슬래브궤도가 부설된 고속철도 교량단부 체결장치의 거동

Behavior of Fastening system of HSR bridge ends deck on Slab Track installed Bridge

천대성* 최정열** 안해영*** 박용걸****

Chun, Dae-Sung Choi, Jung-Youl An, hea-young Park, Yong-Gul

ABSTRACT

Deformations of bridge deck ends on abutment can cause extreme deformations on track. Especially, since slab track was fixed onto the bridge deck slab on concrete slab track installed bridges, deformations of bridge deck ends directly affect the slab track behavior, and thus these interactions can bring about the premature failure of rail fastenings or other deteriorations to lower the serviceability. In this study, a foreign standard to evaluate forces on track components caused by the track-bridge interactions and the behavior of bridge deck ends was investigated and for real scale bridges. It was found that rail support spring coefficients, as well as toe loads, support spacing were very important parameters.

Key word : Bridge deck ends(교량단부), Track-bridge interactions(궤도ㅡ교량상호작용)

1. 서 론

교량단부(교량연결부) 또는 교량 상부구조의 연결부에서는 교량 상판단부의 변형(단차 및 회전)에 의한 궤도의 변형이 발생하고 이로 인해 과도한 응력이 작용할 수 있다. 이러한 응력은 궤도의 빈번한 유지보수를 유발할 수 있으므로 그 부분에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다. 그러나 현재까지 국내에서는 교량과 교량단부 콘크리트궤도의 거동특성(상호작용)을 확인하고 이러한 교량단부에서의 체결장치 거동특성을 입증하기 위한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 슬래브궤도가 부설된 고속철도 교량단부 체결장치의 거동특성에 대하여 실험적으로 입증하고자 한다.

2. 교량상부구조의 변형에 의한 단부 체결장치의 거동

레일이 상부구조 위에 고정된 슬래브에 직접 체결되는 콘크리트궤도의 특성상 레일의 변형은 직접체결장치에 전달되며, 레일 지지점에 작용하는 부상력은 체결장치의 초기 체결력 이하로 억제하여야 한다. 그림. 1은 교량 단부에서의 변형에 의한 체결장치의 작용력을 나타내었다.

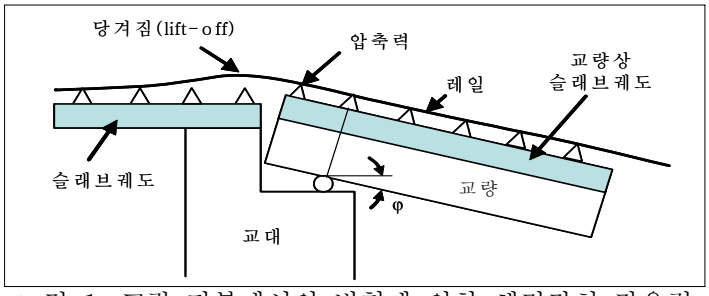


그림 1. 교량 단부에서의 변형에 의한 체결장치 작용력

* 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, 석사과정
E-mail : cds0505@hanmail.net
TEL : (02)978-6575 FAX : (02)971-6575

** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 뉴레일연구소 연구원, 공학석사

*** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, 석사과정

**** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사

3. 실내시험

3.1 실내시험의 개요

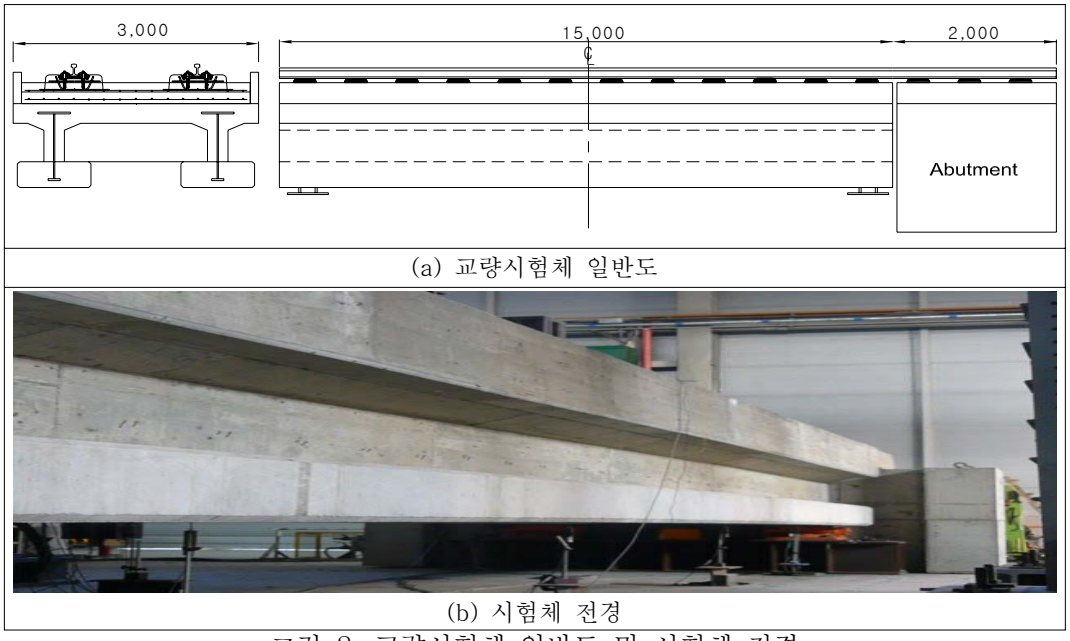
본 연구의 실내시험에서는 교량연장 15m인 강합성 거더 시험체와 교대(Abutment) 역할을 수행할 수 있는 교대 시험체를 제작하여 교량과 교대 상부에 슬래브궤도를 부설하였다. 또한 실내시험을 위한 하중조건은 주행 열차하중에 의한 실제 철도교량의 동적응답과 유사하도록 교량 중앙부 레일 위에 하중이 작용하도록 하였다. 하중조건은 정적최대하중 400kN을 20kN 단위로 단계별 재하하였으며 220kN의 축중에 대한 속도 및 축간거리에 따른 동적 윤중변동을 15%로 고려하여 동적가진시험을 실시하였다. 또한 레일이 상부구조 위에 고정된 슬래브에 직접 체결되는 콘크리트궤도의 특성 상 레일의 변형은 직접 체결장치에 전달되며, 레일 지지점에 작용하는 부상력은 체결장치의 초기 체결력 이하로 억제하여야 한다.

따라서 사용하중과 극한하중상태에서의 교량상판 변형에 따른 단부 체결장치의 거동특성을 파악하여 단부 레일지지점에 작용하는 부상력과 체결장치의 체결력과의 상관관계를 입증하고자 한다. 실내시험을 위한 시험체는 크게 교량, 교대 및 궤도시험체로 구분할 수 있으며 각각의 제원은 표. 1과 같다.

표 1. 시험체 제원

구 분		내 용	
교 량		강합성 거더	연장 : 15m, 교폭 : 3m
		교 대	연장 : 2m, 폭 : 3m
궤도	궤도형식	콘크리트 궤도(침목매입식)	
	레 일	60kg K	
	침 목	ERS침목(RC 침목)	
	방진패드	스프링계수 : 17.5kN/mm, 두께 : 10mm	
	체결시스템	Vossloh System 300-1	

그림. 2는 실내시험에 적용한 강합성 거더의 일반도와 실험실에 설치된 전경을 나타내며, 교량상 슬래브궤도의 부설전경은 그림. 3과 같다.



(a) 교량시험체 일반도

(b) 시험체 전경

그림 2. 교량시험체 일반도 및 시험체 전경

(a) 슬래브궤도 일반도

(b) 교량단부 슬래브궤도 부설 전경

그림 3. 슬래브궤도 부설 전경

3.2 실험방법 및 하중재하 조건

실내시험은 교량과 교대 상부에 슬래브궤도를 부설하고 교량단부회전이 최대가 되어 단부 체결장치의 부담력이 최대가 될 수 있도록 교량중심에 정격하중 1,000kN인 Actuator를 설치하여 정적재하시험과 동적가진시험을 실시하였으며, 실내시험에 적용한 하중재하 조건을 정리하여 표. 2에 나타내었다.

표 2. 하중재하 조건

하중 조건	비 고
① 정적재하시험 : 0kN ~ 400kN	단계별 20kN씩 하중재하
② 동적가진시험 : 220kN(176±44.0kN)	가진주파수 : 1 ~ 18Hz

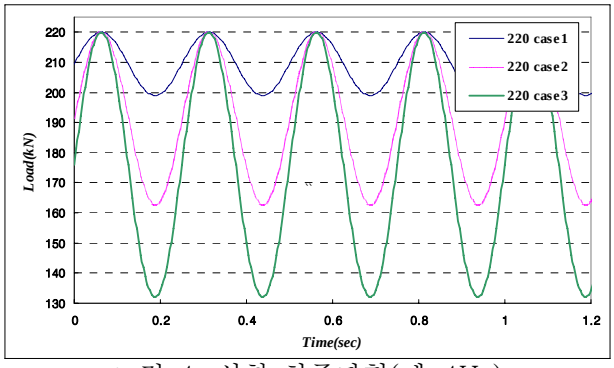


그림 4. 실험 하중파형(예-4Hz)

본 실험에서 적용한 가진하중파형은 Sine 파형으로써 최대하중 220kN을 도입할 수 있도록 동적하중 변동을 고려한 초기하중과 증폭하중을 그림. 4와 같이 모델링하여 실험에 적용하였다. 이때 가진주파수는 실험의 안전을 위해 가력프레임의 공진주파수 대역을 피하고 시험체의 공진주파수를 포함할 수 있도록 설정하여 1~18Hz까지 고려하였다.

3.3 측정항목 및 방법

교량구간과 교량단부(교량연결부)를 중심으로 교량변위 8개, 레일변위 4개, 레일지지점 변위 6개, 레일저부응력 4개, 체결구응력 5개의 센서를 설치하여 측정을 실시하였으며 교량 및 궤도각부의 센서설치 위치도는 그림. 5와 같다.

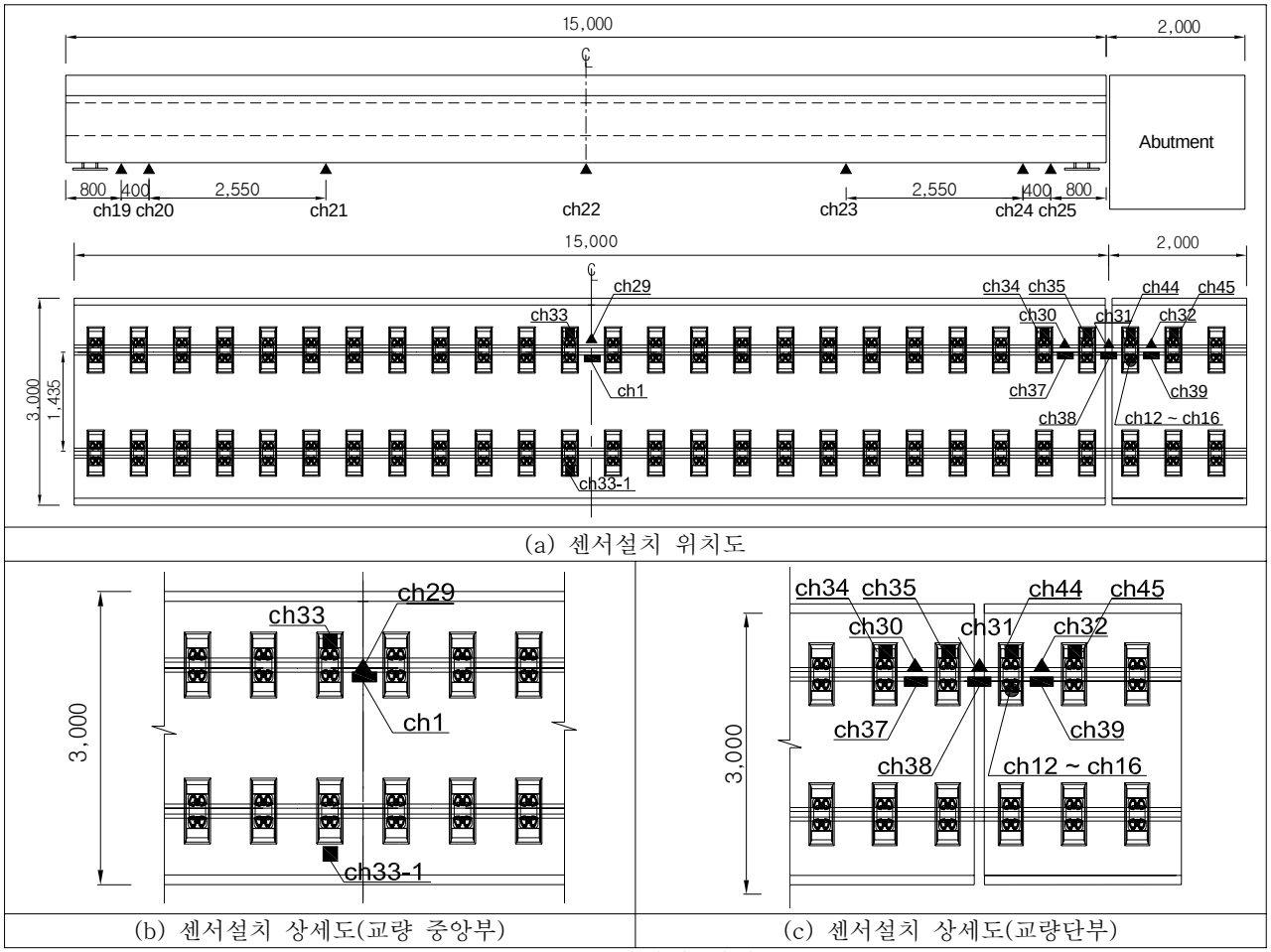


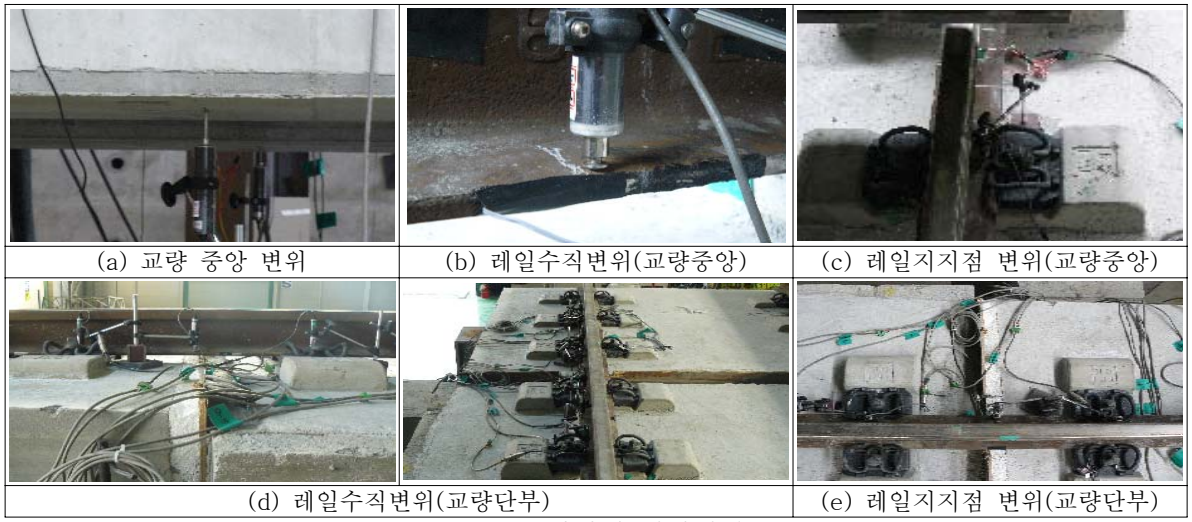
그림 5. 센서설치 위치도

1) 변위

경간중앙과 교량 단부에서의 교량변위, 레일 및 레일지지점 변위(패드변위 혹은 레일들림)를 측정하였으며 그림. 6은 변위계 설치전경을 나타낸다.

변위계 설치는 모두 변위계의 스트로크가 하향으로 발생되도록 설치하였으므로 측정결과에서 (-)는 상향변위를, (+)는 하향변위를 의미한다.

또한 레일지지점 변위의 경우에는 레일직하부 탄성패드의 변위를 직접 측정하기에 무리가 있으므로 침목상부의 레일에서 발생되는 변위량으로 가늠하고자 한다. 따라서 단부 레일지지점 변위측정시 위치에 따라서는 패드변위가 측정되는 것이 아니라 레일의 들림량이 측정됨으로써 레일의 lift off 수준을 판단할 수 있도록 변위계를 설치하였다.



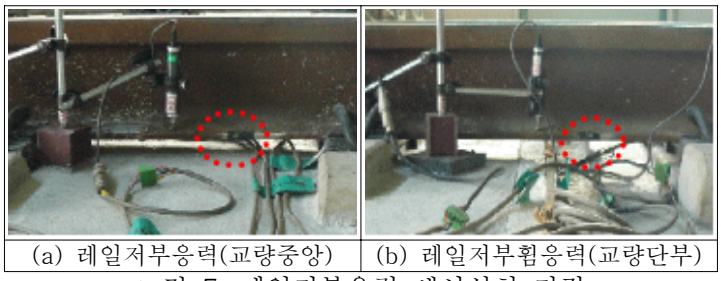
(a) 교량 중앙 변위 (b) 레일수직변위(교량중앙) (c) 레일지지점 변위(교량중앙)

(d) 레일수직변위(교량단부) (e) 레일지지점 변위(교량단부)

그림 6. 변위계 설치전경

2) 레일저부응력

정, 동적 시험하중에 의해 발생하는 레일 저부응력을 파악하고자 교량중앙부와 교량단부 소정의 위치에 휨응력이 가장 크게 발생하는 침목과 침목사이 중앙의 레일 저부 측면에 1축 스트레인 게이지를 종방향으로 설치하였으며 설치전경은 그림. 7과 같다.



(a) 레일저부응력(교량중앙) (b) 레일저부휨응력(교량단부)

그림 7. 레일저부응력 센서설치 전경

3) 체결구 응력(교량 단부)

레일이 상부구조에 고정된 슬래브에 직접 체결되는 콘크리트 궤도의 특성에 따라 교량상부구조의 변형은 레일의 변형을 유발하게 된다.

따라서 교량단부 변형에 따른 단부 체결장치 각부의 영향을 파악하고, 체결구 자체의 응력특성에 대해 검토하고자 체결구(텐션클램프) 각부에 1축 스트레인 게이지를 부착하였으며, 센서설치 전경은 그림. 8과 같다.

그림 8. 체결구 센서설치 전경

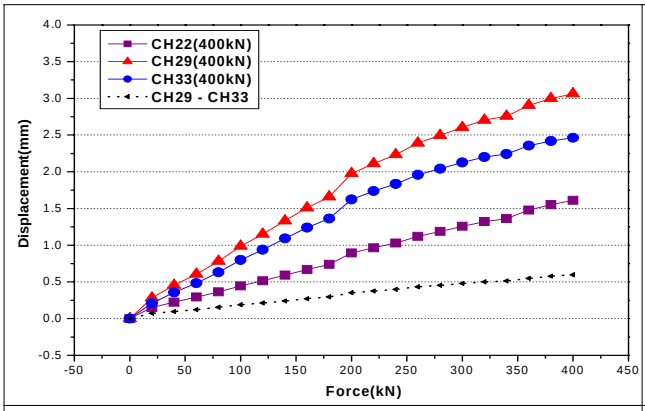
4. 측정결과 및 분석

1) 변위측정결과

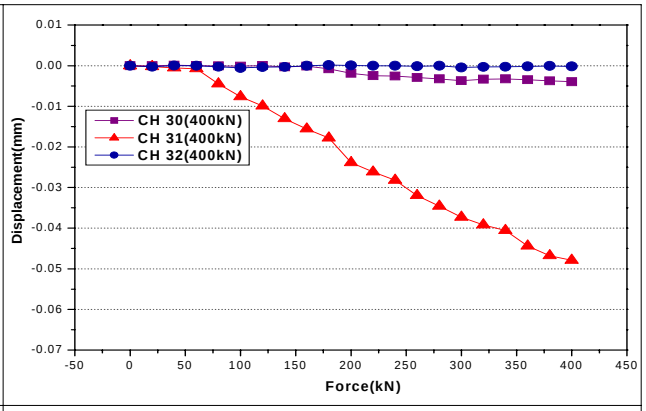
① 정적재하시험

정적재하시험에 따른 교량과 궤도의 변위측정결과를 그림. 9에 나타내었다. 그림. 9(a)와 같이 중앙부 교량변위와 레일변위는 약 50% 정도 레일변위가 크게 나타났다. 그러나 여기서 레일의 수직변위는 레일지지점 변위를 포함하므로 레일자체의 변형수준을 파악하기 위해서는 그림. 9(a)의 점선과 같이 레일지지점 변위(패드변위)를 제외한 변위량으로 판단함이 바람직하다. 따라서 교량중앙부와 단부에서의 레일 변형 관계를 검토한 결과, 본 실험에서 적용한 시험체의 경우 교량단부 레일의 변위는 중앙부 레

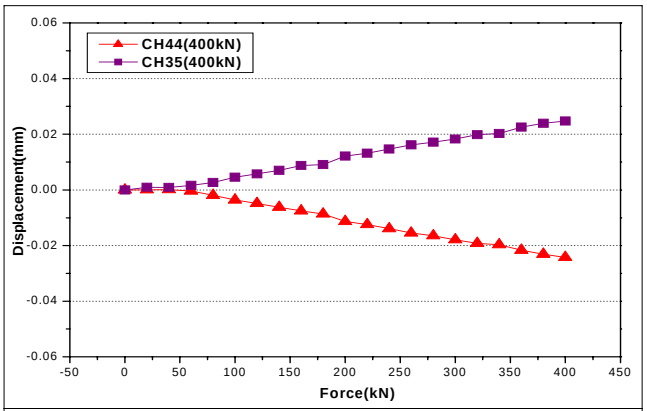
일 변위의 약 10% 수준인 것으로 분석되었다. 또한 그림. 9(b)의 교량단부 레일변위 측정결과는 중앙부 레일변위보다 크게 작은 것으로 나타났으나 교량상부구조의 처짐은 단부레일의 변형에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 단부 레일은 하중재하에 따른 교량의 처짐에 의해 그림. 9(b)의 ch30, ch31과 같이 교량과 교대연결부에서 레일의 상향거동이 나타났으나 교량상판 변형에 따른 레일변형의 영향은 교대부 레일(ch32)에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.



(a) 중앙부 교량 및 궤도변위



(b) 레일수직변위(교량단부)



(c) 레일지지점 변위(교량단부)

그림 9. 정적 변위측정결과

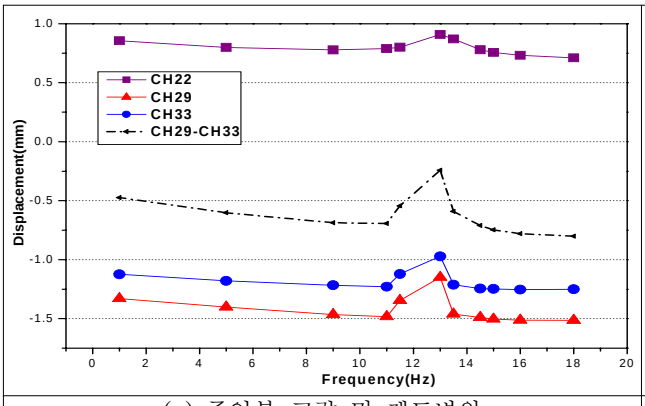
레일지지점 변위 측정결과, 그림. 9(c)와 같이 교량측 마지막 침목과 교대측 첫 번째 침목에서의 변위 발생경향이 각각 압축, 들림으로 나타나 교량단부에서의 변형에 의한 체결장치의 작용력을 실험적으로 입증하였다. 교량측 마지막 침목의 패드는 교량의 변형과 함께 하향 처짐이 발생하여 압축상태로 변화되나 교대측 첫번째 침목의 패드는 레일의 상향거동에 따라 오히려 초기 압축력의 상태보다 작은 변형이 발생되었을 것으로 예측되었다.

그러나 측정결과가 매우 작은 것으로 나타나 단부레일의 상향거동(부상력)에 따른 패드의 이동 혹은 탈락현상은 사용하중상태에서 안정적인 것으로 판단된다. 또한 정적최대하중 400kN 재하시 교량중앙부와 교량측 마지막 침목의 패드변위가 패드의 압축 변형한계(패드 두께의 10~20%)를 만족하는 것으로 분석되어 사용하중상태에서의 교량거동에 따른 패드의 변형은 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

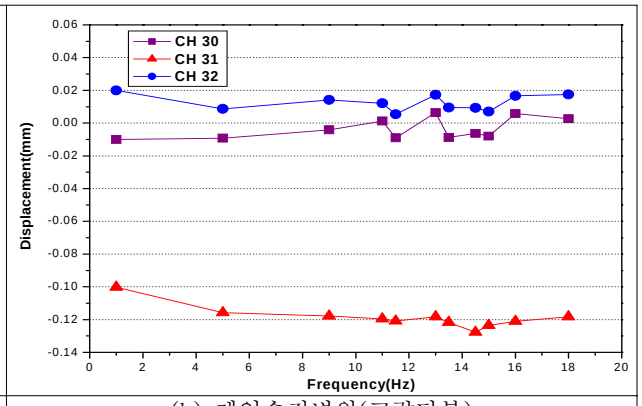
② 동적가진시험

교량 중앙부와 단부에서의 교량과 궤도의 변위 측정결과를 그림. 10에 나타내었다. 가진주파수 변화에 따른 교량과 궤도의 변위 측정결과, 교량과 궤도 모두 시험체의 공진주파수 대역인 13.5Hz에서 최대 변위응답이 나타났다. 그러나 공진주파수 대역을 제외하고는 가진주파수의 변화가 궤도변위에 미치는 영향은 측정위치와 무관하게 매우 작은 것으로 나타났다. 교량 중앙부에서는 교량과 궤도의 동적변위가 정적변위 보다 약 25% 작게 나타나는 것으로 분석되었으나 교량단부 레일의 동적변위는 정적 변

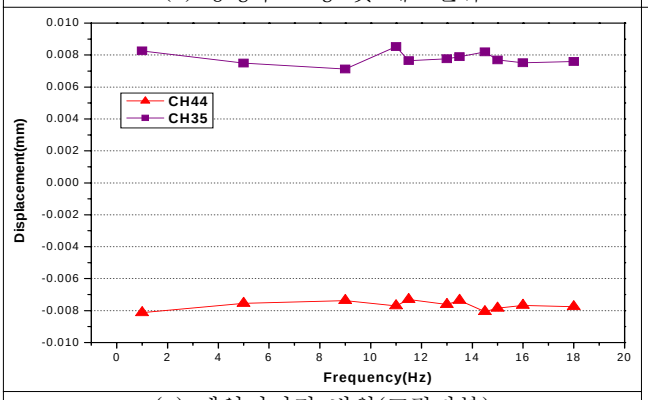
위 보다 약 3배 정도 크게 나타났다.



(a) 중앙부 교량 및 궤도변위



(b) 레일수직변위(교량단부)



(c) 레일지지점 변위(교량단부)

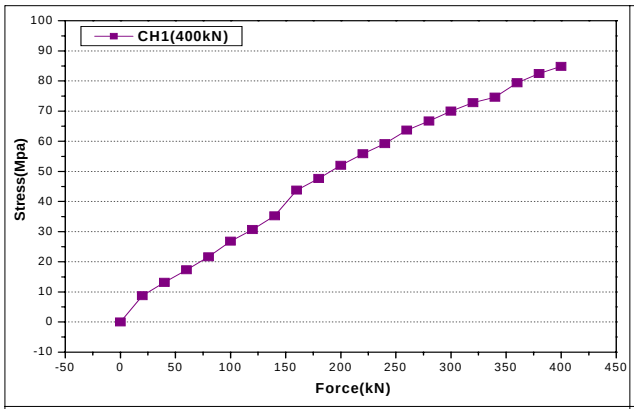
그림 10. 동적 변위측정결과

동적가진시험을 통한 레일지지점 변위 측정결과, 그림. 10(c)와 같이 교량측 마지막 침목과 교대측 첫번째 침목에서의 변위발생경향이 각각 압축(+), 들림(-)으로 나타나 교량단부에서의 변형에 의한 체결장치의 작용력을 실험적으로 입증하였으며 정적재하시험의 결과와 동일한 경향으로 나타났다. 또한 가진주파수 변화는 교량단부 레일 및 레일지지점 변위응답특성에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

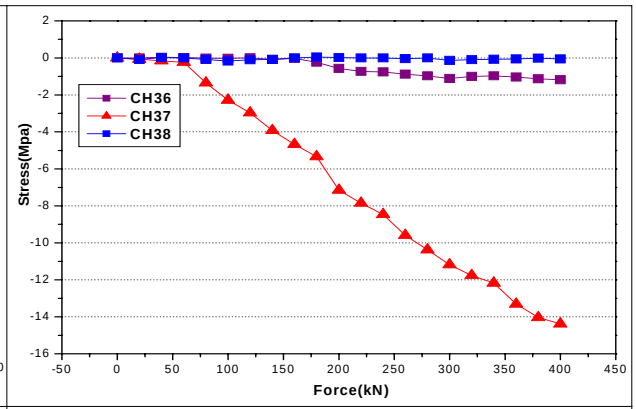
2) 레일저부응력 측정결과

① 정적재하시험

교량중앙부와 단부의 정적 레일저부응력 측정결과는 그림. 11과 같다. 정적 레일저부응력 측정결과, 교량중앙부와 단부에서의 레일휨응력 발생경향이 레일변위 측정결과와 동일하며 단부 레일의 응력수준은 중앙부 레일의 약 18% 수준인 것으로 나타났다. 또한 교량상부구조의 변형에 의한 단부레일의 허용휨응력 기준이 80MPa인 것을 감안할 때 사용하중상태에서 안정적인 것으로 판단된다.



(a) 레일저부응력(교량중앙부)

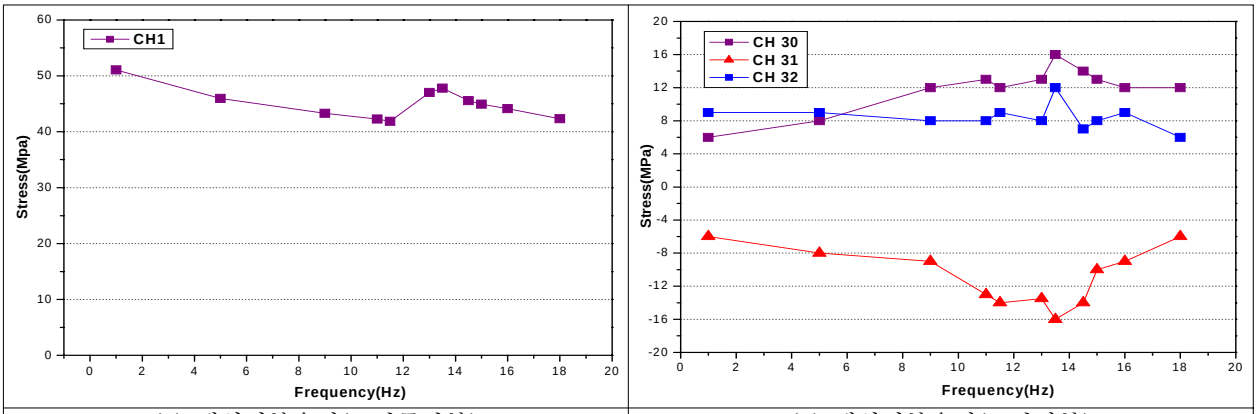


(b) 레일저부응력(교량단부)

그림 11. 정적 레일저부응력 측정결과

② 동적가진시험

동적가진시험 결과 역시 레일의 동적 변위응답특성과 유사하며 정적응력수준보다 약 10% 정도 작게 나타났다. 또한 시험체의 공진주파수 대역인 13.5Hz에서 최대응답이 나타났으나 가진주파수 변화에 따른 레일저부응력의 변화는 매우 작게 나타났다.



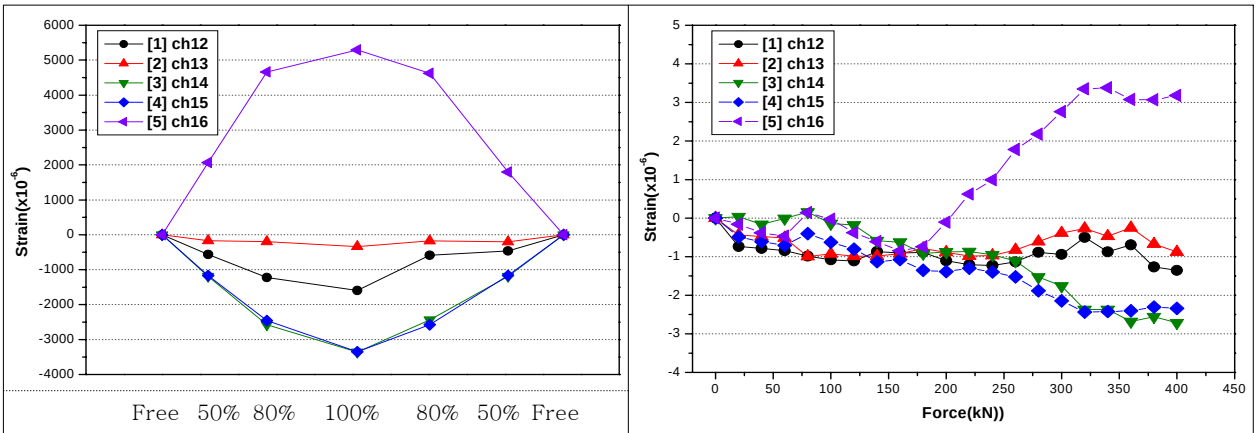
(a) 레일저부응력(교량중앙부) (b) 레일저부응력(교량단부)

그림 12. 동적 레일저부응력 측정결과

3) 체결구 응력

① 정적재하시험

본 연구에서 적용한 체결장치의 체결구는 텐션클램프(skl-15)로써 체결력 조정을 토크렌치의 토크치로 조정하도록 되어 있다. 따라서 정량적인 체결력 도입이 가능하며 체결력 손실에 따른 체결구의 거동 특성 파악을 위해 체결력 도입 및 해체에 따른 체결구 각부의 응력수준을 검토하였으며 그 결과를 그림. 13(a)에 나타내었다.(여기서, 체결력 100%는 토크치 250N·m 도입시 체결력 19kN을 의미함.)



(a) 체결력 도입단계별 체결구 응력 (b) 정적 체결구 응력

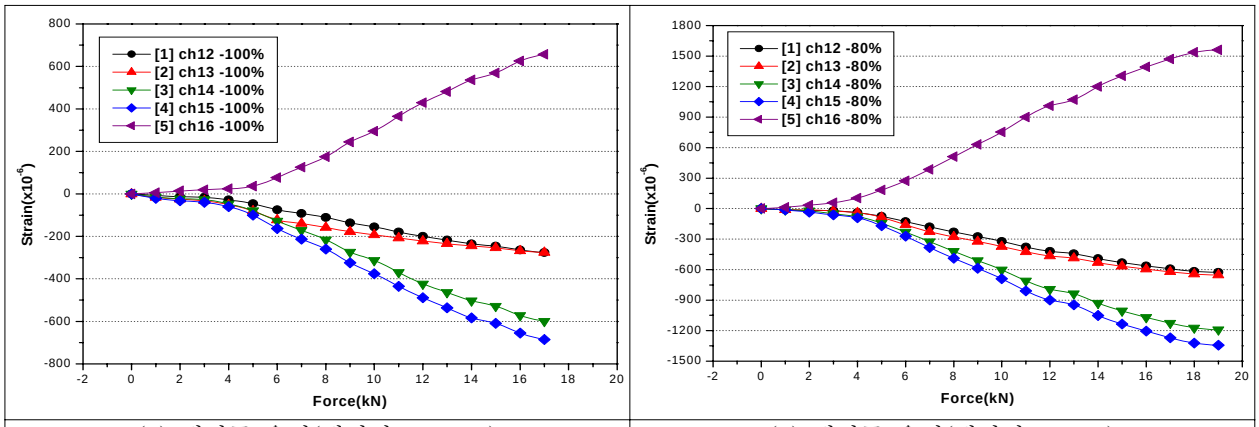
그림 13. 정적 체결구 응력 측정결과

그림. 13(a)은 외부하중이 없는 상태에서 체결력(토크)만을 도입하였을 경우의 체결구 각부에서 발생된 변형률을 의미한다. 또한 체결력 도입에 따라 텐션클램프의 [5]번 부분에는 큰 인장력이 도입되나 기타 부분에는 압축력이 도입되는 것으로 나타났다. 이러한 인장력과 압축력은 체결구가 외부하중을 지지하기 위한 보강력으로 작용하는 것으로 예상되며 이것은 정적하중 400kN 재하시 측정된 체결구 각부의 응력상태를 나타낸 그림. 13(b)로서 입증하였다. 외부하중작용에 의해 각 위치별 초기 변형율이

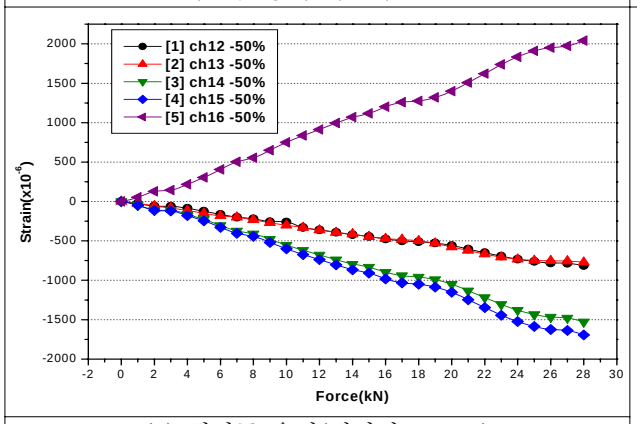
감소하는 것으로 나타났으며 이것은 텐션클램프의 구조적 특성상 초기 체결력(토크)에 의해서 [1]번~[5]번까지 압축~인장의 응력상태를 확보하고 외부하중작용시에는 각각의 위치별로 반대 응력상태로 변화하게 되는 것이다. 즉, [1]번~[4]번까지는 인장응력이 작용되며, [5]번에는 압축응력이 작용되는 것을 의미한다. 따라서 초기체결력은 단순히 레일 지지를 위한 힘 뿐만 아니라 체결구(텐션클램프) 자체의 응력을 사용하중상태에서 양호한 수준으로 확보하기 위해 도입된 보강력을 의미하는 것으로 검토되었다.

교량상부구조의 변형에 따라 단부체결장치는 부상력을 받게 되며 이러한 현상은 앞서 기술한 변위와 레일저부응력 검토결과에서 실험적으로 입증하였다. 따라서 단부체결장치에 작용하는 부상력이 체결구에 미치는 영향을 검토하고자 부상력(up-lift) 실험을 시행하였다.

본 연구에서는 교량중앙부에서 재하하는 하중조건하에서는 단부에 작용하는 부상력이 미소하여 단부체결장치에 미치는 영향을 뚜렷하게 파악하기에 부족한 것으로 판단되어 부상력이 최대가 되는 교대측 첫번째 침목(레일지지점)에 인접하여 정적하중재하를 실시하였으며 하중재하 방향은 레일에 상향력을 도입 할 수 있도록 셋팅하였다.



(a) 체결구 응력(체결력 : 100%)　　(b) 체결구 응력(체결력 : 80%)



(c) 체결구 응력(체결력 : 50%)

그림 14. 부상력 작용시 체결구 응력 측정결과

하중은 1kN씩 단계별로 재하하였으며 그림. 14와 같이 체결력을 100%, 80% 및 50%로 조절하면서 시험을 수행하였다. 부상력 시험결과, 체결구 각부의 거동은 비교적 선형으로 나타났으나 체결력이 작을수록 체결구의 하중-변형률선도의 기울기가 커지는 것으로 나타났으며 체결력의 감소는 체결구 각부의 응력증가로 나타났다. 사용하중상태에서의 단부체결구의 응력상태는 매우 미소하나 단부체결장치의 체결력 확보는 체결구의 장기사용수명과 연관이 있음을 실험적으로 입증하였다.

② 동적재하시험

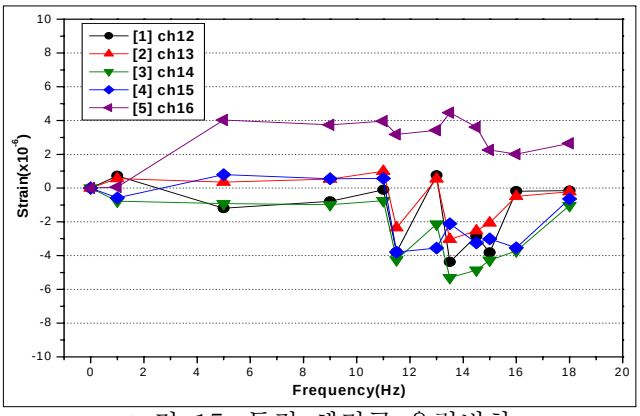


그림 15. 동적 체결구 응력변화

동적가진에 의한 체결구 각부의 응력검토 결과, 그림. 15와 같이 정적재하시험결과 보다 다소 높은 수준으로 나타났으나 그 편차는 크지 않으며 시험체의 공진주파수대역에서 다소 높은 변형률이 측정되었으나 발생경향이 일정치 않은 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 슬래브궤도가 부설된 교량의 단부 체결장치의 거동을 검토하기 위해 실내시험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 변위 및 레일저부응력 검토결과, 본 실험에서 적용한 시험체의 경우 교량단부 레일의 변위는 중앙부 레일 변위의 약 10% 수준이며, 레일저부응력은 약 18% 수준인 것으로 분석되었다. 또한 레일지지점 변위 측정결과, 교량측 마지막 침목과 교대측 첫번째 침목에서의 변위발생경향이 각각 압축, 들림으로 나타나 교량단부에서의 변형에 의한 체결장치의 작용력을 실험적으로 입증하였다.
2. 가진주파수 변화에 따른 교량과 궤도의 변위 및 레일저부응력 측정결과, 교량과 궤도 모두 시험체의 공진주파수 대역에서 최대응답이 나타났으나 가진주파수 변화는 교량단부 레일 및 레일지지점 변위응답 특성에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.
3. 체결구 응력 검토결과, 본 실험에 적용된 체결장치의 초기체결력은 체결구(텐션클램프)자체의 응력을 사용하중상태에서 양호한 수준으로 확보하기 위해 도입된 보강력으로서의 의미도 있는 것으로 검토되었다.
4. 또한 부상력 시험결과, 체결력이 작을수록 체결구의 하중-변형률선도 기울기가 커지는 것으로 나타났으며 체결력의 감소는 체결구 각부의 응력증가로 나타났다. 사용하중상태에서의 단부체결구의 응력상태는 매우 미소하나 단부체결장치의 체결력 확보는 체결구의 장기사용수명과 연관이 있음을 실험적으로 입증하였다.

참고문헌

1. 김정일 외 3명 (2005) “고속철도 궤도패드의 최소 수직 스프링계 결정에 관한 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집
2. 최은수 외 3명 (2005) “철도교량용 고무패드의 특성 및 강성 추정기법”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집
3. D.J. Thompson and J.W. Verheij.(1997), The Dynamic Behaviour of Rail Fasteners at High Freqencies. Applied Acoustics, Vol. 52, No. 1, pp.1-17