

# 협궤 차량용 준능동형 현가 시스템 설계

## Design of Semi-Active suspension system for Railway Vehicle with narrow gauge

이남진\*, 김철근\*, 남학기\*

Lee, Nam-Jin Kim, Chul-Gun Nam, Hak-Gi

---

### ABSTRACT

Active suspension system improves ride quality with optimized suspension force, generated by electric, hydrolic or pneumatic power and controlled by micro-processor under various operation condition of train, while Semi-Active suspension system provides optimized and controlled characteristics of suspensions such as damping coefficient without external energy. The benefits fo Semi-Active suspension are no required power source and to be made compact with lower cost.

Train with narrow gauge could be more unstable than one for normal or wide gauge, and it could be more vibrated than others one by external force such as aerodynamic force and track irregularity. So, the reduced ride quality could be improved with appling with Semi-active suspension system.

In this report, the Semi-Active suspension system for narrow gauge train shall be proposed and to prepare the Roller Rig test of this train, integration of system, development of control algorithm and confirmation of its performance with simulation tool would be taken.

---

### 1. 서론

능동형 현가장치는 다양한 차량의 상태에 따라 최적의 현가특성에 해당하는 현가력을 차량에 제공하여 승차감을 향상하는 시스템이며, 준능동형 현가장치는 능동형 현가장치와 달리 별도의 구동원없이 작동하여, 능동형 현가시스템에 비해 전체 시스템의 규모가 작고, 저렴한 특성이 있다. [1,2,3]

협궤차량은 궤간 거리가 일반궤에 비해 좁아 상대적으로 안정성이 떨어지는 차량으로 여타 궤도 차량에 비해 횡방향 진동이 커 승차감이 낮을 수 있고, 차체에 가해진 외란으로 인한 승차감 저하가 심할 수 있고, 이러한 문제를 능동형 현가장치의 장착으로 해결할 수 있다.

본 연구에서는 협궤 차량용 준능동형 현가장치를 제안하고, 개발중인 협궤용 준고속 열차의

---

\* (주)로템 주행장치개발팀, 비회원

시험을 대비하여, 차량 및 시스템에 적합한 시스템의 구성품 선정, 제어 알고리즘 제시, 성능 예측을 수행하고자 한다.

## 2. 차량 및 주요 구성품 모델링

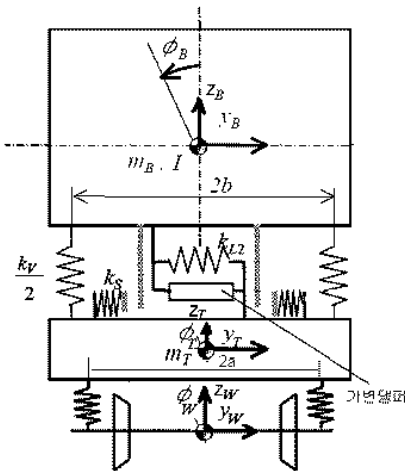
### 2.1 차량

설계 대상이된 차량은 기본 사양은 Table 1.과 같으며, 능동현 현가장치의 설계를 대차별 독립 제어로 구상하여, 차량의 half model을 그림 1.과 같이 단순화하여 수학적 모델을 구성하였다.

Table 1 Key figures of Vehicle

Key figure	Value
Track gauge	1067 mm
Max. axle load	14 ton(fully laded condition)
Max. Design speed	120 km/h
Wheel base	2300 mm
Wheel Diameter	860/780 mm (new/worn)

차량 시스템의 입력을 차축 변위로 설정하고, 입력변수  $U = [y_w, z_w, \phi_w]^T$ 의 값은 Vampire를 통해 생성하였다. 차량모델의 상태변수는 대차와 차체에 각각 6개의 변위와 속도변수로 단순화된 선형모델을 제시하고, 차량에 영향을 주는 비선형 모델은 별도로 구성하여 향후 제어기 설계시 적용가능토록 하였다.



$$\dot{X} = AX + Bu + F_{wd} \quad \text{수식(1)}$$

$$X = [x_B \quad x_T \quad \dot{x}_B \quad \dot{x}_T]^T \quad \text{수식(2)}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_B \\ \dot{x}_T \\ \ddot{x}_B \\ \ddot{x}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a1 & a2 & a3 & a4 \\ a5 & a6 & a7 & a8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ x_T \\ \dot{x}_B \\ \dot{x}_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b1 \\ b2 \end{bmatrix} U + F_{wd} \quad \text{수식(3)}$$

상기 수식(1~3)은 차량 모델을 식을 단순화 하여 표현한 것이다.

Fig. 1 Analytical model of target vehicle

### 2.2 가변댐퍼

가변댐퍼는 준능동형 현가 시스템의 핵심구성 요소로서, 외부 가변댐퍼 내장 서보밸브를 통해 댐퍼내 Orifice 통과유량을 제어하고, 이를 바탕으로 Damping Coefficient를 조절한다. 가변댐퍼의 단순화 모델은 Fig 2.와 같으며, 수학적 모델은 수식(4~8)과 같다. 댐퍼내의 부쉬효과를 고려하여, 내부 변수  $x_2$ 를 지정하였으며, 코일의 유효전류 효과를 위해 서보밸브내 유효 전류  $i_2$ 를 지정하고 있다.

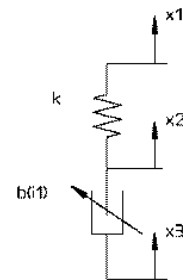


Fig. 2 Simplified Variable Damper

가변댐퍼의 입력전류 영역은  $-1.5 \sim 1.5$  [A]로 양극을 사용하며, 제이거 및 Signal conditioner의 고장에 대해 0[A]에서 Passive damping력을 확보하여 기준승차감을 만족시킬 수 있도록 시스템을 구성하였다. Fig.3에서 Passive Damper와 가변댐퍼의 Damping력과, 모델링에 적용한 수식과 시뮬결과를 비교하였다. 수식(4-8)은 가변댐퍼의 수학적 모델을 수식으로 환한 것이며, 시뮬적으로 관련된 변수를 추정하였다.

$$A1 = A11 * 2,72^{412 * i2} \quad \text{수식 (4)}$$

$$A2 = A21 * 2,72^{422 * i2} \quad \text{수식 (5)}$$

$$Fd = k * (x1 - x2) \quad \text{수식 (6)}$$

$$\frac{1}{\omega i^2} * \frac{d^2 i2}{dt^2} + \frac{2 * Ri}{\omega i} * \frac{di2}{dt} + i2 = i1 \quad \text{수식 (7)}$$

$$\left( \frac{dx2}{dt} - \frac{dx3}{dt} \right) = A1 * Fd + A2 * Fd^3 \quad \text{수식 (8)}$$

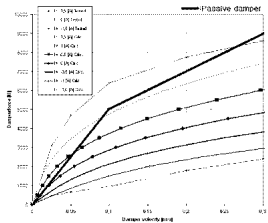


Fig. 3 Damping force Diagram

### 2.3 제이거

제이거는 차체에 장착된 가속도 센서를 통해 차량의 횡방향 가속도를 측정하고, 그 방향의 진동을 최소화할 수 있도록 대차와 차체를 연결하고 있는 가변댐퍼에 적절한 저항을 내릴 수 있도록 하며, 댐핑력의 결정은 Sky hook 알고리즘을 적용하도록 한다. 적용된 Sky hook 알고리즘은 가상의 공간과 차체사이에 가상의 댐퍼가 있는 것으로 가정하고, 가상의 댐퍼에 작용하는 가상의 작용력을 차체와 대차의 사이에 있는 Actuator에 상사시켜 실제 힘이 작용하도록하는 알고리즘이며, Fig. 4에서 Sky hook 알고리즘을 표현한 개념도이다.

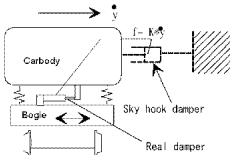


Fig. 4 Schematic of Sky Hook Algorithm

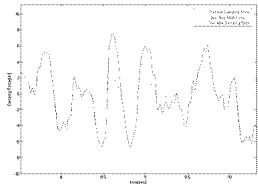


Fig. 5 Example of Variable Damping

Sky hook 알고리즘 적용에 있어, Full Active suspension과 Semi Active suspension의 적용력과 응답에 차이를 보이는데, Semi Active suspension은 Damping coefficient를 변화할 이용한 방식으로 Sky hook damper의 힘을 구현하는데, 한계가 있어 결과에 차이를 보인다. Sky hook damper, 가변댐퍼, 그리고 일반적인 passive damper의 작용력을 비교한 예는 Fig.5와 같다.

### 3. 시뮬레이션 결과

차량의 Half 모델과 Passive suspension과 제어가 적용된 Semi-active suspension을 조합하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 입력자료는 Vampire 110km/h급 전차에서 160km/h로 50[s] 동안 주행한 결과를 1[ms] 간격으로 차축기동을 축출한 것이다. 본 입력조건에 대한 Passive suspension과 Semi-active suspension을 장착한 차량의 횡방향 가속도값을 비교하여, 설계된 준능동형 현가시스템의 성능을 비교하고자 한다.

단, 입력자료인 차축의 기동은 현가특성에 따라 변화 가능한 값이나, 본 연구에서는 차량의 모델을 단순화를 위해 차륜/레일간 모델을 생략하였으며, 현가특성에 의한 차축의 기동은 영향이 미미한 것으로 가정하여, 동일 차축입력을 시뮬레이션에 지정하였다.

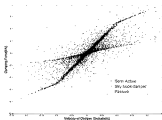
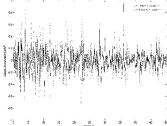


Fig. 6 Lateral Acceleration of carbody Fig. 7 Distribution of Controlled Damping force

Fig. 6은 준능동형 현가장치의 설치 경우의 차량 횡방향 가속도를 비교한 결과로 준능동형 현가장치로 인해 횡방향 진동가속도 진폭치가 줄어들었음을 확인 할 수 있으며, 그림.7은 가변댐퍼에서 작용한 Damping력과 Sky hook damper에서 요구되는 힘을 도식화 하였다. 이상적인 Sky hook damper의 요구력은 damper의 stroke방향과 거의 무관하게 나타남을 확인 할 수 있으며, 음의 damping 계수를 표현할 수 없는 준능동형 현가장치에서는 현시된 것과 같이 작용가능범위의 최소점에 대부분 귀중하여 작용하였음을 알 수 있다. 이와 같은 차이로 준능동형 현가장치(Semi-active suspension)가 능동형 현가장치(Full-active suspension)의 성능의 차이가 있을 것으로 추정된다. 그에 비해 Passive damping력은 여타 댐핑력에 비해 비교적 근값으로 나타나 댐핑계수 조정을 통해 진동가속도 감치를 시도하였으나, 이미 최적의 상수진폭으로 Passive damper 변경으로 인한 진동가속도 감진을 없었다.

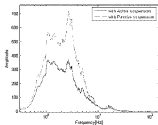


Fig. 8 Lateral Acceleration of Carbody

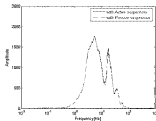


Fig. 9 Lateral Acceleration of Bogie

Fig.8과 Fig.9는 준능동형 현가장치의 설치 전후의 차량과 대차의 횡방향 가속도측 주파수선도로 표현한 것으로, 차량의 횡방향 가속도 경우 1~10Hz 영역에서 상당부분 진동가속도가 줄어든 것을 확인 할 수 있었으며, 대차의 경우 전역역에서 기의 변화가 있음을 확인 할 수 있다. 이것으로 준능동형 현가장치는 탈선등의 차량안전성에 영향을 거의 미치지 않는다고 판단할 수 있으나, 모델의 기본 가정인 2차 현가장치의 영향이 선로와 차륜의 가동에 영향을 거의 미치지 않는다는 가정의 오류에서 기인한 것일 수도 있어, 향후 연구에서 선로와 차륜의 모델을 포함한 차량 시뮬레이션이 요구된다.

#### 4. 성능검증을 위한 시험 장치 구성

차량의 Roller Rig 시험은 새로운 대차 혹은 차량의 개발결과를 field가 아닌 선원실에서 검증하는 방법으로, 현차 시험에서 있을 수 있는 위험성과 시험 선로 확보등의 어려움 해결하기 위한 방안이며, 본 연구의 결과 역시 현차 시험 이전에 Roller Rig 시험을 통해 설계한 업계용 준능동형 현가장치의 성능 검증은 준비하고 있다. 시스템의 기본 구성과 개발 모델은 각각 Fig.6 와 Fig.7과 같다.

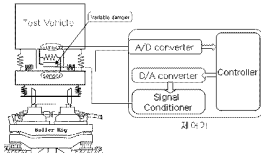


Fig. 6 Schematic of Roller Rig Test Tool

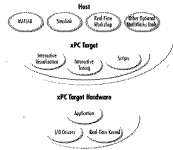


Fig. 7 Schematic of Control-Developing Tool

알고리즘 및 제어기개발 모델은 matlab의 xPC Target 모듈을 기반으로 하여 Real-Time Kernel로 활용, Simulink상에서 개발된 알고리즘을 제어기에 활용할 수 있도록 준비중이다.

#### 5. 결론 및 향후 계획

본 연구에서 협력용 차량을 대상으로 준능동형 현가장치의 설계를 진행하였으며, 설계된 제어기와 차량모델을 시뮬레이션을 수행한 결과, 승차감이 향상됨을 확인할 수 있었다.

향후 연구 계획은 장치의 성능 입증을 위한 Roller Rig 시험과 현차 시험을 통해 제어 알고리즘의 수정,보완하여 양산차량에 상용화될 수 있도록 추진해 나갈 계획이다.

#### 참고문헌

[1] Kimiaki Sasaki, Masao Nagi, "A Lateral Semi-Active Suspension of Tilting Train". International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003,p214~219  
 [2] Masay Tabara,Kazunori Watanabe, Tomoyuki Endo, "Practical Use of an Active Suspension System for Railway Vehicles". International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev

Systems 2003, p225~ 228

[3] Tatsuya Oishi, Teyduya Hayashi, Kimiaki Sasaki, Junichi Arai, "Development of Advanced Semi-active Suspension System For Shinkansen Vehicles", International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003, p220~ 224

[4] Ralph Streiter, "Active Lateral Suspension for High Speed Trains", 2001

[5] 이남진, 김철근, 김진태, "철도차량용 능동형 현가 시스템 설계에 대한 연구", 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, 2004