

# 철도차량 MR댐퍼 성능검증용 HILS를 위한 실시간 해석모델 개발

## Development of a real time simulation model for verification performance HILS of railway vehicle with MR damper

조연호<sup>\*†</sup>, 오형식<sup>\*</sup>, 이강운<sup>\*</sup>

Yonho Cho<sup>\*†</sup>, Hyeongsik Oh<sup>\*</sup>, Kangwun Lee<sup>\*</sup>

**Abstract** The railway vehicles with various active suspension are provided to meet the needs for high speed and high quality. On the domestic market variety researches are accomplishing to adopt the active suspension to railway vehicle. Hyundai-Rotem continuously researches to apply MR damper which developed by defense industries sector on railway vehicle. These days running test with real train is preparing to evaluate MR damper's performance. The analysis and verification performance of parts are necessary to secure the enough stability before running test. Hyundai-Rotem has the plan to secure the stability through the evaluate performance by HILS before running test. A development of real-time simulation model to have the accuracy and reliability is needed. This paper describes the process of developing the reliable 14 dof and 17 dof real time model by comparative study with Vi-Rail analysis results.

**Keywords :** HILS, MR damper, Real-time simulation model, Vi-Rail, Dynamic analysis

**초 록** 철도차량에 대한 고속화와 고급화에 대한 수요증대에 따라 최근에는 다양한 형태의 능동형 현가장치가 적용된 철도차량이 보급되고 있다. 국내에서도 철도차량에 능동형 현가시스템을 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. 현대로템은 방산분야에서 개발된 MR댐퍼를 철도차량에 적용하기 위한 연구를 지속적으로 수행해 왔으며 현재 실차 주행시험을 준비 중이다. 실차 주행시험 전 충분한 안정성 확보를 위해 해석 및 성능 평가가 필요하다. 현대로템은 실차 주행시험 전 HILS를 통한 성능검증을 통해 안정성을 확보할 계획이며, 이러한 HILS시스템의 정확도와 신뢰성 확보를 위한 실시간 해석모델 개발이 필요하다. 본 논문에서는 14자유도 모델과 17자유도 모델로 개발된 실시간 해석모델을 Vi-Rail해석 결과와 비교하여 신뢰성 높은 실시간 해석모델 개발 과정에 대하여 기술하였다.

**주요어 :** HILS, MR댐퍼, 실시간 해석모델, Vi-Rail, 동역학해석

## 1. 서 론

최근의 철도차량 개발은 고속화와 더불어 승차감 개선 및 소음 저감과 같은 고객편의를 높이는 고급화 기술에 대한 수요를 만족하기 위한 연구분야에 대한 투자가 지속적으로 증대되고 있다. 국내에서도 몇 해전에 국책과제를 수행하면서 철도차량에 대한 능동형 현가 시스템 적용에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다.

† 교신저자: 현대로템주식회사 주행장치개발팀(ycho@hyundai-rottem.co.kr)

\* 현대로템주식회사 주행장치개발팀, \*\* 현대로템주식회사 철차연구3팀

하지만, 아직까지 국내에서 능동형 현가시스템을 실차에 적용하거나 실용화된 사례가 없으며 능동형 현가 시스템을 산업현장에 보급할 수 있는 업체가 없다. 현대로템은 방산분야에 적용하기 위해 수년간 개발되었던 MR댐퍼 시스템을 철도차량에 적용하기 위한 연구를 본격적으로 시작하였으며, 현대 자동차에서도 동일한 목적으로 MR댐퍼를 버스에 적용하는 연구를 수행 중이며 현재 주행시험을 통한 성능평가를 완료한 상태이다. 철도차량의 경우 자동차와 달리 시험차량의 제작 및 시험 노선의 확보가 어렵기 때문에 가상의 철도차량과 가상 시험조건에서 개발 부품의 성능을 평가하는 HILS의 적용이 필요한 분야이다. HILS의 성공적인 적용을 위해서는 신뢰성이 확보된 실사가 해석모델의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 MR댐퍼를 적용한 철도차량의 성능 개선효과 검증을 수행하기 위한 HILS용 실시간 해석모델 개발과 이를 검증하는 과정에 관하여 기술하였다.

## 2. 대상 차량 선정

MR댐퍼를 적용하여 시험을 수행하기 위한 대상 차종으로는 고속 주행이 가능한 시험차량인 HEMU430X를 선정하였다. 현재 철도기술연구원에서 다양한 철도 분야 연구를 수행하기 위해 주행시험이 계획되어 있으며, 현대로템에서도 자체기술로 개발한 이층고속열차의 주행시험을 위해 HEMU-430X에 이층고속열차를 추가 배치한 시험편성을 활용한 시험을 검토 중이다.



Fig. 1 HEMU-430X Test Vehicle

철도차량에 적용된 MR댐퍼는 횡댐퍼에 적용하여 횡방향 가속도를 감소시킴으로써 승차감을 향상시키는 효과가 있다. 이러한 반능동현가 시스템의 성능 확인을 위해 횡방향 자유도와 요방향 자유도만을 고려한 14자유도 모델을 이용한 해석이 가능하지만, 횡방향 승차감은 차체나 대차의 롤효과에 의한 횡방향 가속도 성분이 영향을 크게 주게 되므로 롤 자유도를 고려한 17자유도 해석모델이 경우에 따라 실제 차량의 특성을 더 잘 표현해 줄 수 있다.

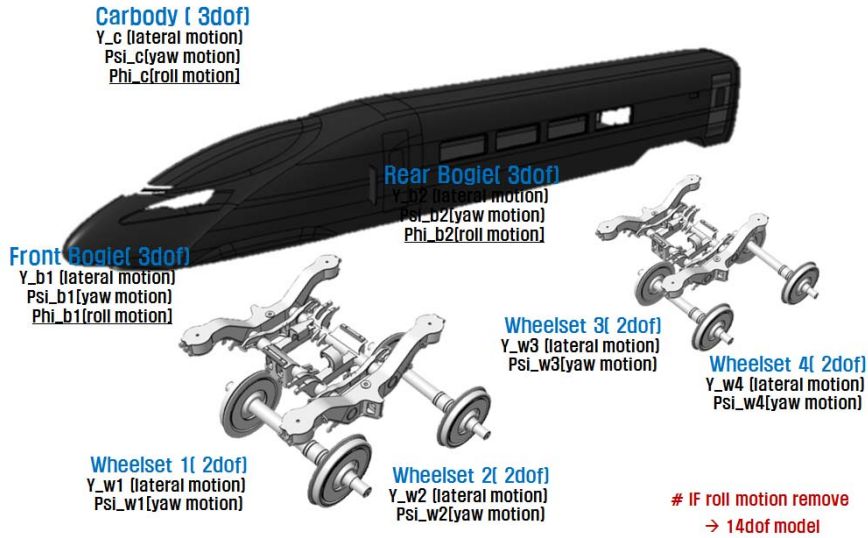


Fig. 2 14dof & 17dof schematic of test vehicle

### 3. 실시간 해석모델 개발

해석 대상 모델에 대하여 차체의 횡, 요, 롤의 3자유도 모델과 대차의 횡, 요, 롤의 3자유도 모델 그리고 휠셋의 횡방향과 요방향 자유도를 포함한 17자유도 해석모델을 개발하였다. 아래 그림은 17자유도를 나타내는 실시간 해석모델 대상 차량의 개략도이다.

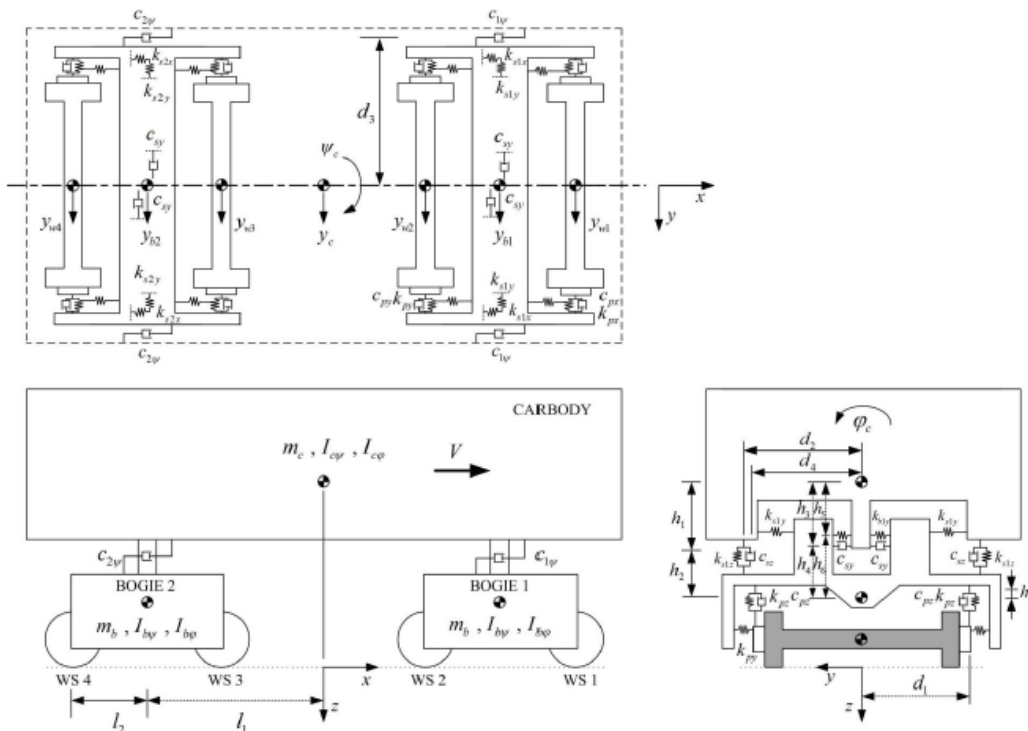


Fig. 3 The simulation model of test vehicle with real time simulation equations with Matlab/Simulink

아래의 수식은 도출된 17자유도 운동방정식을 차체, 대차, 휠 셋으로 구분한 수식이다.

### Carbody

$$\begin{aligned}
m_c \ddot{y}_c = & -2k_{s1y} (y_c - y_{b1} + \psi_c l_1 - \varphi_c h_1 - \varphi_{b1} h_2) - 2k_{s2y} (y_c - y_{b2} - \psi_c l_1 - \varphi_c h_1 - \varphi_{b2} h_2) \\
& - 2c_{sy} (\dot{y}_c - \dot{y}_{b1} + \dot{\psi}_c l_1 - \dot{\varphi}_c h_3 - \dot{\varphi}_{b1} h_4) - 2c_{sy} (\dot{y}_c - \dot{y}_{b2} - \dot{\psi}_c l_1 - \dot{\varphi}_c h_3 - \dot{\varphi}_{b2} h_4) \\
& - k_{b1y} (y_c - y_{b1} + \psi_c l_1 - \varphi_c h_5 - \varphi_{b1} h_6) - k_{b2y} (y_c - y_{b2} - \psi_c l_1 - \varphi_c h_5 - \varphi_{b2} h_6) \\
& + (m_c V^2 / R) \cos \theta_{cant} - m_c g \sin \theta_{cant}
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
I_{c\psi} \ddot{\psi}_c = & -4c_{1\psi} (\dot{\psi}_c d_3 - \dot{\psi}_{b1} d_3) d_3 - 4c_{2\psi} (\dot{\psi}_c d_3 - \dot{\psi}_{b2} d_3) d_3 \\
& - 2k_{1\psi} (\psi_c d_3 - \psi_{b1} d_3) d_3 - 2k_{2\psi} (\psi_c d_3 - \psi_{b2} d_3) d_3 \\
& - 2k_{s1y} (y_c - y_{b1} + \psi_c l_1 - \varphi_c h_1 - \varphi_{b1} h_2) l_1 + 2k_{s2y} (y_c - y_{b2} - \psi_c l_1 - \varphi_c h_1 - \varphi_{b2} h_2) l_1 \\
& - k_{b1y} (y_c - y_{b1} + \psi_c l_1 - \varphi_c h_5 - \varphi_{b1} h_6) l_1 + k_{b2y} (y_c - y_{b2} - \psi_c l_1 - \varphi_c h_5 - \varphi_{b2} h_6) l_1 \\
& - 2k_{s1x} (\psi_c d_2 - \psi_{b1} d_2) d_2 - 2k_{s2x} (\psi_c d_2 - \psi_{b2} d_2) d_2 \\
& - 2c_{sy} (\dot{y}_c - \dot{y}_{b1} + \dot{\psi}_c l_1 - \dot{\varphi}_c h_3 + \dot{\varphi}_{b1} h_4) l_1 + 2c_{sy} (\dot{y}_c - \dot{y}_{b2} - \dot{\psi}_c l_1 - \dot{\varphi}_c h_3 + \dot{\varphi}_{b2} h_4) l_1
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
I_{c\varphi} \ddot{\varphi}_c = & 2k_{s1y} (y_c - y_{b1} + \psi_c l_1 - \varphi_c h_1 - \varphi_{b1} h_2) h_1 + 2k_{s2y} (y_c - y_{b2} - \psi_c l_1 - \varphi_c h_1 - \varphi_{b2} h_2) h_1 \\
& + k_{b1y} (y_c - y_{b1} + \psi_c l_1 - \varphi_c h_5 - \varphi_{b1} h_6) h_5 + k_{b2y} (y_c - y_{b2} - \psi_c l_1 - \varphi_c h_5 - \varphi_{b2} h_6) h_5 \\
& - 2k_{s1z} (\varphi_c d_2 - \varphi_{b1} d_2) d_2 - 2k_{s2z} (\varphi_c d_2 - \varphi_{b2} d_2) d_2 \\
& - 2c_{sz} (\dot{\varphi}_c d_4 - \dot{\varphi}_{b1} d_4) d_4 - 2c_{sz} (\dot{\varphi}_c d_4 - \dot{\varphi}_{b2} d_4) d_4 \\
& + 2c_{sy} (\dot{y}_c - \dot{y}_{b1} + \dot{\psi}_c l_1 - \dot{\varphi}_c h_3 - \dot{\varphi}_{b1} h_4) h_3 + 2c_{sy} (\dot{y}_c - \dot{y}_{b2} - \dot{\psi}_c l_1 - \dot{\varphi}_c h_3 - \dot{\varphi}_{b2} h_4) h_3
\end{aligned} \tag{3}$$

### Bogie $i=1(-), j=1$ ; $i=2(+), j=3$

$$\begin{aligned}
m_b \ddot{y}_{bi} = & -2k_{s1y} (y_{bi} - y_c \mp \psi_c l_1 + \varphi_{bi} h_2 + \varphi_c h_1) - 2c_{sy} (\dot{y}_{bi} - \dot{y}_c \mp \dot{\psi}_c l_1 + \dot{\varphi}_{bi} h_4 + \dot{\varphi}_c h_3) \\
& - 2k_{py} (y_{bi} - y_{wj} + \psi_{bi} l_2 + \varphi_{bi} h_7) - 2k_{py} (y_{bi} - y_{w(j+1)} - \psi_{bi} l_2 + \varphi_{bi} h_7) \\
& - k_{bij} (y_{bi} - y_c \mp \psi_c l_1 + \varphi_{bi} h_6 + \varphi_c h_5) + (m_{bi} V^2 / R) \cos \theta_{cant} - m_{bi} g \sin \theta_{cant}
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
I_{b\psi} \ddot{\psi}_{bi} = & -4c_{1\psi} (\dot{\psi}_{bi} d_3 - \dot{\psi}_c d_3) d_3 - 4k_{\psi} (\psi_{bi} d_3 - \psi_c d_3) d_3 - 2k_{six} (\psi_{bi} d_2 - \psi_c d_3) d_3 \\
& - 2k_{py} (y_{bi} - y_{wj} + \psi_{bi} l_2 + \varphi_{bi} h_7) l_2 + 2k_{py} (y_{bi} - y_{w(j+1)} - \psi_{bi} l_2 + \varphi_{bi} h_7) l_2 \\
& - 2k_{px} (\psi_{bi} d_1 - \psi_{wj} d_1) d_1 - 2k_{px} (\psi_{bi} d_1 - \psi_{w(j+1)} d_1) d_1
\end{aligned} \tag{5}$$

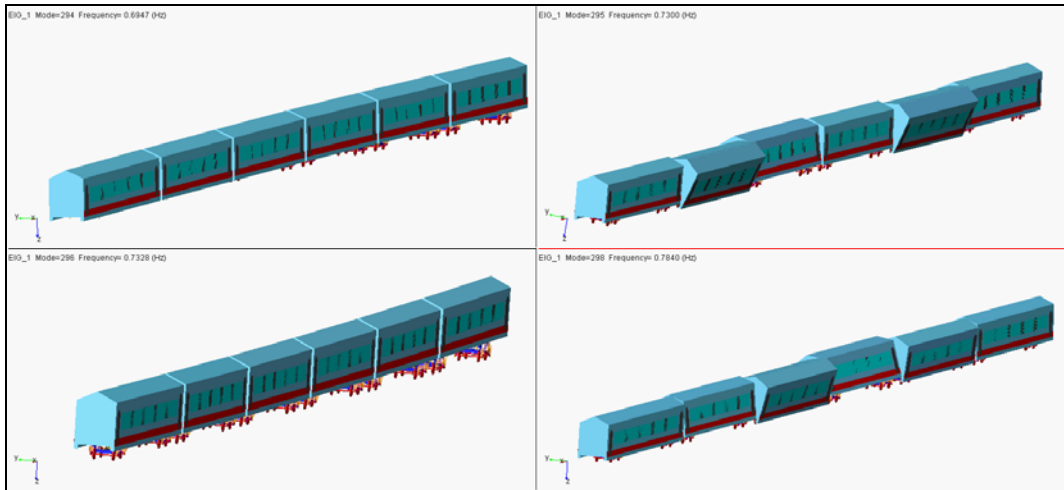
$$\begin{aligned}
I_{b\varphi} \ddot{\varphi}_{bi} = & -2k_{sy} (y_{bi} - y_c \mp \psi_c l_1 + \varphi_{bi} h_2 + \varphi_c h_1) h_2 \\
& -k_{by} (y_{bi} - y_c \mp \psi_c l_1 + \varphi_{bi} h_6 + \varphi_c h_5) h_6 \\
& -2c_{sy} (\dot{y}_{bi} - \dot{y}_c \mp \dot{\psi}_c l_1 + \dot{\varphi}_{bi} h_4 + \dot{\varphi}_c h_3) h_4 \\
& -2k_{siz} (\varphi_{bi} d_2 - \varphi_c d_2) d_2 - 2c_{sz} (\dot{\varphi}_{bi} d_4 - \dot{\varphi}_c d_4) d_4 \\
& -4k_{pz} (\varphi_{bi} d_1) d_1 - 4c_{pz} (\dot{\varphi}_{bi} d_1) d_1 \\
& -2k_{py} (y_{bi} - y_{wj} + \psi_{bi} l_2 + \varphi_{bi} h_7) h_7 - 2k_{py} (y_{bi} - y_{w(j+1)} - \psi_{bi} l_2 + \varphi_{bi} h_7) h_7
\end{aligned} \tag{6}$$

**Wheelset**  $i=1, j=1$  (-) or  $2(+)$ ;  $i=2, j=3$ (-) or  $4(+)$

$$\begin{aligned}
m_w \ddot{y}_{wj} = & -2k_{py} (y_{wj} - y_{bi} \mp \psi_{bi} l_2 - \varphi_{bi} h_7) + 2F_y \\
& + (m_w V^2 / R) \cos \theta_{cant} - m_w g \sin \theta_{cant} + u_{wj} \\
I_{w\psi} \ddot{\psi}_{wj} = & -2k_{px} (\psi_{wj} d_1 - \psi_{bi} d_1) d_1 + 2M_z
\end{aligned} \tag{7}$$

#### 4. 실시간 해석모델 검증

개발된 해석모델의 검증을 위해 2가지 방법을 제안하였다. 우선 해석모델의 고유모드 해석을 수행하여 Vi-Rail을 이용한 차량 해석모델과의 비교를 통해 횡방향과 요방향 모드의 주파수 특성의 일치성을 확인하였다.



**Fig. 4** Mode analysis result of analysis model by Vi-Rail software

실시간 해석모델을 벡터-행렬식으로 기술할 수 있으므로 질량행렬과 댐핑행렬, 강성행렬에 대하여 고유치 해석을 수행할 수 있다. 상태행렬은 17자유도 모델에서 34개의 고유값을 갖게 되며 대부분은 음의 실수부를 갖는 켈레복소수로 존재한다. 고유값의 벡터는 켈레고유벡터의 크기를 나타내고 벡터의 각도는 위상을 나타낸다.

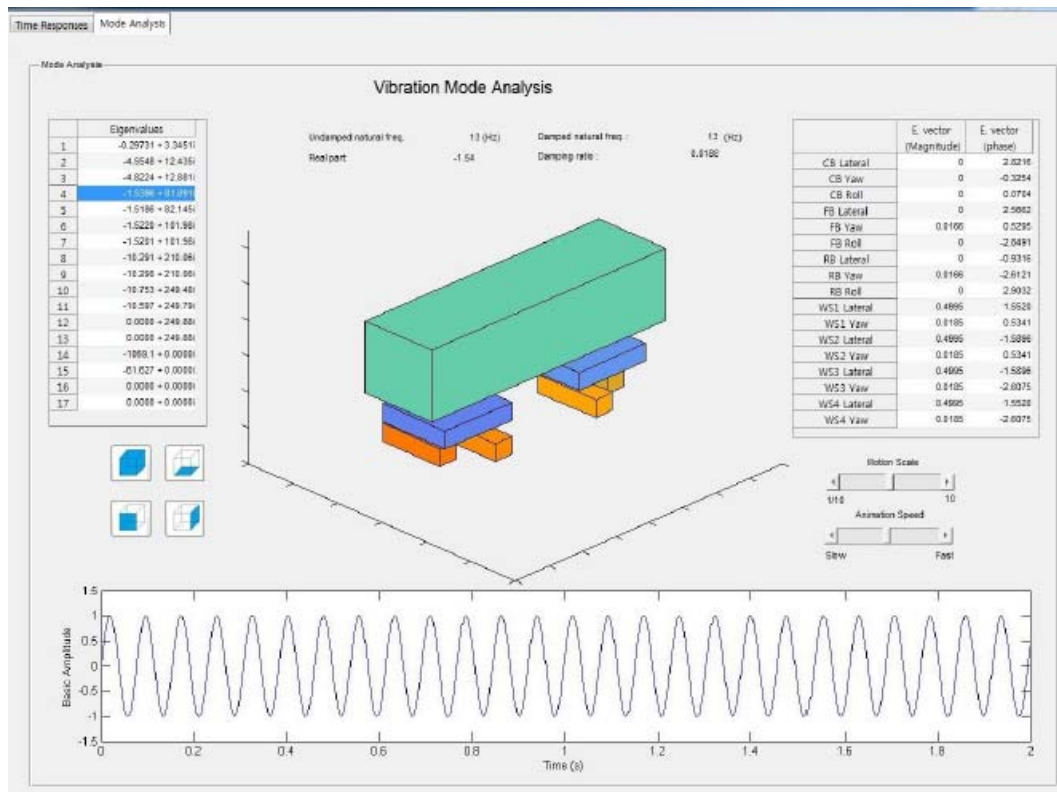


Fig. 5 Mode analysis result of real time simulation model by Matlab

1량 단위 해석을 통해 도출한 Vi-Rail의 모드해석결과 중 횡방향과 요방향 주요모드에 대한 주파수와 감쇠 특성이 개발된 실시간 해석모델과 유사함을 확인하였다. 초기외란 과 곡선 주행 특성에 대한 횡방향 변위와 요각변화를 비교하여 모델의 정합성을 확인하였다.

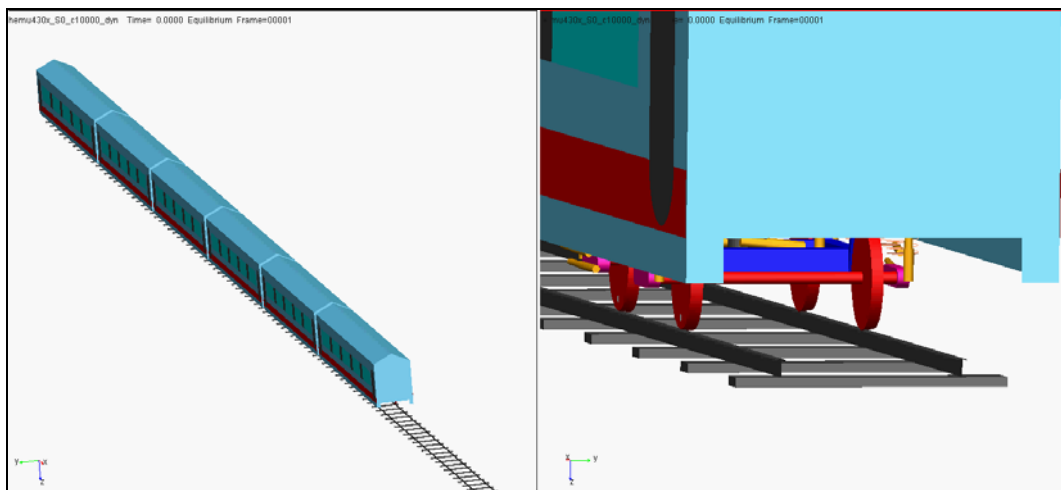


Fig. 6 running analysis result of analysis model by Vi-Rail

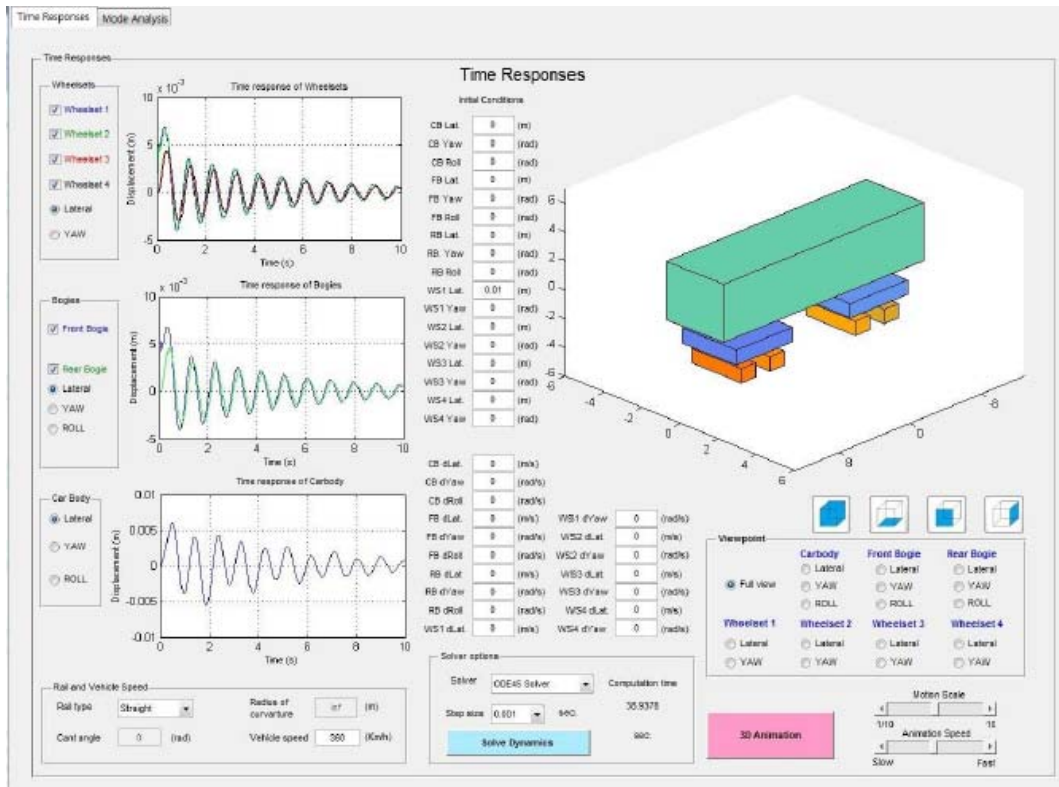


Fig. 7 running analysis result of real-time simulation model by Matlab

## 5. HILS 적용 및 검증

개발된 실시간 해석모델을 dSPACE사에서 제공하는 control desk와 motion desk를 이용하여 실시간 철도차량 해석모델을 개발하였으며 아래 그림과 같이 외란입력에 대한 실시간 응답특성을 포함하여 MR댐퍼 제어기와 MR댐퍼를 적용한 성능 개선 효과를 검증하였다.

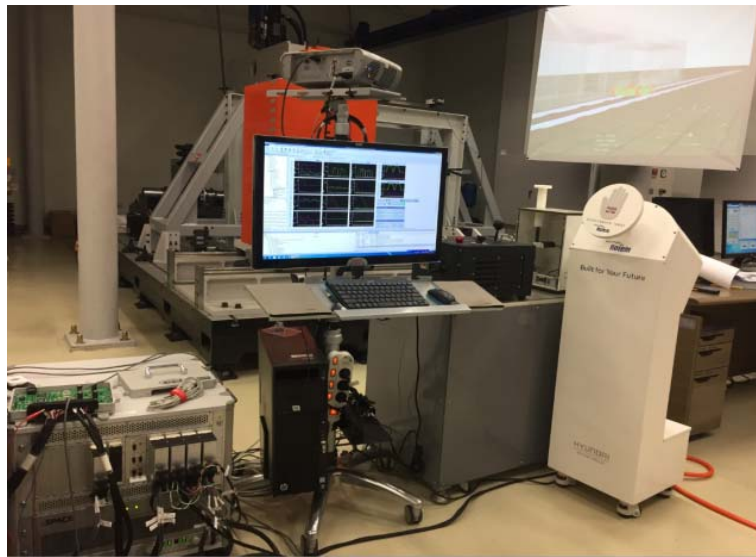


Fig. 8 MR damper performance evaluate by HILS with real time simulation model