

자기부상열차 가이드웨이 거더의 실험적 연구:
PSC-U 형 거더와 프리캐스트 바닥판의 합성 시스템
Experimental Study on the the Maglev Train Guideway Girder :
Composite System with PSC-U Type Girder and Precast Deck

진병무* 김인규** 김영진*** 여인호**** 정원석*****
Jin, Byeong Moo Kim, In Gyu Kim, Young Jin Yeo, In Ho Chung, Won Seok

ABSTRACT

Maglev is a system that a train runs levitated above a rail. Therefore it is very important to maintain a constant levitation gap for achieving serviceability and ride comfort. This study is a cooperation research subject of the 3-1 subject, performance improvement of maglev track structures, of the Center for Urban Maglev Program in Korea, started in 2006. The aim of this study is development of rapid constructions of bridge superstructure for maglev. At present, precast deck is widely used because of its superiority to cast-in-place concrete on quality and the term of works. The research group suggested basic systems of maglev guideway with PSC-U type and trapezoidal open steel box type girder, and precast deck, cooperating with Korea Railroad Research Institute, the managing institute of the 3-1 subject. In this study, longitudinally full-scale guideway girder system was fabricated and static/dynamic test of the girder was performed for the purpose of the performance evaluation.

1. 서 론

자기부상열차는 궤도 위에 부상하여 운행하는 시스템이다. 자기부상열차의 특성상 주행 중 부상공극을 일정하게 유지하는 것이 사용성 및 승객의 승차감 면에서 매우 중요하다. 이 연구는 2006년 출범한 도시형 자기부상열차 실용화 사업단의 3-1 세부과제 선로구축물 성능개선 과제의 협동연구과제로 자기부상열차교량 상부구조의 급속시공법 개발을 목표로 연구를 수행하였다. 현재 도로교에서 프리캐스트 바닥판은 품질, 공기 면에서 현장타설 바닥판에 비해 우수하며, 널리 사용되고 있다. 따라서, 연구진은 3-1세부과제의 주관기관인 한국철도기술연구원과 협업을 통하여 1차년도에 PSC-U형 거더 및 개구제형 강재 거더에 프리캐스트 바닥판을 적용하여 자기부상열차 가이드웨이의 기본 시스템을 제안한 바 있다. 이 연구에서는 제안된 가이드웨이의 성능검증을 목적으로, 종방향으로 실험대형 크기의 가이드웨이 거더 시스템을 제작하였고, 거더 시스템의 정·동적 실험을 수행하였다.

2. 가이드웨이 거더(PSC-U형 거더와 프리캐스트 바닥판 합성 시스템)의 단면 제안

도시형 자기부상열차 실용화 사업단의 3-1세부과제에서는 선로구축물의 성능향상을 위하여 그림 1 및 그림 2에 나타난 형상과 같은 가이드웨이 거더를 사업단에 제안하였다. 제안된 형식의 가이드웨이 거더는 차량 활하중에 대한 교량처짐한계 및 수직/수평 단차 등을 만족하며, 사업단의 실용화 목표인 선로구

* (주) 대우건설, 토목연구팀, 책임연구원, 비회원

E-mail : jinbm@dwconst.co.kr TEL : (031) 250-1190

FAX : (031) 250-1131

** (주) 대우건설, 토목연구팀, 책임연구원, 비회원

*** (주) 대우건설, 토목연구팀, 수석연구원, 비회원

**** 한국철도기술연구원, 궤도구조연구팀, 정회원

축물의 슬립화, 급속시공, 그리고 경제성을 만족하도록 단면을 결정하였다. 표 1에는 교량처짐한계 (L/1,500~L/4,000)와 지간(25m 및 30m)에 대해 구조최적화 과정을 통하여 결정된 최적 단면을 나타내었다.

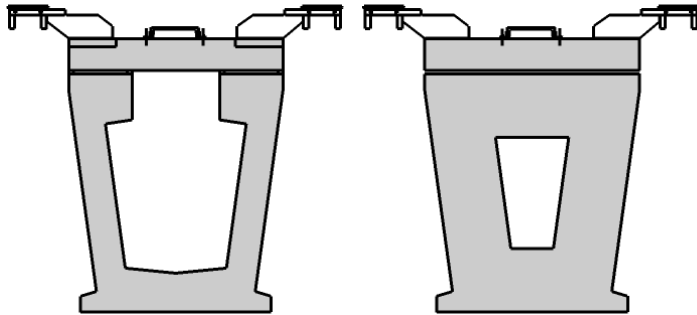


그림 1 제안된 자기부상열차 가이드웨이 단면 형상

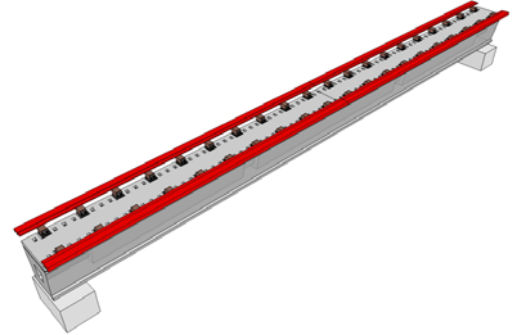


그림 2 제안된 자기부상열차 상부구조

표 1. 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 플렌지 두께 T _{fb} (mm)	200	223	214	206	201	234	208	229
상부 플렌지 두께 T _{ft} (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

3. 가이드웨이 거더의 요소실험 및 모의시공실험

그림 1과 보인 바와 같이 가이드웨이는 크게 3부분으로 구성된다. PSC-U형 거더와 프리캐스트 바닥판 및 가이드레일부로 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. 또한 거더-바닥판-레일 체결구조는 그 구조적 성능 외에 시공의 원활함 등 시공적 측면도 매우 중요하다고 할 수 있다. 여기에서는 프리캐스트 바닥판과 궤도레일의 체결부의 구조성능 측면을 다룬 요소실험과 거더-바닥판-레일 체결구조의 시공성 측면에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

3.1 프리캐스트 바닥판-궤도레일 요소 실험체

그림 1에 보인 궤도레일 시스템은 단침목 형태로, 한국철도기술연구원에서 기존 침목형태의 레일체결 구조가 아닌 새로운 형식의 가이드레일 시스템으로 제안하였는데, 이 가이드레일 시스템과 프리캐스트 바닥판의 체결구조의 구조안전성을 검증하고자 하는 것이 요소 실험체의 주된 목적이다.

그림 3에 보인 바와 같이 제안된 가이드웨이는 PSC-U형 거더와 프리캐스트 바닥판의 합성구조로 가이드웨이 거더를 이루고 있으며, 프리캐스트 바닥판과 우각 형식의 단침목으로 구성된 레일체결구조를 갖는다. 따라서 이 연구에서는 단위 길이에 대한 거더-프리캐스트 바닥판-레일의 요소실험체를 그림 3에 보인 바와 같이 앵커의 종류 및 매설형태에 따라 총 9기 제작하였다. 각 실험체에 대해 좌우측의 바닥판-레일 체결부의 구조성능 실험을 수행하였다. 자기부상열차의 설계 활하중은 약 23kN/m로 PSC 거더교의 경우 충격계수를 0.1로 고려하여 요소실험체 길이에 대한 등가집중하중(16kN)을 결정하였다. 실험방법은 수직하중을 10, 20, 40, 80 및 100kN 순으로 재하 및 제거를 하였으며, 100kN 이후 파괴 때까지 하중을 재하하는 방법으로 실험을 수행하였다.

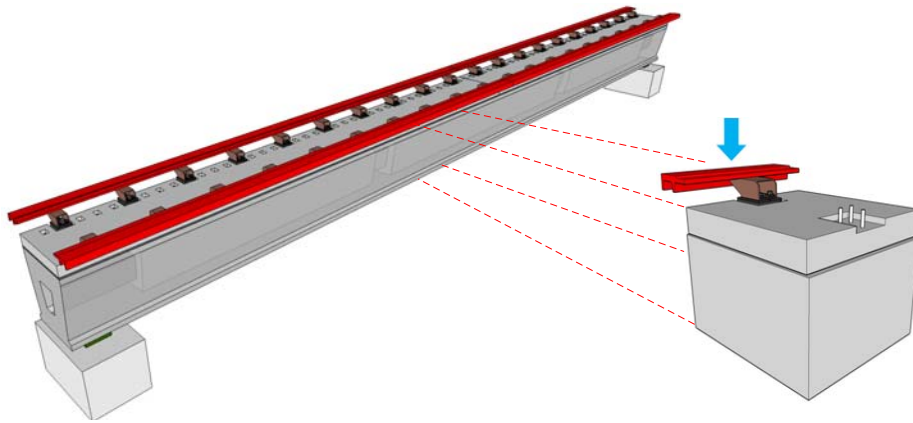


그림 3. 제안된 가이드웨이 형상과 가이드웨이 거더-바닥판-레일 요소실험체

제안된 프리캐스트 바닥판-레일 체결구조는 전반적으로 실험변수에 따른 최대 내력의 차이는 없으므로 나타났다. 하중 증가에 따른 균열의 발생은 휨, 압축 및 전단이 복합적으로 작용한 것으로 판단되며 실험체의 지지조건 및 실험체 강도에 따라 다소 차이가 있는 것으로 판단된다. 그림 4에 보인 것과 같이 프리캐스트 바닥판-레일 체결구조의 극한 내력은 설계 활하중의 8-10배 정도로 제안한 프리캐스트 바닥판-레일 체결구조의 구조적 안전성이 있음을 확인하였다.

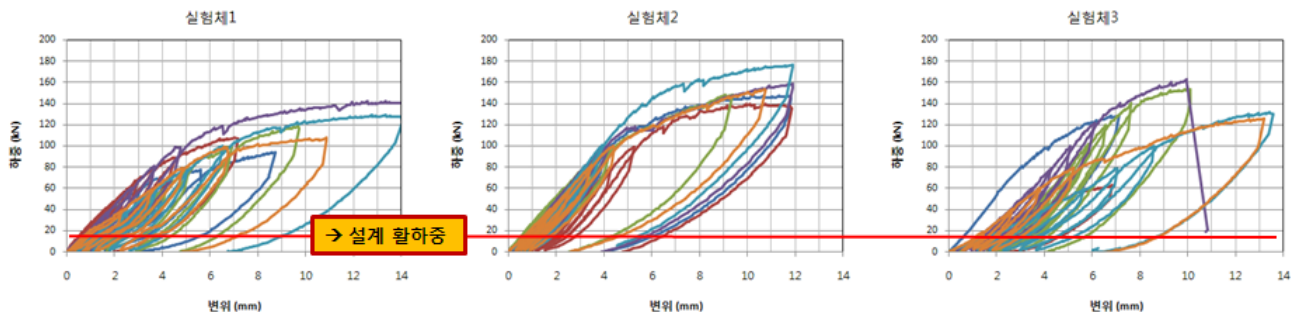


그림 4. 프리캐스트 바닥판-레일 체결구조 실험체의 하중-변위 곡선

3.2 PSC U형 거더-프리캐스트 바닥판-궤도레일 시스템의 모의 시공 실험

그림 5에는 목업실험체의 개념도를 도시하였다. 목업실험체는 크게 거더부와 2조의 프리캐스트 바닥판 그리고 가이드레일 연결부로 구성되었다. 거더는 15m 길이로 PSC-U형 거더의 플랜지부분을 모사하며, 바닥판은 12.5m와 2.5m의 길이이다. 그림 6에 보인 목업실험체는 거더 거치부부터 바닥판 거치 및 궤

도레일 침목부의 설치까지 과정이 약 4시간에 이루어졌다. 실제 가이드웨이 거더 시공시에는 2거더/1일 이상의 시공이 가능하리라 판단된다. 그림 7과 같이 가이드레일의 선형조정을 위해 프리캐스트 바닥판의 높이 조정능력은 레벨링 볼트 1회전에 대해 1mm의 높이를 조정할 수 있음을 확인하였다. 궤도레일의 교축방향, 교축직각방향 및 수직방향의 미세조정은 한국철도기술연구원에서 제안한 우각형태의 침목부에서 이루어진다. 따라서 프리캐스트 바닥판을 적용한 가이드웨이 거더 시스템이 가이드레일의 수직방향의 1차 선형 조정에 있어 매우 뛰어난 정밀성과 시공성을 갖고 있는 것으로 판단한다.

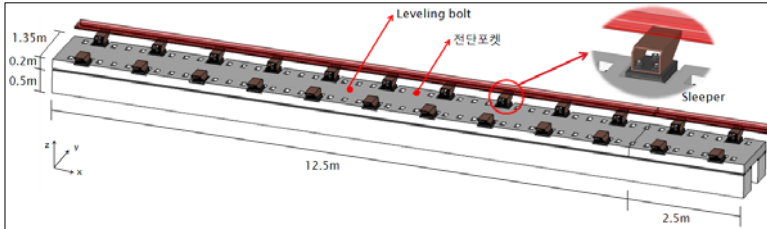


그림 5. 목업실험체 개념도



그림 6. 목업실험체 전경



그림 7. 프리캐스트 바닥판의 높이 조정 (1mm/레벨링볼트1회전)

4. 실대형 가이드웨이 구조실험체 제작 및 실험

3절은 제안된 PSC-U형 거더와 프리캐스트 바닥판 시스템의 자기부상열차 가이드웨이 거더의 요소실험 및 목업실험체의 모의 시공 실험에 대하여 다루었다. 여기에서는 실대형 크기로 가이드웨이를 제작하고 그 성능을 평가하여 가이드웨이 거더의 제작성과 시공성 및 구조성능을 평가하고자 한다. 그림 8 ~ 그림 11은 2절에서 보인 최적단면으로부터 구조실험동 여건에 따라 교축방향의 거더 길이를 제한한 실대형 가이드웨이 거더의 설계도면을 나타낸 것이다.

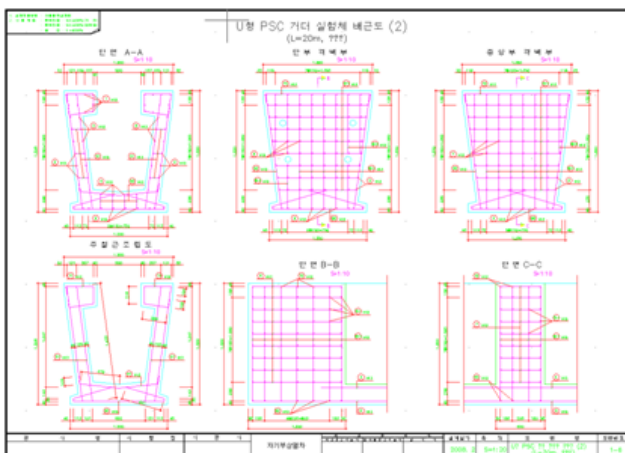


그림 8. PSC-U형 실험체 배근도

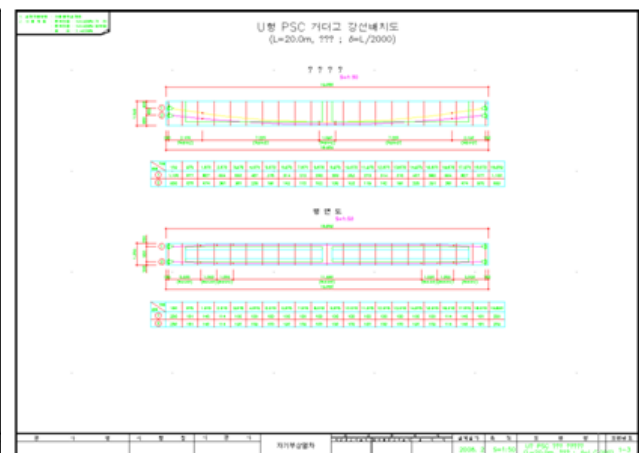


그림 9. PSC-U형 거더 강선 배치도

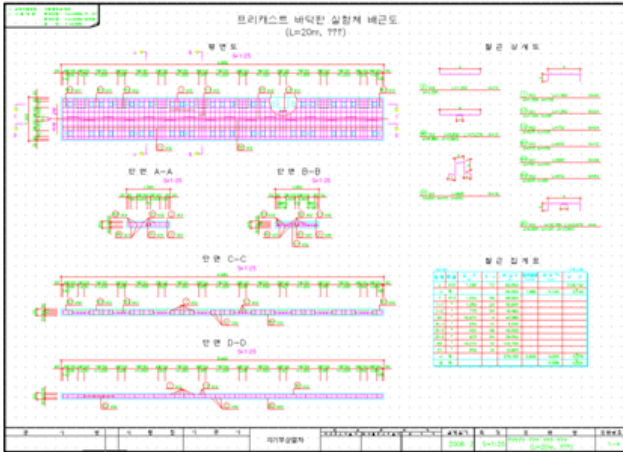


그림 10. 프리캐스트 바닥판 실험체 배근도

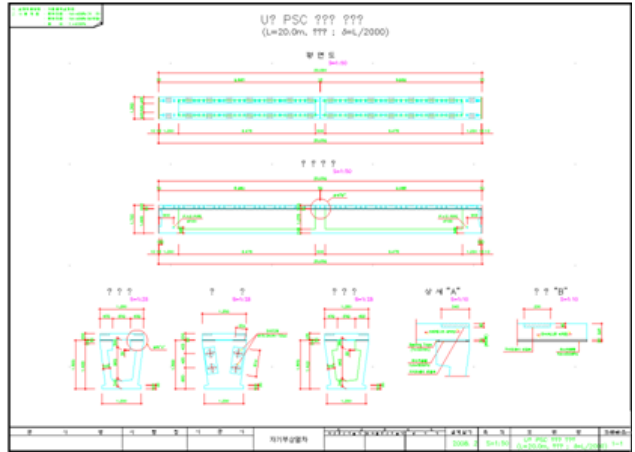


그림 11. PSC-U형 거더 실험체 일반도

4.1 제작 및 설치

그림 12부터 그림 31까지는 PSC-U형 거더의 제작, 프리캐스트 바닥판의 운반 및 거치 등 일반적인 PSC 거더와 프리캐스트 바닥판 합성 시스템의 공정을 보였다. 자기부상열차 가이드웨이 거더와 밀접한 관련이 있는 공정은 그림 17의 전단 스톱드 설치와 그림 25~그림 27의 프리캐스트 바닥판의 거치 및 레벨링 조정이라고 할 수 있다. 거더와 프리캐스트 바닥판의 합성은 이번 실험체의 경우처럼 교각 위에 거치 전 이루어지거나, 또는 현장여건에 따라 교각 거치 후에 이루어질 수도 있다.



그림 12. 철근 배근



그림 13. 쉬스판 설치



그림 14. 내부 거푸집 설치



그림 15. PSC-U형 거더 철근 및 거푸집 전경



그림 16. 거푸집 완성



그림 17. 전단스터드 설치



그림 18. 콘크리트 타설



그림 19. 증기 양생



그림 20. 거푸집 탈형



그림 21. 강연선 삽입



그림 22. 긴장전 거더 전경



그림 23. 강연선 긴장



그림 24. 프리캐스트 바닥판 운반



그림 25. 프리캐스트 바닥판 거치



그림 26. 합성 전 레벨링 조정



그림 27. 무수축 모르타르 충전 (합성)



그림 28. 거더 시스템 인양



그림 29. 거더 시스템 운반



그림 30. 거더 시스템 현장 운반



그림 31. 거더 시스템 거치

4.2 제작성 · 시공성 분석

실대형 자기부상열차 가이드웨이의 제작 및 시공에서 몇 가지 검토 및 보완할 사항을 정리하면 다음과 같다.

- ① 거더 하부 플랜지의 돌출부의 크기가 10cm 내외이므로, 철근 배근의 어려움이 있다. 따라서 이러한 돌출부를 없애거나 또는 돌출부의 크기를 적어도 20cm로 하는 것이 제작성이 높을 수 있다고 판단된다.
- ② 거더 웹 부분의 두께가 20cm로 쉬스판 배치 및 내측 및 외측의 주철근을 배근하는 경우, 단면의 두께가 콘크리트 타설이 잘 되지 않을 염려가 있다. 따라서 거더 웹 두께를 적어도 25cm 이상으로 하는 것이 원활한 콘크리트 타설에 유리할 것으로 생각된다.
- ③ 전단스터드는 프리캐스트 바닥판과 거더의 합성을 위한 필수 장치로 반드시 필요하다. 또한 프리캐스트 바닥판과 원활한 합성 시공을 위해서는 전단스터드의 간격이 프리캐스트 바닥판에 있는 전단 포켓과 그 위치와 일치하도록 거더 · 프리캐스트 바닥판의 설계 및 제작 중 주의를 기울일 필요가 있다.
- ④ PSC 거더의 특징상 거더 사하중에 의한 처짐과 텐던 긴장력에 의한 솟음이 이상적일 경우는 드물다. 따라서 프리캐스트 바닥판 설치 시 거더 솟음을 충분히 고려하여 베딩층의 두께를 설정하여야 한다. 프리캐스트 바닥판이 유효한 합성단면으로 작용하기 위해서는 이 베딩층의 두께가 40mm 이내여야 하며, 이 값을 넘는 경우 변단면 형식으로 프리캐스트 바닥판을 제작할 것을 권한다.
- ⑤ 거더 인양시 거더 단부에 강봉을 삽입하여 인양하였으며, 강봉 삽입구에서 국부적인 콘크리트 압쇄가 발생하였다. 실제 가이드웨이 거더의 인양에서는 적절한 인양방법을 강구하여야 할 것으로 판단된다.
- ⑥ 거더 내부 하부 플랜지의 경사는 원활한 시공을 위해서 수평으로 할 것을 제안한다.

5. 가이드웨이 거더 실대형 구조실험체 정 · 동적 성능 평가 실험

5.1 실험 방법

그림 32와 그림 33에는 동적 실험 및 정적 실험의 전경을 나타내었다. 동적 실험은 가이드웨이 거더 중앙 상부에 가진기를 설치하여 강제진동실험을 수행하였다. 정적 실험의 경우, 거더 중앙에서 1m 씩 떨어진 위치에 가력기를 설치하고 정적실험을 수행하였다.



그림 32. 동적 실험 전경



그림 33. 정적 실험 전경

실험은 먼저 가이드웨이 거더 시스템의 동적 특성을 먼저 파악하는 동적실험을 수행한 후, 균열하중까지 정적실험을 수행하였다. 이 후 균열이 발생한 자기부상열차 거더 시스템의 동적특성을 다시 파악한 후 파괴실험을 수행하는 것으로 하였다. 실험 순서를 다시 정리하면 다음과 같다.

- ① 1차 동적실험 : 균열하중 이전 동적 특성 파악
- ② 1차 정적실험 : 균열하중까지 정적 실험

- ③ 2차 동적실험 : 균열하중 이후 동적 특성 파악
- ④ 2차 정적실험 : 파괴하중까지 정적 실험

5.2 실험 결과

그림 33은 하중-변위 곡선을 나타내었다. 제안된 자기부상열차 가이드웨이 거더의 실대형 구조실험체는 대체적으로 1250kN까지 선형거동을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 균열하중은 대략 1500kN 이상으로 판단되며, 최대내력은 3250kN 이상인 것으로 판단된다. 균열 전후 시스템의 변화는 대략 0.2 Hz 정도인 것으로 나타내었다(표 2). 자기부상열차의 활하중이 등가집중하중 개념으로 약 600kN 정도임을 감안하면, 활하중 상태에서 제안된 자기부상열차 가이드웨이 거더 시스템은 매우 건전한 구조 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

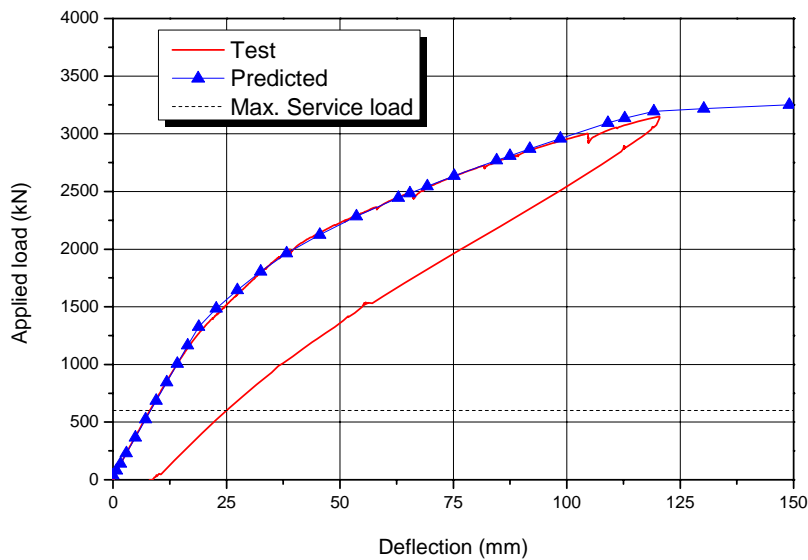


그림 33. 하중-변위 곡선

표 2. 균열 전후의 고유진동수

구 분	고유진동수 (Hz)
균열 전	8.0
균열 후	7.8

6. 결론 및 맺음말

도시형 자기부상열차 사업단 3-1세부 선로구축물 성능개선 과제의 협동과제로 본 연구에서는 제안된 자기부상열차 가이드웨이 시스템의 시공성, 제작성, 구조안전성 등의 여러 면에서 실험적 연구를 수행하였다. 제안된 자기부상열차 가이드웨이 거더 시스템은 PSC-U형 거더와 프리캐스트 바닥판을 적용한 것으로 프리캐스트 바닥판과 궤도레일 체결부의 구조 성능 검증에 위한 ①바닥판-궤도레일 체결부 요소실험을 수행하였다. 또한 거더-바닥판-궤도레일로 이루어지는 가이드웨이 시스템의 시공성 검증을 위하여 목업 실험체를 제작, ②모의시공실험을 통하여 시공성을 검증하였다. 마지막으로 거더-바닥판 시스템으로 이루어진 자기부상열차 ③가이드웨이 거더의 정동적 실험을 수행하여 제안된 PSC-U형 거더 및 프리캐스트 바닥판 시스템이 충분한 구조 안전성을 확보하고 있음을 확인하였다.

제안된 PSC-U형 거더 및 프리캐스트 바닥판 시스템은 몇 가지 제작성 및 시공성 측면에서 개선 또는 보완을 한다면, 도시형 자기부상열차교량 상부구조물(가이드웨이)의 급속시공 및 정밀시공에 매우 적

합한 가이드웨이 안이라고 판단한다.

감사의 글

이 연구는 도시형 자기부상열차 실용화 사업단의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 도시형 자기부상열차 실용화 사업단, <http://www.maglev.re.kr>
2. 진병무, 김인규, 김영진(2007), "PSC-형식 자기부상열차교량 상부구조의 단면 제안", 2007년 대한토목학회 학술발표회.
3. Jin, B.M., Kim, I.G., Kim Y.J., Yeo I.H., Chung, W.S., Moon, J.S. (2007), "Proposal of Maglev Guideway Girder by Structural Optimization: Civil Works of Center for Urban Maglev Program in Korea," International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2007, Seoull, Korea, 2007.
4. 진병무, 김인규, 김영진, 오현철, 마향욱, 이윤석(2008), "프리캐스트 바닥판의 자기부상열차 가이드웨이 시스템 적용성 평가 : 모의 시공 실험", 2008년 한국콘크리트학회 춘계학술발표회.
5. 진병무, 김인규, 김영진, 이윤석, 마향욱, 오현철(2008), "프리캐스트 바닥판의 자기부상열차 가이드웨이 시스템 적용성 평가 : 정적 성능 실험", 2008년 한국콘크리트학회 춘계학술발표회.