

# 슬래브궤도의 구조안전성 평가

## Evaluating of Structural Safety of Slab Track

강윤석\*                      양신추\*\*                      이영제\*\*\*  
 Kang, Yun-Suk    Yang, Sin-Chu    Lee, Young-Je

### ABSTRACT

In recent years, the destructive force acting on the ballasted track is on the increase with the speed-up of trains and the number of trains, requiring more labor and- expenditure to maintain the track in good condition. Slab track has been developed to decrease the track maintenance work on earthworks. One type of slab track Rheda has prefabricated track grid, consisting of rails, prestressed concrete sleepers and reinforcement rods are aligned into position, and then concrete is then placed to integrate the sleepers into a reinforced concrete track slab. In this paper, a new analysis model for the system analysis of the slab track is presented. Then the analysis results are compared with requirements for slab track.

### 1. 서론

현재 전세계적으로 200km/h이상의 고속 운행시 운영되는 슬래브궤도는 독일, 일본, 이탈리아 등에서 개발된 몇 개의 형식에 국한되어있다. 산악지형이 많아 교량, 터널, 암거등의 토목구조물의 비율이 높은 나라에서는 더욱 적극적으로 일본의 슬래브궤도경우는 2,700km연장에 275km/h의 영업속도를 달성하였고 독일의 경우 슬래브궤도의 시공이 활발하여 200km이상의 부설실적을 가지고 있으며 ICE3를 위한 신선구간에 슬래브궤도로 약 180km의 부설이 계획되고 있는 실정이다. 전세계적인 추세에 맞추어서 현재 국내에서도 현장타설식 슬래브궤도에 대한 적극적인 검토가 되고 있는 형편이다. 본 연구에서는 기존의 일본 직결식궤도와 다른 현장 타설식 슬래브궤도에 대한 해석모델을 새롭게 제시하고 구조안전성 평가항목을 정한 후 예제해석을 통해서 구조안전성을 평가하였다.

표 2. 안전성평가의 성능검토사항

구 분	검토대상
레 일	- 최대처짐 : 레일의 허용처짐 - 최대휨모멘트 : 실차 주행에 따라 발생하는 레일 휨모멘트
슬래브(트로프)	- 주응력 : 주응력방향 압축, 인장응력검토 - 수직처짐, 수평밀림 - 휨모멘트

\* 한국철도기술연구원 주임연구원

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원

\*\*\* (주) A.V.T 대표이사

## 2. 설계하중

KTX의 차량축중( $W_0$ )은 17t이며 차량축중재하위치는 그림 1과 같다. 상하방향의 동적인 열차하중(윤중P)는 정적윤중  $W_0/2$ 가 된다. 따라서 설계윤중은 축중 17t을 좌우 윤축수로 나눈 8.5t이 되는데, 축중에 의해 발생하는 최대하중은 적절한 안전을 N값을 고려해 설계하중으로 정의할 수 있다. 슬래브에 윤중을 고려하기 위해서 N값을 고려한다면 차량의 마모로 인한 차량 플랫폼(flat) 또는 이상궤도 틀림, 부등침하등이 있을 경우를 고려해 고속철도공단 시방서에서는 N의 값을 3으로 제시하고 있다. 즉

$$P = \frac{17}{2} \times 3 = 25.5t$$

실제 레다형(Rheda)궤도를 사용하는 독일의 경우 무도상구조 설계에 적용되는 기준은 축중 250 kN, 윤중은 125kN로 12.75t(f)이 된다. 이외에 ICE 동력차 역시 하중의 기준이 될 수 있으며 1.5배의 안전성을 보장하기 위해 계산시 정역학적 윤력이 추가적으로 50% 확보되어야 하고 곡선주행시 윤력변위의 20%가 추가 확보되는 것이 특징이다.

본 해석에서는 고속철도 공단시방서에서 제시한 축배치도에 따라 독일 레다궤도 성능요구조건인 설계윤중 125kN(12.75t)과 고속철도 공단시방서의 설계윤중 225kN(25.5t)에 대한 슬래브 궤도의 안전성평가가 수행되어 비교분석 되어있다.

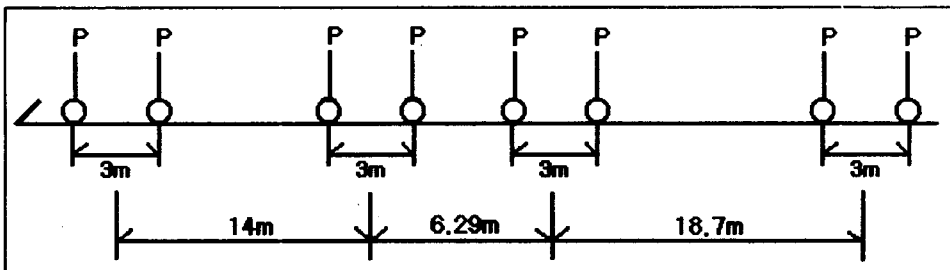


그림 1. 축중하중선도

## 3. 3차원 유한요소모델링

슬래브궤도의 설계 및 안전성 검토를 위해서는 궤도슬래브에 발생되는 모멘트와 파괴면에 발생되는 주응력이 검토되어야 한다. 일반적으로 보이론에 의해 근사치를 얻을 수 있다. 그러나 보이론에 의한 방법은 레일패드의 탄성이 연속적으로 분산되기 때문에 레일간격이 크게 되면 레일지지 탄성이 작게 되기 때문에 슬래브 휨응력이 다소 작게 계산된다. 또한 평판구조로 레일직각 방향의 엄밀해를 구할 때 제한성을 가지게 된다. 이러한 점을 개선시키고 침하량외에 실제 트로프의 평면응력분포를 고려하기 위하여 판요소를 사용한 유한요소법(Finite Element Method)에 의한 궤도슬래브의 해석을 수행하였다. 실제 일본에서는 東北·上越 신간선에서는 평판모델링을 통한 유한요소법을 이용한 해석방법에 의해 궤도슬래브가 설계되었고 고속철도공단의 궤도구조설

계보고서에도 이러한 방법에 대해서 기술되어 있다.

본 해석에서는 대상이 되는 궤도를 범용 유한요소프로그램인 LUSAS를 이용하여 Thick Shell 요소와 Thick Beam 그리고 Joint Element와 스프링요소를 통해서 격자형구조로 모델링하여 해석하였다. 모델링상세는 표 2와 같다.

표 3. 모델링상세

구분	모델링 상세
레일	(1) 전단을 고려한 Thick Beam Element (2) eccentricity를 고려함.
레일패드	(1) 레일패드의 강성은 체결구마다 스프링으로 고려
매트	(1) 지점조건은 실제 매트의 동적 스프링 지지계수를 고려하여 처짐을 구함
트로프	(1) Thick Shell Element로 고려 (2) 4각형 8절점요소로 연속체로 고려해 해석
PC 침목	(1) Beam요소로 모델링 (2) 단 하중분배효과 및 침목의 응력분배정도를 파악을 위해서는 shell element를 통해서 해석수행을 통해 가시화
충축강봉	(1) Bar element (2) 충전콘크리트 타설후 고정후에는 휨모멘트를 전달가능함을 가정하기 때문에 Beam Element로 모델링

일본의 슬래브궤도역시 3절점을 가지는 삼각형 평판요소로 분할하여 해석을 수행하였는데 이는 곡률이 있는 돌기주변의 해석을 위한 목적이었다. 레다형궤도는 연속타설식으로 돌기가 없는 관계로 사각형요소를 사용했지만 그 정확성을 높이기 위해 8절점요소를 도입하여 해석을 수행하였다. 레일의 경우는 침목위에 방진패드에 의해서 지지되는 보요소로, 레일을 지지하는 체결구는 강성을 가진 스프링으로 모델링하였다. 침목 역시 강성을 가지고 있는 보요소로 모델링하였으며, 침목의 강봉을 고려하여 격자형구조를 모델링하고 하부트로프를 평판으로 하여 해석을 수행하였다.

침목을 관통하는 강봉의 경우 충전콘크리트와 일체되어 거동하기 때문에 휨강성일부가 전달되므로 보요소로 가정하였고, 매트 역시 하부의 하중분포와 횡압으로 인한 수평방향밀립을 파악하기 위해서 스프링 지지를 시켜 열차주행시 안전성을 평가하였다

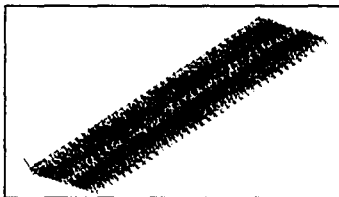


그림 2 슬래브궤도의 요소분할모델

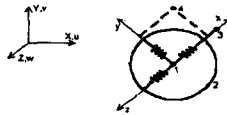


그림 3 Spring Element

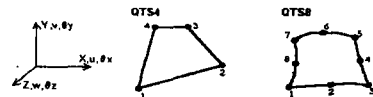


그림 4 Thick Shell Element

#### 4. 예제해석

타설식 슬래브케도의 실질적인 거동특성을 알아보기 위하여 경부고속철도 남서울정거장 STA17Km 500, . 일부터널구간에 부설이 검토중인 슬래브케도에 대하여 범용해석프로그램인 LUSAS 프로그램을 이용하여 제안된 새로운 모델에 설계하중을 재하하여 그 구조거동을 평가하였다. 시스템검토에 사용된 슬래브케도의 각 구성품의 제원 및 물성치는 표 3과 같다.

슬래브케도 설계시 케도구조의 안전성과 차량의 주행안전성 및 승차감 측면에서 검토해야할 검토항목과 각각의 검토 기준은 표 1과 같다. 이러한 레다형 케도는 격자형구조로 콘크리트도상케도중 하중분배가 뛰어나며 시공속도가 빠르며 부설실적이 많은 케도중의 하나이다.

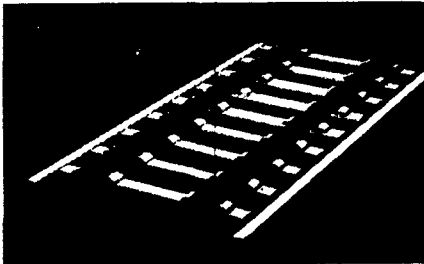


그림 5. 대상슬래브케도(측면)

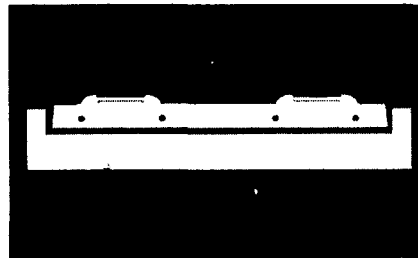


그림 6 대상슬래브케도(전면)

표 4 슬래브케도의 상세제원

구 분		재료특성
케도(고속철도용 레일)	(1) 단면적	78.9cm <sup>2</sup>
	(2)단위길이당 중량	60.3kg/m <sup>3</sup> /m
	(3) Iz	3090cm <sup>4</sup>
	(4) Iy	512cm <sup>4</sup>
	(5) 탄성계수	E=210,000N/mm <sup>2</sup>
탄성패드	(1)Static	22.5±2.5 KN/mm
	(2)Dynamic(주행고려)	50%증가
탄성매트	(1)Static	0.01N/mm <sup>3</sup>
	(2)Dynamic(주행고려)	0.015N/mm <sup>3</sup>
콘크리트	(1)설계기준강도	350kg/cm <sup>2</sup>
	(2)탄성계수	300,000kg/cm <sup>2</sup>
	(3)단위중량	2500Kg/cm <sup>2</sup>
	(4)포아송비	0.18
	(5)트로프 단면적	3.2754m <sup>4</sup>
콘크리트 침목	(1)설계기준강도 (고속철도용 재령 28일)	600kg/cm <sup>2</sup>
	(2)길이	260mm
	(3)중량	296kg
재하운중	(1) 독일기준	125KN(12.75t)
	(2) 고속철도슬래브설계기준 중 안전율3배고려	225KN(25.5t)

## 5. 해석결과 검토

### 5.1 레일의 처짐 및 용력검토

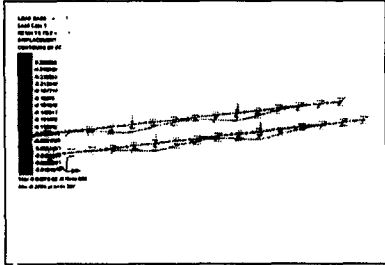


그림 7. 레일의 처짐

표 5. 레일 및 패드에서의 최대응답치

구 분	12.75t(f) 하중재하시	25.5t(f) 하중재하시	판정기준
레일최대처짐 (mm)	1.343	2.684	125KN:1.5mm 225KN:3.0mm
레일 휨용력 (N/mm <sup>2</sup> )	두부	137.3	200KN: 200N/mm <sup>2</sup> 225KN: 300N/mm <sup>2</sup>
	저부	111.01	
레일패드 최대지압력 (kN)	50.36	100.65	-

슬래브케도 검토프로그램을 이용하여 해석한 레일처짐은 그림 7과 같고 레일에 최대처짐, 레일 두부 및 저부에서의 휨용력, 레일패드의 최대 지압력은 표 4에서 제시된 바와 같다.

이들 결과로부터 레일의 최대처짐은 12.75t(125kN)이 재하되는 경우는 1.343mm로 독일철도에서 주행시 제한하고 있는 1.5mm처짐과 일본 신칸센 신주행판정표준에서 제한하고 있는 200kN의 2mm를 넘지 않는다. 25.5t(225kN)재하시에는 그 처짐량이 커지게 되는데 2.684mm까지 이르게 되는데 여기에 대한 제한기준은 3mm정도이지만 제한치에 근접하는 값이므로 레일의 허용용력 검토가 요구된다. 레일저부의 인장력과 두부의 압축력이 허용용력을 초과 레일손상을 유발시킬정도로 변위가 발생되면 안되므로 제한치와의 비교검토가 필요하다. 검토결과 레일 두부 및 저부 휨용력은 두부(68.8N/mm<sup>2</sup>) 및 저부(55.6N/mm<sup>2</sup>)이며 레일의 허용휨용력 200N/mm<sup>2</sup>(200kN적용시)보다 적으므로 허용치 안에 드는 것을 알 수 있다.

레일패드의 압축력은 윤중에 의한 케도변형 및 패드의 변위발생등으로 감소되어 12.75t(125kN)인 경우에는 50.36kN, 25.5t(225kN)재하시에는 100.65kN이 발생되었다.

### 5.2 트로프의 처짐 및 밀림 검토

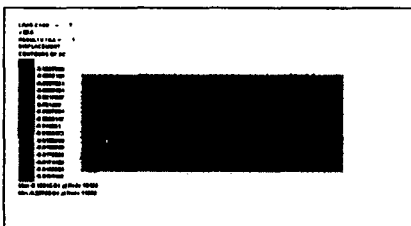


그림 8. 트로프의 처짐형상

표 6. 트로프의 처짐

구 분	12.75t(f) 하중재하시	25.5t(f) 하중재하시
수직처짐	0.12mm	0.24mm
횡압으로 수평밀림	0.081mm	0.171mm

열차주행시 안전성판단을 위해 트로프 및 레일직각방향밀림에 대해서도 분석을 하였는데 독일 에 기준외에 일본의 직결슬래브케도기준과 비교하였다. 수직처짐발생은 윤중재하부 주위로 적은 처짐이 발생되었다. 수직처짐에 비해 횡압(수직윤중의 0.8배)으로 인한 수평밀림은 매우 적은 값을 보이고 있다.

### 5.3 트로프의 응력검토

슬래브의 응력검토는 슬래브상단에 발생되는 압축력과 매트와 접촉하는 슬래브하단에 하중재하로 인한 슬래브 휨응력을 분석하였다. 그림10~그림18까지 125kN과 225kN의 운중재하시의 슬래브상하단의 주응력분포를 나타낸 것이다.

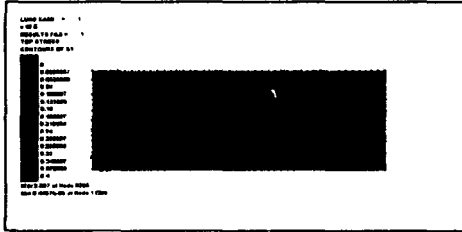


그림 9. 레일방향의 슬래브상단 주응력분포(12.75t재하)

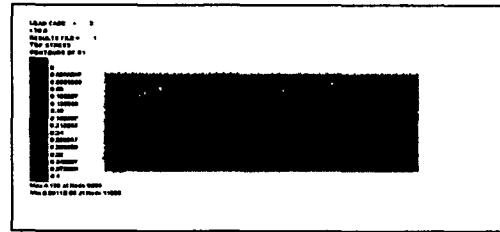


그림 10. 레일방향의 슬래브상단 주응력분포(25.5t재하)

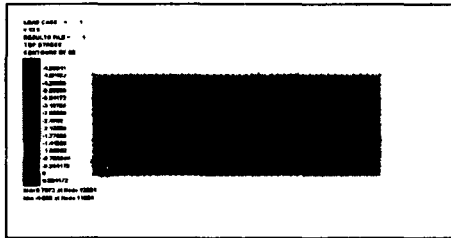


그림 11. 레일직각방향의 슬래브상단 주응력분포(12.75t재하)

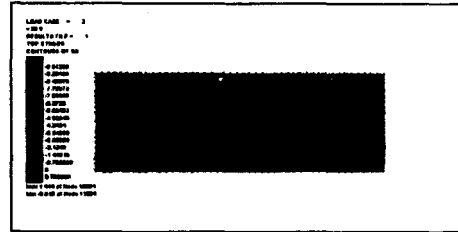


그림 12. 레일직각방향의 슬래브상단 주응력분포(25.5t재하)

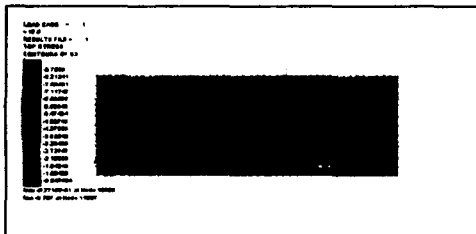


그림 13. 연직방향의 슬래브상단 주응력분포(12.75t재하)

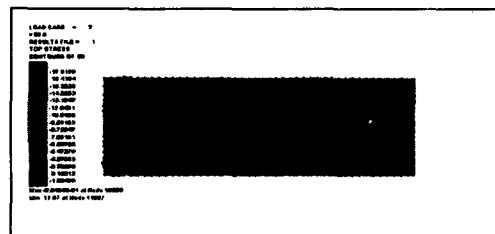


그림 14. 연직방향의 슬래브상단 주응력분포(25.5t재하)

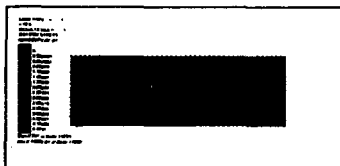


그림 15. 레일방향의 슬래브하단 주응력분포(12.75t재하)

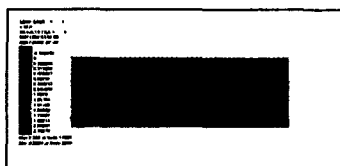


그림 16. 레일직각방향의 슬래브하단 주응력분포(12.75t재하)

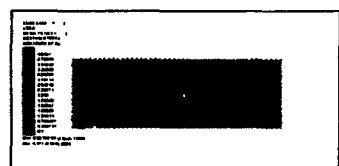


그림 17. 운중재하방향의 슬래브하단 주응력분포(25.5t재하)

상부슬래브의 경우 레일두부에 재하된 윤중은 하중재하 체결구 및 인접 체결구를 통해 윤중재하방향 전후로 하여 고르게 분산되며 레일과 침목, 그리고 침목을 관통하고 있는 강봉을 통해 격자형으로 분산되게 된다. 하중에 따른 결과는 표 6에 제시되어 있으며 슬래브상단의 압축력은 기준내에 들게된다. 슬래브하단에 반복윤중을 통한 인장균열을 설계시 고려해야 하므로 트로프하단의 인장력을 검토하면 125kN의 하중재하시 레일방향으로 4.797kg(f)/cm<sup>2</sup> 레일직각방향으로 2.226kg(f)/cm<sup>2</sup>의 인장력이 발생된다. 225kN하중 재하시에는 레일방향으로 9.590kg(f)/cm<sup>2</sup> 레일 직각방향으로 4.450kg(f)/cm<sup>2</sup>의 인장력이 발생되어 제한치 30kg(f)/cm<sup>2</sup>를 넘지 않았다.

슬래브의 격자형구조로 인해 균등한 처짐이 유도되었고 매트와 유연한 강성으로 인한 하중분배효과로 인해 윤중재하시 압축력은 최대 4.171kg(f)/cm<sup>2</sup>를 상회하지 않아 하중분배효과를 알 수 있었다.

표 7. 하중에 따른 결과분석

구 분	12.755t 윤중재하	25.5t (공단기준 안전율3배)	제한치 비 교
트로프상단 최대주용력 (S1)	2.067kg(f)/cm <sup>2</sup> (인장)	4.133kg(f)/cm <sup>2</sup> (인장)	고속철도궤도 구조설계보고서 시공, 제작 및 주행시 기준:  압축력 160kg(f)/cm <sup>2</sup> 인장력 30kg(f)/cm <sup>2</sup>
트로프상단 최대주용력 (S2)	4.960kg(f)/cm <sup>2</sup> (압축)	9.915kg(f)/cm <sup>2</sup> (압축)	
트로프상단 최대주용력 (S3)	8.787kg(f)/cm <sup>2</sup> (압축)	17.57kg(f)/cm <sup>2</sup> (압축)	
트로프하단 최대주용력 (S1)	4.797kg(f)/cm <sup>2</sup> (인장)	9.590kg(f)/cm <sup>2</sup> (인장)	
트로프하단 최대주용력 (S2)	2.226kg(f)/cm <sup>2</sup> (인장)	4.450kg(f)/cm <sup>2</sup> (인장)	
트로프하단 최대주용력 (S3)	2.086kg(f)/cm <sup>2</sup> (압축)	4.171kg(f)/cm <sup>2</sup> (압축)	

## 6. 결 론

본 논문에서는 기존의 일본 직결식궤도와 다른 현장 타설식 슬래브궤도에 대한 해석모델을 새롭게 제시하였다. 제시된 모델은 기존의 레일패드의 탄성을 연속적으로 분포시키지 않고 체결부마다 1개의 선형스프링으로 이산되어 있으며 종방향철근과 침목을 고려하여 격자형모델을 통해 슬래브상하단의 하중분포상태를 비교할 수 있도록 하였다. 또한 트로프 하단의 스프링을 통해 횡방향 밀림에 대한 검토가 가능하도록 모델을 개선하였다.

또한 본 모델에서는 모델제시후 구조안전성 평가기준을 정한 후 예제해석을 통해서 구조안전성을 평가하였다. 해석을 통해 12.75t(125kN), 25.5t(225kN)의 윤중재하시 레일의 최대처짐

및 트로프의 연직방향처짐, 횡압으로 인한 수평방향밀림의 분석을 통해 열차주행안전성을 평가하였다. 아울러 발생하는 레일 휨응력을 검토하여 궤도안전성을 검토하였다. 그리고 트로프의 주응력 분포분석을 통해 슬래브의 격자형구조와 방진매트등의 효과를 검토하고 균열단면에 대한 슬래브궤도의 설계요소에 대해 분석에 의거하여 제시된 성능평가기준을 만족함을 확인 할 수 있었다.

앞으로 아울러 온도하중으로 인한 장대레일축력 시계동등의 슬래브밀림등이 평가되어야 할 것으로 보이며 실제 현장에서의 계측된 특성값과 해석에 대한 보정치를 구하여 슬래브궤도의 성능요구구조건의 설정 및 더욱 개선된 모델을 통한 구조검토가 필요하다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 G7 궤도기술개발과제로 수행되었으며, 연구비를 지원해주신 건설교통부, 산업자원부 과학기술처와 참여기업인 철도기술공사, AVT등에 감사드립니다.

#### 7.참고문헌

- (1) 韓國高速鐵道建設公團 : 슬래브 軌度構造 設計報告書, 1994. 12.
- (2) 강기동, 콘크리트 軌度 슬래브의 構造 解析에 關한 研究, 1980.
- (3) 양신추, 이희현, 신중서, "저진동 궤도구조에 관한 연구(II)", 대한토목회, 학술발표회의 논문집, 1994. 10.
- (4) 이상진, 슬래브궤도 등 성력화궤도의 설계·시공과 보수 철도시설No.58
- (5) 양신추, 강윤석 "궤도하부강성 변화에 따른 방진슬래브궤도의 동적특성 연구", 한국철도학회 춘계 학술발표회, 1998. 5., pp. 307~314
- (6) 양신추, 강윤석, "슬래브궤도의 시스템설계 기법개발", 한국철도학회 추계학술발표회, 1999. 11., pp. 455~462
- (7) 이종득, 「철도공학」, 노혜출판사, pp. 13~23, 1996.
- (8) 山本 喬 外 1人, " 內省力化軌度 防振 軌度", 日本鐵道施設協會誌, 1993. 6.