

승차감 향상을 위한 철도차량용 MR 현가장치의 진동제어 성능평가

Vibration Control Performance Evaluation of Railway Vehicle MR Suspension System for Ride Quality Improvement

하성훈* · 최승복† · 이규섭**

Sung Hoon Ha, Seung-bok Choi and Kyu Seob Lee

1. 서 론

철도차량은 차량의 크기, 필요한 용도에 적합하도록 차체, 대차 및 윤축이 설계되어 있다. 철도차량에서 현가장치는 위의 3가지 요소를 연결하며 각각의 성능을 유지하도록 설치되어야 한다. 이러한 현가장치는 철도차량의 성능지수를 나타내는 승차감, 탈선계수, 임계속도, 고속주행 안정성에 중요한 영향을 주고 있다. 철도차량에서 현가장치는 윤축과 대차를 연결하는 1차 현가장치와 대차와 차체를 연결하는 2차 현가장치로 구성되며 이들 현가장치들은 대부분 스프링 요소 및 댐핑 요소들로 구성된다. 이러한 스프링 요소 및 댐핑 요소들의 성능은 차량의 안정성과 승차감에 중요한 영향을 미치는 인자들이다. 따라서, 철도차량의 현가장치 설계는 차량의 주행속도와 무게에 따라서 이런 인자들이 통합적으로 만족하도록 설계하여야 한다.

하지만 철도차량의 동적 특성상 차량이 고속으로 주행하면 할수록 차량으로 인가되는 진동은 더 심해진다. 이런 특성을 극복하기 위해서는 1, 2차 현가장치를 포함한 모든 현가요소의 용량을 향상시켜야 한다. 하지만 이는 차량의 안정성을 향상시킬 수는 있겠지만 모든 주행속도 영역에서 차량의 승차감 및 주행성능을 향상시킬 수는 없다. 그러므로 철도차량에서도 현가요소의 특성을 차량에 들어오는 외란에 따라서 능동적 또는 반능동적으로 조절할 수 있는 현가장치의 도입이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 철도차량에 적용 가능한 가변 현가장치를 설계하기 위하여 MR 유체를 이용한 반능동형 댐퍼를 제안하였다. 또한, 이의 성능을 평가하기 위하여 철도차량 2차 현가장치 중 횡 방향 댐퍼에 이를 적용하여 제안된 댐퍼의 성능을 분석하였다.

2. MR 현가장치 설계

2.1 MR 댐퍼의 모델링

MR 댐퍼는 작동 피스톤 헤드에 MR 밸브를 설치하고 피스톤의 작동영역 아래에 부피를 보상할 수 있는 가스 챔버를 설치한 실린더 타입의 댐퍼를 도입하였다. MR 댐퍼는 기존의 유압식 형태의 댐퍼에 MR 밸브를 설치한 것으로 밸브에서 발생하는 자기장과 이에 반응하는 MR 유체를 이용하여 피스톤 헤드를 기준으로 상, 하부 챔버의 압력강하를 변화시켜 가변적인 댐핑력을 도출 할 수 있다. MR 댐퍼의 모델링을 위하여 댐퍼에서 발생하는 압력강하를 수학적으로 표현하면 MR 유체 기본 점성에 의한 압력강하와 MR 유체가 자기장에 의하여 발생하는 항복응력에 의한 압력강하로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta P_d = \Delta P_{vis} + \Delta P_y = \frac{6\eta L}{\pi d^3 R} Q + 2c \frac{L_p}{t_d} \tau_y \quad (1)$$

MR 유체의 특성과 MR 밸브의 기하학적인 형상을 이용하여 식(1)과 같이 댐퍼에서 발생하는 압력강하를 산출할 수 있으며 이를 이용하여 다음과 같이 MR 댐퍼가 가질 수 있는 댐핑력을 표현할 수 있다.

$$F_d = P_a A_s + (A_p - A_s)^2 \Delta P_{vis} + (A_p - A_s) \Delta P_y \quad (2)$$

여기서, MR 댐퍼가 표현하는 최종적인 힘은 우변 첫 번째 항부터 가스 챔버에 의한 탄성력, MR 유체

† 교신저자; 정회원, 인하대 기계공학부

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

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

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 알엠에스테크놀로지 연구소

기본 점성에 의한 댐핑력 그리고 MR 유체 항복응력에 의한 댐핑력의 합이다.

2.2 철도 차량 모델링

본 연구에서는 MR 댐퍼의 진동제어 성능을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같은 2개의 대차를 가지는 철도차량 1량의 수학적 모델을 도입하였다. 차량 1량에 대한 운동은 차체의 횡 응답을 확인하기 위하여 총 15자유도를 가지는 시스템으로 표현하였고 4개의 윤축이 가지는 움직임과 이에 따른 대차, 차체의 움직임이 서로 연동되도록 모델링 하였다. 그리고 차량으로 들어오는 진동 신호를 입력하기 위하여 차량의 바퀴와 레일의 접촉이론과 횡 방향 교차 입력값을 통해 진동 신호를 인가하였다.

3. 제어 성능평가

본 연구에서 제안한 MR 현가장치의 제어를 위하여 반능동 현가장치 제어에 유용하게 쓰이는 스카이훅 제어 이론을 도입하였다. 이를 적용하기 위하여 철도차량이 일정속도에서 운행할 시 발생하는 대차와 차체의 상대속도를 변수로 하여 제어 시스템을 구성하였다. Fig. 2는 차량의 차체 중심에서 발생하는 횡방향의 운동을 PSD 선도로 나타낸 것으로 MR 댐퍼를 제어한 경우와 제어를 하지 않은 것으로 나누어 표현하였다. 이를 통해 차량의 횡 방향 응답은 특징적으로 1Hz 주변에서 발생하는 첫 번째 공진대역과 8Hz 주위에서 발생하는 두 번째 공진대역이 발생하는 것을 확인하였고 MR 댐퍼의 제어 성능을 통해 두 공진 대역 모두 적절히 제어된 것을 확인하였다.

또한, 차량의 승차감 분석을 수행하기 위하여 영국 철도 승차감 기준을 도입하였다. 승차감 기준은

Table 1 Ride quality and ride index

Ride quality	Ride index
Uncontrolled	3
Controlled	1.9

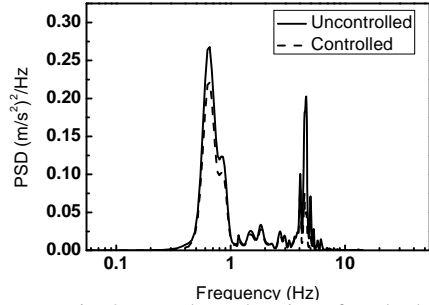


Fig. 2 Lateral acceleration of car body

1~5사이의 수치로 표현되며, 수치가 낮을수록 더 좋은 승차감을 표현하고 있다. 횡 방향 승차감을 도출하는 과정은 다음의 식과 같다.

$$V_r = \begin{cases} 8.1(ace)^{0.3}(fre/5.4)^{1/3}, & fre < 5.4Hz \\ 8.1(ace)^{0.3}(fre/5.4), & fre > 5.4Hz \end{cases} \quad (3)$$

여기서, 각각의 대역의 가속도는 다음 식을 통해 다시 계산되어 최종적인 승차감 기준으로 표현할 수 있다.

$$V_r = (V_{r1}^{10} + V_{r2}^{10} + \dots + V_m^{10})^{1/10} \quad (4)$$

최종적으로 계산된 승차감 기준을 Table 1에 나타내었다. 영국 철도차량 승차감 기준에 따르면 기준 값 3은 만족할 만한 기준으로 나타나고 있으며, 1.9의 값은 매우 우수한 성능을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 철도차량 차체의 진동제어를 통한 승차감 향상을 위해 반능동 현가장치인 MR 댐퍼를 설계하여 이를 철도차량의 수학적 모델에 결합하였다. 그리고 MR 댐퍼로 인한 진동제어 성능을 평가하였고, 이에 따른 차량의 승차감 분석을 수행하였다. MR 댐퍼의 제어성능에 의해서 차량의 승차감이 매우 향상되었음을 확인하였다.

후 기

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

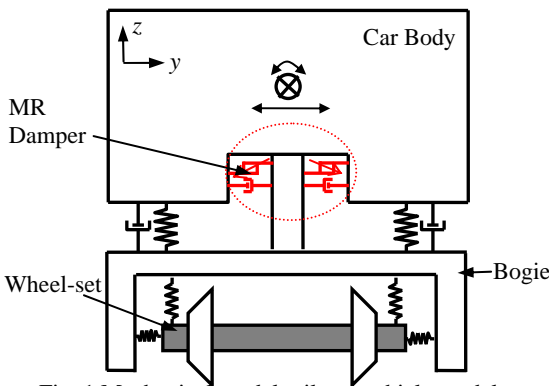


Fig. 1 Mechanical model railway vehicle model