

LIM 방식 자기부상철도의 궤도시스템 개발

Development of the Track System for a LIM Type Maglev

여인호[†] · 김동석* · 장승엽** · 황성호**
In-Ho Yeo · Dong-Seok Kim · Seung-Yup Jang · Sung-Ho Hwang

Abstract This paper proposes the track system with twin block sleeper for a LIM type maglev railroad. Because a LIM type maglev railroad is expected to be constructed in inner city, social costs can be required under construction. Accordingly, superstructure using precast plate was adopted and twin block sleeper which can be constructed together with precast plate was developed to reduce the construction period. To examine the structural safety of the proposed track system with twin block sleeper, the finite element analyses and the laboratory experiments were performed. Also, the workability of the proposed track system was investigated through the construction simulation test and construction experience in test bed.

Keywords : LIM type Maglev railroad, Twin block sleeper, precast plate

요 지 이 연구에서는 선로구축물을 최소화 할 수 있어 도시형 자기부상철도로 적합한 LIM 방식 자기부상철도의 궤도시스템을 개발 제안하였다. 도심지에 건설될 경우 많은 사회적 비용을 초래하므로 공사기간을 단축할 수 있도록 프리캐스트 바닥판을 사용하는 상부구조 형식을 채택하였으며 바닥판 시공시 침목이 함께 설치 될 수 있는 트윈블록 침목 궤도시스템을 개발하였다. 제안한 트윈블록 침목 궤도시스템에 대해 유한요소해석과 실험을 통해 구조적 안전성을 검증하였으며 모의시공시험 및 기계연구원 시험선 시공을 통해 그 시공성을 확인하였다.

주 요 어 : LIM 방식 자기부상철도, 트윈블록 침목, 프리캐스트 바닥판

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 대도시의 교통난 해소와 대기오염이 없는 친환경 대중교통망 구축을 위해 다양한 교통시스템이 도입되고 있다. 이중 LIM(Linear Induction Motor) 방식의 자기부상철도는 LSM(Linear Synchronous Motor) 방식에 비해 선로구축물을 최소화할 수 있어 도시형 자기부상철도로 적합하며 기존의 중량전철이나 경량전철에 비해 경제적이며, 소음, 진동, 분진 등 환경문제를 거의 일으키지 않아 미래형 교통시스템으로 주목받고 있다[1,2].

자기부상열차는 궤도와 비접촉으로 운행되지만 궤도의

형태, 크기, 구조적 성능에 민감한 부상/추진 특성을 가지고 있다. 따라서 자기부상열차의 성능을 높이기 위해서는 차량의 성능을 높이는 연구뿐만 아니라 선로구축물에 대한 연구도 중요하게 다루어져야 한다. 그럼에도 불구하고 아직 국내에는 차량개발에 비해 선로구축물에 대한 연구가 미진한 실정이며, 기존에 설치된 기계연구원의 시험선이나 엑스포 과학공원의 시험선 또한 해외사례를 참조하여 설치한 것일 뿐 선로구축물에 대한 특별한 연구는 없었다고 할 수 있다.

도시형 자기부상열차는 도심지에 건설되는 특성상 그 실용화를 높이기 위해서는 시민의 거부감을 최소화하고 도시경관에 순응할 수 있도록 그 크기를 최소화할 수 있는 형상이 필요하며 시공기간 또한 단축할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 자기부상열차의 주행안정성을 확보하면서 도심지 시설물로서 적합하도록 경량화, 슬림화할 수 있고 공사기간을 줄일 수 있는 궤도시스템에 대해 제안한다.

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원
E-mail : ihyeo@krti.re.kr

TEL : (031)460-5664 FAX : (031)460-5359

* 한국철도기술연구원 박사후 연구원

** 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

1.2 연구 수행 범위

경량화, 슬림화 및 시공기간 단축에 초점을 두고 개발된 트윈블록 침목 궤도시스템에 대해 그 특징을 모노블록 침목 궤도시스템과 비교 설명하고 유한요소해석 결과와 실험 결과를 토대로 제안한 궤도시스템의 구조적 안정성을 검토한다. 또한 모의시공시험과 기계연구원 시험선 시공을 통해 제안된 궤도시스템의 시공성을 평가한다.

2. 트윈블록 궤도시스템 개발

일본의 리니모[1] 또는 대전 엑스포 과학공원의 자기부상열차에 적용되었던 모노블록 궤도시스템(Fig. 1a)은 현장에서 레일 높이를 조절한 후 그에 맞게 Plinth를 상부구조 위에 제작 양생한다. Plinth의 양생이 끝나면 그 위에 모노블록 침목을 시공하게 된다. 이와 같이 Plinth의 완성 후 궤도시스템을 시공하기 때문에 상부구조 시공과 궤도시스템 시공이 분리될 수밖에 없으며 Plinth가 양생되는 시간을 필요로 하게 된다.

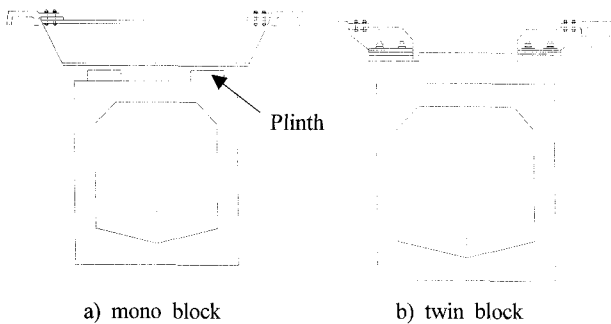


Fig. 1. track system

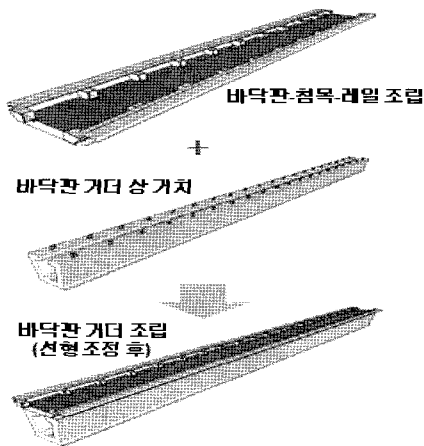


Fig. 2. Construction procedure of the proposed track system

반면 제안하는 트윈블록 궤도시스템(Fig. 1b)은 프리캐스트 바닥판과 일체로 조립되기 때문에 Fig. 2와 같이 프리

캐스트 콘크리트 바닥판에 미리 조립된 상태로 거더 위에 설치될 수 있어 공사기간을 단축시킬 수 있다.

또한, 바닥판과 일체 시공되므로 형고를 낮추어 상부구조의 경량화, 슬림화가 가능하고 Fig. 3과 같이 바닥판 상부의 공간을 확보함으로써 신호케이블 관로 등을 설치할 수 있고 유지보수를 위한 통로와 대피로 등으로 활용할 수 있는 이점을 가지고 있다.

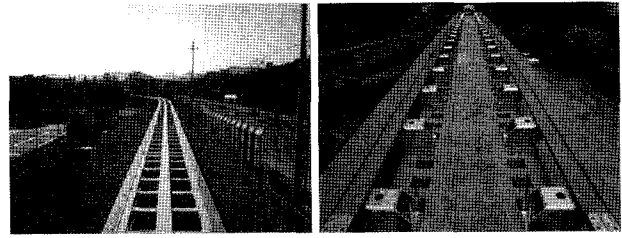


Fig. 3. Space above the plate for 2 types of track system

그러나 구조적인 면과 시공적인 면에서 몇 가지 추가로 검토해야 할 사항이 증가하는 단점이 있다. 구조적인 면에서는 Fig. 4와 같이 하중전달체계가 달라지면서 휨능력만으로 저항하는 모노블록과 달리 트윈블록은 휨능력뿐만 아니라 인장측 앵커볼트의 인발 성능 또한 검토되어야 한다. 시공적인 면에서는 레일의 궤간을 맞춰주는 과정이 추가로 필요하게 된다.

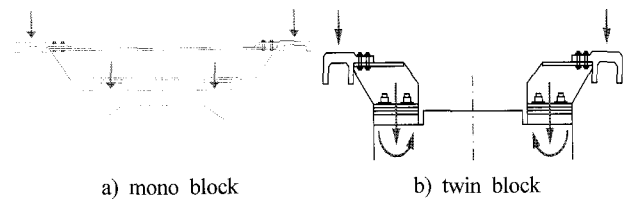


Fig. 4. Load transmission mechanism for 2 types of track system

Plinth로 높이 조절을 할 수 없는 트윈블록 궤도시스템은 Shim plate를 이용하여 높이조절을 하게 되는데 제안된 트윈블록 침목은 수평하중에 의해 앵커볼트의 휨피로파괴가 발생하는 않는 범위를 감안할 때 최대 38mm까지 높이 조절이 가능하다[3]. 곡선 완화구간에서 열차의 속도를 40 km/h라고 가정할 때 도시형 자기부상열차 건설규칙(안)[4]에서 제시한 최대 캔트변화량을 고려할 경우 10m 길이의 프리캐스트 바닥판 내에서 최대 높이 차이는 16.3mm이다. 따라서 기타 유지보수를 위해 필요한 조절 높이를 감안하더라도 제안된 트윈블록 침목의 높이 조절 능력이 충분하다고 할 수 있다[3]. 자기부상열차의 운용시 미세 높이 조절을 위해서는 Wedge plate가 사용된다. 높이 조절 후 Wedge plate가 미끄러져 내리는 것을 방지하기 위해 케이

스가 도입되었으며(Fig. 5 참조) 케이스 옆의 나사를 돌려 최대 ±2.0mm의 높이 조절이 가능하도록 하였다.

트윈블록 침목의 단면은 작업성과 각관 기성품의 수급상황을 고려하여 200×200×12 단면을 사용하였으며 궤도-거더 상호작용을 고려할 때 레일과 거더의 휨차이에 의해 침목에 비틀림 응력이 추가 발생하는 것을 고려하여 Fig. 5와 같이 전단격벽을 보강 적용하였다.

전단격벽 (Diaphragm)



Fig. 5. Twin block sleeper reinforced by diaphragm

3. 트윈블록 궤도시스템의 구조적 안정성 검토

3.1 유한요소해석

침목과 레일부분만을 모델링한 궤도시스템 해석 모델에서는 침목 하단이 고정단 경계조건을 갖기 때문에 침목은 연속보의 지점처럼 거동하게 되고 각 침목이 감당하는 하중을 수직하게 받는 것으로 해석된다. 따라서 Fig. 6과 같이 레일과 거더의 휨차이에 의해 발생할 수 있는 침목의 비틀림을 고려하지 못하게 된다. 이와 같이 실제 침목에 발생할 수 있는 하중상태를 고려하기 위해 이 연구에서는 Fig. 7과 같이 궤도시스템뿐만 아니라 상부구조를 함께 모델링 하였다.

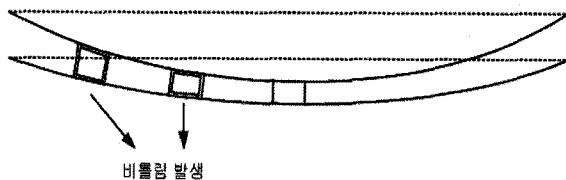


Fig. 6. Torsion induced by the flexural difference between girder and rail

시험노선에 적용된 설계를 고려하여 거더는 단순 지지된 25m 단경간으로 모델링하였으며, 침목 간격은 1.15m로 하였다. 레일은 12.5m씩 제작되는데 레일 연결부의 경계조건은 종방향으로 구속, 비구속으로 나누어 해석하였다. PSC U형 거더와, 침목, 레일은 판요소를 사용하였으며 프리캐스트 바닥판은 입체요소를 사용하였다. 해석시간을 고려하여 하중이 종방향 횡방향 모두 대칭이면 1/4모델을, 한쪽 방향으로만 대칭이면 1/2모델을 사용하였다. 사용한 하중

과 하중조합은 도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준(안)[5]에서 제시한 것을 사용하였으며 해석은 범용프로그램인 Midas Civil 2006(v. 7.0.1)을 사용하였다.

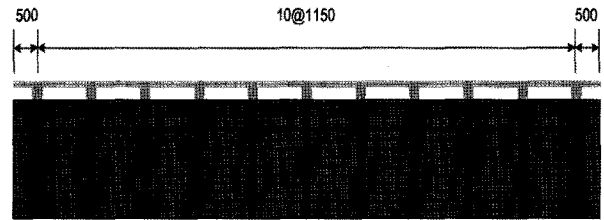


Fig. 7. FEM model considering girder-rail interaction

3.1.1 침목의 응력

Fig. 8은 자중, 활하중 작용시 최대 응력이 발생한 침목의 변형 형상과 침목 내 최대 응력의 발생위치를 나타낸 것이다. 변형 형상을 통해 침목이 비틀림을 받고 있다는 것을 알 수 있으며, 레일이 연결되는 부분을 전면이라고 할 때, 최대 응력은 상단 전면부 모서리에서 발생하는 것으로 나타났다.

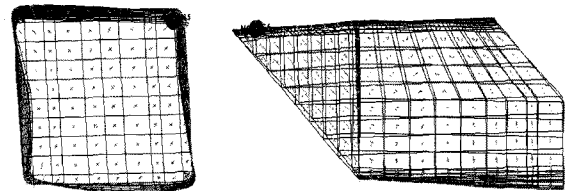


Fig. 8. Deformation shape and location of maximum stress

여러 하중조합에 대해 침목에 발생한 최대 응력을 Table 1에 허용응력과 함께 나타내었다. 여기서 허용응력은 하중조합에 따른 증가계수를 적용한 값이다. 레일 연결부의 경계조건에 따라 약간의 차이는 있으나 모든 하중조합에서

Table 1. Maximum and allowable stresses

하중조합	허용응력	침목 간격 1.15m	
		레일 연결부 비구속	레일 연결부 구속
자+활	140	-133.4	-134.9
자+활+원심	140	-136.8	-138.9
자+활+원심+차량횡	175	-155.2	-153.1
자+활+원심+풍	175	-152.8	-156.7
자+활+원심+풍+차량횡	189	-163.4	-149.3
자+활+원심+정상낙하	175	-150.5	-144.7
자+활+원심+최대낙하	210	-148.2	-144.1
자+활+원심+활주	175	-146.2	-141.5
자+활+시제동	175	-141.7	-142.5

단위 : MPa, (-) : 압축

허용응력을 만족하는 것을 확인할 수 있다. 허용응력 증가 계수가 큰 하중조합에서는 많은 여유가 있는 반면 허용응력 증가계수가 1인 자중 + 활하중 + 원심하중인 경우에는 여유가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 이 해석에서 사용한 원심하중은 설계기준의 최대 원심하중을 사용한 것이므로 실제로는 좀 더 여유가 있을 것으로 판단된다.

3.1.2 처짐

자기부상열차의 주행안정성에 큰 영향을 미치는 처짐에 대해 검토하였다. 처짐은 활하중(충격포함)에 대해서만 검토한다. Table 2는 레일만의 처짐, 침목의 변형을 포함한 처짐, 거더의 처짐을 포함한 경우를 각각 나타낸 것이다. 레일 연결부가 구속된 모델의 경우 비구속 모델보다 레일이나 레일 + 침목의 처짐은 크게 발생하였으나 거더까지 포함한 총 처짐에서는 오히려 작게 나타났다. 이는 거더의 처짐에 의해 거더 중앙으로 발생할 레일 변위가 종방향으로 구속되면서 레일이 압축측 철근과 같은 역할을 하면서 거더의 강성을 증가시킨 것으로 판단된다. 레일과 침목을 포함한 궤도부의 처짐은 0.5mm를 넘지 않으며 거더를 포함한 처짐 또한 도시형 자기부상철도 설계기준(안)[4]에서 제시하고 있는 처짐 기준 $L/2000$ (지간 길이 25m를 적용할 경우 12.5mm)을 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Deflection

	레일 연결부 비구속	레일 연결부 구속
레일	0.231	0.280
레일+침목	0.427	0.494
레일+침목+거더	6.449	5.418

단위 : mm

3.2 성능 시험

제한한 트윈블록 침목에 대한 성능검증을 위해 종방향과 수직방향에 대해 각각 정적하중 시험과 반복하중 시험을 수행하였다.

3.2.1 종방향 하중재하 시험

종방향 하중재하 시험은 Fig. 9와 같이 두 개의 침목을 1.15m 간격으로 배치하고 레일을 연결한 후 레일 한쪽 끝을 지그로 잡고 레일의 길이 방향으로 하중을 서서히 증가시키면서 수행하였다.

Fig. 10은 하중과 레일 변위를 나타낸 것인데 150kN까지 거의 선형거동을 보이는 것으로 보아 레일이나 침목이 탄성범위내에 있음을 알 수 있다. 초기에 약간의 비선형구간과

잔류변형이 남은 것은 볼트로 체결한 부분에서 유격만큼 밀리면서 생긴 것으로 판단된다. 종방향으로 작용하는 설계하중인 제동하중과 활주하중을 레일에 작용하는 집중하중으로 치환하였을 때 약 10.5kN 정도이며, 3.1의 거더와 레일의 상호작용을 고려한 유한요소해석에서 계산된 최대 수평력을 레일에 작용하는 집중하중으로 치환하였을 경우 약 50.7kN인 것을 감안하더라도 주어진 침목은 종방향 하중에 대해 충분한 안정성을 확보하고 있는 것을 알 수 있다.

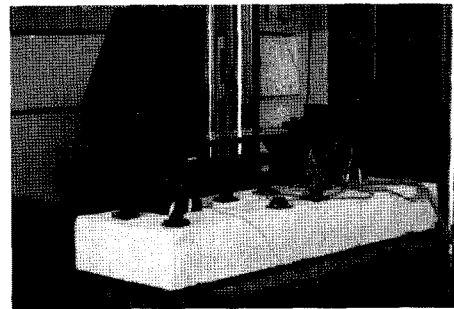


Fig. 9. longitudinal loading test

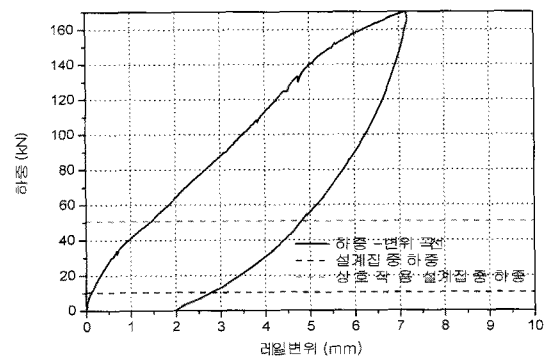


Fig. 10. Force-rail displacement relationship

Fig. 11은 하중과 계측된 변형률 중 가장 크게 나타난 전면부 하단의 침목 변형률을 나타낸 것이다. Fig 10에서의 결과와 마찬가지로 침목이 탄성범위 내에 있음을 알 수 있다.

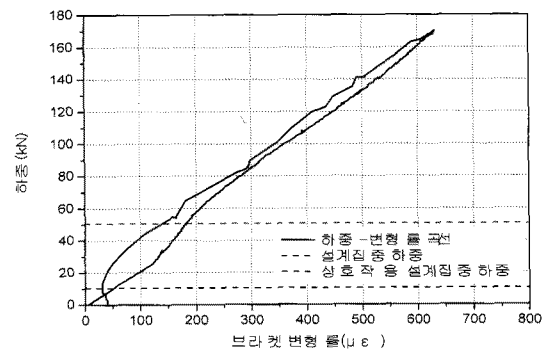


Fig. 11. Force-strain relationship

종방향 하중에 대한 침목의 피로강도를 검토하고자 200만회 이상의 반복하중 재하시험을 수행하였다. 재하 하중은 3.1의 유한요소 해석에서 활하중일 때 계산된 수평력을 집중하중으로 치환한 30kN을 사용하였다. Fig. 12는 하중을 각각 1, 100, 1만, 10만, 50만, 100만, 200만회 재하후 수행한 정적 하중재하 시험의 하중-침목 변형률 관계를 나타낸 것이다. 초기 곡선과 200만회후의 곡선이 거의 일치함으로 피로에 대해서도 충분한 안정성이 있음을 알 수 있다.

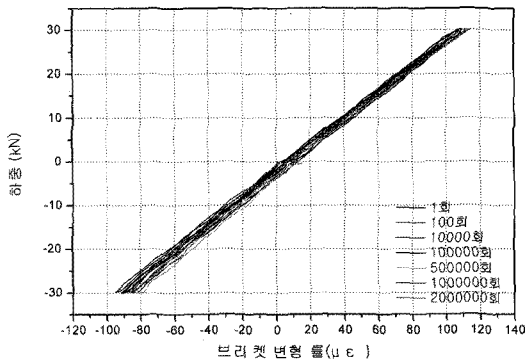


Fig. 12. Force-strain diagram after repeat loading test

3.2.2 수직방향 하중재하 시험

수직방향 하중에 대한 침목의 성능을 알아보기 위해 Fig. 13과 같이 1개의 침목이 부담하는 1.15m의 바닥판과 레일을 제작 조립한 후 종방향 시험과 마찬가지로 정적하중 시험과 반복하중 시험을 수행하였다. Fig. 14는 정적하중 재하시험에서 하중과 침목의 변형률 관계를 나타낸 그림이다. 60kN을 재하했을 때 탄성영역 내에서 거동하는 것을 알 수 있으며 120kN을 재하했을 때는 약 100kN 부근에서 탄성영역을 넘어가는 것을 알 수 있다. 침목 하나가 부담하는 수직방향 설계하중이 16.5kN이고 이상시 최대 낙하하중 또한 35kN이므로 수직방향 역시 충분한 안정성을 가지고 있다고 판단된다.

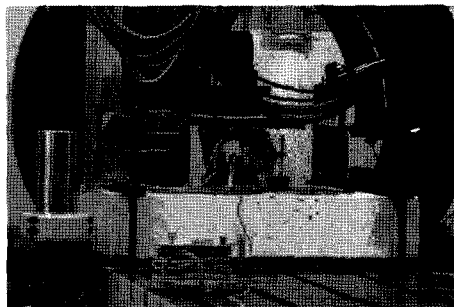


Fig. 13. Vertical loading test

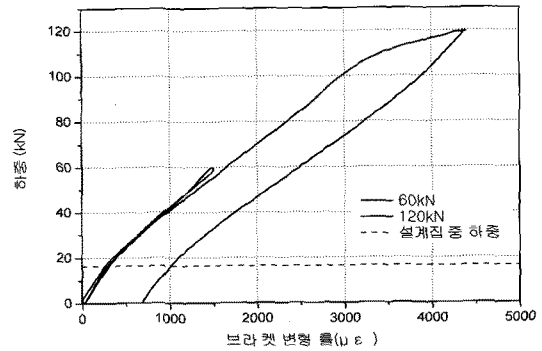


Fig. 14. Force-strain relationship

피로검토를 위해 만차일 때 활하중으로 구한 수직방향 설계하중 16.5kN을 200만회 반복 재하하였으며 일정 횟수 반복재하 후 수행한 정적하중 시험의 결과를 비교하였다. Fig. 15는 하중과 레일 변위를 나타낸 것인데 초기 시험체가 자리를 잡기 위해 잔류변형이 남은 1회를 제외하고 모두 비슷한 거동을 보임으로써 수직방향 하중에 대한 피로 성능 또한 우수함을 확인하였다.

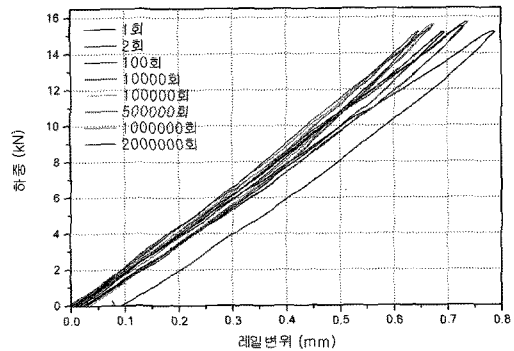


Fig. 15. Force-rail displacement diagram after repeat loading test

4. 트윈블록 궤도시스템의 시공성 검토

목업 시험체에 대한 모의시공시험[6]과 기계연구원 시험선 시공을 통해 트윈블록 궤도시스템에 대한 시공성을 검토하였다. 검토결과 궤간 조정을 용이하게 하기위해 궤간 자 등이 필요하며 앵커볼트의 조립 시 숙련도가 필요한 것으로 나타났다. 숙련도 없이 앵커볼트 체결을 보다 쉽게 하기 위해서는 사전에 바닥판에 앵커볼트를 매립하고 제작오차 보정이 가능하도록 침목의 앵커볼트 구멍을 장공으로 하는 방안이 검토될 수 있다. 그러나 시공이 거듭될수록 숙련도가 높아지므로 Plinth의 양생기간을 기다려야 하는 기존의 모노블록 침목에 비해서는 빠른 시공이 가능할 것으로 판단된다.

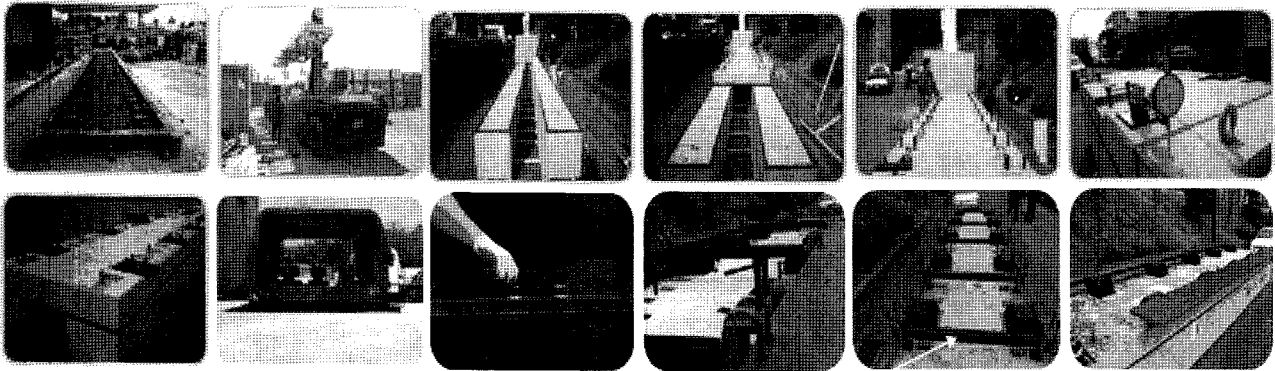


Fig. 16. construction simulation test of proposed track system

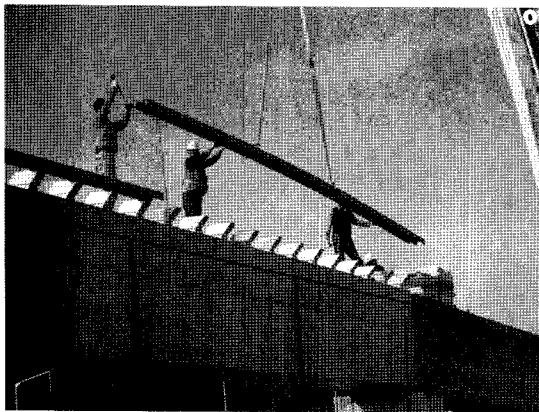


Fig. 17. construction in test bed(KIMM)

5. 결론

이 연구에서는 경량화, 슬림화 및 시공기간 단축에 초점을 두고 프리캐스트 바닥판과 일체 시공이 가능한 트윈 블록 궤도시스템을 개발하였다. 개발된 궤도시스템은 바닥판 위의 공간을 신호케이블 관로, 유지보수를 위한 통로나 대피로 등으로 활용할 수 있는 이점까지 가지고 있다. 거더 레일 상호작용을 고려한 유한요소 해석과 종방향/수직방향 정적하중 재하시험과 반복하중 재하시험을 통해 개발된 궤도시스템이 충분한 구조적 안정성을 가지고 있음을 확인하였다. 또한 모의시공시험과 기계연구원 시험선 시공을 통해 개발된 궤도시스템의 시공성을 검토한 결과, 궤간조정이나 앵커볼트 체결에서 숙련도를 필요로 하나 숙련도가 쌓이면 빠른 시공이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 도시형 자기부상열차 실용화 사업단을 통한 국토해양부와 한국철도기술연구원 기본과제의 연구지원에 의해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Chubu HSST maglev system evaluation and adaptability for US urban maglev, FTA report, FTA-MD-26-7029-03.8, Federal Transit Administration, 2004.
2. 도시형 자기부상열차 실용화 사업단(2007), 선로구축물 성능개선 열차실적보고서.
3. 장승엽, 최일윤, 여인호(2007), "도시형 자기부상열차를 위한 새로운 레일지지부의 설계," 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 1312-1317.
4. 도시형 자기부상열차 실용화 사업단(2007), 도시형 자기부상열차 건설규칙(안).
5. 도시형 자기부상열차 실용화 사업단(2008), 도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준(안).
6. 진병무, 김인규, 김영진, 여인호, 정원석(2008), "자기부상열차 가이드웨이 거더의 실험적 연구," 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 44-53.

접수일(2009년 9월 7일), 수정일(2009년 10월 1일),
 게재확정일(2009년 10월 13일)