

# 구동과 마찰조건에 따른 차륜의 크립 특성 연구

## A Study of Creep Characteristics by Conditions of Driving and Friction

김범수\* · 김관주\*\* · 박진규\* · 김상수\* · 이찬우\*\*\*

Beom-soo Kim, Kwan-ju Kim, Jin-kyu Park, Sang-soo Kim and Chan-woo Kim

**Key Words** : creep(크립), friction condition(마찰조건), squeal noise(스킬소음)

### ABSTRACT

This paper presents experimental analysis of a friction-driven wheel responsible for generating wheel squeal. Creep and squeal noise generating mechanism are influenced by friction conditions of attack angle, loading force, driving velocity and surface roughness. Squeal noise phenomena has been examined under the laboratory condition by the model rig. Creep characteristics and squeal noise were observed by varying relative velocity of the wheel with respect to the rail and friction coefficient.

### 1. 서론

철도차량의 곡선부 스킨소음의 발생 메커니즘은 여러 나라에서 연구가 이뤄지고 있으며, 현재 발생 원인으로 차륜과 레일 사이의 스틱-슬립 운동이 가장 신빙성 있게 받아들여지고 있다. 특히, 차륜의 횡방향(lateral)에 있어 정 마찰력이 임계(saturation)에 이르면 차륜은 미끄러지기(sliding) 시작하며 스킨소음이 발생한다. 이때 미끄러지는 속도(sliding velocity)에 의존하여 마찰계수가 변화되며 또한 발생하는 음압도 변화하는 특성을 보이고 있다. 즉, 마찰조건에 따른 마찰력의 임계값과 크립 속도에 따라 마찰계수의 변화와 발생하는 스킨소음을 나타낼 수 있다.

이를 이해, 지난 연구에서는 스킨소음 발생장치를 이용하여 스킨소음발생에 대해 소음원-전달계-반응계의 순서로 대상 차륜과 주변 음향공간에 대해 선형적인 실험과 해석을 하였다.<sup>(1)</sup> 또한 시간영역과 주파수영역에서의 상호적인 관찰을 통해, 스킨소음 발생 원인으로, 접촉된 차륜과 레일에서 차륜이 횡방향으로 미끄러질 때 스킨소음이 발생함과 미끄러지는 동안 차륜이 불안정한 음의감쇠를 갖게 됨을 알아보았다.<sup>(2)</sup>

이에 본 논문에서는, 차륜이 레일을 미끄러지는 속도의 함수인 크립과 발생음압의 특징을 분별하기위해, 차륜에

작용하는 마찰 조건을 하중, 구동속도, 구동각(attack angle) 등의 실험변수로 설정하여 실험을 행하였다. 또한 각 마찰 조건에 따른 크립과 마찰계수, 발생 음압의 크기 및 그 변화를 알아보았다.

### 2. 횡방향 크립에 대한 수치적 모델

#### 2.1 Remington의 모델

Remington은 Rudd의 두 탄성체의 접촉이론에 근거하여 직경 190mm 차륜과 760mm 레일의 다이내모를 이용하여 실험하였으며, 실험결과로부터 비선형적인 마찰계수 데이터의 근사식을 구하였다.<sup>(3)</sup>

$$\mu = \mu_0 \frac{\xi}{\xi_0} \exp\left(1 - \frac{\xi}{\xi_0}\right) \tag{1}$$

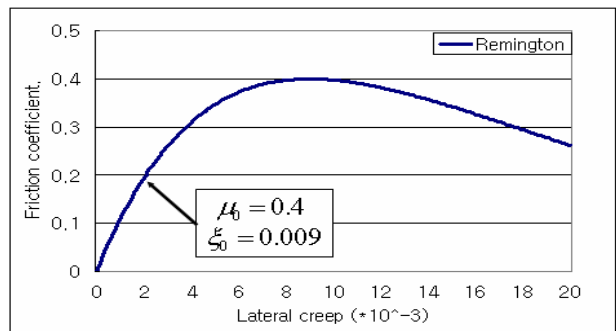


Fig. 1 Measured rolling friction coefficient due to lateral creep by Remington

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

\*\* 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

\*\*\* 철도기술연구원 차량성능연구팀

여기서, 구름 최대 마찰계수( $\mu_0$ )와 슬립속도, 구름속도의 비인 크립계수( $\xi_0$ )는 상수이고 각각 0.4와 0.009를 입력하여 크리피지( $\xi$ )의 변화에 따른 구름 마찰계수( $\mu$ )를 나타낸다. Fig. 1은 식 (1)에 의해 구현된 것이며, 횡방향 크립에 대해 마찰계수가 변화하고 있는데 임계점 이상 즉, 최대 마찰력 이상에서는 횡방향 크립은 증가하지만 마찰계수가 감소하는 특징을 볼 수 있다.

## 2.2 횡방향 크립 모델의 비교

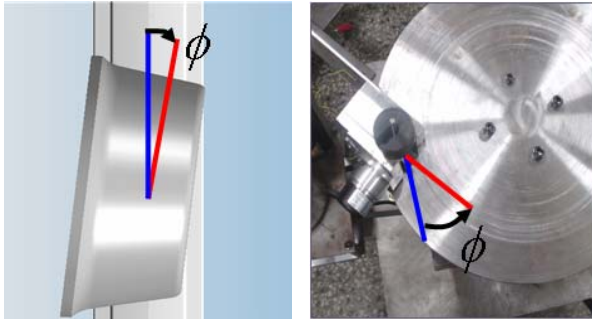
### (1)Kooijman의 모델

Kooijman 등은 곡선부에서 일체형 차륜의 회전 반경이 다름으로 인해 종방향 크립과 횡방향 크립이 증가하게 되며, 횡방향으로 차륜과 레일이 비틀린 정도를 구동각( $\phi$ )으로 나타내어 횡방향 크립을 식 (2)와 같이 정의하였다.<sup>(4)</sup>

$$s \equiv \frac{\delta V_y}{V_1} \quad (2)$$

여기서,  $V_1$ 은 레일의 정상상태의 구름속도이며  $\delta V_y$ 는 횡방향 크립속도를 나타낸다. 횡방향 크립(s)은 두 물체의 상대속도에 의해 계산되어지고 또한 무차원이다.

### (2)스킬소음 발생장치



(a) Train wheel and rail (b) model rig

Fig. 2 Attack angle of each cases

$$s = \frac{\delta V_2}{V_1} = \frac{V_2 \cdot \sin \phi}{V_1} \quad (V_1 < V_2) \quad (3)$$

$$s = \frac{\delta V_2}{V_1} = \frac{V_2 \cdot \tan \phi}{V_1} \quad (V_1 > V_2) \quad (4)$$

$V_2$ 는 차륜의 속도이며 식 (3)과 (4)는 구동의 주체에 따라 분류된다. Kooijman의 모델은 차륜의 구동과 그에 따른 레일의 속도가 발생하는 것이므로 레일의 속도가 차륜의 속도를 넘을 수 없으므로 식 (3)을 적용한다. 그러나

스킬소음 발생 장치에서는 반대로 레일의 구동에 따라 차륜이 구동하므로 레일의 속도가 더 높다. 따라서 스킬소음 발생장치에서는 식 (4)를 적용한다.

## 3. 마찰변수에 따른 크립 특성과 발생 음압

### 3.1 실험 개요

#### (1)센서의 설치와 측정항목

스킬소음 발생장치를 이용하여 대상 차륜의 횡방향 크립과 발생하는 음압을 측정하기 위해 Table. 1과 같이 장치와 센서를 설정하였다.<sup>(2)</sup>

Table. 1 Sensors of measurement and variables

Sensors & Devices	Measurement	Variables
Weighting counter	normal force	creep force friction coefficient
Flexible arm	bending stiffness	
Strain gauge	strain	
Encoder 1	wheel velocity	lateral creep
Encoder 2	rail velocity	
Encoder 3	attack angle	
Microphone	sound pressure	sound pressure

#### (2)실험변수 설정

스킬소음 발생의 각 인자들의 특성 및 기여도를 알아보기 위해 대조군과 실험군을 설정하였다. 실험군은 마찰변수의 각 항목으로서 구동속도, 하중, 구동각(attack angle), 거칠기 등으로 정하였으며, 각 변수의 정도(rate)는 Table. 2와 같이 설정하여 크기를 분류하였다. 대조군은 기준값을 적용하고 실험군은 크기와 정도를 바꾸어 실험하였다.

Table. 2 Variables and rates of experiments in each tests

Variable and 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

### 3.2 스틱/슬립 운동에서의 발생음압

스틱/슬립 운동에서의 음압을 분류하면, 스킬소음 발생의 특징을 알 수 있다. Fig. 3<sup>(2)</sup>은 시간 영역에서의 차륜의 스틱-슬립 운동과 음압 발생의 크기를 보여준다. 차륜에 작용하는 마찰력은 스틱 구간에서 임계점까지 증가되지만 스킬소음을 발생하지 않는다. 슬립 구간에 접어들면서 대상 차륜의 움직임과 반대 방향으로 가진을 하며, 스킬소음이 발생됨을 확인할 수 있다.

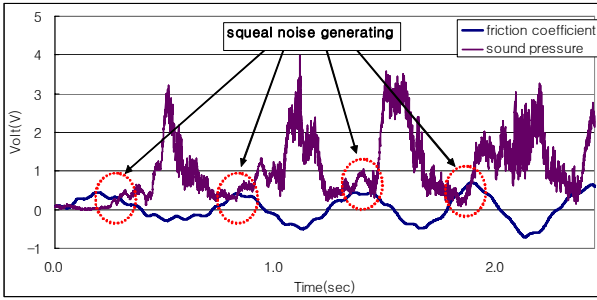


Fig. 3 Measurement of the value of sound and friction in stick-slip cycles

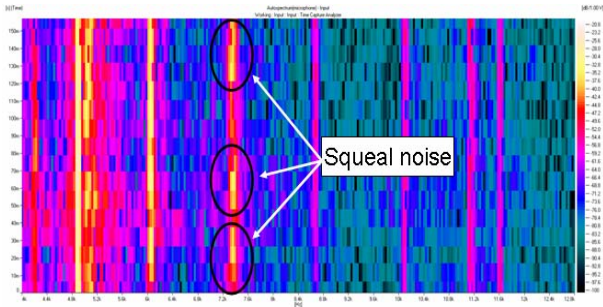


Fig. 4 Graphical result of sound pressure with time and frequency domains

Fig. 4는 스킨소음이 발생하는 슬립구간에서 음압 결과를 시간과 주파수 축에 대해 보여준다. 스킨소음은 약 10 ms 내외의 연속적으로 발생하는 충격신호와 같은 특징임을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6은 스틱/슬립의 각 구간(약

100 ms)에서 음압을 1/12 옥타브밴드로 나타낸 결과이다. 스킨소음은 Fig. 6의 슬립구간에서 그리고 중심주파수 7288 Hz의 스펙트럼(spectrum)에서 나타나며, 대상 차륜의 (3,1) 굽힘 모드와 일치한다.<sup>(1)</sup>

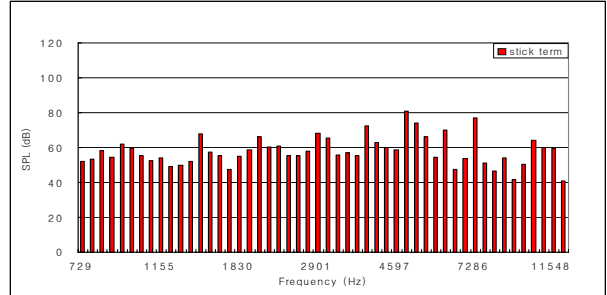


Fig. 5 Measurement of sound pressure spectrum in stick term

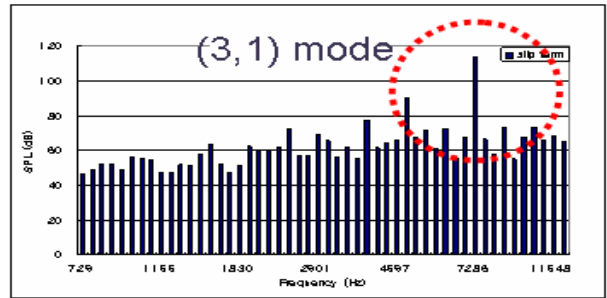
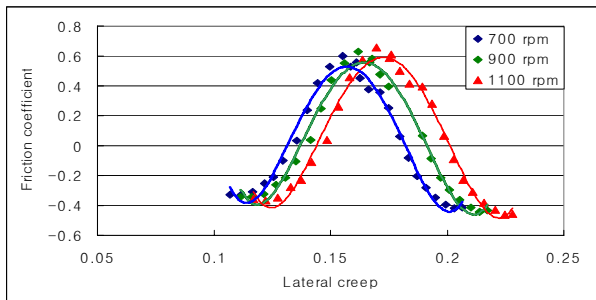
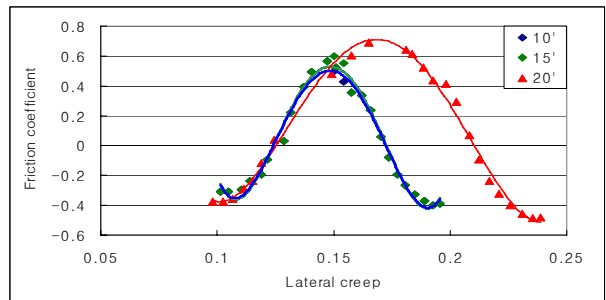


Fig. 6 Measurement of sound pressure spectrum in slip term

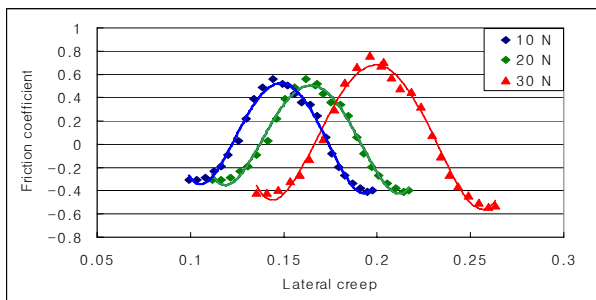
### 3.3 크립과 발생음압의 측정 결과



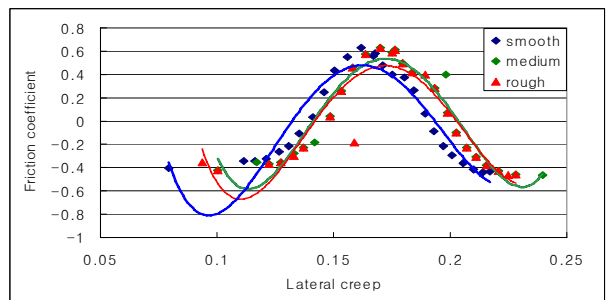
(a) Creep curve due to driving velocity



(b) Creep curve due to attack angle



(c) Creep curve due to loading force



(d) Creep curve due to roughness

Fig. 7 Results of creep curves by each variables shifting the level

**Table. 3** Results of lateral creep, friction coefficient and sound pressure by each variables shifting the level

variable	Driving velocity						Attack angle					
	700rpm		900rpm		1100rpm		10°		15°		20°	
level	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
range												
s	0.21	0.16	0.22	0.16	0.23	0.17	0.2	0.15	0.2	0.15	0.24	0.18
$\mu$	0.6	-0.3	0.65	-0.3	0.7	-0.36	0.6	-0.3	0.6	-0.3	0.7	-0.4
term	stick	slip	stick	slip	stick	slip	stick	slip	stick	slip	stick	slip
SPL in band of squeal	60 dB	100 dB	70 dB	110 dB	80 dB	115 dB	78 dB	105 dB	80 dB	115 dB	90 dB	115 dB

variable	Loading force						Roughness					
	10N		20N		30N		smooth		medium		rough	
level	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
range												
s	0.2	0.15	0.22	0.16	0.26	0.2	0.22	0.16	0.25	0.18	0.23	0.17
$\mu$	0.6	-0.3	0.65	-0.3	0.8	-0.4	0.65	-0.4	0.65	-0.4	0.65	-0.5
term	stick	slip	stick	slip	stick	slip	stick	slip	stick	slip	stick	slip
SPL in band of squeal	75 dB	105 dB	80 dB	115 dB	82 dB	115 dB	80 dB	100 dB	80 dB	105 dB	78 dB	105 dB

Fig. 7의 결과에서는 마찰조건과 그 레벨에 의한 크립 곡선의 이동을 볼 수 있다. 그 중 (a)의 운행 속도에 의한 크립 곡선의 이동이 가장 뚜렷이 보인다. 스틱-슬립 한 주기 동안에 마찰계수의 임계치 등은 거의 변함이 없지만 슬립속도의 함수인 크립은 구동 속도에 비례하여 증가하기 때문이다. 또한 (b), (c)의 구동각, 하중에서는 곡선의 이동과 크기의 변화를 볼 수 있는데, 이는 슬립 속도의 증가와 마찰 임계값의 증가를 뜻한다. 하중의 경우 대상 차륜과 레일의 접촉강성의 증가가 마찰 임계값을 높이는 결과를 낳았으며, 구동각의 경우 플렉시블 암(알루미늄 보)의 굽힘강성이 낮아 구동각의 변화에 민감하게 반응하기 때문으로 여겨진다. 그리고 (d)의 거칠기 조건에서는 그 특징을 분별하기 힘들다. 동일 재질에서는 표면 거칠기에 따라 마찰계수가 변화하는데, 마찰력이 증가한 경우 미끄러짐을 방지하는 측면이 있는 반면에 최대 마찰력인 임계점 이상에서는 더욱 미끄러지는 복합적인 특성 때문으로 여겨진다.

Table. 3의 결과에서는 마찰조건에 따른 횡방향 크립, 마찰계수의 변화, 스킨소음 대역의 음압 변화를 보여준다. 스킨소음의 음압에서는 각 조건의 증가에 비례적으로 상승하지만 115 dB 이상의 증가는 보이지 않는데, 이는 대상 차륜의 해당 모드에서 마찰에 의한 구조적인 가진과 그에 따른 진동에는 한계가 있음을 보여준다.

#### 4. 결론

마찰조건에 따른 크립의 특성과 발생음압의 상관성을 실험을 통해 알아보았으며, 기존의 연구에서보다 크립의 특성과 스킨소음 발생음압을 분별적으로 알 수 있다. 그러나 실험의 대상 지그의 마찰력 측정을 위해 설치한 플렉시블

암의 연성조건과 차륜의 크기(scale)는 다른 연구의 결과와 오차로 작용한다. 예컨대, Remington의 크립 결과와 비교하면, 마찰계수의 임계치와 크립의 크기에 대한 레벨 차이가 있다. 플렉시블 암의 정하중에 의한 스트레인 실험값을 기준으로 마찰력을 측정하였지만, 플렉시블 암의 비교적 작은 굽힘 강성과 동적 실험에서는 관성력의 영향을 많이 받기 때문이다. 또한 차륜의 작은 크기로 인해 동일한 각속도를 갖더라도 운행속도에는 큰 차이가 나타나기 때문이다. 따라서 스틱-슬립 조절을 위해 개발한 스킨소음 발생장치는 각 조건의 분별적 실험을 하는데 유용하지만 철도차량의 조건과는 분명한 차이가 있으며 실험의 결과를 정량화하여 나타내는데 어려움으로 작용한다.

#### 참고 문헌

- (1) Kim Kwanju, etc., 2006, "Experimental study on the curve squeal noise of the train wheels", Proceedings of WESPAC., pr-2-4.
- (2) 김범수 등. 2006. "철도차량 곡선부 주행시 차륜에 작용하는 크립과 스킨소음 발생에 관한 고찰", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, KSNVE06A.
- (3) Remington P. J., 1987, "Wheel/rail squeal and impact noise: what do we know? what don't we know? where do we go from here?" Journal of Sound and Vibration, Vol. 116, pp. 339-353.
- (4) Kooijman P. P., etc., 2000, Curve squeal of railbound vehicles, part2: set-up for measurement of creepage dependent friction coefficient, Proceedings of Internoise, Vol. 3, pp. 1564~1567.