

영구자석을 이용한 자기부상 시스템

강도현, 김용주

한국전기연구소 전력기기연구실

이준각

대보마그네틱(주)

ABSTRACT

The advantage of the controlled permanent magnet system for magnetic levitation is the considerable improvement in levitation force to weight ratio and the reduced rating of the on-board power supply. A combined support and guidance technique with selfstable guide behaviour reduce the expense of control and power electronics. An important feature of this system is the simplified mechanical construction of track and the vehicle does not embrace the guide way. Therefore surface mounted as well as elevated tracks are possible. The magnet was designed to provide a lift force of 750kg for a 3 ton prototype vehicle with 4 magnets by KERI and built by Dae-Bo Magnetic Co., LTD. The paper also describes the assembling technology for permanent magnets, the experimental setup and test results for lift force, guidance force and flux distribution.

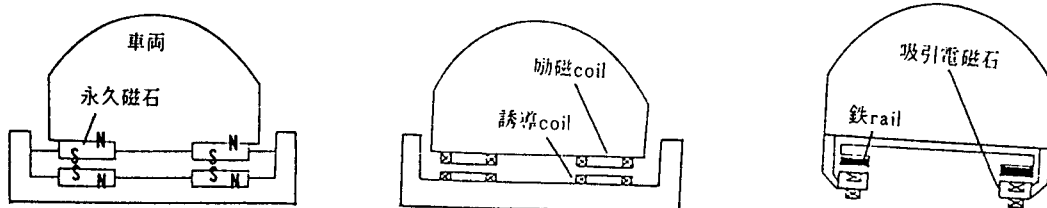
1. 서론

본 연구는 과학기술처 국제공동연구과제로 한국전기연구소와 독일 Braunschweig 대학 IEM 연구소가 수행한 "한국형 자기부상열차 모듈개발"의 연구결과로 영구자석에서 정격 부상력을 발생시키고 Control coil에 의한 전류를 통해서 부상제어를 행하는 영구자석 과 상전도 전자석이 결합한 형태로 부상시 에너지가 많이 필요하고 부상력비가 적은 기존의 상전도 전자석의 단점을 해결하였다.

철심 재료는 포화자속밀도가 높은 순철을 수입하였으며 영구자석재료는 국내에 생산하는 Ferrite를 사용하였으며 대보 마그네틱(주)에서 제작하였다.

2. 부상원리 및 영구자석 해석

2.1 부상원리



(1) 영구자석 방식

(2) 초전도 방식
그림 1. 자기부상 방식

(3) 상전도 방식

자기력을 이용해서 차량을 선로로부터 부상시켜서 불리적인 접촉을 하지 않도록하는 방법은 반발력(Repulsive force)과 흡인력(Attractive force)을 이용하는 방식으로 나눌 수 있는데 그 형태는 그림 1과 같이 3가지로 나눌 수 있다.

그림 1.(1)은 영구자석을 이용한 방식으로 마주보고 있는 영구자석의 극성이 서로 상반될 때 부상력을 발생시키는데 기술적으로는 어렵지 않으나 Track에 영구자석을 설치해야 하고 고속주행에는 적합하지 않아 저속의 M-Bahn에만 사용되고 있다. 그림 1.(2)는 반발력을 이용하는 방식으로 주로 차량에 탑재된 초전도 자석(Superconducting magnet)을 이용하여 가이드웨이에 설치되어 있는 도전성 코일과의 상호간에 발생하는 반발력을 이용하는 방식이며, 이를 EDS(Electrodynamic Suspension)라 하며, 그림 1.(3)은 흡인력을 이용하는 방식으로 차량에 탑재된 전자석과 가이드웨이에 설치된 강자성체(Ferromagnetic material)와의 사이에 발생하는 흡인력으로 차량을 부상시키는데 이를 EMS(Electromagnetic Suspension)라고 한다.

2.2 영구자석 해석

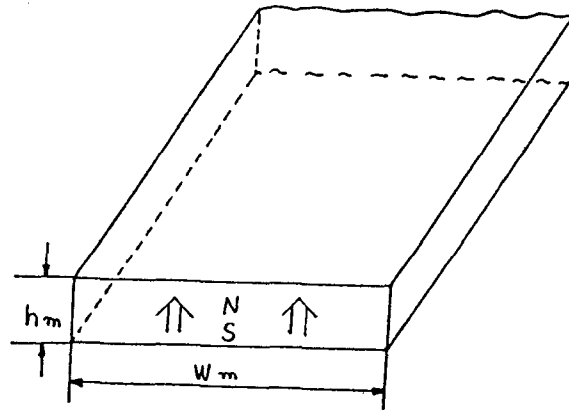


그림 2. 영구자석 모델

위의 그림 2의 영구자석 모델은 잔류자속이 $Br[\text{wb/m}^2]$ 이고 자석의 폭 W_m , 높이 h_m , 상부가 N극, 하부가 S극이고 길이가 무한대인 것으로 이것을 등가자화전류로 계산하여 일반적으로 이해하기 수월한 등가전류 모델로 변형시키면 그림 3과 같이 평행선으로 등가화시킬 수 있다.

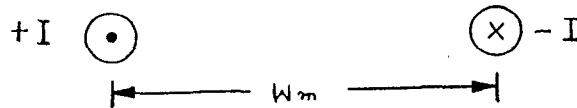


그림 3. 등가자화전류 모델

current sheet $A[\text{A/m}]$ 는 다음 식 1로 표현되므로

$$A[\text{A/m}] = \frac{Br}{\mu_0 \mu_r} \quad (\mu_r = \text{영구자석 비투자율}) \quad \text{----- 1}$$

$$\text{등가자화전류 } I[\text{A}] = \frac{Br}{\mu_0 \mu_r} \cdot h_m \quad \text{----- 2}$$

식 2에 의해서 전류가 결정되면 영구자석 해석영역내의 자계는 그림 4와 같이 나타나는데 이것은 유한요소법으로 해석한 결과이다.

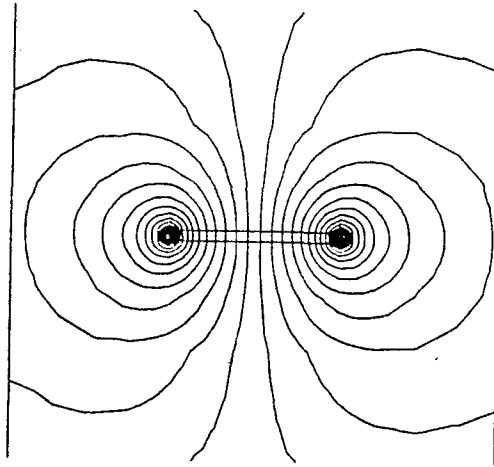
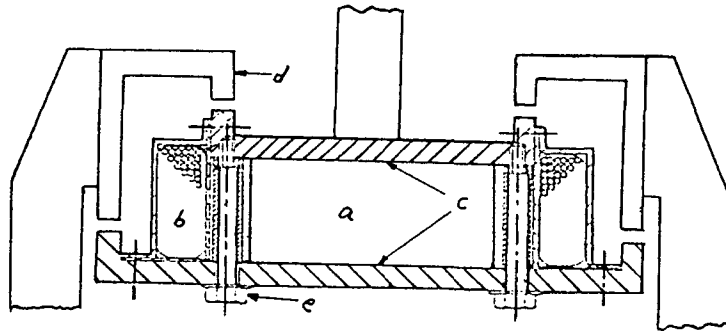


그림 4. 유한요소법에 의한 영구자석의 자속분포도

3. Controlled permanent magnet의 설계 및 제작

3.1 전자석 형상 및 Track



(a) 영구자석 (b) Controll coil (c) 철심 (d) 레일 (e) 영구자석 지지블록

그림 5. 전자석 형상

그림 5는 전자석의 형상으로 초기부상상태는 전자석과 Rail이 접촉한 형태로 공극이 없으며 이때의 부상력은 영구자석에 의해서 발생시키고 있는데 자속의 크기는 영구자석의 잔류자속과 같으므로 영구자석의 보존에도 적합하다.

부상시킬 경우 Control coil에서 발생하는 자속이 영구자석에서 발생하는 자속에 대해서 반대방향으로 작용하게하여 부상시키며, 정격하중으로 정격공극에 도달했을때는 영구자석에 의한 흡인력만으로 부상하게 되어 하중의 증가에 대해서는 Control 코일의 전류제어로 정격공극을 유지케한다. 따라서, 부상에 필요한 Power는 매우 적으므로, 전력 변환장치의 용량과 크기도 매우 적어지므로 부상의 효율성을 높이고 영구자석에 의한 자기회로의 자기저항이 크지므로 인덕턴스(L)이 감소하게 되므로 회로시정수가 적고 응답속도가 빨라진다.

부상실패시 영구자석에 미치는 충격을 완화시키기 위해 지지 Bolt와 Pipe를 영구자석의 가장자리에 설치하였다. 그림 5에서 같이 영구자석의 높이가 공극에 비해 상당히 크므로 회로의 인덕턴스값이 매우 적으므로 외부의 부하변동에 대해 응답속도가 빠르므로 공극을 적게해도 무방하므로 5[mm]의 공극을 정격공극으로 정했으며 누설자속을 줄이기 위해 외측 양쪽의 공극을 아래로 정했다.

한개의 전자석에 대해 공극이 4개 있으므로 Core와 Rail의 폭을 10[mm]로 선정했으며 2개의 공극을 가지고 20[mm]로 선정하는 경우보다 측면변위에 대해 안정성이 매우 높게 된다.

영구자석은 일반적인 Ferrite 재료를 사용하고 있는데 사용재료의 잔류자속밀도는 0.4[T]정도이고 운전 자속밀도는 에너지 밀도가 가장 높은 0.25[T]에서 정했다.

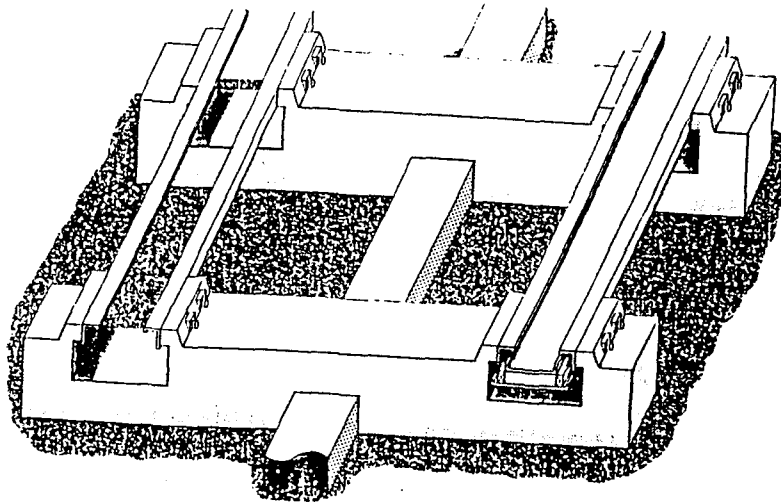


그림 6. 전자석 및 Track 형상

그림 6은 Track의 형상을 보여주고 있는데 Rail이 차량의 전자석을 감싸고 있는 형태가 되므로 간단하고 높은 기둥을 세울 필요가 없다.

3.2 전자석 설계

부상력을 최저 2,500[N/m]에서 최고 14,000[N/m]의 범위내에서 선정할 경우 전자석의 최적설계치를 찾기위하여 영구자석의 단면적이 주어진 경우 영구자석의 높이, 철심 Bottom plate의 높이, 철심 Top plate의 높이, Pole폭, Pole 높이, 코일폭을 파라메타로 하여 부상력을, 계산한 길과 가장 높은 부상력, 부상력비율 얻을 수 있는 최적의 설계치를 도출했다. 이를 근거로하여 전력변환장치의 용량을 선정하기 위하여 소비전력량을 계산하였으며 제어상수를 도출했다.

이 최적화 설계를 근거로 하여 부상력 750Kg인 전자석을 제작하였다.

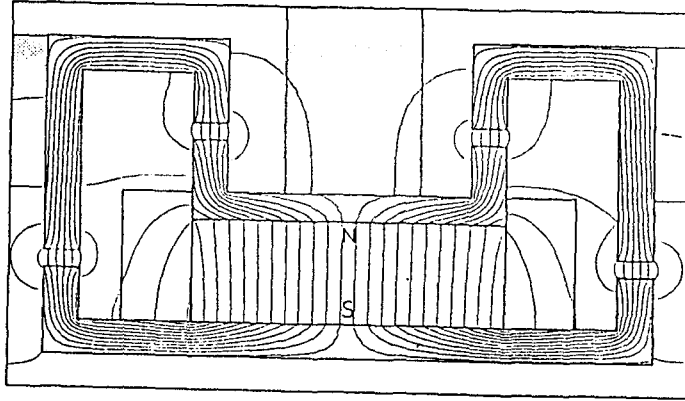


그림 7. 전자석의 Equi-potential line

그림 7은 전자석의 정격공극 = 5[mm], 영구자석 자화전류밀도 입력으로 하고 FEM으로 해석한 Equi-potential line이며 그림 8은 최적설계에 의해 제작된 전자석의 치수를 나타내고 있으며 그림 9는 공극에 따른 부상력의 크기이다.

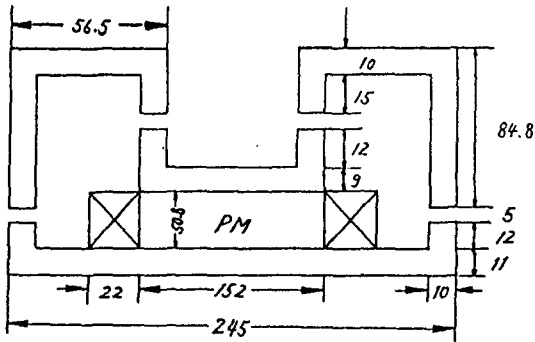


그림 8. 제작 전자석 치수

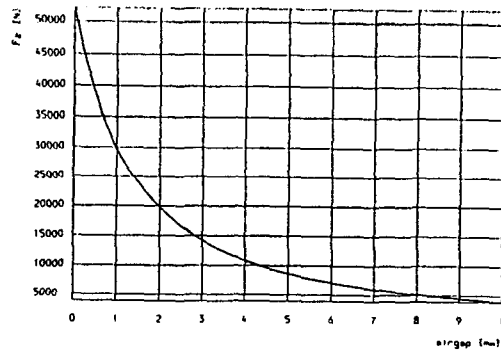


그림 9. 공극-부상력 (제어전류=0)

3.3 제작

그림 7의 영구자석 길이는 918[mm], 높이 50.8[mm], 폭 152[mm]인데 주문제작이 불가능하므로 152 x 25.4 x 102을 36개 접착제로 부쳐서 제작하였으며 영구자석의 이음매에 Bolt와 Pipe를 설치할 수 있는 홈을 만들었다.

4. 결론

본 연구는 일반 상전도 부상전자석보다 부상력이 크고 전력소비가 적은 새로운 형태의 전자석(영구자석과 Control coil이 결합)을 제안하였으며 이것의 설계와 제작을 통해서 이의 가능성을 입증하였다.

참고 문헌

1. H.Weih, "High performance magnetic levitation with controlled magnets and magnets with stable characteristics", Maglev, 1988.