자기부상열차 상부구조의 최적화 설계

The Optimal Design for Super-structure of the MAGLEV Train

| 차 경 렬 |
현대건설 토목환경사업본부
설계부문 차장

| 백 준 식 |
현대건설 토목환경사업본부
설계부문 사원

자기부상열차는 최근 저탄소 녹색성장을 상징하는 신교통수단으로 수많은 국내외 턴키 프로젝트에 도입되고 있다. 이에 자사에서도 국내 첫 자기부상열차 상용화 프로젝트인 영종도 도시형 자기부상열차 실용화사업 시범노선 건설공사 프로젝트를 통해 자기부상열차의 상부구조에 관한 연구를 진행하였으며 최적화 설계를 통하여 PSC-U거더 및 궤도 구조 개선 등을 제안하였다.

1. 서론

자기부상열차는 1934년 독일의 캠퍼(Herrman Kemper) 교수에 의하여 제안된 후 많은 연구가 진행되었다. 그러나 자기부상열차가 개발된 1900년대에는 유럽 및 미국 등에서 시험선이 운영되었을 뿐 상용화에는 실패하였다.

2000년대에 들어서 중국 상하이 푸동의 고속선(V=430km/h, 2004. 1월 개통, <그림 1> 참고)과 일본 나고야의 중저속선(V=100km/h, LINIMO, 2005. 3월 개통, <그림 2> 참고)이 아시아 지역에서 처음으로 상용화되면서 국내에서도 자기부상열차에 관한 연구가 본격화되었다.

국내에서는 2004년 처음으로 도시형 자기부상열차 실용화사업단이 구성되어 자기부상열차 상용화를 위한 프로젝트를 추진하였고, 2006년 인천 영종도에 자기부상열차 시범노선 건립이 확정되어 2007년 실시설계를 진행하였다. 그러나 2009년 9월에 실시설계 대안 입찰을 추진하면서 기존 실시 설계안에 대한 검증이 시작되었고, 자사에서도 본 프로젝트에 참여하여 실시 설계안을 검토한 결과 개선의 여지가 있음을 확인하였다. 이에 본문에서는 전반적인 프로젝트 개요 및 자기부상열차의 특성

그림 1. 중국 상하이 푸동선(L=30.0km)

그림 2. 일본 나고야 Linimo(L=8.9km)

을 요약한 후, 자기부상열차 상부구조 설계시 요구되는 설계 조건 및 실제 설계와 관련된 주요 사항에 대하여 서술하고, 대안 설계에서의 개선 사항과 그 검토 과정에 대한 내용에 대하여 논의하고자 한다.

2. 본론

2.1 프로젝트 개요

영종도 자기부상열차는 인천국제공항 교통 센터부터 차량기지까지 총 연장이 약 6.1km(본선 6.113km, 입출고선 0.380km)에 이르며, 정거장 6개소와 차량기지 1개소를 포함한다. 본 프로젝트는 우리나라 최초의 상용화 시범노선으로 추후 영종도 전체를 순환하는 노선으로 3단계 계획이 수립되어 있으며 본 공사는 그 중 1단계 시범노선 건설공사이다.

전체 노선은 <그림 3>과 같으며 공사 개요는 다음과 같다.

공사 개요

1) 공 사 명 : 영종도 자기부상열차 실용화사업 시범노선 건설공사
2) 공사금액 : 2,070억원
3) 공사기간 : 착공일로부터 30개월
4) 위　　치 : 인천광역시 중구 영종동, 용유동 일원
5) 발 주 처 : 한국철도시설공단
6) 공사범위 : 노반, 궤도, 건축, 검수설비분야 전 공종 (전력, 전차선, 신호, 통신, 차량 등 후속공종 제외)

그림 3. 노선도

2.2 자기부상열차 원리

자기부상은 영어로 Magnetic Levitation이라 하며 말 그대로 자석을 이용하여 물체를 들어 올리는 것이다. 자석을 이용하여 물체를 들어 올리는 방법에는 영구자석을 이용한 방법 또는 전기를 통해 전자기 유도 작용에 의한 자계를 이용하는 방법을 생각할 수 있다. 그러나 영구자석을 이용하는 방법은 실용성에 있어 거의 불가능하므로 자기부상열차는 전기에 의한 자계를 이용하여 열차를 부상 및 추진시키는 원리로 작동한다. 이에 자기부상열차는 부상 및 추진원리에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

1) 부상원리

① 반발식 : 같은 극성끼리 자석을 가까이 하면 서로 반발하는 것을 이용하여 <그림 4>와 같이 지상 측, 차량 측 모두 같은 극성의 자석을 배치하여 차량이 반발력에 의해 부상하는 원리.

차량에 설치된 전자석은 수동적 역할을 하고 노반에 설치된 전자석이 능동적으로 작용하여 부상하는 것으로, 상온에서의 전도체가 아닌 극저온에서 구현 가능한 초전도체를 이용하여야 한다는 단점이 있음.

② 흡인식 : <그림 5>와 같이 지상 측 가이드 웨이에 철 등의 자성체를 배치하고, 그 자성체의 하부에 차량의 전자석이 위치하여, 지상 측의 자성체가 전자석을 흡인하는 성질을 이용하여 차량이 부상하는 원리.

궤도 역할을 하는 노반 구조물에 철재 자성체를 배치하고 차량 형상을 노반을 감싸는 구조로 구성하여 자성체 하

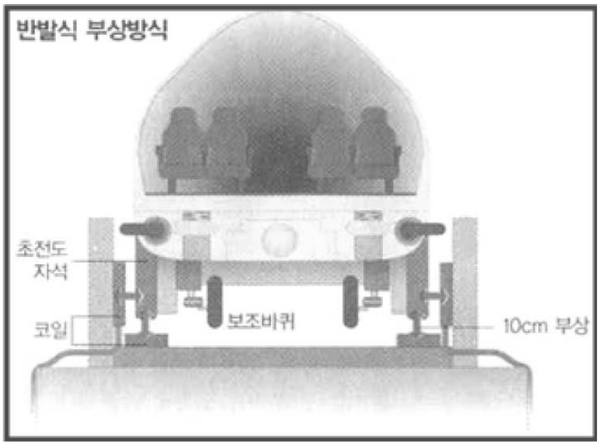


그림 4. 반발식 부상방식

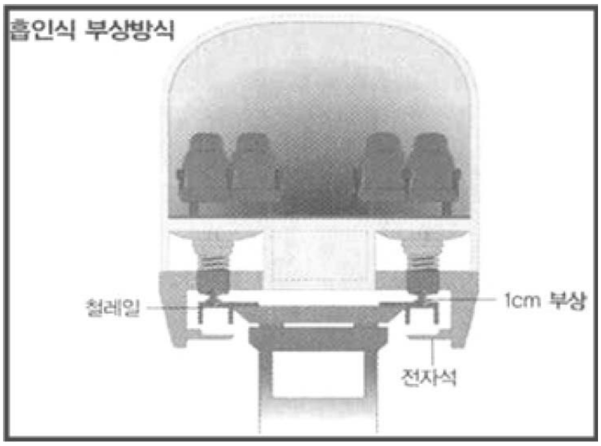


그림 5. 흡인식 부상방식

면에 직류로 구동하는 전자석을 양쪽에 배치하여 전자석에 전류를 가하여 노반의 철재 자성체와 전자석 간에 흡인력이 작용하게 되어 차량이 부상함.

위와 같이 부상 원리는 두 가지로 나뉘며 본 사업에서는 세계적으로 가장 많이 개발되고 있는 흡인식 부상방식을 적용하였다.

2) **추진원리**

① LIM(Linear Induction Motor, 선형유도 전동기) : <그림 6>과 같이 고정자에 해당하는 차상 측에 이동자계를 발생시켜, 회전자에 해당하는 지상 측에 알루미늄 등의 자성체 도체판(Reaction Plate)에 전류가 유기되어 이동자계와 작용하여 차량이 추진하는 원리

② LSM(Linear Synchronous Motor, 선형동기 전동기) : LIM과 달리 지상 측에 고정자가 위치하여 이동자계를 발생시켜, 차상 측에 부착된 영구 자석 또는 직류에 의해 방향이 일정한 전자석을 추진시키는 원리

여기서 선형유도전동기는 고정자 측에 설치된 3상 권선에 전류를 흘리면 연결되는 3상 전원의 회전 방향에 따라 시간-공간적으로 변동하는 자기장이 발생하고 회전자 측 이동자 판형도체에 고정자 측 권선에 대응하는 부분별 기전력이 유기되게 된다. 이 기전력에 의해 와류가 발생하게 되며 이 와류에 의하여 고정자 측에 발생한 자계와 상호작용하여 Lorentz 힘으로 추진하게 되나 이러한 자계를 연속적으로 생성, 즉 와류 및 유기 전류를 지속적으로 발생하여야만 추진이 가능하므로 유기 작용에 의한 시공간적 제약

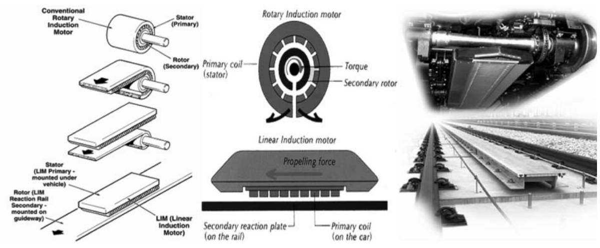


그림 6. LIM(Linear Induction Motor)의 작동 원리

으로 인하여 고속선에 잘 사용하지 않으며 중저속선에 사용한다.

반대로 선형동기전동기는 고정자 권선에 3상 교류를 가하면 영구 자석 또는 직류에 의해 방향이 일정하게 정해진 이동자가 고정자 자계의 이동을 추종하여 이동하므로 유기 과정이 생략되어 고속선에 사용된다. 본 프로젝트에서는 선형유도전동기를 이용한 중저속선을 도입하였다.

위와 같이 자기부상열차는 전기적 작용에 의하여 부상 및 추진을 하게 되므로 레일과 대차 사이의 간격이 매우 작게 된다. 이러한 작은 간격을 일정하게 유지하는 것이 자기부상열차의 운행의 주행성 및 안정성에 결정적인 영향을 미치게 된다. 따라서 레일과 대차간의 수평 및 수직 간격을 일정하게 유지하는 것이 바로 자기부상열차의 가장 필요한 핵심 기술이 되며 이에 따라 지지금구와 레일의 위치를 정확히 시공할 수 있는 정밀도와 기술력이 필요하다. 또한 운영 중에도 레일과 대차의 간격을 유지하기 위해 지지금구 및 레일과 대차 사이의 간격을 측정하는 Gap Sensor의 모니터링 시스템 구축 및 지속적인 계측 장비 운영이 필요하다.

2.3. 자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건

자기부상열차의 상부구조는 처짐에 민감하며, 레일과 차량의 Interaction이 승차감에 많은 영향을 미치게 된다. 이에 자기부상열차의 차량 제작사인 Rotem에서 발간한 자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건에서는 각종 조건을 타 구조물보다 엄격하게 요구하고 있다. 그 조건은 <표 1>과 같다.

위와 같이 자기부상열차는 그 설계 및 시공에 있어 엄격한 정밀도를 요구한다. 이는 자기부상열차 차량의 부상 및 주행 안정성을 위한 것으로 반드시 위 요구 조건을 만족시킬 수 있도록 시공하여야 한다.

표 1. 자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건

구분	항목	요구사항		조건	비고
		설치	유지		
레일 공차	수직틀림	2mm	5mm	10m 기준	직선구간
	수평틀림	2mm	5mm	10m 기준	
	궤간틀림	2mm	4mm	1,850mm 기준	
	이음매 수직단차	1mm	1mm		
	이음매 수평단차	0.5mm	1mm		
	좌우 높이 차이	2mm	4mm	좌/우레일	
	뒤틀림	1mm	2mm	218mm 기준	
레일	재질	기 제공			
	형상 및 치수				
	단위 길이	10mm 이상			
	이음매 연결방법	동부구릉선 방법 또는 고안		열 및 하중에의한 변형시 연속 형상유지	
	접지방법	동부구릉선 방법 또는 고안			
	처짐	0.3mm 이하			
	1차 굽힘 고유진동수	50Hz 이상			
추진레일	재질	알루미늄			
	형상	기 제공			
	단위 길이	5m 이상			
	레일과의 접합	동부구릉선 방법 또는 고안			
침목 (Sleeper)	설치간격	1.25m 이하			최소화
	설치방법	동부구릉선 방법 또는 고안			절연장치 고려
거더 (Girder)	처짐한계	L/3,000			사하중 역캠버 부가
	1차굽힘 고유진동특성 -고유진동수 -감쇠비	 -5Hz 이상 -2% 이상			권장
	차량/거더 질량비	0.6 이하		거더(거더+상부구조물), 차량(거더상 질량)	
	거더간 연결	동부구릉선 방법 또는 고안		연속 형상 유지	
선형	완화구간(수평)	Sinusoidal/Clothoid			
	곡선반경(수평/수직)	60m 이상/3,000 이상			
	캔트	최대 8도			
	완화구간 길이	캔트량의 600배 이상			
	곡선 사이 직선	30m 이상 1편성 길이 중 큰 값			
	수평-수직 동시 완화 구간	없어야 함			

2.4 자기부상열차 상부구조 설계시 주요 조건

자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건에 명시된 바와 같이 자기부상열차의 상부구조는 타 구조물에 비하여 엄격한 조건이 요구되며 위에서 열거한 조건들을 만족 여부를 결정하는 주요 조건은 다음과 같다.

1) 처짐비

구조물의 처짐은 활하중이 정해진 상태에서 사하중에 의해 결정된다. 즉 사하중이 클수록 처짐이 많이 발생하게 되므로 처짐을 줄이기 위해서는 거더의 중량을 감소시켜야 한다. 자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건에서 명시된 처짐비는 L/3,000 이하이었으나 입찰 안내서상 기준은 90km/h 이하 미만 구간에서는 L/2,000 이하, 90km/h 이상 구간에서는 L/3,000 이하로 하향 조정되었다. 그러나 자기부상열차의 부상 및 주행 안정성을 위해서는 자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건대로 전체 구간에서 처짐비를 L/3,000 이하로 제한하여야 한다. <그림 7>과 같이 자기부상열차의 표준 부상 공극이 8mm(±3mm) 밖에 되지 않

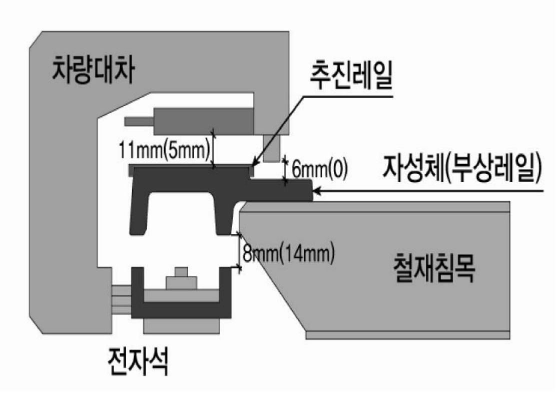


그림 7. 대차 및 레일 간 부상 공극

으므로 처짐비가 클 경우 거더 및 레일의 선형에 의하여 대차와 레일 간 공극이 줄어들게 되므로 처짐비를 작게 유지하여야 한다.

2) **차량/거더 질량비**

차량이 정지 부상 또는 30km/h 이하 속도로 주행하는 경우, 차량은 궤도에 매달려서 부상 공극을 유지하기 위해 진동하게 되므로 차량 중량에 비하여 거더 질량이 작게 되면 부상 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건에서는 Transrapid의 사례 및 대전 중앙 과학관에 설치된 자기부상열차 시험 결과를 토대로 차량/거더 질량비를 0.6 이하로 명시하고 있다. 따라서 차량의 중량이 정해져 있는 경우 거더의 중량을 증가시킴으로써 차량/거더 질량비를 낮추어야 차량의 운행이 거더에 미치는 영향을 최소화한다.

3) **고유 진동수**

차량 운행시 발생한 동적 하중으로 인하여 거더에 진동이 발생하게 되면 부상 안정성뿐만 아니라 공진 현상이 발생하여 거더에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 거더의 고유 진동수가 일정한 값 이상이 되어야 주행시 발생한 하중에 대해 공진 현상을 방지할 수 있다.

고유 진동수는 다음 〈식 1〉에 의해 결정된다.

$$w_N = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{48EI}{mL^3}} \qquad \text{〈식 1〉}$$

위의 <식 1>과 같이 고유 진동수는 강성, 즉 단면 2차 모멘트에 비례하고 질량에 반비례하는 관계를 가지고 있다.

그러나 자기부상열차의 상부구조는 처짐비 조건으로 인해 최대 중량 한계가 존재하며, 차량/거더 질량비 조건으로 인해 최소 중량 한계가 존재한다.

따라서 처짐비와 차량/거더 질량비의 두 가지 상충되는 조건을 만족시키면서 고유 진동수도 5Hz가 넘어야 하므로 단면 결정시 같은 중량이라도 단면 2차 모멘트가 커지는 단면을 선택하여야 한다. 단면 2차 모멘트는 중립축에서의 거리가 멀수록 커지게 되므로, 같은 중량이라 하더라도 단면 2차 모멘트가 커질 수 있도록 단면의 높이를 키우는 것이 고유 진동수 조건에 유리하다.

2.5 자기부상열차 상부구조 최적화 설계시 고려 사항

자기부상열차는 다른 구조물에 비해 정밀도가 요구되므로 위에서 언급한 주요 조건들을 모두 만족시킬 수 있어야 한다. 그러나 처짐비와 차량/거더 질량비, 고유 진동수 등은 거더 중량의 상한과 하한 및 기타 조건을 제한하게 되므로 이를 모두 만족시킬 수 있는 단면 설계가 필요하다. 또한 자기부상열차는 다른 철도 운송 수단에 비하여 기계 장비가 복잡하여 작은 오류로도 작동이 되지 않을 수 있으므로 부상 및 추진 장치 등의 고장으로 인한 열차 정지시 대피할 수 있는 대피 통로가 반드시 노선을 따라 구축되어야 한다. 이에 위의 조건들을 고려한 기타 대안 설계시 보완 사항은 다음과 같다.

1) **프리스트레스**(Pre-Stress)

자기부상열차 상부구조는 차량/거더 질량비 조건에 의하여 거더 중량의 최소 한계치가 고정되어 있다. 따라서 거더의 중량을 증가시켜야 하나 거더의 중량이 커지면 자중에 의한 처짐으로 인해 처짐비 조건을 만족시킬 수 없게 되므로 거더 중량을 임의대로 증가시킬 수 없다. 따라서 거더의 최대 중량의 한계치가 정해지므로 이를 향상시키기 위해서는 거더의 강도를 증대시켜야 한다.

이에 거더의 프리스트레스를 도입하는 것이 필수적이다. 원안에서는 프리스트레스 공법 중 포스트텐션(Post-Tension)을 적용하였으나, 대안에서는 별도의 그라우팅 장비 및 작업이 필요 없고 정착단에서 균열이 적어 품질 관리가 용이한 프리텐션(Pre-Tension) 공법을 우선적으로 고려하였다.

2) **대피 통로 및 슬래브 설치**

자기부상열차 운행시 고장이 발생한 경우에 대비하여 고가에 설치되는 경우에는 반드시 대피 통로가 설치되어 있어야 한다. 대피 통로는 고장시 뿐만 아니라 유지 관리에 있어서도 관리자가 이동할 수 있는 수단이므로 반드시 대피 통로가 설치되어야 한다.

또한 대피시 승객의 안정성 및 유지 관리 작업시 작업자의 편의성을 위해서 슬래브가 설치하는 것이 유리하다. 이러한 슬래브는 구조적으로 작용할 수 있을 뿐만 아니라 미관상으로도 안정감을 주게 되므로 슬래브를 설치하여야 한다.

원안 설계에서 상부 거더는 Box형 복선 구조로 Box 사이 가로보 위에 대피 통로가 <그림 8>과 같이 불안하게 설치되어 대피시 불안감을 조성하며 유지 관리에 어려움이 예상되므로, 대안에서는 이를 해결하기 위해 슬래브를 설치하는 방법을 고려하였다.

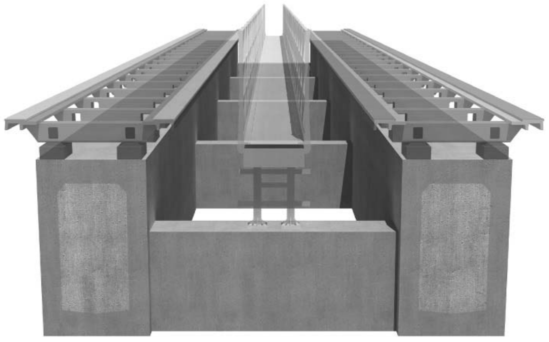


그림 8. 원안 설계 거더 및 대피통로

3) **궤도 구조 개선**

자기부상열차에서의 궤도는 일반 철도와 달리 하중이 지점 내부에서 가해지는 것이 아니라 캔틸레버 끝단에서 하중을 받게 되므로 지렛대의 원리에 의하여 부반력이 걸려 인발력에 의해 빠질 수 있다. 따라서 <그림 9>와 같이 침목이 거더에 체결되는 경우 인발력에 의해 앵커볼트가 빠질 수 있는 위험성을 가지고 있다. 따라서 이를 인발에 저항할 수 있는 구조로 개선하여야 한다.

4) **유지관리**

자기부상열차의 시공 및 유지 관리시 가장 핵심적인 사항은 레일의 위치를 항상 일정하게 유지시켜야 한다는 것이다. 특히 경간과 경간 사이에서 레일의 수평 또는 수직 이격이 발생하는 경우, 주행 안정성을 보장할 수 없으므로 자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건에서도 시공 중 변위 뿐만 아니라 공용 중 변위에도 제한을 두고 있다. 따라서 반드시 경간과 경간 사이에 레일 이격이 발생할 경우를 고려하여 이를 조정할 수 있도록 설계하여야 한다.

2.6 자기부상열차 상부구조 최적화 설계 결과 및 검토

위에서 언급한 사항을 반영하여 설계 주요 조건을 만족시키는 상부구조를 다음과 같이 설계하였다.

1) **거더**

① 대안 비교

자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건 및 Pre-Tension, 기타 만족시켜야 하는 고려 사항 등은 대부분이 거더의 단면 형상에 의하여 만족 여부가 결정된다. 최적 경간장을 산정

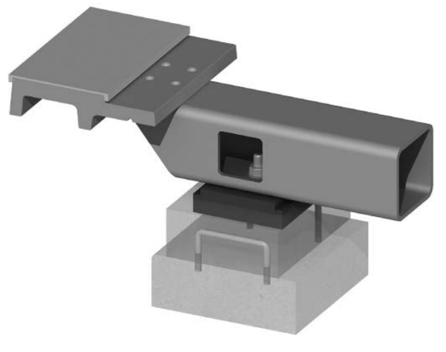


그림 9. 원안 체결 구조

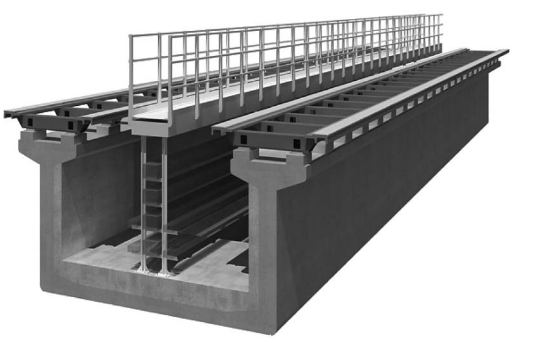
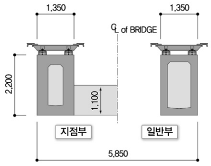
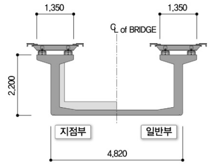


그림 10. PSC-U 거더

표 2. 거더 비교

구분		원안설계	대안설계
		PSC BOX 거더교	PSC-U 거더교
구조단면검토	상부공법	Post-Tension	Pre-Tension
	횡단면도		
	특 징	• 가로보 등 복잡한 부재 개방으로 미관 보통 • 곡선부 설치시 전도에 대한 별도 안전시설 필요 • 유지관리시 별도시설 필요 • 거더제작→운반→가설→가로보현타시공 으로 시공성 복잡	• 하부슬래브 설치로 미관 우수 • 대블럭가설로 시공성 우수 • 유지관리 및 비상대피로용 별도시설 불필요 • Pre-Tension 공장제작→운반→가설로 품질 및 시공성 우수
	단면적(m^2)	3.104	2.926
	단면2차모멘트(m^4)	1.736	1.955
	탄성계수(MPa)	2.86×10^7	2.99×10^7
	진동수(Hz)	4.42	5.18
	처짐비(㎜)	9.3〈10.0	8.3〈10.0
	질량비(차량/거더)	0.537	0.569

하여 표준 경간장이 선택되면 처짐비, 차량/거더 질량비, 고유 진동수 등에 적용되는 경간장 L값이 정해지게 되므로, 단면 형상에 의해 질량 및 단면2차 모멘트가 결정되기 되기 때문이다.

따라서 거더 단면의 형상을 결정하는 것이 가장 중요한 설계 과정이 된다. 본 프로젝트에서도 여러 대안들을 비교 및 검토하여 표준 경간장을 산정한 후 이에 따른 질량 및 단면 2차 모멘트를 검토한 결과, 다음 <그림 10>과 같이 PSC-U 거더를 채택하였으며, 이를 원안의 PSC Box (Post-Tension) 공법과 비교하면 <표 2>와 같다.

그 외에도 <그림 11>, <그림 12>와 같이 PSC-하로형 U 거더와 PSC-I 거더를 중점적으로 고려하였으나, PSC-하로형 U 거더는 단면에서 하중을 받는 부분이 많지 않아 비효율적인 구조 부재로 경제성이 좋지 않다는 단점이 있었으며, PSC-I 거더는 대피시 안전성과 유지 관리를 위한 별도의 시설이 필요하다는 단점이 있어 <그림 10>의 PSC-U 거더를 채택하였다.

② 설계 검토

위에서 대안으로 채택한 PSC-U 거더는 원안 및 다른 대안에 비하여 외관이 슬림하고, 지점에 접촉하는 부분이 원안 및 다른 안에 비해 작아 구조적으로 비틀림 변위와 횡방향 변위에 취약하며, 응력이 집중되는 지점부가 취약할 수

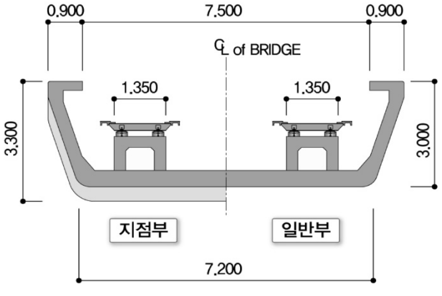


그림 11. PSC-하로형 U거더

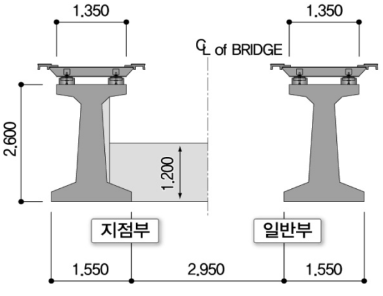


그림 12. PSC-I 거더

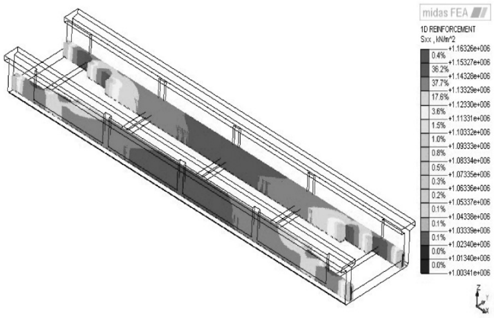


그림 13. 비틀림 검토

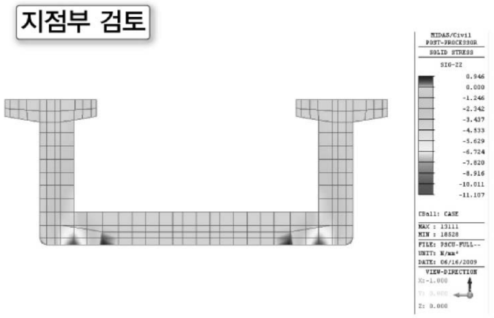


그림 14. 지점부 검토

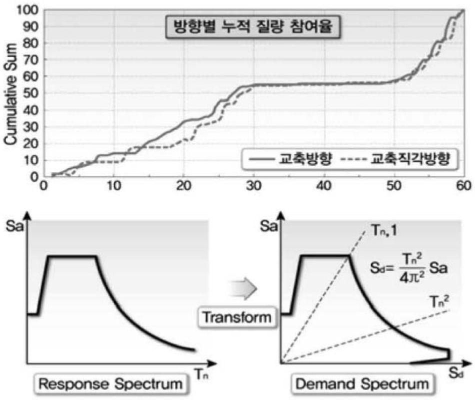


그림 15. 내진 해석

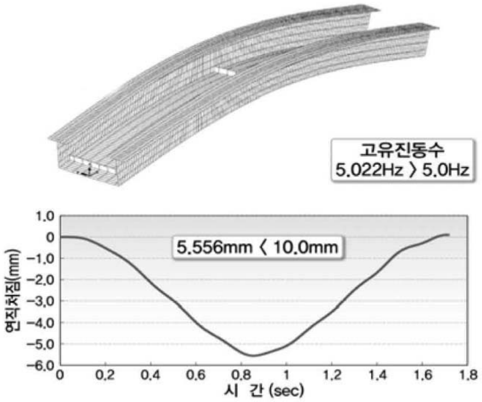


그림 16. 동적안정성 검토

있다.

이에 구조 해석을 통하여 전단 및 비틀림 철근과 횡방향 철근을 산정 및 배치한 후 <그림 13>과 같이 비틀림 해석과 FEM 및 Frame 해석을 통하여 횡방향 하중에 대한 해석을 실시한 결과 구조적으로 안정함을 확인하였으며, <그림 14>와 같이 지점부 응력 집중에 대한 FEM 구조 해석을 실시하여 위 단면이 자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건 및 자기부상열차 토목구조물 설계기준을 만족함을 확인하였다.

또한 <그림 15>과 같이 철도교 설계기준에 의하여 내진1등급(재현주기 1000년)에 대한 내진 설계를 실시하였으며, 자기부상열차의 실 운행하중을 고려하여 연행이동 등분포하중으로 속도별(10~110km/h) 동적거동을 검토하여 운행 안정성 여부를 판단하였다. 그 중 가장 낮은 고유진동수를 나타내면 <그림 16>과 같이 5.022Hz로 자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건에 나온 고유 진동수 기준인 5Hz 이상을 만족함을 확인하였다.

③ 유지 관리성 검토

자기부상열차의 특성상 공용 중에도 지속적이고 정확한 계측을 통한 유지 관리가 요구되며 미소변위 뿐만 아니라 대변위에 대한 보정도 가능하여야 한다. 미소변위는 주로 궤도의 Shim Plate에 의하여 보정할 수 있으나, 대변위는 그러할 수 없으므로 교좌장치에서 보정해 주어야 한다. 따라서 교좌장치는 높낮이를 조절할 수 있도록 <그림 17>과 같이 고안정 내진받침을 적용하였다.

고안정 내진받침은 진동 및 충격 흡수가 뛰어나고 방진 기능이 유리한 교좌장치로 내부 플레이트 교체로 높낮이를

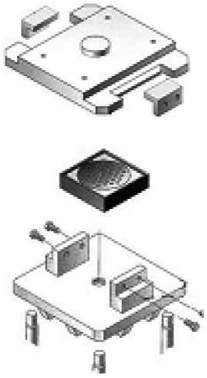
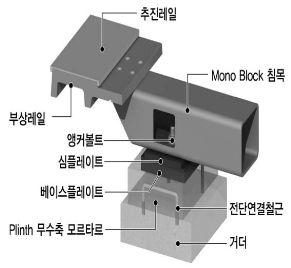
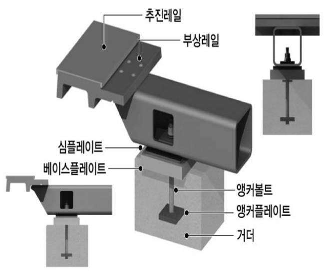


그림 17. 고안정 내진받침

표 3. 체결 구조 비교

구분	원안설계	대안설계
단면		
형식	L형 앵커볼트 + 전단철근	앵커박스(앵커볼트&플레이트)
개선효과	• 원안설계의 경우 앵커볼트의 궤도지지대의 비 매입으로 침목과 상부거더의 연결부가 취약	• 침목체결장치 개선에 따른 앵커볼트의 상부거더와 연결으로 안전성 제고 및 시공성 향상 효과
	• 고장력 L형 볼트 적용으로 전단력만 저항	• 고장력 I 장형볼트 매입으로 부반력 대응 가능
	• Plinth 콘크리트 재료 강도가 낮음 (F_{ck}=40MPa)	• 무수축 모르타르의 재료강도향상(F_{ck}=60MPa) 구조성능 향상

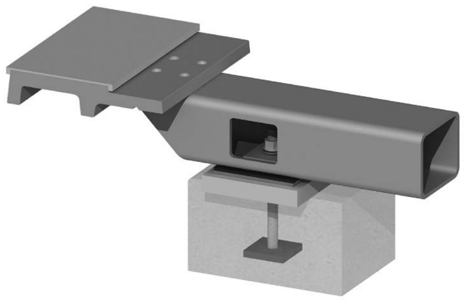


그림 18. 궤도 체결 구조

조절할 수 있다.

또한 경간과 경간 사이에 이격에 대하여 유연한 대처가 가능할 수 경간 구성을 단경간 구조로 하였다. 단경간 구조는 연속경간에 비하여 모멘트 분배 효과에서 불리하나, 장기 처짐 예측 및 교좌장치를 통한 변위 보정이 가능한 장점 외에도 연속경간 구조에 비해 시공성이 우수한 장점이 있어 단경간 구조로 적용하였다.

2) 궤도

① 대안 비교

궤도는 차량의 하중을 직접적으로 받는 구조물로 거더와 마찬가지로 상부구조에서 가장 중요한 역할을 담당한다. 위에서 언급하였듯이 자기부상열차 차량의 특성상 레일이 침목에 캔틸레버 형태로 설치되므로 체결 구조가 열차의 활하중에 대하여 안정하도록 설계하여야 한다. 이에 대안으로 채택한 체결 구조는 <그림 18>과 같이 앵커볼트 및 플레이트로 구성되는 앵커박스를 거더에 매입하고 기하학적으로 인발이 되지 않도록 하였다.

이를 원안과 비교하면 <표 3>과 같다.

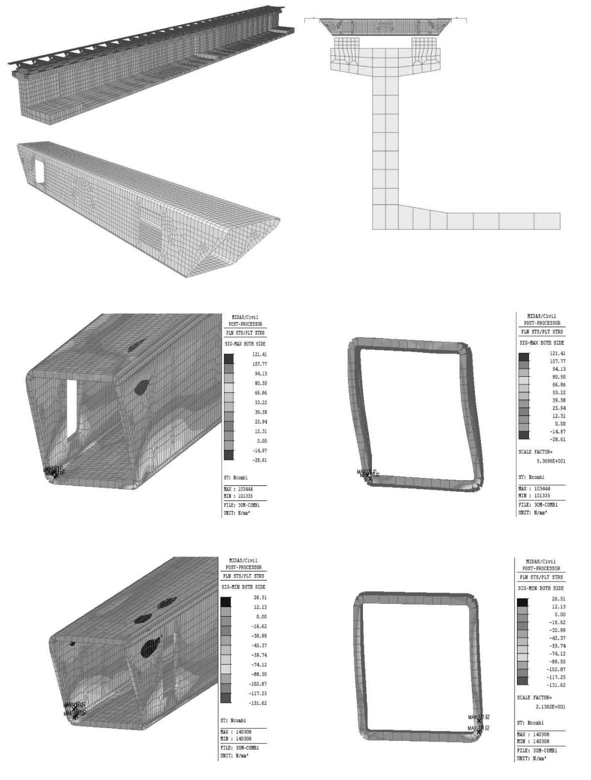


그림 19. 궤도 구조 모델링

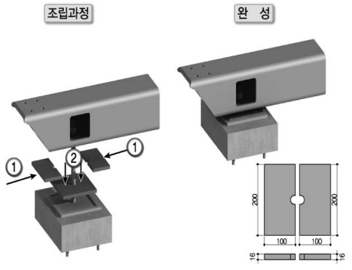
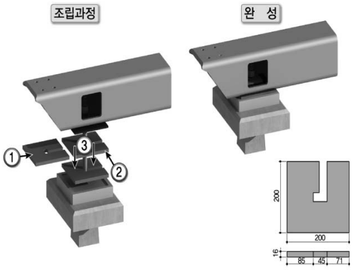
표 4. 처짐 및 응력

지지부재	응력	발생응력(MPa)	허용응력(MPa)	결과	레일처짐
레일	인장응력	26	140	OK	0.22
	압축응력	40	140	OK	
침목	인장응력	121	140	OK	
	압축응력	122	140	OK	
해석결과	• 레일의 최대응력은 40MPa로 허용응력 140MPa 이내로 나타났으며, 레일의 처짐은 0.22㎜로 차량에서 요구하는 궤도허용처짐 0.3㎜보다 작게 나타남(응력은 편의상 허용응력할증계수로 나눈 값임)				

표 5. 설계 피로 응력

구분	설계피로응력(200만회 이상 적용) (MPa)		응력차 Δf(MPa)	상세범주	허용응력fr(MPa)	비고
	최대응력	최소응력				
레일	19.28	6.4	13.4	A	168	OK
침목	115.6	30.2	185.4	A	168	OK
해석결과	• 설계피로응력에 대한 피로 검토 결과 상세범주에 의한 허용응력보다 주하중과 고정하중의 차인 피로응력의 차가 작게 해석되어짐					
	• 설계피로 검토결과 레일 및 침목의 200만회이상의 피로 응력에 대하여 안전성 확보					

표 6. Shim Plate 형상 개선

구분	원안설계	대안설계
단면		
개선효과	•2조각으로 분리되는 Shim Plate 구조로 높이 조정용으로 추가로 삽입이 빠질 수 있음	•1조각으로 된 Shim Plate 개선으로 높이조정 작업이 수월하고 삽입 후 빠질 위험이 적음

② 설계 검토

궤도 구조에 대한 검토는 MIDAS 프로그램을 이용하였으며, <그림 19>와 같이 레일과 침목을 모델링하였다.

표준 경간장을 30m로 모델링을 하여 구조 해석을 실시한 결과, <표 4> 및 <표 5>와 같이 설계 기준을 만족함을 확인하였다.

③ 유지 관리성 검토

위에서 언급한 바와 같이 자기부상열차 운영시 발생하는 미소변위는 Shim Plate에서 보정하여야 하므로 <표 6>과 같이 Shim Plate의 형상을 개선하여 변위 조절이 용이하게 하였다.

3. 결론

자기부상열차는 다른 열차 교통수단과 달리 바퀴 없이 전기를 이용한 자계 생성으로 부상 및 추진하는 저탄소 녹색 성장의 신교통수단이다. 따라서 국내 및 해외 프로젝트에 지속적으로 도입될 것으로 예상되며 이에 대비한 연구 및 시공 기술 습득이 필요하다. 그러나 현재까지는 이론적 연구에만 치우쳐 실제 시공 및 운영 과정에서의 문제점 등은 연구되지 않았으므로 사례 분석 및 실제 적용이 필요하다.

이에 본 프로젝트에서는 실제 설계 과정을 통하여 시공시 적용될 수 있는 문제점을 분석하여 그에 대한 해결책을

제시함으로써 추후 자기부상열차에 대한 시공 및 운영에 대한 적용이 가능할 것으로 사료된다.

♣ 참고 문헌

1. 도시형 자기부상열차 실용화 사업단(2008), "도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준"
2. 현대로템(2009), "자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건", 도시형 자기부상열차 차량개발 및 제작-1단계 보고서(첨부 자료), p108~146.