

[보충자료]

초고속 자기부상열차 기술과 도시형 자기부상열차 기술의 차별성

1. 요약

----- p. 2

2. 부상시스템

----- p. 4

3. 안내시스템

----- p. 9

4. 대차/차체

----- p.11

1. 요약

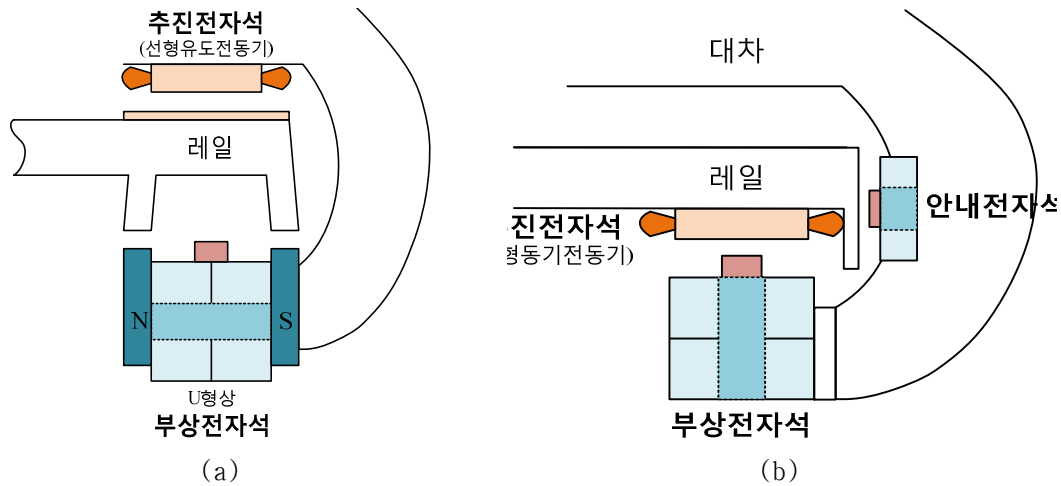


그림 1. 도시형(a)과 초고속(b) 자기부상열차 단면도

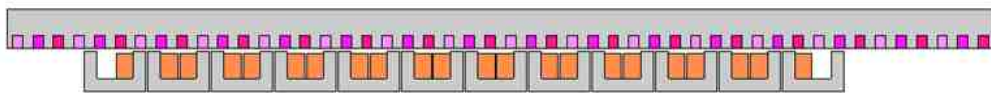


그림 2. 초고속 자기부상열차 부상전자석 측면도

- 추진시스템

■ 도시형

- 선형유도전동기. 레일 상면과의 전자기 유도현상을 이용하여 추진력 발생
- 최고속도: 110km/h

■ 초고속

- 선형동기전동기. 부상전자석이 추진의 계자로 이용됨
- 최고속도: 550km/h

- 부상시스템

■ 도시형

- U형상의 부상전자석 이용
- 요구 부상대역폭: 1.0Hz 이상

■ 초고속

- 부상의 기능 뿐만 아니라 추진전자석의 계자로 이용됨
- 요구 부상대역폭: 5.1Hz 이상
- 자세제어 필요

- 안내시스템

■ 도시형

- 저속주행이라 곡선 주행 시 원심력 영향이 적어 큰 안내력이 요구되지 않음
- 횡변위가 발생했을 때, U형상의 부상전자석에 의해 수동적으로 안내력 발생

■ 초고속

- 고속주행이라 곡선 주행 시 원심력 영향이 커서 큰 안내력이 요구됨
- 별도의 안내시스템이 대차 측면에 존재
- 부상시스템과 독립적으로 제어가능
- 요구 안내대역폭: 2.5Hz 이상

- 대차/차체

■ 초고속

- 부상/안내/추진의 형상이 변경되어 새로운 형태의 대차 개발이 필요
- 부상/안내 제어시스템과의 공진을 회피하기 위해 진동해석 필수
- Fail-safe 개념을 적용
- 경량화

- 전장품

■ 초고속

- 경량화
- 이중화

1. 부상시스템

1.1. 빠른 응답특성 (부상대역폭)

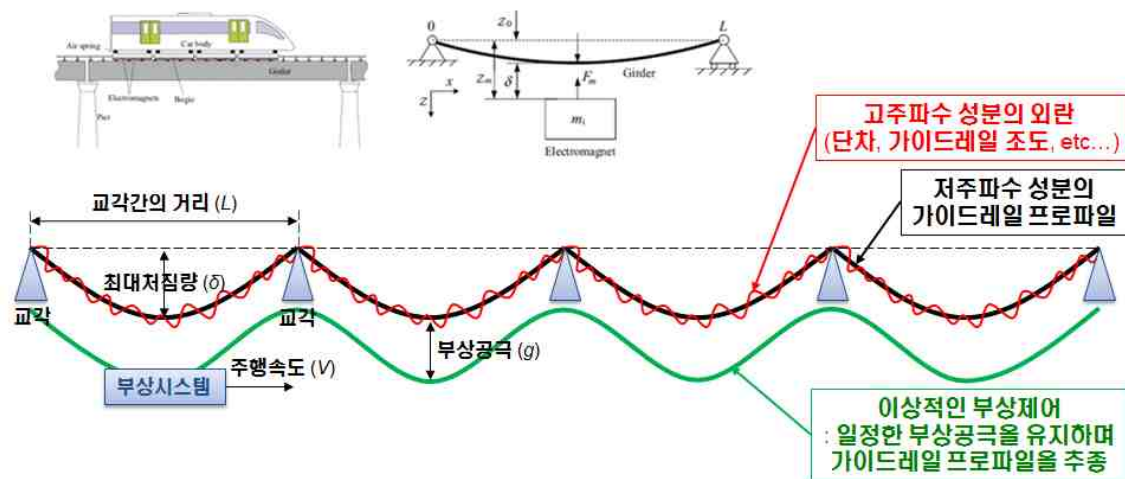


그림 5. 주행속도에 따른 요구 부상성능

- 최고속도 550km/h로 주행하는 초고속 자기부상열차는 최고속도 110km/h로 주행하는 도시형 자기부상열차에 비해 보다 높은 부상성능이 요구된다. 다른 말로 말하면, 그림 1과 같이 가이드레일 처짐이 존재하는 교각 구간을 고속으로 지나기 위해서는 보다 빠른 응답 특성이 요구된다.
- 교각간의 거리(L)를 30m로 가정한다면, 초고속 자기부상열차와 도시형 자기부상열차에 요구되는 부상 대역폭은 아래와 같다.

표 1. 도시형 / 초고속 자기부상열차의 요구 부상 대역폭

	도시형 자기부상열차 (최고속도: 110km/h)	초고속 자기부상열차 (최고속도: 550km/h)
요구 부상 대역폭*	1.0Hz	5.1Hz

* 요구 부상 대역폭 구하는 공식: $f = v/L = \text{주행속도}/\text{교각간의거리}$

- 초고속 자기부상열차의 경우, 도시형 부상열차열차에 비해 요구되는 부상대역폭이 높은 것을 알 수 있다. 독일의 초고속 자기부상열차 Transrapid의 경우, 부상대역폭을 5~6Hz로 설정하여 사용하고 있다. 이를 감안하면 본 과제에서 목표로 하는 최고속도 550km/h를 달성하기 위해서는 5Hz 이상의 부상대역폭이 요구된다고 할 수 있다.
- 본 과제에서는 안전계수를 고려하여 부상대역폭을 10Hz이상으로 확보하고자 하였다.

- 부상 대역폭을 높이기 위해서는 부상전자석, 부상전자석 드라이버, 센서 모듈, 제어기 전반의 대역폭이 동시에 높아져야 한다. 이는 보다 빠른 응답특성을 얻기 위해 개별부품의 설계 단계부터 도시형 자기부상열차와 차별성이 있다는 것을 의미한다.
- 아래 그림은 실험적으로 얻은 부상시스템의 대역폭이다. 그림과 같이 본 과제에서는 10Hz 정도의 부상대역폭이 확보되었다. 이를 통해 간접적으로 초고속 주행이 가능하다는 것을 입증한 셈이다.
- 해당 내용은 보고서 p. 243 ~ p. 256에 상세히 기재되어 있다.

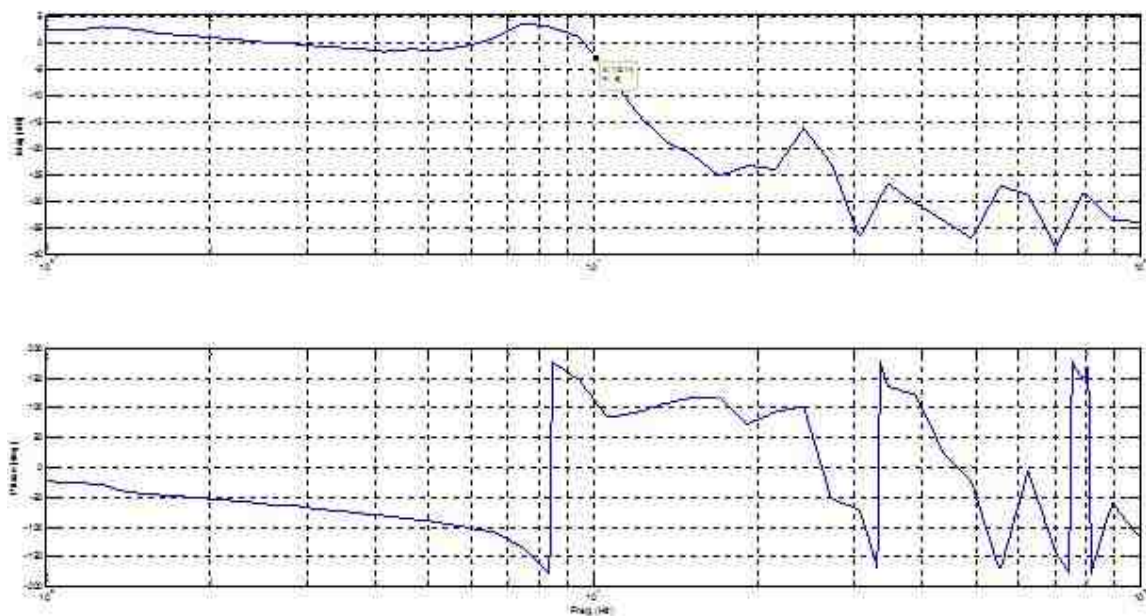


그림 6. 부상시스템 대역폭 (실험치)

1.2. 부상전자석 고유 모델 개발 (토크 리플 최소화)

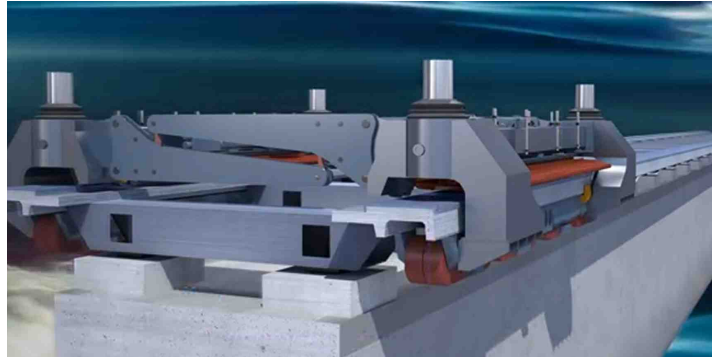


그림 7. 도시형 자기부상열차 구조

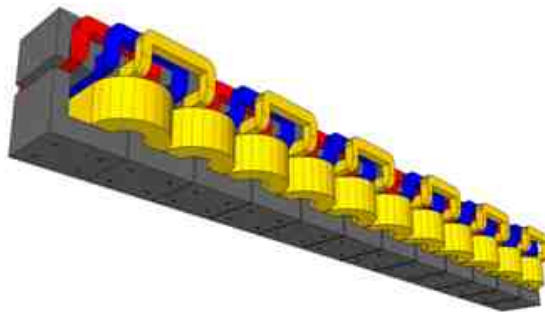
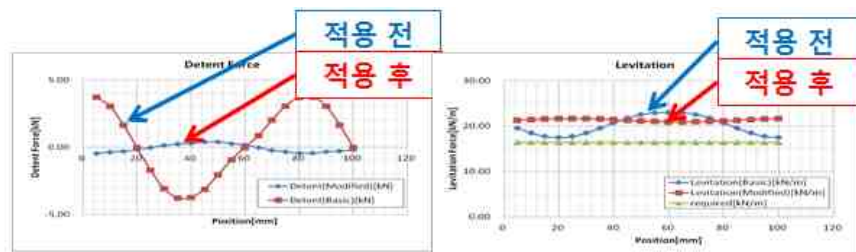


그림 8. 초고속 자기부상열차 부상전자석 구조

- 그림 3과 같이 도시형 자기부상열차의 경우 부상전자석 대응면이 평평하며 주행방향으로 연속적인 것이 특징이다. 반면 초고속 자기부상열차의 경우, 도시형 자기부상열차와 추진방식이 다르기 때문에 그림 4와 같이 부상전자석 대응면이 요철 형상을 갖는다. 이러한 대응면의 불연속성 때문에 추진 시 부상력/디텐트력이 급변한다.
- 이런 문제를 해결하기 위해 디텐트력/부상력 변동이 최소화되는 부상전자석을 개발하였다. 이는 도시형 자기부상열차와 추진방식이 다른 초고속 자기부상열차를 개발하기 위해 필요한 핵심요소기술이다.
- 해당 내용은 보고서 p. 47 ~ p. 74에 상세히 기재되어 있다.



제안된 모델의 디텐트력 축소 제안된 모델의 부상력 축소

그림 9. 토크리플 최소화를 위한 부상전자석 설계법

1.3. 자세제어

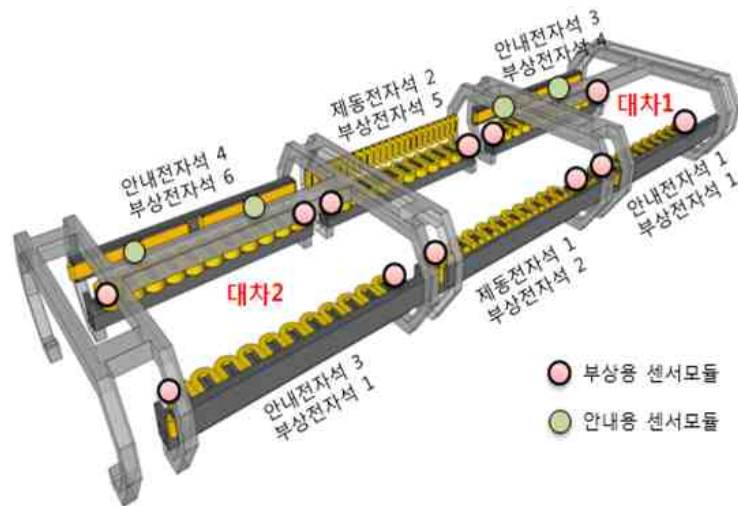


그림 10. Fail-safe 개념을 적용한 대차구조

- 부상대응면의 요철형상, 가이드레일의 가공/설치오차, 가이드레일의 roughness, 이음매단차, 승객의 움직임 등에 의해 자기부상열차는 Roll 방향과 Pitch 방향으로 진동하게 된다.
- 특히, 초고속 자기부상열차의 경우 대차에 Fail-safe 개념이 도입되어 그림 6과 같이 대차간의 직접체결방식을 적용하였다. 이는 고속주행을 위해 기계적인 강성을 높이하고자 한 측면과 부상전자석 중 일부가 기계적 혹은 전기적 결함으로 적절한 동작을 하지 못했을 때에도 인접한 부상전자석이 부상력을 보완해 줌으로써 열차의 부상을 안정적으로 유지시키기 위함이다. 하지만 이러 기계적인 연성효과는 여러 순기능도 있지만 인접한 부상전자석들 간의 상호작용이 더 심해지는 단점도 있다.
- 이런 상호작용을 제어하기 위해 초고속 자기부상열차에는 도시형 자기부상열차에서는 적용하지 않았던 그림 7-8과 같은 Roll 제어기와 Pitch 제어기를 추가하였다.
- 해당 내용은 보고서 p. 256 ~ p. 265 에 상세히 기재되어 있다.

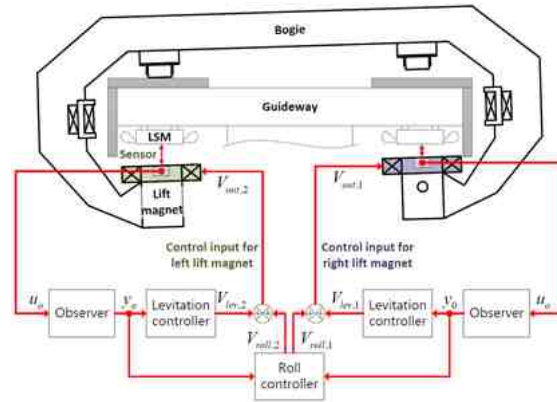


그림 11. Roll 제어기 개략도

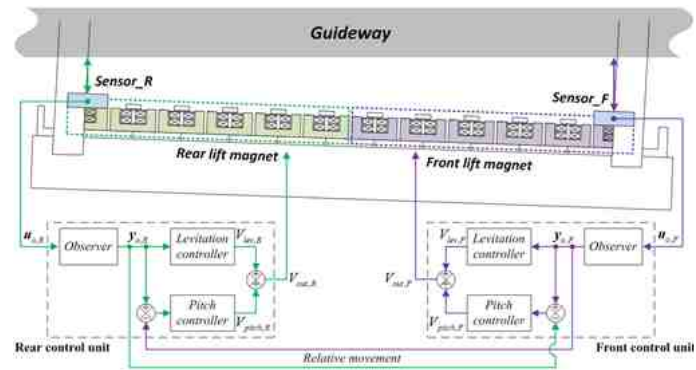


그림 12. Pitch 제어기 개략도

2. 안내시스템

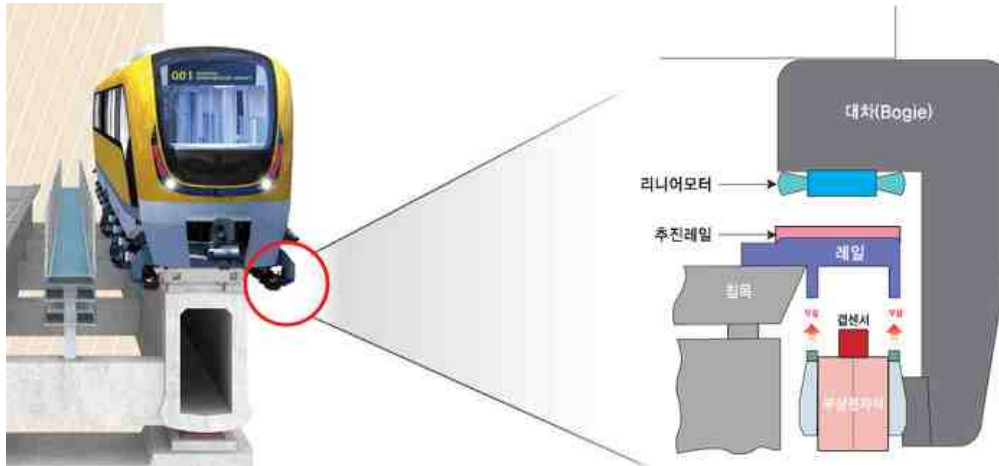


그림 13. 도시형 자기부상열차의 부상전자석 형상

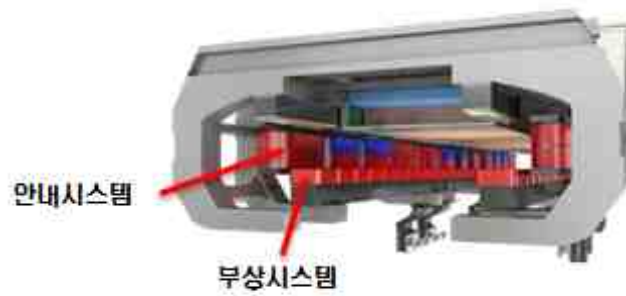


그림 14. 초고속 자기부상열차의 부상/안내 시스템

- 도시형 자기부상열차의 경우 그림 9와 같이 부상전자석과 레일간의 특이한 형상(‘ㄷ’ 형상)에 의해 횡변위 발생 시 안내력이 발생한다. 다른 말로 말하면, 별도의 안내시스템이 없고, 부상시스템이 안내시스템 역할을 부분적으로 한다고 할 수 있다.
- 반면, 초고속 자기부상열차의 경우 고속으로 곡선구간을 선회하기 위해서는 원심력을 극복할 큰 안내력이 필요하므로 별도의 안내시스템이 필요하다. 이를 위해 그림 10과 같이 수평 방향으로 흡입력을 조절할 수 있는 안내전자석을 대차 좌우 측면에 배치하였고, 이를 통해 안내력을 능동적으로 제어할 수 있게 하였다.
- 안내시스템 또한 부상시스템과 동일하게 고속주행을 위해서는 빠른 응답특성을 얻어야 하며, 안내전자석, 안내전자석 드라이버, 센서모듈, 제어기 설계/제작에 요구되는 응답특성이 반영되어야 한다. 본 과제에서는 설계단계부터 해당 요구성능을 반영하였다.
- 550km/h를 주행하기 위해서는 안내시스템의 대역폭이 최소 2.5Hz 이상이 확보되어야 하

며, 본 과제에서는 해당 요구성능을 아래 그림과 같이 만족시켰다. 이를 통해 주파수영역상에서 간접적으로 초고속 주행 시 안내제어가 원활히 이루어지는 것을 입증한 셈이다.

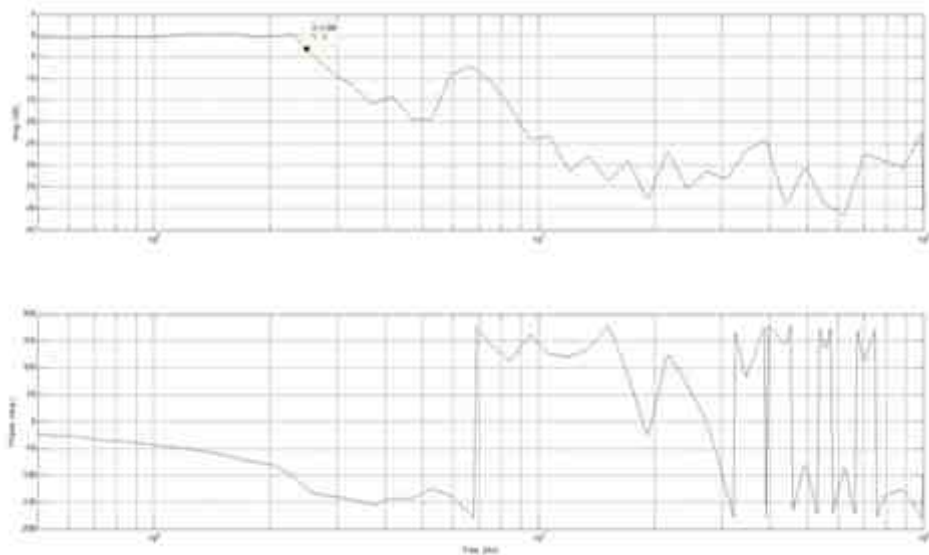


그림 15. 안내시스템 대역폭

- 부상시스템과 마찬가지로 안내제어에서도 자세제어가 필요하다. 이를 위해 그림 12와 같은 Yaw 제어기를 추가하여 안내시스템의 성능을 증대시켰다.

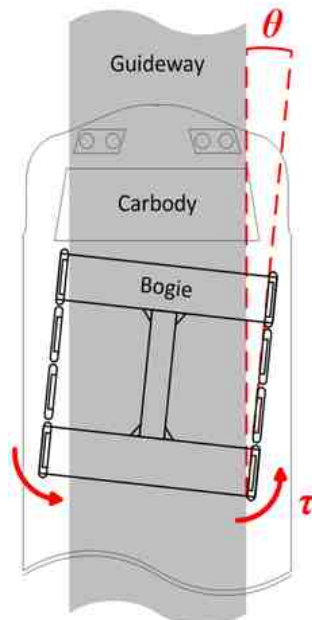


그림 16 Yaw 제어

- 해당 내용은 보고서 p. 75 ~ p. 96, p. 268 ~ p. 284 에 상세히 기재되어 있다.

3. 대차/차체

- 경량화를 위해 알루미늄 압출재 & 복합소재를 적용하여 2톤/m 이하를 달성하였다.

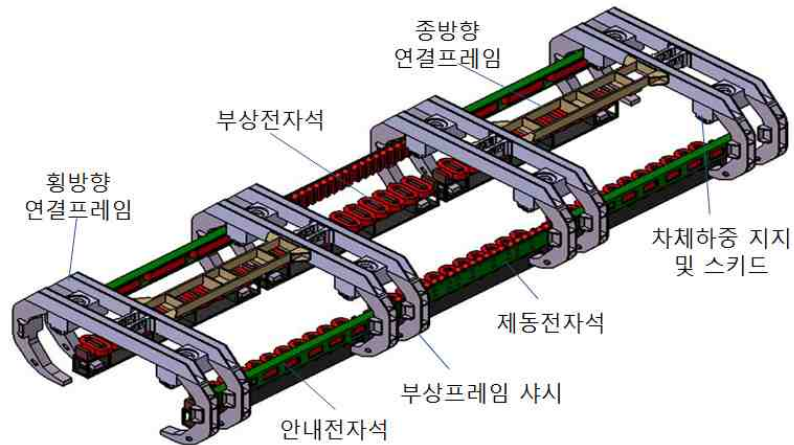


그림 17. Fail-safe 개념이 적용된 대차시스템

- 초고속 주행 시 안전성을 향상시키기 위해 그림 13과 같이 Fail-safe 개념을 대차 개발에 적용하였다. 이는 부상전자석 중 일부가 기계적 혹은 전기적 결함으로 적절한 동작을 하지 못했을 때에도 인접한 부상전자석이 부상력을 보완해 줌으로써 열차의 부상을 안정적으로 유지시키기 위함이다.
- 부상 및 안내 제어 시스템과의 공진을 회피하기 위해 그림 14-15와 같이 대차/차체의 진동 해석 및 구조해석, 충돌해석을 수행하였다.

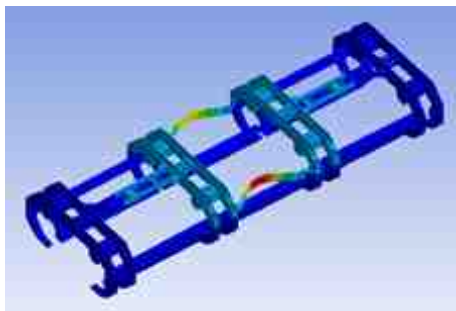


그림 18. 대차 진동 해석

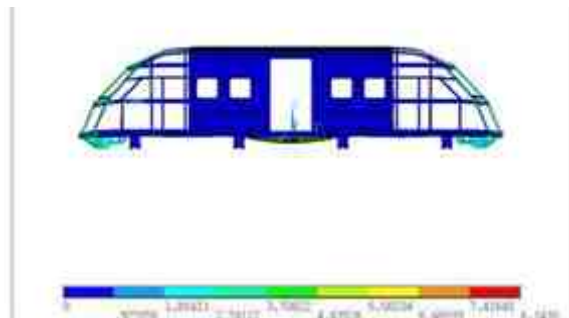


그림 19 차체 진동 해석

- 해당 내용은 보고서 p. 288 ~ p. 462 에 상세히 기재되어 있다.