

# 초전도 유도 반발식 부상특성을 고려한 캡슐트레인 동특성 해석 모델 구축 및 주행 특성 분석

이진호\*, 임정열, 유원희, 이관섭  
한국철도기술연구원 신교통혁신연구소

## Capsule Train Dynamic Model Development and Driving Characteristic Analysis Considering the Superconductor Electrodynamic Suspension

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

**요약** 아진공 튜브 안을 부상한 상태로 주행하는 캡슐트레인은 공기저항력 및 마찰력을 획기적으로 줄임으로써 초고속 주행이 가능하다. 캡슐트레인에서 부상방식으로 사용되는 초전도 유도 반발식 부상은 부상 공극이 커서 인프라 건설비용이 저렴하고 별도의 부상제어가 필요 없는 장점이 있지만, 부상-안내 공극의 변화가 크고 부상 및 안내력에 댐핑 특성이 작아 주행 안정성 및 승차감을 악화시킬 수 있다. 본 연구에서는 초전도 유도 반발식 부상방식에 기반한 캡슐트레인의 동특성 해석 모델을 구축하고 이를 활용하여 캡슐트레인의 주행 특성을 분석하였다. 먼저 초전도 유도 반발식 부상에 있어서 동특성에 중요한 영향을 미치고 속도 및 공극 변화에 따라 비선형적인 특성을 보이는 부상 및 안내 강성을 도출하였고, 이러한 강성이 반영된 캡슐트레인의 3D 동특성 해석 모델을 구축하였다. 구축된 모델을 이용하여 캡슐트레인의 속도별 주행 특성이 승차감에 미치는 영향과 곡선 주행, 튜브 처짐 및 튜브 연결부 단차 등과 같은 주행 환경이 차량의 동특성 및 주행 안정성에 미치는 영향을 검토하였다.

**Abstract** A magnetically levitating capsule train, which runs inside the sub-vacuum tube, can reach ultra-fast speeds by dramatically reducing the aerodynamic drag and friction. The capsule train uses the superconductor electrodynamic suspension (SC-EDS) method for levitation. The SC-EDS method has advantages, such as a large levitation gap and free of gap control, which could reduce the infra-construction cost. On the other hand, disadvantages, such as the large variation of the levitation-guidance gap and small damping characteristics in levitation-guidance force, could degrade the running stability and ride comfort of the capsule train. In this study, a dynamic analytical model of a capsule train based on the SC-EDS was developed to analyze the running dynamic characteristics. First, as important factors in the capsule train dynamics, the levitation and guidance stiffness in the SC-EDS system were derived, which depend non-linearly on the velocity and gap variation. A 3D dynamic analysis model for capsule trains was developed based on the derived stiffness. Through the developed model, the effects of the different running speeds on the ride comfort were analyzed. The effects of a disturbance from infrastructure, such as the curve radius, tube sag, and connection joint difference, on the running stability of the capsule train, were also analyzed.

**Keywords** : Capsule Train, Sub-Vacuum Tube, Superconductor, Electrodynamic Suspension Levitation, Dynamic Analysis

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

\*Corresponding Author : Jin-Ho Lee(Korea Railroad Research Institute)

email: jinholee@krri.re.kr

Received April 27, 2020

Revised June 9, 2020

Accepted July 3, 2020

Published July 31, 2020

## 1. 서론

현재 한국철도기술연구원에서 국내 최초로 개발 중인 캡슐트레인은 공기가 희박한 아진공 튜브 안을 자기 부상된 상태로 주행하는 열차(Fig. 1)로 공기저항과 마찰저항이 기존의 열차보다 매우 작기 때문에 1,000 km/h 이상의 초고속 주행이 가능할 것으로 예상된다[1,2]. 캡슐트레인에서 사용하는 부상방식은 초전도 전자석을 이용한 유도 반발식(SC-EDS: Superconductor Electrodynamic Suspension, 이하 SC-EDS) 부상으로 별도의 부상제어가 필요 없고, 부상 공극이 10 cm 이상으로 커서 인프라 건설비용을 절감할 수 있는 장점이 있다[3]. 그러나 SC-EDS 부상 특성상 부상 공극의 변화가 커서 과도할 경우 주행 안정성에 문제가 될 수 있고, 부상력에 댐핑 특성이 거의 없기 때문에 주행 시 외란에 의해 발생하는 진동 절연 효과가 적어 승차감이 악화 될 수 있다[4,5]. 따라서 SC-EDS 부상특성을 고려한 차량의 주행 동특성을 분석하고 이를 기반으로 한 주행 안정화 장치의 적용을 통해 주행 안정성 및 승차감을 향상시켜야 한다. 본 연구에서는 한국철도기술연구원에서 개발을 진행 중인 캡슐트레인에 대해서 동특성 해석 모델을 구축하고 여러 주행 조건에서 주행안정성과 승차감에 영향을 미치는 동특성을 분석하였다. 특히, 캡슐트레인 동특성에 중요한 영향을 미치는 SC-EDS 부상 및 안내 강성을 도출하고 이러한 강성이 반영된 동특성 해석 모델을 구축하였다. 구축된 동특성 모델을 이용하여 속도별 주행 특성이 승차감에 미치는 영향과 튜브 선로 불규칙도, 곡선 반경, 튜브 처짐 및 연결부 단차 등과 같은 주행 환경이 차량의 동특성 및 주행 안정성에 미치는 영향을 분석하였다.



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

## 2. 본론

### 2.1 캡슐트레인 개요

Fig. 2는 캡슐트레인 차량의 조감도이다. 차량의 앞부분과 뒷부분에 동력실이 있고 중간에 승객실이 있는 구조로, 승객실에는 20명의 승객이 탈 수 있으며, 동력실은 초전도 전자석이 부착된 대차와 배터리 및 각종 전장품으로 구성된다. 차량의 높이, 폭, 길이는 각각 1.46 m, 1.4 m, 26 m 이며, 차량의 주요 부품에 대한 무게는 Table 1에 나타나 있다. Fig. 3은 튜브 및 튜브 내 가이드웨이에 설치된 추진·부상용 전자레일의 조감도이다. 차량의 초전도 전자석과 전자레일의 상호 작용에 의해 추진력 및 부상·안내력이 발생하게 된다.

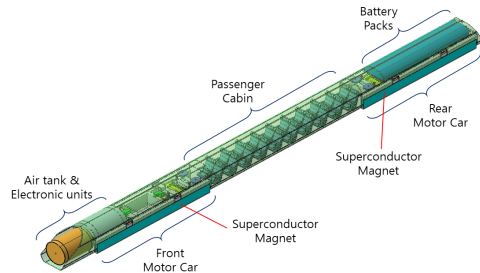


Fig. 2. Capsule train vehicle with superconductor magnet[1]

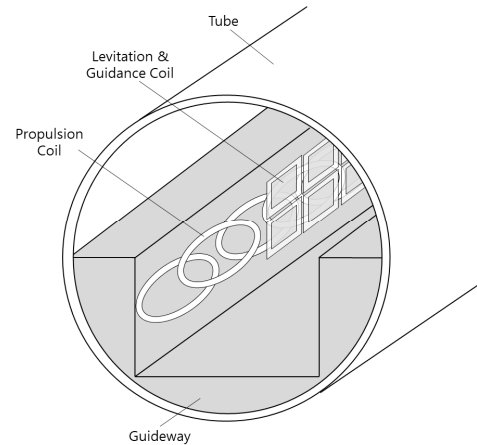


Fig. 3. Tube guideway with propulsion, levitation and guidance coil[1]

Table 1. Major components of the capsule train and their weights[1]

Bogie		Car body	
Superconductor magnets	1,500 kg	Structure	4,396 kg
Wheels	250 kg	Chairs and interior	800 kg
Frame	1,853 kg	Passengers and luggages	2,000 kg
etc.	1,056 kg	etc.	9,868 kg
Total	4,759 kg	Total	17,064 kg

## 2.2 캡슐트레인 동특성 해석 모델 구축

### 2.2.1 전자기 부상·안내 강성

캡슐트레인은 부상·안내 방식으로 Fig. 4와 같이 초전도 전자석 코일과 널 플럭스(null flux) 코일과의 상호 작용에 의해 부상 및 안내력을 발생시키는 방식(SC-EDS)을 사용한다. SC-EDS 방식으로 생성된 부상 및 안내력으로 인해 가이드웨이와 차량 사이에는 전자기 부상·안내 강성이 존재하게 되는데 이러한 강성이 캡슐트레인의 일차 현가장치(primary suspension)가 된다. 일차 현가장치는 대차와 차체 사이의 이차 현가장치(secondary suspension)와 더불어 캡슐트레인의 동특성에 중요한 영향을 미치는 요소이다(Fig. 5).

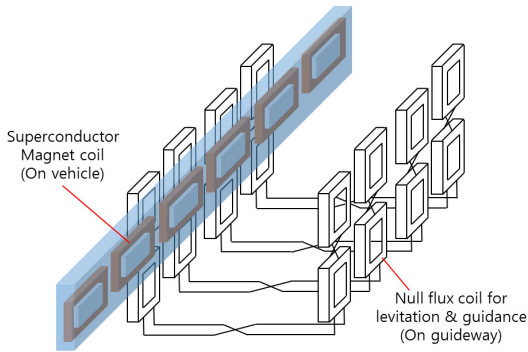


Fig. 4. Superconductor magnet coil and null flux coil[1]

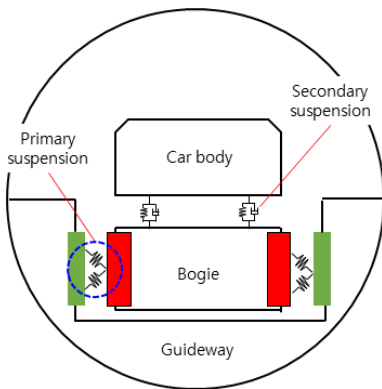


Fig. 5. Primary and secondary suspension

캡슐트레인이 주행함에 따라 초전도 전자석과 널 플럭스 코일 사이에서는 Eq. (1)과 같이 상호 작용력( $F_\alpha$ )이 발생하게 된다[6]. 여기서  $i_s$ 와  $i_l$ 는 각각 초전도 코일과 널 플럭스 코일에 흐르는 전류이고,  $M$ 은 초전도 전자석

코일과 널 플럭스 코일 간의 상호 인덕턴스이다.

$$F_\alpha = -i_s i_l \frac{\partial M}{\partial \alpha}, \quad \alpha = y, z \quad (1)$$

널 플럭스 코일에 유도되는 전류( $i_l$ )는 다음과 같은 미분방정식을 풀어서 구할 수 있는데[6], 여기서  $R$ 과  $L$ 은 각각 널 플럭스 코일의 저항과 인덕턴스이다.

$$Ri_l + \frac{d\Phi}{dt} = 0, \quad \Phi = Mi_s + Li_l \quad (2)$$

Fig. 6과 Table 2에 나타나 있는 사양을 이용하여 Eq. (1,2)를 수치 해석적으로 풀면 캡슐트레인의 부상력( $F_z$ )과 안내력( $F_y$ )을 구할 수 있다. 그 결과의 한 예로써 Fig. 7은 속도가 1,000 km/h이고 초전도 전자석과 널 플럭스 코일 간의 상대 변위인 z offset과 y offset이 각각 -30 mm 와 -20 mm 일 때 초전도 전자석 코일 한 개에 발생하는 부상력과 안내력을 보여준다. 이 결과에서 알 수 있듯이 코일과 코일 사이에 발생하는 전자기력의 특성상 힘의 변동(fluctuation)이 생기는데, 본 연구에서는 계산상의 편의를 위해 평균값을 사용하였다.

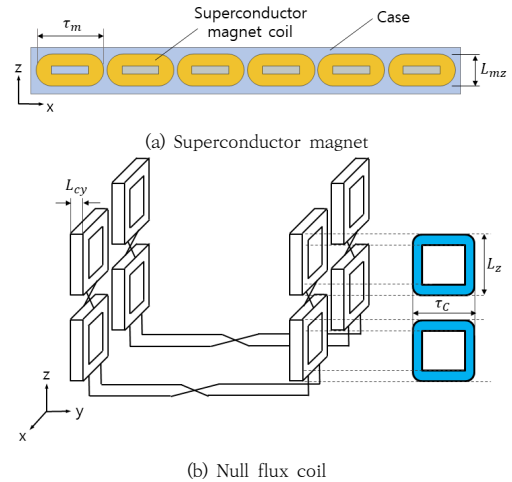


Fig. 6. Parameters of the superconductor magnet and null flux coil[1]

Table 2. Specification of the SC-EDS system[1]

Lateral length of superconductor magnet( $\tau_m$ )	1,100 mm
Vertical length of superconductor magnet( $L_{mz}$ )	400 mm
Supplied current in superconductor magnet( $i_s$ )	750 kAt
Electrical gap between superconductor magnet and null flux coil( $g$ )	150 mm
Lateral length of null flux coil( $\tau_c$ )	720 mm
Vertical length of null flux coil( $L_z$ )	290 mm
Thickness of null flux coil( $L_{cy}$ )	30 mm
Number of turns in null flux coil( $N_{turn}$ )	24

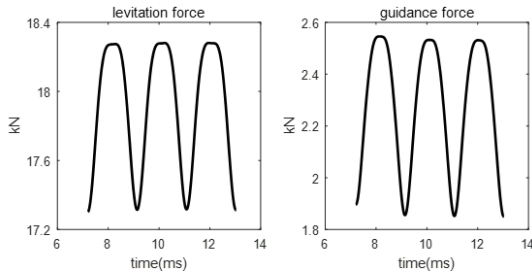


Fig. 7. Levitation and guidance force at 1,000 km/h with z offset(-30 mm) and y(-20 mm) offset

부상 강성과 안내 강성은 z 변화량에 대한 부상력의 변화량과 y 변화량에 대한 안내력의 변화량을 각각 계산해서 구할 수 있다. 이와 같은 강성은 초전도 전자석과 널 플럭스 코일 간의 상대 속도와 상대 변위(z offset과 y offset)에 따라 달라지기 때문에 이러한 조건들과 강성과의 관계를 분석할 필요가 있다. 이를 위하여 Table 3과 같은 해석 조건별로 각각의 부상 강성과 안내 강성을 구한 뒤 속도, z offset 및 y offset과의 관계식을 도출하고자 하였다.

Fig. 8은 속도와 z offset 조건별 부상 강성에 대한 계산 결과를 Matlab curve fitting tool을 이용하여 3차원 그래프로 나타낸 것인데, 부상 강성이 속도 및 z offset과 비선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 이러한 관계를 수식으로 도출하기 위하여 Fig. 8의 결과에 커브 피팅 방법을 적용하면 다음과 같이 속도(v)와 z offset(z)을 변수로 갖는 부상 강성식을 얻을 수 있다.

Table 3. Analysis conditions

velocity(km/h)	y offset(mm)	z offset(mm)
50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 1000	-50, -40, -30, -20, -10, 0	-100, -90, -80, -70, -60, -50, -40, -30, -20, -10, 0

$$k_{lev} = 592250 \times e^{-\frac{6.64}{v}} (1 - 101z^2) \quad (3)$$

Fig. 9는 1,000 km/h의 속도에서 z offset과 y offset 조건별 부상 강성 계산 결과를 보여주는데, 부상 강성은 z offset 뿐 만 아니라 y offset과도 비선형 관계가 있을 수 있다. 따라서 Eq. (3)을 기초로 하고 커브 피팅 방법을 이용하면 다음과 같이 속도(v), z offset(z) 및 y offset(y)을 변수로 갖는 부상 강성식을 도출할 수 있다.

$$k_{lev} = 592250 \times e^{-\frac{6.64}{v}} (1 - 101z^2)(1 + 168y^2) \quad (4)$$

안내 강성에 대해서도 동일한 방법을 적용하여 속도, y offset 및 z offset에 따른 관계식을 구할 수 있다. Fig. 10은 속도와 y offset 조건별 안내 강성을 나타내고, Fig. 11은 1,000 km/h의 속도에서 y offset과 z offset 조건별 안내 강성을 나타낸다. 이 결과를 이용해서 다음 식과 같이 속도(v), y offset(z) 및 z offset(y)을 변수로 갖는 안내 강성식을 도출할 수 있다.

$$k_{guid} = 134500 \times e^{-\frac{3.48}{v}} (1 - 100y^2)(1 + 2823z^2) \quad (5)$$

Eq. (4,5)는 SC-EDS 시스템에 있어서 속도와 대차의 수직-수평 변위에 따라 비선형적으로 변하는 일차 현가 장치의 특성을 나타낸다.

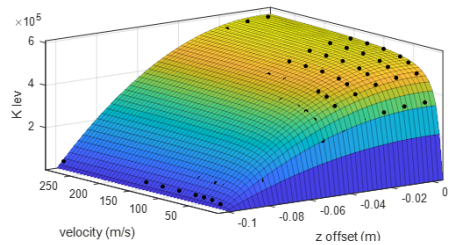


Fig. 8. Levitation stiffness depending on velocity and z offset

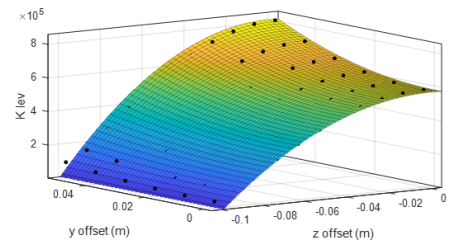


Fig. 9. Levitation stiffness depending on z and y offset

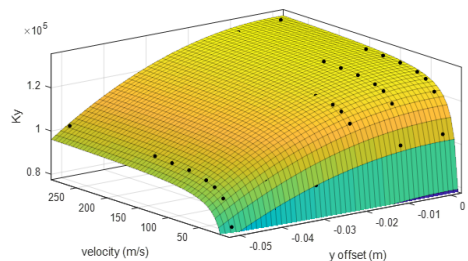


Fig. 10. Guidance stiffness depending on velocity and y offset

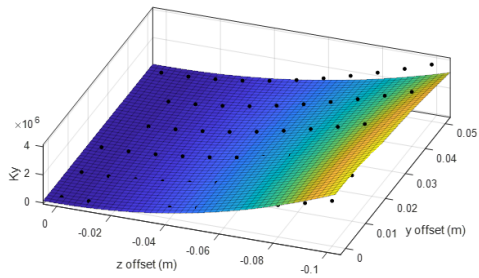


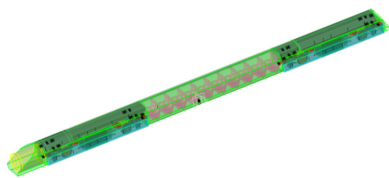
Fig. 11. Guidance stiffness depending on y and z offset

### 2.2.2 3D 동역학 해석 모델

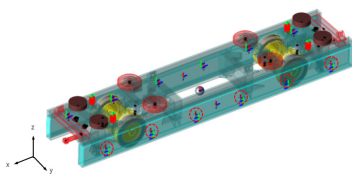
앞서 도출한 부상 강성과 안내 강성이 적용된 캡슐트레인의 3D 동역학 해석 모델을 다물체 동역학 해석 전용 툴인 DAFUL을 이용하여 Fig. 12와 같이 구축하였다. 모델에 작용하는 외란을 위해서 [7]에서 제시된 철도에 적용되는 불규칙도 생성 방법을 이용해서 Fig. 13과 같이 수평 방향과 수직 방향의 가이드웨이 불규칙도를 생성하였다. 이러한 가이드웨이 불규칙도(변위)와 앞서 도출한 부상-안내 강성에 의해서 대차의 초전도 전자석에 작용하는 외란(힘)을 대차 모델에 적용하였다(Fig. 12 (b)에서 빨간색 점선 원으로 표시된 부분).

### 2.3 캡슐트레인 동특성 해석 결과

캡슐트레인이 600 km/h의 속도로 주행할 때 캡슐트레인 대차의 변위에 대한 해석결과가 Fig. 14에 나타나 있다. 수평 방향 최대 변위 폭이 53 mm로 수직 방향(21 mm)보다 크고, 수직 방향에서는 수평 방향에 비해 고주파 진동 특성이 나타남을 알 수 있다.

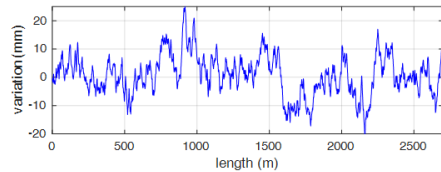


(a) Full train model

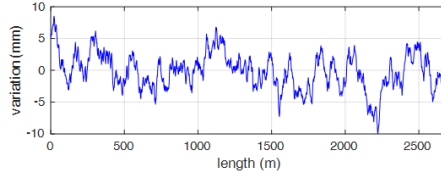


(b) Bogie model

Fig. 12. Capsule train model for dynamic analysis

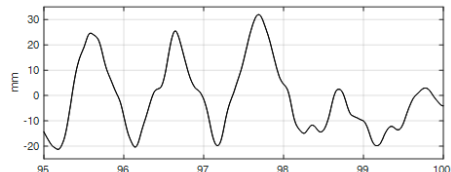


(a) Lateral direction

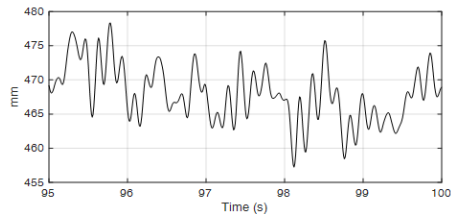


(b) Vertical direction

Fig. 13. Guideway irregularity

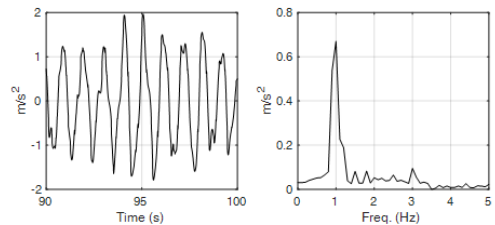


(a) Lateral

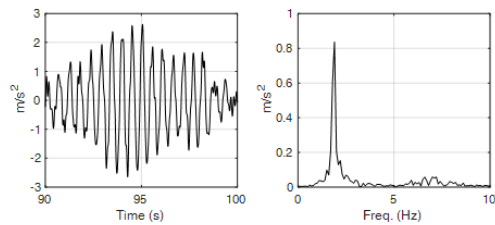


(b) Vertical

Fig. 14. Bogie displacement at 600 km/h



(a) Lateral



(b) Vertical

Fig. 15. Carbody acceleration at 600 km/h

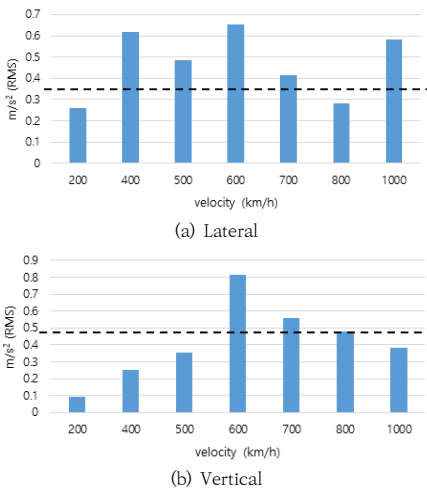


Fig. 16. Carbody acceleration according to velocities

Fig. 15는 같은 속도에서의 차체 가속도 결과인데, 차량 승차감 한계값과의 비교를 위해서 가속도 RMS(Root Mean Square) 값에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 결과를 함께 나타내었다. 수평 방향의 경우 1 Hz 근방에서  $0.67 \text{ m/s}^2$  크기의 진동이 발생하고, 수직 방향의 경우 약 2 Hz 에서  $0.84 \text{ m/s}^2$  크기의 진동이 주되게 발생함을 알 수 있다.

이와 같은 차체의 진동 크기를 속도별로 Fig. 16에 막대 그래프로 표시하였는데, 그림에서 가로 방향의 점선은 ISO 2631 승차감 기준(4시간 한계)을 나타낸다[8]. 일부 속도에서 승차감 한계 기준을 초과하고 있는 것을 알 수 있는데, 이는 추후 현가장치의 최적화 및 주행 안정화 장치의 적용 등을 통해 개선할 예정이다.

다음으로 커브 주행 시 캡슐트레인의 동특성을 살펴보았다. Fig. 17은 1,000 km/h의 속도로 주행하는 캡슐트레인이 85 km의 곡선 반경을 갖는 커브 구간에 진입할 때 대차의 수평 방향 변위를 보여준다. 직선 주행을 하다가 210초부터 곡선 주행이 시작되어 230초에 이르면 반경 85 km의 곡선 주행에 이르게 되는데, 이때 발생하는 수평 방향의 원심력으로 인해 대차의 변위가 약 20 mm 이동하였음을 알 수 있다. 또한, 이로 인해 대차의 최대 변위가 74 mm까지 이르게 되는데, 차량과 가이드웨이 사이의 거리가 100 mm 임을 고려할 때, 충돌의 위험은 없을 것으로 판단된다. 이와 같은 해석을 토대로 속도별 허용 곡선 반경을 구하면 Table 4와 같다.

다음은 튜브가 교각의 거더(girder)와 거더 사이에 놓일 때 튜브 자중에 의해 발생하는 튜브의 처짐이 캡슐트

레인 동특성에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 18은 거더와 거더 사이의 거리가 30 m 이고, 최대 처짐이 10 mm인 튜브를 600 km/h의 속도로 주행하는 캡슐트레인 대차의 수직 방향 변위를 나타내는데, 튜브 처짐으로 인해 대차 변위 폭이 약 20 mm에서 약 55 mm로 2.8배 가량 커졌음을 알 수 있다.

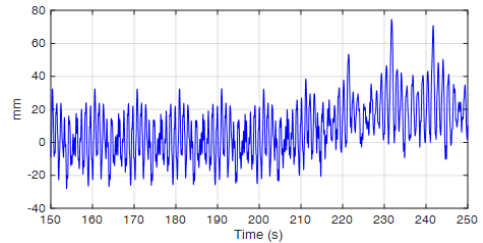


Fig. 17. Lateral bogie displacement at curve running

Table 4. Acceptable curve radius

velocity (km/h)	1,000	800	600	400
radius (km)	85	65	37	25

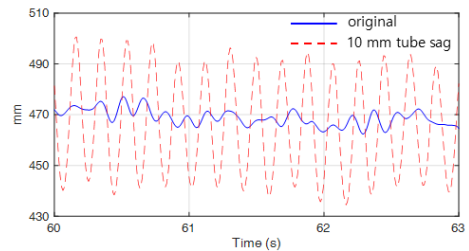


Fig. 18. Vertical bogie displacement according to tube sag

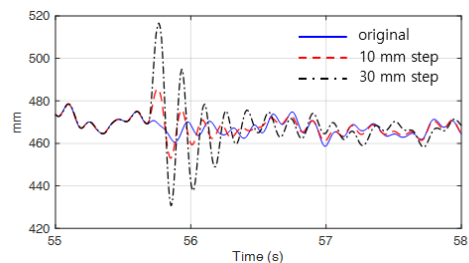


Fig. 19. Vertical bogie displacement according with connection joint difference

튜브와 튜브 사이의 연결부에서 조립 오차 또는 변형 등으로 인해 단차가 발생할 수 있으며, 이러한 단차 역시 캡슐트레인의 주행 동특성에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 19는 600 km/h의 속도로 주행하는 캡슐트레인이 10 mm와 30 mm의 단차를 통과할 때의 대차 수직 변위를 보여주는데, 대차의 진폭이 각각 약 1.5배와 약 4배로 커짐을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 튜브 안을 초전도 유도 반발식 방법으로 부상하여 주행하는 캡슐트레인에 대해서 동특성 해석 모델을 구축하고 주행 특성을 분석하였다. 먼저 캡슐트레인의 고유 특성인 초전도 유도 반발식 부상에 의해 캡슐트레인의 일차 현가장치에 발생하는 비선형 부상-안내 강성을 도출하였고, 이러한 강성이 적용된 캡슐트레인의 3D 동역학 해석 모델을 구축하였다.

구축된 모델을 이용하여 캡슐트레인의 대차 동특성을 분석한 결과, 수평 및 수직 방향의 변위 폭이 각각 약 53 mm와 21 mm로 나타났다. 승차감과 연관된 차체의 수평-수직 방향 가속도를 분석한 결과, 일부 속도 대에서 ISO 기준의 승차감 한도를 초과하고 있는 것으로 분석되어 추후 개선이 필요함을 알 수 있었다.

또한, 곡선 반경, 튜브 처짐 및 튜브 연결부와 같은 인프라 요소가 캡슐트레인의 주행 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 곡선 주행 시 발생하는 원심력에 의한 대차의 변위를 검토하여 속도별로 허용 곡선 반경을 분석한 결과, 1,000 km/h의 속도에서는 85 km의 곡선 반경이 필요하고, 400 km/h의 속도에서는 25 km의 곡선 반경이 필요함을 알 수 있었다. 거더 사이의 거리가 30 m 이고 최대 처짐이 10 mm인 튜브를 600 km/h의 속도로 주행할 때의 주행 특성을 분석한 결과, 대차 변위가 2.8 배 정도 증가함을 알 수 있었고, 10 mm와 30 mm 크기의 튜브 연결부 단차를 같은 속도로 통과할 경우 대차의 변위가 각각 1.5배 및 4배로 커져 주행 안정성이 악화됨을 확인할 수 있었다.

이와 같은 캡슐트레인 동특성 해석 모델을 이용한 주행 특성 분석 결과는 향후 캡슐트레인 및 인프라 설계 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상 된다.

### 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] S. Ohashi, H. Ohsaki, E. Masada, "Running Characteristics of the Magnetically Levitated Train in a Curved Track Section," *IEEE Transactions on Magnetics*, 33, pp.4212-4214, 1997.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/20.619713>
- [7] H. Claus, W. Schiehlen, "Modeling and simulation of railway bogie structural vibrations," *J Vehicle System Dynamics*, 29(S1), pp.538-552, 1998.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00423119808969585>
- [8] ISO 2631-1. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements. International Organization for Standardization, 1997.

이진호(Jin-Ho Lee)

[정회원]



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

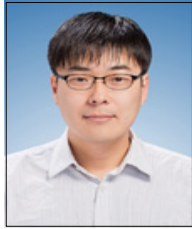
- 2006년 4월 ~ 2009년 12월 : 삼성코닝정밀소재 책임연구원
- 2010년 1월 ~ 2011년 12월 : 국방기술품질원 선임연구원
- 2012년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

메카트로닉스, 기계제어, 진동

임 정 열(Jungyoul Lim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (기계 학사)
- 2010년 8월 : 조지아 공과대학교 기계공학과 (기계 석사)
- 2014년 5월 : 조지아 공과대학교 기계공학과 (기계 박사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

자기부상, 전자기 구동기 및 발전기, 메카트로닉스

유 원 희(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