

도시형 자기부상열차의 부상용 전자석의 Long Pole화에 따른 비교해석 연구

김 봉 섭, 성호경

한국기계연구원 신교통기술연구부 자기부상열차개발그룹

The Study of Compare with Anaysis of Longitudinal Pole to Levitation Magnet for Urban Transit Maglev

Kim Bong Seop, Sung Ho Kyoung

(e-mail : bskim@kimm.re.kr)

Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract : It leaves much room for improvement that UTM-01 is of practical use. Therefore we will design of longitudinal pole magnet for UTM-02 system. The design of new magnet is based on light weight for bogie system. The new magnet for UTM-02 was reduced weight of magnet is 18kg per one, then it was ratio lift to weight is 10.13.

Keyword : 3D FEM, Magnet, Longitudinal pole, UTM-02

1 서 론

부상용 전자석은 자기부상열차의 차체와 지상 선로와의 간격을 일정하게 부상 유지시키는 시스템이다.

부상용 전자석의 설계 시 부상력은 자기부상열차의 滿車를 기준으로 한 전체 자중을 필요로 하는 전자석의 대수로 나누어 전자석 한 대가 부담하여야 할 부상력을 산출한다. 전자석의 길이 및 정격 공극 등은 차체의 길이와 선로의 곡선 및 勻配에 의해 결정된다. 정격 부상력이 결정되면 전자석의 허용 온도 등을 고려하여 정격 전류, 전압 및 코일 turn수를 결정한다. 전자석의 부상력은 ampturn의 제곱에 비례하므로 가급적 turn수가 많을수록 커진다. 그러나 필요이상의 turn수는 전자석의 pole 높이를 크게하므로 전자석의 중량이 증가하므로 경량화에는 적합치않다. 또한 ampturn이 커지면 전자석 core 재질의 자기포화를 가져오므로 부상력 증대에 큰 영향을 주지 못한다.

따라서, 자기부상열차에서의 부상용 전자석의 설계는 전체 시스템 설계의 기본이 되는 사항으로서 시스템 경량화 및 안전성, 신뢰성 등에 상대적으로 영향을 줄 수 있기 때문이다. 전자석의 경량화 설계가 전체 시스템의 경량화로 직결되지는 않지만 이와 관련한 충분한 설계 knowhow를 극대화하여 고효율의 전자석 설계가 필요하다.

본 논문에서는 부상용 전자석에 대한 longitudinal pole의 해석을 통하여 새롭게 시도하는 경량화 자기부상열차 UTM-02의 부상용 전자석을 설계하고자 한다.

2 UTM의 부상용 전자석 개발 현황

2.1 제 1단계 (1995~1997)

도시형 자기부상열차(UTM-01) 1호 차량(전체 공차 23ton) 전자석은 당시 현대정공 자기부상열차개발부에서 설계 제작하였고, KIMM에서 특성시험 및 분석을 하였다.¹⁾²⁾

1호 차량 부상용 전자석의 주요 제원은 다음과 같다. 정격 공극 11mm, 전자석 pole 길이 680mm, pole 높이 191mm, yoke 두께 70mm, 전자석 코일(알루미늄 각선; 3mm×4mm) turn 수 660, 전자석 자중은 179kg, 부상력은 정격 전류 21A에서 10,838N으로 전자석 자중 대 부상력 비는 6.18이고, 전자석의 재질은 전기순철(pure iron)이다.

전자석의 허용 온도는 180℃로 설계되었으나 정격 전류 21A에서 5시간 만에 140℃에 접근하여 온도특성이 좋지 않은 것으로 결론지었다. 이는 알루미늄 각선에 절연을 위한 nomex 때문에 방열이 충분히 일어나지 않았기 때문이다.

2.2 제 2단계 (1998~1999)

도시형 자기부상열차(UTM-01) 2호 차량 전자석은 KIMM에서 재설계, 제작되었고, 충분한 시험을 거쳐 성능을 확인하였다.³⁾⁴⁾⁵⁾

2호 차량 부상용 전자석의 주요 제원은 다음과 같다. 정격 공극 11mm, 전자석 pole 길이 650mm, pole 높이 161mm, yoke 두께 65mm, 전자석 코일(산화피막 알루미늄 박판재; 0.25mm×80mm) turn 수 700, 전자석 자중은 143.5kg, 부상력은 정격 전류 23A에서 12,808N으로 전자석 자중 대 부상력 비는 9.11이고, 전자석의 재질은 일반 구조용강(SS400)이다. 1호 차량 부상용 전자석과 비교하여 전자석 자중은 19.8% 감소하였고, 정격 부상력은 17.8% 증가하였다. 따라서, 전자석 자중 대 부상력 비는 47.5% 증대되었다.

전자석의 온도특성은 전자석 코일재를 알루미늄 각선에서 산화피막알루미늄박판재로 변경되어 별도의 절연재를 사용하지 않아 전자석 코일의 높이를 크게 감소할 수 있었으며, 전자석 코일의 방열효과가 커서 정격 전류 21A에서 14시간 경과 후 150℃에서 유지됨을 알 수 있었으며, 전류 24A에서 18시간 경과시에는 175℃에서 포화상태임을 알 수 있었다.

2.3 제 3단계 (~2000)

UTM-02의 부상용 전자석 모델을 개선 설계하였다. 대차(bogie)의 4코너에 전자석이 장착되는데 각 코너는 2대의 전자석이 달려있다. 기존의 전자석은 각 코너의 2대분의 전자석의 pole 부분이 독립적으로 분리되어 있었으나, 대차에 부착되는 pole부분을 전자석 2대의 pole을 하나로 연결하였다. 장대(longitudinal) pole로 할 경우 대차의 side frame의 구조 강도면에서 뛰어난 효과를 볼 수 있으며, side frame의 알루미늄 사시부분을 감소시킬 수 있다.⁶⁾

UTM-02의 부상용 전자석의 주요 제원은 다음과 같다. 정격 공극 10mm, 전자석 pole 길이 600mm, pole 높이 145mm, yoke 두께 65mm, 전자석 코일(산화피막 알루미늄 박판재; 0.25mm×80mm) turn 수 600, 전자석 자중은 124kg, 부상력은 정격 전류 23A에서 11,158N으로 전자석 자중 대 부상력 비는 9.18이고, 전자석의 재질은 일반 구조용 강(SS400)이다.

3 UTM-02 Longitudinal 전자석 해석

3.1 Longitudinal 전자석 설계 개요

당해 연도에는 차체의 길이가 약 9.2m로 줄고, 대차 길이 또한 3.5m에서 3m로 줄게 되는 2 대차 시스템으로

확정되어 차체의 총 중량(空車)은 약 12ton으로 산출된다. 따라서, 승객, 화물 및 안전율을 고려하면 滿車 시 20ton이 된다. 즉 전자석 1대가 부담해야 할 부상력은 1.250 kgf(12,250N)이 된다.

전자석에 공급되는 정격 전류를 23~24A라 하면 12kN의 부상력을 내기 위하여 전자석 당 coil turn수는 640 turn이 된다. 따라서, 예상되는 전자석의 초기 설계 파라미터는 pole 길이 650mm, pole 높이 145mm, yoke 높이 55mm, 정격 공극은 10mm이다.

전자석의 core 재질은 전자석 coil에 의해 flux를 발생하는 부분인 yoke 부분은 전기순철(pure iron)을 사용하고, 전자석 pole 부분은 일반 구조용강인 SS400으로 한다. Coil은 산화피막알루미늄 박판재를 사용하되 온도 특성을 최대한 올리는 방법으로 nominal current를 상향시켜 설계한다.

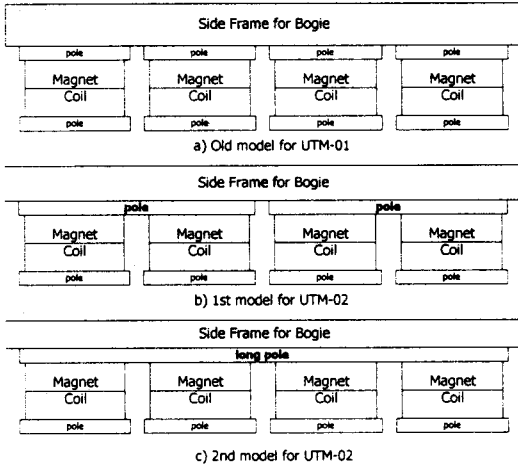


그림 1. 각 Model 별 Bogie의 전자석 배치도

기존 차량의 대차시스템은 그림 1의 a)와 같이 대차의 각 side frame에 4대의 전자석을 배치하는 방법이었으나, 작년도에는 대차의 side frame 부분에 장착되는 부분을 그림 1의 b)와 같이 2개의 longitudinal pole(전자석 2대의 한쪽 pole을 같은 몸체)로 하고 다른 쪽의 pole은 기존과 같게 각각 2개로 나누게 하였다. UTM-02에는 그림 1의 c)와 같이 1개의 longitudinal pole(전자석 4대의 pole을 같은 몸체)로 다른 쪽의 pole은 기존과 같이 각각 4개로 한다. 한쪽을 longitudinal pole로 함으로서 그림 1의 a), b)에 비해 c)의 side frame의 알루미늄 구조가 상대적으로 작아지게 되고 대차의 구조 강도가 크게 강화되는 장점을 가져온다. 따라서, 대차의 경량화 및 구조 안전성을 동시에 해결할 수 있다. longitudinal pole 사용으로 인한 대차의 구조 강도는 대차 설계 part에서 별도로 수행하고, 수행 결과를 통해 전자석 최종 설계에 반영한다. 단, 제동시스템이 유압식으로 되어야 한다.

3.2 FEM을 이용한 전자석 해석

UTM-02 부상용 전자석을 설계하기 위해 FEM해석기법을 사용하였다. 전자석의 형상은 비교적 대칭적이기 때문에 2차원 해석으로도 가능하다. 그러나, 경량화 설계를 위해서는 정밀한 해석이 요구되므로 3차원 FEM 해석을 이용하였다.

정자장의 맥스웰방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$\oint_c H \cdot dl = I \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\oint_s B \cdot ds = 0 \quad (4)$$

$$B = \mu H \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \nabla \times A = 0 \quad (6)$$

식(3),(4)에서 식(6)과 같은 항등식을 이용하여 식(7)과 같이 자기벡터포텐셜 A를 정의한다.

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

식(5)와 식(7)을 식(1)에 대입하여 정리하면 식(8)과 같다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (8)$$

매질이 등방성이라면 식(8)은 식(9)와 같이 된다.

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (9)$$

그림 2는 전자장 해석 흐름도를 보여주고 있다.

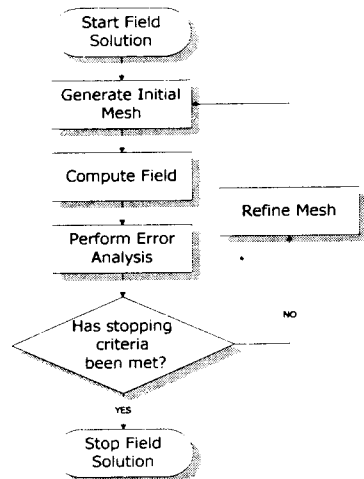


그림 2. 전자장 해석 흐름도

그림 3은 전자석 재질에 대한 초기화특성곡선을 나타내고 있다. 전자석 재질은 전자석의 yoke 부분은 전기순철을, 전자석 pole은 일반 구조용강을 사용하므로 이에 대한 자기이력곡선 조사를 하였다.

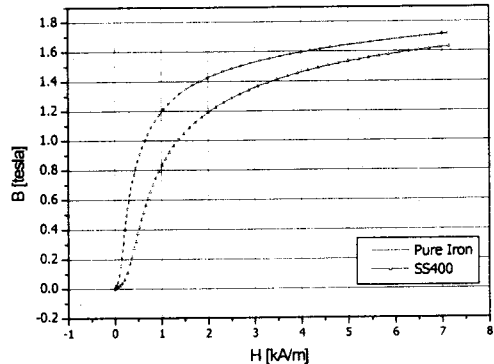


그림 3. 전자석 Core 재질의 초기 BH 특성곡선

3.3 3D FEM 해석 결과

UTM-02 Longitudinal 전자석의 해석 조건은 정격 공극 10mm, 코일 재질 알루미늄, 640turn(turn 당 두께×폭; 0.25mm×80mm)이다. 차량 총 하중은 안전율을 고려한 20ton으로 하였다. 전류 source는 48A까지 변화할 경우를 해석하였고, 전자석 core의 yoke 재질은 pure iron, 전자석 pole과 대향 rail의 재질은 SS400으로 하였

다. 그림 4와 5는 전자석 코일의 전류가 각각 24A, 48A 일 경우 전자석 core 및 rail의 자속 밀도 분포를 보여주고 있다.

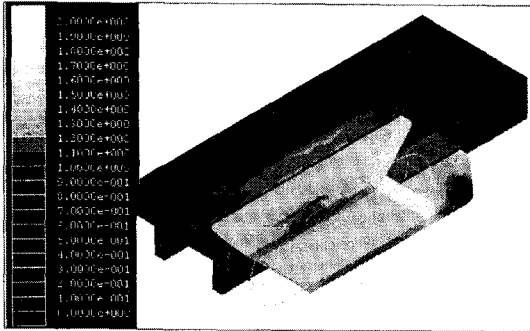


그림 4. 전류 24A에서의 자속밀도 분포도

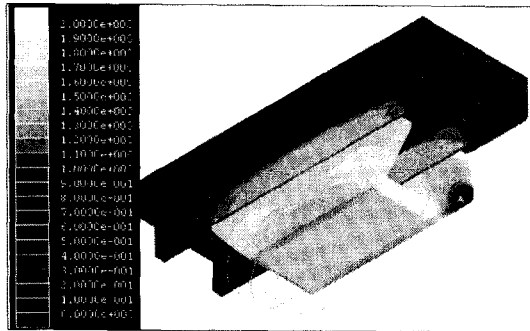


그림 5. 전류 48A에서의 자속밀도 분포도

그림 5의 자속밀도 분포는 초기 부상 시 공극 18mm에서 10mm까지 변동하므로 최대 48A의 전류가 흐른다. 이 경우 전자석 core의 yoke 부분이 자기포화 영역에 근접함을 보여주고 있다.

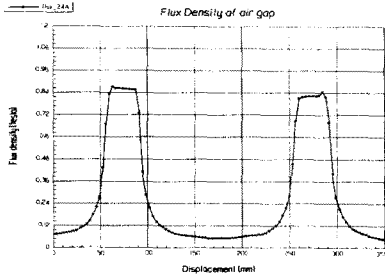


그림 6. 공극 내의 자속 밀도(24A)

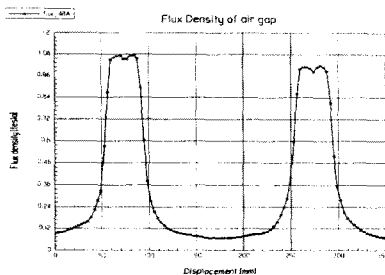


그림 7. 공극 내의 자속 밀도(48A)

그림 6과 7은 공극 내의 자속밀도를 나타내고 있고,

그림 8과 9는 전자석 단면에서의 자속밀도를 보여준다. 정격 공극, 정격 전류에서 0.8 tesla 이며, 초기 부상시 자속밀도는 거의 1.8 tesla에 근접함을 보여주고 있다.

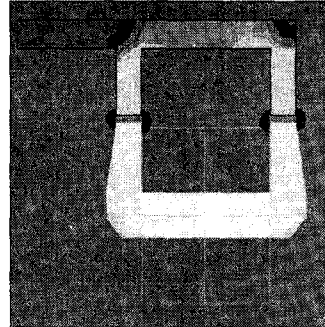


그림 8. 정 중앙 단면에서의 자속밀도(24A)

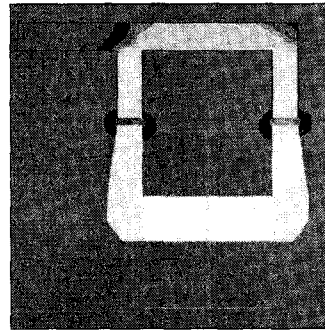


그림 9. 정 중앙 단면에서의 자속밀도(48A)

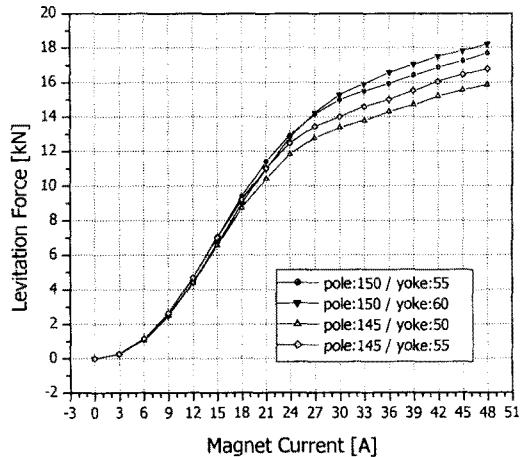


그림 10. 전류에 따른 model 별 부상력 특성

그림 10은 부상용 전자석의 전류 증가에 따른 부상력 특성을 보여주고 있다. 해석 model은 pole 높이가 150mm 일 때 yoke 두께 55mm, 60mm의 경우와 pole 높이가 145mm 일 때 yoke 두께 50mm, 55mm인 경우로 나누었다. 그림에서 알 수 있듯이 pole 높이가 일정할 경우 yoke의 두께 변화에 따라 초기 부상에 따른 부상력 부담이 커지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

도시형 자기부상열차는 높은 효율의 부상력을 갖춘 전자석을 이용함으로써 경량화에 접근하고 있으며, 대차의 AI 구조인 side frame의 강도를 보강해주는 longitudinal pole을 사용함으로써 구조의 간단화, 경량화, 고강도화의 효과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 전자석 pole의 장대화에 따른 부상력 특성을 고찰하고 3차원 해석을 통하여 전자석 설계를 제시하였다. 해석 결과 장대화 pole에 의한 중량 증가를 예상하였으나 불필요한 부분을 제거함으로써 1대차의 8대분의 전자석 중량은 1,004kg으로 전자석 1대의 중량은 125.5kg이다. 정격 공극 10mm, 정격 전류 24A에서 12,467N의 부상력을 나타냄으로써 전자석의 부상력 대차중비는 10,13으로 UTM-01의 2호 차량(9.11)에 비해 약 11%의 증가를 보였다.

본론에서 언급하였듯이 longitudinal pole 전자석의 경우 제동시스템이 유압으로 사용할 경우 가능한 구조임을 밝힌다.

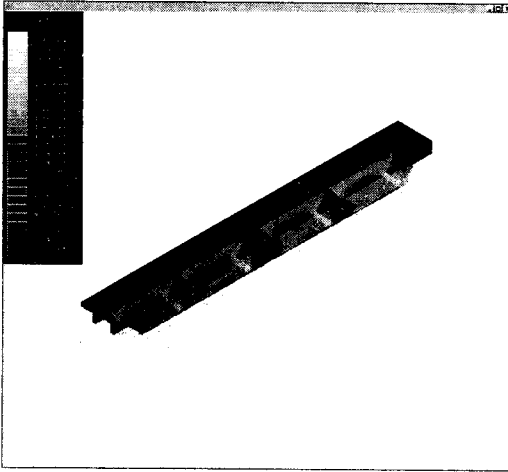


그림 11. UTM-02 Magnets for Side Frame

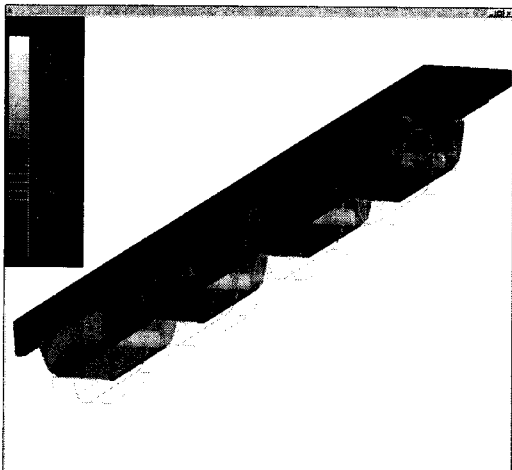


그림 12. UTM-02 Magnets for Side Frame (longitudinal pole)

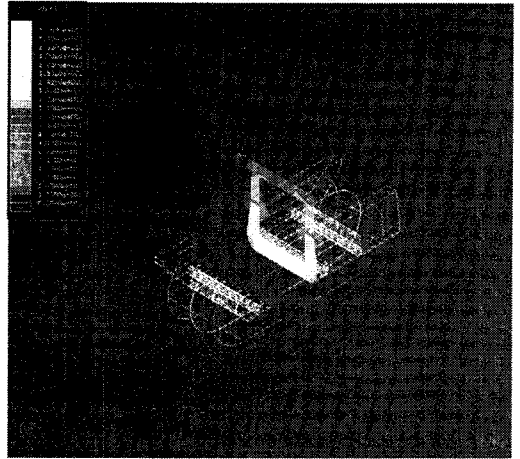


그림 13. 3차원 단면의 자속밀도 분포(24A)

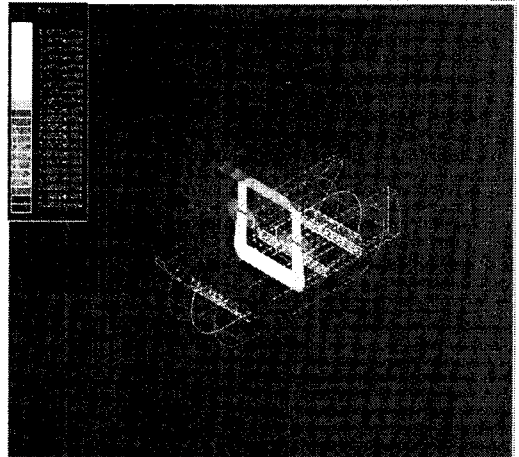


그림 14. 3차원 단면의 자속밀도 분포(48A)

참고 문헌

- 1) 김봉섭, 정현갑, "상전도흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구", 대한전기학회 1995년도 하계학술대회, 1995.7.22, pp.46-49
- 2) 김봉섭, 정현갑, 강병관, 강만식, "상전도흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(II)", 대한전기학회 1995년도 추계학술대회, 1995.11.18, pp.49-51
- 3) 김봉섭, 정현갑, "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(III)", 1996년도 추계학술대회, 대한전기학회, 1996.11.16, pp.12-14
- 4) 김봉섭, 정현갑, 하경덕, 신판석, "상전도 흡인식 자기부상차량용 전자석의 실험적 연구(V)", 1997년도 추계학술대회, 대한전기학회, 1997.11.29, pp.28-31
- 5) 김봉섭, 유문환, 정현갑, "도시형 자기부상열차 부상용 전자석에 대한 실험적 연구(VI)", '98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1998.7.21., pp.40-42
- 6) 김봉섭, "Maxwell-3D FEM을 이용한 UTM(Urban Transit Maglev)-02 부상용 전자석 설계", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집A, 2000. 7. 20., pp.699-701