체결장치의 강성 평가를 위한 실험적 연구
- 레일 연직방향 병진강성, 레일 강축에 대한 회전강성 -

An Experimental Study to Evaluate the Stiffness of Fastening Systems
- Translational Stiffness along the Vertical Axis of Rail, Rotational Stiffness along the Strong Axis of Rail -

김 정 훈[*] 한 상 윤[**] 임 남 형[***] 강 영 종[****]

Kim, Jung-Hun Han, Sang-Yun Lim, Nam-Hyoung Kang, Young-Jong

Abstract

In the case of the railway bridges, uplift forces were occurred at the edge of the segments when vehicular loads were applied. These forces caused the compressive and tensile forces in the fastening system. In the past, a structural analysis has been performed to investigate the safety of fastening system which was modeled with one directional spring elements based on the compressive test of fastening system. In this case, the stiffness of the spring element was obtained from experimental study which was conducted by compressive load. Therefore, to perform rational and exact structural analysis, the translational stiffness of the fastening system obtained from the experimental study applied the tensile load and the rotational stiffness should be considered because it was occurred the tensile force as well as the compressive force in fastening system. In this study, an elastic and inelastic experimental study was performed for six specimens. The translational stiffness along the vertical axis of rail and the rotational stiffness along the strong axis of rail were investigated, also structural behavior of the fastening system was analyzed.

요 지

철도교량의 경우, 열차하중에 의한 영향으로 교량 단부에서 상향력이 발생하였으며, 이 상향력은 체결장치에 압축력과 인장력을 유발시켰다. 현재까지 이에 대한 안전성을 검토하기 위해 체결장치를 1방향의 스프링 요소로 모사하여 구조해석을 수행해 왔다. 이러한 경우에 스프링 요소의 강성은 압축력을 재하한 실험적 연구에 의하여 산정되었다. 따라서, 상향력은 체결장치에 압축력뿐만 아니라 인장력도 유발시키기 때문에 합리적이고 정확한 구조해석을 수행하기 위해서는 인장력을 재하한 실험적 연구로부터 산정된 병진방향 강성 그리고 회전방향 강성을 함께 고려해야 한다. 본 연구에서는 6가지 실험체에 대하여 탄성과 비탄성 실험을 수행하여 레일 연직방향 병진강성과 레일 강축에 대한 회전강성을 검토하였고, 체결장치의 구조적인 거동을 분석하였다.

Keywords : Fastening system, Safety, Spring element, Stiffness, Uplift force

핵심 용어 : 체결장치, 안전성, 스프링 요소, 강성, 상향력

* 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과, 박사과정

** 정회원, 고려대학교 강구조공학협동과정학과, 박사과정

*** 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 공학박사

**** 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수, 공학박사

E-mail : zamsin97@korea.ac.kr 017-379-2866

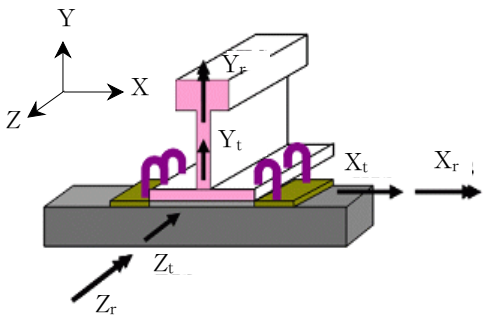
• 본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2008년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

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.

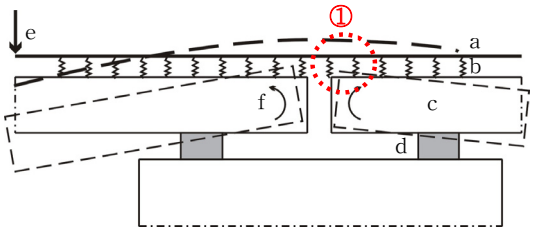
궤도는 열차를 정해진 길로 유도하는 역할을 할 뿐만 아니라 하부로 전달되는 열차 하중을 완화하여 하부 구조물을 보호하는 역할을 한다. 이러한 궤도는 노반 위에 부설된 도상, 침목, 체결장치 그리고 레일로 구성되어 있다. 이들 중 체결장치(fastening system)는 레일을 침목이나 슬래브 등의 지지물에 고정하여 궤간을 유지함과 동시에 차량 주행 시에 차량이 궤도에 주는 여러 방향의 하중이나 진동에 저항하고, 이들을 침목, 도상, 노반으로 분산 혹은 완충하여 전달하는 기능을 하는 중요한 구성요소이다. 일반적으로 체결장치는 6방향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

정의된 체결장치의 각 방향에 대한 특성이 궤도 시스템에 미치는 영향은 다음과 같다. 안흥환 등(2004)에 따르면 X, Z축 병진방향과 Y축 회전방향의 강성이 자갈도상에 부설된 장대레일 궤도의 안정성(좌굴)에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, Z축 회전방향 강성은 곡선 장대레일 궤도의 거동에 영향을 미친다.



X_t : X축 병진방향　　X_r : X축 회전방향
Y_t : Y축 병진방향　　Y_r : Y축 회전방향
Z_t : Z축 병진방향　　Z_r : Z축 회전방향

Fig. 1 체결장치의 각 방향 정의



a: 레일　　b: 체결장치　　c: 거더
d: 교량 받침　　e: 열차하중　　f: 회전변위

Fig. 2 철도교량 단부에서의 레일 체결장치의 거동

Fig. 2와 같이 철도교량에서 열차하중에 의한 교량의 처짐으로 인하여 교량 단부에서는 회전변위에 의한 상향력이 발생하게 된다. 이러한 상향력은 교량 단부에서 레일과 도상을 연결한 체결장치에 Y축 병진방향으로 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 연구로써 이주헌 등(2006)은 콘크리트 도상 궤도에서 교량단부 상향력 해석의 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 체결장치를 스프링 요소로 모사하였으며, 체결장치를 모사한 스프링의 강성은 KIMM(한국기계연구원, 2005)에서 체결장치의 Y축 병진방향으로 레일 패드에 압축력을 재하하여 하중과 변위를 측정한 강성 값이다. 그러나 체결장치에 Y축 병진방향으로 인장력이 작용한 경우에는 체결장치가 체결클립의 강성으로써 저항하게 되므로 구조해석 시 체결장치에 인장력을 재하하여 하중과 변위를 측정한 강성을 반영해야한다.

또한, 철도교량에서 열차하중에 의한 교량의 처짐 발생 시, Fig. 2의 ①부분에서 레일과 교량의 회전변위가 서로 다르게 발생하기 때문에 궤도의 안전성 검토를 위한 구조해석 시 레일과 교량을 연결하는 체결장치의 X축 회전방향에 대한 강성을 고려해야 할 것이다. 이러한 체결장치의 실험적 연구로는 AAR (Association of American Railroads, 1982)에서 X, Y, Z축 회전방향에 대하여 실험을 수행하였는데, 목침목을 사용한 궤도의 나사못 스파이크 타입인 체결장치에 대해서만 실험적 연구가 수행되어졌다.

따라서, 본 연구에서는 현재 가장 많이 쓰이는 P.C 침목을 사용한 궤도의 다양한 체결장치에 대하여 인장력을 재하한 Y축 병진방향(레일 연직방향)과 회전력을 재하한 X축 회전방향(레일 강축에 대한 회전)에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 실험에 앞서 신뢰할 수 있는 실험 결과를 얻기 위하여 실험체들에 대해 체결력 실험을 수행하여 체결력들의 기준치와 비교하였다. 그리고 모든 실험체들은 탄성구간에서 Y축 병진방향과 X축 회전방향에 대하여 실험을 수행하여 그 결과를 분석하였으며, 현재 가장 많이 사용되고 있는 실험체에 대하여 Y축 병진방향의 소성 실험을 수행하여 극한 거동을 분석하였다.

2. 실험 개요

본 연구에서는 체결장치의 각 방향 강성과 구조적인 거동을 분석하기 위하여 현재 국내에서 사용 중인 P.C침목용 체결장치인 실험체를 6개로 구성하여 실험을 실시하였다.

2.1 실험체의 종류

체결장치는 크게 레일클립, 레일패드, 절연블록, 베이스 플레이트(필요에 따라 추가로 설치)로 구성되어 있다. 본 연구의 실험체는 현재 고속철도, 국철, 지하철 등에서 실제 사용 중이며, 생산 가능한 제품을 중심으로 구성하였다. 레일클립은 선스프링-숄더식과 선스프링-볼트식으로 Table 1과 같이 5가지의 종류이며, 레일패드는 EVA(Ethylene Vinyl Acetate copolymer) 패드와 Studded Rubber 패드가 사용되어졌다. EVA 패드는 일반 국철용 레일 패드이며, 패드 두께가 5-6.5mm이다. Studded Rubber 패드는 고속철도와 같이 충격 차단이 최대로 필요한 본선 궤도용 탄성 레일패드이며, 패드 두께가 9-10mm이다. 또한, 레일의 길이는 1m이며, 국철용인 KS50과 KS60 그리고 고속철도용인 UIC60으로 구성하였다.

2.2 실험 방법

체결장치의 실험적 연구를 위해 Fig. 3과 같이 P.C 침목, 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 Fig. 3과 같이 250kN과 500kN의 가력기를 사용하여 하중을 재하 하였으며, 레일과 P.C침목의 상대변위를 측정하기 위한 변위계의 변위와 가력기의 재하 하중은 UCAM-20A를 통하여 실시간 그리

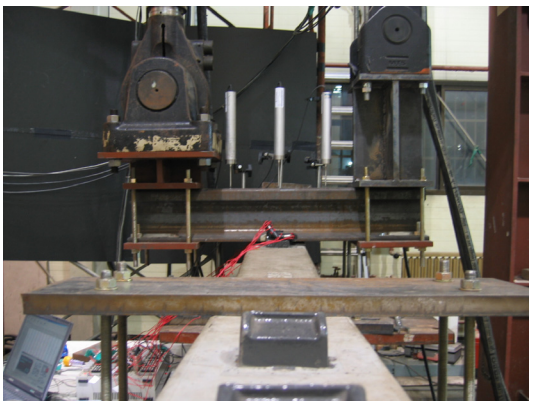


Fig. 3 체결장치 실험

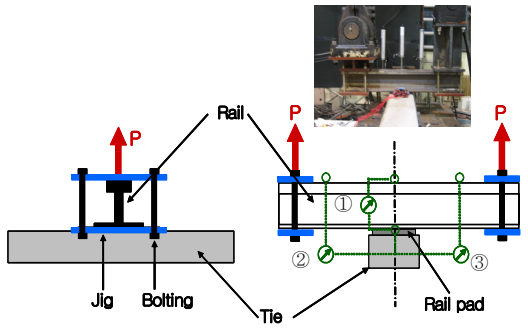
Table 1 실험체의 종류

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.

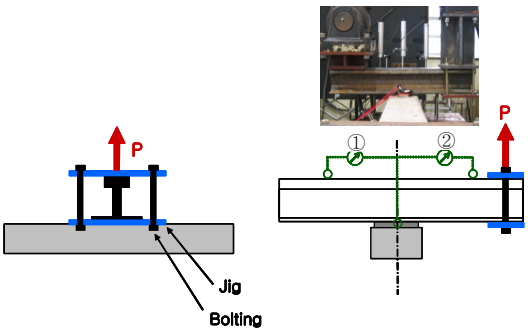
※ FS: Fastening System

고 1초 간격으로 동시에 측정하였다. 또한 하중은 0.05mm/sec 속도의 변위제어 모드(Displacement control mode)로 두 대의 가력기를 정확히 동시에 재하 하였다.

실험 방법은 CEN 규정(유럽 체결장치 성능 시험 규정, 2002)을 참고하여 수행하였으며, 레일과 P.C 침목의 상대변위를 측정하기 위한 변위계의 위치는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a) Y축 병진방향의 경우, 레일과 침목의 상대변위측정은 체결장치와 가장 근접한 부분이 가장 정확하다고 판단된다. 그리고 두 대의 가력기가 동시에 하중이 재하 되었는지를 확인하기 위하여 ①, ②, ③과 같이 변위계를 설치하였다. Fig. 4(b) X축 회전방향의 경우, ①, ②와 같이 변위계를 설치하였다. 하중은 가력기의 가력부에 설치한 지그와 레일을 볼팅으로 연결시켜 수직방향으로 인장력을 재하 하였다.



(a) Y축 병진방향



(b) X축 회전방향

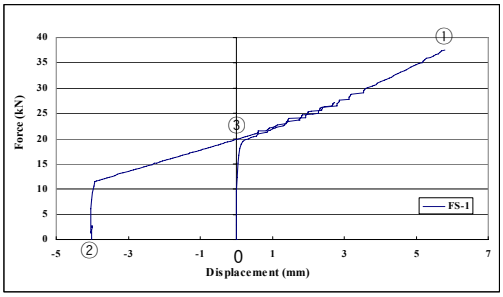
Fig. 4 체결장치 실험의 하중 재하 방법 및 변위 측정위치

3. 실험 결과 및 분석

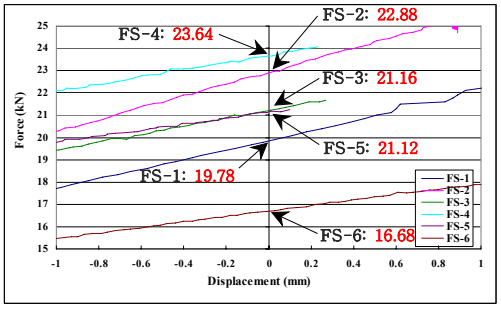
3.1 체결력 실험

체결력 실험은 체결클립이 레일과 클립걸이에 체결되었을 때 체결력을 측정하기 위한 실험이다. 체결장치의 Y축 병진방향과 X축 회전방향의 실험 결과는 체결력에 의해 영향을 받을 수 있으므로 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 실험결과는 버리고, 나머지 3회 수행한 실험 데이터의 평균값으로 체결력을 산정하였다.

체결력의 실험방법은 Fig. 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

Fig. 5 하중-변위 곡선(체결력 실험)

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

Table 2 체결력 비교결과 (체결장치의 한측만 고려)

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

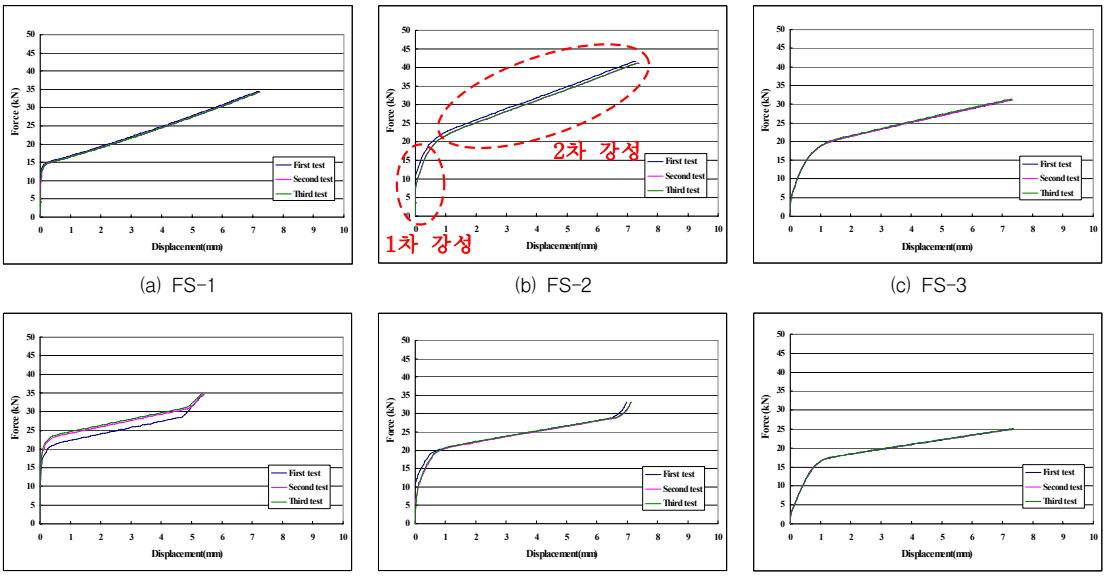
3.2 체결장치의 Y축 병진방향 탄성 실험

Y축 병진방향 탄성실험 또한 체결력 실험과 마찬가지로 3회 수행한 실험 결과의 평균값으로 강성을 산정하였다. 6개 실험체의 실험을 3회 수행한 결과는 Fig. 6과 같이 하중-변위 곡선이 일치하고 잔류변형이 없으므로 체결장치의 실험이 탄성구간에서 수행되었음을 알 수 있다. 각 체결장치들의 하중-변위 곡선은 탄성구간에서 강성이 변하는 비선형 거동을 보였으며, 초기의 강성을 1차 강성으로 그리고 강성이 급격히 변한 후를 2차 강성으로 정의하였다.

3.2.1 Y축 병진방향 1차 강성

레일과 침목 사이에 레일패드를 두고 체결클립을 설치하면 일정량의 체결력이 생기게 된다. 이 때 레일 아래에 거치된 레일패드에 압축력이 가해지게 되고, Fig. 4(a)와 같이 레일의 상향으로 하중을 재하 했을 때 1차 강성과 2차 강성 변곡 부분의 하중은 체결장치의 체결력과 근접하게 나타났으며, 각 실험체들의 이러한 변곡 부분은 체결클립과 레일패드의 특성이 복합적으로 작용하여 Fig. 6과 같이 각 실험체 마다 다른 양상을 나타내었다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 같은 종류의 레일클립이지만 P.C 침목과 레일 그리고 레일패드의 종류가 서로 다르다. 특히 (a)의 레일패드는 단단하고 두께가 얇아서 강성이 변하는 천이 부분이 급격하게 나타났으며, (b)의 레일패드는 부드럽고 두께가 두꺼워서 강성이 완만



(a) FS-1 (b) FS-2 (c) FS-3

(d) FS-4 (e) FS-5 (f) FS-6

Fig. 6 Y축 병진방향 하중-변위 곡선(탄성구간)

하게 변하는 것으로 나타났다. 결과적으로 레일클립만을 실험할 경우는 실험결과가 유사하여야 할 것으로 판단되나 여러 종류로 구성되어진 시스템에 대한 실험을 수행하는 것이므로 레일패드의 재료적인 특성이 많이 다르며 하중 작용 시 거동 또한 상이하므로 서로 다른 강성이 나타나는 것으로 판단된다.

Table 3은 실험체들의 Y축 병진방향 1차 강성을 정리한 것이다.

Table 3 Y축 병진방향 1차 강성

구분	FS-1	FS-2	FS-3	FS-4	FS-5	FS-6
Stiffness (kN/mm)	102.72	41.637	22.714	99.63	38.699	19.324

3.2.2 Y축 병진방향 2차 강성

앞에서 언급한 바와 같이 체결장치의 Y축 병진방향 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 Fig. 6의 (d)와 (e)에서 나타난 것처럼 강성이 다시 증가하였다.

Table 4는 실험체들의 Y축 병진방향 2차 강성을 정리한 것이다.

Table 4 Y축 병진방향 2차 강성

구분	FS-1	FS-2	FS-3	FS-4	FS-5	FS-6
Stiffness (kN/mm)	2.8427	3.0141	1.8525	1.6816	1.4267	1.2221

3.3 체결장치의 Y축 병진방향 소성 실험

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

현재 교량단부에서 레일 체결장치 상향력에 대한 구조해석 및 검토 시 체결장치에 발생하는 수직반력을 계산한 후 체결장치의 허용 상향력(초기 체결력)을 초과하는지에 대한 검토를 수행하고 있다. Y축 병진방향 소성실험에서 체결력 이상의 상향력이 작용하더라도 탄성구간에서 저항하는 것으로 나타났으므로 구조해석 및 검토 시 이를 추가적으로 적용한다면 더욱 더 합리적인 안전성 검토를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

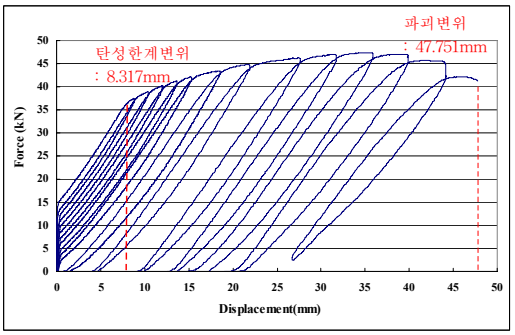


Fig. 7 하중-변위 곡선(FS-1)

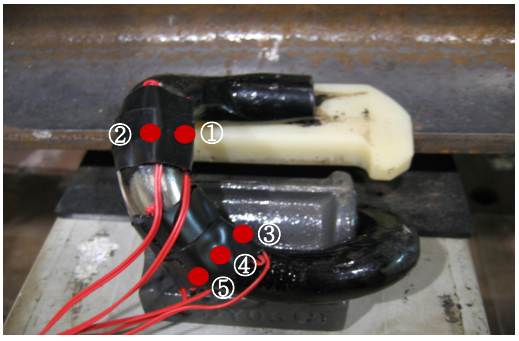


Fig. 8 변형률계의 부착위치(FS-1)

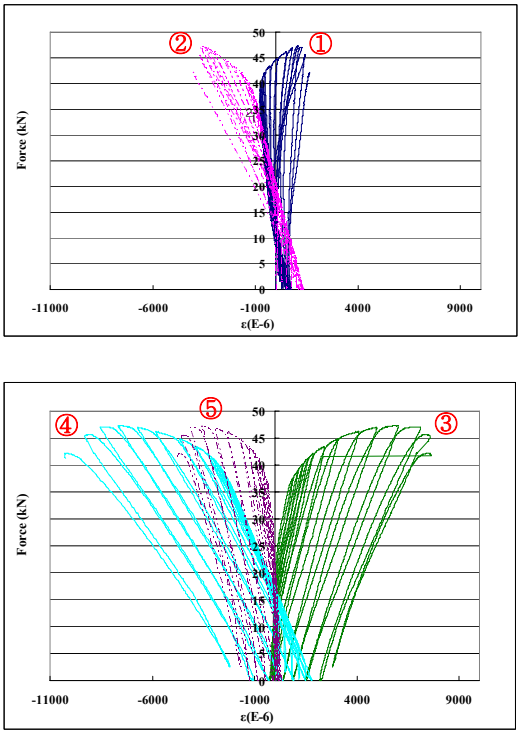


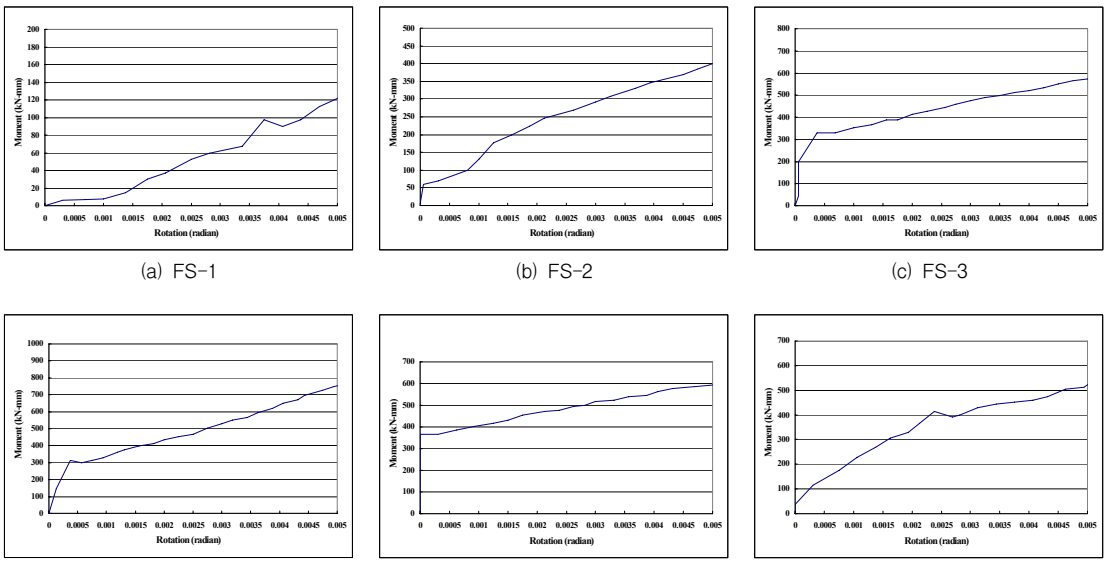
Fig. 9 하중-변형률 곡선(FS-1)

여러 차례의 실험을 통하여 가장 많은 변형률이 발생한 지점을 선정하여 Fig. 8과 같이 변형률계를 부착하였다. FS-1의 소성 실험 결과에 대한 하중-변형률 곡선은 Fig. 9와 같으며, 실험 결과는 ④에서 가장 많은 압축 변형이 그리고 ③에서 가장 많은 인장 변형이 발생하는 것을 알 수 있었다.

3.4 체결장치의 X축 회전방향 탄성 실험

실험은 레일의 정중앙을 체결클립으로 체결한 실험체를 고정시킨 후 레일 한쪽 끝단에 연직하중을 재하하여 레일을 회전시켜 수행하였다. 이 때 초기에는 회전의 중심이 체결클립이지만 하중이 재하됨에 따라 레일 한쪽이 들려짐으로 회전의 중심이 점점 침목의 끝단으로 이동하게 된다. 따라서, 체결장치의 X축 회전방향 탄성실험은 레일이 침목 끝단에 닿기 전에 하중과 변위를 Fig. 10과 같이 나타내었다.

Fig. 10의 (a), (b), (f)와 (c), (d), (e)의 초기에 하중-변위가 일정하지 않음을 보이는 것은 체결클립의 기하학적 특성과 레일패드에 의한 영향으로 다른 양상을 보이는 것으로 판단된다.



(a) FS-1 (b) FS-2 (c) FS-3

(d) FS-4 (e) FS-5 (f) FS-6

Fig. 10 X축 회전방향 하중-변위 곡선(탄성구간)

Y축 병진방향과 마찬가지로 Fig. 10의 (a)과 (b)는 같은 종류의 레일클립이지만 P.C침목과 레일 그리고 레일패드의 종류가 다르기 때문에 서로 다른 회전강성이 나타났다.

Table 5는 실험체들의 X축 회전방향 강성을 나타낸 것이다.

Table 5 X축 회전방향 강성

구분	FS-1	FS-2	FS-3	FS-4	FS-5	FS-6
Stiffness (kN-mm /radian)	24026	59903	56443	107983	48316	49248

4. 결 론

현재 국철 및 고속철도에 사용 중인 체결장치의 종류에 따라 병진 및 회전 방향에 대하여 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 신뢰할 수 있는 실험 결과를 얻기 위하여 수행한 실험체들의 체결력 실험은 기준 체결력과 근접한 결과로 나타났다.
2) 체결장치의 Y축 병진방향 탄성 실험에서 하중-변위 곡선은 탄성구간 내에서 1차 강성과 2차 강성이 나타나는 비선형 거동을 보임을 확인할 수 있었고, 강성이 변하는 천이 부분의 하중은 체결장치의 체결력과 근접한 것으로 나타났다.
3) 체결장치의 Y축 병진방향 탄성 실험에서 초기에는 1차 강성 그리고 체결력 이상인 하중이 재하 됨에 따라 2차 강성이 나타나기 때문에 철도교량에서 교량 단부에 발생하는 상향력에 대한 궤도의 합리적인 안전성 검토를 위한 구조 해석을 수행할 때, 체결장치를 모사한 스프링 요소의 강성에 본 연구에서 산정한 Y축 병진방향으로 인장력을 작용시켜서 얻은 1, 2차 강성과 X축 방향 회전 강성을 적용해야 할 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 인장력을 작용시켜서 얻은 1, 2차 강성을 구조해석에 적용할 때 교량 단부의 체결장치에 1차 강성을 적용하여 안전성 검토를 실시하고, 안전성 검토 기준인 초기 체결력 보다 그 이상의 하중이 체결장치에 발생할 경우에 대해서도 탄성구간에서의 2차 강성을 추가적으로 적용하여 검토한다면 더욱 더 합리적인 안전성 검토를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.
4) FS-1의 Y축 병진방향 소성 실험에서 탄성구간에서의 최대 하중은 36.96kN으로써 체결력 보다 2.3배 더 크게 나타났다. 따라서, 체결력 이상의 상향력이 작용하더라도 탄성구간에서 저항하는 것으로 판단된다.
5) FS-1의 Y축 병진방향 소성 실험에서 소성구간으로 접어들면서 잔류변형이 발생함에 따라 체결력이 점차 상실되었다. 그리고 하중이 41.3kN까지 재하되었을 때 레일이 클립으로부터 이탈되었으며, 이것이 체결장치의 최종파괴 형태이다.
6) FS-1 실험체에서 체결클립의 최대 변형률은 -0.010287로 클립걸이 위에 놓여진 곳의 굴곡부분에서 가장 큰 응력이 발생하였다.

감사의 글

"이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(R0A-2005-000-10119-0)."

참고문헌

1. 안홍환, "궤도 구성 인자들이 장대레일 궤도 안정성에 미치는 영향", 고려대학교 석사학위 논문, 2004. 06.
2. 이주헌, 서사범, 이상진, 김재학, 김한종, "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. J. Choros and I. Gitlin, "Track component property tests", AAR(Association of American Railroads) Report No. R-479, 1982.
5. KIMM(한국기계연구원), "Performance Tests of Fastening System in Korea High Speed Rail", Test Certificate, 2005183832-3~4, 2005. 05.

(접수일자 : 2007년 6월 27일)
(심사완료일자 : 2008년 2월 20일)