

차륜/레일에 의한 전동음에 관한 연구

A Study on Wheel/Rail Rolling Noise

김재철* 유원희** 문경호*** 구동회*

Kim, Jae-Chul You, Won-Hee Moon, Kyung-Ho Koo, Dong-Hoe

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 3150Hz.

1. 서론

철도차량 주행시 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 250Km/h 이하에서 커다란 문제가 되고 있다.

이 소음의 발생은 주행구간, 차륜과 레일 담면의 요철상태, 마모형태, 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 차량주행시 차륜과 레일에 의해서 발생하는 소음은 복잡하고 다양하여 모든 소음을 예측하기는 불가능할 뿐만 아니라 저감방안도 제각기 다르다.

따라서 본 논문에서는 차륜과 레일 담면의 미세한 요철에 의해서 발생하는 전동음의 메커니즘과 예측 방법에 대한 기초적인 검토에 대해서 기술한다.

전동음에 관한 연구는 1970년대 중반부터 Remington^(1,2,3)에 의해서 본격적으로 시작되어, 1980년대 후반에 전동음 예측에 관한 방법을 제시하였으며^(4,5), 1990년대 중반에 ERRI에서 TWINS^(6,7)라는 전동음 예측

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

** 한국철도기술연구원 차량연구본부 책임연구원

*** 한국철도기술연구원 차량연구본부 주임연구원

프로그램을 완성하여 전동음 예측 및 저감에 대한 연구에 이용하고 있다. 그러나 현재 우리나라에서는 철도에 대한 인식부족으로 전동음에 대한 연구는 수행되지 않았고, 최근 환경소음이 커다란 문제로 야기되면서 점차 전동음에 대한 관심이 커지고 있다.

따라서 본 논문은 차량이 주행하면서 차륜과 레일에 의해서 발생하는 소음을 저감시킬 수 있는 대책 방안을 세우기 위해서 Remington의 예측방법을 이용하여 현재 주행중인 차량의 전동음을 예측하여 측정치와 비교 검토하고, 차륜과 레일에서 방사되는 소음의 기여도를 분석하였다.

2. 전동음 예측방법^(4,5)

차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음에 관한 예측방법은 그림 1의 순서도와 같이 차륜과 레일표면의 거칠기에 의한 상호작용으로부터 차륜의 차축, 방사방향과 레일의 수직, 수평방향의 임피던스를 이용하여 각 방향으로부터 방사되는 소음을 계산하여 철도연변으로 전파되는 소음을 예측한다. 그러나 본 계산에서는 소음이 철도연변에 전파될 때 지표면 효과는 고려하지 않았다.

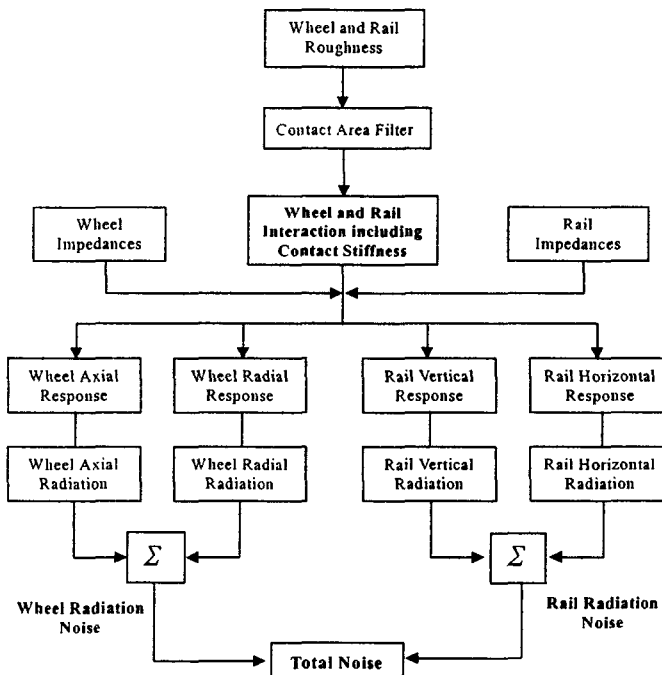


그림 1. 전동음 예측 순서도

2.1 차륜과 레일의 상호작용에 의한 속도

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

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

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.

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

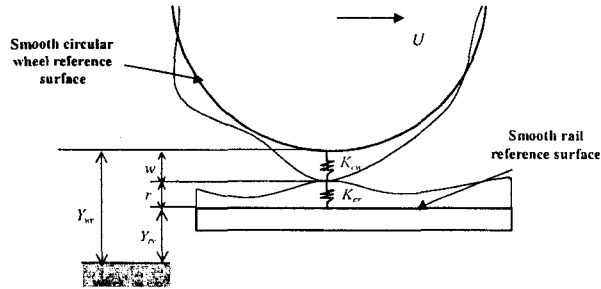


그림 2. 차륜과 레일에 의한 상호작용

식(1)과 식(2)을 이용하여 옥타브 밴드에 대한 차륜과 레일에 대한 접촉점에서의 속도를 구하면 다음과 같다.

$$S_{jrv}(\omega) = \left| \frac{Z_{wr}}{Z_{wr} + Z_{rv} - j\omega(Z_{wr}Z_{rv}/Kc)} \right|^2 \omega^2 (S_{rw}(\kappa) + S_{rr}(\kappa)) H(\kappa)^2 \text{-----}(3)$$

$$S_{jwr}(\omega) = \left| \frac{Z_{rv}}{Z_{wr} + Z_{rv} - j\omega(Z_{wr}Z_{rv}/Kc)} \right|^2 \omega^2 (S_{rw}(\kappa) + S_{rr}(\kappa)) H(\kappa)^2 \text{-----}(4)$$

여기서, κ 는 거칠기의 Wavenumber, $S_{rw}(\kappa), S_{rr}(\kappa)$ 는 차륜과 레일표면의 거칠기를 나타내며, S_{jrv}, S_{jwr} 는 차륜의 방사방향과 레일의 수직방향에 대한 속도를 나타낸다.

또한 차륜과 레일 사이의 수평력과 수직력 사이의 관계를 고려하여, 차륜의 차축방향과 레일의 수평방향의 속도를 구하면 식(5)와 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{jva}(\omega) = \left| \frac{Z_{rh}}{Z_{wa} + Z_{rh}} \right| \left| \frac{Z_{wr}}{Z_{rvh}} \right| S_{jrv}(\omega) \text{-----}(5)$$

$$S_{jrh}(\omega) = \left| \frac{Z_{rh}}{Z_{wa} + Z_{rh}} \right| \left| \frac{Z_{wr}}{Z_{rh}} \right| S_{jrv}(\omega) \text{-----}(6)$$

여기서, S_{ywa} 는 차륜의 차축방향의 속도, S_{jrh} 는 레일의 수평방향에 대한 속도를 나타낸다. 또한 Z_{wr} , Z_{rh} 는 차륜의 차축방향과 레일의 수평방향에 대한 임피던스 이고, Z_{wa} 는 레일에 대해서 수직방향의 가진에 대한 수평방향의 응답을 나타내는 임피던스이다.

상식에서 $|H(\kappa)|^2$ 는 차륜과 레일의 접촉면적과 표면의 거칠기 과장에 따른 영향을 나타내는 접촉면 필터를 나타낸다. 또한 Kc 는 다음과 같이 정의 되는 Hertzian 접촉강성을 나타낸다.

$$\frac{1}{Kc} = \frac{1}{Kr} + \frac{1}{Kw} \text{-----}(7)$$

2.3 접촉면 필터(Contact Area Filter)

차륜과 레일표면의 거칠기 과장이 차륜과 레일의 접촉면적의 크기보다 클 경우에는 접촉면적의 크기에 영향을 받지 않고 서로 밀접하게 접촉한다. 그러나 거칠기의 과장이 접촉면적보다 작을 경우에는 양쪽의 거칠기가 평균 되어 차륜과 레일에 작용하는 가진력이 작아진다. 따라서 이러한 현상을 고려하기 위해서 Remington 은 다음과 같은 접촉면 필터를 고려하였다.

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

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

본 계산에서는 $\alpha \ll 0$ 할 경우에 대해서 식(8)을 식(9)와 같이 간단히 하여 본 계산에 이용하였다.

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

2.4 차륜과 레일로부터 방사되는 음압계산

본 연구에서는 철도를 선음원으로 모델화하여 차륜과 레일에서부터 방사되는 음압을 식(10)과 식(11)로부터 차량이 통과하는 시간(T 초) 동안의 평균음압으로 계산하였다.

$$S_{pr}(\omega) = 10 \log \left\{ \frac{N}{2d\pi} \frac{\rho c^2}{p_o} \left[\sigma_{rv}(r_f + r_h) S_{jrv}^{are}(\omega) + \sigma_{rh}(r_h) S_{jrh}^{are}(\omega) \right] \right\} \text{-----}(10)$$

$$S_{p_{rw}}(\omega) = 10 \log \left\{ \frac{N}{2d\pi VT} \frac{\rho c^2}{p_o} \left[\sigma_{wr} A_{wr} S_{ywr}^{are}(\omega) + \sigma_{wa} A_{wa} S_{ywa}^{are}(\omega) \right] \right\} \quad (11)$$

여기서, P_o 는 기준음압(2×10^{-5} Pa)이고, A_{wr}, A_{wa} 는 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_{*}^{are} 는 차륜과 레일의 속도에 대한 공간평균을 나타낸다.

2.5 차륜과 레일의 방사효율

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

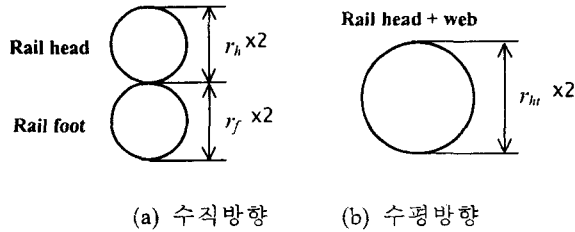


그림 3. 레일에 대한 각 방향의 방사효율 모델

식(12)는 레일의 수평방향과 수직방향에 대한 방사효율 이고, 식(13)은 차륜에 대한 방사효율을 나타낸다.

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

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

3. 차륜/레일에 대한 임피던스

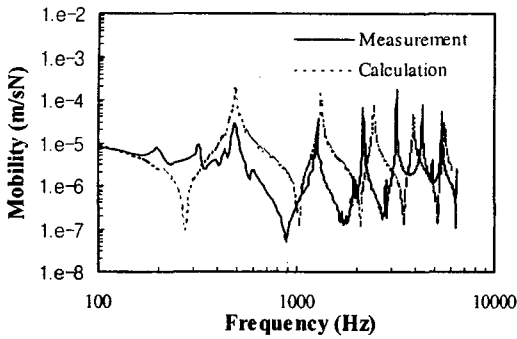
차륜과 레일에서 방사되는 소음을 계산하기 위해서는 차륜과 레일의 임피던스가 필요하다. 본 연구에서는 차륜을 링으로 모델화하고 레일을 무한 보로 모델화하여 계산한 결과와 실제 측정된 결과를 비교하였다.

3.1 차륜의 모빌리티의 측정치와 계산치

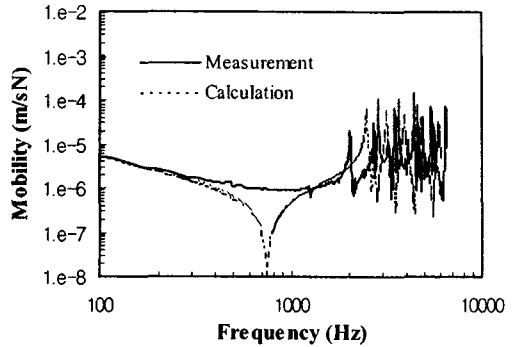
차륜에 대한 모델은 Munjal⁽⁷⁾과 Haran⁽¹⁰⁾ 등에 의해서 링으로 모델화하여 각 방향에 대한 임피던스를 계산하여 비교적 만족할만한 결과를 얻었다. 본 연구에서도 차륜을 링으로 모델화하여 차륜의 각 방향에 대한 임피던스를 계산하였다.

그림 4는 차륜의 차축방향과 방사방향에 대한 모빌리티(임피던스의 역수)의 측정치와 계산에 의

해서 얻은 결과에 대한 비교이다.



(a) 차축방향의 모빌리티

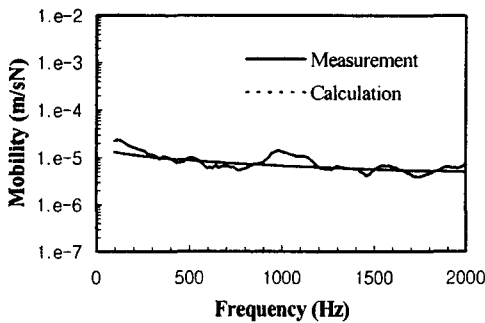


(b) 방사방향의 모빌리티

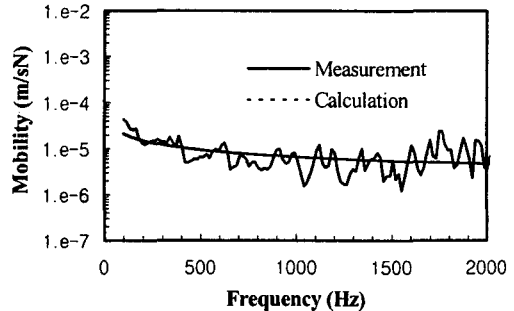
그림 4. 차륜에 대한 모빌리티의 측정치와 계산치

3.2 레일에 대한 모빌리티의 측정치와 계산치

레일에 대한 임피던스는 Remington⁽²⁾이 무한보로 모델화하였으며, Munjal⁽⁶⁾ 등은 연속적으로 침목이 지지하는 무한 보로 모델화하여 침목의 영향을 고려하여 레일의 임피던스를 계산하였다. 그러나 본 연구에서는 계산을 간단히 하기 위해서 레일을 무한 보로 가정하여 식(14)를 이용하여 임피던스를 계산하였다.



(a) 수직방향의 모빌리티



(b) 수평방향의 모빌리티

그림 5. 레일 모빌리티의 측정치와 계산치

$$\begin{aligned} Z_{rv} &= 2\rho_r A_r C_{rv} (1-j) \\ Z_{rh} &= 2\rho_r A_r C_{rh} (1-j) \end{aligned} \quad (14)$$

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

그림 5는 레일에 대한 측정치와 식(14)을 이용해서 계산한 결과에 대한 비교이다.

그림 5의 (a)는 수직방향에 대한 모빌리티에 대한 비교 결과이고, (b)는 수평방향에 대한 모빌리티의 비교 결과이다. 전주과수 영역에 대해서 측정치와 계산치가 약간의 오차는 있지만, 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 전동음 측정 및 계산결과

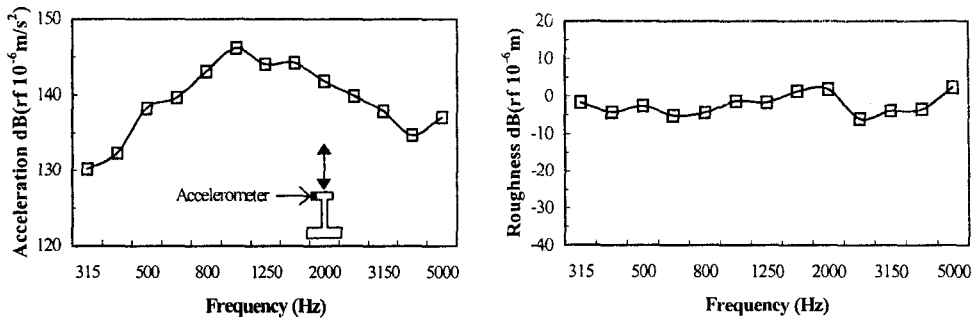
본 장에서는 제 3 장의 전동음 예측방법을 이용하여 차륜과 레일에서 방사되는 소음을 예측하고 차륜과 레일의 각 방향에 대한 소음 기여도를 분석하였다.

4.1 차륜과 레일표면의 거칠기

차륜과 레일의 표면 거칠기는 전동음 계산에 중요한 측정값이다. 그러나 본 연구에서는 차륜과 레일에 대한 측정 데이터가 없기 때문에 식(4)에 레일의 수직방향 진동가속도의 측정치를 대입해서 차륜과 레일에 대한 거칠기를 계산하였다.

레일의 가속도는 레일담면 측면부에 가속도계를 부착하여 측정하였다.

그림 6의 (a)는 실험을 통해서 측정한 레일의 진동가속도이고, (b)는 식(4)로부터 계산한 차륜과 레일의 거칠기이다.



(a) 레일의 수직방향 진동가속도

(b) 차륜과 레일의 거칠기

그림 6. 레일의 수직방향 진동가속도와 차륜레일의 거칠기

4.2 전동음의 측정치와 예측치

전동음의 측정은 전동차가 약 78Km/h의 속도로 자갈도상의 콘크리트 침목위를 주행시, 레일에서부터 약 6m 정도 떨어진 거리에서 측정하여 분석하였다.

그림 7은 전동음에 대한 측정결과와 전철의 전동음 예측방법을 이용해서 얻은 계산결과를 비교하였다. 실선이 측정치, 점선이 계산치, □을 포함한 실선이 차륜에서 방사되는 소음, ○를 포함한 점선이 레일에서 방사되는 소음을 나타낸다.

그림 7의 결과로부터 주파수 500 ~ 3150Hz 사이에서 측정치와 계산치가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 500Hz 이하와 3150Hz 이상에서는 측정치가 계산치보다 큰 것을 알 수 있다. 500Hz 이하의 저주파수 영역에서는 침목의 영향 때문에 측정치가 크게 나타난 것으로 생각되고, 3150Hz 이상의 영역에서는 본

계산에서 차륜에서 방사되는 소음이 작게 계산된 것으로 생각된다.

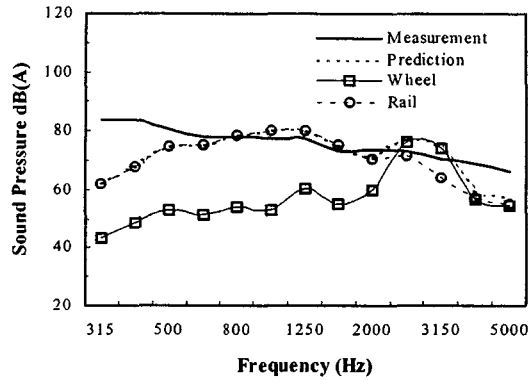


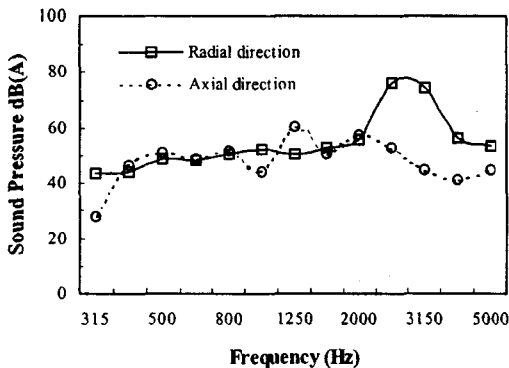
그림 7. 차륜과 레일에서 방사되는 음압의 측정치와 계산치의 비교

위의 결과로 부터 레일에서 방사되는 소음의 영향이 대부분의 주파수 영역에서 크며, 특히 2kHz 이상의 영역에서는 차륜에서 방사되는 소음이 큰 것을 확인할 수 있다.

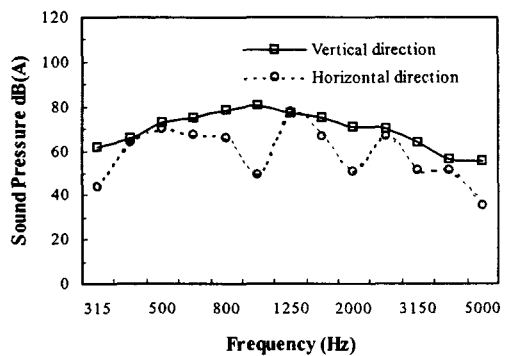
4.3 차륜과 레일에서 방사되는 소음의 기여도 계산 결과

그림 8은 차륜과 레일에서 방사되는 소음 가운데 각 방향에 대한 소음 기여도를 파악하기 위해서 각 방향에서 방사되는 소음을 분리하였다. 그림 8의 (a)는 차륜의 방사방향과 차축방향에 대한 결과이고, (b)는 레일의 수직방향과 수평방향에서 방사되는 소음의 결과이다.

위의 결과로부터 레일에 대해서는 수직방향의 진동에 의해서 방사되는 소음이 크며, 2kHz 이상의 주파수 영역에서는 차륜의 방사방향의 소음 기여도가 큰 것을 확인 할 수 있다. 그러나 레일의 수평방향으로 부터 방사되는 소음도 고려해야 될 것으로 판단된다.



(a) 차륜에서 방사되는 소음



(b) 레일에서 방사되는 소음

그림 8. 차륜과 레일의 각 방향에서 방사되는 소음의 예측결과

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) 차량주행시 레일 측면에서 측정된 진동가속도를 이용해서 차륜과 레일표면의 거칠기를 추정하였다.
- (3) 차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음을 계산한 결과, 레일에서 방사되는 소음이 대부분의 주파수 영역에서 크며, 특히 2kHz 이상의 영역에서는 차륜에서 방사되는 소음이 큰 것을 확인하였다.
- (4) 또한 차륜과 레일에 의해서 발생하는 소음을 분리하여 분석한 결과, 레일에서 방사되는 소음은 수직방향에 의한 기여도가 크며, 수평방향으로부터 방사되는 소음도 고려해야 된다는 것을 확인하였다. 또한 차륜에서 방사되는 소음은 2kHz 이상의 주파수의 영역에서 방사방향으로부터 방사되는 소음이 큰 것을 확인하였다.
- (5) 실제 전동음을 측정된 결과 침목등에서 방사되는 소음이 크기 때문에 침목에 대한 고려가 필요한 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] E.K.Bender and P.J.Remington(1974 년), "The influence of rails on train noise" J Sound.Vib, 37(3), pp321-334.
- [2] P.J.Remington(1976 년), "Wheel/rail rolling noise-part I :Characterization of the wheel/rail dynamic system"J.Sound.Vib.46(3), pp359-379.
- [3] P.J.Remington(1976 년), "Wheel/rail rolling noise-partIV :Rolling noise"J.Sound.Vib.46(3), pp419-436.
- [4] P.J.Remington(1987 년), "Wheel/rail rolling noise: I Theoretical analysis"J.Acost.Soc.Am.81(6) , pp1805-1823.
- [5] P.J.Remington(1987 년), "Wheel/rail rolling noise: II Validation of the theory"J.Acost.Soc.Am.81(6) , pp1824-1832.
- [6] D.J.Thomson(1996 년), "Experimental Validation of the TWINS Prediction Program for Rolling Noise Part 1:Descriptron of the Model and Method", J. Sound. Vib. 193(1), pp 123-135.
- [7] D.J.Thomson(1996 년), "Experimental Validation of the TWINS Prediction Program for Rolling Noise Part 2:Results", J. Sound. Vib. 193(1), pp 137-147.
- [8] M.L.Munjaj and M.Heckel(1982 년), "Some mechanisms of excitation of a railway wheel",J.Sound.Vib, 81(4), pp477-489.
- [9] M.L.Munjaj(1982 년), "Vibrations of a Periodic Rail Sleeper System Excited by an Oscillationg Stationary Transvers Force",J.Sound.Vib, 81(4), pp491-500.
- [10] S. Haran and R.D. Finch (1983 년)," Ring model of railroad wheel vibrations" J.Acoust.Soc.Am.74(5),,pp 1433-1440.