

실용화 자기부상열차의 부상용 전자석 설계 검토

DESIGN STUDY OF ELECTROMAGNET FOR MAGLEV

강병관* 김국진** 김봉섭*** 최규철****
Kang, Byung-Gwan Kim, Kuk-Jin Kim, Bong-Sub Choi, Gu-Chul

ABSTRACT

MAGLEV is the vehicle which can run in levitated condition by the electro-magnets, and the vehicle can run without any contact condition. In MAGLEV system achieving a high magnetic field for minimum weight is a noteworthy goal. Unfortunately the two aspects of this goal high field and low weight are contradictory. Suitable designs must be sought using optimization techniques. In this paper, magnet attraction force is calculated and conformed by experimental data for designing a electro-magnet.

1. 서론

자기부상열차는 저공해 신교통 시스템으로서 추진방식에 따라 중·저속형과 고속형으로 구분할 수 있으며, 부상방식에는 상전도 흡인식(EMS)과 초전도 반발식(EDS)이 있다. 상전도 흡인식 고속 추진 방식인 독일 Transrapid는 중국 상하이 농양역에서 푸둥공항까지 약 33km를 상업운행중에 있으며, 상전도 흡인식 중·저속 방식인 일본 HSST는 2005년 애지현 국제박람회를 대비하여 약 8.9km의 상업화 노선을 현재 건설중에 있다. 국내에서 개발 진행되고 있는 자기부상열차는 중·저속용으로 선형유도전동기에 의해 추진되고 상전도 흡인 방식에 의해 부상되는 열차로서 1988년부터 개발에 착수하여 대전 EXPO'93 관람객 수송을 위한 HML-03, 과기부 대책과제로 대전 기계연구원내 시험선로 1.3km에서 시험 운행중인 UTM-01등을 통하여 실용화에 필요한 기본기술을 습득하였으며 현재 산업자원부 중기거점과제로 실용화를 위한 자기부상열차를 개발하고있다.

상전도 흡인식은 부상용 전자석의 흡인력을 이용하여 자기부상열차의 차체를 지상궤도에 대하여 일정 간격으로 부상 시키는 방식으로 전자석의 설계는 자기부상열차 설계의 가장 기본으로 전자석의 최적 설계는 차량의 경량화 및 안정성에 큰 영향을 미치며, 최적 설계가 되기 위해서는 운전조건, 설치조건, 하중조건, 온도조건 등을 모두 만족하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 실용화자기부상열차의 조건에 따라 설계 제작된 전자석의 해석 및 정특성 시험기로 그 결과에 대한 고찰을 기술한다.

* (주)로템 중앙연구소, 선임연구원, 정회원

** (주)로템 중앙연구소, 수석연구원, 정회원

*** 한국기계연구원, 선임연구원, 비회원

****(주)우성마그네트, 기술연구소장, 비회원

2. 전자석 및 정특성 시험기 사양

2.1 전자석의 기본 사양 및 구조

표1은 전자석의 기본 설계 사양을 보여주고 있으며 그림1은 전자석 취부 구조를 나타낸다.

표 1. 전자석 주요 설계 사양

항 목	단 위	내 용
Vehicle Total Weight	TON	30
No. of Magnet per Vehicle	EA	24
Initial Air Gap	mm	17
Nominal Air Gap	mm	10
Stagger	mm	5
Magnet Pole Width	mm	32
Coil Width	mm	80 x2
Magnet Pole Length	mm	670
No. of Coil Turns	TURN	350 x 2
Total Mass	kg	153

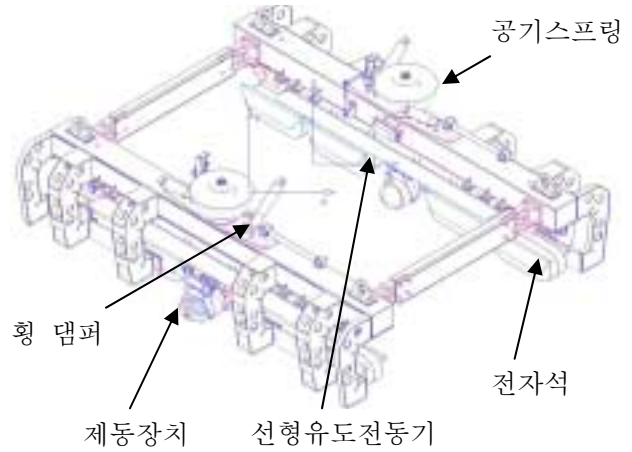


그림 1. 전자석 취부 구조

2.2 정특성 시험기 기본사양

정특성 시험기는 전자석의 부상력을 계측할 수 있도록 그림2와 같이 대향 레일의 Leg부의 폭 방향 중심부에 둥근 봉이 들어갈 수 있도록 4개의 구멍을 가공, 봉에 의해 부상력이 전달될 수 있게 하고 봉의 직하에 압축형 1,000kgf Load Cell을 4개 설치 하였으며, 횡방향 복원력의 계측은 대향 레일 측방 직각의 2개소에 1,000kgf Load Cell을 설치하였다.



그림 2. 정특성 시험기 외형도

3. 전자석 해석 및 시험 결과

3.1 FEM 해석 방법

전자석을 설계하기 위해 FEM해석기법을 사용하였으며, 정자장의 맥스웰방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \times A = J \quad (1)$$

$$\oint_c H \cdot dl = I \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\oint_s B \cdot ds = 0 \quad (4)$$

$$B = \mu H \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \nabla \times A = 0 \quad (6)$$

식(3), (4)에서 식(6)과 같은 항등식을 이용하여 식(7)과 같이 자기벡터포텐셜 A를 정의한다.

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

식(5)와 식(7)을 식(1)에 대입하여 정리하면 식(8)과 같다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (8)$$

매질이 등방성이라면 식(8)은 식(9)와 같이 된다.

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (9)$$

3.2 FEM 해석 결과

해석조건은 정격공극 10mm, 코일 재질 알루미늄, 700 turn(0.25mm x 80mm), 전자석코아 재질은 pure iron, 레일의 재질은 SS400이다.

그림 3과 4는 전자장 해석 S/W를 사용하여 해석 한 결과로서 자속의 분포 및 밀도가 비슷하게 나타남을 알 수 있으며, 그림5, 6은 전류변화에 따른 부상력과 공극에 따른 부상력을 그림7은 레일 및 전자석 코아 재질의 자화특성을 그림8은 단면 자속밀도를 나타낸 그래프이다.



그림 3. 전자석 2차원 해석 모델

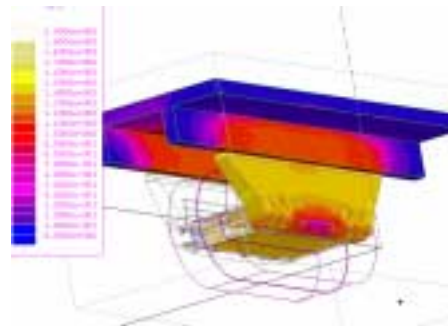


그림 4. 전자석 3차원 해석 모델

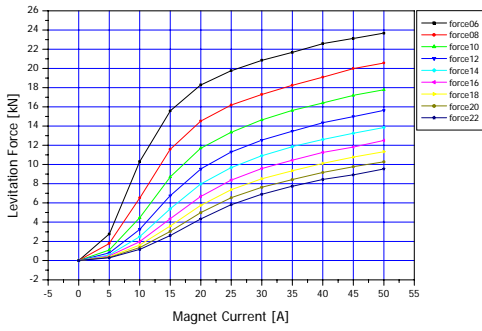


그림 5. 전류 & 부상력 특성

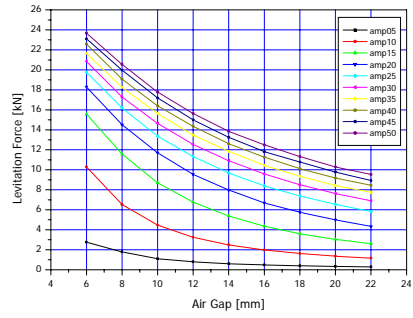


그림 6. Air Gap & 부상력 특성

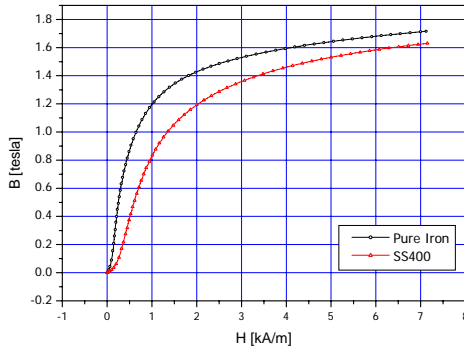


그림 7. 재료의 초기 B-H 특성 곡선

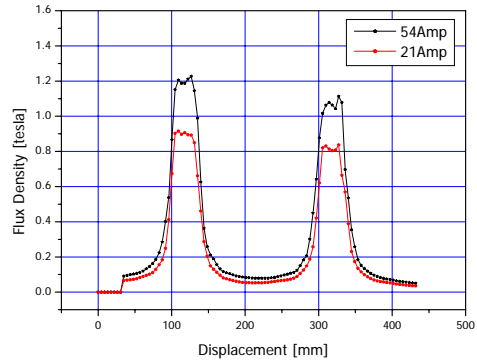


그림 8. 자속밀도 분포

3.3 정특성 시험결과

그림9는 공극 및 스테그량의 변화에 따른 전류대 수직력 시험 결과를, 그림 10은 전류대 횡력의 시험 결과를 보여주고 있다.

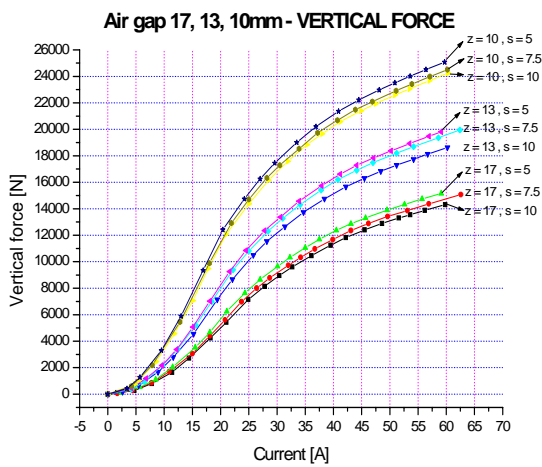


그림 9. 전류-Vertical Force

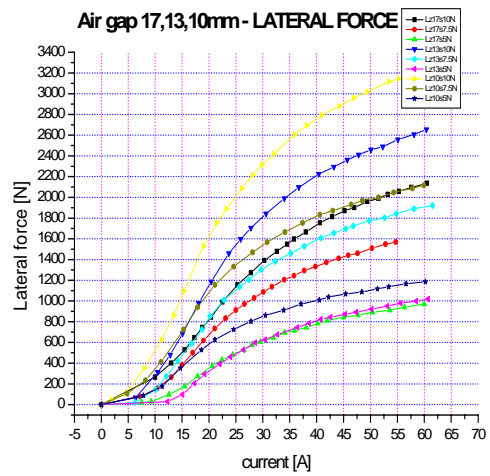


그림 10. 전류-Lateral Force

그림11과 12는 전류의 변화에 따른 횡변위 대 수직력 및 횡력을 보여주고 있다.

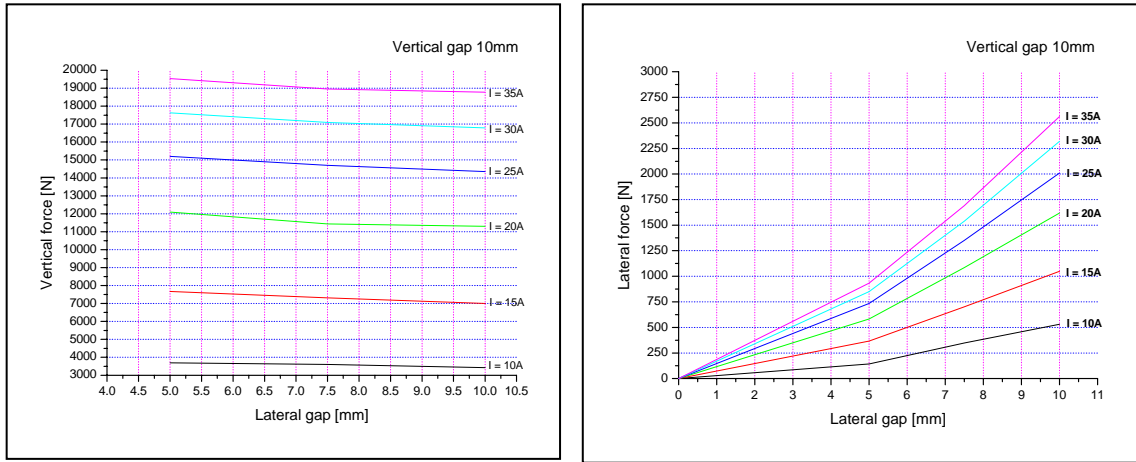


그림 11. Lateral displacement-Vertical Force 그림 12. Lateral displacement-Lateral Force

4. 결론

본 논문에서는 상전도 흡인식 자기부상 열차용 전자석의 해석 및 시험을 통하여 전류 변화에 따른 수직방향 및 횡 방향의 힘과 공극의 변화 및 횡방향 변화에 따른 수직 및 횡 방향의 힘을 측정하였다. 여러 조건에서 전자석의 특성을 파악하는 것은 공극의 제어를 위한 기본적인 데이터로 활용되며 차량의 운전조건에 적합하게 설계 및 제작되었는지 확인하였다. 만차 조건을 기본으로 FEM 해석 및 측정결과 전류가 40[A]이상에서 해석치와 측정치의 차이점이 있으며 40[A] 미만에서는 비슷한 결과를 보였으며, 정격공극 10mm, stagger 5mm에서 12,250[N]의 부상력이 발생되기 위해서는 약 21[A]의 전류가, 초기공극 17mm, stagger 5mm에서 12,250[N]의 부상력을 발생하기 위해서는 약 42[A]가 소요됨을 알 수 있다.

참고문헌

1. 정현갑외 1명(1995), “상전도흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구”, 대한전기학회 1995년도 하계학술대회, pp.46~49
2. 강병관외 2명(1995), “상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적연구(II)”, 대한전기학회 1995년도 추계학술대회, pp.12 ~ 14
3. 신판석외 3명(1997), “A design of analysis of a magnet for Urban Transit Maglev Vehicle(UTM-01) in korea”, 15th International Conference on Magnet Technology
4. 김봉섭, “maxwell-3D FEM을 이용한 UTM(Urban Transit Maglev)-02 부상용 전자석 설계”, 대한전기학회 2000년도 하계학술대회, pp.699~701
5. P.K.Sinha, “Electromagnetic Suspension Dynamics & Control”, Peter Pererinus Ltd., United Kingdom, 87