

캡슐 차량 비선형 특성을 고려한 차체의 강제운동 최적 자유도 연구

유원희*, 이진호
한국철도기술연구원 신교통혁신연구소

Study on the Appropriate DOF of Rigid Body Motion of Carbody Considering Capsule Vehicle Nonlinear Characteristics

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

요약 하이퍼루프용 캡슐 차량은 일반 고속철도차량과 마찬가지로 15 자유도의 동역학 모델로 표현될 수 있다. 그러나 캡슐 차량의 1차 현가장치에 해당하는 부상 및 안내 현가장치는 자기장에 의한 부상력 및 안내력의 특성이 반영되어 비선형 특성을 가지게 되기 때문에 동특성 파악을 위한 시뮬레이션에 있어서 일반 철도차량보다 복잡하고 많은 시간이 소요된다. 따라서 15 자유도의 동역학 모델도 중요하지만, 캡슐 차량의 동특성에 큰 영향을 미치지 않도록 자유도를 축소하여, 좀 더 간단한 수학적 모델을 구현함과 동시에 시뮬레이션 시간을 단축하는 것이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 11 자유도 및 9 자유도의 캡슐 차량 동역학 모델을 제안하였으며, 이들에 대한 시뮬레이션 결과들을 15 자유도의 시뮬레이션 결과와 비교하여 어느 정도 오차가 발생하는지 확인하였다. 한편, 1차 현가장치가 비선형으로 표현되는 캡슐 차량 동특성의 수학적 모델은 비선형 부분공간 식별(Nonlinear Subspace Identification) 방법의 원리를 사용하여 전개하였다. 시뮬레이션 결과로부터 캡슐 차량 차체의 수직 및 횡 방향 운동에 거의 영향을 미치지 않는 11 자유도의 캡슐 차량을 제안하였다.

Abstract Capsule vehicles for hyperloops, like conventional high-speed rail vehicles, can be expressed as a dynamics model with 15-DOF. On the other hand, the levitation and guidance suspension systems, which are the primary suspension systems of the capsule vehicle, have nonlinear characteristics by reflecting the characteristics of the levitation force and guidance force caused by the magnetic field, so the computer simulation for understanding the dynamic characteristics of capsule vehicle is more complicated and requires more effort and time than conventional high-speed rail vehicles. Therefore, although a dynamic model with 15-DOF is important, it is necessary to implement simpler mathematical equations by reducing the degrees of freedom to have no significant effects on the dynamic characteristics of the capsule vehicle and simultaneously shorten the simulation time. Hence, the capsule vehicle dynamics models with 11-DOF and 9-DOF were proposed, and the simulation results for these were compared with the simulation results with 15-DOF to find out the differences between them. A mathematical model of the dynamic characteristics of a capsule vehicle in which the primary suspension is expressed nonlinearly was developed using the nonlinear subspace identification method. From the simulation results, this study proposed a capsule vehicle with 11-DOF that has little effect on the vertical and lateral motions of the capsule vehicle body.

Keywords : Capsule Vehicle, Carbody Motion, Hyperloop, Nonlinear Subspace Identification, Nonlinear Suspension

본 논문은 한국철도기술연구원 연구과제(PK2401A1)로 수행되었음.

*Corresponding Author : Won-Hee You(Korea Railroad Research Institute)

email: whyou@krri.re.kr

Received May 27, 2024

Accepted August 2, 2024

Revised June 18, 2024

Published August 31, 2024

1. 서론

기존의 고속철도차량 현가장치와 마찬가지로 캡슐 차량의 현가장치도 두 부분, 즉 1차 현가장치와 2차 현가장치로 나뉜다. 그러나 캡슐 차량의 1차 현가장치에 해당하는 부분은 전기역학 서스펜션(Electro-Dynamic Suspension, EDS) 시스템의 특성이 반영되는 등가 현가장치로서 기존 고속철도차량의 1차 현가장치와는 다르게 비선형성을 포함하고 있다.

본 연구에서 캡슐 차량은 1개의 차체와 2개의 대차로 구성된다고 가정하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 대차와 차체 사이에는 수직 방향 및 횡 방향 스프링이 설치되어 있고, 전자기력을 이용한 부상 및 안내를 위해 대차의 각 측면에 4개의 초전도체 코일이 설치되어 있다[1].

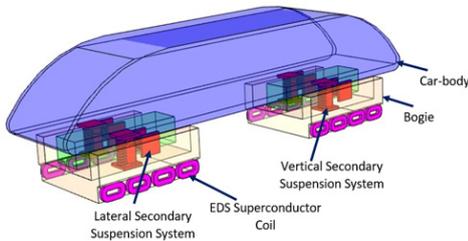


Fig. 1. Capsule vehicle suspension system overview

전통적인 철도차량의 동특성을 파악하기 위한 수학적 모델은 정속 주행 상태에서 전부 및 후부 대차, 차체 등 3개의 질량이 각각 상하, 횡, 롤, 요, 피치의 5-DOF를 갖는다고 가정하여 총 15-DOF를 갖는 시스템으로 표현된다. 이때 1차 및 2차 현가장치는 선형으로 표현된다. 그러나 15-DOF의 시스템도 매우 복잡한 시스템이기 때문에 전체 시스템을 다루기보다는 목적에 따라 자유도를 축소하여 시뮬레이션을 수행하는 것이 일반적이다. 최근에는 VI-RAIL이나 SIMPACK, VAMPIRE와 같은 상용 프로그램이 개발되어 사용되기도 하지만 가격이 매우 높기 때문에 연구자가 직접 프로그램을 개발하여 사용하는 경우가 많은데, 이때는 전체 시스템을 다루기보다는 목적에 맞게 축소된 모델을 수학적으로 전개하여 시뮬레이션을 수행하는 것이 일반적이다[2-4]. 차체의 수직, 롤 운동을 파악하기 위해서는 대차의 피치 및 요 운동을 생략하고 있으며, 승객의 횡 방향 승차감을 평가하기 위한 목적으로는 간단히 대차의 횡 및 요 운동과 차체의 횡, 롤 및 요 운동만을 고려하고 있다[5].

한편, 하이퍼루프용 캡슐 차량의 동특성에 대한 연구 결과는 일부를 제외하고는 거의 발표되지 않고 있다[6].

그러나 이 일부 연구의 경우 1차 현가장치의 비선형성으로 인하여 동특성 해를 찾기 위해 많은 시뮬레이션 시간이 소요되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 캡슐 차량 동특성의 변화를 최소화하면서 시뮬레이션 시간을 현저히 감소시키면서 최적의 자유도를 찾고자 하였다.

2. 본론

2.1 캡슐 차량의 부상 및 안내시스템

기존의 차륜-레일 시스템은 고속에서 차륜과 레일 사이에 높은 마찰 손실과 동적 불안정성을 가지고 있다. 그러나 초고속으로 주행하는 하이퍼루프 캡슐 차량은 가이드웨이와의 마찰 손실이 거의 없고 안정성을 확보할 수 있는 주행 메커니즘이 필수적이기 때문에, 이에 대한 연구가 오랫동안 검토되어 왔다. Eric C. et al은 작동 단순성, 동적 안정성, 전력 소비 및 승차감을 기반으로 세 가지 유형의 주행시스템(차륜-레일 방식, 에어 베어링, 자기 부상)을 비교했는데, 각 후보의 장점과 단점을 고려하여 결국은 자기 부상이 가장 좋은 방법이라고 결론지었다[7]. 자기 부상 시스템에는 두 가지 경쟁 시스템이 있는데, EMS 방식과 EDS 방식이 그것이다.

2.2 전자기 서스펜션 시스템

전자기 서스펜션 시스템(Electro-Magnetic Suspension, EMS)은 전자기력의 원리에 따라 작동하는 기술이다. EMS 시스템에서는 전류가 흐르는 코일에 순간 전압이 인가되면 차량에 설치된 철심과 선로에 고정된 강자성 레일로 구성된 자기회로가 여차된다. 이에 따라 차량에 탑재된 철심이 레일로 끌어당겨지며, Fig. 2의 a)에 표시된 바와 같이 가이드웨이의 아래쪽과 대차 사이에 형성된 자기력에 의한 인력이 차량의 전체 중량을 지탱하게 된다. 부상은 본질적으로 차량 속도와 무관하게 제공되므로 정차 중에도 부상이 될 수 있다. 따라서 차량이 저속으로 이동하거나 정차 중에도 휠-레일 마찰 시스템이 필요하지 않게 된다. 그러나 EMS시스템의 두 차화된 구성 요소 사이에 허용되는 최대 공극은 10~20mm이다[8,9]. 차륜-레일 접촉식 고속철도차량에 비해 고속으로 주행 가능하지만, 약 450km/h 이상의 초고속으로 주행 시에는 차량의 진동에 의한 대차의 움직임이 가이드웨이와 대차 사이의 작은 공극을 초과하게 되어 굽힘이 생기는 등 여러 가지 단점이 드러나게 된다.

2.3 전기역학 서스펜션 시스템

EDS 시스템은 자기반발의 원리를 이용한 서스펜션 기술이다. 이 시스템의 두 가지 주요 구성요소는 움직이는 차량에 고정된 초전도 전자석(또는 코일)과 Fig. 2의 b)에 표시된 바와 같은 가이드웨이에 설치된 부상 및 유도 코일(8자형 단락 코일)이다. 초전도 전자석이 가이드웨이 위로 특정 속도로 이동할 때 8자형 코일에 시간에 따라 변하는 와전류가 유도된다. 생성된 와전류의 결과로 8자형 코일은 초전도 전자석의 자기장과 반대 극을 갖는 자기장을 생성하게 된다. 따라서 이 두 자기장에 의해 반발력이 생성되고 이 반발력에 의해 차량이 부상하게 되고 동시에 안내된다. 8자형 코일에 의해 생성되는 자속의 양은 그 위를 통과하는 차량의 속도와 유도 전류의 양에 따라 달라진다. 그러므로 8자형 코일에 유도되는 전류량과 차량의 속도를 조절함으로써 부상과 안내에 필요한 반발력을 조절할 수 있다. 초전도 전자석은 전기 저항이 없거나 낮은 상태인 극저온까지 냉각될 수 있으므로 훨씬 더 큰 전류를 전도할 수 있다. 결과적으로 EDS 시스

템은 더 많은 양의 부상력과 안내력을 생성한다. 따라서 차량은 주행 중 가이드웨이에서 수십 밀리미터 이상 위로 공중에 떠 있을 수 있다. 이러한 큰 간격으로 인해 EDS 시스템은 가이드웨이의 거칠기에 대한 민감도가 낮다. 이 시스템에서 허용되는 최대 공극은 약 10~150mm이다[8,9]. EDS 부상 시스템은 저속에서는 바퀴를 이용하여 주행해야 하므로 차량에 접이식 바퀴를 장착해야 한다. 따라서 부상되지 않는 저속에서는 효과적이지 않을 수 있다. EDS 시스템은 본질적으로 정적으로 안정적인 동작을 가지기 때문에 정적 안정성을 위한 피드백 제어 시스템이 필요하지 않다. 그러나 감쇠 성능이 매우 낮기 때문에 차량 움직임을 감쇠시키고 승차감을 향상시키기 위한 특별한 장치가 필요하다.

앞의 2.2절과 2.3절에 설명한 사유로 인하여 본 연구에서는 시속 1,000km/h의 속도로 주행하는 캡슐 차량을 위한 부상 시스템으로서 EDS 시스템을 채택하는 것으로 결정하였다.

2.4 상하 및 횡 방향 EDS 등가 강성계수

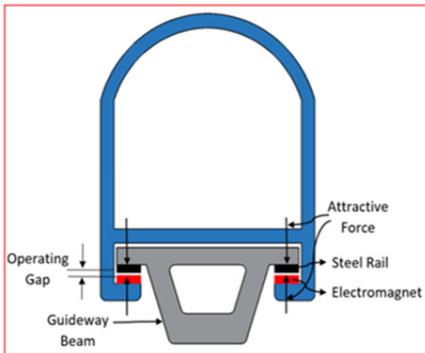
본 연구에서는 시속 1,000km/h 주행하는 캡슐 차량의 EDS 시스템으로서 일본의 자기부상열차에서 사용하고 있는 측벽 EDS 시스템 방식을 도입하고자 하였다. 측벽 EDS 시스템의 부상력과 안내력은 대차의 측면에 있는 초전도 전자석과 8자형 코일의 상호작용에 의해 생성되는데 차량의 속도, 8자 코일의 중심에 대한 초전도 전자석의 측면 및 수직 위치에 따라 달라진다.

초전도 전자석이 장착된 대차의 운동방정식은 다음 식과 같다.

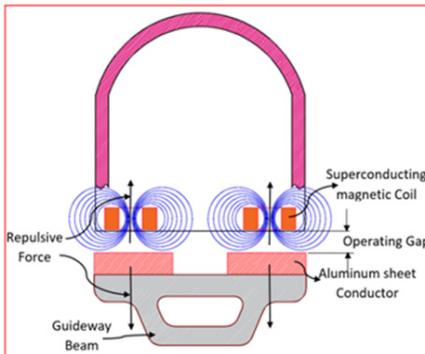
$$\left. \begin{aligned} M \frac{d^2 y}{dt^2} &= F_z \\ M \frac{d^2 z}{dt^2} &= F_y - Mg \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서 M 은 대차의 질량이고 g 는 중력가속도이다. 또한 F_y 는 안내력이며 F_z 는 부상력을 나타낸다. 속도에 따른 캡슐 차량의 주행 동특성을 파악하기 위해 필요한 운동방정식을 도출함에 있어서 대차의 상하 및 횡 방향 위치와 차량의 주행속도 및 EDS 강성계수 특성 사이의 관계에 대한 자세한 사항은 이전 연구에서 수행된 결과를 참조하였다[10, 11].

본 연구에서 채택된 EDS 시스템의 부상 및 안내 강성계수에 대한 최종 단순화된 수학적식은 평균 성분과 진동



(a) EMS system



(b) EDS system

Fig. 2. Magnetic levitation system[7]

성분으로 구분될 수 있는데, 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

Vertical stiffness ($k_{eds,z}$):

$$k_{eds,ave,z}(v,y,z) = (5.43 \times 10^6 - 1.29 \times 10^8 \times z^2) \times (1 + 84.3 \times y^2) e^{-6.18/v}$$

$$k_{eds,osc,z}(v,y,z) = (6.85 \times 10^5 \times e^{-1.43/v} - 1.56 \times 10^7 \times z^2) \times (1 + 171 \times y^2) \times \sin(2\pi vt/\tau_{lev})$$

$$k_{eds,z} = k_{eds,ave,z} + k_{eds,osc,z} \quad (2)$$

Lateral stiffness ($k_{eds,y}$)

$$k_{eds,ave,y}(v,y,z) = 2.75 \times 10^6 \times e^{-14.5/v} + (4.1 \times 10^8 \times z^2)$$

$$k_{eds,osc,y}(v,y,z) = (-7.18 \times 10^5 + 0.5 \times 10^6 \times z^2) \times \sin(2\pi vt/\tau_{lev})$$

$$k_{eds,y} = k_{eds,ave,y} + k_{eds,osc,y} \quad (3)$$

여기서 z 는 대차의 상하 방향 위치, y 는 횡 방향 위치를 나타내며, v 는 대차의 주행속도, τ_{lev} 는 극 피치를 나타낸다.

대차의 최대 허용 상하방향 변위 z 는 $-0.2 < z < 0m$ 로 하였다. Fig. 3에 표시된 바와 같이 본 연구의 EDS 시스템에는 각 대차의 측면에 4개의 초전도 전자석이 설치되어 있으며, 초전도 전자석의 크기는 부상 코일 1개의 길이와 같다.

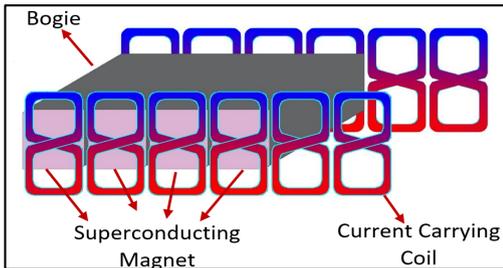


Fig. 3. Superconductor and Levitation Coil Arrangement on the Bogie[8]

EDS 시스템이 적용된 캡슐 차량의 동특성은 Eq. (2) ~ (3)에서 보는 바와 같이 1차 현가장치에 해당하는 부상 강성 및 가이드웨이 강성의 비선형 특성으로 인하여 시뮬레이션을 통해 해를 얻는 데 있어서 캡슐 차량의 주행속도에 따라 다르지만 수렴 시간이 매우 오래 걸리는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 자유도를 줄이면서

오차가 크게 나타나지 않고, 시뮬레이션 시 수렴 시간이 짧아지는 방법으로서 캡슐 차량의 동역학적 특성에 큰 영향을 끼치지 않는 방안을 고려하게 되었다.

3. 캡슐 차량의 비선형 동역학 모델

3.1 비선형 부분 공간 식별법을 이용한 캡슐 차량 운동방정식

본 연구에서 다루고 있는 캡슐 차량의 운동방정식은 다자유도 시스템으로서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[M]\{\ddot{z}\} + [C]\{\dot{z}\} + [K]\{z\} = \{F(t)\} \quad (4)$$

여기서 $[M]$, $[C]$ 및 $[K]$ 는 시스템의 질량, 감쇠 및 강성 행렬이고 $\{z\}$, $\{\dot{z}\}$ 및 $\{\ddot{z}\}$ 는 각각 가속도, 속도 및 변위 벡터를 나타낸다. 운동방정식의 근사해를 얻기 위한 방법으로는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 수치 적분을 사용하였다.

선형 동적 시스템의 경우 행렬 $[M]$, $[C]$ 및 $[K]$ 는 시간에 독립적이며 적분을 실행하는 동안 변경되지 않은 상태로 유지된다. 그러나 비선형 동적 시스템의 경우 이러한 행렬은 시간에 따라 변화하므로 적분을 실행하는 동안 수정되어야 한다. 캡슐 차량의 EDS 부상 및 안내 서스펜션은 비선형 특성을 가지므로 이 연구의 대상이 되는 캡슐 차량의 동적 모델은 비선형으로 간주된다. 이러한 비선형 동적 시스템의 해석방법 중의 하나로 본 연구에서는 비선형 부분공간 식별법(Nonlinear Subspace Identification, NSI)을 사용하였다[12]. 캡슐 차량의 비선형 동적 모델링 및 해석을 하는데 있어서 NSI를 사용하기 위해서는 Eq. (4)와 같은 표현식을 비선형 동역학 모델에 구성하는 것이 필요하다. 다시 말하면, 비선형 동역학 모델을 선형 부분과 비선형 부분으로 구분하여 전개시켜야 한다. 선형 부분과 비선형 부분으로 구성된 캡슐 차량의 다자유도 운동방정식은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$M\ddot{z}(t) + C_{lin}\dot{z}(t) + K_{lin}z(t) + \sum_{i=1}^m \mu_i L_i K_{eds,i}(v_x, z, y) z(t) = F(t) \quad (5)$$

여기서 μ_i 는 비선형 구성요소의 가중치를 나타내고 L_i 는

비선형 구성요소의 위치를 나타내며 그 값은 -1, 0 또는 1이 된다. M 은 질량 행렬을 나타내고 C_{lin} 는 선형 부분의 감쇠계수를 나타낸다. 또한 K_{lin} 은 선형 부분의 강성 행렬을 나타내고 $K_{nonlin,i}(k_{eds,z}, k_{eds,y})$ 는 비선형 강성 행렬을 나타낸다. m 은 시스템의 비선형 구성요소 수를 나타낸다. 이 경우에는 부상 및 안내 EDS 시스템 초전도 전자석은 $m = 16$ 이 된다.

NSI를 사용하여 캡슐 차량의 동특성을 파악하기 위해서는 Fig. 4와 같이 미지의 EDS 힘이 선형 동역학 모델에 작용하는 내부 피드백 힘으로 사용된다. 비선형 EDS 강성력은 스칼라 비선형 함수 $K_{eds,i}(v_x, z, y)$ 에 따라 각각 m 개의 구성 요소에 대한 합으로 표현된다.

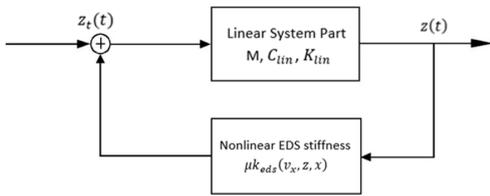


Fig. 4. Capsule vehicle nonlinear dynamics model

Eq. (5)의 비선형 항을 오른쪽으로 이동하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} M\ddot{z}(t) + C_{lin}\dot{z}(t) + K_{lin}z(t) &= F(t) + F_{k_{eds}} \quad (6) \\ &= F(t) - \sum_{i=1}^m \mu_i L_i K_{eds,i}(v_x, z, y) z(t) \end{aligned}$$

Eq. (6)은 외력 $F(t)$ 와 비선형 항 $F_{k_{eds}}$ 로 인한 내부 피드백 힘을 받는 시스템으로 해석될 수 있다. 이는 NSI로 알려진 현재의 시간 영역 식별 방법을 기반으로 한다. 상태벡터 $Z = [z \ \dot{z}]^T$ 및 입력 벡터 u 에 해당하는 운동 방정식은 상태 공간 식으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{Z} = AZ + Bu \quad (7)$$

$$y = CZ + Du$$

이때, 차량의 횡 변위 및 수직 변위를 측정할 수 있다고 가정하며, 입력 벡터 u 는 Eq. (8)과 같다.

$$u = [F(t) \ -F_{k_{eds,1}} \ -F_{k_{eds,2}} \ -F_{k_{eds,3}} \ \dots \ -F_{k_{eds,m}}]^T \quad (8)$$

3.2 자유도의 축소 및 가이드웨이 불규칙

Fig. 1에 표현된 바와 같은 캡슐 차량에 대해 뉴턴의 운동 제2법칙과 강제 운동을 사용하여 차체와 두 대차의 수직, 횡, 롤, 피치 및 요 운동 등 15-DOF에 대한 15개 방정식이 도출될 수 있다. 15-DOF는 캡슐 차량의 동특성을 파악 하는데 있어서 허용되는 최대 자유도이다.

본 연구에서는 15-DOF의 모델과 더불어 가능한 오류를 최소화하고 계산시간을 개선하기 위해 11-DOF 모델과 9-DOF 모델에 대한 운동방정식을 구성하였으며, 이 3개의 모델로부터 캡슐 차량 동역학 모델의 최적 자유도를 결정하고자 하였다. 15-DOF의 캡슐 차량에 있어서 대차는 차체와 수직 방향의 2차 현가장치로 연결되어 있는데, 이 현가장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 대차의 좌우 양쪽의 중간 부위에 있기 때문에 대차의 피치 운동과 요 운동이 차체에 미치는 영향이 매우 작을 것으로 예상된다. 따라서 전부 및 후부 대차의 피치 운동과 요 운동을 제외하여 11-DOF의 모델을 고려하였다. 한편, 11-DOF 모델에 더하여 캡슐 차량의 차체의 좌우 및 상하 방향의 동적 특성에 영향을 미치는 대차의 강제 운동 중 롤 운동을 추가로 제외하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이는 일반적인 철도 차량의 경우에 비취볼 때 대차의 롤 운동이 상하 운동에 비하여 차체의 상하 운동에 미치는 영향이 작으며, 좌우 운동에 비하여 차체의 좌우 운동에 미치는 영향이 비교적 작기 때문이다. 이에 따라 11-DOF와 9-DOF에 있어서 제외되는 자유도를 정리하면 다음 표와 같다.

Table 1. Motions considered for each model

Model		15-DOF	11-DOF	9-DOF
Carbody	Vertical	○	○	○
	Pitch	○	○	○
	Roll	○	○	○
	Lateral	○	○	○
	Yaw	○	○	○
Bogie (Front/Rear)	Vertical	○	○	○
	Pitch	○	×	×
	Roll	○	○	×
	Lateral	○	○	○
	Yaw	○	×	×

3개의 캡슐 차량 모델에 대한 수치해석 결과를 비교하기 위하여 가이드웨이의 불규칙이 입력으로 주어진다.

가이드웨이의 불규칙은 캡슐 차량의 주행 안정성과 승차 감에 영향을 미친다. 본 연구에서는 가이드웨이의 불규칙을 특성화하기 위해 가이드웨이 수직 및 측면 불규칙을 Fig. 5에 표시된 바와 같이 최대 진폭이 각각 $\pm 10\text{mm}$ 및 $\pm 20\text{mm}$ 인 정규 분포의 백색 잡음 신호로 가정하였다.

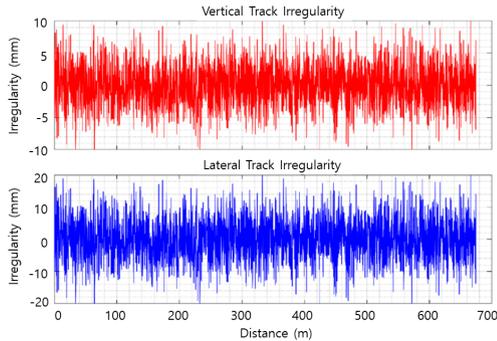


Fig. 5. Guideway track irregularity

시뮬레이션은 MATLAB/Simulink 환경에서 수행되었으며, Fig. 6과 같이 폐쇄 루프 유형이다. 대차 변위의 하위 시스템에서는 가이드웨이 불규칙과 상태 공간 하위 시스템의 출력 신호가 입력 신호로 사용되며, 가이드웨이에 대한 대차의 수직 및 횡 방향 상대변위를 계산하여 하위 시스템인 EDS 강성시스템으로 보낸다. EDS 강성 시스템은 Eq. (3) ~ (4)를 사용하여 EDS 시스템의 비선형 수직 및 측면 강성을 계산한다. 하위 시스템인 EDS Force 시스템에서는 EDS 시스템의 비선형 부상력 및 안내력이 계산되어 하위 시스템인 상태공간 시스템에 입력으로 전송된다. 시뮬레이션을 위한 캡슐 차량 매개변수는 아래 Table 2에 명시되어 있다.

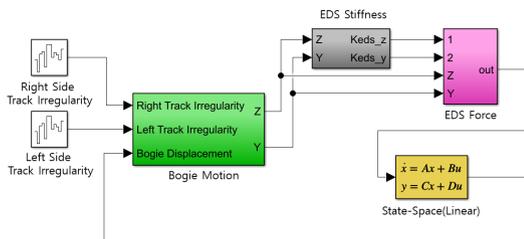


Fig. 6. MATLAB/Simulink simulation layout

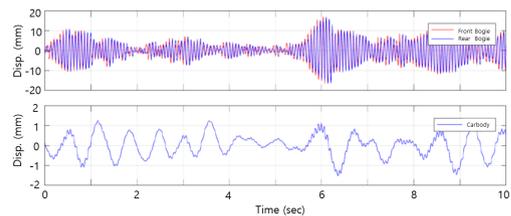
Table 2. Capsule vehicle parameter values

Parameter	Symbol	Value
Mass of Car-body(kg)	M_c	17,060
Mass of Bogie(kg)	M_b	4,759
Secondary Suspension Spring Stiffness Coefficient(N/m)	K_{sv}	37.26e4
Secondary Suspension Damper Coefficient(N*s/m)	C_{sv}	3,276
Length of Car-body from the center of the mass of Car-body to the lateral or vertical secondary suspension system(m)	L_C	7.40
Bogie Length(m)	L_b	4.40
Height from the center of mass of the bogie to the lateral secondary suspension system(m)	h_{airb}	0.497
Width from the center of mass of bogie to the vertical secondary suspension system(m)	W_{air}	0.40
Hight from the center of mass of Bogie to the guidance EDS system(m)	h_{gut}	0.07
Width from the center of mass of Bogie to the levitation EDS system(m)	W_v	0.63

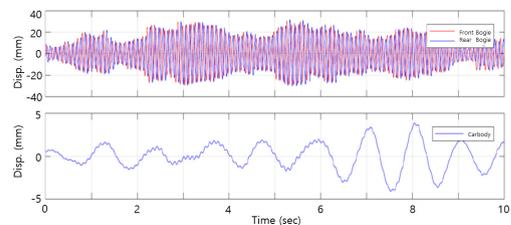
4. 결과 및 고찰

4.1 15-DOF 모델의 시뮬레이션 결과 분석

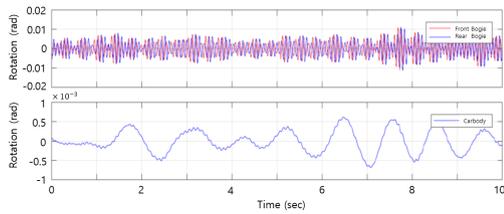
다음 Fig. 7은 1,000km/h로 주행하는 캡슐 차량의 15-DOF 모델에 대해 동특성 시뮬레이션을 수행한 결과를 보여주고 있다.



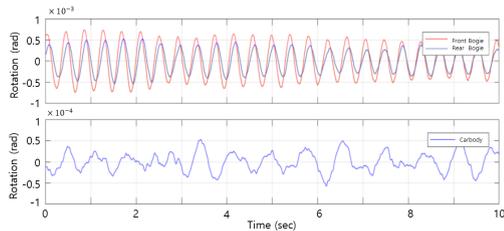
(a) Vertical displacement of bogies and car-body



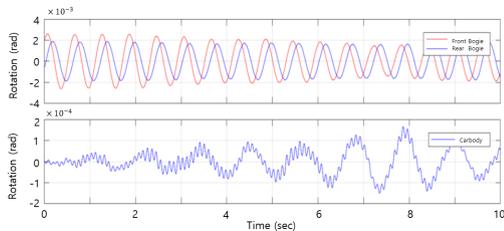
(b) Lateral displacement of bogies and car-body



(c) Roll motion of bogies and car-body



(d) Pitch motion of bogies and car-body



(e) Yaw motion of bogies and car-body

Fig. 7. Simulation results for 15 DOF model

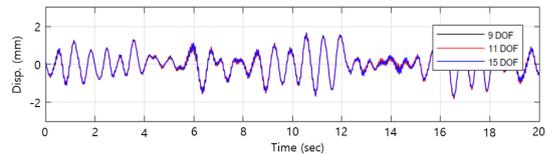
이들에 대한 피크 및 RMS(Root Mean Square) 값을 정리하면 다음 표와 같다.

Table 3. Peak and RMS values of displacements and rotations from 15 DOF simulation

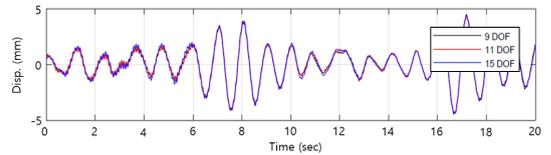
Disp.	Front Bogie		Rear Bogie		Car-Body	
	Peak	RMS	Peak	RMS	Peak	RMS
Vertical (mm)	20.9707	5.0791	21.0531	5.1042	2.7282	0.7872
Lateral (mm)	34.8815	9.9054	36.0317	9.9766	5.1999	1.4325
Roll (rad)	1.42e-2	3.45e-3	1.44e-2	3.47e-3	1.10e-3	3.09e-4
Pitch (rad)	2.49e-3	1.06e-3	2.41e-3	1.06e-3	1.24e-4	3.17e-5
Yaw (rad)	5.49e-3	1.82e-3	3.45e-3	1.13e-3	1.67e-4	4.32e-5

Table 3에 명시된 데이터를 고려하면 대차의 롤, 피치 및 요 운동의 효과가 차체의 수직 및 측면 운동에 거의 또는 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 따라

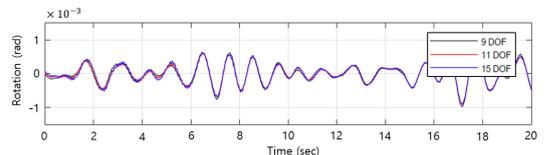
서 전체 캡슐 차량 모델의 적절한 자유도는 모델의 계산 시간이 짧고 차량 동역학에 대한 모델의 오류가 적은 9-DOF 또는 11-DOF 중에서 선택될 수 있다. 15-DOF의 동적 오차는 캡슐 차량의 최대 DOF이므로 0으로 가정하였다. 수학적 모델의 최적 DOF는 차체 운동의 피크 값과 RMS 값 근사치 및 계산시간을 기반으로 선택된다. Fig. 8에 나타난 각 모델의 시간 영역 시뮬레이션 결과는 9-DOF 및 11-DOF 모델의 차체 운동이 15-DOF 모델에 대해 어떻게 근사화되는지를 보여주고 있으며 이를 정리하면 Table 4 및 Table 5와 같다. 한편, Table 6에서는 각 모델의 시뮬레이션 시간을 비교하여 보여주고 있다.



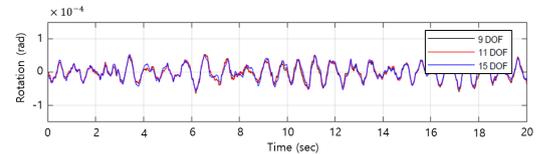
(a) Vertical displacement



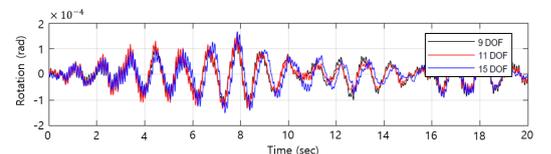
(b) Lateral displacement



(c) Roll motion



(d) Pitch motion



(e) Yaw motion

Fig. 8. Simulation results of Car-body motions under 9, 11, and 15-DOF models

Table 4. Peak values of car-body's displacement under 9, 11 and 15 DOF simulation and deviations (dev.)

Motion	15-DOF	11-DOF		9-DOF	
	Peak value	Peak value	% peak dev.	Peak value	% peak dev.
Vertical Disp. (mm)	2.7282	2.7344	0.23	2.6881	1.47
Lateral Disp. (mm)	5.1999	5.2414	0.80	5.2615	1.18
Roll Motion (rad)	0.0011	0.0011	0.00	0.0012	9.09
Pitch Motion (rad)	1.24e-4	1.26e-4	1.61	1.28e-4	3.23
Yaw Motion (rad)	1.67e-4	1.91e-4	14.37	1.96e-4	17.37
Average dev.	-	-	3.40	-	6.47

Table 5. RMS values of car-body's displacement under 9, 11 and 15 DOF simulation and deviations (dev.)

Motion	15-DOF	11-DOF		9-DOF	
	RMS value	RMS value	% RMS dev.	RMS value	% RMS dev.
Vertical Disp. (mm)	0.7872	0.7872	0.00	0.7882	0.13
Lateral Disp. (mm)	1.4325	1.4154	1.19	1.4163	1.13
Roll Motion (rad)	3.09e-4	3.09e-4	0.00	3.22e-4	4.21
Pitch Motion (rad)	3.12e-5	3.20e-5	2.56	3.21e-5	2.88
Yaw Motion (rad)	4.32e-5	4.67e-5	8.10	4.62e-5	6.94
Average dev.	-	-	2.37	-	3.06

Table 6. Computation time under 9,11 and 15 DOF models for one iteration simulation

	No of DOF of the model	Computation time for 1 iteration (min)	Computation time improvement with respect to 15 DOF
1	15 DOF	0.9844	
2	11 DOF	0.5274	46.43 %
3	9 DOF	0.4414	55.16 %

Table 4, Table 5 및 Table 6을 보면 자유도를 축소 한 11-DOF 및 9-DOF 모델의 오차가 거의 발생하지 않고 비선형 성분을 포함한 계산시간이 획기적으로 향상되는 것을 알 수 있다. 11-DOF의 동역학 모델은 차체 운동의 피크 값 오차는 평균 3.40%, RMS 값 오차는 평균

2.37%를 나타내고 있으며 계산시간은 46.43%로 감소되었음을 알 수 있다. 한편, 9-DOF 동역학 모델은 15-DOF 차량 동역학 모델에 대하여 차체 운동의 피크 값 오차는 평균 6.47%, RMS 값 오차는 평균 3.06%로 나타나고 있으며 계산시간은 55.16%로 감소되었음을 알 수 있다.

한편, 11-DOF와 9-DOF 모두에서 차체의 요 운동 값이 피크 값의 경우 각각 14.37% 및 17.37% 높게 나타나고 있다. 그러나 차체의 횡 방향 또는 수직 방향 운동의 경우에는 피크 값 및 RMS 값 모두 1.5% 이내의 오차를 보여주고 있다. 이로부터 회전운동의 경우에는 11-DOF 모델이 9-DOF 모델에 비해 15-DOF 모델의 시뮬레이션 결과에 현저히 근접하고 있음을 알 수 있다. 이는 대차의 롤 운동이 11-DOF 모델에서는 고려되었으나 9-DOF 모델에서는 고려되지 않았기 때문으로 보인다. 차체의 강제 운동 중 횡 방향 및 수직 방향의 운동에만 초점을 둘 경우 11-DOF 모델에 비하여 오차는 비슷하게 나타났지만, 시뮬레이션 시간이 단축되므로 9-DOF 모델이 더 적절함을 알 수 있다. 그러나 진행방향을 제외한 차체의 모든 강제 운동에 초점을 둘 경우에는 11-DOF 모델이 최적으로 사용될 수 있는데, 이 경우 요 운동의 오차는 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

5. 결론

자유도가 큰 복잡한 시스템의 경우 복잡성, 계산시간, 역학적 근사 사이를 절충하는 최적의 자유도를 선택해야 한다. 차체의 강제 운동에 대한 해석을 수행하기 위해 도입된 15-DOF 모델의 캡슐 차량을 기준으로 11-DOF 및 9-DOF 모델을 구성하여 수치해석 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 차체의 강제 운동 중 횡 방향 및 수직 방향의 운동에만 초점을 둘 경우 시뮬레이션 오차와 시간을 같이 고려하면 9-DOF 모델이 더 적절하지만 회전 운동의 경우에는 11-DOF 모델이 9-DOF 모델에 비해 15-DOF 모델의 시뮬레이션 결과에 현저히 근접하고 있다.
- (2) 진행 방향을 제외한 차체의 모든 강제 운동에 초점을 둘 경우에는 11-DOF 모델이 최적으로 사용될 수 있는데, 이 경우 요 운동의 오차는 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

References

- [1] N. Birhan Abebaw, *Semi-active suspension control of Hyperloop capsule vehicle's vertical dynamics by using MR damper*, Ph.D's thesis, University of Science and Technology, pp.33, Aug. 2021.
- [2] Simon Iwnicki, *Handbook of Rail Vehicle Dynamics*, CRC Press, 2006, pp.359-421.
- [3] Garg K V., Dukkipati V R., *Dynamics of Railway Vehicle Systems*, Academic Press Canada, 1984, pp.407.
- [4] Evans, J.R., "Rail vehicle dynamics simulations using VAMPIRE", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 31(Suppl.), pp.119-140, 1999
- [5] J.K. Hedrick, D.N. Wormley, A.K. Kar, W. Murry and W. Baum, *Performance Limits of Rail Passenger Vehicle: Evaluation and Optimization*, U.S. Department of Transportation, 1979, pp.250.
- [6] Ranhee Yoon, Wonhee You, etc. "Study on Dynamic Characteristics of Superconducting Capsule Train", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.29, No.4, pp.453-461, 2019. DOI: <https://soi.org/10.5050/KSNVE.2019.29.4.453>
- [7] Eric C., Shankar P.B., and Adonios N.K., "Levitation Methods for Use in the Hyperloop High-Speed Transportation System" *Energies*, Vol.12, No.21, 4190, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12214190>
- [8] Rakesh C, Manish D, Rajeev K and Manish K., "Magnetically levitated Vehicle: Suspensions, Propulsion and Guidance". *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, Vol.3, No.11, pp.5-8, 2014.
- [9] A. Santangelo, "Hyperloop as an Evolution of Maglev", *Transportation System and Technology*, Vol.4, No.4, pp.46-63, 2018.
- [10] Shunsuke O, Hiroyuki O and Eisuke M., "Equivalent Model of the Side Wall Electrodynamic Suspension System". *Electrical Engineering in Japan*, Vol.124, No.2, pp.63-73, 1998.
- [11] Ranhee Yoon, Wonhee You, etc. "Dynamic Analysis of Capsule Train with 9-DOF According to Speed", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 22, No. 2, pp.109-117, 2019. DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2019.22.2.109>
- [12] Marchesiello S. and Garibaldi L., "A time domain approach for identifying nonlinear vibrating structures by subspace methods", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.22, No.1, 81-101, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.04.002>

유 원 희(Won-Hee You)

[정회원]



- 1993년 8월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (석사)
- 1985년 8월 ~ 1989년 2월 : 국방과학연구소 연구원
- 1993년 12월 ~ 1996년 11월 : 삼성전자 책임연구원
- 1996년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

동력학 및 소음진동제어

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 : 삼성코닝 정밀소재 책임연구원
- 2010년 1월 ~ 2011년 12월 : 국방기술품질원 선임연구원
- 2012년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

메카트로닉스, 기계제어, 진동