

도시형 자기부상열차 가이드웨이 개발 현황

Introduction to the Development of Urban Maglev Guideway



정원석*
Won-Seok Chung



여인호**
In-Ho Yeo



장승엽**
Seung-Yup Jang



김영진***
Young-Jin Kim



진병무****
Byeong-Moo Jin



김인규****
In-Gyu Kim

1. 서 론

바퀴 없이 자력에 의해 떠서 주행하는 자기부상열차의 실용화 사업이 본격적으로 진행되고 있다. 도시형 자기부상열차 실용화 사업은 2012년까지 6차 년도에 걸쳐 4,500억원을 투입하는 국토해양부 대형 국책과제이다. 시속 110km급 무인운전 도시형 자기부상열차 시스템을 개발하고 시험운행을 위한 시범노선을 건설하여 시운전을 거친 후 실제 상업운전을 시작하게 된다. 시범노선 지역으로 인천광역시가 선정되어 영종도 인천공항 내에 총연장 6.1km에 6개의 역으로 시범노선 건설을 위한 기본설계가 진행 중이다.

토목 분야에서는 자기부상열차 가이드웨이의 성능 개선을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자기부상열차는 각종 전기적 기계적 부품들을 포함하므로 일반 철도와는 달리 고가구조물, 즉 가이드웨이로 건설되는 것이 일반적이다. 따라서 현재 한국철도기술연구원을 중심으로 가이드웨이 설계기준 수립, 성능해석을 위한 부상/추진 레일 최적설계 및 제작, 교량 상하부 구조 급속시공 연구, 열차/가이드웨이 상호작용 등의 연구가 진행되고 있다. 본고에서는 현재 개발되고 있는 한국형 자기부상열차 가이드웨이의 형식안을 소개하고, 개발된 실물 가이드웨이를 대상으로 정적 동적시험을 통한 성능검증 과정을 소개하고자 한다.

2. 자기부상열차 시스템

자기부상열차(Maglev: magnetically levitated vehicle)는 자석의 힘으로 차량을 부상시키고 가이드웨이 상에서 자기장에 의해서 일정한 갭(gap)을 유지하면서 선형전동기로 추진하는 새

로운 형태의 교통수단이다. 자기부상열차의 핵심기술은 부상, 추진, 제어로 나눌 수 있다. 현재 연구가 진행 중인 도시형 자기부상열차 시스템은 부상 방식으로 자석의 인력을 이용한 흡인 방식을 채택하고 있다. 즉 차량에 부착된 전자기와 가이드웨이의 부상레일 사이에서 작용하는 흡인력을 이용하여 열차를 부상시키는 방식이다. 또한 열차와 가이드웨이 사이의 자기장의 형성 및 약 8mm 정도의 일정 간격을 유지시키기 위해서는 전기적 제어 장치에 대한 높은 기술력이 필요하다. 추진 방식은 선형유도전동기 방식(linear induction motor)을 사용하고 있다. 선형유도전동기는 회전형의 유도전동기를 반경방향으로 잘라 펼친 것으로 고정자에 해당하는 차상 측에는 이동자계를 발생시키고, 회전자에 해당하는 지상 측에는 알루미늄 등의 재료를 이용한 추진레일이 설치되어 전류가 유기(誘起)되어 이동자계와 작용하여 차량이 추진되는 원리이다. <그림 1>은 자기부상열차 시스템의 개략적인 개념도를 나타낸다.

도시형 자기부상열차는 레일과의 비접촉에 따른 우수한 주행 특성과 저소음, 저공해성을 지닌 첨단 교통수단이라는 장점 때문에 지난 20여년 이상 독일, 일본 등을 중심으로 활발한 실용화 모델 개발이 진행되어 오고 있다. 1990년대 초부터 우리나라도 국책연구사업 등을 진행하여 핵심기술을 확보해 나가고 있으며 장기적인 안목에서 자기부상식이 일반 시스템에 비해 초기 건설

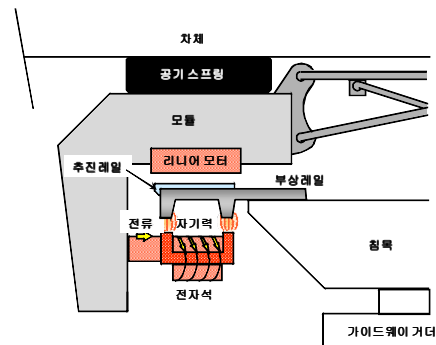


그림 1. 자기부상열차 시스템

* 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원
wschung@krrri.re.kr

** 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

*** 정회원, (주)대우건설기술연구원 수석연구원

**** 정회원, (주)대우건설기술연구원 책임연구원

비용이 비싸나 에너지 비용 및 운영비용을 비교해 볼 때 상대적으로 저렴하다는 특징이 있다¹⁾.

3. 제안 가이드웨이 형식

자기부상열차의 가이드웨이는 크게 궤도 분리형과 궤도 일체형으로 나눌 수 있다. 궤도 분리형은 일본 동부구릉선과 같이 교량 위에 침목역할을 하는 크로스빔을 설치하고 그 위에 부상레일 및 추진레일을 설치하는 방법이며, 궤도일체형은 중국 상해 트랜스라피드(transrapid) 가이드웨이와 같이 거더에 직접 부상레일 및 추진레일을 설치하는 방법이다. 국내 자기부상열차 시험선인 한국기계연구원과 국립중앙과학관의 가이드웨이는 <그림 2 (a)>와 같이 분리형 궤도시스템으로 제작되었다.

지금까지의 국내 자기부상열차 가이드웨이에 대한 연구는 차량 중심의 연구로 인해 활발히 진행되어 오지 못한 것이 사실이다. 도시형 자기부상열차 실용화사업을 통해서 급속시공이 가능하고 구조적 미관적으로 우수한 새로운 자기부상열차 가이드웨이를 개발하고 있다. 급속시공을 위해 시공 중 교통에 미치는 영향을 최소화할 뿐만 아니라 시공현장의 안전성, 환경적 요인의 최소화, 시공성 향상 등을 기대할 수 있는 프리캐스트 공법을 채택하였다.

제안 가이드웨이는 프리캐스트 궤도바닥판과 U 거더의 합성 구조로 구성된다. 제안 가이드웨이의 단면은 <그림 2(b)>에 나타내었으며 개념도는 <그림 3>에 도시하였다. 궤도바닥판은 <그림 4>와 같이 침목역할을 하는 모노블럭에 부상레일을 연결하여 궤도시스템을 구성한 후 이를 프리캐스트 바닥판에 직접 연결하는 형태이다. 자기부상열차 가이드웨이는 차량에서의 엄격한 요구조건을 만족하기 위해서 레일 허용단차를 0.5mm에서 1mm 이내로 엄격하게 제한하고 있으므로 시공 및 유지관리 시에 궤도시스템의 정밀조정이 가능하여야 한다. 이러한 조정 기능을 확보

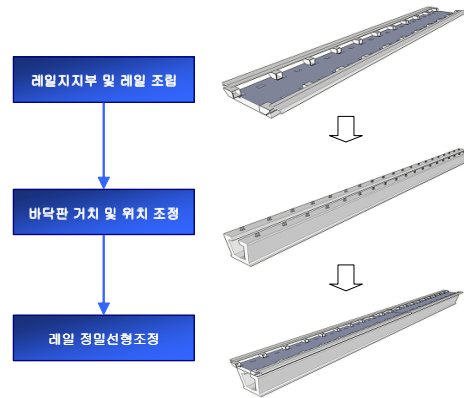


그림 3. 제안 가이드웨이 개념도

하기 위해 프리캐스트 궤도바닥판이 U 거더에 거치될 때 바닥판의 레벨조절 볼트를 이용하여 일차적으로 조정을 실시하고, 정밀 조정을 위해 모노블럭 궤도에서 전후 상하 좌우로 미세 조정이 가능하게끔 궤도시스템을 구성하였다. 프리캐스트 바닥판은 기시공된 사례가 다수 있으며 국내에서도 충분한 기술력을 확보하고 있다. 프리캐스트 바닥판은 정형화된 거푸집을 이용하여 공장 제작할 수 있으므로 현장타설 콘크리트보다 콘크리트의 품질 및 시공 정밀성을 향상시킬 수 있으므로 시공 정밀도가 중요한 자기부상열차 가이드웨이로의 적용성이 우수하다고 판단된다. <그림 5>는 제안 가이드웨이의 시공 순서를 나타낸다.

자기부상열차 차량에서의 주행안전성 및 부상제어 안정성 확보를 위해 기존 경전철 시스템에 비해 다소 엄격한 활차중 처짐 규정이 제시되고 있다. 현재 검토 중인 가이드웨이 처짐한계는 L/1,500 및 L/3,000이다. 이러한 처짐 규정을 만족하는 최적 단면의 선정을 위해 거더 중량을 목적함수로 최적화 기법을 이용하여 처짐 규정과 구조적 안정성을 확보하면서 단면 효율성이 우수한 단면제원을 도출한 바 있다²⁻⁴⁾.

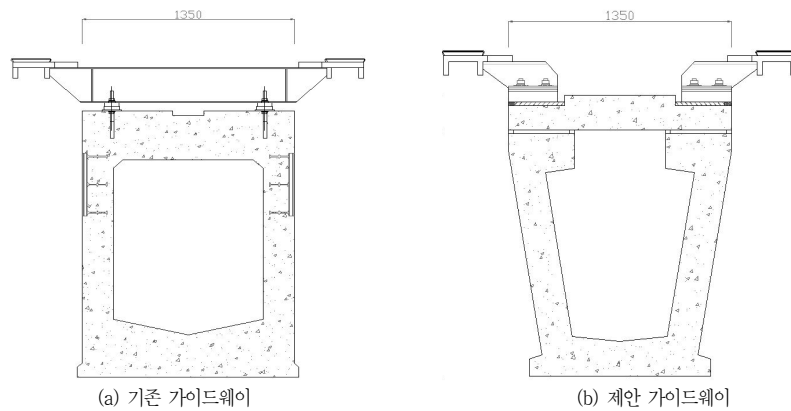


그림 2. 기존 가이드웨이와 제안 가이드웨이

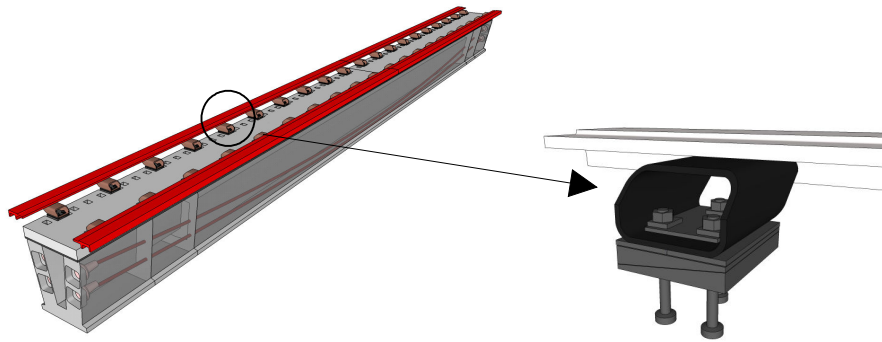


그림 4. 제안 가이드웨이의 모노블럭 개념도



그림 5. 제안 가이드웨이 시공 순서

4. 개발 형식 적용성 검토를 위한 실물 시험

제안 가이드웨이의 성능 검증을 위해 길이 20m의 실물 가이드웨이 시험체를 제작하고 동적 가진시험 및 정적 재하시험을 수행하여 동특성 분석 및 구조적 성능 검증을 수행하였다. 또한 궤도시스템을 포함한 시공성 시험을 실시하여 급속시공의 가능여부도 검토하고 있다.

4.1 동특성 시험

일반적으로 철도교량의 경우 열차에 의해 유발되는 일정 간격

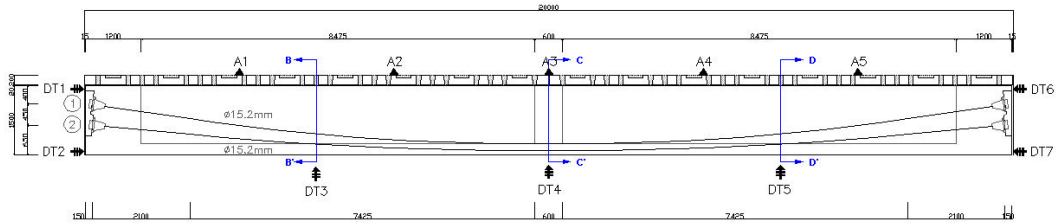
의 반복하중으로 인해 공진 발생가능성을 가지고 있다. 교량 구조물의 공진현상은 열차에 의한 가진주파수와 교량의 고유진동수가 일치할 경우 발생하며 이는 동적거동의 불안정성과 직결되어 승객의 승차감에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 자기부상의 경우에는 하중형태가 자기력에 의한 분포하중이므로 일반열차의 경우와 같이 일정한 축간에 의한 가진주파수는 발생하지 않는다. 그러나 자기부상열차의 핵심인 부상력을 제어하기 위한 제어기의 주파수와 가이드웨이의 간섭이 발생하면 구조물의 과다진동에 의해서가 아닌 차량의 부상 불안정에 의해 승차감과 열차 주행안정성에 영향을 미치게 된다. 따라서 가이드웨이에서 이러한 현상이 발생하지 않도록 교량의 동특성을 정확히 분석하여 차량 제어기와와의 간섭

문제를 사전에 조율해야 한다. 또한 열차하중을 받는 교량의 동적 거동을 정확히 분석하기 위해 교량의 동적거동과 관련되는 특성치를 정확히 선정하고 해석모델에 입력하는 것도 중요하다.

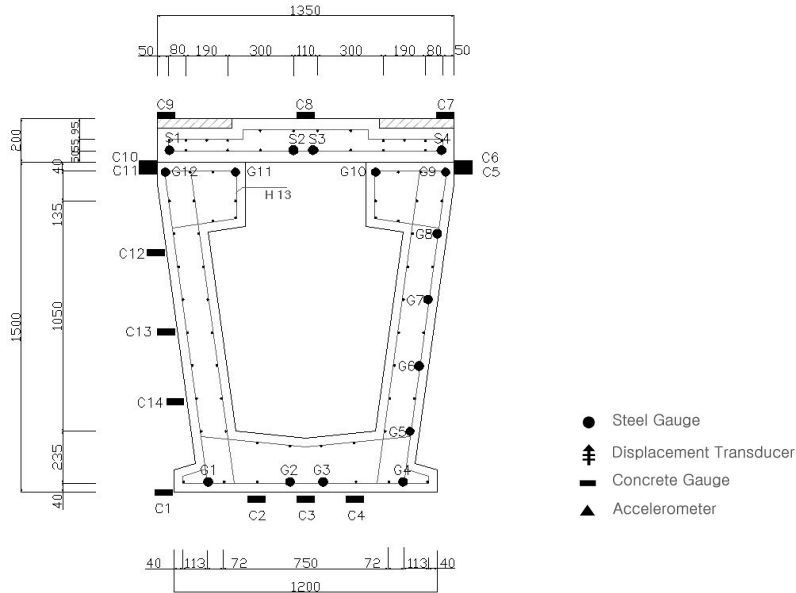
이를 위해 실물 가이드웨이를 제작하고 고유진동수와 감쇠비 등의 동적 물성치를 추출해 내기 위한 공진실험을 수행하였다. <그림 6>은 제안 가이드웨이 실물 시험체의 제원과 센서배치도를 나타낸다. 기존의 동특성 실험에서 흔히 활용되는 충격해머에

의한 가진 이외에 가진기(vibration exciter)를 이용하여 가진력을 변화시켜가며 동특성 분석을 수행하였다.

공진실험에서는 실험모형의 첫 번째 휨 고유진동수에서 공진을 일으키기 위하여 가진기의 가진주파수(rpm)를 조정하여 가진주파수를 변화시키며 동특성 시험을 수행하였다. 가진기의 최대 가진주파수는 10Hz이며 가진력은 80 kN이다. <그림 7>과 같이 가진기를 시험체의 중앙부에 설치하여 강제진동을 유발시켰다.



(a) 정면도



(b) 센서배치도

그림 6. 실물 가이드웨이 시험체



그림 7. 가진시험 및 재하시험

가진기의 중량은 약 1.5ton으로 실물 시험체 중량을 고려하면 가이드웨이 동적 물성치에 미치는 영향은 작을 것으로 사료된다. <그림 8>은 가진 주파수를 10Hz까지 변화시켜가며 경간 중앙 부에서 측정된 최대진동가속도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 교량의 고유진동수와 일치하는 주파수로 가진될 때 급격한 가속도 응답의 증가로 공진이 발생됨을 확인할 수 있다. <그림 9>는 주요 가진주파수 대역에서의 진동가속도 응답을 시간이력

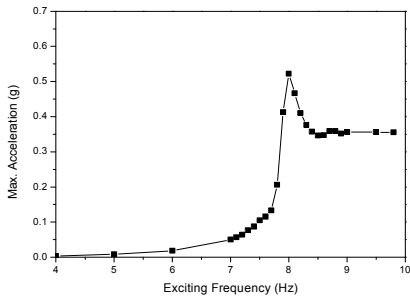


그림 8. 가진주파수에 따른 최대가속도

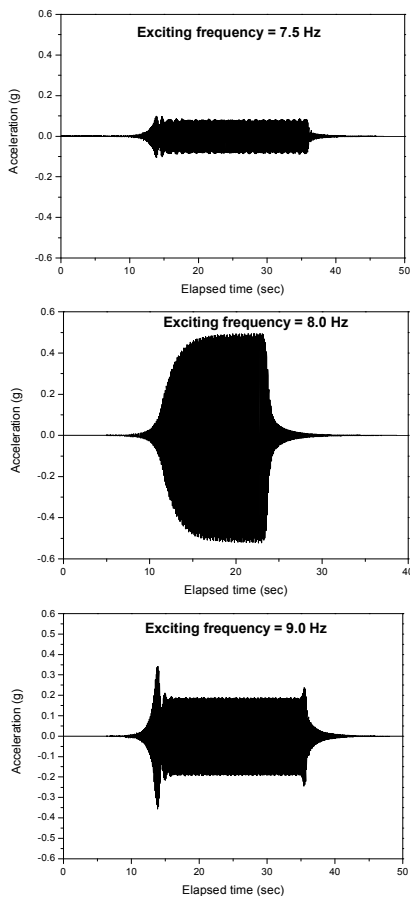


그림 9. 가진주파수에 따른 가속도계(A3)의 시계열 응답

으로 나타낸 것이다. 8.0Hz 가진 시에 가이드웨이가 공진거동을 나타내고 있으며, 9.0Hz 가진 시에는 가진주파수 증가와 감소 시 8.0Hz 대에서 공진이 발생하는 현상을 확인할 수 있다. 또한 레도바닥판 상면에 설치된 5개의 가속도계에서 각각 얻은 응답함수의 값을 중앙지점의 Amplitude로 정규화하여 도시하면 <그림 10>과 같이 전형적인 단순보에서의 1차 휨모드 형상을 나타남을 알 수 있으며, 이로부터 얻어진 진동수는 1차 진동수임을 확인할 수 있다. 또한 각각의 가속도계에서 Logarithmic Decrement 방법을 이용하여 감쇠비를 추정한 후 평균치를 구한 결과 약 1.35%의 감쇠비를 나타냈다.

자기부상열차 개발 과정에서 최적의 부상제어 기능을 확보하기 위해서는 차량과 가이드웨이 간의 시스템 해석이 필요하며 다양한 시스템 분석을 위해서는 신뢰성 있는 유한요소해석 모델의 정립이 필요하다. 본 연구에서는 다양한 교량 유한요소 모델²⁾ 중에서 가이드웨이 거더, 바닥판, 격벽 등은 쉘 요소를 이용하고 긴장재는 트러스 요소를 사용하여 시험체의 유한요소 모델을 구성하였다. 긴장재와 거더 하면은 rigid link로 연결하여 일체화하였다. 대상 시험체 유한요소 모델의 고유치 해석 결과 고유진동수는 8.32Hz로 시험 결과인 8.0Hz와 약 4% 정도의 차이를 나타내었다.

실험치와 비교 검증된 가이드웨이 유한요소 모델을 활용하여 실용화 노선에 적용 가능한 다양한 가이드웨이 단면을 대상으로 1차 고유진동수를 수치적으로 산정하였다. <표 1>은 제안 가이드웨이의 지간 및 처짐한계에 따른 1차 휨 고유진동수 값을 나타낸 것이다. 일반적으로 차량의 부상제어를 위해 가이드웨이의 1차 휨 고유진동수가 4Hz에서 8Hz 대역이 추천되고 있으므로 제안 가이드웨이 고유진동수는 적절한 것으로 나타났다.

4.2 정적 재하시험

동특성시험 및 재하시험에서 사용된 실물 가이드웨이 거더 단면은 경간 25m 가이드웨이 표준단면을 20m로 제작한 것으로 단면의 자세한 제원은 <그림 6>에 나타나 있다. 가이드웨이 실험

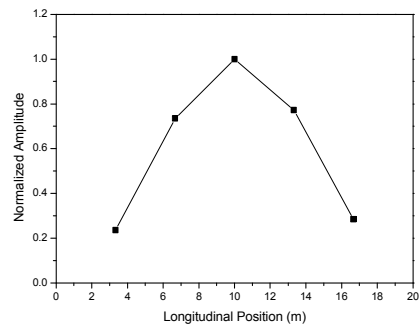


그림 10. 가진기에 의한 1차 모드형상

표 1. 제안 가이드웨이의 고유진동수

지간	치짐한계	1차 휨 고유진동수(Hz)	
		실험치	해석치
20m(시험체)	L/1500	8.0	8.32
25 m	L/1500	-	5.13
	L/3000	-	6.14
30 m	L/1500	-	4.13
	L/3000	-	4.41

체의 치짐 및 단부꺾임각을 측정하기 위해 지간 중앙, 1/4지간, 3/4지간, 단부 등에 변위계를 <그림 6(a)>와 같이 설치하였으며 내부변형률의 측정을 위해 지간중앙, 1/4지간, 3/4지간에 <그림 6(b)>와 같이 거더의 상부, 하부 및 거더 깊이 방향으로 철근 표면에 변형률계지를 설치하였다.

<그림 7>과 같이 실물 가이드웨이를 재하프레임에 거치한 후 중앙부에서 1m 떨어진 지점에 정적 하중을 가하여 재하실험(4-point bending test)을 수행하였다. 재하실험은 초기균열이 발생하기 전까지는 하중조절 방식으로 진행되었으며, 육안으로 확인 가능한 균열이 확인되면 실험실의 안전을 고려하여 변위조절 방식으로 전환하여 수행하였다. 최종 재하하중은 시험장비의 용량과 시험실 안전을 고려하여 3,150 kN까지 재하하였다.

<그림 11>은 가이드웨이 중앙경간에서의 치짐-하중 관계를 도시한 것이다. <그림 11>에 나타난 바와 같이 1,200 kN 이상부터 뚜렷한 비선형거동을 보였으며, 가이드웨이 하면에서 육안으로 식별가능한 균열은 1,400 kN에서 발생하였다. <그림 12>는 철근에 부착하여 매립한 변형률계지의 결과이다. 가이드웨이 지간 중앙의 상부철근은 <그림 12>와 같이 최종 재하하중까지 항복하지 않았지만, 인장측 최하단 철근에 매립된 센서(G3)는 약 1,200 kN에서부터 심한 비선형성을 나타낸다. 이는 중앙 하면에서 균열이 발생하면서 인장력이 철근에 집중되기 때문이다. 현재 설계 중인 자기부상열차의 만차하중이 약 600 kN 임을 감안하면 제안 가이드웨이가 설계범위 내에서 우수한 정적 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다. <그림 13>은 최종 재하하중에서의 균열도를 나타낸 것으로 전형적인 휨 파괴 모드로 파괴가 진행됨을 확인할 수 있다.

다양한 가이드웨이 제안단면의 성능검증을 위해 상용 프로그램

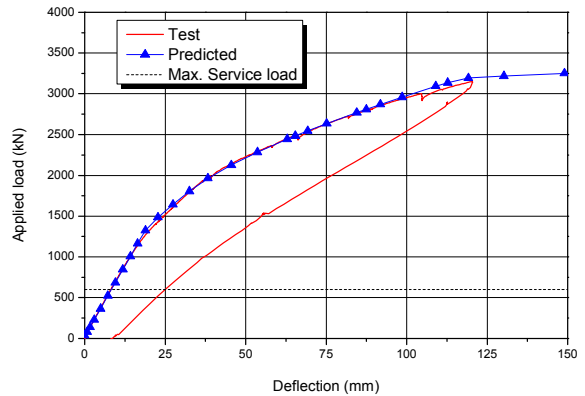


그림 11. 하중-치짐 곡선(중앙지간)

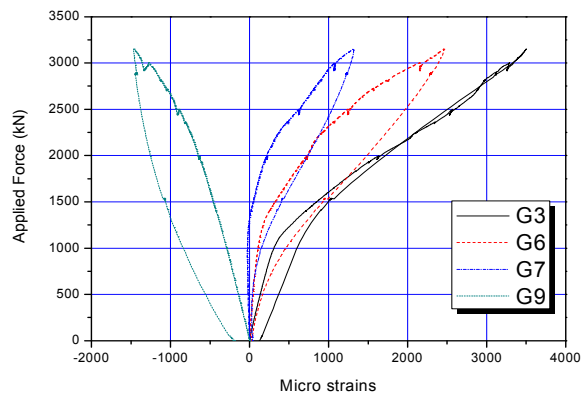


그림 12. 하중-철근 변형률 곡선(중앙지간)

(ABAQUS)⁶⁾에서 제공하는 섬유보요소(fiber beam element)를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 섬유점에서의 콘크리트 거동은 Hognestad⁷⁾ 곡선에 근거하여 제시된 일축 콘크리트 재료 모델(Ayoub)⁸⁾을 채택하였다. 이 모델은 압축 시에는 포물선 형태의 비선형 탄성 거동을 보이며 극한 압축강도에 도달한 후에는 직선으로 감소하는 모델이다. 긴장재 및 철근의 재료모델은 다중선형직선 모델을 사용하였다. 재료모델은 프로그램에서 제공하는 사용자정의 재료모델을 이용하여 섬유보요소와 통합하여 상용프로그램의 비선형해석 알고리즘을 활용할 수 있게끔 구현하였다⁹⁾. 긴장재는 트러스 요소로 이상화하여 가이드웨이의 섬유보요소와 rigid link를 통해 연결된다. 이 모델은 비교적 간

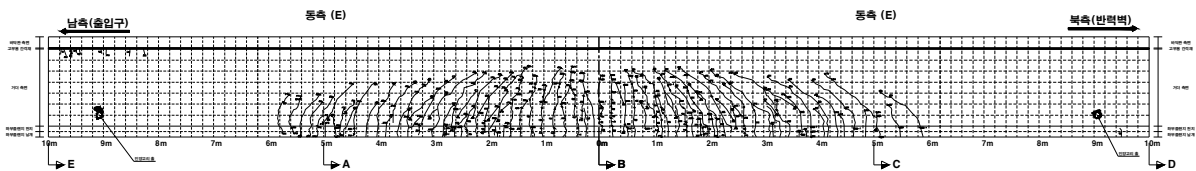


그림 13. 최종 재하하중에서의 균열도

편한 실용적인 모델이나 콘크리트와 긴장재 사이의 부착과괴는 고려되지 않는다. <그림 11>은 앞서 언급한 모델링 기법으로 실물 가이드웨이의 수치해석을 수행한 결과로 앞서 언급한 실물시험체의 정적재하시험 결과와 우수한 상관관계를 나타내고 있다. 수치해석에서 최초의 균열은 재하하중 1,255 kN에서 지간중앙 요소 하면의 섬유점에서 발생하였으며, 약 3,030 kN에서 강연선의 항복이 시작되었다.

실용화 노선에 적용 가능한 다양한 가이드웨이 단면의 정적 성능을 평가하기 위해 앞서 언급한 유한요소 모델링 기법을 활용하여 비선형 해석을 수행하였다. <그림 14와 15>는 각각 경간길이 25 m와 30 m 가이드웨이의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 경간 25 m 가이드웨이의 경우는, <그림 14>에서와 같이 L/1,500 가이드웨이는 약 4대, L/3,000 가이드웨이는 약 4.5대의 자기부상열차가 재하될 시에 최초의 균열이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 자기부상열차 1편성(600 kN)이 재하될 시에 각 가이드웨이의 처짐한계를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. <그림 15>는 경간 30 m 가이드웨이의 정적성능을 분석한 결과로 사용하중 범위에서 충분히 안전하며 처짐한계를 만족하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

자기부상열차(Maglev: magnetically levitated vehicle)는 자석의 힘으로 차량을 부상시키고 가이드웨이 상에서 자기장에 의해서 일정한 갭(gap)을 유지하면서 선형전동기로 추진하는 새로운 형태의 교통수단이다. 자기부상열차는 각종 전기적 기계적 부품들을 포함하므로 일반 철도와는 달리 고가구조물, 즉, 가이드웨이로 건설되는 것이 일반적이다. 본고에서는 현재 개발되고 있는 한국형 자기부상열차 가이드웨이의 형식을 소개하고, 개발된 실물 가이드웨이를 대상으로 정적 동적시험을 통한 성능검증 과정을 소개하였다. 현재 실물 가이드웨이 실험을 통해 부상제어와 연동되는 고유진동수 분석을 통해 가이드라인을 만족하였으며 정적인 성능도 만차 하중에서 충분히 우수한 것으로 나타났다. □

참고문헌

1. 건설교통부, 도시형 자기부상열차 실용화사업 타당성조사, 최종보고서, 2006.
2. Jin, B. M., Kim, I. G., Kim, Y. J., Yeo, I. H., Chung, W. S., and Moon, J. S., *Proposal of Maglev Guideway Girder by Structural Optimization: Civil Works of Center for Urban Maglev Program in Korea*, International Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Seoul, Korea.

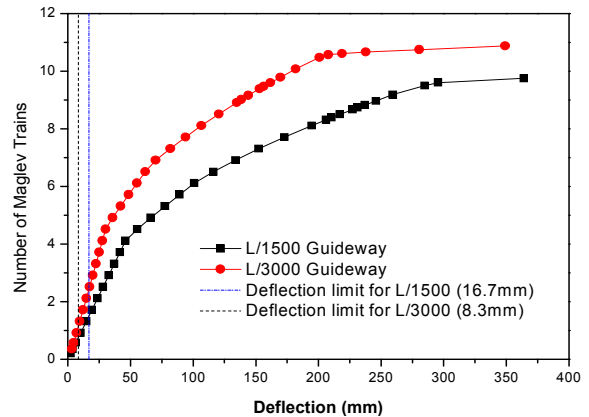


그림 14. 경간 25 m 가이드웨이의 정적 성능

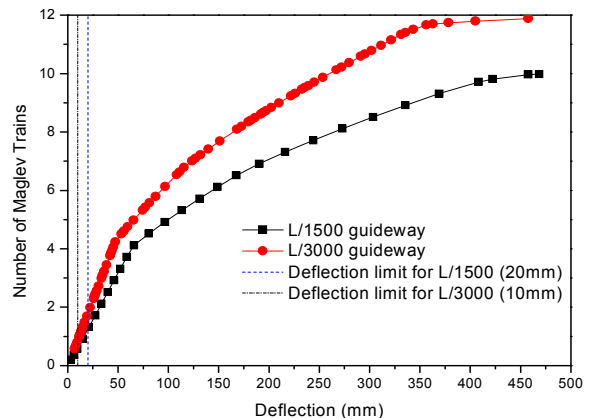


그림 15. 경간 30 m 가이드웨이의 정적 성능

3. 진병무, 김인규, 김영진, “PSC-U 형식 자기부상열차교량 상부구조의 단면 제안”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2007, pp.4428 ~ 4431.
4. 한국철도기술연구원, 도시형 자기부상열차 선로구축물 성능개선 연구차보고서, 2007.
5. Chung, W. and Sotelino, E. D., “Three-Dimensional Finite Element Modeling of Composite Girder Bridges”, *Engineering Structures*, Vol.28, No.1, 2006, pp.63 ~ 71.
6. ABAQUS, Inc., *ABAQUS/Standard User's Manual-Version 6.2*, Pawtucket, R.I., USA, 2001.
7. Hognestad, E. A., “A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members, University of Illinois Engineering Experiment Station”, *Bulletin*, No.399, 1951.
8. Ayoub, A. and Filippou, F. C., “Nonlinear Finite-Element Analysis of RC Shear Panels and Walls”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.124, No.3, 1998, pp.298 ~ 308.
9. 정원석, “재료비선형을 고려한 콘크리트 보의 실용적인 비선형 해석”, 한국철도학회논문집, 9권, 6호, 2006, pp.778 ~ 783.