

자기부상열차 UTM-01의 부상 공극 해석

Air Gap Responses of the Maglev Vehicle UTM-01 to Irregularities of Guideway

한형석* 김숙희* 임봉혁** 권정일* 허영철*
Han, Hyung-Suk Kim, Sook-heeYim, Bong-Hyuk Kwon, Jung-Il Hur, Young-Chul

ABSTRACT

The irregularities in the guideways used in the Maglev transportation system that result from surface roughness and deflection of guideway have strong effects on the dynamic characteristics of Maglev vehicles, because the electromagnetic suspension of Maglev vehicles strongly interacts with the guideway. For this reason, a numerical prediction of air gap responses to these irregularities is desirable to improve aspects of running performance, such as stability and passenger comfort, while minimizing aesthetic impact and construction cost. This paper presents a procedure to predict the air gap response which is a criteria for stability, and investigates the responses with the goal of attaining higher travel speeds in the urban Maglev vehicle UTM-01 utilizing electromagnetic suspension.

1. 서 론

상전도 흡입식 도시형 자기부상열차의 동특성은 가이드웨이의 처짐과 가이드웨이 표면 조도로 인한 불규칙도에 따라서 주로 결정된다⁽¹⁾. 주행성능인 부상 안정성과 승차감을 확보하면서 가이드웨이 건설 비용을 최소화하기 위해서는 자기부상열차 시스템 설계 초기 단계에서 가이드웨이 불규칙도에 따른 주행성능을 예측하여 가이드웨이 구조, 표면 조도 및 차량 설계 변수를 합리적으로 선정할 필요가 있다. 특히, 주행성능 중 가장 중요한 성능인 부상 안정성에 대한 해석이 이루어져야 한다. 부상 안정성의 평가 척도 중 하나는 전자석과 가이드웨이의 간극 즉 부상 공극 응답이다. 본 논문은 한국기계연구원에 설치된 시험선 가이드웨이를 바탕으로 가이드웨이 불규칙도에 따른 도시형 상전도 흡입식 자기부상열차 UTM-01의 부상 공극 예측에 목적이 있다. UTM-01은 5개의 관측 상태변수 궤환 제어 법칙을 사용한다. UTM-01은 시험용 도시형 자기부상열차로 시험 운행 중에 있으나 시험선의 길이 한계로 약 60 km/h 이상의 속도에서는 주행하지 못하였기 때문에 그 이상의 속도 즉 목표 속도인 110 km/h에서의 부상 공극 예측은 의미가 있다고 할 수 있다. 부상 공극 예측을 위하여 시험선에 대한 표면 조도 및 처짐에 의한 불규칙도가 우선 정의 된다. 그리고 ODYN/Maglev 프로그램을 이용하여 동특성을 해석한다. 동특성 중 부상 공극응답이 속도에 따라서 예측되고 평가된다. 이러한 결과는 자기부상열차의 부상 시스템 설계와 가이드웨이 구조 설계에 응용할 수 있다.

* 한국기계연구원, e-엔지니어링연구센터, 회원

E-mail : hshan@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7814 FAX : (042)868-7418

** 충남대학교 대학원

2. 해석 모델

2.1 가이드웨이 높이 불규칙도

본 논문에서는 가이드웨이의 구조적 설계가 이루어지지 않은 상태에서의 부상 공극을 예측한다. 즉, 가이드웨이의 처짐을 이론적인 값으로 가정한다. 이러한 가정에는 실제 동특성과 약간의 차이가 있지만 도시형 자기부상열차의 경우 운행 중 충격계수가 0.1이하이기 때문에 그 차이는 작을 것이다. 더구나, 이러한 가정은 이전 연구자들이 사용한 접근법이기도 한다⁽²⁾. 가이드웨이의 처짐은 그림1에서와 같이 처짐 한계만큼 이미 처져 있다고 가정한 것이다. 그림1은 1025 형상의 가이드웨이에 차량에 의한 하중이 전 구간에 분포하였다고 가정한다. 차량은 이와 같이 미리 처진 가이드웨이를 주행하게 되는 것이다. 랜덤 불규칙도인 가이드웨이 높이 조도는 한국기계연구원 시험선의 일부 구간에 대한 측정 형상을 이용한다. 그림2는 가이드웨이 높이 불규칙도이며, 이 불규칙도를 그림2의 형상과 합성하게 된다. 그 결과의 예를 그림3에서 보여주고 있다. 결과적으로 차량은 그림3의 형상을 주행하는 것으로 가정한다.

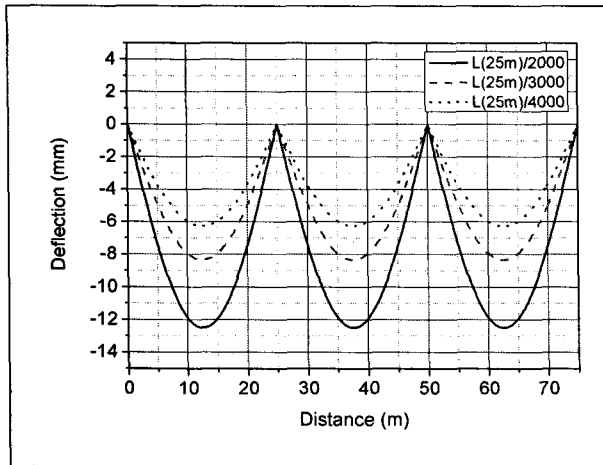


그림1. 가이드웨이 이론적 처짐 형상

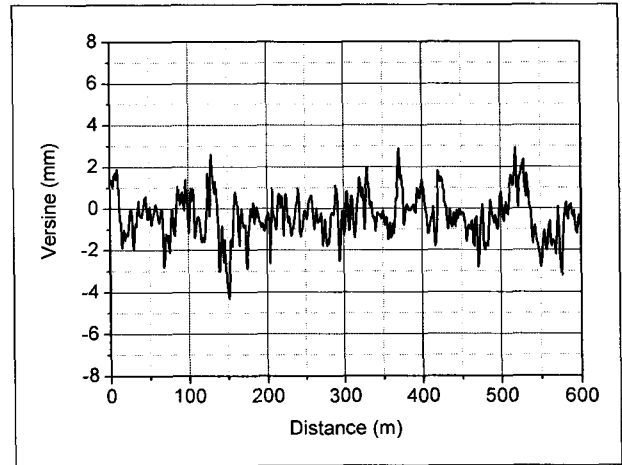


그림2. 가이드웨이 높이 불규칙도

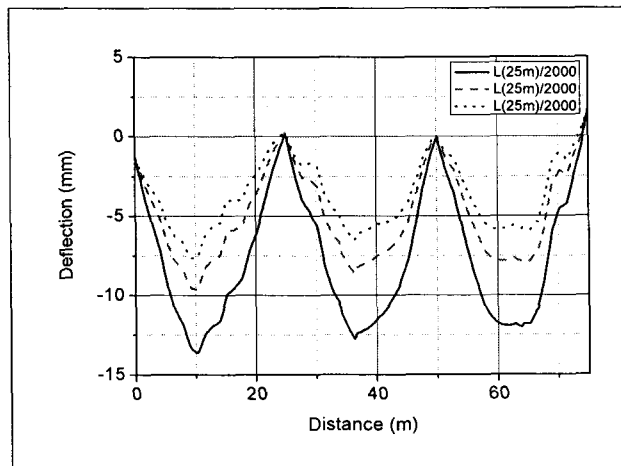


그림3. 가이드웨이 처짐을 합성한 높이불규칙도

2.2 차량

차량과 대차의 구조를 그림4와 그림 5에서 각각 보여주고 있으며, 대차 당 좌우 8개의 전자석과 좌우 사이드 프레임, 전후 타이빔, 좌우 2개의 공기 스프링, 좌우 4개의 감쇠기, 좌우 2개의 견인바, 그

리고 견인바에 내재된 고무로 구성된다. 타이빔과 사이드 프레임은 회전 조인트로 연결되어 있다. 차량에 대한 운동방정식은 비선형 구속 다물체계 동역학 운동방정식이 이용한다. 다물체 동역학 운동방정식의 장점은 차량을 구성하는 물체(부품), 조인트, 힘 요소 등을 상세하게 표현할 수 있는 장점을 갖는다. 이러한 운동 방정식은 ODYN/Maglev에서 자동적으로 생성하고 해를 구한다⁽³⁾. ODYN/Maglev는 공간 운동방정식을 사용하지만 가이드웨이 모델이 평면 운동이기 때문에 차체와 대차의 자유도 중 평면 병진 자유도와 하나의 회전 자유도 이외에는 구속시켰다. 향후 공간적 가이드웨이 모델이 이용된다면 차량은 당연히 공간적으로 표현가능하다. 가이드웨이 모델이 평면 운동을 갖기 때문에 대차는 평면 모델화되었다. 결과적으로 1량 1편성인 경우 그림6과 같은 모델이 이용된다. 차량에 대한 상세한 모델 방법 및 수치해석에 관련된 내용은 참고문헌 [3]에 상세하게 설명되어 있기 때문에 생략한다.

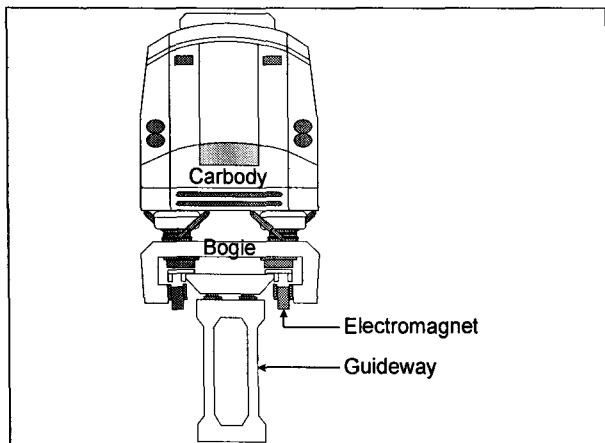


그림 4. Section schematic of the UTM-01

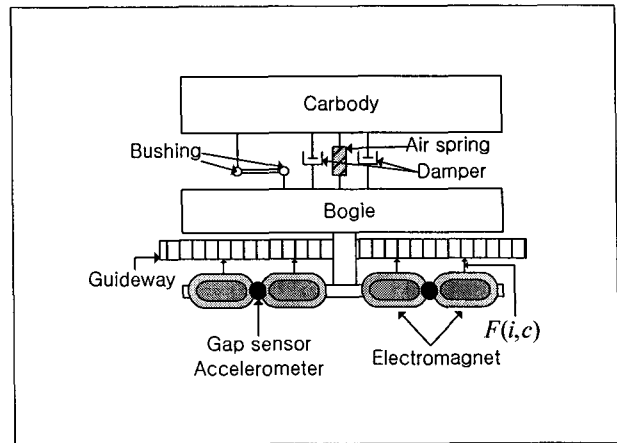


그림 5. Bogie model

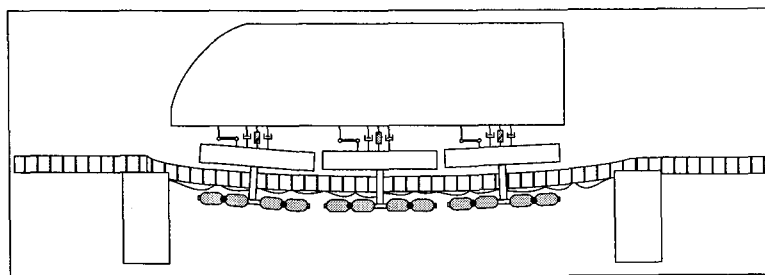


그림6. UTM-01 해석 모델

3. 해석

그림7 ~ 그림9는 가이드웨이 처짐과 랜덤 불규칙도가 합성된 가이드웨이 주행 시 부상 공극 응답 이력을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 부상 공극 변동은 차량 속도 증가에 따라서 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 가이드웨이 처짐 한계 증가에 따라서 부상 공극 변동이 증가한다. 부상 공극 응답을 좀 더 명확하게 분석하기 위하여 통계적 값인 부상공극 편차에 대한 RMS 값을 비교하였다. 그림 10은 랜덤 불규칙도만을 고려하였을 때 차량 속도에 따른 부상 공극 편차 RMS 값을 보여주고 있다. 부상 공극 편차 RMS는 30 km/h에서는 약 0.4 mm 이고, 120 km/h 에서는 약 0.9 mm을 나타내고 있다. 전반적으로 부상 공극 편차 RMS는 속도 증가에 따라서 증가하는 것을 알 수 있다. 특이한 점으로는 약 60 km/h 영역을 중심으로 RMS 값 증가 기울기가 다소 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 랜덤 불규칙도에 의한 부상 공극 변동에의 영향도는 속도 증가에 따라서 다소 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 상전도흡인식 자기부상열차의 고속화에 있어서 요구되는 특성이다. 그림 11은 가이드웨이의 처짐만을 고려하였을 때 부상 공극 편차 RMS를 보여주고 있다. 처짐 한계가 증가할수록 즉 처짐이 증가할수록 부상 공극 편차 RMS 가 증가한다. 랜덤 불규칙도와 다르게 속도 증가에 따라서 공극 편차 RMS 가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 부상 공극 편차 한계를 만족하면서 속도를 향상시키기 위해서는 가이드웨이

이 처짐 한계를 합리적으로 선정할 필요가 있음을 알 수 있다. 그림12는 불규칙도와 처짐을 모두 고려한 경우로 실제적인 조건이라고 할 수 있다. 그림에서와 같이 주행속도 증가에 따라서 부상 공극 편차도 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히, L/2000의 경우 속도 증가에 따라서 거의 선형적으로 부상 공극 편차가 증가한다. 현재, 실용화사업에서의 부상 공극 변동 폭이 3 mm 임을 고려하면 가이드웨이의 처짐, 불규칙도에 대한 합리적인 선택이 필요하다.

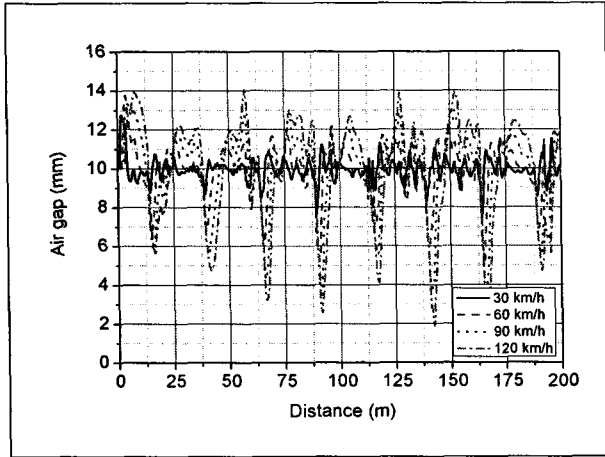


그림7. 공극 응답(L/2000)

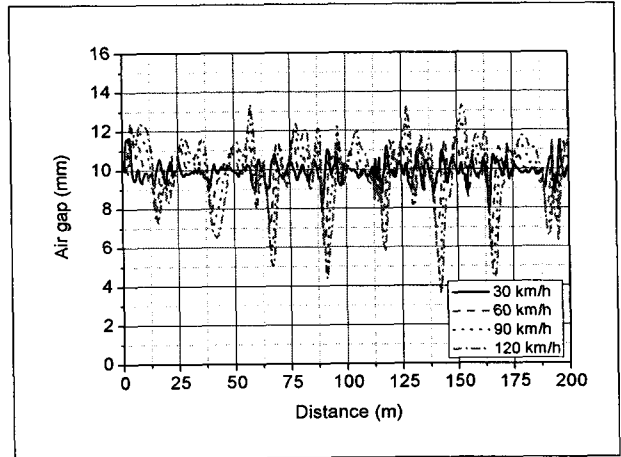


그림8. 공극 응답(L/3000)

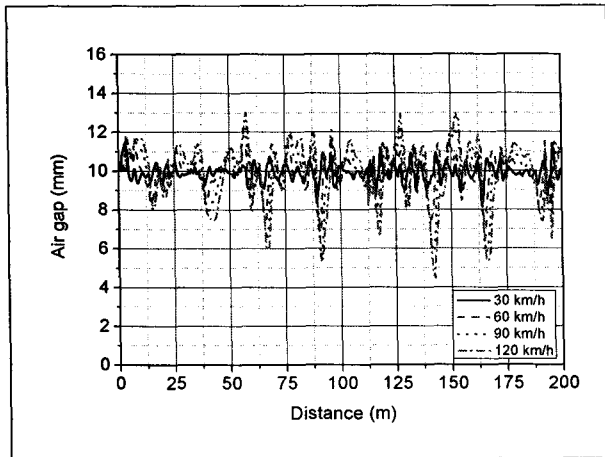


그림9. 공극 응답(L/4000)

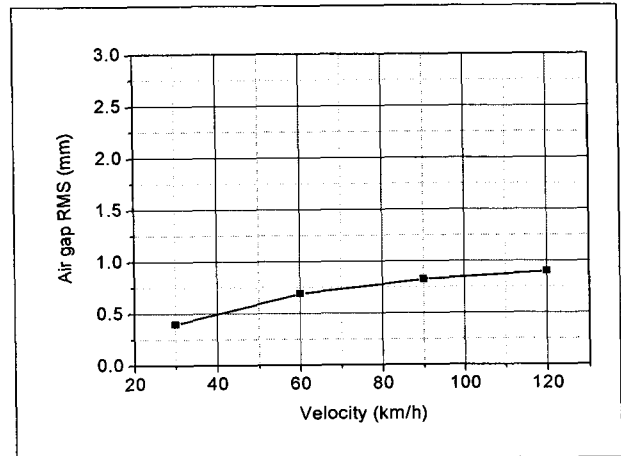


그림10. 불규칙도만에 의한 부상 공극 편차 RMS

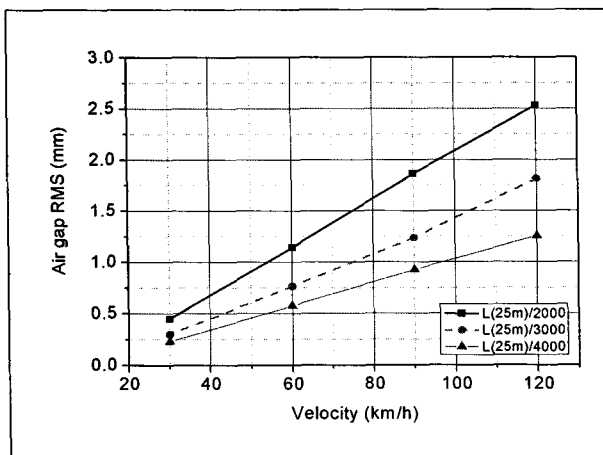


그림11. 가이드웨이 처짐만에 의한 부상 공극 편차 RMS

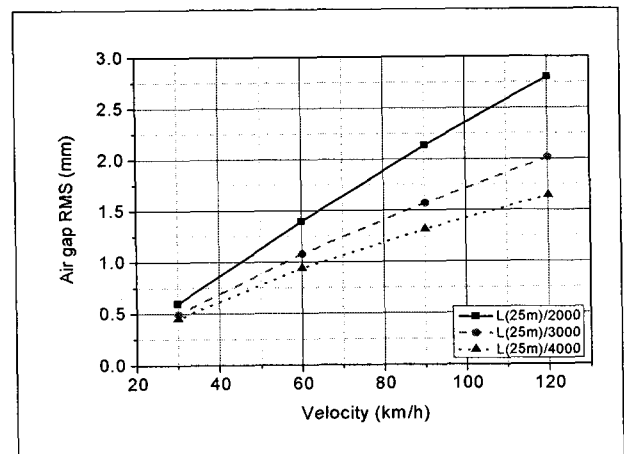


그림12. 불규칙도+가이드웨이 처짐에 의한 부상 공극 편차 RMS

4. 결론

이상과 같이 전자석 현가 시스템을 이용하는 도시형 자기부상열차 UTM-01의 가이드웨이 불규칙도에 따른 부상 공극 예측 방법과 결과를 소개하였다. 주행 속도 및 불규칙도 증가에 따라서 정량적으로 공극 편차를 예측하였다. 랜덤인 높이 불규칙도와 가이드웨이의 이론적 처짐에 의한 부상 공극 편차의 증가 정도를 분석하였다. 그 결과를 통하여 차량의 주행 속도를 향상시키기 위해서는 불규칙도의 합리적인 제한과 부상시스템의 개선이 필요함을 알 수 있었다. 이러한 연구 결과는 자기부상열차의 부상시스템과 가이드웨이 설계에 적용하여 경제적인 가이드웨이 건설 및 주행성능 향상에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 도시형 자기부상열차 실용화 사업에 의해 수행되었습니다.

1. P.K. Sinha (1987), Electromagnetic suspension dynamics & control, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.
2. Minoru Morita (2004), "The characteristics of the levitation system of linimo," Maglev2004, pp.525-532.
3. H.S. Han, H.K. Sung, Y.J. Kim and B.H. Kim (2007), "Coupling model of the maglev vehicle/guideway," Journal of KSR, Vol. 10, No. 2, pp. 243-250.