

캡슐트레인 주행 동특성 분석을 위한 축소 시험장치의 개발

이진호*, 유원희, 이관섭
한국철도기술연구원 신교통혁신연구소

Development of the Small Scale Testbed for Running Dynamic Characteristics Analysis of the Capsule Train

Jin-Ho Lee*, Won-Hee You, Kwansup Lee
New Transportation Innovative Research Center, Korea Railroad Research Institute

요약 공기 저항이 적은 아진공 상태의 튜브 안을 주행함으로써 초고속주행이 가능한 캡슐트레인은 부상 공극이 커서 인프라 건설 비용 절감에 유리한 초전도 유도 반발식 부상을 채택하고 있다. 초전도 유도 반발식 부상은 부상 공극을 크게 할 수 있고, 별도의 공극 제어가 필요 없는 장점이 있는 반면, 공극 변동량이 크고 부상력에 댐핑 특성이 작기 때문에 차량의 주행 안정성 및 승차감이 악화 될 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 차량의 주행 동특성에 기반한 주행안정화장치를 설계하고 적용하여야 한다. 본 연구에서는 캡슐트레인의 동특성을 모사하고 주행안정화장치의 성능을 사전에 검토할 수 있는 1/10 스케일의 축소형 시험장치를 개발하였다. 시험장치는 대차의 모션을 구현할 수 있는 6 자유도 스튜어트 플랫폼, 주행안정화장치가 적용된 2차 현가장치 및 차체로 구성되어 있다. Jaschinski가 제안한 동특성 상사 법칙에 따라 축소 시험장치를 제작하였고, 가이드웨이 불규칙도와 부상 강성이 반영된 대차 모션 구현 알고리즘을 적용하였다. 제작된 시험장치를 이용한 실험을 통해 얻어진 결과와 수치해석 결과와의 비교를 통해 시험장치의 성능을 검토하였다.

Abstract A capsule train runs inside a sub-vacuum tube and can reach very high speed due to the low air resistance. A capsule train uses a superconducting electrodynamic suspension (SC-EDS) method for levitation, which allows for a large levitation gap and does not require gap control. However, SC-EDS has inherent characteristics such as the large gap variation and a small damping effect in the levitation force, which can degrade the running stability and ride comfort. To overcome this, a stability improvement device should be designed and applied based on dynamic analysis. In this study, a 1/10 small-scale testbed was developed to replicate the dynamic characteristics of a capsule train and investigate the performance of stability improvement devices. The testbed is composed of a 6-degree-of-freedom Stewart platform for the realization of bogie motion, a secondary suspension with a running stabilization device, and a carbody. Based on the dynamic similarity law proposed by Jaschinski, the small-scale testbed was manufactured, and a bogie motion algorithm was applied with the consideration of guideway irregularity and levitation stiffness. The experimental results from the testbed were compared with simulation results to investigate the performance of the testbed.

Keywords : Capsule Train, Superconducting Electro Dynamic Suspension(SC-EDS), Running Dynamics, Small Scale Testbed, Vibration Control

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업(PK2001A1)의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jin-Ho Lee(Korea Railroad Research Institute)
email: jinholee@krri.re.kr

Received July 20, 2020

Revised August 14, 2020

Accepted September 4, 2020

Published September 30, 2020

1. 서론

현재 한국철도기술연구원에서 1,000km/h 이상의 주행 속도를 목표로 국내 최초로 개발 중인 캡슐트레인의 주요 개념은 아진공 상태로 유지되는 튜브 안을 캡슐 형태의 작은 크기의 차량이 부상한 상태로 접촉 없이 주행하는 것이다(Fig.1)[1]. 아진공 상태의 튜브 안에서는 공기가 희박하기 때문에 공기에 의한 주행저항을 감소시킬 수 있어 1,000km/h 이상의 초고속주행이 가능하다[1,2]. 캡슐트레인 차량은 강력한 자기장을 생성할 수 있는 초전도 전자석을 탑재하고 있는데(Fig.2), 튜브 내 가이드웨이에 설치된 추진 및 부상-안내용 전자레일과의 상호 작용에 의해 추진 및 부상-안내력이 생성된다(Fig.3).



Fig. 1. Concept of the capsule train[1]

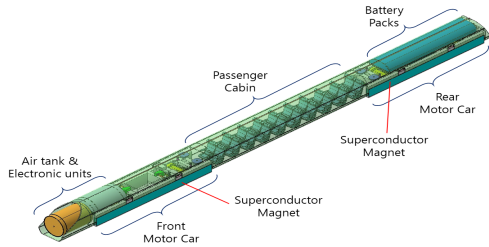


Fig. 2. Capsule train vehicle with superconductor magnet[1]

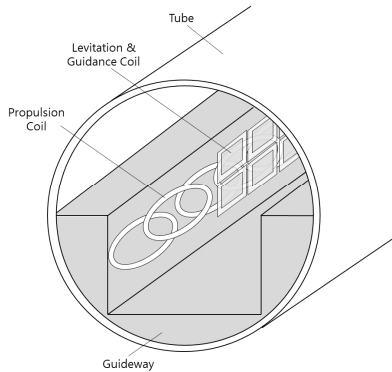


Fig. 3. Tube guideway with propulsion, levitation and guidance coil[1]

캡슐트레인은 Fig. 4와 같이 초전도 전자석 코일과 널플럭스(Null Flux) 형태의 코일과의 상호 작용에 의해 부상 및 안내력이 생성되는 초전도 유도반발식(Superconducting Electro Dynamic Suspension(SC-EDS)) 부상 방법을 사용하는데, SC-EDS 부상 방법은 별도의 부상 및 안내 제어가 필요 없고, 10 cm 이상의 큰 부상 및 안내 공극이 가능해 인프라 건설 비용을 낮출 수 있는 장점이 있다 [3]. 그러나 SC-EDS 부상방식은 주행 중 부상 공극의 변동이 크고 부상력에 댐핑 특성이 거의 없기 때문에 주행 안정성 및 승차감 측면에서 불리하며 이를 향상시킬 수 있는 주행안정화장치가 추가로 필요하다[4,5]. 주행안정화장치로 Fig. 5와 같이 캡슐트레인의 대차와 차체 사이의 2차 현가장치에 능동 액추에이터(Active suspension)를 설치하고 이를 실시간으로 제어하여 대차 및 차체의 진동 변위 및 가속도를 능동적으로 감소시킴으로써 캡슐트레인의 동특성을 향상시킬 수 있다. 이러한 주행안정화장치를 적용하기 위해서는 먼저 캡슐트레인의 주행 동특성을 파악하여야 하고, 이를 기반으로 주행안정화장치를 설계해야 한다.

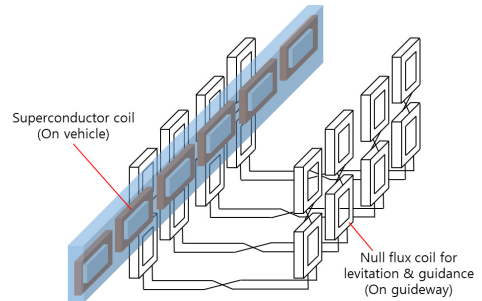


Fig. 4. Superconductor magnet coil and null flux coil[1]

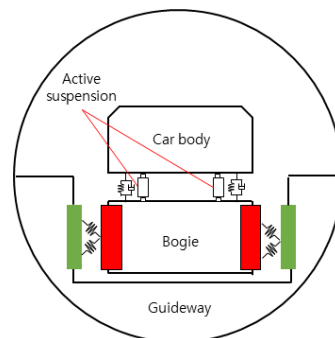


Fig. 5. Stability improvement device

차량의 동특성을 사전에 파악하기 위한 일반적인 방법으로 시뮬레이션을 주로 활용한다. 하지만, 시뮬레이션은 실제 시스템을 반영하는데 한계가 있고, 다양한 제어기법 적용에 따른 주행안정화장치의 실질적인 효과를 입증하기에는 충분하지 않다.

따라서 본 연구에서는 캡슐트레인의 주행 동특성을 분석하고 주행안정화장치의 성능을 실험적으로 확인하기 위하여, 캡슐트레인의 동특성을 모사할 수 있는 1/10 스케일의 축소형 시험장치를 개발하였다. 동특성 상사 법칙에 따라 시험장치의 주요 부품(차체 및 2차 현가장치)을 설계·제작하였고, 주행 동특성에 영향을 미치는 가이드웨이 불규칙도 및 SC-EDS 부상에 따른 부상 강성을 고려한 대차 모션을 구현하기 위하여 6 자유도 스튜어트 플랫폼(Stewart Platform)을 사용하였다. 대차와 차체 사이에는 스프링과 조인트 등으로 2차 현가장치를 구현하였으며 주행안정화장치로써 소형 리니어 샤프트 모터(Linear Shaft Motor)를 적용하였다. 제작된 시험장치를 통해 실험을 수행하고 실험 결과를 수치해석 결과와 비교함으로써 시험장치의 성능을 검토하고자 하였다.

2. 본론

2.1 축소 시험장치 설계 및 제작

본 연구에서는 캡슐트레인의 수직 방향 동특성을 모사할 수 있는 시험장치를 우선적으로 설계·제작하였는데, 이를 바탕으로 향후 수직 및 수평 방향의 동특성 모사가 동시에 가능한 시험장치를 추가 제작할 예정이다.

캡슐트레인의 수직 방향 동특성 모델은 Fig. 6과 같다. 차체와 대차 사이에는 2차 현가장치인 스프링 요소(k_{sus})와 주행안정화장치(Active suspension)가 포함되어 있고, 대차와 가이드웨이 사이에는 초전도 전자석과 Null flux 부상 코일 사이에 발생하는 부상력에 의한 부상 강성(k_{lev})이 존재한다.

본 연구에서는 Jaschinski가 제안한 동특성 상사 법칙을 사용하여 축소 시험장치를 설계하였는데, Jaschinski의 동특성 상사 법칙에서는 l_1 이 실제 모델에서의 길이이고, l_0 가 축소모델에서의 길이일 때, 다음과 같이 길이, 속도 및 밀도에 대한 상사비($\varphi_l, \varphi_v, \varphi_\rho$)를 정의한다[6].

$$\varphi_l = \frac{l_1}{l_0}, \varphi_v = \sqrt{\varphi_l}, \varphi_\rho = 1 \quad (1)$$

Eq. (1)을 이용하면 질량, 힘, 강성, 시간 및 가속도에 대한 상사비($\varphi_m, \varphi_f, \varphi_c, \varphi_t, \varphi_a$)를 다음과 같이 얻을 수 있다[6].

$$\begin{aligned} \varphi_m &= \varphi_f = \varphi_\rho \varphi_l^3, \varphi_c = \varphi_\rho \varphi_l^2, \\ \varphi_t &= \frac{\varphi_l}{\varphi_v}, \varphi_a = \frac{\varphi_l}{\varphi_t^2} \end{aligned} \quad (2)$$

본 연구에서는 실제보다 1/10 만큼 길이가 축소된 시험장치를 제작하고자 하였으므로, Eq. (1,2)에 의한 상사 법칙에 따라 축소 시험장치의 무게는 1/10³, 2차 현가장치 스프링의 강성은 1/10² 만큼 실제보다 축소하여 제작하였다. 시간의 상사비는 $\sqrt{10}$ 이므로($\varphi_t = \varphi_l/\varphi_v = 10/\sqrt{10} = \sqrt{10}$), 축소 시험장치를 이용 하여 실험을 할 때의 시간 영역은 실제 차량의 시간 영역에 비해 1/ $\sqrt{10}$ 만큼 줄어들게 된다. 따라서 시험장치를 이용해 10초간 수행한 시험은 실제 차량에서는 31.6초(=10× $\sqrt{10}$)간 수행한 시험과 동일하게 된다. 또한, 축소 시험장치에서의 변위는 실제 차량 대비 1/10 만큼 줄어들지만, 가속도는 변함이 없다($\varphi_a = \varphi_l/\varphi_t^2 = 1$). Table 1에 실차 모델의 파라미터 값과 Jaschinski 상사 법칙에 따라 1/10로 축소된 모델의 파라미터 값을 정리하였다.

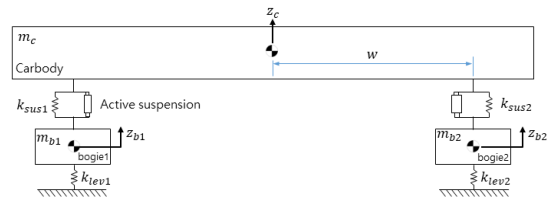


Fig. 6. Capsule train model for vertical motion

Table 1. Parameters for capsule train model

Parameters	Full scale model	Small scale model
Carbody mass (m_c , kg)	14,000	14
Bogie mass ($m_{b1,2}$, kg)	10,000	10
Secondary suspension stiffness ($k_{sus1,2}$, N/m)	403,000	4,030
Levitation stiffness ($k_{lev1,2}$, N/m)	300,000	3,000
Distance between carbody and bogie center (w , m)	8.5	0.85

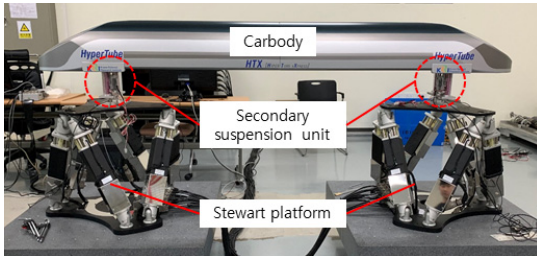


Fig. 7. Developed small scale testbed

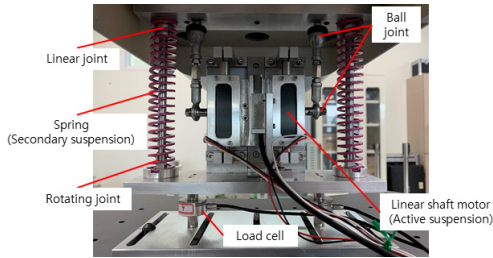


Fig. 8. Secondary suspension unit

Fig. 7은 도출된 사양을 바탕으로 제작된 축소 시험장치의 전체 사진을 보여준다. 차체는 알루미늄 판 위에 플라스틱 재질의 모형 차체를 얹혀 제작하였다. 가이드웨이의 불규칙도와 부상 강성이 반영된 진후 2개의 대차의 모션을 구현하기 위하여 스투어트 플랫폼 2개를 사용하였다. 각 스투어트 플랫폼은 6개의 리니어 액추에이터로 구성되어 있으며, 6 자유도의 모션 구현이 가능하다. 스투어트 플랫폼을 이용하여 대차 모션을 구현하는 방법에 대해서는 다음 절에 상세히 설명하였다.

차체와 대차 사이에는 Fig. 8과 같이 2차 현가장치 유닛을 제작하였다. 스프링을 이용하여 2차 현가장치를 구현하였고 양끝이 각각 선형 조인트와 회전 조인트로 된 링크를 연결하여 수직 방향 및 pitch 방향의 자유도가 확보될 수 있도록 하였다. 주행안정화장치로는 소형 리니어 샤프트 모터를 사용하였다. 모터의 고정자와 이동자는 리니어 가이드를 통해 움직임이 이루어지는데, 고정자는 대차에 연결하고 이동자는 볼 조인트를 이용하여 차체에 연결하였다. 2차 현가장치 유닛 아래에는 로드셀을 설치하여 차체와 대차 사이에 발생하는 힘을 실시간으로 스투어트 플랫폼 제어장치로 피드백시켜 대차 모션을 구현하기 위한 데이터로 사용하였다.

2.2 대차 모션 구현 알고리즘

2차 현가장치 및 주행안정화장치에 의해 차체의 진동이 감소하면 그 반력을 받아 대차의 진동 진폭도 변하기

때문에 이 상호 작용이 고려된 대차의 모션이 스투어트 플랫폼에 의해서 구현되어야 한다. 대차 모션 구현 알고리즘을 설명하기 위한 Fig. 9를 보면 대차에는 현가장치에 의한 반력 F_c 와 외란인 가이드웨이 불규칙도가 부상 강성을 거쳐 발생시키는 힘인 F_g 가 작용하게 된다. z_b 를 대차 변위, z_g 를 가이드웨이 불규칙도, m_b 를 대차의 질량, k_{lev} 를 부상 강성이라고 하면, 다음과 같은 운동 방정식이 성립한다.

$$F_g - F_c = m_b \ddot{z}_b + k_{lev} z_b \quad (3)$$

F_g 는 가이드웨이 불규칙도가 부상 강성에 의해 대차에 가해지는 힘($k_{lev} z_g$)이므로 Eq. (3)은 다음과 같이 된다.

$$-F_c = m_b \ddot{z}_b + k_{lev} (z_b - z_g) \quad (4)$$

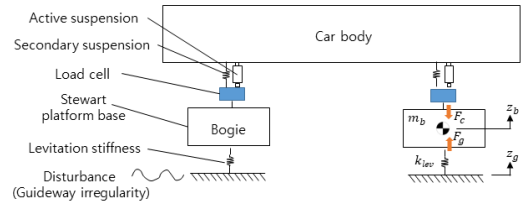


Fig. 9. Forces acting on the bogie

여기서 z_g , m_b , k_{lev} 는 주어지는 값이고, F_c 는 로드셀에 의해서 실시간으로 측정되는 값이다. 따라서 z_b 에 대한 미분방정식인 Eq. (4)에 대해서 수치해석방법을 이용하여 실시간으로 z_b 를 계산하고, 이를 스투어트 플랫폼에서 구현되도록 해야 한다. 본 연구에서는 스투어트 플랫폼을 구동시키기 위한 제어기로 Motion Engineering Inc.에서 개발한 MEI controller를 사용하였는데, 측정된 로드셀 값은 실시간으로 MEI controller에 입력되고 이 값과 주어진 변수를 이용해서 미분방정식인 Eq. (4)를 풀어 대차의 모션(z_b)을 구현하였다. 이때 미분방정식을 푸는 수치해석 방법으로 계산속도가 빠르고 오차가 비교적 적은 Runge-Kutta 방법을 사용하였다.

2.3 성능시험

먼저 수직 방향의 가이드웨이 불규칙도(z_g)에 대한 스투어트 플랫폼의 추종 성능을 확인해 보았다. 이를 위해

불규칙도 프로파일이 지령값으로 입력되었을 때의 스텐더트 플랫폼의 실제 변위(반응값)를 측정하여 서로 비교하였다. 실제 변위 측정을 위해 Fig. 10과 같이 외부에서 레이저 센서를 이용하여 그림에 표시된 것과 같이 스텐더트 플랫폼의 상판 변위를 측정하였다. Fig. 11에 나타난 결과와 같이, 시간 지연이 약 12 ms 가량 발생하나 전체적으로 스텐더트 플랫폼이 가이드웨이 불규칙도를 잘 추종함을 확인할 수 있다.

다음으로 2.2 절에서 설명한 대차 모션 구현 알고리즘을 적용하여 실험을 수행하였다. 시험 편의상 동일한 수직 방향의 가이드웨이 불규칙도가 1번 대차와 2번 대차에 동시에 입력되도록 하였다. 결과값으로서 대차(스튜어트 플랫폼) 변위, 각 대차의 2차 현가장치에 작용하는 힘(로드셀 값) 및 차체의 가속도를 측정하였는데, 차체 가속도의 경우 Fig. 12와 같이 차체 상부에 가속도 센서를 설치하여 측정하였다. Fig. 13은 각 값에 대한 10초간 측정 데이터를 시간 영역에서 나타낸 것이고, Fig. 14는 이를 Fast Fourier Transform(FFT) 하여 주파수 영역에서 나타낸 것이다. FFT 결과에서 1차 진동 주파수는 2.5 Hz이고, 그 주파수에서의 대차 변위는 0.069 mm, 로드셀 값은 0.197 N, 차체 가속도는 0.026 m/s²임을 알 수 있다.

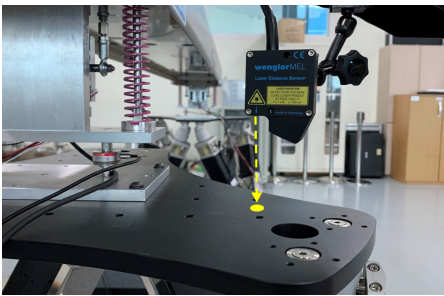


Fig. 10. Stewart Platform displacement measurement by using laser sensor

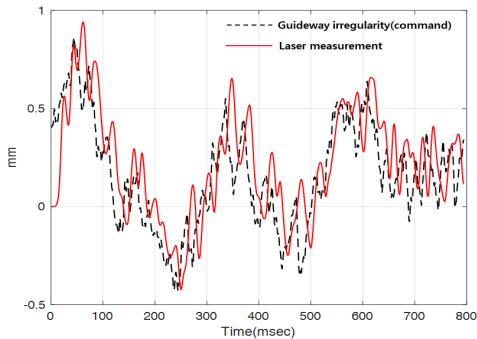


Fig. 11. Guideway irregularity measurement results

실험 결과와의 비교를 위하여 축소 시험장치 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6과 같은 모델에서 수직 방향의 운동만을 고려할 때의 차체 및 대차 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_c \ddot{z}_c &= -k_{sus1}(z_c - z_{b1}) - k_{sus2}(z_c - z_{b2}) \\ m_{b1} \ddot{z}_{b1} &= k_{sus1}(z_c - z_{b1}) - k_{lev1}(z_{b1} - z_g) \\ m_{b2} \ddot{z}_{b2} &= k_{sus2}(z_c - z_{b2}) - k_{lev2}(z_{b2} - z_g) \end{aligned} \quad (5)$$

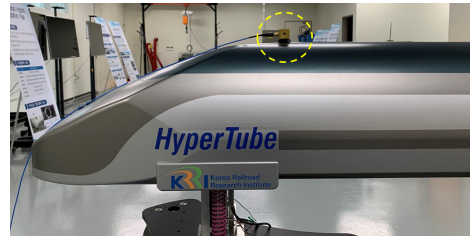


Fig. 12. Carbody acceleration measurement by using accelerometer

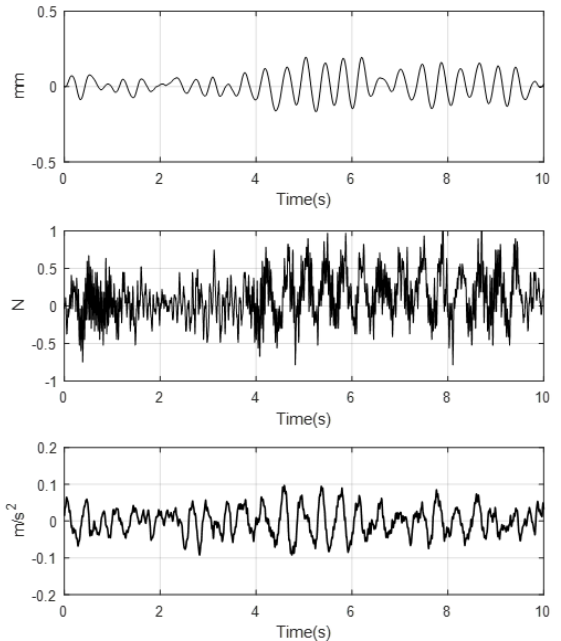


Fig. 13. Experiment results of the small scale testbed in time domain(top: bogie displacement, middle: load between bogie and carbody, bottom: carbody acceleration)

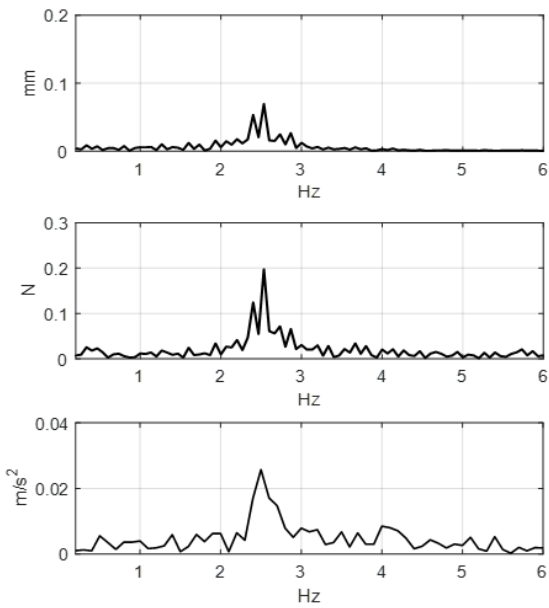


Fig. 14. Experiment results of the small scale testbed in frequency domain(top: bogie displacement, middle: load between bogie and carbody, bottom: carbody acceleration)

이와 같은 운동 방정식을 Fig. 15와 같이 Matlab Simulink로 구현해서 대차의 변위, 대차와 차체 사이의 힘(2차 현가장치에 작용하는 힘), 그리고 차체의 가속도를 살펴보았다. 축소형 시험장치의 파라미터 값을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과가 Fig. 16과 Fig. 17에 나타나 있는데, Fig. 16은 1초부터 10초까지의 시간 영역에서의 결과이고, Fig. 17은 이를 FFT 변환한 결과이다. 1차 진동 주파수는 2 Hz 이고, 그 주파수에서의 대차 변위는 0.168 mm, 대차와 차체 사이의 힘은 0.229 N, 차체 가속도는 0.032 m/s²임을 알 수 있다. Table 2에 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

Table 2. Comparison of vibration values at the first mode

	Experiment (at 2.5 Hz)	Simulation (at 2 Hz)
Bogie displacement(mm)	0.069	0.168
Load between bogie and carbody(N)	0.197	0.229
Carbody acceleration(m/s ²)	0.026	0.032

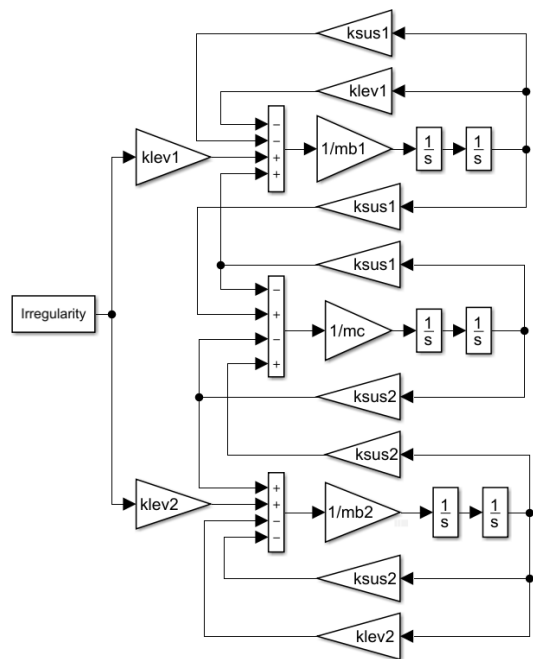


Fig. 15. Simulink model for the capsule train dynamic analysis

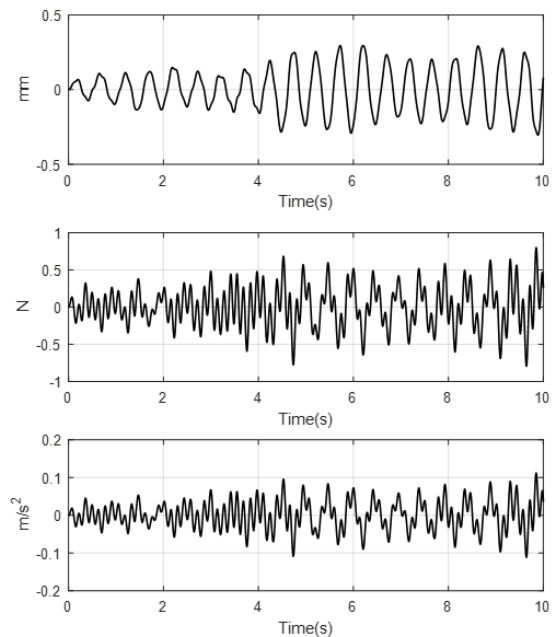


Fig. 16. Simulation results of the small scale testbed in time domain(top: bogie displacement, middle: load between bogie and carbody, bottom: carbody acceleration)

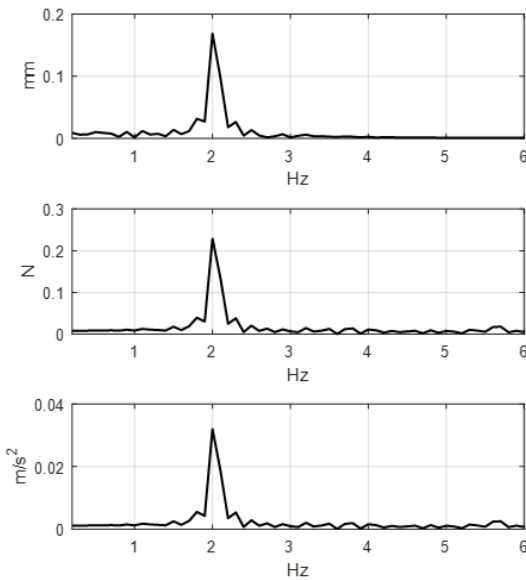


Fig. 17. Simulation results of the small scale testbed in frequency domain(top: bogie displacement, middle: load between bogie and carbody, bottom: carbody acceleration)

대차 변위, 대차와 차체 사이의 반력(로드셀 값) 및 차체 가속도에 대한 데이터 파형 모양은 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 유사함을 확인할 수 있으나, Table 2에 나타난 것처럼 실험값이 시뮬레이션 값보다 다소 작음을 알 수 있다. 이와 같은 차이가 발생하는 이유는 다음과 같이 생각해 볼 수 있다. 시뮬레이션의 경우 2차 현가장치에 댐핑(damping) 요소가 없는 것으로 모델링 하였지만, 실제 시험장치의 2차 현가장치에는 리니어 가이드 및 조인트 등에서의 마찰이 댐핑 요소로 작용하게 된다. 이러한 댐핑 요소의 작용으로 인해 대차 변위 및 차체 가속도가 시뮬레이션에 비해 작게 측정된 것으로 보인다. 시뮬레이션의 파형에서 보이는 고주파 진동 성분이 실험에서는 적어지는 이유도 댐핑의 영향으로 예상된다. 실험 데이터의 FFT 결과(Fig. 14)에서 진동 주파수에서의 peak 모양이 시뮬레이션 결과에 비해 해당 주파수 주위로 분산되면서 peak 값이 작아지는 형태를 나타내는 것 역시 이러한 댐핑 요소에 기인한 것이다.

실험 결과와 시뮬레이션 결과의 차이를 만드는 또 다른 원인은 시험장치에서 측정된 로드셀 값이 시뮬레이션에서의 값과는 다르다는 것이다. 시뮬레이션에서는 대차와 차체 사이의 2차 현가장치인 스프링에 의해 생기는 반력이 모두 대차로 전달된다. 하지만 시험장치에서는 2차 현가장치 유닛에 설치된 리니어 가이드 및 각종 조인

트 등에 존재하는 마찰로 인해 스프링에 의한 순수한 반력보다 줄어든 값이 로드셀로 전달되며, 이는 대차 모션에 영향을 미친다. Fig. 15의 Simulink를 이용하여 대차와 차체 사이의 반력(로드셀 값)이 줄어든 경우에 대해 시뮬레이션을 수행해 보면 진동 주파수가 기존보다 커짐을 확인할 수 있는데, 이는 로드셀 값이 진동 주파수에 영향을 미치는 것을 보여준다.

이와 같은 시험장치 제작상에 발생하는 요소들은 실제 차량을 제작할 때도 발생할 수 있는 것으로서, 이러한 요소들이 시험장치를 이용한 실험 결과를 시뮬레이션 결과보다 더 현실적으로 만든다.

Fig. 18은 실차 기준으로 대차 변위, 대차와 차체 사이의 반력 및 차체 가속도에 대해서 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타낸다. 축소모델 결과인 Fig. 16과 비교하기 위하여 축소모델에서 10초에 해당하는 $31.6\text{초} (= 10\text{초} \times \sqrt{10})$ 까지의 데이터를 표시하였다. 축소모델 결과(Fig. 16)와 비교했을 때, 대차 변위는 10배, 대차와 차체 사이의 힘은 10^3 배이고, 차체 가속도는 동일함을 알 수 있는데, 이는 Eq. (1,2)에서 살펴본 동특성 상사 법칙에 부합되는 결과이다.

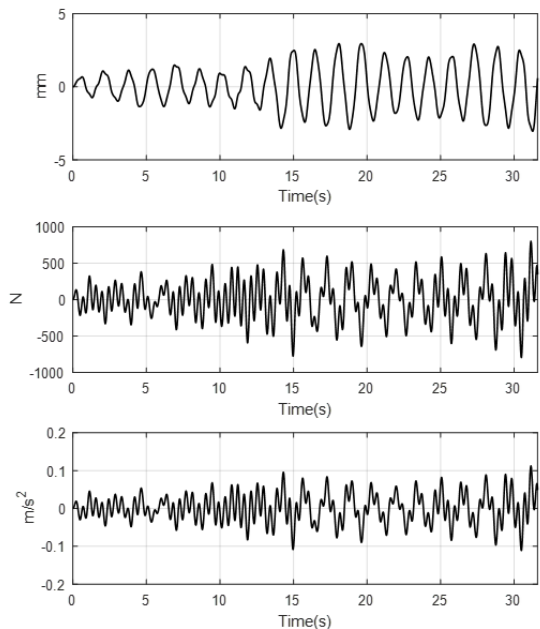


Fig. 18. Simulation results of the real scale capsule train in time domain(top: bogie displacement, middle: load between bogie and carbody, bottom: carbody acceleration)

3. 결론

본 연구에서는 캡슐트레인의 동특성을 분석하고 주행 안정화장치의 성능을 사전에 검증하기 위하여 캡슐트레인의 동특성을 모사할 수 있는 1/10 스케일의 축소형 시험장치를 개발하였다.

Jaschinski가 제안한 동특성 상사 법칙에 따라 시험장치를 설계하여 차체 및 2차 현가장치를 제작하였으며, 6 자유도 스텐트 플랫폼을 이용하여 대차의 모션을 구현하였다. 특히, 가이드웨이 불규칙도, 부상 강성 및 차체와의 반력이 고려된 대차의 모션을 구현하기 위하여, 대차와 차체 사이에 작용하는 힘을 측정하여 스텐트 플랫폼 구동 알고리즘에 활용하였다.

구축된 축소형 시험장치를 이용한 실험 결과를 시물레이션과 비교한 결과 전반적인 데이터 파형 모양은 유사함을 확인할 수 있었으나, 시험장치에 존재하는 댐핑 요소로 인해 실제 측정값이 시물레이션보다 작게 나타남을 확인하였다. 또한, 시험장치의 2차 현가장치 내의 각종 부품에서 발생하는 마찰로 인하여 대차와 차체 사이의 반력이 시물레이션보다 작아지게 되고 이로 인해 진동 주파수가 변함을 확인할 수 있었다.

향후 본 시험장치를 이용하여 주행안정화장치가 주행안정성 및 승차감에 미치는 영향을 검토하기 위한 실험을 추가로 진행할 예정이다. 또한, 수직 방향뿐만 아니라 수평 방향으로도 모션이 가능하도록 시험장치를 수정할 계획이다.

개발된 축소 시험장치는 향후 캡슐트레인 주행안정화장치의 설계 및 성능 검증에 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 특히, 다양한 제어 알고리즘에 대한 실험을 통해, 보다 실용적이고 효과적인 제어 방법을 도출하는 데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

References

[1] Core technology development of subsonic capsule train, Annual Report. Korea Railroad Research Institute, Korea, 2018.

[2] E. Musk, Hyperloop Alpha. White paper, 2014.

[3] H. James, "Technical assessment of maglev system concepts," US army corps of engineers. 1998.

[4] J. He, H. Coffey, "Magnetic damping forces in figure-eight-shaped null-flux coil suspension systems," IEEE Transactions on Magnetics, 33(5),

pp.4230-4232, 1997.

[5] K. Higashi, S. Ohashi, H. Ohsaki, E. Masada, "Magnetic damping of the electrodynamic suspension-type superconducting levitation system," Electr. Eng. JPN., 127(2), pp.49-60,1999. DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6416\(19990430\)127:2%3C49::AID-EEJ7%3E3.0.CO;2-X](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1520-6416(19990430)127:2%3C49::AID-EEJ7%3E3.0.CO;2-X)

[6] A. Jaschinski, H. Chollet, S. Iwnicki, A. Wickens, J. Von Wurzen, "The application of roller rigs to railway vehicle dynamics," Veh. Syst. Dyn., 31, pp. 345-392, 1999.

이진호(Jin-Ho Lee)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학학사)
- 2000년 2월 : 광주과학기술원 전기공학과 (공학석사)
- 2005년 12월 : University of Florida 기계공학과 (공학박사)

- 2006년 4월 ~ 2009년 12월 : 삼성코닝정밀소재 책임연구원
- 2010년 1월 ~ 2011년 12월 : 국방기술품질원 선임연구원
- 2012년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

메카트로닉스, 기계제어, 진동

유원희(Won-Hee You)

[정회원]



- 1993년 8월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (석사)
- 1984년 8월 ~ 1989년 2월 : 국방과학연구소 연구원
- 1993년 12월 ~ 1996년 11월 : 삼성전자 책임연구원
- 1996년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

동력학 및 소음진동 제어

이 관 섭(Kwansup Lee)

[정회원]



- 1995년 2월 : 한국과학기술원(기계공학 석사)
- 2002년 2월 : 모스크바 바우만 공과대학교(제어계측공학 박사)
- 1982년 1월 ~ 1996년 7월 : 국방과학연구소 선임연구원
- 1996년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

〈관심분야〉

제어계측, 초고속 차량