

초전도 유도 반발식 자기부상 캡슐트레인 차량의 단면적 및 길이에 따른 동특성 분석

이진호

한국철도기술연구원 신교통혁신연구소

Dynamic Characteristic Analysis of the Superconductor Electrodynamic Suspension Levitated Capsule Train according to Vehicle Cross-Section Area and Length

Jin-Ho Lee

New Transportation Innovative Research Center, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구에서는 초전도 유도 반발식 자기부상 방식을 사용하는 캡슐트레인 차량의 단면적 및 길이에 따른 동특성을 분석하여 비교하였다. 튜브 직경, 승객수, 부상에 필요한 초전도 전자석의 개수 등을 고려하여 총 5개의 차량 형상을 정의하였고, 각 차량 형상에 대한 동특성 해석 모델을 구축하였다. 동특성 해석 모델에는 캡슐트레인 주행 중 대차와 튜브 가이드웨이 사이에 발생하는 부상 및 안내 강성을 포함하였으며, 튜브 가이드웨이의 불규칙도를 외란으로 적용하였다. Matlab Simulink를 이용하여 모델 구현 및 동특성 시뮬레이션을 수행하였고, 이를 통해 대차 및 차체의 수직, 수평, 롤, 피치, 요 방향의 운동을 분석하였다. 동특성 분석 결과, 차량 단면적 및 길이 증가에 따라 전체 차량의 무게 증가로 인해 대차 변위는 증가하고 차체 가속도는 감소함을 알 수 있었다. 그리고 같은 무게의 차량일 경우, 차량의 단면적을 증가시키는 것이 길이를 증가시키는 것보다 차량의 회전 동특성 측면에서 유리하고 속도에 따른 영향도 적음을 확인하였다.

Abstract In this study, the dynamic characteristics of a superconductor electrodynamic suspension levitated capsule train were analyzed and compared according to the vehicle's cross-section area and length. Five vehicle design models for the capsule train were defined by considering the tube diameter, the number of passengers, and the number of superconductor magnets required for vehicle levitation. A dynamic characteristic analysis model was developed for each design. The developed models included the levitation and guidance stiffnesses between the bogie and the tube guideway that are generated during operation, and guideway irregularity was applied as an external disturbance. Matlab Simulink was used to realize the developed models and simulate the dynamic characteristics of each one. The vertical, lateral, roll, pitch, and yaw motions of bogies and the carbody were analyzed. As a result of the dynamic characteristic analysis, it was found that the increase of vehicle mass due to the increase of the cross-section area and length makes the bogie displacement increase and the carbody acceleration decrease. In the case of vehicles of the same weight, it was found that increasing the cross-sectional area was more advantageous for the rotational dynamic characteristics and less affected by the speed than increasing the length.

Keywords : Capsule Train, Dynamic Characteristic, Electrodynamic Suspension Levitation, Superconductor, Vehicle Design

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업(PK2201A1)의 연구비 지원으로 수행되었음.

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

email: jinholee@krii.re.kr

Received July 20, 2022

Revised August 26, 2022

Accepted September 2, 2022

Published September 30, 2022

1. 서론

캡슐트레인 (Fig. 1)의 중요한 특징은 공기 밀도가 낮은 아진공 튜브 안에서 차량이 자기 부상한 채로 주행한다는 점이다[1]. 운행 중인 차량에 가해지는 공기 저항은 속도의 제곱에 비례하기 때문에 공기 저항은 속도에 있어서 가장 큰 장애 요소인데, 아진공 튜브를 이용하여 이러한 문제를 해결할 수 있다. 또한, 자기부상을 통해 차량과 튜브 사이의 접촉을 없애 고속에서의 마찰 저항 및 소음도 줄일 수 있다[1,2].

대표적인 아진공 튜브 재질인 철은 충분한 강도를 가지면서도 기공성 재질인 콘크리트에서 발생하는 outgassing (기압 차가 발생하면 외부에 있는 공기가 튜브 안으로 침투하는 현상)과 같은 문제[3]가 없는 것이 장점이지만, 재료비 및 제작비 측면에서 콘크리트보다 비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서 철을 튜브 재질로 사용하는 경우 비용 절감을 위해서 튜브 제작에 투입되는 철의 양을 최소화하는 것이 중요한데, 이는 곧 튜브 직경을 작게 유지해야 함을 의미한다. 튜브 직경이 작아지면 그에 따라 차량의 단면적도 작아져야 하는데, 이는 차량에 탑승하는 인원수에 영향을 미치게 된다. 따라서 캡슐트레인 차량의 형상은 이와 같은 튜브 직경 및 탑승 인원 등을 고려하여 설계되어야 한다. 또한 캡슐트레인을 부상시키기 위해 필요한 초전도 전자석의 경우, 차량의 하중에 따라 필요한 초전도 전자석의 개수가 달라지므로 차량 형상 설계 시 필요한 초전도 전자석의 개수도 함께 고려해야 한다.

차량 설계시, 기본적인 차량 형상 설계안이 정해지면 차량의 동특성 시뮬레이션을 통해 설계안의 타당성을 사전에 분석할 필요가 있다. 차량의 동특성은 차량 주행 안정성 및 승차감과 연관이 되기 때문에 차량 설계 시 이에 대한 사전 분석과 분석 결과에 대한 설계 반영이 필요하기 때문이다.

본 연구에서는 캡슐트레인 차량 형상 설계를 위한 기초 단계로서, 캡슐트레인 차량의 단면적 및 길이에 따른 동특성을 비교·분석하였다. 튜브 직경을 최소화하고 최소 탑승 인원을 갖는 캡슐트레인 차량 형상을 비교 기준으로 하고, 단면적 및 길이를 각각 증가시켰을 때 차량의 동특성 변화를 살펴보았다. 차량 설계안 별 동특성 분석을 위하여 먼저 차량 동특성 해석 모델을 구축하였는데, 모델에는 대차와 튜브 가이드웨이 사이의 부상·안내 강성과 주행 중 발생하는 가이드웨이 불규칙도를 외란으로 적용하였다. 동특성 모델의 구현 및 시뮬레이션을 위해

서는 Matlab Simulink를 이용하였으며, 이를 통해 대차 및 차체의 수직, 수평, 롤, 피치, 요 방향의 운동을 분석하여 각 설계안 별 동특성을 비교하였다. 이러한 결과를 토대로 차량의 단면적 및 길이가 동특성에 미치는 영향을 살펴보고 향후 차량 설계 방향에 대해서 검토하였다.



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

2. 본론

2.1 캡슐트레인 차량 설계안

본 연구에서는 동특성 분석을 위한 캡슐트레인 차량 형상으로 A, B, C, D, E의 5가지 형상을 정의하였다 (Table 1). A 형상은 다른 형상과 비교 기준이 되는 기본 형상으로, 가운데 통로를 기준으로 양옆에 좌석이 하나씩 있는 구조로서 차량 단면적과 탑승 인원이 최소가 되는 형태이다. A 형상 차량에서 좌석 열의 개수는 10개로 총 20명이 탑승할 수 있다. B와 C 형상은 A 형상에 비해 가운데 통로를 기준으로 좌우로 좌석이 각각 1개와 2개씩 늘어난 구조이고, 차량 길이는 A 형상과 동일하다. 따라서 B와 C 형상 차량에 승차할 수 있는 인원은 각각 30명과 40명이고, 그에 따라 차량의 무게는 A에 비해 각각 1.5배와 2배 늘어나는 것으로 가정하였다. 차량 하중이 늘어나면 차량의 부상을 위해 필요한 초전도 전자석의 개수도 늘어나야 한다. 따라서 A 형상 차량의 경우 한 개 대차에 부착되는 초전도 전자석의 개수가 4개라면, B형의 경우는 1.5배 늘어난 6개가 필요하고, C형의 경우는 2배 늘어난 8개가 필요하다.

B와 C 형상은 A에 비해 차량의 길이는 동일하고 단면적이 커진 형태이기 때문에 차량 단면적 변화에 따른 영향을 살펴볼 수 있다. 이에 비해 D와 E 형상은 A와 차량 단면적은 동일하나, 차량의 길이 방향으로 A에 비해 각각 1.5배와 2배 늘어난 형상이다. 따라서 D와 E 형상의 승객수와 초전도 전자석의 개수도 A에 비해 각각 1.5배와 2배씩 늘어나게 된다.

Table 1. The representative vehicle geometry designs of the capsule train

Type	Front view	Side view	Total number of passengers
A			20
B			30
C			40
D			30
E			40

Table 2. The parameters of the capsule train dynamic model

Type	m_c (kg)	m_b (kg)	$I_{\theta,c}$ (kg·m ²)	$I_{\theta,b}$ (kg·m ²)	$I_{\phi,c}$ (kg·m ²)	$I_{\phi,b}$ (kg·m ²)	$I_{\psi,c}$ (kg·m ²)	$I_{\psi,b}$ (kg·m ²)	$k_{air}(V)$ (N/m)	$c_{air}(V)$ (Ns/m)	$k_{air}(L)$ (N/m)	$c_{air}(L)$ (Ns/m)	w_{lev} (m)	$h_{air}(c)$ (m)	$h_{air}(b)$ (m)	w_{air} (m)	h_{gud} (m)	b_{air} (m)	L_b (m)
A	16110	4760	6969	3.30 E+05	3.30 E+05	1627	3365	4484	37260	3726	16670	1667	0.93	-0.05	0.497	0.7	0.07	6.4	1.2
B	24165	7140	23512	7.10 E+05	7.10 E+05	5015	10882	15134	37260	3726	16670	1667	1.395	-0.075	0.497	1.05	0.07	6.4	2.4
C	32220	9520	55720	1.23 E+06	1.23 E+06	11481	25376	35843	37260	3726	16670	1667	1.86	-0.1	0.497	1.4	0.07	6.4	3.6
D	24165	7140	10448	1.11 E+06	1.11 E+06	2440	10882	12560	37260	3726	16670	1667	0.93	-0.075	0.497	0.7	0.07	9.6	2.4
E	32220	9520	13931	2.62 E+06	2.62 E+06	3254	25398	27636	37260	3726	16670	1667	0.93	-0.1	0.497	0.7	0.07	12.8	3.6

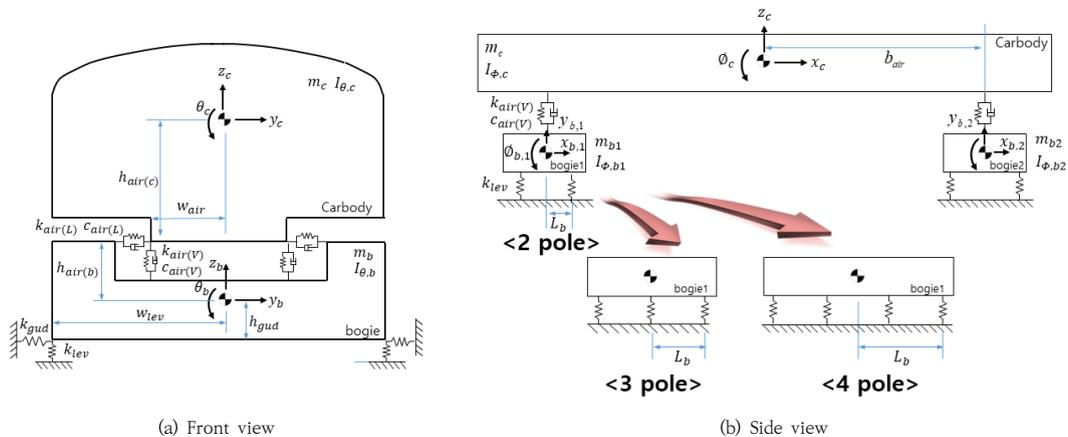


Fig. 2. Dynamic model of the capsule train with parameters

B와 C 형상의 차량은 단면적이 커지므로 튜브 직경이 커져야 하는 단점이 있지만, 차량 길이가 짧아 곡선 운행에 유리하고 역 승강장 길이를 짧게 할 수 있는 장점이 있다. D와 E 형상은 단면적이 작아 튜브 직경을 작게 유지할 수 있는 장점이 있는 반면에, 차량 길이가 길어 곡선 반경이 커지고, 긴 차량 길이로 인해 차체의 처짐 및 구조체 기인 진동이 발생할 수 있는 단점이 있다.

2.2 캡슐트레인 차량 동특성 해석 모델

캡슐트레인 차량의 동특성 해석 모델은 Fig. 2와 같다. Fig. 2 (b)는 모델의 측면도를 나타내는데, 초전도 전자석의 개수에 따라서 대차와 가이드웨이 사이인 1차 현가장치 부분의 모델이 변함을 보여준다. Table 2에는 모델별로 동특성 해석에 사용된 파라미터를 정리하였다.

본 연구에서 제안한 캡슐트레인은 부상·안내를 위하여 초전도 유도반발 방식을 사용하는데, 이 방식은 대차에 부착된 초전도 전자석과 튜브 가이드웨이에 설치된 전자레일 사이의 상호 작용으로 차량을 부상·안내시키는 방식이다. 이러한 초전도 유도반발 방식으로 부상하여 주행하는 차량의 대차와 튜브 가이드웨이 사이에는 주행 속도 (v) 및 대차의 수직 변위 (z)와 수평 변위 (y)에 따라 비선형적으로 변하는 부상·안내 강성이 존재하는데 [4], 본 연구에서는 다음과 같이 정의되는 부상·안내 강성을 사용하였다[5,6].

$$k_{lev} = 852840 \times e^{-\frac{6.64}{v}} (1 - 101z^2)(1 + 168y^2) \quad (1)$$

$$k_{guid} = 193680 \times e^{-\frac{3.48}{v}} (1 - 100y^2)(1 + 2823z^2) \quad (2)$$

동특성 해석을 위한 상태 변수 및 시스템 상태 방정식은 Eq. (3), Eq. (4)와 같다. 여기에서 상태 변수는 전두부 대차 (fb), 후미부 대차 (rb) 및 차체 (c)의 수직 (z), 수평 (y), 롤 (θ), 피치 (Φ), 요 (ψ) 방향의 운동을 나타낸다. 상태 방정식에서 A, B, C 는 각각 시스템 특성, 입력 및 출력을 위한 행렬을 나타내고, u 와 w 는 각각 입력력과 출력 변수를 나타낸다. 입력 변수 u 는 시스템에 작용하는 외란 인데, 이를 모사하기 위하여 Fig. 3과 같은 수직 및 수평 방향의 가이드웨이 불규칙도를 모델에 적용하였다. 불규칙도 생성을 위해서는 [7]에서 제시된 철도 레일 불규칙도 생성 방법을 이용하였다.

$$x = [z_{fb} z_{rb} z_c y_{fb} y_{rb} y_c \theta_{fb} \theta_{rb} \theta_c \Phi_{fb} \Phi_{rb} \Phi_c \psi_{fb} \psi_{rb} \psi_c] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu & (4) \\ w &= Cx \end{aligned}$$

앞서 도출한 동특성 해석 모델 및 시스템 상태 방정식을 구현하기 위하여 Fig. 4와 같은 Matlab Simulink를 구축하였다. 구축된 Matlab Simulink는 가이드웨이 불규칙도를 입력으로 받아들이는 부분, 대차 변위에 따라 부상 및 안내 강성을 계산하는 부분, 그리고 시스템 상태 방정식을 풀어 각종 변위와 가속도를 구하는 부분으로 구성된다.

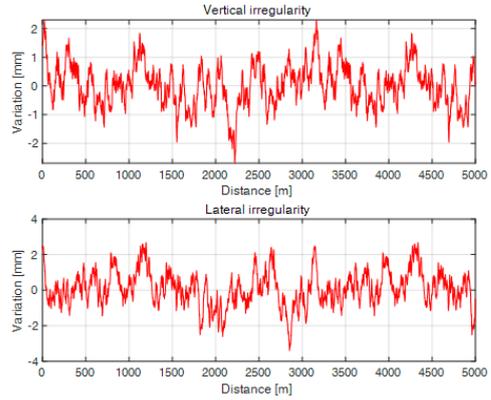


Fig. 3. Guideway irregularity in the vertical and lateral direction

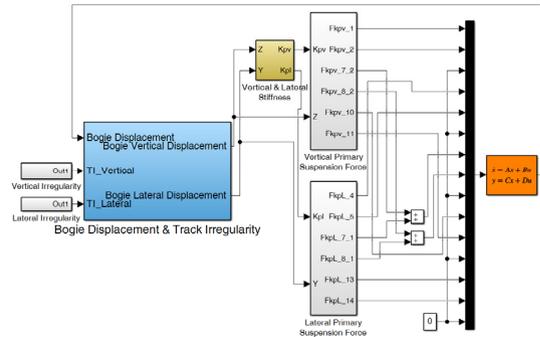


Fig. 4. Matlab Simulink for capsule train dynamic model and simulation

2.3 차량 동특성 분석

2.3.1 차량 단면적에 따른 동특성 분석

차량 단면적 변화에 따른 동특성 변화를 살펴보기 위하여, 기본 차량 형상인 A형과 단면적이 커진 B, C형에 대해서 동특성을 비교·분석하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 시뮬레이션을 통해 얻은 동특성 해석 결과로써, Fig. 5는 주행 속도가 300 km/h 일 때 전두부 대차의 수직 및 수평 방향의 변위를 나타내고, Fig. 6은 같은 주행 속도에

서 차체의 수직 및 수평 방향 가속도를 나타낸다. 대차 변위는 가이드웨이와의 접촉 및 주행안정성을 검토하기 위해 필요하고, 차체 가속도는 승차감을 평가하기 위해 주로 사용된다. 대차 변위는 A형에서 B, C형으로 갈수록 전반적으로 그 값이 커지고 차체 가속도는 B, C형으로 갈수록 작아짐을 알 수 있다.

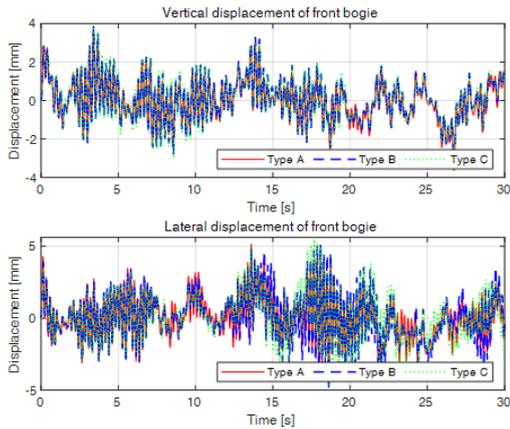


Fig. 5. Vertical and lateral displacement of the front bogie at 300 km/h speed (Type A, B, and C)

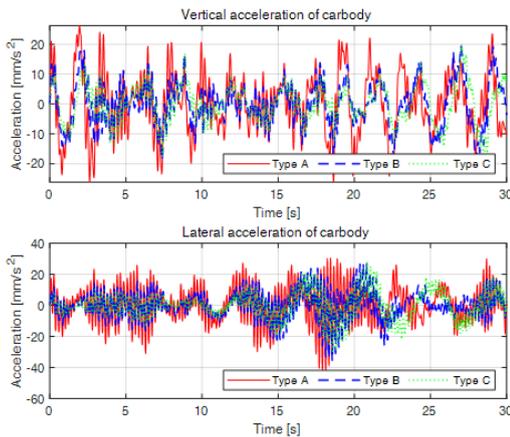


Fig. 6. Vertical and lateral acceleration of the carbody at 300 km/h speed (Type A, B, and C)

차량 단면적별 동특성 비교를 위해서 시뮬레이션을 통해 얻은 데이터의 제곱평균제곱근 (Root MeanSquare, RMS) 값을 이용하였는데, Fig. 7은 차량 단면적별 속도(300 km/h, 600 km/h, 900 km/h)에 따른 RMS 값을 비교한 결과이다. 결과를 보면, 대차 변위는 A, B, C형의 순서로 커지는데, 이는 차량 중량이 증가

하고 초전도 전자석 개수가 증가하면서 가이드웨이 불규칙도에 의해 대차에 가해지는 충격량이 커져서 발생한 결과로 판단된다. 즉, 충격량은 무게와 속도의 곱으로 나타나기 때문에 차량 무게가 증가할수록 충격량이 커지게 되며, 초전도 전자석 개수가 증가할수록 외란이 대차에 전달되는 빈도가 잦아지기 때문에 충격량이 커지게 된다. 반면에 차체 가속도는 B형, C형 차량으로 갈수록 작아지는데, 이는 차체 중량이 커져 관성이 증가할수록 2차 현가장치 (에어 스프링)에 의해 차체 진동 가속도가 더 많이 감소하기 때문이다. 그리고 대차 변위와 차체 가속도의 크기는 속도가 증가함에 따라 커지는 경향을 보임을 알 수 있다.

Fig. 8은 차체의 회전 (롤, 피치, 요) 가속도의 RMS 값을 차량 단면적별로 속도에 따라 정리한 결과이다. 롤 가속도 값이 피치, 요 가속도에 비해 상대적으로 큼을 알 수 있고, 차체의 수직/수평 가속도 결과와 유사하게 A형에서 B형, C형 차량으로 갈수록 차체의 회전 가속도 값이 작아짐을 알 수 있다. 속도증가에 따라 대체로 일정하게 커지는 수직/수평 가속도와 롤 가속도에 비해, 피치와 요 가속도의 경우 600 km/h 이후의 속도에서는 일정하거나 오히려 약간 줄어드는 경향을 보이는데, 이는 600 km/h 속도 근처에서 차체의 피치 및 요 가속도에 영향을 미치는 공진 주파수가 존재함을 보여준다.

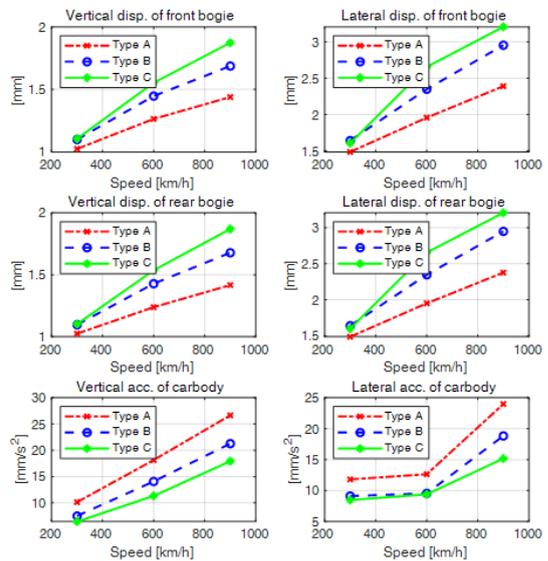


Fig. 7. RMS value of the vertical/lateral motion of the bogie/ carbody according to speed (Type A, B, and C)

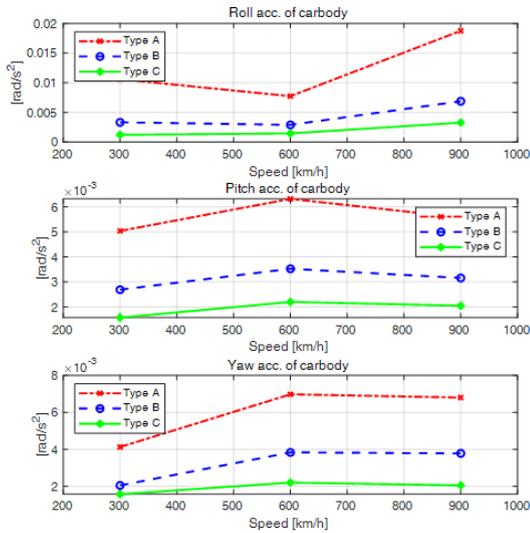


Fig. 8. RMS value of the roll, pitch and yaw motion of the carbody according to speed (Type A, B, and C)

2.3.2 차량 길이에 따른 동특성 분석

차량 길이 변화에 따른 동특성 변화를 살펴보기 위하여, 기본 차량 형상인 A형과 길이가 길어진 D, E형에 대해서 동특성을 비교·분석하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 주행 속도가 300 km/h 일 때의 동특성 해석 결과이고, Fig. 11은 차량 길이 및 속도별 각종 데이터의 RMS 값을 정리한 결과이다.

Fig. 11에서 보듯이, 대차의 수직 및 수평 변위는 D형, E형 차량에서 더 커지는데, 이는 앞서 살펴본 바와 같이

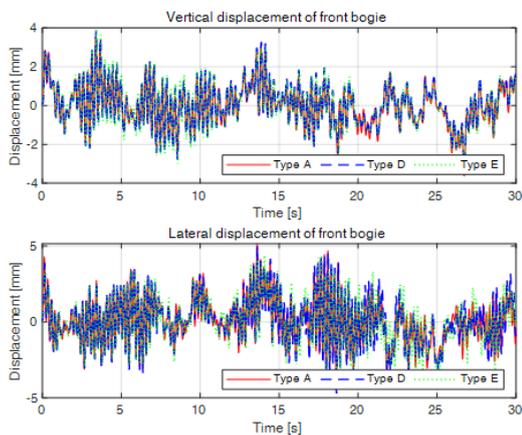


Fig. 9. Vertical and lateral displacement of the front bogie at 300 km/h speed (Type A, D, and E)

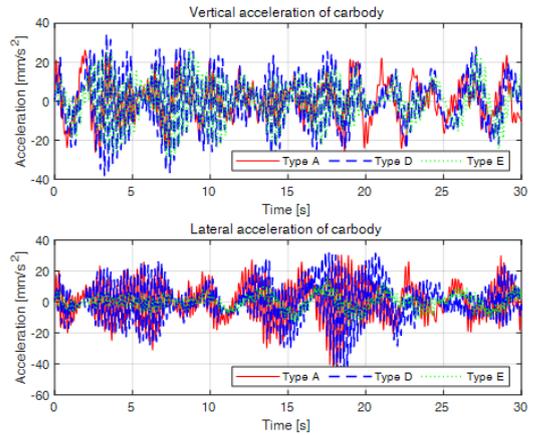


Fig. 10. Vertical and lateral acceleration of the carbody at 300 km/h speed (Type A, D, and E)

차량 중량이 증가하고 초전도 전자석 개수가 증가하여 대차에 가해지는 충격량이 커져서 생긴 결과이다. 차체 가속도의 경우 A형에 비해 D형과 E형이 전체적으로 낮는데, 이 역시 앞서 살펴본 B형과 C형의 경우와 유사하다. 그러나 B형과 C형의 경우에는 속도 증가에 따라 차체 가속도 값도 계속 증가하였으나, D형과 E형의 경우에는 속도에 따른 가속도 값의 증감이 일정하지 않는데, 이는 차량 단면적 보다 차량 길이가 속도에 따른 특정 진동 주파수에 기인한 공진 현상에 더 영향을 받음을 알 수 있다. Fig.

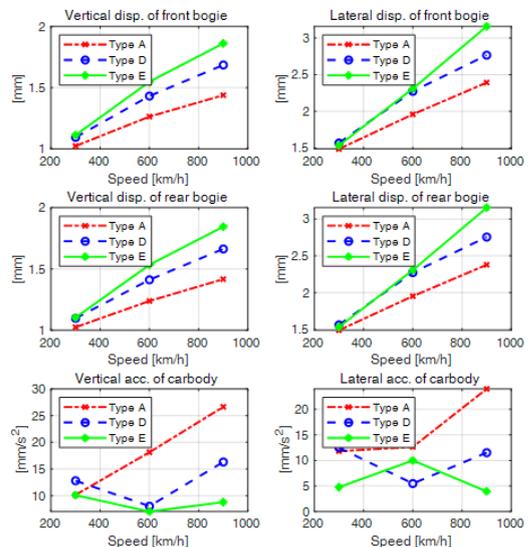


Fig. 11. RMS value of the vertical/lateral motion of the bogie/ carbody according to speed (Type A, D, and E)

12는 차체의 회전(롤, 피치, 요) 가속도의 RMS 값을 정리한 결과인데, 전체적으로 D형, E형 차량으로 갈수록 가속도 값이 작아짐을 알 수 있다. 그러나 E형의 롤 가속도의 경우 600 km/h의 속도에서 가장 크게 나타난다. 그리고 D형, E형 차량의 전반적인 회전 가속도 값은 B형, C형보다 큼을 알 수 있는데, 이는 차량 단면적보다 차량의 길이가 회전 가속도에 미치는 영향이 더 큼을 보여준다.

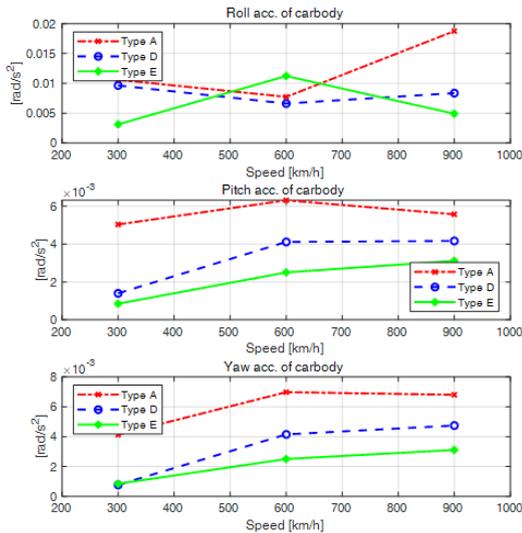


Fig. 12. RMS value of the roll, pitch and yaw motion of the carbody according to speed (Type A, D, and E)

3. 결론

본 연구에서는 캡슐트레인 차량 설계의 기초 단계로서, 캡슐트레인 차량의 단면적 및 길이에 따른 차량 형상을 정의하고, 각 형상에 따라 동특성을 분석·비교하였다. 동특성 분석을 위해 캡슐트레인의 특징인 부상·안내 강성이 포함된 모델을 구축하고, 외란으로 가이드웨이 불규칙도를 적용하였다. Matlab Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 대차 및 차체의 운동을 분석하였고, 각 차량 형상별 동특성을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 차량의 단면적 및 길이가 증가할수록 대차의 수직 및 수평 변위는 커지는데, 이는 차량 무게 증가와 초전도 전자석 개수 증가로 인한 충격량의 증가에 기인한 결과임
2. 차량의 단면적 및 길이가 증가할수록 차체의 수직·

수평 가속도 및 회전(롤, 피치, 요) 가속도가 대체로 작아지는데, 이는 차체 중량이 커져 관성이 증가할수록 2차 현가장치에 의해 차체 진동 가속도가 더 많이 감소하기 때문임

3. 차량의 단면적보다 차량의 길이가 속도에 따른 특정 진동 주파수에 기인한 공진 현상에 더 영향을 받음
4. 차량의 길이 증가가 회전 가속도에 미치는 영향이 차량의 단면적 증가보다 더 큼

이와 같은 차량의 동특성 분석 결과를 바탕으로 차량 설계 시 다음과 같은 사항을 고려할 필요가 있다. 차량 단면적 및 길이가 증가할수록 무게 증가로 인해 차체의 가속도는 감소하여 승차감은 향상되나, 대차의 변위는 커져서 주행 안정성은 악화하기 때문에, 차량 동특성, 수송 인원, 튜브 직경 등을 종합적으로 고려해서 적절한 차량 무게를 결정해야 한다. 그리고 동일한 차량의 무게를 기준으로 했을 때, 차량의 단면적을 크게 하는 것이 차량의 길이를 증가시키는 것보다 회전 방향의 동특성 측면에서는 우수하며, 속도에 따른 동특성 변화도 적게 받는다. 이는 차량 길이가 길어짐에 따라 차체의 회전 운동이 커지고, 속도 증가에 따른 차량과의 공진 현상이 발생하기 때문이다. 그러나 차량 단면적 증가는 튜브 직경을 증대시켜 건설 비용 상승을 초래하게 되므로 이를 고려하여 적절한 차량의 단면적 및 길이를 선정해야 한다.

향후 본 연구 결과를 바탕으로 캡슐트레인 차량의 설계를 구체화할 예정이며, 보다 상세히 설계된 차량에 대해서 동특성을 분석할 예정이다.

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] A. Santangelo, "Hyperloop as an evolution of maglev," *Transportation Systems And Technology*, 4(4), 44-63, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst20184444-63>
- [4] S. Ohashi, H. Ohsaki, E. Masada, "Equivalent model of the side wall electrodynamic suspension system," *Electrical Engineering in Japan*, 124(2), 63-73, 1998.
- [5] J. Lim, C. Y. Lee., J. H. Lee, W. You, K. S. Lee, S. Choi, "Design Model of Null-Flux Coil Electrodynamic

Suspension for the Hyperloop,” Energies, 13(19), 5075, 2020.

- [6] R. Yoon, BA Negash, W. You, J. Lim, J. Lee, C. Lee, K. Lee, “Capsule Vehicle Dynamics Based on Levitation Coil Design Using Equivalent Model of a Sidewall Electrodynamic Suspension System,” Energies, 14(16), 4979, 2021.
- [7] H. Claus, W. Schiehlen, “Modeling and simulation of railway bogie structural vibrations,” J Vehicle System Dynamics, 29(S1), pp.538-552, 1998.

이 진 호(Jin-Ho Lee)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한국과학기술원
기계공학과 (공학학사)
- 2000년 2월 : 광주과학기술원
기전공학과 (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