

# 궤도 고유진동수에 따른 자기부상열차 주행특성 연구

## Study on Effects of Natural Frequency of a Guideway on Running Behaviour of a Maglev Vehicle

임봉혁\* 한형석\*\* 정정훈\*\* 김영중\*\* 김병현\*\*

Yim, Bong-Hyuk Han, Hyung-Suk Jung, Jung-Hoon Kim, Young-Joong Kim, Byung-Hyun

---

### ABSTRACT

Since Maglev vehicle is run over an elevated guideway, the vibrational characteristics of guideway affect the running behavior of the vehicle and guideway. The design of a guideway has a strong effect on the costs of constructing guideways, therefore optimized design of the guideway satisfying running performance is needed for the commercialization of the Maglev vehicle. With an analysis program for dynamics of Maglev vehicles, the dynamic responses of the Maglev vehicle with electromagnet suspension are numerically analyzed according to changes in fundamental natural frequency ratio of a guideway.

---

## 1. 서 론

자기부상열차는 일반적으로 그림 1에서와 같이 교각으로 지지되는 가이드웨이(guideway)를 주행한다. 이러한 가이드웨이는 교각으로 지지되기 때문에 가이드웨이의 유연성을 무시할 수 없으며 그 유연성으로 인한 진동특성은 자기부상 열차 시스템과 연성을 일으킨다. 결과적으로 자기부상열차의 부상 안정성, 승차감 등 주행특성에 영향을 미친다[1-3]. 그러므로 차량의 주행성능을 향상시키고 경제적인 가이드웨이 설계를 위해서는 가이드웨이의 구조진동 특성에 따른 차량의 동특성 연구가 요구된다.

본 논문에서는 가이드웨이의 고유진동수의 크기에 따른 차량의 동특성을 해석하여 그 경향을 파악하는데 목적이 있다. 이를 위하여 도시형 자기부상열차와 유연한 가이드웨이의 연성 동특성 해석 모델이 이용된다[3]. 가이드웨이의 1차 고유진동수를 5.5 ~ 9.5 Hz, 차량의 속도는 20 ~ 110 km/h로 변경하면서 동특성을 해석하였다. 해석 결과 중 안정성에 중요한 평가 항목인 부상공극(air gap), 차체의 수직 가속도 및 가이드웨이의 최대 처짐을 분석하였다. 그 결과 20 ~ 110 km/h에서는 동특성의 차이가 적은 것을 알 수 있었다.

## 2. 해석 모델

### 2.1 가이드웨이

그림 1에서 보여주는 가이드웨이는 거더가 콘크리트로 구성된다. 이 가이드웨이의 충격 진동시험에 의한 주파수분석 결과를 1차 고유진동수는 7.5 Hz를 나타냈다. 만일 이 고유진동수에서 부상제어기와 공진을 일으킨다면 부상안정성을 확보할 수 없다.

---

\* 한국기계연구원, e-엔지니어링연구센터, 비회원

E-mail : yimbbong@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7877 FAX : (042)868-7418

\*\* 한국기계연구원

일본의 도시형자기부상열차의 경우 그러한 공진을 회피하기 위하여 6 ~ 9 Hz 대역의 고유진동수를 갖도록 가이드웨이를 설계한다. 그림 2는 실제 예로 자기부상열차가 주행할 때 가이드웨이의 진동을 보여주고 있다. 시험에 의한 1차 고유진동수가 7.5 Hz 인데, 그림 2에서 보는바와 같이 이 진동수 영역에서 가속도가 큰 것을 알 수 있다. 이러한 진동특성은 차량 및 부상 시스템과 동적 상호작용을 일으킨다. 그러므로 자기부상열차의 부상안정성을 확보하기 위해서는 이러한 진동특성에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 그림 1에서와 같은 가이드웨이를 표현하기 위하여 전통적인 Euler-Bernoulli 빔 모델을 적용한다. 이에 대한 상세한 설명은 참고문헌 [4,5]을 참조 바란다.



그림1. 자기부상열차용 가이드웨이

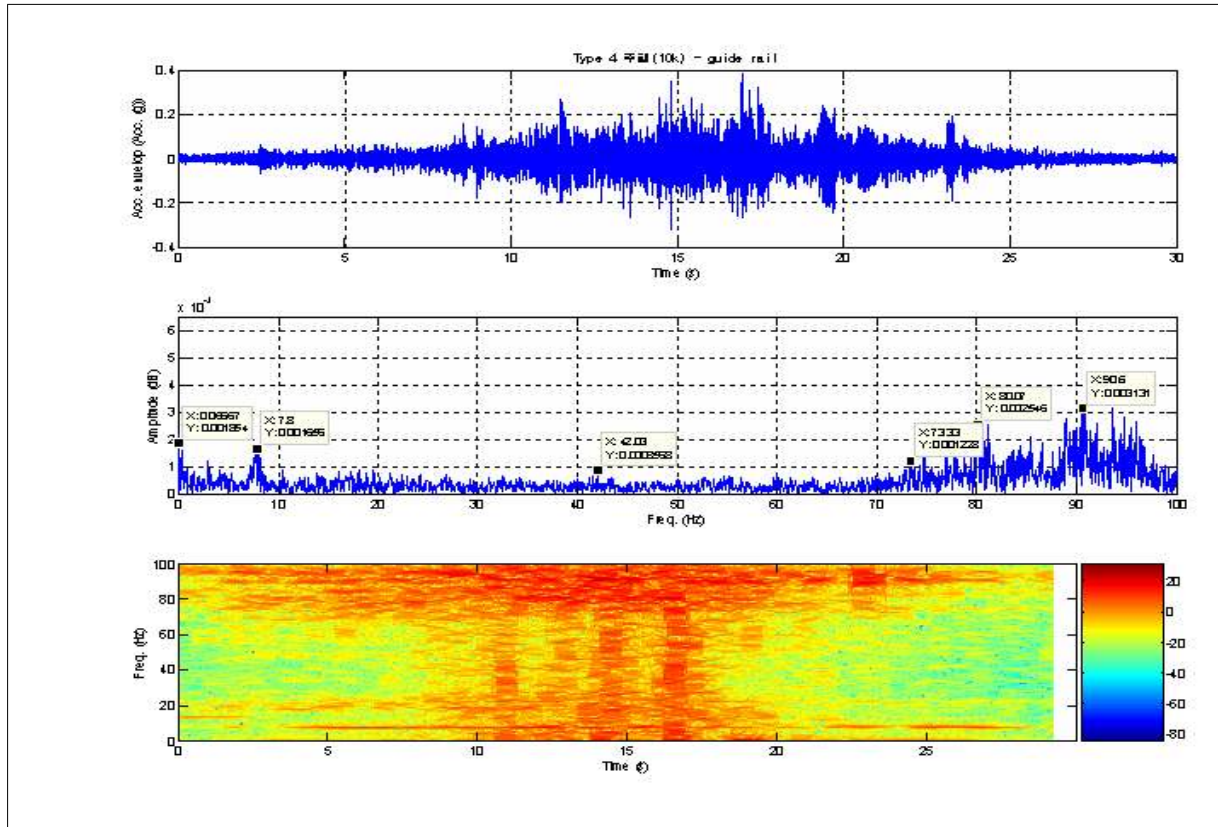


그림2. 자기부상열차 주행 중 가이드웨이 진동응답

## 2.2 연성 모델

자기부상열차의 동특성을 해석하기 위해서는 그림 3과 같은 연성모델이 이용된다. 즉, 가이드웨이의 유연성으로 인한 차량과 가이드웨이의 동적 상호작용을 표현하기 위하여 차량운동방정식과 가이드웨이의 운동방정식을 연립하여 해석하게 된다. 연성해석 모델과 구체적인 수치해석 알고리즘은 참고문헌 [5]에 나타나 있다. 본 논문에서는 참고문헌 [5]에서 발표된 자기부상열차 동특성 해석 프로그램 ODYN/Maglev를 이용하며 상세한 설명은 생략한다. ODYN/Maglev에서의 연성해석 모델에서는 자기부상력 제어기, 차량 및 유연 가이드웨이 운동방정식이 통합되어 해석된다.

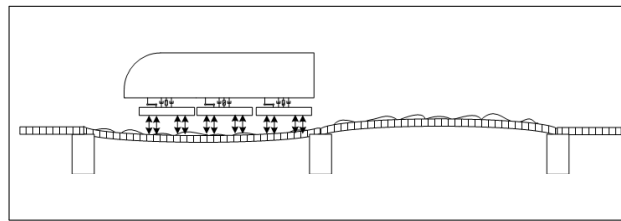


그림3. 자기부상열차/가이드웨이 동적상호작용 ODYN/Maglev 해석 모델

## 3. 해석

2장에서 설명한 ODYN/Maglev 해석 모델을 이용하여 자기부상열차의 주행 중 동특성을 해석하였다. 이 용된 가이드웨이는 그림 1에서 보여주는 25 m 길이의 콘크리트 거더로 구성된 가이드웨이이다. 가이드웨이의 물성치는 도표 1과 같다. 차량의 총 중량은 23000 kg이다. 부상제어기에 대한 설명은 참고문헌 [3]을 참조 바란다. 차량의 속도는 20 km/h ~ 110 km/h 이며 20 km/h 간격으로 증가시킨다. 1차 고유진동수의 영향을 분석하기 위하여 5.5 Hz, 7.5 Hz, 9.5 Hz로 변경하면서 해석을 수행한다. 여기서, 1차 진동 모드에 대한 모드 감쇠비는 0.04로 동일하다. 그림 4 ~ 그림 9는 해석 결과를 보여주고 있다. 해석 결과 중 부상안정성에 중요한 평가 항목인 부상공극(air gap), 차체의 수직 가속도 및 가이드웨이의 최대 처짐을 분석하였다. 그림 4, 그림 5에서와 같이 차체의 수직 가속도는 변곡점에서 고유진동수가 증가할수록 변동이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 가속도에 대한 통계치인 RMS는 차이가 미미한 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 사용된 제어기 특성에 따라 다를 수 있다. 그림 6, 그림 7에서와 같이 공극 응답으로 상대적 차이는 미미한 것을 알 수 있다. 그림 8, 그림 9는 가이드웨이의 처짐과 최대 처짐을 각각 보여주고 있다. 가이드웨이의 처짐도 110 km/h 까지는 차이가 미미한 것을 알 수 있다. 이를 통하여 가이드웨이에 작용하는 동적하중은 정하중의 값에서 변화가 적은 것을 알 수 있다. 그림 9에서는 최대처짐을 비교하였다. 속도 증가에 따라 일반적으로 처짐의 변화가 적지만 증가한다. 그런데, 고유진동수에 따라서 특정 속도에서의 응답 경향은 다를 수 있음을 알 수 있다.

도표 1. 도표 양식

항목	물성치
Area (m <sup>2</sup> )	1.244
Inertia (m <sup>4</sup> )	1.037
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2805
E (N/m <sup>2</sup> )	3.0E+10
Damping ratio	0.04( 1차모드)

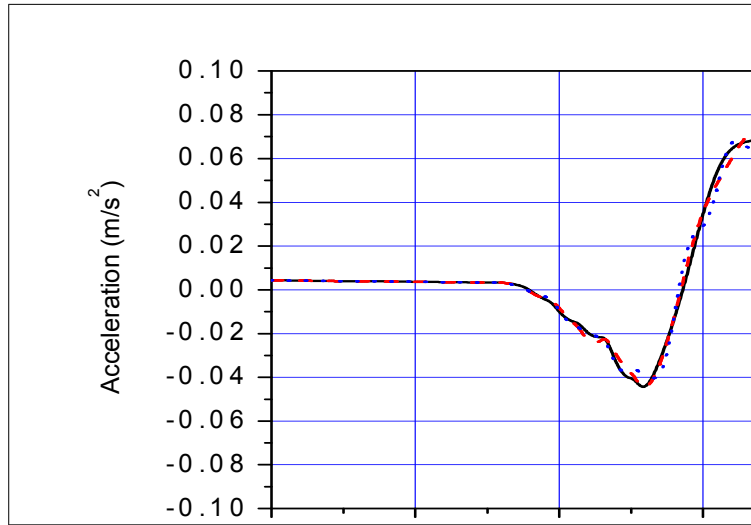


그림4. 110 km/h 에서의 차체 수직 가속도

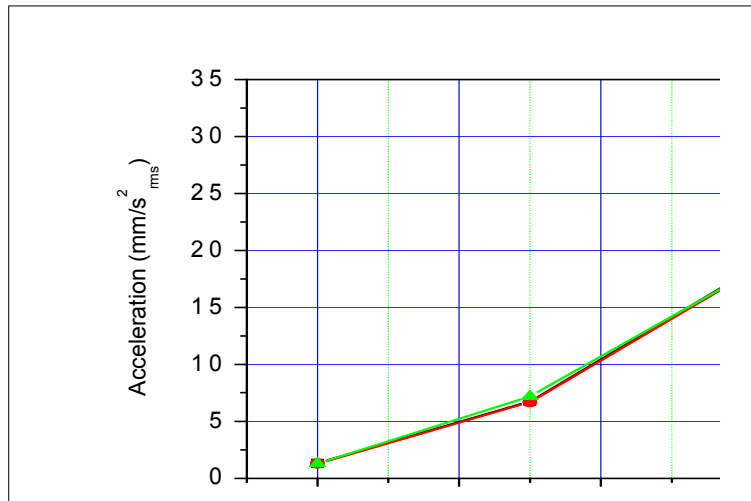


그림5. 속도 증가에 따른 가속도 RMS

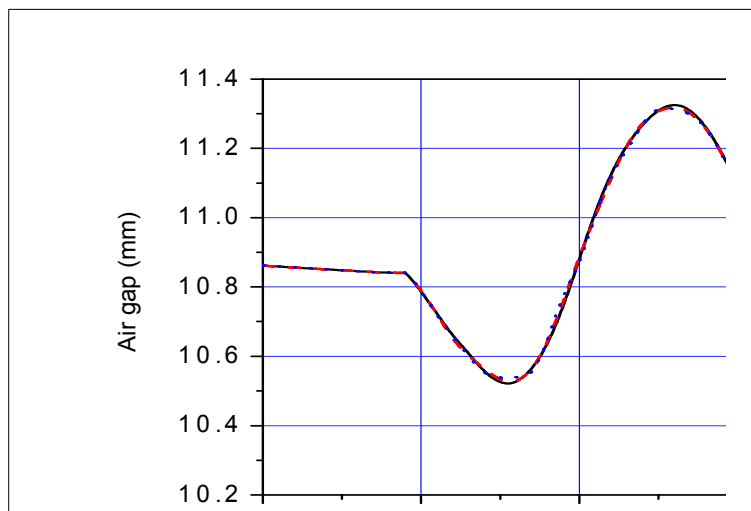


그림6. 110 km/h 에서의 공극

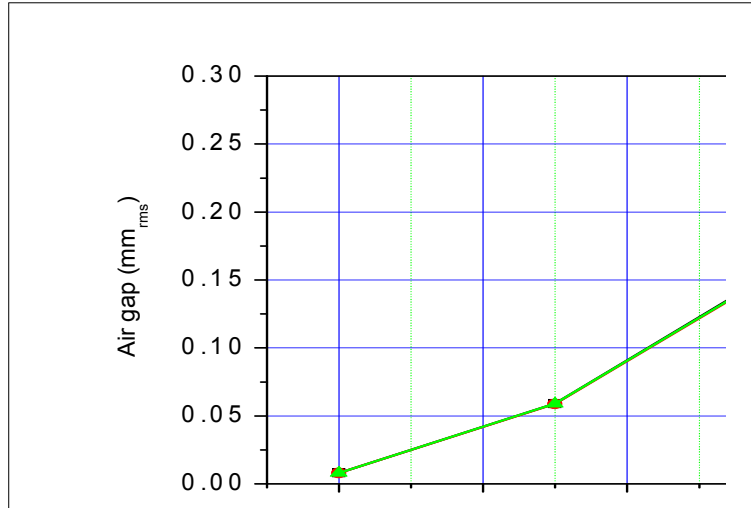


그림7. 속도 증가에 따른 공극 RMS

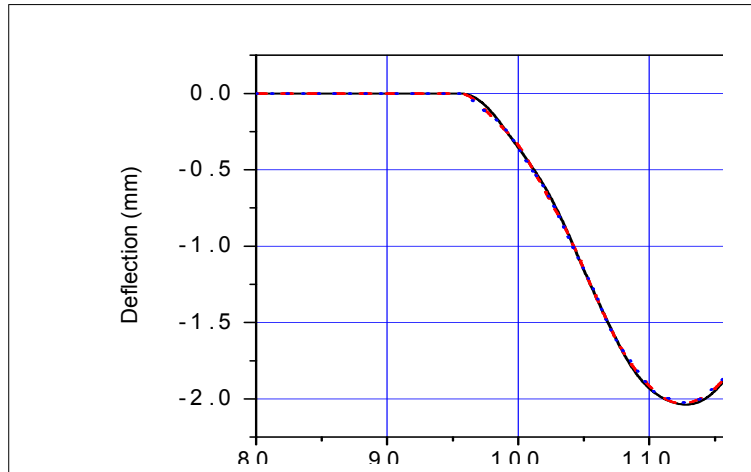


그림8. 110 km/h 에서의 가이드웨이 처짐

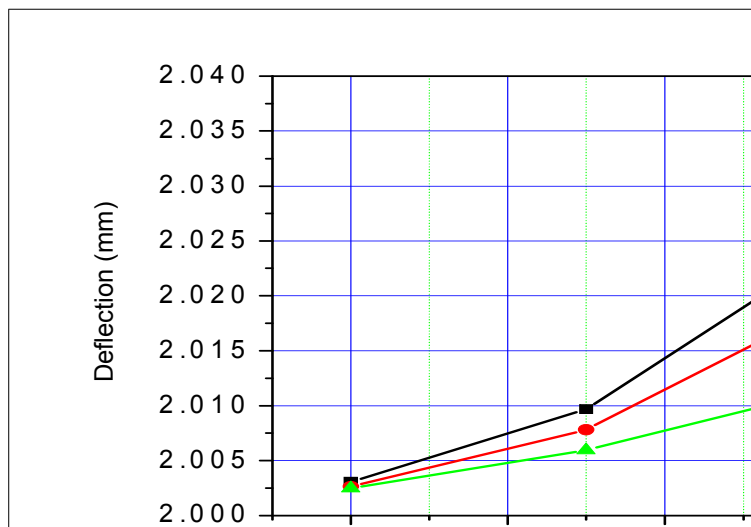


그림9. 속도 증가에 따른 가이드웨이 최대 처짐

#### 4. 결론

본 논문에서는 자기부상열차의 가이드웨이의 구조적 특성 중 1차 고유진동수에 따른 차량의 동특성을 해석하였다. 도시형자기부상열차용 가이드웨이의 1차 고유진동수의 영향을 분석하기 위하여 5.5 Hz, 7.5 Hz, 9.5 Hz로 변경하면서 해석을 수행하였다. 차체의 수직 가속도는 변곡점에서 고유진동수가 증가할수록 변동이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 가속도에 대한 통계치인 RMS는 차이가 미미한 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 사용된 제어기 특성에 따라 다를 수 있다. 부상 공극 응답의 상대적 차이는 미미한 것을 알 수 있었다. 가이드웨이의 처짐도 110 km/h 까지는 차이가 미미한 것을 알 수 있다. 이를 통하여 가이드웨이에 작용하는 동적하중은 정하중의 값에서 변화가 적은 것을 알 수 있다. 속도 증가에 따라 일반적으로 처짐의 변화가 적지만 증가한다. 그런데, 고유진동수에 따라서 특정 속도에서의 응답 경향은 다를 수 있음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Zhao, C.F. and Zhai, W.M.(2002). "Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 38, No.3, pp.185-210.
2. Cai, Y. and Chen, S.S.(1997), "Dynamic characteristics of magnetically-levitated vehicle systems," *Appl. Mech Rev* Vol 50, No 11, Part 1, pp. 647-670.
3. 한형석, 이종민, 김영중, 김국진, 김동성, 김숙희(2006), "유연다물체 동역학을 이용한 자기부상열차 동역학 모델링 연구", *한국철도학회논문집*, 제9권 제6호, pp.792-797.
4. 박찬종, 박태원(2000), "유연한 보 구조물 위를 이동하는 구속기계계의 동역학 해석(I):일반적인 접근법", *한국정밀공학회지*, 제 17권 제 11호, pp.165-175.
5. 한형석, 성호경, 김영중, 김병현(2007), "자기부상열차/가이드웨이 연성 모델링 연구", *한국정밀공학회지*, 출판예정.