

철도차량 스킨소음의 발생메커니즘에 관한 실험연구

Experimental study of generating mechanism about railway's squeal noise

김범수*·김관주**·김상수*·김재철***

Beom-soo Kim, Kwan-ju Kim, Sang-soo Kim and Jae-chul Kim

Key Words : railway(철도차량), squeal noise(스킨소음), experimental study(실험연구), frictional force(마찰력)

ABSTRACT

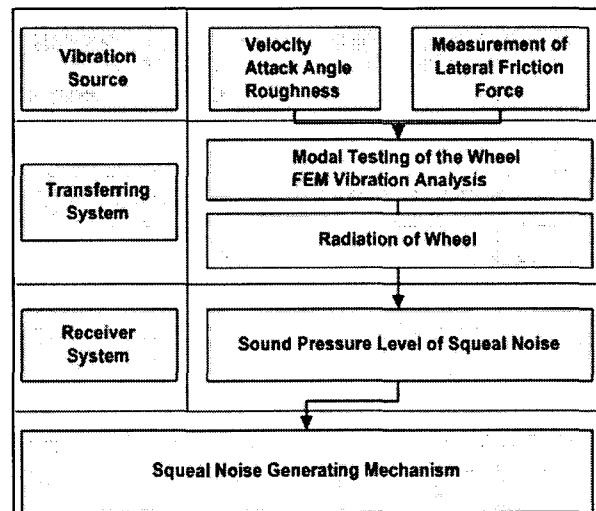
This paper presents experimental analysis of a friction-driven wheel responsible for generating wheel squeal. Squeal noise generating mechanism has been examined under the laboratory condition. Model rig of the rail and the wheel are made and influential parameters to squeal noise e. g. frictional force, normal force between the rail and the wheel, creep speed of the wheel have been measured and calculated. Negative damping characteristic curve are calculated currently. Necessary relating computational analysis has been carried on also.

1. 서론

스킨 소음이란 철도차량이 급격한 곡선을 주행할 때 발생하는 '끼걱'거리는 소음을 말한다. 스킨소음을 저감시키는 경험에 의한 대책으로 곡률반경을 크게 하는 방법, 차륜과 레일사이의 윤활유를 뿌리는 방법 등이 알려져 있다. 그러나 인구 밀집 지역에 불가피하게 설치되어 있는 곡선 철로 구간 운행 시, 특정 고주파수 영역에서 집중적으로 발생하는 스킨 소음에 대한 대책 방안에는 한계가 있다.

본 연구에서는 아직 명확히 규명되지 않은 스킨소음 발생 메커니즘에 대해서 스킨소음 발생 장치를 제작하여, 관련 실험을 수행하고, 필요한 진산 해석을 병행하여 체계적인 스킨소음 발생 메커니즘을 규명하고자 한다. 스킨소음 발생 현상을 명확하게 파악하기 위하여, 소음원(진동원)-전달계-반응계의 순서로 실험과 해석을 진행하였다. 소음원 부분에서는 모델 차륜의 여러 운행 조건에 따른 차륜 횡방향의 마찰력 특성을 구하였다. 전달계 부분은 마찰력에 의한 차륜의 진동 특성과 차륜의 진동에 의한 방사소음에 관한 내용에 관한 연구를 진행하였다. 반응계에서는 차륜의 소리 방사에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위한 연구의 전반적인 내용에 대해서 Table 1에 나타냈다.

Table 1 Overview of investigating squeal noise mechanism



2. 스킨소음 발생장치 Version-II 모델 설명

2.1 차륜과 레일의 접촉 모델

일반적으로 알려진 스킨 소음의 발생 원인은 스틱-슬립 현상에 의한 자려 진동이다. 간단한 자려 진동의 모델로 가진이 속도나 혹은 속도와 변위의 조합으로써 표현할 수 있을 경우를 들 수 있다.[1] 예를 들어, 1자유도계 시스템에 이런 형식의 힘이 작용하는 경우를 식 (1)과 같이 표현하였다.

* 김범수, 홍익대학교 기계공학과 대학원
E-mail : gulbongyi@hanmail.net
Tel : (02) 320-1113, Fax : (02) 320-1113

** 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

*** 한국철도기술연구원

$$m \ddot{x} + [c\dot{x} - F(\dot{x})] + kx = 0 \quad (1)$$

m은 질량, c는 댐핑, k는 강성, F는 가진력, x는 응답을 나타낸다. 식(1)에서 $F(\dot{x})$ 가 $c(\dot{x})$ 보다 크게 되면 음의 감쇠가 될 가능성이 있다. 음의 감쇠는 스프링 질량계에 투입되는 에너지가 방출되는 에너지보다 크게 되어, 진폭은 임계점까지 계속 증가하게 된다. Fig. 1은 자력진동에 의한 시스템의 불안정한 운동을 보여준다.[2]

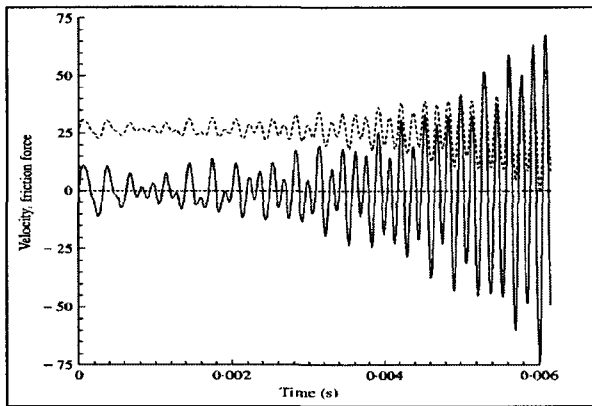


Fig. 1 Unstable case of the self-excitation motion

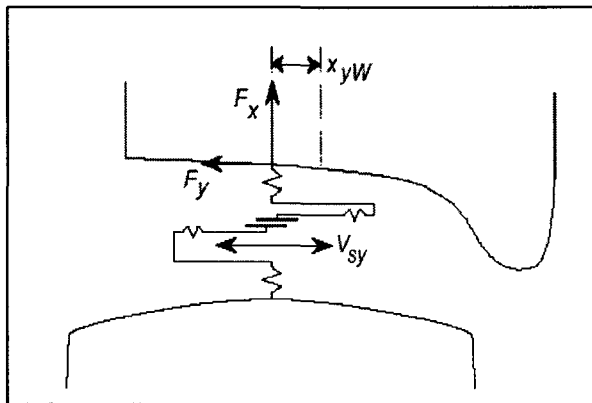


Fig. 2 Self-excitation case of the wheel and rail model in lateral direction

위 현상을 철도차량의 차륜과 레일의 접촉 시스템에 적용하기 위해 식 (2), (3)을 식(1)에 대입한다(Fig. 2 참조).

$$F = \mu N \quad (2)$$

$$k = \hat{k} + k_f \quad (3)$$

가진력 F는 횡방향 마찰력, 강성 행렬 k는 본래의 강성 값에 차륜부의 하중에 의한 마찰강성 k_f 을 더한 값으로 나타

낼 수 있다.[3] 여기서 가변 마찰력 F는 마찰계수 μ 와 수직항력 N의 곱인데, 수직항력의 크기를 상수로 가정하는 경우, 마찰계수의 크기가 변한다. 마찰계수는 스틱-슬립 운동에서 정마찰과 동마찰 사이에서 반복적인 변화를 겪는다. 또한 레일에 대한 차륜의 횡방향 상대속도가 증가하게 되면 마찰력은 일반적인 동마찰력 보다 더욱 감소하게 된다.

2.2 스킨소음 발생장치 Version-II

이전의 연구에서 스킨소음 발생장치 Version-I을 통해 스킨소음 발생을 확인하고 스킨소음과 관련된 속도, 하중, 표면 거칠기, 차륜과 레일사이의 구동각, 휠에 작용하는 축방향 마찰력 등의 인자를 발견했다.[4] 본 연구에서는 스킨소음과 관련된 인자들의 실험적 자료를 효율적으로 추출하기 위하여 Fig. 3과 같은 개선된 모델인 Version-II를 제작하였다. 스킨소음 발생장치 Version-II는 불규칙적인 Stick-Slip의 변위 값을 조절하여 Wheel에 작용하는 축방향 마찰력을 측정할 수 있도록 설계되었다. 특히 스킨소음 발생장치 Version-I의 차륜축 대신 Flexible Arm으로 교체하였다. 또한 Fig. 4와 같이 차륜부의 하중을 조절가능하게 제작되었다.

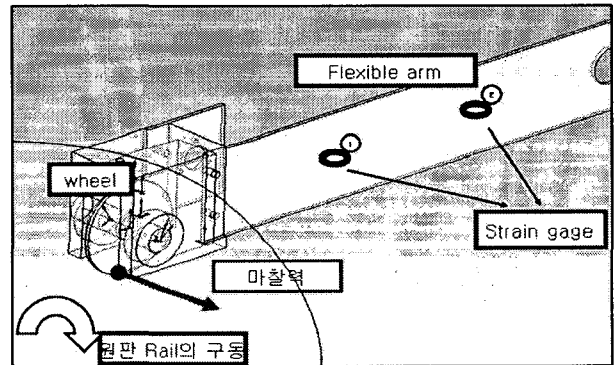


Fig. 3 Sketch of Version-II wheel components

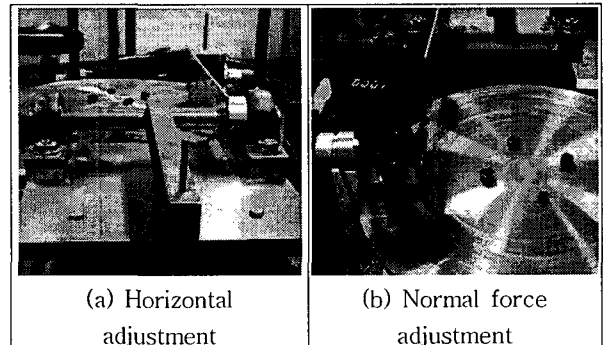


Fig. 4 Adjustment of force magnitude in Version-II model rig

3. 스킵소음 발생조건 및 마찰력 측정 실험

3.1 스킵소음 발생조건 변수 설정

스킵소음의 발생은 여러 인자들의 복합적 요소의 결합에 의해 발생되므로 실험에서는 정적 변수인 차륜부의 하중과 차륜과 레일이 이루는 구동각(Attack Angle)을 설정하고 동적 변수인 Flexible Arm의 스트레인지이지로부터 탄성복원력, 차륜의 변위, 횡방향 속도 등을 구하고 차륜부와 레일부의 엔코더로부터 각각의 속도를 동시 측정하여야한다. 또한 각 조건하에서의 방사되는 스킵소음을 측정해야한다.

3.2 Flexible Arm을 이용한 마찰력 측정

마찰력 측정 실험에 앞서 Flexible arm의 굽힘 탄성복원력을 측정하였다. Flexible arm 상단에 하중을 가하고 하단은 고정하여 그 변형량으로부터 굽힘 탄성력을 측정하였으며, 이를 통해 차륜에 가해지는 횡방향 마찰력을 측정하였다. Flexible arm에 의한 차륜부의 변형 진폭은 스킵소음 발생장치에서 원판 레일이 일정한 속력을 이루고 차륜의 진동이 임계점에 도달하면 안정한 상태를 이룬다. 이 때, 스킵소음 발생장치에서 차륜에 작용하는 마찰력은 굽힘 탄성복원력과 동적 평형을 이루게 되는데, 차륜부의 동적 가변마찰력을 정형파로 근사하여 표현하면 식 (4)과 같다.

$$k_f B = \mu N = F_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (4)$$

B는 정적상태에서 측정된 Flexible Arm의 굽힘 탄성복원력이며, F_0 는 동적평형상태의 마찰력이다. 또한 마찰력과 Flexible Arm의 굽힘 탄성복원력은 하중에 의한 마찰강성이 비례함을 확인하였다. F_0 는 우극점과 좌극점 사이를 적분 평균하여 구할 수 있다. 따라서 스킵소음 발생장치에서의 가변 동마찰력은 Flexible arm의 굽힘 탄성복원력과 차륜부의 하중에 따른 마찰강성으로부터 구할 수 있다.

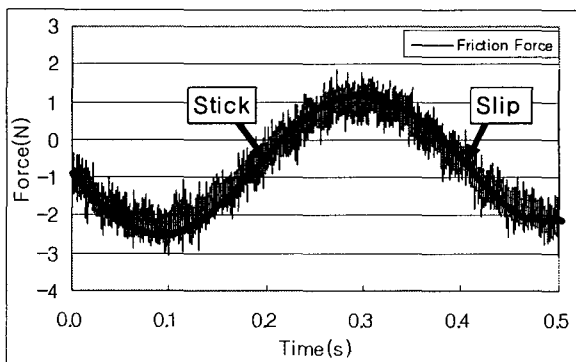


Fig. 5 Frictional force measurement result of model rig

스킵소음 발생장치를 이용한 실험에서 차륜부의 시간에 대한 가변 동마찰력과 이때의 스틱-슬립은 Fig. 5와 같다.

4. 차륜의 진동모드 실험

전달계로서의 차륜의 진동 특성을 파악하기 위해 Version-II 차륜의 모드 시험을 행하였다. 측정 주파수 범위는 17kHz까지이며 FRF 결과 7개의 고유진동수를 확인하였지만 그 중 스킵소음과 관련된 4개의 굽힘 모드를 선별하였다. 그리고 유한요소법으로 차륜의 모드를 해석하여 결과를 비교하였다.

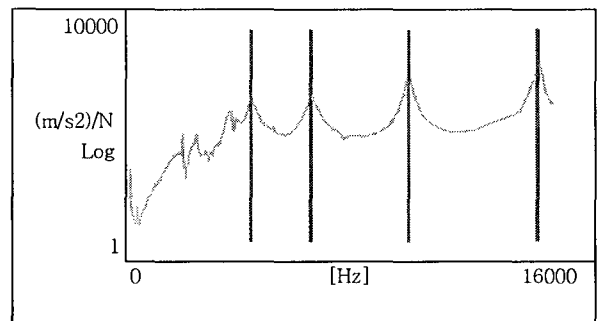

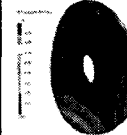
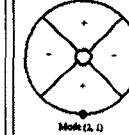
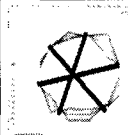
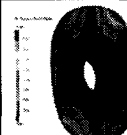
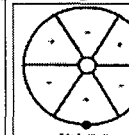
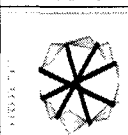
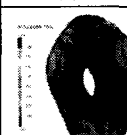
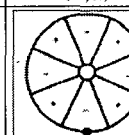
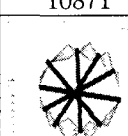

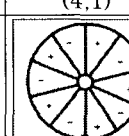


Fig. 6 Measured FRF result of Version-II model wheel

Table 2 Comparison of vibration result of model wheel

No.	EMA	Analysis	Mode shape
1st	 4778(Hz)	 5612	 Mode (2, 0) (2, 1)
2nd	 7110	 7714	 Mode (2, 1) (3, 1)
3rd	 10871	 11524	 Mode (4, 1) (4, 1)
4th	 15779	 16771	 Mode (5, 1) (5, 1)

5. 스킨소음 측정

반응계로서 각 변수들의 조합에 따라 스킨소음을 측정하였다. 가청주파수 범위에서 1/12 옥타브 밴드의 SPL 결과를 나열하면 아래의 그림과 같다.

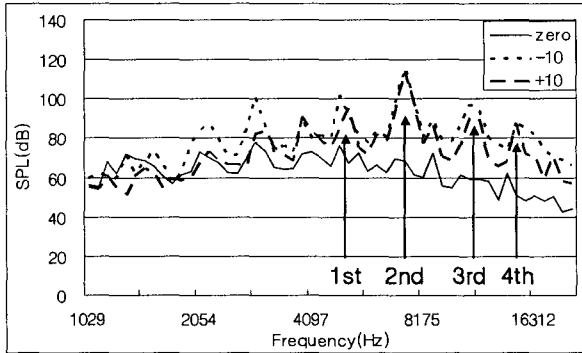


Fig. 7 SPL of squeal noise according to attack angle variation

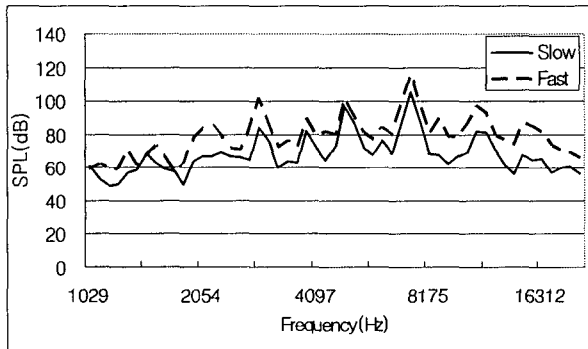


Fig. 8 SPL of squeal noise according to wheel speed

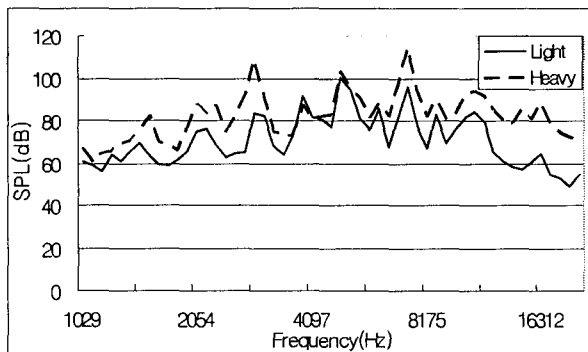


Fig. 9 SPL of squeal noise according to normal force variation

Fig. 7에서는 구름소음과 스킨소음의 주파수 영역차이를 볼

수 있다. 차륜의 횡방향 가진은 굽힘모드를 생성하며 그 모드가 구름소음 영역과 비교하여 스킨소음을 발생시킴을 알 수 있다. 또한 2차 모드의 손실계수가 가장 작음을 확인할 수 있다. 그리고 차륜부의 시계방향과 반시계방향 회전이 차륜의 진동 및 음향 방사가 틀림을 보여준다. Fig. 8은 차륜의 속도를 제한 동일 조건하의 실험 결과이다. 고속일수록 방사가 더 큼을 보여준다. Fig. 9는 차륜부의 하중조건 변경시의 음압 측정 결과이다. 하중은 전주파수 영역에 영향을 미치는 경향을 보인다.

6. 결론

스킨소음 발생 메커니즘 규명을 위해, 기존의 스킨소음 발생장치 Version-I에서 스틱-슬립 조절 및 각 인자의 측정센서를 장착한 스킨소음 발생장치 Version-II를 제작하여 실험하였다. 이를 통해 차륜과 레일의 접촉 시스템을 고찰하고 음원으로서의 각 인자들 간의 상관성, 전달계로서의 차륜의 고유 모드, 반응계로서의 스킨소음의 인자들이 방사에 미치는 기여도를 알아 볼 수 있었다. 그러나 스킨소음 발생에는 미묘하게 작용하는 변수들이 더 있음을 실험을 통해 직감할 수 있었다. 예컨대 마찰된 차륜의 무게중심과 온도와 압력 등의 환경적 변수들도 고려해 보아야한다.

향 후, 변수들 간의 엄밀한 상관성을 밝히고 실제 철도차량에서의 스킨소음을 줄일 수 있는 대책 마련에 대해 연구해 보도록 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Willam T. Thomson. 1993. Theory of Vibration with Applications. Prentice-Hall. Inc..
- (2) 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. 669 ~ 693.
- (3) 신기홍, 2006, 진동 소음으로 인한 고장분석 및 대책 기술. 한양대학교 신뢰성분석연구센터.
- (4) 김관주 등. 2005. "철도차량 곡선부 소음에 대한 발생 메커니즘 규명 관련 연구". 춘계학술대회(수송기계편). 한국소음진동공학회. pp. 29~32.