

고속 열차하중을 받는 슬래브궤도의 동적거동에 관한 연구

A Study on Behavior of Concrete Slab Track subjected to High Speed Train Loads

조 병 완*
Jo, Byung Wan

김 영 진**
Kim, Young Jin

허 민 회***
Hur, Min Hoi

정 태 호***
Jeong, Tae Ho

ABSTRACT

In the rail facilities, the rail track consists of rail, tie, fastening, accessories and bed. The rail track is largely divided into Ballast Bed Track(BBT) and Concrete Bed Track(CBT) according to the type of bed.

In this thesis, among Concrete Bed Track, slab track, which is used for the Japanese high speed railway, is a target of this study. Dynamic analysis by using finite element method are performed where moving train load is periodic function. Then through parametric study, some conclusions are obtained as follows. Cement Asphalt Mortar(CAM) affects contrary mechanical behavior to rail and slab greatly. Therefore, change of CAM spring coefficient should be handled with care For slab thickness, thin slab is more profitable to reduction of vibration of rail than thick one but mechanical capacity of slab is deteriorated.

Improved structural type is proposed, then structural analysis is performed for this one This type is effective to reduction of vibration of railway system.

1. 서론

고속궤도의 경우 사용재료의 경량화, 고속화, 고강도화 및 최적설계개념에 의한 설계 등으로 인하여 열차 운행시 궤도 및 하부 구조물에 큰 진동이 발생하며, 일단 궤도 및 구조물에 이상진동이 일어나면 궤도파괴와 승차감 저하 등을 발생시켜 사용성과 안전성에 악영향을 미치므로 고속궤도에서의 궤도진동 저감은 시급히 해결해야 할 중요한 과제이다.

본 연구는 고속궤도용 궤도로 많이 채택되고 있는 콘크리트도상궤도 가운데 시공성이 우수한 일본 슬래브궤도시스템의 제원을 이용하여 재료의 물성치와 기하학적 형상 등을 변수로 유한요소해석을 수행하여 레일과 슬래브의 연직가속도, 처짐, 모멘트 등의 궤도 동특성을 파악하고 이를 토대로 궤도의 진동 저감에 유효한 변수범위를 제시하는 한편 새로운 구조형식을 제안하고자 한다.

2 무한연속 탄성2중보 이론⁽¹⁾⁽²⁾

궤도의 진동을 해석하기 위해 사용되는 진동모델은 크게 질량모델과 보 모델로 나눌 수 있다. 질량 모델은 가장 간단한 해석모델이나 佐藤 吉彦⁽¹⁾은 질량모델을 사용할 경우 실측결과와 일치하지 않는 부분이 있고 특히 슬래브궤도의 경우 그 차이가 크므로 보다 정확한 진동해석을 수행하기 위해서는 판 또는, 보요소로 궤도를 모델링하여야 한다고 하였다. 이동하중을 받는 궤도를 무한연속 탄성2중보

*심회원, 한양대학교 토목공학과 교수

**심회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

***심회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정

로⁽⁴⁵⁾ 모형화하여 궤도의 운동방정식을 나타내고 FFT(Fast Fourier Transfer) 알고리즘⁽⁴⁶⁾을 이용하여 주파수영역 응답을 구할 수 있었다

3 유한요소법을 이용한 궤도 해석

3.1 개요

본 연구에서는 경계조건의 적용이 비교적 자유로운 유한요소법을 이용하여 도상슬래브에 대하여 3점당 6개의 자유도를 가진 4절점 사각형 판 요소와 3절점 삼각형 판요소를 사용하고 레일에 대해서는 절점당 6개의 자유도를 가진 2절점 보요소를 사용하여 슬래브궤도 시스템을 모델링하였다 또한, 레일 위에 가해지는 하중은 레일 체결장치부에 설치된 궤도패드를 통해 슬래브에 전달되므로 레일계설부마다 1개의 선형스프링을 내부 스프링요소를 이용하여 이상화하는 한편 콘크리트 아스팔트 모르타르는 슬래브를 지지하는 스프링으로 모델링하였다. 슬래브궤도는 주로 강성노반상에 설치되므로 노반콘크리트는 무한강성으로 가정하였다

3.2 해석대상 슬래브궤도

일본 신간선의 경우 길이 495cm, 폭 234cm, 두께 16cm, 체결구의 간격 62.5cm로 한 슬래브당 8개의 체결구를 갖는 구조를 표준으로 설계되고 있으며 그림 1은 슬래브궤도의 기본적인 구조를 나타낸 것이다. 레일의 제원과 물성치는 일본 신간선에서 사용하고 있으며 국내에서는 국철에서 사용하고 있는 60kgf 레일을 사용하였다. 변수연구의 기준이 되는 일본 표준 슬래브궤도의 입력제원은 표 1에 나타내었다

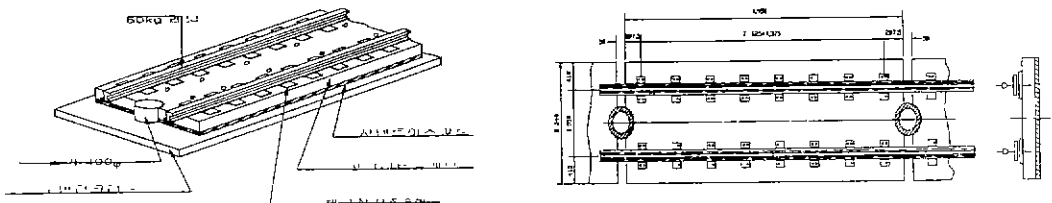


그림 1 슬래브궤도의 구조 형식

표 1 슬래브 및 레일의 입력제원과 물성치

슬래브궤도를 해석할 때 해석구간을 3개의 연속되는 프리캐스트 슬래브 unit으로 설정하였으며 각 슬래브 unit은 내부스프링으로 연결되는 것으로 가정하였다. 본 연구는 범용 유한요소해석 프로그램인 Lusas를 이용하여 수행하였다. 해석대상 슬래브궤도의 모델링은 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보여지는 'Z'는 내부스프링을 나타낸다

레일관련 세원 및 물성치		슬래브관련 개원 및 물성치	
레일단면적	7750 cm ²	슬래브 개수	3
단면 2차모멘트(I _x)	3,090 cm ⁴	슬래브 사이의 간격	495 cm
단면 2차모멘트(I _y)	512 cm ⁴	슬래브 폭	234 cm
단면계수(Z _x)	397 cm ³	슬래브 두께	16 cm
레일 변형계수	2100 tf/cm ²	붙기부 기류	40 cm
포아송 비	0.3	슬래브 탄성계수	350 tf/cm ²
레일 단위중량	6080kg/m	포아송 비	0.17
레일 간격	151 cm	슬래브의 단위중량	215kg/cm ³
레일 체결장치 간격	62.5 cm	CAM 스프링 개수	0.40 unit/cm
레일패드 스프링계수	60 tf/cm		

3.3 이동하중

본 연구에서는 활하중을 실제 열차하중에 의한 연직작용으로 제한하고, 이외의 작용과 효과는 단순화를 위해 무시한다. 궤도의 응답에 작용하는 많은 요소들 가운데 차량의 동특성은 K-TGV 열차하중공에⁽⁴⁷⁾ 기⁽⁴⁸⁾ 하였다 K-TGV 열차는 전체 46개의 축중을 가지며 유효타격간격은 18.7m이며 각 축중의 타격은 그림 3과 같다 본 논문에서는 이동하중을 간략화하기 위해 열차하중공은 18.7m의 유효타격간격을 갖는 3기함수로 모델링하였으며 17ton의 축중을 두 번에 슬래브 unit의 중앙 위치에서 레일의 양측에 각각

8.5tonf를 재하하였다. 이것은 궤도-차량간의 상호작용이나 차량-차량간의 상호작용은 고려하지 않음을 의미한다.

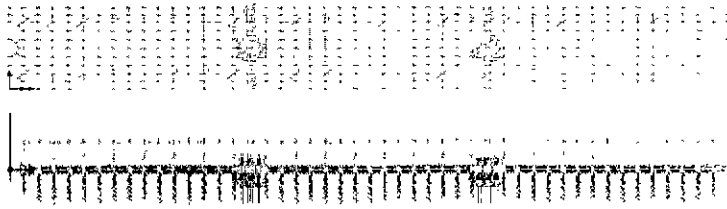


그림 2 슬래브궤도의 모델링

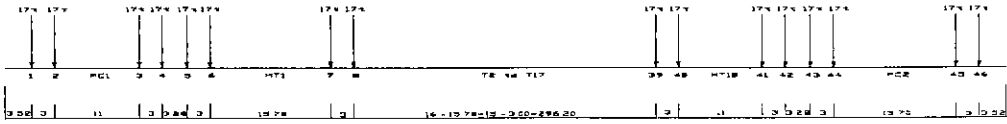


그림 3 K-TGV 열차하중분포

4. 매개변수 고찰

4.1 변수의 개요

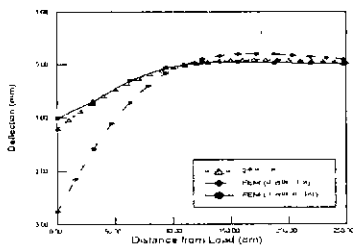
슬래브궤도의 동특성을 파악하기 위하여 슬래브 지지체(CAM)의 스프링 계수와 슬래브 두께를 변수로 하여 시간이력해석(time history analysis)을 수행하였다. 다음 표 2는 변수의 종류와 범위를 나타낸 것이다. 각각의 변수들은 완전하게 조합되며 각 변수는 다른 변수들의 영향을 받지 않는다.

표 2 변수의 종류와 범위

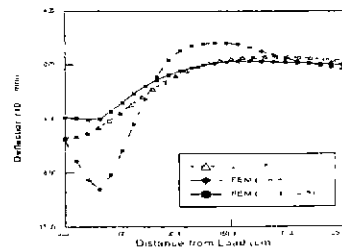
변수의 종류	변수의 범위
슬래브지지체(CAM) 스프링계수	0.10tf/cm ² , 0.15tf/cm ² , 0.20tf/cm ² , 0.25tf/cm ² , 0.30tf/cm ²
슬래브 두께	12cm, 16cm, 20cm

4.2 해석결과

위에서 기술한 매개변수들 이용하여 정적 및 동적 해석을 수행하였으며 하중은 187m의 타격간격을 가지는 일련의 주기함수로 가정하였으며 해석시 열차의 속도는 300km/h로 하였다. 그림 4는 레일의 이음매가 있는 경우에 대하여 탄성2중보 이론에 의한 계산결과와 유한요소법을 이용한 해석결과를 비교한 것이다.



(a) 레일의 처짐



(b) 슬래브의 처짐

그림 4 탄성2중보 이론과 FEM 해석결과 비교

그림에서 알 수 있는 바와 같이 2중보 이론은 레일하부에 레일과 레일지지체 간의 상호작용을 고려하지 않

가정하기 때문에 레일채결부에만 레일패드가 설치되어 있는 실제 궤도₂ 비해 치짐과 모멘트가 낮게 평가되는 경향이 있다

4.2.1 슬래브지지체(CAM) 스프링계수 변수

슬래브지지체(CAM)의 스프링계수가 증가함에 따라 레일의 정적 처짐은 103mm에서 1mm까지 미소하게 비례하여 감소하였으며 정적 모멘트 역시 112t·m에서 1.11t·m로 약간 감소하였다 동적해석의 결과는 CAM 스프링계수의 증가에 따라 치짐(114~109mm)이 미소하게 감소하였으나 모멘트는 0.15tf/cm²일 때 1.2t·m로 최소치를 나타낸 것외에는 거의 일정한 수준을 유지하였다 이러한 결과는 레일의 거동이 CAM 스프링계수의 영향을 거의 받지 않음을 나타내는 것이다 슬래브의 경우에는 레일의 경우와는 다르게 CAM의 스프링계수가 증가함에 따라 슬래브의 치짐과 용량이 큰 폭으로 감소하는 경향을 보였다 슬래브의 정적 처짐은 최대 0.065mm에서 최소 0.031mm로 거의 110% 감소하였으며 동적 처짐은 0.077mm에서 0.034mm로 120%이상 감소하였다 DMF는 스프링계수가 작아질수록 다소 증가하였으며 1.08~1.2 사이의 값을 보였다

CAM 스프링계수에 따른 레일의 연직가속도 최대응답은 CAM 스프링계수가 증가함에 따라 큰 폭의 선형적인 증가를 나타냈으며 0.25tf/cm²을 기준으로 증가의추세가 완만해졌다.

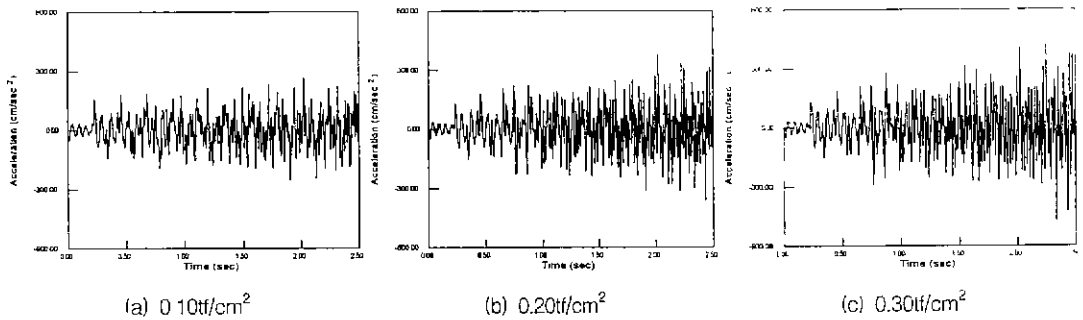


그림 5 슬래브지지체 스프링계수에 따른 레일의 연직가속도 비교

슬래브 연직가속도의 최대응답은 CAM 스프링계수가 증가함에 감소하였다 변수내 슬래브의 연직가속도 최대값과 최소값의 차는 0.017g였으며 CAM스프링계수가 0.5tf/cm² 증가함에 따라 평균 0.001g 감소하였다.

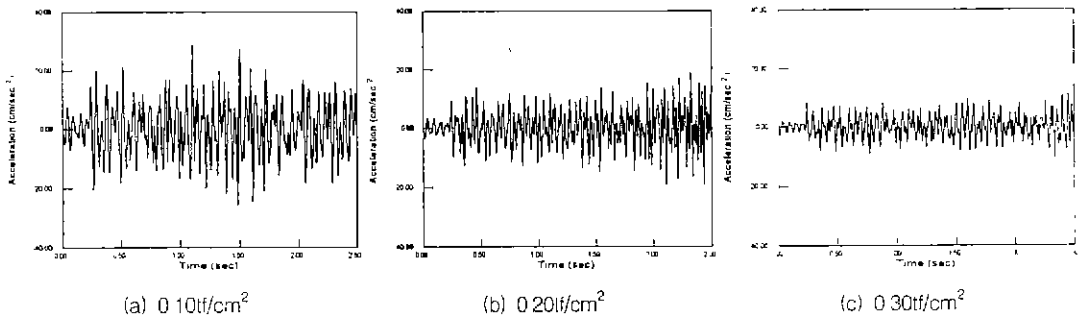


그림 6 슬래브지지체 스프링계수에 따른 슬래브의 연직가속도 비교

이는 CAM 강성 증가에 따라 레일의 연직가속도의 최대응답이 큰 폭으로 감소한 것과는 상반되는 경향이이며, 따라서 궤도 시스템의 진동저감을 목적으로 CAM의 강성을 완화시키고자 할 경우에는 세심한 주의가 뒤따라야 함을 알 수 있다.

4.2.2 슬래브 두께 변수

레일의 연직가속도 최대응답은 슬래브의 두께 12~16cm 사이에서 0.054g, 16~20cm 사이에서

0.019g 증가하였다 그러나, 슬래브의 경우는 특별한 경향이 나타나지 않았다 이상의 해석결과는 레일의 이음매가 없는 경우로, 앞에서 언급한 바와 같이 이음매가 있는 경우에 비해 치짐이나 응력이 낮게 평가되는 경향이 있다 따라서, 궤도의 파괴를 검토하기 위해서는 이음매가 있는 경우에 대한 해석이 별도로 수행되어야 하며 더불어 차륜의 플랫이나 궤도의 상하 또는 고저틀림과 같은 운중의 이상변동에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

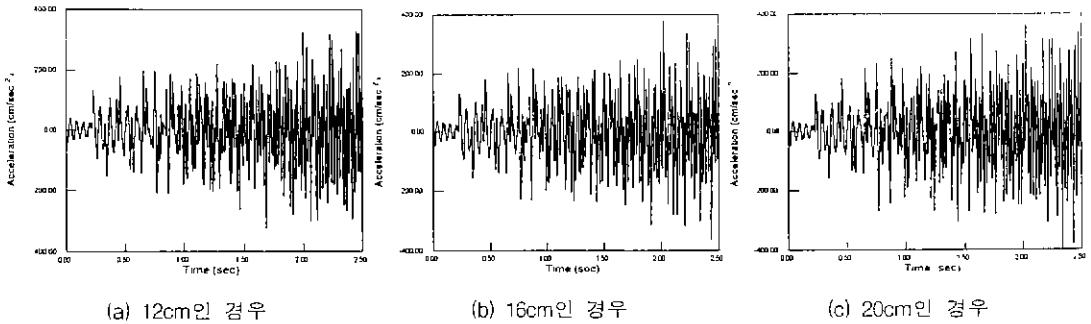


그림 7 슬래브 두께에 따른 레일의 연직가속도 비교

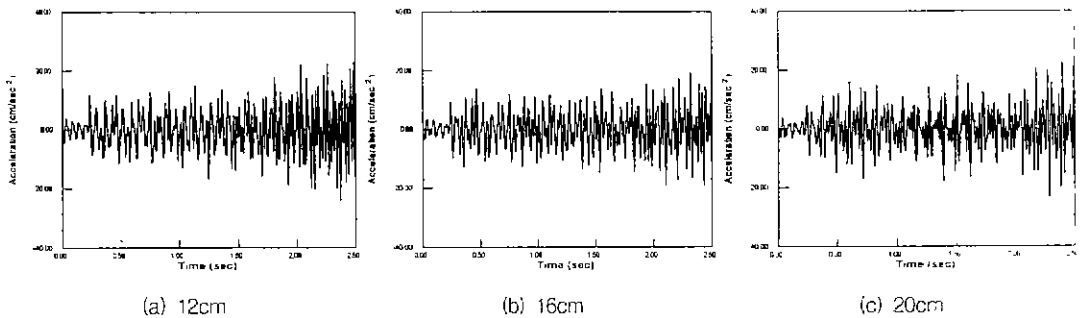


그림 8 슬래브 두께에 따른 슬래브의 연직가속도 비교

이상의 해석결과는 레일에 이음매가 없는 경우로, 앞에서 언급한 바와 같이 이음매가 있는 경우에 비해 치짐이나 응력이 낮게 평가되는 경향이 있다. 따라서, 궤도의 파괴를 검토하기 위해서는 이음매가 있는 경우에 대한 해석이 별도로 수행되어야 할 것이다

5 슬래브궤도의 형식개선 제안

5.1 개요

표준 슬래브궤도는 프리캐스트 슬래브 간의 종방향 또는 횡방향 하중을 전달하는 역할을 하는 공기부가 프리캐스트 단부의 중앙에 설치되어 있으나 이를 양 끝단 두 곳에 설치하는 것으로 변경하였다. 이는 프리캐스트 슬래브의 종방향 및 횡방향 틀림에 대한 저항을 기존 슬래브궤도에 비해 향상시키기 위한 것이다 또한, CAM에 의한 회전구속이 많아지므로 진동저감에도 영향을 미칠것으로 판단된다 다음 그림 5는 새로운 구조형식의 슬래브궤도와 그 모델링을 나타낸 것이다 이하, 편의를 위해 기존 슬래브궤도를 Type-1, 새로운 궤도형식의 슬래브궤도를 Type-2라 한다.

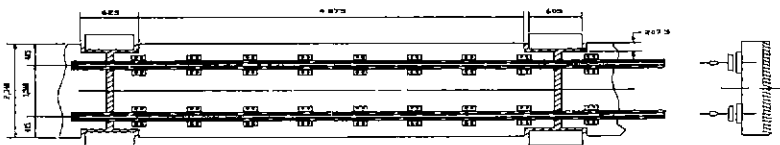


그림 5 구조형식을 개선한 슬래브궤도와 해석 모델링

5.2 표준 슬래브케도와의 거동 비교

동적해석 결과, 새로운 형식의 궤도시스템의 동적거동이 다소 향상되었음을 알 수 있었다. 그림 6(a)는 레일의 연직가속도 응답을 비교한 것이다. Type-1의 연직가속도 379.43cm/sec^2 에 비해 Type-2의 연직가속도는 222.02cm/sec^2 으로 0.16g 감소하였고 슬래브 연직가속도의 최대응답은 Type-1이 19.23cm/sec^2 이고 Type-2가 15.79cm/sec^2 으로 슬래브의 진동저감에도 Type-2가 더 효율적임을 보여 주었다. 두 궤도시스템은 동일한 재료 물성치를 이용하였으므로 정적 거동에서는 거의 유사한 결과를 보인 반면 동적 거동, 특히 레일진동의 측면에서는 예상외의 큰 차이를 나타내었다. 이 결과는 그림 6(b)에 나타내었다.

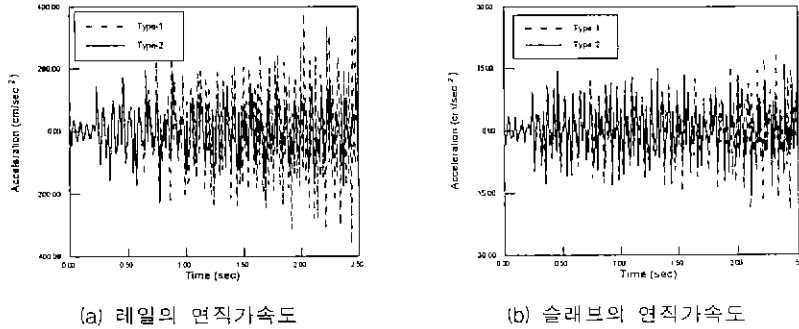


그림 6 연직가속도 비교

6. 결론

슬래브케도에 대하여 유한요소법을 이용한 정적 및 동적해석을 수행하였으며 변수연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 시멘트 아스팔트 모르타의 강성을 변화시켜 해석한 결과, 레일과 슬래브의 진동에 큰 영향을 미쳤다. 레일의 진동은 시멘트 아스팔트 모르타의 강성이 커짐에 따라 큰 폭으로 증가한 반면 슬래브는 그 반대의 경향을 나타내었다. 따라서 시멘트 아스팔트 모르타의 강성을 변화시킬 필요가 있을 때에는 세심한 주의가 필요하리라 판단된다.
- 2) 슬래브 두께에 따른 슬래브의 처짐과 응력변화는 본 연구의 변수범위 내에서 가장 크게 나타났으며 두께가 작을수록 처짐과 응력이 증가하였다. 그러나 슬래브의 진동에는 별다른 영향이 없는 것으로 나타났다.
- 3) 구조형식의 개선을 통해 궤도를 구성하는 레일과 슬래브의 진동을 저감시킬 수 있었다. 스프링으로 돌기부와 연결되는 단부의 면적이 넓은 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 레일의 연직가속도가 크게 감소하였으며 슬래브의 연직가속도 역시 미소한 감소추세를 보였다. 이것은 해석적 측면에서의 결론이므로 실제적인 적용을 위해서는 폭넓은 파괴 및 피로실험이 선행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 이성욱, "저진동궤도 개발을 위한 철도궤도의 동특성에 관한 연구", 한양대학교 박사학위 논문, 1996. 12., pp. 20~26
2. 이희현, "차륜-레일 상호작용을 고려한 슬래브케도의 진동해석", 전산구조공학회 논문집, 제7권, 제2호, 1994. 6.
3. 佐藤吉彦, "軌道に生ずる高周波振動とろの考察", 日本土木學會 論文集, 第77巻, 1~61
4. 철도전문대학, "궤도역학", 1996., pp.118~127
5. 鐵道綜合技術研究所, "A形軌道スラブ設計要領", 1997.
6. William H Press and Saul A. Teukolsky, "Numerical Recipes", 2nd Ed, Cambridge University Press, 1998., pp.498~502