

# 지하철 곡선부 운행구간 차륜방사소음에 관한 실험적 연구

## On-board investigation on wheel noise radiation of metro train

고효인†·조준호\*·허현무\*·박준혁\*·유원희\*

Hyo-In Koh, Jun-Ho Cho, Hyun-Mu Hur, Joon-Hyuk Park, Won-Hee You

**Key Words** : Wheel noise(차륜소음), Curve squeal (곡선부 스킨), metro train(지하철도)

### ABSTRACT

In this paper the noise characteristics of metro train is investigated experimentally. It is primarily aimed at observing the squealing noise radiation of each wheel when the vehicle pass the curve sections. This will be used to understand the noise excitation mechanism at the contact area between squealing wheels and rails which induce squeal noise at curve sections. To identify the related key parameters and boundary conditions on-board monitorings of the noise, vibration of the wheel and bogie and displacement behaviour of the wheels and rails have been done. In this paper only noise measurement and results are discussed. From spectrogramms squeal noise due to creepage and noise due to the flange contact of the wheels could be identified. At the moment of the curve passing the highest squeal levels are found on the front inner wheel. However since curve noise depends on variable factors more analyses will be followed to identify the squealing wheels and the noise excitation.

### 1. 서론

철도차량의 구조와 곡선주행원리에 의해 차량이 곡선 구간을 주행할 때에 나타나는 스킨소음은 옥외영역은 물론 차량 내 승객에게 큰 피해를 끼치는 가장 듣기 싫은 소음 유형이다. 특히 곡선반경이 작은 도심지 내의 궤도인 경우 피할 수 없는 소음현상이며, 트램 종류의 시가전철이 운행되는 해외의 경우 차 내 뿐 아니라 차량외부로 방사되는 소음을 저감하고 개선하기 위해 활발히 규명 및 저감연구가 진행되고 있다. 국내의 경우 추가적으로 건설된 지하철 노선들의 경우 곡선반경이 작고, 지하터널 내에서 콘크리트 슬라브 도상궤도로 운행하는 구간에서는 차 내에서의 스킨 소음이 주요한 소음원이 되고 있다.

곡선운행 시 별도의 조향장치가 없는 기존의 일반 철도차량의 윤축은 궤도의 곡선방향을 따라서 조향할 수 없는 이유로 주행원리상 외륜과 내륜의 차륜과 레일의 접촉영역

및 접촉역학이 상이하며, 스킨소음은 차륜과 레일의 접촉, 마찰 시 횡방향과 종방향으로 미끄러지는 속도의 관계에서 발생하는 동역학적 불안정 상태에서 야기된다고 이해되고 있으나 정확한 규명은 현재 연구되고 있는 상태이다. 운행 접촉영역에서 일어나는 이 역학현상에 의해 레일과 차륜이 진동하게 되며 접촉역학의 유형에 따라서 차륜의 특정모드가 야기되어 이에 상응하는 주파수 영역에서 소음이 발생한다. 스킨소음은 그 에너지 범위가 250 Hz에서 10 kHz 이상까지 넓은 주파수 영역에서 발생하나 주로 좁은 밴드 내의 강한 톤(tonal) 음으로 나타난다. 그 외 곡선부에서 나타날 수 있는 소음의 유형으로는 전철기 부분이나 분기 교차부분에서 차륜의 플랜지 부분마모로 인해 발생 또는 차체의 동역학적 불안정성 이상진동에서 유발되는 것으로 여겨지는 삐덕덕거리는 소음 그리고 알루미늄 자재가 중심 부분을 구성하는 강철차륜과 연관된 하울링 소음 등을 들 수 있다[1].

스킨소음의 두 가지 대표적 유형은 차륜이 마찰하면서 레일상부면을 횡방향으로 미끄러지면서 발생하는 스틱-슬립 소음과 차륜의 플랜지 부분이 레일과 마찰하여 나타나는 소음이다. 전자는 가장 높은 소음레벨을 야기하며 주로 4-차륜 대차나 2-윤축 차량에서는 전륜 내륜에서 통상적으로 나타난다고 알려졌으며 주파수 영역은 200 Hz~2000 Hz 가 주류를 이룬다. 후자는 전륜 외륜이나 후륜 내륜에서 발생하고 전자의 경우보다는 낮은 레벨로써 5000Hz에

† 한국철도기술연구원  
E-mail : hikoh@krri.re.kr  
Tel : (031) 460-5207, Fax : (031) 460-5279

\* 한국철도기술연구원

서 10kHz 이상까지 간헐적으로 나타나지만 발생시에는 상당한 소음피해를 끼치는 것으로 여겨진다. 곡선부 소음을 저감하기 위한 대안으로는 주로 특정 모드로 진동과 소음 방사가 야기되는 차륜의 댐핑을 이용하거나 접촉영역의 마찰계수 조절을 위한 레일면의 윤활, 분사등을 사용하여 왔다. 앞에서 언급한 가장 빈번히 발생하며 높은 소음 레벨을 야기하는 스틱-슬립 현상 시의 횡방향 크리피지(creepage) 소음을 제거기 위해서는 곡선반경을 변경할 수 없는 조건 하라면 조향대차 개발이나 레일의 구조를 개조하는 것만이 효율적이라 여겨지고 있다[2]. 관련 주요인자로는 운행 속도, 윤축과 레일 사이의 공격각, 차륜 답면의 횡변위 등을 들 수 있다.

이를 위해서는 우선적으로 좀 더 구체적인 대상의 스킬소음 발생역학과 인자를 이해할 수 있어야 할 것이며 운행 속도를 고려한 주행안정성 설계가 되어야 한다.

본 연구에서는 국내 운행하는 도시철도차량의 스킬소음을 발생역학 단계에서 제거하는 기술의 가능성을 검증, 개발하며 이를 위해서 우선 운행하는 차량의 곡선부 구간 소음 발생역학을 이해하고자 한다.

본 논문에서는 이의 기본 단계로 차량 운행 중의 차륜 및 차 내 소음을 측정하고 그 특성을 분석하였다.

## 2. 실차 운행시험

### 2.1 시험조건

본 측정의 목적은 국내 지하철 운행 시 곡선구간을 통과할 때의 소음 데이터를 수집하는 것이며 나아가서는 소음레벨과 특성에 따른 현황을 파악하고 궁극적으로는 스킬을 발생하는 데에 작용하는 주요 인자들을 분석하는 것이다. 시험은 특정 노선의 전 구간 왕복으로 실시되었으며 30 km/h ~ 80 km/h 의 속도로 운행되었다. 본 연구의 목적과 취지에 더 근접한 신뢰도 높은 데이터를 취득하고자 한다면 측정기준 [3] 에 근거하여 동일한 운행조건 하에 일정한 속도로 특정 구간을 여러 번 왕복 한 뒤 차륜의 조건과 레일의 거칠기 상태를 고려해서 분석값을 얻어야 하겠지만 국내 지하철 운행 여건 상 정상 상업 운행하는 차량의 첫 전두부량을 시험차량으로 선정하여 이루어졌다. 따라서 차 내 소음도 모든 정상 상업운행의 일반 조건하에서 측정되었다. 본 논문에서는 우선 정상 상업 운행하는 지하철의 곡선부를 포함하는 구간의 소음현황을 파악하고 분석하는 것이 되겠다.

연구에 의하면 곡선부 스킬소음은 곡선 반경이 500 m 보다 큰 구간에서는 발생하지 않으며 300 m 이하에서부터 주로 발생한다. 한 대차의 전후 윤축사이의 거리(W)와 곡선반경(R)의 비율에 의해 그 비 (R/W) 가 100 이하이면 매우 높은 스킬소음이 발생한다고 알려져 있다. 본 논문에서는 곡선반경이 300 m 이하인 구간 중 일부의 결과만 소개하며

측정차량의 두 윤축사이의 거리(W)가 2.1m 이다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 네 개의 마이크로폰이 13cm 정도의 간격으로 각각 차륜의 바깥쪽에 차륜중심과 떨어져 설치되었으며 차 내에는 객실 내 정 중앙부, 차량진행 방향 전위대차 중심부 상면과 차량진행방향 후위대차 중심부와 차량정중앙부의 중간으로 세 위치에서의 1.2m 높이에서 측정되었다.

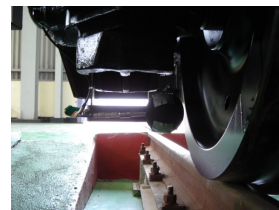
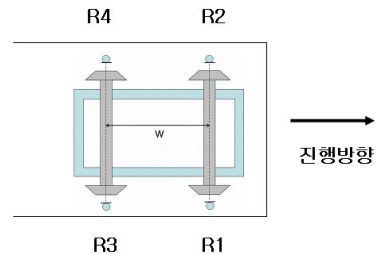


Figure 1 Diagram and photo of noise measurement on metro vehicle

### 2.2 시험결과

다음은 반경이 300m 이하인 곡선을 포함하는 다섯 구간 전체운행에 대한 차륜 및 차 내 소음 측정 결과이다.

#### (1) 차륜의 소음방사 레벨 및 주요 주파수 영역

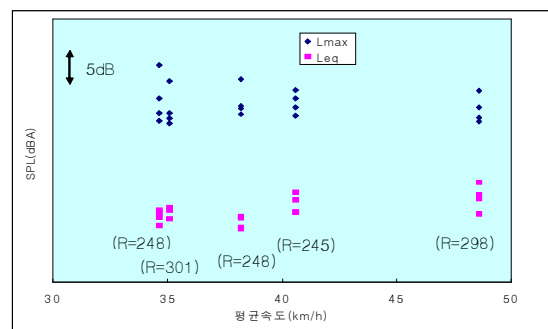


Figure 2 Sound pressure levels measured close to wheels versus average train speeds

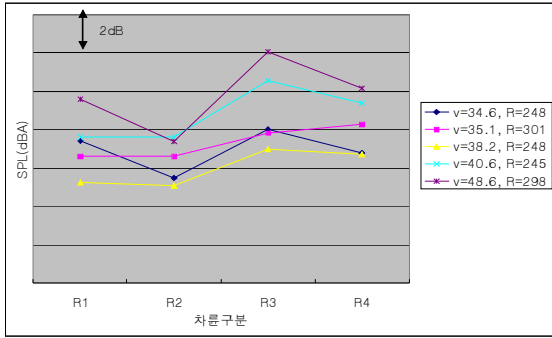


Figure 3 Sound pressure levels (Leq) measured close to wheels

Fig.2 에서 알 수 있듯이 전반적으로 구간운행 시 발생하는 최고소음도(Lmax)는 열차의 운행속도나 곡선반경과 비례하지 않는 것을 볼 수 있으며, 구간 등가소음도는 한 구간을 제외하면 대체적으로 평균운행속도에 따라서 증가함을 볼 수 있다. Fig.3 에는 차륜 별 (Fig.1) 방사 소음을 나타내었다. 전반적으로 전륜보다는 후륜에 의해 방사된 소음이 더 높음을 볼 수 있고 후륜 오른쪽 차륜 (R3) 이 가장 높은 소음을 방사함을 나타낸다. 곡선의 굽은 방향을 고려하여 볼 때에는 후륜의 내륜이 외륜보다 소음레벨을 방사함을 볼 수 있다.

지금까지 나타낸 결과는 곡선구간을 포함한 역과 역 사이의 전체 시간동안의 소음레벨이며 그 중 곡선부를 운행하는 구간의 소음특성을 관찰하기 위해 한 구간을 예로 차륜소음레벨과 차 내 소음레벨을 Fig.4 에 나타내었다. 속도는 50 km/h 로 일정하게 운행되었으며 구간내에 포함되어 있는 곡선의 반경은 248m 이다.

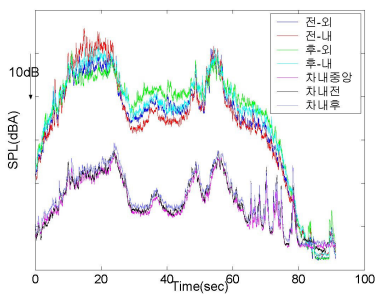


Figure 4 Sound pressure levels measured close to wheels and inside coach at the speed of 50km/h

구간 내 전반적으로는 Fig.2~3 에 나타난 결과에서처럼 후륜의 한 차륜이 가장 높은 소음을 방사했으나 약 10sec 부터 30sec 까지 차량은 R=248m 인 곡선부를 통과하며 이 부분에서만은 R2차륜이 가장 높은 소음을 방사함을 알 수 있다. 이는 이 구간의 경우 전위의 내륜에 해당한다. R2 차륜은 그 외의 부분에서는 가장 낮은 소음을 방사함을 알

수 있다. 이 곡선부에서 다음으로 높은 소음레벨을 방사하는 차륜은 R4로써 후위 내륜이다. Fig.5 에는 전위내륜 차륜인 R2 차륜의 방사 소음레벨은 한 구간 전체에 대해 주파수의 변화와 함께 나타내었다. Fig.5 는 20kHz까지의 구간운행 중 소음레벨이 표시되었으며 청감보정을 하지 않은 측정레벨은 1kHz 이하에서 전동소음을 비롯한 주요소음성분이 존재하나 곡선부 통과 시 10kHz 이상까지 소음이 발생하는 것을 볼 수 있다. 곡선부 통과 시간동안 전위내륜 차륜 방사 소음에 나타난 주파수 특성은 300Hz~500Hz에서 가장 두드러지며, 1kHz 와 2kHz 사이 그리고 2kHz 영역에 소음이 발생하고 그의 정수배의 주파수 영역에서 나타남을 관찰할 수 있다, 이는 차륜의 축방향 모드에 해당하는 것으로 추정된다.

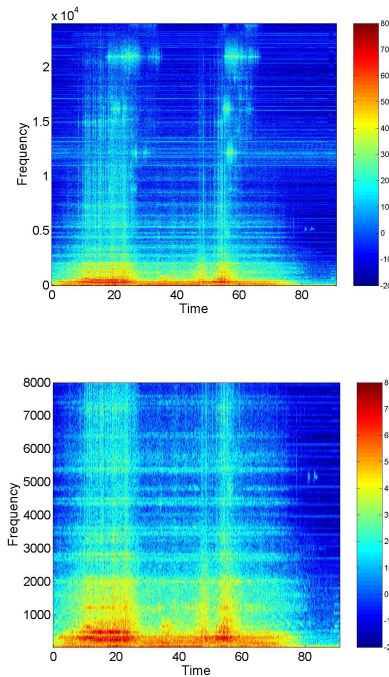


Figure 5 Sound level measured close to leading inner wheel at the speed of 50km/h

## (2) 차내소음 특성

Fig.4 에서 관찰할 수 있듯이 차 내 소음은 전반적으로는 차륜 외부 방사 소음의 경향을 따라감을 관찰할 수 있다. Fig.6 에는 R=248m 인 곡선부를 포함하는 지하철 운행 구간의 차 내 소음레벨을 나타내었다. 측정위치는 차량의 진행방향 후위 대차와 중앙 사이이며 주요 소음영역인 200Hz ~ 1kHz 외에 10kHz 까지 소음 에너지가 상당히 나타나는 것을 볼 수 있다.

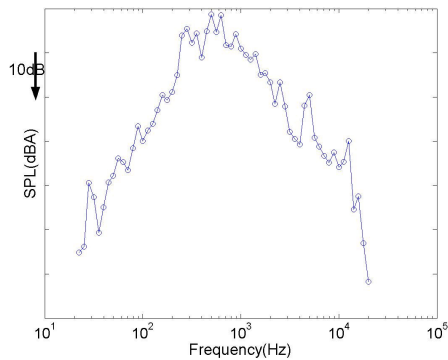


Figure 6 Sound level measured inside vehicle at the speed of 50km/h

#### 4. 결론

본 연구에서는 전동차 곡선부 소음의 근본 발생 역학을 차단하고자 하는 기술의 연구 및 개발과제의 한 일환으로 우선 국내에서 운행되고 있는 지하철 구간의 차륜 방사 소음특성 및 차 내 소음특성을 측정, 분석하였다. 곡선부에서 가장 빈번히 나타나는 소음은 스킵소음으로 알려졌으나 이 외에도 주행패턴이나 속도, 날씨, 습도 등에 의해 나타날 수 있는 소음의 유형과 주파수 영역이 유형별로 존재한다. 본 논문에서는 국내 지하철 구간 중 반경이 300m 이하인 곡선을 포함하는 구간에서의 차륜의 방사소음을 분석한 결과 곡선부를 통과하는 순간에만 특정하게 높은 소음을 방사하는 차륜들 있음을 관찰할 수 있었으며 각각 이에 상응하는 주파수를 통해 차륜의 특정모드에 해당하는 소음이 발생함을 추정할 수 있었다. 이를 통해 곡선부 운행시의 차륜과 레일의 접촉유형과 그에 따른 소음 및 마모에 따른 소음발생역학을 분석하고자 한다. 향후에는 차륜의 가속도 응답과 보다 정확한 차륜과 레일의 변위관계를 통해 국내 운행 차량의 소음 발생역학 관련 주요 제어 인자를 규명하고자 한다. 앞에서 언급하였고 또 해외의 많은 연구결과에서도 나타나듯이 곡선부 소음은 그 외 차륜과 레일 표면의 물리적 상태 뿐 아니라 궤도의 구조, 운행패턴 등에 따라서 예민하게 반응하는 특성을 지니고 있으므로 다양한 데이터 축적과 면밀한 경계조건의 관찰이 요구된다.

#### 참고 문헌

(1) J.T. Nelson, 1997, "Wheel/rail noise control manual", Transit cooperative research program, National Academy Press

(2) N. Vincent, J.R. Koch, H. Chollet, J.Y. Guerder, 2006, "Curve squeal of urban rolling stock-Part 1 : State of the art and field measurements", Journal of sound and vibration 293 (2006) 691-700