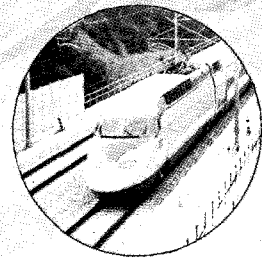
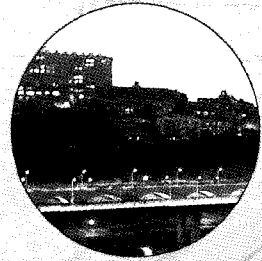


특별Session

도시형 자기부상철도 궤도구조 개선 및 거동분석

최은수 _ 한국철도기술연구원



도시형 자기부상철도 궤도구조 개선 및 거동분석

Improvement and Behavior Analysis of Track Structure for Urban Maglev System

최은수*
Choi, Eunsoo

이희업**
Lee, Hee-Up

김이현**
Kim, Lee-Hyeon

정원석**
Chung, Wonseok

ABSTRACT

The existing track structure for urban Maglev system is designed for the Maglev vehicles of HSST in Japan and UTM in Korea. The tracks having cross beams for supporting rails are located on bridge girders and have several drawbacks. Linimo in Nagoya, Japan, the first commercial urban Maglev line, has separated tracks from a bridge to overcome the previous track structure. However, the Linimo just put the existing track on bridge deck. This study suggests an improved track structure for urban Maglev system and compares the behavior of the new and existing track through static structural analyses. In the improved track, the power collector of a Maglev vehicle is installed parallel to the bridge deck surface, and, thus, the bottom width of the track structure is not limited by the vehicle's width. Therefore, the live load is distributed more effectively by the wide bottom of the track. Also, steel plates instead of steel cross beams are used to support rails, and, thus, the rail's deflection is improved.

1. 서론

자기부상철도가 다른 경량전철에 비해 특별한 점은 부상하여 주행하는 비접속식 방식이라는 점이다. 따라서 궤도구조는 부상과 추진력을 발생시킬 수 있는 구조로 고안되어야 한다. 자기부상차량은 크게 중저속의 차량과 초고속의 차량으로 구분되는데 중저속은 약 100 km/h 이내의 운영속도를 가지고 있으며, 초고속은 상업 운행속도 400km/h에 이른다. 중저속과 초고속은 차량의 특징이 다르므로 따라서 궤도구조 및 교량구조의 특징도 달라지게 된다. 중저속으로 개발된 차량은 국내의 UTM과 일본의 HSST가 있으며, 이러한 중저속의 차량을 이용하는 자기부상철도를 '도시형'이라 부른다.

국내의 UTM 차량과 일본의 HSST 차량을 위한 궤도 및 교량구조는 차량성능 시험을 위한 시험선용으로 구조가 간단하며 사용성을 고려하지 않은 구조이다. 따라서 기존의 궤도구조는 사용성과 구조적 특성에 의해서 여러 가지의 단점을 내포하고 있다. 도시형 자기부상철도의

* 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 자기부상연구팀
E-mail : eunsoochoi@krri.re.kr Tel: 031-460-5324, Fax: 031-460-5649

** 한국철도기술연구원

최초의 상업노선인 일본의 Linimo는 이러한 단점들을 극복하기 위해서 사용성과 안전성이 개선된 교량형식을 채택하였다. 그러나 Linimo 노선의 궤도구조는 HSST 시험선의 궤도구조와 동일하며, 차이점은 교량의 상부에 궤도구조가 설치되었다는 점이다.

본 연구에서는 HSST 및 UTM 시험선에 사용된 궤도구조 및 Linimo 상업노선 궤도구조의 장단점을 분석하여 도시형 자기부상철도에 적합한 개선된 궤도구조를 제안하였으며, 구조해석을 통해서 기존의 궤도구조와 거동특성을 비교하였다.

2. HSST 및 Linimo의 궤도구조와 교량구조

HSST의 자기부상차량은 부상과 추진을 하는 전자석 및 리니어모터를 차량에 부착하고 있다. 따라서 궤도에는 부상을 위해서 반발력을 발생시키는 역할을 수행하는 레일과 추진을 위한 리액션플레이트(reaction plate)가 있으며 이를 지지하는 가로보(cross arm-침목역할을 수행)가 있다. 또한 거더의 측면에는 전기를 공급하기 위한 전차선이 설치되어 있다. 부상 및 추진을 위한 구성품의 명칭, 교량의 형상 및 궤도구조의 상세가 그림 1에 나타나 있다. HSST의 자기부상차량은 차량이 교량을 감싸고 주행하는 형식이며, 그림 1에서 보듯이 궤도구조와 교량구조가 명확하게 분리되어 있지 않다. 레일에 발생하는 힘이 가로보를 통해서 거더에 전달되는 하중전달 경로를 가지고 있다. 이러한 구조는 다음과 같은 단점이 존재 한다.

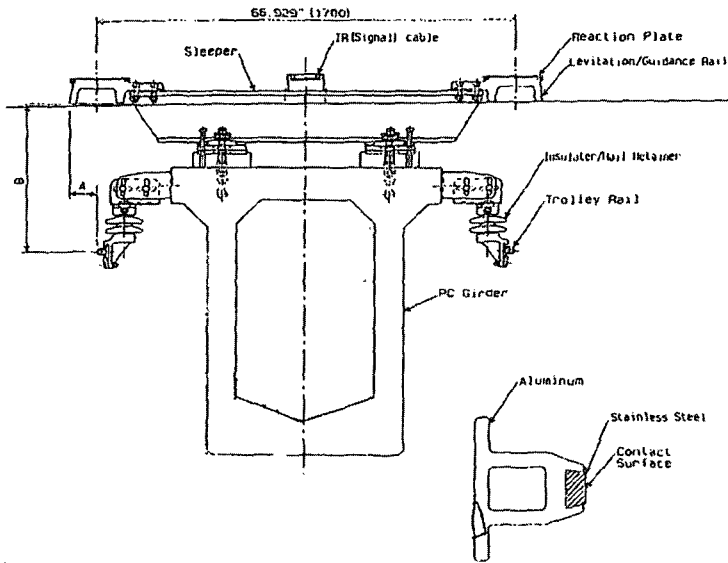


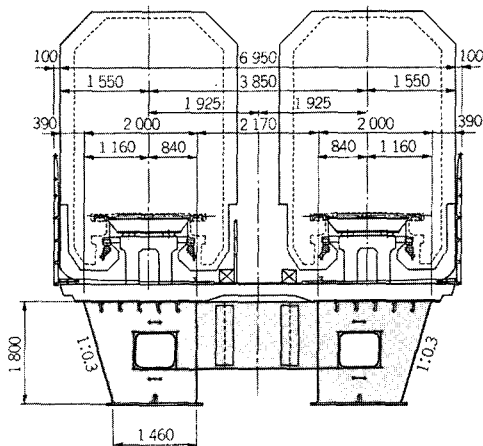
그림 1 HSST의 궤도구조 및 교량구조

- 차량 폭에 의해서 교량폭이 제한을 받기 때문에 공간을 크게 할 경우 거더의 높이가 지나치게 증가할 수 있다. 즉 요구되는 강성확보를 위해서 교량폭의 증가는 불가능하므로 높이를 증가시켜야 하며, 이러한 과도한 높은 거더는 풍하중 및 안정성에서 불리하다.

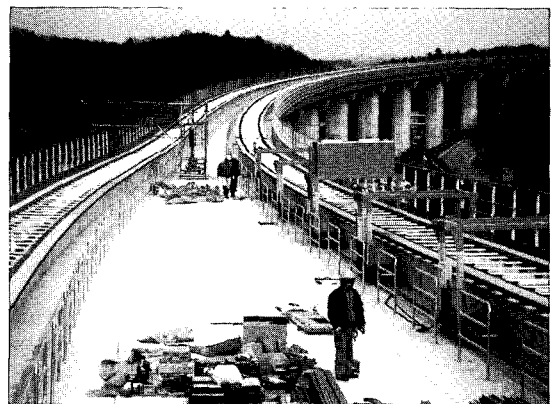
- 긴급상황 시 대피할 수 있는 대피통로가 부족하며, 측면공간이 없어 차량의 전후로만 대피하도록 되어 있어 긴급구난에 취약점이 있다
- 레일과 전차선 등에 접근이 어려우며, 궤도틀림 보정을 위한 공간이 협소하여 유지보수에 대한 어려움이 있다.
- 침목의 높이가 크기 때문에 긴급대피 시 보행이 불량
- 고가의 강거더를 침목으로 사용하므로 고비용

위와 같은 단점 때문에 상업노선인 Linimo에서는 교량상부에 궤도구조를 설치하는 방식으로 노선을 건설하였으며, 그 형상이 그림 2에 나타나 있다. HSST의 전차선 부분까지를 교량의 바닥판위에 설치하여 궤도구조로 사용하고 교량은 완전히 분리된 형태로 시공되었다. 그림에서 보듯이 Linimo의 교량구조는 상부구조의 강성을 확보하는데 차량에 의해서 영향을 받지 않으며, 긴급대피 및 유지보수를 위한 공간이 충분히 확보되어 있다. 그러나 Linimo의 궤도구조는 HSST의 궤도구조와 동일하므로 집전장치의 설치를 위해서 일정한 높이가 확보되어야 하며, 폭에 제한받기 때문에 교량의 바닥판의 한정된 곳에 하중이 집중적으로 작용한다. Linimo 노선의 교량구조에서 상자형상은 이러한 문제에 최적화한 형태를 띠고 있다. Linimo 노선은 궤도구조와 교량구조를 분리하여 제작하는 궤도구조 형식을 사용하였으나, 이 또한 다음과 같은 단점을 가지고 있다.

- 집전장치 설치를 위해 궤도구조의 높이가 높다
- 집전장치 설치에 의해서 궤도구조의 폭이 제한을 받아 교량상부에 집중하중으로 작용하므로 교량 바닥판 하부의 교량 상자구조가 좁고 높게 설치되어야 한다.
- 따라서 전체적으로 구조물의 높이가 높아지며, HSST 교량 및 궤도구조에 비해 거대한 구조물이 된다.



(a) Linimo 노선의 교량 거더 및 궤도구조



(b) 건설 중인 Linimo 노선 교량 및 궤도

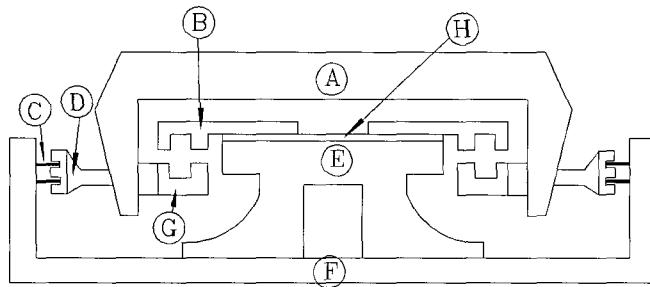
그림 2 Linimo의 궤도 및 교량구조

3. 도시형 자기부상철도 궤도구조의 개선

기존 자기부상철도의 단점은 주로 전기를 공급하는 제3궤조가 궤도의 측면 하부에 부착되어 있어 집전장치를 수직으로 설치해야 하기 때문에 발생하며, 또한 레일을 지지하기 위해서 가로보를 사용하기 때문에 발생한다.

따라서 개선된 자기부상철도 궤도구조의 특징은 집전을 위한 제3궤조를 교량 측면이나 궤도 슬래브의 하부에 설치하지 않고, 그림 3과 같이 교량 바닥판 위에 설치된 측벽에 설치하고 집전장치를 수직이 아닌 수평으로 배치하는 것이다. 이러한 경우, 집전장치의 높이만큼 궤도구조의 높이를 감소시킬 수 으며 특징을 정리하면 다음과 같다.

- 집전을 위한 제3궤조 교량 바닥판 상의 측벽에 설치한다.
- 집전장치는 수평으로 설치한다.
- 궤도 슬래브는 철근 콘크리트로 제작되며, π 형으로 저부를 넓게 제작한다.
- 레일을 부착하기 위한 침목은 I형 거더를 사용하지 않고, 강판을 이용한다.
- 강판 침목은 궤도슬래브에 앵커볼트를 사용하여 고정된다.
- 레일은 강판 침목에 용접으로 부착한다.



- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| Ⓐ : 대차 (boggy) | Ⓑ : 레일 (rail) |
| Ⓒ : 제3궤조 (third rail) | Ⓓ : 집전장치 (power collector) |
| Ⓔ : 궤도 슬래브 (track slab) | Ⓕ : 교량 바닥판 (bridge deck) |
| Ⓖ : 전자석 (electronic magnet) | |

그림 3 개선된 궤도구조 형식 및 구성품

위와 같은 궤도구조 형식은 기존의 형식에 비해 다음과 같은 장점이 있다.

▣ π 형 궤도 슬래브의 장점

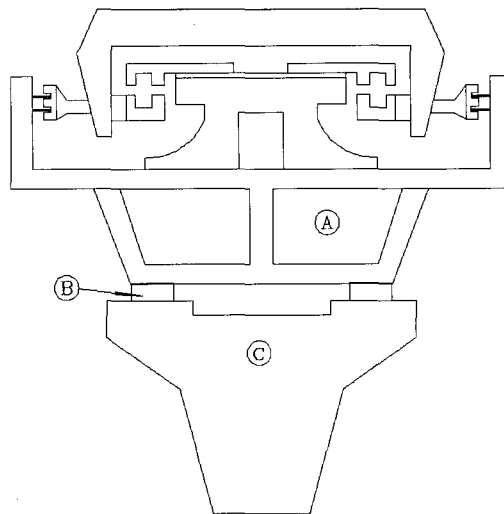
- 궤도구조의 높이가 감소하여 고정하중이 감소하고, 강거더로 된 침목을 사용하지 않고, 철근콘크리트 궤도슬래브를 사용하므로 재료비 절감되어 건설비 절감효과가 있다.
- 궤도슬래브의 저부를 넓게 하기 때문에 고정하중 및 활하중을 교량 바닥판에 넓게 분포시켜, 교량의 상자거더를 넓고 낮게 제작할 수 있다.
- 이러한 경우, 교량의 높이가 감소하여 도시미관에 도움이 된다.

- 궤도구조가 간단하고 높이가 낮기 때문에 분기기 제작에 유리한 구조이다.
- 긴급대피 시, 교량상의 측벽과 궤도 슬래브 사이의 공간을 대피로로 활용이 가능하다.
- 위의 공간은 유지관리 시에도 사용할 수 있어 매우 유용하다.
- 궤도 상부가 평면으로 대피 시 이동이 용이하다.

■ 강판침목 사용의 장점

- 강판 침목을 궤도슬래브에 고정하므로 궤도틀림이 거의 발생하지 않는다.
- 레일을 통해서 전달되는 휨하중에 의해 궤도 슬래브의 철근콘크리트에 압축이 발생하고, 강판에는 인장이 발생하게 되어 각 재료의 특성을 반영한 이상적 구조이다.
- 강판 침목에 레일을 용접하여 설치하며, 침목의 높이가 낮아 작업이 용이하다.
- 침목의 높이가 매우 낮아, 궤도 슬래브 상부를 자유로이 보행할 수 있어 유지보수가 용이하며, 긴급대피 시 원활한 대피가 가능하다.
- 궤도틀림이 거의 발생하지 않는 구조이므로 차량의 주행안정성 개선에 도움이 된다.
- 강판침목은 기존의 가보로(H형강) 침목에 비해 저렴하므로, 침목간격을 좁게 배치하여 레일의 부착 및 처짐 개선에 도움이 된다.

그림 4에는 개선된 궤도구조와 교량의 일예를 보여주고 있다. 교량의 상부구조는 상자 또는 거더형식으로 구성할 수 있다.

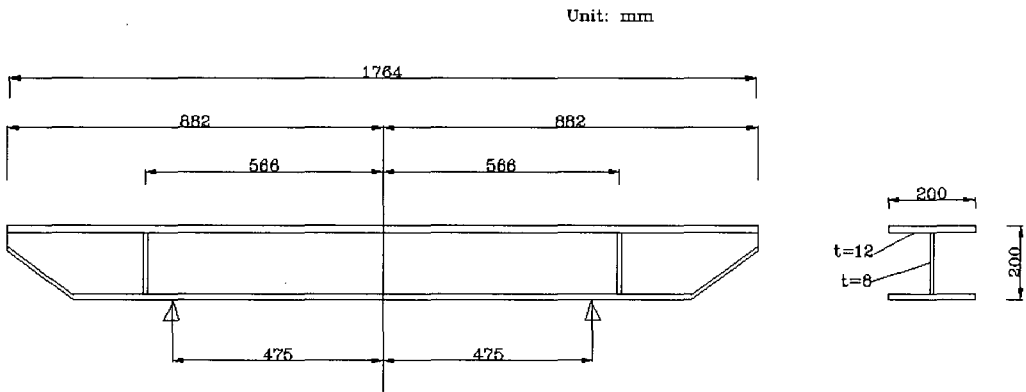


- Ⓐ : 상자거더 (box girder)
- Ⓑ : 교량받침 (bridge bearing)
- Ⓒ : 교각 (pier)

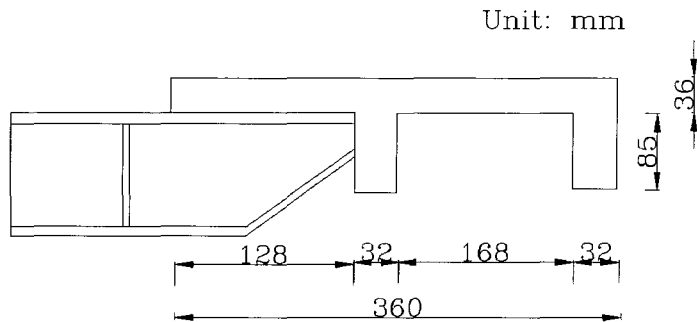
그림 4. 개발된 궤도구조와 교량

4. 기존 및 개선된 궤도구조의 구조해석 및 결과

기존의 자기부상철도 궤도구조와 개선된 궤도구조의 거동특성을 비교하기 위해서 모드해석 및 정적 해석을 실시하였다. 궤도구조의 모델링은 궤도구조에서 철근콘크리트 부분을 제외한 부분, 즉 기존 구조에서는 레일과 가로보를 개선된 구조에서는 레일과 플레이트만을 포함시켜 해석모델을 작성하였다. 정적 해석은 설계하중인 2.5 ton/m를 재하하여 레일 단부의 최대 처짐과 가로보 또는 레일의 최대 들림을 비교하였다. 기존 궤도구조의 제원은 그림 5에 나타나 있으며, 해석 모델은 그림 6에 나타나 있다. 가로보의 간격은 1.25 m로 4개의 가로보와 5.0 m 길이의 레일을 구조해석에 포함시켰다. 개선된 궤도구조에서도 플레이트의 간격은 동일하게 1.25 m로 하였으며 레일 길이 또한 5.0 m 이다. 각 해석모델은 LUSAS 프로그램의 shell 요소를 사용하여 모델링하였다 (LUSAS, 2004). 개선된 궤도구조의 해석모델은 레일과 가로보의 상부 플레이트만을 포함하며, 플레이트의 두께는 24 mm 이다 (상부와 하부 플렌지 두께를 합한 값). 플레이트의 경계조건은 그림 3에서 보듯이 플레이트가 콘크리트에 묻혀있기 때문에 바닥전면이 핀으로 고정되어 있다고 가정하였다.

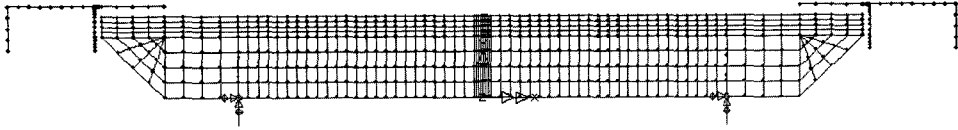


(a) 가로보(cross beam)의 제원

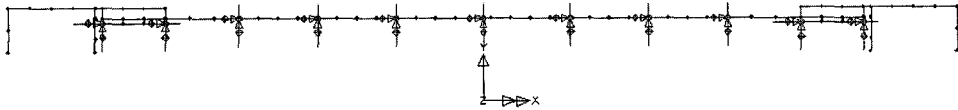


(b) 레일의 제원

그림 5. 가로보 및 레일의 제원



(a) 기존 궤도구조



(b) 개선된 궤도구조

그림 6. 궤도구조의 해석모델

4.1 모드해석 및 결과

모드해석은 각 해석모델의 5차 모드까지 수행하여 고유진동수와 모드형상을 표 1 및 2에 나타내었다. 기존 궤도구조의 모드형상은 1차 모드에서 레일의 역대칭 진동이 나타나고, 2차 모드에서 레일의 대칭 진동이 발생한다. 이 때 레일의 대칭 진동에 의해서 가로보의 중앙부분이 휨에 의해서 들리는 현상이 발생한다. 3차 및 4차 모드는 레일이 사인파 형태로 진동하는 형상이며, 5차 모드에서는 레일의 진동은 거의 없으며 가로보의 플렌지의 변형이 발생하는 것으로 나타났다.

개선된 궤도구조에서는 플레이트가 고정되어 있으므로 두 개의 레일은 구분된 구조처럼 따라서 1차 및 2차 모드는 두 레일의 대칭 및 역대칭 진동을 나타내며, 고유진동수의 차이가 없다. 개선된 궤도구조에서는 레일이 플레이트에 고정되어 있으므로 모드형상이 연속보의 사인파 모양을 하고 있으며, 모드 차수가 증가하면 레일의 개구간 단면에서 비틀림이 크게 발생하고 있다.

개선된 궤도구조의 고유진동수가 기존 궤도구조에 비해 크게 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 이러한 진동특성의 변화가 차량 또는 교량의 진동특성에 어떻게 영향을 줄 것인가에 대해서는 차량/궤도 상호작용 해석 및 교량구조를 포함하는 차량/교량 상호작용 해석을 통해서 규명될 수 있다.

기존의 궤도구조에서 2차 모드의 경우 레일의 대칭 진동에 의해서 가로보의 중앙이 진동하는 형상을 보이는데, 이러한 가로보의 진동을 제어하는 방법으로 중앙에 세로 보강재(stiffener)와 편받침을 설치하는 것이다. 기존 궤도구조에 편받침을 추가한 궤도의 모드형상 및 고유진동수가 표 3에 정리되어 있다. 가로보 중앙에 편받침과 세로 보강재를 설치하게 되면 진동형상은 크게 변하지 않으나, 고유진동수가 증가한다. 특히, 가로보의 강성이 진동에 영향을 미치는 1, 2 및 5차 모드의 고유진동수가 증가하였다. 3차 및 4차는 레일의 강성에 의해서 결정되는 진동형상으로 고유진동수에 변화가 거의 없다. 동특성의 저차모드가 구조물의 진동에 크게 영향을 미치는 것을 고려하며 중앙에 편받침을 설치하는 것은 궤도구조의 전체적인 진동 특성에 영향을 줄 수 있다.

4.2 설계하중에 의한 정적해석 및 결과

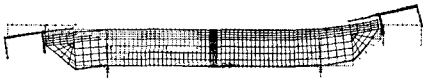
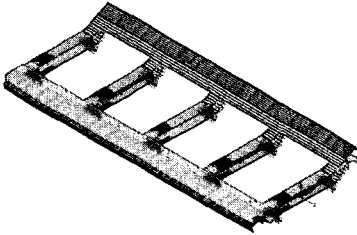

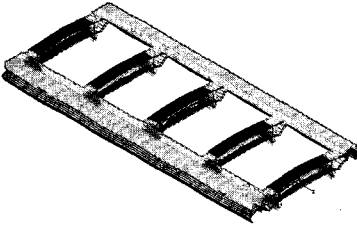
자기부상철도의 설계하중은 국립중앙과학관의 자기부상철도 건설에 적용된 2.5 ton/m를 적용하였다. 하중의 재하는 각 레일의 중앙부에 1.25 ton/m씩 재하하여 정적 해석을 실시하였으며, 수직방향의 처짐 및 들림을 위의 세 가지 경우에 대해서 비교하였다. 표 4에 각 경우의 재하 및 처짐 형상과 수직방향의 최대 처짐 및 들림의 값이 나타나 있다.

기존 궤도구조의 경우 최대 처짐은 레일 단부에서 0.317 mm 발생하였으며, 들림은 가로보의 중앙에서 0.059 mm 발생하였다. 중앙에 편받침을 추가하게 되면 레일 단부의 최대 처짐은 0.291 mm로 감소하며, 가로보 중앙의 들림도 0.009 mm로 감소한다. 따라서 가로보 중앙에 편을 추가하는 것은 레일의 처짐 감소 및 가로보의 들림 감소에 크게 기여하는 것을 알 수 있다. 또한, 가로보의 편받침은 실제 건설 시에는 이상적인 편이 아닌 일종의 플레이트 위에 가로보를 받치게 된다. 이러한 경우 편 2개인 경우 가로보가 힘에 의해 회전하면서 받침 플레이트의 특정 부위에 집중적으로 힘을 가하게 되어 받침 플레이트에 손상이 발생할 수 있다. 편이 3개인 경우에는 변형된 모양에서 보듯이 가로보의 힘에 의한 변형이 거의 없기 때문에 편으로 지지된 구간에서는 가로보가 수평을 유지하여 받침 플레이트의 특정 부위에 힘이 집중되는 현상이 감소하게 된다. 이러한 특징은 받침 플레이트의 유지관리에 크게 영향을 미칠 것이다.

개선된 궤도구조의 레일 단부 최대처짐은 0.087 mm로 기존 궤도구조에 비해 약 28%에 불과하며 72%의 감소 효과를 나타내고 있다. 들림은 레일의 끝부분에서 나타나는 것으로 0.019 mm 이다. 이 부분은 원래는 편으로 지지되어 있어 들림이 발생하지 않아야 하나, 해석모델의 작성하는 과정에서 편 지점과 레일사이에 해석을 위한 플레이트를 설치하여 발생하는 것이다.

개선된 궤도구조는 편 3개인 경우에 비해서도 레일의 처짐 개선효과가 매우 크며, 또한 기존의 궤도구조와 같이 편 지점이 존재하지 않기 때문에 유지관리에도 유리하다고 판단된다.

표 1. 기존 궤도구조의 모드형상 및 고유진동수

모드	측 면	3차원
1차	 (95.6 Hz)	
2차	 (98.2 Hz)	


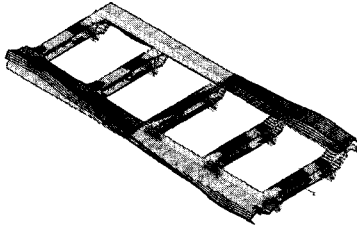

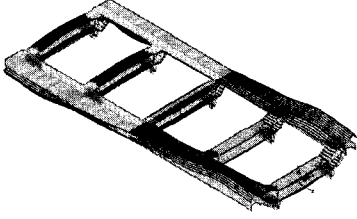

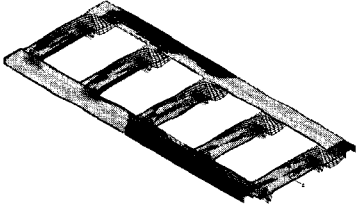
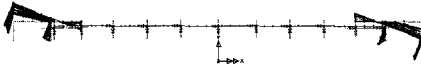
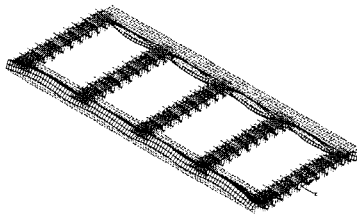
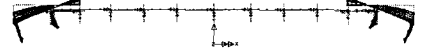
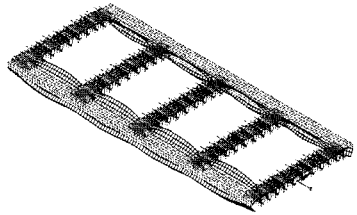
모드	측 면	3차원
3차	 <p>(185.0 Hz)</p>	
4차	 <p>(187.6 Hz)</p>	
5차	 <p>(216.1 Hz)</p>	

표 2. 개선된 궤도구조의 모드형상 및 고유진동수

모드	측 면	3차원
1차	 <p>(203.3 Hz)</p>	
2차	 <p>(203.3 Hz)</p>	

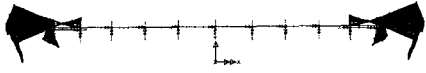
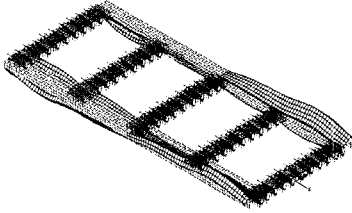

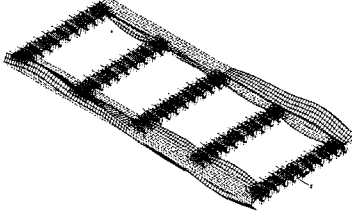
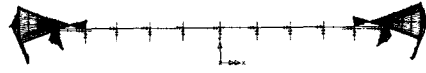
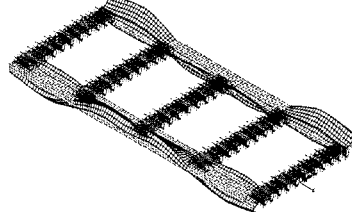

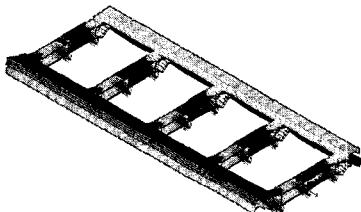

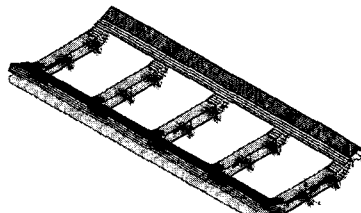
모드	측 면	3차원
3차	 <p>(207.0 Hz)</p>	
4차	 <p>(207.0 Hz)</p>	
5차	 <p>(220.0 Hz)</p>	

표 3. 핀받침이 추가된 기존 궤도구조의 진동형상 및 고유진동수

모드	측 면	3차원
1차	 <p>(99.4 Hz)</p>	
2차	 <p>(104.5 Hz)</p>	

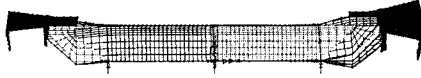
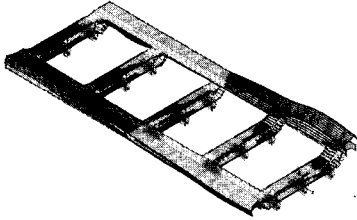
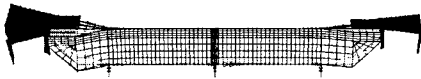
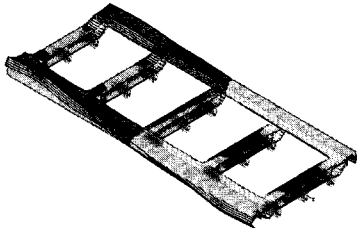

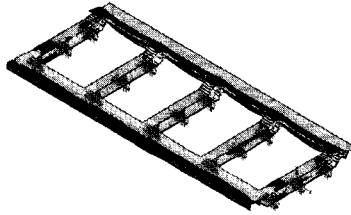

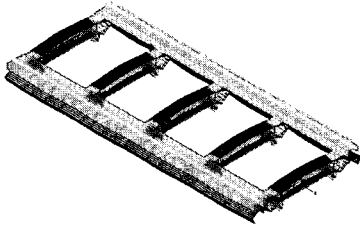

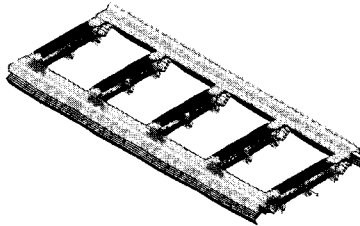

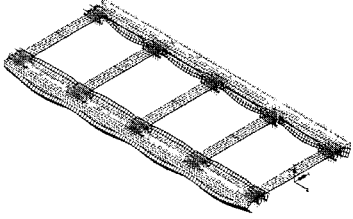
모드	측면	3차원
3차	 <p>(184.4 Hz)</p>	
4차	 <p>(189.1 Hz)</p>	
5차	 <p>(227.7 Hz)</p>	

표 4. 정적 해석의 결과

구분	처짐/틀림	변형형상 (측면)	변형형상 (3차원)
기존 궤도구조 (2 핀)	0.317(처짐) 0.059(틀림)		
기존 궤도구조 (3 핀)	0.292(처짐) 0.009(틀림)		

구분	처짐/들림	변형형상 (측면)	변형형상 (3차원)
개선된 궤도구조	0.087(처짐) 0.019(들림)		

5. 결론

본 연구에서는 도시형 자기부상철도 궤도구조의 형태에 따른 궤도구조의 진동특성의 변화 및 설계하중에 대한 수직 처짐 및 들림을 비교·평가하였다. 기존 궤도구조는 레일과 이를 지지하는 가로보로 구성되어 있으나, 개선된 구조에서는 가로보를 대신하여 강재 플레이트를 설치하여 레일을 지지하였다.

이러한 변화는 가로보의 휨 거동에 의해서 발생하는 수직 처짐의 증가를 방지할 수 있으며, 이는 자기부상철도 차량의 주행안정성 개선에 도움이 될 수 있다. 또한 개선된 궤도구조는 편받침이 없어 유지관리에 유리하며 강재의 절약으로 건설경비의 감소에 기여할 수 있다. 또한 시공효율을 증가시켜 전체적인 건설경비의 감소를 유발할 수 있는 것이다.

그러나 개선된 궤도구조의 고유진동수 증가가 차량의 진동 및 교량의 동적 거동에 어떠한 영향을 줄 것인가는 추후에 연구해야할 사항이다.

참고문헌

- LUSAS (2004). "Lusas Powerful FE technology for specialist applications - LUSAS Modeller User Manral", Worldwide, FEA Ltd.