# 영구자석을 이용한 상전도 자기 부상 열차용 전자석 개발 연구

이 석원[1], 신 판석[1], 정 현갑[2], 김 봉섭[2]
[1]홍익대학교 전기공학과, [2]한국기계연구원 자기부상열차 개발사업단

# Development of a hybrid-type magnet for MAGLEV vehicle using permanent magnet.

Suk Won Lee[1], Pan Seok Shin[1], Hyun Kap Chung[2] and Bong Seop Kim[2]
[1]Hong-Ik University, [2]Korea Institute of Machinery & Materials(KIMM)

**Abstract** - Experiments and design efforts have been made to develope a hybrid-type magnet for magnetically levitated(MAGLEV) vehicle using NdFeB permanent magnet. The permanent magnet, which embedded in both poles of the magnet, has been designed, analyzed using FEM program. The model is manufactured and tested to verify its performance.

## 1.서 론

현재 한국기계연구원과 현대 정공(주)에서 공동으로 개발하고 있는 도시형 자기부상열차(UTM : Urban Transit Maglev Vehicle)는 상전도 흡인방식의 부상용 전자석을 사용하고 있으며, 각 차량 1량에는 24대의 전자석을 사용하고 있다. 그러므로, 자기부상차량의 경량화를 위해서는 전자석의 경량화(부상력 대 자중비의 증가) 노력이 주안점이 되어 왔다.

필자들은 부상력/자중 비 $\rho$의 값을 키우기 위해 전자석의 자중을 감소시키기 위한 연구들 즉, 전자석 대향레일 형상별에 따른 부상력 크기 변화[1]와 전자석 coil 형상을 알루미늄 각선재에서 알루미늄 박판재로 변경하여 경량화를 시도하였고[2,3], 이를 통해 전자석 전체의 형상을 축소시켜 자중을 감소시켰으며, 코아재를 전기연철에서 일반구조용 강으로 대체하여 재료비절감 효과를 얻게 하는[4,5] 연구들을 해왔다..

본 연구에서는 부상용 전자석의 부상력 대 자중비를 더욱 증가시키기 위하여 전자석의 코아 pole에 영구자석을 매입하였을 경우에 있어서 영구자석의 설계방법, 형상 및 크기의 결정 방안에 대해서 여러가지 model로 나누어 해석을 시도하였다. 또한, 양쪽 pole에 모두 영구자석을 매입하였을 경우에 대해서도 비교 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 해석 조건 및 model 사양

부상용 전자석의 효율은 부상력 대 자중비로 평가되기 때문에 그것을 높이기 위한 방안으로 그림 1에 나타낸 것처럼 희토류 영구자석(NdFeB)을 매입한 것이다. 본 연구에 이용된 전자석은 공극길이 11 [mm], 정격부상력 12 [kN], 정격전류 21 [A], 권회수 330 [Turn], 전자석의 길이 650 [mm]의 사양을 가지고 있으며, 코아부의 재질특성은 포화자속밀도 1.73 [T], 초기투자율 6000 [H/m]인 전기 연철, 영구자석(NdFeB)의 재질특성은 잔류자속밀도 1.1 [T], 비투자율 1.05 [H/m]의 값을 갖는다.

그림 2와 같이 영구자석의 두께 t, 영구자석이 이루는 각도 $\alpha$, pole면에서 영구자석까지의 거리 h를 변경하면서 simulation한 결과 t=10 [mm], $\alpha$=90°, h=20 [mm]로 결정하여 설계하였다[5]. 그림 3(a)와 같이 설계된 영구자석을 제작상의 어려움 때문에 그림 3(b)와 같이 돌출부가 있는 형태로 제작되었으며, 이 제작 model을 simulation하여 실험 결과와 비교하였다. 한쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우 효율이 증가될 것이라 예상하였으며, 더 나아가 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우의 효율이 개선될 것을 기대하여 그림 1(b)처럼 설계하여 한쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우와 부상특성을 비교하였다. 그림 4는 영구자석 매입형 전자석의 외형 사진이다.

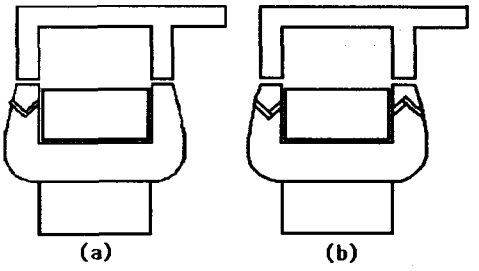



그림 1. (a) 한쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우 전자석 단면
(b) 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우 전자석 단면

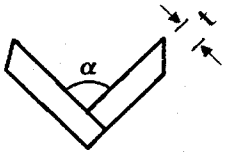



그림 2. 영구자석 설계 mode

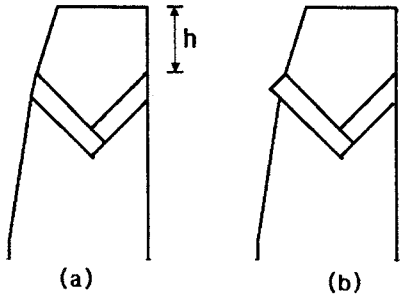



그림 3. (a) 설계 model (b) 제작 model

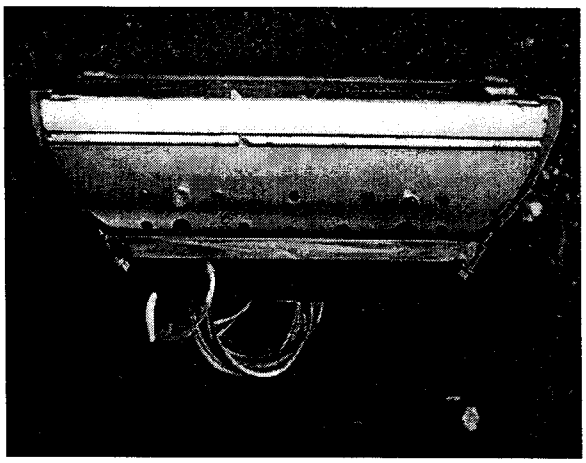


그림 4. 영구자석 매입형 전자석의 외형 사진

### 2.2 해석 결과

#### 2.2.1 제작 model과 설계 model의 부상력 비교

실험용으로 제작된 model은 설계 model에 비해 제작시 발생되는 제작가공 오차 등으로 인하여 실제 설계 model과는 차이가 있다. 본 연구에서 자계해석은 유한요소 프로그램인 FLUX2D를 이용하여 해석하였다. 그림 5는 설계 model과 제작 model 그리고 한국기계연구원에서 실험한 제작 model 실험치를 비교 분석한 것이다.

실험용 제작 model이 설계 model보다 부상력이 일률적으로 높게 나오는 것은 영구자석의 부피가 전체적으로 증가하여 energy적(B · H)이 증가했기 때문으로 생각된다. 또한 제작 model의 실험치가 해석치 보다 일률적으로 약 6 [%]정도 작게 나온 것은 영구자석의 자화량과 가공 제작시의 정밀도가 설계값 보다 작았음에 기인한 것으로 판단된다. 정격전류 21 [A]에서 설계 model의 부상력이 11.38 [kN]으로 제작 model의 부상력 12.04 [kN]에 비해 작지만, 정격전류를 24 [A]로 한다면 설계 model로 정격 부상력을 발생시킬 수 있을 것이다.

그림 6은 정격전류 21 [A]에서의 자속선도를 보여주고 있고, 그림 7에서 보면 영구자석 위치에서의 자속선도가 pole의 폭이 좁아지는 곳에서 안쪽으로 모아지는 경향이 있다는 것을 볼 수 있다. 그림 8은 영구자석이 없는 경우와 정격 전류에서 비교한 공극 자속밀도 분포이다. 공극의 중앙 부분에서 보면 영구자석을 매입한 경우가 약 10 [%]정도 크게 나오는 것을 알 수 있다.

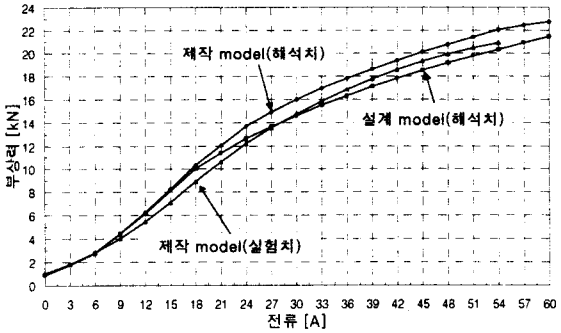
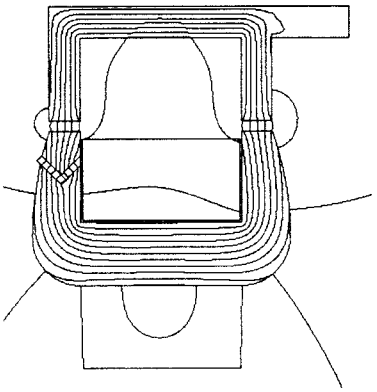



그림 5. 매입형 영구자석의 부상력 특성



림 6. 영구자석 매입형 전자석의 정격에서의 자속선도

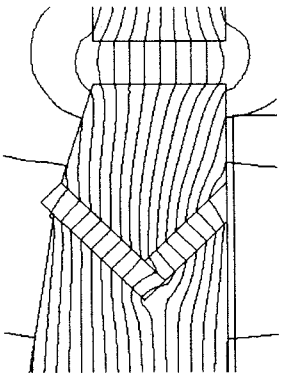


그림 7. 영구자석을 매입한 부분의 자속선도

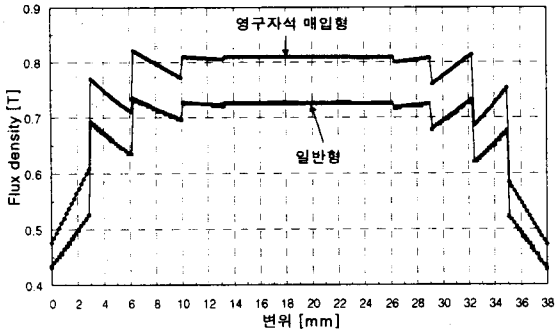



그림 8. 공극에서 자속밀도분포 비교

### 2.2.2 양쪽 pole에 매입한 경우 부상력 비교

그림 9는 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우의 정격전류에서의 자속선도를 보여 준 것이다. 한쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우에 비해 양쪽 pole에 영구자석을 매입하였을 때 부상력의 향상과 자중비 증대를 기대한 연구이다. 그림 10에서 나타난 것처럼 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우 초기(전류가 15 [A]일 때까지)에는 부상력이 한쪽 pole에 매입한 경우보다 20~30 [%] 더 크게 나오지만, 입력전류가 증가하여 코아와 rail부분의 자속밀도가 증가하여 영구자석의 잔류자속밀도(1.1[T])에 근접하게 되면 코아와 rail부분의 자기저항이 증가하게 된다. 결과적으로, 영구자석이 자기저항의 역할을 하게 되어 부상력의 증가율이 둔화되는 결과를 초래한다. 그 원인을 분석해본 결과 그림 11에 보여진 것처럼 36 [A]부근에서 한쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우와 양쪽 pole에 매입한 경우 공극 부분의 자속밀도가 거의 일치하다가 교차되어 36 [A]이상에서는 한쪽 pole에 매입한 경우의 자속밀도가 커짐을 알 수 있다. 또한, 그림 12를 보게되면 전류가 증가함에 따라 한쪽 pole에 매입한 경우보다 양쪽 pole에 매입한 경우의 자기저항의 훨씬 커지고 있음을 알 수 있다.

그림 10에서 알 수 있듯이 전류가 36 [A]이상이 되면 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우가 더 작은 부상력을 가지며 60 [A]일 때는 약 4 [%]정도 작아진다. 비록 고전류 영역에서는 작게 나올지라도 정격전류 21 [A]일 경우를 보면 한쪽 pole에 영구자석을 매입한 예보다는 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우가 더 높은 부상력을 가짐을 알 수 있었다.

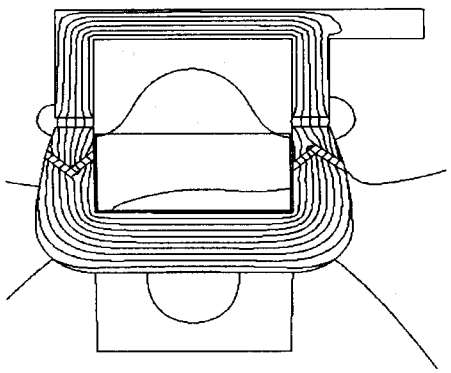


그림 9. 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우 정격에서의 자속선도

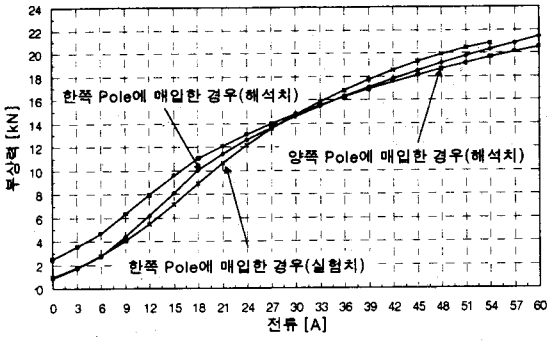



그림 10. 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우 부상력 특성

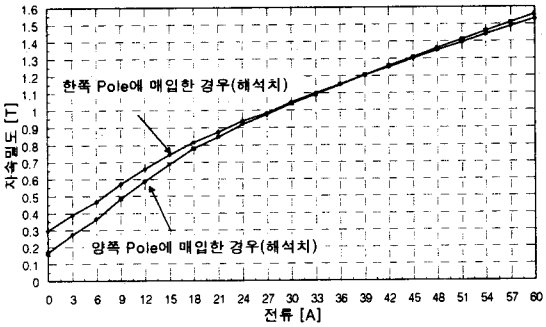



그림 11. 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우 자속밀도 분포 특성(공극부분)

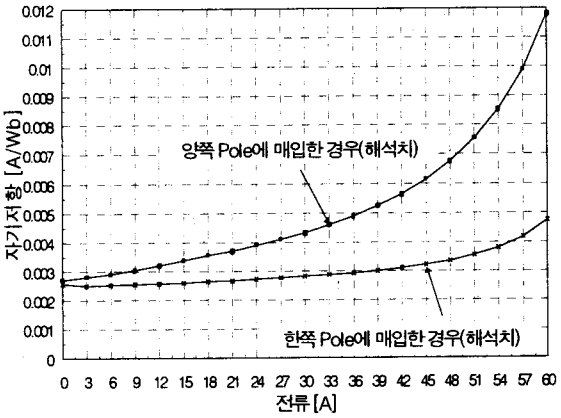



그림 12. 양쪽 pole에 매입한 경우 자기저항 특성(Core부분)

## 3. 결 론

흡인식 자기부상용 전자석의 부상력 대 자중비의 향상을 위해 전자석의 코아부에 영구자석을 매입한 경우를 해석한 결과, 제작 model이 설계 model에 비해 부상력이 약 5 [%]정도 크게 산출되었으며, 이것은 제작의 용이성을 고려하여 제작하였기 때문이다. 실험결과 30 [A]이하에서는 제작 model의 부상력이 작았지만, 30 [A]이상에서는 계산값 보다 더 큰 부상력이 나왔다. 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 경우의 해석은 36 [A]이상에서는 영구자석의 포화로 인해서 부상력이 오히려 감소하지만, 초기 입력전류에서는 20~30 [%]정도 높게

나오게 되고 정격전류 21 [A]에서는 약 5.5 [%]정도 높게 결과가 나왔다. 따라서, 정상운전시를 고려하면 양쪽 pole에 영구자석을 매입한 전자석을 사용하는 것이 부상력 대 자중비를 향상시킬 수 있는 방안이 될 것이라 판단 되지만 고전류의 운전시에는 영구자석의 효과가 오히려 역방향으로 작용된다는 것을 알 수 있다.

본 연구과정에서 산출되었던 문제 중에서 영구자석의 포화문제 해결대안과 고 전류 인가시 발생될 온도특성 문제, 영구자석 매입의 형태와 위치등에 관한 연구가 지속되어져야 할 것으로 생각되어진다.

## [참 고 문 헌]


[1] 김봉섭, 정현갑, "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(Ⅰ)", '95 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 46~49, 1995. 7. 20~22.

[2] 김봉섭, 정현갑, "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(Ⅱ)", '95 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 49~51, 1995. 11. 18.

[3] 김봉섭, 정현갑, "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(Ⅲ)", '96 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 12~14, 1996. 11. 16.

[4] 김봉섭, 정현갑, "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(Ⅳ)", '97 대한전기학회 50주년 하계학술대회 논문집(EMO20), pp. 67~73, 1997. 7. 21~23.

[5] 김봉섭, 정현갑, 하경덕, 신판석 "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(Ⅴ)", '97 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 28~31, 1997. 11. 29.