한국철도학회논문집
제9권 제2호 2006년 ▮ pp. 151-159

강철도교에 대한 외부 후긴장 보강공법의 적용에 관한 실험 및 해석적 연구

An Experimental and Analytical study on the Steel Plate Girder Railway bridge in the applying External Post-tensioning Method

박용걸† · 박영훈* · 조선규** · 최정열***
Yong-Gul Park · Young-Hoon Park · Sun-Kyu Cho · Jung-Youl Choi

Abstract

It analyzed the mechanical behaviors of non-ballasted railway bridge (steel plate girder type) with ballast reinforced on the finite element analysis, field test and laboratory test for the static and dynamic responses. The major objective of this study is to investigate the effects and application of reinforcement for steel plate girder railway bridge by the external post-tensioning method. The reinforcement of non-ballast railway bridge had obviously stable dynamic behaviors due to the additional dead force which was ballast. But in case of static behaviors, static displacements and stresses had increased nearly the allowable values. Therefore we analyzed the mechanical behaviors of non-ballasted railway bridge with ballast reinforced and external post-tensioning reinforced on the finite element analysis and laboratory test for the static and dynamic behavior. As a result, the reinforcement of ballasted railway bridge the external post-tensioning method are obviously effective for the additional dead force which is ballast. The analytical and experimental study are carried out to investigate the post-tension force decrease bending behavior and deflection in composite bridge for serviceability. The servicing railway bridge with ballast reinforced has need of the reasonable reinforcement measures which could be reducing the effect of additional dead load that degradation phenomenon of structure by an unusual stresses and a drop durability.

Keywords : steel plate girder railway bridge(강철도판형교), ballast(도상), external post-tensioning(외부 후긴장)

1. 서 론

국내 강판형 철도교는 1930년대에 가설되기 시작하여 다른 교량형식에 비해 상당한 공용기간을 가지고 있으며 많은 교량들이 노후화되고 있다. 또한 구조형식에 있어서도 리벳형 판형교에서 용접형 판형교 형식으로 변경되고 있으며 도상의 경우는 무도상에서 유도상으로 교체되고 있다.

도상형식이 무도상의 경우는 침목 등 궤도구조가 거더의 상부 플렌지에 직접적으로 놓여지기 때문에 열차하중이 거더에 직접적으로 전달되며 그에 따른 충격, 진동 및 소음 등이 크게 발생한다. 그리고 유도상 형식에 비하여 상부구조의 질량이 상대적으로 작기 때문에 사하중에 의한 발생응력은 작지만 동적처짐 및 응력, 진동 등 동적영향이 크게 작용하며 경간길이, 열차의 종류, 주행특성 등에 따라 응답이 민감하게 나타나는 특성을 가진다. 또한 철도교의 특성상 교량에 놓인 레일이나 침목, 보조레일, 교측보도, 기타 부착물 등도 교량의 진동특성에 영향을 미쳐 레일 이음매의 위치와 상태, 교량진출입부의 강성차이, 궤도틀림 등에 영향을 주게 되고, 최종적으로는 교량의 내하력 저하 외에도 운행중인 열차의 안전성 및 승차감에도 문제를 일으킬 수 있다[9,15].

한편 교량 등과 같은 구조물에 있어 철도의 고속화에 따른 안전성 및 사용성 확보에 대한 요구조건이 점차 까다로워지고 있고 또한 기존선을 그대로 이용하고 운행에 따른 요구조건을 만족하도록 해야만 하는 경우가 많이 발생하고 있다. 이 경우 최근 설계기준에 부합한 교량의 개축이 아니면 부분적인 구조계의 변경 또는 보수, 보강 등의 기술이 도입되어야 하는데 이를 위해서는 우선 대상교량에 대한 거동

† 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사
E-mail : ygpark@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6575 FAX : (02)978-6575
* 정회원, 부천대학 토목공학과 조교수, 공학박사
** 정회원, 서울산업대학교 철도건설공학과 교수, 공학박사
*** 정회원, (주)대한콘설탄트 철도부 궤도팀, 공학석사

분석이 수행되어야 하며 여러가지 방법에 의한 대안이 강구되어야 한다[12,13].

강판형교에 대한 국내의 연구로서는 질량 및 경간길이에 따른 고유진동수의 특성분석 및 교량의 보수보강 및 유도상화 기술개발 등에 관한 연구 등이 수행되었으나 거동 분석이나 다양한 보수보강 방법 등에 대한 연구는 아직 충분하지 못한 실정이므로, 공용중인 무도상 강판형교의 진동을 저감하고 이에 따른 내하력 저하 방지 및 보강을 위한 유도상화 연구과정에서 대두된 추가 사하중의 증가 및 장기적인 사용성과 내구성 측면에서 노후된 교량에 대한 효과적인 보강대책으로서 외부 후긴장 보강공법의 적용이 가능할 것이라 생각된다[10,11].

따라서 본 연구에서는 공용기간이 50년인 무도상 강판형교를 유도상으로 변경했을 때의 정, 동적거동을 파악하고 외부 후긴장 공법의 보강효과를 입증하고자, 기존의 도로교에 적용하고 있는 외부 후긴장 보강공법을 강판형 철도교에 적용함으로써 보강효과 및 적용가능성을 알아보는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해서 실교량의 동적특성을 측정하고 3차원 유한요소 해석을 통하여 정적 응력 및 고유진동수를 비교, 분석하였으며 이를 바탕으로 정, 동적 실내시험을 수행하였다. 이에 적용된 판형교에 대하여 실열차 하중하에서의 보강 전, 후의 정, 동적거동을 분석하였으며 유도상화에 따라 증가된 사하중에 의해 발생하는 고유진동수 변화와 교량의 수직진동 가속도 저감 효과를 분석하고, 외부 후긴장 보강공법의 적용 가능여부를 검증하고자 하였다. 또한 기존선의 운행속도 증가를 감안하여 열차운행속도를 200km/h까지 증가시켰을 교량의 동적응답을 시간이력해석에 의하여 분석하였다[11].

2. 대상교량 및 현장측정

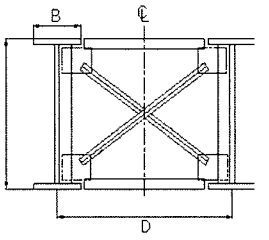
2.1 대상교량 제원 및 특성

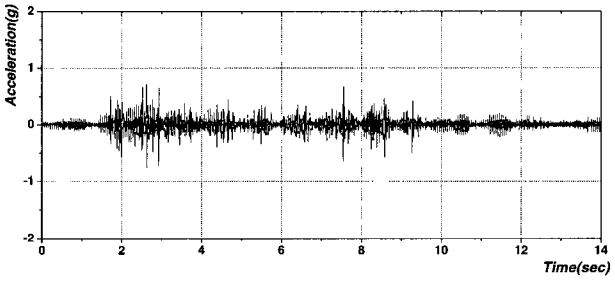
본 연구의 대상교량은 1953년에 준공된 경간길이 13.4m의 전형적인 단순지지 판형교로서 1996년에 내하력 증대를 목적으로 단면증설공법에 의해 보강되어진 교량이며 보강 후 약 8년의 공용기간을 가진 교량이다. 대상교량의 제원을 Table 1에 나타내었다.

2.2 현장측정

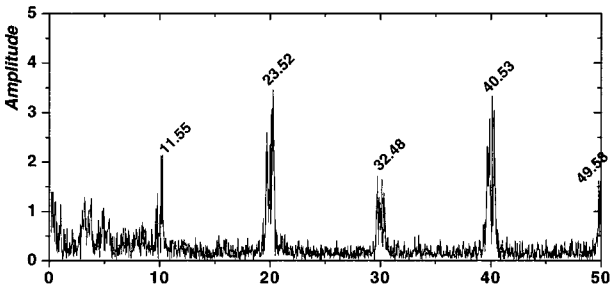
대상교량에 대한 현장측정은 동적응답 특성을 파악하기 위하여 지간 중앙에 가속도계를 설치하여 열차 주행에 따른 교량의 수직진동 가속도를 얻고 이를 FFT 분석을 통하여 고유진동수를 구하였다. 계측 수행방법은 동적계측장비(MGC-Plus)로 동적가속도 응답을 100Hz의 샘플링 주기로 계측하였으며 실제 운행중에 있는 열차 중 새마을호 주행시의 응답으로 비교하고자 하였다. Fig. 1은 현장측정결과 얻어진 가속도

Table 1. Geometry and properties of test bridge

구 분		A 교	비 고
설 계 하 중		LS-22	
상·하 행선		상행	
경 간 장(m)		13.4	
지점간 거리(m)		12	
제 원 (mm)	거더 중심간격(D)	1800	
	복 부 판 (H×t)	1,100×22	
	상부플랜지 (B×t)	300×19	지점에서 1/8까지
		300×25	1/8에서 3/8까지
		300×35	3/8에서 중앙까지
	하부플랜지 (B×t)	300×19	지점에서 1/8까지
		300×25	1/8에서 3/8까지
		300×33	3/8에서 중앙까지
	보 강 재	12×16	수직보강재
		100×9	거셋플레이트
	브레이싱	90×90×10	복부 브레이싱
		100×100×10	상, 하부 브레이싱
레 일		KS60	
침 목		23×23×250	



(a) Acceleration record in the mid span



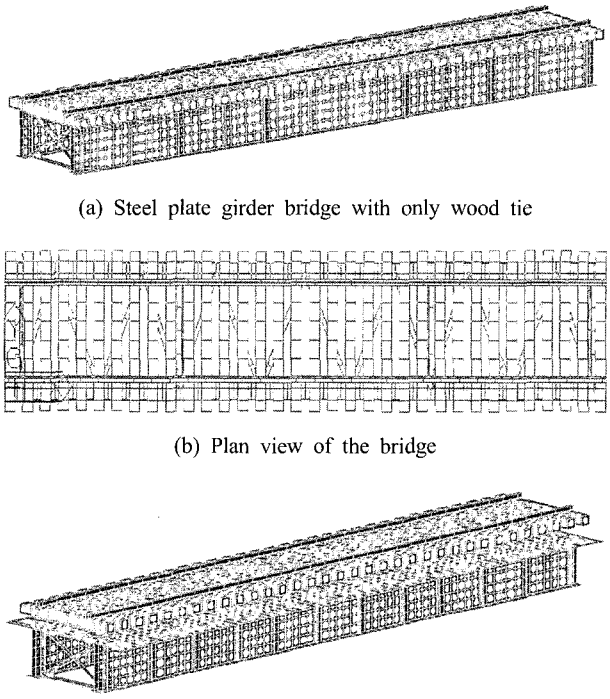
(b) Frequencies from FFT analysis

Fig. 1. Measured data results in field test

파형과 FFT분석 결과를 나타낸 것이다.

3. 유한요소해석

본 연구의 유한요소해석은 현장측정 대상교량과 동일한 경간길이 13.4m의 표준 강판형교 단면에 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. 또한 유도상 판형교의 모델링에 있어서는 자갈도상의 영향을 반영하기 위해 현재 경부선의 일반적인 궤도 스프링계수인 K_s=19.6N/mm^{2}을 침목과 슬래브 도상간의 스프링 요소에 반영하였다. 레일의 궤간은 표준궤간인 1.435m를 적용하였고, 레일의 단면특성은 KS60을 사용하였다. 침목은 교량용 목침목(23cm×23cm)을 10m당 25개로 배치하였다. Fig. 2는 유도상 및 무도상 판형교의 유한요소 모델링을 나타낸 것이다[7,8].



(a) Steel plate girder bridge with only wood tie

(b) Plan view of the bridge

(c) Steel plate girder bridge with ballast

Fig. 2. FEM modeling

Table 2. Define of Dead load

구 분	슬래브	자 갈	침 목	레 일	외부 후긴장
무도상	-	-	목침목	60kgf/m	-
유도상	Precast Con'c Slab	O	PC침목	60kgf/m	-
무도상 +보 강	-	-	목침목	60kgf/m	PC 강연선 (7연선/B종 /SWC7B)
유도상 +보 강	Precast Con'c Slab	O	PC침목	60kgf/m	PC 강연선 (7연선/B종 /SWC7B)

4. 분석 결과 및 고찰

4.1 정적변위

도상 유무에 따라 궤도 구성요소는 Table 3에 나타낸 바와 같이 달라지기 때문에 사하중이 크게 달라지며 그에 따른 정적 처짐을 구하였다. Fig. 3은 사하중 재하시의 정적변위도를 나타낸 것이다. 정적 처짐의 최대 값을 철도교 설계기준의 한계치와 비교하면 유도상화에 따른 처짐의 증가량은 무도상에 대하여 약 60%의 증가한 6.8mm를 나타내고 있다.

이와 같은 추가 사하중에 의한 처짐을 방치해 두었을 경우 장기적으로 교량의 내하력 저하를 유발할 것으로 판단되는 바 이에 대한 적절한 보강이 필요할 것으로 판단된다.

4.2 정적응력

도상유무에 따른 주형의 정적응력을 분석하기 위해 사하중과 활하중에 의한 발생응력을 구하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 그 결과 유도상화에 따른 주형의 응력증가

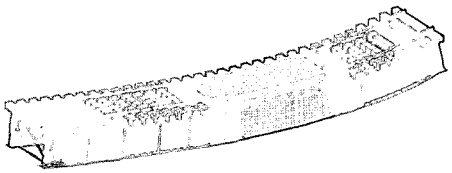


FIg. 3. Displ. contour of the non-ballast track with only tie

Table 3. Static displacement of the ballast and the non-ballast track bridge

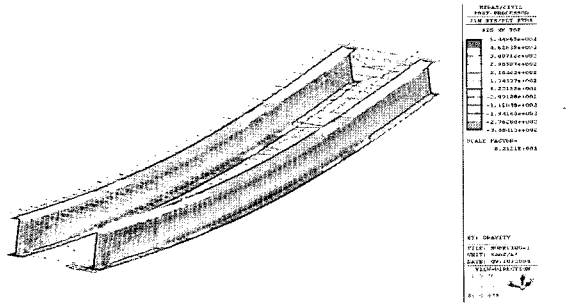
구 분	무도상 판형교	유도상 판형교
궤도조	주형+레일 +목침목+브레이싱	주형+레일+PC침목+브레이싱 +콘크리트 슬래브+자갈
최대변위	4.3mm	6.8mm

Table 4. Static stress of each conditions

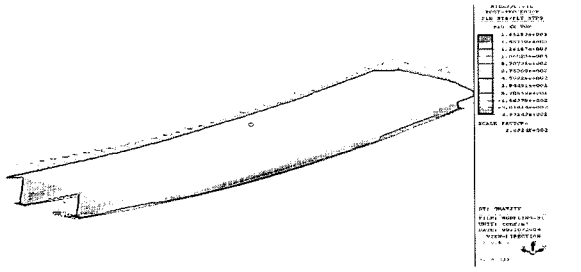
구 분(MPa)		사하중+활하중	사하중	유도상-무도상
무도상	인장응력	33.64	6.96	-
	압축응력	-20.30	-3.51	-
유도상	인장응력	100.62	71.07	66.98
	압축응력	-54.92	-35.83	-34.62

분은 무도상에 대하여 인장응력은 66.98MPa, 압축응력은 34.62MPa의 응력증가를 보이고 있다. 그러나 유도상의 경우 주형 하부플랜지의 인장응력은 100.62MPa로서 허용응력 137.29MPa보다 낮은 수준이나 주형의 정적 안전율은 1.34로서 무도상에 비하여 현저하게 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 공용기간 중 추가응력에 의한 주형의 손상 및 이에 따른 내하력 저하를 유발할 가능성이 있음을 나타내었다.

이에 긴장력 산정 시 주형 모재의 긴장력에 대한 부담을 최소화하기위해 추가사하중에 의한 응력증가분 50%정도를 부담할 수 있는 700kN을 도입긴장력으로 산정하였고 긴장



(a) Non-ballast track



(b) Ballast track

Fig. 4. Static stress contours of bridges

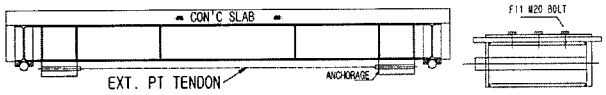


Fig. 5. Plan view of Straight Tendon (Detail Anchorage)

Table 5. Stress and Displ. of Ballast track bridge in according to Tendon force

도입 긴장력	주형하부플랜지 응력(MPa)	응력감소율 (%)	최대변위(mm) ( ) : 무도상
무보강	73.84	-	8.2(6.8)
600KN	41.78	43.4	6.4(4.5)
700KN	36.87	50.1	5.5(3.9)
800KN	31.28	57.6	5.1(3.7)
900KN	25.89	64.9	4.7(2.3)
1000KN	20.00	72.2	4.4(1.1)

재배치형태는 주형모재손상을 최소화할 수 있는 하부 직선보강으로 선정하였다[4,5].

이와 같은 긴장재 보강 후 경간중앙 주형 하부플랜지의 응력과 최대변위가 약 50%정도 감소한 것으로 나타나 보강 시 추가하중 부담이 비교적 작은 외부 후긴장 보강공법으로 유도상화에 따른 추가사하중을 부담하게끔 함으로써 내하력 상승효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 고유진동수

유도상 및 무도상 형식에 대한 동적특성을 평가하기 위하여 고유치 해석에 의해 고유진동수를 구하였으며 이를 Table 6에 무도상인 경우의 실측 고유진동수와 함께 나타내었다. 그림 6은 고유치 해석결과 얻어진 모드형상을 나타낸 것이다.

그 결과를 보면 무도상 교량의 경우 상부구조의 질량 특히 횡방향 강성이 작기 때문에 횡방향 모드가 1차 모드로 나타나고 있으며 고유진동수가 21.67Hz로 비교적 크게 나타나고 있다. 이는 실측결과와 비슷한 결과로 동적해석 모델링의 타당성을 보여주고 있다. 반면, 유도상의 경우는 도

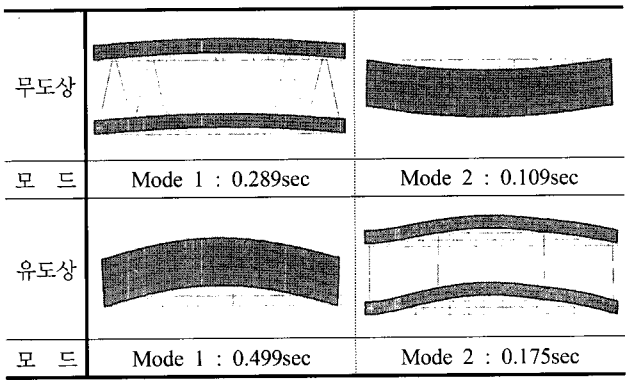


Fig. 6. Mode shapes of bridges

Table 6. Frequencies of bridges types

구 분	Mode 1		Mode 2	
	Period (sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)	Frequency (Hz)
무 도 상	0.289	21.67	0.109	57.41
무도상+보강	0.287	21.88	0.107	58.56
실측(무도상)	0.267	23.52	0.105	59.74
유 도 상	0.499	12.58	0.175	35.71
유도상+보강	0.490	12.81	0.173	36.20
Reduction Ratio (%) : 무도상의 경우와 비교				
유 도 상	-	41.9	-	37.7
무도상+보강	-	(+)0.3	-	(+)1.1
유도상+보강	-	40.8	-	36.9

상의 중량이 크게 증가하므로 1차 모드 형상이 연직방향으로 바뀌게 되며 고유진동수도 무도상에 비하여 절반으로 줄어드는 양상을 보이고 있다. 또한 외부 후긴장 보강이 고유진동수 변화에 미치는 영향은 극히 미비한 것으로 나타났다.

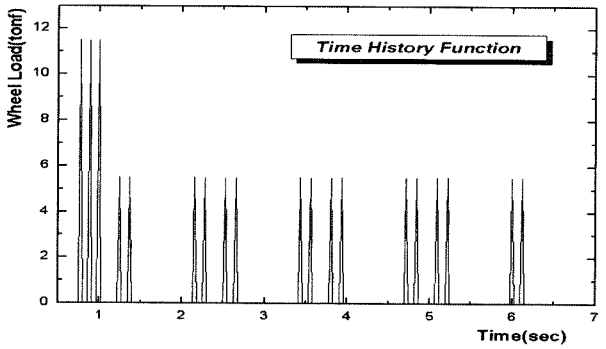
4.4 시간이력해석

도상유무 및 열차 주행에 따른 교량의 동적 응답을 파악하기 위해서 실 운행 열차 디젤 1량 + 객차 4량의 열차하중을 20~200km/h의 주행속도로 재하하여 시간이력 해석을 수행하였다. 하중지속시간은 요소분할 간격과 속도의 관계에 따라 계산되며 열차하중 모델과 축중을 Fig. 7에 나타내었다.

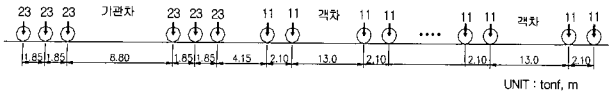
Fig. 8은 도상 유무에 따른 시간이력 해석결과의 일례로 시간에 따른 동적변위 및 가속도응답을 나타낸 것이다.

Table 7은 속도별 시간이력 해석결과 최대 변위 및 가속도를 나타낸 것이다. 그 결과를 보면 무도상 및 유도상 모델 공히 최대 변위 및 가속도는 차량속도가 100km/h 일때 가장 크게 나타나며 이보다 큰 속도에서는 동적응답이 약간 작아지는 것으로 나타났다. 또한 유도상의 경우는 단면 전체의 강성 증가에 따라 변위 및 가속도가 무도상에 비하여 최대 약 70% 정도 낮아지는 것을 알 수 있었으며 유도상화에 따른 시간이력 응답의 감소 정도는 속도 변화에 따라 거의 일정한 효과를 나타내는 것으로 분석되었다.

따라서 동적응답에 있어서는 기존의 교량을 유도상화 함으로써 무도상보다 더 양호한 거동을 확보할 수 있음을 알 수 있다.



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



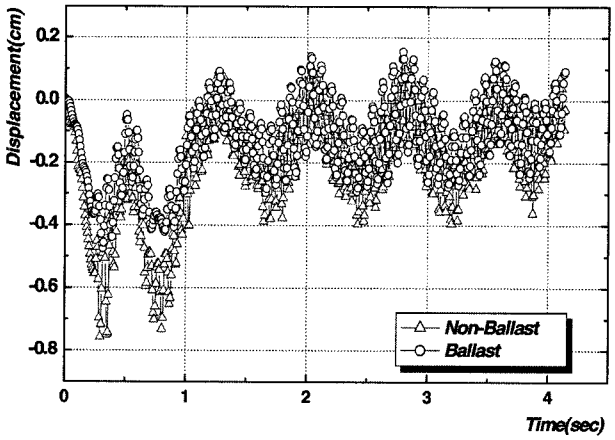
(b) Load combination of static wheel loads

Fig. 7. Load composition for the dynamic analysis

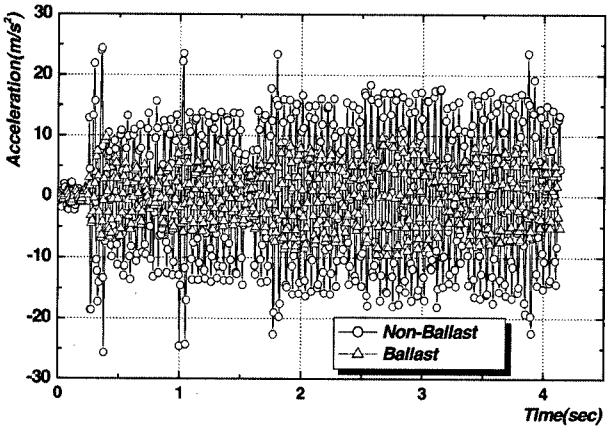
5. 실험결과 및 분석

5.1 실험내용 및 범위

본 연구에서는 시험체 설계에 있어서 실험 여건 등을 감안하여 Fig. 9와 같이 설계하중 LS-22의 경간 길이 6m인 무도상 및 유도상 시험체를 제작하였다. 시험체 주요 제원은 Table 8과 같다. 또한 유도상 시험체는 Fig. 9의 무도상 시험



(a) Analysis results of displacement to time



(b) Analysis results of acceleration to time

Fig. 8. Time history analysis results at 100km/h

Table 7. Maximum displacement and acceleration to the various velocities

속 도	최대변위(mm)		가속도(m/sec²)	
	무도상	유도상	무도상	유도상
20km/h	6.98	4.26	12.84	3.06
60km/h	8.29	4.99	17.88	6.39
100km/h	7.57	5.98	25.68	18.96
180km/h	7.35	4.37	18.23	4.78
200km/h	6.59	4.63	29.02	10.04

체에 슬래브를 적용하였으며 그 두께는 15cm로 하였다. 슬래브는 유도상화에 따른 추가사하중으로써의 역할만을 수행할 뿐 응력 부재로 거동하지 않도록 전단연결재(Shear connector)를 생략하였으며 슬래브 두께는 실험실 호이스트 용량을 고려하여 통상의 도상슬래브 소요두께에 미치지 못하는 15cm로 선정하였으나 도상유무에 따른 검토에는 지장이 없을 것으로 판단된다. 하중재하는 0～550kN까지 50kN씩 증가시켜가며 정적재하 실험을 수행하였다. 외부 후긴장 보강은 Centre hole jack(ZEP-2FJ) 2대를 동시에 사용하여 각각의 강연선에 대한 긴장력의 차이를 최소화 하였으며 펌프식 유압조절장치를 이용하여 단계별 긴장을 수행하였다. 긴장력은 유도상의 경우 상부슬래브 인장강도를 고려하여 적정 긴장력을 96KN부터 최대 거더당 138KN까지 조절하여 실험을 수행하였다. 긴장재는 시험체의 주형 하부플랜지에 직선 배치하여 프리스트레스 잭(Prestressing Jack)으로 긴장하였다[1-3]. 또한, 무도상 및 유도상 시험체 중앙에 소정의 가진판을 설치하고 그 위에 원심력을 이용한 가진기(최대가진주파수: 35Hz)를 설치하여 단계별(3단계: 8Hz-17Hz-25Hz) 가진을 통해 도상유무 및 보강에 따른 진동특성을 파악하였다.

한편, 대상 시험체에 있어서 무보강 상태의 하중 재하에 따른 거동, 외부 후긴장 과정의 거동 및 긴장된 시험체의 하중 재하시 거동을 분석하기 위하여 Fig. 11과 같이 변형율 게이지, 유압잭 및 처짐기와 가속도계를 설치하여 실험을 실시하였다.

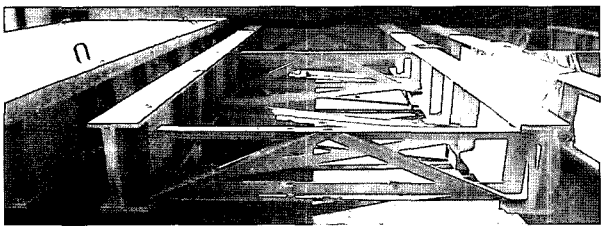


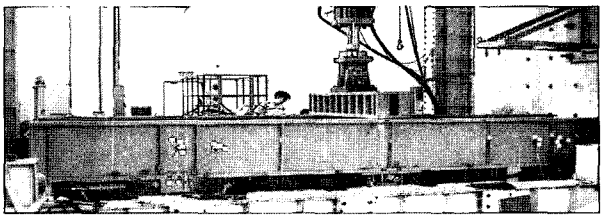
Fig. 9. View of specimens

Table 8. Geometry of specimen

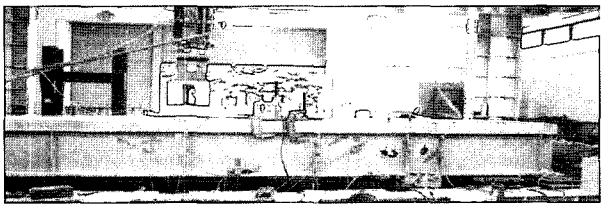
구 분	단 면 치 수(mm)
거더 중심간격(D)	1,600
복 부 판(H×t)	600×16
상부플랜지(B×t)	190×35
하부플랜지(B×t)	190×35
보 강 재	90×9
브레이싱	90×90×10

5.2 정적 응력 및 변위 검토결과

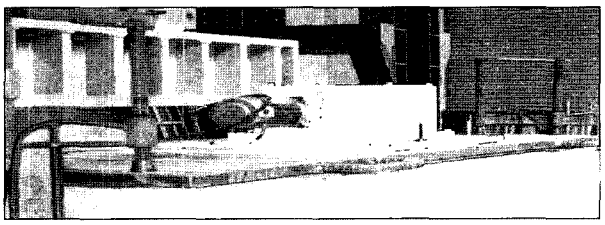
실험 결과 400kN의 하중재하시 무도상 시험체 중앙 하부 플랜지의 발생 응력은 41.19MPa로 나타났으며, 직선보강시 응력은 17.65MPa로 나타났다. 또한 유도상 시험체의 중앙 하부 플랜지 응력은 56.88MPa로 나타났으며, 직선보강시



(a) Non-ballast specimen

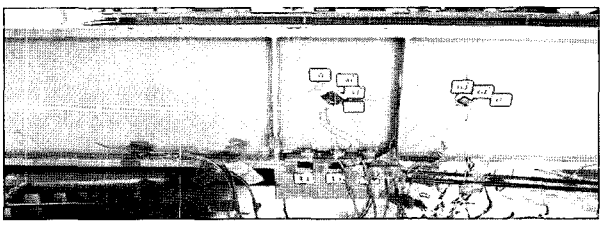


(b) Ballast specimen

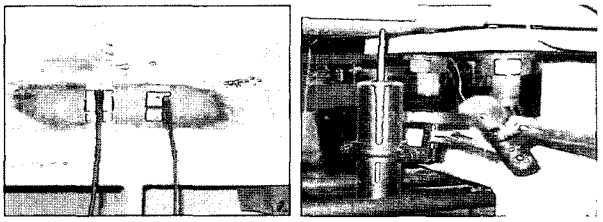


(c) Set up a vibrator(electro exciter)

Fig. 10. View of laboratory test



(a) Attachment of strain gages and prestressing jack



(b) Attachment of LVDT and accelerometer(Vertical/Lateral Axes)

Fig. 11. Sight of the attachment of sensors and jack

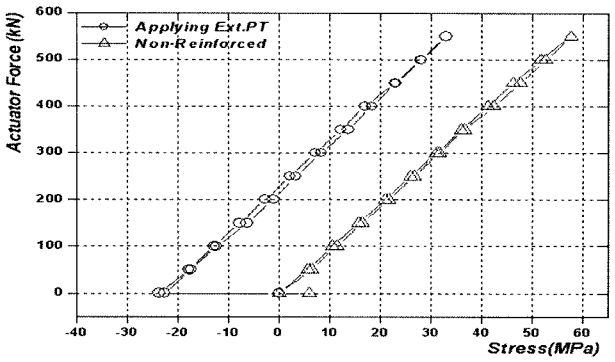


Fig. 12. Test result of non-ballast specimen for stresses

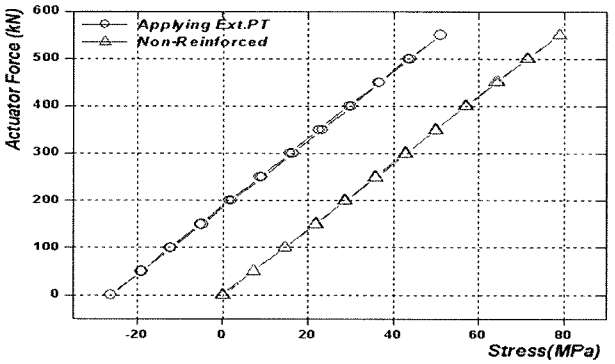


Fig. 13. Test result of ballast specimen for stresses

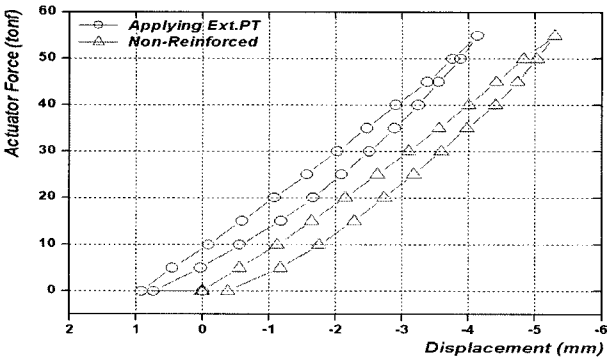


Fig. 14. Test result of non-ballast specimen for displacements

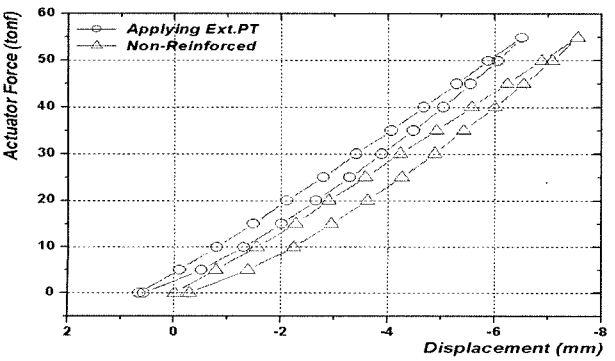


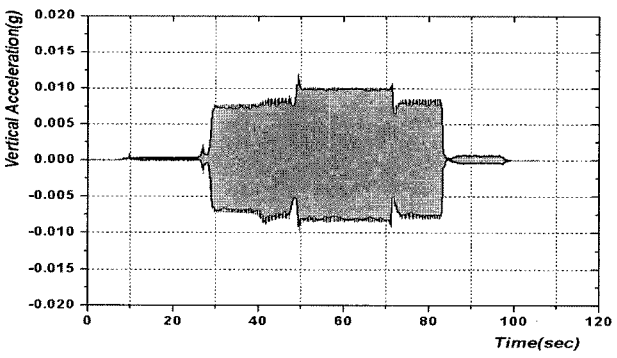
Fig. 15. Test result of ballast specimen for displacements

응력은 29.42MPa로 나타났다. 이에 따라 주형 하부플랜지의 허용응력의 18%만큼의 긴장력 도입시 무보강 시험체의 경우보다 약 50%정도 감소됨을 알 수 있었으며, 무도상 시험체 중앙의 변위를 비교해본 결과 직선보강시가 무보강시보다 적게 나타남으로써 외부 후긴장 보강에 따른 보강효과를 확인하였다.

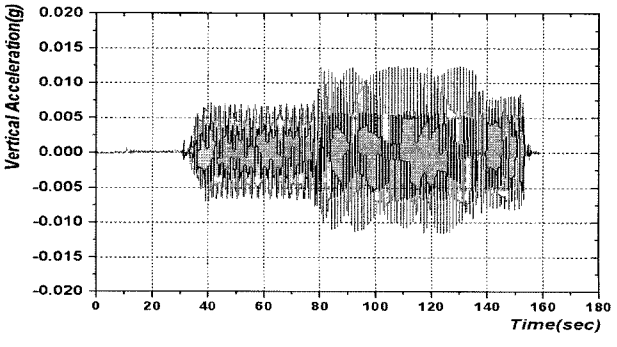
유도상 보강 시험체와 무도상 무보강 시험체의 응력을 비교해본 결과 유도상화에 따른 추가사하중으로 인해 증가된 주형 하부플랜지 응력(29.42MPa)은 긴장력 도입으로 무도상 무보강 시험체의 발생응력(41.19MPa)을 밑도는 결과를 나타냄으로써 긴장력에 따른 뚜렷한 응력감소효과가 나타났다. 이상과 같은 외부 후긴장 보강에 따른 보강효과를 입증할 수 있는 무도상 시험체와 유도상 시험체의 중앙부 하부플랜지의 응력 및 변위를 측정한 결과를 Fig. 12～15에 나타내었다.

5.3 중력방향 진동가속도 검토결과

무도상 시험체와 유도상 시험체의 보강 전, 후의 중력방향 진동가속도를 측정한 결과 무도상 시험체의 경우는 각각 0.011g(보강 전)와 0.012g(보강 후)로 나타났으며, 유도상

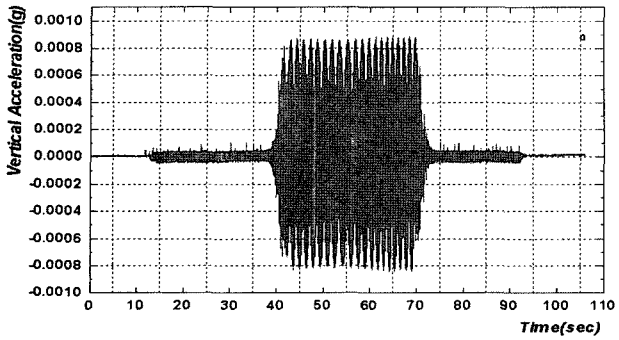


(a) Non-reinforced

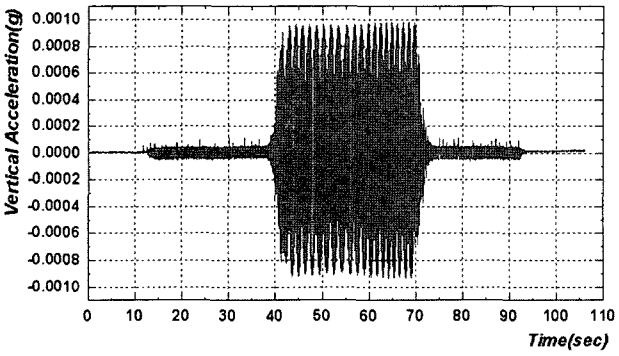


(b) Applying Ext-PT

Fig. 16. Test result of non-ballast specimen for acceleration

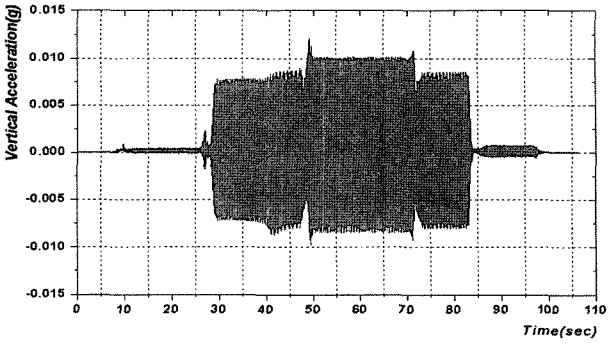


(a) Non-reinforced

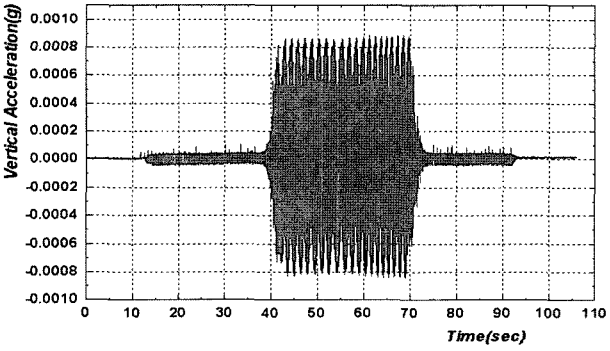


(b) Applying Ext-PT

Fig. 17. Test result of ballast specimen for acceleration



(a) Non-ballast specimen



(b) Ballast specimen

Fig. 18. Comparison of test result with the ballast existence for acceleration

시험체의 경우는 각각 0.0008g(보강 전)와 0.0009g(보강 후)로 나타나 긴장재 및 긴장력 적용 여부에 따라 진동가속도의 크기가 미세하게 변화함을 알 수 있었으며, 유도상화에 따라 0.011g의 진동가속도가 0.0008g로 크게 작아지는 것으로 나타났다.

이는 앞서 수행한 유한요소 해석 결과와 동일한 경향을 보이며, 외부 후긴장 보강에 따른 강철도 판형교의 동적거동 변화는 다소 증가하지만 그 크기는 매우 작기 때문에 외부 후긴장 보강공법의 적용성에 큰 문제가 없음을 보여준다.

또한 유도상화에 따라 진동가속도가 약 10배 정도 작게 나타나는 것으로 나타나 유도상화의 효과를 실험적으로 입증하였다.

6. 결 론

강철도 판형교의 유도상화에 따른 동적특성 및 추가사하중에 의한 내하력 저하 방지를 위한 외부 후긴장 공법의 보강효과 및 적용가능성을 살펴보고자 실험 및 해석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유도상화에 따른 교량의 정적 변위에 있어서는 무도상에 비하여 약 60%정도의 변위 증가가 있으며 정적 응력의 경우에도 상당한 증가를 보이고 있으나 설계기준의 허용 값보다는 작은 것으로 나타났다. 그러나 기존교량의 상당한 노후화로 인한 내구성 저하와 하중 증가에 따른 안전율의 감소로 내하력이 설계시보다 감소될 우려가 있으므로 하중 증가의 영향을 보완할 수 있는 적절한 보수, 보강 대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

(2) 유도상화에 의해 발생된 추가 사하중에 의한 주형 하부 플랜지의 응력증가(+64.11MPa)를 초래하여 장단기적으로 구조물의 내하력 저하를 유발 할 것으로 판단된다. 따라서 보강시 추가 하중에 대한 부담이 비교적 작은 외부 후 긴장 공법으로 보강하여 충분한 내하력을 확보(유도상 응력의 약 50.1%감소)하여 구조물의 내하수명을 증대시킬 수 있으며 종방향 선형을 보완하여 주형 안전성 및 승차감 저하 방지를 위한 보강 방안으로 제시될 수 있음을 해석적으로 증명하였다.

(3) 도상의 유무 및 외부 후긴장 보강에 따른 교량의 고유진동수의 변화를 해석적으로 분석한 결과, 유도상화 됨으로서 구조물 전체적으로 진동에 대한 안전(감소율25~

42%)을 확보 할 수 있었으며, 또한 외부 후긴장 보강 적용에 따라 고유진동수가 다소 증가되는 것으로 나타났으나 강선에 의한 질량의 증가가 거의 없는 것으로 볼 때 외부 후 직선 긴장 보강이 고유진동수의 변화에 미치는 영향이 매우 낮은 것으로 나타났다.

(4) 유한요소해석 결과, 외부 후긴장 보강공법 적용에 의한 예측된 보강효과가 나타났다. 아울러 보강 전, 후 및 도상 유, 무에 따른 고유치 해석과 시간이력해석결과 유도상화에 의해 고유진동수, 동적 변위 및 가속도가 무도상에 비하여 상당히 안정적으로 나타나고 있어 동적안정성에 있어서 유리한 것을 알 수 있었다.

(5) 정적실험결과, 추가 사하중에 의한 주형 하부플랜지의 응력증가는 외부 후긴장 공법의 적용으로 감소시킬 수 있어(유도상 응력의 약 50.1%감소) 공용중인 강철도 판형교의 내하력 증대와 구조적 안정성 확보를 위한 보강방안으로 제시될 수 있음을 해석적, 실험적으로 증명하였다.

(6) 동적실험결과, 유도상화의 경우 무도상에 비해 수직진동가속도가 크게 감소되는 것으로 나타나 진동에 대한 안전을 확보할 수 있었으며, 외부 후긴장 보강공법 적용에 따른 진동가속도는 다소 증가되나 그 영향은 매우 낮은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

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. 백범렬 (2001), 외부 후긴장에 따른 합성보 거동에 대한 실험적 연구.
4. 박영훈, 박용걸, 전준창 (2003), "외부 후 직선긴장 보강공법적용에 따른 합성형의 동적거동", 대한토목학회논문집.
5. Baidar Bakht, and Leslie G. Jaeger : Bridge Analysis Simplified, Mcgraw-Hill Book, 1985, pp.1-149, 159-196.
6. E.C. Hambly : Bridge Deck Behavior, E&PN SPON, 1991, pp.1-221.
7. Robert D. Cook : Finite Element Modelling for Stress Analysis, John Willy & Sons, Inc., 1994. pp.1-40, 105-144.
8. M.S. Troitsky, D. Dc, "Prestressed Steel Bridge Theory and Design", VNR, 1990.
9. 최일윤 (2002), 국내 강철도교의 열화손상 사례분석", 한국강구조학회 춘계학술발표회.
10. 최정열 (2004), 강철도교에 대한 외부 후긴장 보강공법의 적용에 관한 연구.
11. 박용걸, 최정열, 강덕만 (2005) 강철도교에 대한 외부 후긴장 보강공법의 적용에 관한 연구, 한국강구조학회 학술대회논문집, 제16권 1호, pp.486-491.
12. 오지택, 김현민, 박찬 (2003), 무도상판형교의 횡방향 동적거동 특성 분석을 위한 실험적 연구, 한국철도학회 추계학술대회.
13. 김현민, 오지택, 이소진 (2003), 무도상판형교의 횡거동분석을 위한 주행하중 매개변수 연구, 한국철도학회 추계학술대회.
14. 박문석, 오지택, 최진유 (2003), 열차유형에 따른 판형교의 정적거동에 대한 연구, 한국철도학회 추계학술대회.
15. 오지택, 최진유, 김현민 (2002), 무도상판형교의 고유진동특성에 관한 연구, 한국철도학회 추계학술대회.