

해외철도기술동향 : 차륜/레일 접촉에 의한 소음과 저감기술



| 김재철 |

한국철도기술연구원, 차륜레도 연구실 책임연구원

1. 머리말

철도에 의한 수송력이 증대되면서 차량 실내소음은 승차감 측면에서 점차 중요시 되고 있으며, 철도연변에 주거하는 주민이 증가하면서 철도에 의한 소음공해는 점차 커다란 사회적 문제로 발전하고 있다. 이에 반해 철도는 타 교통수단과의 경쟁력 향상을 위해 차량의 고속화와 경량화가 추진되고 있어 철도에 의한 소음진동문제는 점차 커다란 문제를 야기시키고 있다.

따라서 본 논문에서는 철도차량의 소음원 가운데 차륜과 레일의 접촉에 의해서 발생하는 소음의 발생현상과 저감기술에 대해서 논의하고자 한다.

2. 차륜/레일 접촉에 의한 소음

철도차량에서 발생하는 소음은 크게 차륜과 레일의 접촉에 의해서 발생하는 소음, 공력음, 동력장치와 주변기기에 의한 소음 등으로 구분할 수 있으며, 이러한 소음 가운데 특히 차륜과 레일에 의해서 발생하는 소음은 외국에서 오래 전부터 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 차륜과 레일에 의한 소음은 발생현상이 매우 복잡하고 다양하여 아직도 일부 소음에 대해서는 정확하게 규명되지 않고 현재까지도 많은 연구가 진행되

고 있다.

차륜과 레일에 의해서 발생하는 소음은 차륜과 레일의 형태 및 주행구간 등에 따라 크게 진동음(Rolling Noise), 충격음(Impact Noise), 스킨음(Squeal Noise) 등으로 분류되며 소음의 발생원인 및 현상은 다음과 같다.

2.1. 진동음(Rolling Noise)

차륜과 레일의 접촉에 의해서 발생하는 진동음은 차륜이 레일 위를 주행 시 차륜과 레일표면의 불규칙한 거칠기에 의해서 가진력이 발생하여 차륜, 레일 및 침목 등에서 발생하는 진동이 소음으로 전파된다. 따라서 차륜과 레일표면의 거칠기에 따라서 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

차륜과 레일표면의 거칠기가 양호하고 결함이 없는 직선구간을 통과 시 발생하는 소음과 차륜과 레일 표면의 심한 마모, 불규칙적인 결함, 차륜과 레일의 파상마모(Corrugation) 등에 의해서 발생하는 소음으로 구분 할 수 있다.

일반적으로 진동음은 전자의 경우를 의미하기 때문에 여기서는 전자에 대한 발생원인 및 예측방법에 대해서 논의한다.

진동음 예측에 관한 연구는 Munjal이 차륜과 레일의 진동을 예측하는 방법을 제안하였고, Remington은 차륜과 레일을 간단히 모델화하여 각각의 임피던스와 방사효율(Radiation Effiancne) 및 차륜과 레일표면의 거칠기를 이용하여 차륜과 레일에서부터 방사되는 소음을 예측하였다. 그리고 현재

ERRI(European Rail Research Institute)에서 Remington의 모델과 예측방법을 기초로 하여 TWINS(Track Wheel Interaction Noise Software)라는 프로그램을 개발하여 전동음 저감방안에 이용하고 있다.

차륜과 레일에 의해서 발생하는 전동음에 대한 계산방법은 그림1의 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 계산하는 경우에는 지표면 효과를 고려하지만, 침목은 지표면 위에 위치하기 때문에 침목에서 방사되는 소음 계산에는 지표면 효과를 고려하지 않는다.

전동음 예측방법에서는 철도차량을 선음원으로 모델링하여 차륜과 레일로부터 방사되는 소음을 식(1)과 식(2)와 같이 차량 통과시간(T초)에 대한 평균음압으로 계산한다.

$$S_{pw}(\omega) = 10 \log \left\{ \frac{N}{2dVT} \left(\frac{\rho c}{p_0} \right)^2 \left[\sigma_{wr} A_{wr} S_{swr}^{avg}(\omega) + \sigma_{wa} A_{wa} S_{swa}^{avg}(\omega) \right] D(\omega, d) \right\} \quad (1)$$

$$S_{pr}(\omega) = 10 \log \left\{ \frac{N}{2d} \left(\frac{\rho c}{p_0} \right)^2 \left[\sigma_r (r_r + r_h) S_{sv}^{avg}(\omega) + \sigma_{rh} (r_{rh}) S_{sh}^{avg}(\omega) \right] D(\omega, d) \right\} \quad (2)$$

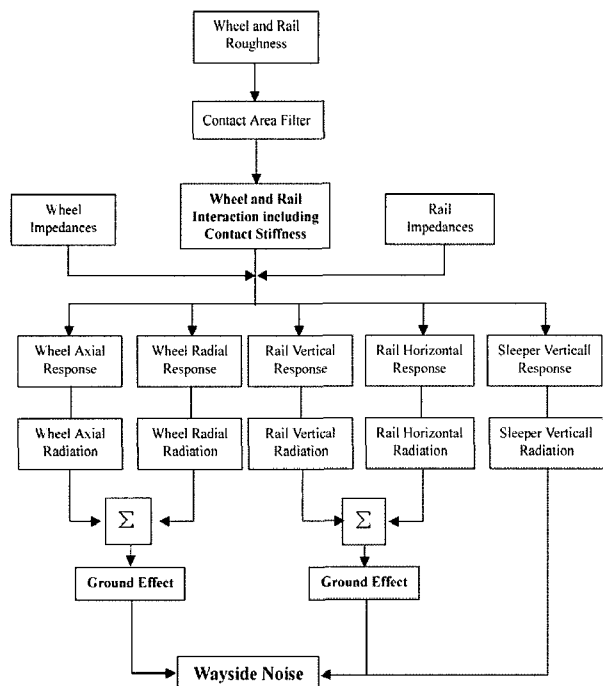


그림 1. 전동음 예측 순서도

여기서, P_0 는 기준음압이고, ρc 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 레일 두부의 폭, r_r 는 레일밑면의 폭, r_{rh} 는 레일의 높이, S_{wr} 과 S_{wa} 는 차륜의 방사방향과 차축방향의 방사효율, S_{sv} 와 S_{sh} 는 레일의 수평방향과 수직방향의 방사효율, S^{avg} 는 차륜과 레일의 공간 평균 속도의 스펙트럼 밀도를 나타내며, $D(\omega, d)$ 는 지표면 효과를 나타내는 항이다.

침목에 의한 소음은 수평방향은 무시하고 수직방향만을 고려하여 계산한다. 침목의 수직방향 평균속도는 레일의 평균 속도 $S_{&cv}^{avg}$ 와 침목의 동특성으로부터 계산할 수 있으며 이 결과를 식(3)에 대입하여 침목으로부터 방사되는 소음을 계산할 수 있다.

$$S_{ps}(\omega) = 10 \log \left\{ \frac{N}{2d} \left[\frac{\sigma_{sv} (\rho c)^2 A_T}{4L_T P_0} \right] S_{&sv}^{avg}(\omega) \right\} \quad (3)$$

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

그림 2는 위의 식을 이용하여 차륜, 레일 및 침목에서 방사되는 소음의 계산결과를 나타내고 있다.

위의 모델에서는 차륜과 레일의 거칠기가 크거나 레일의 파상마모 등에 의한 차륜과 레일의 분리, 좌우방향의 접촉력과 속도, Roll-Slip 혹은 Spin-Creep 등은 무시되었다.

차륜과 레일의 마모가운데 그림3과 같이 차륜과 레일의 파상마모에 의한 소음은 전동음에 비해서 매우 높은 레벨의 소

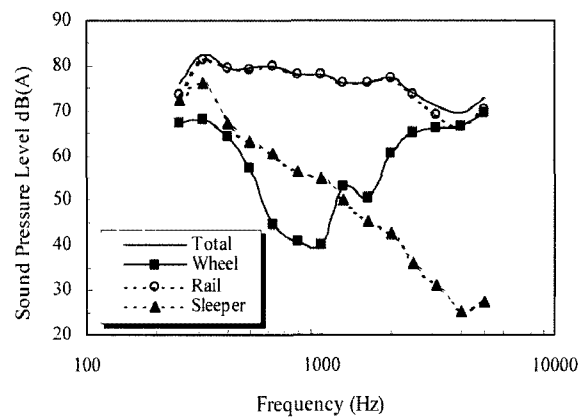
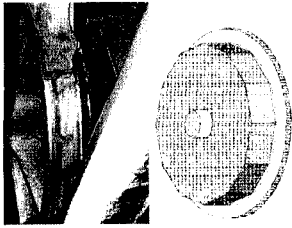
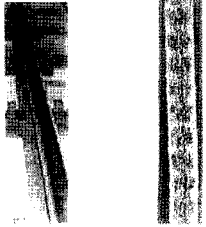


그림 2. 차륜, 레일 및 침목에서 방사되는 소음 예측 결과



(a) 차륜의 파상마모 현상



(b) 레일의 파상마모 현상

그림 3. 차륜과 레일의 파상마모 현상

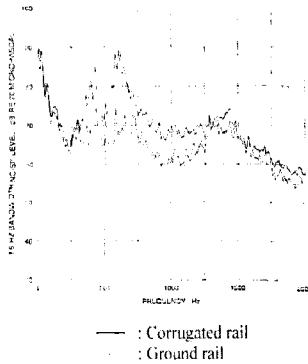


그림 4. 레일의 파상마모에 의한 차량소음

의 분리에서 발생하는 특별한 형태의 소음이다.

Ver은 레일표면의 형태와 차량속도에 따라 충격음을 분류 하였으며 레일표면의 거칠기가 완만한 경우에도 차량의 속도가 임계속도를 초과하면 충격음이 발생할 수 있음을 제안 하였다.

완만한 레일의 거칠기에 대해서 식(4)과 같은 임계속도를 초과하면 차륜과 레일이 분리되어 충격음이 발생한다.

$$V_{CE} = \left[\frac{g \left(1 + \frac{M}{m} \right)}{\frac{d^2 y}{dx^2}} \left(1 + \frac{m\beta}{2\rho} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

식(4)에서 g 는 중력가속도, M 은 차량의 질량, m 은 차륜의 질량을 나타내며, β 는 $\left[\frac{\mu}{4EI} \right]^{\frac{1}{4}}$ 로 정의된다.

음을 발생시키기 때문에 파상마모가 발생하면 커다란 환경소음문제로 발전한다.

그림 4는 레일의 파상마모에 의해서 발생하는 소음의 측정 예로서 파상마모에 의한 소음은 약400Hz와 600Hz에서 커다란 소음레벨을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 파상마모에 의한 소음은 차량속도에 따라 증가하기 때문에 차륜과 레일의 공진현상에 의해서 발생하는 소음과는 구분된다.

2.2. 충격음 (Impact Noise)

충격음은 레일의 조인트, 레일의 결함, 심한 마모, 불연속한 표면 및 분기점, 차륜의 평면화(Flat) 등에 의해 차륜과 레일

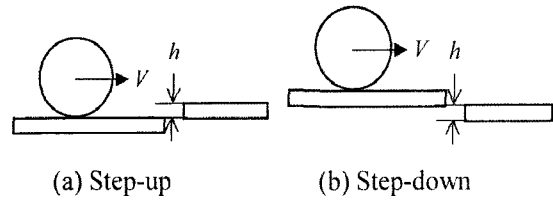


그림 5. 레일 조인트의 형태

또한 레일의 조인트부분, 레일의 흠, 차륜의 평면화 등에 의한 임계속도는 식(5)와 같이 정의되며, 레일의 조인트 부분은 그림5와 같이 Step-down의 경우만 적용되고, Step-up상태에서는 임계속도가 존재하지 않고 항상 충격음이 발생된다.

$$V_{CE} = \left[ag \left(1 + \frac{M}{m} \right) \left(1 + \frac{m\beta}{2\rho} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

여기서, a 는 차륜의 반경을 나타낸다.

위식에서 레일의 흠, 레일간의 높이 혹은 차륜의 평면화 깊이는 임계속도에 크게 영향을 미치지 않는다. 그러나 식(6)에서와 같이 레일의 충격량에는 중요한 요소이다.

$$m_{eq} \Delta V = V m_{eq} \sqrt{\frac{2h}{a}} \quad (6)$$

식(6)에서 m_{eq} 는 등가 레일 질량을 나타내며 h 는 레일의 흠, 레일간의 높이, 차륜의 평면화 깊이 등을 나타낸다. 그림6은 레일간의 높이 h 에 따른 Step-up과 Step-down상태에서 방사되는 소음의 양을 나타낸 결과로서 Step-down에 비해서 Step-up이 커다란 충격음을 발생시킨다.

가장 커다란 충격음은 차량이 분기기를 통과 시 발생되며

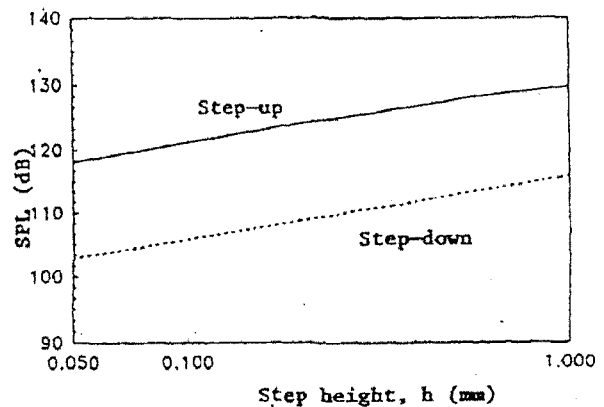


그림 6. 레일간의 높이h에 따른 Step-up과 Step-down의 소음레벨 (속도72km/h)

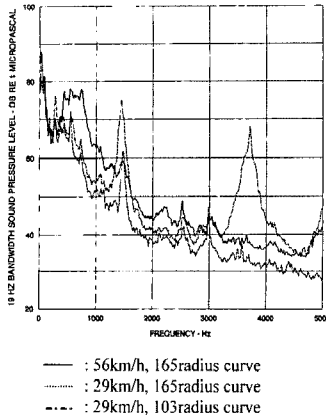


그림 7. 곡선구간에서의 스킨음

2.3. 스킨음(Squeal Noise)

철도차량이 회전반경이 작은 곡선구간을 운행할때 매우 불쾌한 소음이 발생하는데 이러한 소음을 스킨음이라 한다.

스킨음의 발생원인은 다음과 같이 크게 3형태로 분류된다.

- ① 안쪽과 바깥쪽 차륜의 Slip 차이
- ② 차륜의 플랜지와 레일측면의 접촉에 의한 Stick-Slip
- ③ 좌우방향 크리프에 의한 Stick-Slip

그러나 현재 ③이 가장 일반적인 발생원인으로 알려져 있다. 이러한 현상을 "Wheel crabbing" 이라고 한다. 스킨음의 발생현상은 현악기를 활로 켤 때 나타나는 현상과 유사하게 설명되며, Von Stappenbeck이 처음으로 스킨음의 발생 메커니즘으로 "Wheel crabbing" 현상을 제안하였으며, Rudd는 좌우방향 Stick-Slip 모델을 이용하여 차륜에 대한 음의 댐핑으로 인해서 불안정한 진동을 발생시킨다고 하였다. 그 이후 현재까지 많은 연구자가 스킨음을 규명하기 위해서 차륜과 레일의 모델에 대한 연구를 수행하고 있다.

스킨음에 대한 발생 메커니즘은 Rudd의 좌우방향 Stick-Slip

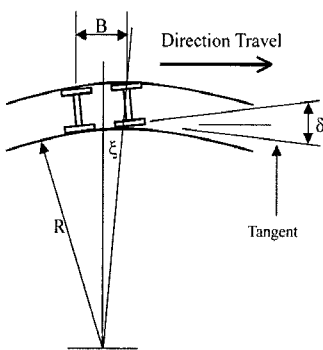


그림 8. 곡선구간의 좌우방향 Stick-Slip 모델

일반적인 전동음에 비해 약 7~10dB 정도 높은 레벨을 나타내며, 레일 조인트보다 높은 충격음이 발생한다. 그러나 거리가 멀어질수록 전동음과 같은 수준이 되거나 낮아지는 경향의 방사특성을 갖고 있다.

에 대한 차륜의 전체 크리프를 구하면 다음과 같이 정의된다.

$$\xi = V - \frac{dU}{dt} \quad (7)$$

또한 좌우방향 평균슬립속도에 대한 평균크리프는 다음과 같다.

$$\xi_o = \frac{V}{S} \quad (8)$$

여기서, S는 차륜의 진행방향 속도를 나타낸다.

그리고 차륜에 대한 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$m \frac{d^2U}{dt^2} = -kU - C \frac{dU}{dt} + \mu W \quad (9)$$

여기서, mW: 마찰력, W: 수직하중을 나타낸다.

또한 마찰계수 m와 평균크리프 ξ_o 에 대한 관계, 크리프와 마찰계수와의 구배 $v = \frac{d\mu}{d\xi}|_{\xi_o}$ 차륜의 동적변형 $U=U_o+u$ 에 대한 관계로부터 식(9)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m \frac{d^2u}{dt^2} + ku + \left[C + v \frac{W}{S} \right] \frac{du}{dt} = 0 \quad (10)$$

결국, 식(10)의 해는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u = u_o e^{\pm i \left[\frac{k}{m} - \frac{1}{4m} \left(C + v \frac{W}{S} \right)^2 \right]^{1/2} t} e^{-\frac{1}{2m} \left(C + v \frac{W}{S} \right) t} \quad (11)$$

Rudd는 위의 이론을 기초로 하여 다음과 같이 차륜의 내부 손실계수와 Stick-Slip에 의한 음의 손실계수를 이용하여 이론적인 설명을 하였다.

$$\eta = \eta_{in} - \eta_{ss} \quad (12)$$

식(12)에서 $\eta_{in} = \frac{C}{m\omega}$: 내부손실계수를 나타내며,

$\eta_{ss} = -\frac{vW}{m\omega S}$: Stick-Slip : Stick-Slip에 의한 음의 손실계수를 나타낸다.

만약 구배 v가 음이 되면, η_{in} 가 양이 되고 η_{ss} 가 커지면 전체 손실계수는 음이 되어 공진주파수에서 진동이 증폭된다. 그

리고 h_{ss} 는 차륜의 진행방향속도 S 에 반비례하며, v 는 S 와 무관하기 때문에 속도가 어느 정도 이상 증가하면 h_{ss} 가 h_{in} 보다 작아져서 스킨음이 발생하지 않는다.

또한 Stick-Slip에 의한 음의 손실계수가 발생하지 않도록 내부손실계수 h_{in} 를 크게 하면 스킨음 저감에 효과가 크다.

3. 저감기술

전절에서 분류한 차륜과 레일의 접촉에 의해서 발생한 소음은 각각 발생현상이 다르기 때문에 그에 따른 소음대책도 다르며, 동일한 저감대책에 대해서도 발생소음의 저감효과는 각각 다르다.

따라서 본 절에서는 각각의 소음에 대해서 차량 및 궤도에 대한 소음 저감기술과 효과에 대해서 논의하기로 한다.

3.1. 차량에 대한 저감기술

차륜과 레일에 관한 소음을 저감하기 위한 차량의 대책방법으로 차량하부의 흡음, 흡음 처리된 스커트, 차륜의 연삭 및 방음 처리된 차륜 등을 생각할 수 있다.

차륜과 레일의 거칠기가 양호한 상태에서 발생하는 전동음은 차량하부를 흡음 처리하면 약2~3dB(A) 정도의 차량실내소음의 저감효과가 있으며, 흡음 처리된 스커트와 그림 9의 탄성차륜을 적용하면 약1~3dB(A) 정도의 차량외부소음의 저감효과가 있다. 그림 11은 탄성차륜을 적용한 전동차의 실내소음 저감효과를 나타내고 있다. 또한 차륜의 마모가 심한 경우 발생하는 소음과 차륜의 평면화에 의한 충격음에 대해서는 차륜연삭이 7~10dB 정도의 저감효과가 있다.

곡선구간에서 발생하는 스킨음은 그림 9와 그림 10과 같은 탄성차륜과 댐핑 처리된 차륜을 적용하면 약5~20dB 정도의 저감효과를 얻을 수 있어 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다. 그리고 차량에 도유기를 설치하거나 혹은 차량의 현가장치들을 조절하면 저감효과가 큰 것으로 알려져 있다.

조인트 혹은 분기기에서 발생하는 충격음은 탄성차륜을 적용하면 약3dB(A)정도 저감되며, 현가장치에 대한 대책방법으로 약0~6dB(A) 정도의 저감효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

그림 12는 곡률반경이 400m인 곡선구간에서 차량 하부소음에 대한 측정결과로서, 약1260Hz, 2830Hz 및 3620Hz

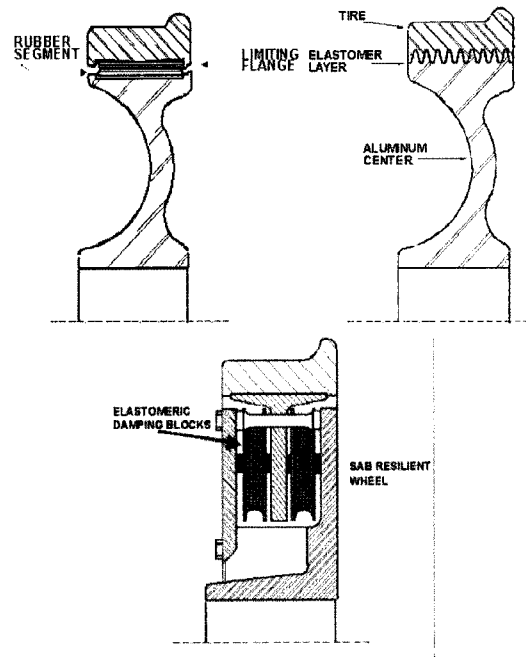


그림 9. 탄성차륜

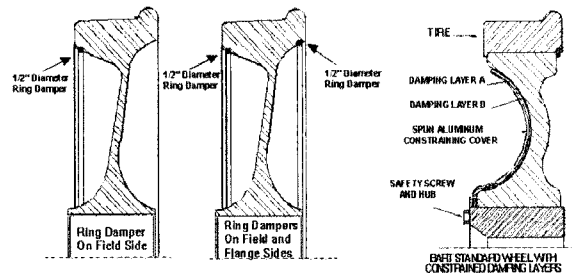


그림 10. 댐핑 처리된 차륜

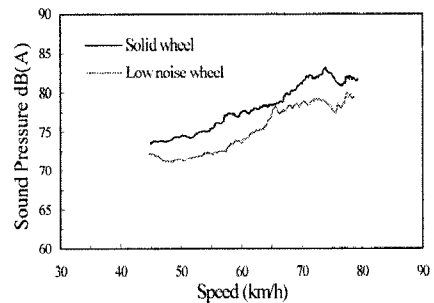


그림 11. 탄성차륜의 실내소음 저감효과

부근의 스킨음에 대한 저감효과를 나타내고 있다.

3.2 궤도에 대한 저감기술

전동음의 경우, 궤도사이의 방음벽을 설치하면 약3~5dB 정도의 저감효과가 있으며, 그림13과 같이 레일에 댐퍼를 설치할 경우 약2~3dB 정도의 저감효과가 있으며, 특히 철교에서

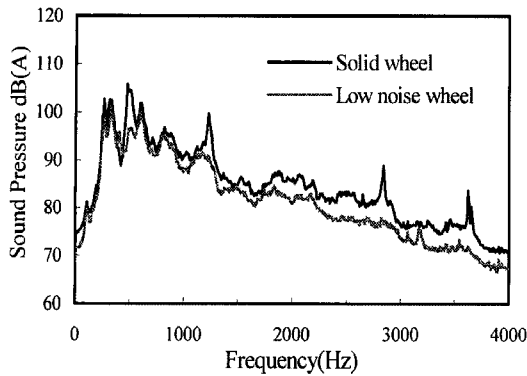


그림 12. 탄성차륜에 의한 스킨소음 저감효과

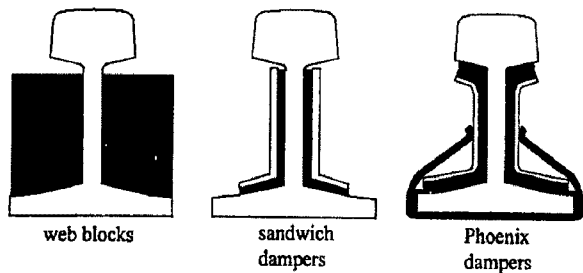


그림 13. 레일 댐퍼의 종류

발생되는 소음을 저감하는데 유효하다. 그러나 레일의 마모(파상마모 포함)가 심하거나 결함에 의해 발생하는 소음, 충격음에 가장 효과적인 대책방안은 레일삭정이며, 차륜과 함께 삭정을 하면 약7~10dB 정도의 저감효과가 있는 것으로 알려져 있으며, 레일의 결함부분만을 보수하여 삭정할 경우에는 약5dB 정도의 저감효과가 있다. 또한 최근에는 레일두부에 경도가 다른 재질을 추가하여 곡선구간의 레일피로와 함께 스킨소음을 저감시키기 위한 연구가 진행되고 있다.

분기기에서 발생하는 충격음은 주로 프러그(frog)에서 발생되기 때문에 이동식 프러그를 설치할 경우 약7dB 정도의 저감효과가 있으며, 스프링 프러그(spring frog) 혹은 용접 처리된 V-프러그를 사용하면 약5dB의 저감효과가 있는 것으로 알려져 있다.

4. 맺음말

현재 200km/h 이하의 철도차량에서 발생하는 소음 가운데 가장 커다란 소음원은 차륜과 레일의 접촉에 의해서 발생하는 소음이다. 그러나 위에서 설명한 것처럼 차륜과 레일에 의한

소음은 발생현상이 매우 다양하고 복잡하여 해석적으로 파악하기가 어렵기 때문에 효과적인 저감방안을 세우기 위해서는 시험 등을 통해서 소음의 발생현상을 파악하는 것이 가장 중요하며, 그에 따른 적절한 소음대책을 주위여건에 따라 차량 및 궤도에 대해서 고려해야 한다.

따라서 향후, 차륜과 레일에 의해서 발생하는 소음에 대한 발생 원인 규명과 함께 소음저감 대책기술에 대한 연구가 절실히 요구된다. ☺

♣ 참고 문헌

1. M. L. Munjal and M. Heckl, 1982, "Some Mechanisms of Excitation of a Railway Wheel", Journal of Sound of Vibration, Vol.81, No.4, PP 477 ~ 489.
2. M. L. Munjal and M. Heckl, 1982, "Vibration of A Periodic Rail-Sleeper System Excited by an Oscillation Stationary Transverse Force", Journal of Sound of Vibration, Vol.81, No.4, PP 491 ~ 500.
3. Paul, J. Remington, 1988, "Wheel/Rail Rolling Noise What Do We Know? What Don't We Know? Where Do We Go From Here?", Journal of Sound of Vibration, Vol.120, No.2, PP 203 ~ 226.
4. Rudd, M.J., 1976 "Wheel/Rail Noise-Part II: Wheel Squeal", Journal of Sound of Vibration, Vol.46, No.3, PP 381~394.
5. Ver, I. L., C.S. Ventres, and M.M. Myles, 1976, "Wheel/ Rail Noise-Part III: Impact Noise Generation by Wheel and Rail Discontinuities", Journal of Sound of Vibration, Vol.46, No.3, PP 395~417.
6. Paul, J. Remington, 1987, "Wheel/Rail Rolling Noise I: Theoretical Analysis", Journal of Acoustical Society of America, Vol.181, No.6, PP 1805~1823.
7. Paul, J. Remington, 1987, "Wheel/Rail Rolling Noise II: Validation of the Theory", Journal of Acoustical Society of America, Vol.181, No.6, PP 1824~1832.
8. D.J. Thompson, 1996, "Experimental Validation of the TWINS Prediction Program for Rolling Noise, Part I: Description of the Model and Method", Journal of Sound of Vibration, Vol.193, No.1, PP 123~135.
9. D.J. Thompson, P. Fodiman, H. Mahe, 1996, "Experimental Validation of the TWINS Prediction Program for Rolling Noise, Part II: Results", Journal of Sound of Vibration, Vol.193, No.1, PP 123~135.
10. Pieter Dings, Peter van Tol, "Measures to Reduce the Noise of Existing Steel Railway Bridges", WCRR97, P265~269.
11. Mara A. Heckl, I.D. Abrhams, "Curve Squeal of Train Wheels, Part 1: Mathematical Model for its Generation", Journal of Sound of Vibration, Vol.229, No.3, PP 669~693.
12. 김재철, "철도차량의 진동음 예측에 관한 연구-지표면 효과 및 침목에서 방사되는 소음 계산", 한국소음진동공학회, 제13권, 제1호, PP. 56~62.
13. 김재철, "방음차륜의 소음진동 저감효과에 관한 연구", 한국소음진동공학회, 제10권, 제4호, PP. 629~635.