슬래브궤도의 시스템설계 기법개발
Development of a numerical method for system design of slab track

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

ABSTRACT

In this paper, a numerical method for the system analysis of the slab track is presented. In the model, rail is considered to have a distributed mass and to be supported by sleepers discretely on slab. The slab supported by discrete slab pads - isolators put on floor is modelled by finite beam elements. The system analysis for the same type floating slab laid in Puchon station is carried out using the developed program. Then the numerical results are compared with system requirements for slab track.

1. 서 론

차량이 슬래브궤도상을 주행할 때 슬래브 자체의 구조적 안전성뿐만 아니라 차량의 주행안전성 및 승차감이 확보되어야하며, 슬래브궤도가 방진목적으로 부설된 경우는 요구되는 방진성능이 확보되어야 한다. 따라서 슬래브궤도를 설계한 후에 상기의 요구조건들을 충족하는가를 평가할 수 있는 궤도의 시스템 해석기법의 개발은 슬래브궤도 설계에 있어서 중요한 과제이다.

본 연구에서는 슬래브궤도의 시스템 성능을 검토할 수 있는 해석기법을 개발하였다. 개발된 해석기법을 사용하여 최근 부설된 부천역사의 방진슬래브궤도와 동일 조건의 방진궤도에 대하여 시스템성능을 검토하였다.

2. 슬래브궤도 시스템성능 검토사항

슬래브궤도 설계시 궤도구조의 안전성과 차량의 주행안전성 및 승차감 측면에서 검토해야할 검토항목과 각각의 검토 기준은 표 1과 같다.

표 1. 시스템별 성능검토사항

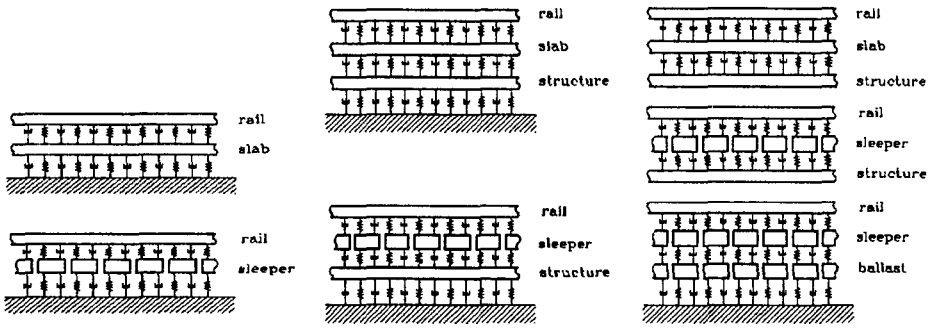
구 분	검토대상
레 일	- 최대처짐 : 레일의 허용처짐은 대체로 1.5mm 적합 - 최대휨응력: 실차 주행에 따라 발생하는 레일 휨응력 $80kN/mm^2$ 이하 만족
레일패드	- 패드 압축응력 - 레일패드의 압축응력은 탄성영역내
슬래브	- 휨응력 : 휨응력은 설계휨응력이하
슬래브패드	- 슬래브패드의 허용압축응력
공진주기	- 3~6Hz

* 한국철도기술연구원 책임연구원
** 한국철도기술연구원 주임연구원
*** (주) A.V.T 대표이사

3. 슬래브궤도 시스템설계 기법개발

궤도의 동적해석 모형은 크게 연속지지모델(Continuous Support Model)과 이산지지모델(Discrete Support Model)로 분류할 수 있다. 연속 지지 모델은 실제로 이산되어 있는 침목을 연속 분포된 것으로 가정하여 레일을 분포된 질량과 강성을 가진 보(Beam)로 침목을 휨강성이 없는 연속 강체로 그리고 기초를 점탄성 연속체로 모형화하는 방법이며, 이산지지모델은 레일과 기초를 연속지지 모델과 같은 방법으로 모형화하나 이산되어 있는 침목을 개개의 강체로 모형화하는 방법이다. 두 모델을 사용한 해석 결과들은 수직방향 궤도운동에 대해서는 400 Hz까지는 잘 일치하나 이들 주파수 이상에서 연속지지모델의 정확도는 각 침목을 지점으로 하는 모드를 나타낼 수 없음으로 인하여 이산지지 모델의 것보다 떨어지게 된다.

본 연구에서는 슬래브궤도를 시스템적으로 해석할 수 있는 수치해석기법을 개발하였다. 가능한한 슬래브궤도 각 구성품의 기능을 잘 모의할 수 있도록 하기 위하여 이산지지특성을 고려할 수 있는 유한요소 해석기법을 사용하였다. 레일과 슬래브는 보요소로 모형화하고, 레일패드 및 슬래브패드는 스프링요소로, 또한 자갈도상은 탄성스프링으로 지지된 집중질량체로 모형화하였다.



(a) 2 중보 모델 (b) 3 중보 모델

그림 1.여러 가지 궤도유형

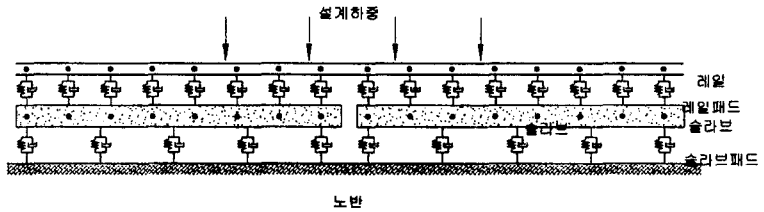


그림 4. 슬래브궤도의 모형화

다층화 된 슬래브궤도에 설계윤중을 재하하여 설계요구조건 만족여부를 파악하기위해 슬라브궤도를 설계하기 위한 슬래브궤도 범용해석프로그램 GFSAP (General Floating Slab Analysis Program)을 개발하였다. 본 프로그램은 레일응력해석, 슬래브허용 휨응력검토, 레일패드, 슬래브패드지압력분석, 슬래브 공진주기분석, 슬래브방진효율성분석등에 다양한 해석이 가

능하다. 본 프로그램은 객체지향 프로그래밍을 이용하여 각각의 부재 및 설계과정의 독립과정을 입력 해석 2개의 모듈(module)로 분리하였다. 객체지향 데이터베이스의 개념을 수용하여 사용자가 간편하게 궤도, 슬라브, 패드등의 물성치와 제원을 입력하여 해석을 수행할 수 있도록 설계되어 있다. 그림 3은 슬래브의 하부방진슬래브의 위치를 설정하는 것이고 그림 4는 3개 슬래브가 연결된 모습을 나타낸 것이다.

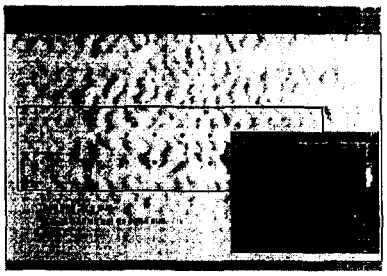


그림 5. GFSAP의 입력창

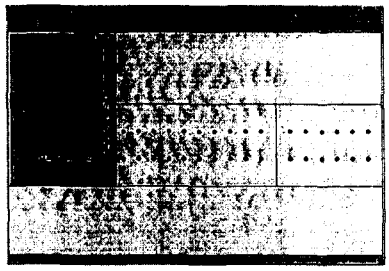


그림 6. 3개 슬래브 연결모델

4. 궤도제원 및 설계하중

지하철 1호선 부천역사에 부설된 방진슬래브궤도에 대하여 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하여 시스템성능을 검토하였다. 또한 설계하중선도는 그림 5와 같으며, 슬래브스프링의 설치위치는 그림 6과 같다. 시스템검토에 사용된 슬래브궤도의 각 구성품의 제원 및 물성치는 표 2와 같다.

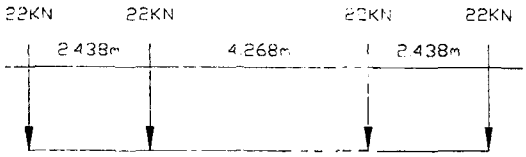


그림 5. 설계하중선도

표 2. 궤도의 제원 및 물성치

레 일	탄성 계수	2.06E+11 (N/m2)
	단위길이당 중량	60.8 (kg/m)
	단 면 적	7.75E-03 (m2)
	단면 2차 모멘트	3.09E-05 (m4)
레일패드	스프링 계수	8.17E+07 (N/m)
침 목	중 량	250 (kg/m3)
	간 격	0.6 (m)
자갈도상	스프링 계수	3.69E+07 (N/m)
	단위길이당 중량	
슬래브 (콘크리트)	길이, 넓이, 높이	L=35.97m, B=3.8m, H=0.8286m
	탄성계수	3x107(kN/m2)
슬래브 스프링	총갯수	20
	수직스프링계수(1개당)	19880(kN/m)
	수평스프링계수(1개당)	15904(kN/m)

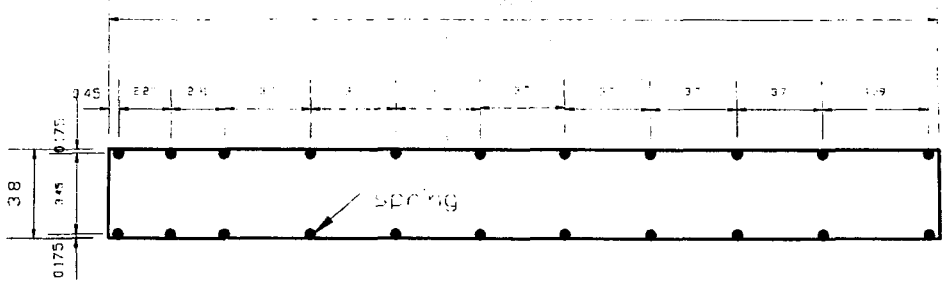


그림 6. 방진스프링 위치

방진슬래브가 연속하여 놓이는 경우 두 슬래브 사이의 불연속성에 기인한 궤도영향을 검토할 수 있도록 하기 위하여 3개 슬래브가 연속적으로 놓이는 경우를 대상으로 하여 해석을 수행하였다. 또한 가능한 한 불리한 조건에 대한 설계검토를 수행하기 위하여 설계하중이 슬래브 중앙(좌단으로부터 54m)과 이음부(좌단으로부터 36m)에 각각 작용하는 경우를 검토하였다.

5. 슬래브궤도의 공진주기 검토

슬래브의 수직방향에 대한 공진주기를 검토할 때에는 슬래브를 강체로 가정한 후 상부 레일, 체결구 및 자갈도상의 질량을 슬래브 질량에 부가하여 공진주기를 구한다. 이때 수직방향의 공진주기는 다음과 같다.

$$\omega = \sqrt{\frac{K_t^v}{M_t}} \qquad \text{식(1)}$$

여기서 K_t^v는 슬래브패드 수직방향의 총합강성이고, M_t는 슬래브, 자갈도상 및 레일질량의 총합질량이다. 또한 특정축에 수직면에서의 교차고유진동수(Coupled Natural Frequency) 다음과 같이 구해진다.

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\left[\frac{1}{2}\left(\frac{K_t^x}{M_t}+\frac{K_\phi^x}{I_t}\right)\mp\left\{\frac{1}{4}\left(\frac{K_t^x}{M_t}\frac{-K_\phi}{I_t}\right)^2+\frac{K_t^{x\phi 2}}{M_t I_t}\right\}^{1/2}\right]} \qquad \text{식(2)}$$

여기서 I_t는 질량관성모멘트, K_t^ϕ는 회전강성, $K_t^{x\phi}$는x, φ의 교차강성이다.

6. 시스템 해석결과 검토

6.1 레일과 레일패드의 검토

슬래브궤도 검토프로그램을 이용하여 해석한 레일처짐은 그림 7과 같고 레일에 발생하는 모멘트는 그림 8과 같다. 또한 레일 두부 및 저부에서의 휨응력은 그림 9, 10과 같다.

이들 결과로부터 레일의 최대처짐은 슬래브 중앙에 하중이 재하되는 경우 14.6mm이나 정적처짐 8mm를 제외하면 6.6mm이다. 이는 레일 허용처짐 1.5mm보다는 매우 큰 값이므로 레일의 허용응력 검토가 필수적으로 요구된다. 특히 슬래브와 슬래브사이의 접속부에서의 레일응력의 검

토가 요구되는데 이 때의 레일 두부 및 저부 휨응력은 두부(0.723kN/mm^2) 및 저부(0.642kN/mm^2)의 휨응력이다. 이는 레일의 허용휨응력 80kN/mm^2 보다 매우 적으므로 안전함을 알 수 있다. 또한 이들 해석결과로부터 하중이 슬래브 이음부와 중앙에 재하되는 경우를 비교하면 모든 값이 슬래브 중앙에 재하되는 경우 크게 산출되는 것을 알 수 있다. 슬래브 이음부에 하중재하시 양쪽 슬래브에 축중의 분산효과 때문에 레일의 처짐은 작아지게 된다.

표 3. 레일 및 레일패드에서의 응답 최대치

구 분		설계하중이 슬래브이음부에 재하	설계하중이 슬래브중앙에 재하
레일최대처짐 (mm)		12.7	14.6
레일휨응력 (kN/mm^2)	두부	0.722	0.723
	저부	0.641	0.642
레일패드 최대압축력(KN)		34.5	35.0

이들 결과로부터 슬래브궤도 설계시 하중검토는 슬래브 중앙에 재하되는 경우만을 고려해도 되는 것을 알 수 있다. 한편 레일패드의 지압력은 이음부에 재하시 34.5KN이고 중앙부에 재하시 35KN정도로 큰 차이를 보이지는 않았다. 그리고 이음부에서 응답은 하중이 재하되지 않을지라도 일정한 응력 및 변위(15%정도)가 유발됨을 알수 있는데, 이들 값은 슬래브패드 설치 위치에 따라 그 크기가 증가하여 궤도안전성에 지장을 주므로 슬래브패드 설치위치는 이들 영향을 고려하여 결정되야한다.

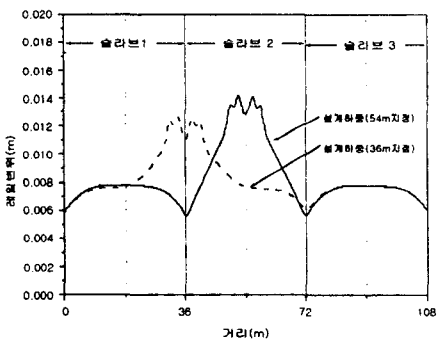


그림 9. 설계하중에 대한 레일처짐

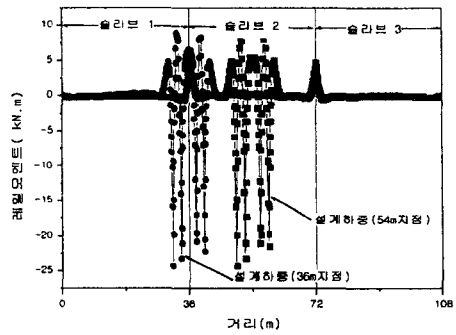


그림 10. 설계하중에 대한 레일모멘트

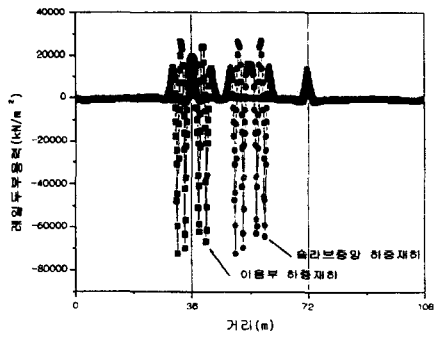


그림 11. 설계하중에 대한 레일 두부응력

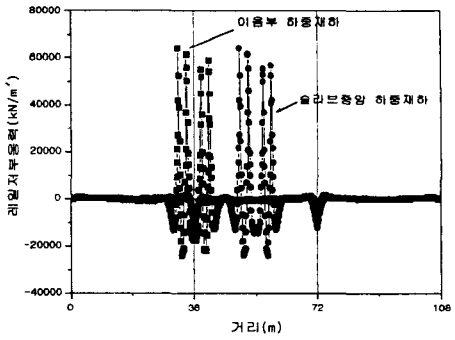


그림 12. 설계하중에 대한 레일 저부응력

6.2 슬래브 및 슬래브패드에서의 응답최대치

슬래브에서의 변위 및 모멘트는 그림 12, 13과 같다. 슬래브패드의 변위 및 지압력은 그림 14, 15와 같다. 이들 응답으로부터 레일 및 슬래브에서의 최대응답은 표 4, 5에 정리되어 있다.

슬래브 및 슬래브패드에서의 응답최대치를 나타낸 표 4로부터 방진슬래브궤도의 하중에 따른 처짐은 대부분 슬래브패드의 처짐에 기인하는 것을 알 수 있다.

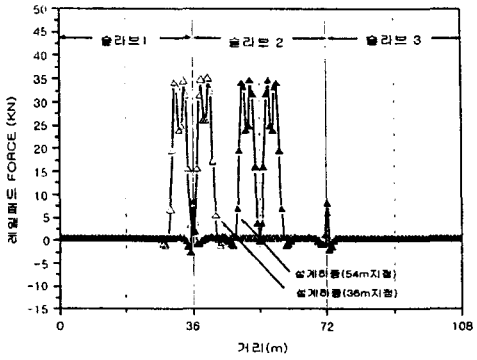


그림 13. 설계하중에 대한 레일패드 지압력

슬래브 변위를 나타낸 그림 12로부터 슬래브의 변위는 전체적으로 일정하게 수직으로 처짐이 발생하기보다는 하중을 중심으로 휨에 의해 중앙부 중심으로 곡선모양으로 처지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 슬래브의 공진주기 검토는 슬래브를 강체로 간주하여 검토하는 것뿐만 아니라 윙클러기초(Winkler Foundation) 강의 휨강성을 갖는 탄성체로 가정하여 검토하는 것이 필요함을 알 수 있다. 표 5는 슬래브를 강체로 간주하여 공진주기를 계산한 결과이다.

또한 이들 해석결과로부터 하중이 슬래브 이음부와 중앙에 재하되는 경우를 비교하면 모든 값이 슬래브 중앙에 재하되는 경우 크게 산출되는 것을 알 수 있다. 슬래브 이음부에 하중재하시 양쪽 슬래브에 축중의 분산 때문에 전체슬래브의 처짐은 작아지게 된다.

표 4. 슬래브 및 슬래브패드에서의 응답 최대치

구 분	슬래브최대처짐 (mm)	슬래브패드의 최대변위(mm)	슬래브패드 최대압축력(KN)
설계하중이 슬래브이음부에 재하	11.2	11.3	223
설계하중이 슬래브중앙에 재하	12.8	13.1	260

표 5. 슬래브의 공진주기

구 분		고유진동수
수직방향		6.026(Hz)
회전방향		5.716(Hz)
넓이축에 수직면에서의 고유진동수	ω_1	5.379(Hz)
	ω_2	6.360(Hz)
길이축에 수직면에서의 고유진동수	ω_1	5.216(Hz)
	ω_2	9.566(Hz)

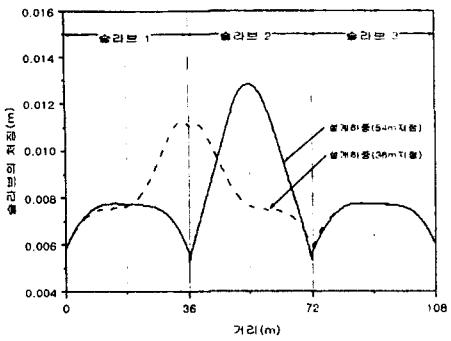


그림 14. 설계하중에 대한 슬래브 변위

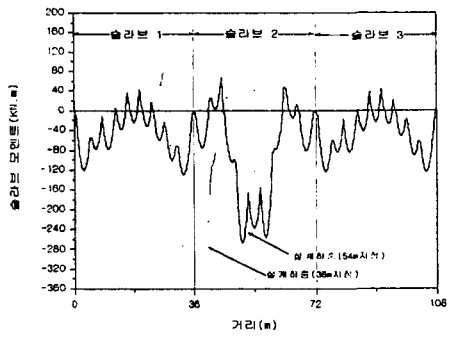


그림 15. 설계하중에 대한 슬래브 모멘트

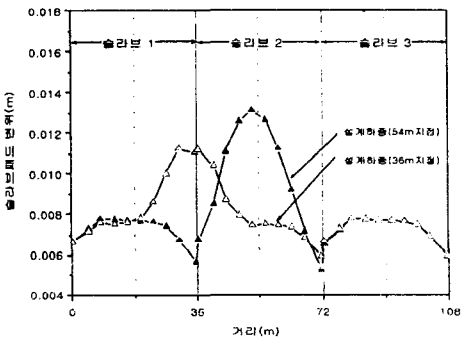


그림 16 설계하중에 대한 슬래브패드변위

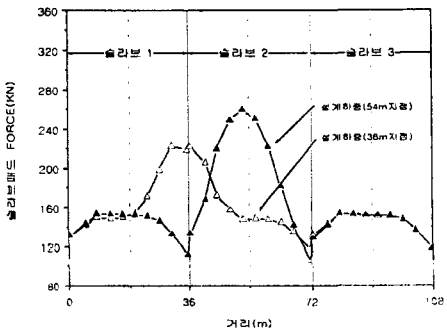


그림 17. 슬래브패드 지압력

7. 결론

슬래브궤도의 시스템설계를 위해 본 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- **슬래브에 정적하중재하시 레일의 허용응력검토가 필요하며 슬래브 중앙부의 하중재하시의 응답이 가장크다.**

레일의 최대처짐은 슬래브 중앙에 하중이 재하시 레일 허용처짐보다는 큰 값이 발생되므로 레일의 허용응력 검토가 요구된다. 슬래브와 슬래브사이의 접속부에서의 레일응력의 검토결과 레일 두부 및 저부 휨응력은 허용휨응력 80kN/mm^2 보다 적으므로 안전하다. 하중이 슬래브 이음부와 중앙에 재하되는 경우를 비교하면 슬래브 이음부에 설계하중 재하시 양쪽 슬래브의 축중의 분산효과 때문에 레일의 처짐은 작아지게 된다.

- **이음부에서 응답은 하중이 재하되지 않을때 일정한 응력 및 변위가 유발되는데, 슬래브패드 의 설치 위치에 따라 그 크기가 변한다.**

레일패드의 지압력은 이음부에 재하시와 중앙부에 재하시 큰 차이를 보이지는 않으며 이음부에서 응답은 하중이 재하되지 않을지라도 일정한 응력 및 변위가 유발된다. 이들 값은 슬래브패드

설치 위치에 따라 그 크기가 증가하여 궤도안전성에 지장을 주므로 슬래브패드 설치위치는 이들 영향을 고려하여 결정되어야한다.

- **슬래브의 공진주기 검토는 슬래브를 강체로 가정하여 검토하는 것외에도 윙클러기초의 휨강성을 갖는 탄성체로 가정하여 검토하는 것이 필요하다.**

슬래브의 수직방향변위는 전체적으로 일정하게 수직으로 처짐이 발생하기보다는 하중을 중심으로 휨에 의해 중앙부 중심으로 곡선모양으로 처진다. 이러한 결과로부터 윙클러기초(Winkler Foundation) 강의 휨강성을 갖는 탄성체로 가정하여 검토하는 것이 필요하다.

이상과 같이 슬래브의 정적해석을 통해 슬래브의 성능검토를 하였다. 제시된 모델은 기존의 레일패드의 탄성을 연속적으로 분포시키지 않고 체결부마다 1개의 선형스프링으로 되어있다. 또한 하부의 슬래브패드에서 이산되어 있으므로 슬래브 휨응력값이 작게 나오는 점을 개선시켰다. 앞으로는 실제 현장에서의 계측된 특성값과 이론값에 대한 보정치를 구하여 슬래브궤도 시스템의 성능요구조건의 설정 및 보완의 기초자료로 활용할 계획이다.

본 연구는 G7 궤도기술개발과제로 수행되었으며, 연구비를 지원해주신 건설교통부, 산업자원부 과학기술처와 참여기업인 AVT, 평화산업등에 감사드립니다.

8.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) 이종득, 「철도공학」, 노해출판사, pp. 13~23, 1996.
(3) 강기동, 콘크리트 軌度 슬래브의 構造 解析에 關한 硏究, 1980.
(4) 양신추, 이희현, 신종서,"저진동 궤도구조에 관한 연구(II)", 대한토목회, 학술발표회의 논문집, 1994. 10.
(5) 양신추, 강윤석 "궤도하부강성 변화에 따른 방진슬래브궤도의 동적특성 연구", 한국철도학회 춘계학술발표회, 1998. 5., pp. 307~314
(6) 양신추, 강윤석, "방진궤도의 진동특성연구", 대한토목학회 추계학술발표회, 1998. 10.
(7) Grassie, S.L, Gregory, "Dynamic response of railway track to high frequency vertical/lateral/ longitudinal excitation", J. Mech. Engrng. Sc. 24, 1982.
(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.