

방진궤도시스템 적용에 따른 강철도 무도상 판형교의 거동 분석

A Behavior Analysis of Railway Steel Plate Girder Bridge in the Applying Resilient Panel Track System

박용걸[†] · 최정열* · 엄 맥** · 강덕만***

Yong-Gul Park · Jung-Youl Choi · Mac Eom · Duk-Man Kang

Abstract

The major objective of this study is to investigate the effects and application of improvement for railway steel plate girder bridge by resilient panel track system. It analyzed the mechanical behaviors of steel plate girder bridge with applying resilient panel track system on the finite element analysis and laboratory test for static & dynamic characteristics. As a result, the improvement of steel plate girder bridge with resilient panel track systems are obviously effective for the static & dynamic response which is non-ballast steel plate girder bridge. The analytical and experimental study are carried out to investigate resilient panel track system decrease vertical acceleration and deflection on steel plate girder bridge for serviceability. And the resilient panel track system reduced dynamic maximum displacements (about 59%) and stresses (about 82%), the increase of dynamic safety is predicted by adopting resilient panel track system. From the dynamic test results of steel plate girder bridge, it is investigated that vertical acceleration and deflection is very low with applying resilient panel track system. The servicing steel plate girder bridge with resilient panel track system has need of the reasonable improvement measures which could be reducing the effect of static and dynamic behavior that degradation phenomenon of structure by an unusual response characteristic and a drop durability.

Keywords : Railway steel plate girder bridge(강철도 판형교), Resilient panel track system(방진궤도시스템), Static & Dynamic response(정적 & 동적 응답)

1. 서론

기존선의 선로구조물 대부분은 준공된지 상당한 시일이 경과되어 노후된 상태이며 특히 기존 철도교량 중 판형교는 상당수가 이미 40~60년 이상 경과된 노후교량이며 80년대 중반 이후 새마을호의 속도향상에 대응하는 동적 안정성을 확보하지 못한 상태라 할 수 있다. 최근 산업사회의 발달에 따라 기존선은 점차 고속화, 고밀화 되고 있어 준공 당시의 설계조건과 다른 하중조건 및 환경조건 때문에 열차운행 상의

안전 확보에 많은 문제점을 내포하고 있어 이러한 상황에 대한 적절한 대처가 필요한 실정이다.

뿐만 아니라, 기존 연구결과 국내 부설된 강철도 교량의 전체교량연장 대비 판형교형식의 비율이 약 46.6%로 나타남으로써 실질적으로 판형교의 선로점유 비율이 단일형식 교량으로서는 매우 높은 것으로 분석되었다. 따라서 기존선 강철도 판형교에 대한 적절한 유지관리 및 보수, 보강기술의 개발이 매우 시급함을 알 수 있다.

이에 본 연구에서는 기존선 성능개선을 위한 기존 강철도 무도상 판형교의 유도상화 연구에서 대두된 사하중 증가를 개선하고 장기적인 사용성과 내구성을 확보할 수 있는 궤도시스템을 개발하는데 주안점을 두었다. 본 방진궤도시스템의 적용으로 노후된 강철도 무도상 판형교의 거더 부담력을 경감시키고 유지보수비용 절감과 고속열차주행에 따른 동적 안정성의 확보가 가능할 것으로 판단된다.

† 책임저자 : 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사
E-mail : ygpark@snu.ac.kr
TEL : (02)970-6890 FAX : (02)978-6575

* 정희원, (주) 대한 컨설팅 철도부 궤도팀 사원, 공학석사

** 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 석사과정

*** 정희원, (주) 삼보기술단 구조부, 공학석사

2. 강철도 판형교의 주요 손상현황 및 구조적 거동특성

기존 연구결과 강철도 무도상 판형교의 주요 손상은 경간 길이 및 열차하중의 축배치, 운행속도 등과 밀접한 연관이 있는 것으로 분석되었으며, 이러한 손상의 주된 원인은 수직보 강재 및 브레이싱 연결부의 응력집중과 과도한 진동(수직·횡비틀림)에 의한 피로균열에 있다고 분석되었다. 강철도 판형교는 상로 및 하로 판형교로 구분할 수 있으며 특히 상로 판형교의 경우 도상이 없이 침목고정용 호크볼트에 의해 교량용 목침목이 강거더에 직결되는 형태로써 유도상 교량과 달리 열차주행 하중이 교량 상부구조에 직접 전달되는 특성을 가지고 있어 교량에 가해지는 충격이 크다. 또한 상부구조의 중량이 차량하중에 비해 상대적으로 작아 차량의 종류 및 주행 특성에 따라 복잡한 진동특성을 나타내며 이에따라 양측 거더를 연결하는 부부재의 피로손상발생 빈도가 높다. 이러한 무도상 판형교의 구조적 특성에 의해 열차주행에 따른 교량의 동적 안정성을 확보하기에 많은 어려움이 있다. 또한 무도상 판형교는 열차가 통과하는 동안 발생하는 연직 및 횡방향 변형과 진동에 의해 소음과 손상이 가중되게 된다.

3. 기존 궤도구조의 문제점 및 궤도시스템 개량의 필요성

3.1 기존 궤도시스템의 문제점

1) 장기사용시 충격흡수력 저하

무도상 궤도구조는 빈번한 열차운행시 충격으로 레일 및 거더의 손상을 초래한다.

이 경우 궤도에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 궤도자재 손상 및 훼손 증가(레일균열, 침목파손)
- 승차감 저하 및 궤도 보수주기 단축
- 소음, 진동 증가로 환경보전저해 및 민원발생 우려
- 구조물 수명 단축 및 차량 고장원인 제공 우려

2) 주기적인 궤도자재 교체작업 필요

장기사용으로 인해 레일체결을 위한 나사스파이크 및 타이플레이트를 비롯한 목침목의 파손이 발생하였을 경우에는 이를 교체하지 않으면 안된다.

3) 유지보수 노력 과다

무도상 궤도구조는 교량용 목침목이 대부분의 열차하중을 하부 구조로 전달하는 역할을 수행함에 따라 거더와의 접촉

부 파손을 초래하게 되며 이에 따라 거더와 궤도간의 유간이 발생하게 된다. 따라서 목침목과 거더사이의 유간축소를 위한 별도의 보수노력이 필요하며 과도한 유간발생시 궤도틀림을 유발할 수 있는 구조로써 정상적인 선로유지를 위해 많은 유지보수 노력이 필요하다.

보통 무도상 궤도의 보수작업에서 50~60%는 타이플레이트 교체 및 목침목 보수, 교체작업이 차지하게 되며, 이와 아울러 궤도자재의 수명단축으로 인한 사업량 및 자재보수작업 증가 등을 고려할 때 더 많은 유지보수노력이 소요됨을 예상할 수 있다.

4) 궤도 절연성 저하

무도상 궤도는 도상이 없어 우천시 거더 및 궤도가 빗물에 직접적으로 노출되게 되며 이때 레일전류가 강재로 제작된 판형교의 거더로 누설되어 궤도절연성이 저하됨으로써, 강거더의 전식 촉진 및 부식으로 인한 수명단축, 궤도 자재 전식 촉진 및 전기손실이 크게 된다.

3.2 궤도시스템 개량의 필요성

본 연구에서 제시하는 궤도시스템 개량이라는 것은 기존의 무도상을 자갈도상이 아닌 생력화된 궤도구조로써의 콘크리트 슬래브 판넬식 방진궤도시스템을 의미하며 무도상 및 자갈도상 궤도구조에 비해 충분한 횡저항력 및 종저항력을 확보할 수 있어 장대레일 궤도의 좌굴안정성 확보에 유리하다. 이러한 콘크리트 슬래브 궤도구조는 궤도 안전성의 증가로 승차감이 향상되고 궤도 변형이 적어 선형 유지가 좋으며 콘크리트 도상에 별도의 방진대책으로 진동흡수력이 증가될 뿐만 아니라 반영구적인 궤도시스템으로써 유지보수 투입주기가 길어져 궤도 유지보수 인력 및 비용이 절감된다. 또한 도상배수로 설치로 배수가 원활하며 궤도절연성이 향상되어 강구조부재의 부식발생 저감에 효과적이다.

3.3 궤도시스템 및 레일체결시스템 검토

궤도구조시스템의 선정에 있어 운행선은 건설선과 달리 궤도구조의 형상에 따라 시공성에서 많은 차이가 있기 때문에 짧은 시간대에 모든 공종을 마무리해야 하는 특수성을 고려하여 국내외에서 성능이 검증되고 소음진동에 유리하며 안정성, 시공성, 환경성, 유지관리성 및 경제성 측면에서 우수한 궤도구조를 선정하고자 하였다. 이에 궤간조정 및 체결시스템의 성능과 절연성이 우수하며 시공작업 조건이 간단한 국내외 부설실적이 많은 궤도시스템을 선정하였다. 콘크리트 슬래브 판넬 설치시에는 기존의 목침목 철거가 불가피하며

궤도시스템 개량시 콘크리트 도상과 침목의 일체형식인 직결식 방진궤도시스템을 적용하여 침목과 레일체결시스템을 동시에 개량할 수 있다. 침목과 도상이 일체로 된 궤도구조로써 레일과 침목사이에서 방진재를 삽입하는 궤도구조시스템의 일례를 Table 1에 나타내었다.

콘크리트 슬래브 판넬 형식의 궤도구조는 자갈도상 궤도구조보다 궤도의 탄성력 확보에 어려움이 있으므로 열차 주행 안전성을 확보하고 운중 분산율을 높여 구조물의 부담력을 최소화함으로써 피로하중을 경감시켜 설비 수명을 연장시키는 노력이 필요하다. Table 2는 직결식 궤도에 적용이 가능한 방진레일체결시스템의 종류를 나타낸다.

프리캐스트 판넬 구조위에 방진레일체결장치의 설치에 필수적인 사항이므로 본 연구에서는 국내의 부설 실적이 풍부하고 운행선에서의 안정성, 시공성 및 기존선 본선 궤도와 궤도자재의 일관성을 고려하여 현재 기존선 대부분의 궤도에서 사용하고 있는 팬드클립(e-clip)을 적용한 ALT-II를 선정하였다. Table 3은 레일체결장치 선정에 위한 요건을 나타낸다.

Table 1. 침목-도상 일체형 방진궤도시스템 현황

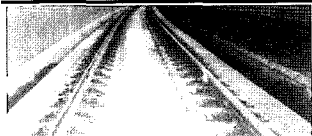

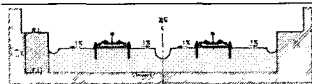
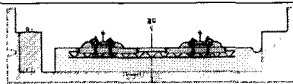
ALT- I, II(직결식)	Rheda 2000(침목매입식)
	
	
<ul style="list-style-type: none"> 호주, 국철, 서울1-4호선, 부산3호선 적용 중량 및 측면배수 가능 Two Block 형 방진궤도 방진레일체결장치 사용(일체형) 레일체결장치는 보슬로, 팬드를 겸용 	<ul style="list-style-type: none"> 독일, 경부고속전철 2단계구간 검토중 측면배수 Twin Block 형 방진궤도 방진패드 및 플레이트 사용(분리형) 레일체결장치는 보슬로 system300

Table 2. 방진레일체결장치의 종류


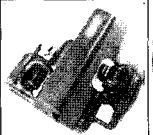
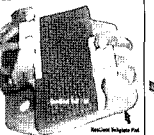

Alternative- I	Alternative- II	Pandrol VIPA	Vossloh system336
			

Table 3. 레일체결장치 선정요건

- 2중 탄성체결 구조일 것(방진성이 있을 것).
- 운중 분산율을 높일 수 있는 구조이며, 가능한 실용화된 구조로서 열차 주행 안전성이 보장될 것.
- 고저 및 수평 조정 범위가 크고, Tilting에 대해 탄성적으로 저항할 것.
- 전식방지 및 신호절연을 위해 소요의 전기력 절연 저항을 가질 것.
- 운행선인 점을 감안하여 궤도자재의 일관성을 유지할 것.

4. 방진궤도시스템의 제원

본 연구에서는 적용대상 구조물이 운행선상에 있는 무도상 판형교인 점을 감안해 기존 레일 면고를 유지할 수 있으면서 궤광의 강성을 충분히 확보할 수 있는 직결식 방진슬래브 판넬 시스템을 적용하고자하며 대상교량에 적용한 단면은 Fig. 1과 같다.

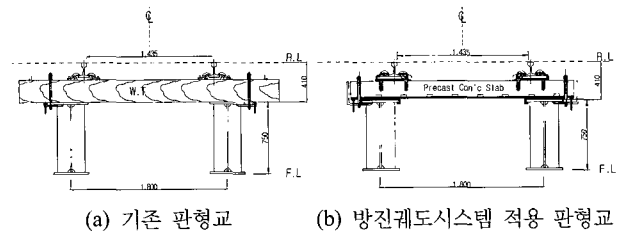


Fig. 1. 기존 판형교와 방진궤도시스템 적용 판형교의 단면

Fig. 1의 방진궤도시스템은 프리캐스트 콘크리트 슬래브 판넬구조 형식으로써 공장제작으로 인해 품질과 내구성이 우수하다. 판넬의 기본구조는 강합성 콘크리트 슬래브구조로써 전단연결재를 설치한 바닥판 플레이트와 상부 고강도 철근콘크리트로 구성되며 이러한 방진슬래브 판넬의 주요제원 및 특성은 Table 4와 같다.

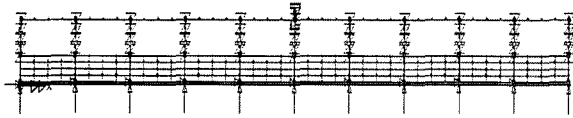
Table 4. 프리캐스트 콘크리트 슬래브 판넬의 제원 및 특성

구분	제원	특성
직결식 레일체결장치	· 탄성계수 : 26kN/mm * 철도용품표준규격 (철도2250-1057)적용	· 궤도높이 최소화(경량화 유도) · 방진효과 및 소음저감
고강도 철근콘크리트	· f _{ck} =59MPa · A _s =12.33cm ²	· 교량 상부 구조 내구성 증대 · 콘크리트도상으로써 유지보수 절감
인장 플레이트 전단연결재	· f _{sa} =393MPa · t=15mm	· 판넬의 내구성 및 안전성 확보 · 강합성구조 부재로 충분한 강도 확보 · 콘크리트량 절감으로 사하중 최소화
거더와 판넬사이의 방진패드	· 저마찰패드(t=25mm) · 스프링계수 : 0.1MPa · 마찰계수 : 0.22μ	· 2차 소음 및 진동 최소화 · 거더부담력 최소화 · 종방향 신축거동 여유확보

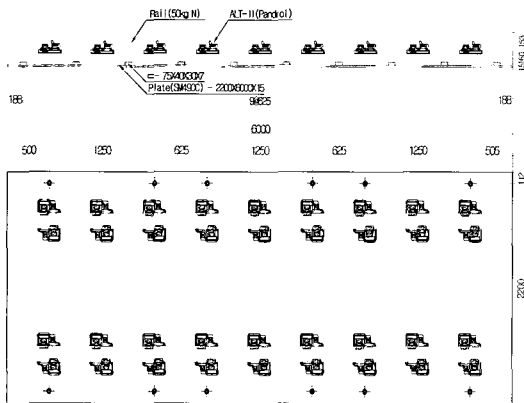
5. 유한요소해석

프리캐스트 슬래브 판넬 적용에 따른 무도상 판형교의 거동분석을 위해 범용 구조해석 프로그램인 LUSAS 13.7과 MIDAS civil을 이용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 본 연구의 수치해석을 위한 해석 모델은 프리캐스트 슬래브 판넬 단면을 콘크리트와 하부인장 플레이트의 합성거동을 유도하고자 합성단면으로 적용하여 3차원 Solid 요소를 사용

하고 레일은 Frame 요소로, 방진레일체결장치는 방진궤도시스템의 영향을 반영하기 위해 방진패드의 탄성계수 26kN/mm를 고려한 탄성스프링 요소를 이용하여 레일과 프리캐스트 슬래브 판넬 간의 해당절점을 일반적인 침목간격인 625mm 간격으로 각각 연결시킴으로써 역학적으로 합성된 궤도로써

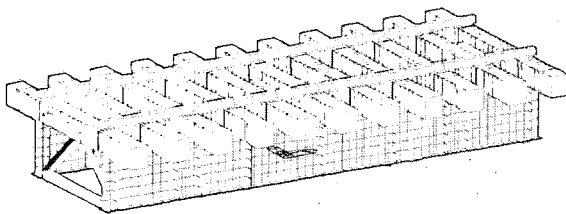


(a) 방진궤도시스템 유한요소 모델

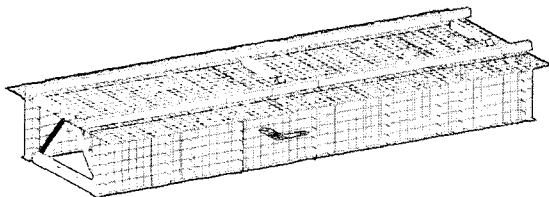


(b) 방진궤도시스템 모델 단면도

Fig. 2. 해석대상 판넬의 단면 및 해석모델



(a) 기존 무도상 관형교 모델



(b) 방진궤도시스템 적용 관형교 모델

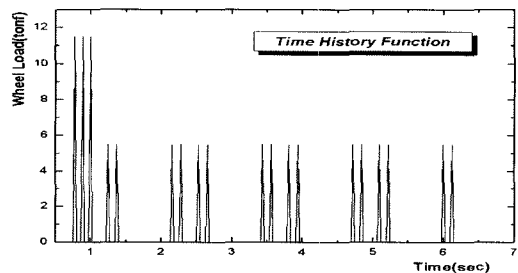
Fig. 3. 유한요소해석모델

거동하도록 모델링 하였다.

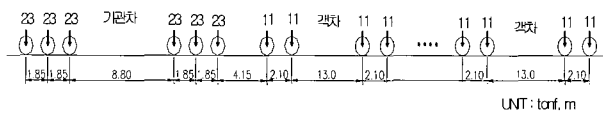
또한 무도상 관형교의 거동 및 판넬 적용 후의 거동분석을 위한 대상교량은 경간길이 6m의 표준 강관형교 단면(Table 5참조)에 대하여 플레이트 거더 부분은 4절점 Shell요소, 레일과 침목, 종리브, 브레이싱은 Frame요소를 사용하여 3차원으로 모델링 하였다. 여기서 레일과 침목, 침목과 상부플랜지 각각의 절점을 연결시켜 변위가 전달되도록 하였다. Fig. 2~Fig. 3은 유한요소해석에 적용한 해석대상 판넬의 단면과 유한요소 모델링을 나타낸 것이다.

6. 분석 결과 및 고찰

프리캐스트 방진 슬래브 판넬의 방진효과 및 적용교량의 동적 안정성 검토를 위해 실 주행열차 하중을 적용한 유한요소해석 결과를 비교 분석하였다. 열차하중의 횡방향 거동을 감안한 교량의 동적응답을 파악하기 위해서 실 운행열차 디젤1량+객차4량의 열차하중을 20~200km/h의 주행속도로 재하하여 시간이력해석을 수행하였으며 열차하중 모델과 축중배치를 Fig. 4에 나타내었다. 직선교량에 재하되는 열차하중의 횡압은 차륜과 레일 답면의 기하학적 형상으로 인해 주기적으로 변동되는 특징이 있다. 이러한 열차하중의 횡방향 거동은 Klingel movement 이론으로부터 수학적 모델링이 가능하다. 교량의 레일선상에서 통과하는 횡압의 시간이력을 수치적으로 표현하기 위하여 레일에 재하되는 횡압을 시간에 따른 등가절점하중으로 치환하였다. 여기서의 횡압과 이로 인한 모멘트 하중만을 고려하였으며 직선교량에서 큰 영향을 미치지 않는 비틀림 하중은 고려하지 않았다[7]. 다수의 집중하중으로 재하되는 열차하중의 시간이력을 해석에 적용하



(a) Example of time history function at 100km/h



(b) Load combination of static wheel loads

Fig. 4. Load composition for the dynamic analysis

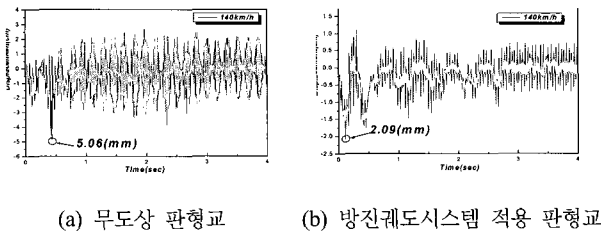


Fig. 5. Time history analysis results at 140km/h(Displacement)

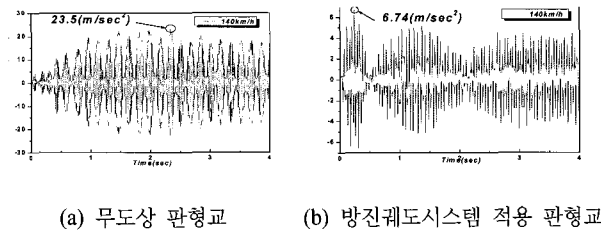


Fig. 6. Time history analysis results at 140km/h(Acceleration)

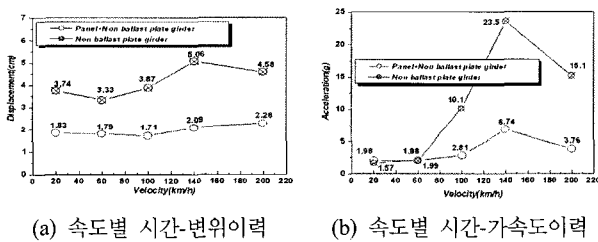


Fig. 7. Time history analysis results

기 위해 먼저 열차의 각 하중의 요소 내 위치를 시간간격마다 요소길이에 따라 재하되고 사라지는 충격하중의 형상으로 모델링 하였다[7].

시간이력해석결과 방진궤도시스템 적용 후 거더에 작용하는 시간-변위 및 시간-가속도 응답이 각각 약 59%, 82%정도로 크게 감소되어 무도상 판형교는 방진궤도시스템의 적용으로 충분한 동적 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 주행 열차하중에 의한 발생 진동가속도와 동적 변위 검토결과는 Fig. 5~Fig. 7와 같다.

7. 실험결과 및 분석

7.1 실험내용 및 범위

본 연구에서는 시험체 설계에 있어서 실험 여건 등을 감안하여 Fig. 8과 같이 설계하중 LS-22의 경간 길이 6m인 무도상 시험체를 제작하였다. 시험체 주요 제원은 Table 5와 같다. 또한 방진궤도시스템 적용 여부에 따른 거동분석을 위한 프

Table 5. 무도상 시험체 제원

구 분	단 면 치 수(mm)
거더 중심간격(D)	1,600
복 부 판(H×t)	600×16
상부플랜지(B×t)	190×35
하부플랜지(B×t)	190×35
보 강 재	90×9
브레이싱	90×90×10

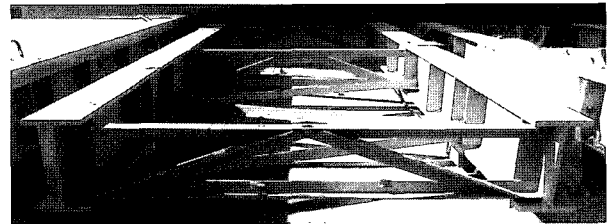
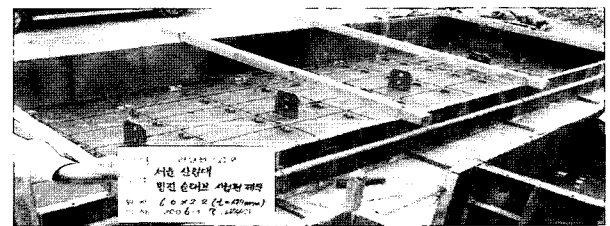
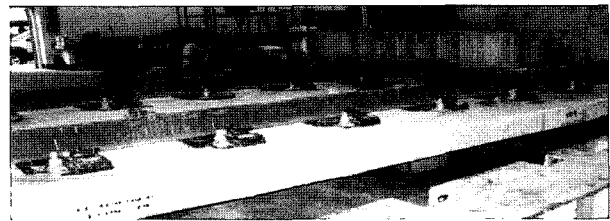


Fig. 8. 무도상 시험체 전경



(a) 프리캐스트 방진 슬래브 판넬 제작 전경



(b) 프리캐스트 방진 슬래브 판넬 제작 완료

Fig. 9. 프리캐스트 방진 슬래브 판넬 시험체 전경

리캐스트 판넬 시험체는 Fig. 9와 같으며 그 두께는 15cm와 17.5cm로 하였다. 판넬의 두께는 레일높이와 체결장치 및 거더와 판넬사이의 거더패드 두께를 고려하여 기존 목침목 궤도구조에서의 레일면고를 유지할 수 있는 유효 두께로 선정하였으며 판넬의 두께 변화에 의한 강성차이와 적절 판넬 단면을 검토하고자 두 가지 형식으로 제작하였다. 또한 하부 플레이트에 전단연결재를 설치하여 상부 콘크리트와 완전한 합성거동을 할 수 있도록 제작하였으며 압축부에 철근배근을 하였다. 동적 가진시험을 위한 가진판 제작은 방진레일체결장치 적용에 따른 방진효과 분석 및 실 주행차량에 의한 발생

진동의 영향을 반영하기 위해 가진기의 가진력이 레일두부로부터 하부로 전달될 수 있도록 하였다. 동적 가진시험 시 제작된 가진판을 무도상 및 방진궤도시스템 적용 시험체 중앙에 설치하고 그 위에 원심력을 이용한 가진기(최대 가진주파수: 35Hz)를 설치하여 단계별(3단계: 8Hz-17Hz-25Hz) 가진을 통해 방진궤도시스템 적용 유무에 따른 진동특성을 파악하였다. 또한 정적재하시험 시 하중재하는 0~550kN까지 50kN씩 증가시켜가며 실험을 수행하였다.

한편, 대상 시험체에 있어서 무도상 상태의 하중 재하에 따른 거동과 방진궤도시스템 적용 후 시험체의 하중 재하시 거동을 분석하기 위하여 Fig. 11과 같이 변형을 게이지, 변위계 및 가속도계를 설치하여 실험을 실시하였다.

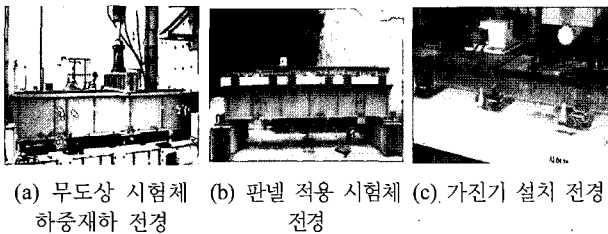


Fig. 10. 실내시험 전경

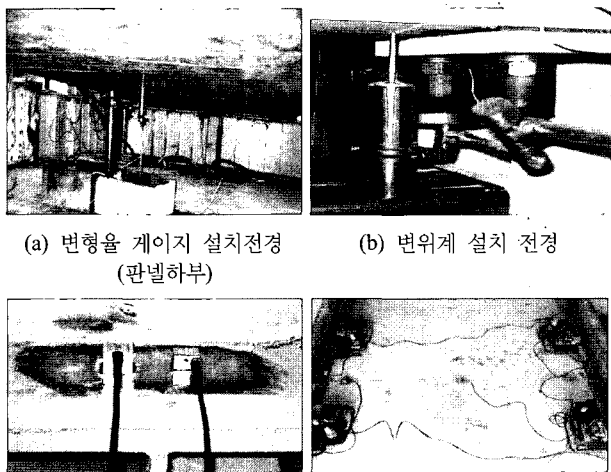


Fig. 11. 센서설치 전경

7.2 정적 응력 및 변위 검토결과

실험 결과 400kN의 하중재하시 무도상 시험체 중앙 하부 플랜지의 발생 응력은 58.19MPa로 나타났으며, 판넬설치 시험체의 응력은 판넬두께 15cm와 17.5cm에서 각각 9.8MPa, 10MPa로 나타났다. 이에 따라 프리캐스트 방진 슬래브 판넬설치에 의해 동일하중 재하시 주형 하부플랜지 응력이 무보

강 시험체의 경우보다 약 86~87%정도 감소됨을 알 수 있었다. 또한 무도상 시험체와 판넬설치 시험체의 거더중앙 변위를 비교해본 결과 판넬설치 시험체의 경우 판넬 중량에 의해서 약 0.99~1.27mm 정도의 초기 변위가 발생하나 거더에 구조적인 문제를 일으킬만한 변위량은 아닌 것으로 판단되며 판넬설치에 의해 하중재하에 따른 변위증가폭이 무도상 시험체의 경우보다 매우 작은 것으로 나타났다. 이때 최대 하중재하시 발생 최대 변위량이 무도상시험체 대비 약 59~62% 정도 감소됨을 알 수 있었다.

판넬설치 시험체와 무도상 시험체의 응력을 비교해본 결과 판넬 중량에 의해 증가된 주형 하부플랜지 응력(15cm: 4.1MPa, 17.5cm: 5.0MPa)은 매우 미소한 것으로 나타났으며 하중재하에 따른 응력증가폭이 무도상 시험체의 경우보다 매우 작아 판넬설치 시험체의 경우 최대 하중(550kN)재하시 발생 최대응력(15cm: 9.6MPa, 17.5cm: 0.6MPa)이 무도상 시험체의 발생응력(78.4MPa)을 크게 하회하는 수준으로 나타남으로써 판넬설치에 따른 뚜렷한 응력감소효과가 나타났다. 무도상 시험체와 판넬설치 시험체의 중앙부 하부플랜지의 변위 및 응력을 측정된 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

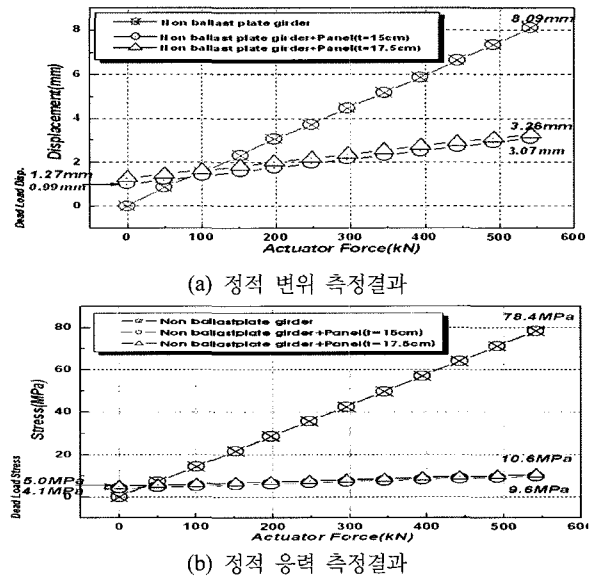


Fig. 12. 정적 재하시험 결과

7.3 진동가속도 검토결과

무도상 시험체와 판넬설치 시험체의 진동가속도를 측정된 결과 Fig. 13~14와 같이 무도상 시험체의 경우는 거더 중앙부 최대 진동가속도의 크기가 0.12g로 나타났으며, 판넬설치 시험체의 경우는 판넬 두께별로 각각 0.041g(15cm)와 0.030g(17.5cm)로 나타나 방진궤도시스템을 적용한 판넬설치 여부

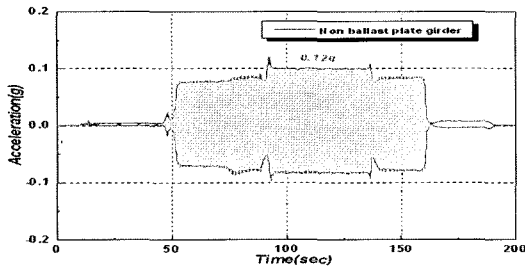


Fig. 13. 무도상 시험체의 진동가속도 측정 결과(거더 중앙부)

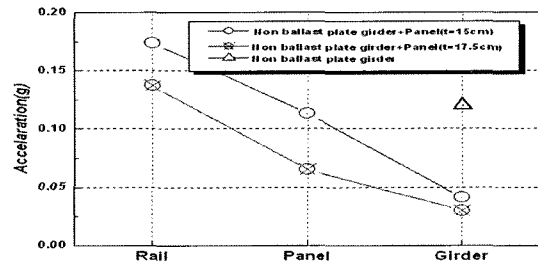


Fig. 14. 시험체별 최대 진동가속도 결과

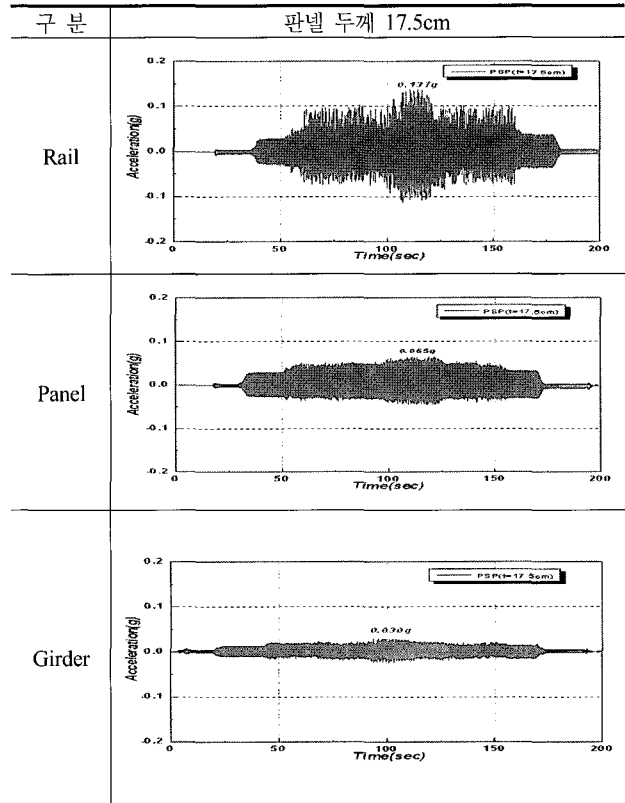
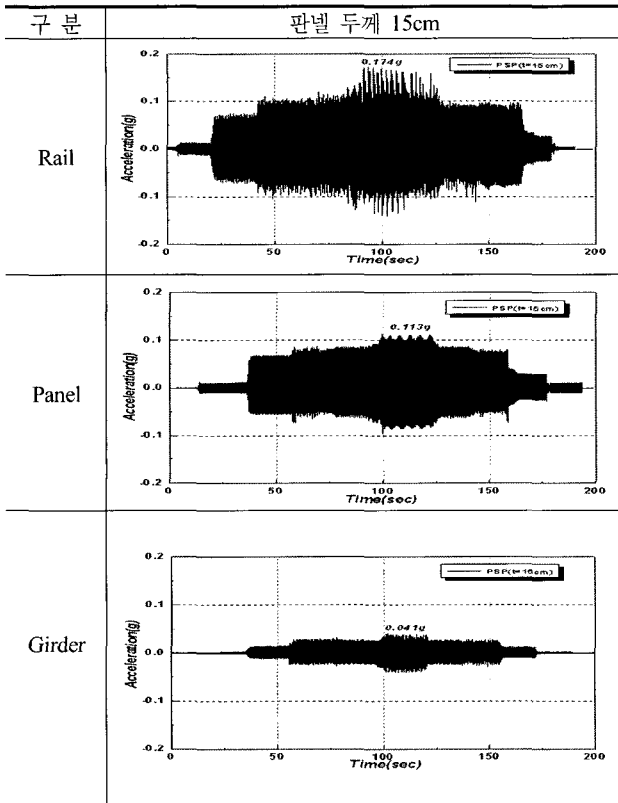


Fig. 15. 판넬설치 시험체의 궤도 및 거더 진동가속도 측정결과

에 따라 거더 진동가속도가 크게 감소되는 것으로 나타났다. 이는 앞서 수행한 유한요소해석 결과와 동일한 경향을 보이며, 방진 궤도시스템 적용에 따라 무도상 강철도 판형교의 진동특성이 크게 안정적으로 변화되어 최대진동가속도가 약 66% 정도 감소되는 것으로 나타나 유도상화 및 방진 궤도시스템 적용의 효과를 실험적으로 입증하였다.

또한 Fig. 15와 같이 레일두부에 작용한 진동의 영향이 레일-판넬-거더로 전달되는 과정에서 단계별로 크게 저감되는 것으로 나타나 방진레일체결장치와 판넬 및 거더패드의 방진 효과를 실험적으로 입증하였으며 기존 무도상 강철도 판형교에 방진궤도시스템을 적용함으로써 열차하중에 따른 기존 거더의 동적하중 부담력을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

8. 결론

방진궤도시스템 적용에 따른 무도상 강철도 판형교의 거동 분석과 방진궤도시스템의 방진효과 및 적용 가능성을 살펴보고자 실험 및 해석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 유한요소해석 결과, 방진궤도시스템 적용 전, 후에 따라 시간-변위 및 가속도가 무도상 판형교의 경우보다 상당히 안정적으로 나타나고 있어 기존 무도상 판형교의 동적안정성 확보에 있어서 유리한 것을 알 수 있었다.
- (2) 정적실험결과, 판넬설치 시험체의 경우 판넬 중량에 의한

초기 변위 및 응력이 다소 발생하나 거더에 구조적인 문제를 일으킬만한 크기는 아니었으며, 하중재하에 따른 변위 및 응력증가폭이 무도상 시험체의 경우보다 매우 작은 것으로 나타났다. 또한 최대 하중 재하시 발생 최대 변위 및 응력수준은 무도상 시험체의 경우보다 각각 62%, 87% 정도 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 프리캐스트 방진슬래브 판넬을 적용하여 판넬 자체의 강성으로 열차하중을 대부분 부담할 수 있어 구조물의 내하수명을 증대시킬 수 있음을 실험적으로 증명하였다. 그러나 기존교량의 상당한 노후화로 인한 내구성 저하와 하중 증가에 따른 안전율의 감소로 내하력이 설계치보다 감소될 우려가 있으므로 필요 시 하중 증가의 영향을 보완할 수 있는 적절한 보수, 보강 대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

- (3) 동적실험결과, 방진궤도시스템을 적용한 판넬설치 여부에 따라 거더 진동가속도의 크기가 크게 저감되는 것으로 나타났다. 이는 앞서 수행한 유한요소 해석 결과와 동일한 경향을 보이며, 방진궤도시스템 적용에 따라 무도상 강철도 판형교의 진동특성이 안정적으로 개선되어 동적 최대진동가속도가 약 66% 정도 작게 나타나는 것으로 나타나 유도상화 및 방진궤도시스템 적용의 효과를 실험적으로 입증하였다.
- (4) 동적실험결과, 레일두부에 작용한 진동의 영향이 레일-판넬-거더로 전달되는 과정에서 단계별로 크게 저감되는 것으로 나타나 방진레일체결장치와 판넬 및 거더패드의 방진 효과를 실험적으로 입증하였으며 기존 무도상 강철도 판형교에 방진궤도시스템을 적용함으로써 열차주행 하중에 대한 거더의 부담력을 크게 낮출 수 있을 것으로 판단된다. 또한 유도상 방진궤도의 실현으로 그동안 문제가 되었던 무도상 강철도 판형교의 고강성, 저중량 특성에 따른 동적 불안정을 해소할 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

1. 박용걸 (2000), 외부 후긴장 공법의 적용에 따른 공용적인 판형교 거동의 실험적 연구, 토목학회 학술집.
2. 박용걸, 박영훈, 강덕만 (2002), 합성형교의 외부 후 긴장력 횡분배 거동에 대한 실험 및 해석적 연구, 대한토목학회논문집, 제22권, 6-A호, pp.1469-1479.
3. 박영훈, 박용걸, 전준창 “외부 후 직선긴장 보강공법적용에 따른 합성형의 동적거동” 대한토목학회논문집, 2003.
4. 최일운 (2002), 국내 강철도교의 열화손상 사례분석”, 한국강구조학회 춘계학술발표회.
5. 최정열 (2004), 강철도교에 대한 외부 후긴장 보강공법의 적용에 관한 연구.
6. 박용걸, 최정열, 강덕만 (2005) 강철도교에 대한 외부 후긴장 보강공법의 적용에 관한 연구, 한국강구조학회 학술대회논문집, 제16권 1호, pp.486-491.
7. 오지택, 김현민, 박찬 (2003), 무도상판형교의 횡방향 동적거동 특성 분석을 위한 실험적 연구, 한국철도학회 추계학술대회.
8. 김현민, 오지택, 이소진 (2003), 무도상판형교의 횡거동분석을 위한 주행하중 매개변수 연구, 한국철도학회 추계학술대회.
9. 박문석, 오지택, 최진유 (2003), 열차유형에 따른 판형교의 정적 거동에 대한 연구, 한국철도학회 추계학술대회.
10. 오지택, 최진유, 김현민 (2002), 무도상판형교의 고유진동특성에 관한 연구, 한국철도학회 추계학술대회.
11. M. S. Troitsky, D. Sc, “Prestressed Steel Bridge Theory and Design”, VNR, 1990.
12. Szilard, R., “Strengthening Steel Structures by Means of Prestressing”, The Engineering Journal, 10, 1955, pp.1379-1381.
13. Hoadley, P. G., “Behavior of Prestressed Composite Steel Beams”, Journal of the Structural Division, Proceeding of the ASCE, June, 1963, pp.21-34.
14. Michal S. Troitsky, Zenon A. Zielinski, Naser F. Rabbani, “Prestressed-Steel Continuous-Span Girders”, Journal of the Structural Engineering, Vol.115, No.6, June, 1989, pp.1357-1370.
15. Wenxia Tong, Hamid Saadatmanesh, “Parametric Study of Continuous Prestressed Composite Girders”, Journal of the Structural Engineering, Vol.118, No.1, January, 1992, pp.186-206.
16. Tachibana, Y., Kondo, K., and Ito, K. (1964), “Experimental Study on Composite Beams Prestressed with Wire Cables”, Final Report, Intern. Assoc. for Bridge and Struct. Engrg., 7th Congress, Rio de Janeiro, pp.677-683.
17. Murkowski, W. (1974), “Experimental Testing of New Type of Prestressed Steel Girder.”, Poznan Polytechnic, Poland, Archives of Civil Engineering, 20(4), pp.699-712.
18. Hamid Saadatmanesh, Pedro Albrecht, Bilal M. Ayyub “Analytical Study of Prestressed Composite Beams”, Journal of the Structural Engineering, Vol.115, No.9, September, 1989, pp.2364-2381.
19. Yong Gul PARK, Young Hoon PARK “External Post Tensioning Method for Reinforcement of Existing Steel Bridge” Proceedings of the 7 Korea-Japan Joint Seminar on Steel Bridges (JSSB-KJ7), Aug. 2003.
20. Park Young Hoon, Park Cheol Woo, Park Yong Gul, 2005. “Behavior of in-service plate girder bridge strengthened with prestressed external tendons”, Engineering Structures 27, pp.379-386.
21. Ayaho Miyamoto, Katsuji Tei, Hideaki Nakamura, 2000. “Behavior of Prestressed Beam Strengthened with External Tendons”, Journal of Engineering Structures, ASCE, 126(9), pp.1033-1044.