

# 궤도 감쇠에 따른 자기부상열차 주행특성 연구

## Study on Effects of Damping of a Guideway on Running Behaviour of a Maglev Vehicle

김속희\* 한형석\*\* 정정훈\*\* 권정일\*\* 김병현\*\*

Kim, Suk-Hee Han, Hyung-Suk Jung, Jung-Hoon Kwon, Jung-Il Kim, Byung-Hyun

---

### ABSTRACT

Since Maglev vehicle is run over an elevated guideway, the structural properties of guideways 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 modal damping 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 유연성은 차량과 상호작용을 일으켜, 자기부상열차의 부상 안정성, 승차감 등 주행특성에 영향을 미친다 [1-3]. 그러므로 차량의 주행성능을 향상시키고 경제적인 가이드웨이 설계를 위해서는 가이드웨이의 구조 특성에 따른 차량의 동특성 해석이 요구된다.

본 논문에서는 가이드웨이의 구조적 특성 중 모드 감쇠비에 따른 차량의 동특성을 해석하여 그 경향을 파악하는데 목적이 있다. 이를 위하여 도시형 자기부상열차와 유연한 가이드웨이의 연성 동특성 해석 모델이 이용된다[3-5]. 가이드웨이의 1차 진동 모드의 감쇠비를 2 ~ 6 %, 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 연성 모델

자기부상열차의 동특성을 해석하기 위해서는 그림 2와 같은 연성모델이 이용된다. 즉, 가이드웨이의 유연성으로 인한 차량과 가이드웨이의 동적 상호작용을 표현하기 위하여 차량운동방정식과 가이드웨이의 운동방정식을 연립하여 해석하게 된다.

---

\* 한국기계연구원, e-엔지니어링연구센터, 비회원

E-mail : irisone@kimm.re.kr

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

\*\* 한국기계연구원

연성해석 모델과 구체적인 수치해석 알고리즘은 참고문헌 [3,5]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.



그림1. 자기부상열차용 가이드웨이

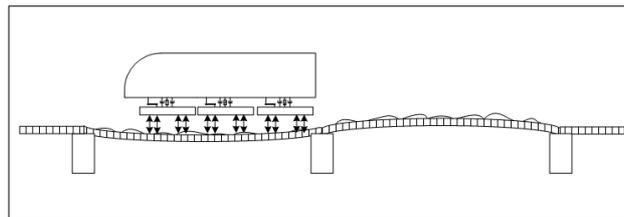


그림2. 자기부상열차/가이드웨이 동적상호작용 ODYN/Maglev 해석 모델

## 2.2 가이드웨이

본 논문에서는 그림 1에서와 같은 가이드웨이를 표현하기 위하여 그림 3에서와 같은 전통적인 Euler-Bernoulli 빔 모델을 적용한다. 이에 대한 상세한 설명은 참고문헌 [4,5]을 참조 바란다. 결과적인 Euler-Bernoulli 빔 모델의 한 요소에 대한 운동방정식은 식(1)과 같다.

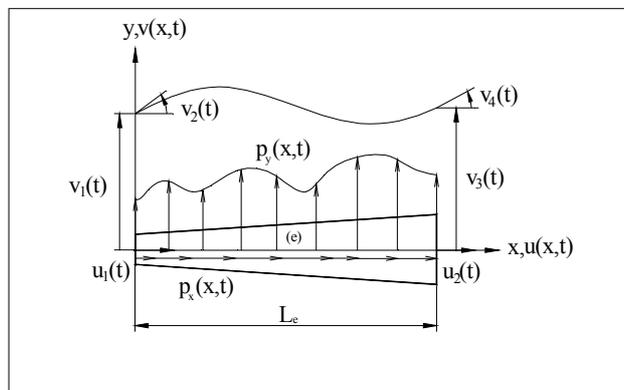


그림3. Euler-Bernoulli beam model

$$[M]_e \ddot{v}_e + [C]_e \dot{v}_e + [K]_e v_e = P_e \quad (1)$$

여기서,

$$\{\mathbf{v}\}_e^T = [u_1, v_1, v_2, u_2, v_3, v_4]_e : \text{nodal coordinates}$$

$$\{\mathbf{P}\}_e^T = [P_{u_1}, P_{v_1}, P_{v_2}, P_{u_2}, P_{v_3}, P_{v_4}]_e : \text{nodal forces}$$

$$[\mathbf{M}]_e : \text{element mass}$$

$$[\mathbf{K}]_e : \text{element stiffness}$$

$$[\mathbf{C}]_e = a[\mathbf{M}]_e + b[\mathbf{K}]_e : \text{element damping}$$

식(1)을 이용하여 모달 감쇠비를 적용하기 위해서는 모드 감쇠비를 이용하여  $a, b$ 을 결정해야한다.  $a=0$  일 때  $b=2\zeta_n/(f_n)$  관계가 있다. 여기서  $\zeta_n$ 는 모드 감쇠비,  $f_n$ 는 모드 진동수 있다. 본 논문에서는 1차 진동 모드에 대한 모드 감쇠비를 고려하였다. 즉, 실제의 가이드웨이는 많은 수의 모드 진동수가 있고 그에 대한 모드 감쇠비는 다르며 결과적인 응답은 그러한 모드들의 합성에 의한 것이다. 그림 1과 같은 가이드웨이는 시험결과 가이드레일의 1차 고유진동수는 7.5 Hz, 1차 고유진동수에 대한 감쇠비는 0.04를 나타냈다. 1개의 모드 감쇠만을 정확히 고려하기 때문에 그 이외의 모드 감쇠비는 실제의 감쇠비와 차이가 있다. 엄밀한 해석을 위해서는 경험에 의하면 100 Hz 내의 모드에 대한 감쇠비를 고려할 필요가 있다. 그러나 차량의 주행특성은 가이드웨이의 1차 진동 모드와 연성이 상대적으로 큰 경향이 있어 본 논문에서는 1차 진동 모드만을 엄밀하게 고려하였다.

### 3. 해석

2장에서 설명한 OBYN/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 [3,5]을 참조 바란다. 차량의 속도는 20 km/h ~ 110 km/h 이며 20 km/h 간격으로 증가시킨다. 모드 감쇠비는 0.04를 기준으로  $\pm 0.02$  변화시켰다. 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 전체적으로 차이가 미소하였다. 50 km/h에서는 감쇠비가 클수록 가속도 크기는 작은 값을 나타냈다. 그림 6, 그림 7은 부상공극의 결과로 그 차이가 더 미소하였다. 그림 8, 그림 9는 가이드웨이 최대 처짐으로 50 km/h에서는 감쇠비가 클수록 처짐은 작았다. 그러나 다른 속도 영역에서는 차이가 미소하였다. 결과적으로 20 ~ 110 km/h 에서는 1차 모드 감쇠비에 따른 동특성의 변화는 전체적으로 작으나 차량의 속도에 따라 일부 차이를 나타내기도 한다. 결론적으로 콘크리트로 만들어진 가이드웨이에 있어서 1차 진동 모드의 감쇠비가 2 ~ 6 % 일 때 동특성의 차이는 작은 것을 알 수 있었다. 그러나 이러한 경향은 일반적인 경향이라고 할 수 없다. 자기부상열차에 있어서는 사용된 부상제어기에 따른 영향이 있기 때문이다. 보다 엄밀한 해석을 위해서는 더 많은 차수의 모드에 대한 감쇠비를 고려할 필요가 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 ( b )	0.02(2 %), 0.04( 4%), 0.06(6 %) (0.00084, 0.0016, 0.0025)

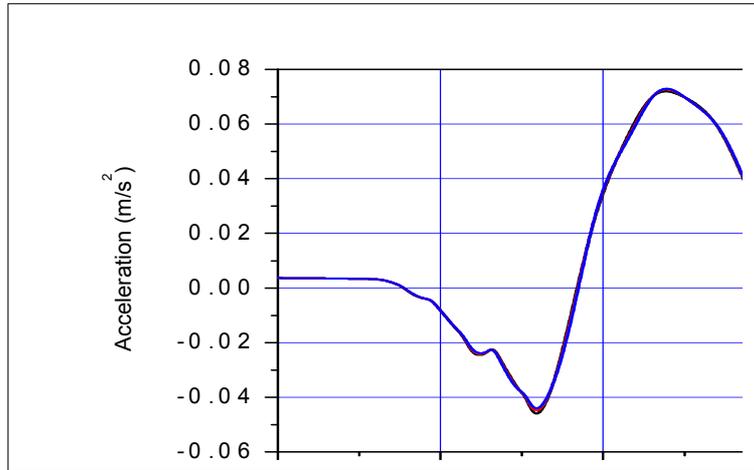


그림4. 110 km/h 에서의 차체 수직 가속도

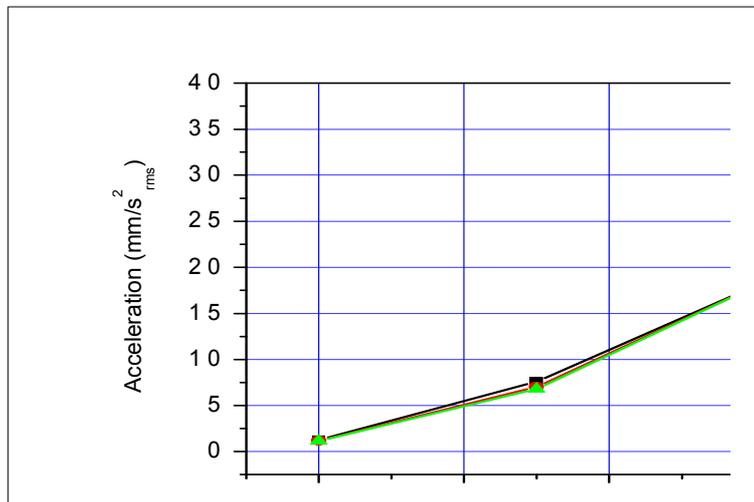


그림5. 속도 증가에 따른 가속도 RMS

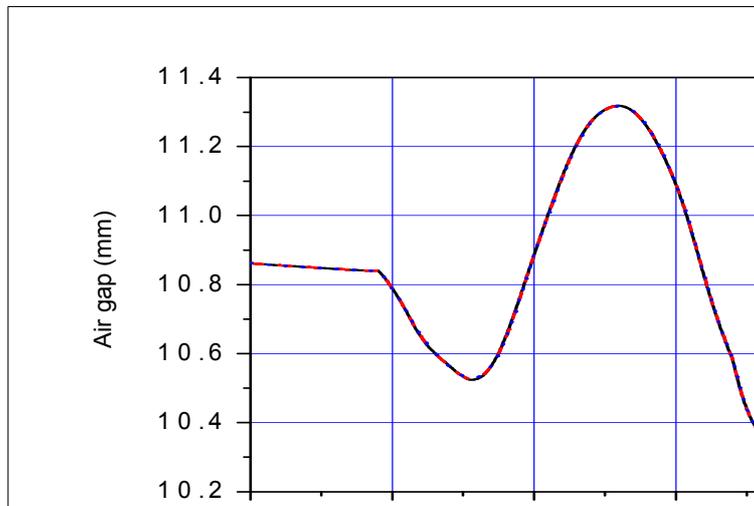


그림6. 110 km/h 에서의 공극

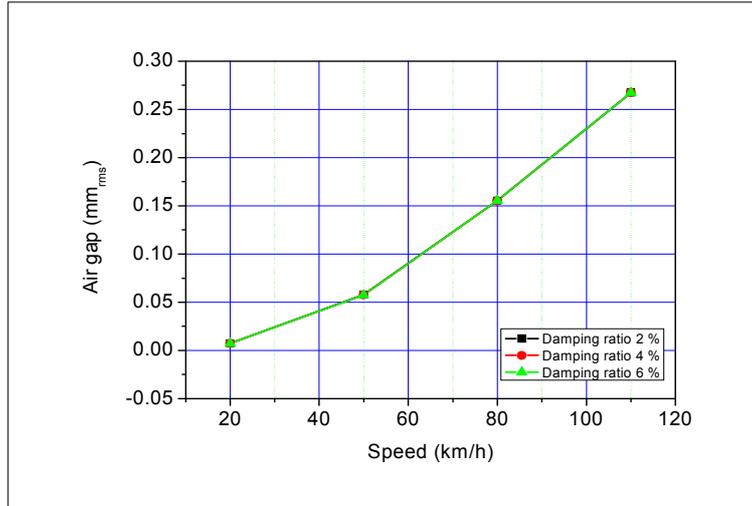


그림7. 속도 증가에 따른 공극 RMS

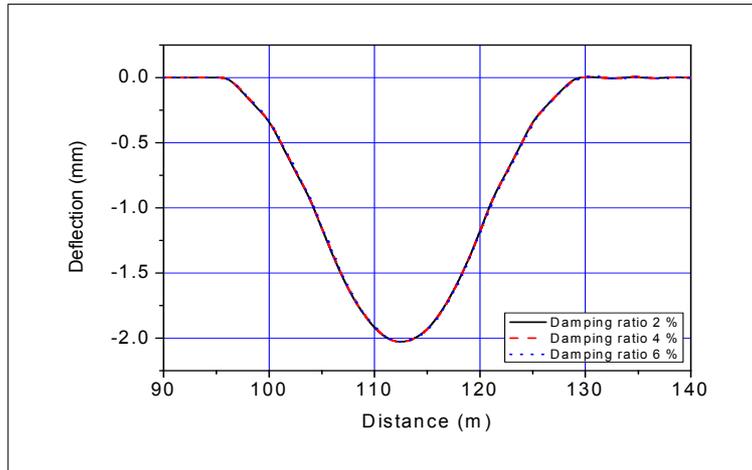


그림8. 110 km/h 에서의 가이드웨이 처짐

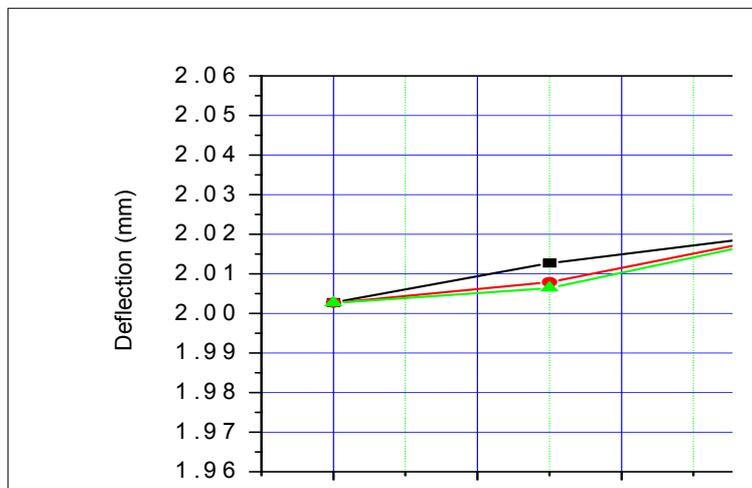


그림9. 속도 증가에 따른 가이드웨이 최대 처짐

#### 4. 결론

본 논문에서는 자기부상열차의 가이드웨이의 구조적 특성 중 모드 감쇠비에 따른 차량의 동특성을 해석하였다. 도시형자기부상열차용 가이드웨이의 1차 진동 모드의 감쇠비를 2 ~ 6 %, 차량의 속도는 20 ~ 110 km/h로 변경하면서 동특성을 해석하였다. 차체의 가속도는 전체적으로 차이가 미소하였다. 다만, 50 km/h에서는 감쇠비가 클수록 가속도 크기는 작은 값을 나타냈다. 부상공극은 그 차이가 미소하였다. 가이드웨이 처짐은 50 km/h에서는 감쇠비가 클수록 처짐은 적었다. 그러나 다른 속도 영역에서는 차이가 미소하였다. 결과적으로 20 ~ 110 km/h 에서는 1차 모드 감쇠비에 따른 동특성의 변화는 전체적으로 작으나 일부 속도에 따라서 차이를 나타내기도 한다. 결론적으로 콘크리트로 만들어진 가이드웨이에 있어서 1차 진동 모드의 감쇠비가 2 ~ 6 % 일 때 동특성의 차이는 적은 것을 알 수 있었다. 그러나 이러한 경향은 사용된 부상제어기에 영향을 받기 때문에 부상제어기의 동특성과 연관시켜 해석하여야 한다.

#### 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.