

# FLUX3D를 이용한 자기부상용 전자석의 특성 해석

이재건, 신판석

홍익대학교 과학기술대학 전기공학과, 339-701 충남 연기군 조치원읍

## Characteristic Analysis of a Magnet for Magnetically Levitated Vehicle using FLUX3D

Jae-Kun Lee, Pan-Seok Shin

Dept. of Electrical Engineering, Hong-ik Univ. Chochiwon Chung-nam 339-701

### Abstract

A 3-dimensional analysis is desired for a magnet of magnetically levitated vehicle because the geometrical shape of the magnet is complicated and nonsymmetric. A FEM package of FLUX3D is used to analyze the characteristic of the magnet. Various quantities could be observed like levitation force, flux density distribution along the air gap, edge and fringing effect, leakage flux pattern, etc. The simulation results from FLUX3D are compared with those of 2-D analysis and test results. There are a little difference between results due to the boundary conditions and magnetized B-H curve of the core

### 1. 서론

FLUX3D는 1980년대 말부터 프랑스의 한 연구구룹인 'Modelisation et CAO the Laboratoire d'Electrotechique de Grenoble'에서 개발한 전자장 해석을 위한 computer package이며 이전의 FLUX2D를 개발한 동일한 연구진에 의해 개발되었다. 임의의 한 단면만을 2 차원으로 해석만이 가능하게 되는 단점을 보완하고 문제점을 해결하기 위해 개발된 program이 FLUX3D이다. 2 차원 해석이 불가능한 부분, 즉 3 차원적인 비대칭형상을 가진 model, 예를 들면 부상용 전자석의 길이방향은 2 차원해석에서는 '대칭이고 무한대임'을 가정하여 계산하지만 FLUX3D에서는 3 차원 형상을 그대로 modeling하여 해석 할 수 있다[1].

FLUX3D의 post-processor는 해석된 결과를 보다 여러 가지의 각도에서 사용자가 볼 수 있게 해준다. 몇 가지의 외부함수를 입력하여 중으로써 2 차원 영역은 물론 3 차원 영역에서의 물리적인 현상을 관찰할 수 있다. 예를 들면 전자석의 내부에서의 자속량을 2 차원 graph는 물론이면 3 차원 그래프, vector의 방향, 세기 등을 볼 수 있다[2~3].

FLUX3D는 FLUX2D에 비하여 한 개의 program으로 인체화(module) 시킴으로써 사용 중에 program 밖으로 빠져나갈 필요가 없으므로 사용자에게 더 친숙하게 구성되어 있다. Modeling하는 과정 중에서 작업환경을 저작함으로써 실수로 인한 오작업 등을 찾아볼 수 있으며 back ground 영역에서의

solving작업은 물론 일부 반복작업을 사용자가 간단한 editing을 통하여 혼란 없이 간단히 처리할 수 있다[3]. 본 논문에서는 현재 한국기계연구원에서 개발 중인 모사형 자기부상열차에 이용할 전자석을 모델로 하여 특성을 해석하였으며 한국기계연구원의 실험결과를 이용하였다.

### 2. 3 차원 해석 조건

부상용 전자석은 DC로 운전되므로 해석의 기본 조건은 정자장으로 가정하였다. 해석의 간략화를 위하여 rail은 여자가 되는 부분만을 간략히 modeling하였으며 core는 중심에서 좌우방향과 길이방향으로 대칭이므로 전체 model의 1/4만을 해석하였다. 그리고 부상력 실험 장치와 같은 조건을 만족시키기 위하여 rail 일부분에 core와 같은 재질의 얇은 판을 modeling하였다.

표 1. 자성체의 재질 특성 실험 결과

	$B_r$	$\mu_r$ (초기투자율)
core	2.02	7000
rail	1.24	3600

표 1 은 순철을 이용한 전자석의 core와 구조용 강판을 이용한 rail의 재질 특성을 보여주고 있다. 시편을 이용한 B-H Curve의 실험결과(표1)를 이용하여 simulation을 한 결과 그림 1과 같이 부상력이 많은 차이를 보였다. 이것은 전자석 운전상의 B-H curve는 작은 시편을 이용하여 측정한 curve하고는 상당히 거리가 있음을 보여주고 있다. 따라서 core와 rail의 초기투자율( $\mu_r$ )의 값을 낮추어 주면서 균형한 값을 찾아내는 simulation을 하였다.

표 2. Simulation에 의해 균사화 된 재질 Data

	$B_r$	$\mu_r$
core	2.02	7000
rail	1.24	3500

표 2 의 값은 여러 번 되풀이 되어 균사화된 core와 rail의 재질 값이다. 이 값으로 simulation한 결과가 그림 2에 나타나 있다. 초기 투자율이 7000인 경우 그림 1과 800인 경우 그림 2를 보면 초기투자율은 부상력의 상승기울기를 좌우하고 있으며 전자석 전체의 운전시 투자율의 기울기는

simulation의 결과에서와 같이 상당히 낮은 것으로 판명되었다.

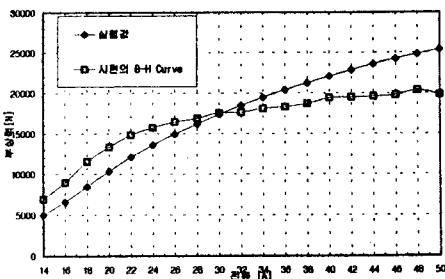


그림 1. 부상력의 비교(실험치-시편의 B-H Curve)

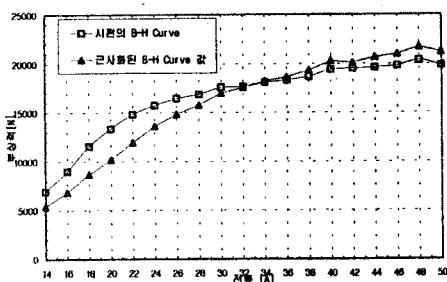
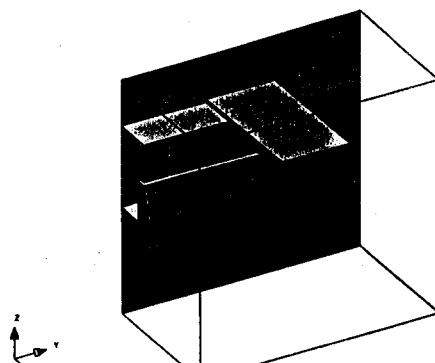


그림 2. 부상력의 비교  
(시편의 B-H Curve-근사화 된 B-H Curve 값)

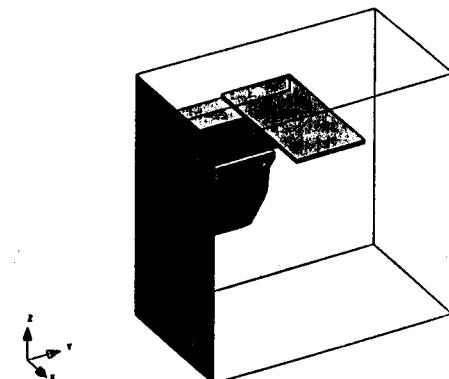
주변 경계조건(그림 3)은 실험장치의 조건과 일치되도록 일부는 고정경계조건(dirichlet condition)으로, 일부는 자연경계조건(tangential constraint, normal constraint)으로하여 modeling하였다. model에 사용된 coil의 재질은 일반적인 특성을 사용하였다.

### 3. 전자석 해석 model

그림 4는 3차원 해석을 위해 FLUX3D program으로 modeling한 전자석의 형상을 나타내고 있다. 공극에서 전자석의 core의 길이는 1/2로 340 [mm]이며, rail의 길이는 450 [mm]로 하였다. rail위의 강판은 경계조건을 실제와 균사하게 하기 위하여 실험장치의 cross beam을 modeling 한 것이다.



(a) normal constraint



(b) tangential constraint

그림 3. 3 차원 해석 model의 경계조건

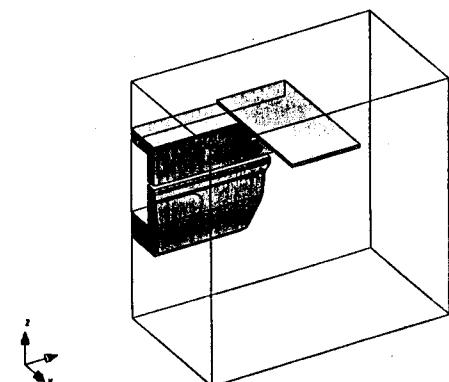


그림 4. 3 차원 해석 model

그림 5는 해석을 위해 FLUX3D program으로 modeling한 전자석의 형상을 나타내고 있으며 inductor coil의 형상을 보여준다. coil은 대칭면의 영향으로 2개의 완벽한 형상을 보여준다.

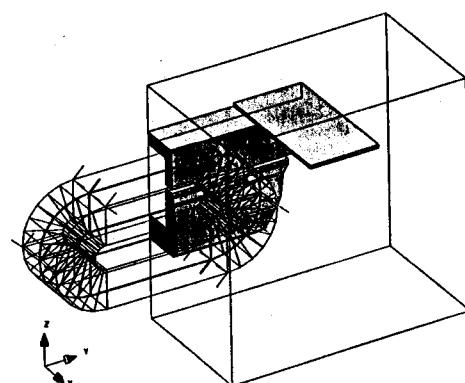


그림 5. 3차원 해석 model(inductor coil 포함)

### 4. 해석 결과

#### 4.1 초기부자율( $\mu_r$ )의 영향

core의 초기부자율  $\mu_r$ 은 시편에 의해서 측정된 7000으로

하여 해석할 때는 실험치와 많은 차이를 보았다. 전류의 증가에 따라 부상력이 증가하는 기울기는 전자석 core의 포화자속밀도와 투자율, rail의 포화자속밀도와 투자율에 따라 결정되므로 simulation을 통해서 운전시 전체 전자석 system의 투자율을 유출하는 방법을 모색하였다. 결국 core의  $\mu_r$ 값을 줄여나가면서 실험치와 유사한 값을 얻도록 하였고, core의  $\mu_r$ 값을 줄여나가면서 rail의  $\mu_r$ 값도 같이 줄였다.

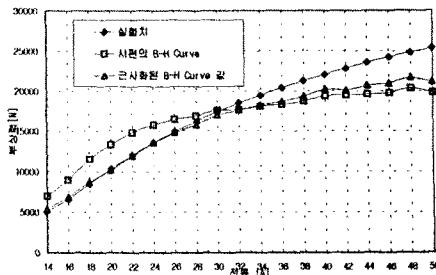


그림 6. 실험치와 계산치의 부상력의 비교

그림 6 은 실험치와 계산치와의 부상력의 차이를 보여주고 있다. 24 [A]이하에서는 simulation을 한 값이 1~3 [%]정도 많이 나오며 전류가 증가함에 따라 계산값의 포화현상이 두드러지면서 많은 오차가 나타나고 있다. 이것은 실험시 전류의 증가에 따라 부상력에 의해 gap이 점점 작아지는 영향도 있으며 전류의 증가에 따라 실험 장치 주변의 자성체가 포화되지만 simulation은 rail과 core 그리고 beam에만 자화된 움을 가정하기 때문에 이 점을 고려 해 준다면 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

#### 4.2 rail의 영향

그림 7 는 포화자속밀도  $B_s$ 값에 따른 부상력의 변화 추이를 보여주고 있다.  $B_s$ 가 커짐에 따라 정격전류 이하에서는 커다란 차이를 볼 수는 없지만 높은 전류에서는  $B_s$ 값이 높아짐에 따라 곡선이 점점 실험치에 근접해짐을 알 수 있다. 이것은 실험장치 주변에 많은 자성체가 존재하여 등가포화자속밀도가 상당히 크게 작용하고 있는 것으로 생각된다.

그림 7 는 전자석의 부상력을 실험실적으로 자성체 core의 특성값을 넣은 경우, simulation에 의해서 등가화된 자성체 core 특성값을 넣어서 계산한 결과를 부상력 측정 결과와 비교한 것이다. 실제 전자석의 B-II특성을 이론치의 특성과는 상당히 차이가 있는 것으로 예상되며 정확한 해석을 위해서는 실제운전상의 전자석 재질 특성이 실증되어야 가능하게 될 것이다.

#### 4.3 길이방향에 따른 공극자속밀도 분포

3 차원 해석을 함으로서 2 차원에서는 불가능한 길이방향의 자속밀도 분포를 관찰하였다. 그림 8에서 보는 것과 같이 전류가 증가함에 따라 전자석의 공극자속밀도가 증가함을 알 수 있고 전자석 유효길이의 계산을 실제의 길이보다 작게 산정하여 왔으나[4] 3 차원 해석결과 전자 속의 유효길이는 실제의 전체 길이로 산정해도 좋다는 것을 알 수 있다.

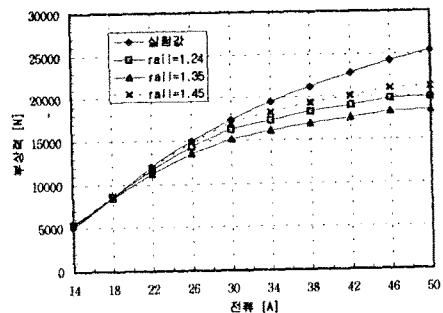


그림 7. Rail의 포화 자속밀도  $B_s$ 에 따른 부상력의 비교

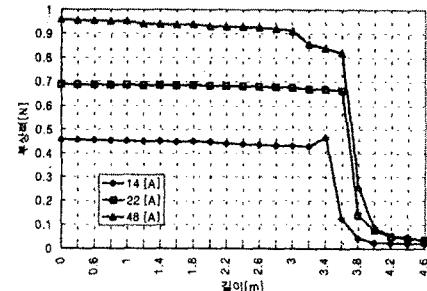


그림 8 길이방향의 자속밀도 분포

## 5. 결 론

자기부상용 전자석의 형상이 3 차원적인 해석을 필요로 하므로 본 연구에서는 3 차원 해석 program인 FLUX3D를 이용하여 그 특성을 해석하고 선개방향을 제시하였다.

이론적인 전자석 재질 Data를 이용하여 Simulation 되어진 결과값과 한국기계연구원에서 실험한 부상력의 실험치와 많은 차이를 보았다. 기계연구원의 실험장치의 주변환경을 고려하지 않은 부분에서 생겨난 오차와 시편에 의해 측정된 core 재질의 특성과 실제운전상의 재질특성에 많은 차이가 있는 것 같다. Simulation에 의해서 근사화 된 재질 값이 최적의 값으로 예상되나 정확한 해석을 위해서 재작된 재질의 초기 자화특성곡선이 실측되어야하며, 부상력 실험장치의 정확성, 주변 여진의 강제조진 등이 정상적으로 문서되어서 반영되어야 할 것이다. 또한 해석 program의 운용과 computer system의 한계로 인한 오차도 고려해야 하며, 차량의 속도가 고려된 특성을 해석한다면 더 가치있는 정보를 제공할 수 있을 것이다.

#### \* 참고문헌

- [1] 도시형 자기부상열차 전자석 설계 및 해석, 한국기계연구원, 1996. 2
- [2] G.Meunier, J.C.Sabonnadiere, J.I.Coulomb, "The Finite Element Post-processor of FLUX3D", IEEE TRANSACTION MAGNETICS, VOL. 27, NO.5, SEPTEMBER 1991
- [3] FLUX3D users manual, 1995 Magsoft, USA
- [4] 자기부상 및 추진시스템 기술개발, 한국전기연구소, 1992. 7