

능동조향대차 곡선구간 주행시의 철도차량 차륜의 동적 특성 해석

Dynamic Characteristic Analysis of the Railway Vehicle Wheel in the Active Steering Bogie

박준혁† · 고효인* · 허현무* · 유원희*

Joon-Hyuk Park, Hyo-In Koh, Hyun-Moo Hur and Won-Hee You

1. 서론

기존의 철도차량에서는 강한 강성에 의해 지지되는 윤축(wheelset)의 조향성능 부족에 의하여 곡선구간에서 심한 마모 및 소음이 발생하고 있다. 이는 철도차량의 주행안정성을 확보하기 위하여 강한 일차현가계에 의해 윤축이 지지되고 있기 때문에 발생하는 문제라고 할 수 있다. 주행안정성과 조향성능은 서로 상충되기 때문에 조향성능보다 주행안정성을 강화하는 방향으로 철도차량의 설계가 진행되고 있으며 따라서 대부분의 철도차량의 조향성능은 낮을 수밖에 없다.

이러한 상충되는 철도차량의 중요한 두 성능을 동시에 만족시키고자 최근에는 능동조향대차에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근 유럽에서는 가시적인 성과를 나타내고 있다.

특히 곡선구간에서는 내측차륜이 매우 지배적인 소음을 발생시키는데, 이는 조향성능 부족에 의해 내측 차륜의 불안정 진동현상 때문으로 알려져 있다.

본 논문에서는 곡선구간을 철도차량이 주행할 때 내측차륜에서 발생하는 불안정 진동현상과 이로인한 스킵소음의 발생원리를 규명하고, 능동조향대차를 적용하였을 때 내측차륜의 불안정 진동현상의 억제 효과를 분석하고자 한다.

2. 차륜의 불안정성 해석

차륜이 레일위를 구르기 시작하면 차륜과 레일의 접촉점에서는 크리피지(creepage)와 크리프력(creep force)이 발생하게 된다. 크리프력은 마찰계수를 포함한 여러 인자에 의해 정의가 되는데, 마찰계수 또한 크리피지에 대한 함수로 나타나는 비선형 계수로 알려져 있다. 이 비선형 마찰계수의 가장 큰 특징은 크리피지가 증가할수록 마찰계수는 작아진다는 것이다. 따라서 크리피지가 큰 영역에서는 마찰계수의 기울기는 음의 값을 가지게 되며 이로 인해 불안정 자력 진동이 발생하게 된다.

차륜의 불안정 자력진동은 Nyquist 판별법을 이용하여 주파수 영역에서 해석할 수 있다. 이때 Nyquist 판별법을 위한 개루프 전달함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H(\omega) = -\frac{N}{V} \frac{\partial \mu(\xi_r)}{\partial \xi} Y_y \quad (1)$$

여기서 Y_y 는 차륜의 횡진동에 대한 모빌리티(mobility), N 은 접촉점에서의 수직항력, V 는 차륜의 이동거리 $\mu(\xi_r)$ 는 비선형 점착계수, ξ_r 는 강체모드에서의 크리피지, ξ 는 강체와 유연체 모드를 합한 전체 크리피지를 나타낸다. 식 (1)의 개루프 전달함수는 양의 되먹임 함수이기 때문에 식(1)의 실수부가 1보다 크고 그때의 위상이 '0' 일 때 불안정하다.

Fig. 1 은 국내 전동차 차륜에 Nyquist 판별법을 적용한 결과이다. 주행방향 크리피지가 0 인 경우에는 Fig. 1(a)와 같이 횡방향 크리피지가 0.006 이상에서 차륜의 공진 주파수 대역이 불안정한 것을 알 수 있다. 그러나 주행방향 크리피지가 증가할수록 불안정한 영역이 줄어들는데, 주행방향 크리피지가 0.004 인 경우에는 횡방향 크리피지가 0.008 이상이 되어야 불안정해지며, 주행방향 크리피지가 0.006 이

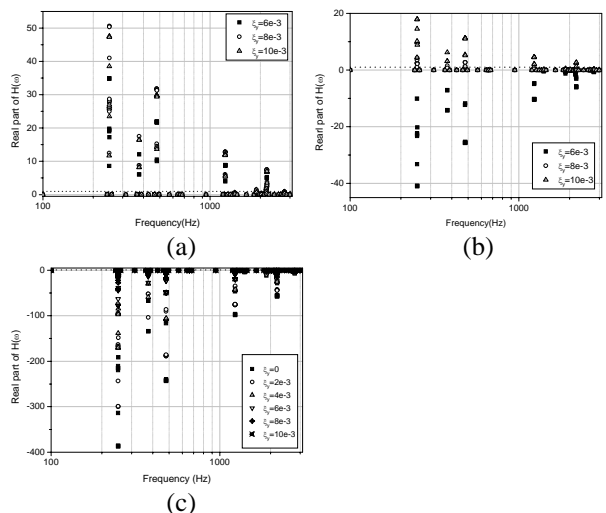


Fig. 1 Instability analysis using Nyquist criterion: (a) $\xi_x = 0$, (b) $\xi_x = 0.004$, (c) $\xi_x = 0.006$

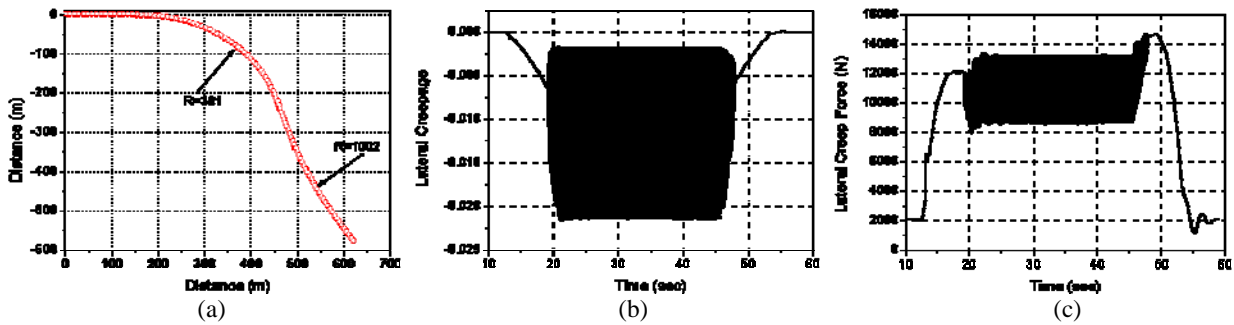


Fig. 2 Time domain analysis results of the front inner wheel in the conventional bogie at R=301(m): (a) track, (b) lateral creepage, and (c) lateral creep force

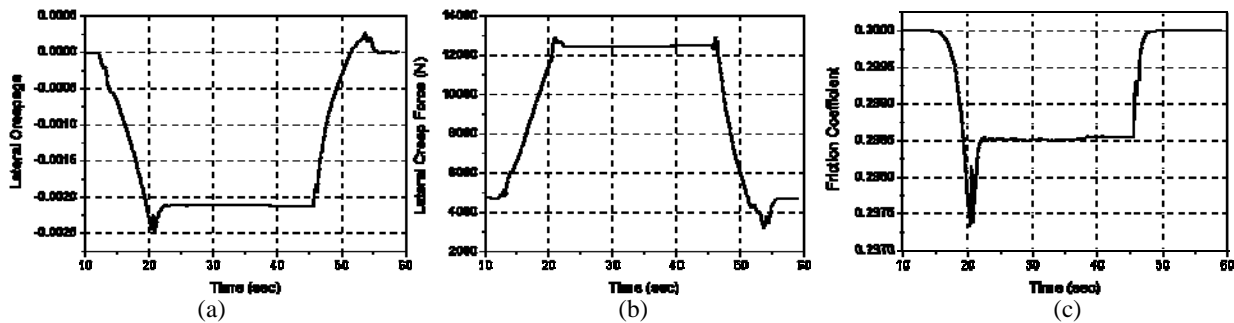


Fig. 3 Time domain analysis results of the front inner wheel in the active steering bogie at R=301(m): (a) lateral creepage, (b) lateral creep force, and (c) friction coefficient

상에서는 횡방향 크리피지가 0.01 이 되어도 안정하다.

3. 능동조향에 의한 차륜진동 저감효과 분석

2 장에서 기술한 Nyquist 판별법을 이용한 불안정성 해석은 차량의 주행에 따른 동적거동 정보 없이 정상상태로 가정하고 수행하는 것이기 때문에 기존 차량과 능동조향대차를 적용한 차량을 상호비교하기에는 무리가 있다. 따라서 본 장에서는 시간영역의 해석을 통해 능동조향 효과를 분석하고자 한다.

시간영역 해석은 국내 전동차 차량 모델과 실제노선 조건과 주행속도 정보를 토대로 철도차량의 주행특성을 모사하였다. 일반적으로 차륜의 불안정성은 전위 대차의 전위 내측차륜에서 제일 심하기 때문에 이에 대한 해석결과만을 다루기로 한다.

시간영역에서의 해석은 우선 철도차량을 14 자유도 강제모델로 가정하고 주행특성을 해석한 후에 여기서 획득한 강제모드에서의 크리피지 및 크리프력, 접촉 특성을 이용하여 차륜의 유연체 해석을 수행하게 된다. 이는 강제모드의 주파수 영역이 30Hz 이하로 유연체 모드보다 수배 낮기 때문에 차륜의 거동은 강제모드와 유연체 모드와의 선형 조합으로 나타낼 수 있기 때문이다.

Fig. 2 는 기존 철도차량이 곡선 301m 를 주행할 때 전위대차 내측 차륜의 동적특성을 해석한 결과이

다. Fig. 2(b)와 (c)에서 볼 수 있듯이 곡선구간에서 차륜의 불안정 구조진동에 의한 횡방향 크리피지 및 크리프력의 진동현상을 확인할 수 있다. Fig. 3 은 같은 주행조건에서 능동조향을 적용하였을 때의 해석 결과로서 Fig. 4(a)와 (b)에서 보듯이 불안정 진동이 제거된 것을 확인할 수 있다. 이는 능동제어에 의하여 조향기술이 향상됨에 따라 과도한 횡방향 크리피지가 발생하지 않은 결과로, Fig. 4(c)에서 보듯이 마찰계수의 감소율이 매우 작기 때문에 차륜의 불안정 자려 진동이 발생하지 않았기 때문이다

4. 결론

본 연구에서는 철도차량 내측차륜에 의한 곡선부 소음 발생원리를 규명하고, 능동조향기술에 의한 저감효과를 분석하였다. 특히 Nyquist 판별법을 통해 비선형 마찰계수에 의한 차륜 진동모드의 불안정성을 해석하였고, 시간영역 해석을 통해 기존대차와 능동조향 대차의 내측차륜 진동현상을 비교하였다.

해석결과에 의하면 능동조향기술을 통해 내측차륜에서 발생하는 곡선부 소음을 효과적으로 저감할 수 있을 것으로 예측되었다. 부수적으로 능동조향기술은 외측차륜의 플랜지가 레일에 접촉하지 않도록 하기 때문에 플랜지 접촉에 의한 스킵소음도 제거할 수 있을 것으로 기대된다.