

장대레일 궤도의 안정성에 미치는 체결장치의 실험적 연구

An Experimental Study of Fastening System on CWR(Continuous Welded Rail) Track Stability

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

Until now, the railway has been constructed using track with jointed rails of relatively short lengths to allow thermal expansion in hot summer months. These joints weaken the track structurally and increase track maintenance cost and power consumption of the running train. The CWR(Continuous Welded Rail) Track is the solution of these drawbacks. Although the CWR track not only reduces the track maintenance cost but also increases the life cycle of track components, the stability of the track is highly affected by change of temperatures and vehicle load. A three dimensional nonlinear analysis which considers rail, fastening system and tie has been performed to understand structural behavior of the CWR track. In this case, the translational and rotational stiffness values of fastening system have not been studied. The fastening system makes ties and rails connect. In this study, the stiffness values of various types of fastening systems which consist of clips, rail-pads and insulators are determined by the experiment. The experimental results of the fastening system are compared with the results of parametric study that is performed to investigate the sensitivity of fastening system on stability of CWR track.

Key words: Fastening system, CWR(Continuous Welded Rail) track, Stability

1. 서 론

도로에 비하여 매우 열악한 발전을 해온 철도는 고속철도가 국토의 만나질 생활권을 이루고, 남북철도, 시베리아철도 등이 세계로 진출하기 위한 물류운송수단으로 계획되면서 미래의 핵심교통수단으로 주목받고 있다. 이러한 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 레간을 유지함과 동시에 차량 주행 시에 차량이 궤도에 주는 여러 방향의 하중이나 진동에 저항

* 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정, 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 건축·사회환경공학과 교수, 공학박사

하고, 이들을 침목, 도상, 노반으로 분산 혹은 완충하여 전달하는 기능을 하는 중요한 구성요소이다. 일반적으로 체결장치는 6방향 자유도를 가지며, 본 논문에서는 체결장치의 3개의 병진방향과 3개의 회전 방향에 대하여 그림 1과 같이 정의 하였다.

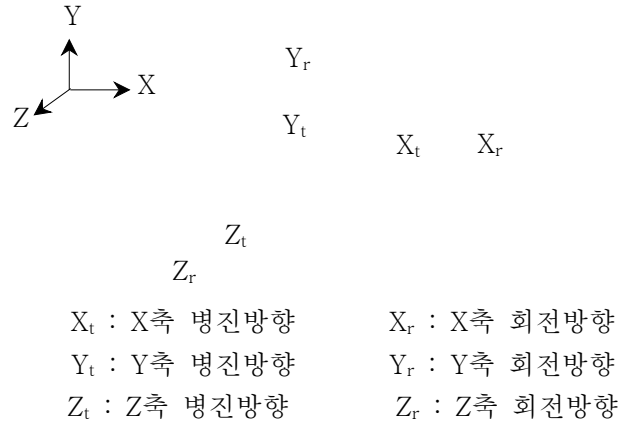


그림 1. 체결장치의 각 방향 정의

정의된 체결장치의 각 방향에 대한 특성이 궤도 시스템에 미치는 영향은 다음과 같다. 김정훈 등(2006)과 이주현 등(2006)에 따르면 Y축 병진방향과 X축 회전방향의 강성은 철도교량 단부에서의 상향력에 대한 안전성에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, Z축 회전방향 강성은 곡선 장대레일 궤도의 거동에 영향을 미친다. 그리고 안흥환 등(2004)에 따르면 본 연구에서의 X, Z축 병진방향과 Y축 회전방향의 강성이 자갈도상에 부설된 장대레일 궤도의 안정성(장출)에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

전 세계적으로 널리 사용되고 있는 장대레일 궤도는 유지보수 비용을 절감시키고, 궤도구성요소들의 수명이 길어진다는 장점을 가지고 있다. 그러나 혹서기에 레일의 높은 온도 상승으로 인해 장대레일 궤도에는 매우 큰 압축력이 작용하게 되고, 이는 장대레일 궤도의 장출(좌굴)을 발생시켜 열차의 탈선으로 인한 사고로 이어진다. 이를 위해 장대레일의 구조적인 거동을 분석하기 위하여 침목, 체결장치 시스템 그리고 레일을 모사한 3차원 비선형 해석을 수행한다. 이러한 경우, 안정성에 영향을 미치는 체결장치의 병진 및 회전강성에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 현재 가장 많이 쓰이는 P.C침목을 사용한 궤도의 다양한 체결장치에 대하여 X, Z축 병진방향과 회전력을 재하한 Y축 회전방향에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 실험에 앞서 신뢰할 수 있는 실험 결과를 얻기 위하여 실험체들에 대해 체결력 실험을 수행하여 체결력들의 기준치와 비교하였다. 그리고 모든 실험체들은 X, Z축 병진방향과 Y축 회전방향에 대하여 실험을 수행하여 그 결과를 분석하였으며, 선행 연구된 장대레일 궤도의 좌굴 안정성에 영향을 미치는 체결장치 강성의 매개변수 해석결과와 비교하여 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. 표 1과 같이 레일클립은 5가지의 종류이며, 레일패드는 EVA(Ethylene Vinyl Acetate copolymer) 패드와 Studded Rubber 패드가 사용되어졌다. 또한, 레일의 길이는 1m이며, 국철 용인 KS50과 KS60 그리고 고속철도용인 UIC60으로 구성하였다.

표 1. 실험체의 종류

	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 2과 같이 250kN과 500kN의 가력기(MTS: Material Test Systems)를 사용하여 하중을 재하 하였으며, 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 재하 하였다.



그림 2. 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 3과 같다. 그림 3(a) X축 병진방향의 경우, 레일과 침목의 상대변위측정은 체결장치와 가장 근접한 부분이 가장 정확하다고 판단된다. 그리고 두 대의 가력기가 동시에 하중이 재하 되었는지를 확인하기 위하여 두 개의 변위계를 추가적으로 설치하였다. 그림 3(b)와 (c)의 Z축 병진방향과 Y축 회전방향의 경우, 두 개의 변위계를 설치하였다. 하중은 가력기의 가력부에 설치한 지그와 레일을 볼팅으로 연결시켜 수직방향으로 하중을 재하 하였다.

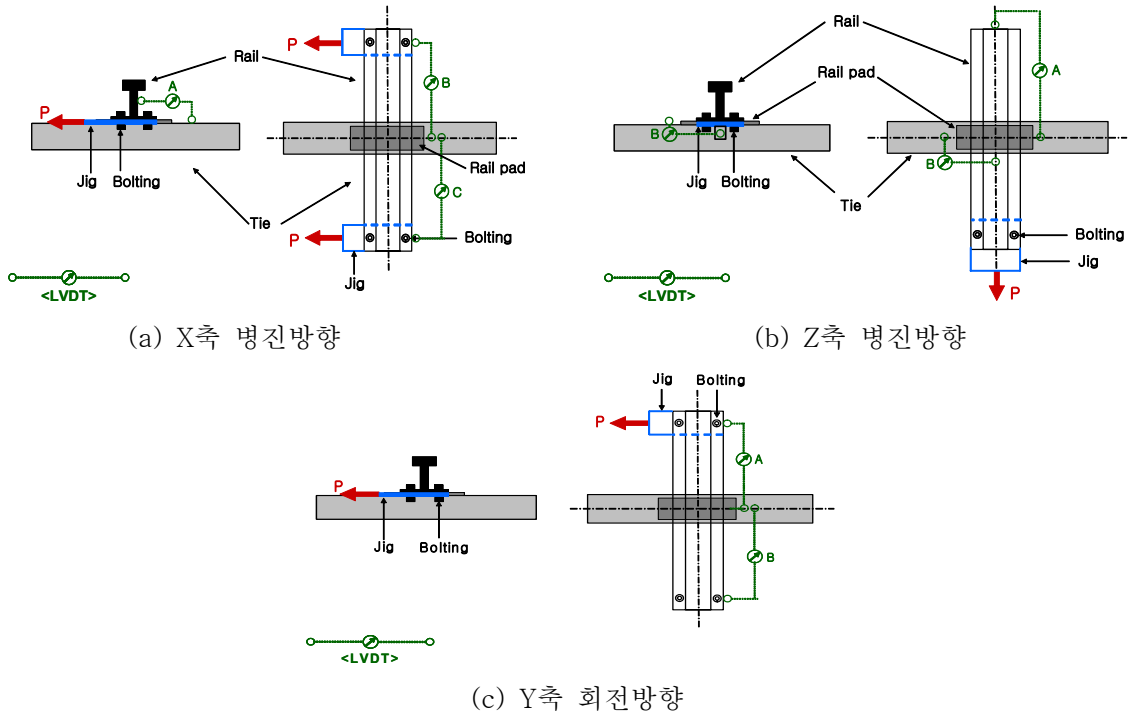


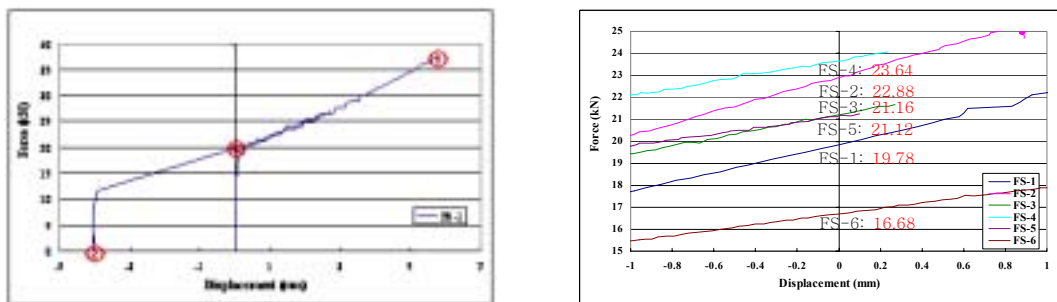
그림 3. 체결장치 실험의 하중 재하 방법 및 변위 측정위치

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 실험결과를 버리고, 나머지 3회 수행한 실험 데이터의 평균값으로 체결력을 산정하였다.

체결력의 실험방법은 그림 4(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 4. 하중 - 변위 곡선

그림 4(b)는 각 실험체들의 체결력을 실험한 결과 중 그림 4(a)의 ③부분을 나타낸 것이다. 표 2는 체결장치의 기준 체결력과 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 X축 병진방향 실험

X축 병진방향 실험 또한 체결력 실험과 마찬가지로 3회 수행한 실험 데이터의 평균값으로 강성을 산정하였다. 이에 대한 하중-변위 곡선은 그림 5과 같으며, 레일과 절연블럭과의 간격이 실험체마다 서로 다르다. 그리고 절연블럭과 레일패드의 재료적인 특성이 많이 다르며 하중 작용 시 거동 또한 상이하므로 서로 다른 강성이 나타나는 것으로 판단된다.

그림 5(b), (c) 그리고 (f)의 경우 레일과 절연블럭과의 간격이 크므로 하중이 재하되기 시작하면 처음에 정마찰력에 의한 강성이 나타나고 레일이 움직이기 시작한 후는 동마찰력에 의한 강성이 나타났다. 이후 하중이 더욱 증가함에 따라 레일이 절연블럭에 닿게 되면 강성이 크게 증가하게 된다.

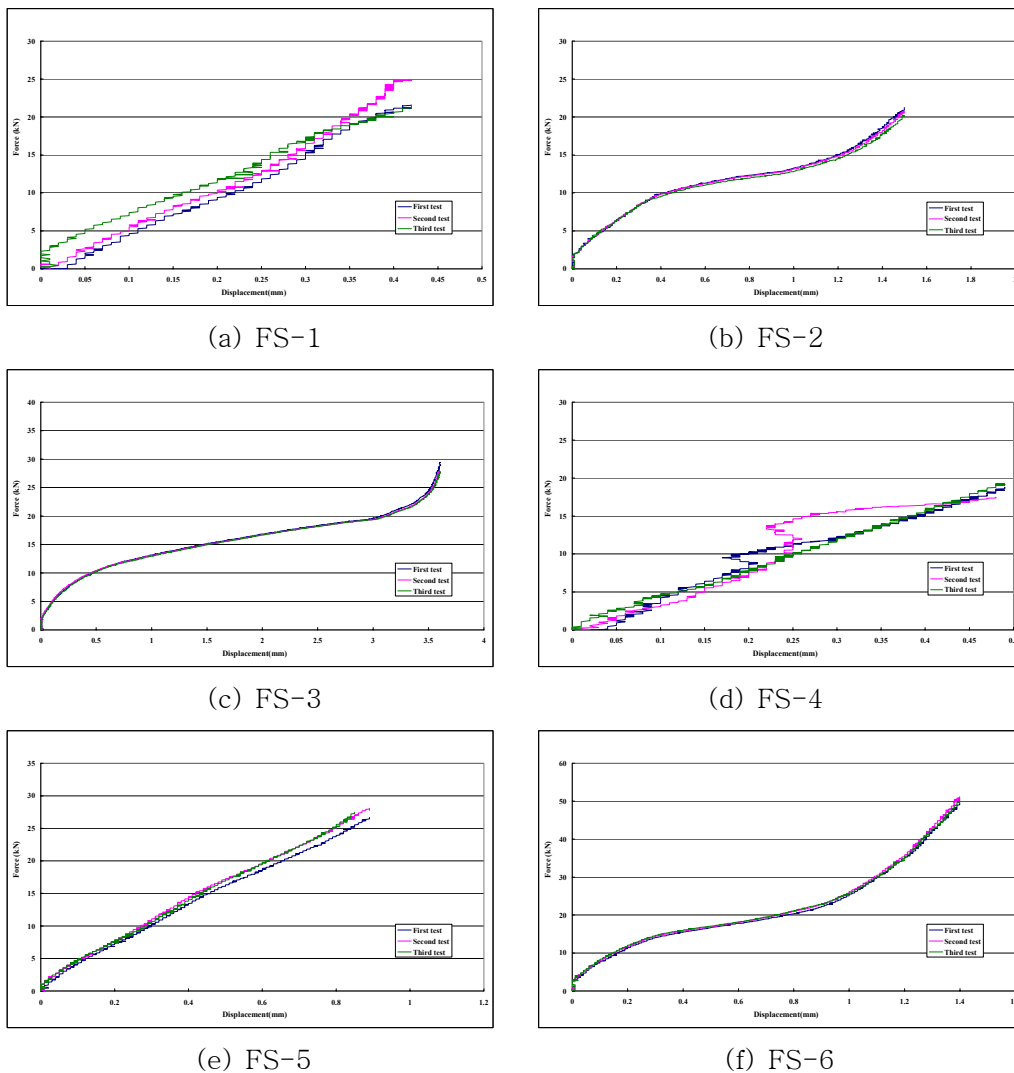


그림 5. 하중-변위 곡선

표 3은 실험체들의 X축 병진방향 강성을 정리한 것이다.

표 3. 실험체의 X축 병진방향 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)	47.85	22.805	19.196	38.307	30.146	44.685

3.3 체결장치의 Z축 병진방향 실험

CEN 규정을 참조하여 레일이 Z축 병진방향으로 미끄럼이 발생하기 전(종방향 저항력)까지의 구간에 대해 강성을 산정하였으며, 하중-변위 곡선은 그림 6과 같다.

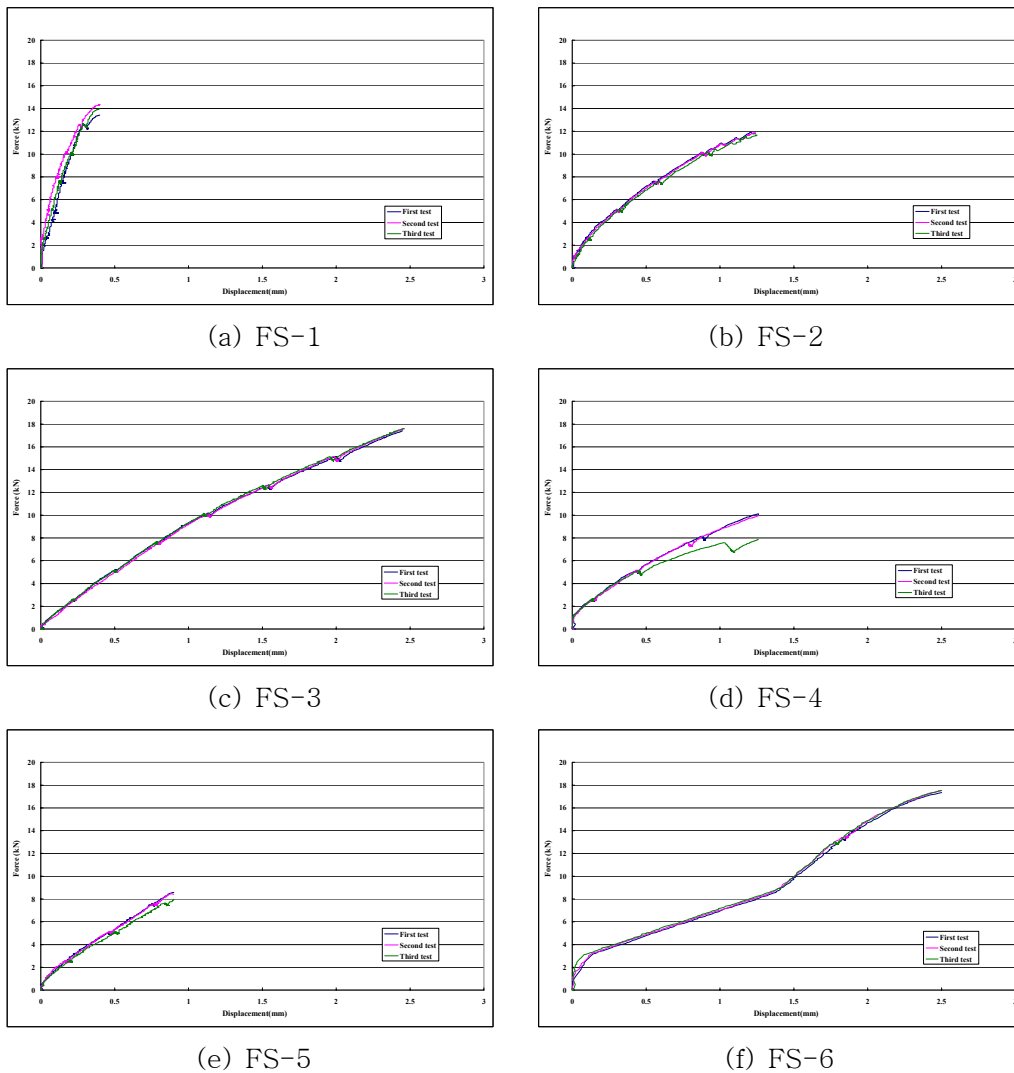


그림 6. 하중-변위 곡선

표 4는 실험체들의 Z축 병진방향 강성을 정리한 것이다.

표 4. 실험체의 Z축 병진방향 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)	33.603	9.3581	6.8787	7.2995	8.7392	6.5431

3.4 체결장치의 Y축 회전방향 실험

CEN 규정을 참조하여 초기의 체결된 상태에서 Y축 회전방향으로 1.5도 변위(그래프 Y축의 오른쪽 곡선)를 발생시킨 후 다시 반대방향으로 1.5도 변위(그래프 Y축의 왼쪽 곡선)를 발생시켜 실험을 실시하였고, 하중-변위 곡선은 그림 7과 같다. Y축 회전방향 또한, 레일과 절연블럭과의 간격이 실험체마다 서로 다르고 레일패드의 재료적인 특성이 많이 다르며 하중 작용 시 거동 또한 상이하므로 서로 다른 강성이 나타나는 것으로 판단된다.

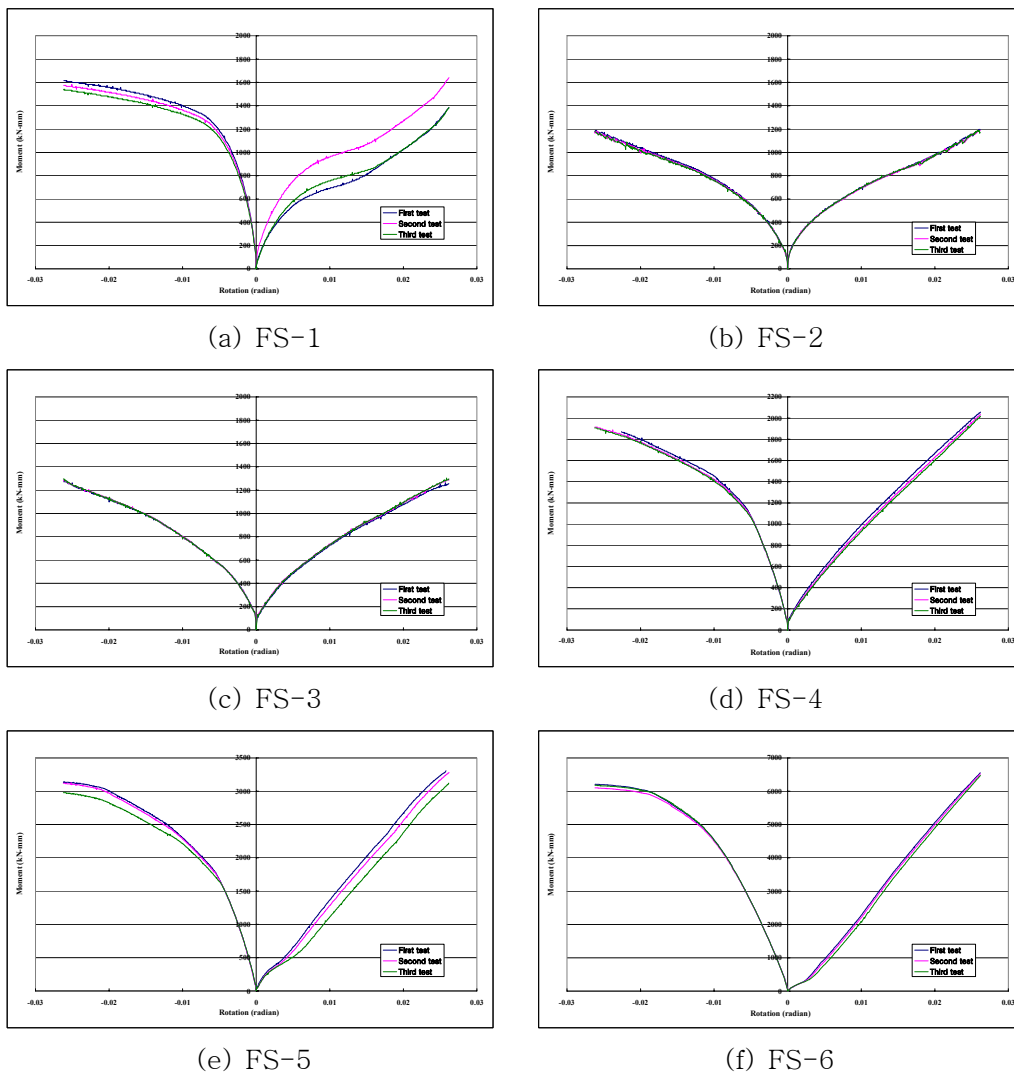


그림 7. 하중-변위 곡선

표 5는 실험체들의 Y축 회전방향 강성을 정리한 것이다.

표 5. 실험체의 Y축 회전방향 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 /radian)	81699	83164	76228	110079	128861	124491

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. 장대레일의 구조적인 거동을 분석하기 위하여 침목, 체결장치 시스템 그리고 레일을 모사한 3차원 비선형 해석을 수행할 때, 체결장치를 모사한 스프링 요소의 강성에 본 연구에서 산정한 X, Z축 병진 방향과 Y축 회전방향 강성을 적용해야 할 것으로 판단된다.
3. 체결장치의 X, Z축 병진방향과 Y축 회전방향 강성은 체결력에 의한 레일과 레일 패드의 마찰력, 절연블록 그리고 레일패드의 재료적인 특성이 많은 영향을 미치며, 하중을 재하하는 방향으로 레일과 절연블록의 간격이 클 경우 정마찰력, 동마찰력 그리고 절연블록 등의 영향으로 하중-변위 곡선은 3가지의 강성(기울기)이 나타나는 것으로 판단된다.

감사의 글

" 이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(No. M10500000119-06J0000-11910)."

참고문헌

1. 김정훈, 한상운, 임남형, 강영종 (2006), “궤도의 안전성 평가를 위한 체결장치의 실험적 연구”, 대한토목학회 학술대회 논문집, PP. 346~349
2. 이주현, 서사범, 이상진, 김재학, 김한중 (2006), “콘크리트도상 궤도 교량단부 상향력 해석 및 적용”, 한국철도학회 06춘계학술대회 논문집, pp.103-109
3. 안홍환(2004), “궤도 구성 인자들이 장대레일 궤도 안정성에 미치는 영향”, 석사학위논문, 고려대학교
4. CEN(European Committee for Standardization)(2002. 11.), “The European Standard EN 13146 Railway applications-Track-Test methods for fastening systems”, Part 1 PP. 1~8, Part 2 PP. 1~8, Part 7 pp. 1~10
5. J. Choros and I. Gitlin(1982) “Track component property tests”, Report No. R-479, AAR(Association of American Railroads)