

초고속 자기부상열차를 위한 하이브리드형 부상 추진 시스템 설계

조한욱, 한형석, 이종민, 김봉섭, 노규석, 김동성

한국기계연구원 자기부상연구실

Design of Hybrid Type Levitation and Propulsion System for High-Speed Maglev

Han-Wook Cho, Hyung-Suk Han, Jong-Min Lee, Bong-Sup Kim, Kyu-Suk Rho, Dong-Sung Kim
Dept. of Magnetic Levitation and Linear Drive, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM)

Abstract - This paper deals with the design considerations of electro-magnet (EM)-permanent magnet (PM) hybrid levitation and propulsion device for magnetically levitated (maglev) vehicles. Several design considerations such as machine structure, manufacturing, and control strategy are described. In order to verify the design scheme and feasibility of control strategy, dynamic test set is implemented and tested.

1. 서 론

현재 우리나라의 자기부상열차의 연구는 지난 2006년 착수한 도시형 자기부상열차 실용화 사업과 시속 550 km급 차세대 자기부상열차의 핵심기술개발, 두 가지의 목표를 중심으로 활발히 진행되고 있다. 중저속 도시형 자기부상열차 실용화 사업의 경우, 성능, 설계안, 차량의 외형 등의 기본 사항들이 마련되어 기술적 보완 및 절충을 통한 차량의 설계/제작이 이루어지는 기술 상용화 단계에 있으며, 초고속 자기부상열차 연구개발의 경우, 기술선진국의 초고속 자기부상열차 기술현황 조사 및 기술의 장단점 검토, 시뮬레이션/기본 실험을 수행하고 한국형 초고속 자기부상열차의 기본사양 결정과 개념설계를 도출하고, 성능을 검증 기본 연구가 한창이다 [1].

초고속 주행을 위한 자기부상열차의 추진시스템으로는 지상 1차형 LSM이 가장 적합한 방법이며, 이미, 상전도 흡인식 LSM은 독일에서 개발되어 Transrapid에 적용되었고, 초전도방식의 LSM이 일본 MLX에 적용되어 각각 상용화 및 상용화 추진 중에 있다. 한편, 최근들어 에너지밀도가 높은 회토류계의 영구자석 제조기술의 발전, 제작가격의 저하로 인하여, 영구자석을 사용하는 전기기기에 관한 연구 개발이 매우 활발히 이루어지고 있는데, 이와 관련한 영구자석형 선형동기전동기는 다양한 선형동기전동기 중에서 추력밀도가 가장 높고, 고속운전에 매우 유리한 장점을 갖는다. 게다가, 자기부상열차 응용에 있어서 가동자를 영구자석이 담당할 경우 최소전력 제어(Zero-Power Control)에 의한 부상장치로 용융이 가능하여 부상 추진장치가 일체화된 시스템의 개발이 가능하고, 차량의 경량화를 꾀할 수 있어 기존의 EMS (Electro-Magnetic Suspension) 방식에 비하여 상대적으로 큰 공극, 높은 가속성능, 지상선로 가공공차 상승으로 인한 경제성 향상등의 장점을 취할 수 있다 [2]. 미국 MagneMotion社는 하이브리드형 LSM을 이용한 흡인식 부상방식을 갖는 시험기를 개발하여 축소형 모델 단계의 자기부상열차 실험 및 제어 알고리즘에 관한 연구를 지속적으로 진행중이다. 본 논문에서는 한국형 초고속 자기부상열차에 하이브리드형 부상 추진 시스템을 적용할 경우 관련 핵심 장치의 설계 및 제어에 관한 내용을 다루고, 초기 시험 모델의 특성을 간략히 기술한다.

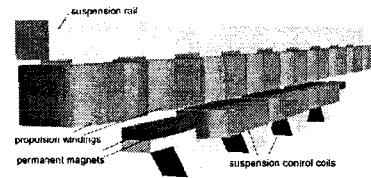


그림 1. MagneMotion 社의 하이브리드형 부상 추진 시스템

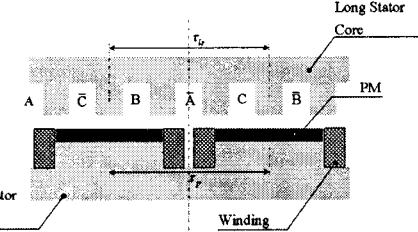
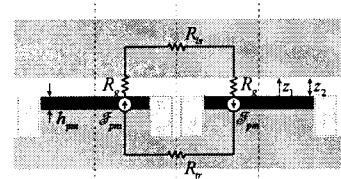
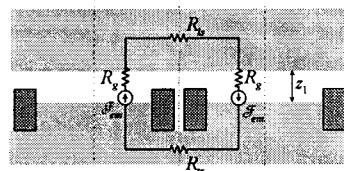


그림 2. 하이브리드형 부상 추진 시스템 기본 구조



(a) 영구자석만 포함하는 자기회로 구조



(b) 전자석만 포함하는 자기회로 구조

그림 3. 하이브리드형 부상 추진 시스템 자기회로 구조

2. 하이브리드형 부상/추진 장치 설계 고려 사항

2.1 기본 구조 및 자기회로 해석

그림 1은 미국 MagneMotion 社의 축소형 시험기에 적용된 하이브리드형 부상 추진 시스템을 나타낸다. 그림에 간단히 표기된 바와 같이, 긴 고정자(Long-Stator) 측은 적층 규소강판 및 접증관형 권선이 설치되어 있고, 차량측에 부착되는 가동자측은 적층 규소강판 코어, 영구자석 및 제어 코일로 구성되어 있다. 그림 2는 초고

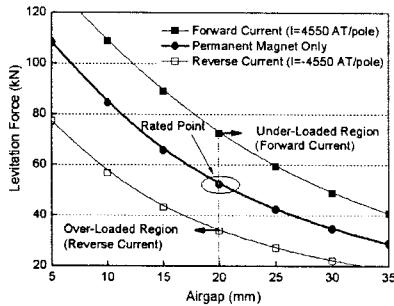


그림 4. 부상 공극 및 제어 전류의 크기에 따른 부상력 특성

속 자기부상열차 적용을 위한 하이브리드형 부상 추진 시스템의 기본구조를 나타낸다. 긴 고정자 측은 대전력 스위칭 추진 3상 권선을 취부하기 용이하도록 치/슬롯 구조를 구성하였고, 가동자측에는 영구자석 및 제어 코일이 설치된다. 그림에서 τ_{ls} 와 τ_p 는 긴 고정자측 국파 치(Pole-pitch)와 가동자측 국파치를 각각 나타낸다.

그림 3은 부상 추진 시스템의 1-극 모델을 영구자석 및 제어 코일에 의한 자기회로로 각각 나타낸 것이다. 부상 시스템의 흡인력은 영구자석에 의한 힘 (F_{pm})과 제어 코일에 의한 힘 (F_{em})의 중첩에 의하여 발생하며, 총 부상력 (F_m)은 식(1)과 같다.

$$F_m = F_{pm} + F_{em} \quad (1)$$

$$= \frac{A_m (\mu_0 H_{pm} h_{pm})^2}{\mu_0 z_2^2} + \frac{\mu_0 N^2 A_m}{4} \left(\frac{i}{z_1} \right)^2$$

여기서, A_m 은 자극 면적, H_{pm} 은 영구자석 자계의 세기율 각각 나타낸다. 그림 4는 공극 및 전류의 크기에 따른 부상력 특성을 나타낸다.

2.2 최소 전력 제어 (Zero-Power Control)

초고속 자기부상열차 시스템은 비접촉 전력발생/공급 장치에 의하여 차체의 부상 전력을 공급하므로, 부상제어부의 전력 소비량의 최소화를 통한 차량중량의 경량화가 절실히 요구된다. 기존 도시형 자기부상열차 시스템(UTM: Urban Transit Maglev, 1989~현재, KIMM)에 적용된 상전도 흡인방식(EMS)의 경우 일정공극의 유지를 위해 일정전류가 지속적으로 투입되어야 하므로, 상대적으로 큰 차상의 전력변환장치가 요구된다. 하이브리드형 부상 추진 시스템의 경우 차체의 부상력을 이론적으로 모두 영구자석에 의한 흡인력을 적용하는 최소전력제어를 기반으로 하므로, 초고속 자기부상열차에서 요구하는, 차상 전력변환장치의 용량을 최소화 및 차량의 총 중량을 현저히 줄일 수 있는 매우 큰 장점을 갖는다. 또한, 제어 전류량이 급격히 감소하므로 자기부상 마그네트의 열적특성 또한 향상시킬 수 있는 좋은 대안이 될 수 있다.

2.3 추력 리플 저감

자기부상열차의 추력은, 고정자 및 가동자의 치/슬롯 구조 및 돌극구조 등, 공극 자계의 불균일성에 의하여, 비교적 큰 맹동(Ripple)값을 갖는다. 영구자석을 갖는 가동자가 고정자의 치/슬롯을 갖는 자기회로와 정렬하려고 하는 방향으로 디텐트력이 발생하는데, 공극이 상대적으로 매우 큰 자기부상열차의 추진 시스템에서는 가동자의 돌극성에 의한 릴리펀스력 보다는 디텐트력 성분이 추력 리플의 주된 성분이 된다. 본 논문에서는 자기부상열차 승차감을 1차적으로 지배하는 요소인 추력 리플성분을

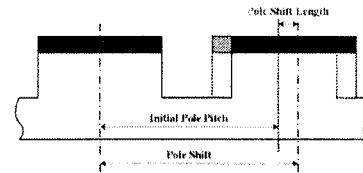


그림 5. 극위치 이동

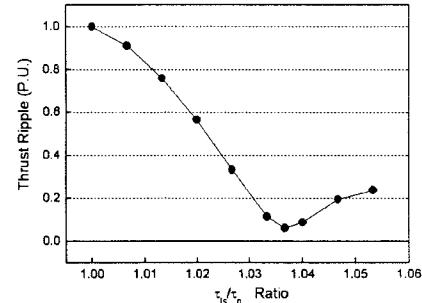


그림 6. 극위치 이동에 따른 추력 리플의 변화

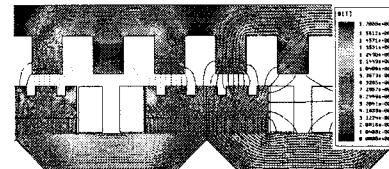


그림 7. 자속 분포도

최소화 하기 위하여 그림 5와 같이 극위치 이동기법을 적용하여, 회전형 기기에서의 스튜와 동일한 효과를 자기부상열차의 선형추진시스템에서 얻었으며, 극위치 이동에 의한 추력리플의 변화는 그림 6에 나타내었다.

2.4 선형 발전기

자기부상열차와 같이, 대부분의 자기부상 기술이 적용된 이송/수송 장치의 경우 차상의 전력 공급을 위한 몇 가지 방법을 적용하는데, 가장 일반적인 방법은 제3궤조 방식의 팬토그래프 접전 형태이며, 중저속형 자기부상열차에 적용된 바 있다. 제3궤조 방식은 기계적 접촉을 이용한 접전 시스템이기 때문에 고가의 유지보수 비용과 신뢰성 저하, 대전력 마찰 접촉에 의한 위험성 증가 등의 단점을 갖는다. 따라서, 독일과 일본의 초고속형 자기부상열차인 Transrapid와 MLX는 선형발전기를 차상에 취부하여 비접촉 차상 급전을 하는데, 시속 350~400 km 이상의 초고속형에서는 제3궤조 방식의 급전이 불가능하기 때문에 사실상 가장 유일한 방법 중 하나이다. 단, 선형발전기의 발전 전력량은 차상 1차 권선의 전력량과 공극 등에 매우 민감하게 반응하는 값이다. 그림 7에 선형 발전기의 형태를 간략히 나타내었다.

2.5 고정자 코어 및 권선

초고속 자기부상열차의 특징은 추진 시스템의 고정자가 수십~수백 km에 걸쳐 설치된다는 점인데, 이는 초고속 자기부상열차의 단위길이당 건설비를 기존 바퀴식 철도차량에 비해 수십배 증가시키는 주요 원인이 된다. 선형동기전동기의 고정자는 적층 규소강판이며, 회전형 기기에 비해 낮은 주파수로 운전되므로 0.5t 정도의 전기 강판을 적층하여 적용한다.

3. 시뮬레이션 및 하이브리드 부상제어 시험

3.1 유한요소해석 및 동특성 시뮬레이션

그림 7은 유한요소해석에 의한 선형 추진시스템의 자

속 분포도를 나타낸다. 해석결과에 의하면, 최소전력 제어가 수행될 때, 선형전동기의 추력상수는 약 1.53 (N/A, @20 mm) 이다.

그림 8은 초고속 자기부상열차를 위한 하이브리드형 부상/추진 시스템의 제어 및 동특성 시험을 수행하기 위하여 구성한 축소형 자기부상 제어 시험기를 보여준다. 그림에서와 같이, U-형 하이브리드 마그네트를 구성하고, 시속 550 km 의 가진 형태를 모의하기 위한 선로 가진장치를 구성하였다. 부상 제어에 사용된 제어기는 TI TMS320F28335 DSC 를 사용하였다. 표 1 은 하이브리드형 자기부상 제어 시험기 기본 사양을 나타낸다.

한편, 시스템의 특성식으로부터 상태방정식을 식(2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}(t) \\ \Delta \ddot{x}(t) \\ \Delta \dot{i}_x(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_x}{m} & 0 & -\frac{k_i}{m} \\ 0 & i_0/(z_0 + h_{pm}) - R/L_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ i_x(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{m} \\ 1/L_0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ f_d(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 계수 k_x , k_i 와 L_0 각각 식(3)-(5)와 같다.

$$k_x = \frac{\mu_0 N^2 A_m i_0^2}{2(z_0 + h_{pm})^3} + \frac{\mu_0 A_m (H_{pm} h_{pm})^2}{z_0^3} \quad (3)$$

$$k_i = \frac{\mu_0 N^2 A_m i_0^2}{2(z_0 + h_{pm})^2} \quad (4)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A_m}{2(z_0 + h_{pm})} \quad (5)$$

여기서, R 은 저항, m 은 부상체 총 중량, z_0 는 공극, $f_d(t)$ 는 외란을 각각 나타낸다.

그림 9는 자기부상열차의 선로측 가진을 고려하여 설계된 부상 제어 시험기의 제어 특성 실험 결과를 보여주고 있다. 부하 중량으로 약 20 kg 이 추가되었을 때, 공극 및 인가 전류의 과도 특성을 제어-온, -오프 시의 특성을 각각 보여주고 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이, 하이브리드형 자기부상 시스템의 최소전력제어 성능이 제어 구간에서 매우 양호하게 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 한국형 초고속 자기부상열차로써 우선 순위를 갖고 선정된 하이브리드형 부상 추진 시스템의 설계를 위한 중요한 고려사항들을 상세히 다루고, 제작된 부상제어 시험기의 최소전력제어 성능을 검증하여 향후 연구방향의 타당성을 제시하였다.

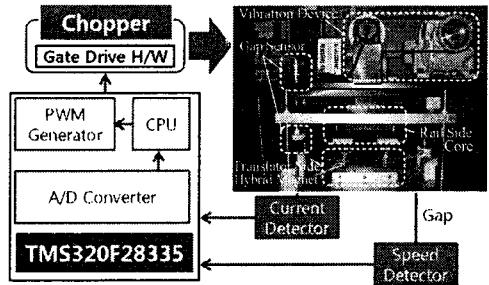
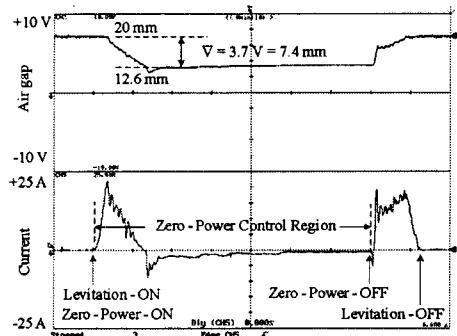


그림 8. 하이브리드형 부상/추진 시스템 구조

표 1. 하이브리드형 자기부상 제어 시험기 기본 사양

항 목	사 양
영구자석 부상력	482 N(@g=15 mm)
무부하 중량	24.8 kg
무부하 공극	15 mm
코일 저항	0.56 Ω
코일 인덕턴스	40 mH
턴수	365 Turn



(b) 실험 결과

그림 9. 하이브리드형 부상/추진 시스템 기본 구조 및 최소전력 제어 실험

[참 고 문 헌]

- [1] 조한욱, 방제성, 한형식, 성호경, 김동성, 김병현, “한국형 차세대 자기부상열차 개발을 위한 선진기술 분석 및 국내연구 현황,” 대한전기학회 논문지, 제57권, 10호, pp.1767-1776, 2008.
- [2] Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, and Ju Lee, “Review of maglev train technologies,” IEEE Trans. Magn., vol.42, no.7, pp.1917-1925, 2006.