

# 자기부상열차의 동적 해석 연구

## Study on Dynamic Analysis of Magnetic Levitation Vehicles

한형석\*                      조흥제\*                      김대진\*\*  
Han, Hyung-Suk              Cho, Heung-Je              Kim, Dae-Jin

---

### ABSTRACT

Dynamic analysis of the magnetic levitation vehicle UTM01 is studied using the multibody dynamic analysis program DADS. The magnetic levitation force is defined and incorporated into DADS through the user-defined subroutines of DADS. The vehicle with bogies is modeled in 3 dimension. The developed vehicle model with magnetic nodules is analyzed for two rail profiles. The results show that the presented method is applicable to magnetic levitation vehicles.

---

## 1. 서론

자기부상열차는 자기력에 의하여 운행되는 교통수단으로 자기부상열차의 고속화 및 안전성, 경제성 향상을 위해서는 동적 설계 기술이 필수적으로 대두된다. 최적의 동적 설계를 달성할 때 궤도건설 비용을 줄일 수 있고 승차감 향상 및 안전성을 확보할 수 있다. 일본과 독일은 이미 자기부상열차의 동적 해석 기술 및 설계기술에 대한 연구를 활발히 수행해 왔다[1-4]. 국내에서는 단순모델에 의한 동적 설계에 대한 연구가 수행된바 있다[5]. 현재 한국기계연구원에서 자기부상열차[UTM01]를 개발하여 시험운행중에 있다. 현 차량의 개선 및 추후 개발된 열차의 설계를 위하여 동적 설계 기술의 확보가 필요하다.

본 논문은 자기부상열차의 동적 해석에 대한 시작 연구로써 자기부상열차의 동적 해석법을 제안하고 연구방향을 제시하는데 목적이 있다. 이를 위하여 자기부상열차 동적 해석 방법으로 다물체동역학을 이용하는 것이 제안되고 2가지의 궤도형상에 대하여 해석을 수행한다. 시작 연구이기 때문에 우선 자기력 중 부상력에 한정하며 차량은 전체차량을 대상으로 한다.

## 2. 자기부상력

그림 1은 자기부상열차의 단면 개략도로 부상력 발생 원리를 보여주고 있다. 그림 1에서 자기부상력  $F$  에 의하여 대차를 부상시키게 된다. 자기부상력  $F$ 는 식(1)과 같이 정의할 수 있다[1]. 식(1)에서 자기 부상력  $F$ 는 보는 바와 같이 같이 미분방정식 형태로 정의된다. 식(1)에는 정해진 상수이외에 제어 게인(gain)이 포함되어 있다. 제어게인 및 상수들은 현재 한국기계연구원에서 시험운행중인 UTM01의 값을 이용한다. 식(1)에서  $C, Z$ 는 그림 1에서와 같이 전자석과 레일사이의 거리(gap), 궤

---

\* 한국기계연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국기계연구원 인턴연구원, 비회원

도의 위치를 각각 나타낸다.

$$\dot{F} = -\frac{R}{L_o} F + \frac{k_{rp}k_i - Rk_z}{L_o} C + \frac{k_{rp}k_i}{L_o} \dot{C} + \frac{k_{ap}k_i}{L_o} Z + \frac{k_{av}k_i}{L_o} \dot{Z} + \frac{k_{aa}k_i}{L_o} \ddot{Z} \quad (1)$$

여기서,

$R$  = reluctance of the magnetic circuit

$L$  = magnet inductance

$k_{rp}, k_{ap}, k_{rv}, k_{av}, k_{aa}$ : feedback gains

$$k_i = \frac{\mu_o N^2 A i_o}{2z_o^2}$$

$$k_z = \frac{\mu_o N^2 A i_o^2}{2z_o^3}$$

$\mu_o$  = 투과상수 ( $8.85 \times 10^{-12} F/m$ )

$N$  = 코일의 감은 횟수

$A$  = 단면적

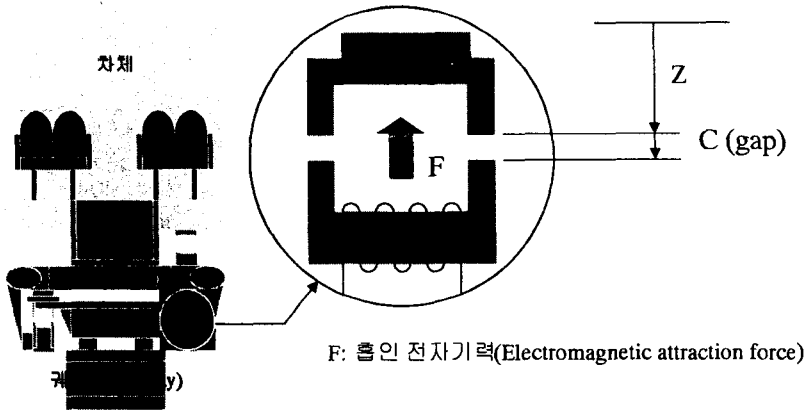


그림 1. 자기부상 모듈의 구조

### 3. 동적 모델링

자기부상열차의 동적 해석을 위하여 다물체동역학 해석 프로그램인 DADS[6]를 이용하였다. 자기부상열차의 동적 해석은 그림 2에서 보여주는 구조를 가진다. 그림 2에서와 같이 차량모델, 제어기 모델, 자기부상 모듈 모델을 하나로 통합하여 해석하게 되는 것이다. 여기서 자기부상 모듈에 대한 요소는 DADS에 없기 때문에 식(1)을 기초로 하여 DADS 사용자 정의 Subroutine USR07을 이용하게 된다.

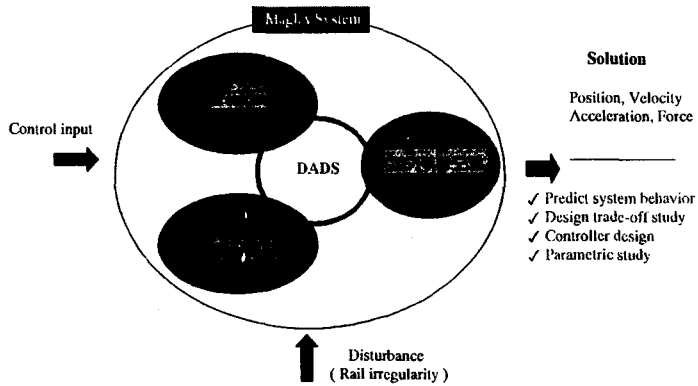


그림 2. 자기부상열차 동적 해석 구성도

### 3.1 차량 모델링

차량 모델링에는 동적 특성에 영향을 주는 모든 부품이 포함된다. 대차에는 공기스프링, 댐퍼, 견인 바, 링크 등이 포함되어 있으며 차량을 지지한다. 이러한 요소들은 DADS의 기본 요소들 TSDA, BEAM, BUSH, BODY 요소를 이용하여 모델링이 가능하다. DADS를 이용한 전체차량에 대한 해석 모델은 그림 3과 같다.



그림 3. 자기부상열차(UTM01)의 동적 해석 모델

### 3.2 자기부상력 모델링

자기부상력은 식(1)과 같이 미분방정식 형태로 정의된다. 이것을 모델하기 위하여 DADS USR07 요소가 이용된다. 이 요소는 일반적인 비선형 미분방정식을 사용자가 정의할 수 있는 요소이다. 즉 그림 4에서와 같이 USR07은 차량으로부터 궤도의 위치(position), 거리(gap)을 감지하여 식(1)을 풀어

차량에 부상력  $F$ 를 대차에 전달한다. 즉 USR07은 차량과 자기부상모듈과의 인터페이스 및 미분방정식 해석을 수행하는 역할을 한다.

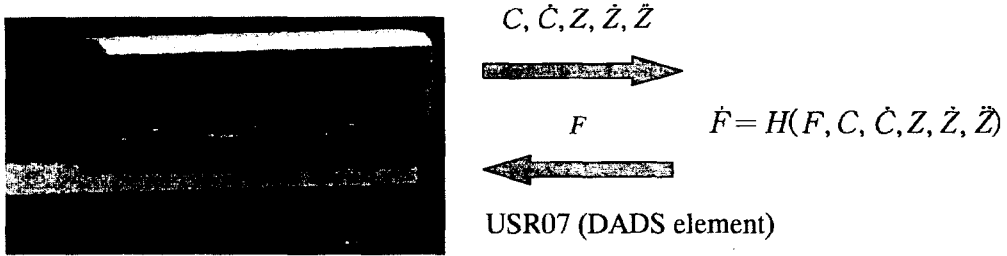


그림 4. USR07을 이용한 자기부상모듈/차량 인터페이스

#### 4. 적용

3장에서 개발한 동적 모델을 이용하여 제안한 해법의 안정성을 평가하기 위하여 궤도에 불규칙을 입력하여 해석을 수행하였다. 우선 궤도의 형상이 계단 입력(Step input)이 되도록 하였다.(그림 5) 그림 6은 입력에 대한 출력 즉 자기부상 모듈에서의 위치 응답을 보여주고 있다. 그림에서 1-1,2-1,3-1은 대차번호와 각 대차에서의 출력 모듈번호를 의미한다. 그림에서 보듯이 각 모듈의 위치 응답이 주어진 궤도 형상에 안정적으로 추종하는 것을 볼 수 있다. 이를 통하여 본 논문에서 이용한 방법이 안정성을 가지는 것을 알 수 있다. 그림 7은 그때의 차체 수직 가속도를 보여주고 있다.

두 번째로 궤도입력을 그림 8과 같이 Sine 형상을 갖도록 하여 해석하였다. 이러한 입력에 대한 응답을 그림 9, 그림 10에서 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 각 모듈들이 주어진 형상을 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 그림 11-14는 해석 결과에 대한 시간에 따른 운동을 보여주고 있다.

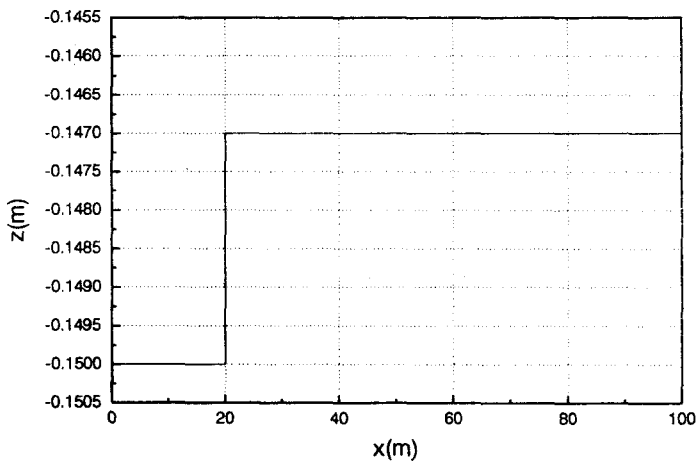


그림 5. 궤도 형상(Step input)

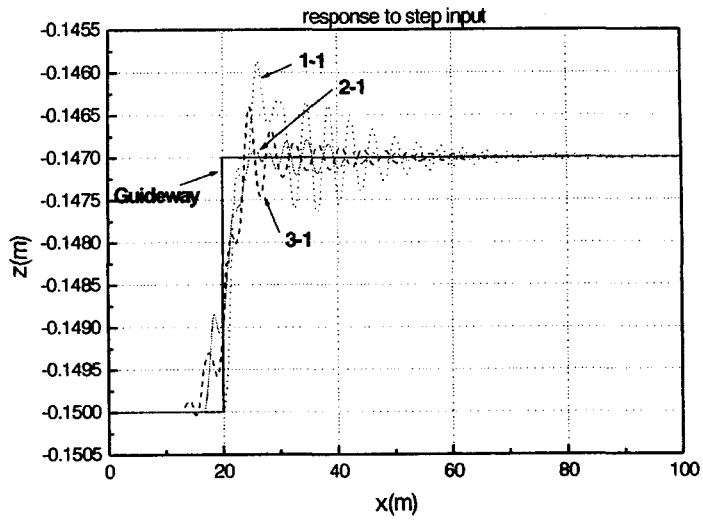


그림 6. 계단 입력에 대한 자기부상 모듈의 위치 응답

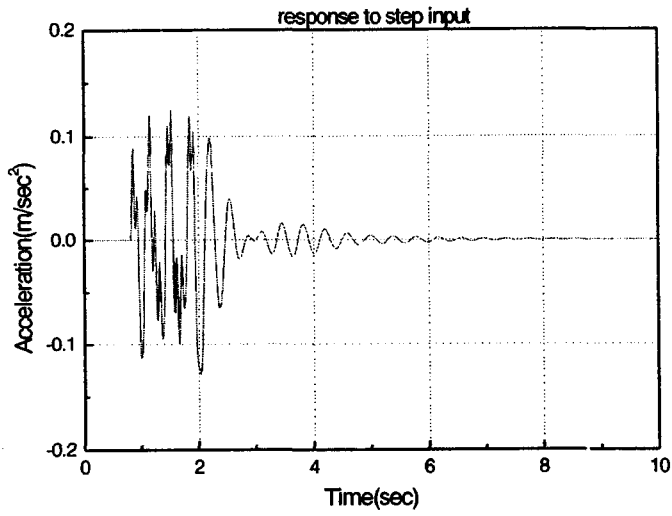


그림 7. 계단 입력에 대한 차체 가속도 응답

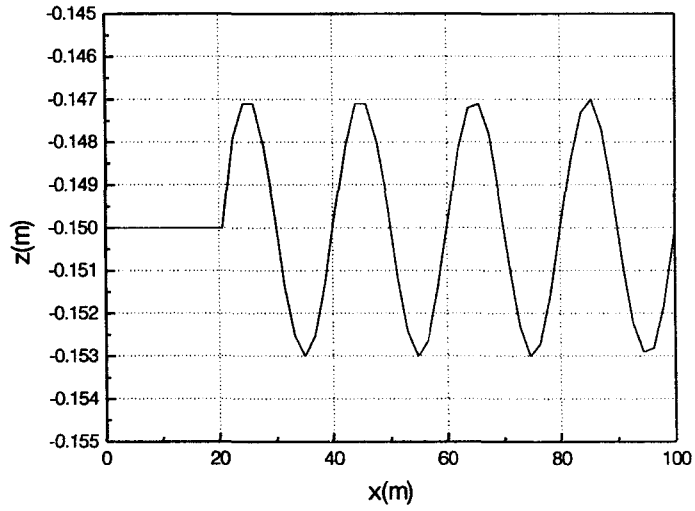


그림 8. 궤도 형상(Sine input)

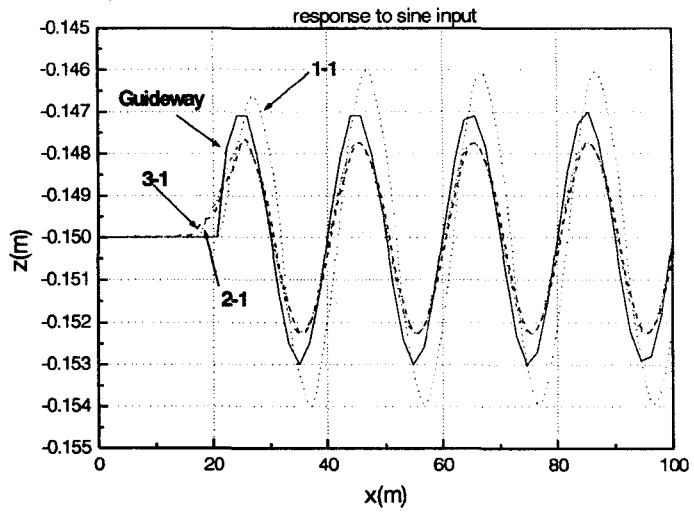


그림 9. Sine 입력에 대한 자기부상 모듈 위치 응답

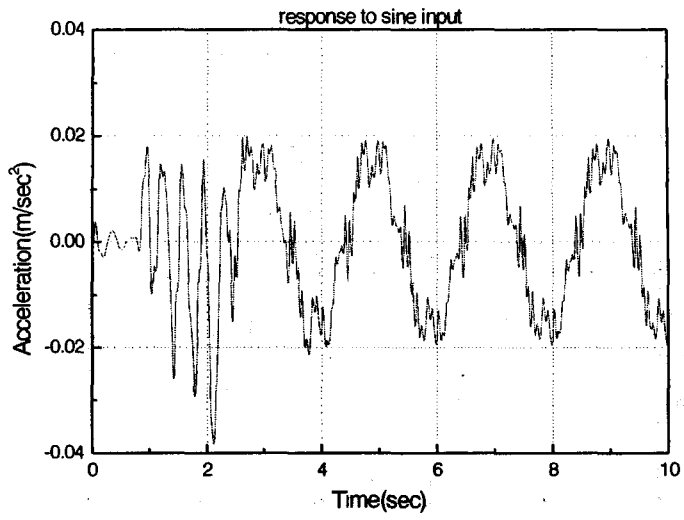


그림 10. Sine 입력에 대한 차체 가속도 응답

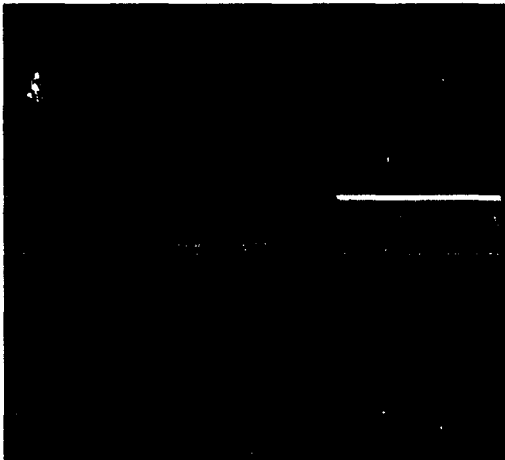


그림 11. Time=0.00 sec

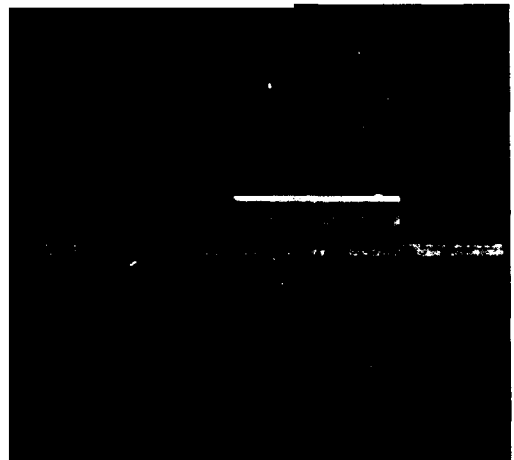


그림 12. Time=0.8 sec

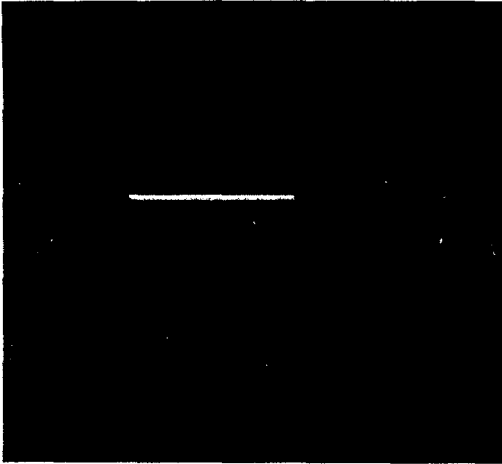


그림 13. Time=1.61 sec



그림 14. Time=2.40 sec

## 5. 결론

이상과 같이 자기부상열차에 대한 동적 해석 연구를 수행하여 얻은 결론과 차후 연구방향은 다음과 같다.

1. 본 논문에서 제안한 다물체동역학에 기초한 해석법은 자기부상열차의 동적 해석에 이용 가능함을 알 수 있다.
2. 차후 자기부상력 뿐만이 아니라 안내력을 포함하여 3차원적 자기력을 고려한 동적 해석이 필요하다.
3. 실험과의 비교 검토를 통하여 본 해석법의 신뢰성을 검증할 필요가 있다.
4. 궤도의 유연성을 포함할 필요가 있다.

## 참고문헌

1. W. Kortum, W. Schwartz and I. Faye(1988), "Dynamic Modeliing of High Speed Ground Transportation Vehicles for Control Design and Performance Evaluation", Dynamics of Controlled Mechanical Systems IUTAm/IFAc Symposium Zurich, Switzerlan.
2. Yeou-Kuang Tzeng and Tsih C. Wang(1995), "Dynamic Analysis of the Maglev System Using Controlled-PM Electromagnets and Robust Zero-Power-Contro Strategy", IEEE Transactions on Magrnetics, Vol. 31, No. 6, pp.4211-4213
3. Akio Seki, Yutaka OSADA, Jun-ichi Kitano, Shigeki Miymoto(1996), "Dynamics of the Bogie of a Maglev System with Guideway Irregularities", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 32, No. 5, pp.5043-5045
4. Hitoshi Tsunashims and Takehiko Fujioks(1994), "Dynamics of a Mechanically Controlled Permanent Magnet Suspension for Maglev Transport Vehicle", DSC-Vol.54/DE-Vol. 76, Transportation Systems, ASME.
5. 강정식, 강이석(1996),"자기부상열차 현가장치의 능동진동제어", Proceedings of the 11<sup>th</sup> KACC, pp.876-879.
6. DADS User's Manual, LMS CADSI, USA