

도시형 자기부상열차 부상용 전자석에 대한 실험적 연구(Ⅳ)

김봉섭, 정현갑, 유문환
한국기계연구원

An Experimental Study on Electromagnets for Urban Transit Maglev Vehicle(Ⅳ)

Bong Seop Kim, Hyun Kap Chung, Mun Whan Yoo
Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract: The levitation magnets for the UTM-01(Urban Transit Maglev) take up a substantial portion of the vehicle weight and vehicle cost. It is thus very important to reduce the weight of magnets by improving their performance and also reduce the cost of making them. A very extensive study was conducted to achieve above goals. Shape of the magnet core was varied and various core materials were tested. Also tested was the anodized sheet coil to replace the currently used rectangular shape Al coil. The study so far has improved the performance of the magnet substantially. The levitation force-to-magnet weight ratio has been improved from 6.8 to 9.2 as a result. This improvement reduced to magnet weight of the UTM-01 test vehicle by 900 kg.

1 서 론

도시형 자기부상열차 사업은 1호차에 이어 2호차 제작이 완성되어 부상 및 주행시험을 실시할 예정에 있다. 본 2호차량은 1호차와 마찬가지로 같은 규모로 제작되었으며, 승객만차시 약 28ton의 중량을 갖게 된다. 향후 실용화시에는 24ton 미만의 경량화를 목표로 하고 있다. 실차 1량은 3개의 대차(bogie)로 구성되어있고, 1개의 대차는 부상용 전자석 8개와 추진용 선형유도전동기 2개가 장착되어있다.

따라서, 1대의 차량을 만차시 28ton으로 볼때 24대의 전자석이 부담을 하게되므로 1대의 전자석은 1.16ton을 들어 올리면 된다. 2호 차량의 개선된 부상용 전자석은 정격 공극 11mm, 정격전류 23A에서 1,309kgf의 부상력을 확보할 수 있으므로 충분한 부상 조건을 만족하게 된다.

본 연구는 실용화를 대비하여 부상용 전자석에 대한 부상력의 증가 및 경량화를 목표로 대항 레일의 형상 및 재질변경, 전자석 Test bed 설계 및 제작 시험, 전자석 코어의 형상 및 재질 변경, 전자석 코일의 형상 변경 등을 통하여 전자석의 성능향상 및 제작비, 전자석 자중을 크게 감소하고자 하였다.¹⁾⁻⁶⁾

기존에 사용한 1호차량용 전자석은 전기연철 소재인 전자석 코어에 알루미늄 각선 코일을 사용하였다. 그러나, 전기연철이 전량 수입에 의존하여야 하며, 제작 공정상 소재 가공성이 어려워 제작비 등이 높아지는 단점이 있다. 또한 알루미늄 각선은 절연체인 NOMEX지를 감아 사용하므로 코일의 온도특성이 제한을 받게 된다. 2호차량에서는 일반 구조용강인 SS400을 사용하여 코어를 제작하였으며, 전자석 코일은 산화 피막 알루미늄 박판재(0.25mm)를 사용하므로서 절연지를 감을 필요가 없어 온도특성이 좋아지게 되어 정격 전류의 증가를 가능하게 한다. 또한, 코일의 turn수를 증

가하고도 전자석 코어의 높이를 감소시킬 수 있어 전자석 자중을 크게 감소할 수 있다. 실험 결과 부상력/자중비를 6.8에서 9.2로 크게 향상시켰으며, 12%의 부상력 증가를 나타내었다.^{7),8)}

온도특성에 있어서 정격전류 인가시 1호 차량용 부상전자석은 5시간만에 180℃에 도달하였으나, 2호차량 부상용 전자석 코일의 온도특성은 45시간 동안의 정격전류 인가시에도 140℃에서 포화되어 온도특성이 크게 향상됨을 알 수 있었다.

2 전자석 설계 및 개발

2.1 전자석 코어

전자석 코어의 설계는 차량의 무게(승객, 화물 포함)를 고려하여 전자석의 수량과 개별 부상력을 설정하고, 차량의 길이와 선로의 최소곡선반경 등을 고려하여 코어의 길이를 결정하고, 주행가능한 선로의 구배 등을 고려하여 부상 높이를 설정한다. 또한 전자석 코어 및 코일의 재질에 따라 부상 전류의 정격을 결정한다.^{1),2)}

사진1과 사진2, 3에 개선된 2호차량용 부상전자석의 코어와 조립 완성된 전자석을 보여주고 있다.

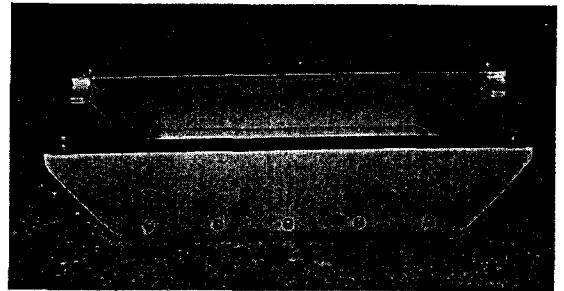


사진 1. 개선된 2호 차량용 부상전자석 코어

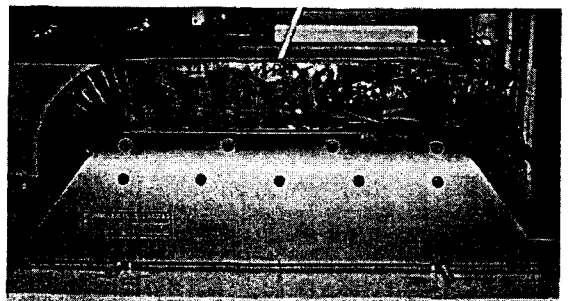


사진 2. 2호 차량용 부상전자석

2.2 전자석 코일

전자석 코일은 차량 단위의 집전 전압 및 내부 전력 변환 등의 구성요소(magnet driver, dc-dc converter) 및 부상 높이 등을 고려하여 코일의 크기, 정격 전류 등 제어특성에 따라 제한 파라미터를 설정한다. 표1에 개선된 2호차량용 부상전자석의 주요사양을 나타내었다.

표1. 2호 차량용 부상전자석 주요 사양

ITEMS	UNIT	CONTENTS
Length of Pole	[mm]	680
Width of Pole Face	[mm]	32
Height of Pole	[mm]	161
Thickness of Yoke	[mm]	65
Length of Yoke	[mm]	444
Width of Yoke	[mm]	168
Material of Core		S400
Number of Coil Turn	[turn]	350/1coil
Section area of Coil	[mm ²]	20(W×H: 80mm×0.25mm)
Material of Coil		Anodized Aluminum
Weight of Coil	[kg]	50(25×2ea)
Weight of Core	[kg]	93
Total weight of Magnet	[kg]	143
Rated Current	[A]	23
Ampere Turn	[AT]	16.100
Nomial Air Gap	[mm]	11
Initial Air Gap	[mm]	19
Levitation Force at Nominal Gap	[N]	12.828
Ratio of Magnet Weight/Levitation Force		9.15

2.3 대차(Bogie) 취부

자기부상열차 차량은 3대의 대차(bogie)로 구성되어있고 각 대차는 양쪽으로 side frame으로 구성되며 tie beam으로 체결되어있다. 각 side frame은 4대의 전자석과 1대의 SLIM(Single-sided Linear Induction Motor), brake system이 내장된다. 한쪽의 side frame은 약 2.13ton으로 전원 차단 등의 전기적 요인으로 비상 착지할 때 비틀림이나 힘이 발생하지 않도록 견고하면서도 가볍게 알루미늄 재질로 설계 제작되었다. 그림3에 대차의 side frame과 LIM, 전자석을 보여주고 있다.



사진3. 대차에 취부되는 LIM과 부상 전자석

2.4 전자석 제작

1호 차량에 사용된 부상용 전자석의 코아 재질은 전기연철로서 전량 수입에 의존한다. 전기연철의 자화특성은 상당

히 우수하나 자기부상열차와 같은 부상공극이 크게 존재하는 부분에서는 일반 구조용강에 비하여 절대적으로 장점이 되지 못한다.^{6),7)} 기계가공성에서 전기연철은 일반 구조용강에 비하여 상당히 나쁘기 때문에 특수한 용도에 사용되는 단점이 있다.

2호 차량용 부상전자석은 일반 구조용강인 SS400을 사용하여 제작하였으며, 재질의 물성을 고르게 하기 위하여 동일한 롯트 생산품을 선정하였고, 전기적 특성을 고루 갖추기 위해 전부 열처리를 하였다.(사진1 참조)

전자석 코아의 기계가공은 NC 밀링선반에서 가공하여 24대의 전자석 부분품이 호환성을 갖도록 정밀가공을 하도록 하였다. 전자석 코일의 형상이 알루미늄 각선재에서 산화피막 알루미늄 박판재로 개선됨으로 해서 코일 turn수가 330turn에서 350turn으로 증가함에도 불구하고 전자석 코아의 높이가 191mm에서 161mm로 30mm 낮아질 수 있었다. 사진3은 개선전후의 전자석의 외형을 나타내고있다.

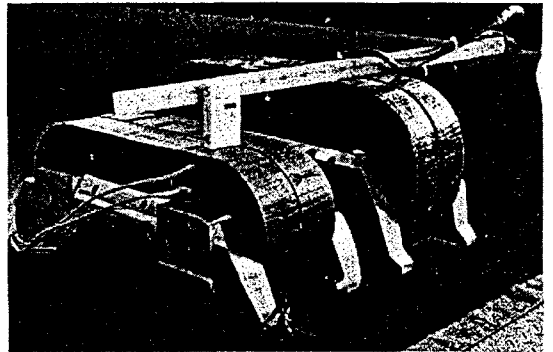


사진4. 개선된 전자석과 기존 전자석의 외형 비교

전자석 코일은 산화피막 알루미늄 박판재(0.25mm)를 사용하여 코일의 높이를 30mm로 낮추었고, 온도특성 또한 크게 향상시킬 수 있었다. 전자석 코일 재료는 국내산을 시험용으로 제작하여 보았으나, 절연특성이 나빠서 절연지를 감아야 하기 때문에 turn수 증가에 따른 코일의 높이 감소 factor의 의미가 적어졌다. 따라서, 독일의 Metaloxid사의 산화 피막 알루미늄 코일(anodizing aluminium strip coil)재를 수입하여 사용하였는데, 코일 winding 역시 독일에서 제작하였다. 이는 국내의 winding 기술이 떨어지는데 0.25mm의 박판재를 감을 때 모서리 부분의 산화피막 부분의 crack 방지 기술을 확보하기 어려웠다.

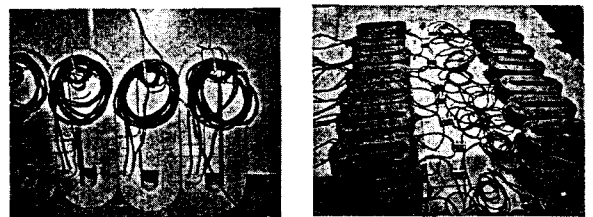


사진5. 독일에서 제작된 코일과 molding 처리 된 코일

사진5는 독일에서 제작된 코일을 보여주고 있는데 좌측은 anodizing coil에 석면 테이프를 감은것이고, 우측은 국내에서 molding 처리를 한 것이다. Molding 재료는 스위스 산의 Araldite로 epoxies (AW106), hardner (HV953K)를 1:1로 섞어서 사용한다. 본 molding에는 산화철분을 섞어 붉은색이 나도록 하였다. 본 epoxies는 온도 180℃까지 내열성을 갖고 있으며, 자연 건조후 경도가 뛰어난 장점이 있다.

3 전자석 시험 결과

전자석의 설계, 제작 후 전자석의 정특성 시험은 공극 변화에 따른 부상력 특성, 전류 변화에 따른 부상력 특성, 전자석 코일의 온도특성 등을 확인한다. 이때 사용하는 장치가 single magnet test bed이다.¹⁾

그림1은 2호 차량용 부상전자석에 대한 시험결과를 나타내고 있다. 정격 공극인 11mm, 12mm, 초기 부상공극인 19mm, 18mm에서 전자석에 전류를 공급하며, 부상력을 측정 한 결과이다. 그림2는 개선전의 전자석당 660turn 코일과 개선후의 700turn 코일의 경우를 비교한 결과이다.

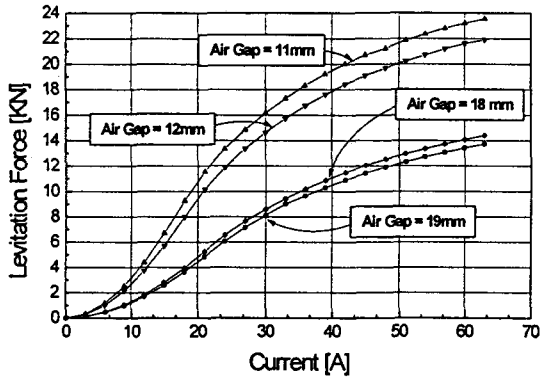


그림1. 2호 차량용 부상전자석의 전류 대 부상력 특성

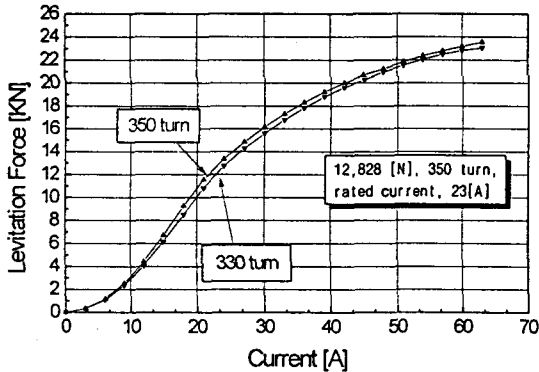


그림2. 전자석 코일의 turn수에 따른 부상력 특성

그림3은 Anodizing 코일에 대한 온도특성을 측정 한 결과이다. 온도센서는 K-type의 thermocouple을 사용하였다.

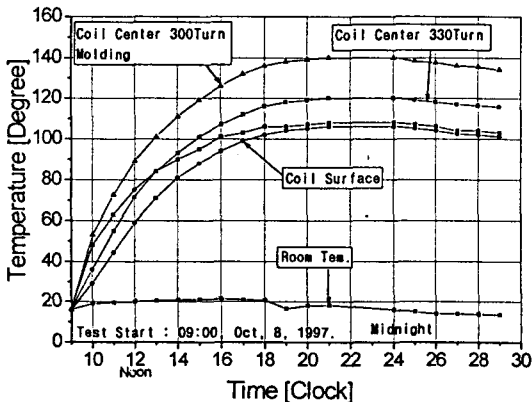


그림3. Anodizing Coil에 대한 온도특성시험

온도센서는 코일의곽에서 안쪽으로 약 2/3 지점에 심어져 있으며, 온도시험 결과 48시간 동안 정격 전류 23A를 통전 하여 약 140℃에서 포화가 나타남을 알 수 있었다. 따라서, 산화피막 알루미늄 박판재는 기존의 알루미늄 각선재에 절연지를 감아 사용하던 코일보다 온도에 대한 방열 효과가 큼을 확인하였다.

4 결 론

본 연구는 실용화를 목표로 하여 부상용 전자석에 대한 부상력의 증가 및 경량화를 목표로 대향 레일의 형상 및 재질 변경, 전자석 Test bed 설계 및 제작 시험, 전자석 코아의 형상 및 재질 변경, 전자석 코일의 형상 변경 등을 시도하여 전자석의 부상력 향상 및 제작비, 전자석 자중을 크게 감소하고자 하였다.

기존에 사용한 1호차량용 전자석은 전기연철 소재인 전자석 코아에 알루미늄 각선 코일을 사용하였다. 그러나, 전기연철이 전량 수입에 의존하여야 하며, 제작 공정상 소재 가공성이 어려워 제작비 등이 높아지는 단점이 있다. 또한 알루미늄 각선은 절연재인 NOMEX지를 감아 사용하므로 코일의 온도특성이 제한을 받게 된다. 2호차량에서는 일반 구조용강인 SS400을 사용하여 코아를 제작하였으며, 전자석 코일은 산화 피막 알루미늄 박판재(0.25mm)를 사용하므로 절연지를 감을 필요가 없어 온도특성이 좋아지게 되어 정격 전류의 증가를 가능하게 한다. 또한, 코일의 turn수를 증가하고도 전자석 코아의 높이를 감소시킬 수 있어 전자석 자중을 크게 감소할 수 있다. 실험 결과 부상력/자중비를 6.8에서 9.15로 크게 향상시켰으며, 12%의 부상력 증가를 나타내었다.

온도특성에 있어서 정격전류 인가시 1호 차량용 부상전자석은 5시간만에 180℃에 도달하였으나, 2호차량 부상용 전자석 코일의 온도특성은 45시간 동안의 정격전류 인가시에도 140℃에서 포화되어 온도특성이 크게 향상됨을 알 수 있었다.

향후 전자석에 대한 형상 개선 연구가 필요하며 edge 부분에 대한 누설 자속 감소 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 김봉섭, 정현갑, "상전도흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구", 대한전기학회 1995년도 하계학술대회, 1995.7, pp.46-49
- [2] 김봉섭, 정현갑, 강병관, 강만식, "상전도흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(II)", 대한전기학회 1995년도 추계학술대회, 1995.11, pp.49-51
- [3] 김봉섭, 정현갑, "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(III)", 1996년도 추계학술대회, 대한전기학회, 1996.11, pp.12-14
- [4] 김봉섭, 유문환, 정현갑, "상전도 흡인식 자기부상열차 부상용 전자석에 대한 실험적 연구(IV)", 1997년도 하계학술대회, 대한전기학회, 1997.7, pp.67-73
- [5] 정현갑, 김봉섭, "도시형 자기부상열차 개발의 요소성능시험 및 평가", 기계와 재료, 한국기계연구원, 제9권 제2호, 통권32호, 1997.7, pp.46-69
- [6] 김봉섭, 정현갑, 유문환, 신판석, "A Design of Analysis of A Magnet for Urban Transit Maglev Vehicle (UTM-01) in Korea", 15th International Conference on Magnet Technology, Beijing, China, 1997.10.20-24
- [7] 김봉섭, 정현갑, 하경덕, 신판석, "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석의 실험적 연구(V)", 1997년도 추계학술대회, 대한전기학회, 1997.11, pp.28-31
- [8] 정현갑, 김봉섭, 유문환, 강병관, "An Experimental Study to Improve the Magnet Performance for Korean Maglev Test Vehicle (UTM)", MGALEV'98, The 15th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 1998.4.12~4.16, Tokyo, Japan