

# 레일 체결구의 형상설계 및 해석 기술에 관한 연구

## A study on the shape design and analysis of rail fastener

이지하\*                      나성훈\*\*                      양신추\*\*\*                      임영락\*\*\*\*  
Lee, Jee-Ha                  Na, Sung-Hoon                  Yang, Sin-Chu                  Lim, Young-Lak

---

### ABSTRACT

In this paper, a technique for the shape design and analysis of rail fastener is presented. KRRI's own 3 type fasteners are developed after due consideration for the aspects of installation, maintenance, and cost of fastener. Numerical analyses by using commercial FEM program COSMOS/Works are carried out to determine the optimal shape of fastener clip. From the manufactured models and numerical results, the developed fasteners show the possibility to be commercialized. But in order to have their competitiveness on the markets, further studies are required for the demonstration of performance through laboratory and field tests

---

### 1. 서론

초기의 체결구는 레일을 침목 위에 고정하여 소정의 궤간을 확보하는 것이 주목적이었지만 그후 통과하중의 증가로 횡압 등 작용력이 증가함에 따라 더욱 견고하고 체결력이 강한 구조가 필요하게 되었으며, 현대에 와서는 열차의 속도가 획기적으로 향상됨에 따라 소음, 진동의 문제가 속도향상의 제한요소로 되어 이를 경감할 수 있는 탄성체결구가 개발되어 사용되고 있으며, 경제성 제고를 위하여 부설, 교체가 쉽고 유지보수비가 적게드는 체결구가 지속적으로 개발되고 있다. 최근에는 유지보수비의 절감과 소음, 진동을 줄이기 위한 직결제도, 슬라브제도 등 여러 가지 형식의 제도의 개발이 시도되고 있는데, 여기서도 체결구의 역할이 더욱 커지고 있다.

본 연구에서는 3개 유형의 독자형 체결구를 개발하였다. 먼저 체결구의 기본요건을 조사분석한 후 이들 기본요건을 만족하면서도 경제적이고 유지관리에 편리하도록 3개 유형의 체결구를 형상설계하였다. 형상설계된 각 체결구에 대하여 구조분석한 후 변위에 대하여 적정 체결력이 확보되는가를 검토하기 위하여 선스프링의 지름을 변화하면서 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 개발된 체결구의 실용화를 위해서는 실내시험 및 현장시험을 통한 성능검증을 위한 추가적인 연구가 있어야 할 것이다.

### 2. 레일체결구의 기본요건

#### 2.1. 체결장치의 역할

---

\* 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원  
\*\* 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원  
\*\*\*\* (주)강원궤도 기술팀 차장

체결구는 좌우 2개의 레일을 침목 등에 체결하여 소정의 계간을 확보, 유지하는 장치이다. 레일 체결장치는 레일에 가해지는 열차하중을 하부구조인 침목, 도상 노반에 전달하며 레일상하방향, 레일좌우방향, 레일종방향의 하중과 작용력, 여기에 수반된 회전력, 충격력 및 진동에 저항할 수 있어야 한다.

## 2.2 체결장치의 기능조건

체결구 개발시 고려해야하는 기능조건으로서는 충분한 강도, 충분한 기능(레일의 고정, 레일을 누르는 힘의 안정성, 하중의 분산과 충격 완화, 진동의 감쇠 및 차단효과, 조절성, 전기적 절연성 등), 구조의 단순화와 부재의 공용성, 경제성 등이 있어야 한다.

## 3. 체결구 형상설계

본 연구에서는 체결구를 제작하기 위한 절차를 제시하고 이 절차에 따라 몇 가지 모형을 개발하여 실제로 형상설계 및 해석을 수행하였다. 체결구의 개발과정은 그림 1과 같다.

체결구는 10개 내외의 부속품으로 이루어지며, 이들 부품간의 상호작용으로 하중을 전달하는 구조이나, 그 중 체결구의 성능에 가장 큰 영향을 미치며 복잡한 역학적 거동을 하는 부품이 체결스프링이다. 본 연구에서는 우선 이 체결스프링의 설계에 주안점을 두었으며, 각 부품에 대한 형상 설계조건 및 설계매개변수는 다음과 같다.

### 3.1 체결구 형상조건

- (1) 선스프링 방식: 세계적으로 선스프링과 판스프링 두가지 방식이 사용되고 있으나 본 연구에서는 체결구의 성능비교검토 결과 선스프링의 우수성이 인정되어 선스프링 방식으로 결정하였다.
- (2) 쇼울더 고정식: 나사식체결구의 여러 장점에도 불구하고 유지보수비의 감소, 사용성의 향상을 위하여 나사고정식의 단점을 개선한 쇼울더 고정식으로 하였다.
- (3) 형상의 대칭과 비대칭: 1점 또는 2점 접촉방식 및 기계적인 자동설치를 고려한 대칭과 비대칭 두 가지 방식을 제안하였다.

### 3.2 형상설계 매개변수

체결스프링의 형상 고안시 고려한 형상매개변수(Parameter)는 다음과 같다.

- 사용된 스프링가봉의 지름 (6mm~20mm)
- 스프링에 전달된 응력을 분산시키는 아치형 팔(arm)구조의 크기: 높이, 길이, 곡률
- 레일 저부 접촉부의 넓이 및 접근 각도
- 쇼울더 고정방식 및 고정각도

### 3.3 재료조건

체결구 제작에는 특수한 스프링강을 사용하게 된다. 대변형에서도 고강도 특성을 유지할 수 있어야 한다. 현재 철도청에서는 코일스프링형 침목체결구(Pandrol 형)에 대해서 소재의 재질을 KSD 3701, SPS 4종 또는 JIS 4801, SUP 7종에 적합한 소재로 정하고 있다. 이 SPS 4종 강재는 '실리콘 망간 강재'로서 주로 곱판스프링, 코일스프링 및 비틀림 막대 스프링에 사용하는 것이다.

강재에 대한 기계적 성질은 표 1과 같다.

도표 1. 체결구의 재료조건

기호	내력 0.2% kgf/mm <sup>2</sup> {MPa}	인장강도 kgf/mm <sup>2</sup> {MPa}	연신율 %
			4호 또는 7호 시험편
SPS 4	110(1079) 이상	125(1226) 이상	9이상

3.4. 형상설계된 체결구들의 특성 및 구조분석

본 연구에서는 여러 형태의 스프링을 검토하여 최종적으로 다음 3가지의 독창적인 모형을 개발하였으며 각 모델의 특성 및 구조분석은 다음과 같다.

(1) 유형 I(Type I, 그림 2)

설치와 해체가 간편하고, 영속적이고 탄성적인 체결력을 가지고 있다. 또한 유지보수비가 적게 들며 구성부품의 수가 적으며 조립과 해체가 쉬운 특성이 있다.

모형은 비대칭형 선스프링이며 1점 접촉방식이다. 하중을 전달하는 주 부재는 2개의 서로 다른 형상의 아치형 팔로 (㉓, ㉔, ㉕)의 아치와 (㉗, ㉘)번의 아치이다. ㉖번 부분에서 레일의 저부를 지압하게 된다. 이 아치는 높이 33.6mm에 길이는 101mm에 이르며, 레일 저부 들림에 의한 하중전달 경로는 2개의 아치를 따라 각각 ㉑번과 ㉙번 부분에서 특수하게 제작된 쇼울더에 끼워지게 된다. ㉑번과 ㉙번의 부재는 실형 쇼울더에 끼워지게 되며 따라서 회전은 가능하나 변위는 구속된다. 특히, ㉑번과 ㉙번 두 부재의 축방향이 서로 직각이라서 안정적으로 설치된다.

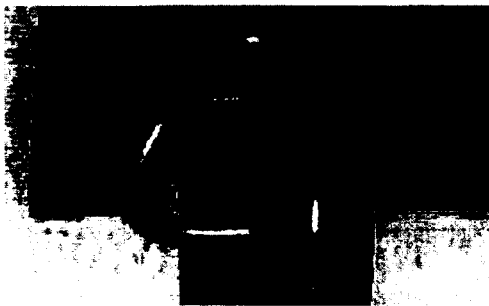


그림 2. Type I 모형사진

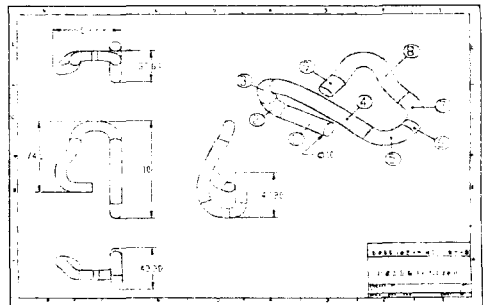


그림 3. Type I의 구조 형상

(2) 유형 II(Type II, 그림 4)

체결구 사용기간중 충분한 지압력을 유지할 수 있는 구조이며, 체결구를 해체하지 않고 쉽게

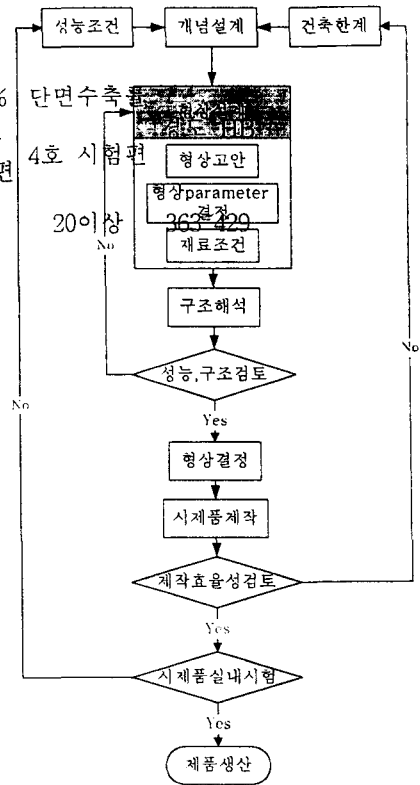


그림 1. 체결구 설계 흐름도

체크할 수 있다. 또한 설치 후 오랫동안 탄성특성을 유지할 수 있는 구조적 특성이 있다.

대칭형 선 스프링이며 1점 접촉방식이다. 하중을 전달하는 주 부재는 아치형의 팔(④,⑤,⑥)로 레일의 저부를 지압하게 된다. 이 아치는 높이 43mm에 길이는 115mm에 이르며, 레일 저부 들림에 의한 하중전달 경로는 ⑦번 부분이 레일과 직접 접촉하고 ⑥→⑤→④번 부분을 통하여, ③번 까지이다. ②번 부분은 쇼울더의 바닥과 접촉하게 되어 상방향 변위가 구속된다. ①번 부분은 쇼울더에 만들어진 구멍에 끼워지게 되어 스프링의 중심축 방향으로 회전은 가능하나 변위는 구속된다. 본 모형은 하중경로가 길어 체결스프링의 파손위험이 적고 탄성변위가 커서 지압력이 과다하게 발생하지 않고, 쇼울더와 절연판을 이용한 체결구의 높이 조절을 통하여 체결력을 조절할 수 있다.



그림 4. Type II 모형사진

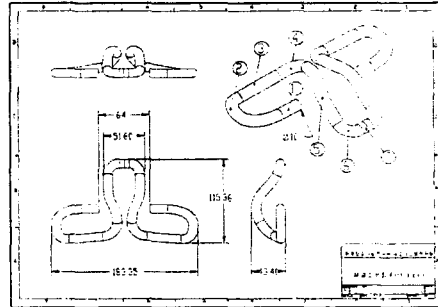


그림 5. Type II의 구조 형상

(3) 유형 III (Type III, 그림 6)

구조가 간단하며 쇼울더의 형태가 다른 것이 특징이다. 이 모형도 대칭형 선 스프링이며 1점 접촉방식이다. 하중을 전달하는 주 부재는 아치형의 팔(③,④,⑤)로 ⑥번 부분에서 레일의 저부를 지압하게 된다. 이 아치는 높이 33mm에 길이는 101mm에 이르며, 레일 저부 들림에 의한 하중전달 경로는 ⑥번 부분이 레일과 직접 접촉하고 ⑤→④→③번 부분을 통하여, ②번까지이다. ①번 부분은 T자 모양의 쇼울더 양쪽 홈에 끼워지게 되어 스프링의 파손시 교체가 용이하다. 쇼울더의 모양은 실물모형사진에서 확인할 수 있다. 따라서 스프링의 중심축 방향으로 회전은 가능하나 변위는 구속된다. 이 모형 역시 하중경로가 비교적 길어 체결스프링의 파손위험이 적고 탄성변위가 커서 지압력이 과다하게 발생하지 않을 것으로 기대된다.



그림 6. Type III 모형사진

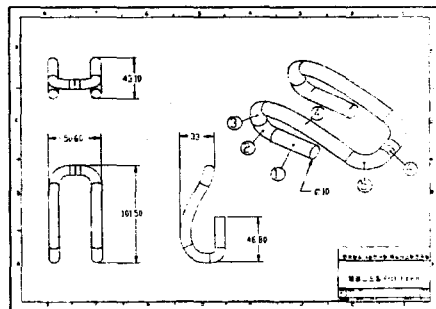


그림 7. Type III의 구조 형상

#### 4. 체결구 구조해석

##### 4.1 물성조건

실제 체결스프링에 사용되는 강은 특수 스프링강으로서 고강도, 고탄성강이 사용된다. 특히 체결구에 사용되는 스프링강은 담금질이나 뜨임질로 금속내부 성질이 현격히 변화하여 강인한 성질을 갖게된다. 그러나 본 연구에서는 체결구강의 물성조건에 대한 자료가 부족하여 일반적인 탄소강에 대한 물성치를 사용하여 해석하였다.

##### 4.2 해석모델링

체결구의 구조해석은 복잡한 기계부품을 편리하게 모델링 할 수 있는 Solid Works 99 프로그램과 연계할 수 있는 COSMOS 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다. 사용된 요소는 COSMOS/M에서 제공한 사면체 요소(Tetra-2nd Order Uniform Mesh)를 사용하였다. 균일한 단면이므로 가급적 균일하게 체산화(Mesh)화 하였다. 그림 8은 각 체결구 유형의 유한요소 모델을 나타낸다.

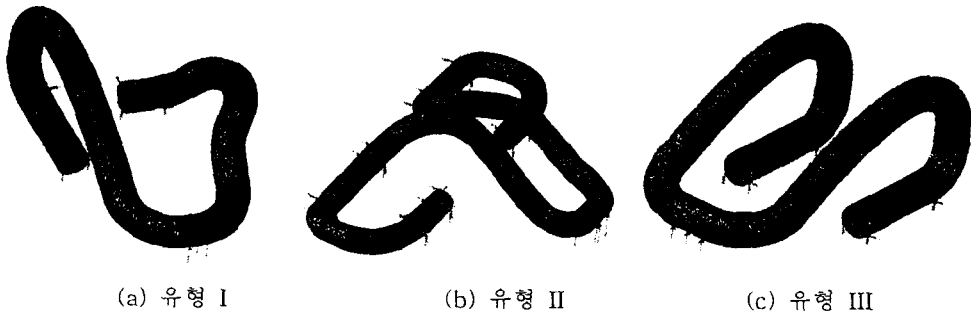


그림 8. 체결구의 유한요소 모델

##### 4.3 경계조건 및 하중재하

해석을 위한 경계조건은 쇼울더와의 결합상태를 고려하여야 한다. 따라서 쇼울더와 끼워지는 스프링강의 단부부분은 선스프링 축에 대하여 회전이 자유롭게 하고 변위는 쇼울더의 탄성변위에 일치하여 변형될 수 있도록 하였다. 그림 9는 유형 2 체결구에 대한 경계조건의 예를 나타낸다.

하중조건은 하중을 재하지 않고 역으로 레일의 접촉면에서 수직으로 1~15mm의 변위를 주었을 때 이에 대응하는 하중을 구하였다. 이때 적정 체결력은 철도용품 표준규격의 시험조건에서 제시한 레일의 접촉면에 상방향으로만 13mm의 변위에 대응하는 하중이 적정 체결력(1,100~1,400 kgf)의 범위 내에 있는가를 비교함

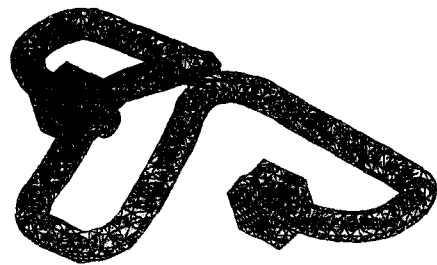


그림 9. 유형 II 체결구의 해석모형 및 경계조건

으로써 검토하였다.

#### 4.4 해석결과

그림 10은 유형 I 체결구의 변위-응력도를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 최대응력이 ⑦번 부분에서 발생하고 있는 것을 알 수 있는데 이는 형상의 비대칭에 기인되었다고 판단된다. 스프링 강봉의 지름은 10mm로 하고, 레일 저부와 접촉하는 ⑥번 부분에 상방향으로 13mm의 변위를 주었을 때 대부분의 영역에서는 1600MPa 응력이 발생하는데 이 값은 철도청의 기준인 1079MPa를 상회하므로 보다 큰 지름의 스프링강이 필요함을 알 수 있다.

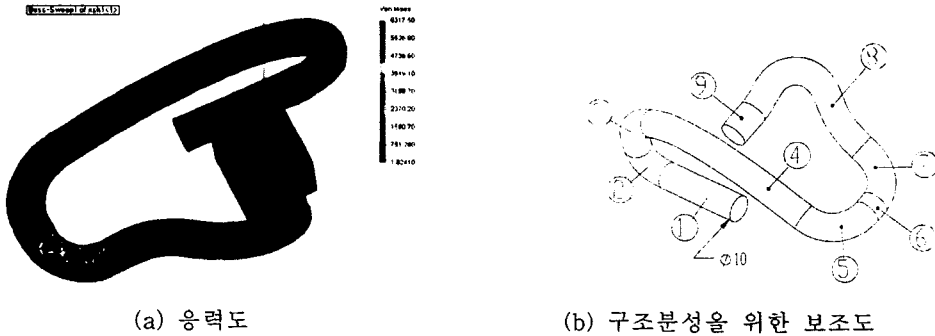


그림 10. 유형 I의 응력도

레일접촉점에서 스프링강의 변위에 대한 체결력을 나타낸 그림 11로부터, 체결력이 철도청의 기준인 1,100~1,400 kgf에 도달할 때의 변위는 5~6mm 정도로 소요변위 13mm에는 이르지 못하는 것을 알 수 있다. 이것은 탄성해석 결과로 실제 보다는 체결력이 크게 산출된 것으로 정확한 스프링강의 굵기를 결정하기 위해서는 소성해석이 수행되어야 할 것이다.

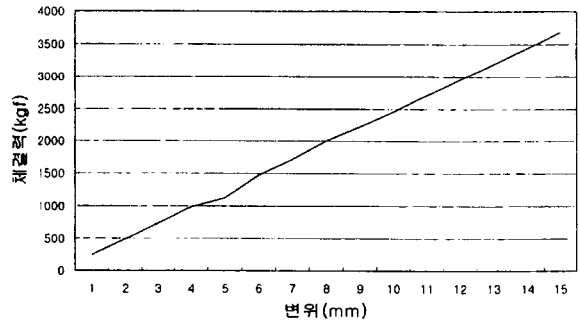


그림 11. Type I의 체결력-변위 곡선

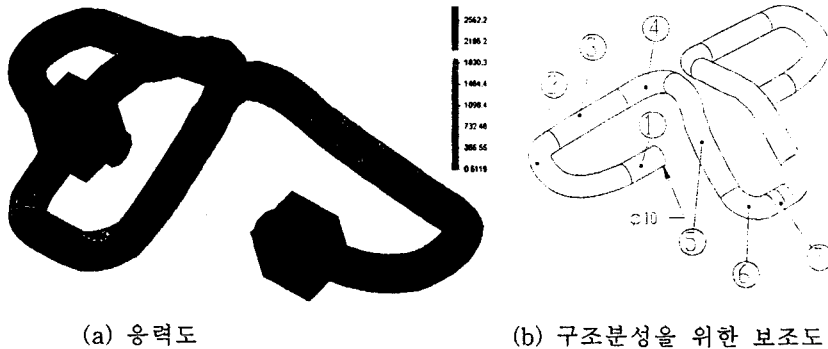


그림 12. Type II 의 응력도

그림 12는 유형 II 체결구의 응력도를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 밝은 ③~⑦부분에서 응력이 크게 발생하고 ⑥부분에서 최대 응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 변위-체결력을 나타낸 그림 13으로부터 변위를 13mm로 하였을 때 직경 8mm의 경우 응력은 21,000 kgf 서 기준한도인 12,500 kgf를 넘어서고 있음을 알 수 있다.

유형 III 체결구의 응력도를 나타낸 그림 14로부터 쇼울더에 결합되는 부분인 ②부분에서 최대응력이 발생하는 것을 알 수 있다.

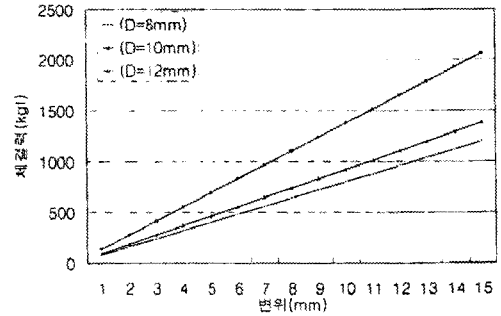


그림 13. 유형 II의 변위에 따른 체결력



(a) 응력도



(b) 구조분석을 위한 보조도

그림 14. Type III 의 응력도

### 5. 체결구 최적설계

체결구의 최적화에서 중요한 것은 사용된 재료를 최소화하면서 사용기간 동안 구성품이 파손되지 않도록 설계하는 것이다.

본 연구에서는 주요부품인 체결스프링의 최적설계를 수행하였다. 개념설계를 통하여 몇 가지 유형에 대한 기초 형상을 결정한 다음, 각 모형들에 대하여 형상 및 스프링강봉의 굵기를 변화화면서 최적의 체결력이 얻어지도록 유한요소해석을 되풀이하였다.

그림 15는 유형 III에 대한 스프링강봉의 최적 굵기를 결정하기 위하여 강봉의 지름을 8~14mm로 크기를 변화하며 변위에 대응하는 체결력을 구한 것이다. 이 결과로부터 현재의 강재특성으로 볼 때 직경 8mm 이하에서 체결력 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. 이 때의 내부응력도 항복강도를 초과하지 않음을 알 수 있다. 따라

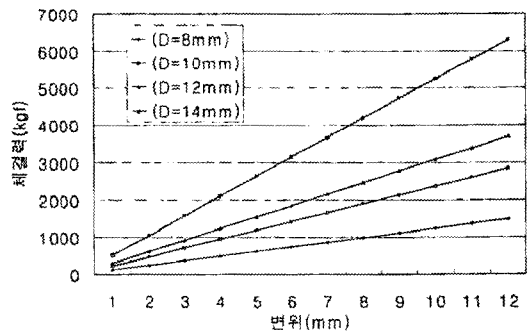


그림 15. Type III 의 변위-체결력 곡선

서 유형 III의 모델에 대해서는 강보의 굵기가 직경 8mm가 적합함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

체결구의 기본요건을 조사분석한 후 이들 기본요건을 만족하면서도 경제적이고 유지관리에 편리하도록 3개 유형의 체결구를 형상설계하였다. 형상설계된 각 체결구에 대하여 구조 분석한 후 변위에 대하여 적정 체결력이 확보되는가를 검토하기 위하여 선스프링의 지름을 변화하면서 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 형상설계된 3개 유형의 체결구에 대한 수치해석의 결과로부터 3개 유형 모두 스프링강봉의 굵기 및 형상에 대하여 최적설계가 이루어지면 활용 가능한 체결구가 될 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 체결구 개발을 완성하기 위해서는 향후 일반 탄소강이 아닌 스프링강 재료를 사용한 최적 형상설계 연구가 수행되어야 하며, 실험실 및 현장실험을 통하여 성능검증 과정을 걸쳐야 할 것이다. 또한 전체 체결구 시스템의 복합적인 거동에 대한 성능향상을 위하여 다른 체결구 부품에 대한 최적화 연구도 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 長藤敬晴 外(1992), "레일締結裝置의 機能向上", RTRI REPORT, Vol.6, No.11.
2. V.A.Profillidis(1995), "Railway Engineering"
3. 松原 健太郎(1979), "신간선의 궤도", 일본철도시설협회
4. 村上卓男(1992), "팬드롤 締結裝置 開發·導入後", 일본철도시설협회지
5. DELKOR PTY LTD, Clouth Elastic Fasteners for Ballatless Rail Tracks