

자기부상열차의 곡선주로(60mR) 주행 시를 고려한 부상용 전자석 설계 Simulation

김 봉 섭

한국기계연구원 첨단산업기술연구부 신교통시스템그룹

The Design Simulation of the Levitation Magnet for the Urban Transit Maglev as the Running Vehicle on Curved Line(60mR)

Kim Bong Seop

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

Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract : There is much room for consideration that the magnet design of UTM. When the vehicle runs 60mR curved line on test track, the ratio of cross section area changed to cross the magnet pole and rail. The ratio is reduced about 20% of the total magnet on one bogie. Therefor, magnet current is increased about 3.5A to maintain constant air gap. This paper suggest to margin of the magent design is 1.1 rather than rated levitation force.

Keyword : Magnet, 60mR curved line, cross section area

된다. 한쪽을 longitudinal pole로 함으로서 side frame의 알루미늄 구조가 상대적으로 작아지게 되고 대차의 구조 강도가 크게 강화되는 장점을 가져온다. 따라서, 대차의 경량화 및 구조 안전성을 동시에 해결할 수 있다.

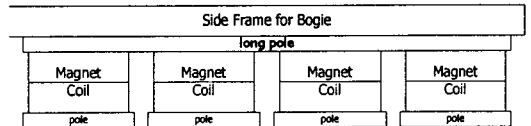


그림 1. UTM-02용 New Bogie의 전자석 배치도

1. 서 론

부상용 전자석(이하 전자석이라 함)은 자기부상열차의 차체와 지상 선로와의 간격을 일정하게 부상 유지시키는 시스템이다¹⁾. 따라서, 전자석의 설계는 전체 자기부상 열차의 설계 상 기본이라 할 수 있다.

전자석의 설계는 열차의 총 하중과 열차의 길이를 고려하여 필요 대수 및 필요 길이, 각 전자석의 필요 부상력을 산출한다.²⁾³⁾ 전자석의 부상력⁴⁾⁵⁾을 결정하는 조건은 상기에서 언급한 외에 다음과 같이 파악할 수 있다.

열차가 직선구간을 주행할 경우 전자석 pole과 대향 레일간의 일치하는 대향 면적을 100%라 할 때, 60mR 인 곡선구간의 경우 Tie Beam 대차는 곡선구간의 안쪽 대차가 바깥쪽 대차보다 약 160mm 만큼 앞서는 현상으로 1대차분 전자석 8대의 pole과 대향레일간의 겹치는 부분은 평균 약 75.5%이다. 전자석 공급 전류가 21A로 일정하고 공극이 일정한 정상상태의 경우 직선구간보다 곡선구간의 경우가 약 12%의 부상력 감소를 가져온다. 전자석 당 12%의 부상력 감소는 전자석 당 3.5A의 전류 증가를 보인다.

본 논문에서는 공차 중량 20ton, 만차 중량 30ton의 자기부상열차가 3대의 대차로 구성되고 총 24대의 전자석을 사용할 경우에 대해서 60mR 곡선구간을 주행함을 전제로 전자석의 최적 설계 Simulation을 하고자 한다. 아울러 전자석 설계 시 최적 margin을 제시하고자 한다.

2. UTM의 대차 운동 특성과 Simulation 조건

2.1. 대차의 구성

새로 개발될 차량의 대차시스템은 그림 1과 같이 1개의 longitudinal pole(전자석 4대의 pole을 같은 몸체)로 다른 쪽의 pole은 기존과 같이 각각 4개로 구성

2.2. 곡선 주행시 대차의 운동성 고찰

KIMM 자기부상열차 시험선로는 그림 2와 같이 직선, 분기, 완화곡선, 60mR 곡선, 4% 및 6%의 수직구배구간으로 되어있다. 직선 및 수직구배구간에서의 주행은 차량 속도와 관련되어 부상제어상태, 추진제어상태, 소음, 소비전력 등을 관찰한다. 60mR 곡선구간은 2가지로 되어 있는데, 곡선의 Cant각이 없는 격납고에서 나오는 곡선과 분기설비를 지나 4% 수직구배구간으로 향하는 60mR 곡선은 Cant각 2° 가 있다.

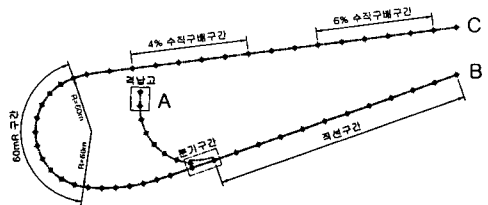


그림 2. 자기부상열차 시험선로(KIMM)

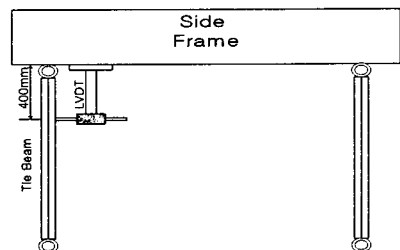


그림 3. 대차의 side frame과 tie beam 간의 변위 측정용 LVDT 구성도

자기부상열차가 이들 곡선구간에서 주행시 3대로 구성된 대차는 기존 바퀴식 열차의 피봇 대차 방식과 다른 Tie Beam 구조로 인하여 전자석 pole과 대향레일간의 평행이 직선구간과는 다르게 발생된다. 이러한 운동성을 관찰하기 위하여 그림 3과 같이 변위센서를 설치하여 횡방향 변위각을 측정하였다.

그림 4는 2호 차량의 1번 bogie로 60mR 곡선을 속도 5 km/h로 주행 시의 side frame과 tie beam 간의 변위를 나타낸 것이다. 곡선에 진입하여 주행할 경우 바깥쪽 side frame보다 안쪽 side frame이 160 mm 정도 앞선 현상을 알 수 있었으며, 이는 4.57°의 각을 보인다. 따라서, 60mR 곡선상을 차량이 주행할 경우 1, 3번 bogie는 약 4.57°의 각을 이루면서(평행 사변 형태), 궤도를 따라 감을 알 수 있다.

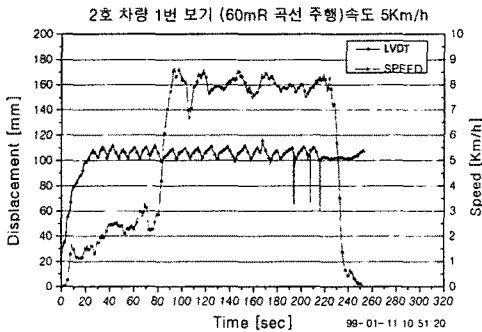


그림 4. Side Frame과 Tie Beam간의 변위 변화 (60mR)

또한, 3대의 대차 중 가운데를 제외한 앞, 뒤쪽 대차가 평행사변형을 이루면서 양쪽 side frame은 안쪽으로 약 9.7mm 정도 좁혀진다. 따라서, 열차의 주행 시 횡방향 변위 변화에 대한 guidance roller가 이탈을 막게 한다. guidance roller는 side frame과 레일 측면과 10mm의 유격을 갖도록 설치되어 전자석이 최대 20mm이상 횡방향으로 벗어나지 않도록 방지하는 장치이다.

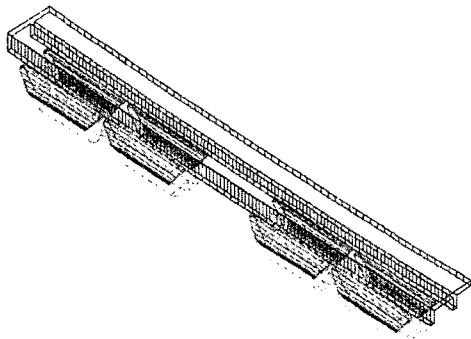


그림 5. Side Frame 전자석 배열의 3D Model

그림 5와 6은 한쪽 side frame의 전자석 배열과 횡방향 변위가 없을 때를 보여주고 있다. 횡방향 변위의 기준선은 전자석 2대와 2대 사이의 중앙이다. 이 기준선에서 좌우로 최대 15mm의 변위가 발생하는 것을 가정한 경우의 전자석 pole과 대향레일간의 겹치는 면적은 그림 7과 같다.

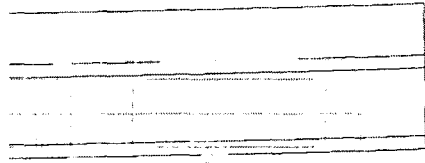


그림 6. 60mR 곡선에 위치한 대차 끝단의 전자석

한 대차에 구성된 전자석은 전후좌우 대칭구조이므로 열차의 진행방향의 좌 또는 우로 변위를 움직여도 같음을 그림 7에서 보여주고 있다.

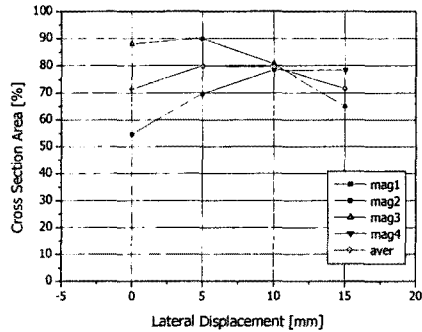


그림 7. 60mR곡선구간에서 횡방향 변위에 따른 전자석 pole과 대향레일간의 겹치는 면적

그림 8은 전자석 pole과 대향레일간의 겹치는 면적에 대한 부상력의 변화를 simulation한 결과이다. 그림 7에서 10mm 횡변위 시 겹치는 면적은 80% 정도이다. 그림 8로부터 겹치는 면적이 100%일 때 전자석 1대의 부상력은 14283(N)이고, 80%일 때의 전자석 1대의 부상력은 12581(N)이었다. Simulation 결과 곡선구간의 부상력은 직선구간에 비해 12%의 부상력 감소를 보인다. 부상력 대 전류의 비는 약 482(N/A)로서 12%의 부상력 감소는 약 3.5(A)의 전자석 공급전류의 증가를 가져온다.

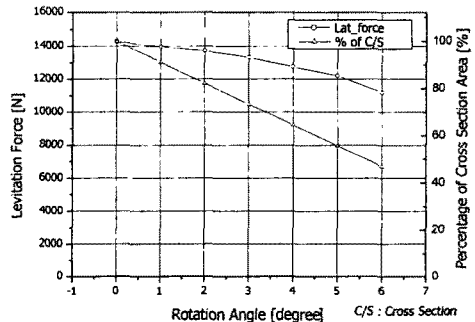


그림 8. 전자석 pole과 대향레일간의 겹치는 면적에 대한 부상력 변화

그림 9는 전자석의 횡방향 변위 시 부상력과 안내력의 변화를 보여 주고 있다. 일반적으로 자기부상열차는 비접촉 주행을 하면서 대향 레일을 추종하는 방식이다. 따라서, 부상제어방식에 있어서 부상제어만이 아닌 좌우 안내제어를 하고 있다. 따라서, 초기의 UTM-01 1호차의 경우 그림 10과 같이 5mm의 stagger를 주어 전자석을 배열하였다. Stagger는 전자석의 배열을 기준선(대향레일의 중심선: 레일의 진행방향)에서 좌우로

5mm의 편차를 두는 것을 말한다.

전자석의 stagger 배열은 전자석의 안내력(lateral force)을 복원력으로 이용하여 대차의 횡방향 운동을 제어하려는 목적이다. 그림 9에서 나타내었듯이 5mm의 횡방향 변위 시 안내력은 1016(N) 정도로 부상력에 비해 7%이다. 지금까지 차량시험 결과 안내력은 부상력의 10%미만 일 때 별도의 stagger를 줄 필요가 없다. 따라서, UTM-01 2호차의 경우 전자석 배열 시 stagger를 주지 않았다. 열차의 곡선 주행 시 발생되는 대차의 좌우 흔들림을 감소시키기 위해서는 최소한의 stagger는 7mm를 주어야 한다. 이에 대한 조건은 대차 길이 3.5m와 최소 곡선반경 60mR에 국한된다.

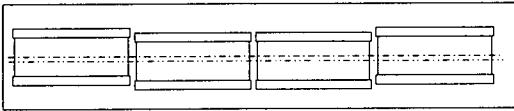


그림 9. 전자석의 Stagger 배열

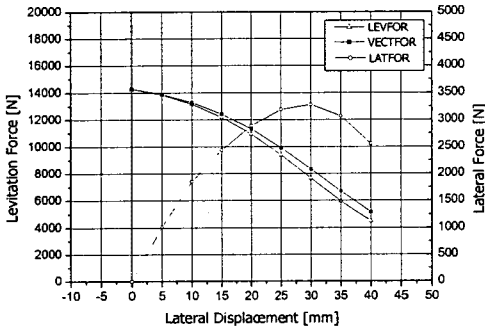


그림 10. 전자석의 횡방향 변위 변화에 따른 부상력, 안내력 변화

3. 결 론

부상용 전자석 설계는 차량의 Full Load 및 길이, 대차의 수, 전자석의 필요대수, 공극 길이, 공급전력 등 많은 요소가 필요하다.

지금까지의 전자석 설계는 차량의 Full Load와 전자석의 필요대수, 공극 및 공급전력 등을 고려하여 이루어져왔다. 차량이 구성되어 주행을 위한 동적 상태에서 여러 가지 외란으로 작용되는 것이 많다. 따라서, 본 논문에서는 상기와 같은 여러 외란 중 자기부상열차 전용 시험선에 있는 최소 곡선 선로에 대하여 차량 주행 시 대차의 운동특성을 실험을 통하여 고찰하고 대차의 운동특성이 부상계에 미치는 영향을 전자석의 설계에 반영하고자 하였다.

설계 조건은 정상상태인 일정 공극 정지 부상 시를 고려하였다. 60mR 곡선구간에 차량이 위치하였을 경우 전자석 pole과 대향레일간의 겹치는 면적이 20% 감소를 알 수 있었고, 이는 전자석 1대 당 12%의 부상력 감소를 보였다. 일정 공극을 유지하려면 전자석 1대 당 3.5(A)의 전류 증가가 필요하다. 따라서, 차량의 Full Load 시 보다 10% 정도의 margin이 필요할 것으로 사료된다.

전자석 설계 시 고려하여야 할 항목에 상기와 같은 선로조건이 들어가야 하며, 추후 동적 상태를 고려하여 전자석 최적 설계가 필요할 것으로 판단된다.

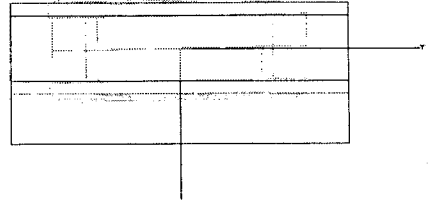


그림 11. 대향 면적비를 구하는 3D 모델

참고 문헌

- 1) 正田 英介, 藤江 柁治, 水間 毅, 加藤 純郎 共著, "磁氣浮上鐵道の技術", オーム社, 1992.8
- 2) 조홍계, 김봉섭, "상진도 자기부상식 도시형 자기부상열차의 주행성능시험 및 평가(Ⅲ)", 한국기계연구원 연구논문집, 28집, 1998.12., pp.5-12
- 3) 김봉섭, "도시형 자기부상열차의 종합 주행성능시험", 1999년도 춘계합동학술발표회, 대한전기학회 전기기기연구회, 1999. 5. 7., pp.13-15
- 4) 이정석, 이서우, 김봉섭, "도시형 자기부상열차의 주행성능시험(Ⅱ) - 부상 시스템", 1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집A, 1999. 7. 20., pp.6-8
- 5) 김봉섭, 성효경, "도시형 자기부상열차의 부상용 전자석의 Long Pole화에 따른 비교해석 연구", 2001년도 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 2001. 4.20., pp.163-166