

철도차량용 능동형 현가 시스템 설계에 대한 연구

The study for Design of Active suspension system for Railway Vehicle

이남진*, 김철근*, 김진태*

Lee, Nam-Jin Kim, Chul-Gun Kim, Jin-Tae

ABSTRACT

Nowadays, the more speedy and functional railway vehicles are required by customers, the more broad boundary conditions of train's running are present. At this condition, it is difficult for the traditional concept of suspension system which has the constant characteristics dependant on the running condition to meet the advanced requirements such as high ride quality. So, the active suspension should be designed to supplied the optimized suspension condition actively and to perform the optimal ride quality on the irregula running condition such as on the enterance or exitance of the tunnel or on the crossing the high speed train each others. On this study, the train dynamic model, integration of active suspension system, and the control logic would be proposed, and the advanced performace of train would be shown though the simulation tests.

1. 서론

철도 차량의 고속화 및 기능화에 따라 차량의 주행 조건은 보다 광범위해지고 있으며, 고전적인 현가장치의 개념인 고정된 현수 특성으로 차량의 승차감 등의 수요처의 요구를 만족시키는 데 한계가 있다. 이에 철도 차량용 능동형 현가장치는 터널의 입출구 혹은 고속의 철도차량이 서로 교차될때 등의 불규칙적으로 차량에 미치는 외력에 대해 최적의 현가 조건을 능동적으로 차량에 제공할 수 있도록 하여, 최적의 차량 승차감을 달성하도록 설계되어진다.

능동형 현가시스템은 틸팅시스템과 자동 조향장치 등과 더불어 지능형 대차 시스템의 근간으로 고속주행, 곡선 주행 성능, 노이즈, 차량 안전성을 향상을 위한 연구가 현재의 기술적 추세가 되고 있다. [1,2,3]

본 논문에서는 능동형 현가시스템 개발에 적용할 차량 모델링을 개발하고, 요구된 기능구현을 위한 능동형 현가 시스템의 구성 요소를 정의한다. 그리고, 제시된 차량과 능동형 현가시스템의 제어를 위한 제어시스템을 제안/적용하여, 차량의 향상된 성능을 확인하고자 한다.

* ㈜로템 주행장치개발팀, 비회원

2. 차량 모델링

능동형 현가 시스템과 제어기 개발을 위한 대상 차량은 최고 속도 120km/h 급의 전동차로 현재 개발 단계에 있으며, 관련 성능시험 수행을 능동형 현가 시스템과 병행할 수 있도록하여, 그 개발 과정을 용이도록하였다. 차량 모델의 단순화를 위해 차륜/레일 간 다이내믹 특성과 1차 현가장치의 특성 결과는 Vampire 프로그램 결과를 활용하였으며, 능동형 현가장치가 장착되는 차체와 대차의 동역학적 관계에 초점을 맞춘 모델링을 제안한다. 제안된 차량 모델의 개념도는 아래 Fig.1과 같다.

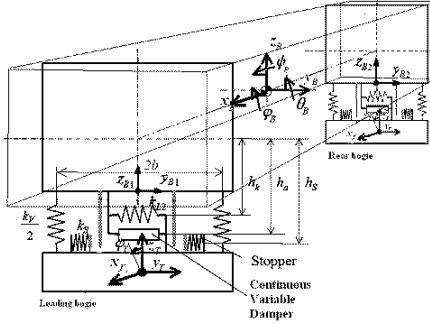


Fig.1 Analytical model of vehicle

한 차량에 두 대의 대차와 차체는 각각 6자유도를 갖고 있고 전체 18 자유도의 모델이 되지만, 그림 1과 같은 대차 단위로 단순화한 평면 모델링의 4자유도(대차의 pitch, yaw 운동은 차체거동에 영향 무시하여, 모델링에서 고려치 않음)를 차체 모델링의 입력으로 차체 6자유도 모델을 제안한다. 또한 x 방향의 자유도를 타 방향과 독립적으로 단순화하여, 방정식을 단순화하여, 식(1)과 같은 방정식을 얻었다. 제안된 모델의 운동 방정식을 바탕으로 모델링을 수행하였으며, 결과는 수식(1~6)으로 표현된다.

$$m\ddot{x}_B = k_c(x_{T1} - x_B) + d_c(\dot{x}_{T1} - \dot{x}_B) + k_c(x_{T2} - x_B) + d_c(\dot{x}_{T2} - \dot{x}_B) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y_{B1} &= y_B + a \cdot \psi_B & z_{B1} &= z_B - a \cdot \theta_B \\ y_{B2} &= y_B - a \cdot \psi_B & z_{B2} &= z_B + a \cdot \theta_B \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_1 = K(X_{T1} - X_{B1}) + D(\dot{X}_{T1} - \dot{X}_{B1}) \quad F_2 = K(X_{T2} - X_{B2}) + D(\dot{X}_{T2} - \dot{X}_{B2}) \quad (3)$$

$$m \begin{bmatrix} \ddot{y}_B \\ \ddot{z}_B \end{bmatrix} = K(X_{T1} - X_{B1}) + D(\dot{X}_{T1} - \dot{X}_{B1}) + \begin{bmatrix} F_{control} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$I_{xx} \cdot \ddot{\phi}_B = M \cdot \phi_1 + M \cdot \phi_2 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} I_{yy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_B \\ \ddot{\psi}_B \end{bmatrix} = \bar{a} \times F_1 - \bar{a} \times F_2 \quad (6)$$

단, 소첨자 1은 leading bogie 관련 변수, 소첨자 2는 rear bogie 관련 변수, 대문자는 벡터로 두 방향 이상을 한 식으로 표현한다. 이위 수식에서 k_c, d_c 은 center pivot의 주행방향 특성으로 식(1)은 차체의 x방향 운동방정식이며, 식(2)는 차량의 3D 거동을 대차 단위에서 2D로 단순화하기 위한 대개변수의 식이며, 식(3)은 F_1, F_2 은 차체와 대차간의 2차현가장치에 의한 반력이며, 식(4)에서 차체의 수직,수평방향을 식(5-6)은 차체의 roll, pitch, yaw로 간략화하여 표현하였다. $F_{control}$ 은 능동형 현가장치에 의한 가진력이다.

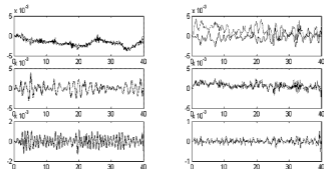


Fig 2. Result of proposed model and Vampire (blue line for proposed model)

위 Fig.1과 수식 (1)~(6)을 바탕으로 차량 모델링을 하였으며, 모델의 정확성 확인을 위해 Vampire에서의 시뮬레이션 결과와 비교 하였다. Fig. 2는 그 결과를 $x, y, z, roll, pitch, yaw$ 순으로 plot하였으며, 일부 방향에 대해 값의 차이가 있으나, 제시된 차량 모델이 능동형 현가 시스템 개발에 활용에 적용하기에 적합할 것으로 판단된다.

3. 능동형 현가 시스템의 구성

능동형 현가 시스템의 구성 요소는 차량의 상태를 측정, 감시하는 센서와 생성된 차료를 분석하고 능동적으로 차량 상태를 제어하는 제어기, 그리고 제어기의 지령을 받아 수행할 작동기(actuator)로 구성된다. 이때 작동기에 외부 동력원에 따라 적절한 광치가 추가되며, 외부 동력원 없이 자체 변위로 요구되는 변압력을 생성하는 시스템을 별도로 Semi-active suspension system이라 한다. Semi-active suspension system은 일반적으로 댐핑 계수를 외부 제어신호를 이용해 제어하는 방식으로, 일반적인 Active suspension system과 달리 음의 댐핑계수(minus damping coefficient)값을 생성하지 않아, Semi-active suspension이 적용된 차량의 안정성에 악영향을 미치지 않는 것으로 조사된다. [4]

본 연구에서 적용한 Actuator는 CVD(continuous variable damper)로 그 입출력 특성은 Fig 3과 같으며, CVD의 입력 제어신호에 대한 응답특성 시험 결과는 Fig 4과 같다.

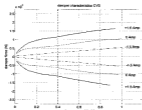


Fig. 3 Characteristics of CVD

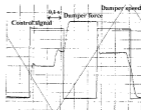


Fig 4 The performance of CVD

장착되는 센서는 차량의 양 끝단의 횡방향 가속도와 CVD의 Stroke sensor를 측정하여, carbody의 횡방향 가속도와 yaw 가속도와 CVD의 반발력 연산을 위한 stroke 속도를 제어기에 전달하도록 한다.

4. 제어 알고리즘

제어기는 차체의 양 끝단에 장착된 가속도 센서를 통해 차량의 yaw와 횡방향 가속도를 측정하고, 그 방향의 진동을 최소화할 수 있도록 대차와 차체를 연결하고 있는 Actuator에 적절한 지령을 내린다. 이때 적절한 지령을 위해 Sky hook 알고리즘을 적용하도록 한다. 적용된 Sky hook 알고리즘은 가상의 공간과 차체 사이에 가상의 덤퍼가 있는 것으로 가정하고, 가상의 덤퍼에 작용하는 가상의 작용력을 차체와 대차의 사이에 있는 Actuator에 상사시켜 실제 힘이 작동하도록 하는 알고리즘이며, Fig.5에서 Sky hook 알고리즘을 표현한 개념도이다.

본 논문의 차량 모델에서는 Fig.6에서와 같이 차체의 yaw 운동과 횡방향운동을 구별 및 관측이 가능하도록 되어 있으며, 측정된 yaw와 횡방향 운동을 제어기의 입력으로 선정하여, 제어기에서 두가지 운동모드에 대해 독립적으로 Sky hook 제어알고리즘을 적용하도록 하였다. 제어기에서 나온 결과는 전후의 대차에 장착된 각각의 CVD에 권류 지령을 내리기 위해 Composition과정을 거쳐 최종적으로 Active suspension system을 구동한다. Fig.7 은 본 글에서 기술한 제어 알고리즘에 대한 Control flow이며, 향후 제어 응답성을 빠르게 하고, 시스템의 안정성을 높이는 제어 알고리즘이 추가될 예정이다.

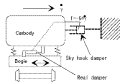


Fig. 5 Concept of Sky hook algorithm



Fig. 6 Yaw and later mode vibration

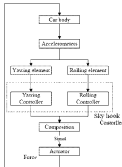


Fig. 7 Flowchart of control logic

5. 시뮬레이션

위 절에서 제안된 차량 모델과 제어기 그리고, CVD을 조합된 Semi-active suspension system 시뮬레이션하였다. 운행조건은 1개 차량이 직선주행성능을 40sec간 운행한 것으로 한다. 선로의 조건은 160km/h급의 선로로 가정하였으며, 풍력, 원심력, cam효과 등은 고려하지 않았다. 가정된 조건에서의 vampire 시뮬레이션 결과에서 전후의 대차의 8개 변수를 본 시스템의 입력으로 선정하였으며, 능동형 현가시스템의 성능 비교를 위해 일반 덤퍼의 시뮬레이션도 병행하여 수행하였다.

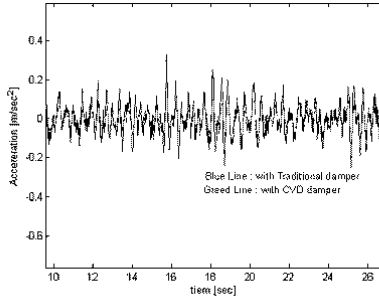


Fig.8 Lateral acceleration of carbody

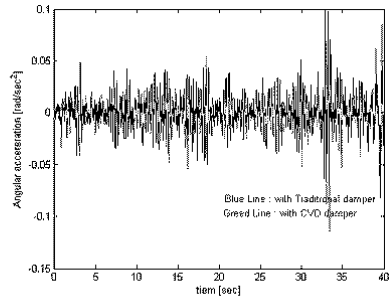


Fig.9 Yaw acceleration of carbody

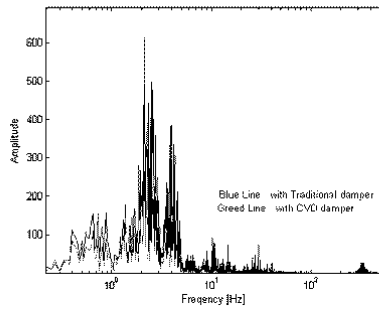


Fig.10 Lateral acceleration on frequency domain

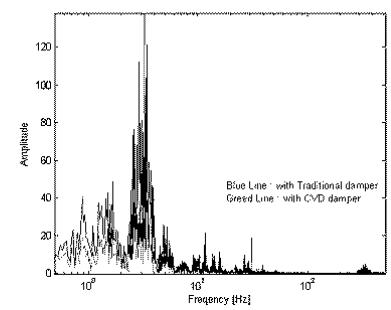


Fig.11 Yaw acceleration on frequency domain

Fig.8-11은 횡방향과 yaw의 진동가속도를 time domain 과 frequency domain으로 표현하였으며, 전 영역에 걸쳐 거동이 줄어들음을 알 수 있으며, 특히 거동이 집중되는 3~5Hz에서 그 감소 폭이 큼을 확인할 수 있다.

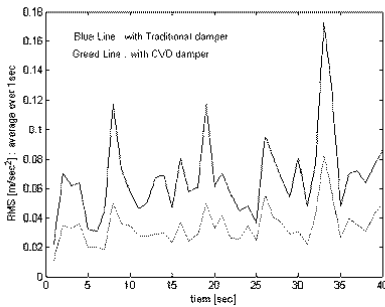


Fig.12 Lateral RMS average value for 1 sec

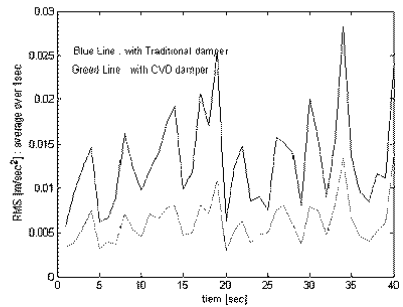


Fig.13 Yaw RMS average value for 1 sec

Fig.12-13은 향상된 성능을 수치화 하기위해 시뮬레이션의 결과를 승차감 지수의 직접적인 치수가 되는 형태인, 1초 단위로 진동가속도의 RMS값을 평균값을 표현한 것이다. 그 결과 대략 50%정도의 성능 향상을 보이고 있다.

6. 결과

능동형 현가장치 개발을 위한 14자유도 차량 모델을 제안하여 그 신뢰성을 확인 하였으며, Sky hook 알고리즘을 이용한 제어기와 CVD를 이용한 Semi-active suspension system을 한 차량 단위에서 구성하여, 차량의 횡방향 운동과 yaw운동을 제어하여, 그 향상된 성능을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

향후 연구 진행방향으로 고장 진단등 상용화에 필요한 추가 검토와 실제시험을 통한 능동형 현가 시스템의 성능을 확인할 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 Tahara,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