

# 윤축의 횡방향 안정성을 위한 제어기 설계에 대한 고찰

## A Study on Control Design for Lateral Stability of Wheelset

\*#신유정<sup>1</sup>, 박준혁<sup>2</sup>, 허현무<sup>2</sup>, 김남포<sup>2</sup>, 유원희<sup>2</sup>

\*# Y. J. Shin(yjshin@krri.re.kr)<sup>1</sup>, J. H. Park<sup>2</sup>, H. M. Hur<sup>2</sup>, N. P. Kim<sup>2</sup>, W. H. You<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 과학기술연합대학원대학교 미래첨단교통시스템공학, <sup>2</sup> 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터

Key words : Wheelset, Stability Control, Suspension

### 1. 서론

철도차량의 주행은 저속의 직선구간에서 Rock and Roll 문제가 발생하고 고속에서는 Hunting이나 Bouncing 문제가 발생한다. 오래전부터 많은 연구자들이 철도차량의 이러한 문제들을 해결하기 위해 다양한 수학적 해석모델에 대해 시뮬레이션 및 여러 해석 기법들이 최근까지도 많은 연구가 이루어지고 있다. 기존 철도차량의 이러한 여러 불안정성 문제를 해결하기 위한 방법으로 윤축과 대차사이에 현가장치를 연결하여 추가적인 강성을 통해 많이 향상되었으나 이렇게 추가한 강성은 곡선부 주행에서 차륜/레일의 심한 마모를 일으키는 요소로 작용하고 차체에서의 승차감에 영향을 미친다. 이러한 이유로 철도차량의 현가장치 설계는 곡선추종성과 주행안정성 향상에 대해 상충(trade off) 관계를 최적화하는 것이 중요하다.

본 논문은 철도차량의 다양한 파라미터에 대해 능동 제어를 위한 연구의 기초로, 윤축의 횡방향 안정성 향상을 위한 능동 제어 설계에 대하여 고찰하고자 한다.

### 2. 윤축 모델

곡선 주행성능 향상과 사해도 방지를 모두 만족시키는 방법으로서 최근에는 조향대차가 개발되어 실용화되어 효과를 거두고 있다. 이것은 곡선 통과 시에 윤축의 차축 중심을 곡선 반경의 중심 방향으로 조향시켜 플랜지 접촉을 피하도록 하고, 횡압을 작게 하는 대차이다. 윤축을 유압과 링크 등의 기계적 기구로 강제적으로 조향하는 강제 조향대차와 윤축의 차륜의 답면구배와 링크에 의해 기구학적으로 조향하는 자기조향대차가 있다. 횡방향 안정성 향상을 위한 윤축의 해석모델에 대한 개념도는 Fig. 1에서 보는데와 같고, 기본적인 윤축에 횡방향과 길이방향으로 제어를 위해 액추에이터와 같은 부품이 장착되었을 때에 대한 그림이다. 윤축의 수학적 모델은 횡(Lateral)방향과 요(Yaw)방향만 고려하였으며 직선주행을 한다는 가정 하에 해석하였다.

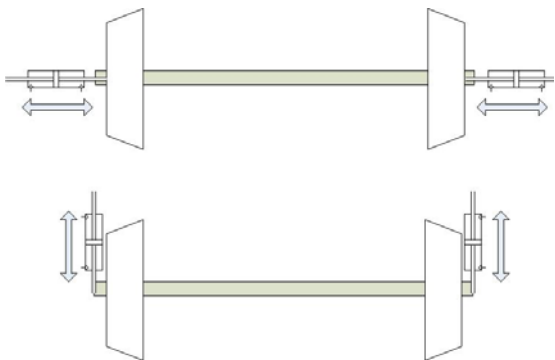


Fig.1 Plan-view diagram of a single wheelset for control

철도차량 윤축의 운동에 대한 수식은 윤축과 차륜의 접촉 메커니즘이 선형화된 모델이며, 트랙 입력값은 고려하지 않았다. 윤축에 대한 특성은 크게 기하학적 특성과 동역학적 특성으로

나누어 볼 수 있으며, Fig. 2는 2자유도를 가진 윤축에 대한 그림이다.

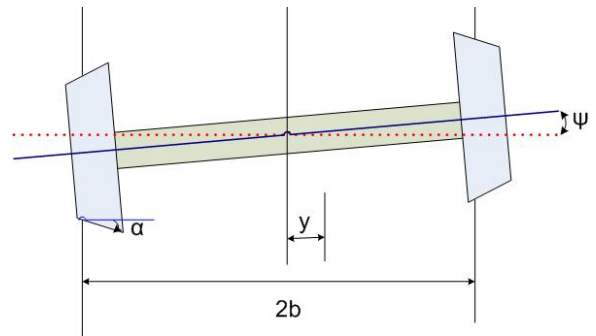


Fig.2 Plan-view diagram restrained wheelset degree of freedom

$\psi$  : yaw angle,  $\alpha$  : effective conicity,  $r$  : wheel rolling radius  
 $V$  : velocity of wheelset,  $y$  : lateral displacement from center

일반적인 철도차량 윤축의 횡방향과 요(yaw)방향에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{y} + \frac{2f_{11}}{V} \left[ \dot{y} + r_0 \frac{\alpha}{a} \dot{y} - V\psi \right] + \frac{2f_{12}}{V} \dot{\psi} + W_a \frac{\alpha}{a} y = 0$$

$$I_{wz} \ddot{\psi} + I_{wy} \frac{V}{r_0} \dot{y} + af_{33} \frac{2\alpha}{r_0} - \frac{f_{12}}{V} (\dot{y} + r_0 \frac{\alpha}{a} y - V\psi)$$

$$+ 2a^2 f_{33} \frac{\dot{\psi}}{V} - a\psi W_a \alpha + \frac{2f_{22}}{V} \dot{\psi} = 0$$

이러한 원래의 선형 윤축 운동방정식에서 스프링상수(k)와 차축의 질량(m)과 그에 대한 관성을 모두 고려하지 않는다면 순수하게 기하학적인 구속조건만으로 운동하는 특성을 지닌다.

윤축의 기하학적인 특성방정식에서 고유치를 이용해서 주파수 모드 특성에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$y = Y e^{\lambda t}, \lambda_{1,2} = \pm i V \sqrt{\frac{\alpha}{r \cdot b}}$$

$$f_c = \frac{V_s}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{r \cdot a}} \quad : \text{Natural frequency mode(Hz)}$$

윤축의 운동방정식의 해석에는 4차식으로 복소수로 나타낸다. 이 시스템의 안정성에 대한 부분은 임계속도의 경계를 실수부분이 0(zero)일 때 전달함수의 분모에 의해 구별된다. 속도가 증가하면, 불안정하게 만드는 관성력이 점점 우세하게 되고 결국 불안정성에 다르게 한다. 안정모드(stable mode)는 윤축의 질량(mass)/관성(inertia)에 관련되어있고, 물리적으로 보통 저속에서 차륜/레일의 접촉력(contact force)에 의해 크게 감소한다.

### 3. 시스템 해석

시스템 해석은 모델링, 동역학, 제어이론, 시뮬레이션과 같은 분야 간의 상관성을 취급하는 분야로 시스템 동적거동에 대한 고찰은 수학적 모델을 가지고 입력과 출력간의 관계를 나타내는 전달함수를 규명하는 것이다. 주행안정성 해석은 시스템 행렬의 고유치 변화에 의해서 결정되고, 고유치 중 한 쌍의 켈레근이 허수축을 넘어 양(+)의 실근을 가지 때의 속도를 선형 임계속도라고 정의한다. 철도차량의 임계속도는 여러 가지 설계변수들에 영향을 받는다. 본 연구에서는 여러 가지 설계변수들 중에서 1차 현가장치의 강성을 변화가 임계속도에 미치는 영향을 검토하여 제어기 설계시 목적에 맞게 고려해야할 요구사항을 간단한 시뮬레이션을 통해 정리하고자 하였으며 시뮬레이션에 사용된 모델에 대한 파라미터와 물성치는 국내 전동차 사양을 추정한 값으로 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters used for numerical simulation

Parameter	Value
Wheelset mass	$m_w = 1600\text{kg}$
wheel radius	$r_0 = 0.43\text{m}$
Half of the track gauge	$a = 0.7175\text{m}$
Conicity	$\alpha = 0.05$
Half of the primary vertical damping arm	$b = 1.05\text{m}$
Longitudinal stiffness of the primary suspension	$K_{px} = 6.6 \times 10^6 \text{N/m}$
Lateral stiffness of the primary suspension	$K_{py} = 4.4 \times 10^6 \text{N/m}$
Lateral creep force coefficient	$f_{11} = 6.8431 \times 10^6 \text{N}$
Lateral/spin creep force coefficient	$f_{12} = 3120 \text{Nm}^2$
Spin creep force coefficient	$f_{22} = 50 \text{N}$
Longitudinal creep force coefficient	$f_{33} = 7.8958 \times 10^6 \text{N}$
Axle load	$W_a = 7.84 \times 10^4 \text{N}$
Spin moment of the inertia of the wheelset	$I_{wy} = 68 \text{kgm}^2$
Yaw moment of the inertia of the wheelset	$I_{wz} = 550 \text{kgm}^2$

다양한 제어기법들이 연구되어오고 있으며, 그 중 Model based control 접근법, 피드백(feedback) optimal control, robust control 등 그 시스템의 파라미터 변화(variation)에 대해 연구되고 있다. 윤축의 안정성 제어를 위한 수치해석 프로그램은 Matlab & Simulink® 을 이용하여 모델을 구성하였다.

Table 2 Natural frequency and damping ratio of a conventional wheelset

Velocity(m/s)	Natural frequency(Hz)	Damping(100%)
20	231.301066	100
30	135.7124256	100
40	89.3640048	100
50	89.3640048	96.287
60	67.2951839	83.778

먼저 지난 춘계 학술대회에서는 국내 전동차의 파라미터를 가지고 현재 전동차의 임계속도가 어느 정도인지 선형해석을 하였다. control 문제는 윤축의 lateral과 yaw motion에 연관되어있고, 실수축의 0(zero)인 부분을 확대한 부분의 data를 검토해 보면 국내 전동차의 임계속도는 약 330km/h 정도에 존재한다고 예측된다. 선형해석이기에 비선형성을 고려한다면 이보다 더 낮은 임계속도를 가질 것이라고 예측하였다.

Table 2는 기존 윤축의 속도에 따른 고유주파수와 댐핑계수를 나타낸 표이다. 이것은 윤축의 전달함수의 분모에서 첫 번째 두 부분을 무시한 것으로, 불안정한 모드의 고유주파수는 답면구배와 두 차륜사이의 반경에 대해 비례하고 안정모드는 질량과 관성력에 반비례함을 볼 수 있다.

Fig. 3에서 국내 전동차 사양인 답면구배 0.05이고 주행방향 강성이 4.4MN/m 일 때 곡선부에서의 추종성을 본 것이며, 이와같이 목적에 맞게 여러 설계변수들이 미치는 영향을 확인하여 그 값을 조절할 필요가 있다고 판단된다.

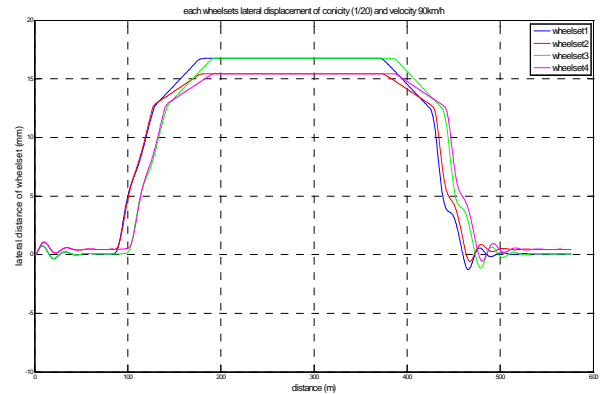


Fig.3 lateral displacement of wheelset on curve

윤축의 능동제어를 위해 간단한 시뮬레이션을 통해 불안정성에 대한 상관관계를 살펴봄으로써 파라미터 최적화와 제어설계에서의 요구사항에 대해 고찰해보았다.

### 4. 고찰

만족스런 승차감을 보장하는 방법으로는 두 개의 간단한 피드백 제어 접근법이 있지만, 안정모드(high frequency)의 요소로 인해 그 시스템에서 추가적인 지연(delay)가 발생하므로 더 나은 안정성 마진(margin)을 얻기 위해서는 그에 따른 계측이 이루어져야 한다. 요각(yaw angle) 피드백 제어는 고유의 미분 term이 존재하기 때문에 피드백 횡방향 속도(lateral velocity) 제어보다 더 효과적인 제어 결과를 얻을 수 있다.

안정성을 주된 제어 목적으로 많은 연구들이 이루어져왔으며, 파라미터 변수를 최적화하는 제어에 대한 강건성을 고려한 설계에 대하여 개발되어 왔다. 제어 증폭요건을 최소화하기 위하여 우선적인 고려사항을 제어설계에 고려하고, 성능의 저하 없이 액추에이터의 사이즈나 비용에 대해 만족할 수 있도록 제어기를 설계한다. 결론적으로 철도차량 윤축의 제어에서의 복잡하고 어려운 문제를 올바르게 인식하고 차량성능과 제어시스템 모두 만족시키는 factor가 실제 제어설계 목적에 맞도록 요구사항에 대해 고찰하였다.

### 참고문헌

1. Rao V. Dukkipati, " Vehicle Dynamics ", CRC Press LLC, 2000
2. Sen-Yung Lee, Yung-Chang Cheng, " Hunting Stability analysis of high-speed railway Vehicle trucks on tangent tracks," Journal of Sound and Vibration, pp. 881-898, 2005
3. T. X. Mei, " Control Design for the Active Stabilization of Rail Wheelsets ", Journal of Dynamic Systems(by ASME), Vol.130, 2008
4. A. H. Wickens, " Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics ", Swets & Zeitlinger, 2003
5. 박준혁, 고효인, 허현무, 함영삼, 김민수, 유원희, " 철도차량의 윤축 변위 특성에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 2007
6. 박준혁, 허현무, 유원희, "현가특성 변화에 따른 도시형 전동차의 임계속도 선형해석" 한국철도학회 논문집, 2007
7. 유원희 외, "도시형 친환경 열차 대차시스템 개발" 한국철도기술연구원 연구보고서, 2008