

MR 횡댐퍼를 적용한 철도차량의 동특성 해석

Dynamic Characteristic Analysis of Railway Vehicle using MR Lateral Damper

*#신유정¹, 유원희²

*# Y. J. Shin¹(yjshin@kri.re.kr), W. H. You²

¹ 과학기술연합대학교대학원(한국철도기술연구원), ² 한국철도기술연구원

Key words : MR damper, Semi-active suspension, Skyhook control

1. 서론

철도차량의 주행안정성은 차량의 구성요소와 주행 조건에 따라 일정한 주행속도 대역 이상에서는 급격히 악화되는 현상이 발생한다. 최근 들어 자동차뿐만 아니라 철도차량에서도 기존의 수동형 현가장치를 보완하거나 또는 새로운 개념의 반능동형과 능동형 현가장치에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다. 능동형 현가장치는 우수한 제어성을 지니고 있지만 복잡한 구조와 고가의 비용 그리고 무엇보다도 철도시스템의 특성상 여러 문제로 인해 상용화에 많은 어려움을 지니고 있다. 이에 반해 반능동형 장치는 기존의 철도차량 구조에 추가적으로 취부하거나 기존의 수동형 현가장치를 반능동형 현가장치로 대체하는 방법으로 구조가 간단하고 저비용으로 구현이 가능할 뿐만 아니라 최소의 주행안정성은 확보가 가능한 이점이 있다.

본 논문에서는 기존의 대차와 차체사이에서 취부되어 있는 수동형 횡댐퍼를 반능동형 MR 댐퍼로 대체하고 간단한 제어를 이용하여 철도차량의 동특성에 미치는 영향에 대해 분석하고자 한다.

2. MR 댐퍼 적용한 철도차량의 기본 개념과 제어전략

MR 댐퍼의 위치는 기존 철도차량의 횡댐퍼 위치에 취부되어 있으며 전체 개념도는 Fig. 1과 같고, Fig. 2는 차체와 대차에 MR 댐퍼의 위치를 정면에서 바라본 그림이다.

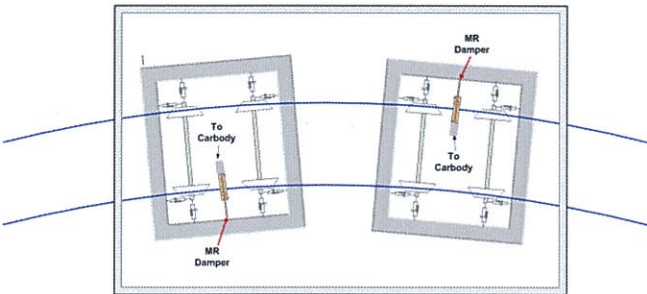


Fig. 1 MR damper application of railway vehicle

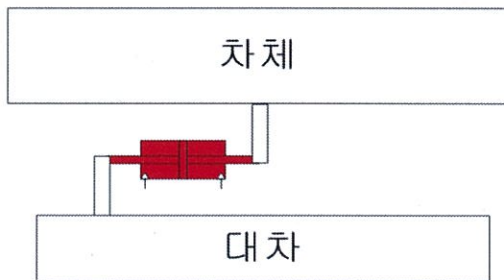


Fig. 2 The front side of the MR damper arrangement

수치해석은 철도차량의 횡방향(Lateral)과 요모멘트 방향(Yaw moment)에 대해 고려하였으며 윤축, 대차, 차체로 구성된 전체 14자유도로 운동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$m_t \ddot{y}_t = F_{syt} + (m_t + m_c) \left(\frac{V^2}{gR} - \phi_{se} \right) g$$

$$I_{t_z} \ddot{\psi}_t = M_{s_zt}$$

$$m_c \ddot{y}_c = F_{syc} + m_c g \left(\phi_{sc} - \frac{V^2}{gR} \right)$$

$$I_{c_z} \ddot{\psi}_c = M_{s_zc}$$

$$m_w \left(\ddot{y}_i - \frac{V^2}{R} + g\phi_{se} \right) = F_{Ly_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) + F_{Ry_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) + N_{Ly_i} + N_{Ry_i} + F_{s_yi} - F_{t_i}$$

$$I_{w_z} \ddot{\psi}_i = [R_{Rx_i} F_{Ry_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) - R_{Ry_i} F_{Rx_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i)] + [R_{Lx_i} F_{Ly_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) - R_{Ly_i} F_{Lx_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i)] + (R_{Rx_i} N_{Ry_i} + R_{Lx_i} N_{Ly_i}) + M_{Lz_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) + M_{Rz_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) + M_{s_zi}$$

여기서,

y_c : 차체의 횡방향 변위

ψ_c : 차체의 yaw 각

y_t : 대차의 횡방향 변위

ψ_t : 대차의 yaw 각

y_w : 윤축의 횡방향 변위

ψ_w : 윤축의 yaw 각

MR 댐퍼는 댐퍼시험기에서 성능시험을 통해 얻어진 실험데이터를 이용하였으며, 이상적인 진동억제 특성을 갖는다고 알려진 진정공간에 댐퍼를 매달아 놓은 것과 같은 스카이훅 시스템(Fig. 3)을 적용하였다.

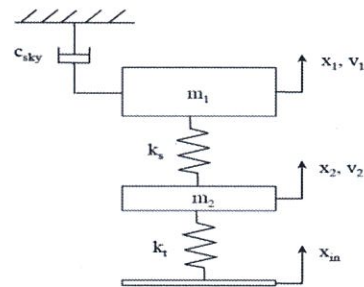


Fig. 3 Skyhook Damper Configuration

반능동 스카이훅 제어전략 절대속도와 상대속도의 곱한 값에 따라 댐핑력을 계산하였고 다음과 같이 표현된다.

$$v_1 v_{12} \geq 0, F_{control} = c_{sky} v_1$$

$$v_1 v_{12} < 0, F_{control} = 0$$

v_1 = absolute velocity

v_{12} = relative velocity

$F_{control}$ = control damping force

c_{sky} = skyhook damping coefficient

3. 철도차량 모델링 및 해석 결과

곡선부에서의 조향성능을 향상시키기 위하여 기존의 1차현가 장치의 강성계수를 1/10 이하로 낮추고 75km/h의 속도로 반경 250m의 곡선선로를 주행한다고 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 1 Parameters used for numerical simulation

Parameter	Value
Wheelset mass	$m = 1600\text{kg}$
Bogie mass	$m = 2400\text{kg}$
Carbody mass	$m = 21000\text{kg}$
wheel radius	$r_0 = 0.43\text{m}$
Half of the track gauge	$a = 0.7175\text{m}$
Conicity	$\lambda = 0.05$
Half of the primary vertical damping arm	$b = 1.0\text{m}$
Longitudinal stiffness of the primary suspension	$K_{px} = 6.6 \times 10^6\text{N/m}$
Lateral stiffness of the primary suspension	$K_{py} = 4.4 \times 10^6\text{N/m}$
Longitudinal stiffness of the secondary suspension	$K_{sx} = 0.167 \times 10^6\text{N/m}$
Lateral stiffness of the secondary suspension	$K_{sy} = 0.167 \times 10^6\text{N/m}$
Lateral damping of the secondary suspension	$C_{sy} = 0.096 \times 10^6\text{Ns/m}$
Lateral rail stiffness	$K_r = 15 \times 10^6\text{N/m}$
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	$I_{wz} = 550\text{kgm}$
Yaw moment of the inertia of the bogie	$I_{bz} = 2600\text{kgm}$
Yaw moment of the inertia of the carbody	$I_{cz} = 900000\text{kgm}$

수치해석 프로그램은 Matlab & Simulink® 을 이용하여 모델을 구성하였고 파라미터 값들은 Table 1과 같다. Fig. 4는 Simulink® 안에서의 철도차량을 모델링한 그림이다.

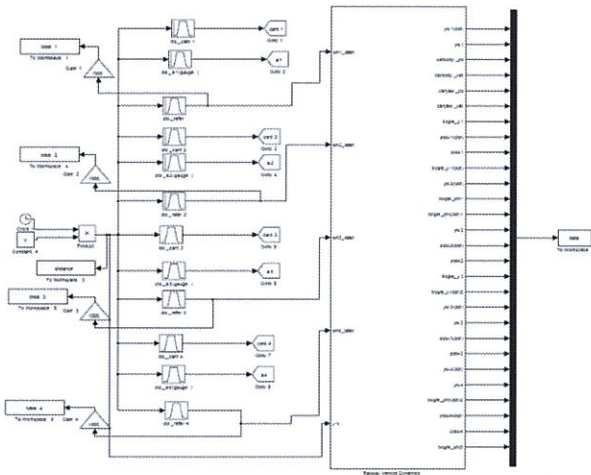


Fig. 4 14DOF railway vehicle model in Simulink®

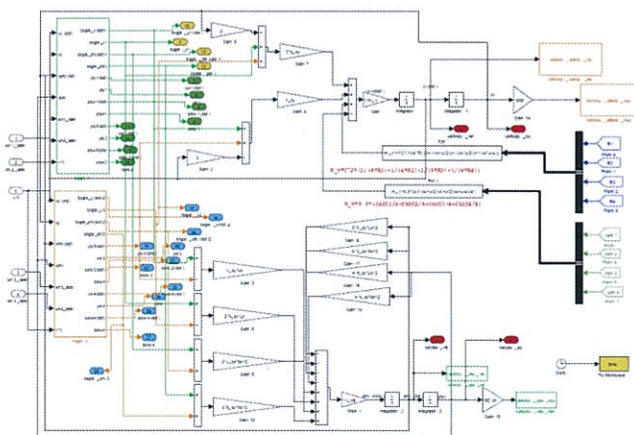


Fig. 5 Detail model of railway vehicle

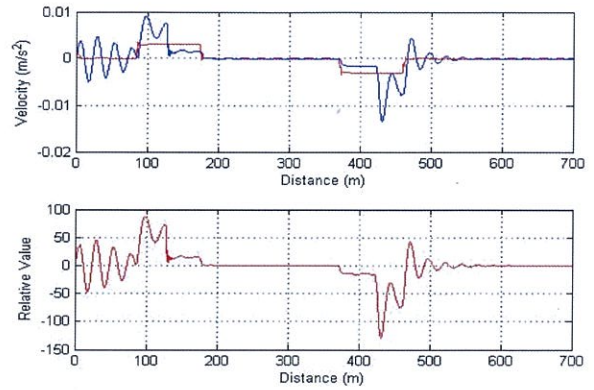


Fig. 6 Reference velocity vs Relative velocity

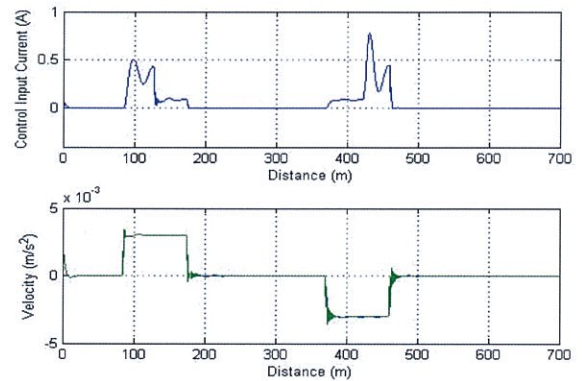


Fig. 7 Control input Current and Velocity

시뮬레이션 결과를 살펴보면, 우선 기존의 1차강성계수를 가지는 철도차량 모델에 액추에이터의 능동제어(Active Control)를 통해 얻어진 대차의 횡방향 속도를 Reference 값이라 가정하였다. Fig. 6은 1차강성계수를 1/10로 낮추고 같은 조건하에서 곡선부를 주행할 때 대차의 횡방향 속도와 Reference 값을 비교하여 나타낸 그래프이다. 그 결과 강성을 낮추었을 때 횡방향 운동이 커진 것을 볼 수 있으며, 이러한 결과에 SkyHook 개념을 적용하여 MR 댐퍼의 입력전류에 따른 댐핑계수를 변화시켜 횡방향 운동을 제어하였다. Fig. 7은 제어를 위한 MR 댐퍼의 입력전류 값과 MR 댐퍼를 적용한 대차의 횡방향 속도를 Reference와 비교한 그래프로 강성을 낮추더라도 MR 댐퍼를 통해 동적 제어가 가능함을 보여준다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 1차 강성계수를 낮추고, 수동형 2차 횡방향 댐퍼를 MR 댐퍼로 대체했을 경우 차량의 동특성에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 그 결과 곡선부에서의 조향성능을 향상시키기 위하여 낮춘 강성계수에 의해 발생하는 불안정한 동특성을 MR 댐퍼의 제어를 통해 향상될 수 있음을 보여주었다.

참고문헌

1. 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
2. T. X. Mei, " Control Design for the Active Stabilization of Rail Wheelsets ", Journal of Dynamic Systems(by ASME), Vol.130, 2008
3. Y K Lau, W H Liao, " Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension, IMechE, Vol. 219, 2005
4. 유원희 외, "도시형 친환경 열차 대차시스템 개발" 한국철도기술연구원 연구보고서, 2007