

도시형 자기부상열차를 위한 새로운 레일지지부의 설계

Design of New Rail Support Block for Urban Maglev

장승엽*
Jang, Seung Yup

최일윤**
Choi, Il-Yoon

여인호***
Yeo, Inho

ABSTRACT

Proposed herein is a shape design of a different rail support block with existing ones for the commercialization of the urban maglev. The rail support for existing test lines adopts monoblock steel sleeper, whereas an individual support system has been proposed to achieve an additional cost savings and to provide an emergency exit. Also, to enhance the easiness of installation and the repairability, alignment adjusting methods suitable for the new design have been devised.

1. 서론

현재 실용화를 추진 중인 도시형 자기부상열차는 상전도 흡인식 중저속 자기부상열차로 본 논문에서는 개발 중인 도시형 자기부상열차에 적합한 레일지지부 형상설계안을 제시하였다.

2. 레일지지부의 형상설계

먼저 레일지지부의 형상설계를 위해 레일과 교량 바닥판과의 체결방법에 따라 아래와 같이 몇 가지 대안을 검토하였다.

대안1) 모노블럭 침목을 사용하는 구조

~ 기존 기계연 시험선로, 과학관 선로, 일본 HSST 시험선로에 적용 (그림 1, a)

대안2) 브라켓(bracket) 형태의 단블럭 침목을 적용하는 구조 (그림 1, b)

대안3) 교량 바닥판 상면에 레일을 직접 체결하는 구조 (그림 1, c)

대안4) 교량 바닥판 측면에 레일을 직접 체결하는 구조 (그림 1, d)

먼저 대안1의 경우는 궤도에 작용하는 하중이 거더를 가로지르는 모노블럭 침목을 통해 전달되기 때문에 침목 체결부에 모멘트가 발생하지 않는다는 점과 시공 시에 침목에 레일이 일단 체결되면 궤간을 유지하기 위한 별도의 장비가 필요없다는 점이 장점인 반면 침목의 재료비가 상대적으로 많이 들고 자중이 커지는 점을 단점으로 꼽을 수 있다.

대안2는 거더를 가로지르는 모노블럭 침목 대신 브라켓 형태의 단블럭 침목을 적용함으로써 재료를 절감할 수 있고, 자중이 작아지며 거더 상면에 장애물이 없어지기 때문에 외관이 더 깔끔해지고 비상 시 거더 상면을 대피를 위한 워크웨이로 사용할 수 있다. 반면 열차하중이 레일에 작용하게 되면 브라

* 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 정회원

E-mail : syjang@krri.re.kr

Tel : (031)460-5302, Fax : (031)460-5814

** 한국철도기술연구원

*** 한국철도기술연구원

켓의 체결 위치에서 모멘트가 작용하게 된다는 점이 지지블럭(침목) 체결 앵커의 설계에 다소 부담이 되며 시공 시에나 유지관리 시에 레일을 고정할 장치가 별도로 필요하다는 단점이 있다.

대안3과 대안4는 교량 바닥판에 부상레일을 직접 체결하는 경우 대안 2보다 재료비가 더 절감되고 무게가 더 가벼워지며, 궤도높이가 상당히 낮아지게 된다. 또한 체결이 매우 단순해지고 부품의 수가 줄어들어 유지관리에는 매우 유리하다고 판단된다. 그러나 대안 3의 경우 레일 하부에서 레일 선형 조정을 실시하는 경우 충분한 공간을 확보하기 어렵다는 점이 단점이며, 또한 열차 부상모듈의 좌우 움직임이 발생할 경우에 대비하여 여유공간을 확보하려면 모멘트암이 길어져서 별도의 지지블럭이 필요하고 이 지지블럭이 충분한 단면을 가져야 하는데 이렇게 되면 거의 대안2와 동일한 구조가 된다. 그리고 대안4는 부상레일을 측면에 부착함으로써 궤도높이가 가장 낮은 구조가 되지만 이렇게 할 경우 시공 시에나 유지관리 시에 레일 선형을 조정하는 것이 매우 어려워진다. 실제 FTA에서 일본 HSST 시스템에 대한 검토보고서[1]에서 검토한 바에 따르면 직접 체결시스템(대안3과 대안4)이 침목을 사용하는 경우에 비해 시공 시 인력투입이 더 많은 것으로 나타났다. 그러나 FTA 보고서에서는 시공난이도는 직접 체결시스템의 설계상세에 따라 달라질 수 있다고 보았고 이에 따라 시공성을 높일 수 있는 직접 체결시스템의 상세설계안을 제시한 바 있다[1].

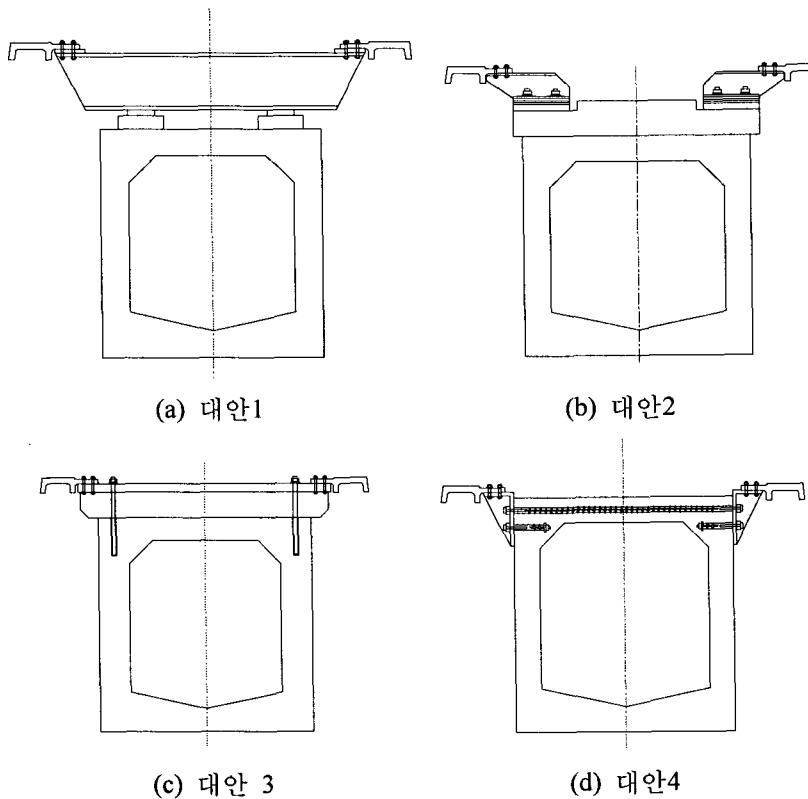


그림 1. 레일지지부의 형상설계대안

이상 각 대안에 대한 검토 결과, 모든 대안이 각각의 장단점이 있지만 가급적 직접 체결하는 방식으로 설계하여 재료비를 절감하고 상부구조를 보다 단순하게 함으로써 경량화하는 것이 도시형 자기부상 열차 선로구축물의 최종목표(경량화, 슬립화)에 더 부합하는 것이라 할 수 있다. 전술한 바와 같이 HSST 시험선로에서의 경험에 따르면 직접 체결방식으로 할 경우 인력소모가 많고 시공성이 나빠질 수 있다는 지적이 있지만 이는 프리캐스트 콘크리트 바닥판을 사용하여 레일지지부를 바닥판에 미리 부착하고 바닥판을 거더 위에 거치한 이후에 각 체결위치에서 충분한 범위의 조정이 가능하도록 설계한다면 충분히 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 앞서 지적한 바와 같이 직접 바닥판의 상부 또는 측면에 레일을 체결하게 되면 체결위치에서의 선형조정을 위한 충분한 공간확보가 어렵고 열차의 부상

모듈의 좌우동요에 대한 여유공간을 확보하기 위해서는 바닥판 측면방향으로 모멘트암이 커지게 되므로 대안3이나 대안4의 직접체결방식보다는 레일을 지지하는 지지블럭을 브라켓 형태로 하고 그 위에 레일을 체결하는 대안2가 가장 적절한 방안으로 평가된다.

따라서 레일지지부의 설계안은 대안2의 체결방식을 적용하는 것으로 하되 시공성을 높이기 위해 프리캐스트 콘크리트 바닥판에 미리 지지블럭과 레일을 설치한 후에 거더 위로 거치하고 이후에 정밀조정을 각 체결위치에서 실시하는 방안을 강구하도록 한다. 그림 2는 이상 설명한 레일지지부의 설계안의 개념도를 보여주고 있다.

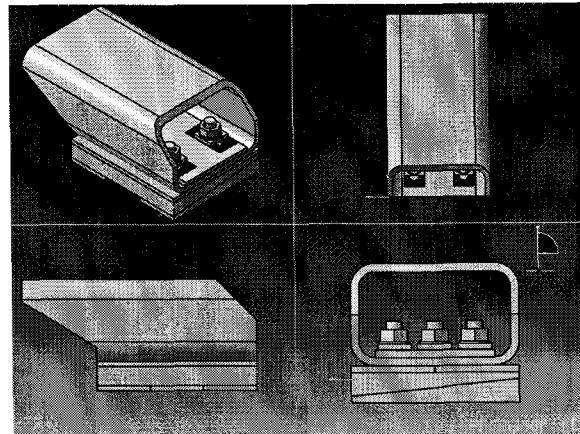


그림 2. 레일지지부 개념도

3. 선형조정방안 검토

3.1 선형조정방법

그림 2의 레일지지부는 전술한 바와 같이 시공 및 유지보수를 위한 선형조정이 가능하도록 설계되었다. 선형조정방법을 요약하면 아래와 같다.

<input type="checkbox"/> 상하방향 조정	고저조정용 쉼플레이트(shimplate) 삽입	최대 ±23mm
	고저조정용 웨지	최대 ±2.3mm
	계	최대 ±25.3mm
<input type="checkbox"/> 좌우방향 조정	브라켓 전체 이동 가능	최대 ±23mm
	(긴 볼트구멍 적용, 서레이트 플레이트를 너트-와셔로 고정)	

3.2 최대 조정치 검토

(1) 상하방향

시공에서의 조정목표치는 완화곡선에서의 최대 캔트변화량으로부터 산정될 수 있다. 원곡선에서는 바닥판에서 캔트를 조정하지만 완화곡선에서는 바닥판 내에서 캔트변화가 발생하기 때문이다. 먼저 원곡선에서 열차속도와 곡선반경 간의 관계는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V^2}{12.96R} = \left(\frac{C}{G} + \frac{C_d}{G} \right) g \quad (1)$$

여기서, V : 열차속도(km/h), R : 곡선반경(m), C : 캔트 설정 값(mm), C_d : 캔트부족(mm), G : 궤간 (mm), g : 중력가속도 (m/s^2)

최급곡선을 가정하여 곡선반경을 60m로 하고, 캠트는 최대캠트(8°)로 설정한다. 그리고 캠트부족은 불평형 원심가속도의 최대값으로 일본 Linimo에서 적용한 값(0.075g)를 적용한다[2]. 이렇게 하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V^2}{12.96R} = (0.14 + 0.075)g \quad (2)$$

따라서, 곡선반경이 60m일 때 최고속도는 $V = \sqrt{12.96g \times 60 \times (0.14 + 0.075)} \approx 40\text{km/h}$ 로 제한됨을 알 수 있다. 캠트변화율의 최대값은 UIC 703R[3]에서는 궤간 1453mm에 대해 속도 80~120km/h인 경우 28mm/s(종곡선이 없는 경우), 56mm/s(종곡선이 있는 경우)로 제안하고 있다. 종곡선이 없는 경우만 고려하기로 하고, 이것을 궤간 1850mm로 환산하면 약 35.7mm/s가 된다. 그리고 도시형 자기부상열차 전설규칙(안)[4]에서는 캠트변화율의 최대값을 1.25 "/s(31.75mm/s)로 제시하고 있다. 두 값 중 더 엄격한 기준을 적용하면 캠트변화율은 31.75mm/s이 되고, 이 기준을 적용하면 속도 40km/h에 대해 단위 길이 당 캠트변화량은 $31.75/(40/3.6) \approx 2.86\text{mm/m}$ 가 된다. 그리고 레일 지지블럭의 체결위치 간 거리는 현재 설계안에 따르면 1,054mm이므로 지지블럭 위치에서의 높이 변화량은 $2.86 \times 1054/1850 \approx 1.63\text{mm/m}$ 이며, 바닥판 한 세그먼트의 길이를 10m로 하면 바닥판 한 세그먼트 내에서 최대 높이차는 $1.63 \times 10 = 16.3\text{mm}$ 가 된다. 결과적으로 시공 시에 필요한 스크레이트 최대 조정치는 16.3mm에서 여유를 고려하여 20mm로 설정할 수 있다.

스크레이트의 두께만큼 높이조정이 가능하지만 조정가능한 최대높이는 앵커에 작용하는 수평하중에 대해 앵커의 휨파로파괴가 발생하지 않는 범위로 제한되어야 한다. 레일지지부 하나에 작용하는 최대 수평하중은 약 9.07kN으로(4절 참조) 하중계수를 1.7, 하중 작용높이는 표준 위치에서 약 61mm이므로 앵커 하나에 작용하는 휨응력은 $(9.07 \times 1.7) \times 61.0\text{mm} / (\pi \times 24^3/32) / 2 = 204 \text{ MPa}$ 이 된다(여기서 총 3개의 앵커 중 안쪽 두개의 앵커만이 수평하중에 지지하는 것으로 가정). 앵커의 인장강도는 835MPa이므로 허용응력을 대략 인장강도의 40%인 334MPa로 볼 때, 최대 조정치는 약 38mm 정도가 된다(최대 38mm까지 조정할 경우에 앵커 하나에 작용하는 휨응력은 321MPa). 따라서 시공 시 최대 조정치를 20mm로 하면 유보수 시에는 18mm 정도 조정여유가 남게 됨을 알 수 있다.

(2) 좌우방향

곡선부 좌우방향 최대 위치조정량의 검토를 위해 그림 3과 같이 원곡선을 가정하여 원곡선과 직선과의 레일의 위치변화량을 산정하였다. 표 1은 그 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 60m 반경의 최급곡선 조건에서는 프리캐스트 콘크리트 바닥판의 한 세그먼트 길이가 10m 이면 최대 -229.7mm, +203.4mm까지 위치변화가 발생하고 한 세그먼트 길이가 5m이면 최대 $\pm 53.84\text{mm}$ 까지 위치변화가 발생한다. 반경이 증가하면 점차 위치변화량이 감소하여 반경 150m의 곡선에서 세그먼트 길이가 5m일 때 위치변화량이 $\pm 21.1\text{mm}$ 가 되어 조정범위 이내에서 조정이 가능하다. 또한 반경 600m의 곡선에서 세그먼트 길이가 10m일 때도 최대 $\pm 20.9\text{mm}$ 로 조정범위 이내에서 조정이 가능해진다. 따라서 현재 레일지지부 설계대로 $\pm 23\text{mm}$ 이내에서 조정이 가능하도록 하려면 반경 600m 이하의 곡선에서는 바닥판 세그먼트의 길이를 축소하는 방안을 고려하거나 급곡선부에 적용하는 레일지지부의 최대 조정량을 좀 더 크게 하는 방안을 강구해야 할 것으로 판단된다.

4. 앵커 인발 및 레일지지부 응력 검토

앞서 설명한 레일지지부의 각 구성요소의 구조적 안전을 앵커 인발 및 수평하중에 대한 안정성과 브라켓 및 하부 지지구조(스크레이트 및 고저조정용 웨지)의 안정성 측면에서 검토하였다. 설계하중은 다음과 같은 하중을 고려하였다.

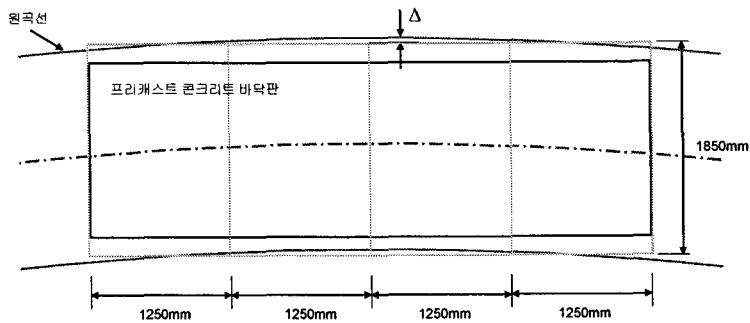


그림 3. 곡선부에서의 좌우 위치조정량 개념

표 1. 곡선반경 및 바닥판 세그먼트 길이에 따른 위치조정량

곡선 반경 (m)	바닥판 세그먼트 길이(m)	구분	바닥판 위치별 위치조정량 Δ (mm)								
			0m	1.25m	2.5m	3.75m	5m	6.25m	7.5m	8.75m	10m
60	5M	외측	-47.4	28.6	53.8	28.6	-47.4				
		내측	-53.8	27.0	53.8	27.0	-53.8				
	10M	외측	-203.4	-24.8	102.2	178.2	203.4	178.2	102.2	-24.8	-203.4
		내측	-229.7	-39.4	95.8	176.6	203.4	176.6	96.8	-39.4	-229.7
100	5M	외측	-29.5	16.5	31.9	16.5	-29.5				
		내측	-31.9	15.9	31.9	15.9	-31.9				
	10M	외측	-118.4	-10.6	66.3	112.3	127.7	112.3	66.3	-10.6	-118.4
		내측	-127.7	-15.8	64.0	111.8	127.7	111.8	64.0	-15.8	-127.7
150	5M	외측	-20.0	10.8	21.1	10.8	-20.0				
		내측	-21.1	10.6	21.1	10.6	-21.1				
	10M	외측	-80.3	-8.2	43.3	74.2	84.5	74.2	43.3	-8.2	-80.3
		내측	-84.5	-10.5	42.3	73.9	84.5	73.9	42.3	-10.5	-84.5
200	5M	외측	-15.2	8.0	15.77	8.0	-15.2				
		내측	-15.8	7.9	15.77	7.9	-15.8				
	10M	외측	-60.8	-6.6	32.2	55.4	63.1	55.4	32.2	-6.6	-60.8
		내측	-63.1	-7.9	31.6	55.2	63.1	55.2	31.6	-7.9	-63.1
600	5M	외측	-5.2	2.6	5.2	2.6	-5.2				
		내측	-5.2	2.6	5.2	2.6	-5.2				
	10M	외측	-20.6	-2.5	10.5	18.3	20.9	18.3	10.5	-2.5	-20.6
		내측	-20.9	-2.6	10.5	18.3	20.9	18.3	10.5	-2.6	-20.9

- 사하중(D) 3kN/m (양쪽 레일자중)
- 활하중(L) 23kN/m (궤도당)
- 충격(I) 0.15L(강거더) / 0.10L (콘크리트거더)
- 낙하하중(EL)
 - 정상낙하 24kN (2개소에 집중하중)
 - 최대낙하 27kN (1개소에 집중하중)
- 횡하중 0.15(23) kN/m (레일 기준면 높이에서 교축직방향으로 작용)
- 원심하중 $V^2/(127R) \leq 0.216$ (차량 중심위치에서 열차진행방향 직각으로 작용)
- 풍하중 열차 투영면적에 대하여 1.5kN/m²

검토결과를 간략히 요약하면 표에서 알 수 있듯이 앵커는 인발과 전단에 대해 모두 안전한 것으로 나타났고, 브라켓과 하부 지지구조에 발생하는 응력도 모두 허용응력에 못 미치므로 안전에 문제가 없는 것으로 나타났다. 레일 단부에서 발생하는 최대 변위도 약 0.914mm로 매우 작았다(그림 4 참조).

표 1. 앵커설계 결과

구분	항목	기호	단위	계산값	비고
인발	극한하중(계수하중)	M_u	kN m	19.56	$1.4D+2.0(L+I)+1.4(\Delta P_{CF}+\Delta P_w)$ $1.7D+1.7(L+I)+1.7(\Delta P_{CF}+\Delta P_w)$ $1.4D+1.7EL$
	공칭강도	ΦM_n	kN m	20.7	
	안전율	F.S	-	1.06	
	검토결과			O.K.	
전단	극한하중(계수하중)	V_u	kN m	15.42	1.7(CF+LF+W)
	공칭강도	ΦV_n	kN m	98.3	
	안전율	F.S	-	6.37	
	검토결과			O.K.	

주) 여기서, D : 사하중, L : 활하중, I : 충격, ΔP_{CF} : 원심하중에 의한 연직하중 증분, ΔP_w : 풍하중에 의한 연직하중 증분, EL : 이상제어 시 하중(낙하하중), CF : 원심하중, LF : 횡하중, W : 풍하중

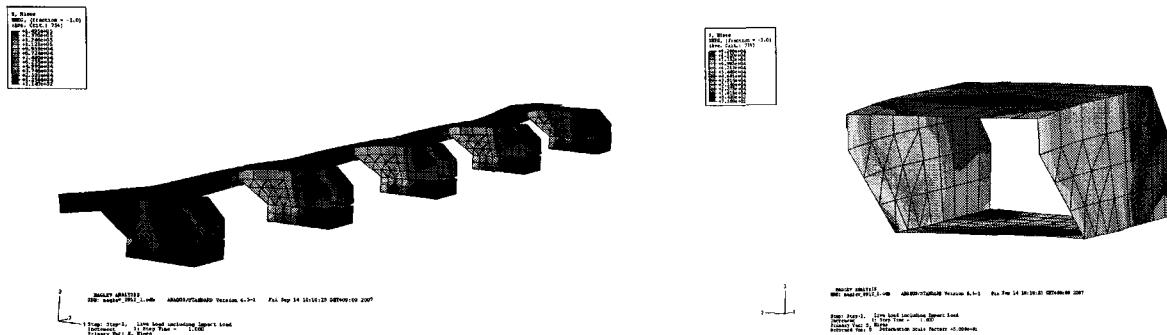


그림 4. 활하중에 의한 레일지지부 각 부의 응력 검토

5. 결론

이상 검토한 바와 같이 본 연구에서는 도시형 자기부상열차의 실용화를 위해 기존의 시험선로와 다른 형태의 레일지지부의 형상설계안을 제안하였다. 기존 시험선로에 사용된 레일지지부는 모노블럭 강재침목을 적용하고 있으나 재료비 절감, 대피통로 확보 등을 위하여 이를 개별지지 시스템으로 변경하여 새로운 레일지지 시스템의 형상을 제안하였으며 시공성과 보수성 확보를 위해 새로운 설계에 적합한 선형조정방안을 강구하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술연구개발사업의 일환으로 도시형 자기부상열차 실용화 사업을 통해 수행되었으며 재정적 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Chubu HSST Maglev System Evaluation and Adaptability for US Urban Maglev, FTA report, FTA-MD-26-7029-03.8, Federal Transit Administration, Mar. 2004.
- 일본 자기부상열차 선로 설계기준.
- UIC 703R, Layout characteristics for lines used by fast passenger trains, UIC leaflet, 2nd ed.
- 도시형 자기부상열차 건설규칙(안), 도시형 자기부상열차 실용화 사업단, 2007.