된다. 그 가운데에서도 차륜과 레일에 의한 소음은 차량속도가 약 250 km/h이하에서 커다란 문제가 된다.

이 소음은 주행구간, 차륜과 레일 답면의 요철상태, 마모 형태, 레일의 분기기 등에 따라 소음의 발생 메커니즘이 다르기 때문에 소음의 크기와 형태가 다르다. 따라서 이 소음은 전동음(rolling noise), 충격음(impact noise), 마찰음

(squeal noise, howl noise) 등으로 구분된다. 이렇게 차량 주행 시 차륜과 레일에 의해서 발생하는 소음은 복잡하고 다양하여 차륜과 레일의 소음을 모두 예측하기는 불가능할 뿐만 아니라 저감방안도 제각기 다르다.

따라서 본 논문에서는 차륜과 레일 답면의 미세한 요철에 의해서 발생하는 전동음의 발생 메커니즘과 예측방법에 대한 기초적인 검토에 대해서 기술한다.

전동음에 관한 연구는 1970년대 중반부터 Remington⁽¹⁻³⁾에 의해서 본격적으로 시작되어, 1980년대 후반에 전동음 예측에 관한 방법을 제시하였으며^(4,5), 1990년대 중반에 ERRI(european rail research institute)에서 TWINS^(6,7)라는 전동음 예측 프로그램을 완성하여 전동음 예측 및 저감에 대한 연구에 이용하고 있다.

현재 국내에서는 철도에 대한 인식부족으로 전동음에 대한 본격적인 연구는 수행되지 않고 있었으나, 최근 환경소

* 정회원, 한국철도기술연구원 차량연구부

** 한국철도기술연구원 차량연구부

음이 커다란 사회적 문제로 야기되면서 점차 전동음에 대한 관심이 커지고 있는 추세이다.

따라서 본 논문은 Remington의 예측방법을 이용하여 차량 주행 시 차륜과 레일에서 발생하는 소음을 저감시킬 수 있는 대책방안을 세우기 위해서 현재 주행중인 차량의 전동음을 예측하여 측정치와 비교 검토하였다. 또한 차륜과 레일의 각 방향에서 방사되는 소음을 계산하여 기여도를 분석하였다.

2. 전동음 예측방법^(4,5)

차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음에 관한 예측방법은 Fig. 1의 순서도와 같이 차륜과 레일표면의 거칠기를 입력조건으로 차륜의 차축방향, 방사방향과 레일의 수직방향, 수평방향의 임피던스를 이용하여 각 방향에서 방사되는 소음을 계산하여 철도연변으로 전파되는 소음을 예측한다. 그러나 본 계산에서는 소음이 철도연변에 전파될 때 지표면 효과는 고려하지 않았다.

2.1 차륜과 레일의 상호작용에 의한 속도

차륜과 레일에 대한 상호작용은 Fig. 2와 같이 차륜과 레일이 하중을 받아서 접촉하면 접촉면에서 국부적인 변형이 발생한다. 이러한 현상 때문에 차륜과 레일사이에 스프링을 고려하여 차륜과 레일의 거칠기와 속도에 대한 관계식을 구하면 식 (1)과 같이 얻을 수 있다.

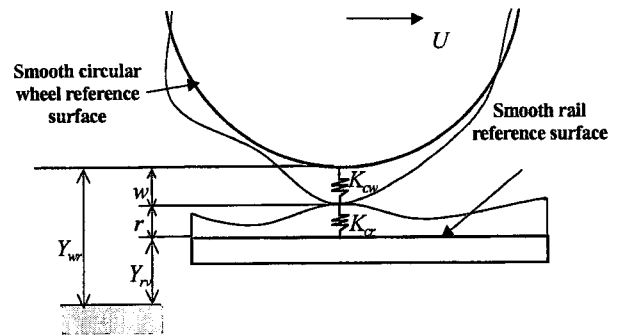


Fig. 2 Interaction of wheel/rail

$$\dot{Y}_{wr} = \dot{Y}_{rv} + \dot{r} + \dot{w} + j\omega \frac{F_v}{K_{cw}} + j\omega \frac{F_v}{K_{cr}} \quad (1)$$

여기서, F_v 는 차륜과 레일에 작용하는 수직력, w, r 은 차륜과 레일의 거칠기 변위, Y_{wr}, Y_{rv} 는 차륜과 레일의 총 변형량, K_{cw}, K_{cr} 은 차륜과 레일에 대한 Hertzian 접촉강성을 나타낸다.

또한 차륜과 레일의 임피던스 Z_{wr}, Z_{rv} 와 수직력에 대한 관계를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{wr} &= \frac{F_v}{Z_{wr}} \\ \dot{Y}_{rv} &= -\frac{F_v}{Z_{rv}} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 1/3옥타브 밴드에 대한 차륜과 레일의 접촉점에 관한 속도를 구하면 다음과 같다.

$$S_{y'wr}(\omega) = \left| \frac{Z_{wr}}{Z_{wr} + Z_{rv} - j\omega(Z_{wr}Z_{rv}/Kc)} \right|^2 \times \omega^2 (S_{rw}(k) + S_{rr}(k)) |H(k)|^2 \quad (3)$$

$$S_{y'rv}(\omega) = \left| \frac{Z_{rv}}{Z_{wr} + Z_{rv} - j\omega(Z_{wr}Z_{rv}/Kc)} \right|^2 \times \omega^2 (S_{rw}(k) + S_{rr}(k)) |H(k)|^2 \quad (4)$$

여기서, k 는 거칠기의 파수(wavenumber), $S_{rw}(k), S_{rr}(k)$ 는 차륜과 레일표면의 거칠기를 나타내며 $S_{y'wr}, S_{y'rv}$ 는 차륜의 방사방향과 레일의 수직방향에 대한 속도를 나타내며, $|H(k)|^2$ 는 차륜과 레일의 접촉면적과 표면의 거칠기 파장에 따른 영향을 나타내는 접촉면 필터이다.

또한, 차륜의 차축방향 임피던스 Z_{wa} 와 레일의 수평방

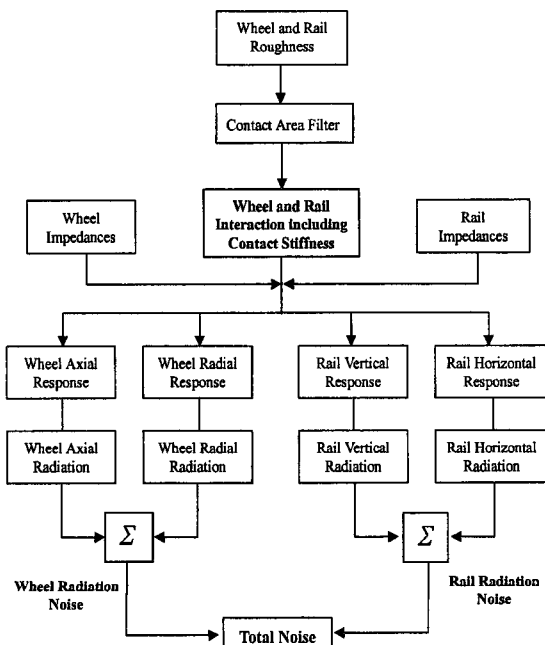


Fig. 1 Block diagram on prediction of rolling noise

향 임피던스 Z_{rh} 를 이용해서 차륜의 차축방향과 레일의 수평방향의 속도를 구하면 식 (5), 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$S_{y'wa}(\omega) = \frac{Z_{rh}}{Z_{wa} + Z_{rh}} \left\| \frac{Z_{wr}}{Z_{rvh}} \right\| S_{y'wr}(\omega) \quad (5)$$

$$S_{y'wh}(\omega) = \frac{Z_{rh}}{Z_{wa} + Z_{rh}} \left\| \frac{Z_{wr}}{Z_{rvh}} \right\| S_{y'vw}(\omega) \quad (6)$$

여기서, $S_{y'wa}$ 는 차륜의 차축방향의 속도, $S_{y'wh}$ 는 레일의 수평방향의 속도, Z_{rh} 는 레일에 대해서 수직방향의 가진에 대한 수평방향의 응답을 나타내는 임피던스이다.

식 (3)과 식 (4)의 K_c 는 다음과 같이 정의 되는 Hertzian 접촉강성을 나타낸다.

$$\frac{1}{K_c} = \frac{1}{K_{cr}} + \frac{1}{K_{cw}} \quad (7)$$

2.3 접촉면 필터(Contact Area Filter)

차륜과 레일표면의 거칠기 파장이 차륜과 레일의 접촉면 적보다 클 경우에는 접촉면적의 크기에 영향을 받지 않고 서로 밀접하게 접촉한다. 그러나 거칠기의 파장이 접촉면 적보다 작을 경우에는 양쪽의 거칠기가 평균 되어 차륜과 레일에 작용하는 가진력이 작아지기 때문에 Remington은 다음과 같은 접촉면 필터를 고려하여 거칠기 파장에 따른 거칠기의 크기를 정의하였다.

$$|H(\kappa)|^2 = \frac{4}{\alpha} \frac{1}{(\kappa b)^2} \int_0^{\tan^{-1}\alpha} [J_1(\kappa b \sec x)]^2 dx \quad (8)$$

여기서, J_1 은 제 1종 베셀함수, b 는 접촉면의 반지름, α 는 차륜과 레일표면에 대한 거칠기의 상호관계를 나타낸다.

식 (8)에서 α 가 작으면 필터의 영향이 작아져 차륜과 레일표면의 거칠기의 상관관계가 큰 것을 의미하고, α 가 크면 필터의 영향이 커져 상관관계가 작은 것을 나타낸다.

본 연구에서는 차륜과 레일에 대한 거칠기의 데이터를 측정할 수 없기 때문에 상호관계가 크다고 가정하여 식 (8)에서 α 가 0에 접근하는 경우에 대해서 정리하면 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$|H(\kappa)|^2 = \frac{1}{1 + \frac{(\kappa b)^3}{\frac{4}{\pi}}} \quad (9)$$

Fig. 3은 식 (9)에 대한 계산결과이다.

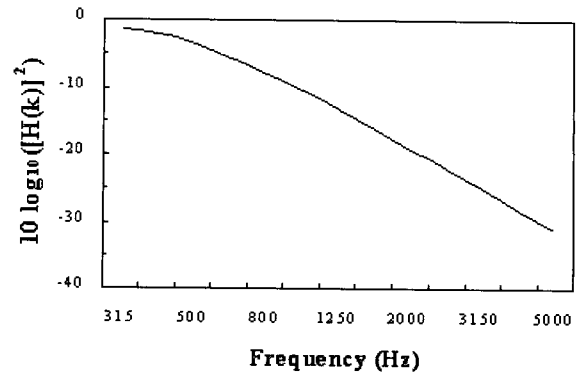


Fig. 3 Contact area filter

2.4 차륜과 레일로부터 방사되는 소음계산

본 연구에서는 철도를 선음원으로 모델화하여 차륜과 레일에서부터 방사되는 음압은 식 (10)과 식 (11)로부터 차량이 통과하는 시간(T초) 동안의 평균음압을 계산하였다.

$$S_{pr}(\omega) = 10 \log \left\{ \frac{N}{2d\pi} \left(\frac{\rho c}{p_0} \right)^2 [\sigma_{rv}(r_f + r_{hl}) S_{y'rv}^{ave} + \sigma_{rh}(r_{ht}) S_{y'wa}^{ave}] \right\} \quad (10)$$

$$S_{pw}(\omega) = 10 \log \left\{ \frac{N}{2d\pi VT} \left(\frac{\rho c}{p_0} \right)^2 [\sigma_{wr} A_{wr} S_{y'wr}^{ave} + \sigma_{wa} A_{wa} S_{y'wa}^{ave}] \right\} \quad (11)$$

여기서, p_0 는 기준음압(2×10^{-5} Pa)이고, A_{wa} , A_{wr} 은 차륜의 방사방향과 차축방향의 방사면적, V 는 열차속도, N 는 차축의 수, σ_{rh} 와 σ_{rv} 는 레일의 수평방향과 수직방향의 방사효율, σ_{wr} 과 σ_{wa} 는 차륜의 방사방향과 차축방향의 방사효율을 나타내고, S_{*}^{ave} 는 차륜과 레일의 속도에 대한 공간평균을 나타낸다.

2.5 차륜과 레일의 방사효율

차륜과 레일의 방사효율은 차륜의 경우 원판으로 모델화하여 방사효율을 구하였으며, 레일의 경우에는 Fig. 4와 같이 원통형 보로 모델화하여 수직방향에 대해서는 레일의 단면과 밑부분을 고려하여 두개의 원통형 보로 모델화하고 수평방향에 대해서는 레일높이를 지름으로 하는 한 개의 원통형 보로 모델화하였다.

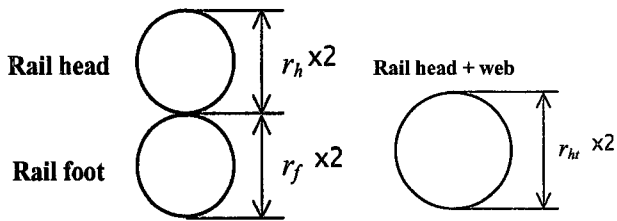
식 (12)는 레일의 수평방향과 수직방향에 대한 방사효율이고, 식 (13)은 차륜에 대한 방사효율이며, Fig. 5는 레일에 대한 방사효율을 표시한 것이다.

$$\sigma_{rv} = \frac{2}{[1 + (630/f)^3]}, \sigma_{rh} = \frac{1}{[1 + (630/f)^3]} \quad (12)$$

$$\sigma_{wr} = \sigma_{wa} = 2 \quad (13)$$

3. 차륜/레일에 대한 임피던스

차륜과 레일에서 방사되는 소음을 계산하기 위해서는 차륜과 레일의 임피던스가 필요하다. 본 연구에서는 차륜을 링으로 모델화하고 레일을 무한 보로 모델화하여 계산한 결과와 실제 측정된 결과를 비교하였다. 본 계산에서 사용한 차륜과 레일의 파라미터는 Table 1과 같다.



(a) Vertical direction (b) Horizontal direction

Fig. 4 Models of radiation efficiency for rail

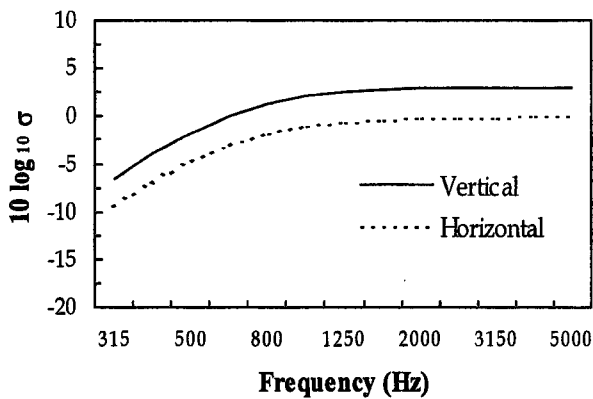


Fig. 5 Radiation efficiencies for rail

Table 1 Parameters for wheel and rail

Young's Modules	$2.0 \times 10^{11} \text{ Pa}$
Density	7850 kg m^{-3}
Rail foot width	0.145 m
Rail head width	0.065 m
Rail section perimeter	0.6 m
Rail mass per unit length	60 kg m^{-1}
Wheel radius	0.43 m
Web thickness	0.025 m
Tread thickness	0.045 m
Flange width	0.026 m
Flange height	0.034 m

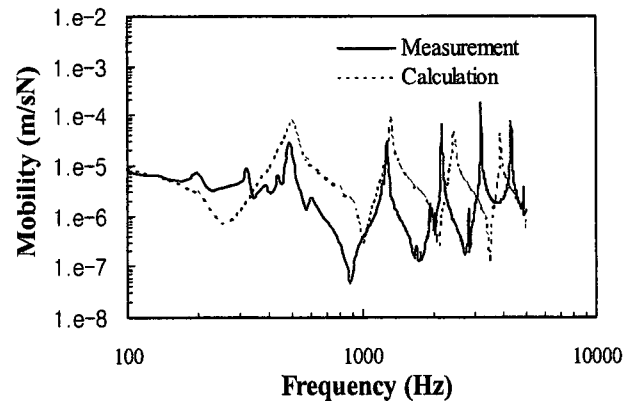
3.1 차륜에 대한 모빌리티의 측정 및 계산결과

차륜에 대한 모델은 Munjal⁽⁸⁾ 과 Haran⁽⁹⁾ 등에 의해서 링으로 모델화하여 각 방향에 대한 임피던스를 계산하였다. 본 연구에서도 차륜을 링으로 모델화하여 차륜의 각 방향에 대한 임피던스를 계산하였으며, 임피던스 측정은 차륜, 차축 및 대차가 결합되어있는 상태에서 임팩트 해머로 가진하여 각 방향의 모빌리티를 측정하였다.

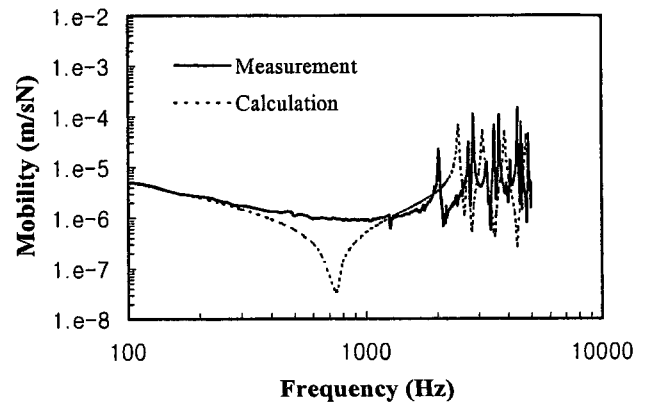
Fig. 6은 차륜의 차축방향과 방사방향에 대한 모빌리티(임피던스의 역수)의 측정치와 계산치의 비교이다. 측정치와 계산치가 정확히 일치하지는 않으나, 대체적으로 만족할 만한 결과를 얻었다.

3.2 레일에 대한 모빌리티의 측정 및 계산결과 비교

레일에 대한 임피던스는 Remington⁽²⁾ 이 무한보로 모델화하였으며, Munjal⁽¹⁰⁾ 등은 연속적으로 침묵이 지지하는 무한 보로 모델화하여 침묵의 영향을 고려하여 레일의 임피던스를 계산하였다. 그러나 본 연구에서는 계산을 간단히 하기 위해서 레일을 무한 보로 가정하여 계산하였다⁽¹¹⁾ 식 (14)는 임피던스 계산에 사용된 식이다.

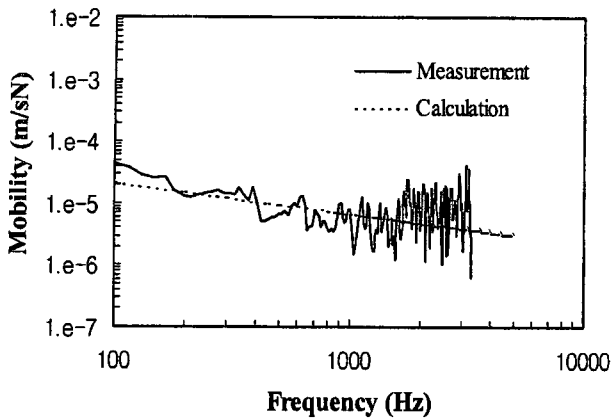


(a) Axial direction

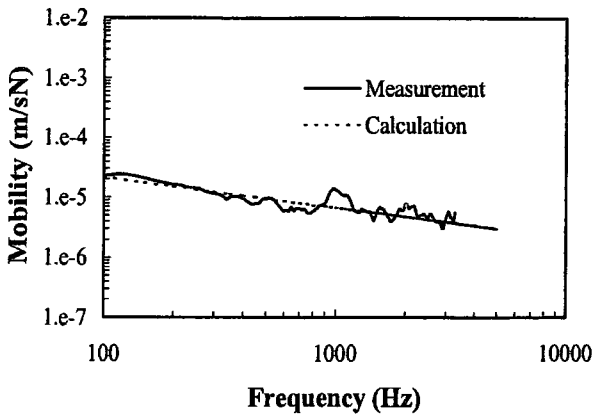


(b) Radial direction

Fig. 6 Comparison of measured and predicted wheel mobilities



(a) Vertical direction



(b) Horizontal direction

Fig. 7 Comparison of measured and predicted rail mobilities

$$Z_{rv} = 2\rho_r A_r C_{rv} (1-j) \tag{14}$$

$$Z_{rh} = 2\rho_r A_r C_{rh} (1-j)$$

여기서, ρ_r 은 레일의 밀도, A_r 은 레일의 단면적, C_{rv} , C_{rh} 는 수직방향과 수평방향에 대한 파의 속도를 나타낸다.

Fig. 7은 레일에 대한 측정치와 식 (14)를 이용해서 계산한 결과에 대한 비교로서, (a)는 수직방향에 대한 모빌리티에 대한 비교 결과이고, (b)는 수평방향에 대한 모빌리티의 비교 결과이다. 전주파수 영역에 대해서 측정치와 계산치가 약간의 오차는 있지만, 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

4. 전동음 측정 및 계산결과

본 장에서는 제 3장의 전동음 예측방법을 이용하여 차륜과 레일에서 방사되는 소음을 예측하고, 차륜과 레일의 각 방향에 대한 소음 기여도를 분석하였다.

4.1 차륜과 레일표면의 거칠기

차륜과 레일의 표면 거칠기는 전동음 계산에 중요한 입력조건으로 일반적으로 시험에 의한 측정치를 사용한다. 그러나 본 연구에서는 차륜과 레일의 거칠기를 측정할 수 없기 때문에 식 (3)에서 레일의 수직방향 진동가속도의 측정치를 대입하여 차륜과 레일에 대한 거칠기를 계산하였다. 레일의 가속도는 레일표면 측면부에 가속도계를 부착하여 측정하였다.

Fig. 8은 실험으로부터 측정된 레일의 진동가속도이고, Fig. 9는 식 (4)를 이용하여 계산한 차륜과 레일표면의 거칠기이다.

4.2 전동음의 측정치와 예측치

전동음의 측정은 전동차가 약 78 km/h의 속도로 자갈도상의 콘크리트 침목 위를 주행 시, 레일에서부터 약 6m 정도 떨어진 지점(지상에서 약 1.2 m 높이)에서 측정하여 분석하였다.

Fig. 10은 차량 통과시 약 10초 동안 측정된 소음의 결과로서 소음의 피크치와 차륜의 위치가 정확히 일치한다. 따라서 이 구간에서는 차륜과 레일에 의한 전동음이 가장 커다란 소음원인 것을 확인할 수 있다. Fig. 11은 Fig. 10을 주파수 분석하여 얻은 결과와 전철의 전동음 예측방법을 이용해서 얻은 계산결과를 비교하였다. 실선이 측정치, 점선이 계산치, □을 포함한 실선이 차륜에서 방사되는 소음, ○를 포함한 점선이 레일에서 방사되는 소음을 나타낸다.

Fig. 11의 결과로부터 주파수 500~3150 Hz사이에서 측정치와 계산치가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 500 Hz이하와 3150 Hz이상에서는 측정치가 계산치보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 500 Hz이하의 저주파수 영역에서 침목에서 방사되는 소음의 영향 때문에 측정치가 크게 나타난 것으로 생각되고, 3150 Hz이상의 영역에서는 본 계산에서 차륜에서 방사되는 소음이 작게 계산된 것으로 생각된다.

위의 결과로부터 레일에서 방사되는 소음의 영향이 대부분의 주파수 영역에서 크며, 특히 2 kHz이상의 영역에서는 차륜에서 방사되는 소음이 큰 것을 확인할 수 있다.

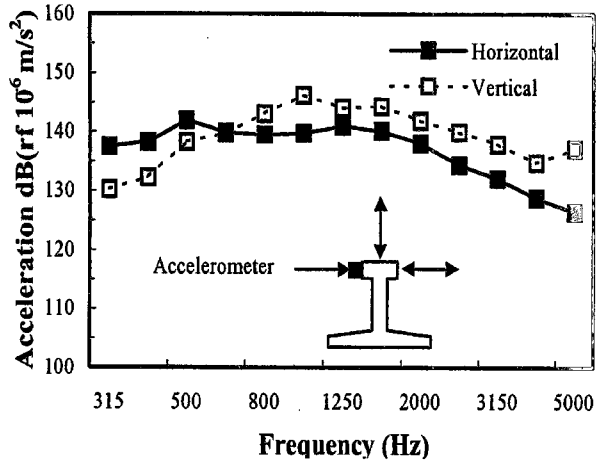


Fig. 8 Acceleration for rail

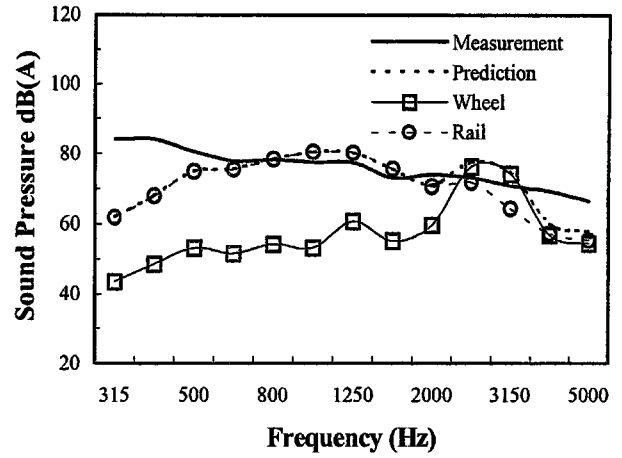


Fig. 11 Comparison of measured and predicted sound pressures for wheels and rail

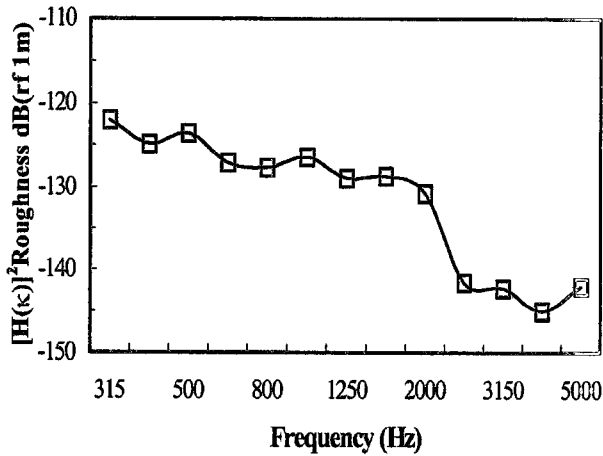


Fig. 9 Roughness of wheel/rail surface

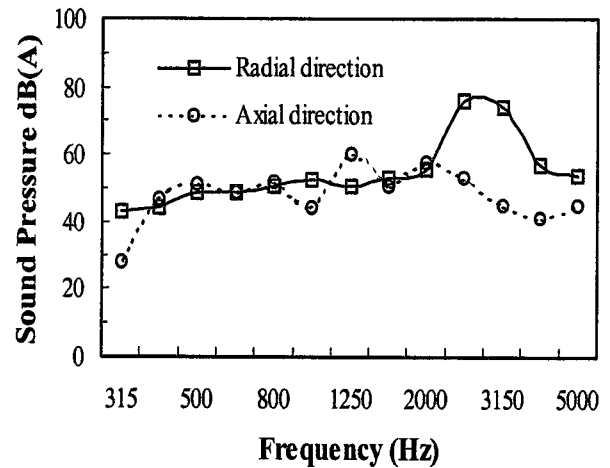


Fig. 12 Noise radiated from wheels

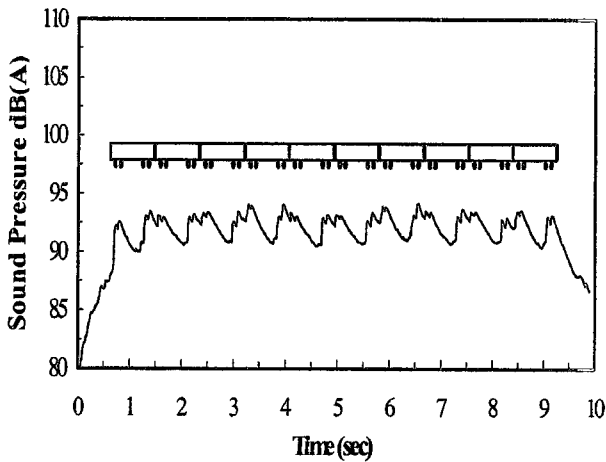


Fig. 10 Wayside noise at 6 m

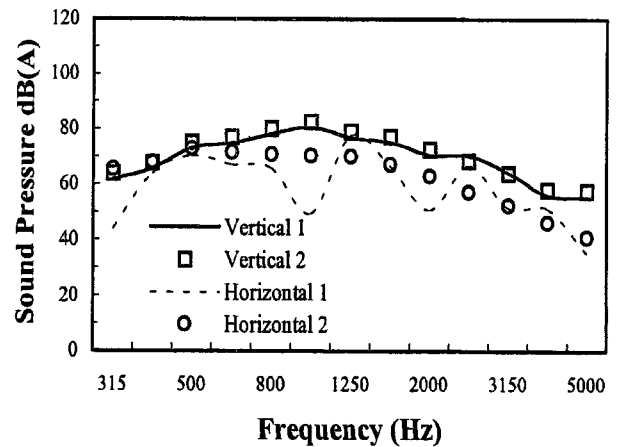


Fig. 13 Noise radiated from rail

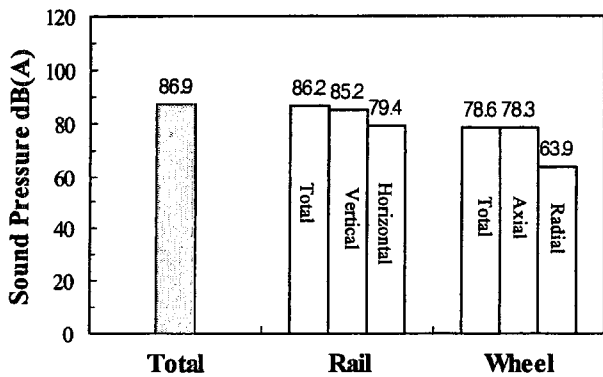


Fig. 14 Contribution noise of wheels and rail

4.3 차륜과 레일의 소음 기여도

Fig. 12~Fig. 14는 차륜과 레일에서 방사되는 소음 가운데 각 방향에 대한 소음 기여도를 파악하기 위해서 각 방향에서 방사되는 소음을 분리하여 계산한 결과이다.

Fig. 12는 차륜의 방사방향과 차축방향에 대한 결과이고, Fig. 13은 레일의 수직방향과 수평방향에서 방사되는 소음의 결과로서, 1은 계산에 의해서 얻어진 결과이고 2는 식 (3)과 식 (6)에 해당하는 Fig. 8의 레일에 대한 수평방향과 수직방향의 진동가속도 측정치를 이용해서 얻은 결과이다. 그리고 Fig. 14는 Fig. 12와 Fig. 13의 계산결과에 대한 overall 값으로 각 방향에 대한 소음의 기여도를 나타낸다. 위의 결과로부터 2 kHz이상의 주파수 영역에서는 차륜의 방사방향의 소음 기여도가 크며, 레일에 대해서는 수직방향의 진동에 의해서 방사되는 소음이 큰 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 차량 주행시 차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음 예측방법에 대한 기초적인 검토를 통해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 차륜과 레일의 임피던스를 이용해서 차량 주행시 발생하는 전동음을 예측하였으며 차륜과 레일에서 발생하는 소음을 분리하여 기여도를 분석하였다.

(2) 차량 주행시 레일 측면에서 측정된 진동가속도를 이용해서 차륜과 레일표면의 거칠기를 추정하였으며, 레일에서 방사되는 소음을 계산하였다.

(3) 차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음을 계산한 결과, 레일에서 방사되는 소음이 대부분의 주파수 영역에서 크며, 특히 2 kHz이상의 영역에서는 차륜에서 방사되는 소음이 큰 것을 확인하였다.

(4) 또한 차륜과 레일에 의해서 발생하는 소음을 각 방향에 대해서 분리하여 분석한 결과, 레일의 수직방향에 의

한 소음 기여도가 크고, 차륜에서 방사되는 소음은 2 kHz 이상의 주파수 영역에서 방사방향으로 방사되는 소음이 큰 것을 확인하였다.

(5) 실제 전동음을 측정된 결과 침목등에서 방사되는 소음이 크기 때문에 침목에 대한 고려가 필요한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

- (1) Bender, E. K. and Remington, P. J., 1974, "The Influence of Rails on Train Noise" J. Sound.Vib, 37(3), pp. 321~334.
- (2) Remington, P. J., 1976, "Wheel/rail Rolling Noise-part I: Characterization of the Wheel/rail Dynamic System" J. Sound.Vib, 46(3), pp. 359~379.
- (3) Remington, P. J., 1976, "Wheel/rail Rolling Noise-part IV: Rolling Noise" J. Sound. Vib. 46(3), pp. 419~436.
- (4) Remington, P. J., 1987, "Wheel/rail Rolling Noise: I Theoretical Analysis" J. Acoust. Soc. Am. 81 (6), pp. 1805~1823.
- (5) Remington, P. J., 1987, "Wheel/rail Rolling Noise: II Validation of the theory" J. Acoust. Soc. Am. 81 (6), pp. 1824~1832.
- (6) 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. 193(1), pp. 123~135.
- (7) Thomson, D. J., Thomson, 1996, "Experimental Validation of the TWINS Prediction Program for Rolling Noise Part 2: Results", J. Sound. Vib. 193(1), pp. 137~147.
- (8) Munjal, M. L., and M.Heckel, 1982, "Some Mechanisms of Excitation of a Railway Wheel", J. Sound. Vib, 81(4), pp. 477~489.
- (9) Haran, S. and Finch, R. D., 1983, "Ring Model of Railroad Wheel Vibrations" J. Acoust. Soc. Am. 74(5), pp. 1433~1440.
- (10) Munjal, M. L., 1982, "Vibrations of a Periodic Rail Sleeper System Excited by an Oscillating Stationary Transvers Force", J.Sound.Vib, 81(4), pp. 491~500.
- (11) Cremer, L. and Heckel, M. 1987, "Structure-Borne Sound", Springer-Verlag.