

국내 전동차 스킨소음에 관한 연구

A Study on the Squeal Noise for Domestic EMU

문경호* 김재철** 유원희*** 서정원*
Moon Kyeong-Ho Kim Jae-Chul, You Won-Hee, Seo Jung-Won

ABSTRACT

Squeal noise is generated by railway vehicles transversing tight curves. This squeal has always been noticed as one of the most disturbing noise sources of railway systems. At present we cannot predicted 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 also measured squeal noise at Seoul subway line 1, line 2, line 4 for domestic EMU(Electrical Multiple Unit).

1. 서 론

철도차량이 급격한 곡선을 주행할 때 발생하는 스킨소음은 철도소음에서 가장 거슬리는 소음원의 하나로서 인식되어 왔다. 이러한 스킨소음은 곡률반경을 충분히 크게 함으로서 제거할 수 있다. 그러나 지하철노선은 현존하는 도로의 지하 또는 고가에 건설되므로 곡률반경을 크게해서 건설하기에는 한계가 있다. 스킨소음을 줄이기 위해서 많은 방법이 적용되었고 스킨소음에 대한 발생 메카니즘을 파악하기 위한 시도도 계속되었지만 아직까지도 정확하게 발생메카니즘을 규명하지 못하였다. 그렇지만 발생메카니즘으로 일반적으로 받아들여지고 있는 이론은 Rudd에 의해서 제시된 것으로 Rudd는 차륜스킨 메카니즘으로 다음이 세가지를 모델을 제시하였고

- i) 일체차축에서 안쪽과 바깥쪽 차륜사이의 미끄럼 차이
- ii) 레일에 대한 프렌지 마모
- iii) 차륜이 레일 상부를 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, 차륜댐핑, 운행속도, 곡선반경, 차륜의 주파수, 레일의 구조, 기타 변수(상대습도, 온도 및 먼지)로 구분할 수 있다. 차륜의 댐핑을 증가시킴으로써 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,

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 주임연구원
** 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원
*** 한국철도기술연구원 차량연구본부 책임연구원

온도 및 먼지 등도 마찰특성에 영향을 주는 요인이다.

본 연구에서는 수치해석을 통하여 차륜의 모우드별 주파수를 파악하고 실차시험을 통한 스컬주파수와 비교하였다. 비교결과 스컬소음의 주파수는 차륜의 차축방향 모우드와 일치하는 것을 알 수 있었으며 스컬소음을 줄이기 위해서는 소음원을 줄일 수 없다면 차륜의 방사소음을 줄이는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

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.

표 1. 차륜모델의 물성치

종류	윤축
탄성계수(E) (N/mm ²)	210,000
프아송비(ν)	0.3
밀도(ρ) (kg/mm ³)	7850E-9
비고	

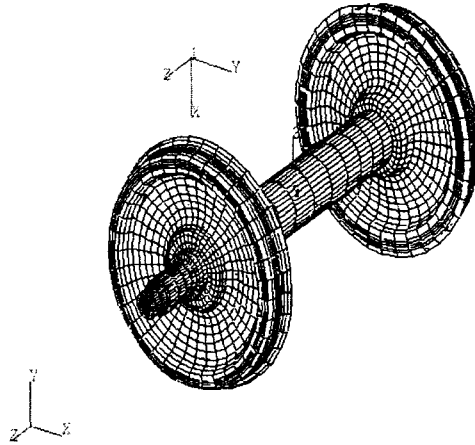


그림 1. 차륜의 수치해석 모델

2.2 차륜의 해석 결과

차륜의 모드를 해석한 결과 중 일부분을 그림 5~6에 나타냈다. 이 결과에서 차륜의 모드형상은 표 2에서와 같이 차축방향과 방사방향으로 나누어서 관찰할 수 있다.

표 2. 차륜의 방향별 모드에 대한 주파수

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

모드해석결과로부터 방사방향은 약2000Hz이상의 영역에서 모드가 발생하고 차측방향의 모드에 대한 주파수는 방사방향보다 낮은 주파수 영역에서 나타나고 있음을 알 수 있었다. 따라서 저주파 영역에서는 차측방향에 대한 모드의 영향이 크고, 고주파 영역에서는 차측방향과 방사방향에 대한 모드를 모두 고려해야 할 것으로 판단된다. 그렇지만 곡선부에서 문제시되는 스킵소음의 경우, 스틱-슬립현상에 의해서 발생하기 때문에 차측방향에 대한 모드가 주로 영향을 미칠 것으로 판단된다.

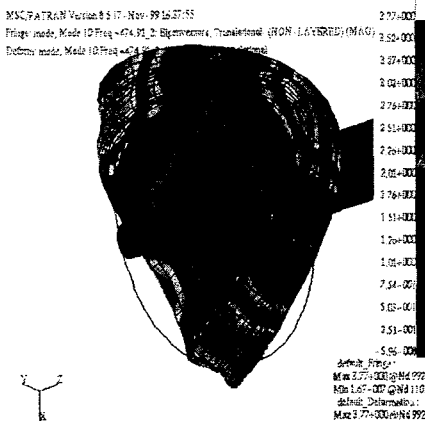


그림 2. 차륜의 모드해석결과 (474Hz)

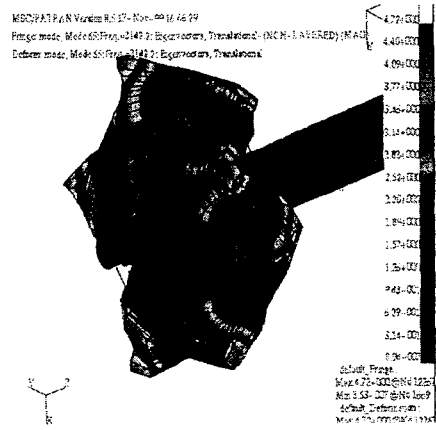


그림 3. 차륜의 모드해석결과 (3142Hz)

3. 스킵소음 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-상개(R=180)를 측정구간으로 하였으며 측정에 사용된 장비는 표 3과 같다. 측정위치는 그림과 같으며 높이는 레일바닥에서 0.7m이며 지상구간은 레일에서 1.3m, 지하구간은 레일에서 1.5m 거리에서 측정하였다.

표 3. 측정에 사용된 장비

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

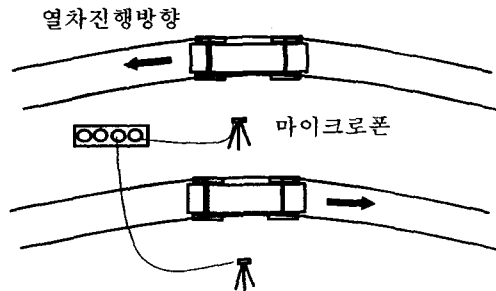


그림 4. 측정 위치

3.2 측정 결과

현 서울지하철 운행구간에서 가장 곡선반경이 급격한 곳은 시청-종각 구간(R=140)이며 이 곡선 구간에서의 통과소음수준을 측정된 결과는 그림 5~6과 같다. 대체적으로 통과시간이 짧을 수록 (즉, 속도가 빠를수록) 등가소음수준도 커지고 있다. 그림 7~8은 주파수 분석을 한 그림으로 대략 500Hz, 1200Hz, 2100Hz, 3100Hz, 4200Hz 부근의 주파수가 크게 나타나고 있었다. 이는 차륜의 차 축방향 모드와 일치한다. 이로인하여 곡선부 소음은 스틱-슬립에 의해서 나타난 가진력이 차륜을 공진시켜서 나타나는 현상임을 알 수 있다.

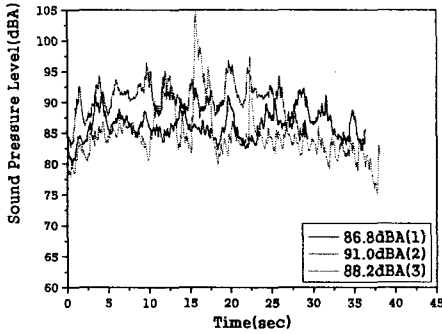


그림 5. 시청-종각 통과소음 수준(1)

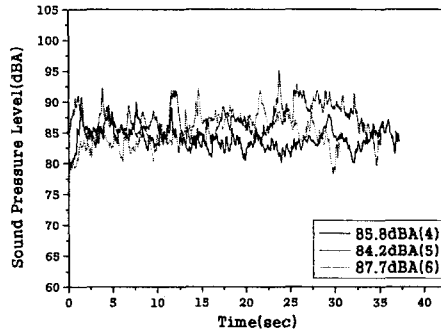


그림 6. 시청-종각 통과소음 수준(2)

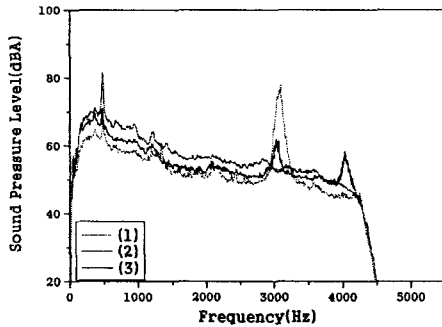


그림 7. 시청-종각 통과소음 주파수분석(1)

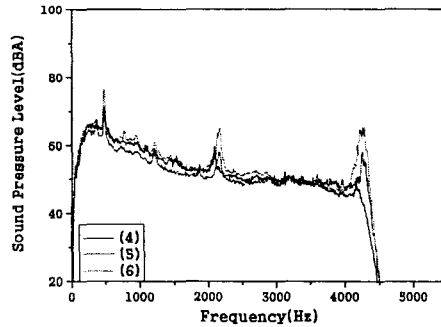


그림 8. 시청-종각 통과소음 주파수분석(2)

시청-종각 구간은 지하구간이므로 터널에서 반사되는 소음으로 인하여 곡선통과시 진행방향 좌측과 우측의 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 상계→당고개(상행)로 진행할 때 통과소음을 측정된 결과이며 그림 10은 당고개→상계(하행)로 진행할 때의 결과이다. 그림 11~12는 각각에 대해서 주파수 분석을 한 결과이다. 곡선반경을 기준으로 안쪽을 내측, 바깥쪽을 외측이라 했을 때 내측의 소음이 외측보다 크게 나타나고 있었다. 그림 9(상행)와 그림 10(하행)을 비교했을 때, 소음수준이 낮은 그림 10은 열차가 통과할 때 나타나는 진동음이 뚜렷하게 나타난 반면에 스켈소음이 크게 나타난 그림 9는 진동음이 스켈소음에 묻히게 되어 진동음이 뚜렷하지 않았다. 주파수 분석을 한 결과도 상행의 경우, 스켈주파수가 뚜렷하게 나타나고 있었다. 그림 13과 14는 속도별 소음수준을 비교한 그림으로 속도가 커질수록 소음수준도 올라가고 있었다. 속도가 낮을 때는 내측소음이 컸으나 속도가 높아질수록 내측에 비

해서 외측 소음이 커지고 있다. 이 결과에 기인하여 운행속도가 낮을 때는 캔트의 영향에 의해서 내측 소음이 커지지만 운행속도가 올라가면 원심력에 의해서 외측소음이 올라감을 알 수 있다.

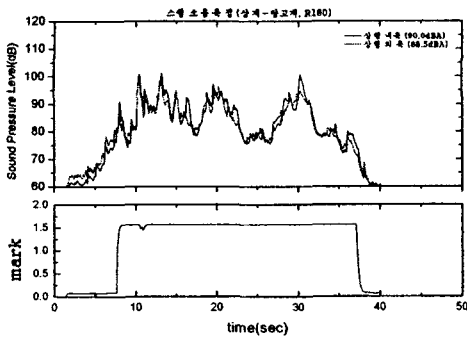


그림 9. 당고개-상계 통과소음 수준(상행)

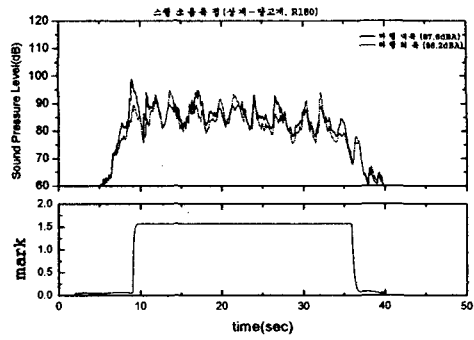


그림 10. 당고개-상계 통과소음 수준(하행)

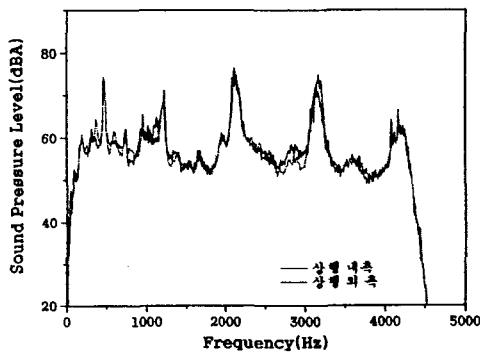


그림 11. 당고개-상계 통과소음 주파수분석(상행)

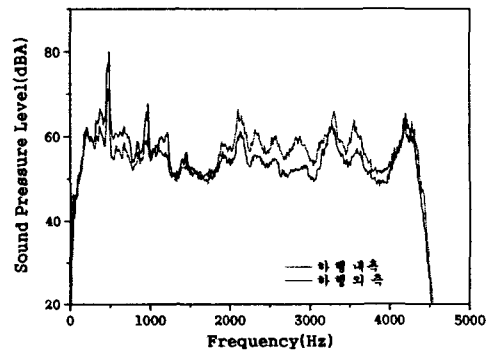


그림 12. 당고개-상계 통과소음 주파수분석(하행)

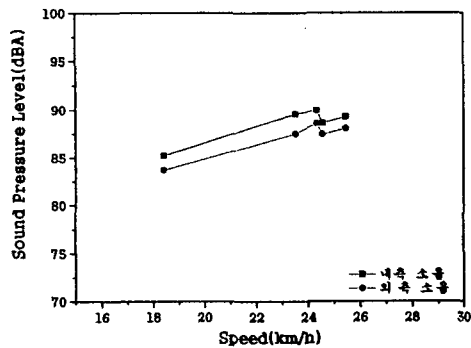


그림 13. 당고개-상계 속도별 소음수준(상행)

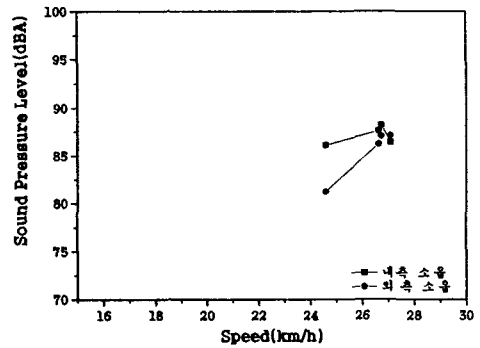


그림 14. 당고개-상계 속도별 소음수준(하행)

5. 결론

국내 전동차에 대한 곡선부 스켈소음을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

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

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

(3) 속도가 낮을 때는 내측소음이 컸으나 속도가 높아질수록 외측 소음이 커지고 있다. 이 결과에 기인하여 운행속도가 낮을 때는 캔트의 영향에 의해서 내측 소음이 커지지만 운행속도가 올라가면 원심력에 의해서 외측소음이 올라감을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김재철 외 4명, 2000, 차륜/레일의 전동음 저감방안 연구, 한국철도기술연구원 KRRI 연구 00-42, pp44~78
2. 김재철 외 2명, 2000, 방음차륜의 소음진동 저감효과에 관한 연구, 한국소음진동공학회, 제10권 제4호 2000, pp629~635
3. M.J.Rudd, 1976, Whell/Rail Noise-Part II: Wheel Squeal, J.Sound.Vib, 46(3), pp381-394.
4. James T. Nelson, 1997, Wheel/Rail Noise Control Manual, National Academy Press, pp35~64, pp105~124
5. E.J.M.Hiensch, Two-Material Rail Development to Prevent Rolling Contact Fatigue and to Reduce Noise Levels in Curved Rail Track, INFRA-STAR project
6. C.M.Kootwijk-Damman, 1996, Industrial Noise in Railway Yard: The Problem of Squeal Noise, J.Sound.Vib, 46(3), pp451-452.