

Maxwell-3D FEM을 이용한 UTM(Urban Transit Maglev)-02의 부상용 전자석 설계

김 봉 섭

한국기계연구원 신교통기술연구부 자기부상열차개발그룹

The Design of Levitation Magnet for UTM(Urban Transit Maglev)-02 using Maxwell-3D FEM

Kim Bong Seop

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

Korea Institute of Machinery & Materials

Abstrat : It leaves much room for improvement that UTM-01 is of practical use. Therefore we will design of UTM-02 system. The design of new magnet is based on light weight for bogie system. We used Maxwell-3D FEM for design of new magnet. The new magnet for UTM-02 that was reduced weight of magnet, 22kg, then it was increased ratio lift to weight is 9.87.

Keyword : Maxwell-3D, FEM, Magent, UTM-02

전자석의 pole 길이는 650mm에서 600mm로 줄였으며, pole 높이는 161mm에서 145mm로 줄였다. 가장 큰 영향을 차지하는 yoke의 경우는 두께 65mm를 그대로 유지하였고, 길이를 444mm에서 425mm로 줄였다. 따라서, 전자석의 부상력 감소 없이 전자석당 약 22kg을 줄일 수 있었다. 전자석의 부상력 대 전자석 자중 비는 21A에서 UTM-01 전자석의 경우 8.39이며, UTM-02 전자석은 24A에서 9.87이다. 전자석 1대의 중량은 124kg이다.

1 서 론

도시형 자기부상열차(UTM-01: Urban Transit Maglev-01)의 prototype은 1차량에 차체와 3개의 대차(bogie)로 구성되어있다. 각 대차는 한 쌍의 frame이 2개의 tie-bar로 결합되어있으며, 각 frame에는 부상용 전자석 4대 및 추진용 SLIM 1대로 되어있다. 따라서 1차량은 총 24대의 전자석과 6대의 SLIM으로 구성되어있다. UTM은 차량 총 중량(만차시) 28ton을 고려하여 24대의 전자석으로 reference gap 11mm로 부상시키며, 6대의 SLIM으로 추진을 한다.

UTM-01이 기존의 바퀴식 교통시스템에 비해 저진동 저소음 등의 장점을 지닌 반면 차체의 경량화, 시스템 안정성 및 신뢰성 등에서 미흡한 면이 있다. UTM이 실용화 측면에서 해결되어야 할 점은 시스템의 경량화 및 최소 곡선반경(60mR)의 원활한 주행, 부상 및 추진 제어 안정성 및 신뢰성 확보이다.

UTM-02는 이러한 문제를 해결하기 위한 시도로 차체의 공차 중량을 21ton에서 18ton으로 경량화 설계를 실시중이다. 경량화 설계의 주된 내용은 대차의 side frame의 길이를 3.5m에서 3.2m로, 높이를 950mm에서 750mm로 감소되며, 정격 부상 공극 또한 11mm에서 10mm로 줄어들게 된다.

본 논문에서는 UTM-02 차량 설계에 따른 새로운 부상용 전자석 설계를 다루고자 한다. 필자는 수 차례에 걸쳐 UTM-01 전자석에 대한 특성시험 자료를 발표한 바 있다. 1)2)3)4)5)6)7)8)

전자석 설계를 위한 해석 S/W는 Maxwell-3D FEM을 사용하였다. 먼저 Maxwell-3D FEM에 대한 확인 검증용 위하여 실제 사용되고 있고 모든 특성 시험결과를 가지고 있는 UTM-01 부상용 전자석을 해석 모델로 사용하였다. 해석 결과 UTM-01 전자석에 대한 전류 대 부상력 특성은 실험치와 잘 일치함을 알 수 있었다.

전자석 설계는 안전율을 고려하여 차량 총 중량을 25ton으로 하면 전자석 1대의 부상력 부담은 만차 시 1.04ton이다. UTM-01에 비해서 정격 공극이 11mm에서 10mm로 줄어들게 되므로 부상력의 증가는 약 21% 늘게 된다. 따라서, UTM-02의 경우 전자석의 coil turn 수는 감소되므로 350turn에서 300turn으로 줄였다. 대차의 side frame의 길이가 감소됨에 따라 UTM-02용

2 UTM-02 부상용 전자석 설계

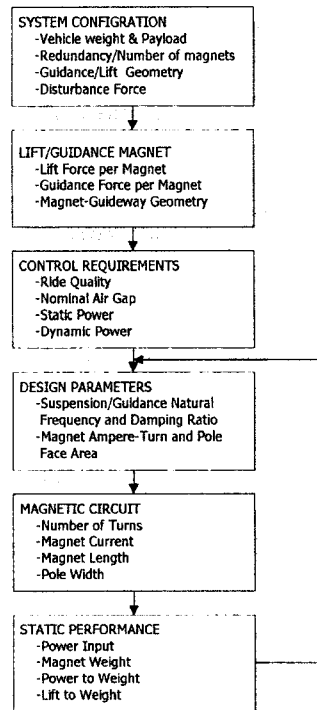


그림 1 전자석 설계 흐름도

전자석 설계를 위해서 고려되어야 할 조건은 그림 1과 같으며 내용은 다음과 같다.9)

- (1) System Configuration : 안전율을 고려한 차량중량 산정, 전자석 개수, 레일 구조 등
- (2) Lift/Guidance Magnet : 전자석 당 요구 부상력 및 안내력 예측
- (3) Control Requirement : 정격 부상 공극, 승차감, 센

서 선정, 정·동특성 등

- (4) Design Parameter : 2차 suspension 및 guideway natural frequency, damping factor 등
- (5) Magnet Circuit : 코일 turn 수, 전류, pole 길이, yoke 두께 등
- (6) Static Performance : 전자석 중량, 입력 대 자중비, 부상력 대 자중비, 전류 및 공극 대 부상력, feedback gain 및 보상 등

3 Maxwell-3D FEM 해석

3.1 Maxwell-3D FEM

국내에서 사용되는 전자장 해석 S/W는 여러 가지가 있다. 필자는 사용자의 접근이 용이하며, 복잡한 구조의 modeling도 쉽게 구현이 되는 Maxwell-3D FEM을 선택하였다. 본 S/W는 유한요소법을 기초로 한 2,3차원 전자장해석 simulator로서 사용하기 쉬운 ACIS 3D Modeler, Mesh 최적화, Adaptive Solve, 전계, 자계, Eddy current 해석 등이 가능하다. 전자장 해석을 위한 흐름도는 그림 2와 같다.

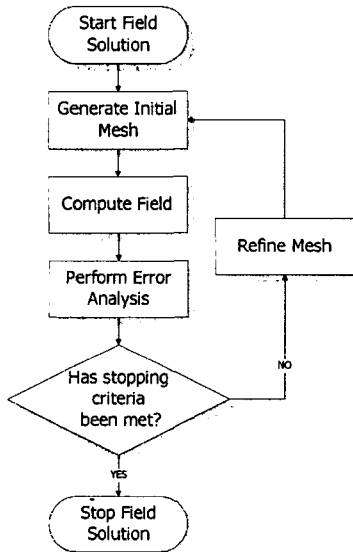


그림 2 전자장 해석 흐름도

3.2 전자장 Simulation

전자장의 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.

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

식(9)는 전류분포에 의해 나타나는 공간의 자기벡터포텐셜을 표현하고 있는 정자장에서의 지배방정식이다. 이는 편미분 방정식에서 Poisson 방정식이라 불리며 포물선형에 속한다.

3.3 UTM-02 전자석 Simulation 결과

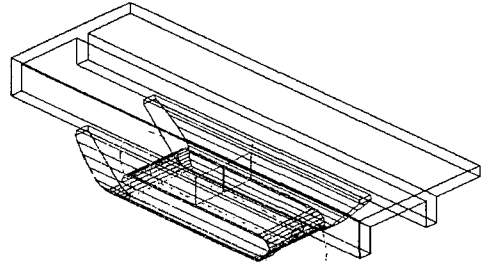


그림 3 전자석 3차원 Model

전자석 3차원 모델은 그림 3과 같다. 3차원 그림으로 표현하기 위해서 전자석 pole, yoke, coil, rail의 단면형상을 2차원에서 그린 후 3차원 modeler에서 입체화한다.

해석 모델을 완성한 후 경계조건을 설정한다. 경계조건에서 전자석 코일은 ampere turn 값으로 주어지며 전자석 pole과 rail의 공극은 10mm, 11mm 두가지 경우로 해석하였다. 재질 입력은 코일의 경우 Al으로 core, yoke, rail은 SS400으로 주어졌다.

서론에서 기술한대로 기존의 UTM-01 부상용전자석에 대한 실험 data를 근거로 하여 1차로 3차원 해석을 시도하였다. 해석 결과 주어진 조건에서 잘 일치함을 알 수 있었으며, 실험치와 해석치의 비교는 그림 4와 같다.

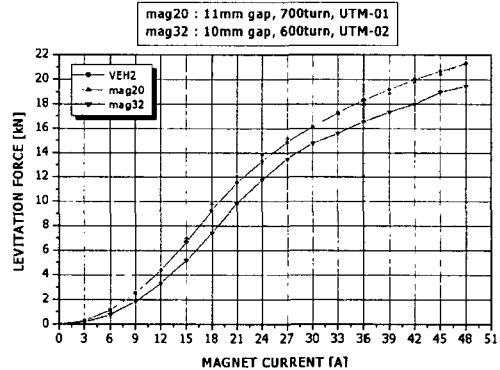


그림 4 UTM-01,02 전자석의 해석 및 실험 비교

따라서, 표 1과 같이 전자석 모델을 설정하여 해석을 하였다. 표 1에 나타내었듯이 전자석의 pole 길이 및 높이가 변화, yoke의 두께 및 길이 변화, 공극길이의 변화, 코일의 turn수 변화 등에 따라 해석하였다. 표에서 Mag_20~25는 UTM-01 전자석의 경우이며, Mag_31~35는 UTM-02 전자석을 나타낸다. Mag_33의 경우가 가장 큰 force를 보여주고 있지만 pole의 최대 두께가 50mm가 되어 자중이 증가한다. 따라서, Mag_32를 최종모델로 선정하였다. 전자석의 중량은 Al 코일의 경우 2개가 38.8kg, 전자석 pole 2개가 50kg, yoke 1개가 35kg으로 산출되어 총 123.8kg이다. UTM-02 전자석은 UTM-01 전자석에 비해 약 22.5kg의 중량이 감소하였으며, 부상력 대 자중 비의 경우 8.39에서 9.87로 향상시킬 수 있었다.

4 결론

UTM-02 전자석의 설계는 차량 전체 시스템을 고려하여 야 한다. 차량 중량, 안전율, 차체 길이, 주행선로의 조건 등 여러 가지를 참작하여 전자석의 크기가 결정된다. 또한 전자석의 전류원인 초퍼, 컨버터의 용량을 고려하여 정격 전류등이 결정된다.

본 논문에서는 이러한 차량 조건을 고려하여 전자석의 기본설계를 하였으며, Maxwell-3D FEM S/W를 이용하여 상세설계를 위한 각종 parameter를 산출하였다. Simulation S/W가 비교적 쉽게 접근할 수 있어서 해석 시간을 짧게 할 수 있었다. 전자석 해석 과정에서 어려웠던 점은 재질특성 입력이 매우 중요함을 알 수 있었다. UTM-01, 02와 같이 대용량의 전자석의 경우 조그만 시편에 의한 BH-curve 특성은 저전류 영역에서는 잘 일치하지만, 전류가 큰 영역에서는 해석치가 saturation 영역에 접근하지 못함을 알 수 있었다. 따라서, UTM용 전자석과 같이 제작이 큰 경우 BH-curve의 특성은 필히 고려해야 할 것이다.

결과적으로 UTM-02 전자석 설계는 coil turn수는 350turn에서 300turn으로 줄였고, 전자석의 pole 길이는 650mm에서 600mm로 줄였으며, pole 높이는 161mm에서 145mm로 줄였다. 가장 큰 영향을 차지하는 yoke의 경우는 두께 65mm를 그대로 유지하였고, 길이를 444mm에서 425mm로 줄였다. 따라서, 전자석의 부상력 감소 없이 전자석당 약 22kg을 줄일 수 있었다. 전자석의 부상력 대 전자석 자중 비는 21A에서 UTM-01 전자석의 경우 8.39이며, UTM-02 전자석은 24A에서 9.87이다. 전자석 1대의 중량은 124kg이다.

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, 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
- 5) 김봉섭, 정현갑, 하경덕, 신판석, "상전도 흡인식 자기부상차량용 전자석의 실험적 연구(V)", 1997년도 추계학술대회, 대한전기학회, 1997.11.29., pp.28-31
- 6) 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
- 7) 김봉섭, 유문환, 정현갑, "도시형 자기부상열차 부상용 전자석에 대한 실험적 연구(VI)", '98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1998.7.21., pp.40-42
- 8) 이석원, 신판석, 정현갑, 김봉섭, "영구자석을 이용한 상전도 자기부상열차용 전자석 개발 연구", '98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1998.7.21., pp.308-310
- 9) P.K.Sinha, "Electromagnetic Suspension Dynamics & Control", Peter Pererinus Ltd., United Kingdom, 1987

표 1 전자석 해석 모델 구분

	POLE (mm)			YOKE (mm)		COIL		AMP (A)	GAP (mm)	FORCE (N)	REMARKS
	L	H	W	L	H	Turn	H				
Mag 20	650	161	50	444	65	350	88	21	11	10,760	UTM-01 2호차 모델
Mag 21	650	161	50	444	60	350	88	21	11	9,849	Yoke 높이만 감소
Mag 22	650	161	50	444	65	350	88	21	11	10,773	Pole 양측, round type
Mag 23	600	161	50	394	65	350	88	21	11	9,484	Pole 길이 & Yoke 길이 감소
Mag 24	600	161	50	444	65	350	88	21	11	10,679	Pole 길이만 감소
Mag 25	650	161	45	444	65	350	88	21	11	10,300	Pole width 만 감소
Mag 31	600	153	45	402	73	300	75	23	10	10,737	Yoke 단면적을 같게
Mag 32	600	145	45	425	65	300	75	23	10	10,638	New Model
Mag 33	600	145	50	425	65	300	75	23	10	11,158	New Model의 pole 두께 증가
Mag 34	600	145	50	424	64	300	75	23	10	10,891	Yoke 길이, 두께 1mm 감소
Mag 35	600	146	50	425	65	300	75	23	10	10,994	Pole 높이 1mm 증가

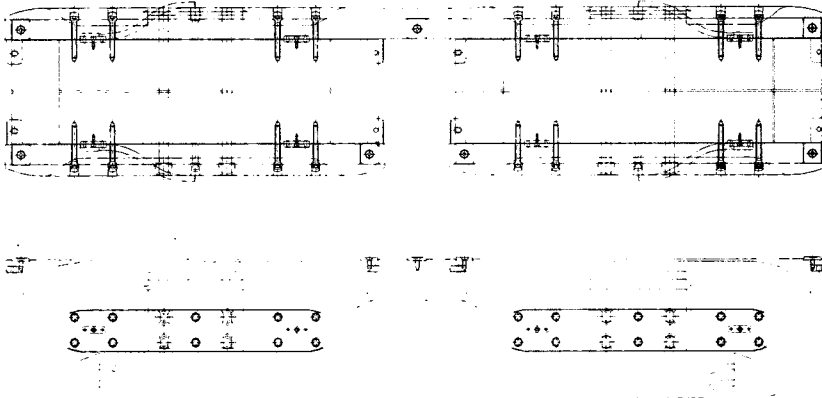


그림 5. UTM-02 부상용 전자석 제작도