



# 초전도 EDS 시스템 캡슐열차의 동특성 연구

## Study on Dynamic Characteristics of Superconducting Capsule Train

윤란희\* · 유원희† · 이진호\*\* · 이창영\*\* · 이관섭\*\*  
Ranhee Yoon\*, Wonhee You†, Jinho Lee\*\*, Changyoung Lee\*\* and Kwansup Lee\*\*

(Received April 8, 2019 ; Revised May 24, 2019 ; Accepted May 24, 2019)

**Key Words :** Capsule Train(캡슐열차), Running Dynamic Characteristics(주행 동특성), Levitation Stiffness(부상 강성), Guidance Stiffness(안내강성), Electrodynamic Suspension(유도반발식 자기부상)

### ABSTRACT

The capsule train is a subsonic high-speed transportation system adopting electrodynamic suspension using a superconducting magnet. As the capsule train travels in a levitated state by using magnetic levitation force at a certain speed, the dynamic characteristics under those conditions must be considered. In this study, the running dynamic characteristics of a capsule train were studied in the speed range of 210 km/h to 1080 km/h. To analyze the dynamic characteristics of a capsule train comprising one carbody and two bogies, the equations with 15 degrees of freedom for vertical, lateral, roll, pitch, and yaw directions were derived. Based on the characteristics of a side wall EDS system, the effects of running speed, levitation coil pitch, and vertical and lateral displacement were taken into account for the levitation stiffness and guidance stiffness, which function as primary suspensions of capsule train. In addition, irregularities of the guideway in the vertical and lateral directions were considered in the analysis. Finally, the displacement and acceleration of capsule train were analyzed in terms of specific frequencies and those magnitudes.

### 기 호 설 명

$b_{air}$  : 차체 중심과 2차 현가장치 사이 거리(m)  
 $c_p$  : 1차 현가장치 수직 댐퍼(Ns/m)  
 $c_{pl}$  : 1차 현가장치 횡 댐퍼(Ns/m)  
 $h_{airb}$  : 대차 중심과 2차 현가장치 사이 높이(m)  
 $h_{airc}$  : 차체 중심과 2차 현가장치 사이 높이(m)  
 $h_{gud}$  : 대차 중심과 1차 현가장치 사이 높이(m)  
 $I_{bp}$  : 대차 피치 방향 관성 모멘트(kg·m<sup>2</sup>)

$I_{br}$  : 대차 롤 방향 관성 모멘트(kg·m<sup>2</sup>)  
 $I_{by}$  : 대차 요 방향 관성 모멘트(kg·m<sup>2</sup>)  
 $I_{cp}$  : 차체 피치 방향 관성 모멘트(kg·m<sup>2</sup>)  
 $I_{cr}$  : 차체 롤 방향 관성 모멘트(kg·m<sup>2</sup>)  
 $I_{cy}$  : 차체 요 방향 관성 모멘트(kg·m<sup>2</sup>)  
 $k_s$  : 2차 현가장치 수직 스프링 강성(N/m)  
 $k_{sl}$  : 2차 현가장치 횡 스프링 강성(N/m)  
 $L_c$  : 차체 길이(m)  
 $L_p$  : 초전도 전자석 길이(m)

† Corresponding Author; Member, New Transportation Innovative Research Center, Korea Railroad Research Institute  
E-mail : whyou@krii.re.kr

\* Department of Railway System Engineering, University of Science and Technology

\*\* New Transportation Innovative Research Center, Korea Railroad Research Institute

‡ Recommended by Editor Jun Hong Park  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

- $m_b$  : 대차 질량(kg)
- $m_c$  : 차체 질량(kg)
- $\tau_{lw}$  : 부상코일 피치(m)
- $w_{air}$  : 대차 중심과 2차 현가장치 사이 폭(m)
- $w_{lw}$  : 대차 중심과 1차 현가장치 사이 폭(m)

### 1. 서 론

캡슐열차는 진공에 가까운 튜브 안을 초고속 주행하는 차량으로, 기존의 열차와는 다르게 비접촉 초전도 전자석에 의한 유도반발식(EDS: electrodynamic suspension) 자기부상시스템을 채택하고 있다<sup>(1)</sup>.

캡슐열차의 주행 동특성은 캡슐열차의 사양 및 자기부상시스템의 사양에 따라서 크게 좌우될 것으로 예측된다. 차체와 2대의 대차로 구성된 캡슐열차의 수직방향 부상 주행 동특성에 대하여 이루어진 최근 연구에서는 수직, 피치, 롤 방향을 고려한 3개의 자유도에 대하여 총 9 자유도의 수학적 모델을 고려하였다<sup>(2)</sup>.

이 연구에서는 수직 방향뿐만이 아닌 횡 방향부상 주행 동특성까지 보기 위하여 차체와 2대의 대차 각각의 수직, 횡, 롤, 피치, 요 방향을 고려한 총 15 자유도의 수학적 모델을 도출하였다. 이 모델을 바탕으로 캡슐열차의 초기 사양과 EDS 자기부상시스템의 특성을 반영하여 부상 주행하는 210 km/h ~ 1080 km/h의 속도 영역에서의 캡슐열차의 부상 주행 동특성을 확인하였다.

### 2. EDS 자기부상시스템의 특성

캡슐열차에 적용된 측벽 EDS 자기부상시스템은 대차에 탑재된 초전도 전자석이 가이드웨이의 부상코일을 통과하며 발생하는 유도 자기장 사이의 반발력으로 부상력 및 안내력을 발생시킨다. 이때 부상력과 안내력은 대차와 가이드웨이 사이의 부상강성과 안내강성으로 표현되는데, 부상강성과 안내강성은 맥동현상을 띄며 차량 주행속도( $v$ ) 및 수직( $z$ ), 횡( $y$ ) 변위에 영향을 받는 특성을 가진다<sup>(2)</sup>. 이러한 특성은 캡슐열차의 동적 거동에 주요한 영향을 미치기 때문에 캡슐열차의 동특성 확인 시에 반드시 고려되어야 한다. 이와 같은 부상강성과 안내강성의 특성은 초전도 전자석을 이용한 EDS 자기부상 철도 시스템에 관한 연구를 참고하였다<sup>(3,4)</sup>.

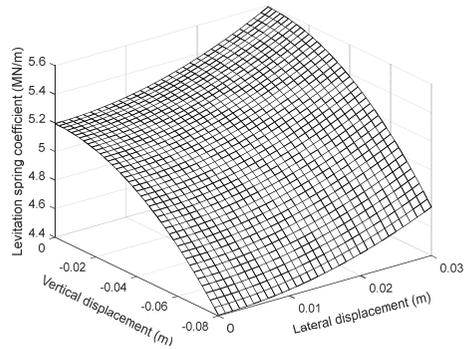


Fig. 1 Dependence of the levitation spring coefficient on  $y$  and  $z$  ( $v = 140$  m/s, static)

#### 2.1 부상강성

부상강성은 수직 변위 및 횡 변위에 비례하게 발생하는데, 식 (1)은 부상력에 대한 식을 바탕으로 도출한 부상강성의 근사식이다<sup>(3)</sup>. Fig. 1은 식 (1)을 바탕으로 주행속도가 140 m/s일 때 횡 변위와 수직 변위 변화에 따른 부상강성의 평균값 변화를 보여준다<sup>(3)</sup>. 이러한 경향은 다른 주행속도에서도 유사하게 나타나기 때문에 부상강성은 횡 변위와 수직 변위의 영향을 반영하고 맥동현상까지 고려하여 정리된 식 (1)을 통하여 분석에 적용되었다.

#### 2.2 안내강성

안내강성은 차량의 횡 변위에 비례하고 수직 변위에 반비례하여 발생한다. 식 (2)는 안내력에 대한 식을 바탕으로 도출한 안내강성의 근사식인데, 횡 변위가 안내강성에 미치는 영향이 매우 미미하여 무시 가능한 수준으로 판단되어 안내강성은 수직 변위의 변화만을 고려했다<sup>(3)</sup>. Fig. 2는 주행속도가 140 m/s일 때 횡 변위와 수직 변위 변화에 따른 안내강성의 평균값 변화를 나타낸 것으로, 횡 변위가 0 m ~ 0.03 m까지 변하여도 안내강성은 큰 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다<sup>(3)</sup>. 안내강성 또한 수직 변위 변화에 따른 경향이 다른 주행속도에서도 유사하게 나타나기 때문에 안내강성은 맥동현상까지 고려하여 정리한 식 (2)를 통해 캡슐열차의 동특성 분석에 반영되었다.

$$\begin{aligned}
 k_{lv} = & (1 + 84.3y^2)(5.43 - 129z^2) \times 10^6 e^{-\frac{6.18}{v}} \\
 & + (1 + 171y^2)(6.85 e^{-\frac{1.43}{v}} - 156z^2) \times 10^5 \quad (1) \\
 & \times \sin(2\pi vt / \tau_{lw})
 \end{aligned}$$

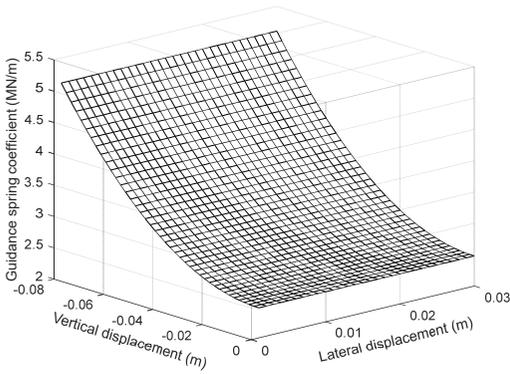


Fig. 2 Dependence of the guidance spring coefficient on  $y$  and  $z$  ( $v = 140\text{m/s}$ , static)

$$k_{\text{guid}} = (2.75 \times e^{-\frac{14.5}{v}} + 410z^2) \times 10^6 + (-7.18 + 5z^2) \times 10^5 \times \sin(2\pi vt / \tau_{lv}) \quad (2)$$

### 3. 캡슐열차의 주행 동특성 해석 모델

#### 3.1 캡슐열차의 구성

1대의 차체와 2대의 대차로 구성된 캡슐열차를 Fig. 3과 같이 간단히 도식화하였다. 2차 현가장치는 대차 중앙 좌우에 하나씩 위치하며, 1차 현가장치의 역할은 부상강성과 안내강성이 수행하기 때문에 대차에 탑재된 초전도 전자석의 구성을 그대로 반영하여 하나의 대차당 좌우에 4개씩 구성하였다. Fig. 3에 표기한 주요 파라미터 수치는 Table 1에 정리하였으며<sup>(1,4,5)</sup>, 값이 정의되지 않은 부상강성  $k_p$ 와 안내강성  $k_{pl}$ 은 앞서 나온 식 (1)과 식 (2)를 통하여 적용되었고, 부상댐핑  $c_p$ 와 안내댐핑  $c_{pl}$ 의 값은 EDS 자기부상 시스템의 댐핑 특성을 참고하여 결정하였다<sup>(5,6)</sup>.

#### 3.2 수학적 모델

이 논문에서는 Fig. 3을 바탕으로 전부 대차, 후부 대차, 차체 모두 수직, 횡, 롤, 피치, 요 방향의 동특성이 고려된 15 자유도의 수학적 모델을 구성하였다<sup>(2)</sup>. 구성된 수학적 모델을 상태공간식으로 정리하면 다음 식 (3)과 같이 표현되며, 이때 상태 벡터  $x$ 와 상태 행렬  $A$ , 입력 행렬  $B$  및 출력 행렬  $C^*$ 는 식 (4) 및 식 (5)와 같이 표현된다. 식 (5)에서  $M$ 은 질량 행렬,  $C$ 는 댐핑 행렬,  $K$ 는 강성 행렬을 의미한다<sup>(2)</sup>. 캡슐열차의 동특성 분석을 위한 시뮬레이션 수행 시에 식 (5)의

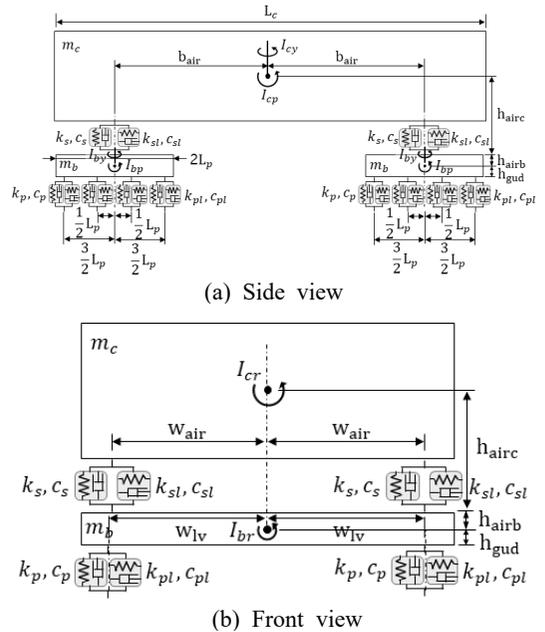


Fig. 3 Dynamic model of capsule train with main parameters

행렬들을 통한 상태공간식 형태의 수학적 모델을 활용하였다.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = C^*x \quad (3)$$

$$x = [z_{b1} \ z_{b2} \ z_c \ y_{b1} \ y_{b2} \ y_c \ \theta_{b1} \ \theta_{b2} \ \theta_c \ \phi_{b1} \ \phi_{b2} \ \phi_c \ \psi_{b1} \ \psi_{b2} \ \psi_c \ \dot{z}_{b1} \ \dot{z}_{b2} \ \dot{z}_c \ \dot{y}_{b1} \ \dot{y}_{b2} \ \dot{y}_c \ \dot{\theta}_{b1} \ \dot{\theta}_{b2} \ \dot{\theta}_c \ \dot{\phi}_{b1} \ \dot{\phi}_{b2} \ \dot{\phi}_c \ \dot{\psi}_{b1} \ \dot{\psi}_{b2} \ \dot{\psi}_c] \quad (4)$$

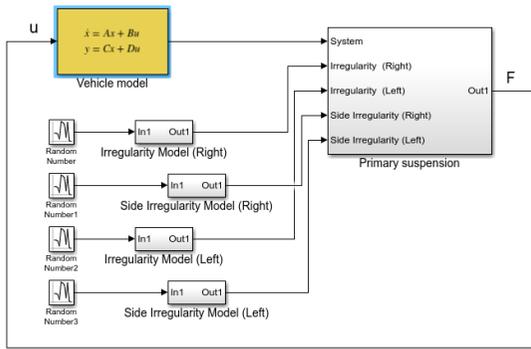
$$A = \begin{bmatrix} 0_{15 \times 15} & I_{15 \times 15} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0_{15 \times 15} \\ M^{-1} \end{bmatrix}, \quad C^* = [I_{30 \times 30}] \quad (5)$$

#### 3.3 해석 시스템 설계

캡슐열차의 동특성 해석 시스템은 Fig. 4와 같이 MATLAB/Simulink S/W를 통해 설계되었다<sup>(2,7)</sup>. 캡슐열차의 수학적 모델은 상태방정식 형태로 vehicle model 블록으로 구성되어 있다. 부상강성과 안내강

**Table 1** Main parameters of capsule train

Parameter	Value	Parameter	Value
$m_b$	10 467 kg	$I_{br}$	10 000 kg·m <sup>2</sup>
$m_c$	16 361 kg	$I_{cr}$	16 700 kg·m <sup>2</sup>
$L_c$	18 m	$I_{bp}$	612 000 kg·m <sup>2</sup>
$L_p$	0.45 m	$I_{cp}$	1 040 000 kg·m <sup>2</sup>
$b_{air}$	7.4 m	$I_{by}$	1 190 000 kg·m <sup>2</sup>
$h_{airb}$	0.497 m	$I_{cy}$	970 000 kg·m <sup>2</sup>
$h_{airc}$	-0.102 m	$k_s$	372 600 N/m
$h_{gud}$	0.07 m	$k_{sl}$	166 700 N/m
$w_{air}$	0.4 m	$c_p$	2450 Ns/m
$w_{iv}$	0.63 m	$c_{pl}$	400 Ns/m
$p_{iv}$	0.45 m	$c_s$	3726 Ns/m
		$c_{sl}$	1677 Ns/m



**Fig. 4** Modeling of capsule train with simulink S/W

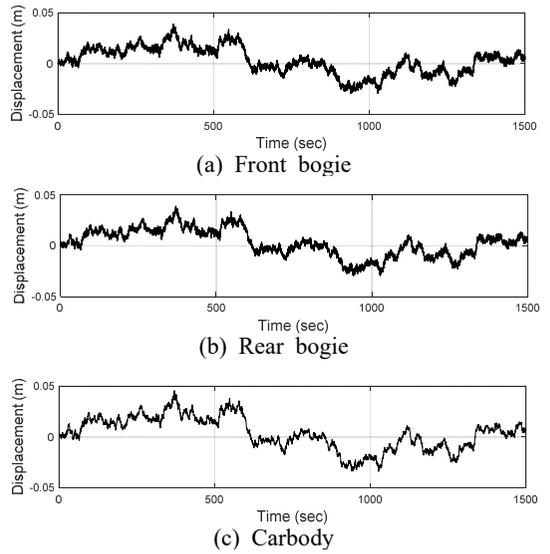
성의 변화 및 가이드웨이의 불규칙<sup>(8)</sup>에 의하여 발생하는 힘은 primary suspension 블록에 반영되어 상태 방정식 상에서 외력으로 해석된다. 앞서 언급하였듯이 시뮬레이션 수행은 캡슐열차가 부상 주행하는 210 km/h~1080 km/h의 속도 영역에 대하여 1500초 동안 이루어졌다.

## 4. 분석 결과

### 4.1 동적 범위 분석

#### (1) 시간 영역에서 변위의 변화

캡슐열차의 주행속도가 810 km/h일 때, 시뮬레이션이 수행된 시간 영역에서 변위의 변화 결과는 횡 방향에 대하여 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 대차와 차체의 전체적인 경향은 가이드웨이의 불규칙에 영향을 받아 유사하게 나타나지만, 고주파 성분이 차체에 비하여 전부 대차와 후부 대차에 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 주파수 분석을 수행하면 Fig. 6에서 보는



**Fig. 5** Lateral displacement of front bogie, rear bogie and carbody ( $v = 810$  km/h)

바와 같이 대차에는 고주파 성분이 나타나고 차체에는 저주파 성분이 나타남을 확연히 알 수 있다. 이는 2차 현가장치가 고주파수 성분을 차단하기 때문으로 판단된다.

#### (2) 변위의 주파수 분석

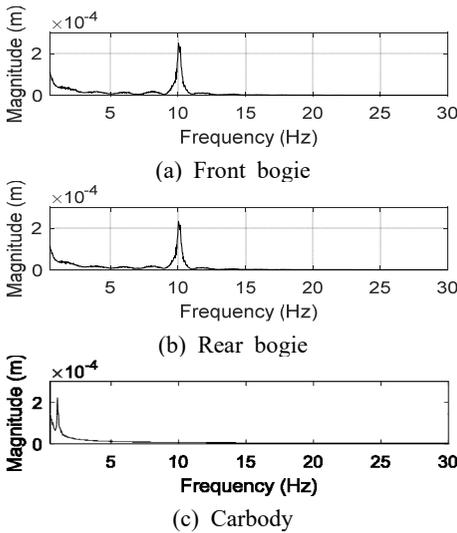
시뮬레이션 결과를 바탕으로 캡슐열차의 각 방향 변위에 대한 주파수 특성을 분석하였다. 주파수 분석의 정확도를 향상을 위하여 1500초간의 시뮬레이션 결과 데이터를 20개 구간으로 나누어 주파수 분석을 수행한 후 주파수 영역에서 평균을 계산하였다. 앞서서도 언급하였지만, Fig. 6은 캡슐열차의 주행속도가 810 km/h일 때의 횡 방향에 대한 주파수 분석 결과이다. 차체는 약 1 Hz에서, 대차는 약 10 Hz에서 주목할 만한 크기의 피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

각각의 방향에 대하여 살펴볼 주요한 피크 주파수 성분 값은 Table 2와 같이 정리하였다. Table 2에서 F는 전부 대차, R은 후부 대차, C는 차체를 의미하는데, 운동 방향 및 대차와 차체에 따라 주요 주파수 성분은 다르게 나타났다. Table 2를 통해 알 수 있듯이, 최종적으로 살펴볼 주요 피크 주파수 성분은 0.46 Hz, 0.67 Hz, 0.9 Hz, 1.03 Hz, 1.1 Hz, 1.64 Hz, 6.13 Hz, 6.88 Hz, 14.5 Hz, 15.01 Hz 그리고 주행속도 증가에 따라 전반적으로 조금씩 주파수가 커지는 경향을 보인 9.25 Hz~10.18 Hz 성분까지 총 11개로 정

**Table 2** Result of frequency analysis (displacement)

Frequency (Hz)	Vertical			Lateral			Roll			Pitch			Yaw		
	F	R	C	F	R	C	F	R	C	F	R	C	F	R	C
0.46													o	o	
0.67										o	o				
0.9	o	o													
1.03						o									
1.1					o				o						
1.64					o				o						
6.13								o	o						
6.88								o	o						
9.25 ~ 10.18					o	o									
14.5	o	o						o	o						
15.01	o	o													

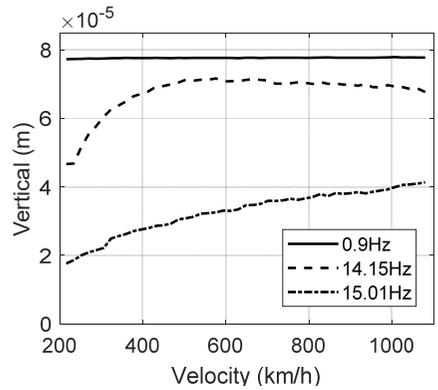
F(front bogie), R(rear bogie), C(carbody)



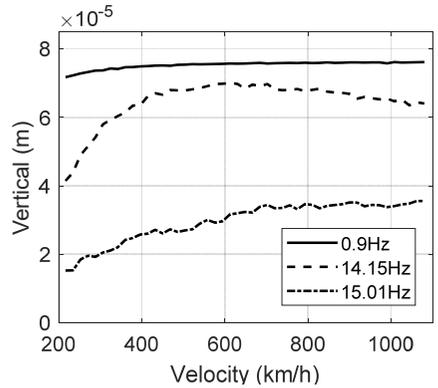
**Fig. 6** Displacement of bogies and carbody (lateral direction,  $v = 810$  km/h)

리되었다. 11개의 주파수 성분 중 수직과 롤 방향에 대한 성분 일부(0.9 Hz, 1.1 Hz, 1.64 Hz, 14.5 Hz)는 캡슐열차의 수직 방향에 대한 9자유도 모델을 통해 도출된 주요한 피크 주파수 성분과 근사하게 나타났다<sup>(2)</sup>. 캡슐열차의 주행속도 변화에 따른 각 주요 피크 주파수 성분들의 크기 변화는 각각의 방향별로 나누어 살펴보았다.

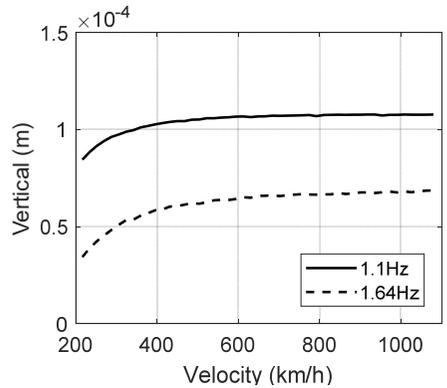
Fig. 7은 수직 방향의 결과로 전부, 후부 대차에서는 0.9 Hz, 14.15 Hz, 15.01 Hz 성분을, 차체에서는 1.1 Hz, 1.64 Hz 성분을 볼 수 있다. 수직 방향에 대한 전부 대차와 후부 대차의 결과는 유사하며, 속도 증가에 큰 영향을 받지 않는 0.9 Hz 성분의 크기가 가장



(a) Front bogie



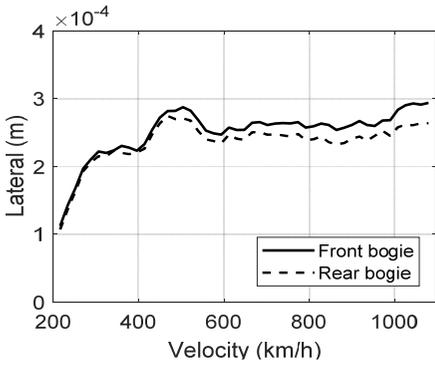
(b) Rear bogie



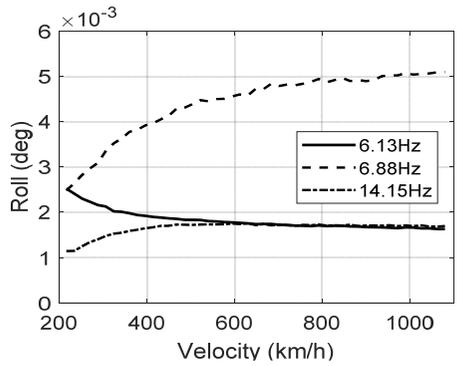
(c) Carbody

**Fig. 7** RMS displacement according to velocity (vertical direction)

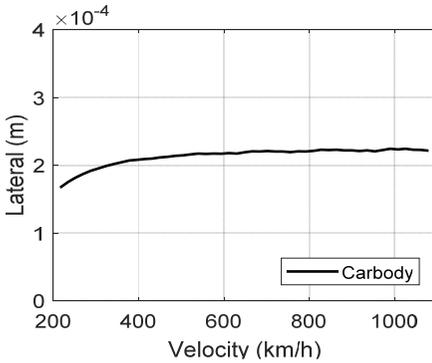
크게 나타났다. 가장 작은 값을 가지는 15.01 Hz 성분은 속도 증가에 따라 일정하게 증가하는 형태를 보이고, 14.15 Hz 성분은 약 400 km/h 속도까지는 급격히 증가하다가 약 600 km/h 이후에서는 조금씩 감소하는 경향을 보였다. 차체에서는 1.1 Hz 성분과 1.64 Hz



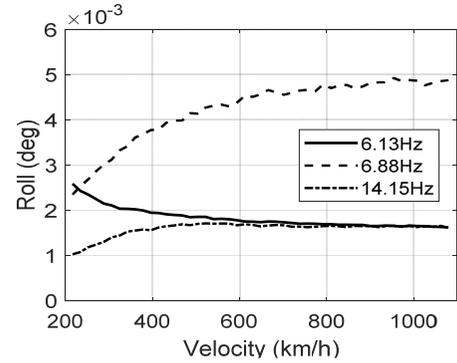
(a) 9.25 Hz ~ 10.18 Hz



(a) Front bogie



(b) 1.03 Hz



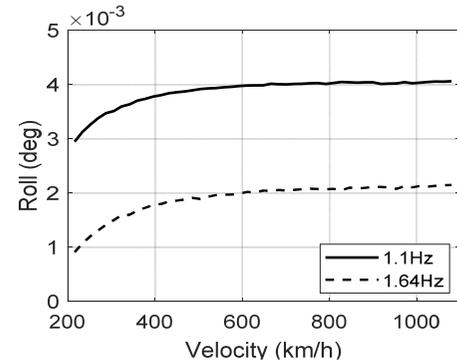
(b) Rear bogie

**Fig. 8** RMS displacement according to velocity (lateral direction)

성분이 유사한 경향으로 나타났는데, 1.1 Hz 성분이 더 크게 나타난 것을 확인할 수 있다.

횡 방향에 대해서는 Fig. 8과 같이 전부 대차와 후부 대차에서 9.25 Hz ~ 10.18 Hz 성분 하나, 차체에서 1.03 Hz 성분 하나의 주요 피크 주파수가 나타났다. 전부, 후부 대차에서 나타나는 횡 방향 변위는 약 300 km/h까지는 매우 급격하게 증가하고, 차체에서는 약 400 km/h까지 증가하다가 600 km/h 이후의 속도에서는 약 0.22 mm에 근사한 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

롤 방향 결과는 Fig. 9와 같으며, 대차에서는 6.13 Hz, 6.88 Hz, 14.15 Hz의 세 가지 피크 주파수 성분이, 차체에서는 수직 방향과 동일하게 1.1 Hz, 1.64 Hz의 두 가지 피크 주파수 성분이 나타났다. 차체에서는 비교적 저주파수 성분이 나타나고 전부, 후부 대차에서는 보다 고주파수 영역에서의 성분이 나타난 것을 알 수 있다. 대차의 결과를 보면 6.88 Hz 성분의 크기가 전체적으로 가장 크게 나타나고, 6.13 Hz와 14.15 Hz가 대조되는 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다. 차체에

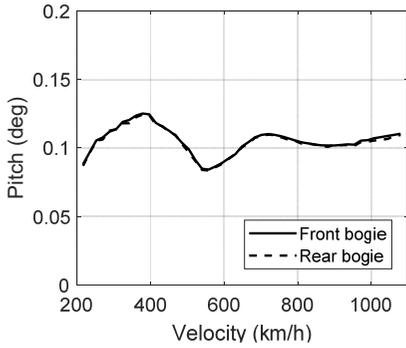


(c) Carbody

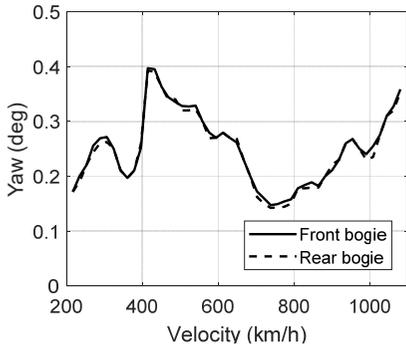
**Fig. 9** RMS displacement according to velocity (roll direction)

서는 수직 방향에서의 결과와 동일하게 두 성분이 유사한 경향을 보이고, 1.1 Hz 성분이 월등히 큰 값으로 나타나기 때문에 1.1 Hz 성분이 차체의 롤 방향 변위에 가장 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

Figs. 10, 11에서 볼 수 있듯이 피치 방향과 요 방향에서는 전부 대차와 후부 대차에서만 주요 피크 주파수 성분이 나타났다. 피치 방향에서는 0.67 Hz 성분이,



**Fig. 10** RMS displacement according to velocity (pitch direction, 0.67 Hz)



**Fig. 11** RMS displacement according to velocity (yaw direction, 0.46 Hz)

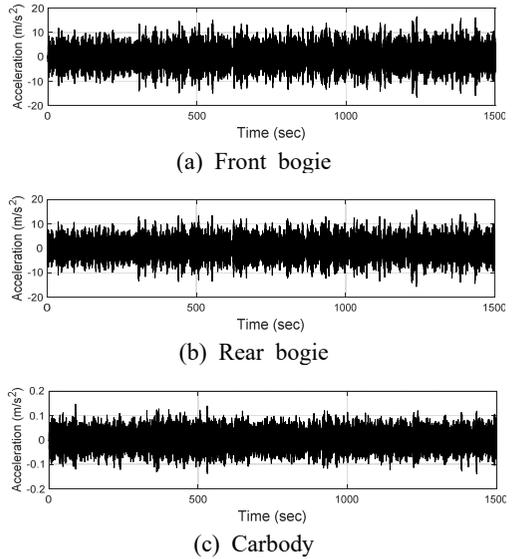
요 방향에서는 0.46 Hz 성분이 전부 대차와 후부 대차에서 거의 일치하게 나타나며, 두 성분의 결과 모두 주행속도 증가에 따라 크기가 증가와 감속을 반복하는 것을 볼 수 있다. 피치 방향의 성분보다 요 방향의 성분이 더 큰 값으로 나타나며, 피치 방향에서는 약 390 km/h 속도에서 최대값을, 약 550 km/h 속도에서 최소값을 보이고, 요 방향에서는 약 410 km/h 속도에서 최대값을, 약 720 km/h 속도에서 최소값을 보인다.

4.2 동적 가속도 분석

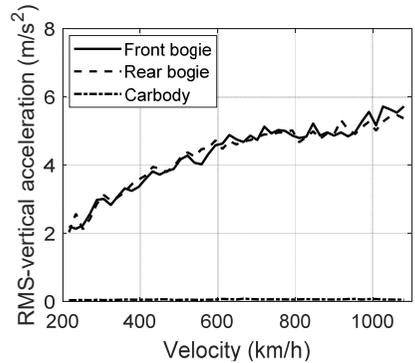
(1) 시간 영역에서 가속도의 변화

수직 방향과 횡 방향에 대하여 이루어진 가속도 분석에서 Fig. 12는 캡슐열차의 주행속도가 810 km/h일 때 시뮬레이션이 수행된 시간 영역에서 횡 방향의 가속도 변화 결과를 보여준다. 대차와 차체 모두 고주파수 성분이 매우 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 전부 대차와 후부 대차는 약  $\pm 15 \text{ m/s}^2$  내의 범위에서 변동하고 차체는 약  $\pm 0.15 \text{ m/s}^2$  내의 범위에서 변동한다.

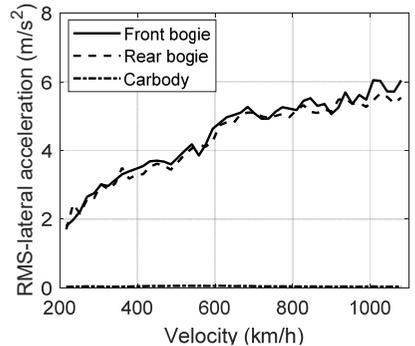
주행속도 증가에 따른 가속도 크기 변화를 보기 위



**Fig. 12** Lateral acceleration of bogies and carbody ( $v = 810 \text{ km/h}$ )



(a) Vertical



(b) Lateral

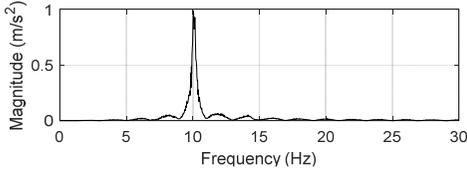
**Fig. 13** RMS acceleration according to velocity

하여 전부 대차, 후부 대차, 차체의 수직, 횡 방향 가속도의 root mean square 값을 정리하여 Fig. 13에 나타

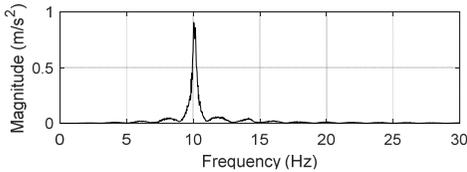
**Table 3** Result of frequency analysis (acceleration)

Frequency (Hz)	Vertical			Lateral		
	F	R	C	F	R	C
9.25 ~ 10.16				○	○	
14.15	○	○				
15.01	○	○				

F(front bogie), R(rear bogie), C(carbody)



(a) Front bogie



(b) Rear bogie

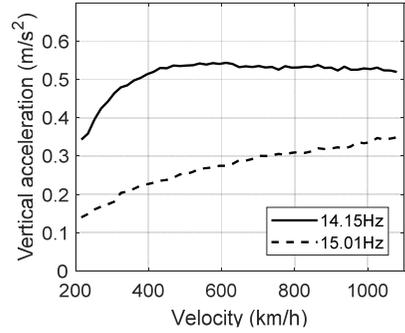
**Fig. 14** Acceleration of bogies (lateral direction,  $v = 810$  km/h)

내었다. Fig. 13을 통해 수직 방향과 횡 방향 가속도의 RMS 값의 결과가 매우 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전부 대차와 후부 대차의 경우 주행속도 증가에 따라 RMS 크기가 약  $2 \text{ m/s}^2$ 에서부터  $6 \text{ m/s}^2$ 까지 증가하였으나, 차체는 약  $0.05 \text{ m/s}^2$  이하의 확연히 작은 값으로 나타났다.

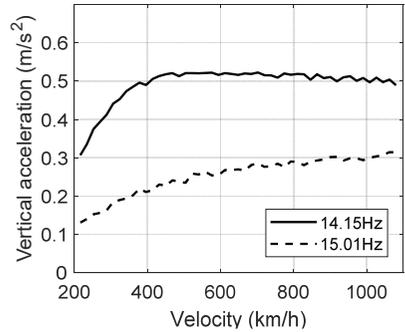
(2) 가속도의 주파수 분석

이상의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 캡슐열차의 수직, 횡 방향 가속도에 대한 주파수 특성을 분석하였다. 변위와 동일한 방법으로 가속도의 주파수 분석을 수행하였으며, Fig. 14는 캡슐열차의 주행속도가 810 km/h일 때 횡 방향 가속도에 대한 주파수 분석 결과를 보여준다. 전부 대차와 후부 대차의 결과가 매우 흡사하고 여러 개의 피크가 나타나지만, 주요한 피크 주파수는 약  $1 \text{ m/s}^2$ 의 크기를 갖는 주파수 성분 하나로 판단된다.

이상의 수직, 횡 방향에 대한 가속도의 주요 피크 주파수 성분을 분석한 결과를 Table 3에 정리하였다. 표기 방법은 Table 2와 같으며, 최종적으로 살펴볼 주요 주파수 성분은 9.25 Hz ~ 10.16 Hz, 14.15 Hz, 15.01 Hz로 총 세 가지이다. 차체에서 나타나는 가속

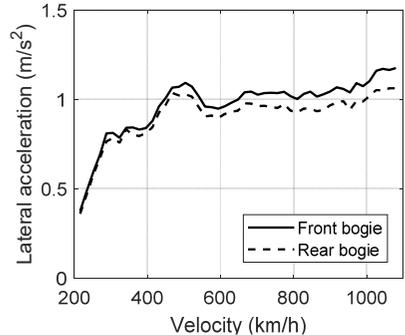


(a) Front bogie



(b) Rear bogie

**Fig. 15** RMS acceleration according to velocity (vertical direction)



**Fig. 16** RMS acceleration according to velocity (lateral direction, 9.25 Hz ~ 10.16 Hz)

도에 대한 주파수 성분의 크기는 전부, 후부 대차와 비교했을 때 매우 작아 뚜렷이 나타나지 않으므로 전부 대차와 후부 대차의 결과만을 살펴보았다. 주행속도가 변함에 따라 각 주요 피크 주파수 성분들의 변화를 각각의 방향별로 나누어 살펴보았다.

수직 방향 가속도에 대해서는 Fig. 15와 같이 14.15 Hz, 15.01 Hz 성분 주파수가 나타났다. 전부 대차와 후부 대차의 경향은 거의 유사하게 나타났으며, 14.15 Hz

성분이 월등히 크게 나타나는 것을 통해 14.15 Hz 성분이 15.01 Hz 성분보다 수직 방향 가속도에 더 큰 영향을 줄 것으로 추정할 수 있다.

Fig. 16은 9.25 Hz ~ 10.16 Hz 성분만이 나타난 횡 방향 가속도의 결과로, 주행속도 증가에 따라 주파수가 9.25 Hz부터 10.16 Hz까지 조금씩 증가하여 나타났다. 앞서 횡 방향 변위 주파수 분석 시에도 전부, 후부 대차에서 동일한 주파수가 나타났는데, 속도 변화에 따른 크기 변화 경향도 거의 일치한다.

약 300 km/h까지는 매우 급격하게 증가하고 이후의 속도에서는 증감 추세가 변화하는 형태를 보이며 약 500 km/h에서 최댓값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 약 480 km/h부터는 주행속도 증가에 따라 전부 대차와 후부 대차의 횡 방향 가속도의 크기 격차가 조금씩 증가하는 것으로 보인다.

## 5. 결 론

캡슐열차의 15 자유도 동적 모델을 구성하여 EDS 자기부상시스템의 특성을 반영한 캡슐열차의 주행 동 특성 분석을 통해 다음과 같은 사항을 파악하였다.

(1) 변위의 주파수 분석 결과 0.46 Hz, 0.67 Hz, 0.9 Hz, 1.03 Hz, 1.1 Hz, 1.64 Hz, 6.13 Hz, 6.88 Hz, 9.25 Hz ~ 10.18 Hz, 14.5 Hz, 15.01 Hz의 총 11개의 주요 피크 주파수 성분이 파악됐다.

(2) 차체의 변위는 모든 방향에서 비교적 저주파수 영역에 속하는 2 Hz 이하의 성분만 나타났으며, 수직 방향과 롤 방향에서 나타난 두 개의 주요 피크 주파수 성분은 주행속도에 따른 변위의 변화 경향이 동일한 것으로 볼 때 수직 방향과 롤 방향은 상호 간에 연관성이 높을 것으로 판단된다.

(3) 수직 방향과 횡 방향에 대한 가속도의 주파수 분석 결과, 차체에서는 주요 주파수 성분이 뚜렷이 파악되지 않았다. 전부 대차와 후부 대차에서는 저주파수 성분이 나타나지 않고 고주파수 대역의 9.25 Hz ~ 10.16 Hz, 14.15 Hz, 15.01 Hz 성분이 주요하게 파악되었다.

## 후 기

이 논문은 한국철도기술연구원의 아음속 캡슐트레인 핵심기술개발(PK1901A1) 과제에의 연구 결과임.

## References

- (1) Lee, K. et al., 2017, Basic System Specification of Hypertube, KRRI Report.
- (2) Yoon, R. H., You, W. H., Lee, J. H., Lee, C. Y. and Lee, K. S., 2019, 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.
- (3) Ohashi, S., Ohsaki, H. and Masada, E., 1998, Equivalent Model of the Side Wall Electrodynamic Suspension System, Electrical Engineering in Japan, Vol. 124, No. 2, pp. 63~73.
- (4) You, W. H., Lee, J. H. and Lee, C. Y., 2019, Vertical Instability of Capsule Train Bogie by Perturbation Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 83~89.
- (5) Song, M. K. and Fujino, Yozo, 2008, Dynamics Analysis of Guideway Structures by Considering Ultra High-speed Maglev Train-guideway Interaction, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 29, No. 4, pp. 355~380.
- (6) Ohsaki, H., Torii, S., Higashi, K. and Masada, E., 1994, Damping Characteristics of the Superconductive Maglev Vehicle, Springer, Tokyo, Advances in Superconductivity VI, pp. 1293~1296.
- (7) Ren, S., 2008, Dynamic Simulation of the Maglev Guideway Design, Delft University of Technology.
- (8) Ren, S., Romeijn, A. and Klap, K., 2010, Dynamic Simulation of the Maglev Vehicle/guideway System, Journal of Bridge Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 269~278.



**Wonhee You** received his Ph.D. from Department of Mechanical Engineering at Yonsei University in 1993. He has working for Rolling Stock Research Division and New Transportation Innovative Research Center at Korea Railroad Research Institute. His research interest includes railway vehicle dynamics, active suspension, noise and vibration.