

### 자기적 비선형 특성을 고려한 자기부상 열차용 전자석의 특성 해석(I)

\*                    o \*\*                   \*\*\*                   \*\*\*\*  
임달호,            장석명,           박찬일,           이    주

\* 한양대학교   \*\* 충남대학교   \*\*\* 해사기술연구소   \*\*\*\* 한양대학교

Analysis on the characteristics of the magnet for MAGLEV  
in consideration with magnetic nonlinear properties (I)

\*                    o \*\*                   \*\*\*                   \*\*\*\*  
Dal-Ho Im,   Seok-Myeong Jang,   Chan-il Park,   Joo Lee

\* Hanyang Univ.   \*\* Chungnam National Univ.   \*\*\* KRISO  
\*\*\*\*

Abstract

This paper treats the analysis on the performance characteristics-levitation force, magnetic flux density and flux density diagram with current-of the magnet for magnetically levitated vehicle(MAGLEV) by using finite element method in consideration with nonlinear magnetic material properties. Therefore, these data are useful for the determination of rated current and optimal design parameter of magnets with magnetic saturation phenomena.

1. 서론

陸上에서 프로펠러 비행기보다 빠른 550[km/h]정도까지의 초고속으로 달릴 수 있는 磁氣浮上列車(MAGLEV)가 급세기중에는 출현될 전망으로, 세계적인 관심속에서 독일, 일본, 영국, 캐나다등에 의해 그 개발이 활발하게 진행되고 있다.

자기부상열차는 레일위를 電磁力에 의해 일정한 높이로 떠서 추진해 나가는 시스템이므로 크게 推進장치와 浮上장치로 구성된다. 일반적으로 추진장치로는 誘導型 또는 同期型의 리니어모터가, 부상장치로는 電磁石의 반발력 또는 흡인력을 이용하는 방법이 개발되고 있다.

즉 자기부상열차의 부상방식은, 1차축의 코일에 의해 발생하는 공극자속과 2차축레일의 도체판에 誘導되는 와전류와의 상호작용에 의해 발생하는 반발력을 이용하는 방식(EDL)과, 1차축의 자성체와 2차축레일의 자성체가 전자석으로 되어 발생하는 흡인력을 이용하는 방식(EML)이 있다. 반발력

을 이용하는 경우는 초전도코일을 이용하는 경우가 대부분이며 세계적으로는 일본의 MLU 시스템이, 흡인력을 이용하는 경우는 독일의 Transrapid, 일본의 HSST시스템이 대표적이다.

전자석은 자기부상열차의 운전특성 전반을 결정하는 중요한 부상시스템이므로 성능, 재료, 중량등의 여러면을 감안한 효율적인 설계를 해야 한다. 따라서 그 특성의 정확한 규명은 최적설계를 위한 필수적인 과정이므로, 본 논문에서 자기적인 비선형성을 고려한 정밀해석을 하여 최적설계를 위한 연구를 하고자 한다.

전기기의 해석법에는 여러가지가 있으나 최근 전자계산기의 발달에 의해 대형 영역에서도 신속한 계산이 가능해짐에 따라, 해석영역내에서의 磁束密度등 주요운전특성의 분포현상을 直觀的으로 표현하기 위하여는 유한요소법을 이용하는 경우가 가장 일반적이다. 또한 자성체를 이용하는 전기기기는 자기적인 특성이 非線形이므로 이를 정밀하게 고려하여 해석하는 것이 불가능하여 종래에는 線形으로 간이화 하여 일정한 상수로 취급하므로써 해석을 시행하여 왔다. 그러나 오늘날 전자계산기에 의한 계산기술이 발달함에 따라 部分線形化를 시켜 반복계산 함으로써 비선형문제를 해석하기 위한 시도가 각 분야에서 이루어지고 있다. 지금까지는 유한요소법에 의한 전자석의 선형적인 해석이 이루어진 바는 있으나 자기적 비선형성을 고려하여 해석된 경우나, 정확한 해석을 근거로 한 전자석의 최적설계를 위한 연구는 별로 없었다. 따라서 본 논문에서는 일반적으로 비선형해석법에 적용되는 뉴턴법<sup>1,2)</sup>에 의해 자기부상열차용

전자석을 구성하는 자성체의 자기적 비선형성을 고려하여 특성을 해석하였으며, 그 결과는 실험치와 거의 부합되는 정도의 좋은 결과를 보였다. 본 논문에서의, 비선형성을 고려한 해석법 및 개발된 알고리즘은 전자석의 최적설계는 물론이고 각 분야에의 응용이 가능할 것으로 사료된다.

2. 유한요소법에 의한 특성해석

2.1 해석모델 및 제한조건

2.1.1 해석모델

본 논문에서 해석하고자 하는 실제의 모델 및 유한요소법에 의한 해석을 위한 간이화모델은 아래의 그림. 1과 같다. 즉 U자형의 자성체로 이루어지는 1차축의 전자석과 2차축의 레일로 구성된 Stagger형으로 수직방향으로의 흡인력과 횡방향으로의 안내력을 동시에 발생시키는 부상시스템이다. 또한 2차축 레일에는 침목에 연결하여 고정시키기 위한 부분도 있으므로 이의 영향을 본 논문에서 해석검토하기 위하여 그림. 1과 같이 해석모델에 고려하기로 한다.

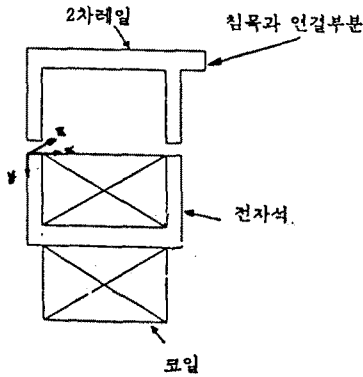


Fig. 1 Analytical model

2.1.2 제한조건

그림. 1의 실제모델을 유한요소법에 의한 2차원 해석을 용이하게 하기 위하여 간이화 하고자 할 때 다음과 같은 가정이 필요하다.

(1). 재질은 균일하며 등방성인 것으로 취급한다. 따라서 유한요소법으로 다루는 경우 각 요소의 부자율은 일정하며, 벡터포텐셜은 선형적으로 변화한다고 본다.

(2). 입력전류는 Z성분만 존재하며 Z축 방향의 변화는 무시하여 일정하다고 본다.

(3). 도체내부의 전류분포는 일정하다.

2.2 지배방정식 및 유한요소법의 적용

해석영역의 특성을 지배하는 방정식을 Maxwell의 전자방정식을 적용하여 유도하면 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = J_0 \quad (1)$$

여기서  $\nu$  : 자기저항률  $A_z$  : 벡터포텐셜 [wb/m]

$J_0$  : 입력 전류밀도[A/m<sup>2</sup>]

지배방정식(1)에 유한요소법을 적용하여 해를 구하기 위해서는 해석영역을 그림(2)와 같이 1차 3각요소로 분할하고 각요소 (e)의 내부에서는 벡터포텐셜  $A^*$  가 선형적으로 변화한다고 가정하면 임의의 점에서 벡터포텐셜  $A^*(x,y)$ 는 다음과 같이 근사화 된다.

$$A_e^*(x,y) = \sum_{i=1}^3 N_i \cdot A_{i0} \quad (2)$$

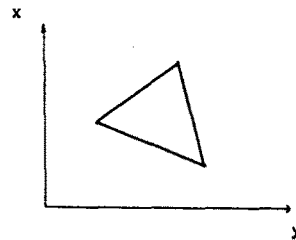


Fig. 2 Triangular element

여기서  $N_{i0}$ 는 보간함수로 다음과 같이 주어진다.

$$N_{i0}(x,y) = \frac{1}{2\Delta e} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (3)$$

여기서  $a_i = x_j y_k - x_k y_j$   
 $b_i = y_j - y_k$

$c_i = x_k - x_j$   $i, j, k$ 는 순환수

식(1)에서 에너지 범함수를 구하면 식(4)와 같다.

$$x = \int_{\Omega} \left[ \frac{1}{2} \left( \nu \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \nu \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy - \int_{\Omega} J_0 A dx dy \quad (4)$$

식(1)의 2계 편미분 방정식의 해를 구하는 것은 식(4)의 예

니지 범함수가 최소화되는 결점치 (A)를 구하는 것과 동가 이므로

$$\frac{\partial x}{\partial A} = \sum_{e=1}^{N_e} \frac{\partial x(e)}{\partial A} = 0 \quad (5)$$

이다. 여기서

$N_e$  : 전 해석 영역의 요소수

이며 식(5)를 만족하는 (A)가 식(1)의 해가 된다.

그리고 각 요소에서의 자속밀도는 식(5)와 같다

$$B(e) = \sqrt{\{B_x(e)\}^2 + \{B_y(e)\}^2} \quad (6)$$

$$B_x(e) = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\Delta e} C_{i0} A_i(e)$$

$$B_y(e) = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\Delta e} b_{i0} A_i(e)$$

2.3 B-H특성곡선의 線形化

SS41을 포함한 대부분의 자성체들은 일반적으로 자계의 세기 H와 자속밀도 B와의 사이에는 그림(3)과 같은 곡선관계로 非線形 특성을 갖는다. 이 관계를 식으로 표시하면 아래의 식(7)과 같다.

$$H = f(B) \quad (7)$$

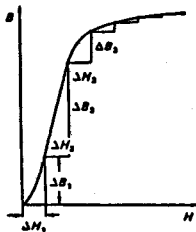


Fig. 3 The linearization of Hysterisis curve

따라서 입력전류의 변화에 따른 자계의 특성을 정확하게 해석하기 위해서는 그림.3 과 같은 磁化曲線에 따른 非線形解析이 필수이다. 전자계의 비선형해석법으로는 특성방정식을 부분적으로 선형화하여 해석하는 방법이 뉴턴법이 일반적이다. 즉 자성체(SM41)의 자화곡선에서의 한 要素에 적당한 부자율을 가정하여 자속밀도를 선형계산하고 그 결과

로 얻어진 자속밀도로 부터 자기저항을 수정하여 입력시킨다. 수정된 자기저항 으로 자속밀도를 재계산하여 수렴 판정을 행하고 수렴이 될 때까지 이러한 과정을 반복하여 수행하므로써 解에 도달 할 수 있다. 非線形 해석방법을 Flow-chart로 나타내면 그림.4 와 같다.

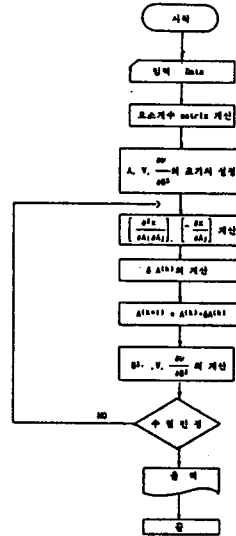


Fig. 4 The flow chart for non-linear analysis

2.4 힘의 계산

전자계해석에 있어서 힘의 계산은, 일반적으로 토렌츠의 힘 방정식이나 맥스웰 응력텐서법 또는 가상변위의 원리를 사용하는 데 본 논문에서는 가상변위의 원리를 사용하여 구하면 식(8)과 같다. 따라서 앞에서와 같은 과정에 의해 자계를 구한 후 식(8)에 의하여 부상력을 구하게 된다.

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad [N] \quad (8)$$

단 A는 전자석의 단면적[m<sup>2</sup>]이다.

3. 부상용 전자석의 설계 및 실험

3.1 전자석의 설계

실험을 하기위한 전자석은 아래의 그림. 5 와 같다. 즉 정면에서 직각형의 U자이며, 측면에서는 자로의 전체 단면적이 변하지 않게 하면서 권선의 방향, 전자석의 자극면의 극대화동을 피하기 위하여 사다리꼴로 만든 철심과 알미늄 사각형 코일의 권선으로 구성되는데 각 부분의 설계파라미터의 값은 아래와 같다.

철심의 윗면의 폭 : 12[mm], 창문폭 : 100[mm]  
 철심의 아랫면 폭 : 16[mm], 철심높이 : 74[mm]  
 철심의 윗면 길이: 450[mm], 권선수 : 857  
 철심의 아랫면 길이: 320[mm], 공극 : 6mm  
 권선의 단면적 : 1.5mm \* 3.3mm,  
 철심의 재질 : SS 41      철연 : H 중

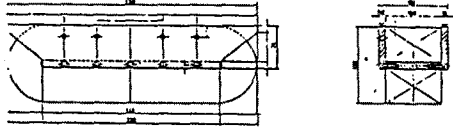


Fig. 5 The model of a designed magnet

(a: side view, b: front view)

3.2 실험

제작된 전자석의 하단에 일련 교와판 제품의 로드 셀을 설치하고 전자석의 권선에 전류를 흘리며 힘을 측정한다. 로드 셀이 스트레인값을 읽어내면 힘의 값으로 고정하여 전류에 따른 변화를 측정한다.

4. 특성계산 및 결과

부상용 전자석의 정지시의 특성을, 유한요소법을 적용하여 해석하였으며 이를 이론적 근거로 하여 아래와 같은 몇가지 최적설계를 위한 중요한 특성을 얻었다.

4.1 전류변화에 따른 부상력특성

전자석의 여자전류가 14[A]까지 2[A]씩 증가됨에 따라 부상력의 변화특성을 2장에서 전개한 특성식에 의해 계산한 값과 실제로 시험장치에서 실험한 값을 비교해 보기 위하여 그래프로 그린 것이 그림. 6 이다. 이로부터 14[A] 정도에서는 자기포화가 되므로 이 전자석의 정격운전점은 7[A] 정도가 됨을 알 수있다.

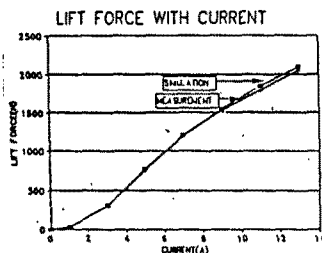


Fig. 6 Attraction force with current

4.2 전류변화에 따른 자속밀도변화

그림. 7 은 자석의 여자전류를 14[A]까지 변화시키며 전자석, 공극, 2차측 레일의 각부분에서의 자속밀도값의 변화 특성을 구한 경우이다.

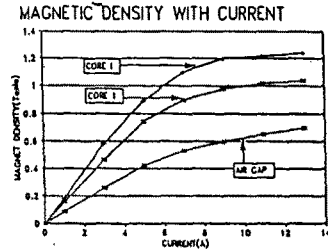


Fig. 7 Magnetic density with current

또한 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13[A]의 각각의 전류값에서의 자속분포를 직시적으로 이해하기 위하여 유한요소법에 의해 구하여 그려보면 아래 그림과 같다.

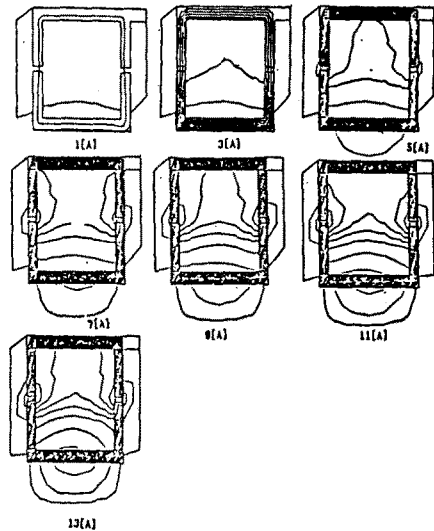


Fig. 8 The diagram of flux density with current

4.3 전자석의 폭과 기자력이 일정한 경우

最適レール幅の 결정

그림. 9 는 기자력에 의해 발생하는 자속밀도의 분포특성을 閉 磁氣回路를 구성하는 1차측인 전자석과 공극, 2차측인 레일에서 전자석의 폭과 기자력이 一定한 경우에, 레일의 폭을 4[mm]로부터 16[mm]까지 변화시켜 가며 자속밀도의 변화특성을 조사한 것이다.

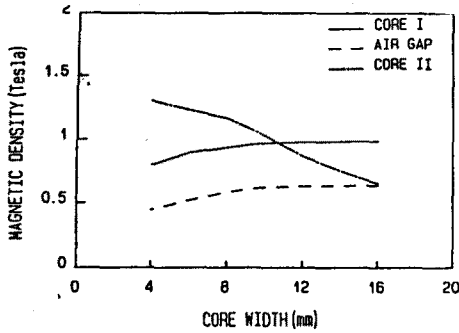


그림. 9 Magnetic flux density, vs. rail core width

즉 레일의 폭이 11[mm]에서 전자석과 레일에서의 자속밀도 값이 같으므로 변화특성의 反轉點이 된다. 전자석을 설계 제작하는 경우는 본 결과를 이용하면 레일의 폭을 줄여 재료를 절감함으로써 제작경비를 크게 절약할 수 있는 중요한 효과를 얻을 수 있다.

5. 결론

자기부상열차용 전자석의 자기적인 특성을 유한요소법에 의하여 非線形특성을 고려하여 해석하였고, 이를 이론적 근거 토하여 최적설계를 하기 위한 자료를 얻어 제시하였다.

6. References

- 1) 장석명"미국을 중심으로 한 자기부상열차의 응용전망 및 시장성과 우리나라의 개발방향" '90부상전철 기술전문위원회 워크샵 논문집(3-8, 1990.11) 및 대한전기학회지, vol.4 0-2, pp.20-29, 1991.2
- 2) 임달호의"상전도 자기부상시스템의 부상 전자석설계에 관한 연구"대한전기학회 하계학술대회, 1990.7
- 3) 강도현의"자기부상용 종속형 전자석의 설계 및 특성해석" 대한전기학회 추계학술대회, 1990.11
- 4) 한송엽, 권대영의"흡인식 부상 전자석의 3차원 해석"'90 부상전철 기술전문위원회 워크샵논문집, 14-i7, 1990.11
- 5) B.V. Jayawant"Electromagnetic levitation and suspension techniques"Arnold Ltd(book), 1981

- 6) S.A. Nasar & I Boldea"Linear electric motors:theory, design, and practical applications" Prentice Hall, Inc (book), 1987
- 7) I. Boldea & S.A.Nasar"Linear motion electromagnetic systems"Wiley interscience(book), 1985
- 8) P.K.Sinha" Electromagnetic suspension dynamics & control"Peter peregrinus Ltd(book), 1987
- 9) Yoshiro Jizo et al" Aanalysis of lift and drag forces in electromagnetic levitation system" IEEJ vol-B-97, 4. 215-222, 1977
- 10) J.F.Eastham" The performance of induction levitator s"IEEE trans, Magnetics, vol-MAG-20, no.5, 1984
- 11) S.Yamamura & H.Yamaguchi"A proposal of new structure for electromagnetic levitation system for trains"Inte r. Confer. MAGLEV transport'85, 165-172, 1985
- 12) S.Ratnajeevan H. Hoole "Computer-aided analysis and design of electromagnetic devices" Elsevier(book), 1989