

체결장치의 수직 방향에 대한 실험적 연구

An Experimental Study of Fastening System for Vertical Directions

김 정 훈* 한 상 윤** 임 남 형*** 강 영 중****
Kim, Jung Hun Han, Sang Yun Lim, Nam Hyoung Kang, Young Jong

ABSTRACT

Several countries including Korea, Japan and European countries have reached the stage of planning, constructing their high-speed railway systems. High-speed train will become a key tool for intercity passenger transportation. Before that, safety of high-speed train must be secured. It is connected directly with track. The track is composed of ballast, tie, fastening and rail. Also, the fastening system makes tie and rail connect. In this case of the railway bridges used concrete slab track, the deflection of the bridge cause uplife of the rail at the areas between segments. In the structural analysis about it, stiffness of the fastening systems has been assumed. Therefore, use of the stiffness according to an experimental study needs. In this study, the stiffness values of various types of fastening systems are determined by the experiment and the structural behavior of fastening system is analyzed.

1. 서 론

철도 시스템은 크게 차량과 궤도로 나눌 수 있으며, 이 중 궤도는 레일 위를 달리는 차량에 직접적인 영향을 주는 것이기 때문에 안전성을 확보하지 않으면 대형 참사를 초래할 수 있다. 따라서 궤도 기술의 발전은 반드시 필요하다.

궤도는 열차를 정해진 길로 유도하는 역할을 할 뿐만 아니라 하부로 전달되는 열차 하중을 완화하여 하부 구조물을 보호하는 역할을 한다. 이러한 궤도는 노반 위에 부설된 도상, 침목, 체결장치 그리고 레일로 구성되어 있다. 이들 중 체결장치(fastening system)는 레일을 침목이나 슬래브 등의 지지물에 고정하여 궤간을 유지함과 동시에 차량 주행 시에 차량이 궤도에 주는 여러 방향의 하중이나 진동에 저항하고, 이들을 침목, 도상, 노반으로 분산 혹은 완충하여 전달하는 기능을 하는 중요한 구성요소이다. 일반적으로 체결장치는 6자유도를 가지며, 본 논문에서는 체결장치의 3개의 병진방향과 3개의 회전방향에 대하여 그림 1과 같이 정의 하였다.

* 정회원, 고려대학교 강구조공학협동과정학과 공학석사, 미래철도구조시스템연구실

E-mail : zamsin97@korea.ac.kr

TEL : (02)921-5166 FAX : (02)921-5166

** 고려대학교 강구조공학협동과정학과 박사과정, 공학석사

*** 충남대학교 토목공학과 교수, 공학박사

**** 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사

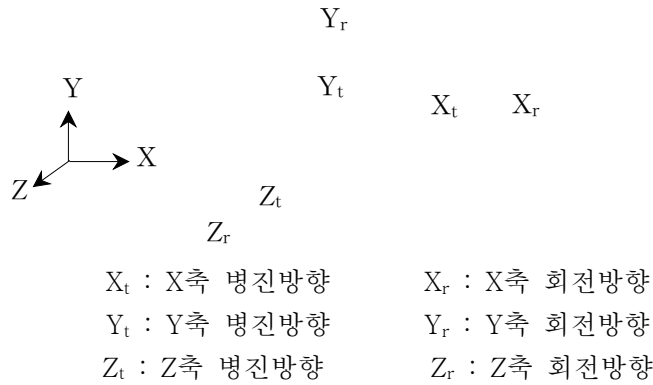


그림 1. 체결장치의 각 방향 정의

정의된 체결장치의 수직 방향(Y축 병진방향)에 대한 특성이 궤도 시스템에 미치는 영향은 다음과 같다.

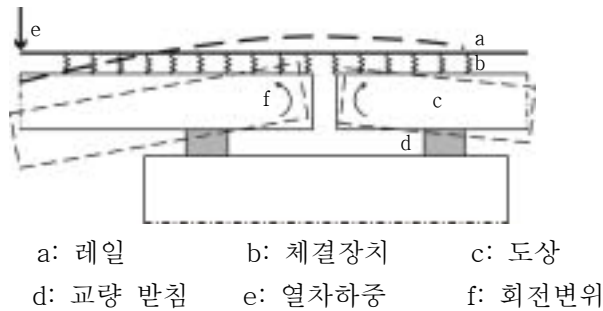


그림 2. 철도교량 단부에서의 레일 체결장치의 거동

그림 2와 같이 철도교량에서 열차하중에 의한 교량의 처짐으로 인하여 교량 단부에서는 회전 변위에 의한 상향력이 발생하게 된다. 이러한 상향력은 교량 단부에서 레일과 도상을 연결한 체결장치에 수직 방향으로 압축 또는 인장력을 유발한다. 이 때 발생하는 압축 및 인장력은 체결장치의 변형 및 파손에 원인이 되어 궤도의 안전성을 저하시킬 우려가 높다. 그러므로 철도교량 단부의 상향력에 대한 구조해석을 수행하여 안전성의 검토가 필요하다. 이에 관한 해석적 연구로서 이주헌 등(2006)은 콘크리트 도상 궤도에서 교량단부 상향력 해석의 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 체결장치를 스프링 요소로 모사하였으며, 실험으로 얻은 체결장치의 강성을 적용하여 구조해석을 수행하였는데 여기서 사용한 체결장치의 강성은 KIMM(한국기계연구원, 2005)에서 수행한 경부고속철도용 레일체결장치 성능시험 중 레일패드의 정적 수직 스프링 계수값이다. 이 실험은 레일 패드에 압축력을 재하하여 하중과 변위를 측정 한 것으로서 체결장치에 수직 방향으로 압축력이 작용한 경우에 대한 강성 값이다. 이에 대해서는 체결장치가 레일패드의 강성으로써 저항하게 되므로 구조해석 시 반영할 강성으로써 타당하다. 그러나 체결장치에 수직 방향으로 인장력이 작용한 경우에 대해서는 체결장치가 체결클립의 강성으로써 저항하게 되므로 구조해석 시 체결장치에 인장력을 재하하여 하중과 변위를 측정 한 강성을 반영해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 현재 가장 많이 쓰이는 P.C침목을 사용한 궤도의 다양한 체결장치에 대하여 인장력을 재하한 수직 방향에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 실험에 앞서 신뢰할 수 있는 실험 결과를 얻기 위하여 실험체들에 대해 체결력 실험을 수행하여 기준되어 있는 체결력들과 비교하였다. 그리고 모든 실험체들은 탄성구간에서 수직 방향에 대하여 실험을 수행하여 그 결과를 분석하였으며, 현재 가장 많이 사용되고 있는 실험체에 대하여 수직 방향의 비탄성 실험을 수행하여 극한 거동을 분석하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험체의 종류

체결장치는 크게 레일클립, 레일패드, 절연블록, 베이스 플레이트(필요에 따라 추가로 설치)로 구성되어 있다. 본 연구의 실험체는 표 1과 같이 현재 고속철도, 국철, 지하철 등에서 실제 사용 중이며, 생산 가능한 제품을 중심으로 구성하였다.

표 1. 실험체의 종류

구분	FS-1	FS-2	FS-3	FS-4	FS-5	FS-6
Clip	Type A	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
Rail	KS60	UIC60	UIC60	KS50	KS50	UIC60
Rail Pad	EVA	Studded Rubber	Studded Rubber	EVA	EVA	EVA
Tie	P.C.	P.C.	P.C.	P.C.	P.C.	P.C.

※ FS: Fastening System

2.2 실험 방법

체결장치의 실험적 연구를 위해 그림 3과 같이 P.C침목, 체결장치 그리고 레일을 결합한 실험체를 실험장소에 설치된 가력기(Actuator)와 정확히 수평과 수직을 일치시켜 침목을 수직방향으로 강판에 볼팅하여 고정시켰다. 그리고 가력기와 레일을 연결하는 지그를 볼팅으로 결합 후에 하중을 재하 하였다.

실험체는 그림 3과 같이 250kN과 500kN의 가력기(MTS: Material Test Systems)를 사용하여 하중을 재하 하였으며, 제어장치를 통해 하중과 축방향 변위를 실시간으로 측정 하였다. 레일과 P.C침목의 상대변위를 측정하기 위한 변위계의 변위와 가력기의 재하 하중은 UCAM-20A를 통하여 실시간 그리고 1초 간격으로 동시에 측정하였다. 또한 하중은 0.05mm/sec 속도의 변위제어 모드(displacement control mode)로 두 대의 가력기를 정확히 동시에 컨트롤하여 재하 하였다.



그림 3. 체결장치 실험

실험 방법은 CEN 규정(유럽 체결장치 성능 시험 규정, 2002)을 참고하여 수행하였으며, 레일과 P.C 침목의 상대변위를 측정하기 위한 변위계의 위치는 그림 4와 같다. 레일과 침목의 상대변위측정은 체결 장치와 가장 근접한 부분이 가장 정확하다고 판단된다. 그리고 가력기의 편심의 여부를 검증하기 위하여 ①, ②, ③과 같이 변위계를 설치하였다. 하중은 가력기의 가력부에 설치한 지그와 레일을 볼팅으로 연결시켜 수직방향으로 인장력을 재하 하였다.

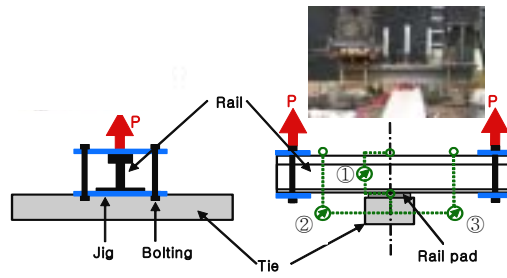


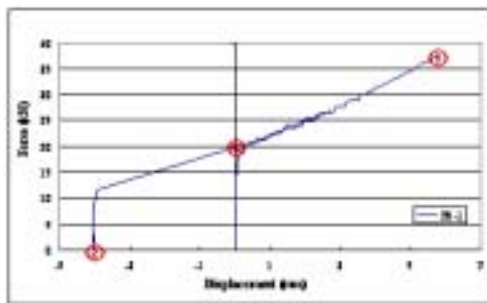
그림 4. 체결장치 실험의 하중 재하 방법 및 변위 측정위치

3. 실험 결과 및 분석

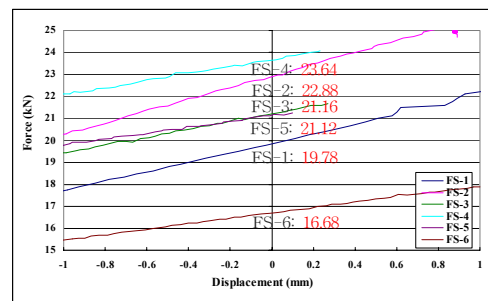
3.1 체결력 실험

체결력 실험은 체결클립이 레일과 클립걸이에 체결되었을 때 체결력을 측정하기 위한 실험이다. 체결 장치의 각 방향에 대한 강도는 체결력에 의해 많은 영향이 있다. 신뢰할 수 있는 실험 결과를 얻기 위하여 실험을 위해 설치한 체결장치가 기준 체결력에 근접한 체결력을 가지고 있는지에 대해 알아보았다. 체결력 실험은 CEN 규정에 준하여 체결력 실험을 4번 수행한 후에 처음의 실험결과를 버리고, 나머지 3회 수행한 실험 데이터의 평균값으로 체결력을 산정하였다.

체결력의 실험방법은 그림 5(a)와 같이 초기변위(0)를 측정한 후 하중을 ①까지 증가시킨다. 다음은 레일패드를 제거한 후 하중을 ②까지 감소시킨다. 그리고 다시 하중을 ③까지 증가시켜 초기변위(0)일 때의 하중이 초기 체결력이다.



(a) 체결력 실험



(b) 실험체들의 체결력

그림 5. 하중 - 변위 곡선

그림 5(b)는 각 실험체들의 체결력을 실험한 결과 중 그림 5(a)의 ③부분을 나타낸 것이다. 표 2는 체결장치의 기준 체결력과 실험한 실험체의 체결력을 비교한 것이다. 모두 기준 체결력에 근접하고 있으며 체결력은 레일클립, 절연블록의 상태, 체결 정도에 따라 조금씩 다를 수 있다.

표 2. 실험체의 체결력과 기준 체결력의 비교

구분	기준 체결력	실험체 체결력
FS-1	11~14kN × 2EA	9.89kN × 2EA
FS-2	11~14kN × 2EA	11.44kN × 2EA
FS-3	9~10kN × 2EA	10.58kN × 2EA
FS-4	9~10kN × 2EA	11.82kN × 2EA
FS-5	9~10kN × 2EA	10.56kN × 2EA
FS-6	9~10kN × 2EA	8.34kN × 2EA

3.2 체결장치의 수직 방향 탄성 실험

수직 방향 탄성실험 또한 체결력 실험과 마찬가지로 3회 수행한 실험 데이터의 평균값으로 강성을 산정하였다. 6개 실험체의 실험을 3회 수행한 결과는 그림 6과 같이 하중-변위 곡선이 일치함으로 체결장치의 실험이 탄성구간에서 수행되었음을 알 수 있다. 각 체결장치들의 하중-변위 곡선은 탄성구간에서 비선형 거동을 보였으며, 초기의 강성을 1차 강성으로 그리고 강성이 급격히 변한 후를 2차 강성으로 정의하였다.

3.2.1 수직 방향 1차 강성

레일과 침목 사이에 레일패드를 두고 체결클립을 설치하면 일정량의 체결력이 생기게 된다. 이 때 레일 아래에 거치된 레일패드에 압축력이 가해지게 되고, 그림 4와 같이 레일의 상향으로 하중을 재하했을 때 초기에는 체결장치의 1차 강성이 나타났고, 체결장치의 체결력 이상인 하중이 재하 됨에 따라 2차 강성이 발생하였다. 따라서, 1차 강성과 2차 강성 변곡 부분의 하중은 체결장치의 체결력과 거의 동일하게 나타났으며, 각 실험체들의 이러한 변곡 부분은 체결클립과 레일패드의 특성이 복합적으로 작용하여 그림 6과 같이 각 실험체 마다 다른 양상을 나타내었다.

그림 6의 (a)FS-1과 (b)FS-2는 같은 종류의 레일클립이지만 P.C침목과 레일 그리고 레일패드의 종류가 다르기 때문에 서로 다른 강성이 나타나는 것으로 판단된다.

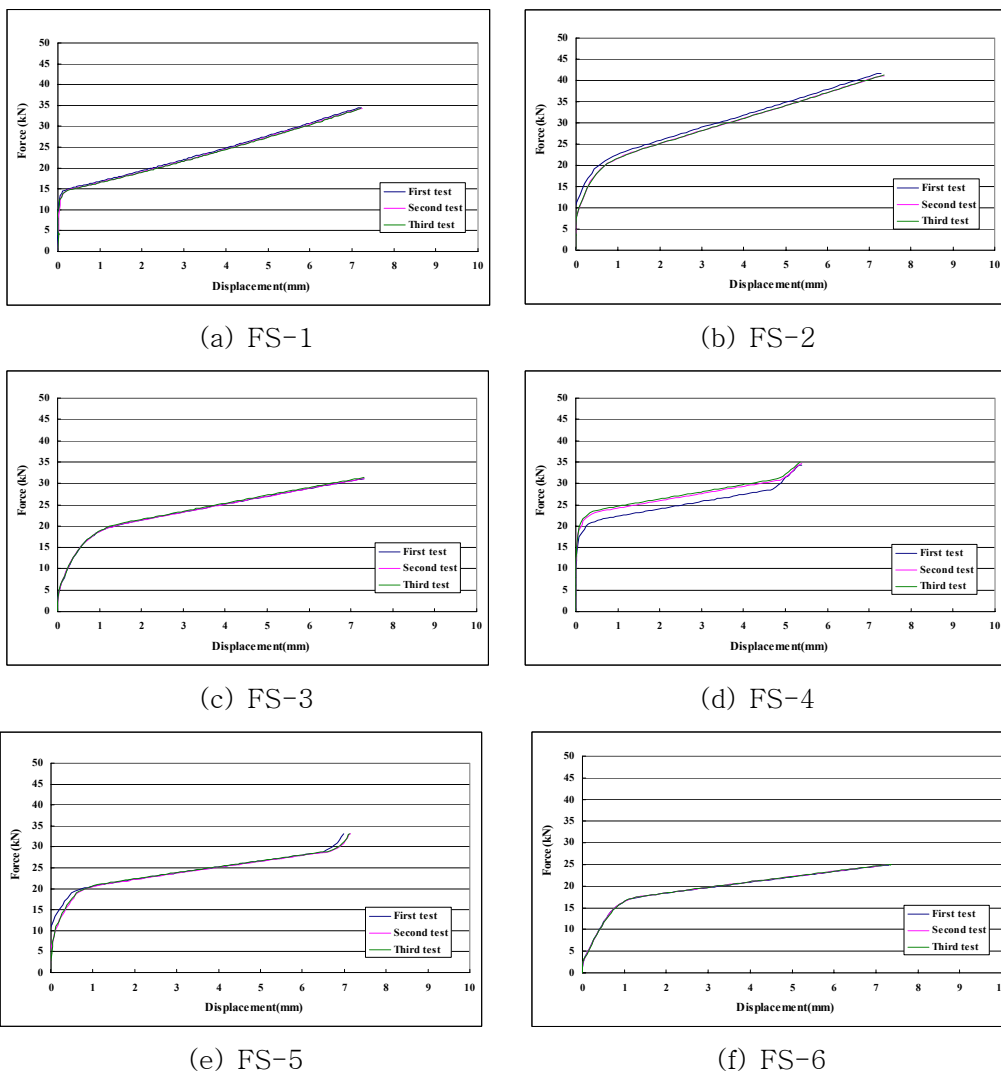


그림 6. 하중-변위 곡선

표 3은 실험체들의 수직 방향 1차 강성을 정리한 것이다.

표 3. 실험체의 수직 방향 1차 강성

구분	FS-1 (Type A)	FS-2 (Type A)	FS-3 (Type B)	FS-4 (Type C)	FS-5 (Type D)	FS-6 (Type E)
Stiffness (kN/mm)	102.72	41.637	22.714	99.63	38.699	19.324

3.2.2 수직 방향 2차 강성

앞에서 언급한 바와 같이 체결장치의 수직 방향 1차 강성 이후에 탄성구간에서 2차 강성이 나타났으며, 이는 체결장치의 종류에 따라 체결력의 1.4(FS-6)~2.3(FS-1)배 정도의 하중에 대해서도 체결장치는 탄성구간에서 저항하고 있음을 확인할 수 있었다.

그리고 FS-4와 FS-5의 레일클립의 경우는 레일이 옆으로 기울어지는 틸팅 현상을 방지하는 부분이 있는데, 그 부분이 레일과 아주 작은 간격으로 떨어져있다. 그렇기 때문에 하중을 재하하여 레일이 들림에 따라 이 틸팅방지 부분이 레일과 닿아서 그림 6의 (d)FS-4와 (e)FS-5에서 나타난 것처럼 강성이 다시 증가하였다.

표 4은 실험체들의 수직 방향 2차 강성을 정리한 것이다.

표 4. 실험체의 수직 방향 2차 강성

구분	FS-1 (Type A)	FS-2 (Type A)	FS-3 (Type B)	FS-4 (Type C)	FS-5 (Type D)	FS-6 (Type E)
Stiffness (kN/mm)	2.8427	3.0141	1.8525	1.6816	1.4267	1.2221

3.3 체결장치의 수직 방향 소성 실험

현재 국내에서 가장 많이 사용하고 있는 체결장치인 FS-1에 대한 극한 거동을 알아보기 위하여 하중재하와 하중제하를 반복하여 소성 실험을 수행하였다. 실험 결과는 그림 7과 같으며, 하중이 증가하면서 체결클립은 탄성한계변위인 8.317mm 이후에 소성변위가 발생하기 시작했다. 그리고 실험이 더욱 진행됨에 따라 체결장치의 변위는 크게 증가하였으며, 하중이 41.3kN까지 증가되었을 때 레일이 클립으로부터 이탈되었다. 체결클립이 파괴되지는 않았으나 이를 체결장치의 최종과괴 형태로 결정하였다. 이때의 파괴변위는 47.751mm로 측정되었다. 또한, 체결클립의 소성변위가 발생함에 따라 체결력이 점점 줄어들어 상실됨을 확인할 수 있었다.

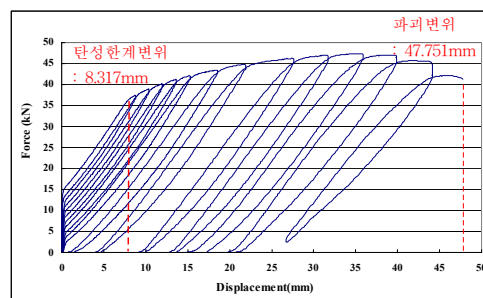
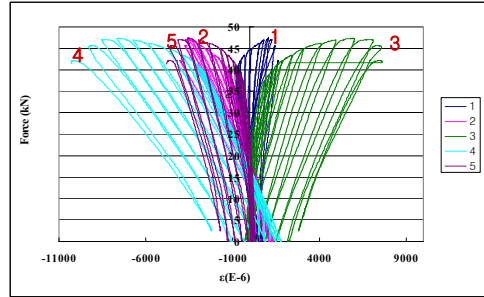


그림 7. FS-1의 하중 - 변위 곡선

여러 차례의 실험을 통하여 가장 많은 변형률이 발생한 지점을 선정하여 그림 8(a)와 같이 변형률계를 부착하였다. FS-1의 소성 실험 결과에 대한 하중-변형률 곡선은 그림 8(b)와 같으며, 실험 결과는 4에서 가장 많은 압축 변형이 그리고 3에서 가장 많은 인장 변형이 발생하는 것을 알 수 있었다.



(a) 변형률계의 부착위치



(b) 하중 - 변형률 곡선

그림 8. FS-1의 소성 실험

4. 결 론

현재 국철 및 고속철도에 사용 중인 체결장치의 종류에 따라 수직 방향에 대하여 실험을 수행하였으며, 체결장치의 수직 방향에 대한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 신뢰할 수 있는 실험 결과를 얻기 위하여 수행한 실험체들의 체결력 실험은 기준 체결력과 근접한 결과로 나타났다.
2. 체결장치의 수직 방향 하중-변위 곡선은 탄성구간 내에서 1차 강성과 2차 강성이 나타나는 비선형 거동을 보였고, 1차 강성과 2차 강성으로 변하는 부분의 하중은 체결장치의 체결력과 근접한 것으로 나타났다.
3. 철도교량에서 교량 단부에 발생하는 상향력에 대한 궤도의 합리적인 안전성 검토를 위한 구조 해석 시, 체결장치로 모사한 스프링 요소의 강성에 본 연구에서 산정한 수직 방향으로 인장력을 작용시켜서 얻은 1,2차 강성을 적용해야 할 것으로 판단된다.
4. FS-1의 수직 방향 소성 실험에서 탄성구간에서의 최대 하중은 체결력의 2.3배 정도인 36.96kN으로 나타났으므로 체결력 이상의 상향력이 작용하더라도 탄성구간에서 저항하는 것으로 나타났다. 또한, 소성구간으로 접어들면서 체결력이 상실되었고, 파괴 시의 하중은 41.3kN으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(국가지정연구실사업-미래형 철도 구조 시스템 기술 구축)

참고문헌

1. 안홍환, “궤도 구성 인자들이 장대레일 궤도 안정성에 미치는 영향”, 고려대학교 석사학위 논문, 2004. 06.

2. 이주현, 서사범, 이상진, 김재학, 김한중, “콘크리트도상 궤도 교량단부 상향력 해석 및 적용”, 한국철도학회 06춘계학술대회 논문집, 2006, pp.103-109
3. CEN(European Committee for Standardization), “The European Standard EN 13146 Railway applications-Track-Test methods for fastening systems”, 2002. 11., Part 7 pp. 1 ~ 10
4. KIMM(한국기계연구원), “Performance Tests of Fastening System in Korea High Speed Rail”, Test Certificate, 2005183832-3 ~ 4, 2005. 05. 31.