

◆ 특집 ◆ 철도차량의 주행안정성 향상 기술

철도차량의 곡선부 스킵 소음에 대한 속도의 영향

Influence of the Speeds on the Curve Squeal Noise of Railway Vehicles

이찬우^{1,✉}, 김재철¹Chan Woo Lee^{1,✉} and Jae Chul Kim¹

1 한국철도기술연구원 차량궤도연구실 (Vehicle-Track Research Department, Korea Railroad Research Institute)

✉ Corresponding author: cwlee@krrri.re.kr, Tel: 031-460-5204

Manuscript received: 2011.3.24 / Accepted: 2011.4.5

Curve squealing of inter-city railway vehicle is a noise with high acoustic pressure and rather narrow frequency spectra. This noise turns out to be very annoying for the people living in the neighborhood of locations and the passenger in railway vehicle where this phenomenon occurs. Squealing is caused by a self-excited stick-slip oscillation in the wheel-rail contact. Curve squeal noise of railway vehicles that passed by a factor of the speed limit, so to overcome in order to improve running performance is one of the largest technology. In the present paper, characteristic of squeal noise behavior at the Hanvit-200 tilting train test-site. Curve squealing of railway wheels/rail contact occurs in R400~ R800 curves with a frequency range of about 4~11kHz. If the curve is less than the radius of wheel/rail contact due to |left-right| noise level difference (dBA) shows a significant effect of squeal noise were more likely.

Key Words: Curve Squeal Noise (곡선 스킵 소음), Wheel-rail Contact (차륜-레일 접촉), Wheel Radiation Noise (차륜방사소음), Hanvit-200 Tilting Trains (한빛-200 틸팅 열차)

1. 서론

철도차량의 주행 성능은 크게 직선 주행 성능과 곡선 주행 성능으로 분류할 수 있다. 바퀴식 철도차량의 경우 차륜-레일 접촉(wheel-rail contact)은 차륜이 레일 위를 구르면서 주행하기 때문에 필연적으로 발생하게 된다. 주행 중 차륜-레일 접촉에 의한 경계 문제는 상호 메커니즘 변화에 따른 매우 복잡한 특성을 유발하게 된다. 우선적으로 차륜-레일 접촉에 의한 차륜/레일 마모, 피로 그리고 손상 문제가 발생하게 된다. 또한 차륜-레일 접촉에 의해 소음/진동 문제는 차량 이용객의 쾌적성과 안전성에 큰 영향을 주게 된다. 철도차량이 레일 위를 구르면서 발생하는 전동소음

(rolling noise)은 차량 속도가 증가함에 따라 함께 증가하는 특성을 가지고 있다. 그러나 철도차량이 곡선부를 주행할 시 휠셋(wheel sets)에 작용하는 수직 하중력 대 횡하중력의 비로 대표하는 탈선계수와 차륜-레일 접촉에 의한 차륜방사소음(wheel radiation noise) 크기가 곡선주행성능에 대한 중요한 평가 항목 중의 하나이다. 철도차량의 탈선계수관련 연구는 철도차량의 안전성 평가 및 주행성능평가를 위해 많은 연구들이 진행되어 왔는데, 최근에는 철도차량의 탈선계수와 궤도선형간의 상관관계와 같은 차량-궤도 인터페이스 측면에서 접근한 철도차량의 안전성 평가연구를 실시하고 있다.¹

철도차량의 곡선 주행 성능에 평가에 큰 영향

을 미치는 고정축거(wheel base)관련 연구에서는 고정축거를 크게 하는 경우 차량의 주행안전성은 좋아지는 반면 기하학적으로 곡선 주행성능은 약간 저하되는 것으로 보고되고 있다.²

차륜/레일 접촉 특성을 고려한 철도차량의 곡선주행성능 연구에서는 곡선부 통과 시 동일축으로 이루어진 차륜/레일 접촉면에서 곡선부 내륜측과 외륜측 회전 반경이 서로 다르기 때문에 슬립영역이 발생하게 되는데 이에 대한 연구를 통한 곡선부 임계속도 계산을 통한 곡선주행성능평가를 실시하였다.³

철도차량이 곡선부를 통과할 시 크게 문제가 되는 것 중의 하나인 곡선부 스킵 소음에 대한 연구도 최근 활발하게 진행되고 있다. 철도차량의 차륜과 레일 시스템을 모사한 스킵 소음 발생장치 실험을 통해 스킵 소음 발생 메카니즘에 대한 체계 연구와 차륜과 레일간의 스틱-슬립(stick-slip) 운동에 의한 스킵 소음 발생 조건 등을 상대속도 또는 미끄러지는 수준에 따른 스킵 소음 발생 크기 정도를 연구하였다.⁴

철도차량의 곡선 주행 성능 평가에 있어서 차륜의 직경 크기가 곡선부 스킵 소음에 어떤 영향을 주는 지를 해석 및 시험을 통하여 곡선 통과 시 스킵 소음 저감에 대한 기법 연구도 스위스에서 실시된 바 있다.⁵

이와 같이 철도차량의 곡선 주행 성능 가운데 스킵 소음 문제는 철도운영자, 철도이용자 및 철도연변 거주자 모두에게 영향을 주는 중요한 이슈 중의 하나이다. 따라서 곡선부 통과 시 차륜-레일 접촉에 의한 차륜 방사소음 크기를 분석하여, 인간이 듣기에 불쾌한 소리로 들리는 곡선부 스킵 소음 특성을 차량 속도에 의한 영향으로 분석하는 것도 곡선부 주행성능 평가에 중요한 요소가 된다.

본 논문에서는 철도차량 스킵 소음의 속도에 의한 영향을 한국형 텀팅열차인 한빛 200 열차를 대상으로 운행 선상에서 곡선부 스킵 소음 특성을 곡선 통과속도와 곡선반경 크기에 따라 실차 시험을 통해 분석하였다.

2. 스킵 소음 발생 메카니즘

철도차량에서의 스킵 소음 발생은 곡선부를 주행할 시 차륜-레일 접촉에 의해 끄덕하는 불쾌한

소음을 스킵 소음이라 한다. 철도에서의 스킵 소음 발생 메카니즘을 파악하기 위한 시도는 계속되었지만 아직까지 명확한 발생 메카니즘을 규명하지 못하고 있다. 일반적으로 받아들여지고 있는 이론은 다음 세가지가 있다.⁶ 첫 째, 레일 접촉에 의한 차륜 플랜지 마모. 둘째, 일체 차축의 안쪽과 바깥쪽 차륜 사이의 슬립 차이. 셋 째, 레일 상부에서의 차륜의 횡 방향 크립(lateral creep)이다. 이 가운데 현재 스킵 소음의 가장 타당한 것으로 받아들여지고 있는 것은 세 번째인 레일 상부에서의 횡 방향 크립에 의한 스틱-슬립 운동에 의한 것이다. 횡 방향 크립은 차륜 접선방향의 속도인 구름속도(rolling velocity)와 차륜에 수직이고 차륜과 레일 사이의 각도에 의존하는 미끄러짐 속도(sliding velocity)의 비를 의미하며, 둘 또는 그 이상의 일체 평행 차축을 가진 대차가 곡선 구간을 운행할 때 발생한다. 대차의 차륜은 레일의 접선에 완전히 일치할 수 없기 때문에 진행방향 전축(front axle)의 차륜은 곡선의 바깥 방향으로 나가려 하고, 반대쪽 차륜은 곡선의 안쪽 방향으로 들어 가려 한다. Fig. 1 은 곡선부를 주행하는 철도차량 대차 내에서 스킵 소음 주요 요인 인 스틱-슬립 발생 현상을 보여주고 있다.

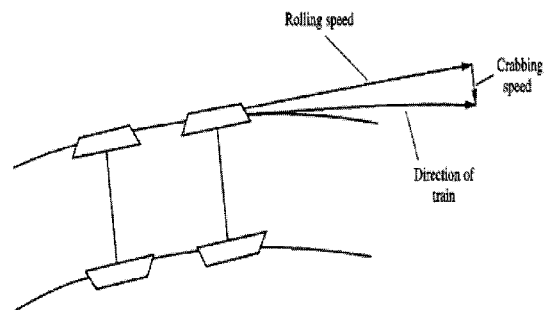


Fig. 1 Lateral contact position and creepage of leading outer wheel

차륜-레일 접촉 시 자기 가진(self-excited)된 스틱-슬립 진동에 의해 발생하는 스킵 소음은 전형적인 비선형성을 갖게 된다. 스킵 소음 발생 현상 메카니즘을 소음원 - 전달시스템 - 반응시스템으로 표현한 것이 Fig. 2 이다.⁷

Fig. 2 에서 보는 바와 같이 소음/진동원은 차량 속도, 차륜의 공격각(attack angle), 차륜/레일 표면 조도, 횡 방향 크립력 등이다. 전달계(transferring

system)로서는 차륜방사소음, 차륜 모달 테스트 분석 등이다. 반응계(receiver system)로는 스킵 소음의 음압 레벨로 구분할 수 있다. 스킵 소음은 4 kHz 이상 주파수를 가지고 곡선부 통과 시 불규칙적으로 발생하게 되며 차륜-레일 접촉 위치에 따라 스킵 소음 특성이 다르게 나타나게 된다. 차륜 플랜지부와 레일 내면부 접촉에 의한 것은 스킵 소음 발생 시간이 짧게 나타나는데 비해 레일 두부 선상에서 차륜 답면의 스틱-슬립에 의한 경우에는 상대적으로 스킵 소음 발생 시간이 길게 나타나는 특성이 있다.⁸

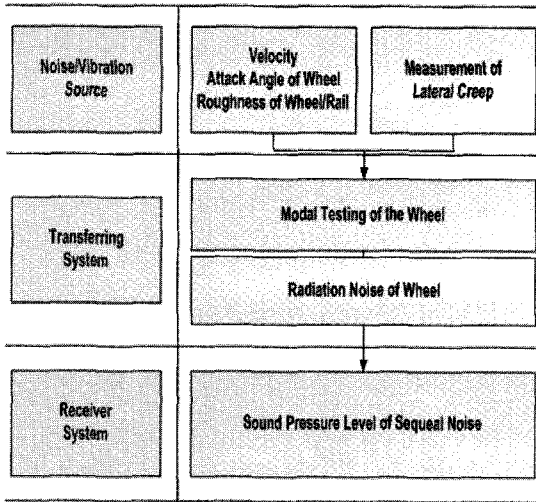


Fig. 2 Squeal noise generating mechanism

3. 한빛-200 열차에 대한 스킵 소음 특성

3.1 개요

한빛-200 열차는 2001년부터 2008년까지 국가 연구개발사업으로 개발한 틸팅열차(tilting train)로 주요 제원은 Table 1 과 같다.

이 열차는 곡선부가 많은 기존선로에서 곡선부 통과 속도를 기존 열차인 새마을호나 무궁화호 열차에 비해 20~27% 정도 속도향상(speed-up)하여 여행 시간을 단축하도록 개발한 차량이다. 본 연구에서는 한빛-200 열차의 곡선부 통과 시 차륜-레일 접촉에 의한 차량 하부에서 차륜방사소음과 스킵 소음을 측정 평가하였다.

Table 1 Specification of Hanvit-200 train

Description	Specification
Formation	4Motorized Cars+2Passenger Cars
Seats	Total 278 seats
Max. speed of operating	180km/h
Max. speed of design	200km/h
Max. tilting angle	8°
Max. tilting angle speed	4°/sec
Interior noise	70dBA at 180km/h
Wheel base	2,600mm
2 nd spring	Diaphragm + emergency spring
1 st spring	Conical rubber spring
Material of carbody	Composite + steel

3.2 시험 조건 및 시험 방법

한빛-200 열차의 스킵 소음 시험 구간은 곡선 선로가 많은 중앙선 제천 ~ 영주 구간에서 실시하였다. 시험 속도는 기존열차보다 곡선 통과 속도를 20 ~ 27% 높은 상태에서 시행하였다.

중앙선의 경우 R400 의 경우 기존 차량 곡선 통과 속도가 75 km/h 인데 비해 한빛-200 열차는 곡선 통과 속도가 27% 증속한 95 km/h 로 통과하였다. 또한 R600 의 경우 기존차량 곡선 통과 속도가 90 km/h 이고 틸팅 열차인 한빛-200 열차는 108 km/h 로 20% 증속하여 통과하였다.

마지막으로 R800 의 경우에도 기존열차 곡선 통과 속도가 100 km/h 인데 틸팅 차량은 20% 증속한 120 km/h 로 통과하였다.

Fig. 3 은 시험 차량의 스킵 소음 측정용 마이크로폰 설치 위치를 보여주고 있다. 마이크로 폰 설치 위치는 #6 차량 전부대차 #1 축 하부 좌우 측에 차륜-레일 접촉 점으로부터 25 cm 떨어진 근접 위치에 B&K 사 마이크로폰 2 개를 설치하였다.

본 시험에서 적용 한 규격은 KS I ISO 3095(철도차량에 의한 방사소음 측정)이고, 사용 된 시험 장비는 B&K 2671 음압 증폭장치 2 개, 데이터 저장장치 탑재용 PC 1 개, 속도 펄스 측정장치 Photo sensor E3S-CD11 1 개, 속도 펄스 전환장치 F/V Converter K3TR-NB11A, 신호증폭기인 Power supply IV60-hannel ICP supply 1 개 및 신호분석시스템인 LMS s/w 를 사용하였다.

Fig. 4 는 차륜-레일 접촉에 따른 스킨소음 측정 블록 다이어그램을 보여 주고 있다.

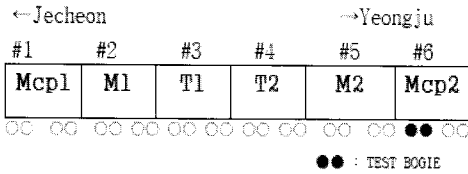


Fig. 3 Squeal noise measurement microphone locations

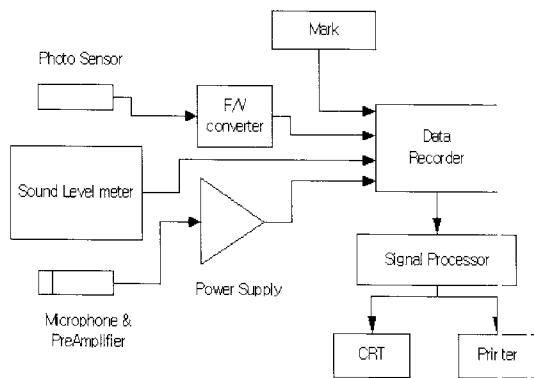


Fig. 4 Block diagram of squeal noise measuring system

3.3 시험 결과 및 고찰

Fig. 5 는 한빛 200-열차가 R400 곡선을 95 km/h 로 통과 할 때 스킨 소음의 주파수 스펙트럼 분석도이다. 스킨 소음은 약 4 ~ 10 kHz 에서 발생하는 것으로 나타나고 있다. 이 경우 스킨 소음이 1 ~ 3 sec 간격으로 짧게 나타나는 것은 차륜 플랜지와 레일 내면 부 게이지 코너와의 접촉으로 나타나는 스킨 소음이고, 이 경우 음압 레벨 자체는 높지 않은 것으로 나타나고 있다. 이에 비해 4 ~ 12 sec 동안 비교적 긴 시간 나타나고 있는 것은 레일 상부에서의 차륜-레일 접촉에 의한 스틱-슬립에 의한 스킨 소음을 나타내 주고 있다.

Table 2 는 중앙선 체천 ~ 영주 구간에서의 한빛- 200 틸팅 차량의 곡선 반경 및 속도 별 차륜 방사소음 크기를 보여주주고 있다. 차륜-레일 접촉점으로부터 매우 근접한 위치한 30 cm 거리에서 측정 한 이 들 값을 살펴 보면, 속도에 따른 스킨 방사 소음 값은 평균값의 경우 R400 에서 기존 열차 보다 곡선 통과속도를 27% 속도를 증속하면 평균 값이 3 dBA 정도 증가하고 최대 값도 3 dBA 증가 하는 것으로 나타나고 있다.

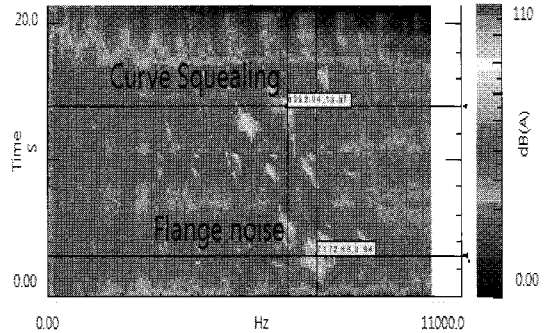


Fig. 5 Frequency spectrum of the noise recorded at one microphone for a train passing at R400 (microphone position : car no. #6, axle no. #1)

Table 2 Wheel radiation noise of Hanvit-200 train in curve lines

Radius (m)	Speed (km/h)	Mean of radiation noise (dBA)	Max. of radiation noise (dBA)
R400	75	105	110
	95	108	113
R600	90	106	110
	108	108	112
R800	100	107	110
	120	109	113

R600 곡선의 경우 속도를 20% 증속 운행 시 곡선부 스킨 방사 소음은 평균값이 2 dBA 증가하고 최대값도 2 dBA 증가하는 것으로 나타났다. 또한 곡선반경이 큰 R800 의 경우 곡선통과 속도를 20% 증속할 때 차륜-레일 스킨 방사 소음 평균값은 2 dBA 증가하고 최대값은 3 dBA 증가하는 것으로 나타나고 있다. 곡선반경이 작은 R400 의 경우 곡선반경 R600 및 R800 보다 곡선부 스킨 방사 소음 값이 상대적으로 크게 나타나고 있다.

이는 틸팅 열차가 R400 곡선부 진입 시 차륜-레일 접촉력에 큰 영향을 주는 완화 곡선부 길이가 작고 캔트량도 상대적으로 작은 것에 따른 것으로 해석되고 있다.

철도차량 곡선부 주행성능 평가 시 차륜-레일 스킨 방사 소음 값의 크기는 환경 소음 평가에 대한 적합성을 동시에 가지고 있어야 한다.

철도 환경 소음에 대한 국내 기준은 고속철도인 KTX 차량의 경우 레일 중심부로부터 25m 떨어

진 곳에서 1.2 m 높이의 수음점에 설치된 마이크로폰에서 $Leq\ max \leq 92\ dBA$ 를 만족해야 하는 것으로 되어있다. 한빛-200 열차의 환경소음은 별도의 기준은 없지만 준 고속차량임을 고려하여 고속차량의 기준을 근거로 환경 소음 기준의 적정성을 평가하였다. 이 경우 한빛-200 열차가 165 km/h 주행 시 레일 중심부로부터 7.5 m 떨어진 곳에서의 열차 통과시간에 대한 평균 값은 90 dBA 이고 최대 값이 92 dBA 로 측정되었다. 이에 비해 25m 거리에서는 측정된 값은 열차 통과시간에 대한 평균 값이 77 dBA 이고 최대값은 80 dBA 로 나타났다.⁹

이를 토대로 한빛-200 열차의 곡선부 통과 시 발생하는 스킨 방사 소음 값은 소음원인 차륜-레일 이를 토대로 한빛-200 열차의 곡선부 통과 시 발생하는 스킨 방사 소음 값은 소음원인 차륜-레일 접촉점으로부터 30 cm 거리에서 측정된 값을 고려하면 곡선부 통과 시의 스킨 방사 소음은 환경 소음 기준으로 부터 적정한 수준임을 알 수 있다.

국내 환경부령 제 374 호에 따른 고시 철도 환경 소음 기준 값은 50 m 거리에서 평균소음 기준 주거지역 등에서 주간 $Leq\ 70\ dBA$ 이하 야간 $Leq\ 60\ dBA$ 이하, 공업/농업 지대에서 주간 $Leq\ 75\ dBA$ 이하 야간 $Leq\ 65\ dBA$ 이하를 기준으로 하고 있다.

현재 한빛-200 열차에 대한 25 m 에서 평균 77 dBA 임을 고려하여 50 m 로 예측하여 계산하면 평균 소음 값이 60 dBA 이하로 예측되므로 법적 기준에는 문제가 전혀 없는 것으로 평가되어 진다.

또한 틸팅 열차가 곡선부 통과 시 곡선반경 크기에 따라 차륜-레일 접촉 스킨 소음 |좌측 - 우측| 음압차(dBA)가 발생하는데, 이는 곡선부 진입부에서 곡선부 종료 통과 시까지 스킨 소음 발생을 일으키는 차륜-레일 접촉에 의한 차륜 횡 방향 크립의 크기 차이에 의한 것이다. 차륜-레일 접촉에 의한 |좌측 - 우측| 음압차(dBA) 가 크면 스킨 소음이 더욱 더 확실하게 나타난다.

Fig. 6 ~ Fig. 8 은 한빛-200 틸팅 차량이 곡선부 통과 시 #6 호차 1 번 축에 설치된 마이크로폰에서 측정되어진 곡선 크기별(R400, R600, R800) |좌측 - 우측| 음압차(dBA)를 보여 주고 있다.

곡선 반경이 작은 R400 의 경우가 곡선반경이 상대적으로 큰 R600 및 R800 보다 동일 축 기준 |좌측 - 우측| 음압차(dBA)가 훨씬 큼을 알 수 있다. 이는 틸팅 차량 특성상 곡선부 통과속도 증속

량에 따른 차륜-레일 접촉 횡 방향 크립이 열차 진행방향 기준 바깥쪽 레일 쪽에 더 크게 발생하기 때문이다.

이에 비해 R600 및 R800 의 경우 곡선진입의 완화곡선부가 크고 종곡선도 상대적으로 큼으로 인해 차륜-레일 횡 방향 크립이 작게 발생하여 |좌측 - 우측| 음압차(dBA) 작게 나타나 상대적으로 곡선 스킨 소음이 낮아지는 것으로 나타나고 있다.

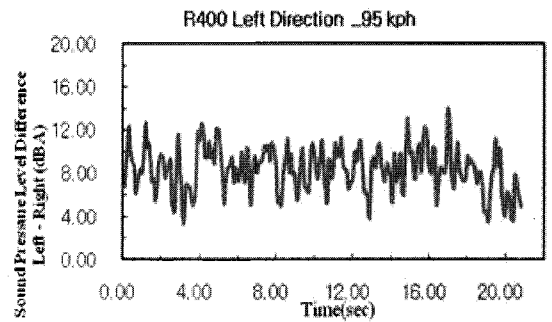


Fig. 6 Wheel-rail contact noise of Hanvit-200 tilting train in curve lines at R400

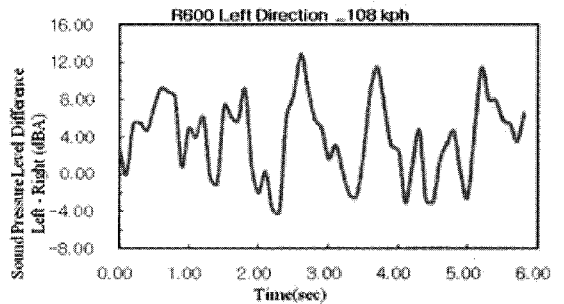


Fig. 7 Wheel-rail contact noise of Hanvit-200 tilting train in curve lines at R600

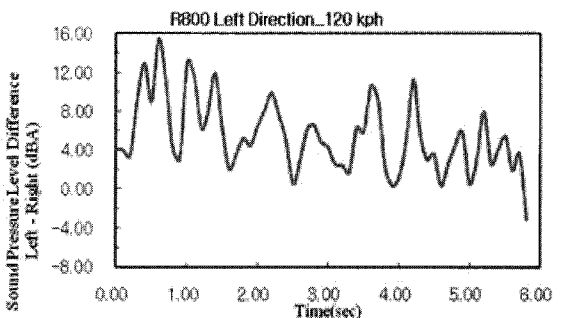


Fig. 8 Wheel-rail contact noise of Hanvit-200 tilting train in curve lines at R800

4. 결론

본 연구에서는 철도차량의 곡선 주행성능 평가 시 곡선부 통과 속도 향상 시 발생하게 되는 스킨 소음의 크기를 통하여 차량의 곡선 통과 성능을 검토하였다. 본 연구에서 곡선부 속도 증속에 따른 차륜-레일 접촉 스킨 소음 특성분석은 한국형 틸팅 열차인 한빛-200 열차를 대상으로 중앙선 제천 ~ 영주 시험 구간의 곡선크기 R400, R600 및 R800 에서 실시하였다. 곡선부 스킨 소음에 대한 속도의 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 곡선부 스킨 소음이 발생하는 곡선반경 R400, R600 및 R800 에서의 스킨 소음 발생 주파수 영역대는 사람들이 듣기에 불편한 4 ~ 11 kHz 영역대에서 발생하게 된다.

2) 곡선부 스킨 소음은 레일 상부에서의 차륜-레일 접촉 시 스틱-슬립에 의한 것은 스킨 소음 발생 시간이 비교적 긴 4 ~ 12 sec 에 걸쳐 나타난다. 이에 비해 레일과 차륜 플랜지 사이의 접촉에 의한 스킨 소음은 1 ~ 3 sec 로 짧게 나타났다.

3) 곡선반경 R400, R600 및 R800 에서 곡선 통과 속도를 20 ~ 27% 증속하였을 때 차륜-레일 접촉에 의한 스킨 방사 소음 크기 증가는 평균 값과 최대 값이 약 2 ~ 3dBa 증가하는 것으로 나타나, 곡선 통과 속도 증속 비율에 비해 스킨 소음 증가는 작은 것으로 나타났다.

4) 한빛-200 틸팅 차량의 곡선부 통과 속도 증속에 따른 환경 소음평가는 국내 법적 기준에 문제가 되지 않는 것으로 나타났다.

5) 곡선반경이 작으면 차륜-레일 접촉에 의한 |좌측 - 우측| 음압차(dBA) 가 크게 나타나 스킨 소음 발생에 따른 영향이 더욱 더 확실하게 나타나는 것을 확인하였다.

참고문헌

- Ham, Y. S., Lee, D. H., Kwon, S. J. and Seo, J. W., "The Experimental Study about a Correlation between the Derailment Coefficient of the Railway Vehicle and the Track Alignment," J. of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27, No. 8, pp. 7-12, 2010.
- Ham, Y. S., "A study on effect that rigid wheel base of rolling stocks gets in running performance in curved line section," Proc. of KSPE Autumn Conf., pp. 1033-1034, 2010.
- Shin, Y. J., Hur, H. M., Park, J. H. and You, W. H., "Dynamic Analysis for Railway Vehicle Considering Wheel/Rail Contact in Curve," Proc. of KSPE Autumn Conf., pp. 1487-1488, 2010.
- Kim, K. J., Park, J. K., Kim, B. S. and Kim, J. C., "An Experimental Study of the Curve Squeal Noise," J. of the Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 2, pp. 176-181, 2008.
- Cataldi-Spinola, E., Glocker, Ch., Stefanelli, R. and Götsch, M., "Influence of the Wheel Diameter on the Curve Squealing of Railway Vehicles," Euronoise, paper ID 465, 2003.
- Rudd, M. J., "Wheel/Rail Noise-Part II : Wheel Squeal," J. of Sound and Vibration, Vol. 46, No. 3, pp. 381-394, 1976.
- Kim, K. J., Kim, B. S., Park, J. K., Kim, J. C. and Lee, C. W., "Experimental study on the curve squeal noise of the train wheels," The 9th Western Pacific Acoustics Conference, pp. 123-127, 2006.
- Glocker, Ch., Cataldi-Spinola, E. and Leine, R. I., "Curve squealing of trains : Measurement, modeling and simulation," J. of Sound and Vibration, Vol. 324, No. 1-2, pp. 365-386, 2009.
- Lee, C. W., Kim, J. C., Kuo, D. H., Moon, H. S., Na, S. H. and Jeon, S. W., "The reduction method of squeal noise of wheel/rail on curve for tilting train," KRRRI Report, No. 2010-09, pp. 36-38, 2010.