

고속 열차하중을 받는 슬래브궤도의 동적거동에 관한 연구 A Study on Behavior of Concrete Slab Track subjected to High Speed Train Loads

조 병 완* 김 영 진** 진 경 민***
Jo, Byung-Wan Kim, Young-Jin Jin, Kyung-Min

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 follow. 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

고속철도의 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 고속철도에서의 궤도진동 저감은 시급히 해결해야 할 중요한 과제이다. 철도의 고속화에 따라 발생하는 진동현상은 열차와 구조물의 동특성 뿐만 아니라 열차의 속도, 전파경로, 및 선로상태 등 여러 가지 원인에 의해 영향을 받고, 열차와 선로 또는 선로구조물의 상호작용에 의해서도 크게 달라진다. 세계각국의 고속철도 운행 경험에 의하면, 궤도의 파괴는 주로 열차 통과시 발생하는 진동에 의해 일어나며 이 때 진동의 크기는 열차속도에 따라 증가한다고 알려져 있으므로 이에 대한 폭넓은 연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 고속철도용 궤도로 많이 채택되고 있는 콘크리트도상궤도 가운데 시공성이 우수한 일본 슬래브궤도시스템의 제원을 이용하여 재료의 물성치와 기하학적 형상 등을 변수로 유한요소 해석을 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

궤도의 진동을 해석하기 위해 사용되는 진동모델은 크게 질량모델과 보 모델로 나눌 수 있다. 질량모델은 가장 간단한 해석모델이나 佐藤 吉彦은 질량모델을 사용할 경우 실측결과와 일치하는 부분과 일치하지 않는 부분이 있고 특히 슬래브궤도의 경우 그 차이가 크므로 보다 정확한 진동해석을 수행하기 위해서는 판 또는, 보요소로 궤도를 모델링하여야 한다고 하였다.

* 한양대학교 부교수, 정회원

** 한양대학교 대학원 박사과정

*** 한양대학교 석사

이동충격을 받는 궤도를 그림 1과 같이 무한연속 탄성2중보로 모형화할 경우 궤도계의 운동방정식은 식(1)과 (2)의 연립 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

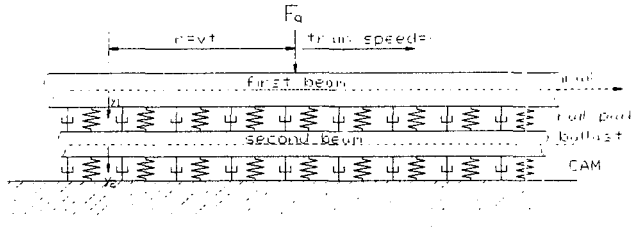


그림 1 무한연속 2중보 해석모델

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 y_1}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial}{\partial t} (y_1 - y_2) + k_1 (y_1 - y_2) = F_q \delta (x - vt) \quad (1)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial}{\partial t} (y_2 - y_1) + k_1 (y_2 - y_1) + c_2 \frac{\partial y_2}{\partial t} + k_2 y_2 = 0 \quad (2)$$

여기서,

$y_1 = (x, t)$ 에 있어서 레일의 처짐, $y_2 = (x, t)$ 에 있어서 침목의 처짐, $t =$ 시간, $x =$ 공간좌표, $E_1 I_1 =$ 레일의 휨강성, $E_2 I_2 =$ 슬래브의 휨강성, $m_1 =$ 레일의 단위길이당 질량, $m_2 =$ 슬래브 또는 침목의 단위길이당 질량, $c_1 =$ 단위길이당 레일패드의 점성감쇠 계수, $c_2 =$ 단위길이당 시멘트 아스팔트 모르타르의 점성감쇠 계수, $k_1 =$ 단위길이당 레일패드의 스프링 계수, $k_2 =$ 단위길이당 시멘트 아스팔트 모르타르의 스프링 계수, $v =$ 열차속도, $\delta =$ Dirac delta함수, $F_q =$ 열차 축중

이동하중에 대한 상대좌표를 $r = x - vt$ 와 같이 정의하면 운동방정식은 상대좌표 r 에 대한 미분으로 나타낼 수 있으며 이 두식을 푸리에 변환(Fourier Transform)한 뒤 연립하여 풀고 푸리에 역변환과 유한요소법(Residual Theorem)을 이용하여 풀면 상대좌표 r 에 대한 해를 얻을 수 있다. 상대좌표 r 에 대한 궤도 각요소의 응답이 구해지면 시계열응답은 $r = x - vt$ 을 이용하여 구할 수 있으며 주파수영역 응답은 구해진 시계열 응답으로부터 FFT(Fast Fourier Transfer)알고리즘을 이용하여 구할 수 있다.

3. 유한요소법을 이용한 궤도 해석

3.1 개요

앞에서와 같이 이론적인 방법으로 궤도를 모델링하여 해석할 경우, 계산과정이 대단히 번거로울 뿐만 아니라 프리캐스트 슬래브궤도의 불연속적인 연결구간이나 슬래브의 부분적인 구조형식의 변화 등을 적절히 반영하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 경계조건의 적용이 비교적 자유로운 유한요소법을 이용하여 도상슬래브에 대해서는 절점당 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 레일체결부 마다 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

국내의 경우 고속철도용 슬래브도상 궤도가 시공된 예는 없으나 일본 신간선의 경우 길이 495cm, 폭 234cm, 두께 16cm, 체결구의 간격 62.5cm로 한 슬래브당 8개의 체결구를 갖는 구조를 표준으로 하여 설계되고 있으며 그림 2는 슬래브궤도의 기본적 구조를 나타낸 것이다. 슬래브도상과 노반콘크리트 사이에는 진동 및 소음을 감소시키기 위하여 콘크리트 아스팔트 모르타르(CAM)가 배치되어 있다. 레일의 제원과 물성치는 일본 동해도신간선에서 사용하고 있으며 국내에서는 국철에서 사용하고 있는 60kg 레일의 것을 이용하였다. 변수연구의 기준이 되는 일본 표준 슬래브궤

도의 입력제원은 표 1에 나타내었다.

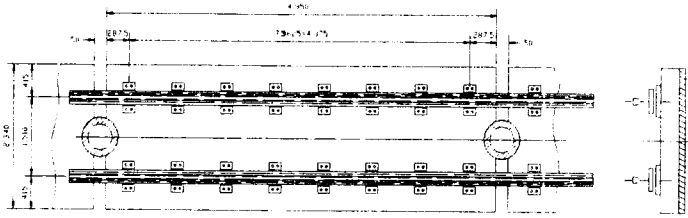


그림 2 슬래브케도의 구조 형식

슬래브케도를 해석할 때 해석구간을 슬래브길이와 동일하게 설정하는 경우, 연속되는 레일을 임의로 절단하는 것이 되어 실제와는 다른 결과를 얻을 수 있고 또한 임의의 초기조건과 경계조건에 따른 오차를 수반할 수 있으므로 해석구간을 3개의 연속되는 프리캐스트 슬래브 unit으로 설정하였으며 각 슬래브 unit은 내부스프링으로 연결되는 것으로 가정하였다. 본 연구는 범용 유한요소해석 프로그램인 Lusas를 이용하여 수행하였다. 해석대상 슬래브케도의 모델링은 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보여지는 'Z'는 내부스프링을 나타낸다.

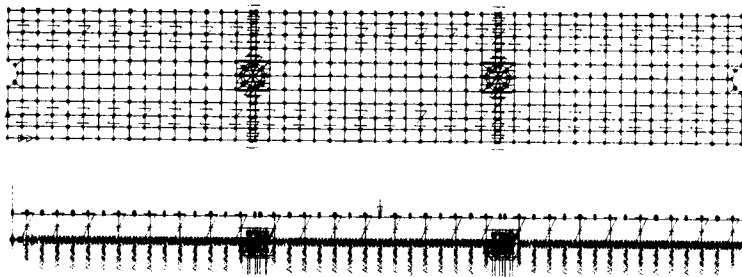


그림 3 슬래브케도의 모델링

표 1 슬래브 및 레일의 입력제원과 물성치

레일관련 제원 및 물성치		슬래브관련 제원 및 물성치	
레일단면적	77.50 cm ²	슬래브 매수	3
단면 2차모멘트(I _x)	3,090 cm ⁴	슬래브사이의 간격	495 cm
단면 2차모멘트(I _y)	512 cm ⁴	슬래브 폭	234 cm
단면계수(Z _n)	397 cm ³	슬래브 두께	16 cm
레일 탄성계수	2100 tf/cm ²	돌기부 지름	40 cm
포아슨 비	0.3	슬래브 탄성계수	350 tf/cm ²
레일 단위중량	60.80kg/m	포아슨 비	0.17
레일 간격	151 cm	슬래브의 단위중량	245kg/cm ³
레일 체결장치 간격	62.5 cm	CAM 스프링계수	0.20 tf/cm ²
레일패드 스프링계수	60 tf/cm		

3.3 이동하중

케도의 동적응답에 지배적인 영향을 미치는 것은 고속의 열차하중이다. 본 연구에서는 활하중을 실제 열차하중에 의한 연직작용으로 제한하고, 이외의 작용과 효과는 단순화를 위해 무시한다. 본 연구에서 케도의 응답에 작용하는 많은 요소들 가운데 차량의 동특성은 K-TGV 열차하중군에 근거하였다. 열차하중군은 두 개의 동력차와 18개의 객차로 구성되며 각 축간의 거리는 그림 4와 같으며 각 축중은 17ton이다. 케도의 동적 거동에 영향을 미치는 중요한 요소는 축중의 수와 거리이다. K-TGV 열차는 전체 46개의 축중을 가지며 유효타격간격은 18.7m이다. 열차는 350km/h의 설계속도 내에서 케도에 태워지므로 여기서 고려되는 속도는 설계속도 이내로 제한되며 케도를

통과하는 동안 일정한 것으로 가정한다. 본 논문에서는 이동하중을 간략화하기 위해 열차하중군을 18.7m의 유효타격간격을 갖는 주기함수로 모델링하였으며 17ton의 축중을 두 번재 슬래브 unit의 중앙 위치에서 레일의 양측에 각각 8.5ton을 재하하였다. 이것은 궤도-차량간의 상호작용이나 차량-차량간의 상호작용은 고려하지 않음을 의미한다.

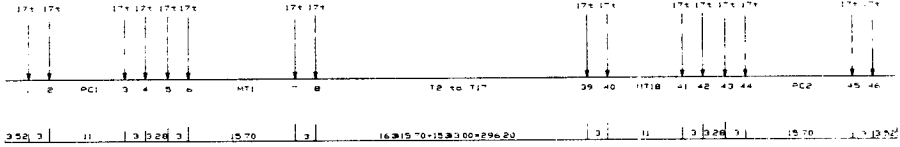


그림 4 K-TGV 열차하중군

4. 매개변수 고찰

4.1 변수의 개요

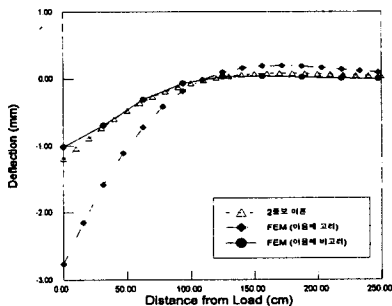
슬래브궤도의 동특성을 파악하기 위하여 슬래브 지지체(CAM)의 스프링계수와 슬래브의 두께를 변수로 하여 시간이력해석(time history analysis)을 수행하였다. 다음 표 4.1은 변수의 종류와 범위를 나타낸 것이다. 각각의 변수들은 완전하게 조합되며 각 변수는 다른 변수들의 영향을 받지 않는다.

표 2 변수의 종류와 범위

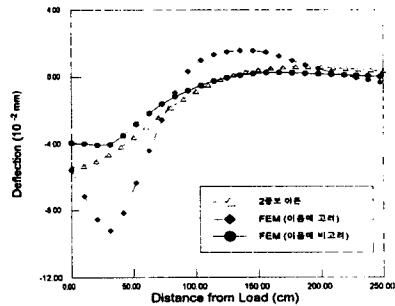
변수의 종류	변수의 범위
슬래브지지체(CAM) 스프링계수	0.10tf/cm ² , 0.15tf/cm ² , 0.20tf/cm ² , 0.25tf/cm ² , 0.30tf/cm ²
슬래브 두께	12cm, 16cm, 20cm

4.2 해석 결과

위에서 기술한 매개변수를 이용하여 정적 및 동적 해석을 수행하였으며 기준이 되는 모델, 즉 표준 제원과 물성치를 가진 슬래브궤도의 해석결과는 2장에서 설명한 해석이론에 의한 계산 결과와 비교하였다. 동적 해석의 경우, 매개변수에 따른 슬래브의 동적거동의 변화를 파악하기 위하여 시간이력해석을 수행하였다. 하중은 18.7m의 타격간격을 가지는 일련의 주기함수로 가정하였으며 장차 운행될 경부고속철도의 최고속도가 300km/h인 점을 감안하여 해석시 열차의 속도는 300km/h로 하였다. 그림 5는 레일의 이음매가 있는 경우에 대하여 탄성2중보 이론에 의한 계산결과와 유한요소법을 이용한 해석결과를 비교한 것이다.



(a) 레일의 처짐



(b) 슬래브의 처짐

그림 5 2중보 이론과 FEM 해석결과 비교

그림에서 알 수 있는 바와 같이 2중보 이론은 레일하부에 레일패드와 연속적으로 분포되어 있

다고 가정하기 때문에 레일체결부에만 레일패드와 설치되어 있는 실제 궤도에 비해 처짐과 모멘트가 낮게 평가되는 경향이 있다. 특히 이음매가 있는 경우에는 레일의 단부가 실제로는 캔틸레버와 같은 거동을 해야 하지만 2중보 이론에서는 등분포화된 스프링으로 지지되는 것으로 가정하므로 그 차이가 더 커지게 된다. 또한 2중보 이론에 의한 슬래브의 처짐은 하중의 직하부에서 가장 크게 나타나지만 유한요소법에 의한 해석의 결과는 하중이 작용하는 레일에 가장 근접한 레일체결 장치부의 직하에서 가장 크게 나타났으며 이것이 실제 궤도의 거동에 더 가깝다고 할 수 있다. 그러나 본 논문에서의 해석은 레일의 이음매가 없는 경우에 대하여 수행한 것이며, 이는 각 변수들의 영향을 분석하는데 있어서 불필요한 단부효과가 개입되는 것을 배제하기 위한 것이다.

4.2.1 슬래브지지체 스프링계수 변수

슬래브지지체(CAM)의 스프링계수가 증가함에 따라 레일의 정적 처짐은 1.03mm에서 1mm까지 미소하게 비례하여 감소하였으며 정적 모멘트 역시 $1.12t \cdot m$ 에서 $1.11t \cdot m$ 로 약간 감소하였다. 동적해석의 결과는 CAM 스프링계수의 증가에 따라 처짐(1.14~1.09mm)이 미소하게 감소하였으나 모멘트는 $0.15tf/cm^2$ 일 때 $1.2t \cdot m$ 로 최소치를 나타낸 것 외에는 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 처짐과 응력이 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. 인장응력의 경우도 처짐과 비슷한 경향을 나타내었으며 DMF는 스프링계수가 작아질수록 다소 증가하였으며 1.08~1.2사이의 값을 보였다.

CAM 스프링계수에 따른 레일의 연직가속도 최대응답은 CAM 스프링계수가 증가함에 따라 큰 폭의 선형적인 증가를 나타냈으며 $0.25tf/cm^2$ 을 기준으로 증가의 추세가 완만해졌다. 그림 6은 슬래브의 연직가속도 시간이력곡선을 변수별로 나열한 것이다. 변수내 연직가속도의 최대응답과 최소응답의 차는 0.213g였으며 CAM 스프링계수가 $0.5tf/cm^2$ 증가함에 따라 연직가속도의 최대응답은 대략 0.047g 상승하였음을 알 수 있다.

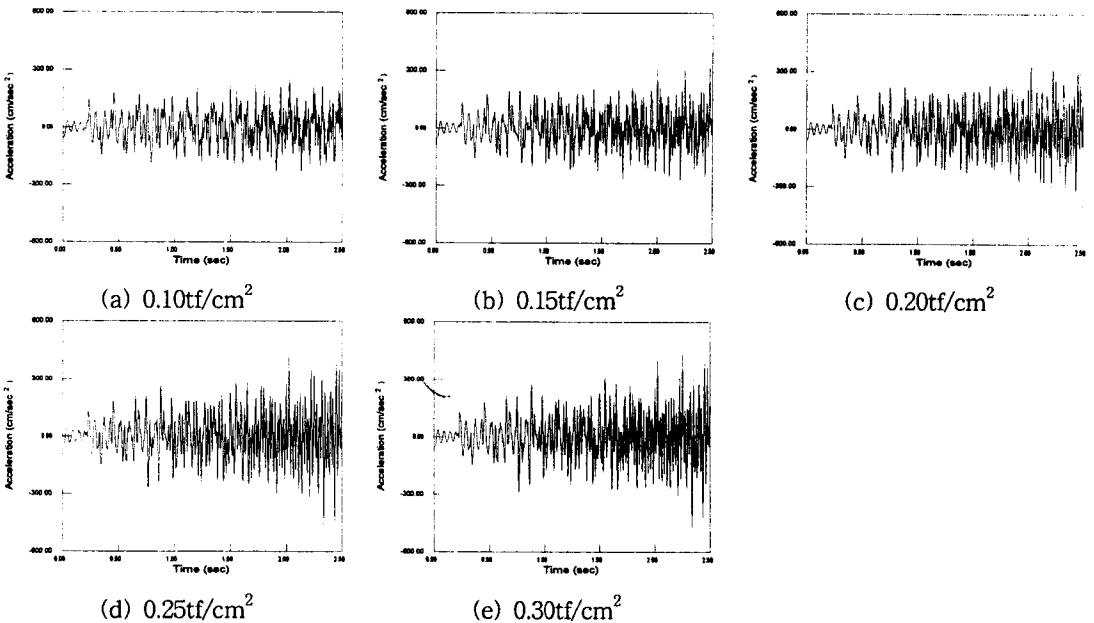


그림 6 슬래브지지체 스프링계수에 따른 레일의 연직가속도 비교

슬래브 연직가속도의 최대응답은 CAM 스프링계수가 증가함에 따라 감소하였다. 그림 7은 CAM의 스프링계수별 연직가속도의 시간 이력곡선을 나타낸 것이다. 변수내 슬래브의 연직가속도 최대값과 최소값의 차는 0.017g였으며 CAM 스프링계수가 $0.5tf/cm^2$ 증가함에 따라 평균 0.004g 감소하였다.

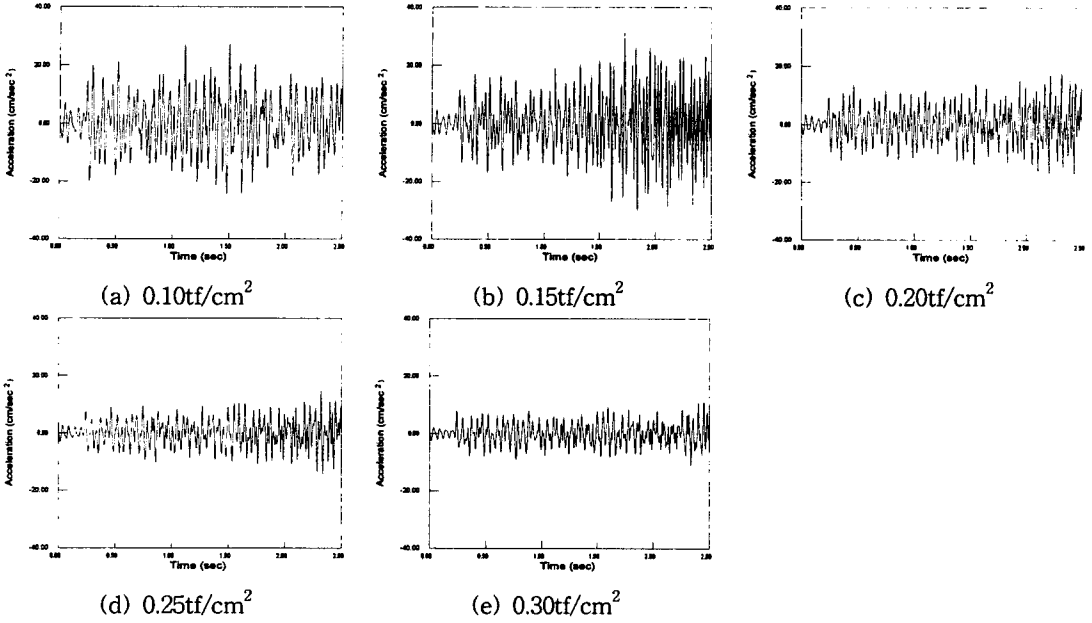


그림 7 슬래브지지체 스프링계수에 따른 슬래브의 연직가속도 비교

이는 CAM 강성 증가에 따라 레일의 연직가속도의 최대응답이 큰 폭으로 감소한 것과는 상반되는 경향이며, 따라서 궤도 시스템의 진동저감을 목적으로 CAM의 강성을 변화시키고자 할 경우에는 세심한 주의가 뒤따라야 한다.

4.2.2 슬래브 두께 변수

슬래브의 두께를 증가시킴에 따라 레일의 정적 처짐은 1.03mm에서 1mm까지 감소하였으며 정적 모멘트 역시 1.12t·m에서 1.11t·m로 감소하였다. 동적해석의 결과 역시 슬래브 두께의 증가에 따라 처짐(1.11~1.04mm)과 모멘트(1.23~1.22t·m)가 미소하게 감소하였다. 슬래브지지체 변수와 마찬가지로 슬래브 두께가 레일의 거동에 미치는 영향은 미미하였다.

슬래브의 경우에는 슬래브 두께가 증가함에 따라 처짐과 응력이 큰 폭으로 감소하는 경향을 보였으며 특히, 슬래브 하부의 인장응력은 본 연구의 변수 범위 내에서 가장 큰 변동폭을 나타내었다. 슬래브의 정적 처짐은 0.054mm에서 0.033mm로 감소하였으며 슬래브 하부의 인장응력은 5.15kg/cm²에서 1.3kg/cm²으로 감소하였다. 또한 슬래브의 동적 처짐 최대치는 0.059mm에서 0.039mm로, 인장응력 최대치는 5.55kg/cm²에서 1.44kg/cm²으로 감소하였다. 슬래브지지체의 경향과 유사하게 슬래브의 두께가 증가함에 따라 감소의 기울기가 완만해짐을 알 수 있다. DMF는 본 변수의 범위 내에서 1.1 정도를 유지하였다. 레일의 연직가속도 최대응답은 슬래브의 두께 12~16cm 사이에서 0.054g, 16~20cm 사이에서 0.019g 증가하였다. 그러나, 슬래브의 경우는 특별한 경향이 나타나지 않았다.

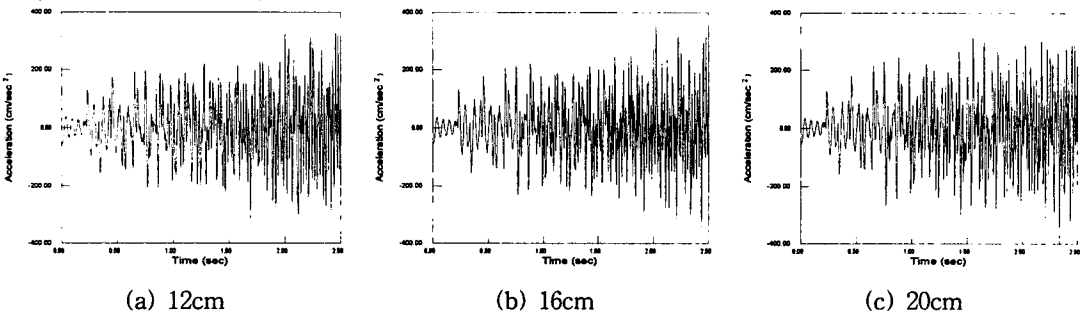
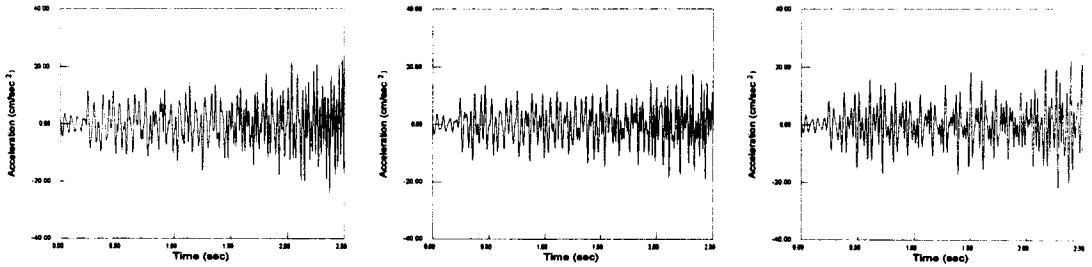


그림 8 슬래브 두께에 따른 레일의 연직가속도 비교



(a) 12cm (b) 16cm (c) 20cm
 그림 9 슬래브 두께에 따른 슬래브의 연직가속도 비교

이상의 해석결과는 레일에 이음매가 없는 경우로, 앞에서 언급한 바와 같이 이음매가 있는 경우에 비해 처짐이나 응력이 낮게 평가되는 경향이 있다. 따라서, 궤도의 파괴를 검토하기 위해서는 이음매가 있는 경우에 대한 해석이 별도로 수행되어야 하며 더불어 차륜의 플랫폼이나 궤도의 상하 또는 고저틀림과 같은 윤중의 이상변동에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

5. 슬래브궤도의 형식개선 제안

5.1. 개요

앞에서 기술한 바와 같이 세계 각국에서는 새로운 궤도 형식의 개발에 박차를 가하여 이미 많은 성과를 올린 것으로 알려져 있으며, 국내에서도 궤도보수의 비용절감과 함께 사용재료의 경량화와 고강도화에 따른 진동문제 해결을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 구조적 거동의 우수성이 입증된 일본 슬래브궤도의 구조형식을 개선하여 이러한 형식변화가 궤도의 성력화에 기여할 수 있는가를 검토하였다. 해석에 사용되는 재료의 물성치는 표준 슬래브궤도의 것과 동일한 것으로 하였다.

표준 슬래브궤도는 프리캐스트 슬래브 간의 종방향 또는 횡방향 하중을 전달하는 역할을 하는 돌기부가 프리캐스트 단부의 중앙에 설치되어 있으나 이를 양 끝단 두 곳에 설치하는 것으로 변경하였다. 이는 프리캐스트의 제작의 간편성을 고려하고, 프리캐스트 슬래브의 종방향 및 횡방향 틀림에 대한 저항을 기존 슬래브궤도에 비해 향상시키기 위한 것이다. 또한, CAM에 의한 회전구속이 많아지므로 진동의 저감에도 영향을 미칠 것으로 판단되었다.

구조형식을 제외한 다른 영향을 배제하기 위하여 프리캐스트 슬래브의 폭과 길이, 궤간과 레일 체결 간격 등은 기존 슬래브궤도와 동일하게 설정하였으며 사용된 유한요소 또한 동일한 것을 이용하였다. 다음 그림 10은 새로운 구조형식의 슬래브궤도와 그 모델링을 나타낸 것이다. 이하, 편의를 위해 기존 슬래브궤도를 Type-1, 새로운 궤도형식의 슬래브궤도를 Type-2라 한다.

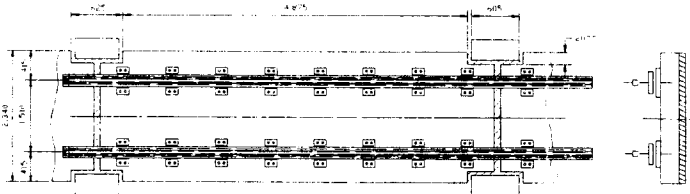


그림 10 구조형식을 개선한 슬래브궤도와 해석 모델링

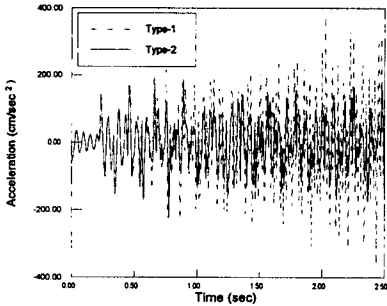
5.2 표준 슬래브궤도와와의 거동 비교

동적해석 결과, 새로운 형식의 궤도시스템의 동적거동이 다소 향상되었음을 알 수 있었다. 그림 11(a)는 레일의 연직가속도 응답을 비교한 것이다. Type-1의 연직가속도 379.43cm/sec²에 비해 Type-2의 연직가속도는 222.02cm/sec²으로서 레일의 연직가속도가 0.16g 정도 감소하였다. 레일 처짐의 경우에는 Type-1이 1.102mm였으며 Type-2가 1.092mm로 미소하지만 Type-2의 처짐이 감소하였으며 레일에 발생하는 모멘트 역시 각각 1.24t·m와 1.20t·m로서 Type-2가 약 3% 작은 값을 나타내었다.

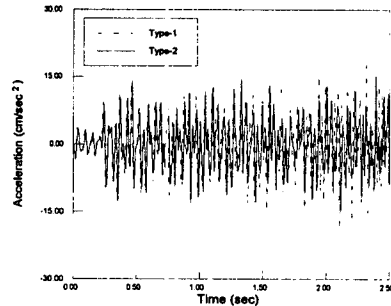
두 궤도시스템은 동일한 재료 물성치를 이용하였으므로 정적 거동에서는 거의 유사한 결과를 보인 반면 동적 거동, 특히 레일진동의 측면에서는 예상외의 큰 차이를 나타내었다. 이는 돌기부

를 고정되어 있는 것으로 모델링하고 이 돌기부가 프리캐스트 슬래브 unit과 선형스프링에 의해 연결되어 있다고 가정하였으므로 프리캐스트와 돌기부와의 접촉면이 넓은 Type-2가 진동의 저감에 효과적일 수 있음을 보여주는 것이다. 또한, 프리캐스트 양단을 고정하면 진동의 저감에는 더욱 효과적일 수 있으나 이러한 경우 국부적인 응력집중에 대한 검토가 필요하다.

슬래브 연직가속도의 최대응답은 Type-1이 19.23cm/sec^2 이고 Type-2가 15.79cm/sec^2 으로 슬래브의 진동저감에서도 Type-2가 더 효율적임을 보여주었다. 그러나 레일의 진동감소의 효과에 비해 하부구조물인 슬래브의 진동 감소효과는 상대적으로 작았다. 이 결과는 그림 11(b)에 나타내었다.



(a) 레일의 연직가속도



(b) 슬래브의 연직가속도

그림 11 연직가속도 비교

6. 결 론

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 케도를 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. 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, “고속전철 케도기술개발 2차년도 연차보고서, 1998. 10.
2. 이성욱, “저진동케도 개발을 위한 철도케도의 동특성에 관한 연구”, 한양대학교 박사학위 논문, 1996. 12., pp. 20~26
3. 이종득, “철도공학”, 노해출판사, 1999. 2.
4. 이희현, “차륜-레일 상호작용을 고려한 슬래브케도의 진동해석”, 전산구조공학회 논문집, 제7권, 제2호, 1994. 6.
5. 철도전문대학, “케도역학”, 1996., pp.118~127
6. E. Kreyszig, “Advanced Engineering Mathematics”, 7th ed., John Wiley & Sons Inc., pp. 84 2~854
7. 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號, 1961.
8. 社團法人 日本鐵道施設協會, “スラブ軌道の施工要領(案)”, 1997
9. 鐵道綜合技術研究所, “A形軌道スラブ設計要領”, 1997.