

고속철도차량 현가장치용 반능동 제어알고리즘 설계

Design of Semi-active Control Algorithm for High Speed Railway Vehicle Suspension

하성훈* · 최승복† · 이규섭**

Sung Hoon Ha, Seung-Bok Choi and Gyu Seop Lee

1. 서 론

최근 한국형 고속철도의 개발과 소도시 간 경전철의 개발로 인해 도로 교통 수송수단에서 철도차량이 가지는 수송 분담 구조가 증가하고 있다. 이런 수송 능력의 향상은 철도차량의 운행속도 향상과 맞물려 증가되었는데, 철도차량의 동적 특성상 차량의 속도가 증가하면 시스템이 불안정해 지며, 또한 차량의 승차감도 저하되는 특성이 있으며 이는 현가장치의 성능과 밀접한 연관성을 지니고 있다.

철도차량은 크게 차체, 대차 및 윤축으로 결합되어 있고 각각의 요소들은 차량의 승차감, 고속주행 안정성, 비탈선화를 위해 충분한 성능을 낼 수 있는 현가장치로 결합되어 있다. 이와 같은 현가장치는 위치에 따라 1, 2차 현가장치로 나뉘어 지며, 이들 현가장치들은 대부분 스프링 요소 및 댐핑 요소들로 구성된다. 이러한 인자들은 철도차량의 안정성과 승차감에 중요한 영향을 미치는 인자들이며, 철도차량의 현가장치 설계는 초기 설계 단계에서 차량의 안정성 및 승차감을 동시에 고려하여 설계되어야 하지만 최우선 적으로 안정성을 기준으로 설계된다.

하지만 최근 들어 철도차량의 고속화로 인한 차량의 승차감 저하도 차량 설계에 있어서 상당 부분 중요한 문제로 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 현가장치의 능력을 가변적으로 도출할 수 있는 반능동 및 능동 현가 시스템을 구성하여 현가장치의 성능을 향상시킬 수 있다. 이러한 반능동 및 능동 현가장치의 종류로는 모터, 전자기 액츄에이터 및 유공압 시스템을 이용한 능동 현가시스

템과 유체의 움직임은 가변적으로 제어하는 반능동 현가시스템이 있다. 능동 현가시스템은 제어성능이 탁월하지만 시스템을 구성하는데 있어서 고가의 비용이 필요하고 구동에 필요한 에너지 소모가 큰 단점이 있다. 반면 반능동 현가시스템은 에너지 소모도 작으며, 제어 성능도 뛰어나다.

따라서, 본 연구에서는 고속철도차량 현가장치 중 승차감과 밀접한 연관인 있는 횡 댐퍼에 반능동 현가장치인 MR 현가장치를 모델링 하여 이를 제어하기 위한 알고리즘을 구현할 것이다. 이를 위해 철도차량을 간략히 9자유도로 모델링하고 차량의 안정성과 승차감을 동시에 제어할 수 있는 퍼지 스카이그라운드혹 제어 알고리즘을 제안할 것이다.

2. 제어 알고리즘 설계

2.1 9자유도 철도차량 모델링

본 연구에서는 철도차량용 MR 현가장치의 반능동 제어 알고리즘을 제안하기 위하여 2개의 대차를 가지는 철도차량 1량을 모델로 사용하였다. 각각의 대차는 2개의 윤축을 가지며, 윤축으로부터 들어오는 진동은 대차를 통해 차체로 전달되지만 본 연구에서는 모델링의 단순화를 위해 윤축의 운동을 무시하고 대차로부터 들어 오는 진동을 인가하여 알고리즘을 구축하였다. 이 부분은 추후 연구에서 윤축과 차량의 속도로 형성되는 진동을 인가하여 제어 알고리즘을 다시 구축할 것이다. 2개의 대차는 각각 횡 변위, 요, 롤 운동을 가지며, 차체는 강체로 가정하고 횡 변위, 롤, 요 회전에 의한 자유도를 가진다.

제안된 모델과 자유도를 통해 얻은 연립 미분 방정식은 최종적으로 식(1)과 벡터 방정식으로 도출되며 각 M, C, K 행렬은 9×9 행렬을 가지며 외력 F 는 9×1 의 행렬을 가진다.

$$M\{\ddot{x}\} + C\{\dot{x}\} + K\{x\} = F \quad (1)$$

† 교신저자; 인하대학교 기계공학부, 정희원

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : 032)860-7319, Fax :032)868-1716

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** RMS 테크놀로지

2.2 퍼지 스카이 그라운드 훅 알고리즘 설계

일반적으로 알려진 스카이 훅 제어 알고리즘은 차량의 승차감에 중점을 두어 설계가 수행되었다. 그러나, 철도차량의 경우는 승차감뿐만 아니라 차량의 안정성과 연계한 성능 향상이 절대적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 새로운 형태의 퍼지 스카이 그라운드 훅 (fuzzy sky-ground hook) 제어 알고리즘을 제안 하겠다.

본 연구에서 제안된 퍼지 스카이 그라운드 훅 제어 알고리즘은 차체와 천장뿐만 아니라 대차와 지면 사이에도 가상의 댐퍼가 구성되게 알고리즘 설계하였다. 이렇게 구성된 가상의 댐퍼에서 발생하는 댐핑력을 요구댐핑력으로 사용하고, 이 때 요구댐핑력은 차체의 진동을 제어하기 위한 댐핑력과 대차의 진동을 제어하기 위한 댐핑력으로 나뉜다. 이 두 댐핑력을 적절히 조합한다면 승차감과 주행안정성을 동시에 향상시킬 수 있다. 차체와 대차의 상대 속도를 v 라고 가정하고 i 번째 대차에 대한 새로운 형태의 제어기를 다음과 같이 설계함으로써 앞에서 설명한 두 댐핑력을 조합하는 방법을 사용하여 식(2)와 같은 제어 입력값을 도출하였다.

$$u_i = -\alpha_i c_{si} v_i - (1 - \alpha_i) c_{gi} v_i \quad (i=1,2) \quad (2)$$

여기서 c_{si} 는 스카이 훅 제어게인이며, c_{gi} 는 그라운드 훅 제어게인이다. α_i 는 제어입력에서의 스카이 훅에 대한 가중치이며 $0 \leq \alpha_i \leq 1$ 이다. 만일 α_i 가 0이라면 승차감 보다는 주행안정성에 중점을 둔 제어입력이 현가장치에 공급되게 된다. 반대로 α_i 가 1이라면 승차감에 중점을 둔 제어입력이 공급되게 된다. 이 α_i 를 적절히 조절하는 것이 중요한데, 본 연구에서는 전문가의 경험적 지식에 기초한 언어적 제어전략을 기계적인 시스템에 구현할 수 있는 수단을 제공하는 퍼지 알고리즘을 사용하여 조절하였다.

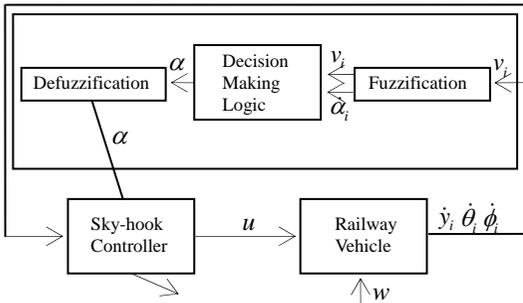


Fig. 1 Control algorithm of fuzzy sky ground hook

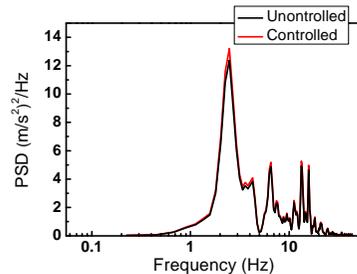
Fig. 1은 퍼지 스카이 그라운드 훅 제어 시스템의 블록선도로 퍼지화부, 추론부, 비퍼지화부로 구성된 퍼지알고리즘과 제어계인을 인가하는 스카이 그라운드 훅 제어 부로 구성하였다. 대차로 들어오는 외란과 시스템으로부터 도출된 댐핑력을 통하여 제어 입력 전류값을 결정하고 이를 현가장치의 요구댐핑력으로 사용한다. 각 현가장치에 대한 제어입력은 반응동 조건을 만족할 때만 공급되도록 하였다.

3. 결과 및 향후 연구계획

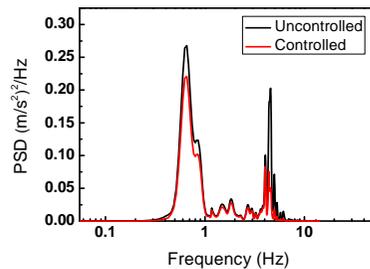
Fig. 2는 대차와 차체의 횡 방향 응답에 따른 PSD 선도를 나타낸 것으로 차체의 경우 제안된 MR 현가장치와 제어 알고리즘을 통해 1차 공진 영역에서 적절히 제어가 된 것을 확인할 수 있었다. 또한 대차의 횡 방향 응답의 경우 제어성능이 비교적 좋지 않는데 이는 퍼지 알고리즘 제어 성능이 낮아 적절한 제어게인 값을 설정하지 못하여 발생한 것으로 판단된다. 따라서 추후 연구에는 제어알고리즘의 개선과 정밀 차량모델링을 통해 보다 향상된 제어성능을 도출할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업기술개발사업 철도차량용 능동현가장치 기술개발 지원에 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.



(a) bogie frame



(b) car body

Fig. 2 PSD of lateral acceleration