

# 철도차량 승차감 향상을 위한 반능동/능동 진동제어

## Semi-active and Active Vibration Control to Improve Ride Comfort in Railway Vehicle

유 원희†·신 유정\*·Hur Hyunmoo·박 준혁\*

Wonhee You, Yujeong Shin, Hyunmoo Hur and Junhyuk Park

**Key Words :** 철도차량(Railway Vehicle), Ride Comfort(승차감), Vibration Control(진동제어)

### ABSTRACT

The maximum speed is one of the most important performance in high speed railway vehicle. The higher the train speed is, the worse the ride comfort is. In order to solve this problem, a semi-active or active suspension can be applied to high speed railway vehicle. The variable damper with hydraulic solenoid valve is used in the semi-active suspension. But the variable damper with hydraulic solenoid valve requires tank for supplying fluid. The MR(Magneto Rheological) damper can be considered instead of hydraulic variable damper which needs additional device, i.e. reserver tank for fluid.

In the case of active suspension, hydraulic actuator or electro-mechanical one is used to suppress the carbody vibration in railway vehicle.

In this study the MR damper and electro-mechanical actuator was considered in secondary suspension system of high speed railway vehicle. The dynamic analysis was performed by using 10-DOF dynamic equations of railway vehicle. The performance of the semi-active suspension and active suspension system were reviewed by using MATLAB/Simulink S/W. The vibration suppression effect of semi-active and active suspension system were investigated experimentally by using 1/5-scaled railway vehicle model

### 1. 서 론

철도차량의 속도향상과 더불어 고품질의 서비스 및 양질의 승차감을 확보하기 위한 노력이 경주되고 있다. 승차감과 직접적으로 관련이 있는 수동현가장치의 경우 성능은 비록 최적화 되더라도 그 성능에 한계가 있기 때문에 능동형(반능동 및 능동) 현가장치가 대안으로 개발되고 있다. 일반적으로 철도차량

의 승차감은 대차와 차체 사이에 장착되는 이차현가장치의 성능에 많이 의존되고, 주행안정성은 윤축과 대차 사이에 위치한 일차현가장치에 많이 의존된다. 또한, 철도차량에 있어서의 승차감은 궤도와의 연관성을 고려해 볼 때 수직방향보다는 횡방향이 우선 고려된다. 본 연구에서는 대차와 차체 사이에 수동형 횡댐퍼 대신 반능동현가장치 및 능동현가장치를 적용하여 승차감을 향상시키고자 하였다. 반능동현가장치의 경우 일본이나 유럽에서 사용되고 있는 가변 오리피스형 댐퍼를 대신하여 자기유전 (Magneto-Rheology) 댐퍼를 사용하고자 하였으며, 능동현가장치의 경우 유압식 액추에이터 대신 볼스크류형의 전기기계식 액추에이터를 사용하고자 하였다. MR댐퍼의 경우 가변 오리피스형 댐퍼에서 요구되는 부가

† 교신저자; 정회원, 한국철도기술연구원

E-mail : whyou@krri.re.kr

Tel : 031-460-5670, Fax : 031-460-5299

\* 한국철도기술연구원

적인 유압 템크가 필요하지 않고 간단하며, 전기기식 액추에이터의 경우에는 누유의 우려가 없고 비교적 간단하다는 장점이 있다.

승차감 향상을 위한 능동형 현가장치를 실대형의 철도차량에 직접 적용하기 전에 수치해석 및 HILS 또는 축소 모델을 이용한 실험적 검증이 매우 중요하다. 본 연구에서는 상사법칙에 따라 1/5 스케일 축소 철도차량 모델을 개발하여 수동형 댐퍼와 반동 MR댐퍼 및 능동액추에이터를 적용한 경우의 현가장치의 승차감제어성능을 비교 검토하였다.

## 2. 1/5 스케일 철도차량 축소모델 개발

### 2.1 철도차량의 수치해석 모델

철도차량의 승차감에 직접적으로 관계하는 현가장치의 성능을 향상시키기 위해 실험실 차원에서 수행할 수 있는 가장 좋은 방법은 축소모델을 개발하여 연구하는 것이다. 그러나 축소모델을 개발할 때 주의하여야 할 사항은 모델이 축소되더라도 그 동역학적 특성은 잃지 않아야 한다는 것이다.

본 절에서는 상사법칙에 따라 축소인자를 이용하여 1/5 스케일의 철도차량 동역학을 수학적으로 모델링하고 해석결과를 분석하여 상사법칙에 따른 축소모델 철도차량의 타당성을 부여하고자 하였다.

철도차량에 대한 수학적 해석 모델은 Table 1에서 보는 바와 같이 2개의 윤축과 1개의 대차 그리고 반차체로 구성되어 있으며 이를 일차 및 이차 현가장치로 연결되어 있는 구조로 총 10자유도의 운동이 허용되고 그 외의 운동은 구속된다고 가정하였다.

Table 1 Degree of freedom of vehicle model

Parameters	Lateral	Yaw	Roll
Wheelset 1	$y_1$	$\psi_1$	-
Wheelset 2	$y_2$	$\psi_2$	-
Truck 1	$y_{T1}$	$\psi_{T1}$	$\Phi_{T1}$
Carbody	$y_c$	$\psi_c$	$\Phi_c$

$$x = [y_i, \psi_i, y_{\bar{\eta}}, \psi_{\bar{\eta}}, \phi_{\bar{\eta}}, y_c, \psi_c, \phi_c, \dot{y}_i, \dot{\psi}_i, \dot{y}_{\bar{\eta}}, \dot{\psi}_{\bar{\eta}}, \dot{y}_c, \dot{\psi}_c, \dot{\phi}_c]^T \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \dot{y} &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} O_{10 \times 10} & I_{10 \times 10} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} O_{10 \times 1} \\ -M^{-1}F \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $x$ 는 시스템의 상태를 나타내는 상태벡터이며,  $n$ 차 시스템에 대하여  $n$ 개의 요소를 포함한다.  $A$ 는 시스템 매트릭스,  $B$ 는 입력벡터는 변환상수벡터,  $D$ 는 직접전달항을 나타낸다.

### 2.2 축소 철도차량 제작

Fig. 1은 축소 주행시험기 및 철도차량의 구성을 나타낸 것으로 케조륜, 윤축, 대차, 반차체, 현가장치, 센터 피봇으로 구성된다. 공기스프링인 이차현가장치는 볼롤러와 코일스프링을 이용해 횡방향과 수직방향의 운동특성이 분리되도록 구현하였다. 그리고 대차와 차체 사이에 횡방향으로 수동댐퍼, MR댐퍼 및 능동액추에이터가 장착될 수 있도록 하였다. 시험 대상 철도차량 모델은 실물의 철도차량을 1/5 스케일로 축소된 제원을 고려하여 제작되었다. 차체는 대차 상단에 설치된 상하방향 이차 현가장치에 의해 지지되며 대차 중심부와 차체 사이는 센터 피봇에 의해 연결되어 있다.

한편, 축소 주행시험기는 레일에 해당하는 케조륜이 속도 지령에 맞춰 서보모터에 의해 제어되는 방법으로 설계되었다.

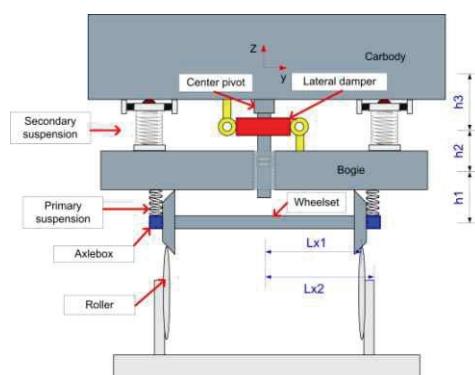


Fig. 1 Layout of test roller rig and vehicle

### 2.3 축소모델의 타당성 검토

본 절에서는 주행시험에 사용될 축소 차량에 대한 동적 특성을 파악하기 위해 수치해석을 실시하였다. 실물 모델의 파라미터와 1/5 스케일 파라미터를 적용하여 임계속도를 확인하였다. 철도차량에 있어서 임계속도는 철도차량이 동역학적으로 안정성이 확보되는 최고 속도를 표현하므로 임계속도를 통해 축소 모델의 타당성을 입증하는 것이 일반적이다. 실물모델의 파라미터를 적용한 임계속도는 76.39m/s이고 1/5 스케일 모델의 파라미터를 적용한 수치해석 모델의 임계속도는 15.39m/s이다. 1/5 스케일 모델의 임계속도를 실물모델의 임계속도로 환산할 경우 76.95m/s에 해당하는 속도로서 실물모델의 임계속도 76.39m/s에 매우 근접하다. 따라서 축소모델은 실물 철도차량의 동적 특성을 매우 잘 나타내준다고 할 수 있다. 한편, Fig. 1과 같이 제작된 1/5 스케일 주행시험기에서 수행된 실험에 의하면 임계속도는 14.3m/s로 확인되었다. 이는 수치해석에 의해 구해진 15.39m/s 보다는 작은 값으로서 수치해석 시 고려되지 않은 비선형성에 의한 영향으로 판단된다.

Table 2 Critical Speed of full and scaled model

	Full model	1/5 scale model	
		Numerical Analysis	Experiment
Critical Speed (m/s)	76.39	15.39	14.3

## 3. MR댐퍼를 이용한 반능동현가장치

### 3.1 스카이훅 제어 이론

본 절에서는 MR댐퍼를 이용한 반능동현가장치의 제어성능을 파악하기 위하여 스카이훅 로직을 사용하고자 하였다.

정지공간에 댐퍼를 매달아 놓은 것과 같은 스카이훅 로직은 이상적인 진동제어 특성을 가진다. Fig. 2와 같은 이상적인 스카이훅 댐퍼는 실제 시스템에는 적용할 수 없다. 따라서 대차와 차체 사이에 댐퍼를 장착하고, 등가의 감쇠계수를 이용하여 스카이훅 댐퍼의 감쇠성능에 상당하는 감쇠력을 발생시키도록

구성할 수 있다.

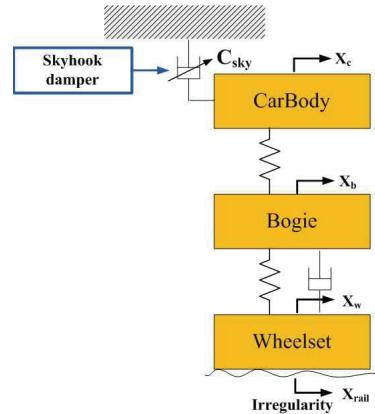


Fig. 2 Ideal skyhook configuration

이 때 감쇠력은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$F_d = F_{skyhook} = \begin{cases} C_{sky} \dot{y}_1 & \dot{y}_{rel} \cdot \dot{y}_1 > 0 \\ 0 & \dot{y}_{rel} \cdot \dot{y}_1 \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

여기에서  $\dot{y}_{rel}$  은 대차와 차체 사이의 상대속도,  $\dot{y}_1$  는 차체의 절대속도를 나타낸다.

### 3.2 소형 MR댐퍼의 특성

MR댐퍼의 작동원리는 전자식 코일에 전류를 인가하면 하우징과 퍼스톤 사이의 틈새 주변에 자기장이 형성되면서 MR유체의 점성을 변화시켜 진동을 제어하는 것이다. MR댐퍼를 이용한 반능동현가장치는 유압식 반능동현가장치에 비해 구조가 단순하며, 능동현가장치에 비해서는 복잡하지 않고 외부 구동파워가 많이 필요하지 않다는 장점이 있다.

본 연구에서 1/5-스케일 철도차량의 승차감 제어를 위해 사용된 소형 MR댐퍼의 특성은 Fig. 3과 같다. Fig. 3에 보여주고 있는 MR댐퍼의 성능을 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$F_d = 148.2 - 296.4 / (1 + (\exp(vel) / 3.3046)) * 116.845 * (i_{mr} / 142.2482) \quad (6)$$

여기에서  $vel$ 은 속도를 나타내고,  $i_{mr}$ 는 전류를 나

타내며,  $F_d$ 는 감쇠력을 나타낸다.

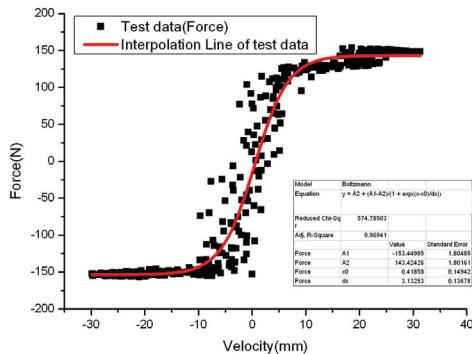


Fig. 3 Test results of MR damper

### 3.3 반동현가장치 성능시험

본 절에서는 소형 MR댐퍼를 축소차량에 장착하고 스카이훅제어를 통해 차체의 진동가속도가 얼마나 감소되는지 살펴보기로 하였다. Fig. 4는 MATLAB/Simulink 프로그램으로 작성된 반동현가장치용 스카이훅 제어 구성도이다.

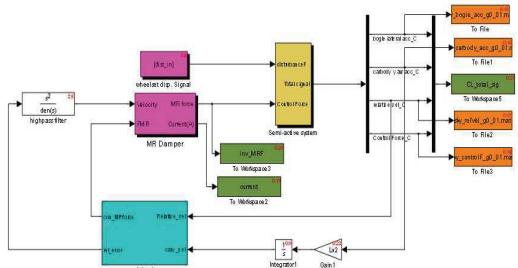


Fig. 4 Simulink diagram for skyhook control

본 연구에서 사용한 스카이훅 제어를 위해 필요한 것은 차체와 대차 사이의 상대속도 및 차체만의 속도이다. 축소형 주행시험기 및 축소 철도차량의 구성에서 보는 바와 같이 시험시에는 차체의 한 끝에서 횡방향의 운동이 구속되어 있어서 요(Yaw) 가속도가 검지되므로 요 방향의 진동가속도를 이용하여 적분기를 통해 차체의 속도를 구하였다. 차체와 대차 사이의 상대속도 또한 차체와 대차의 횡방향 가속도를 취득하여 적분기를 통해 구하였다. 이 때, 적분 시 발생하는 신호의 누적오차를 해결하기 위하여 고주파통과필터를 사용하였다.

Fig. 5는 차체의 횡방향 진동을 저감시키고자 축소 철도차량에 MR댐퍼를 장착하여 시험을 수행하는 프로세스를 보여주고 있다. 축소 철도차량의 차체와 대차 사이에 MR댐퍼를 장착하고 진동가속도, 변위, 타코미터를 부착하였다. dSPACE를 통해 측정항목에 대한 데이터를 저장함과 동시에 스카이훅 제어기법에 의해 요구되는 감쇠력의 전류값을 MR댐퍼의 입력값으로 내보내었다. 이에 따라 MR댐퍼의 감쇠력이 실시간으로 변화하면서 진동을 저감하도록 작동하게 된다.

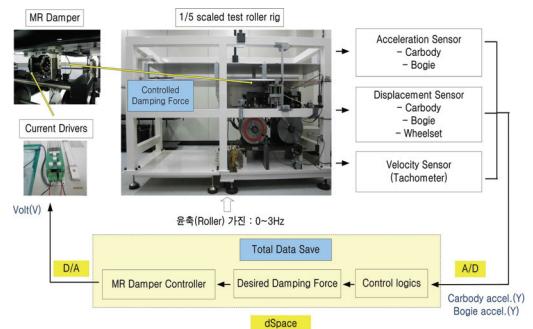


Fig. 5 Measurement and control process

Fig. 6은 MR댐퍼의 성능을 가시적으로 확인하기 위해 1mm의 변위를 4Hz의 정현파로 가진하면서 차체의 진동을 측정한 결과이다.

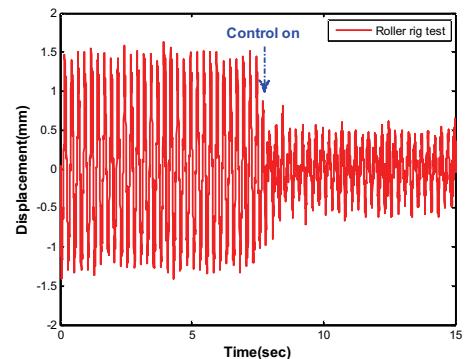


Fig. 6 Displacement of carbody

약 7.5초에서 MR댐퍼가 작동하여 제어하도록 한 결과 차체의 횡방향 변위는 제어 전과 비교하여 67% 감소하였다. ( $1.64\text{mm} \rightarrow 0.53\text{mm}$ ) 한편, Fig. 7은 축소 철도차량에 장착된 MR댐퍼의 스카이훅 제

어를 통해 차체 진동가속도의 주파수 특성을 분석한 결과이다. 이때 주행속도는 실물모델의 약 177km/h에 해당되는 9.8m/s(35.34 km/h)이며, 주행시험기의 베드를 횡방향으로 가진하여 외란을 발생시켰다. 시험결과 제어계인이 클 수록 3~5Hz 성분의 진동이 두드러지게 감소하는 것을 볼 수 있다.

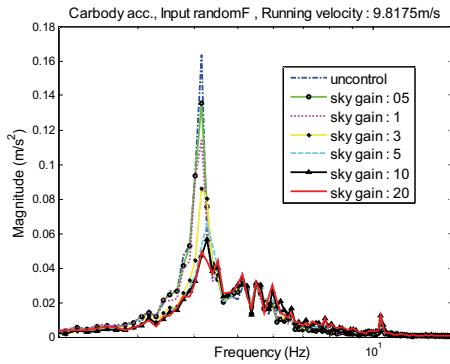


Fig. 7 Carbody acceleration by using skyhook control

#### 4. 액추에이터를 이용한 능동현가장치

철도차량에 반능동현가장치는 일본에서 1995년 최초로 JR 서일본 500계 신간선 차량에 적용되었으며, 능동현가장치는 2002년 최초로 JR 동일본 E2계 및 E3계 신간선 차량에 적용되었다. 능동현가장치를 사용하는 경우는 반능동현가장치로 충분한 효과를 보지 못할 경우이며, 특별히 양질의 승차감을 확보하고자 할 때 사용된다. 일본의 경우에도 능동현가장치를 쓰는 경우에는 특설과 선두차량에만 사용하였으며, 나머지 차량에는 반능동현가장치를 사용하고 있다. 그러나 이들 능동현가장치는 대부분 유압식 액추에이터를 사용하고 있으며, 유럽의 경우에는 최근에 이르러 볼스크류형의 전기기계식 액추에이터를 적용한 능동현가장치를 선보이고 있다.

본 연구에서는 1/5 스케일 모델의 철도차량에 적합한 소형 전기기계식 액추에이터를 선택하여 능동현가장치의 진동자감성능을 검토하였다.

##### 4.1 소형 능동현가장치

본 절에서는 1/5 스케일의 철도차량에 적합한 상용화된 소형 전기기계식 액추에이터를 선택하여 능동현가장치를 구성하였다. 소형 전기기계식 액추에

이터는 1/5 스케일 반능동현가장치에 사용된 MR댐퍼와 크기가 유사하면서 MR댐퍼의 최대감쇠력보다 제어력이 약 2배가 되는 액추에이터이다. Fig. 8과 Fig. 9는 소형 액추에이터 및 1/5 축소 철도차량에 장착된 소형 액추에이터의 모습을 보여주고 있다.

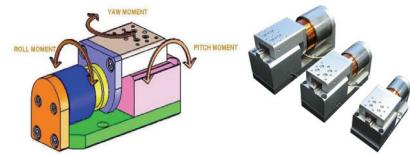


Fig. 8 Actuator for 1/5 scaled railway vehicle



Fig. 9 Installation of small actuator

#### 4.2 능동현가장치 성능시험

Fig. 9와 같이 1/5 스케일의 철도차량에 장착된 소형 액추에이터의 진동제어성능을 파악하기 위하여 반능동현가장치와 마찬가지로 스카이훅 제어 알고리즘을 적용하였다.

축소 주행시험기의 케조륜을 구동하여 축소 철도차량의 주행속도 2.75m/s일 때, 횡방향으로 외란을 주고 제어를 수행한 결과가 Fig. 10에 나타나 있다.

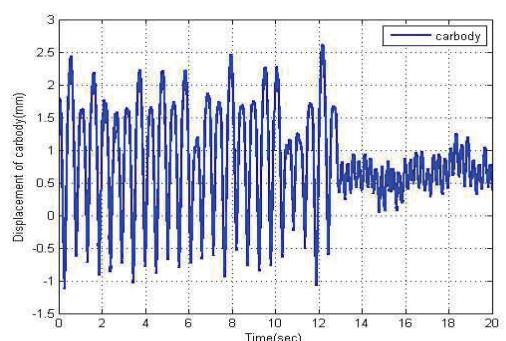


Fig. 10 Displacement of carbody

능동제어 전·후의 차체의 변위를 비교해 보면 능동제어 전에는 차체의 횡방향 변위가 2.42mm이었으나, 제어 후에는 0.99mm로 감소하여 약 41%의 저감효과를 보이고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서 수행된 연구결과 MR댐퍼를 이용한 반능동현가장치 및 전기기계식 액추에이터를 이용한 능동현가장치는 철도차량의 승차감 향상에 매우 유용하다는 결론을 얻었다.

가장 간단한 제어알고리즘인 스카이훅 제어를 적용하여 반능동 및 능동현가장치의 성능을 확인하였다. 향후 보다 다양하고 효과적인 제어전략 및 제어 알고리즘을 적용하여 반능동현가장치와 능동현가장치의 진동제어성능을 최대로 향상시키도록 할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Shin, Y. J., You, W. H., Hur, H. M. and Park, J. H., 2012, Development of the 1/5 scaled railway vehicle to evaluate ride comfort, Proceedings of KSME Annual Spring Conference.
- (2) Ha, S. H., Choi, S. B., Lee, G. S. and You, W. H., 2012, Control Performance Evaluation of Railway Vehicle Suspension Featured by Semi-active Control Algorithm, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 674~675.
- (3) You, W. H., Shin, Y. J., Hur, H. M. and Park, J. H., 2012, Carbody Lateral Displacement of Railway Vehicle According to 2nd Lateral Damper and Track Characteristics, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 722~728.

- (4) Lee, G. S., Ahn, C. H. and Koo, H. W., 2011, Design Method of MR-Damper for Semi-active Suspension Based on a High Speed Railway Vehicle, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 856~857.

- (5) Shin, Y. J., You, W. H., Hur, H. M. and Park, J. H., 2012, Semi-Active Control to Reduce Carbody Vibration of Railway Vehicle by Using Scaled Roller Rig, Journal of mechanical science and technology, Vol. 26, pp.3423~3431.

- (6) You, W. H., Shin, Y. J., Park, J. H. and Hur, H. M., Comparison of Simulation and experimental Results of Railway Vehicle Dynamics by Using 1/5 scaled model, 2012, 19th International Congress on Sound and Vibration.