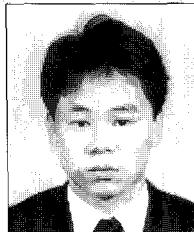
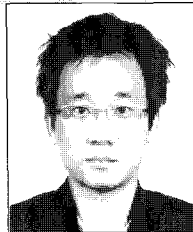


자기부상열차 교량상부구조(가이드웨이) 설계의 전산해석 응용

Application of Computational Analysis to Design of Maglev Guideway



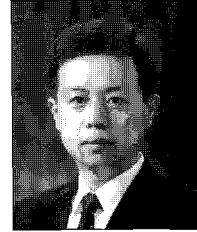
진 병 무*



이 윤 석**



김 인 규*



김 영 진***

* (주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 책임연구원
* (주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 전임연구원
* (주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 전문위원

1. 서 론

이 기사에서는 당사가 2006년 12월부터 2008년 9월까지 약 21개월에 걸쳐 도시형 자기부상열차 실용화 사업의 협동연구기관으로 수행한 “자기부상열차 교량상부구조의 급속시공법 개발” 과제와 현재 수행중인 “자기부상열차 가이드웨이 현장 실용화” 과제의 주요 연구내용인 가이드웨이의 합리적 설계에 반영된 전산해석에 대하여 다음과 같은 내용을 다루고자 한다.

- (1) 가이드웨이의 합리적 설계(단면최적화)
- (2) 연결구조 시스템의 실험적 검증과 해석적 접근
- (3) 궤도-침목-거더의 통합적인 가이드웨이의 처짐 및 응력 예측

도시형 자기부상열차 실용화 사업단은 2006년 11월 건설교통부(현 국토해양부) 대형국책과제로 출범하였다. 사업단은 인천 영종도에 2012년 완공을 목표로 국내 최초이자 세계에서 3번째로 자기부상열차 상용시범노선을 건설할 예정이다. 사업단의 최종목표는 상용시범노선의 건설과 110km/h급 무인 운전 자기부상열차 시스템의 개발이다. 이러한 사업목표 아래 사업 전반기에는 기술보완을 통한 상

용화 시스템 개발을, 사업 후반기에는 시범노선의 건설 및 시운전, 상용화 체제 구축을 이루고자 하고 있다. 사업단은 성능과 가격 면에서 경쟁력 있는 자기부상열차 시스템 개발을 위하여 크게 3가지 핵심과제(시스템 통합, 차량개발 및 시범노선구축)로 구성되었다. 한국철도시설공단이 주관하는 제3핵심과제(시범선로구축)에서는 설계기준정립과 선로구축물 최적설계, 급속시공의 기술보완을 통하여 자기부상열차의 상용화의 기반을 조성 하고자 한다.

자기부상열차 교통 시스템으로는 중국 상하이의 트랜스라피드(Transrapid), 일본 나고야의 리니모(Linimo)가 2000년 들어 상용화 되었다. 자기부상열차는 전자기적 반발력에 의해 궤도 위에 부상하여 운행하는 교통 시스템으로, 그 특성상 주행 중 부상공극을 유지하는 것이 사용성과 승차감 면에서 매우 중요하다. 일정한 부상공극을 유지하는 것은 차량의 운행 중 부상공극 제어성능과 밀접하게 관련되어 있으며, 부상공극 제어성능의 중요한 인자로는 궤도 선형의 정밀성을 꼽을 수 있다.

중국 상하이, 일본 나고야 등에서 상용화된 자기부상열차 노선은 대부분의 구간이 도심지를 통과하며, 궤도, 즉 가이드 레일이 거더 위에 설치된 침목으로 지지되어 있다. 가이드 레일과 침목을 지지하는 이 거더는 토목공학적 측면에서

는 교량이며, 일반 교량구조물의 설계법(도로교, 철도교 또는 자기부상열차교량 설계기준)에 따라 설계를 수행하게 된다. 즉 이러한 설계기준은 거더 또는 교각 및 교좌장치의 설계에서 가이드라인 역할을 수행한다고 할 수 있다. 이는 차량의 활하중이 등가의 하중으로 거더에 전달된다고 가정한다면 일반적인 교량과 동일하므로 타당한 설계로 생각된다.

그러나 자기부상열차의 하중전달 메커니즘을 엄밀하게 고려하면 설계하중의 주요 하중인 차량의 활하중은 우선 가이드 레일로, 레일로 전달된 수직하중이 침목으로, 침목으로 전달된 수직하중 및 모멘트가 최종적으로 거더에 전달된다. 이러한 하중전달 과정에서 설계자가 고려해야 할 사항이 레일, 침목 또는 거더 위에 이를 지지하는 연결구조에서 발생 가능한 변형과 응력이다. 따라서 이 기술기에서는 자기부상열차의 가이드웨이의 기본 설계, 거더-가이드 레일 연결구조 시스템의 검증, 차량 활하중이 레일-침목-거더에 전달되는 통합적인 가이드웨이의 처짐 및 응력의 예비해석에 대해 다룬다.

2. 가이드웨이의 합리적 설계

2.1 가이드웨이의 기본 설계 개념

가이드웨이는 자기부상열차를 운행하기 위한 선로구축물로 교량구조물이 대표적이다. 표 1에는 사업단의 자기부상열차에 대한 실용화 목표 성능 및 규격을 나타내었다. 한

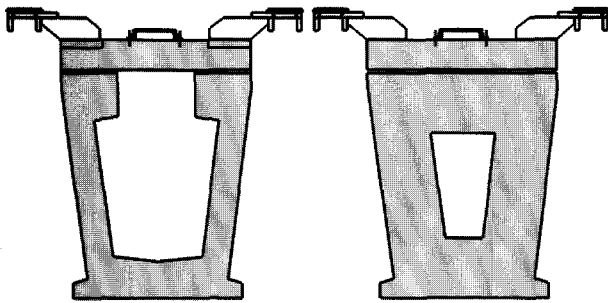


그림 1 제안된 자기부상열차 가이드웨이 단면 형상

국철도기술연구원이 주관한 3-1세부과제에서는 선로구축물의 성능향상을 위하여 그림 1에 보인 바와 같이 PSC-U형 거더와 프리캐스트 바닥판의 합성구조로 이루어진 가이드웨이를 제안하였고, 저자들은 제안된 형식의 PSC-U형 합성 거더에 대해 기본적인 설계를 수행하였다.

한국철도시설공단이 주관한 제3핵심의 선로구축물 성능개선 사항에는 교량처짐한계, 수직 및 수평단차 등 몇 가지 중요한 사항이 포함되어 있다. 교량처짐한계의 경우 기존 엑스포 과학공원과 한국기계연구원 내 자기부상열차 시험선에 적용되었던 L/4,000 수준의 엄격한 처짐규정이 완화되었으며, 이는 자기부상열차 부상제어 성능의 개선을 요구하는 동시에 선로구축물 등 인프라 건설 비용의 절감을 꾀할 수 있다. 이 외에 교량설계에서 고려되어야 할 사항은 고정하중, 차량활하중 및 텐던 긴장력 등에 의한 거더 상하연에서의 콘크리트 압축 또는 인장응력 등이 있으며, 이를 도로교 및 철도교의 설계기준에 따라 검토하였다.

- 선로구축물 성능개선사항
 - 교량처짐한계 : L/1,500 ~ L/2,000(미정)
 - 내진 : 리히터 규모 5.5이상
 - 수직단차 : 1mm이내
 - 수평단차 : 0.5mm이내

2.2 가이드웨이 기본단면 최적화

그림 1에 보인 가이드웨이 단면 형상을 바탕으로 그림 2

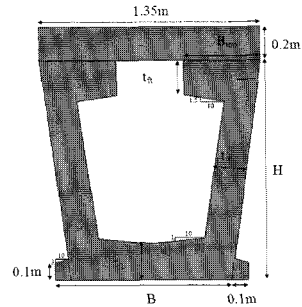


그림 2 가이드웨이 거더의 중앙 단면

표 1 실용화 목표 성능 및 규격

구분	실용화 목표	구분	실용화 목표	구분	실용화 목표
차량 치수	- 길이 : 12m - 폭 : 2.7m - 높이 : 3.45m	운행최고속도	100km/h내외 (실용화 노선상)	가속성능	1.1m/sec ²
승객 인원	최대 93명/량 (만차 기준)	최소수평 곡선반경	50mR이하	실내소음	65dB이하
공차 중량	20톤/량이하	등판능력	7/100이상	궤도	궤간 : 1.85m이하
최고설계속도	110km/h이상	운전방식	ATO/무인자동운행		분기속도 : 25초이내

와 같이 가이드 레일과 침목을 생략하여 단순화한 단면에 대하여 구조최적화(Structural optimization)를 수행하였다. 강도설계법, 허용응력설계법을 따라 설계하는 일반교량과 달리, 자기부상열차 가이드웨이의 중요 설계인자는 차량활하중에서의 교량처짐한계(활하중 처짐규정)이라고 할 수 있다. 강도 또는 응력이 만족하는 단면을 기본적으로 설계하기 위하여, 많은 시행착오를 걸쳐 단면을 제시하였으나, 위에서 언급한 교량처짐한계의 성능개선이 이루어졌다고 할 수 없었다. 따라서 저자 등은 그림 2의 단면에 대해 다음과 같이 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 구조 최적화를 수행하였다. 최적화의 목적함수(object function) f 는 거더의 자중 등이고 제한 사항은 차량활하중의 처짐규정과 각 하중단계에서 거더 상하연 최대응력의 허용응력 만족 조건이

다. 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } f = f(X) \\ & \text{subject to : } g_i \leq g(X) \leq g_j \end{aligned}$$

설계변수(design variables), 상태변수(state variables), 제한사항을 표 2에 정리하였다.

표 1에 보인 사업단의 실용화 목표 성능/규격의 궤간 1.85m 를 수용하기 위해 거더의 상부플랜지 폭은 1.35m로 결정하였다. 교량처짐한계 L/1,500, L/2,000, L/3,000, L/4,000의 4가지와 지간 25m, 30m의 2가지, 모두 8가지 경우에 대하여 구조최적화를 수행하였고 표 3과 같은 단면을 제안하였다. 표 3의 결과에 따르면 자기부상열차교량의 최적 단면은 성능적 측면

표 2 구조최적화에 사용된 설계변수, 상태변수, 목적함수

변수			하한(lower limit)	상한(upper limit)
설계변수 (DV)	H	Girder height	1.20	2.50
	B	Girder bottom flange width	0.90	1.75
	B_{top}	Width of upper wing	0.40	0.50
	T_b	Thickness of bottom flange	0.20	0.30
	T_f	Thickness of web	0.20	0.30
	T_w	Thickness of top precast deck	0.20	0.30
상태변수 (SV)	f_c	Max. compressive stress	-	$0.8f_{ck} / 0.55f_{ci} / 0.4f_{ci}'$
	f_t	Max. tensile stress	-	$0.75\sqrt{f_{ci}} / 1.50\sqrt{f_{ci}}$
	P_t	Prestressing forces	-	-
목적함수 (OBJ)	Weight	Weight of girder system	-	-
	H/L	Slenderness of girder system	-	-
	Cost	Construction cost of girder system	-	-

표 3 교량처짐한계 및 지간별 단면 형상의 제안

항 목	교량처짐한계							
	L/1,500		L/2,000		L/3,000		L/4,000	
지간 L(m)	25.0	30.0	25.0	30.0	25.0	30.0	25.0	30.0
중앙단면에서의 형상								
형고 H(m)	1.402	1.625	1.515	1.837	1.794	2.183	1.991	2.320
폭 B(m)	0.902	1.165	0.978	1.133	0.841	0.909	0.922	1.357
날개 폭 B_{top} (m)	0.400	0.400	0.469	0.400	0.400	0.401	0.403	0.400
바닥 플랜지 두께 T_b (mm)	200	223	214	206	201	234	208	229
상부 플랜지 두께 T_f (mm)	200	211	208	200	202	265	293	223
웹 두께 T_w (mm)	200	200	200	200	200	202	200	200
콘크리트 상하연 응력(MPa)	-4.76	-4.99	-3.98	-4.16	-3.17	-3.19	-2.62	-2.74
	5.72	5.33	4.72	4.56	3.72	3.73	3.14	2.74
활하중에 의한 최대 처짐(mm)	16.25	20.00	12.50	15.00	8.33	10.0	6.25	7.50
거더 중량(ton)	67.07	92.90	73.75	98.40	79.06	109.0	86.50	121.5
단위 길이당 거더 중량(ton/m)	2.68	3.10	2.95	3.28	3.16	3.63	3.46	4.05
거더 중량 비(%)	91.0	126.0	100.0	133.4	107.2	147.8	117.3	164.1
1km 소요 거더수	40	33	40	33	40	33	40	33
1km 전체 중량(ton)	2,682	3,066	2,950	3,248	3,162	3,597	3,460	4,010
1km 중량 비(%)	91.0	103.9	100.0*	110.1	107.2	121.9	117.3	135.9

* 1km 중량 비는 L=25, L/2,000을 기준으로 한 값임

(교량처짐한계 L/1,500이상)과 경제성 측면에서 L/2,000의 처짐한계를 만족하는 25m 단경간 PSC 거터이다. 25m 단경간 거터의 중량만을 비교하였을 때 처짐한계 L/2,000의 거터 중량은 처짐한계 L/4,000의 거터 중량의 약 85% 수준이다. 1km의 직선구간에 대하여 지간 30m, 처짐한계 L/4,000를 만족하는 거터는 지간 25m, 처짐한계 L/2,000를 만족하는 거터보다 36%정도 물량이 증가하는 것을 알 수 있다.

2.3 기본단면의 구조안전성 평가

표 3에서 제안한 기본 단면의 구조건전성을 평가하기 위하여, 그림 2의 자기부상열차교량 상부구조의 유한요소 모델(그림 3 및 그림 4)을 대상으로 고정하중, 차량하중에 대한 구조해석을 수행하였으며, 최종적으로 자기부상열차교량의 교량처짐한계와 각 하중 상태(고정하중 Dead Load DL, 활하중 Live Load LL, 프리스트레스트력 Prestressing PS) 및 하중조합 상태(DL+PS, DL+PS+LL 등)에서 PSC 거터 상하연의 콘크리트 압축 또는 인장응력이 설계기준을 만족하는지를 검토하였다.

그림 5~그림 8은 지간 L=25m, 처짐한계 L/2,000인 PSC 거터의 각 하중상태에서 거터의 변형형상과 응력 분포를

보여준다. 사용하중 상태(DL+PS+LL)에서 거터 상하연의 콘크리트 응력은 각각 -6.57MPa(상연, 압축)과 1.97MPa(하연, 인장)으로 계산되었고 이 값은 허용 인장응력 및 허용 압축응력 범위에 있음을 확인하였다. 지간 L=25m, 처짐한계 L/2,000의 고정하중, 차량활하중, 사용하중상태에서 거터 중앙의 최대 처짐은 각각 -15.4mm, -12.5mm, -10.5mm로 계산되었다. 프리스트레스트에 의한 정착부 응력집중 역시 허용압축응력 17.6MPa보다 작아 구조적으로 안전한 값으로 계산되었다.

2.4 경제성 비교

표 4에는 현재 상용화 되었거나 선행 연구된 자기부상열차 및 경전철의 상부구조에 대한 경제성을 물량에 근거하여 간접적으로 비교한 것이다. 제안된 PSC 거터 형식의 자기부상열차교량 상부구조는 리니모나 트랜스라피드 시스템의 거터보다 50%이상 가볍고, 25% 이상 형고가 낮은 슬림한 형식이다. 또한 선행연구결과인 한국기계연구원 시험선(KIMM), 엑스포 과학공원 노선 및 경량전철(AGT)의 표준단면에 비해서도 매우 경쟁 한국있는 자기부상열차 상부구조라 할 수국있다. 한국연구는 일부 설계변수를 기초로

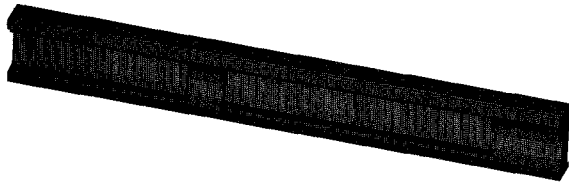


그림 3 기본단면설계를 위한 가이드웨이 거터의 3차원 유한요소 형상(1/4 모델, L=25m)



그림 4 기본단면설계를 위한 가이드웨이 거터 내 텐던의 3차원 형상(1/4 모델, L=25m)

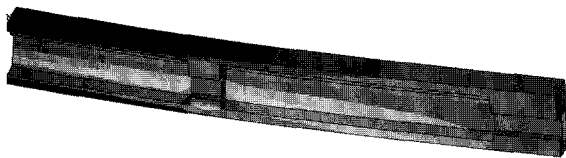


그림 5 변형형상 및 응력분포(DL : 사하중)

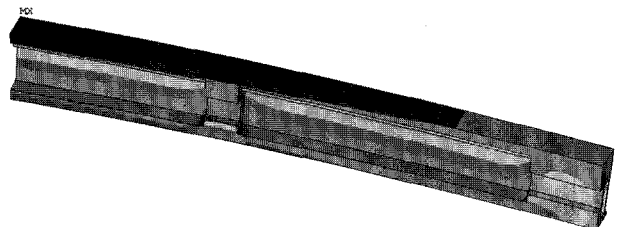


그림 6 변형형상 및 응력분포(PS : 프리스트레스트)

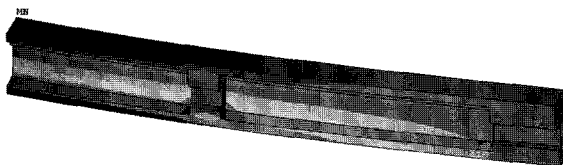


그림 7 변형형상 및 응력분포(LL : 활하중)

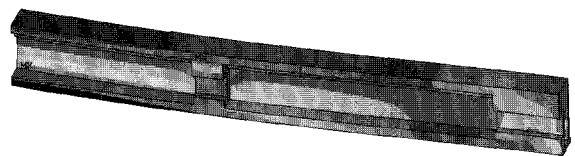


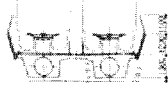
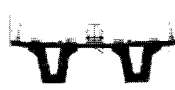
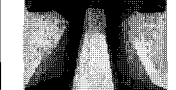




그림 8 변형형상 및 응력분포(DL+PS+LL)

표 4 자기부상열차교량 상부구조 시스템의 경제성 비교

형 상	Proposed girder		리니모 (Linimo)	경량전철 (주)대우건설, 2006)	트랜스래피드 Transrapid (Schwindt, 2004)	KIMM (한국건설기술 연구원, 1992)	엑스포 과학공원 (국립중앙과학관, 2006)
							
L(m)	25.0	25.0	30.0	30.0	25.0	25.0	25.0
H(m)	1.51	1.99	2.5	1.92	2.20	2.06	1.90
H/L	0.0604	0.0796	0.0833	0.0640	0.0880	0.0824	0.0760
차량하중	2.3t/m	2.3t/m	1.78 t/m	53 ton	2.4 t/m	1.86 t/m	2.5 t/m
처짐규정	L/2,000	L/4,000	L/1,500	L/1,000	L/4,000	L/4,000	L/3,000
활하중 처짐	12.5	6.25	20.0	9.94	6.25	6.25	6.98
거더중량 (ton)	73.7	86.5	232.0 (1/2 단면)	165.93 (1/2 단면)	143.3	88.6	106.4
거더중량 /단위길이	2.948	3.460	7.733	5.531	5.732	3.544	4.256
중량비(%)	100.0*	117.4	262.3	187.6	194.4	120.2	144.4

* 중량 비는 L=25, L/2,000을 기준으로 한 값임.

수행되었으므로 전체적인 설계규정과 사용성 검토 등에 따라 단면 변화가 있을 수 있다.

3. 가이드레일 연결부 성능 검증 실험 및 구조해석

그림 9에 보인 바와 같이 가이드웨이는 크게 3부분으로 구성된다. ① PSC-U형 거더, ② 프리캐스트 바닥판, ③ 가이드레일부(침목 및 가이드 레일)로 구성된 가이드웨이에서 중요한 사항은 구조적 성능과 함께 제작성·시공성이라고 할 수 있다. 구조적 성능은 크게 거더-바닥판으로 이루어진 가이드웨이 거더의 정적 및 동적 성능과, 프리캐스트 바닥판-궤도레일로 이루어진 바닥판-레일 연결체의 구조성능을 의미한다. 바닥판-레일 연결체, 즉 자기부상열차 궤도 시스템은 자기부상열차의 활하중을 직접적으로 받아, 거더에 전달시키는 구조로 가이드웨이에서 매우 중요한 요소이

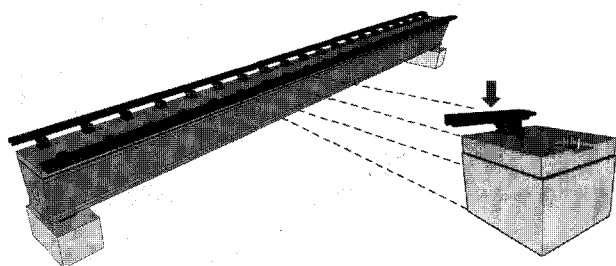


그림 9 제안된 가이드웨이 형상 및 연결부시험체 개요

다. 프리캐스트 바닥판을 적용한 자기부상열차 가이드웨이 거더 개발의 한 과정으로 프리캐스트 바닥판-궤도 레일 연결 시스템의 정적 및 피로실험을 수행하였다. 여기에서는 프리캐스트 바닥판-궤도 레일 시스템의 구조적 특성을 상세 유한요소해석을 통해 수치적으로 평가하였다.

3.1. 가이드레일 연결시스템 개요

도시형 자기부상열차 실용화 사업단 제3핵심 3-1세부과제는 그림 1에 보인 새로운 형식의 가이드웨이를 제안하였고, 제안된 가이드웨이의 프리캐스트 바닥판과 궤도 레일의 연결 시스템(이하 가이드레일 연결시스템)의 성능 검증을 위하여 그림 10과 같이 프리캐스트 바닥판-궤도 연결부 시험체를 제작하여 정적 및 피로 실험을 수행한 바 있다. 여기에서는 FEA 프로그램 ABAQUS를 이용, 가이드레일 연결시스템의 실제 형상과 경계조건을 모사하여 상세 유한

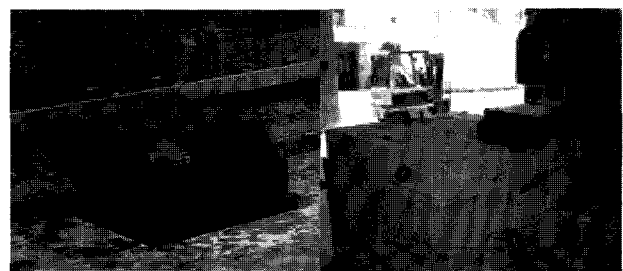


그림 10 가이드레일 연결시스템 및 실험체

요소해석을 수행하였다.

3.2 유한요소해석 및 고찰

그림 10은 제안된 가이드웨이의 궤도레일, 침목부 및 프리캐스트 바닥판의 목업모형을 보여준다. 연결구조는 크게 바닥판; 궤도-바닥판의 연결을 위한 D24mm 볼트; 각관 침목; 레일-침목의 연결 볼트(D16mm); F-형상 레일로 구성된다. 그림 11에 보인 바와 같이 가이드레일 연결시스템 모델은 침목부와 F-형상 레일을 강체처럼 일체로 거동하게 하여 주로 D24mm 앵커볼트와 프리캐스트 바닥판의 연결 성능을 평가하였다. 프리캐스트 바닥판과 Shim Plate, 각관 침목은 서로 맞닿아 있으며, D24mm의 앵커볼트로 연결된다. 따라서 유한요소모델에서는 이들 접촉면에서의 Contact-Slip을 고려하였다. 각 부재는 8절점 고체요소로 모델링 하였다. F-형상 레일의 하면에 분포하여 작용하는 차량 활하중에 대해 등가의 집중하중(약 16kN)을 계산하였고, 이를 외력으로 적용하였다.

그림 12와 그림 13은 활하중에 대한 가이드레일 연결시스템의 처짐과 응력(변형 100배 확대)을 각각 보여준다. 차량 활하중이 작용할 때 레일에서 발생하는 처짐은 차량의 레일부 처짐 요구량을 만족하며, 각관에서의 응력은 허용

응력보다 작음을 확인하였다. 그림 13의 변형형상에서 각관 하부플랜지의 들림이 최종적으로 레일 처짐에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 응력의 경우 각관 외측 하부플랜지와 웹이 만나는 부분에서 응력이 집중되는 것을 확인하였다. 그림 14에 보인 바와 같이 실제 가이드웨이 시스템은 F-형상의 레일과 각관 침목을 D16mm 볼트로 연결하는 방식을 취한다. 이 Prototype 궤도부 모델의 활하중에 의한 처짐과 응력을 그림 15와 그림 16에 나타내었으며, 허용처짐과 허용응력을 약간 상회하는 수준의 결과를 얻었다. 이것은 최초로 제안된 Prototype 궤도부 가이드레일 연결시스템을 대상으로 한 것이며, 이후 이와는 별도로 침목부에 대한 수정·보완 및 개선이 한국철도기술연구원에서 이루어졌다.

4. 차량하중에 의한 가이드웨이의 처짐 및 응력 전산해석

서론에서 언급하였듯이 차량의 하중은 레일-침목-바닥판-거더의 경로를 통해 수직하중과 모멘트의 형태로 전달된다. 거더의 한 단면에서의 하중 전달 메커니즘이 그림 17과 같다면, 거더의 휨변형에 따라 거더 최상단에 위치한 레일에서 종방향으로 응력 또는 변형이 발생할 수 있다. 또한

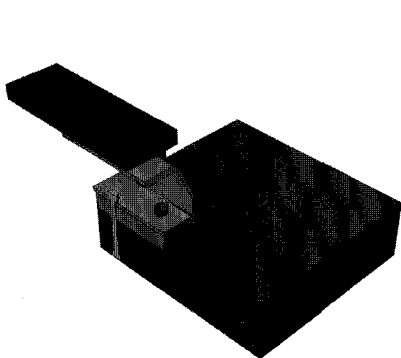


그림 11 궤도부 실험체 모델

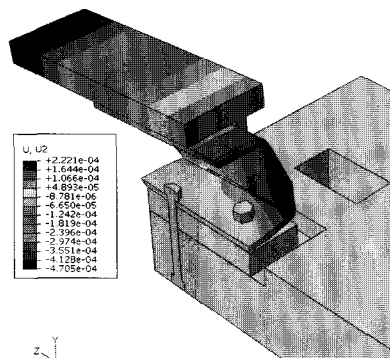


그림 12 처짐 분포

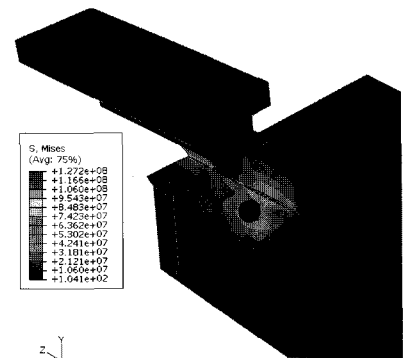


그림 13 응력 분포

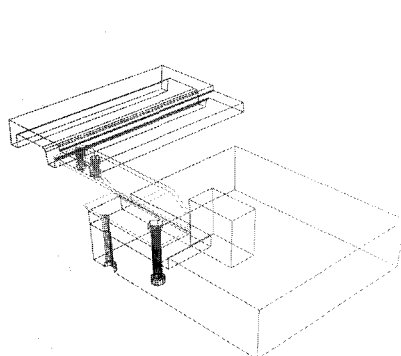


그림 14 Prototype 궤도부 모델

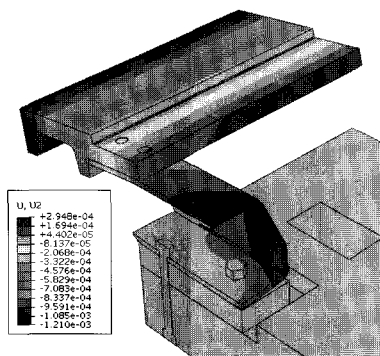


그림 15 Prototype 궤도부 처짐

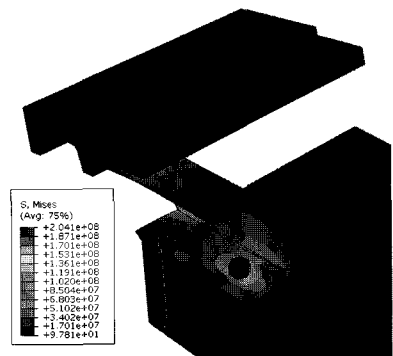


그림 16 Prototype 궤도부 응력

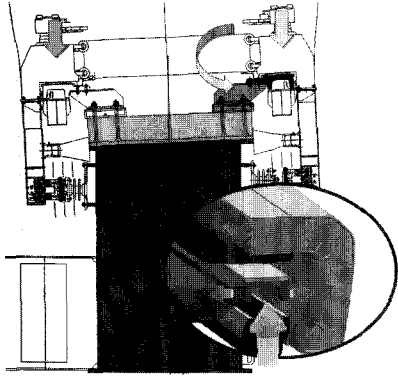


그림 17 하중 전달




그림 18 궤도-바닥판-거더 통합시스템의 예비해석결과

거더와 레일의 휨강성 비에 따라, 경우에 따라서는 침목부에서 전단변형이 발생할 가능성이 있다. 일반교량처럼 주거더가 주요설계범위라면, 최적의 설계방법은 형상이 복잡한 레일과 침목을 과감히 생략한 그림 2의 단면에 대해 설계하는 것이다. 그러나 차량의 활하중이 거더에 전달되는 과정과 거더의 휨강성 또는 레일부의 휨 또는 연직방향 강성에 따라 최종적인 처짐에 대한 검토가 필요하다.

그림 18은 차량 대차의 등분포 연직하중이 레일에 작용하는 정적 하중에 대하여 예비해석을 수행한 결과이다. 거더의 응력분포는 설계응력 범위에 드는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 레일부의 처짐이나 응력은 침목 강성, 보강여부에 따라 허용값을 약간 초과하는 경우도 발생하였다. 이 예비해석에서는 앞서 설명한 **contact-slip**을 모두 고려하지는 않았기 때문에, 보수적인 결과가 얻어진 것일 수도 있다. 현재는 거더와 레일 전체를 3차원 유한요소로 모델링하는 어려움과 과도한 해석시간을 극복하기 위해 적합한 모델에 대한 연구를 수행하고 있다.

참 고 문 헌

1. 도시형 자기부상열차 실용화 사업단, <http://www.maglev.re.kr>
2. 진병무, 김인규, 김영진, “PSC-형식 자기부상열차교량 상부구조의 단면 제안”, 2007년 대한토목학회 학술발표회, 2007
3. 진병무, 김인규, 김영진, 이윤석, 마향욱, 오현철, “프리캐스트 바닥판의 자기부상열차 가이드웨이 시스템 적용성 평가 : 정적 성능 실험”, 2008년 한국콘크리트학회 학술발표회, 2008
4. 진병무, 이윤석, 김인규, 김영진, “자기부상열차 가이드레일 연결시스템의 유한요소 해석”, 2009년 한국콘크리트학회 학술발표회, 2009
5. 정원석, 여인호, 장승엽, 김영진, 진병무, 김인규, “도시형 자기부상열차 가이드웨이 개발 현황” 한국콘크리트학회 기술기사, 2008
6. 여인호, 장승엽, 정원석, “도시형 자기부상열차 선로구축물” 대한토목학회 기술기사, 2008. 5 

[담당 : 전세진, 편집위원]