

# 전자기력의 비선형 효과를 고려한 도시형 자기부상열차의 주행해석

## Moving urban Maglev-vehicle analysis considering nonlinear magnetic levitational force effect

이 준 석\*·유 성 현\*\*·임 동 준\*\*\*·김 문 영\*\*\*\*

Lee, Jun-Seok · Yoo, Sung-Hyun · Lim, Dong-Jun · Kim, Moon-Young

### 요 약

본 연구는 자기부상력의 선형 및 비선형효과가 이동중인 자기부상열차의 부상공극에 미치는 영향을 파악하는데 목적이 있다. 이를 위하여 자기공극의 피드백을 포함한 1자유도 차량에 대한 운동방정식을 구성하고, 최적능동제어기법을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과 차량의 속도가 증가함에 따라 자기부상력의 선형 및 비선형효과가 자기부상차량의 부상공극에 미치는 영향에 뚜렷한 차이가 발생함을 알 수 있다. 결국 자기부상열차의 정확한 해석을 위해서는 자기부상력의 비선형효과를 고려한 해석이 필요할 것으로 판단된다.

**keywords** : 가이드웨이, 자기부상열차, 전자기력, 비선형해석, UTM-01

## 1. 서 론

자기부상열차는 자석의 힘으로 차량을 지지(부상)하고 가이드웨이 상에서 자기장에 의해서 일정한 갭(부상공극, gap)을 유지하면서 추진하는 새로운 형태의 교통수단(그림 1)이다. 이러한 자기부상열차의 경우 기존의 바퀴식 열차와는 거동특성이 분명히 틀리며 레일과의 비접촉에 따른 우수한 주행특성과 저소음, 저공해성을 지닌 첨단 교통수단이라는 장점으로 인해 선진국을 중심으로 활발한 연구와 실용화가 진행되고 있는 실정이다. 국내의 경우도 인천 신공항에 도시형 자기부상열차 시범노선의 신설계획을 진행 중이다.



그림 1 중저속 자기부상열차 UTM-01

\* 정회원 · (주)청석엔지니어링 특수사업부 과장, 공학박사 junsok73@gmail.com  
\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 yoosunghyun@gmail.com  
\*\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 lim980707@nate.com  
\*\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 kmye@skku.edu

자력에 의해 약 10mm 정도 부상하여 운행되는 자기부상열차에서는 열차의 바퀴에 해당하는 역할을 담당하는 마그네트(magnet)와 레일 역할을 하는 가이드웨이(guideway)간의 전자기적 파라미터로 결정되는 Electro Magnetic Suspension System(EMS, 전자기 현가 시스템)이 적절한 강성과 감쇠값을 갖도록 컨트롤 하는 것이 중요하다. 국내에서도 이와같은 자기부상열차의 주행특성에 관한 논문(한형석 등, 2007)이 최근 꾸준히 발표되고 있으나 대부분 주파수해석 및 전자기력 특성의 선형화에 의한 분석에 중점을 두고 있다. 본 연구에서는 전자기력의 비선형화가 주행중 자기부상열차의 부상공극에 미치는 영향을 파악하여 전자기력의 선형화에 의한 결과와 비교하여 그 경향을 분석하였다.

## 2. 자기부상열차의 운동방정식

주행중인 자기부상열차에는 자기부상력, 교량의 처짐 및 레일 조도에 의한 외란, 차량의 중량에 의한 외력 등이 작용한다(그림 2). 자기부상력  $F_m$ 과 회로의 전압  $v$ 는 다음 식 (1) 및 (2)와 같으며 원칙적으로 비선형이다.(Sinha, 1987)

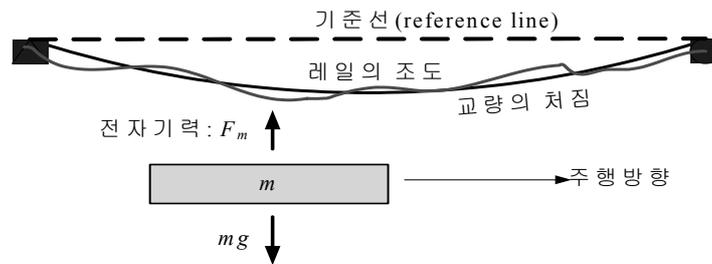


그림 2 주행중인 자기부상열차

$$F_m(i(t), z(t)) = \frac{\mu_0 N_m^2 A_m}{4} \left[ \frac{i(t)}{z(t)} \right]^2 \quad (1)$$

$$v(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 N_m^2 A_m}{2} \frac{d}{dt} \left[ \frac{i(t)}{z(t)} \right] \quad (2)$$

여기서  $\mu_0$ 는 자속의 진공 중 투과율,  $N_m$ 은 전자석코일수,  $R$ 은 회로의 전기저항,  $A_m$ 은 전자석의 넓이,  $z(t) = z_0 + \Delta c(t)$ 는 공칭부상공극( $z_0$ )과 부상공극의 변동성분( $\Delta c$ )을 포함하는 전자석의 부상공극,  $i(t)$ 는 회로의 전류를 각각 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 선형화 시키면 다음과 같이 된다.

$$F_m = F_{m0} + \Delta F_m = \left[ \frac{\mu_0 N_m^2 A_m^2 i_0^2}{4z_0^2} \right] + \left[ \frac{\mu_0 N_m^2 A_m i_0}{2z_0^2} \Delta i(t) - \frac{\mu_0 N_m^2 A_m i_0^2}{2z_0^3} \Delta c(t) \right] = [F_{m0}] + [k_i \Delta i(t) - k_c \Delta c(t)] \quad (3)$$

$$v_0 + \Delta v(t) = Ri_0 + R\Delta i(t) + \frac{\mu_0 N_m^2 A_m}{2z_0} \Delta \dot{i}(t) - \frac{\mu_0 N_m^2 A_m i_0}{2z_0^2} \Delta z(t) \quad (4)$$

이제 주행중인 자기부상열차의 1자유도(연직방향 운동) 모델에 대한 운동방정식은 다음과 같이 구성될 수 있다.

$$m\ddot{z}(t) = -F_m + mg \quad (5)$$

해석시 전압의 변동률  $\Delta v(t)$ 는 여러 가지 방법으로 제어될 수 있으나 본 연구에서는 LQR(Linear Quadratic Regulator)를 구성하여 부상공극의 변동률, 부상공극 변동률의 속도항 및 전류의 변동률을 관찰할 수 있는 것으로 하여 다음 식 (6)과 같이 구성하였다.

$$\Delta v(t) = k_1\Delta c(t) + k_2\dot{\Delta c}(t) + k_3\Delta i(t) \quad (6)$$

### 3. 해석결과의 분석

해석에 사용된 차량의 제원은 다음 표 1과 같으며, 해석툴은 MATLAB을 이용하였다.

표 1 자기부상차량의 제원

항목	값	항목	값
차체질량( $m$ )	29,300kg	전자석코일수( $N_m$ )	680
전기저항( $R_0$ )	24.72 $\Omega$	전자석넓이( $A_m$ )	0.022m <sup>2</sup>
공칭부상공극( $z_0$ )	10mm	공칭부상전류( $i_0$ )	21A

#### 3.1. 교량 및 레일조도

외적 가진으로 작용하는 교량과 레일조도는 다음 그림 3과 같으며 교량과 차량의 상호작용은 고려하지 않았다. 이때 레일조도는 한국기계원구원(대전)의 실측 데이터를 이용했으며 약 -3.7~4.2mm의 범위에 있다. 교량은 경간장 25m의 단경간에 대해서 차량하중에 의한 정적처짐과 경간장의 비율(처짐비)이 1:1500이 되도록 고려하였다.

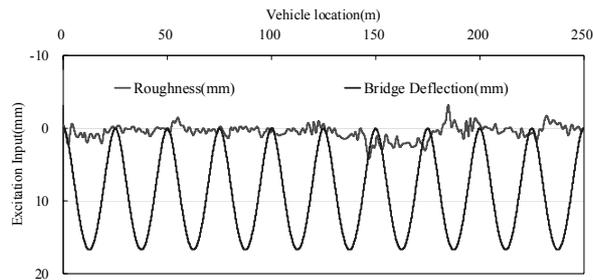


그림 3 정적가진 형태의 레일조도와 교량의 처짐

#### 3.2. 주행중 자기부상열차의 부상공극의 변화

시속 50, 100, 150, 200km/h의 속도로 주행할 경우에 대해서 해석결과를 수록하였으며 이때 총 주행거리는 250m이다. 해석결과 그림 4에서 보듯이 저속구간에서는 EMS의 모델화에 따른 결과의 주행 중 부상공극의 변화가 크게 없으나 고속으로 진행될수록 차이가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 선형화 모델의 경우 부상공극이 기준점(0)을 지나 가이드레일 위를 통과하는 비정상적인 결과를 도출하지만, 비선형 모

델의 경우 이러한 오류가 발생하지 않음을 확인할 수 있고, 선형화모델의 경우 공칭부상지점(-10mm)을 기준으로 부상공극이 상하 대칭적으로 운동하지만 비선형 모델의 경우 각 속도별로 그 기준점이 변화되는 것을 확인할 수 있다.

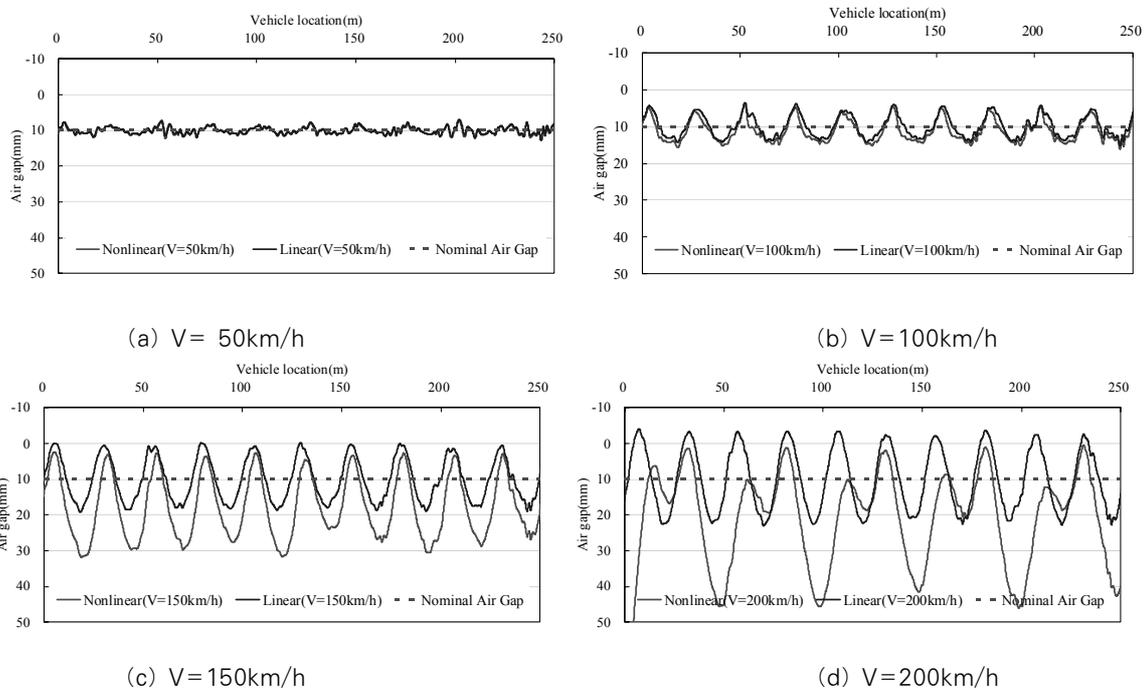


그림 4 EMS모델 방법(선형 및 비선형)에 따른 주행중 부상공극의 변화

#### 4. 결론

본 연구는 자기부상력의 선형 및 비선형효과가 이동 중인 자기부상열차의 부상공극에 미치는 영향을 파악하는데 목적이 있다. 이를 위하여 주행 중인 자기부상열차의 1자유도 차량에 대한 운동방정식을 구성하고, 전압의 제어기법으로는 LQR을 적용하였다.

해석결과 차량의 속도가 증가함에 따라 자기부상력의 선형 및 비선형효과가 자기부상차량의 부상공극에 미치는 영향이 큰 것을 확인하였다. 결국 자기부상열차의 정확한 해석을 위해서는 자기부상력의 비선형효과를 고려한 해석이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

한형석, 임봉혁, 이남진, 문석준, 정정훈 (2007) 전자석 현가 시스템의 부상 공극 주파수 응답 해석. 2007년도 한국철도학회 추계학술발표회, 한국철도학회, pp. 912-917.  
 MATLAB (2004) Control System TOOLBOX, The Math Works Inc.  
 Sinha, P.K. (1987) Electromagnetic Suspension Dynamics & Control, Peter Peregrinus, London,U.K.