

## 곡선부 스킨소음 발생 메커니즘의 실험적 연구 An Experimental Study of the Curve Squeal Noise

김관주<sup>†</sup> · 박진규\* · 김범수\* · 김재철\*\*

Kwanju Kim · Jin-Kyu Park · Beom-Soo Kim · Jaechul Kim

**Abstract** This paper presents results from experimental analysis of a friction-driven wheel responsible for generating wheel squeal noise. Squeal noise generating mechanism has been examined under the laboratory condition by the model rig on a small scale. Creep characteristics and squeal noise were observed by changing the possible variables, such as relative velocities and friction coefficients in time- and frequency-domain.

**Keywords** : Squeal Noise, Stick-Slip phenomena, Creepage

**요 지** 철도차량의 차륜과 레일 시스템을 모사한 스킨소음 발생장치를 통해 실험을 수행하여 관련 원리를 실험적으로 증명하고 스킨소음 발생 메커니즘에 대한 체계적인 연구를 수행하였다. 이를 위해 스킨소음 발생 메커니즘 연구를 소음원-전달계-반응계의 단계별로 진행하였다. 또한 차륜과 레일간의 스틱-슬립 운동에 의한 상대속도 또는 미끄러지는 수준과 마찰결과로서 계산되는 크립곡선과 발생 음압을 시간 및 주파수 영역에서 관찰하여 스킨 소음이 발생하는 조건을 살펴보았다.

**주요어** : 스킨소음, 스틱-슬립 현상, 크립

### 1. 서론

#### 1.1 연구의 배경 및 목적

철도차량이 급격한 곡선을 주행할 때 발생하는 ‘깁깁’거리는 소음을 스킨소음이라 한다. 스킨소음에 대한 발생 메커니즘을 파악하기 위한 시도가 계속되고 있으나 아직까지도 재현성 있는 메커니즘을 구현하지는 못하였으며 진동차단기, 도유기, 탄성차륜 등이 해결책으로 제시되었지만 큰 실효성을 거두지 못하고 있다[1]. 일반적으로 알려진 바와 같이 스킨소음은 곡률반경을 충분히 크게 함으로서 제거할 수 있다. 그러나 이는 근본적인 해결책이 되지 못하며, 인구 밀집 지역에 불가피하게 설치되어 있는 곡선 철로구간의 고속 주행시 특정 고주파수 영역에서 집중적으로 발생하는 스킨소음은 환경에 나쁜 영향을 미치고 있다.

본 연구에서는 레일 위에 접촉하고 있는 차륜의 횡방향

크립에 의해 스킨소음이 발생한다는 이론을 전제로 하여 차륜과 레일의 접촉 시스템을 모사한 스킨소음 발생 장치를 제작하고 재현성 있는 실험을 수행하여 크립과 마찰 조건 등을 계산 및 측정한다. 이를 통해 간헐적으로 발생하는 스킨소음의 발생조건과 그 특성을 파악하고 스킨소음 발생 메커니즘을 구현한다.

#### 1.2 연구 수행 범위

연구에 필요한 실험과 해석의 내용을 소음원(진동원)-전달계-반응계의 순서로 정리하여 Fig. 1에 나타내었다.

소음원 부분에서는 대상 모델에 작용하는 수직하중, 구동 각도(rolling angle), 운행 속도, 표면 거칠기 등의 여러 운행 조건에 따른 차륜 횡방향의 마찰력을 구한다. 두 탄성체의 접촉 이론에 근거하여 레일과 차륜의 접촉모델의 운동 특성으로 나타나는 스틱-슬립(stick-slip)과 차륜과 레일 두 탄성체의 상대속도의 비로서 크립(creep) 속도를 계산한다. 전달계 부분에서는 대상 차륜의 횡방향 동특성을 실험과 해석을 통하여 비교, 검증한다. 반응계에서는 그 결과로서 스킨소음의 음압을 측정하여 분별적인 마찰조건에 따른 특성을 통해 스킨소음 발생 메커니즘을 알아본다.

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 교수  
E-mail : kwanju@hongik.ac.kr  
TEL : (02)320-1113 FAX : (02)320-1113

\* 홍익대학교 기계공학과 대학원

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원

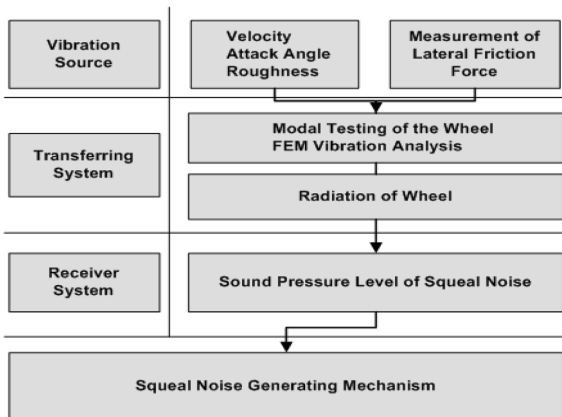


Fig. 1. Overview of investigating squeal noise mechanism

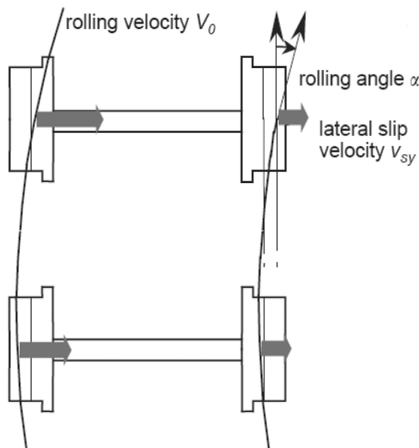


Fig. 2. The lateral slip grows with the rolling angle

## 2. 철도차량 선회시 차륜과 레일간 운동

### 2.1 스틱-슬립 운동과 자려진동

철도차량이 곡선구간을 운행할 때 차륜이 레일 위에서 횡 방향으로 크게 미끄러지는 현상이 발생한다. 이는 Fig. 2와 같이 둘 이상의 일체 평행 차축을 가진 차량이 곡선구간을 운행할 때, 다른 곡선반경을 가지기 때문이다.

스킬소음 발생의 근본적 원인은 차륜이 곡선 레일을 주행하는 경우의 차륜과 레일의 횡방향 운동으로서, 차륜이 레일 위에서 스틱-슬립 운동을 하기 때문이다. 슬립 단계에서는 횡방향 운동 방정식의 음의 값을 갖는 점성항(negative damping)이 나타나게 되며 차륜의 불안정한 운동으로 이어진다.

간단한 자려 진동의 모델로 가진이 속도나 혹은 속도와 변위의 조합으로써 표현할 수 있을 경우를 들 수 있다. 예컨대, 1자유도계 시스템에 이런 형식의 힘이 작용하는 경우를 아래의 식과 같이 표현한다.

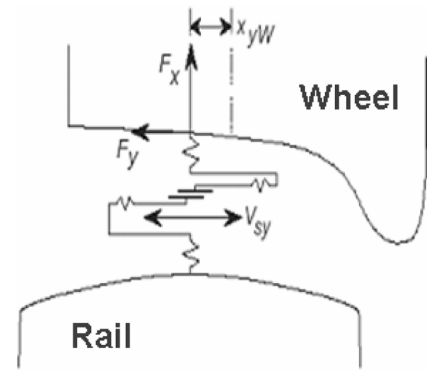


Fig. 3. The contact model of the wheel and the rail

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

$m$ 은 질량,  $c$ 는 댐핑,  $k$ 는 강성,  $F$ 는 가진력,  $x$ 는 응답을 나타낸다. 식 (1)에서  $F(x)$ 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[2].

### 2.2 횡방향 마찰력-크립 측정

#### 2.2.1 횡방향 마찰력 측정

Fig. 3은 횡방향의 미끄러짐 속도  $v_{sy}$ 로 인해 횡방향의 마찰력  $F_y$ 가 차륜을 가진하게 되는 개략적인 차륜과 레일의 접촉 모델이다.

위의 현상을 철도차량의 차륜과 레일의 접촉 시스템에 적용하기 위해 식 (2)와 식 (3)을 식 (1)에 대입한다.

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

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

가진력  $F$ 는 횡방향 마찰력, 강성  $k$ 는 본래의 강성  $\hat{k}$ 에 차륜부의 수직하중에 의한 접촉강성  $k_f$ 을 더한 값으로 나타낼 수 있다[3]. 마찰계수는 스틱-슬립 운동에서 정마찰과 동마찰 사이에서 반복적인 변화를 겪는다. 또한 레일에 대한 차륜의 횡방향 상대속도가 증가하게 되면 마찰력은 일반적인 동마찰력 보다 더욱 감소하는 경향이 있다.

Fig. 4와 같이 스킨소음 발생장치의 차륜과 연성된 플렉시블 암에 부착된 스트레인게이지로 부터 굽힘 강성(본래의 강성)과 마찰강성 측정을 하여 실험조건에 따른 마찰력을 구할 수 있도록 하였다. 플렉시블 암에 의한 차륜부의 변형 진폭은 스킨소음 발생장치에서 원판 레일이 일정한 속도를 이루고 차륜의 진동이 임계점에 도달하면 안정한 상태를 이룬다. 이 때, 스킨소음 발생장치에서 차륜에 작용하는 마찰력은 플렉시블 암의 굽힘에 대한 탄성력과 평형을

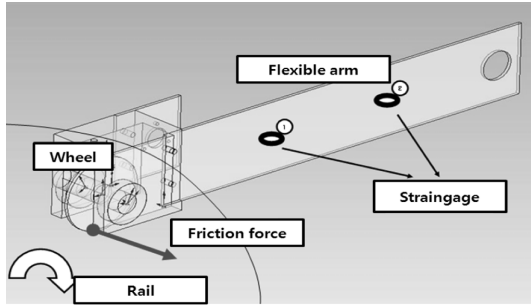


Fig. 4. The drawing of measuring device for lateral friction force of the wheel

이루게 되어, 차륜부의 동마찰력을 정형파로 근사하여 표현하면 식 (4)와 같다.

$$F_y = \mu N = kB = F_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (4)$$

$B$ 는 정적 평형상태에서 측정된 플렉시블 암의 굽힘력이며,  $F_0$ 는 동적 평형상태의 마찰력이다. 여기서 마찰력과 플렉시블 암의 굽힘력과는 수직하중에 의한 마찰강성에 따라 비례함을 확인하였다. Fig. 5는 스킨소음 발생장치의 실험을 통해 마찰력을 측정한 예로서, 스틱-슬립 운동을 하는 대상 차륜의 마찰력 변화를 보여준다.

### 2.2.2 횡방향 크립 측정

크립은 접촉하고 있는 두 탄성체의 상대속도의 비로서 구해지며, 크립 곡선은 크립에 대한 마찰력 또는 마찰계수 결과로서 나타내어진다. 따라서 각각의 발생 변수에 따른 마찰력을 측정하며, 차륜과 레일의 속도를 구해 크립을 계산할 수 있다. 또한 철도차량의 차륜과 레일에서 발생하는 크립은 종방향(longitudinal), 횡방향(lateral), 회전방향(spin)으로 구분이 되는데, 종방향 크립은 차륜을 효과적으로 가진하지 못하며 돌림방향 크립은 차륜의 플렌지(flange)를 가진하여 때때로 스킨소음을 발생시키기도 하지만 이 두 성분은 스킨소음 발생의 근본적인 요인으로 보기 어렵다. 이 중 횡방향 크립만이 스킨소음 발생에 지배적으로 작용한다.

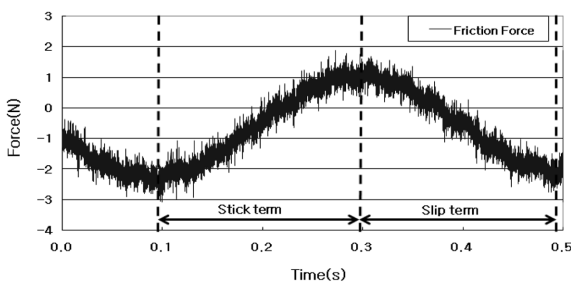


Fig. 5. Measurement result of the friction force which shows stick-slip behavior

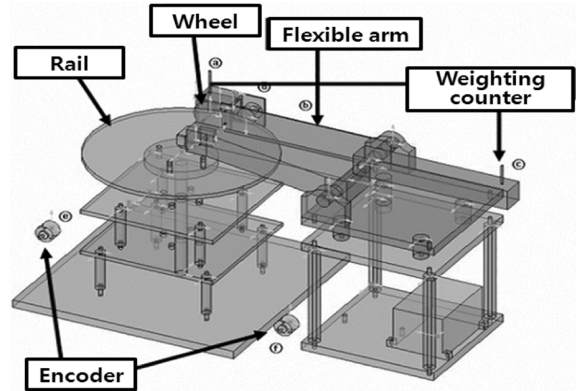


Fig. 6. The schematic picture of the model rig for simulating squeal noise

Table 1. List of measuring sensors

Sensors & Devices	Measurements	Variables
Weighting counter	normal force	creep force friction coefficient
Flexible arm	bending stiffness	
Strain gauge	strain	lateral creep
Encoder 1	wheel velocity	
Encoder 2	rail velocity	
Encoder 3	attack angle	sound pressure
Microphone (B&K 4189)	sound pressure (A meter away from the wheel along the drive shaft)	

따라서 실험은 횡방향 크립만을 측정한다.

스킨소음 발생장치를 이용하여 횡방향 크립과 발생하는 음압을 측정하기 위한 실험 장비와 센서의 설치는 아래의 Fig. 6과 같다. 또한 각각의 센서와 그를 통한 측정항목은 Table 1과 같다.

크립은 접촉한 두 물체의 상대속도에 의해 계산되어진다. 또한 평균 구름 속도로 나누어지므로 무차원이다[4].

$$s = \frac{\overrightarrow{\delta V_2}}{\overrightarrow{V_1}} = \frac{V_2^* \tan \phi}{V_1} \quad (V_1 > V_2) \quad (5)$$

$s$ 는 횡방향 크립,  $\overrightarrow{\delta V_2}$ 는 크립 속도이다[5].  $s$ 는 차륜의 속도  $V_2$ 와 레일의 속도  $V_1$ 의 크기의 비로 나타낼 수 있다.  $\phi$ 는 구동 각도이며, 방향과 크기의 비에 따라 삼각함수를 적용한다. 실제 철도차량에서 레일 속도는 차륜의 속도를 넘을 수 없으므로 sine 항으로 이뤄지지만 스킨소음 발생 장치에서 레일의 구동에 따라 차륜이 구동하므로 레일의 속도가 더 높다. 따라서 tangent의 비를 사용함으로써 크립을 구할 수 있다. 단,  $V_1$ 은 정상상태로 가정하여 레일의 구름 속도로 정한다.

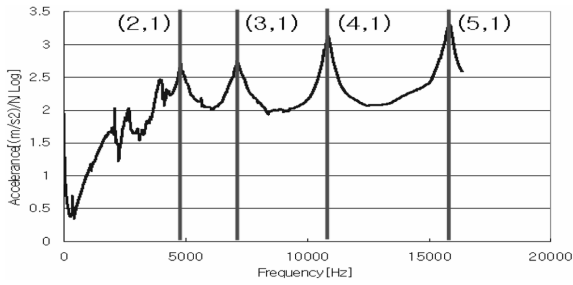


Fig. 7. the accelerance frequency function of the wheel in lateral direction

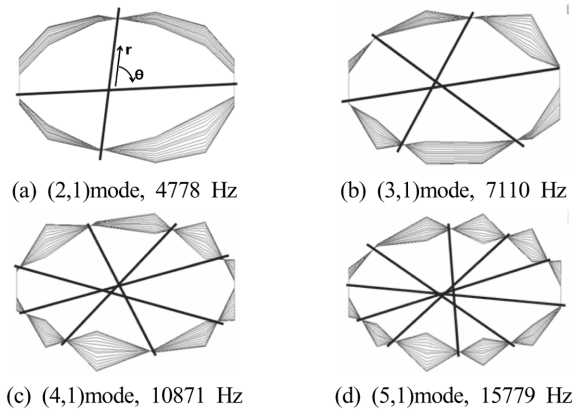


Fig. 8. Fundamental mode shapes of the wheel

### 3. 실험 결과 정리

#### 3.1 대상 차량의 모드시험

전달계로서의 대상 차량의 동특성을 파악하기 위해 차량의 횡방향에 대한 모드시험을 수행하였으며, 그 가속도 응답 결과는 Fig. 7에 주요 모드의 모드 형상은 각도방향( $\theta$ )과 반경방향( $r$ )의 절선의 수로 표현하여 Fig. 8에 나타내었다.

#### 3.2 스틱-슬립 운동과 발생음압

스티크-슬립 운동에서의 음압을 분류하면, 스킨소음 발생의 특징을 알 수 있다. Fig. 9는 시간 영역에서의 차량의 스틱-슬립 운동과 음압 발생의 크기를 보여준다. 차량에 작용하는 마찰력은 스틱 구간에서 임계점까지 증가되지만 스킨소음을 발생하지 않는다. 슬립 구간에 접어들면서 스킨소음이 발생됨을 확인할 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 스틱-슬립의 각 구간에서의 음압을 1/12 옥타브밴드로 나타낸 결과이다. 스킨소음은 Fig. 8의 슬립구간에서 그리고 중심주파수 7288Hz의 스펙트럼에서 나타나며, 대상 차량의 (3,1) 굽힘 모드와 일치한다.

위의 결과를 종합하면, 스킨소음은 슬립구간에서 일어난

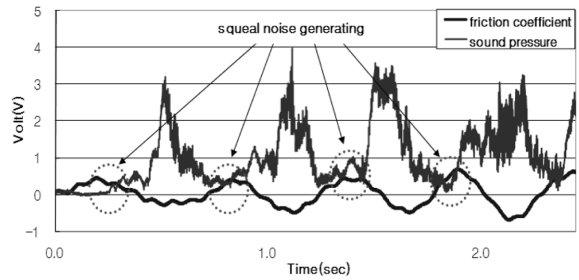


Fig. 9. Measurement of the value of sound pressure and friction in the stick-slip cycles

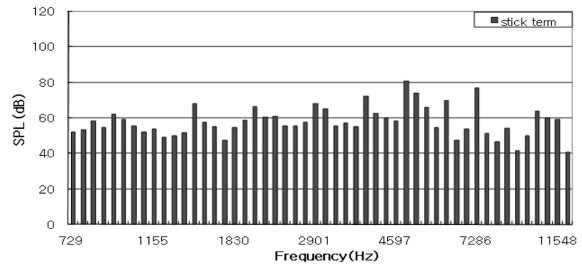


Fig. 10. Measurement of sound pressure spectrum in stick period

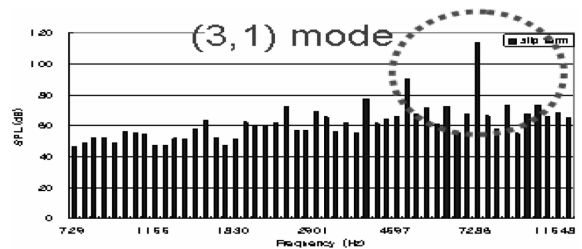


Fig. 11. Measurement of sound pressure spectrum in slip period

Table 2. Variables and rates of experiments in each tests

Level	Driving velocity (rpm)	Attack angle (degree)	Weighting (N)	Roughness
low	700	10	10	smooth
standard	900	15	20	medium
high	1100	20	30	rough

다. 이때, 차량에 가진으로 작용하는 마찰력은 감소하지만 차량의 응답은 더욱 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이를 통해 차량과 레일의 상대속도의 발생이 시스템을 음의 감쇠(negative damping)가 되도록 하며, 불안정하게 만들게 되고 결국 스킨소음을 발생 시키는 것을 알 수 있다.

#### 3.3 크립과 발생음압의 측정 결과

각 마찰력 인자들의 스킨소음 발생에 미치는 특성 및 영향을 알아보기 위해 대조군과 실험군을 설정하였다. 실험군은 마찰변수의 각 항목으로서 구동 속도, 구동 각도, 수직 하중, 거칠기 등으로 정하였으며, 각 변수의 정도(rate)는

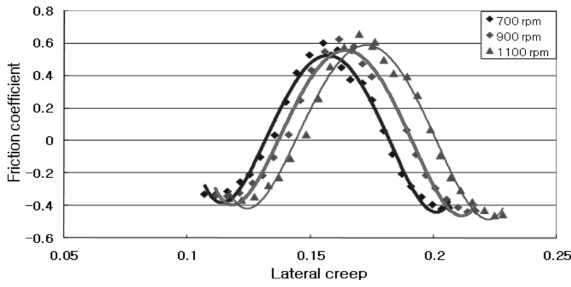


Fig. 12. Results of creep curves depending on driving velocity changes

Table 3. Results of lateral creep, friction coefficient and sound pressure by changing driving velocity

variable	Driving velocity					
	700 rpm		900 rpm		1100 rpm	
level	700 rpm		900 rpm		1100 rpm	
range	max	min	max	min	max	min
s	0.21	0.16	0.22	0.16	0.23	0.17
$\mu$	0.6	-0.3	0.65	-0.3	0.7	-0.36
term	stick	slip	stick	slip	stick	slip
SPL in band of squeal	60 dB	100	70	110	80	115

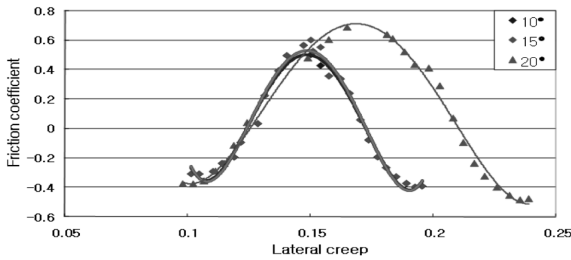


Fig. 13. Results of creep curves by changing attack angle

Table 4. Results of lateral creep, friction coefficient and sound pressure by changing attack angle

variable	Attack angle					
	10 °		15 °		20 °	
level	10 °		15 °		20 °	
range	max	min	max	min	max	min
s	0.2	0.15	0.2	0.15	0.24	0.18
$\mu$	0.6	-0.3	0.6	-0.3	0.7	-0.4
term	stick	slip	stick	slip	stick	slip
SPL in band of squeal	78 dB	105	80	115	90	115

Table 2와 같이 설정하여 분류하였다. 대조군은 기준값을 적용하고 실험군은 크기와 정도를 바꾸어 실험하였다.

3.3.1 구동속도(Driving velocity)에 따른 결과

차륜과 레일의 구동속도를 실험군으로 설정하여 각 경우에 따른 크립 곡선과 음압결과는 Fig. 12와 Table 3과 같다.

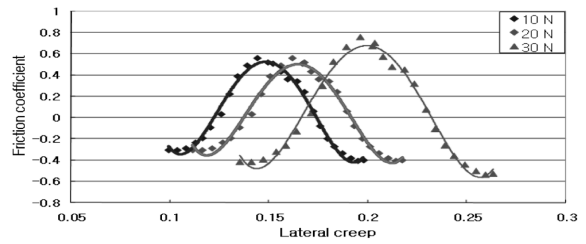


Fig. 14. Results of creep curves depending on loading force change

Table 5. Results of lateral creep, friction coefficient and sound pressure by changing loading force

variable	Loading force					
	700 rpm		900 rpm		1100 rpm	
level	700 rpm		900 rpm		1100 rpm	
range	max	min	max	min	max	min
s	0.2	0.15	0.22	0.16	0.26	0.2
$\mu$	0.6	-0.3	0.65	-0.3	0.8	-0.4
term	stick	slip	stick	slip	stick	slip
SPL in band of squeal	75 dB	105	80	115	82	115

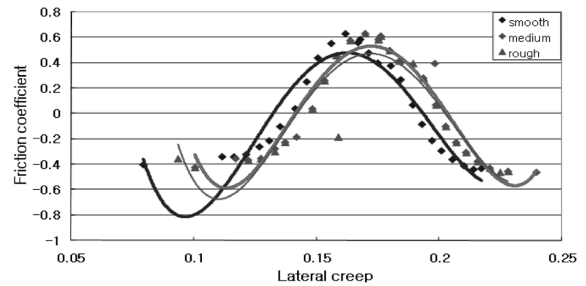


Fig. 15. Results of creep curves depending on roughness change

Table 6. Results of lateral creep, friction coefficient and sound pressure by changing roughness

variable	Driving velocity					
	700 rpm		900 rpm		1100 rpm	
level	700 rpm		900 rpm		1100 rpm	
range	max	min	max	min	max	min
s	0.22	0.16	0.25	0.18	0.23	0.17
$\mu$	0.65	-0.4	0.65	-0.4	0.65	-0.5
term	stick	slip	stick	slip	stick	slip
SPL in band of squeal	80 dB	100	80	105	78	105

3.3.2 구동각도(Attack angle)에 따른 결과

차륜과 레일의 구동각도를 실험군으로 설정하여 각 경우에 따른 크립 곡선과 음압결과는 Fig. 13과 Table 4와 같다.

3.3.3 수직하중(Loading force)에 따른 결과

차륜과 가해지는 수직하중을 실험군으로 설정하여 각 경

우에 따른 크립 곡선과 음압결과는 Fig. 14와 Table 5와 같다.

### 3.3.4 표면거칠기(Roughness)에 따른 결과

레일의 표면 거칠기를 실험군으로 설정하여 각 경우에 따른 크립 곡선과 음압결과는 Fig. 15와 Table 6과 같다.

### 3.3.5 결과 종합

위의 각 결과들에서 마찰조건과 그 레벨에 의한 크립 곡선의 이동을 볼 수 있다. 그 중 운행 속도에 의한 크립 곡선의 이동이 가장 뚜렷이 보인다. 스틱-슬립 한 주기 동안에 마찰계수의 임계치 등은 거의 변함이 없지만 슬립속도의 함수인 크립은 구동속도에 비례하여 증가하기 때문이다. 또한 구동각도, 수직하중에서는 곡선의 이동과 크기의 변화를 볼 수 있는데, 이는 슬립 속도의 증가와 마찰 임계값의 증가를 뜻한다. 수직하중의 경우 대상 차륜과 레일의 접촉 강성의 증가가 마찰 임계값을 높이는 결과를 낳았으며, 구동각도의 경우 각도의 증가에 대하여 *tangent* 비에 따라 크립이 증가하게 되어 구동각도가 20°인 경우에서 일정한 크립의 변화를 나타낸다. 반면 10°와 15°에서는 *tangent* 비의 변화값이 상대적으로 낮아, 플렉시블 암의 스틱-슬립 횡방향 변위와 그에 따른 구동각도의 변화가 초기에 설정된 구동각도의 영향보다 크게 작용한 것으로 사료된다. 그리고 거칠기 조건에서는 그 특징을 분별하기 어려운데, 이는 동일 재질에서는 표면 거칠기에 따라 마찰계수가 변화하지만, 마찰력이 증가한 경우 미끄러짐을 방지하는 측면이 있는 반면에 최대 마찰력인 임계점을 지난 이후에서는 더욱 미끄러지는 복합적인 특성 때문으로 여겨진다. 전체적으로 스킨소음의 음압에서는 각 조건의 증가에 비례적으로 상승하지만 115dB 이상의 증가는 하지 않는데, 이는 대상 차륜의 해당 모드에서 마찰에 의한 구조적인 가진과 그에 따른 진동에는 한계가 있음을 보여준다.

## 4. 결론

재현성 있고 발생 변수를 조절할 수 있는 스킨소음 발생

장치를 개발하여 각각의 마찰 변수 및 경계조건으로부터 발생하는 스킨소음의 음압을 측정하는데까지의 분별적인 실험을 수행하였다. 세부적으로는 시간 도메인에서 스틱-슬립 각 구간의 차륜과 레일 사이의 크립과 마찰계수, 음압 등을 분석하였으며, 스킨소음 발생 메커니즘인 자력진동에 의한 음의 감쇠 특성을 확인하였다. 본 연구의 결과를 통해 스킨소음 발생 메커니즘을 이해하는데 도움이 될 수 있으며 실제 철도차량에서의 스킨소음의 발생 메커니즘의 구현, 곡선부에서의 차량 운행 조건 제시, 스킨소음 저감 또는 제거 대책을 세우는데 있어 기초 자료로 활용될 수 있다. 그러나 효율적인 실험을 위해 제작한 스킨소음 발생장치는 철도차량을 모사한 것이므로, 실제 차량의 조건과는 차이가 분명히 있기 때문에 대상 차륜 등의 물성치와 경계조건의 차이 및 변화하는 환경조건에 주의를 기울여야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 2006년도 홍익대학교 교내연구비와 철도기술연구원 학술연구용역비에 의하여 지원되었습니다. 도와주신 관계자에게 감사함을 표시합니다.

## 참 고 문 헌

1. 김재철, 유원희, 문경호(2000), “방음차륜의 소음진동 저감 효과에 관한 연구”, 한국소음진동공학회지, 제10권, 제4호, pp.629-635.
2. Heckl, M. A. (1999), “Curve Squeal of Train Wheels. Part 1: Mathematical Model for Its Generation,” *Journal of Sound and Vibration*. Vol.229, No.3, pp.669-693.
3. 신기홍(2006), “진동 소음으로 인한 고장분석 및 대책 기술,” 한양대학교 신뢰성분석연구센터.
4. Kooijman, P. P. (2000), “Curve squeal of railbound vehicles, part 2: set-up for measurement of creepage dependent friction coefficient,” *Proceedings of Internoise*, Vol.3, pp.1564-1567.
5. Brunel, J. F. (2003), “Modelling of squeal noise attenuation of ring damped wheels,” *Applied Acoustics*, Vol.65, pp.457-471.

(2008년 1월 30일 논문접수, 2008년 3월 5일 심사완료)