

열해석을 이용한 자기부상자석의 설계

배덕권*, 성호경**, 윤용수***, 배준한****, 조정민, 김동성**
 충주대학교 안전공학과, **한국기계연구원, ***안산공대 전기과, ****한국전기연구원

Design of Levitation Magnet with Thermal Analysis

Duck Kweon Bae*, Ho-Kyung Sung**, Yong Soo Yoon***, Jun-Han Bae****, Jeong Min Jho, and Dong Sung Kim**
 *Dept. of Safety Engineering, Chungju National University, **Korea Institute of Machinery and Materials
 *** Dept. of Electrical Engineering, Ansan College of Technology, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The UTM-01 developed in 1998 was the first maglev vehicle in Korea for the urban transit maglev (UTM) system. Through the improvement of UTM-01 and development of UTM02, the commercialization of the UTM system is being prepared now. In order to prepare for the commercialization of maglev, it is necessary that an optimal design of the levitation magnet should be provided for the safe operation of the vehicle. The levitation force is formed through the function of magnetic flux density on the top of magnet poles and gap between magnet pole and guide rail. To generate a magnetic field that is high enough to levitate the vehicle, ferromagnetic materials, such as pure iron for magnet pole and SS400 for guide rail, were used. The heat generated by I²R loss of magnet conductor makes the thermal convection on the surface of magnet including coil and poles. As these two characteristics are nonlinear phenomena, this paper deals with the nonlinear analysis on the magnetic and thermal properties of the U-type levitation magnet by using 3-D finite element method (FEM). Base on the analysis results, a small scale U-type magnet was designed, manufactured, and tested and it was verified that the magnet manufactured was satisfactory to all the design specifications.

1. 서 론

1998년 세계에서 세 번째로 개발된 도시형자기부상열차 UTM(Urban Transit Maglev)-01을 필두로 UTM-02는 대전에 건설된 약 1km의 선로 구간에서 2007년 후반부에 시험운전을 개시할 예정이다. 또한 정부의 지원 하에 그간 축적한 자기부상관련 국내 기술을 기반으로 한 도시형 자기부상열차 실용화 사업도 순차적으로 진행 중이다.

자기부상열차의 방식은 크게 흡인식과 반발식이 있다. 흡인식은 정밀한 제어기기로 전자석과 지상선로 사이의 흡인력을 제어하여 차량을 부상시키는 방식이고 반발식은 움직이는 차량의 자장과 지상의 코일의 반응하여 형성하는 반발력으로 차량을 부상시키는 방식이다 [1], [2]. UTM-01 및 02는 모두 흡인식 자기부상열차이다. 세계적으로 상용화된 자기부상열차는 일본 나고야 지방에 설치된 중저속형 자기부상열차 Linimo와 독일의 TR08 기술로 중국 푸둥공항과 상해 사이에 설치된 고속형 자기부상열차 SMT(Shanghai Maglev Transportation)인데 모두 흡인식 자기부상열차이다. 반발식 자기부상열차는 미국에서 도시형이 개발 중이며 일본은 초전도자석을 이용하여 세계 최고 기록인 581km/h를 기록한 반발식 자기부상열차로 2025년 일본-나고야 사이의 상업운전을 개시할 예정이다 [3].

국내에서 진행 중인 실용화사업에 투입되는 흡인식 자기부상열차의 부상시스템에는 U형 부상자석이 사용되는데 이 자석은 권선, 철심, 절연물 등으로 이루어진다. 일정한 높이를 유지하는 흡인력을 발생시키기 위해 수 kHz 이상의 높은 주파수를 가지는 전압에 의한 전류로 부상자석의 권선부분과 철심에서 열이 발생하게 되는데 이 발열이 과다하면 부상자석의 절연 파괴 등에 의해 차량 부상시스템이 손상 받을 수 있으므로 도체에서 발생하는 열에 대한 해석을 동반한 부상자석의 최적설계가 실용화 자기부상열차의 안전한 운전을 위해 이루어져야 한다. 본 연구는 부상 자석의 최적설계를 위한 자기장 해석 뿐 아니라 전도 및 대류를 고려한 열 해석을 바탕으로 권선의 최적 전류밀도를 제시하였으며 실험으로써 결과를 검증하였다. 본 연구의 결과로 제작된 자석은 현재 자기부상열차 축소모델에 장착되어 운전 중이다.

2. U형 부상자석의 설계

2.1 U형 부상 자석과 부상력

그림 1은 U형 부상자석 및 선로의 3차원 모델을 보여준다. 선로 하부에 설치한 부상자석에 전류를 인가하면 부상자석의 Pole 단면적과 마주보는 자성체인 선로 단면적 사이에 발생하는 흡인력으로 차량을 부상시킨다. 정밀 제어를 통하여 부상자석과 선로사이의 간격을 일정하게 유지시켜 주는데 UTM-01의 경우 10mm로 간격을 유지시키면서 운행한다.

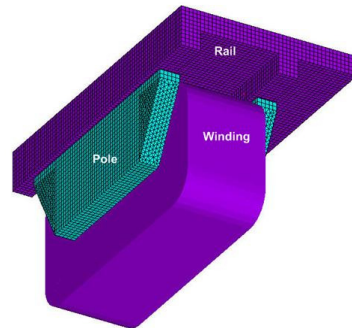
U형 부상자석은 자장을 발생시키기 위한 전류를 통전시키는 권선, 자속의 경로를 만들기 위한 강자성체 철심, 절연 등으로 이루어지는데 이 철심에서 권선이 감기는 부분을 요크(Yoke)라 하고 선로(Rail)의 대향면으로의 자속경로를 만들어주는 폴(Pole)이라 한다.

U형 부상자석의 부상력 F는 식 (1)로 구할 수 있다 [2].

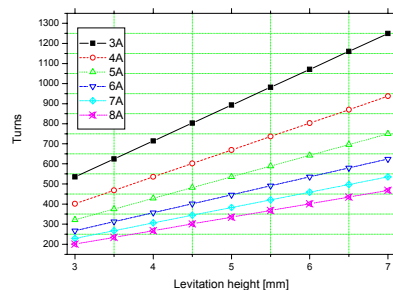
$$F = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\mu_0 N I}{2l} \right)^2 = \mu_0 \left(\frac{N I}{2l} \right)^2 S \quad (1)$$

여기서 μ_0 는 공기의 투자율, N은 권선 수, I는 전류, S는 대향면의 단면적, l은 부상높이를 나타낸다.

그림 2는 부상자석의 전송전류, 턴수 및 부상높이에 따른 부상력을 계산한 것이다. 본 부상자석이 실제로 담당할 하중은 8kg으로 예상되었다.



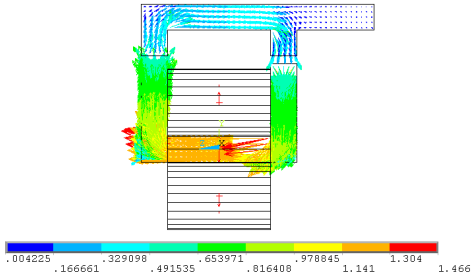
<그림 1> U형 부상자석 및 선로의 3차원 모델



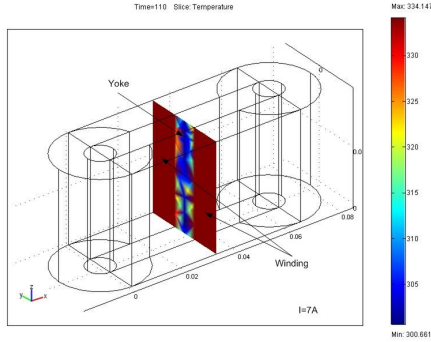
<그림 2> 부상력 계산결과

2.2 자기장 해석

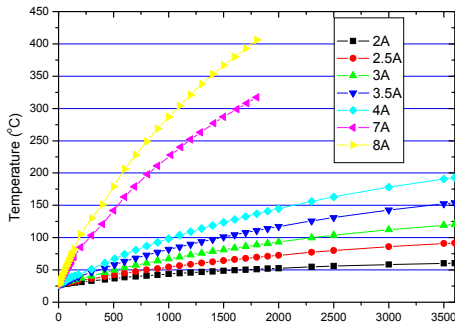
부상력은 자기장에 의해 발생하는데 철심을 사용함에 따라 전류와 자기장(=부상력)의 관계가 비선형적이다. 최적의 부상자석 설계를 위하여 본 연구에서는 3차원 비선형 자기장해석을 수행하였다. 그림 3은 U형 부상자석 및 선로의 자기장해석 결과 중 자속밀도 벡터도의 분포를 나타낸다. yoke 부분에서 최대 자속밀도를 나타내며 공극부분에서는 누설자속



〈그림 3〉 자장해석 결과(자속밀도 벡터)



〈그림 3〉 110초 이후의 온도분포



〈그림 4〉 온도해석 결과

〈표 1〉 U형 부상자석의 제원

	Specification	Remarks
Yoke length	75 mm	
Pole length	112 mm	
Conductor diameter	1.1 mm	
Turns	592 turns	
Transport Current	2.5 A	
F_{design}	85.75 N	by eq. (1)
$F_{simulation}$	87.8 N	by FEM
$L_{simulation}$	93.83 mH	by FEM

이 관측된다. 이 누설자속 현상은 공극(=부상높이)이 커질수록 심해진다.

2.3 열해석

제어기에 의해 인가되는 수 kHz 이상의 전압에 의한 전류는 부상자석 내부에 열을 발생시킨다. 발열의 주 원인은 권선부의 I^2R 손실이며 이 열은 전도 및 대류를 통하여 외부로 방출된다. 그런데 방출되는 열이 과다할 경우 권선내부에 열이 축적되어 절연을 파괴시킬 수 있으므로 부상자석의 설계 과정에 열해석이 꼭 포함되어야 한다. 특히 축적되는 열의 양은 통전 전류뿐만 아니라 부상자석의 형상에 영향을 받으므로 부상자석의 3차원 모델링을 통한 열해석이 설계단계에서 수행되어야 한다. 본 연구에서의 열전달 해석은 전도와 대류를 고려하여 해석하였으며 자석 철심의 yoke 부분만 해석대상에 포함하였고 pole은 제외하였다. 그 이유는 pole이 없는 해석에서 권선 내부에 열이 더 많이 축적되기 때문이다. 본 해석에 사용된 전도 및 대류에 관련한 열전달 지배 방정식은 식 (2)와 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q - h(T - T_{ext}) \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, t 는 시간, C 는 비열, T 는 권선온도, T_{ext} 는 주위 온도, h 는 대류열전달계수, Q 는 인가된 열량, k 는 열전달율을 말한다.

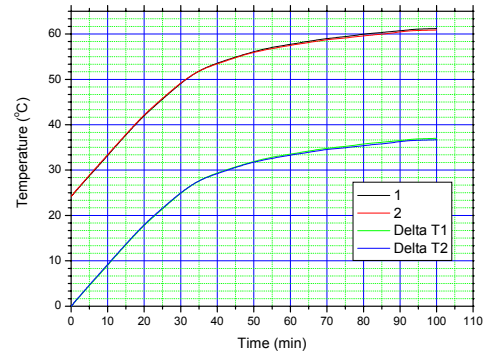
그림 3은 7A를 인가 후 110초 시점에서의 온도분포를 나타낸다. 권선 부분은 동일한 온도분포를 나타내며 권선 중심 철심부분으로 열의 전도가 이루어지는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 인가전류에 따른 온도분포를 나타낸다. 본 해석을 바탕으로 2.5A를 운전전류로 설정하였다. 표 1은 자장해석 및 열해석을 바탕으로 도출한 부상자석의 사양을 나타낸다. 설계 부상력은 85.75N이므로 약 10%의 하중 여유가 있다.

3. U형 부상자석의 온도특성실험 및 고찰

그림 5는 하중 9kg, 부상높이 4mm로 시험 중인 U형 부상자석을 나타낸다. 제어기로 일정한 부상높이를 유지한 채로 시간경과에 따른 권선 표면의 온도변화를 측정하였다. 두 부분의 온도를 측정하였는데 측정위치에 따른 온도편차는 관찰되지 않았다. 본 실험 시의 하중은 설계목표값 보다 12.5% 무거운 하중이었다. 본 실험 시 부상자석의 통전전류는 2.3A였고 열해석보다 빠른 시점에서 온도가 포화되었으며 포화된 온도도 조금 낮았다. 이는 해석 모델에서 고려하지 않은 pole의 영향으로 판단된다. pole의 존재는 열전달에 의한 열 분포 및 대류 표면적을 넓히는 효과를 발생하므로 운전시의 온도는 해석 시의 온도보다 낮았다.



〈그림 5〉 시험 중인 U형 부상자석



〈그림 5〉 온도 측정 결과

4. 요약

본 논문은 흡인식 자기부상열차의 부상자석의 최적설계를 다루었으며 3차원 모델링을 통한 자장해석 및 열해석을 바탕으로 부상자석 운전 시의 자석의 형상, 자속밀도, 부상높이, 부상력, 운전전류 등을 최적으로 설계하였으며 설계를 바탕으로 한 제작 및 실험에서 최적설계의 효과를 검증하였다. 본 해석은 형상에 따른 부상자석의 최적설계에 도움을 줄 것이다.

[참고 문헌]

- [1] B. V. Jayawant, Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques, Edward Arnold Ltd, pp. 80-115, 1981.
- [2] David K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 226-234, 266-281, 1989.
- [3] Available from: http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?artid=2007042718210_71&code=970203
- [4] A. F. Mills, Heat and Mass Transfer, IRWIN, 1995, pp. 124-133