

지하철 스킨소음에 관한 연구

A Study on the Squeal Noise for Subway

문경호¹, 유원희², 김재철³

Kyeong-Ho Moon, Won-Hee You, Jae-Chul Kim

Keywords : Squeal noise(스킨소음), Subway(지하철), Rail Lubricator(레일 도유기)**Abstract**

When a rail vehicle transverses tight curves, it often emits an intense, high-pitched squeal. This squeal has always been noticed as one of the most disturbing noise sources of railway systems. At present, we cannot predict squeal noise that is influenced by a large number of dependent parameters. In this study, we performed structural analysis to find out the frequency of the wheel and measured squeal noise at Seoul subway. We also tested reduction effectiveness of squeal noise through rail lubricator.

1. 서 론

철도차량이 급격한 곡선을 주행할 때 발생하는 킁킁 거리는 소음을 스킨소음이라 한다. 이 스킨소음은 사람의 귀에 가장 민감한 주파수를 내는 순음이기 때문에 매우 거슬리며 더구나 사람이 밀접한 지역인 지하철에서 자주 발생하여 문제시 되고 있다.[1][2] 이러한 스킨소음은 곡률반경을 충분히 크게 함으로서 제거할 수 있지만 지하철노선은 현존하는 도로의 지하 또는 고가에 건설되므로 곡률반경을 크게해서 건설하기에는 한계가 있다. 스킨소음을 줄이기 위해서 많은 방법[3]이 적용되었고 스킨소음에 대한 발생 메카니즘을 파악하기 위한 시도도 계속되었지만 아직까지도 정확하게 발생메카니즘을 규명하지 못하였다. 그렇지만 발생메카니즘으로 일반적으로 받아들여지고 있는 이론은 Rudd[4]에 의해서 제시된 것으로 Rudd는 차륜스킨 메카니즘으로 다음의 세가지 모델을 제시하였다.

- i) 일체차축에서 안쪽/바깥쪽 차륜 사이의 슬립 차이
- ii) 레일에 대한 플랜지 마모
- iii) 차륜이 레일상부를 가로지르는 스틱-슬립 현상

여기서 Rudd는 세 번째 모델인 차륜이 레일 상부를 횡방향으로 미끄러지다가 고착되는 스틱-슬립 현상에 의해서 스킨소음이 발생하는 것이 가장 우세한 요인으로 보았다.

스킨소음은 여러 가지 변수에 의해서 발생한다. 스킨소음에 영향을 미치는 변수를 보면, 차륜뎀핑, 운행 속도, 곡선반경, 차륜의 공진주파수, 레일의 구조, 기타 변수(상대습도, 온도 및 먼지)로 구분할 수 있다. 차륜의 뎀핑을 증가시킴으로서 스틱-슬립 현상을 줄일 수 있고 운행속도는 곡률반경 및 차륜의 하중에 대한 변수로서 슬립 발생과 관련하여 스킨소음에 영향을 준다. 레일 주행표면의 조도는 스틱-슬립 곡선과 경계조건에서의 고유함수(eigenfunction)에 영향을 준다. 그리고 상대습도, 온도 및 먼지 등도 마찰특성에 영향을 주는 요인이다.

본 연구에서는 수치해석을 통하여 차륜의 모우드별 주파수를 파악하고 실차시험을 통한 스킨주파수와 비교하였다. 또한 레일 도유기를 사용하였을 때 스킨소음이 어느정도 효과가 있는지 알아보려고 하였다.

¹ 정회원, 한국철도기술연구원 차량기계연구본부, 주임연구원

² 정회원, 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, 책임연구원

³ 정회원, 한국철도기술연구원 차량기계연구본부, 선임연구원

실험을 한 결과, 스킨소음의 주파수는 차륜의 차축방향 모우드와 일치하는 것으로 나타났으며 이것은 스킨소음을 줄이기 위해서 차륜의 방사소음[5][6]을 줄이는 것이 효과적임을 알 수 있었고, 레일 도유기 사용 전·후를 비교한 결과에서는 레일상부 도유방식이 스킨소음 저감에 효과가 있는 것으로 나타났다.

2. 차륜의 수치해석

2.1 차륜의 해석모델

차륜의 모델은 디스크가 축에 장착되어있지 않는 윤축을 해석대상으로 하였다. 그림 1은 해석에 사용된 유한요소모델로써 8절점 Solid Element(CHEXA)를 사용하였으며, 해석 모델의 요소수는 12,528개와 절점수 14,257개로 구성되어있다. 해석에서 사용된 물성치는 표 1과 같다.

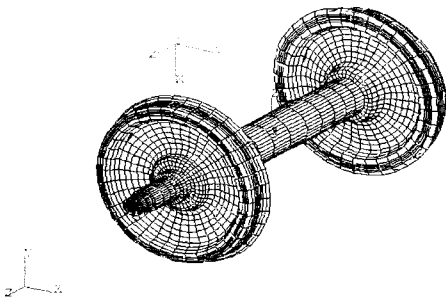


Fig. 1 Analysis model of wheel set

Table 1. Physical property of wheel set

종류	윤축
탄성계수(E) (N/mm ²)	210,000
프아송비(ν)	0.3
밀도(ρ) (kg/mm ³)	7.850E-6

2.2 차륜의 해석 결과

차륜의 모드를 해석한 결과, 차륜의 반경방향인 방사방향과 차륜의 수직방향인 차축방향에 대한 고유진동수는 표 2와 같다.

모드해석결과로부터 방사방향은 약2000Hz이상의

영역에서 모드가 발생하고 차축방향의 모드에 대한 주파수는 방사방향보다 낮은 주파수 영역에서 나타나고 있음을 알 수 있었다. 차륜의 차축방향에 대한 모드해석 결과 중 일부분을 그림 2~3에 나타냈다.

Table 2 Natural frequency of wheel set

차축방향(Hz)	방사방향(Hz)
474	1983
1199	2633
2122	3376
3142	4234
4197	

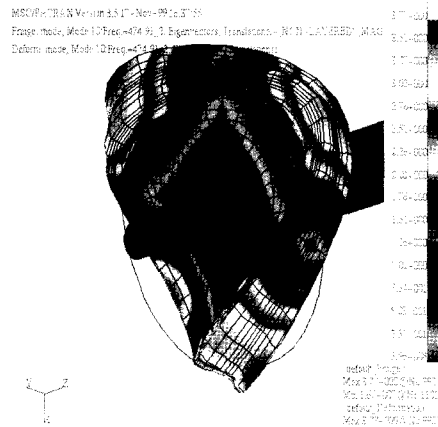


Fig. 2 Result of modal analysis (474Hz)

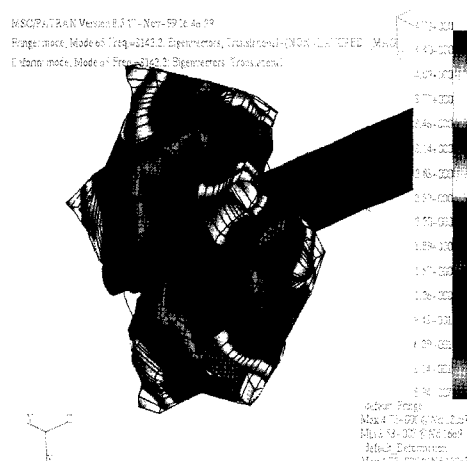


Fig. 3 Result of modal analysis (3142Hz)

3. 스킨소음 측정

3.1 측정 개요

곡선부 소음 측정은 곡선반경이 작고 소음이 심한 구간을 중심으로 측정하였다. 1호선의 경우 시청-종각(R=140), 2호선은 서초-방배(R=200), 4호선은 당고개-상계(R=180)를 측정구간으로 하였으며 측정에 사용된 장비는 표 3과 같다. 측정위치는 그림 4와 같이 곡선의 중앙 부근에서 측정하였고 마이크로폰 측정 높이는 레일바닥에서 0.7m, 지상구간은 레일에서 1.3m, 지하구간은 레일에서 1.5m 거리에서 측정하였다. 도유기 시험의 경우, 레일 측면을 분사하는 방식(그림 5)은 서초-방배구간에서 측정하였고 레일상부 도유방식(그림 6)은 당고개-상계 구간에서 측정하였다.

Table 3 Used equipment to measure

측정 및 분석 장비	사 양
Microphone	B&K 4189
Preamplifier	B&K 2671
Tape Recorder	SONY SIR1000
Power Supply	IV60 6-channel ICP Supply
신호분석시스템	LMS CADA-X

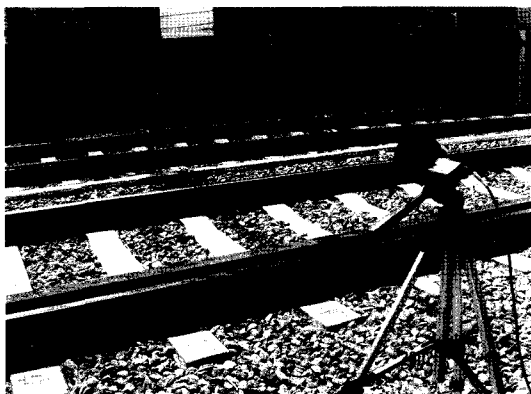


Fig. 4 Measured position of squeal noise



Fig. 5 Rail lubricator(side of rail)

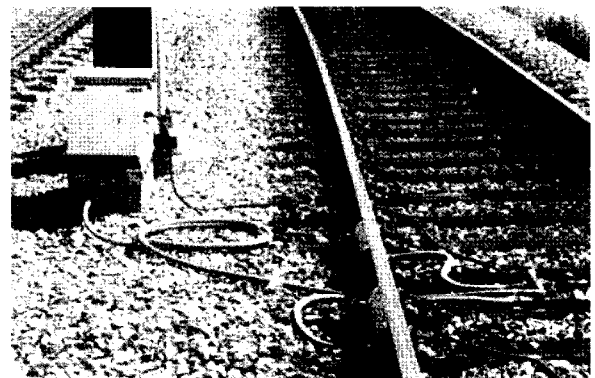


Fig. 6 Rail lubricator(top of rail)

3.2 측정 결과

3.2.1 소음수준 및 주파수 분석 결과

현 서울지하철 운행구간에서 가장 곡선반경이 급격한 곳은 시청-종각 구간(R=140)이며 이 곡선구간에서의 통과소음수준을 측정한 결과는 그림 7과 같다. 대체적으로 통과시간이 짧을 수록(즉, 속도가 빠를수록) 등가소음수준도 커지고 있다. 그림 8은 주파수 분석을 한 그림으로 대략 500Hz, 2100Hz, 3100Hz, 4200Hz 부근의 주파수가 크게 나타나고 있었다. 이는 차륜의 차축방향 모드와 일치하며 이로인하여 곡선부 소음은 스틱-슬립에 의해서 나타난 가진력이 차륜을 공진시켜서 나타나는 현상임을 알 수 있다.

시청-종각 구간은 지하구간이므로 터널에서 반사되는 소음으로 인하여 곡선통과시 진행방향 좌측과 우측(또는 곡선반경을 기준으로 안쪽을 내측, 바깥쪽을 외측)의 소음 중 어느 쪽이 큰가를 비교할 수 없었다.

진행방향 좌·우측 소음을 비교하기 위해서 지상구간에서 시험을 하였으며 곡선반경이 큰 당고개-상계구간(R=180)에서 측정하였다. 그림 9는 내측레일과 외측레일에 대한 소음수준을 나타낸 것으로 원심력에 의해서 외측레일쪽의 소음이 클 것으로 예상되었으나 측정결과, 별다른 차이는 없는 것으로 나타났다. 그림 10은 상계→당고개(상선)로 진행할 때 통과소음, 그림 11은 당고개→상계(하선)로 진행할 때의 통과소음을 측정한 결과이며 그림 12~13은 각각에 대해서 주파수 분석을 한 결과이다. 그림 10(상선)과 그림 11(하선)을 비교했을 때, 소음수준이 낮은 그림 11는 열차가 통과할 때 나타나는 전동음이 뚜렷하게 나타난 반면에 스켈소음이 크게 나타난 그림 10은 전동음이 스켈소음에 묻히게 되어 전동음이 뚜렷하지 않았다. 주파수 분석을 한 결과도 상선의 경우에서 스켈주파수가 뚜렷하게 나타나고 있었다.

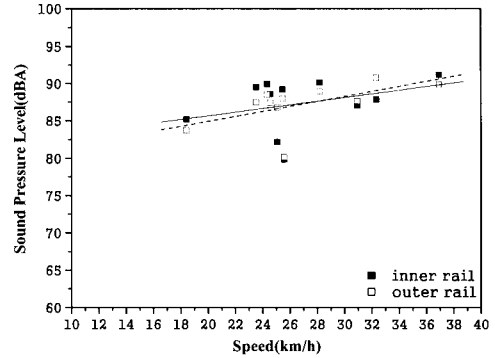


Fig. 9 Comparison of inner rail with outer rail

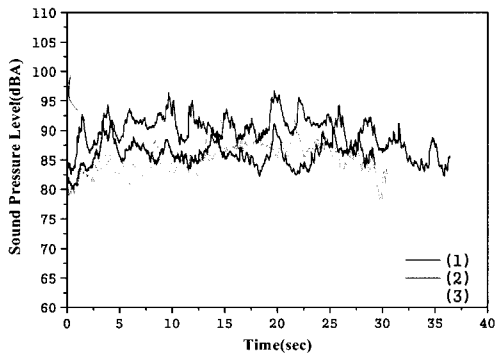


Fig. 7 Level of squeal noise between City Hall and Jonggak

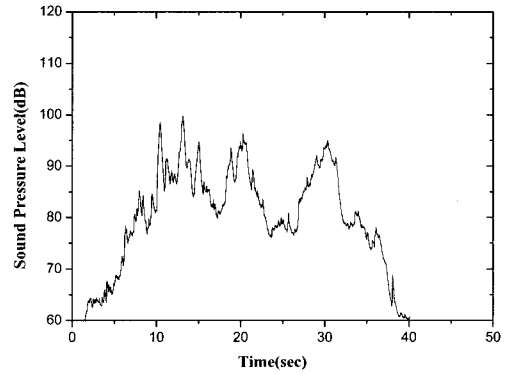


Fig. 10 Level of squeal noise between Sanggye and Dangdogae(upward)

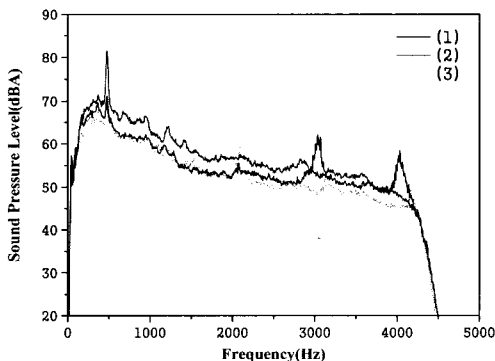


Fig. 8 Frequency of squeal noise between City Hall and Jonggak

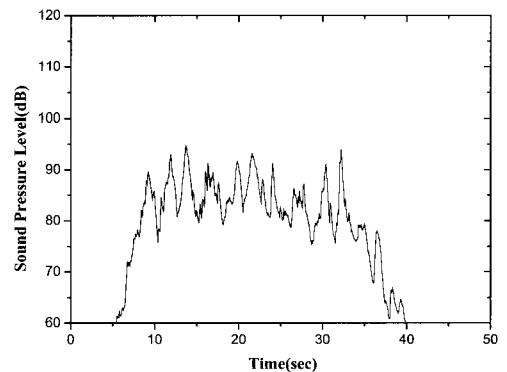


Fig. 11 Level of squeal noise between Dangdogae and Sanggye(downward)

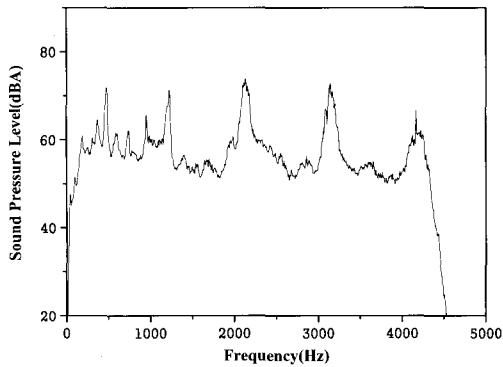


Fig. 12 Frequency of squeal noise between Sanggye and Danggogae(upward)

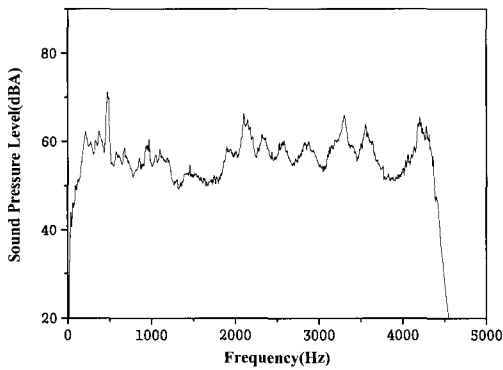


Fig. 13 Frequency of squeal noise between Danggogae and Sanggye(downward)

3.2.2 레일 도유기 효과

레일도유기 사용에 대한 소음저감 효과는 현재 보통으로 사용하고 있는 레일도유기인 레일 측면에 분사하는 방식과 이번에 적용된 레일상부 분사방식의 도유기에 대하여 비교하였다.

그림 14는 레일측면에 분사하는 방식의 도유기를 적용한 것으로 서초-방배 구간에서 측정한 결과이다. 측정결과를 보면, 도유기의 가동전과 후의 소음수준은 별다른 차이가 없는 것으로 보인다. 따라서 레일 측면 분사방식은 레일마모를 줄이는 효과는 있어도 소음저감에는 큰 효과를 보기가 힘든 것으로 보인다.

레일상부에 도유하는 방식은 상계-당고개 구간에서 측정한 결과로 그림 15~16과 같다. 그림 15는 차량

종류를 구분하지 않고 통과하는 모든 차량에 대한 소음수준을 도유기 설치 전과 후를 비교한 것으로, 몇몇 소음이 큰 열차를 제외하면 설치 후가 소음수준이 낮은 것으로 나타나고 있다. 그림 16은 도유기가 설치된 상선과 설치되지 않은 하선에 대한 통과시 소음수준을 비교한 결과이다. 상계에서 당고개로 갔다가 다시 내려오는 차량을 측정된 것으로 차량의 조건은 비교적 균일하다고 볼 수 있고 이 결과로 인하여 레일상부에 도유하는 도유기의 경우는 소음저감에 효과가 있는 것으로 판단된다.

그림 17은 레일 상부에 분사하는 방식의 도유기에 대한 마찰특성을 알아보기로 설치전의 레일상부 및 측면의 마찰계수와 설치후의 레일상부의 마찰계수를 측정한 것이다[7]. 측정결과, 설치전의 평균마찰계수는 레일상부 0.49, 레일측면 0.21이며 설치 후 레일상부의 마찰계수는 0.37로서 도유기 적용시에 가속 및 제동에 악영향을 미치지 않을 것으로 보인다[8].

레일측면 도유기보다 레일상부 도유기를 적용하였을 때 소음저감효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 스킨소음은 레일과 차륜 플랜지의 접촉에 의한 소음보다 차륜이 레일 상부를 가로지르는 스틱-슬립 현상으로 인한 소음이 우세하다는 것을 알 수 있었다.

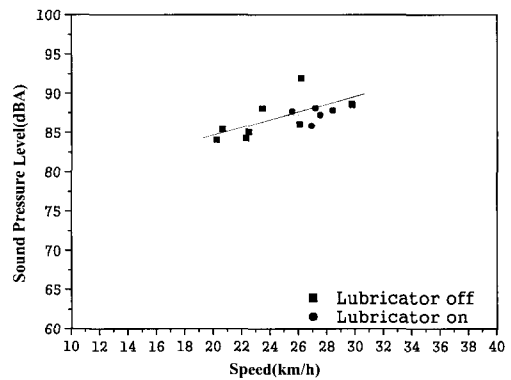


Fig. 14 Reduction effectiveness of noise (side of rail)

4. 결 론

지하철 곡선부에서 발생하는 스켈소음을 측정된 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스켈소음의 주파수는 차륜의 차축방향 고유진동수와 일치함을 알 수 있었고 이로 인하여 곡선부 소음은 스택-슬립에 의해서 나타난 횡방향 가진력이 차륜을 공진시켜서 나타나는 현상임을 알 수 있었다.

(2) 속도가 커질수록 소음수준도 커지고 있으며 이상구간의 경우에 열차 통과시 뚜렷하게 나타나는 전동음은 스켈소음에 묻히어 잘 나타나지 않음을 알 수 있었다.

(3) 레일도유기를 사용한 결과, 레일 측면 분사방식의 경우 저감효과가 미미하였으나 레일상부 도유방식은 스켈소음 저감효과가 있는 것으로 판단된다. 따라서 스켈소음은 플랜지 마모보다 차륜이 레일상부를 횡방향으로 가로지르면서 발생하는 소음이 우세하다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 서울지하철공사의 협조로 이루어졌으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. J. M. Van Ruiten, 1988, Mechanism of Squeal Noise Generated by Trams, J.Sound.Vib, 120(2), pp245-253.
2. C.M.Kootwijk-Damman, 1996, Industrial Noise in Railway Yard: The Problem of Squeal Noise, J.Sound.Vib, 46(3), pp451-452.
3. James T. Nelson, 1997, Wheel/Rail Noise Control Manual, National Academy Press, pp35~64, pp105~124
4. M.J.Rudd, 1976, Whell/Rail Noise-Part II: Wheel Squeal, J.Sound.Vib, 46(3), pp381-394.
5. 김재철 외 4명, 2000, 차륜/레일의 전동음 저감방안 연구, 한국철도기술연구원 KRRRI 연구 00-42, pp44~78
6. 김재철 외 2명, 2000, 방음차륜의 소음진동 저감효과에 관한 연구, 한국소음진동공학회, 제10권 제4호 2000, pp629~635
7. Marco Santoro, 2002, Noise and Friction Report KELTRACK Tracksides Transit, Kelsan Technologies Corporation, pp1~14
8. V.A.Profillidis, 1995, Railway Engineering, Avebury Technical, pp228~229

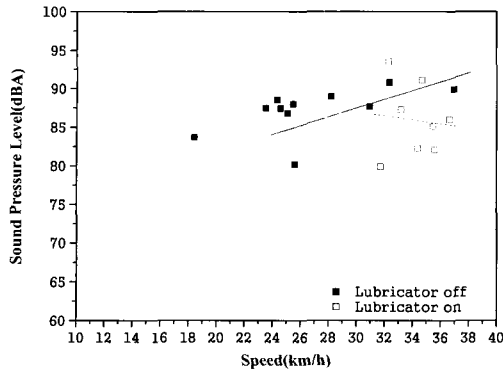


Fig. 15 Reduction effectiveness of noise(1) (top of rail)

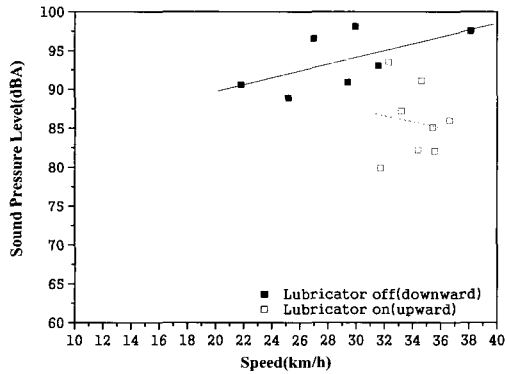


Fig. 16 Reduction effectiveness of noise(2) (top of rail)

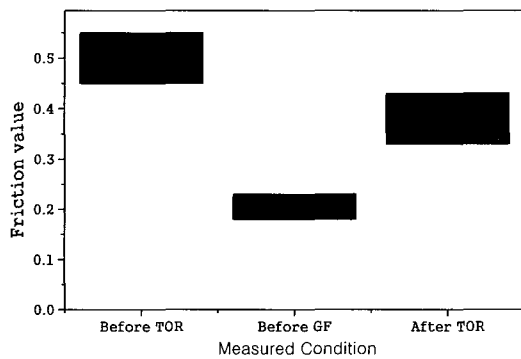


Fig. 17 Comparison of friction value