Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 25(5) : 352~360, 2015
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2015.25.5.352

한국소음진동공학회논문집 제 25 권 제 5 호, pp. 352~360, 2015
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

축소 모델 실험장치를 이용한 철도 스킬소음의 특성에 대한 실험적 연구

An Experimental Study of Squeal Noise Characteristics for Railway Using a Scale Model Test Rig

김 지 용*·황 동 현*·이 준 헌*·김 관 주†·김 재 철**
Jiyong Kim, Donghyeon Hwang, Junheon Lee, Kwanju Kim and Jaechul Kim

(Received March 18, 2015 ; Revised April 17, 2015 ; Accepted April 20, 2015)

Key Words : Squeal Noise(스킬소음), Negative Slope(음의 기울기), Wireless Data Equipment(무선 데이터 송신 장치), Contact Model(접촉 모델)

ABSTRACT

Squeal noise is a harsh, high-pitched sound that occurs when railways are running at sharp curve tracks. The cause of squeal noise is known to be the transient lateral traction force between wheel and rail. Field measurements are too difficult to control the parameters. Thus, the scaled test rig should have been made in order to investigate the generating mechanism of squeal noise. The unique feature of our test rig, HSTR(Hongik Squeal Testing Rig), is that DOFs of its wheelset are as close to as those of the real railway. The attack angle and running speed of the rail roller are controlled in real time for simulating a transient characteristic of driving curve. The environment conditions, such as given axle load, running speed, and wheel's yaw angle have been identified for generating squeal noise and the squeal noise itself has been measured. The relation between wheel creepage and creep force in lateral direction and the criteria for squeal noise have been investigated, which results has been verified by finite element method.

1. 서 론

스킬소음은 철도 차량이 곡선부를 주행하는 도중 차륜과 레일의 접촉부의 횡방향 크립력에 의해 발생하는 높은 주파수의 불안정한 소음을 말한다. 일반적으로 이 소음은 차륜과 레일 사이의 점착 미끄럼(stick-slip) 현상에 의해 발생한다고 알려져 있다[(1)]. 이러한 힘은 레일 상부와 차륜 답면의 접촉면에서 발생하는 횡력, 차륜 플랜지(flange)가 레일 옆면에 미끄러지면서 발생하는 마찰력 그리고 레일과 차륜의 접촉면에서의 속도차로 발생하는 진행방향 미끄러짐으로 인한 마찰력으로 분류할 수 있다. Remington[(2)]에 의하면 레일 상부와 차륜 답면의 접촉면에서 발생하는 횡력이 스킬소음에 가장 큰 영향력이 있다고 설명한다.

† Corresponding Author ; Member, Dept. of Mechanical Engineering and System Design, Hongik University.
E-mail : kwanju@hongik.ac.kr
Tel : +82-2-320-1643, Fax : +82-2-320-1113
* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Hongik University
** Member, Korea Railroad Research Institute

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

곡선부를 주행 시 접촉부에서 발생하는 횡력 및 크리피지 조건에 대한 다수의 연구가 진행되었다[2~6]. 차륜의 크리피지가 커질수록 접촉면적에서 점착부(adhesion)는 줄어들고, 횡력은 정마찰계수에 해당하는 힘까지 증가하는 경향을 갖는다. 정마찰계수에 해당하는 힘에 도달한 이후에는 미끄러짐 속도가 증가하면서 점차적으로 횡방향 크립력이 감소하는 특징을 가진다. 이러한 특징은 횡방향 크리피지와 횡방향 크립력이 수직하중, 재료의 특성, 구름 속도에 대한 함수로 표현됨을 의미한다. 횡방향 크립력이 점차적으로 감소하는 구간에서는 횡방향 크리피지와 크립력이 매우 높은 주파수로 진동하며, 이로 인해 스킬소음을 만드는 결과로 나타난다.

이 연구에서는 위와 같은 스킬소음이 발생하는 현상을 공간적 제약 없이 파악하기 위해 축소 비율의 실험장치를 제작하고, 다양한 입력 변수의 조절을 통해 스킬소음에 미치는 영향도를 분석하였다. 또한 장치의 축소 차륜, 레일 롤러의 진동 특성 실험 결과를 통해 스킬소음의 진동 특성을 살펴보았다.

2. HSTR(Hongik Squeal Test Rig) 실험장치 구성 및 실험 내용 소개

2.1 HSTR 실험장치 구성

기존 스킬 실험을 위한 실험 장치들은 단일 차륜, 단일 레일로 구성된 기구가 대부분이다. 대표적으로 Hue[7]의 연구가 이에 해당한다. 이러한 기구는 스킬소음을 보다 단순하고 직관적으로 분석하기 쉽다는 이점이 있지만, 실제차량과 같은 동특성과 두 차륜의 상호작용에 의한 영향을 배제한다는 조건을 전제로 한다.

Fig. 1 The picture of Hongik Squeal Test Rig

HSTR은 하나의 축으로 구속된 2개의 차륜롤러와 독립적으로 구동되는 2개의 레일 롤러로 구성되었다. 차륜부는 실제 차량과 동일한 자유도를 갖기 위해 리니어 부시를 이용하여 좌우방향, 상하 방향, 진행 방향 축 회전을 자유단으로 구성하였다. 이렇게 부여된 자유도로 인해, 실제 차량의 사행동과 같은 주행특성을 재현할 수 있다.

차륜은 국내에서 많이 운용되는 KNR 40규격의 차륜과 KS R 9106 규격의 레일을 1:7.5 비율로 축소하여 제작하였다. 다만, 실험 공간의 제약으로 인해 실제 레일처럼 직선 형태로 표현할 수 없어 지름 190 mm를 가진 원반 형태로 레일롤러를 제작하였다.

2.2 실험장치의 입력, 출력 변수

HSTR의 입력, 출력 변수는 Table 1과 같이 설정하였다. HSTR은 2개의 레일롤러를 독립적으로 구동할 수 있다. 곡선부 주행을 표현함에 있어 두 롤러의 RPM를 독립적으로 조절하는 방식보다는 첫 번째로 좌우 롤러가 같은 RPM으로 구동하도록 설정하고, 두 번째로 좌우 RPM 차이를 %로 입력하여 곡선부를 표현하였다. RPM은 1 RPM 단위로 조절할 수 있고, 최대 150 RPM까지 설정할 수 있다.

차륜 축의 수직하중은 대차 위에 놓여 있는 판에 무게 추를 추가하여 조절할 수 있다. 이 실험에서 사용된 무게 추는 4 kgf로 대차의 무게 8 kgf를 더하여 12 kgf의 수직하중을 적용하였다.

레일과 차륜 사이의 요각은 -3°부터 3°까지 0.1° 간격으로 조절할 수 있다.

2.3 스트레인 게이지와 무선 데이터 송신 장치

이 논문에서는 스킬소음의 가진력인 횡방향 마찰

Table 1 Input and output parameters of HSTR

Input parameters	Rail roller RPM
	Normal load
	Yaw angle
	RPM difference
Output parameters	Lateral force
	Squeal noise

력을 측정하는 방법으로 스트레인 게이지를 사용하여 차륜의 반경방향 굽힘량을 측정하고, 이를 통해 마찰력을 예측했다. 레일 롤러의 형상적 특징과 굽힘에 대한 민감도와 부착 용의성을 고려하여 스트레인 게이지를 장착했다.

일반적으로 스트레인 게이지의 저항 변화를 전기적으로 인지하기 위해서 휘트스톤브릿지(wheatstone bridge)를 사용한다. 다양한 휘트스톤브릿지의 종류 중 굽힘에 민감한 half-wheatstone bridge를 사용했다.

Fig. 3은 적절한 스트레인 게이지의 부착 위치를 선정하기 위해 수행한 유한요소해석 결과이다. 접촉이 발생하는 지점에 횡방향 힘(350N)을 적용하여 반경 변화에 따른 변형률을 살펴보았다. 세로축은 반경방향의 변형률 값을 나타내며, 변형률은 매우 작기 때문에 $\mu\varepsilon(10^{-6}\varepsilon)$으로 표기 하였다. 가로축은 접촉이 발생하는 표면에서 레일 롤러 중심축 방향으로의 깊이를 나타낸다. 해석 결과 횡방향 힘이 작용할 때 레일 롤러 중심부로 갈수록 큰 변형률을 산출하는 것을 알 수 있으나, 스트레인 게이지의 부착 용이성을 위해서 중심으로부터 일정거리 떨어진 위치에 게이지를 부착했다 Fig. 3에서 삼각형으로 표시된 부분은 실제 스트레인 게이지를 부착한 위치로서 횡방향 힘에 대한 민감도가 상대적으로 높고 부착에 대한 어려움도 적기 때문에 게이지 부착위치는 적절하다고 판단했다.

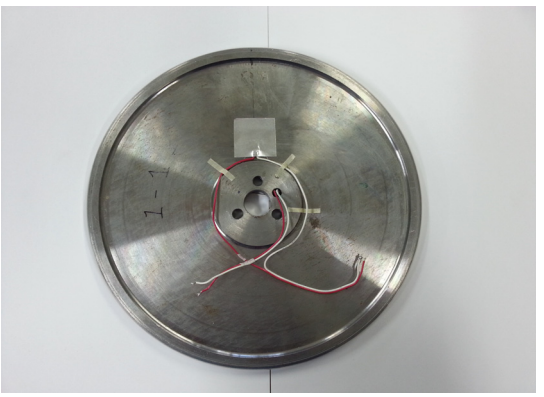


Fig. 2 A rail roller attached with strain gauges

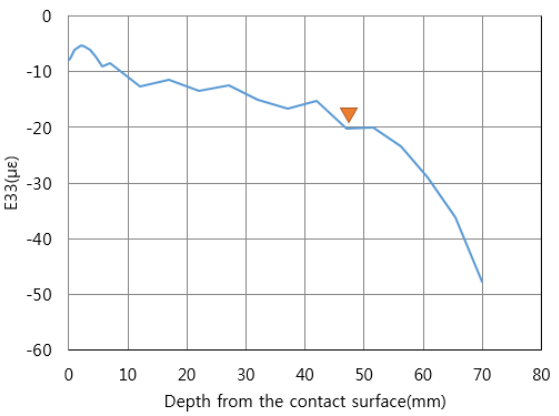


Fig. 3 Strain value along the depth from contact surface by the lateral force(350 N) near contact region

HSTR의 데이터 획득 과정을 설명하면 다음과 같다. 첫 단계로 휘트스톤브릿지의 출력 신호를 Op-amp로 증폭시켜주고, 증폭된 데이터를 AD변환을 통해 디지털화한다. 끝으로 디지털 데이터를 MCU(micro controller unit)와 bluetooth를 통해 PC로 전송하였다.

회전하는 레일 롤러에 부착된 스트레인 게이지 데이터를 획득하는 방식으로 슬립링을 사용하는 방식이 있으나 슬립링 사용의 경우 접촉 단자의 저항, 노이즈와 같은 문제점이 발생할 가능성이 있기에 무선으로 데이터를 전송 받는 장치를 설계하였다. 이 무선데이터송신장치에는 wheatstone bridge 구성 요소, Op-amp, ADC, MCU로서 8bit 연산 유닛인 Atmega328P-AU가 장착되어 있고, 마지막으로 PC와의 통신을 위한 무선 송신 장치로서 bluetooth 모듈까지 Fig. 4와 같이 한 기판에 설계하였다.

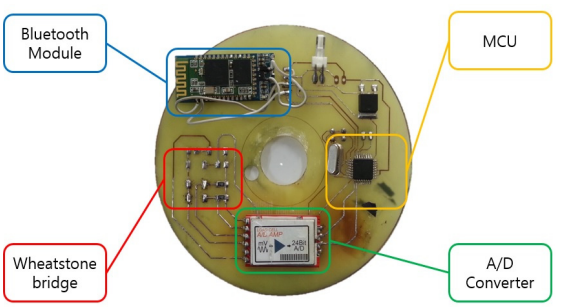


Fig. 4 A rotating data logging equipment which is composed of Wheatstone bridge, Op-amp, AD converter, MCU and bluetooth module

3. 예비 실험

3.1 데이터 처리 과정

PC로 전송된 데이터에서 원하는 데이터를 추출하기 위해서는 두 가지 과정이 필요하다.

(1) 오류 데이터

PC로 전송된 데이터에는 전기적 신호의 오류, 데이터 컨버팅의 샘플링 타임의 혼선으로 간혹 오류 데이터가 포함되어 있다. 이는 점차적으로 변화하는 데이터 추세에서 상당히 동떨어져 있기에 확연하게 구분할 수 있다. 이러한 오류 데이터를 없애기 위해 입력된 상위, 하위 값의 사이 데이터만 추출하는 프로그램을 제작하였다.

(2) Peak값 선택

레일롤러 전체에 스트레인 게이지가 부착된 것이 아니므로, 스트레인 게이지를 통해서 연속적으로 횡력을 측정하는 것이 아닌 수직력의 작용 방향과 일치하는 레일 롤러의 12시 지점에서의 값이 레일에 작용하는 횡력의 추정치가 된다. 이를 Fig. 5와 같이 한 데이터의 인근 값을 비교하여 데이터가 peak에 위치해 있으면 추출하여 저장하는 프로그램을 제작하였다.

3.2 변형률 – 횡력의 실험 관계식 도출

실험에 사용하는 레일 롤러에 대해 스트레인 변형량과 횡력에 대한 관계식을 구하기 위해 Fig. 6과 같이 교정용 기구부를 제작하였다.

볼트를 통해 레일 롤러의 횡방향으로 횡력을 가해주고, 횡력의 크기는 볼트와 롤러 사이에 부착된 로드셀을 통해 측정했다. 횡력을 조금씩 증가시키면서 PC로 전송되는 스트레인 게이지 데이터를 기록하여 Fig. 7과 같이 횡력에 따른 스트레인 게이지로 표현 후 두 변수 사이의 관계식을 최소자승법으로 구하였다.

$$F_2 = -0.0000034SD^2 + 0.04777SD + 1206 \qquad (1)$$

위 식에서 SD는 AD변환된 스트레인 데이터, F_2는 횡력을 의미한다.

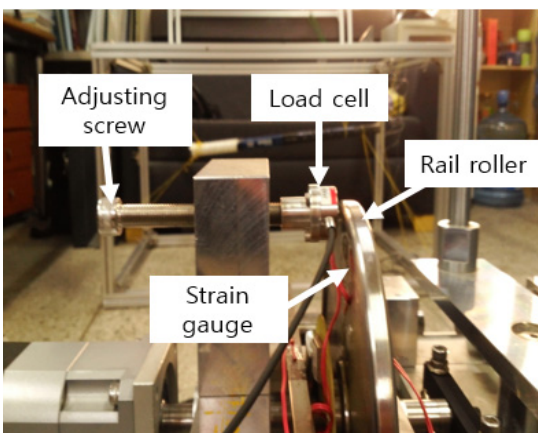


Fig. 6 Experimental jig for measuring lateral force on rail roller

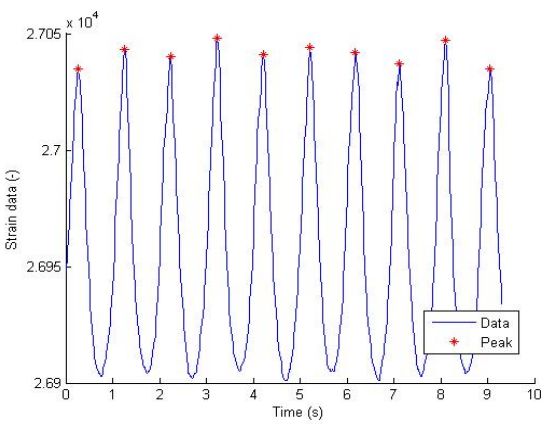


Fig. 5 Data processing for peak selection

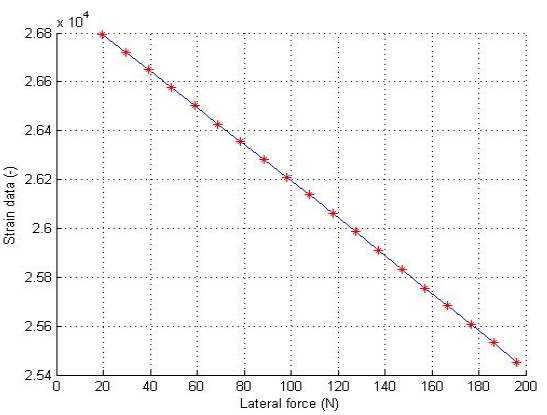


Fig. 7 The calibration chart for lateral force with strain data

4. 스킬소음 실험 결과 및 분석

4.1 스킬 발생 실험에서의 횡방향 크리피지와 크립력 관계 그래프 도출

(1) 횡방향 크리피지(γ_2)의 정의

차륜이 레일 위를 구를 때 접촉면에서의 차륜 롤러의 횡방향 속도(V_2^w)와 레일 롤러의 횡방향 속도(V_2^r) 차이가 발생한다. 이 속도 차이(미끄러짐 속도)를 대차의 주행 속도(V)로 나눈 값을 크리피지라 정의한다. 실제 헌팅과 같이 횡방향 움직임이 발생하는 경우, 정확한 횡방향 크리피지를 구하기는 매우 어렵다. 따라서 요각(ψ)에 따라 크리피지가 정해지도록 횡방향에 구속 조건을 주어 실험을 수행하였다. r_W는 차륜의 반지름, ω_W는 각속도를 나타낼 때, 크리피지와 요각의 관계는 다음 식을 통해 표시된다. 즉, 횡방향 미끄러짐인 크리피지를 요각으로 표현할 수 있다.

$$\gamma_2 = \frac{V_2^W - V_2^r}{V} = \frac{r_W \omega_W \tan\psi - 0}{V} \approx \tan\psi \qquad (2)$$

Table 2 Selected input parameters for generating squeal noise

Normal load(N)	117
Rail roller speed(RPM)	50
Yaw angle(˚)	0 : 0.1 : 1.4

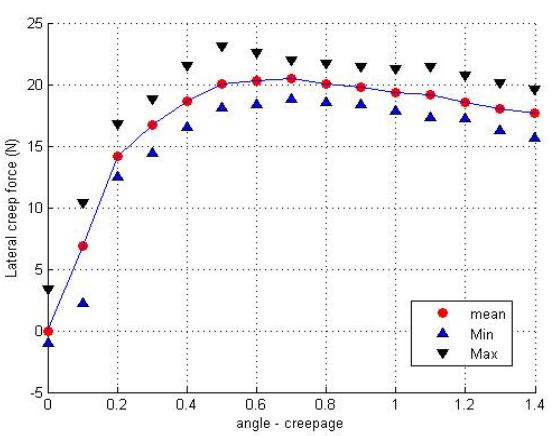


Fig. 8 The lateral force with respect to creepage value

(2) 스킬소음 실험

이 HSTR 장치의 스킬소음이 발생하는 조건을 찾고, 크리피지 값, 횡방향 크립력의 변화를 보고자 하였다. 실험에 설정된 변수는 Table 2와 같다. 크리피지에 해당하는 요각의 증가에 따라 횡방향 크립력의 결과는 Fig. 8과 같다. 그래프에서 요각이 0.7˚보다 큰 영역에서 음의 기울기를 가지는 것을 알 수 있다. 실험에서 스킬소음은 요각이 0.5˚~0.6˚ 가량부터 발생하였는데, 이는 여러 환경 변수로 인해 0.5˚부터 부분적으로 음의 기울기를 가지는 구간이 존재함으로 추정된다.

4.2 유한요소 해석과 스킬실험에서의 횡방향 크리피지와 크립력 관계 결과 비교

HSTR 모델에 의한 4.1절의 실험 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여, 실험조건을 모사하는 유한요소 모델을 작성하여 횡방향 크리피지 대 점착계수 곡선을 추출하였다. 유한요소 해석에서 사용된 소재의 물성자료는 Table 3과 같다.

해석단계는 크게 두 단계로 구성하였다. 첫 번째 단계에서는 차륜과 레일 롤러 사이에 60 N의 수직력이 작용하고, 두 번째 단계에서는 레일 롤러가 Y축을 기준, 반시계 방향으로 약 90˚ 회전시켰다. 두 롤러에 하중 및 경계조건을 적용하기 위하여 두 롤러의 중앙에 기준점(reference point, RP)를 생성하여 롤러 중심 중공부와 운동학적 연결구속(kinematics coupling)을 설정하였다. 또한 요각에 따른 횡방향 크립힘의 변화를 추출하기 위하여 차륜의

Table 3 Material properties of wheel and rail roller

Material	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
SM45C	200	0.29	620	690

Table 4 Fixed degrees of freedom of FE model for squeal noise analysis

Step	Wheel reference point	Rail reference point
1	Y, Z, Θ_X, Θ_Y, Θ_Z	X, Y, Z, Θ_X, Θ_Y, Θ_Z
2	Y, Z, Θ_X, Θ_Z	X, Y, Z, Θ_X, Θ_Z

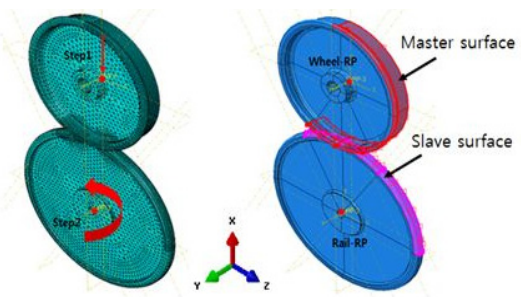
기준점에 국부 좌표계를 설정하였다. 유한요소 모델에서 적용한 경계조건은 Table 4에서 보여준다.

첫 번째 단계에서 차륜에 수직힘(-X방향)을 적용하기 때문에 차륜의 기준점(wheel-RP) 의 X변위 자유도를 제외한 나머지 자유도를 구속하였다. 두 번째 단계에서 레일 롤러를 회전하고, 두 롤러간의 마찰에 의하여 차륜이 같이 회전하기 때문에 Y축 회전 자유도를 추가적으로 풀어 주었다. 유한요소는 사면체 요소(C3D4)를 사용하였으며, 차륜에 37,760개, 레일 롤러에 32,184개의 요소를 사용하여 모델링을 작성하였다. 차륜과 레일 간의 접촉영역에서의 정확한 마찰력을 예측하기 위하여 접촉영역에 500 μm 크기의 정밀 격자를 구성하였다. 유한요소 해석은 상용 프로그램 ABAQUS를 사용하였다.

이 유한요소 모델의 마찰 특성은 다음과 같다. Fig. 9의 (b)에서 차륜의 접촉 예상 영역을 주 표면(master surface)으로 설정하고, 레일의 접촉 예상 영역을 보조 표면(slave surface)를 설정하였다. 두 표면의 접촉조건은 면 대 면 접촉으로 설정하였으며, 유한 미끄럼(finite sliding)이 가능하도록 모델을 구성하였다. 마찰을 정의하는 데에는 크게 수직방향 거동과 접선방향 거동을 설정한다. 수직방향 거동은 수치적 문제를 감소시키기 위해 유연체(flexibilities)를 사용하는 페널티(penalty)법을 적용하였다. 접선방향 거동은 차륜과 레일 롤러 사이에 페널티 법을 적용하였다. 접촉면 내에서 마찰계수는 스킬 실험 결과를 참고하여 0.35로 설정하였다.

Fig. 10은 레일 롤러 중앙에 위치한 기준점에서 요각에 따라 횡방향(Y) 크립력을 출력한 것이다. 레일 롤러 기준점에서 출력된 힘은 접촉면에서의 횡방향 크립력과 동일하다고 생각할 수 있으며, 따라서 구름 접촉 문제에서 요각이 증가함에 따라서 측면방향 크립력이 증가하다가 임계값 이후에 수렴하는 것을 알 수 있다. 모든 경우에 대하여 레일 롤러가 90도 회전할 때 크립력은 일정한 값으로 거의 수렴하며, 이 값에 수직력을 나누어 줌으로써 점착계수를 구할 수 있다. 요각이 0.4°일 경우, 쿨롱 최대 정지 마찰력과 동일한 값으로 수렴하며, 요각이 0.4° 보다 더 커질 경우, 최댓값으로 더 빨리 수렴함을 알 수 있다. 이것은 "포화(saturated)" 상태를 나타낸다.

Fig. 11은 점착계수 대 요각의 관계를 스킬 실험과 해석 결과를 비교하여 보여준다. 점착계수는 횡방향 크립힘을 적용한 수직하중으로 나누어 준 값이다. 실험 결과에 따르면 스킬소음은 요각이 0.5° 이상일 경우에서 발생하였으며, 해석 모델의 경우 요각이 증가함에 따라 점착계수가 증가하다가 요각이



(a) FE Model (b) Friction property

Fig. 9 (a) FE model and (b) frictional surfaces for 3D rolling contact analysis

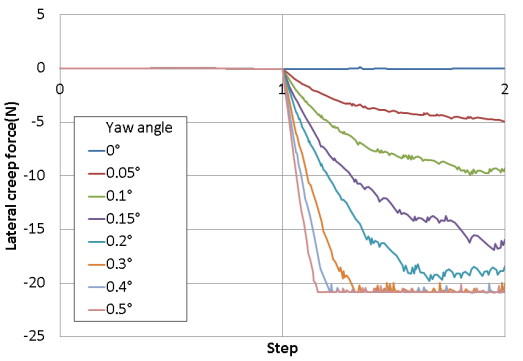


Fig. 10 Lateral creep force variation with respect to yaw angle calculated by FEM

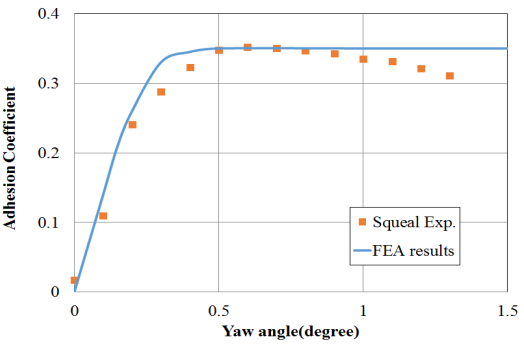


Fig. 11 The comparison of experiment and FEA results for adhesion coefficient vs. yaw angle data

0.4°~0.5°일 때 최대 점착계수 값을 가진다. 일반적으로 마찰특성 곡선에서 음의 기울기를 가질 경우, 스킬소음이 발생한다고 말하지만, 이 해석모델은 정지-마찰계수만 적용하여 해석을 수행하였기 때문에 마찰특성 곡선의 음의 기울기가 나타나지 않는다. 하지만 해석 모델에 정지-운동 마찰계수와 속도 의존 마찰법칙을 적용을 한다면, 마찰특성 곡선의 음의 기울기를 재현할 수 있을 것으로 판단된다. 이것에 대한 내용은 앞으로 계속 진행할 예정이다. 스킬 해석 결과에 따르면 스킬소음은 요각이 약 0.4°~0.5° 이상일 경우 발생한다고 예측을 할 수 있으며, 이는 스킬소음이 요각이 약 0.5° 이상일 때 발생하는 HSTR 모델의 스킬 실험결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서 스킬소음이 발생하는 조건에 대하여 HSTR 스킬실험 자료를 해석적으로 검증하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4.3 스킬소음 주파수와 DPM 특성 비교

(1) 스킬소음 실험

HSTR 장치의 입력 값을 Table 2와 같이 동일한 수직 하중, 레일롤러 운행 RPM으로 설정하고 차륜의 요각은 1°로 고정한 후, 차륜과 레일의 접촉점으로부터 30 cm 떨어진 지점에서 마이크로폰 이용하여 음압을 측정하였다. 음향 실험에서 사용된 장비 구성은 Table 5에 나타내었다. 측정된 스킬소음을 Fig. 12에 나타내었으며, 1,050 Hz, 1,990 Hz, 2,920 Hz, 3,980 Hz 주파수대역에서 스킬소음이 발생하였다. 발생된 소음은 약 1 kHz 간격으로 존재함을 알 수 있다.

Table 5 Experimental equipments for squeal noise and DPM measurement

Experimental Equipment	Specifications
Squeal Noise measurement	
Front-end	SCADAS III
Microphone	AVM MI-17
DPM measurement	
Front-end	SCADAS III
Impact hammer	B&K 8206
Accelerometer	B&K 4394

(2) 차륜/레일의 진동실험 및 스킬소음 특성과 비교

스킬소음을 발생시키는 차륜과 레일의 진동 특성을 파악하기 위해서 차륜과 레일롤러의 접촉점의 드라이빙 포인트 모빌리티(DPM: driving point mobility)를 진동실험으로 측정하였고, 작동 시 발생하는 스킬소음의 주요 주파수 대역과 비교하였다.

DPM 실험은 차륜과 레일이 정지되어 있는 상태에서 차륜과 레일 접촉점 부근에서 수행하였다. Fig. 13과 같이 가속도계를 차륜과 레일에 각각 부착하고 차륜과 레일의 반대편에서 가진 하였다.

차륜과 레일의 측정된 DPM 결과를 Fig. 14에 나타내었으며, DPM의 특성인 반공진점(anti-resonances)이 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다. 2 kHz 이하 주파수 대역에서는 차륜과 레일의 주파수 응답특성이 유사하게 나타나지만, 2 kHz 이상의 주파수 대역에서는 각각의 고유의 특성이 발생한다.

그 이유는 2 kHz 이하의 주파수 대역에서는 접촉해 있는 차륜과 레일의 경계조건이 큰 영향을 미치나, 그 이상의 주파수 대역에서는 경계조건 보다는 차륜과 레일롤러의 고유 특성이 지배하는 것으로 생각된다.

DPM과 스킬소음은 특정 주파수 대역(1,990 Hz, 3,980 Hz)에서는 일치하나, 다른 주파수 대역에서 발생하는 소음은 DPM과 연관성이 작아 보인다. DPM 진동 실험은 차륜과 레일이 정지 상태에서 수행하였기 때문에, 접촉면에서 점착-미끄럼짐 현상으로 발생하는 대표적 비선형, 과도 특성인 스킬소음의

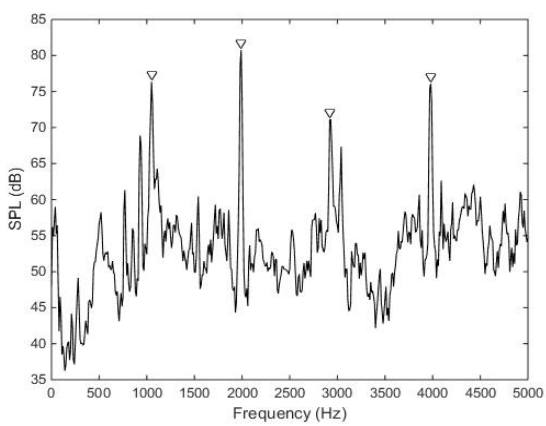


Fig. 12 Measurement results of squeal noise for HSTR experiment

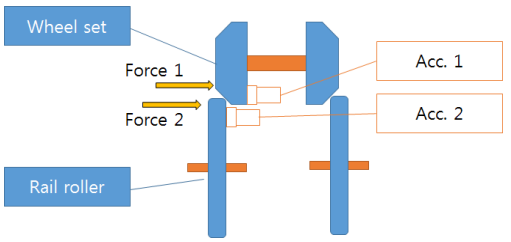


Fig. 13 Experimental setup for measuring the driving point mobility of the wheel and rail roller

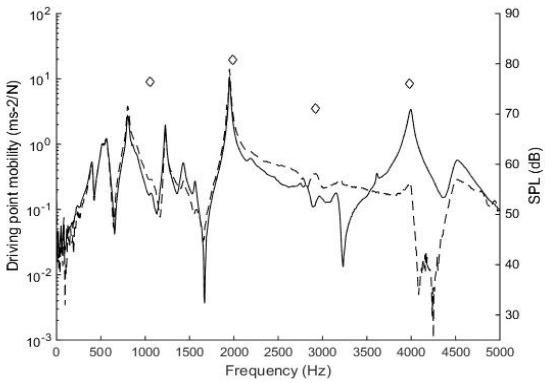


Fig. 14 Measurement results of driving point mobility for wheel and rail roller(solid: rail roller, dashed: wheel, ◇ : SPL and frequencies of squeal noise)

가진력을 설명하기에는 어려움이 있다. 스킬소음의 현상을 규명하기 위해서는 발생 접촉력의 주파수영역에서의 측정 및 분석이 필요하다.

5. 결 론

HSTR은 스킬소음을 연구하기 위해 실제 차량을 대상으로 연구하기에는 많은 제약점이 있으므로 한정된 공간에서 실험을 가능하도록 제작되었다. 실제 차량과 유사한 동적 거동을 표현하기 위한 자유도를 부여하였고, 수직 하중, 주행 속도, 요각을 입력변수로 설정함으로서 스킬소음 영향을 연구하고자 하였다.

실험 결과 스킬소음은 차륜의 요각이 0.7° 이상에서 발생하였고, 주요 스킬소음 주파수 대역은 2 kHz이며, 횡 방향 최대 크립력은 약 21 N, 마찰계수는 약 0.35 정도로 측정되었다. 스킬소음의 발생조건과 측정 결과의 타당성을 검증하기 위해서 ABAQUS 접촉모델을 적용한 해석 결과와 HSTR 실험 결과를 비교하여 실험의 타당성을 검증하였다.

차륜과 레일 롤러의 모빌리티는 2 kHz 대역 이하에서는 매우 유사한 특성을 보인다. 이는 레일과 롤러가 접촉되어 해당 주파수 대역에서는 유사하게 움직이기 때문으로 보인다.

스킬소음의 주요 주파수 대역중 특정 주파수 영역은 차륜과 레일의 모빌리티와 유사한 주파수 대역에서 발생한다. 스킬소음의 현상을 규명하기 위해서는 가진력의 주파수 영역에서 측정 및 분석하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

실험에서 얻은 스킬소음이 발생하는 크리피지 구간과 해석을 통해 예측한 구간이 일치함으로 제작한 HSTR 장치가 스킬소음의 발생현상을 파악하는데 신뢰할 수 있는 기구라 사료된다.

후 기

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 철도기술 연구개발사업의 연구비지원(14RTRP-B071509-02-000000), 교육부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2013R1A1A2009130) 및 2013학년도 홍익대학교 학술 연구 진흥비에 의하여 지원에 의해 수행되었습니다.

References

(1) Thompson, D., 2008, Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control, Elsevier, Oxford.

(2) Remington, P., 1987, Wheel/rail Squeal and Impact Noise: What Do We Know? What Don't We Know? Where Do We Go From Here?, J. Sound Vib., Vol. 116, pp. 339~353.

(3) Fingberg, U., 1990, A Model of Wheel-rail Squealing Noise, J. Sound Vib, Vol. 143, pp. 365~377.

(4) Schneider, E., Popp, K. and Irretier, H., 1988, Noise Generation in Railway Wheels due to Rail-wheel Contact Forces, J. Sound Vib., Vol. 120, No. 2, pp. 227~244.

(5) De Beer, G., Janssens, H. A., Kooijman, P. and van Vliet, J., 2000, Curve Squeal of Railbound Vehicles(part 1): Frequency Domain Calculation Model, Proceedings of Inter-noise2000, pp. 1560~1563.

(6) Kang, J., 2009, Linear Stability Analysis of a Rotating Disc Brake for Squeal Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 10, pp. 1092~1098.

(7) Hue, S., Huang, Z., Iwnicki, D., Thompson, J., Jones, C., Xie, G. and Allen, D., 2006, Experimental and Theoretical Investigation of Railway Wheel Squeal, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 221, pp. 59~73.

JiYong Kim received his M.S. degree in Mechanical Engineering from Hongik University in 2014. He is currently working for Hongik University Research Institute of Science and Technology. He is interested in auto control and Noise, vibration and harshness.

Donghyeon Hwang received his M.S. degree in Mechanical Engineering from Hongik University in 2010. He is currently a Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering at Hongik University. He is interested in contact problems on micro and macro scales and durability problems associated with fatigue and fracture.

Jun-heon Lee received his M.S. degree in Mechanical Engineering from Hongik University, Korea in 2013. He is a research engineer at the Hongik university Research Institute for Science & Technology. His research filed is noise and vibration of transportation.

Kwanju Kim is a professor in dept. of mechanical engineering and system design, Hongik University. Research field is NVH issues of transportation.

JaeChul Kim received the doctor's degree in mechanical engineering from the University of Tokyo in 1996. He is currently working for Advanced HSR Research Division of Korea Railroad Research Institute. He is interested in noise and vibration of railroad.