

자기부상용 종축형 전자석의 설계 및 특성해석

강도현, 신판석, 김용주, 조윤현, 박도영

한국전기연구소 전력기기연구실

Design and Analysis of an Axial Flux Magnet for Magnetic Levitation System.

Kang Do-Hyun, Shin Pan-Seok, Kim Yong-Joo, Cho Yun-Hyun and Park Do-Young

Power Apparatus Lab., KERI

ABSTRACT

An axial flux magnet for a magnetic levitation system is designed and analysed by finite element simulations. The results are compared with those of experiment in order to verify the analysing method. Lift force, air gap flux density and temperature characteristics of the magnet showed fairly good agreement with each other.

형 전자석은 일본의 HSST 의 자기부상 System에 사용되고 있는데 코일이 전자석 상하에 위치하고 있으며 종축형보다 누설자속이 많은 것이 단점이지만 상대적으로 안내력을 많이 발생시키는 장점도 있다. 전자석형태의 결정은 전체 MAGLEV 시스템의 Engineering 단계에서 결정하게 되며, 추진시스템이 선형유도전동기인 경우에는 횡축형이나 종축형 중 한가지 형태를 선택할수 있지만 선형동기전동기인 경우에 부상용 전자석을 종축형으로 국한된다고 할수 있다. 본 연구에서는 1.0 TON Proto-type 자기부상열차에 전자석 8기를 사용할 경우 부상 Magnet의 설계와 종축형 전자석에 대한 부상력, 안내력, 자속 및 온도 특성을 고찰하기 위하여 유한요소법으로 Computer simulation 을 시도하였으며, 이의 타당성을 증명하고자 설계하여 제작된 전자석을 실험하고, 각 특성을 계산치와 비교 검토하였다.

1. 서론

21세기의 새로운 교통수단으로 각광을 받게된 자기부상열차는 산업문명의 발달과 더불어 환경문제가 인류에게 미치는 영향이 크게 대두되면서부터 교통수단에서도 소음 및 공해의 저감, 경제성, 신뢰성과 고속성이 요구되고 있기때문에 여러각도에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 20여년전부터 자기부상열차 개발을 위하여 연구를 해온 독일, 일본 등에서는 현재 자기부상열차의 실용화를 위하여 신뢰성과 승차감의 향상을 위하여 실험 Track 에서 모의실험과 연구들 계속하고 있다. 최근 국내에서도 많은 연구가 산. 학. 연에서 활발히 진행되고 있으며 대전 EXPO'93 에 한국형자기부상열차가 개발되어 박람회 전시장에서 운용하게 될 것이다.

자기부상용 전자석은 크게 두가지 형태로 구별되는데 자속의 형태가 열차 진행방향과 평행인 경우를 종축형수직인 경우를 횡축형이라고 한다.

종축형 전자석은 영국의 Birmingham People Mover 와 독일의 Transrapid 의 자기부상 System에 채택되고, 횡축

2. 전자석의 설계

부상 전자석의 설계는 전체시스템의 일반적인 사양 즉 차량의 무게, 기하학적구조, 외력, 선형유도전동기의 영향 등에 따라 전자석의 수량과 정적 부상력, 전자석과 rail의 형태등을 결정하고 분석적인 방법으로 전자석의 높이, 극의 폭, 코일의 형태, 입력전류 등을 계산하고 수치해석적 방법으로 전자석의 정적 및 동적 특성을 조사하여 전체시스템에 맞는 전자석을 설계하게 된다.

한편, 전자석의 성능은 전자석 자중에 대한 부상력의 비 (Lift force/Weight Ratio) 와 단위하중을 들어 올리는데 소요되는 전력량의 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 재질은 SM17C로 coil은 Al sheet 를 사용했다.

그림 1과 같은 1.0 TON Proto-type 자기부상열차에 사용될 전자석의 설계에 대하여 설명한다.

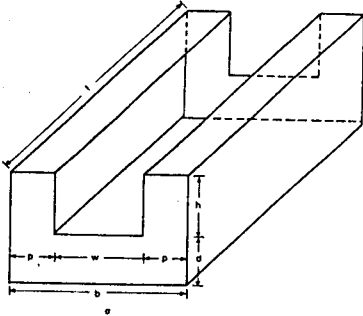


그림 1. 전자석 코어모델

2.1 정격 부상력의 결정

정격 부상력은 Pay load가 포함된 전체 차량무게를 사용될 전자석의 수량으로 나눔으로서 구할 수 있으며 안전도를 고려하여야 한다.

정격 부상력 = 차량 무게 / 전자석수 = 125 [kg중] = 1225 [N] 또한, 전자석의 부상력은 잘 알려진 다음식에 의해서 수학적으로 계산할수 있다.

$$F = B \times 2pl / 2\mu_0 \tag{1}$$

여기서, B는 자속밀도 [wb/m²], P는 전자석 Pole 의 폭, l은 전자석길이, μ_0 는 진공의 투자율을 나타낸다.

2.2 Pole face 의 면적 결정

전자석의 공극에서 정격부상력은 식(1)로 되므로 자속 밀도를 0.60 [T] 로 가정하면 Pole face (P1=F μ_0 /B ') 는 4274 [mm²] 로 정할 수 있다. 만일, P=88(mm)로 택한다면, l = 48(mm)가 되지만 여유를 고려하여 50(mm)로 결정하였다.

2.3 Window area 의 결정

공극에서 필요한 자속밀도를 발생하는데 필요한 기자력 H 은 H= BZo/ μ_0 로 표시되며 Zo는 air gap 길이를 표시하는데 여기서는 10(mm)로 가정했다. 정격공극자속밀도를 0.60T 로 선정하면 H은 약 9,500(AT) 이 된다.

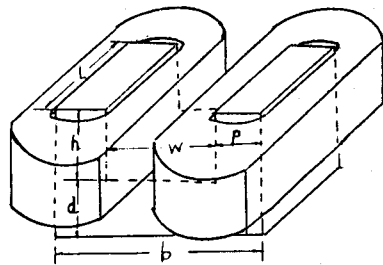
또한 H = wh.k J로 표시되므로 Window area, wh = H /k.J로 계산할수 있는데 J는 전류밀도 [A/mm²], k 는 점적율을 나타낸다. Coil은 알루미늄 Sheet 를 사용하며 정격전류밀도를

1.15[A/mm²] 로 하고, 점적율 k 는 0.75 을 택했다. Window area 는 전자석의 형상을 최종적으로 결정하는 과정이므로 이 형상에 따른 전자석의 특성 즉 부상력, 안내력, 누설자속 Coil 내부의 온도상승등을 분석하여 최적의 폭과 높이를 결정해야 할 것이다.

2.4 Coil 의 설계

Coil 의 재료는 전자석의 무게를 경량화하고, 점적율을 향상시키며 냉각효과를 높이기 위해서 전선종류와 크기, 절연 방법과 재질 등을 면밀히 검토한후 선택해야 할 것이다. 본 연구에서는 상기조건들을 만족시키면서 한국에서 제조 가능하다고 판단되는 재료, 즉 0.3[mm] 두께에 폭이 100[mm] 의 Al sheet 를 0.05t Nomax 절연지로 결정하였으며, 이 경우 정격전류는 35[A] 가 된다. 정격공극 10[mm] 에서 기자력이 9500[AT] 이므로 권선수를 280로 정했다. 권선의 평균 길이는 약 50 cm 이므로 저항의 계산치는 0.146(Ω) 이었으나 실측치는 0.16(Ω) 이었으며 인덕턴스의 계산치는 0.022[H] 이나 실측치는 0.02[H] 이었다.

또한 전자석의 coil 은 부상제어특성과 직결되는 parameter 들을 결정해주는 중요한 요소이므로 전체 시스템의 특성도 설계에 고려되어야 한다. 즉 시정수 (저항, 정격 인덕턴스), 제어상수인 Ki, Kz 등을 제어측면에서 검토한 후 전선의 크기 연수등이 결정되어야 할 것이다.



l = 50 [mm], p = 88 [mm], b = 326 [mm]
d = 90 [mm], h = 110 [mm], w = 150 [mm]
그림 2. 중축형 전자석의 모델 및 치수

3. Computer Simulation 에 의한 특성비교 및 실험

앞절에서 설계한 중축형 전자석으로 Rail의 폭 55mm, 두께 100mm, 길이 600mm 인 경우 부상력, 안내력, 자속 및 온도 특성을 유한요소법으로 해석하였으며 이 결과로부터 중축형 전자석의 성능을 검토하였다.

한편, 실제 제작한 중축형 전자석의 특성에 대한 실험을 수행하였다.

3.1 계산 모델 및 자속선

그림 3은 유한요소법으로 해석한 등포텐셜을 나타내고 있는데, 전자식 크기 4배되는 해석영역에 Neumann 경계조건이 주어진 경우이고 그림 4는 그림 3의 Model 로 안내력을 구할수 없기때문에 자로를 펼친 경우이다. 그림3에 의한 부상력과 그림 4에 의한 부상력의 값은 거의 일치하였다.

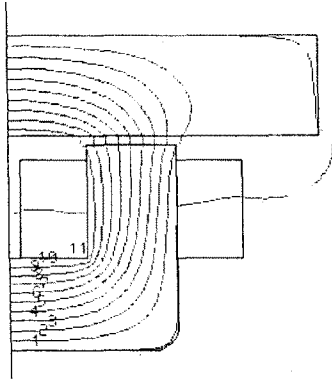


그림 3. 부상력 계산 모델 및 자속선

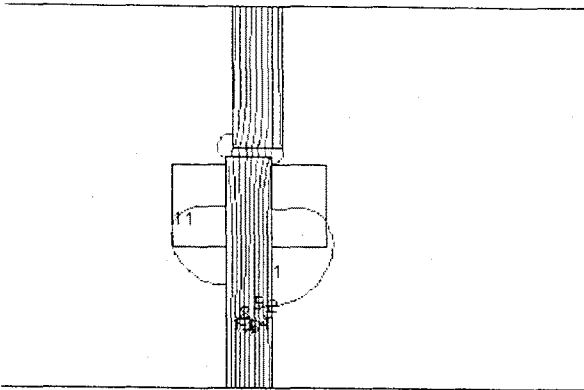
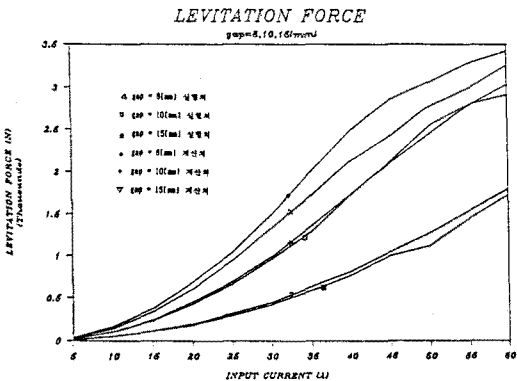
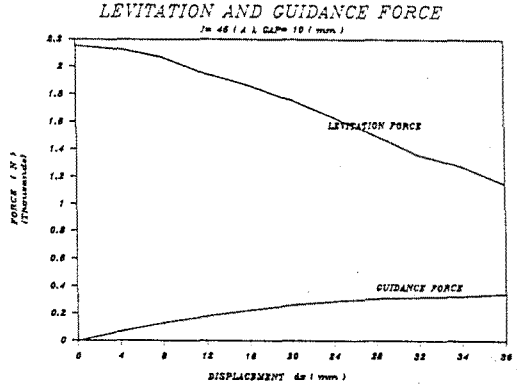


그림 4. 안내력 계산 모델 및 자속선

3.2 부상력 및 안내력



a) 부상력, 공극 - 전류



b) 부상력, 안내력 - 변위
그림 5. 부상력 및 안내력

그림 5.a)는 공극에 8,10,15 (mm) 인 경우 입력전류 값에 따른 부상력의 계산치와 실험치를 나타내고 있는데 잘 일치하고 있음을 나타내고 있다. 2,000(N)까지는 입력전류에 대해 2차함수 적으로 변하고 있으며 그 이상에서는 자속의 포화현상 때문에 선형적으로 변하며 10(mm)의 공극에서 정격전류들 35(A)로 선택할 경우 실험 부상력은 1200(N)으로 설계부상력 1225(N)과 잘 일치하고 있다. 초기부상 공극을 15(mm)로 설정할 경우 소요전류는 53(A)가 됨을 알수 있다.

그림 5-b)는 정격공극에서 입력전류가 45(A)일때 전자식이 Rail 중심축의 변위에 따른 안내력과 부상력을 보여주고 있다. 안내력은 36(mm)의 변위까지는 증가되고 있으나 어느정도 증가된후 감소될 것으로 예상된다.

3.3 자속밀도

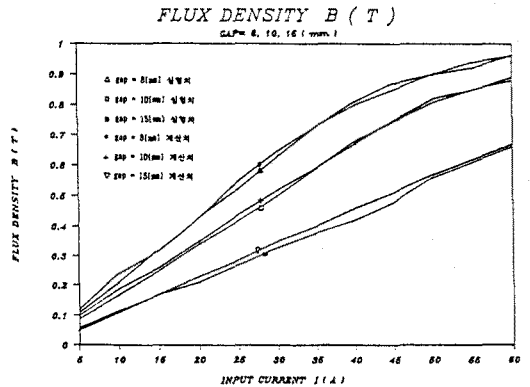


그림 6. 자속밀도

본 그림에서 0.65[T]까지는 선형적으로 변화하나 그 이상의 값에서는 포화됨을 알수 있고 10(mm)의 공극에서 정격 전류 35[A]인 경우 실험 자속밀도 0.58[T]로 설계치 0.6(T)에 근접함을 알수 있다.

3.4 투자율과 부상력

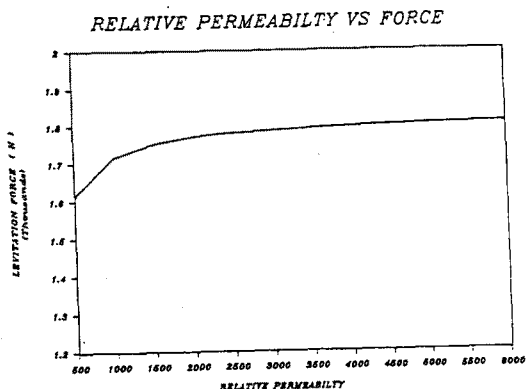


그림 7. 투자율에 대한 부상력과 자속밀도

그림 7은 공극이 10(mm)이고 전류가 40[A] 일때 철심의 투자율에 대한 부상력을 표시하고 있는데 비투자율이 3000 이하에서는 부상력에 크게 영향을 미치지만 그 이상에서는 투자율의 증가에 따라서 부상력의 증가는 극히 작게 나타나고 있다. 따라서 비투자율이 2000-3000 정도이면 설계조건을 만족할수 있는 전자석의 특성을 얻을수 있다고 생각되며 core의 재질은 포화자속 밀도가 훨씬 더 중요하다 는 사실을 고찰할 수 있다.

3.5 온도

전자석에서는 권선에서 발생하는 저항열때문에 온도가 상승하게 되는데 전자석 내의 온도분포는 에너지 방정식에 의해서 다음식 (2)와 같이 된다.

$$\nabla \cdot K \nabla T + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, K는 열전도도 [W/m, °C], g는 체적내 발열밀도 [W/㎠], ρc는 열용량 [W.s/°C . ㎠]이다.

식 (2)를 풀기위한 경계조건은 전자석의 표면에서 열류가 일정하므로 식 (3)을 유도할수 있으며 정상상태 온도해석을 하기 위해서는 식 (2)의 내부에너지 변화량인 우변을 영으로 두면 된다.

$$K \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0 \quad (3)$$

여기서 n : 표면에서 단위 법선 벡터
 h : 표면열전달 계수 [W/㎡, °C]
 T₀ : 외기 온도 [°C]

그림 8은 전자석 core 의 표면에 두께 3[mm]의 Nomax 절연지로 둘러싼 다음 코일을 권선하고, 전자석이 정지했을때 전자석 중심부의 수평방향에 따른 온도 계산값으로 최대온도 값은 코일의 중심부에서 나타나고 철심에서는 전자석 coil

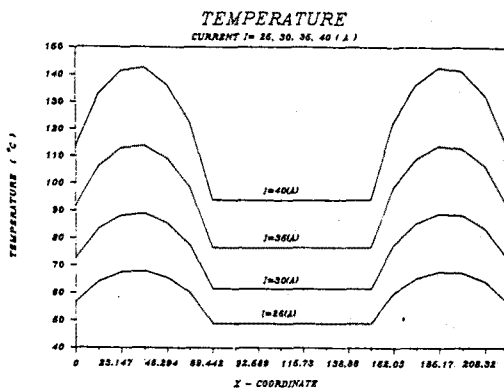
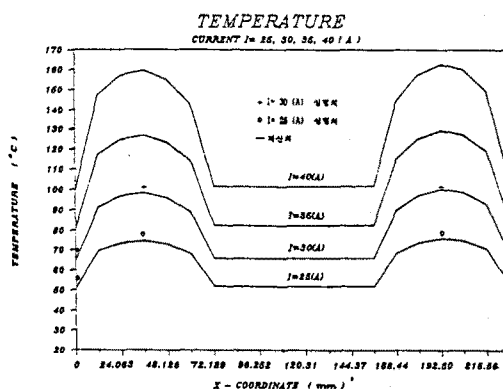
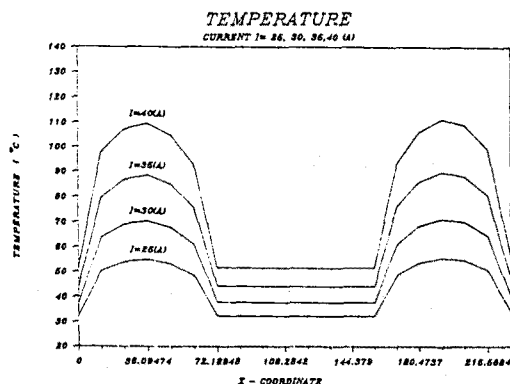


그림 8. 설계 온도 값 (h = 11[W/㎡, °C])



(a) h = 11 [W/㎡, °C]



(b) h = 25 [W/㎡, °C]

그림 9. 온도상승 요소를 고려한 온도 값 (Nomax 두께 5 [mm] 추가)

의 표면과 비슷한 값의 온도를 가졌다.

이때 표면 열전달 계수는 11[W/㎡, °C]로 전자석이 정지하고 있을때 자연대류에 의한 열전달 계수값 7[W/㎡, °C]와 복사 에 의한 열전달 계수값 4[W/㎡, °C]로 되어 있다.

일반적으로 권선작업시 코일의 두께는 계산치보다 증가하게 되는데 실제 제작된 치수는 5[mm] 정도 차이가 났으므로 그림 9-a) 는 그림 8 의 조건에서 Nomax 두께를 5[mm] 추가했을때 온도 값이다.
 한편, 계산치와 실험치를 살펴보면 전류가 30[A], 25[A] 일때 계산치 98°C, 73 °C 와 거의 일치함을 알수 있고 표면에서는 계산치가 65°C, 52°C, 실험치가 70°C, 55°C 를 나타내었다. 또한, 전류가 정격전류인 35[A]일때는 최대 도체 온도가 120°C로 다소 높으나 전자속이 5 [m/s]로 이동 시 표면 열전달 계수가 25 [w/m,°C] 이므로 그림 9-b) 에서 살펴보면 90 °C 되므로 상당히 온도가 감소됨을 알 수 있다.

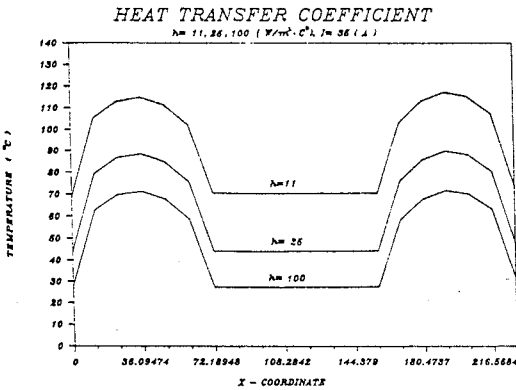


그림 10. 표면 열전달 계수에 따른 온도 값

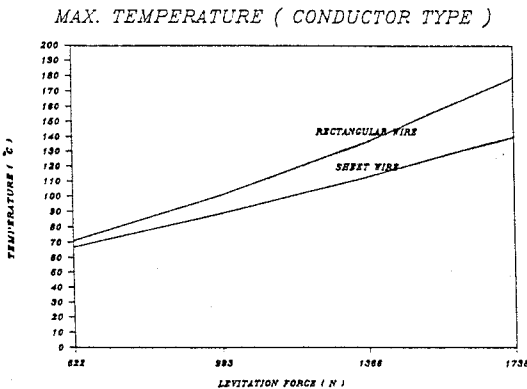


그림 11. 각형과 sheet 형 권선의 온도 비교값

그림 10은 정격전류 35[A]인 경우 표면 열전달계수에 따른 온도값인데 일반적으로 정지시 표면열전달 계수는 11[W/m,°C] , 5 [m/s]로 이동시 25 [w/m,°C], 20 [m/s] 로 이동시 100 [w/m,°C]인 것으로 알려져 있다. 이 그림에서 이동속도에 따른 온도값이 현저히 저하됨을 알 수 있다.

그림 11은 9 [mm] 각형과 설계된 sheet 형 권선에 대해서 같은 부상력을 발생시킬때 최대온도 값을 표시하고 있다. 본 그림에서는 각형의 경우 온도가 상당히 높게 나타나고 있는데 그 이유는 각형의 sheet 형에 비해 열저항율이 매우 큰 전열플이 가로, 세로로 둘러 쌓여있어서 열이 외부로 발산되지 못하기 때문이다. 고 효율의 coil 재료로서는 Al. sheet에 산화피막 (anodized film)을 입힘으로서 접촉율을 높이고 (0.9이상) 열발산효과도 크게 향상시키고 있다.

4. 결론

자기부상용 전자석을 설계 및 제작하고 이에 대한 Simulation 과 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가. 계산결과와 실험결과가 작은 오차 범위내에서 일치하고 있으므로 부상용전자석의 특성 및 제어에 필요한 계수등을 전체 자기부상 시스템에 맞는 최적조건을 찾아서 전자석을 설계 제작할 수 있음을 보여주었다.
 - 나. 정지시 전자석에 대한 온도해석을 표면 열전달 계수 및 coil 의 재료에 따라 수행하고 실험결과와 비교한결과 simulation 값이 5% 이내의 오차를 나타냈으므로 온도상승을 예측하여 절연 설계에 적용할수 있게 되었 으며 부상용 전자석의 운행조건을 도출하게 되었다.
- 앞으로 자기부상용 전자석의 최적화 설계 및 동적현상에 대해서 해석과 실험을 수행할 필요가 있으며 전자석의 이동에 따른 열해석을 실험함으로써 운항에 따른 열 특성을 확립할 필요가 있다.

* 참고 문헌 *

- [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