철도차량 곡선부 주행시 차륜에 작용하는 크립과 스킬소음 발생에 관한 고찰

Study on the relation between creep phenomena and radiating squeal noise about the railway

김범수*· 김상수*·김관주**·이찬우***

Beom-soo Kim, Sang-soo Kim, Kwan-ju Kim and Chan-woo Lee

Key Words : creep(크립), slip(미끄러짐), squeal noise(스킬소음), radiation(방사)

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 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. Computational radiating noise analysis was also performed based on the modal analysis and noise transfer function measurement of the object wheel.

1. 서 론

스킬소음은 차륜과 레일사이의 스틱-슬립 운동에 의해 발생된다. 이 때 차륜을 가진하는 마찰력은 하중, 구동속도, 구동각(attack angle), 온도 등의 여러 인자들에 의해 결정되며, 철도차량의 운전조건과 환경적 변수에 따라 차륜의 마찰 특성과 그 응답은 달라진다.

지난 연구[1]에서는 스킬소음 발생장치를 이용하여 스킬소음발생에 대해 소음원-전달계-반응계의 순서로 실험과 해석을 하였다. 가진력으로 작용하는 마찰력과 대상 차륜의 동특성 그리고 스킬소음으로부터 주파수 도메인에서 관찰하여 각 인자의 특성 및 기여도를 알아보았다. 그러나 스킬소음은 과도 응답이므로, 스킬소음 발생 현상은 차륜이 레일위에서 미끄러지는 슬립구간에서 특징을 살펴보아야한다. 따라서 본 연구에서는 '스틱-슬립'에 따른 크립과 스킬소음 발생에 대해 시간 영역에서 관찰하였다. 크립(creep)은 접촉하는 두 대상 물체간의 상대적인 움직임에 의해 발생한다. 곡선부에서 철도차량의 차륜은 레일과 완전히 접지하지 못하고 헛돌게 되는, 즉 미끄러지는 움직임을 갖게 된다. 이런 크립으로 인해 차륜은 불안정한 진동을 하게 되며 그 중 차륜의 횡방향의 성분이 스킬소음을 발생시킨다. 이를 실험을 통해 확인하고 그 원인을 분석하는 것이 본 논문의 목적이다. 또한 대상 차륜의 방사해석을 수행하여 스킬소음 예측의 기본 모델을 제시한다.

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

** 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

*** 한국철도기술연구원 차량성능연구팀

2. 스킬소음 발생에 대한 시간 도메인 분석

2.1 크립 개요

Fig. 1[2]은 전형적인 크립력과 크리피지의 관계를 보여준다. 크립력(creep force)은 상대운동에 의한 마찰력이므로 운동 방향에 대해 음수로 나타낸다. 크리피지가 증가함에 따라, 접촉 지역(contact patch) 이내의 크립력의 절대값은 증가한다. 크립력의 절대값이 감소하는 부분(falling regime), 즉 마찰 임계값(saturated regime)을 통과하고 나서는 크립력의 절대값이 감소하는 특징이 있다.

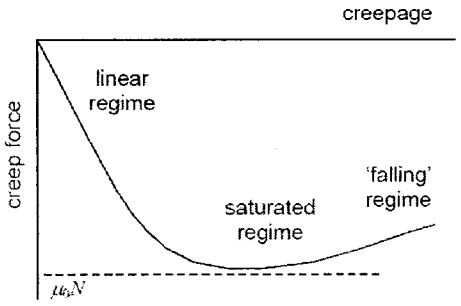
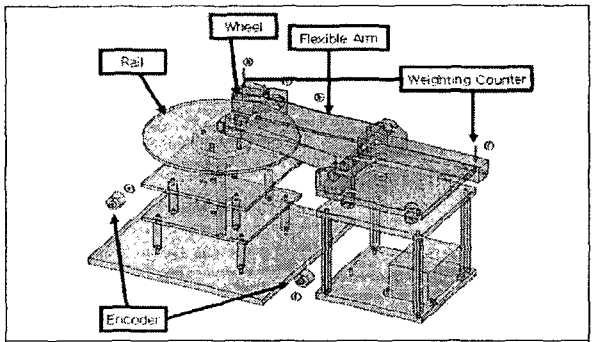


Fig. 1 A typical creep force-creepage relationship

회전하는 두 탄성체가 접촉하는 경우, 접촉면내의 미끄러짐(slip)과 점착(adhesion)으로 분리되어 일어날 수 있다. 마찰 임계값 이하에서는 접촉할 때 유한한 양의 슬립이 발생하고, 이 슬립의 크기는 물체의 탄성과 마찰 특성에 의해 결정된다. 마찰 임계값 이하에서 슬립은 크리피지(creepage)로 알려진다.[3]

2.2 실험 개요

스킬소음 발생장치를 이용하여 횡방향 크립과 발생되는 음압을 시간 도메인에서 측정한다. 실험 장비와 센서를 통한 측정항목은 아래의 Fig. 2과 같다.



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

Fig. 2 Schematic picture of model rig to simulation squeal and sensors of measurement and variables

철도차량의 차륜과 레일에서 발생하는 크립은 종방향(longitudinal) 횡방향(lateral) 돌림방향(spin)으로 구분된다. 종방향 크립은 차륜을 효과적으로 가진하지 못하며 돌림방향 크립은 차륜의 플렌지(flange)를 가진하여 때때로 스킬소음을 발생시키기도 하지만 이 두 성분은 스킬소음 발생의 근본적인 요인으로 보기 어렵다. 이 중 횡방향 크립만이 스킬소음 발생에 지배적으로 작용한다. 따라서 실험은 횡방향 크립만을 측정하였고 동시에 발생되는 크립력과 음압을 측정하였다.

2.3 크립 곡선과 스킬소음 발생

(1)크립 곡선

스킬소음 발생장치에서 차륜의 스틱-슬립이 0.3~0.4초의 주기를 보였다.[4] 스틱-슬립 각 구간에서 차륜과 레일간의 상대속도와 마찰계수로부터 횡방향 크립을 구하고 응답으로서의 음압으로부터 스킬소음 발생 메커니즘을 살펴본다.

$$\mu = \frac{F}{N} \tag{1}$$

$$s = \frac{\delta \overrightarrow{V_2}}{V_1} = \frac{V_2 * \tan\phi}{V_1} \quad (V_1 > V_2) \tag{2}$$

크립 혹은 크리피지는 접촉한 두 물체의 상대속도 의해 계산되어진다. 또한 평균 구름 속도로 나누어지므로 무차원이다. μ는 마찰계수이며 수직항력(N)과 마찰력(F)으로부터 구할 수 있다. s는 횡방향 크립(lateral creep), $\delta \overrightarrow{V_2}$는 크립속도이다.[5] s는 차륜의 속도($V_2$)와 레일의 속도($V_1$)의 크기의 비로 나타낼 수 있다. ϕ는 구동각이며, 방향과 크기비에 따라 삼각함수를 적용한다. 실지 철도차량에서는 레일속도는 차륜의 속도를 넘을 수 없으므로 sine 항으로 이뤄지지만 스킬소음 발생장치에서 레일의 구동에 따라 차륜이 구동하므로 레일의 속도가 더 높다. 따라서 tangent의 비를 사용함으로써 크립을 구할 수 있다. 단, V_1은 정상상태로 가정하여 레일의 구름속도로 정한다.

레일과 그 위에 접지된 차륜이 완전한 구름이라면 s의 수준은 'zero' 이다. 또한 완전한 미끄러짐이라면 s의 수준은 무한대까지 증대된다. 그러나 실제 접촉된 물체간의 의도하지 않은 횡방향 크립의 수준은 제한적이다. Fig. 3은 실험에서 구한 데이터를 식 (1), (2)에 대입한 크립 결과이다.

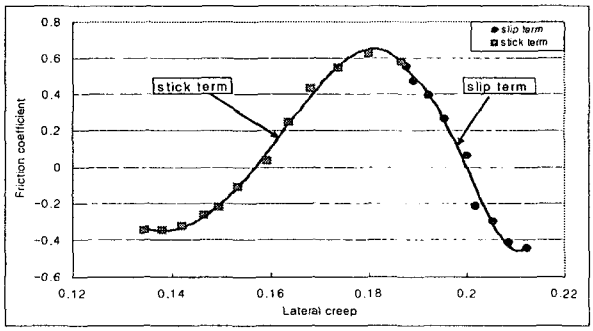


Fig. 3 Measurement of the lateral creep in stick-slip term

스틱구간 동안은 차륜과 레일 사이의 횡방향에 대해 상대속도가 작다. 이는 Fig. 3의 크립 수준이 낮음으로 확인할 수 있다. 또한 마찰 임계점까지 크립력은 증가한다. 슬립구간에서는 크립력은 감소하지만 높은 수준의 크립을 나타낸다. 참고로, 마찰계수값이 음수로 나타난 것은 스킬소음 발생장치의 특성으로 인해 마찰력 방향이 반대임을 의미한다. 또한 동적인 과도한 성분이 마찰 임계값을 높이는 결과를 낳기도 하였다.

(2)스킬소음 발생

시간에 대한 스틱-슬립 구분에서 차륜의 음압 방사를 비교한 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

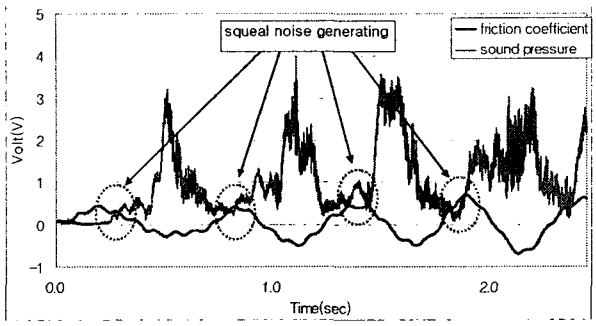


Fig. 4 Measurement of the value of sound and friction in stick-slip cycles

스킬소음은 주파수 영역에서 구름소음과는 확연히 다른 고주파수의 특징이 있다.[1] 또한 위의 결과로부터 스틱-슬립의 경계에서부터 스킬소음이 발생됨을 알 수 있다. 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. 또한 스틱-슬립의 반복 과정과 같이 스킬소음도 스틱구간에서 줄어들고 슬립구간에서 발생되는 과정을 반복하게 된다.

Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 종합하면, 스킬소음은 슬립구간에서 일어난다. 이때, 차륜에 가진으로 작용하는 크립력은 감소하지만 차륜의 응답은 더욱 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이를 통해 차륜과 레일의 상대속도의 발생이 시스템의 댐핑을 음의 감쇠(negative damping)가 되도록 하며, 시스템을 불안정하게 만드는 것을 알 수 있다.

3. 차륜의 방사 해석

3.1 모드해석

모드해석(modal analysis)은 모드시험의 결과와 해석에서구한 FRF 값을 DPM 과 TPM의 Accelerance로 비교하였다. 차륜을 굽힘방향에 대해 등간격으로 12지점을 선정하였고, 이중 DPM은 가진점과 응답점이 같은 경우, TPM은 가진점과 응답점이 다른 경우로 차륜의 가진점에 대한 대칭점을 선택하였다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 모드시험과 유한요소해석이 매우 근접한 결과를 보임을 알 수 있다. 또한 DPM과 TPM의 비교에서 (3,1) 모드 이상의 고주파 영역에서는 매우 흡사하고 그 이하의 저주파 영역에서는 차이를 보이는데, 이는 가진이 전파됨에 있어 분산(dispersion)되었기 때문으로 여겨진다.

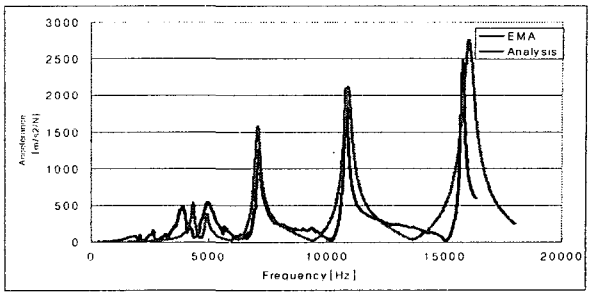


Fig. 5 EMA and FEA results of DPM

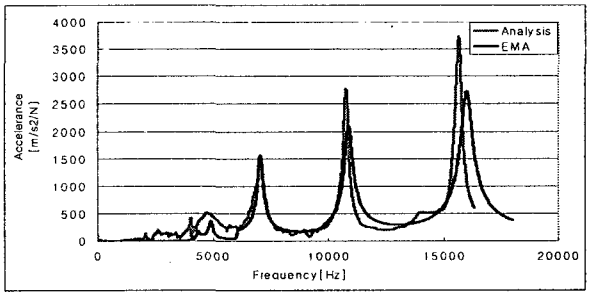


Fig. 6 EMA and FEA results of TPM

이와 같이 모드해석을 행한 이유는 스킬소음 방사해석의 대상 모델의 타당성을 검증하기 위함이다.

3.2 NTF 측정

NTF(Noise Transfer Function)는 가진에 대한 음압발생의 전달함수이다. 무향조건에서는 대상 물체의 단위 힘에 대한 방사에너지량을 알 수 있다. 실험은 거리와 각도에 대해 6개의 측정점을 선정하여 NTF를 측정하였다. Fig. 7은 이중 차륜의 횡방향과 종방향 1(m)인 지점에서 측정한 결과이다. 차륜의 굽힘방향인 횡방향이 종방향 보다 소리가 잘 전파되는 지향성을 나타낸다.

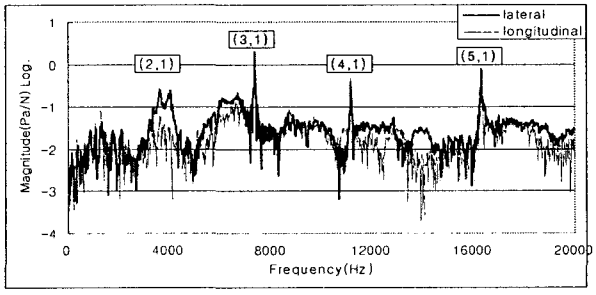


Fig. 7 results of NTF by direction

3.3 차륜의 FRF와 방사 결과 비교

모드해석의 유한요소 모델로부터 횡방향 컴플라이언스(compliance) 결과와 방사해석 된 음압 결과를 비교하여 전산해석시의 수직방향(차륜의 굽힘방향)의 진동이 음향공

간으로의 전파되는 특징을 알아본다.

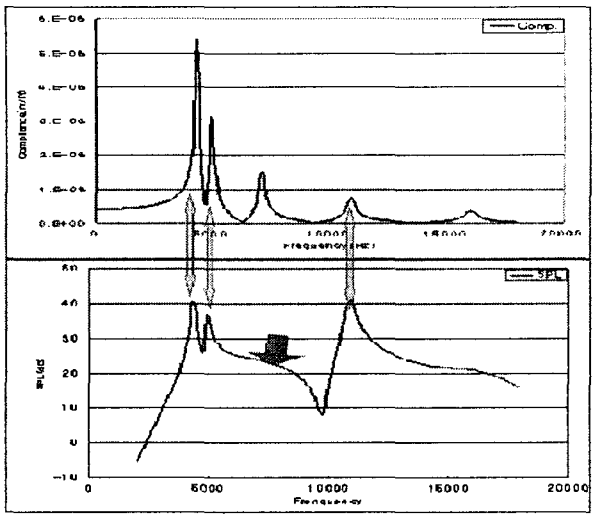
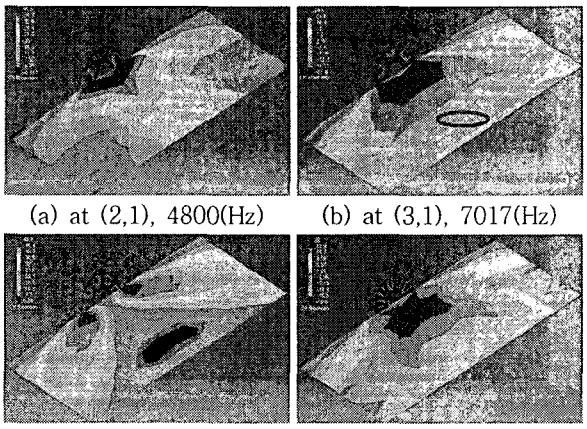


Fig. 8 Comparison of FRF and radiating sound

Fig. 8은 아래의 Fig. 9의 (b)에서 표시된 바와 같이 차륜의 횡방향 1m 지점에서의 방사해석 결과 음압과 차륜의 DPM에서의 컴플라이언스 결과를 비교한 것이다. 방사해석에서의 첫 번째와 세 번째 모드가 어느 정도 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것으로 볼 때, 차륜의 모드에 해당하는 고유진동수가 결과적으로 스킬소음과 상관관계가 있지만 음향의 방사와는 동일하지 않음을 알 수 있다.

3.4 모드별 방사해석 결과

NTF 측정에서 구한 가진 성분을 이용하여 방사해석을 수행하였다. 힘 성분을 NASTRAN에 대입하여 차륜의 FRF를 해석하고, 여기서 나온 결과를 토대로 Virtual.Lab에서 다음 Fig. 9와 같이 임의의 해석 음장을 만들어 음압분포를 나타내었다.



(a) at (2,1), 4800(Hz) (b) at (3,1), 7017(Hz)

(c) at (4,1), 10912(Hz) (d) at (5,1), 15928(Hz)

Fig. 9 Analysis of radiating sound of the wheel

위의 그림은 대상 차륜의 대표적인 4개의 고유모드 해당하는 주파수의 음압분포를 나타내고 있다. 각 차륜 경계면의 음압분포에 따라 음장에도 상이한 결과를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이는 모드별 지향성과 다이폴(dipole) 등의 영향으로 여겨진다.

4. 결론

시간 도메인에서 스틱-슬립 각 구간의 차륜과 레일 사이의 크립과 마찰계수, 음압 등을 분석하여 스킬소음 발생 메커니즘을 연구하였다. 기존의 마찰력 인자들의 상관성과 주파수 도메인에서 관찰한 결과 조합하면 스킬소음 발생 메커니즘을 이해하는데 도움이 될 것이다. 그러나 효율적인 실험을 위해 제작한 스킬소음 발생장치는 철도차량을 모사한 것이므로, 실지 차량의 실험조건과는 차이가 있어, 그 결과 역시 오차를 발생할 수밖에 없었다. 본 논문의 결과는 이론적인 측면을 실험으로 확인한 것이고 이를 실지 차량에 적용하기위해서는 대상 재료의 물성치, 구속 및 경계조건의 차이에 주의를 기울여야 한다. 그리고 대상 차륜의 방사해석을 통해 주변 환경에 대한 영향을 고려하고 발생 메커니즘과 함께 차량 운행조건을 제시하는 것이 연구의 최종 목적이다. 방사해석에서 신빙성 있는 결과를 획득하기 위해서는 실험과 분석이 더욱 필요할 것이라 생각한다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Kwanju Kim, etc., 2006, Experimental study on the curve squeal noise of the train wheels, WESPAC., pp. 187~191.

(2) J.J. Kalker, 1990, Three dimensional elastic bodies in rolling contact, Kluwer academic publisher, Dordrecht.

(3) D.J. Thompson, etc., 2003, "Railway Noise: Curve squeal, roughness growth, friction and wear", Rail Research UK, Birmingham.

(4) 김범수 등. 2006. "철도차량 스킬소음의 발생메커니즘에 관한 실험연구", 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, 논문집CD.

(5) P.P. Kooijman, 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.