

현가장치 내 감쇠 제어를 이용한 캡슐트레인 승차감 향상 연구

이진호*, 임정열, 유원희, 이관섭
한국철도기술연구원 신교통혁신연구소

Study of the Capsule Train Ride Comfort Improvement by using the Damping Control in Suspension System

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

요약 본 연구에서는 캡슐트레인의 승차감 향상을 위하여 캡슐트레인 모델 내의 현가장치에 감쇠 제어 장치를 적용하고 그 효과를 검토하였다. 캡슐트레인의 부상 방식으로 사용되는 초전도 유도 반발식 부상은 별도의 부상제어가 필요 없고 부상 공극이 큰 장점이 있다. 하지만, 본 부상 방식은 공극 변화량이 크고 외부로부터 유입되는 진동에 대한 작은 감쇠 특성으로 인해 캡슐트레인의 승차감을 저하시키는 단점이 있다. 본 연구에서는 캡슐트레인의 승차감 향상을 위해서 1차 및 2차 현가장치 내에 적용되는 감쇠 제어 장치를 고려하였다. 1차 현가장치에 적용되는 감쇠 제어 장치는 외란에 의해 발생하는 진동이 대차로 전달되는 것을 감소시키는 역할을 하고, 2차 현가장치 적용되는 감쇠 제어 장치는 대차의 진동이 차체로 전달되는 것을 감소시키는 역할을 한다. 감쇠 제어가 승차감에 미치는 효과를 검토하기 위하여 캡슐트레인 모델을 기반으로 한 동특성 해석 시뮬레이션을 수행하였다. 검토 결과, 현가장치 내 감쇠 제어를 통해 ISO 기준의 승차감 규격을 만족할 수 있음을 확인하였다.

Abstract In this study, damping control devices were applied to the suspension system of a capsule train, and the effects were investigated to improve the ride comfort. The superconductor electrodynamic suspension (SC-EDS) method is used for the capsule train levitation. This method has advantages such as no gap control and a large gap. However, the SC-EDS method has disadvantages such as large gap variation and small damping characteristics against outer vibration, which causes degradation of the ride comfort. In this study, the damping control devices in the primary and secondary suspension were considered to improve the ride comfort in the capsule train. Damping control devices in the primary and secondary suspension can reduce the vibration transmission from outer disturbances to the bogie and from the bogie to the car body, respectively. Simulations for dynamic characteristics analyses were conducted based on the capsule train dynamic model to investigate the effects of the damping control devices on the ride comfort. As a result, it was confirmed that the ride comfort requirements according to the ISO standard can be satisfied by applying the damping control in the capsule train suspension.

Keywords : Capsule Train, Ride Comfort, Suspension, Vibration, Damping Control

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

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

Received September 2, 2020

Revised September 25, 2020

Accepted October 5, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

현재 한국철도기술연구원은 1,000km/h 이상의 주행 속도를 목표로 하는 캡슐트레인을 국내 최초로 개발 중에 있다. 캡슐트레인은 Fig. 1과 같이 아진공 상태의 튜브 안을 부상한 상태로 주행하는 열차로 공기 저항과 마찰 저항이 기존 열차에 비해 매우 작기 때문에 1,000km/h 이상의 초고속 주행이 가능할 것으로 예상된다[1,2]. 한국철도기술연구원에서 설계한 캡슐트레인의 조감도(Fig. 2)를 보면 차량의 앞뒤에는 추진·부상·안내를 위한 초전도 전자석이 부착된 대차로 이루어진 동력실이 있으며, 중간의 승객실에는 총 20명이 탑승할 수 있게 되어 있다. 캡슐트레인의 높이, 너비, 길이는 각각 1.46 m, 1.4 m, 26 m 이며, 총 무게는 26톤이다.

캡슐트레인은 부상 및 안내를 위해 초전도 유도 반발식(Superconducting Electro Dynamic Suspension (SC-EDS), 이하 SC-EDS) 방법을 사용하는데, 본 방식은 별도의 부상·안내 제어가 필요 없어 시스템이 간단하고, 부상·안내 공극이 커서 인프라 건설비용을 낮출 수 있는 장점이 있다[3]. 그러나 SC-EDS는 부상·안내 공극 변화가 커서 차체로 전달되는 진동량이 크고, 부상·안내력에 감쇠 특성이 작아서 주행 중 외부로부터 발생하는 진동 전파의 차단이 어려운 단점이 있다[4,5]. 이와 같은 특성으로 인해 주행 중 외란에 의해 발생하는 진동이 대차를 거쳐 차체에 쉽게 전달되어 승객의 승차감을 악화시키게 되므로, 대차 및 차체로 전달되는 진동을 저감하기 위한 별도의 장치가 필요하다.

본 연구에서는 캡슐트레인의 승차감 향상을 위해 1차 및 2차 현가장치에 감쇠 제어 장치를 적용하였을 때 예상되는 효과에 대해서 분석하였다. Fig. 3과 같이 가이드웨이와 대차 사이의 1차 현가장치에 적용되는 감쇠 제어 장치는 가이드웨이 불규칙도와 같은 외란에 의해 발생하는 진동이 대차로 전달되는 것을 감소시키고, 대차와 차체 사이의 2차 현가장치에 적용되는 장치는 대차의 진동이 차체로 전달되는 것을 감소시키는 역할을 한다.

현가장치에 감쇠 제어 장치를 적용하여 승차감을 향상하고자 하는 연구는 기존 철도 차량 및 일부 자기부상열차를 대상으로도 수행되었으나, 캡슐트레인의 경우 기존 철도와 사양 및 운행 조건이 상이하여 기존 철도와는 다른 주행 동특성을 나타내기 때문에 그에 적합한 감쇠 제어 장치를 새롭게 설계하고 적용할 필요가 있다.

본 연구에서는 캡슐트레인을 대상으로 감쇠 제어 장치의 효과를 검토하기 위하여 감쇠 제어 알고리즘과 외란

이 포함된 캡슐트레인 동특성 해석 모델을 구축한 후, 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 감쇠 제어가 승차감에 미치는 영향을 검토하였다.



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

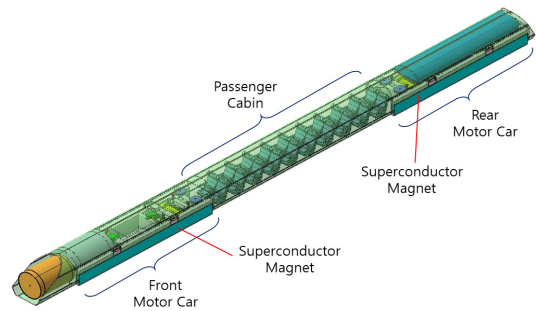


Fig. 2. Capsule train vehicle with superconductor magnet[1]

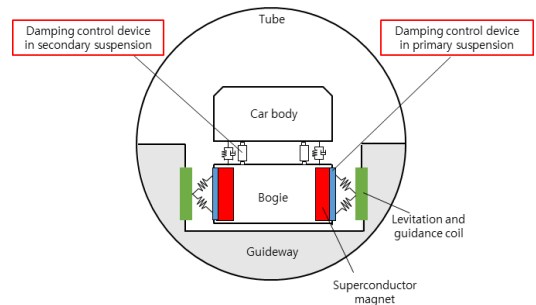


Fig. 3. Damping control devices in a front view of the capsule train

2. 본론

2.1 캡슐트레인 모델

캡슐트레인 동특성 해석을 위하여 Fig. 4, 5와 같은 수평 방향 모델(I)과 수직 방향 모델(II)을 고려하였다. Table 1은 모델에 사용된 파라미터 값이다[1].

Eq. (1)과 Eq. (2)는 각각 수평 방향 및 수직 방향의 동특성 해석을 위한 대차(b)와 차체(c)의 상태변수를 나타내고, Eq. (3)은 시스템 상태방정식을 나타낸다.

$$x_I = [y_b, \dot{y}_b, z_b, \dot{z}_b, \theta_b, \dot{\theta}_b, y_c, \dot{y}_c, z_c, \dot{z}_c, \theta_c, \dot{\theta}_c] \quad (1)$$

$$x_{II} = [z_{b1}, \dot{z}_{b1}, \varphi_{b1}, \dot{\varphi}_{b1}, z_{b2}, \dot{z}_{b2}, \varphi_{b2}, \dot{\varphi}_{b2}, z_c, \dot{z}_c, \varphi_c, \dot{\varphi}_c] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i x_i + B_i u_i \\ w_i &= C_i x_i, \quad i = I, II \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 A 는 시스템 특성 행렬, B 는 입력 행렬, C 는 출력 행렬을 나타내고, u 와 w 는 각각 입력과 출력 변수를 나타낸다. 행렬 A 와 B 에 대한 상세 내용은 Appendix에 기술하였다. 입력 변수인 u 는 시스템에 작용하는 외부 힘으로서, 외란과 2.2절에서 살펴볼 감쇠 제어 장치에서 발생하는 감쇠력으로 구성된다. 캡슐트레인의 주된 외란은 인프라 구조물(가이드웨이)의 수평 및 수직 방향 불규칙도 인데, 불규칙도 생성을 위해서 기존 철도에서 활용되는 선로 불규칙도 생성 방법[6]을 기본으로 하고, 캡슐트레인과 유사 시스템인 일본의 자기부상열차(MLX) 가이드웨이 불규칙도 크기[7]를 참고로 해서 Fig. 6과 같이 도출하였다. 도출된 가이드웨이 불규칙도는 수평과 수직 방향에 동일하게 적용하였다.

Table 1. The parameters of the capsule train model[1]

m_b	4.759 kg	m_c	17.064 kg
$I_{b,roll}$	2,495 kg·m ²	$I_{c,roll}$	17,100 kg·m ²
$I_{b,pitch}$	283,300 kg·m ²	$I_{c,pitch}$	1,086,000 kg·m ²
$k_{air(L)}$	166,700 N/m	$k_{air(V)}$	372,600 N/m
$c_{air(L)}$	1,667 N·s/m	$c_{air(V)}$	726 N·s/m
k_{lev}	5,340,000 N/m	k_{gud}	3,110,000 N/m
$h_{air(b)}$	0.375 m	$h_{air(c)}$	0.009 m
w_{air}	0.4 m	w_{lev}	0.705 m
h_{gud}	0.082 m	b_{air}	8.26 m
b_{mag}	2.9 m	b_{sus}	1.75 m

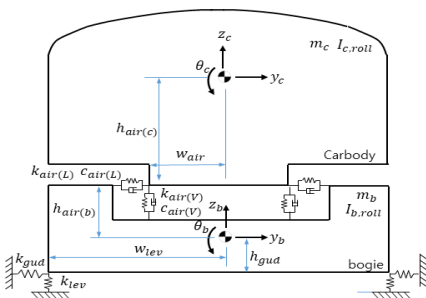


Fig. 4. The capsule train model(I) for lateral motion analysis

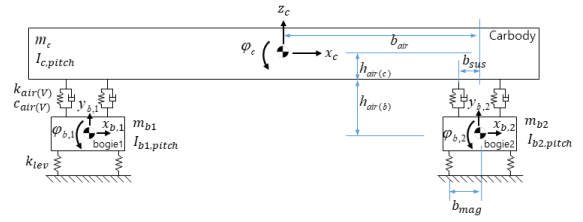


Fig. 5. The capsule train model(II) for vertical motion analysis

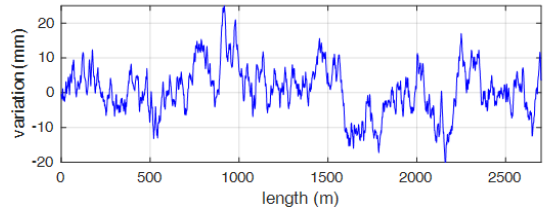


Fig. 6. Guideway irregularity[1]

2.2 감쇠 제어 장치

2.2.1 1차 현가장치 내 감쇠 제어 장치

Fig. 3에 간략히 표시된 1차 현가장치 내 감쇠 제어 장치(이하, 1차 감쇠 장치)를 Fig. 7에 자세히 나타내었다. 1차 감쇠 장치는 차량에 설치된 초전도 전자석 바깥쪽에 부착되는데, 가이드웨이에 부착된 부상·안내 코일처럼 8자 코일 형식으로 되어 있다. 캡슐트레인이 주행하면 감쇠 장치의 코일 내부에는 부상·안내 코일과의 상호 작용으로 인해 Fig. 8과 같이 유도 전류가 생기게 되는데, 이 유도 전류를 제어하여 수평 및 수직 방향으로 자기력을 발생시킬 수 있다[8]. 즉, Eq. (4)와 같이 유도 전류를

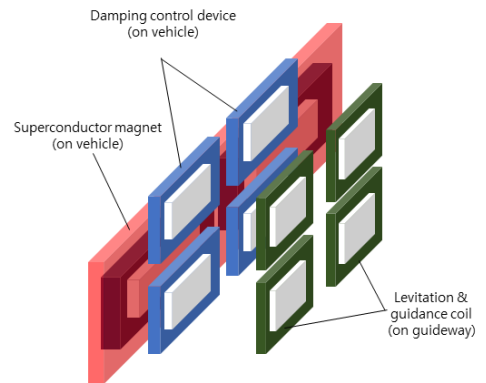


Fig. 7. Configuration of the damping control device at the primary suspension

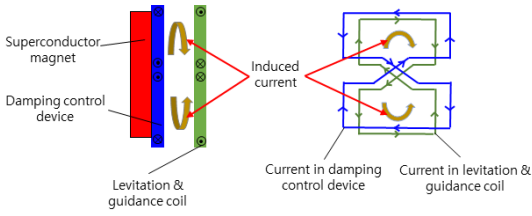


Fig. 8. Mechanism of the induced current generation from the damping control device at the primary suspension[8]

통해 얻을 수 있는 자기력(f_m)을 대차 속도와 반대 방향이 되도록 제어를 해주면, 1차 현가장치 내에 외란에 대한 감쇠력(F_{1st})이 생기는 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 유사 사례인 참고문헌 [9]를 참조하여 f_m 을 2 kN으로 설정하였다.

$$F_{1st} = -\text{sign}(v_b)f_m \quad (4)$$

2.2.2 2차 현가장치 내 감쇠 제어 장치

대차와 차체 사이의 2차 현가장치에 설치되는 감쇠 제어 장치(이하, 2차 감쇠 장치)는 대차에서 차체로 전달되는 진동을 감소시키는 역할을 한다. 기존 철도 차량에도 동일한 목적으로 사용되기도 하는데, 적용 용이성 및 효과를 고려하여 유압(hydraulic) 댐퍼 또는 MR(Magneto-Rheological) 댐퍼가 주로 이용된다(Fig. 9). 유압 댐퍼와 MR 댐퍼는 대차와 차체 사이의 상대속도(진동) 발생으로 인해 댐퍼에 외력이 작용할 때 이를 감쇠시키는 역할을 할 수 있지만, 능동적으로 왕복 운동을 할 수는 없다. 따라서 댐퍼에 작용하는 힘의 감쇠가 필요한 경우에만 작동하고(ON) 그렇지 않은 경우에는 작동하지 말아야 한다(OFF). 스카이훅(Skyhook) 제어는 이러한 특성을 고려한 제어 알고리즘이다. 즉, Fig. 10에서 차체 및 대차의 속도를 각각 v_c 와 v_b 라고 하고 차체와 대차의 상대속도를 v_{cb} 라고 하면, Eq. (5)와 같이 댐퍼에 작용하는 힘의 감쇠가 필요한 경우에만($v_c v_{cb} \geq 0$) 감쇠력(F_{2nd})을 발생시키게 된다. 여기서 C_{sky} 는 감쇠 계수로 댐퍼에 작용하는 속도 대비 출력 힘의 비율이다. C_{sky} 는 댐퍼의 성능과 관계되는데 본 연구에서는 [1]에서 실제 제작한 MR 댐퍼의 성능을 참조하여 50,000 N·s/m로 설정하였다.

$$F_{2nd} = \begin{cases} C_{sky}v_c & v_c v_{cb} \geq 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

2.2.3 모델 구현

앞서 설명한 감쇠 제어 장치를 포함한 캡슐트레인의 동특성 해석을 위해 Matlab Simulink 모델을 구축하였다(Fig. 11). Vehicle dynamics 블록에는 수평(또는 수직) 방향의 시스템 상태방정식(Eq. (3))이 포함되며, 외부에서 가이드웨이 불규칙도(disturbance)와 1차 및 2차 감쇠 장치에 의해 발생하는 힘(F_{1st} , F_{2nd})이 입력된다. 감쇠 장치 모델은 그림에서 점선으로 표시된 부분과 같이 Eq. (4)와 Eq. (5)를 이용하여 구현하였다.

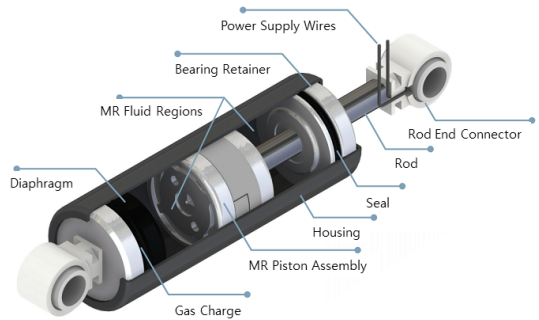


Fig. 9. MR damper[10]

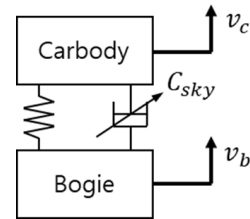


Fig. 10. Skyhook control

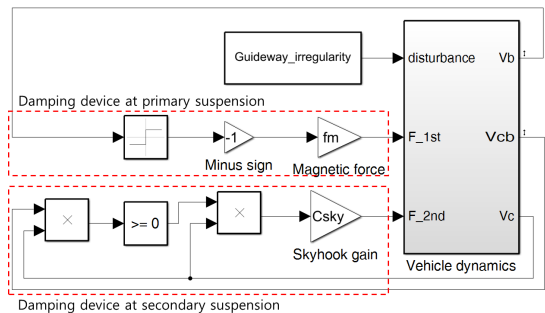


Fig. 11. Simulink model for the capsule train dynamic characteristic analysis

2.3 해석 결과

앞서 구축한 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 동특성 해석을 수행하였다. Fig. 12는 캡슐트레인이 1,000 km/h의 속도로 주행할 때, 대차와 차체의 수평 방향 변위 및 가속도 해석 결과를 시간 영역과 Fast Fourier Transform (FFT)을 통한 주파수 영역에서 나타낸 것이다. 감쇠 제어 장치를 적용하기 전의 결과는 비교기준(benchmark)으로서 점선(dotted line, \cdots)으로 표시하였고, 1, 2차 감쇠 장치를 개별적으로 적용한 결과는 각각 쇄선(dash-dot line, $- \cdot -$)과 파선(dashed line, $--$)으로, 모두 적용한 결과는 실선(solid line, $-$)으로 표시하였다.

감쇠 장치 적용 전 대차의 수평 방향 최대 변위 폭(peak-to-peak)은 33 mm로 나타났는데, 이는 대체로 10 mm 이내의 대차 변위 폭을 갖는 중고속 철도 차량에 비해 큰 수치로 유도 반발식 자기부상을 사용하는 캡슐트레인의 특징을 보여준다.

수평 방향에서는 1.1 Hz와 3.5 Hz에서 주된 진동이 발생하는데, 저주파 진동(1.1 Hz)은 대차와 차체 사이의 상호 작용이 주된 원인이고, 고주파 진동(3.5 Hz)은 가이드웨이와 대차 사이의 상호 작용이 주된 원인이다. 따라서 결과에서 볼 수 있듯이, 1차 감쇠 장치는 3.5 Hz의 진동감소에 주된 효과가 있고 2차 감쇠 장치는 1.1 Hz의 진동감소에 주된 효과가 있다. 그리고 1차 및 2차 감쇠 장치를 모두 적용하였을 때 대차 및 차체의 진동감소 효과가 가장 좋을 수 있다.

승차감을 나타내는 차체의 가속도 결과(Fig. 12 (d))에 승차감 규격인 ISO-2631의 기준[11]을 함께 표시하였는데, 이는 수평 방향에 대한 진동 주파수별 가속도(RMS 값)의 한계로, 승객이 8시간 노출되었을 때의 한계값을 나타낸다. 감쇠 장치를 적용하기 전에는 1.1 Hz에서 진동 한계 기준을 초과하였으나, 2차 감쇠 장치 적용을 통해 승차감 기준을 만족하게 됨을 알 수 있다. 3.5 Hz에서는 감쇠 장치 적용 전에도 승차감 기준을 만족하는데, 감쇠 장치 적용에 따라 진동이 더욱 감소함을 알 수 있다. 3.5 Hz에서의 진동감소 효과는 1차 감쇠 장치가 2차 감쇠 장치보다 더 크게 나타난다.

Fig. 13은 1차 및 2차 감쇠 장치에서 발생하는 감쇠력을 보여주는데, 1차 감쇠 장치에서는 Eq. (4)와 같이 대차 속도의 부호에 따라 ± 2 kN의 힘이 작용하고, 2차 감쇠 장치에는 스카이훅 제어 알고리즘(Eq. (5))에 따라 $v_c v_{cb} \geq 0$ 인 경우에 차체 속도에 비례하는 감쇠력(최대 3.9 kN)이 발생함을 알 수 있다.

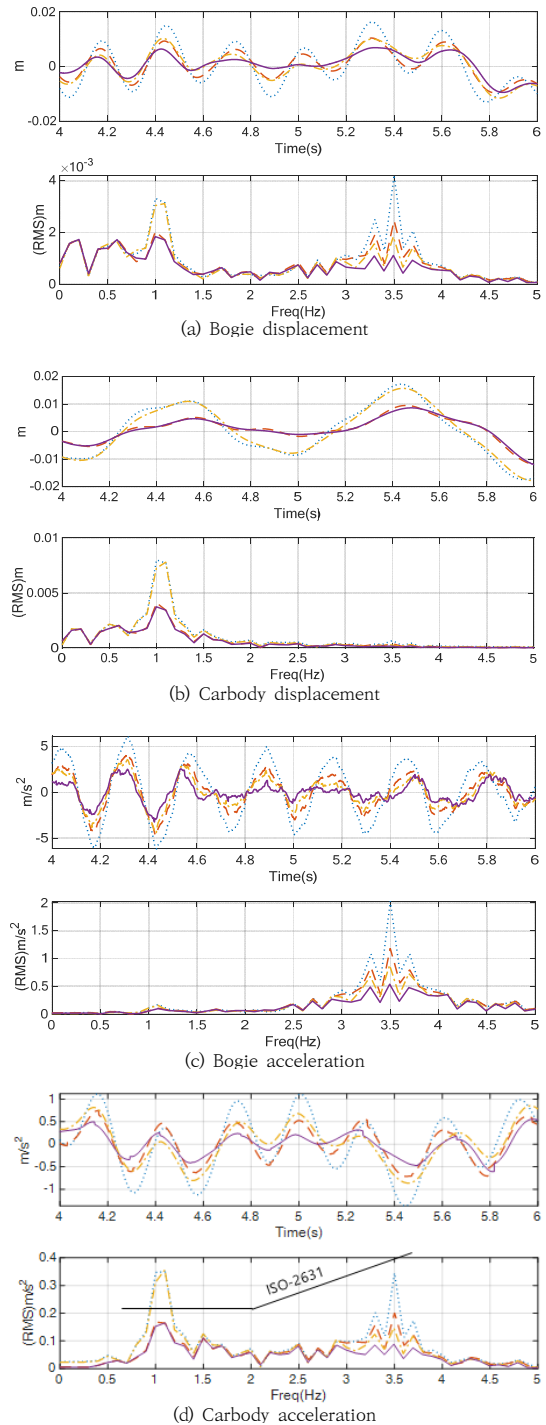


Fig. 12. Lateral dynamic characteristics of the capsule train with 1000km/h running (\cdots benchmark, $- \cdot -$ 1st damping, $--$ 2nd damping, $-$ Both damping)

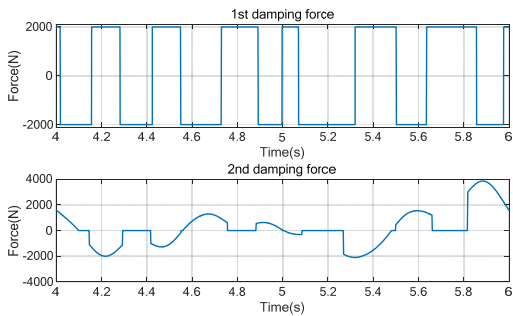


Fig. 13. Lateral damping forces

Fig. 14는 캡슐트레인이 1,000 km/h의 속도로 주행할 때, 첫 번째 대차와 차체의 수직 방향 변위 및 가속도 해석 결과이다. 대차의 최대 수직 변위 폭은 61 mm로 수평 방향(33 mm)보다 더욱 크울 알 수 있다. 수직 방향의 경우 1.6 Hz와 4.8 Hz에서 주된 진동이 발생하는데, 이는 수평 방향의 경우(1.1 Hz와 3.5 Hz)보다 37~45% 높은 수치이다.

수직 방향의 경우도 수평 방향과 마찬가지로 1차 감쇠 장치는 고주파인 4.8 Hz 진동감소에 효과가 있고 2차 감쇠 장치는 저주파인 1.6 Hz 진동감소에 효과가 있음을 알 수 있다. 그리고 감쇠 장치를 모두 사용하였을 때 진동감소 효과가 가장 우수함을 확인할 수 있다.

Fig. 14 (d)는 승차감과 관련된 차체의 수직 방향 가속도 결과인데, ISO-2631의 수직 방향 승차감 기준(승객이 8시간 노출되었을 때의 주파수별 가속도(RMS) 한계값)을 함께 표시하였다. 감쇠 장치 적용 전에는 두 주파수(1.6 Hz 및 4.8 Hz) 모두에서의 진동이 기준을 초과하지만, 감쇠 장치를 적용함으로써 인해 승차감 기준을 만족하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 15는 수직 방향의 감쇠 장치에 발생하는 힘을 나타내는데, 1차 감쇠 장치에서는 ± 2 kN의 힘이 작용하고, 2차 감쇠 장치에는 최대 -4.5 kN의 힘이 작용함을 알 수 있다.

감쇠 장치에서 낼 수 있는 힘이 클수록 차체 및 대차의 진동감소 효과가 커지는데, 이 힘은 Eq. (4)와 (5)에서 살펴본 f_m (유도 전류를 통해 생성되는 최대 자기력)과 C_{sky} (감쇠 계수)와 관계가 있고, 이는 곧 감쇠 장치의 성능을 의미한다.

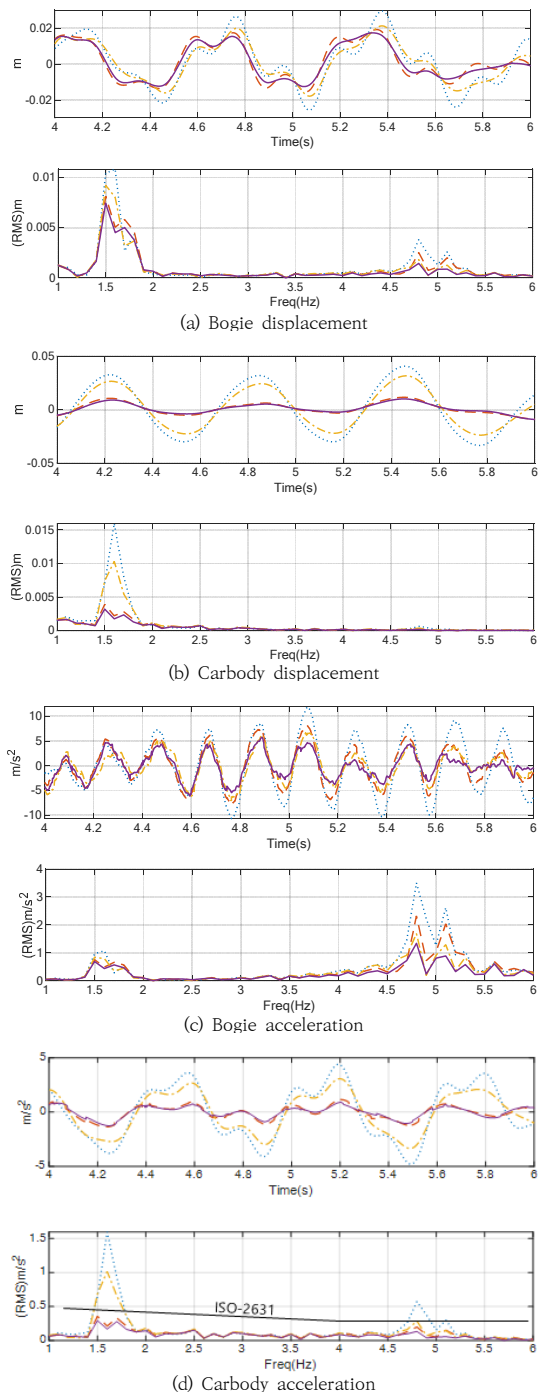


Fig. 14. Vertical dynamic characteristics of the capsule train with 1000km/h running (* benchmark, -- 1st damping, -- 2nd damping, -- Both damping)

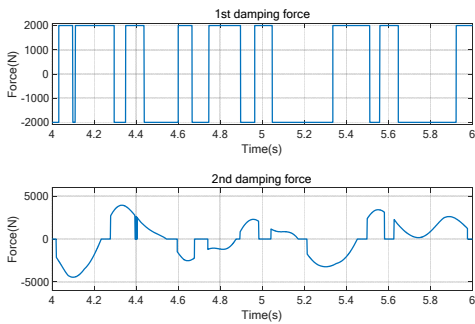


Fig. 15. Vertical damping forces

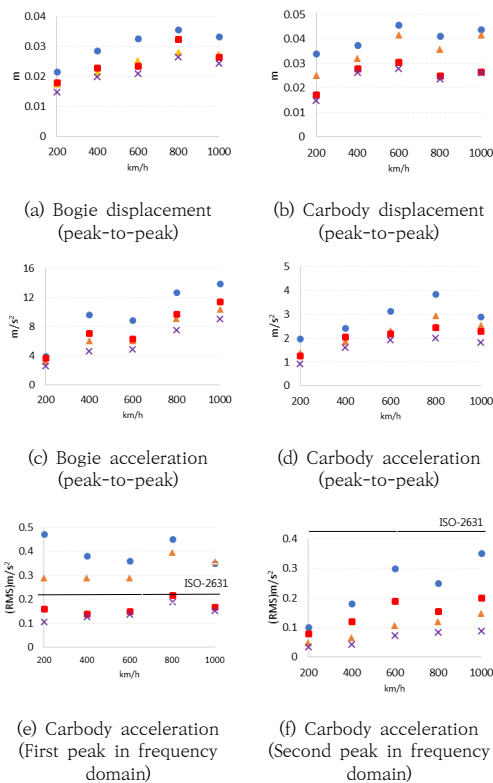


Fig. 16. Lateral dynamic characteristics of the capsule train according to the speed (● benchmark, ▲ 1st damping, ■ 2nd damping, × Both damping)

Fig. 16의 (a), (b), (c), (d)는 수평 방향 대차, 차체의 변위 및 가속도에 대한 최대 peak-to-peak 값을 속도별(200, 400, 600, 800, 1,000 km/h)로 나타낸 결과이다. 감쇠 장치를 적용하기 전의 결과(비교기준, benchmark)는 ●로 표시하였고, 1, 2차 감쇠 장치를 개별적으로 적용한 결과는 각각 ▲와 ■로 표시하였으며,

모두 적용한 결과는 ×로 표시하였다.

대체로 속도가 증가함에 따라 대차, 차체의 변위 및 가속도가 증가하나 감쇠 장치를 사용하였을 때의 진동감소 경향은 모든 속도 대에서 유사하게 나타났다. 즉, 앞서 1,000 km/h 주행 결과에서 살펴본 바와 같이 1차 감쇠 장치는 대차 진동감소에 효과가 있고, 2차 감쇠 장치는 차체 진동감소에 효과가 있으며, 두 개의 장치를 모두 사용할 경우 진동감소 효과가 가장 크다.

Fig. 16의 (e), (f)는 승차감과 관련된 차체 가속도를 FFT 변환하여 주파수 영역으로 표시하였을 때, 첫 번째 진동(1.1 Hz)과 두 번째 진동(3.5 Hz)의 peak 값을 주행 속도별로 나타낸 것이다. 각각에 대해서 ISO-2631 승차감 기준 한계를 함께 표시하였는데, 감쇠 장치 적용을 통해 모든 속도에서 승차감 기준을 만족하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 17은 수직 방향 대차, 차체의 변위 및 가속도에 대한 최대 peak-to-peak 값과 차체 가속도의 주요 주파수(1.6 Hz, 4.8 Hz)에서의 진동 peak 값을 속도별로 나타낸 결과이다. 수평 방향과 유사하게 감쇠 장치를 통

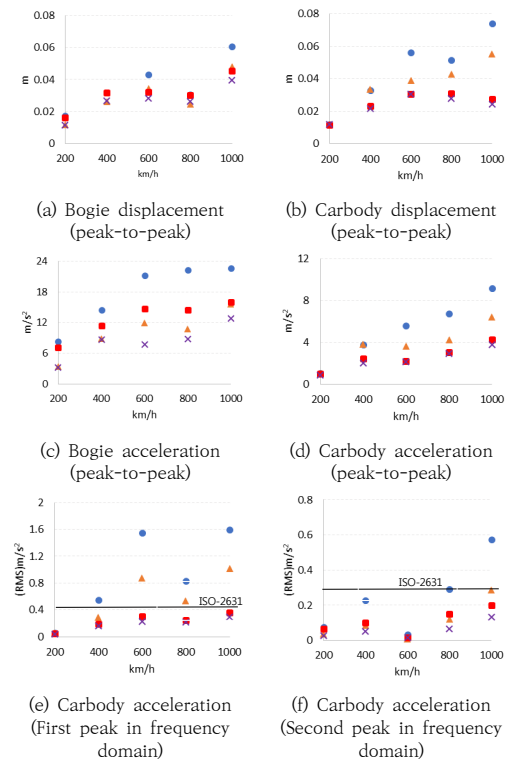


Fig. 17. Vertical dynamic characteristics of the capsule train according to the speed (● benchmark, ▲ 1st damping, ■ 2nd damping, × Both damping)

해 모든 속도에서 승차감 기준을 만족하게 됨을 확인할 수 있다.

감쇠 장치가 승차감에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, Table 2와 3에 감쇠 장치 적용에 따른 차체의 가속도 감소율을 속도별로 정리하였다. 감쇠 장치를 모두 적용하였을 경우, 수평 및 수직 방향으로 각각 64~72%와 68~70%의 진동감소 효과가 발생하여, 감쇠 장치를 통해 승차감을 개선하고 향상하는데 효과가 클 것으로 판단된다.

Table 2. Lateral carbody acceleration reduction percentage(%)

	freq.	velocity(km/h)					avg.
		200	400	600	800	1000	
1 st	1.1 Hz	38	24	19	12	2	18
damping	3.5 Hz	51	63	64	53	58	58
2 nd	1.1 Hz	66	63	59	52	52	58
damping	3.5 Hz	20	34	37	38	43	34
All	1.1 Hz	78	67	62	58	56	64
damping	3.5 Hz	66	76	75	66	75	72

Table 3. Vertical carbody acceleration reduction percentage(%)

	freq.	velocity(km/h)					avg.
		200	400	600	800	1000	
1 st	1.6 Hz	2	47	44	36	36	33
damping	4.8 Hz	52	62	74	58	50	59
2 nd	1.6 Hz	8	66	81	70	78	61
damping	4.8 Hz	17	56	50	48	65	47
All	1.6 Hz	29	71	85	73	82	68
damping	4.8 Hz	68	77	50	78	77	70

3. 결론

본 연구에서는 캡슐트레인의 승차감 향상을 위하여 캡슐트레인의 1차 및 2차 현가장치에 감쇠력을 발생시키는 장치에 대해서 검토하고, 동특성 해석 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 그 효과를 분석하였다.

1차 현가장치에 적용되는 감쇠 장치는 주행 외란인 가이드웨이 불규칙도에 의해 발생하는 진동이 대차로 전달되는 것을 1차로 감소시키는 역할을 하고, 대차와 차량 사이에 댐퍼 형태로 연결되는 2차 감쇠 장치는 대차의 진동이 차체로 전달되는 것을 감소시키는 역할을 한다.

감쇠 장치가 포함된 캡슐트레인 동특성 시뮬레이션을 통해 다음과 같은 결과를 확인하였다.

- 1차 및 2차 감쇠 장치는 각각 고주파수 진동 및 저

주파수 진동 감소에 효과가 있음

- 감쇠 장치를 이용한 차체 진동 감소를 통해 수평 및 수직 방향으로의 ISO-2631 승차감 기준을 만족시킬 수 있음
- 속도별로 감쇠 장치에 의한 차체 가속도의 진동 감소 효과를 분석한 결과, 수평 방향 진동은 평균 64~72% 감소하고, 수직 방향 진동은 평균 68~70% 감소함

감쇠 장치를 실제 시스템에 적용할 경우 다음과 같은 사항이 추가로 고려되어야 한다. 실제 MR 댐퍼 및 유압 댐퍼와 같은 감쇠 장치에는 시간 지연(time delay) 및 히스테리시스(hysteresis) 특성이 존재하기 때문에 이를 고려한 제어 알고리즘이 적용되어야 한다. 또한, 실제 주행 중인 차량에서 감쇠 제어에 필요한 정보(즉, 차체 및 대차 속도)는 직접 얻을 수 없기 때문에 간접적인 방법(가속도 신호를 적분하는 방법 등)을 통해 얻어야 하는데, 이때 발생할 수 있는 오차에 대한 보완 방안도 필요하다.

향후에는 1차 및 2차 감쇠 장치에 대한 실험모델 또는 축소모델을 실제 제작하고, 제작된 장치를 이용한 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 실험을 수행하여 장치의 성능을 실험적으로 검증할 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] 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-EJ7%3E3.0.CO;2-X](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1520-6416(19990430)127:2%3C49::AID-EJ7%3E3.0.CO;2-X)
- [6] 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>

- [7] K. Watanabe, H. Yoshioka, E. Suzuki, T. Tohtake, M. Nagai, "A Study of Vibration Control Systems for Superconducting Maglev Vehicles(Vibration Control of Lateral and Rolling Motions)," Journal of System Design and Dynamics, 1(3), pp.593-604, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsdd.1.593>
- [8] E. Suzuki, J. Shirasaki, K. Watanabe, H. Hoshino, M. Nagai, "Vibration reduction methods for superconducting Maglev vehicles." In Proceedings of the 8th World Congress on Railway Research (WCRR 2008), 2008.
- [9] T. Yamamoto, T. Murai, H. Hasegawa, H. Yoshioka, S. Fujiwara, S. Hatsukade, "Development of Distributed-type Linear Generator with Damping Control," Quarterly Report of Rtri. 41. pp.83-88, 2000. DOI: <https://doi.org/10.2219/rtriqr.41.83>
- [10] How Does an MR Damper Work? [Internet]. Parker LOAD, <https://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/how-does-mr-damper-work> (accessed Aug. 31, 2020)
- [11] ISO 2631-1. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements. International Organization for Standardization. 1997.

이 진 호(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

Appendix

수평 방향 시스템 특성 행렬(A_f) 및 입력 행렬(B_f)

$$A_f = \begin{bmatrix} A_{f,1} \\ A_{f,2} \end{bmatrix}, \quad B_f = \begin{bmatrix} 0 & \frac{k_{gud}}{m_b} & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{gud}h_{gud}}{I_{b,roll}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

where

$$A_{f,1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{0201} & a_{0202} & 0 & 0 & a_{0205} & a_{0206} & a_{0207} & a_{0208} & 0 & 0 & a_{0211} & a_{0212} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{0403} & a_{0404} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{0409} & a_{0410} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{0601} & a_{0602} & 0 & 0 & a_{0605} & a_{0606} & a_{0607} & a_{0608} & 0 & 0 & a_{0611} & a_{0612} \end{bmatrix}$$

$$A_{f,2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{0801} & a_{0802} & 0 & 0 & a_{0805} & a_{0806} & a_{0807} & a_{0808} & 0 & 0 & a_{0811} & a_{0812} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{1003} & a_{1004} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{1009} & a_{1010} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{1201} & a_{1202} & 0 & 0 & a_{1205} & a_{1206} & a_{1207} & a_{1208} & 0 & 0 & a_{1211} & a_{1212} \end{bmatrix}$$

$$a_{0201} = -\frac{2(k_{gud} + k_{air(L)})}{m_b}, a_{0202} = -\frac{2(c_{gud} + c_{air(L)})}{m_b}, a_{0205} = -\frac{2(k_{gud}h_{gud} - k_{air(L)}h_{air(b)})}{m_b},$$

$$a_{0206} = -\frac{2(c_{gud}h_{gud} - c_{air(L)}h_{air(b)})}{m_b}, a_{0207} = \frac{2k_{air(L)}}{m_b}, a_{0208} = \frac{2c_{air(L)}}{m_b}, a_{0211} = \frac{2k_{air(L)}h_{air(c)}}{m_b}, a_{0212} = \frac{2c_{air(L)}h_{air(c)}}{m_b},$$

$$a_{0403} = -\frac{2(k_{lev} + k_{air(V)})}{m_b}, a_{0404} = -\frac{2(c_{lev} + c_{air(V)})}{m_b}, a_{0409} = \frac{2k_{air(V)}}{m_b}, a_{0410} = \frac{2c_{air(V)}}{m_b},$$

$$a_{0601} = -\frac{2(k_{gud}h_{gud} - k_{air(L)}h_{air(b)})}{I_{b,roll}}, a_{0602} = -\frac{2(c_{gud}h_{gud} - c_{air(L)}h_{air(b)})}{I_{b,roll}},$$

$$a_{0605} = -\frac{2(k_{lev}w_{lev}^2 + k_{air(V)}w_{air}^2 + k_{gud}h_{gud}^2 + k_{air(L)}h_{air(b)}^2)}{I_{b,roll}}, a_{0606} = -\frac{2(c_{lev}w_{lev}^2 + c_{air(V)}w_{air}^2 + c_{gud}h_{gud}^2 + c_{air(L)}h_{air(b)}^2)}{I_{b,roll}},$$

$$a_{0607} = -\frac{2k_{air(L)}h_{air(b)}}{I_{b,roll}}, a_{0608} = -\frac{2c_{air(L)}h_{air(b)}}{I_{b,roll}}, a_{0611} = -\frac{2(k_{air(L)}h_{air(b)}k_{air(c)} - k_{air(V)}w_{air}^2)}{I_{b,roll}},$$

$$a_{0612} = -\frac{2(c_{air(L)}h_{air(b)}k_{air(c)} - c_{air(V)}w_{air}^2)}{I_{b,roll}}, a_{0801} = \frac{2k_{air(L)}}{m_c}, a_{0802} = \frac{2c_{air(L)}}{m_c}, a_{0805} = -\frac{2k_{air(L)}h_{air(b)}}{m_c},$$

$$a_{0806} = -\frac{2c_{air(L)}h_{air(b)}}{m_c}, a_{0807} = -\frac{2k_{air(L)}}{m_c}, a_{0808} = -\frac{2c_{air(L)}}{m_c}, a_{0811} = -\frac{2k_{air(L)}h_{air(c)}}{m_c}, a_{0812} = -\frac{2c_{air(L)}h_{air(c)}}{m_c},$$

$$a_{1003} = \frac{2k_{air(V)}}{m_c}, a_{1004} = \frac{2c_{air(V)}}{m_c}, a_{1009} = -\frac{2k_{air(V)}}{m_c}, a_{1010} = -\frac{2c_{air(V)}}{m_c},$$

$$a_{1201} = \frac{2k_{air(L)}h_{air(c)}}{I_{c,roll}}, a_{1202} = \frac{2c_{air(L)}h_{air(c)}}{I_{c,roll}}, a_{1205} = \frac{2(k_{air(V)}w_{air}^2 - k_{air(L)}h_{air(b)}h_{air(c)})}{I_{c,roll}},$$

$$a_{1206} = \frac{2(c_{air(V)}w_{air}^2 - c_{air(L)}h_{air(b)}h_{air(c)})}{I_{c,roll}}, a_{1207} = -\frac{2k_{air(L)}h_{air(c)}}{I_{c,roll}}, a_{1208} = -\frac{2c_{air(L)}h_{air(c)}}{I_{c,roll}},$$

$$a_{1211} = -\frac{2(k_{air(V)}w_{air}^2 + k_{air(L)}h_{air(b)}^2)}{I_{c,roll}}, a_{1212} = -\frac{2(c_{air(V)}w_{air}^2 + c_{air(L)}h_{air(b)}^2)}{I_{c,roll}}.$$

수직 방향 시스템 특성 행렬(A_{II}) 및 입력 행렬(B_{II})

$$A_{II} = \begin{bmatrix} A_{II,1} \\ A_{II,2} \end{bmatrix},$$

$$B_{II} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{k_{lev}}{m_{b1}} & 0 & \frac{k_{lev} b_{mag}}{I_{b1,pitch}} & 0 & \frac{k_{lev}}{m_{b2}} & 0 & \frac{k_{lev} b_{mag}}{I_{b2,pitch}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

where

$$A_{II,1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{0201} & a_{0202} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{0209} & a_{0210} & a_{0211} & a_{0212} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{0403} & a_{0404} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{0411} & a_{0412} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{0605} & a_{0606} & 0 & 0 & a_{0609} & a_{0610} & a_{0611} & a_{0612} \end{bmatrix}$$

$$A_{II,2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{0807} & a_{0808} & 0 & 0 & a_{0811} & a_{0812} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{1001} & a_{1002} & 0 & 0 & a_{1005} & a_{1006} & 0 & 0 & a_{1009} & a_{1010} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{1201} & a_{1202} & a_{1203} & a_{1204} & a_{1205} & a_{1206} & a_{1207} & a_{1208} & 0 & 0 & a_{1211} & a_{1212} \end{bmatrix}$$

$$a_{0201} = -\frac{2(k_{lev} + k_{air}(V))}{m_{b1}}, a_{0202} = -\frac{2c_{air}(V)}{m_{b1}}, a_{0209} = \frac{2k_{air}(V)}{m_{b1}}, a_{0210} = \frac{2c_{air}(V)}{m_{b1}}, a_{0211} = -\frac{2k_{air}(V)b_{air}}{m_{b1}}, a_{0212} = -\frac{2c_{air}(V)b_{air}}{m_{b1}},$$

$$a_{0403} = -\frac{2(b_{sus}^2 k_{air}(V) + b_{mag}^2 k_{lev})}{I_{b1,pitch}}, a_{0404} = -\frac{2b_{sus}^2 c_{air}(V)}{I_{b1,pitch}}, a_{0411} = \frac{2b_{sus}^2 k_{air}(V)}{I_{b1,pitch}}, a_{0412} = \frac{2b_{sus}^2 c_{air}(V)}{I_{b1,pitch}},$$

$$a_{0605} = -\frac{2(k_{lev} + k_{air}(V))}{m_{b2}}, a_{0606} = -\frac{2c_{lev}(V)}{m_{b2}}, a_{0609} = \frac{2k_{air}(V)}{m_{b2}}, a_{0610} = \frac{2c_{air}(V)}{m_{b2}}, a_{0611} = \frac{2k_{air}(V)b_{air}}{m_{b2}}, a_{0612} = \frac{2c_{air}(V)b_{air}}{m_{b2}},$$

$$a_{0807} = -\frac{2(b_{sus}^2 k_{air}(V) + b_{mag}^2 k_{lev})}{I_{b2,pitch}}, a_{0808} = -\frac{2b_{sus}^2 c_{air}(V)}{I_{b2,pitch}}, a_{0811} = \frac{2b_{sus}^2 k_{air}(V)}{I_{b2,pitch}}, a_{0812} = \frac{2b_{sus}^2 c_{air}(V)}{I_{b2,pitch}},$$

$$a_{1001} = \frac{2k_{air}(V)}{m_c}, a_{1002} = \frac{2c_{air}(V)}{m_c}, a_{1005} = -\frac{2k_{air}(V)}{m_c}, a_{1006} = \frac{2c_{air}(V)}{m_c}, a_{1009} = -\frac{4k_{air}(V)}{m_c}, a_{1010} = -\frac{4c_{air}(V)}{m_c},$$

$$a_{1201} = -\frac{2b_{air} k_{air}(V)}{I_{c,pitch}}, a_{1202} = -\frac{2b_{air} c_{air}(V)}{I_{c,pitch}}, a_{1203} = \frac{2b_{mag} b_{sus} k_{air}(V)}{I_{c,pitch}}, a_{1204} = \frac{2b_{mag} b_{sus} c_{air}(V)}{I_{c,pitch}}, a_{1205} = \frac{2b_{air} k_{air}(V)}{I_{c,pitch}},$$

$$a_{1206} = \frac{2b_{air} c_{air}(V)}{I_{c,pitch}}, a_{1207} = -\frac{2b_{mag} b_{sus} k_{air}(V)}{I_{c,pitch}}, a_{1208} = \frac{2b_{mag} b_{sus} c_{air}(V)}{I_{c,pitch}},$$

$$a_{1211} = -\frac{2k_{air}((b_{air} + b_{sus})^2 + (b_{air} - b_{sus})^2)}{I_{c,pitch}}, a_{1212} = -\frac{2c_{air}((b_{air} + b_{sus})^2 + (b_{air} - b_{sus})^2)}{I_{c,pitch}}.$$