

대전 EXPO'93 자기부상열차개발을 위한 전자석의 설계 및 특성해석

구대현*, 신판석, 김용주, 강도현

한국전기연구소 전력기기실

A Magnet Design and Analysis for DAE JEON EXPO'93 Magnetic Levitation System

Koo Dae-Hyun*, Shin Pan-Seok, Kim Yong-Joo, Kang Do-Hyun
Power Apparatus Lab., KERI

ABSTRACT

A magnet is designed and analysed using a finite element method program (FLUX2D), which will be employed to the 2-module MAGLEV test vehicle for developing of DAE JEON EXPO '93 Magnetic Levitation System. Levitation force, guidance force and thermal characteristics are examined according to the variation of parameters of the magnet ie. pole width, window area, rail configuration, input current and so on. An optimal geometry of the magnet are provided.

1. 서론

본 연구는 과학기술처 자기부상열차개발 국책 연구사업단의 1단계 목표인 대전 EXPO'93 에서 운행 전시될 자기부상열차의 전자석 설계에 관한 것이다. 50 여명의 승객을 태운 18 Ton 무게의 자기부상열차는 24개의 전자석을 이용하여 부상하게 되며 선형유도전동기를 이용하여 시속 40 Km로 달리게 될 것이다. 부상용 전자석의 설계는 여러가지 방법이 있을 수 있으나 본 연구에서는 계산적인 방법으로 각 parameter 값 들을 결정하고 2차원 전자계 해석 program(FLUX2D)을 이용하여 parameter 를 변화시키에 따른 각 특성들을 비교, 검토, 수정함으로써 18 Ton급 자기부상용 횡축형 전자석의 설계가 최적의 될 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용된 전자석의 model은 자기부상열차 개발 국책연구사업단에서 시험용으로 설치하게 될 2 - module 시험차량용 전자석의 설계를 기초로 한 것이다.

2. 전자석의 설계

자기부상용 전자석의 설계는 차량의 무게, 운행속도, 외력 등의 영향에 따라서 전자석의 수량, 전자석의 정격부상력, Rail의 형태등을 결정후 입력전류, 코일의 형태, 전자석의 Pole폭 및 높이를 계산한 다음 수치해석적 방법을 통하여 전자석의 특성을 파악해 전체 시스템에 맞는 전자석을 설계한다. 전자석의 성능은 전자석 자중에 대한 부상력의 비 (Lift Force/ Weight Ratio)와 단위하중을 들어올리는데 소요되는 전력량과의 비 (Power/Lift Force Ratio)로 나타내는데 전자석의 효율을 향상시키기 위해서 좋은 Core 제질 (포화 자속밀도가 높은것)과 고효율의 coil 재료가 사용되어야 한다. 본 연구에 사용된 Core의 제질은 순철을 사용하였고 Coil의 제질은 Al 각선을, Rail의 제질은 SS41을 사용 하였다.

2.1 전자석의 정격부상력 결정.

전자석의 정격부상력은 Pay Load가 포함된 전체차량무게를 사용할 전자석의 수량으로 나눈으로서 구할 수 있다. 그러나 설계부상력은 속도영향과 simulation 영향을 고려하여 정격설계 부상력은 937 Kg·중으로 한다. 또한 전자석의 부상력은 다음 식 (1)에 의하여 계산할 수 있다.

$$F = B^2 \times 2 PL / (2\mu_0) \quad (1)$$

여기서 B는 자속밀도 [T], P는 전자석의 pole 폭[mm] L은 전자석의 길이 [mm], μ_0 는 진공의 투자율을 나타낸다.

2.2 전자석의 Pole Face 결정

전자석과 Rail 사이 공극에서의 정격부상력은 식(1)과 같으므로 자속밀도를 0.7 [T] 로 가정하면 전자석의 Pole Face는 다음식 (2)에 의하여 계산 되어질 수 있다.

$$PL = F \mu_0 / B^2 \quad (2)$$

자속밀도 B = 0.7 [T]로 가정하면 식 (2)에 의하여 얻을 수 있다. P 와 L 의 값을 차량의 길이와 전체 System에 따라서 결정될 수도 있지만 최적의 P 를 먼저 결정하고 L값이 결정되어야 할 것이다.

2.3 전자석의 Window area 결정

공극에서 필요한 자속밀도를 발생시키는데 필요한 기자력 M은 다음 식 (3)과 같다.

$$M = 2B Z_0 / \mu_0 \quad (3)$$

여기서 Z_0 는 공극의 길이를 나타낸다. 공극의 길이를 11 [mm], 정격공극자속밀도를 0.7 [T] 로 예상하고 누설 자속을 약 15% 감안하여 설계자속밀도를 0.8 (T)로 하였을 경우, 위의 식 (3) 에서 기자력 M은 14,005 [A·T] 이 된다. 또한 기자력 M은

$$M = W \cdot h \cdot K \cdot J \quad (4)$$

로 표시될 수 있다. 여기서 W·h는 Window area, K는 점적률, J는 전류밀도를 나타낸다. 그러므로 Window area W·h는 위의 식 (4)로 부터 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$Wh = M / (K \cdot J) \quad (5)$$

Coil은 Al 각선을 사용하며 전류밀도 J = 1.3 [A/mm²], 점적률 K = 0.7 로 한 경우 Window area는 위의 식 (5)로 부터 다음과 같은 값을 얻을 수 있다.

$$W \cdot h = 15,390 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Window area는 전자석의 형상을 최종적으로 결정하는 과정 이므로 형상에 따른 전자석의 특성 즉 부상력, 안내력, 누설 자속 및 Coil 내부의 온도상승등을 분석하여 최적의 폭과 높이를 결정하여야 할 것이다.

2.4 전자석의 Coil 설계

coil의 재료는 전자석의 무게를 경량화하고 점적율을 향상 시키며 내각효과를 높이기 위하여 전선종류와, 크기, 절연 방법과 제질등을 면밀히 검토한 후 선택해야 한다. 본 연구에서는 한국에서 제조 가능하다고 판단되는 재료로서 도체는 7 [mm] x 3 [mm] Al 각선을, 도체 절연체로는 0.05 [mm] Nomex를 선택하였다. 이 경우 정격전류는 27 [A]가 되며, 정격공극 11[mm] 에서 기자력이 14,005 [A·T]이 되므로 권선수는 506 [T] 로 하였다. 전자석의 coil은 부상제어 특성과 직결되는 중요 parameter 이므로 시정수 (저항, 정격인덕턴스) 와 제어상수등을 제어측면에서 검토한 후 권선의 크기 턴수 등이 결정 되어야 할 것이다.

3. Computer Simulation 에 의한 특성분석

Rail 폭이 28 [mm], 높이를 80 [mm]로 하였을 경우, 앞절에서 설계한 전자석을 FLUX2D 를 이용하여 전자석의 각 parameter를 변화시킴에 따른 부상력, 안내력 및 온도특성 등을 검토하였다. 그리고 parameter 값이 결정된 전자석의 감탕을 위하여 전자석의 Bottom Plate 두께 및 형상변화와 전자석의 Pole을 여러 형상으로 변화시킴에 따른 부상력, 안내력 특성등을 검토하여 전자석의 부상력과 강도에 문제가 없는 범위 내에서 감탕을 시도 하였다. 그림 1은 완성된 전자석의 Model을 보여 주고 있다.

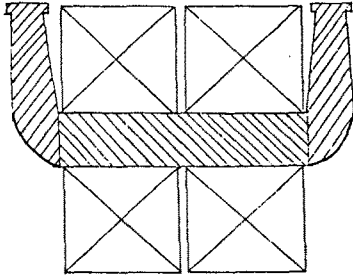
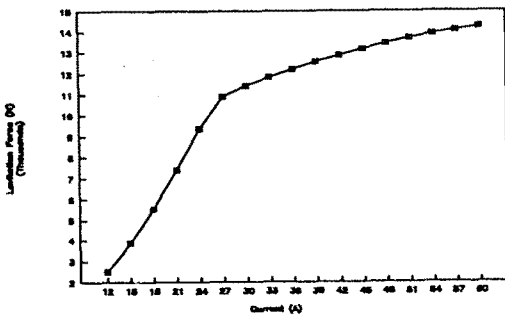


그림 1. 전자석 모델

3.1 전자석의 부상력 및 안내력 특성

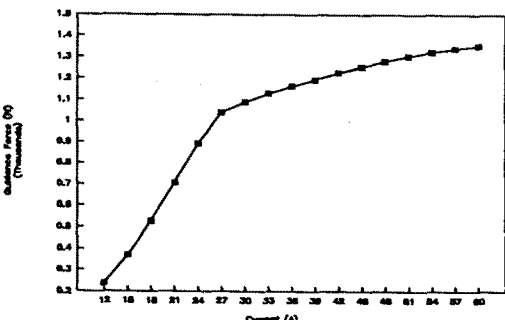
그림 2. a) 와 b)는 정격공극 11 [mm]에서의 전류 대 부상력곡선과 전류 대 안내력 곡선을 각각 나타낸 것이며 그림 c)는 초기 부상 공극이 20 [mm]에서의 전류 대 부상력 곡선을 보여주고 있다. 그림 2. a)의 전류 대 부상력 곡선에서 알 수 있듯이 입력전류에 대해 부상력이 11,000 [N]까지는 2차함수 형태로 변화한다. 11,000 [N] 이후에서는 자속밀도의 포화로 인하여 부상력이 포화현상을 보이고 있다. 정격공극 11 [mm]에서 원하는 정격부상력 937 Kg [9183 N]을 얻기 위하여 흘러야 되는 정격전류는 그림 2. a)에서 보는 바와 같이 24 [A]근방이 됨을 알 수 있다. 초기 부상 공극 20 [mm] 에서 정격 부상력을 얻기 위해서는 그림 2. c)에서와 같이 약 62 [A] (정격전류의 2.5배) 가 필요함을 알 수 있다.

Gap = 11 [mm], Stagger = 5 [mm]



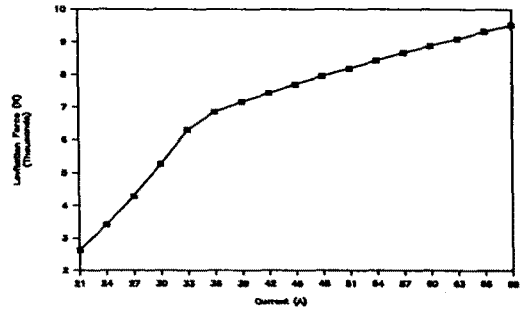
a) 전류 대 부상력 (공극 : 11mm)

Gap = 11 [mm], Stagger = 5 [mm]



b) 전류 대 안내력 (공극 : 11mm)

Gap = 20 [mm], Stagger = 5 [mm]



c) 전류 대 부상력 (공극 : 20mm)

그림 2. 전자석의 부상력 및 안내력 특성

3.2 전자석의 Core경량화를 위한 Pole 형상설계

전자석의 성능은 전자석 자중에 대한 부상력의 비로 나타나기 때문에 전자석의 무게는 정격 부상력과 안내력이 나오는 범위 내에서 최대한 줄여야 할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 전자석의 감탕을 위하여 Pole의 형상을 여러 형태로 변화시킴에 따른 각 특성을 비교 검토한 결과 그림 3의 최초 Pole 형상에서 그림 4와 같은 전자석의 최종 Pole형상을 결정하였다. 그림 3과 그림 4에서의 부상력과 안내력 특성을 서로 비교해 보면 부상력의 차이는 거의 없으나 안내력은 공극에서의 자속밀도 집중현상에 따른 자속의 변화, 누설량의 변화등으로 그림 4 보다는 5%정도 더 많이 나왔으며 형상에 따른 감탕 효과는 약 3.2 Kg/개당이었다. 안내력 증가에 대한 이론적 고찰이 이루어져서 최적 core 형상설계의 정성 및 정량적인 연구를 계속하는 것이 필요하다.

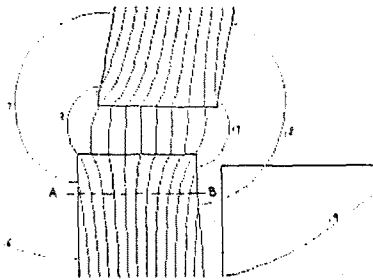


그림 3. 전자석 최초 pole 형상

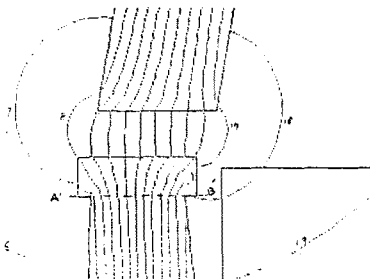


그림 4. 전자석 최종 pole 형상

3.3 Magnetic Rail 형상설계

전자석의 횡방향 변위시 안내력을 향상시키기 위한 방안으로 rail 형상의 변화를 시도하였다. 그림 5 에서와 같이 전자석의 core 및 coil은 동일하고 공극 11 [mm], stagger 량을 5 [mm]로 하였을 경우 rail 각도 변화에 따른 부상력 특성과 안내력 특성을 검토하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 각 α 가 $9^\circ - 12^\circ$ 사이에서 부상력은 약 34 N 감소 (0.3% 감소) 하나 안내력은 약 98 N 증가 (약 8.5% 증가) 함을 알 수 있다. 이는 전자석에서 나오는 힘을 vector 성분으로 나누어 보면 부상력 성분과 안내력 성분으로 나누어지게 되는데 rail 각도가 클수록 안내력 vector 성분이 커짐을 알 수가 있다. 그러나 rail의 각도가 너무 커지게 되면 전자석의 좌-우로의 횡방향 변위시 안내력의 균형에 문제가 발생되고, 부상력의 감소, 기계적 강도등을 고려하여 각도를 결정해야 할 것이다.

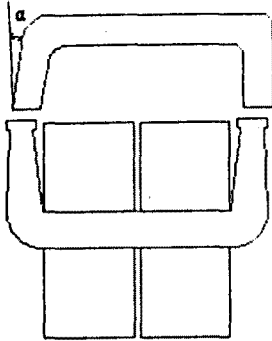


그림 5. Rail 형상 모델

3.4 전자석 횡방향 변위에 따른 안내력 특성

그림 5 와 같이 Rail이 비대칭인 경우, 전자석을 좌,우로 횡방향 변위시켰을 때 따른 안내력 특성을 고찰하였다. 변위량을 5 [mm] 씩 변화시켰을 때 전자석이 오른쪽으로 변위될 때와 왼쪽으로 변위될 때의 부상력 차이 (0.2%차)는 미미하나 안내력은 그림 7 에서 알 수 있듯이 전자석이 오른쪽으로 변위되었을 때보다는 왼쪽으로 변위되었을 때 더 많은 안내력을 보이고 있다. 따라서 전자석을 오른쪽으로 횡변위 시에는 양쪽 균형을 맞추기 위하여 변위량을 6 [mm] 정도해야 양쪽 안내력 균형이 맞겨질 것으로 판단된다. magnetic rail이 대칭일 경우에는 이러한 문제는 발생하지 않을 것이다.

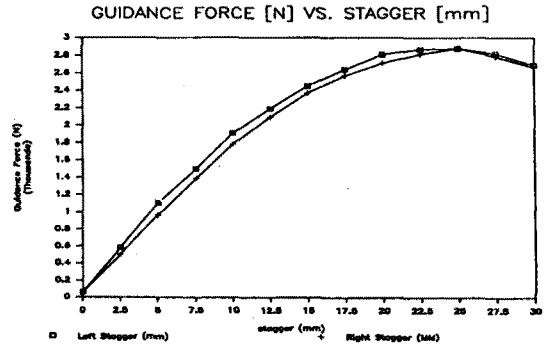


그림 7. Rail이 비대칭인 경우의 전류 대 안내력 특성

3.5 전자석 온도해석

전자석에서는 권선에서 발생하는 저항열때문에 온도가 상승하게 되는데 전자석의 사용온도는 coil의 설계에 직접적인 영향을 주는 요소이므로 제작하기 전에 온도특성해석이 필요하며 본 연구에서는 FLUX2D 를 이용하여 정상상태에서의 온도 해석을 하였다. 그림 8 은 설계된 전자석의 온도 해석으로 열해석 모델에 적용된 물질상수 값들은 표 1과 같다. 정격전류밀도 $J = 1.2$ [A/mm²], 주위온도 30 [°C]로 계산한 결과 Coil 내부에서 최고온도는 109 [°C], 표면온도는 98 [°C]로 나타났다. 전자석이 5 [m/sec]의 속도로 운행시 최대온도는 82 [°C]이며 표면온도는 68 [°C]로 나타났다. 절연물 Nomex의 허용온도는 180 [°C]이며 표면에 Epoxy Moulding 했을 경우 허용온도가 120 [°C]이므로 운전시에는 표면 열전달 계수가 크게 증가하여 냉각효과가 크므로 운용상의 문제는 없을 것으로 사료된다. coil의 무게를 줄이기 위하여 열적특성이 좋은 절연재료를 사용해야하며 Al, 각선이나 sheet 의 산화피막 (anodizing)효과에 대한 연구실험도 진행해야 할 것이다.

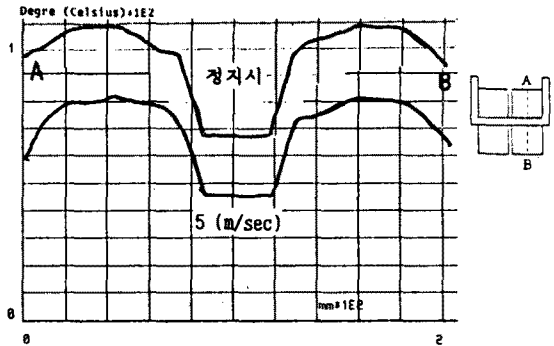
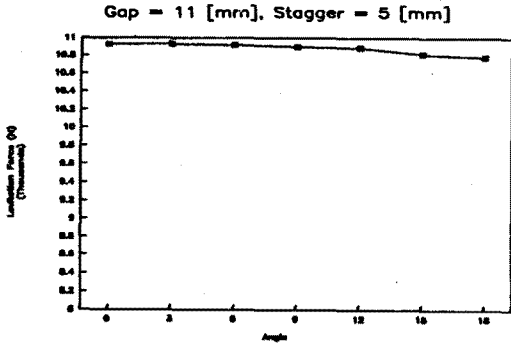
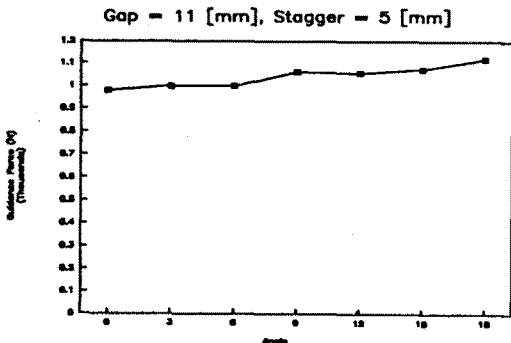


그림 8. 전자석의 온도 특성



a) Angle 대 부상력



b) Angle 대 안내력

그림 6. Rail의 α 각에 따른 부상력과 안내력의 특성

재 료	열전도도 [W/m. °C]	표면열전달계수 [W/㎡. °C]	
		정 지 시	5 [m/sec]
철	73	11	25
Al	204	11	25
Nomex	0.105	11	25

표 1. 열해석 물질상수

4. 결 론

대전 EXPO'93 에서 전시운영될 자기부상열차를 개발하기 위한 시험모델을 선정하여 전자석을 설계 하고 FLUX2D program을 이용하여 전자석의 각 parameter 를 변화시킴에 따른 특성을 검토하여 pole폭, window area, magnetic rail의 형상등 parameter 값 들의 최적치를 도출하였다. Parameter 값이 결정된 전자석의 감량을 위하여 전자석 core를 여러형상으로 변화시킴에 따른 특성을 비교 검토하여 core 부분에서 약 7 Kg 정도 감량을 시켰다. core 형상의 최적 설계는 수치해석 방법과 시행착오법으로 유사형상을 찾았지만, 이론적 성찰과 함께 정성·정량적인 해석이 필요하며 최적이론을 도입하여 형상을 찾아야 할 것이다. 설계된 전자석을 제작하여 특성실험을 함으로서 설계시에 주어진 여유와 수치해석적오차에 대한 정도를 확인 할 수 있으며 설계의 정확한 방향이 제시될 수 있을 것이다.

* 참 고 문 헌 *

- [1] D. Taylor, et.al, "Theoretical and practical considerations in the suspension system for Birmingham Maglev", Int'l Conference on MAGLEV., 1984
- [2] P.K.Sinha, "Electromagnetic suspension dynamics and control", Peter Pere grimus LTD, 1987
- [3] L.A.Johnk, "Engineering electromagnetic fields and waves", Wiely International Edition, 1975
- [4] M.N.Ozisik, "Heat transfer", McGraw-Hill Book Company, 1985
- [5] K.H.Huebner, "The finite element method for Engineers", John Wiely and sons, INC, 1982
- [6] D.S.Armstrong, "Magnet/rail system a critical review of the options", Int'l conference of MAGLEV, 1984
- [7] '자기부상열차의 기반기술 개발을 위한 연구' 보고서, 한국전기연구소, 1990, 12
- [8] "'93 EXPO 자기부상 고가열차틀 위한 자기부상 시스템의 모델개발연구 및 설계사업' 연구보고서, 한국전기연구소, 1990, 12

* 본 연구는 과학기술처의 특정연구개발사업비를 지원 받아 이루어지고 있습니다.