

자기부상열차 선로구조물 동적특성 분석을 위한 실험적 연구

Experimental Study on Dynamic Properties Analysis of Guideway for Maglev

임지훈*, 공부성*, 김기정**†, 한형석**

Jihoon Lim*, Busung Kong*, Ki-Jung Kim**†, Hyung-Suk Han**

Abstract Maglev is one of the attentive railway system as a next generation light railway transit and the first commercial Maglev railway is constructed at Incheon Airport, Korea. The Maglev guideway is designed based on the design criteria of Japan and Germany's with conservative manner so far and it requires optimization economically and functionally. In this study, the dynamic properties like natural frequency and mode shapes of Maglev guideway are evaluated for driving train at Incheon Airport Maglev guideway. Maximum acceleration, deflection, and angle difference are measured during the driving and evaluated by design criteria. This study can provide the fundamental data for design optimization.

Keywords : Malgev, guideway, Dynamic properties, Modal Analysis, Driving Test

초 록 자기부상열차는 차세대 경전철로 국내외 많은 관심을 받고 있으며, 국내에서는 인천공항에 첫 상용화 노선이 건설되었다. 현재까지의 자기부상열차 선로구조물 설계는 거더의 처짐비를 중심으로 보수적인 관점에서 이루어져왔으며, 이에 따라 경제적, 기능적으로 최적설계의 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 인천공항에 건설된 자기부상열차 선로구조물을 중심으로 구조물의 고유진동수, 모드형상 등의 동적 특성을 파악하고 열차 주행에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 열차의 주행에 따른 거더의 최대가속도, 최대처짐 및 이음부의 꺾임각 등을 측정하여 현재 설계기준을 통해 평가하였다. 본 연구를 통해 축적된 데이터는 최적화 설계를 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

주요어 : 자기부상열차, 선로구조물, 동적특성, 모드분석, 주행시험, ODS

1. 서론

자기부상열차는 모노레일, 트램 등과 함께 도심지를 지나는 차세대 경전철로 주목을 받고 있다. 1990년대 대전엑스포 노선 및 기계연구원 시험선 건설을 거쳐 현재는 영종도 내에 인천공항-용유를 잇는 6km에 달하는 상용노선이 건설되어 시험운영 중에 있다. 지금까지 자기부상열차 선로구조물은 일본, 독일 등의 설계기준과 기존연구를 참고하여 거더의 처짐비를 기준으로 건설되어 왔으며, 국내 실정에 맞는 최적설계가 필요한 실정이다.

† 교신저자: 한국기계연구원 자기부상연구팀(kkj74@kimm.re.kr)

* (주)브이테크 기술연구소

** 한국기계연구원 자기부상연구팀

본 연구에서는 자기부상열차의 주행성능과 밀접한 관련이 있는 가이드웨이의 동특성과 주행성능에 초점을 맞추어 진행하였다. 인천공항에서 건설된 자기부상열차 선로구조물을 중심으로 구조물의 모드분석을 통해 고유진동수, 모드형상 등의 동특성을 구해내고, 차량의 주행에 따른 ODS(Operational Deflection Shape)분석을 수행하였다. 또한 차량의 주행속도에 따른 최대가속도, 최대처짐 및 최대꺾임각을 계측하여 주행속도-거더 성능의 관계를 예측하였다. 본 연구의 결과는 자기부상열차의 다물체 동역학 시뮬레이션의 해석모델을 검증하고 예측하는데 사용되며, 추후 최적설계 기준 정립 및 기초자료로 제공한다.

2. 본 론

2.1 실험방법

2.1.1 개요

인천공항 자기부상열차 선로구조물의 시험은 크게 구조물 동특성 시험과 속도별 주행시험으로 나눌 수 있으며, 시험구간은 직선최고속도 구간(3경간 연속교)과 110mR 최급구배 곡선구간(단경간)을 선정하였다. 각각의 시험구간에 대해 가속도계와 LVDT를 이용한 처짐계, 이음부의 꺾임각을 계측할 수 있는 경사계를 설치하였으며, 센서 설치에 대한 내용은 Fig. 1에 도시되어 있다.

직선 최고속도구간은 3경간 연속 PSC BOX구조로서 가로보를 통해 상선과 하선이 구조적으로 연결되어 있다. 3경간 연속보에 대한 시험은 모드의 대칭성을 고려하여 1.5경간에 대해 가속도계를 설치하고 측경간과 중앙경간에서 처짐을 계측하였으며 이음부에서 꺾임각을 계측하였다.

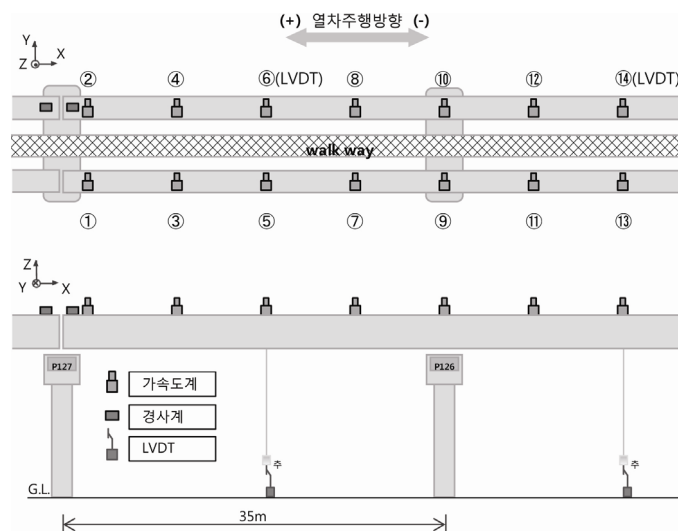


Fig. 1 Sensor Installation for the Experiments of Straight Max Speed Section

2.1.2 구조물 동특성 시험

구조물의 동특성 시험은 가속도계 설치 후 Impact Hammer의 가진을 통해 응답을 받고, 고유진동수와 모드형상을 구하는 방법으로 이루어졌다. LMS Test Lab.의 Impact Testing Module을 이용하여 시험을 수행하였으며, 각각의 가속도계가 설치된 위치를 통해 Geometry를 작성하고 고유진동수에 따른 모드형상을 분석하였다[1].

2.1.3 속도별 주행시험

속도별 주행시험은 Fig. 1과 같이 설치된 가속도계와 처짐계, 경사계를 통해 열차 주행시 선로구조물의 응답을 측정하였다. 직선최고속도 구간의 경우, 공차시 최고주행속도는 110km/h이지만, 현장여건상 만차에 대해 20km/h, 40km/h, 60km/h, 80km/h에 대해 시험을 수행하였다. 속도별 주행시험을 통해 선로구조물의 ODS(Operational Deflection Shape)을 분석하고, 주행속도에 따른 중앙부의 최대 처짐과 이음부의 최대 꺾임각을 구하였다. 가속도의 경우 Euro Code 기준에 맞추어 30Hz Low Pass Filtering을 통해 결과를 분석하였으며[2], 이음부 최대 꺾임각은 두 개의 경사계를 동시계측하여 순간적으로 발생하는 최대꺾임각을 계산하였다.

2.2 구조물 동특성 시험결과

직선 최고속도구간의 고유진동수 및 모드형상은 Fig. 2와 같다. 1차 휨모드는 약 4Hz에서 나타났으며, 가로보의 영향으로 인한 비틀림 모드(Fig.2 (b),(c))의 영향도 크게 나타났다.

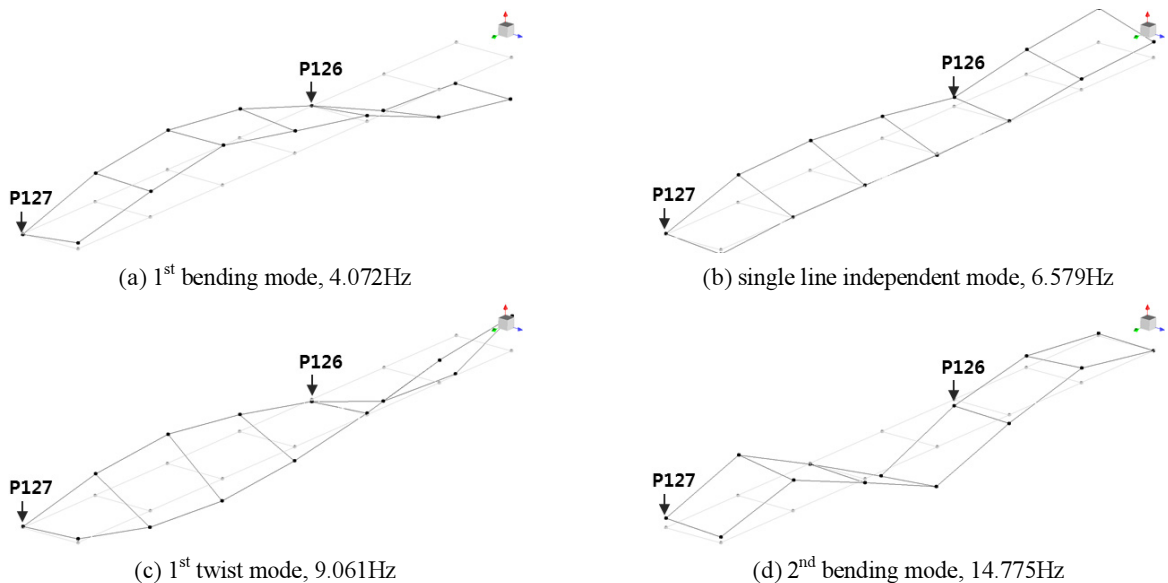


Fig. 2 Natural Frequencies and Mode Shapes of Straight Section

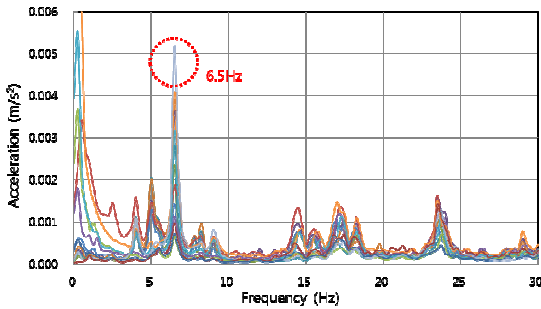
2.3 구조물 주행 시험 결과

2.3.1 주행중 모드 분석(ODS) 결과

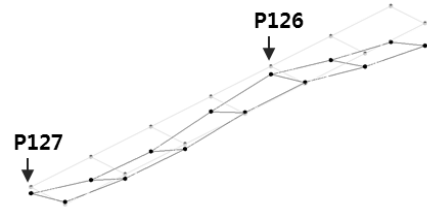
열차 주행시에 주로 가진되는 교량의 모드를 살펴보기 위해 열차 주행에 따른 ODS 분석을 수행하였다. ODS 분석결과, Fig. 4 (a)와 같이 가로보의 영향으로 6.5Hz의 비대칭모드가 가장 크게 가진되는 것으로 나타났다. 이는 3경간 연속보인 직선구간에 열차 주행시, 가로보의 영향으로 가진원의 팔길이가 길어져 열차가 가진하는 구간이 상대적으로 길기 때문이다.

2.3.2 최대가속도, 최대처짐 및 이음부 꺾임각

속도별 열차 주행에 따른 최대 가속도, 최대처짐 및 이음부 꺾임각은 Fig. 6에 도시하였으며 최대값을 Table 1에 나타내었다. Hong 등 [3]의 연구에서와 같이 거더의 최대 가속도 및 처짐 등은 열차의 주행속도와 밀접한 관련이 없는 것으로 나타났으며, 오히려 열차의 가속과 감속 등 가이드웨이 위를 주행하는 열차의 주행조건이 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

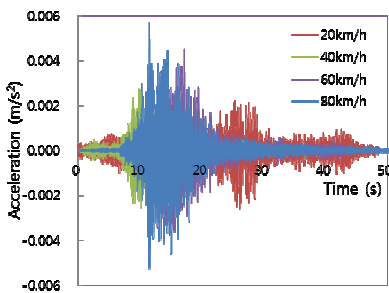


(a) Averaged Spectrum during Driving

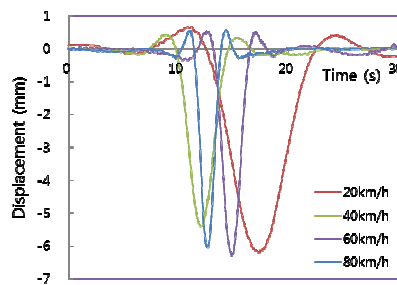


(b) Main Excited Mode Shape during Driving (6.5Hz)

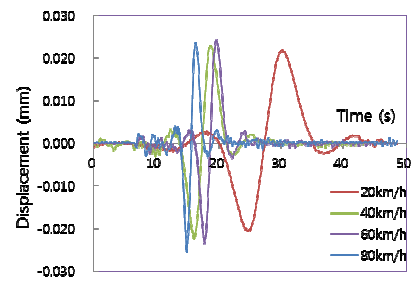
Fig. 4 ODS Results for Straight Section



(a) Time data for Acc. at Center Point



(b) Time data for Displacement at Center Point



(c) Time data for angle difference at Joint

Fig. 6 Measuring Data during Driving by Speed for Straight Section

Table 1 Maximum value of the measured data by driving test

Velocity (km/h)	Maximum Acceleration (time peak, g)		Maximum deflection (mm)		Maximum angle difference (degree)	
	Max value	Criteria	Max value	Criteria	Max value	Criteria
20	0.00259	0.5	6.21	11.67	0.02188	0.1432
40	0.00275		5.41		0.02296	
60	0.00451		6.31		0.02413	
80	0.00568		6.05		0.02541	

3. 결론

자기부상열차 가이드웨이의 동특성 시험결과, 기본적인 휨모드 외에 가로보 영향으로 인한 비틀림모드와 비대칭모드가 다양하게 나타났다. 특히 열차 주행중 ODS분석결과에 의하면 비대칭모드(6.5Hz)가 주요 가진성분으로 나타났으며, 이는 열차의 주행성능 및 승차감에 영향을 미칠 수 있다. 또한 가이드웨이 중앙부의 최대가속도, 처짐, 그리고 이음부의 꺾임각을 분석한 결과, 열차의 주행속도와는 밀접한 관련이 없으며, 가감속 등 순간적인 열차의 주행조건에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다.

후 기

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 시행한 2013년도 인천공항 자기부상철도 선로구조물 성능평가 사업의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D. J. Ewins (2000) *Modal Testing – theory, practice, and application 2nd edition*, Research Studies Press LTD., England, pp. 287-368
- [2] S. I. Kim (2012) Dynamic behavior of KTX railway bridge, *Korean Rail Technology*, Vol. 43, pp. 23-28
- [3] Y. N. Hong, W. S. Chung, and I. H. Yeo (2009) Analysis of dynamic Responses of Urban Maglev Guideway, *Journal of Korean Society for Railway*, 12(1), pp. 115-121.