

# 철도차량 곡선부 소음에 대한 발생 메카니즘 규명 관련 연구

## Study on the Curve Squeal Noise of Train Wheels

김관주† · 김범수\* · 박진규\* · 김재철\*\*

Kwanju Kim Beonsoo Kim Jinkyu Park Jaechul Kim

Key Words : Squeal Noise(스킬소음), Wheel(차륜), Stick-slip Model(붙음-미끄러짐 현상), Negative Damping(음(-)의 감쇠)

### ABSTRACT

This paper presents experimental analysis of a friction-driven wheel that is responsible for wheel squeal. Squeal noise generating mechanism and environment of train wheels has been tried to reproduce under laboratory condition. Scale down size rail and wheel are made and influential parameters to squeal noise are measured, e. g. frictional force, pressure between rail and wheel, creep speed of rail. Negative damping characteristic curve are calculated currently. Necessary relating computational analysis is also carried on.

### 1. 서론

스킬소음이란 철도차량이 급격한 곡선을 주행할 때 발생하는 킁킁거리는 소음을 말한다. 스킬소음에 영향을 미치는 변수를 발생 단계별로 구분하여 보면 진동원으로서 차륜과 레일간의 마찰력 특성, 압력 등을 고려하여야 하며, 전달계로는 차륜과 레일의 동적 변수들 예를 들어, 차륜의 뎀핑, 차륜의 공진주파수 등을 고려하여야 한다. 또한 환경적인 요인으로 인한 온도도 중요한 변수이다. 스킬소음에 대한 발생 메카니즘을 파악하기 위한 시도가 계속되었지만 아직 까지도 재현성 있는 정확한 발생 메카니즘을 구현하지는 못하였다.<sup>(1),(2)</sup> 일반적으로 알려진 바와 같이 스킬소음은 곡률 반경을 충분히 크게 함으로서 제거할 수 있다. 그러나 인구 밀집 지역에 불가피하게 많이 설치되어 있는 곡선 철로 구간 운행 시 특정 고주파수 영역에서 집중적으로 발생하는 스킬소음은 환경에 큰 영향을 끼친다.

알려진 철도 차량에서의 스킬소음 발생 원인을 개괄적으로 설명하여보면 다음과 같다. 그림 1에서와 같이 차륜이 곡선 레일을 주행하는 경우 스킬소음은 차륜과 레일의 횡방향 운동(그림 1의  $V_{sy}$  참조)으로써 차륜이 레일 위를 “붙음-미끄러짐 현상”으로 설명하며, 미끄러짐의 단계에서 횡

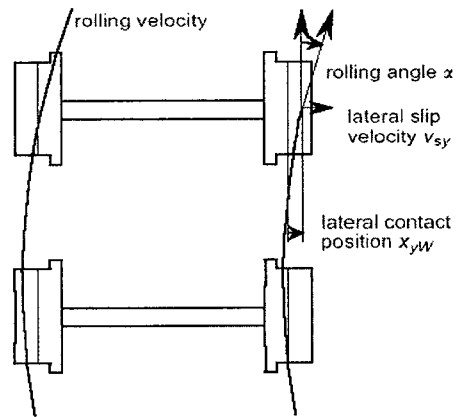


그림 1 철도차량 선회 주행시 앞 차륜에 횡방향 미끄럼 속도  $V_{sy}$ 와 creep 발생

방향 운동 방정식에서 음의 값을 갖는 점성항이 나타나게 되며 이 현상은 차륜 횡방향의 불안정한 운동으로 이어진다. 이 불안정한 현상은 계속 증가하다가 어느 한계 속도에 도달하면 붙음 단계가 되어서 안정한 값을 가지게 된다.

이런 복잡한 스킬현상을 규명하기 위해서, 주행 중인 철도 차륜을 모사한 스킬소음 발생장치를 제작하여 스킬소음에 영향을 미치는 주요한 변수에 대한 실험적인 자료를 수집하였다. 또한 기존에 제시된 이론과 전산 해석을 수행하여 실험을 통해 얻은 자료를 검증하고 총체적인 스킬소음 발생 메카니즘을 규명하고자 한다.

† 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과  
E-mail : kwanju@hongik.ac.kr  
Tel : (02) 336-1435, Fax : (02) 330-1113

\* 홍익대학교 기계공학과

\*\* 한국철도기술연구원

## 2. 스킨 소음관련 해석 이론

스킨소음 발생 현상을 소음원(진동원)-전달계-반응계로 구분해서 생각해 보았다. 첫 번째로 소음원 부분에서는 차륜 횡방향의 마찰력 특성을 차륜의 레일 접촉면에서의 속도의 함수로 구하여야 한다. 대략적인 그림의 형태는 다음 그림 2와 같다.

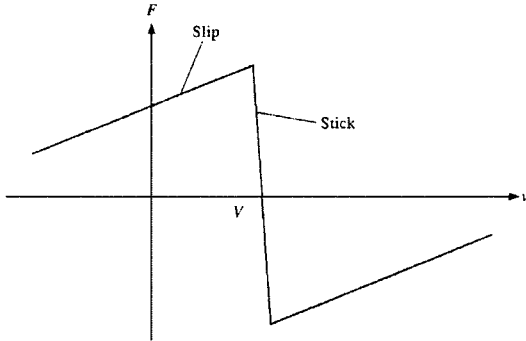


그림 2 마찰력 특성 (F: 마찰력, v: 접촉점에서의 차륜의 속도, V: 차륜의 횡방향 속도)

두 번째로 전달계로 고려해야 할 부분은 임의의 가진에 의한 차륜의 진동 특성이다. 단위충격응답에 대한 차륜내 임의의 횡방향의 변위는 Green 함수로 표현할 수 있다. 일련의 충격응답에 의한 차륜내 임의의 지점에서의 변위 값은 선형시스템으로 가정하여, 다음과 같이 표현된다.<sup>(3),(4)</sup>

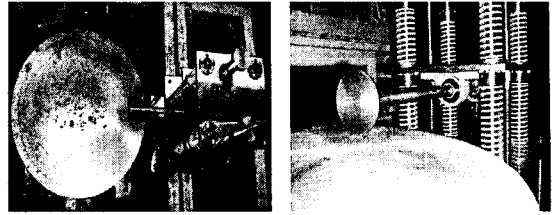
$$w(r, \psi, t) = \int_{t'=0}^t F(t') * G(r, \psi, r', \psi', t-t') dt' \quad (1)$$

윗 식(1)에서  $w$ 는 차륜의 횡방향 변위,  $(r', \psi')$ 는 가진점(차륜이 레일에 접촉하는 점),  $(r, \psi)$ 는 응답을 계산하는 점.  $F$ 는 마찰력,  $G$ 는 Green 함수를 나타낸다.  $t$ 는 임의의 시간,  $t'$ 는 가진이 주어진 시간을 나타낸다. 식(1)의 계산은 손계산에 의한 방법<sup>(3)</sup>, 유한요소법에 의한 방법, 실험에 의한 방법 등으로 구할 수 있으며, 본 논문에서는 스킨소음 발생장치(그림 3 참조)에 장착된 차륜모델에 대한 ANSYS 해석과 PULSE 실험 결과를 비교 검증하였다.

세 번째 반응계에서 고려해야 할 항목은 차륜의 진동에 의한 방사소음에 관한 내용이다. 일반적으로 경계조건을 아는 경우 임의의 위치에서 음압분포를 구하는 내용은 Kirchhoff-Helmholtz 방정식을 지배방정식으로 하는 경계요소법으로 계산할 수 있다. 해결해야 할 항목은 가청주파수 범위내의 차륜의 모든 모드가 스킨소음과 관련되지 않는 현상이다. 이 현상을 설명하기 위해서는 차륜의 강제 진동문제 해결시 음의 댐핑문제를 해결해야 한다.

## 3. 스킨소음 발생장치 모델 및 실험

### 3.1 스킨소음 발생장치 모델



(a) 스킨소음 발생장치 전체 모습

(b) 스킨소음 발생장치 원판레일과 차륜

그림 3 스킨소음 발생장치 모델

스킨소음 발생장치는 그림 3과 같이 원판으로 형상화한 레일 부분과 차륜을 포함한 부분으로 구성되어 있다. 두 부분간의 각도 차이를 주어서 원판 레일과 차륜사이의 구동각(attack angle)을 만든다. 이는 차륜의 횡방향(crabbing) 속도를 발생시킨다. 원판 레일의 축은 벨트로 모터와 연결되어 구동하며 이 운동에 의해서 원판 레일에 접한 차륜도 따라서 회전하게 된다.

스킨소음 발생장치를 작동시켜 보면 원판 레일과 차륜사이에 구동각(attack angle)이 없으면 구름 소음만 발생하지만, 구동각에 변화를 주게 되면 곧바로 스킨소음이 발생한다. 또한 스킨소음과 관련된 변수들을 측정 및 실험할 수 있다. 속도, 하, 표면 거칠기, 차륜에 작용하는 횡방향 마찰력 등이다. 곡선부에서 차량의 앞 차륜과 뒤 차륜의 스킨소음 발생정도는 스킨소음 발생장치의 차륜을 포함한 지그를 시계방향, 반시계방향으로 회전하여 비교해 볼 수 있다.

### 3.2 스킨소음 발생장치의 구동 개형

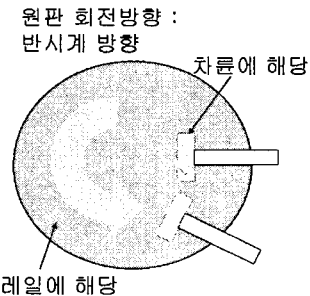


그림 4 스킨소음 발생장치의 구동 개형

스킨소음 발생장치의 구동 개형은 그림 4와 같다. 원판 레일과 차륜의 마찰이 있는 부위가 평행할 때 구동각이 없으며 구름소음만 발생시킨다. 차륜을 포함한 지그를 회전시키면 원판 레일과 차륜사이에 구동각이 생성되고 구름소음

이외의 강력한 스킨소음을 발생시킨다.

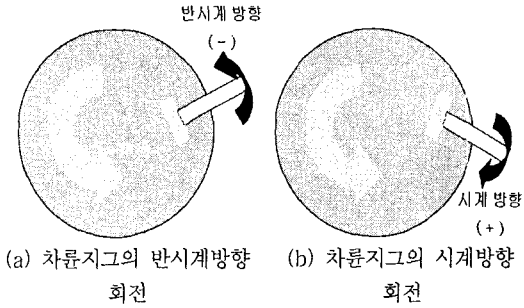


그림 5 휠 지그의 회전과 구동각 생성

### 3.3 스킨소음 발생장치의 실험

스킨소음 발생장치로 음압측정 실험을 하여 구름소음과 스킨소음을 분류하고 스킨소음의 피크(peak)를 발견한다.

실험의 측정 및 분석 장비는 표 1과 같다. 또한 가정주파수 영역에서 측정하였으며, 측정된 음압의 신호에 보정을 하지 않았다.

표 1 측정 장비 제원

측정 및 분석 장비	사 양
Microphone	B&K 4189
Front-End	B&K 3560-B
Sound Calibrator	Rion NC-74
신호분석 프로그램	B&K Pulse Labshop 8.0

#### (1) 주파수 대역의 음압측정 실험

스킨소음의 특정 피크를 발견하기 위해 주파수 대역으로 스킨소음의 개형적인 특징을 분별하였다.

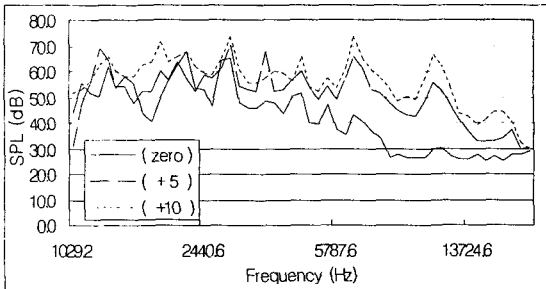


그림 6 구동각에 따른 음압 비교 (1/12옥타브 밴드)

그림 6은 구름소음을 측정하고 이를 기준으로 구동각을 주어 스킨소음을 측정하는 것이다. 1/12옥타브 밴드로 측정 후 구동각에 따른 음압을 비교하기 위해 커브곡선으로 바꾸었다.

주파수 대역의 음압측정 실험으로 스킨소음 발생장치에서 차륜의 횡방향 마찰력 생성은 전 주파수 대역에서 음압의 상승을 야기하였다. 또한 구동각이 커질수록 음압이 상승함을 알 수 있다.

#### (2) 주파수별 구동각에 따른 음압측정 실험

스킨소음의 특정 피크를 발견하기 위한 실험이다. 주파수 별로 구동각에 따른 음압을 측정하고 이를 비교하였다.

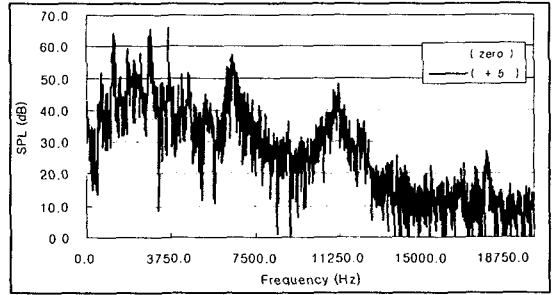


그림 7 구름소음(zero)과 스킨소음(+5°)의 비교

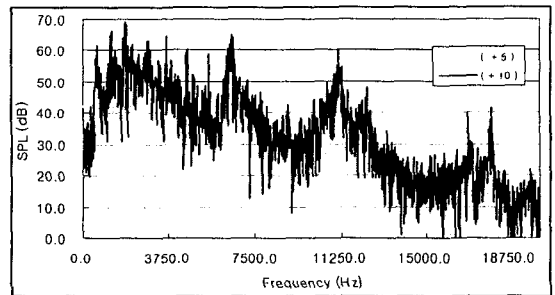


그림 8 구동각에 따른 스킨소음 (+5° vs. +10°)

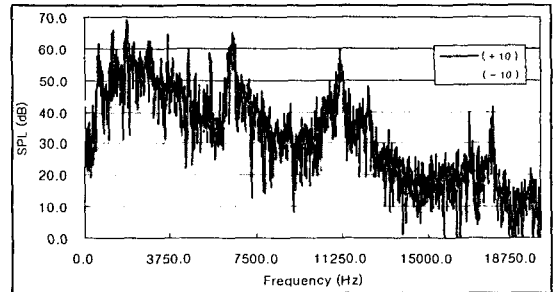


그림 9 구동각에 따른 스킨소음 (+10° vs. -10°)

그림 7은 구름소음과 스킨소음의 사이의 차이를 보여준다. 구름소음에서 과도한 음압의 상승분이 구름소음과는 무관한 스킨소음의 영역이며 이때의 피크가 스킨소음의 특정 공진(resonance)점이다. 그림 8은 구동각에 변화에 따른 음압의 변화를 보여준다. 같은 굽힘 모드를 생성하지만 마찰력의 크기가 음압의 크기에 관련이 있음을 알 수 있다. 그림 9는 차륜을 포함한 지그의 회전 방향에 따른 음압의 차이를 보여준다. 같은 각도의 변화를 주었지만 시계방향으로의 회전에서 음압이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 같은 철도차량에서도 앞 차륜과 뒤 차륜의 소음 방사가 틀림을 보여준다.

표 2 구동각에 따른 스킨소음 피크의 크기

Peak (Hz)	Attack Angle				
	zero	+5°	+10°	-5°	-10°
1st. 3650.0	46.5 (dB)	65.9	64.5	58.2	54.2
2nd. 6550.0	35.2	56.5	63.8	48.8	44.0
3rd. 11137.5	16.4	43.0	60.0	48.9	51.4
4th. 17887.5	11.9	27.1	41.7	23.6	32.0

4. 실험과 차륜의 모드해석과의 비교

표 3 차륜의 재료

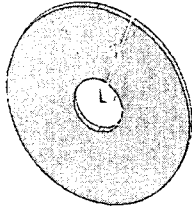
차륜의 형상	소 재	
	Mass Density	8000 kg/m <sup>3</sup>
	Young's modulus(E)	2* 10 <sup>11</sup> Pa
	Poisson's ratio( $\nu$ )	0.3
	outer radius (a)	0.038 m
	inner radius (b)	0.01 m

표 4 실험과 해석의 주파수별 비교

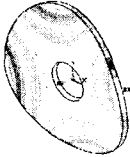
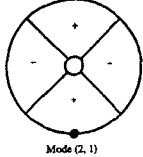
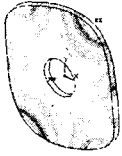
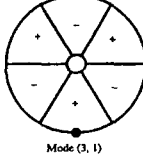
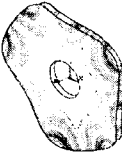
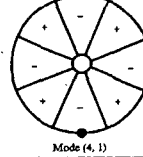
스킬소음 Peak 측정치	Ansys 해석 결과	Heckl and Abrahams 해석 결과
3650.0Hz	 3562.6 Hz	 6341.6 Hz
6550.0Hz	 3655 Hz	 6482 Hz
11137.5 Hz	 10713 Hz	 10980 Hz

표 3은 해석할 차륜의 재료이다. 차륜의 내경은 고정 (clamped)하였으며 이를 제외한 경계에는 구속을 주지 않았다. 표 4는 실험에서 구한 피크 값과 모드해석의 결과 값을 주파수별로 비교하였다. 3650.0 Hz 에서는 Heckl 해석의 모드형상 (2,1)에 해당하며 6550.0 Hz 에서는 모드형상 (3,1)에 해당한다. 또한 11137.5 Hz 에서는 모드형상 (4,1)에 해당한다. 그러나 4번째 피크는 상대적으로 음압이 20 dB 정도 작으므로 스킨소음과는 무관하다고 판단하였다. 비교적 근접한 영역에서 굽힘 모드를 발견하였고 스킨소음원이 되는 모드를 분별할 수 있었다.

5. 결론

현재 스킨소음 저감 대책으로 도유기와 방음차륜 등 여러 가지 방안들이 나오고 있지만 뛰어난 효과를 발휘하지 못하고 있다. 특히 고속화되고 있는 철도에서, KTX와 같은 고속 전철의 기존선 구간 운행 시 스킨 소음의 발생 가능성이 높기 때문에 근본적인 스킨소음 저감 대책이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 이론을 바탕으로 스킨소음 발생장치를 제작, 실험과 해석을 통해 스킨소음의 발생 메커니즘을 확인하였다. 스킨소음의 발생의 근본적 원인으로는 곡선구간에서 차륜의 횡방향 마찰력의 작용으로 불안정한 굽힘 모드를 생성하는데 이때 효과적인 댐핑이 이뤄지지 않고 있기 때문이다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 횡방향 마찰력의 감소, 음의 감쇠가 없는 차륜 혹은 레일의 재질개선, 스킨소음 발생의 굽힘 모드 생성 억제 등을 고려해 볼 수 있다.

향 후, 스킨소음 발생의 변수들 간의 상관성을 밝혀 스킨소음의 발생 메커니즘을 규명하고 스킨소음 방사 해석을 통한 스킨소음 저감 대책을 마련할 계획이다.

참 고 문 헌

- (1) 김재철 등, 2000, "방음차륜의 소음진동 저감효과에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, Vol 10, No. 4, pp. 629~635.
- (2) 문경호 등, 2003, "지하철 스킨소음에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 6권, 3호, pp. 209~214.
- (3) Maria A. Heckl, 1999, Curve Squeal of Train Wheels, Part 2: Which Wheel Modes are Prone to Squeal?, Journal of Sound and Vibration, Vol. 229(3), pp. 669~693.
- (4) Maria A. Heckl, and I. D. Abrahams., 1999, Curve Squeal of Train Wheels, Part 1: Mathematical Model for Its Generation, Journal of Sound and Vibration, Vol. 229(3), pp. 695~707.