고속열차 주행 시 동적하중을 받는 철도구조물의 진동 특성

이 인 규¹ · 김 재 민^{1†}

¹전남대학교 토목공학과 교수

Dynamic Characteristics of Railway Structures under High-Speed Train Loading

Inkyu Rhee¹ and Jae Min Kim^{1†}

¹Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National Univ., Gwangju, 61186, Korea

Abstract

The purpose of this study is to investigate the distribution patterns of displacement and acceleration fields in a nonlinear soil ground based on the interaction of high-speed train, wheel, rail, and ground. For this purpose, a high-speed train in motion was modeled as the actual wheel, and the vertical contact of wheel and rail and the lateral contact, caused by meandering motion, were simulated; this simulation was based on the moving mass analysis. The soil ground part was given the nonlinear behavior of the upper ground part by using the modified the Drucker-Prager model, and the changes in displacement and acceleration were compared with the behavior of the elastic and inelastic grounds. Using this analysis, the displacement and acceleration ranges close to the actual ground behavior were addressed. Additionally, the von-Mises stress and equivalent plastic strain at the ground were examined. Further, the equivalent plastic and total volumetric strains at each failure surface were examined. The variation in stresses, such as vertical stress, transverse pressure, and longitudinal restraint pressure of wheel-rail contact, with the time history was investigated using moving mass. In the case of nonlinear ground model, the displacement difference obtained based on the train travel is not large when compared to that of the elastic ground model, while the acceleration is caused to generate a large decrease.

Keywords : wheel-rail-soil interaction, modified drucker-prager model, nonlinear dynamic explicit analysis

1. 서론

유럽, 일본 철도 시스템은 일반적으로 100년이 넘는 많은 구조물이 열화되고 있다. 유럽, 일본의 철도 시스템 검사는 매년 막대한 비용이 소요되는 반면 철도 교통량은 계속 증가하고 있다. 이로 인해 검사 및 수리를 위한 접근 시간을 확보하기가 어렵다. 일반적인 철도 시스템에서는 다양한 지반 조건에 대한 레일-도상 시스템으로 인해 일부 상대 강성 변화가 발생한다. 이러한 상대 강성 변화는 충격 및 피로 방식에 동적상호작용의 영향을 줄 수 있다. 이러한 동적 효과는 특히 전환 영역에서 탈선 및 승차감 저하를 유발할 수 있다. 중국, 일본 및 한국과 같은 일부 아시아 국가에는 대다수의 고속 회선이 있다. 이들 국가의 일부 선에서는 유지 보수 관점에서 무도상 궤도를 적용

하기도 한다(Karoumi, 2019). 동적상호작용을 고려해야 할 중요한 매개 변수는 교량, 열차 및 레일로, 세 가지 주요 철도 시스템이 이에 속한다(Hong *et al.*, 2013; Karoumi, 2019). 교량 시스템 감쇠비, 동탄성계수, 균열/비균열 콘크리트, 경계 조건, 교량-지반 상호 작용 및 접속부와 교량 사이의 전이 영역 등이 주요한 검토 대상이 될 수 있다. 여기에 고속열차 축 및 회전강성, 고속열차 감쇠, 차축 하중 및 거리, 교량 열차 상호 작용, 차륜-레일 불규칙성이 매개 변수에 영향을 미치는 반면, 도상 시스템은 도상의 강성 및 감쇠, 도상 및 침목의 하중 분포 측면에서 열차-교량의 동적 거동과 관련이 있다(Eum *et al.*, 2013; Choi and Jung, 2018). 특히 차륜-레일 불규칙성, 전이 영역 거동 및 열차-교량 상호작용에 대한 포괄적이고 복잡한 동적 거동을 이해하기 위해서는 여러 다중물체 사이의 상대 강성 및

[†]Corresponding author:

Tel: +82-62-530-1651; E-mail: jm4kim@jnu.ac.kr

Received January 9 2020; Revised January 28 2020;

Accepted January 29 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

감쇠 변화를 살펴볼 필요가 있다. 고속열차-레일-교량(혹은 접속부 포함)-지반이 그 예(Lee *et al.*, 2010; Karoumi, 2019)이다. 이러한 문제의 적용은 매우 복잡하기에 고속열차-레일-지반 동적상호작용에 대해 국한하고, 이들의 상호작용을 입체적으로 검토하기 위해 3차원 유한요소 모델을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 고속열차-차륜-레일 상호 작용 사이의 접촉 손실 즉, 지반 조건(탄성, 비탄성)과 관련된 차륜-레일-도상-지반의 변위, 가속도를 수치적으로 검토하였다.

2. 본 론

2.1 차륜-궤도-지반 상호작용 해석

차량의 거동과 궤도의 거동을 모사하기 위하여 이전 연구(Jang and Yang, 2012)에서 제안된 차량-궤도 상호작용을 고려한 동적해석 모델을 간략화하여 적용하였다. 이들 연구에서는 2차원 평면 거동을 모사하였고, 차량은 10자유도를 가지며, 레일과 궤도 슬래브는 Timoshenko 보로 이중 보로 모형화하였다. 체결구는 선형 스프링 및 선형 점성댐퍼(linear viscous damper)로 모형화한 바 있다. 본 연구에서는 이들 차륜-궤도-지반 상호작용을 3차원 거동으로 확장하고, 차량 주행 방향의 연직 방향으로 작용되는 윤중 하중에 의한 가속도, 변위 등을 검토하였다. 본 연구에서는 3차원 모형으로 차량 주행 방향의 수평 방향으로 차륜에 의한 횡향과 사행동 등이 고려되도록 모형화하였다. Fig. 1과 같이 차량 모형은 차량/차륜 질량과 현가장치로

구성되었으며, 이 중 1, 2차 현가 장치를 통합하여 단순화하였고, 단일 선형 스프링과 선형 점성댐퍼로 표현하였다. 각 차륜 간 연결은 강체 connector 연결로 bogie를 모사하였고, 단면 2차 모멘트의 물성치를 부여하였다. 이전 연구(Jang and Yang, 2012)에서는 차륜과 레일의 접촉면에 Hertzian 스프링을 사용한 반면에 본 모형에서는 차륜과 레일 상면의 평면 간 접촉을 모사하였고, 접촉면의 수직거동과 접선방향 마찰계수를 부여하여 차륜-궤도의 하중전달 구조를 모사하였다. 차륜-궤도 접촉문제는 2가지로 나뉘며, 탄성법과 운동학적 접촉법이다(Rhee and Roh, 2015; Rhee and Kim, 2019). 본 논문은 후자인 운동학적 접촉법을 사용하였으며, 이 penalty기법(식 (1))을 준용한 다중물체 접촉면 구속방정식, $C(\mathbf{X}, t) = 0$ 은 참고문헌(Rhee and Roh, 2015)에서 확인할 수 있다. 여기서, $\mathbf{r}_w, \mathbf{r}_r$ 은 차륜과 레일의 접촉면의 현재 국부 위치벡터이다.

$$C(\mathbf{X}, t) = \mathbf{r}_w - \mathbf{r}_r = 0 \quad (1)$$

콘크리트 궤도슬래브 상면과 레일 하면의 경계조건은 체결구와 방진패드의 효과를 고려하기 위해 선형 스프링과 선형 점성댐퍼를 사용하여 표현하였다. 콘크리트 궤도슬래브 하면과 HSB 상면은 완전부착으로 표현하였다. 지반부는 HSB와 일반 지반(사질 지반)으로 구성되었으며, 지반 경계조건에서의 응력반사파 발생으로 인한 지반 응력 계산의 오차를 최소화하기 위해 점성감쇠 에너지흡수조건(ABAQUS, 2019)을 사용하였다.

2.2 유한요소 모형 및 해석

유한요소해석은 Abaqus를 사용하였으며 Fig. 2(a)와 같이 차륜은 강체요소(R3D3, R3D4)로 구성되었고, 레일, 콘크리트 슬래브, 지반부는 3차원 8절점 요소(C3D8)로 구성되었다. 지반 경계부는 동적무한요소(CIN3D8)으로 표현되었다. 해석은 explicit 동적해석을 수행하였으며, 요소 크기, h 와 시간증분, Δt 의 결정은 식 (2)와 Table 1과 같이 소밀파(wave speed) 계산을 통해 결정되었다. 이는 식 (3)과 같은 고유치 해석을 통해서

Fig. 1 Wheel-rail-soil interaction analysis: (a) vehicle model, (b) model description

Table 1 Material properties, element size, and wave speed

Instances	Elastic modulus (MPa)	Specific gravity (t/mm ³)	Wave speed (mm/s)	Min. element size (mm)	Min. time inc. (s)
Rail	210,000	7.85×10^{-9}	52,220	0.82373	3.5×10^{-5}
Track	29,100	2.45×10^{-9}	35,330	150	4.5×10^{-3}
HSB	10,000	2.30×10^{-9}	21,052	120	5.7×10^{-3}
Soil(sands)	50	1.85×10^{-9}	1,660	600	0.3614

도 계산할 수 있으나, 현재 동적무한요소와 강체요소를 갖는 모델의 최대 고유치 특성의 모호성을 감안하여 단순한 방법인 소밀파 계산법을 사용하였다. 여기서, c_i , E_i , ρ_i , $h_{e,min}$, λ_{max} , ξ 는 각각 재료별 소밀파 속도, 탄성계수, 단위중량, 최소 요소 크기, 전체 모델의 최대 고유치, 임계감쇠비이며, Δt_{min} 는 해석에 필요한 최소 시간증분을 나타낸다. Explicit 동적해석에서 있어, 최소 유한요소 크기가 최소 소요 시간증분을 결정하는 바 현재 모델에서는 레일 부의 가장 작은 요소크기에 의해 Δt_{min} 가 결정되었고, 그 하한치는 $3.5 \times 10^{-5} \text{sec}$ 이다. Fig. 2(b)~(c)는 최종 모델을 나타내고 있다. 이 때 레일의 양단의 경계조건은 변위고정 및 회전허용을 부여하였다. 해석에 사용된 재료 물성치와 기하적 치수는 Table 2와 같다. 콘크리트도상 압축강도는 35MPa, 탄성계수는 29.1GPa로 사용하였다. 차륜

Fig. 2 Finite element model(Abaqus, 2019): (a) rail geometry (UIC-60), (b) wheel set with suspension, (c) whole FE model, (d) fundamental eigenmodes: flexure, twist, higher-order flexure and twist(3.9Hz, 4.2Hz, 4.7Hz, 5.32Hz each)

Table 2 Materials and geometries used in the analyses

Instances	Unit	Input values
Vehicle body mass	tonne	67.96
Bogie mass	tonne	1.21
Bogie moment of inertia		
I_{xx}	mm^4	1.93×10^{-10}
I_{yy}	mm^4	8.56×10^{-7}
I_{zz}	mm^4	1.92×10^{-10}
I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}	mm^4	0
Spring constant(suspension)	N/mm	1,260
Damping constant(suspension)	Ns/mm	22.5
Distance between axles	mm	3,000
Wheel radius(UIC 60)	mm	460
Spring constant(fastener/pad)	N/mm	36,040
Damping constant(fastener/pad)	Ns/mm	10
Sleeper distance	mm	650

은 강체로 모델링하여 별도의 물성치는 부여하지 않고, Table 2에 정의된 환산질량을 차륜 축중심의 참조점에 배치하였다. 해석에 고려된 열차하중은 KTX 고속열차를 단순화한 형태로 사용되었다. 해석모델은 Fig. 2(c)와 같이 최종적으로 총 305,661 절점과 266,768개의 요소로 구성되었다.

$$c_i = \sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}}, \Delta t_{min} = \frac{h_{e,min}}{c_i} \quad (2)$$

$$\Delta t_{min} \leq \frac{2}{\lambda_{max}} (\sqrt{1 + \xi^2} - \xi) \quad (3)$$

최종 모델에는 지반부를 제외하고 5% Rayleigh 감쇠비가 적용되었다. 이 때 사용된 고유모드는 Fig. 2(d)를 이용하여 선정하였다. 모델의 단면 제원과 물성치는 Kim 등(2008)을 준용하였다.

열차하중은 차량 질량을 Table 2와 같이 부여하고, 중력가속도를 통해 재하되었다. 다시 이 차량의 동적하중은 현가장치 선형 스프링계수와 댐핑계수를 통해 레일 부에 전달되었다. Fig. 3과 같이 차륜의 구름(rolling)을 통해 추가적인 동적요인을 모사하였다. Fig. 3(a)에서는 차륜의 이동거리와 차륜의 접촉 호장거리를 통해 회전 각속도(rad/s), ω 를 특정하였다. 본 해석에서는 300km/h의 속도를 갖는 KTX열차가 24m의 레일을 주행하는 조건을 모사하였기에 정속 300km/h의 속도는 각속도, $\omega_x = 614.1 \text{ rad/s}$ 를 차륜 중심의 참조점(강체 차륜)에 작용시켰다. 동시에 총 주행시간 $t = 0.288 \text{ s}$ 동안에 24m를 이동하도록 경계조건을 부여하였다. Fig. 3(b)는 위에서 설명한 차륜 구름 모드를 표현하기 위한 2가지 혼합모드인 병진모드와 회

Fig. 3 Rolling boundary conditions: (a) relationship between translational distance and angular velocity of wheel, (b) rolling boundary conditions of motion superposition (translation + rotation) and kinetic energy balance

Fig. 4 Yield surface of modified Drucker-Prager/Cap model in the p - q plane (ABAQUS, 2019)

전모드를 각각 표현하였고, 이를 위해 필요한 운동에너지를 각 모드별로 중첩하여 표현하였다. 레일부, 콘크리트 슬래브, HSB층은 탄성거동으로 표현하였고, 지반부는 비선형 재료모델인 modified Drucker-Prager 모델을 사용하였다. 사질토의 경우, 점착력, $c=0.001$ MPa, 내부마찰각, $\phi=35^\circ$ 를 이용하였다. 지반의 유효응력과 유효변형도의 비선형 거동은 Fig. 4와 같이 지속적으로 증가는 비선형 전단/압축 모형으로 입력하였다.

Drucker-Prager cap 모델은 영구 변형이 진행되는 점착성 지반의 거동을 모사한다. 파괴 항복 면은 Fig. 4와 같이 전단 파괴면과 등가 압축 파괴면으로 구성된다. 점착력의 절편과 내부

마찰각의 기울기를 갖는 전단 파괴면(F_s), End-cap을 이용한 압축 파괴면(F_c) 및 이 둘을 연결하여 폐합 연속성을 보완하는 전이면(F_t)이다. 비선형 변형경화 구간은 소성 압축을 나타내며 체적 팽창을 제어할 수 있다.

$$F_s(\sigma, \beta, d) = q - p \cdot \tan \beta - d = 0 \quad (4)$$

여기서, $p = -\frac{1}{3} \text{trace}(\sigma)$, $q = \sqrt{\frac{3}{2} (\mathbf{s} : \mathbf{s})}$, $\mathbf{s} = \sigma + p\mathbf{I}$ 이며, p 는 등방 구속응력이며, q 는 von-Mises 등가응력이며, $\mathbf{s}$ 는 σ 에서 등방 구속응력, p 를 제한 편차응력이다.

$$F_c(\sigma, \alpha, R, d, p_a) = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[\frac{R \cdot p}{(1 + \alpha - \alpha / \cos \beta)} \right]^2} - R(d + p_a \tan \beta) = 0$$

$$p_a = \frac{p_b - R \cdot d}{(1 + R \cdot \tan \beta)} \quad (5)$$

$$\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \ln \frac{p'}{p'_o} = \frac{C_c - C_s}{2.3(1 + e_o)} \ln \frac{p'}{p'_o} \quad (6)$$

전단파괴면(F_s)는 현재 응력텐서, σ 인 요구조건에 대한 내부 마찰각, β 와 점착력, d 의 지함 함수에 의해 식 (4)와 같이 결정된다. 이 전단파괴면은 Fig. 4와 같은 원추형 표면으로 등방 구속압, p 방향을 따라 기본적으로 체적 압축파괴기준이 존재하지 않기 때문에 축 대칭의 개방된 원뿔 형상을 갖는다. 이를 보완하기 위해 압축 파괴면, F_c 는 지반이 압축을 받을 경우 다짐 및 변형경화를 표현하기 위해 식 (5)와 같이 도입된다. 이는 개방된 원뿔에 cap을 씌워 변형경화 소성거동을 표현하고자 하며, cap 반경(R) 및 전이 응력(p_b)도 포함된다. 추가 입력 매개변수는 F_s 와 F_c 사이의 전이 반경이다. Cap-변형경화 전이 법칙은 식 (6)과 같으며, 이들 파라미터는 공극비 및 평균 유효응력의 관점에서 등방성 압밀시험으로부터 얻어진다. 예를 들면, Helwany(2007)의 사질지반에 대한 일련의 직접전단시험은 Drucker-Prager 파괴기준에서 $\beta=37^\circ$ 의 내부 마찰각을 나타냈다. 경사는 0.068이고 절편은 1.07이다(공극률 대 평균 주응력). 공극비는 0.658~1.063의 범위이고, 상대밀도는 1.27~1.58의 범위이다. 압축지수는 2.35이다. 입력 매개변수의 개별 영향을 조사하기 위해 패치 시험을 위해 총 5개의 매개변수인 (가) 점착력 d , (나) 내부마찰각 β , (다) cap 반경 R , (라) 전달응력 p_b , 및 (e) 전이면 반경을 선정하였다. Cap 소성 압축변형에 각 개별 인자의 영향을 정규화하기 위해 측면 구속 및 직접 전단을 받는 일축 압축시험을 수행하였다. 2-D 1.0m 정사각형 사질토 패치를 위의 5 가지 서로 다른 인자를 변화시켜 분석하였다. 점착력, 전이면 반경 및 초기 전달응력은 그 영향이 파괴면

Fig. 5 Nonlinear behavior of soil beds: effective stress and strain curve of sand

형상에 비해 거의 작기 때문에 사질토의 비선형 거동에 대해 비교적 둔감하다. 그러나 내부 마찰각과 Cap 반경의 영향은 상대적으로 지배적이다. 사질토의 내부 마찰각은 전단파괴기준과 등방 구속응력의 팽창 효과에 모두 중요한 영향을 미친다. 내부 마찰각의 증가로 인한 초기 전단강성에서는 비교적 큰 변화가 관찰된다. 내부 마찰각 변화는 사질지반의 전단 거동과 관련된 편차 응력 공간에 지배적인 영향을 미친다. 또 다른 주요 파괴모드는 압축 하의 체적변화 거동이다. 등방 구속응력의 항복 한계 Cap 반경이 증가함에 따라 증가한다. 일반적으로 지반의 비탄성 체적 거동은 압축상태일 때 압밀되는 과정의 경사가 다르다. 이는 지반의 유연성에 따라 초기 재하 단계에서 Fig. 5와 같이 이완 효과를 나타낼 수 있다.

2.3 수치예제 결과 및 고찰

수치해석 결과는 Fig. 6과 같이 지반부의 (a) 변위장, (b) 가속도장을 표현하였다. 이 때, 변위와 가속도는 각 방향성분의 노름이다. 변위장은 열차의 진행방향에 따른 변위의 분포를 나타내었고, 지반의 수직구간에 영향을 주는 것으로 나타난 반면에, 지반부의 가속도장은 지반 표면에 국부화되어 작용하는 것을 알 수 있다. Fig. 7(a)에서는 레일 부의 차륜과 접촉부의 수직응력(S33), 차륜의 가이드부와 레일 두부의 횡방향 접촉부 응력(S11), 레일부의 종방향 응력(S22)과 변위가 나타나있다. Fig. 7(b)는 콘크리트 도상(half-section)의 가속도 분포를 나타내고 있다. 콘크리트 도상부도 레일 저면과의 접촉 부에서의 가속도가 국부화 됨을 알 수 있다. Fig. 8(a)는 지반부 재료 비선형이 없는 탄성지반의 전형적인 수직응력 분포를 나타내고 있다. Fig. 8(b)~(d)는 지반부의 상부 2.4m 구간에 Modified Drucker-Prager 사질지반 모델이 비선형 재료로 묘사된 바, 지반비선형 거동의 지표인 Drucker-Prager 파괴면의 등가소성변형도(PEQC1), Cap부의 등가소성변형도(PEQC2), 전체 체적 변형도(PEQC4), 등가소성변형도(PEEQ)를 나타내고 있다. 이들 등가소성변형도는 Fig. 4에서의 파괴면인 전단파괴면 F_s ,

Fig. 6 Contour plots: (a) displacement-norm field, (b) acceleration-norm field on the soil bed

Fig. 7 Contour plots: (a) S33, S22, S11 of rail, (b) vertical acceleration of concrete track

Cap부 압축파괴면 F_c 의 등가소성변형도(PEQC1,2)를 나타내며, 전이부 파괴면인 F_t 에서의 등가소성변형도(PEQC3)는 나타나지 않았다. 이는 전이면을 관통하는 변형도가 없었음을 의미한다. 소성변형도(PE)는 Fig. 8(e)~(i)까지는 소성변형도의 시간 변화에 따른 변화를 보여주고 있다.

Fig. 9은 레일 두부에 작용하는 (a)차륜-레일상면 접촉부 수직응력(S33), (b)차륜가이드-레일두부 측면 접촉부 횡응력(S11), (c)레일부 종방향 응력(S22)의 시간이력 분포이며, 모델의 중앙부에서의 결과이다.

Fig. 8 Nonlinear behavior of soil beds: (a) typical elastic vertical soil stress, (b) PEQC1, (c) PEQC2, (d) PEQC4, (e) PEEQ, (f) PE-stage 1, (g) PE-stage 2, (h) PE-stage 3, (i) PE-stage 4

Fig. 9 Stresses in time history on the rail head: (a) vertical stress, (b) transverse stress, (c) longitudinal stress

Fig. 10은 지반의 중앙부 단면(수직면)에 대한 (a) 변위분포, (b) 등가응력인 von-Mises응력분포를 나타내며, 변위분포는 비선형 지반모델의 유무에 큰 차이는 없는 것(조밀한 사질지반)으로 나타났으며, 등가응력에서는 탄성지반에 비해 비선형 지반의 경우에 다소 낮은 응력이 발생하였다. 가속도의 경우에는 (c) 탄성지반, (d) 비선형지반인 경우가 확연히 차이를 나타내었으며, 비선형 지반에서 수직가속도가 급격히 감소하였음을 알 수 있다. 이 경우에도 지반표면 아래로 1~2m 이내에서만 교란이 발생할 가능성이 있다. Fig. 11에서는 지반부 상면의 횡단면에 대한 von-Mises 응력 분포와 등가소성변형도 분포를 나타내고 있으며, 레일-콘크리트도상과 접촉되어 있는 면 중 레일면 부근에 각각 높은 von-Mises 응력과 등가소성변형도가 나타났다. 이는 Fig. 8에 나타난 PEEQ, PE, PEQC1,2,4의 분포에 그 맥락을 같이 한다. Fig. 12와 13은 수평방향과 길이방향의 수직변위 분포와 가속도 분포를 나타내었다. 탄성지반과 비탄성지반 간의 변위차는 크지 않았다. 반면에 가속도의 경우는 Fig. 13에서 처럼 상당한 차이로 비선형 지반에서 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 지반부의 재료비선형성에 따른 감쇠비가 작용하여 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 10 Nonlinear behavior of soil beds: (a) vertical displacement, (b) von-Mises stress, (c) vertical acceleration in elastic beds and (d) vertical acceleration in inelastic beds¹⁾

1) #100-#1000은 총 주행시간인 0.288s를 1000구간으로 나누었을 때, 각 번호임. (예: #100=100×0.288/1000), n은 비탄성모델의 거동임.

Fig. 11 Nonlinear behavior of soil beds: (a) effective stress and (b) equivalent strain curve on the transverse distance in the soil bed¹⁾

Fig. 12 Nonlinear behavior of soil beds: vertical displacement in (a) transverse, (b) longitudinal direction¹⁾

3. 결론

본 연구에서는 3차원 고속열차-차륜-레일-도상-지반의 상호작용에 따른 비선형 지반모형에 따른 변위와 가속도 분포를 예측하는 유한요소해석을 실시하였다. 해석결과로 아래와 같은 결론을 도출하였다.

Fig. 13 Nonlinear behavior of soil beds: vertical displacement in (a) transverse, (b) longitudinal direction¹⁾

- 1) 이동질량해석과 3차원 차륜-레일 접촉에 따른 레일 두부의 응력분포는 수직응력은 $\pm 100\text{MPa}$, 횡압은 $\pm 5\text{MPa}$, 길이방향 구속압은 -25MPa 으로 예측되었다. 이는 Jang과 Yang (2012)의 일반 콘크리트 슬래브 궤도를 갖는 레일부의 응력범위와 유사하다. 레일 길이방향 응력(S22)은 장대 레일의 연속성을 표현할 수 있는 초기 구속응력은 고려하지 않았다.
- 2) 지반 수직변위는 탄성모델과 비탄성 모델 간의 차이는 크지 않으나, 비탄성 모델의 경우가 더 크게 발생하였다. 모델의 중앙부 기준 $-0.4\text{mm} \sim -0.42\text{mm}$ 가 각각 예측되었다. 노반부 실측 연직 변위가 대략 $0.006 \sim 0.106\text{mm}$ 범주 (Choi and Jung, 2018)에 있어 예측 값이 다소 크게 나타났으나, 이는 현장 지반부 조건을 추후 반영한다면 정확도를 향상할 수 있다고 사료된다.
- 3) 지반의 가속도는 탄성모델과 비탄성 모델 간의 차이가 상당히 크게 나타났으며, $\pm 2 \sim 6$ 배의 차이가 나타났다. 탄성모델의 표면가속도는 $-18 \sim 11\text{m/s}^2$ 의 범위이었으나 비탄성 모델의 표면가속도는 $-2 \sim 5\text{m/s}^2$ 의 범위로 감소하였다. 침목부의 실측 평균 가속도 값이 대략 $10 \sim 30\text{m/s}^2$ 이며 (Lee et al., 2010), 노반부 가속도가 $0.3 \sim 1.2\text{m/s}^2$ (Choi and Jung, 2018)임을 고려하면 비선형 지반모델이 근사한 범위 내에 있으므로 더 정확한 지반가속도 및 연직 변위를 예측할 수 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 에너지기술평가원 연구과제(과제번호:20193110100020)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- ABAQUS** (2019) *Analysis User's Manual*, Version 6.19, Dassault Systemes Simulia, Inc.
- Choi, C.Y., Jung, J.H.** (2018) Study of the Long-Term Behavior Characteristics of Roadbed on Concrete Track of High-Speed Railway, *J. Korea Aca. Indus. Co. Soc.*, 19(4), pp.8~16.
- Eum, K.Y., Lee, S.H., Kim, J.W.** (2013) Study on Dynamic Characteristics of Structure Approaches According to the Train Moving Loads, *Proc. Korean Soc. Rail.*, 16(4), pp.298~304.
- Helwany, S.** (2007) *Applied Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., p.385.
- Hong, G.Y., Kim, D.S., Kang, Y.S.** (2013) Evaluation on the Effect of Railroad Structures Affecting on Wheel Load Fluctuations, *Proc. Korean Soc. Rail.*, 13(3), p.10.
- Jang, S.Y., Yang, S.C.** (2012) Assessment of Train Running Safety, Ride Comfort and Track Serviceability at Transition between Floating Slab Track and Conventional Concrete Track, *J. Korean Soc. Rail.*, 15(1), pp.48~61.
- Karoumi, R.** (2019) Recent Research in Railway Bridge Dynamics, *Int. Sem. Rail. Brid. & Tra. Int.*, 33.
- Kim, Y.H., Jeong, S.S., Seol, H.I., Han, Y.A.** (2008) Analysis of Allowable Settlement on Tracks of High Speed Railway, *J. Korean Soc. Geotech.*, 24(11), pp.25~34.
- Lee, I.W., Lee, S.J., Lee, S.H., Kang, T.H.** (2010) Evaluation of Deformation Characteristics for Bridge/Earthwork Transition Reinforcement Methods Considering Moving Load, *J. Korean Soc. Rail.*, 13(3), pp.298~303.
- Rhee, I., Kim, J.M.** (2019) 3D Train-Rail-Soil Dynamic Interaction Analysis, *COSEIK Annual Conference*.
- Rhee, I., Roh, Y.S.** (2015) Dynamic Analysis of Railway Structures using Multibody Contacts, *J. Korean Soc. Haz. Mit.*, 15(6), pp.293~299.

요 지

본 논문에서는 고속열차-차륜-레일-지반부의 상호작용에 따른 지반부의 변위장과 가속도장의 분포양상을 연구하고자 하였다. 이를 위해 고속열차 주행을 실제 차륜으로 모형하여 차륜-레일간의 연직접촉과 사행동에 의한 횡접촉을 모사하고, 이동질량해석을 근간으로 하였다. 이 때 지반부는 Modified Drucker-Prager 모델을 이용하여 상면 지반부의 비선형 거동을 부여하고 이에 따른 변위, 가속도의 변화를 탄성지반의 거동과 비탄성지반의 거동을 상호 비교하였다. 이를 통해, 실제 지반거동과 가까운 변위와 가속도 범위를 예측하고자 하였다. 이 때 지반부의 von-Mises응력과 등가소성변형도를 검토하고, 각 파괴면에서의 등가소성변형도, 전체 체적변형도 등을 검토하였다. 이동질량을 이용한 차륜-레일 접촉부의 수직응력, 횡압, 종방향 구속압 등의 시간이력에 따른 응력변화도 검토하였다. 비선형 지반모델의 경우 탄성 지반모델에 비해 열차주행에 따른 변위 차이는 크지 않는 반면에 가속도의 경우는 큰 감소를 발생시키는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 차륜-레일-지반 상호작용, Modified Drucker-Prager 모델, 비선형 동적해석