

열차 증속에 따른 콘크리트 궤도 노반의 동적 응력 변화

Dynamic Change of Stresses in Subsoil under Concrete Slab Track Subjected to Increasing Train Speeds

이 태 희¹ Lee, Tae-Hee
Ernest Nsabimana³

최 찬 용² Choi, Chan-Yong
정 영 훈⁴ Jung, Young-Hoon

Abstract

Societal interest on a faster transportation demands an increase of the train speed exceeding current operation speed of 350 km/h. To trace the pattern of variations in displacements and subsoil stresses in the concrete slab track system, finite element simulations were conducted. For a simple track-vehicle modeling, a mass-point system representing the moving train load was developed. Dynamic responses with various train speeds from 100 to 700 km/h were investigated. As train speeds increase the displacement at rail and subsoil increases nonlinearly, whereas significant dynamic amplification at the critical velocity has not been found. At low train speed, the velocity of elastic wave carrying elastic energy is faster than the train speed. At high train speed exceeding 400 km/h, however, the train speed is approximately identical to the elastic wave velocity. Nonlinearity in the stress history in subsoil is amplified with increasing train speeds, which may cause significant plastic strains in path-dependent subsoil materials.

요 지

보다 빠른 교통 수단에 대한 사회적 관심이 현재 운영 중인 KTX의 운행속도인 350km/h을 넘어서는 고속 열차의 운영을 요구하고 있다. 본 연구에서는 콘크리트 궤도 구조물에서 열차 속도 변화에 따른 노반 변위의 변화 양상을 추적하고 비선형적인 노반 응력 변화를 살펴보기 위해 유한요소해석을 실시하였다. 궤도-차량 상호작용을 간단한 형태로 고려하기 위해 이동 하중의 질점 시스템을 개발하였다. 열차 하중의 이동 속도를 100km/h에서 700km/h까지 변화시켜 결과를 얻었다. 열차 속도 증가에 따라 레일과 노반 변위는 비선형적으로 증가하였으나 뚜렷한 임계 속도 효과는 나타나지 않았다. 낮은 열차 속도 대역에서는 열차 속도보다 노반에서 에너지를 전달하는 탄성파 속도가 빠르다. 하지만 400km/h 이상의 열차 속도 대역에서는 열차 속도와 에너지 전달 속도가 거의 일치하였다. 열차 속도 증가에 따라 노반 응력 이력이 크게 변하며 경로 의존적인 토질 재료에서 상당한 크기의 소성 변형률이 예상된다.

Keywords : Critical velocity, Dynamic analysis, Train speed, Concrete Slab Track, Nonlinearity

1 정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyung Hee Univ.)

2 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute)

3 비회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyung Hee Univ.)

4 정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Eng., Kyung Hee Univ., Tel: +82-31-201-2574, Fax: +82-31-202-8854, jyounghoon@khu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

보다 빠른 교통 수단에 대한 사회적 관심이 현재 운영 중인 KTX의 운행속도인 350km/h를 넘어서는 고속 열차의 운영을 요구하고 있다. 하지만 이러한 열차의 증속에 대해 기존 궤도 시스템을 사용하고자 한다면, 열차의 속도 변화에 따라 궤도 시스템에서 어떠한 변화가 발생하는지 정확하게 파악되어야 한다. 또한 최근 400 km/h 이상으로 운행되는 고속 열차 개발이 이루어지고 있으며(Lee, 2011), 이를 뒷받침할 새로운 궤도 시스템의 개발을 위해서도 증속에 따른 궤도 시스템의 역학적 변화를 정확하게 이해하여야 한다.

철도 노반에 대한 열차 속도의 영향은 임계 속도(critical velocity)라는 개념을 통해 오랜 기간 동안 연구되었다. 임계 속도는 열차 증속에 따라 증가하는 레일 처짐량이 최대가 되는 극한 상태의 열차 속도를 의미한다. 물리적으로는 열차가 궤도 구조물을 지나갈 때 노반에 발생하는 에너지는 노반의 표면파(surface wave), 즉 레일리파(Rayleigh wave)에 의해 소산되는데 열차 속도가 임계 속도 또는 레일리파 속도에 근접하면 에너지가 소산되지 못하고 열차 하부에서 계속 축적되며 이로 인해 일종의 공진을 일으켜 노반 변형의 동적 증폭이 최대가 된다(Esveld, 2001).

임계 속도에 대한 이론적 연구는 최근에도 계속 이루어지고 있으나, 대부분의 연구에서 상부 구조를 단순보로 치환하고, 하부 구조를 등가의 동일 재료 상수를 가진 반무한체로 가정하여 접근하고 있다. 실제 열차 속도가 임계 속도에 가까워져서 심각한 궤도 변위 증폭이 발생한 사례는 고속철도가 개발되어 운행되기 시작하면서부터이다(Lee, 2013). 열차 증속에 따른 궤도 변형의 증폭 현상은 TGV100 주행시험을 통하여 본격적으로 연구되기 시작하였다. 임계 속도에 가까운 열차 속도가 궤도 시스템에 영향을 준다는 사실은 스웨덴의 시속 200km/h 급의 X2000 고속열차가 연약지반인 Ledsgard 구간에 개통되어 통과할 때 처음 확인되었다(Madshus and Kaynia, 2000).

열차 증속은 레일 변위를 증가시키고 동시에 노반에 동적 에너지를 증가시키고 동적 에너지의 증가는 노반의 비선형적인 응력 수준을 증가시켜 노반 재료의 비선형성을 가중시킨다. 국부적인 소성 변형을 포함한 비선형적인 노반의 변형 거동은 열차가 계속 통과함에 따라 누적되며 궤도 시스템에 장기적인 누적 소성 변위를 발

생시킨다. 누적 소성 변위는 단기적으로는 열차 운행에 영향을 주지 않으나 지속적으로 누적되어 발생되면 궤도의 사용성(serviceability)에 영향을 주게 된다.

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 콘크리트 궤도 구조물에서 열차 증속에 따른 노반 변위의 변화 양상을 추적하고 이와 함께 발생한 비선형적인 노반 응력의 변화를 분석하였다. 본 연구에서는 레일에서부터 노반까지 모두 유한요소로 모델링하여 보다 현실적인 궤도 구조물을 모사하였고, 그 결과를 상하부 궤도 구조를 비현실적으로 단순화시킨 기존의 이론적 연구 결과와 비교하였다. 유한요소로 모델링된 궤도 구조물에 대해 열차 속도를 100km/h에서 700km/h까지 변화시키면서 동적 열차 하중의 영향을 노반 응력의 관점에서 분석하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 수치해석 단면 모델링

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS (2005)를 사용하여 철도 궤도 구조물을 해석하였다. 동적 해석을 위해 ABAQUS/Implicit 해석모듈을 사용하였다. 해석에 사용된 콘크리트 궤도 단면은 KTX 호남선에 사용된 단면이며, 연직 단면을 2차원 평면 변형률 조건(2-dimensional plane-strain condition)으로 모사하였다. 2차원 해석이므로 레일 한 개만을 고려하여 하중 및 경계 조건을 설정하였다. 콘크리트 궤도 구조물은 상부로부터 레일, 탄성 패드, 침목, TCL(track concrete layer), HSB(hydraulic stabilized base), 강화노반, 노반의 순서로 구성하였다. 레일을 제외한 모든 궤도 구조물의 구성 요소는 4절점 사각형 연속체 요소를 사용하여 모사하였다. 동적인 열차 하중을 받는 재료의 응력-변형률 관계는 매우 낮은 변형률 수준(very small-strain condition)에서 이루어진다고 가정하여 선택한 재료 모델은 선형 등방 탄성 모델(linear isotropic elastic model)이다. 재료 모델의 상수는 국내 경부 및 호남 고속철도의 설계 자료와 독일 및 일본의 기준을 검토한 Jung 등(2011)의 선형 연구를 참고하여 Table 1과 같이 설정하였다.

본 연구에서 사용한 콘크리트 궤도 노반의 수치해석 단면은 Fig. 1과 같다. 레일은 UIC60 레일 단면을 가정하여 2차원 2절점 티모센코 보(TIMOSHENKO BEAM) 요소로 모델링하였고, 접합 구속조건(tied constraint)을 이용

Table 1. Material Properties for simulations

Component	Mass Density (ton/m ³)	Stiffness ¹⁾	Poisson's ratio, ν	Thickness	Damping Coefficients
Rail	7.8	E = 210 GPa I = 3,055 cm ⁴	0.3	-	$\alpha=30.81$ $\beta=5 \times 10^{-5}$
Sleeper	2.3	E = 29.1 GPa	0.2	20 cm	$\alpha=0.369$ $\beta=0.0051$
TCL	2.3	E = 34.0 GPa	0.2	24 cm	
HSB	2.3	E = 12.9 GPa	0.2	28.4 cm	
Reinforced Roadbed	2.0	E = 180 Mpa	0.2	50 cm	
Subsoil	2.0	E = 60 Mpa	0.3	2.976 m	

¹⁾ E = Young's modulus, I = Moment of inertia, k = Linear spring constant, α and β = Coefficients of Rayleigh damping model.

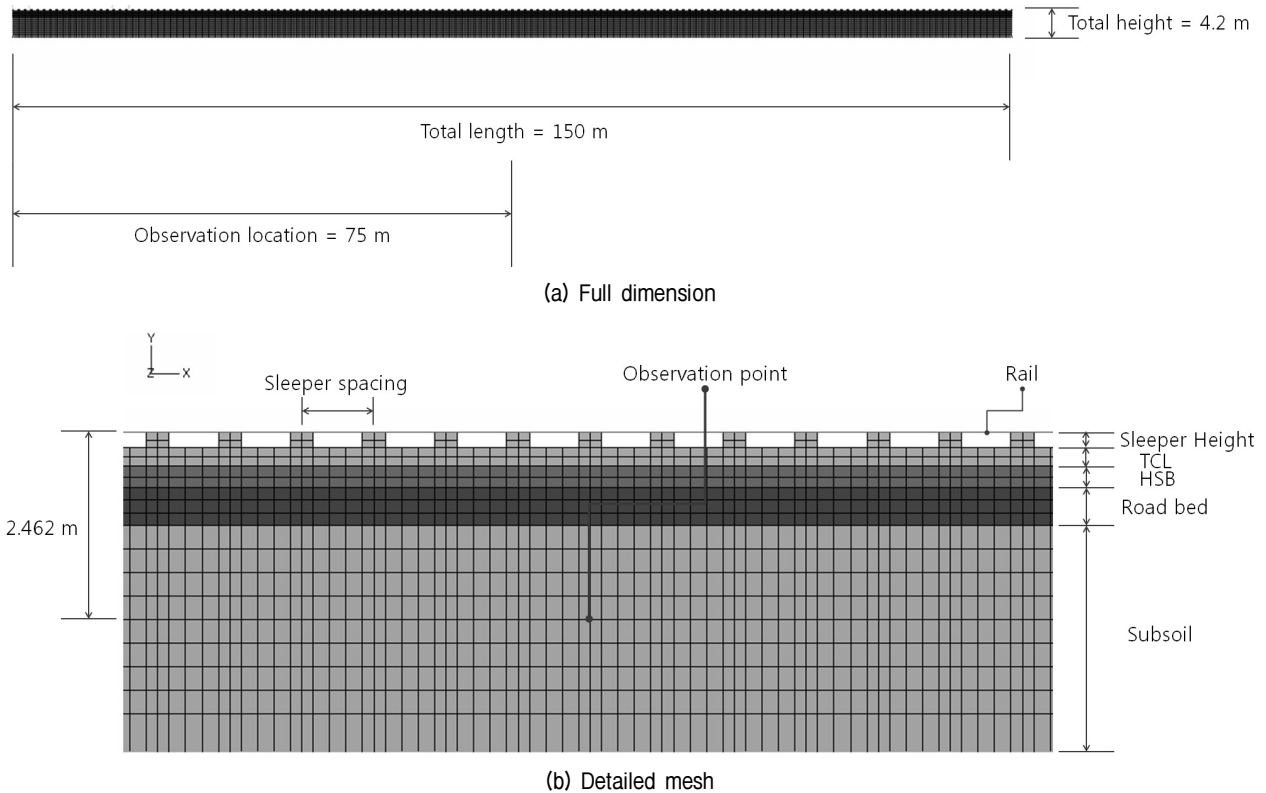


Fig. 1. Finite element mesh for railway structure

하여 650mm의 간격으로 위치한 탄성 패드 및 침목 요소와 연결되었다. 레일 요소의 물성치는 Table 1에 정리하였다. 열차가 통과하는 총 해석 영역의 길이는 150m로 설정하였고, 하부 및 좌우 경계면은 무한 요소(infinite element)를 사용하여 동적 해석 중 발생할 수 있는 경계면 문제를 해결하였다. ABAQUS에서 제공하는 무한요소는 경계면에 수직으로 부딪히는 평면파에 의해 동적 에너지가 반사되지 않도록 요소 내부의 감쇠비를 적절히 분포시킨다. 경계면에 수직하지 않은 파가 도달할 경우 에너지의 반사를 완전히 제어할 수는 없지만, 경계면을 해석영역에서 적절히 떨어뜨리면 해석 결과에 큰 영향을 주지 않는다(Lysmer and Kuhlemeyer, 1969).

2.2 열차 하중의 모사

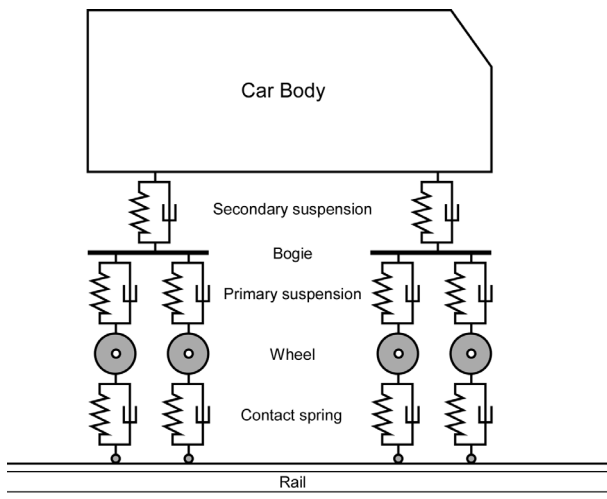
일반적으로 열차 차량 모델은 차량-레일 간의 접촉 문제에서 주로 다루어졌는데, Karoumi(1998), Frohling 등(2007)과 Wiberg(2009)는 다수의 질점과 스프링으로 모사된 열차 차량을 Winkler 지반으로 모사된 단순보에 접촉시켜 해석하였다. 최근에는 Nguyen 등(2011)과 Connolly 등(2012)의 연구와 같이 지반을 2차원 또는 3차원 연속체로 모델링하고 질점과 스프링으로 모사된 열차의 이동 하중을 사용하여 보다 현실적인 해석이 시도되고 있다. 본 연구와 유사하게 시도된 차량 모델은 도로 위의 트럭 하중을 모사하기 위해 시도된 Saleeb and Kumar

(2011)의 모델이 있다. 본 연구에서는 한국철도기술연구원에서 개발 중인 해무(HEMU430) 열차 차량을 해석 대상으로 하였다. 해무 차량에서는 2.6m의 간격을 둔 2개의 차륜으로 대차(bogie)가 구성되며, 하나의 차량은 12.5m의 중심 간격을 갖는 두 개의 대차로 지지된다. 차륜에서 하나의 바퀴는 85kN의 윤중(wheel load)을 받는다.

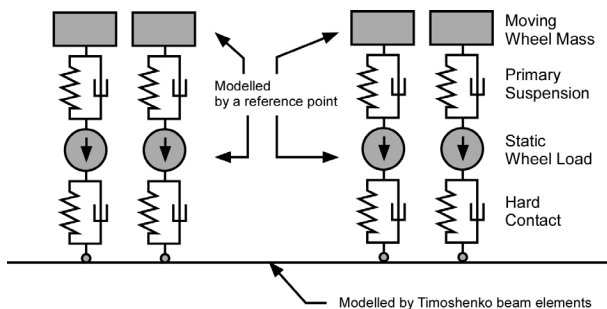
궤도-차량 간의 동역학적 상호작용을 간단한 형태로 모사하기 위해 Fig. 2와 같은 열차 하중 모델을 개발하였다. Fig. 2(a)는 일반적으로 궤도-차량 간 상호작용을 모사하기 위해 고려해야 하는 차량의 구성요소를 표시하였다. 차체(car body)는 2차 현가 장치(secondary suspension)를 통해 대차와 연결되며 대차에서 차륜은 상부에 1차 현가 장치(primary suspension) 스프링으로 연결되며 차륜과 레일의 상호작용은 접촉 스프링(contact spring)으로

로 모사된다. 차량 동해석(vehicle dynamics) 연구 분야에서 보다 실제에 가까운 궤도-차량 상호작용 모델을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 본 연구에서는 열차 운행에 따른 동적 에너지가 노반으로 전달될 수 있는 수준의 단순한 상호작용 모델을 구현하였다. Fig. 2(b)는 본 연구에서 사용한 모델을 설명하고 있다. Fig. 2(b)의 차량 모델에서는 차체와 2차 현가 장치는 제외하는 대신 4곳의 차륜 위치에 독립적인 질점 시스템(mass system)을 배치하였다. 각 질점 시스템은 두 개의 기준점(reference point)과 1개의 선형 스프링-감쇠 요소로 이루어진다. 상부 기준점에는 윤중에 해당하는 질량을 가하였고, 하부 기준점에는 정적 윤중에 해당하는 집중 하중을 가하였다. 하부 기준점과 레일 요소 간의 접촉 상호작용은 접촉면 간의 중첩(overclosure)이 허용되지 않는 접촉 모델(hard contact model)로 구현하였다. 따라서 1차 현가 장치 스프링과 차륜-레일 접촉은 연직 변위에 대해서만 해석이 이루어진다. 1차 현가 장치 스프링의 강성과 감쇠비는 실제 열차 차량의 부품에서 측정된 값을 사용하였다.

열차 하중의 이동을 위해 상부 기준점에 수평 속도를 가하고 하부 기준점도 동일한 수평 이동이 이루어지도록 구속조건을 가하였다. 열차 이동에 의한 동적 에너지는 질점 시스템의 수평 이동 중 발생하는 연직 가속도가 상부 기준점에 위치한 질량에 가해져 발생하게 된다. Fig. 2(b)의 차량 모델에 필요한 상수는 Table 2에 정리하였다. 열차 속도는 100km/h부터 700km/h까지 100km/h의 간격으로 증가시켜 총 7회의 해석을 수행하였다.



(a) Complete model for interaction between rail and vehicle



(b) Simplified model used in this study

Fig. 2. 2-dimensional vehicle modelling

3. 수치 해석 결과

3.1 열차 증속에 따른 궤도 변위의 변화

임계 속도에 대한 이론적 연구를 위해 Timoshenko (1927)는 연속된 윙클러(Winkler) 스프링 위에 놓인 티모셴코 보를 감쇠의 영향을 배제하여 해석하였고, 이후 Fryba(1972)는 감쇠의 영향을 추가 고려하여 해석하였다. Fig. 3(a)와 같이 연속된 윙클러 스프링을 하부 구조

Table 2. Physical properties for simple vehicle model

Primary suspension		Mass on upper reference point	Concentrate force on lower reference point
Spring constant	Coefficient of damping		
1595 kN/m	15 kN·s/m	5,750 kg	85 kN

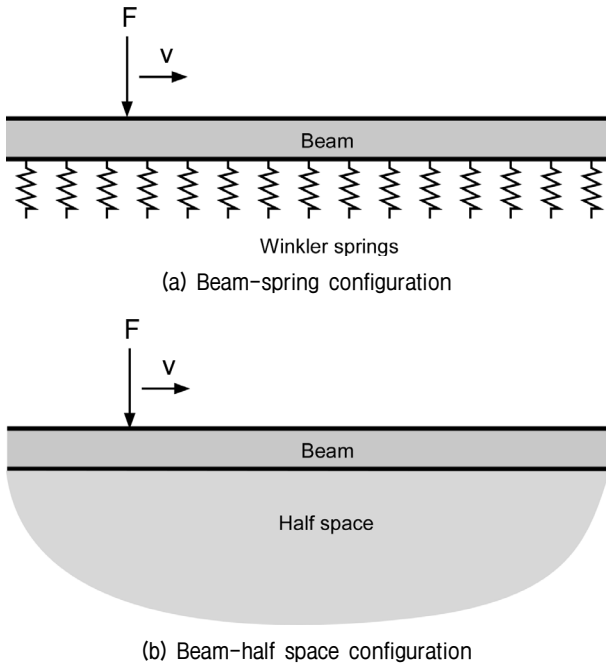


Fig. 3. Beam-spring and beam-halfspace configurations subjected to load F that moves with velocity v (redrawn from Esveld, 2001)

로 표현할 경우 임계 열차 속도 v_{cr} 는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$v_{cr} = (4kEI/m^2)^{1/4} \quad (1)$$

여기서, k 는 윈클러 스프링 계수로 표시되는 궤도 강성(track stiffness), EI 는 티모센코 보의 휨강성(bending stiffness), m 은 단위 길이 당 레일의 질량이다. 식 (1)은 임계 속도를 평가하기 위한 가장 간단한 식이지만 실제 복잡한 다층 구조를 가진 궤도 구조물의 강성을 k 와 EI 의 간단한 변수만으로 표현하고 이에 해당하는 매개변수를 적절히 추정하는 것은 쉽지 않다. 복잡한 궤도 구성 요소를 무시하고 레일과 흙노반에 대한 물성치만을 식 (1)에서 이용한다면 다음과 같은 계산이 가능하다.

- 레일의 휨강성, $EI = 6.42\text{N}\cdot\text{mm}^2$ (UIC60 레일 기준)
- 단위 길이 당 레일 질량, $m = 60\text{kg/m}$
- 궤도 강성, $k = 9$ (노반 불량)~ 90 (노반 양호) N/mm^2

여기서 궤도 강성의 범위는 Esveld(2001)가 제안한 대략적인 범위를 사용하였다. 상기의 값을 식 (1)에 대입하여 임계 속도를 구하면 $v_{cr} = 1812$ (노반 불량)~ 3223 (노반 양호) km/h 의 범위이다. 이러한 범위는 현재 개발된

또는 개발 예정의 최신 고속열차의 가능한 속도 범위를 훨씬 뛰어넘는 값이다. 따라서 식 (1)에서 단순하게 레일과 노반의 개략적인 물성치를 이용하여서는 유의미한 임계 속도를 구할 수 없다. 이러한 문제로 인해 Heelie 등(2000)은 상부 구조와 원지반인 제체를 하나의 보 구조물로 설정하고 연약한 점토층으로 이루어진 원지반을 윈클러 스프링 지반으로 가정하여 해석한 사례가 있다.

Krylov(1995)는 Fig. 3(b)와 같이 티모센코 보의 하부 영역을 윈클러 스프링 대신 표면파가 작용하는 반무한체로 가정하여 임계 속도를 평가하였다. Krylov(1995)는 열차가 흙노반의 레일리파 속도로 운행하면 일종의 공진 현상이 발생하여 궤도 변형의 동적 증폭이 최대가 됨을 밝혔다. Krylov(1995)에 따르면 반무한체 위에 놓인 티모센코 보 구조에서 임계 열차 속도는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$v_{cr} = v_R \quad (2)$$

여기서, v_R 는 레일리파의 속도이다. 레일리파 속도는 매질의 전단파 속도(v_s)와 포아송비의 함수로 표현할 수 있으며 포아송비가 0.3인 경우 $v_R = 0.926v_s$ 이다(Prakashi, 1981). 흙의 전단파 속도는 영탄성계수(Young's modulus)와 포아송비(Poisson's ratio)의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$v_s = \sqrt{E/2\rho(1+\nu)} \quad (3)$$

여기서, E 는 반무한체 매질의 영탄성계수, ρ 는 반무한체 매질의 밀도, ν 는 반무한체 매질의 포아송비이다. 앞서 하부 구조를 단순한 윈클러 스프링으로 가정한 경우와 마찬가지로 하부 구조를 균일한 반무한체(homogeneous halfspace)로 가정한다면 실제 레일 하부의 TCL과 HSB 등으로 이루어진 다층 궤도 구조를 손쉽게 임계 속도 계산에 반영하기는 어렵다. 만약 Krylov의 식에서 반무한체 매질을 단순히 흙노반만으로 이루어졌다고 가정한 후 Table 1에 제시한 노반의 영탄성계수, 포아송비와 밀도 값을 식 (2)와 (3)에 대입하여 임계 속도를 계산하면 $v_{cr} = 358\text{km/h}$ 이다. 이 값은 앞서 식 (1)을 통해 계산된 임계 속도의 범위(1812~3223 km/h)와는 큰 차이가 있으며 실제 고속열차의 운행 속도 대역에 포함된다.

Fig. 4은 수치해석으로 구한 열차 속도에 따른 노반에

서의 연직 변위 변화를 보여준다. 수치해석 결과는 길이 방향으로 전체 해석 길이의 중앙인 75m 지점, 깊이 방향으로 레일 면과 노반 깊이 중앙의 두 지점에서 취득하였다. 속도에 따라 열차 하중이 해석영역을 통과할 때, 관측 지점에서 발생한 최대 연직 변위를 Fig. 4에 도시하였다. 열차 속도의 변화에 따른 동적 변위와의 비교를 위해 움직이지 않는 4개의 윤증을 정재하 시켰을 때 발생한 정적 변위를 함께 계산하였다. Fig. 4에서 직선 또는 점선으로 표시된 연직 변위량은 정적 변위를 나타낸다.

Fig. 4에서 보인 바와 같이 수치해석에서 택한 100~700km/h의 열차 속도 범위에서 동적 연직 변위는 100km/h 대역에서 정적 변위량과 거의 일치하면서 속도가 증가할수록 약간의 비선형성을 보이며 계속 증가한다. 또한 앞서 식 (2)를 통해 계산한 임계 속도 부근에서 동적 변위의 증가 폭이 좀 더 커진다. 700km/h의 열차 속도에서 동적 해석 변위와 정적 해석 변위의 비로 표현된 동적 증폭 계수(dynamic amplification factor)는 1.39이다. 하지만 임계 속도 조건의 특징인 뚜렷한 동적 증폭을 Fig. 4에서 확인하기는 어렵다. 이는 콘크리트 구조 및 강화노반의 강성을 무시하고 흙노반의 물성치를 이용하여 식 (2)와 (3)을 통해 임계 열차 속도를 평가하는 것이 실제 임계 속도 대역을 과소평가함을 의미한다.

Fig. 4에서 발생한 이론적 임계속도 대역의 차이는 Krylov의 가정 조건을 상기한다면 이해할 수 있다. Krylov는 티모센코 보로 표현된 레일의 하부에서 침목 등의 구조물을 모두 배제하고 보에 직접 균질한 반무한체가 연결되었다고 가정하였다. 또한 반무한체에서 에너지 전달은 표면파인 레일리파에 의해 이루어진다고 가정

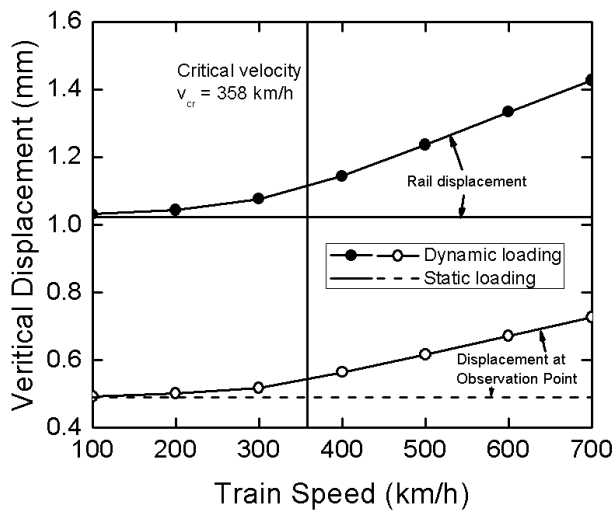


Fig. 4. Vertical displacements for increasing train speed

하였다. 따라서 Krylov(1995)의 이론에 따르면 Fig. 1의 콘크리트 궤도 구조에서 에너지 소산이 이루어지는 표면층은 노반의 표층보다는 레일 하부에 존재하는 TCL 또는 HSB 층이 에너지 소산이 이루어지는 매질일 수 있다. 하지만 식 (2)와 (3)에 TCL 층의 물성치를 입력하여 임계속도를 계산하면 8,872km/h이고, HSB 층의 물성치를 입력하면 5,465km/h의 임계 속도를 얻을 수 있는데, 이 값은 하부 구조를 윙클러 스프링으로 가정한 임계 속도보다 오히려 큰 값이다. 따라서 콘크리트 궤도와 같이 콘크리트 층의 얇은 강성 구조와 노반 층의 두꺼운 연성 구조가 복합되어 있는 경우 임계 속도를 적절히 평가하기 위해서는 서로 다른 강성을 모두 적절히 고려하는 방법이 필요하다.

3.2 증속에 따른 노반 응력의 변화

열차 증속이 노반 응력 변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 1의 관측 지점(observation point)에서 응력 변화를 관찰하였다. Fig. 5~7은 각 속도 대역 별로 열차가 통과할 때 관측 지점에서의 평균주응력(mean normal stress) p 와 축차 응력(deviator stress 또는 Mises stress) q 의 변화량을 보여준다. 평균주응력과 축차 응력은 다음과 같이 정의된다.

$$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3, q = [(3/2)tr\mathbf{S}^2]^{1/2} \quad (4)$$

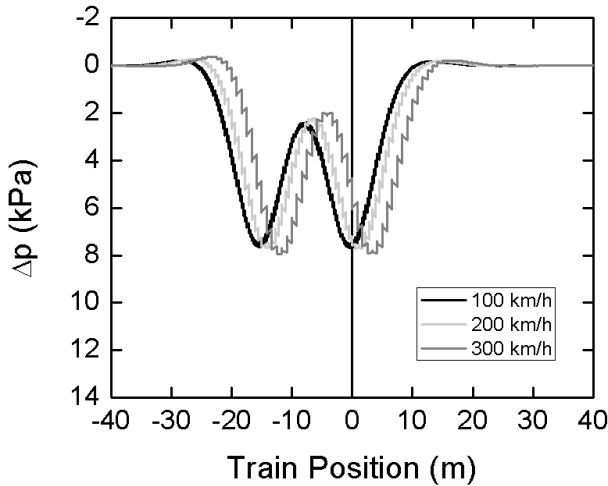
여기서, σ_1 은 최대 주응력, σ_2 는 중간 주응력, σ_3 는 최소 주응력, \mathbf{S} 는 축차 응력 텐서, tr 는 텐서의 trace 연산자이다. Fig. 5~7에서 열차 위치(train position)는 관측 지점과 기준 열차 하중 위치 간의 거리를 나타낸다. 기준 열차 하중의 위치는 4개 윤증의 중앙점으로 선택하였다. 열차 위치가 음의 값이면 기준 열차 하중의 위치가 관측점에 도달하기 이전이며, 양의 값이면 기준 열차 하중 위치가 관측점을 통과한 상태이다.

Fig. 5~7에서 응력 변화의 파형은 모든 속도 대역에서 두 개의 하향 극치(peak value)를 보이며 대차 내 두 개의 윤증에 대한 영향은 콘크리트 층과 강화노반 층을 통과하면서 분산되었다. 두 극치 간의 간격은 실제 대차 간격인 15.1m에서 $\pm 0.2m$ 의 오차 범위로 발생하였다. 열차의 속도가 증가할수록 Δp 와 Δq 의 하향 극치가 증가하였다. Δp 의 경우 열차 하중이 관측 지점에 도착하기 이전에 음의 값을 나타내며, 이는 열차 하중이 도달하기

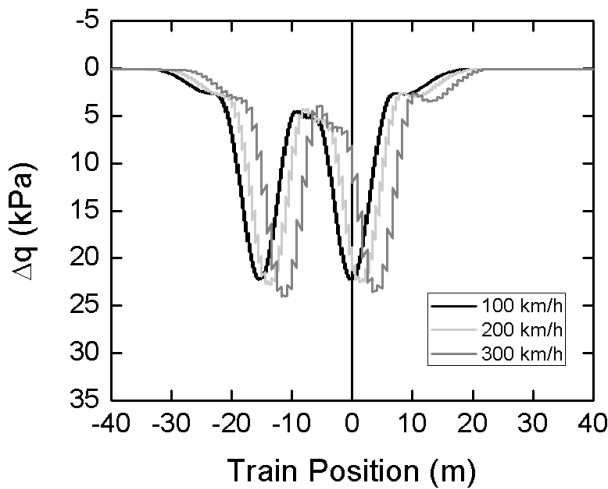
이전에 노반의 평균주응력이 감소함을 의미한다. 이러한 Δp 의 감소는 열차 하중이 지나간 이후에도 작은 크기로 나타난다. Δp 의 감소량은 열차 속도가 빨라질수록 점점 더 커져서 700km/h의 속도에서는 -2kPa까지 감소한다. 또한 특이한 점은 첫 번째 극치가 지나간 후에 Δp 가 다시 감소하는데 이 감소량이 열차 속도가 빨라질수록 점점 더 커져서 열차 속도가 700km/h에서는 첫 번째 감소량과 거의 같은 크기로 나타난다는 점이다. 두 개의 대차가 지나가는 동안 Δp 의 변화량은 100~300km/h 속도 대역에서 -0.5~8.0kPa의 범위이며, 700km/h 속도 대역에서 -2~13kPa의 범위이다. Δq 의 경우 Δp 와 달리 100~300km/h 속도 대역에서 열차 하중이 도착하기 전에 작은 크기의 극치를 보이며 증가한 후 다시 두 개의 극치가 발생한다. 또한 모든 대역에서 두 개의 극치가 발

생된 후에 작은 크기의 극치가 발생하였는데 이 작은 극치의 크기는 속도가 증가할수록 점차 증가하며 700km/h의 속도 대역에서는 약 10kPa까지 증가하였다. 두 개의 대차가 지나가는 동안 Δq 의 변화량은 100~300km/h 속도 대역에서 최대 24kPa까지 증가하며, 700km/h 속도 대역에서는 최대 33kPa까지 증가하게 된다.

Δp 와 Δq 의 파형에서 두 개의 하향 극치 사이에 존재하는 상향 극치는 동적 영향이 배제된 경우 열차 위치 0(train position = 0)에 위치할 것이다. 하지만 Fig. 5~7의 파형을 살펴보면 상향 극치의 위치는 100~300km/h 속도 대역에서 약 -8m 정도이며, 이는 열차가 관측점에 도달하기 -8m 전에 노반에서 응력 변화가 발생하였음을 의미한다. 즉 열차 속도보다 노반에서 에너지를 전달하는 탄성파의 속도가 빠름을 의미한다. 하지만 400~

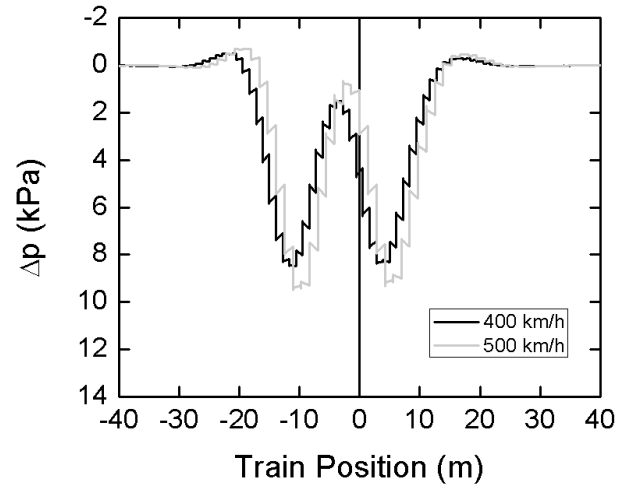


(a) Change in mean normal stress

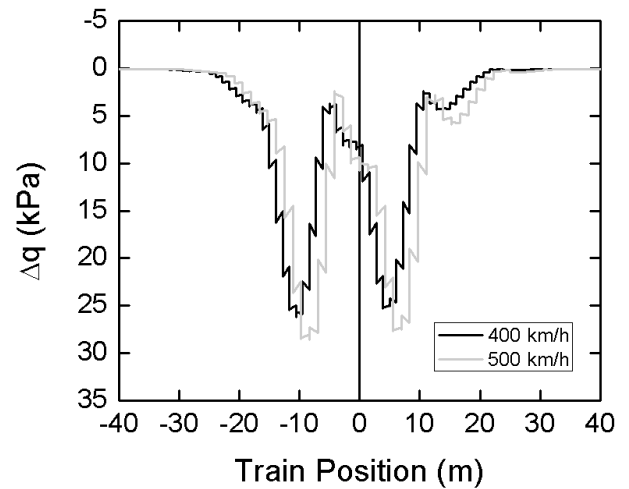


(b) Change in deviator stress

Fig. 5. Stress changes in subsoil for train speed between 100~300 km/h



(a) Change in mean normal stress



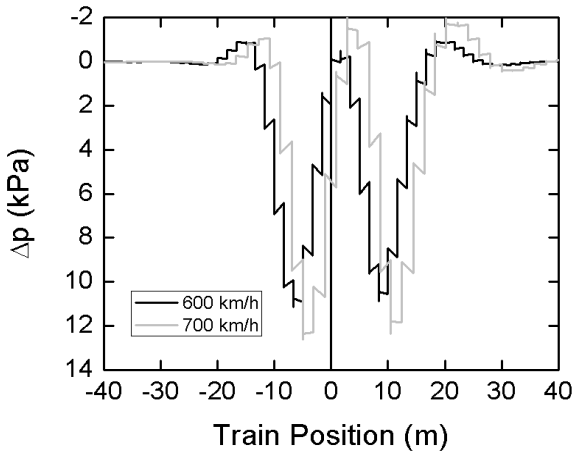
(b) Change in deviator stress

Fig. 6. Stress changes in subsoil for train speed of 400 and 500 km/h

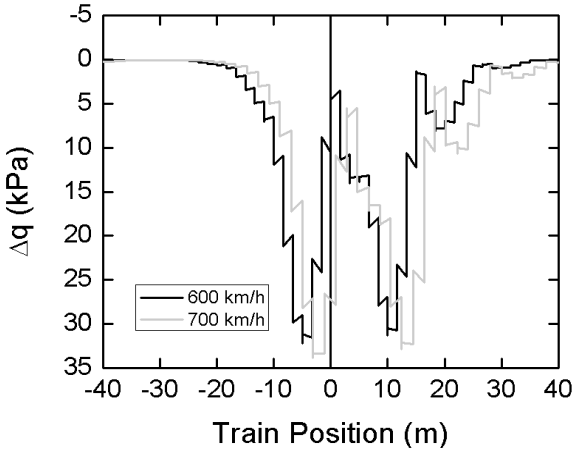
500km/h의 속도 대역에서는 상향 극치의 위치가 약 -3m 정도이며 600~700km/h의 속도 대역에서는 +1.0m에 근접하는데 이는 열차 속도와 에너지 전달 속도 또는 탄

성파 속도가 거의 일치함을 의미한다. 400km/h 대역부터 열차 위치가 0인 지점에 상향 극치가 근접하는 결과는 앞서 식 (3)을 통해 산정하였던 노반의 임계 속도가 358km/h인 점과 연관 지을 수 있다. Fig. 5~7의 파형의 관점에서 판단한다면 탄성 에너지의 전달속도와 열차 속도가 유사하므로 동적 에너지의 소산이 이루어지지 못하고 축적되는 임계 상태에 도달한 것으로 볼 수 있을 것이다. 하지만 Fig. 4의 변위 결과에서 400km/h 속도 대역에서 뚜렷한 변위 증폭이 나타나지 않은 점과는 차이가 있다. Fig. 8은 속도 대역별 관측점에서 얻은 연직 변형률의 변화를 도시하였으며, 변형률의 수준은 $10^{-4}\%$ 로 매우 낮은 수준을 유지하고 있다.

Fig. 9는 속도 대역에 따른 Δp - Δq 의 응력 경로 곡선을 보여준다. 응력 경로는 재하와 제하 과정을 거치면서 서로 유사한 두 개의 루프(loop)를 만든다. 루프의 상단 꼭짓점에 대한 응력 공간 상의 기울기, 즉 응력비($\Delta q/\Delta p$)



(a) Change in mean normal stress



(b) Change in deviator stress

Fig. 7. Stress changes in subsoil for train speed of 600 and 700 km/h

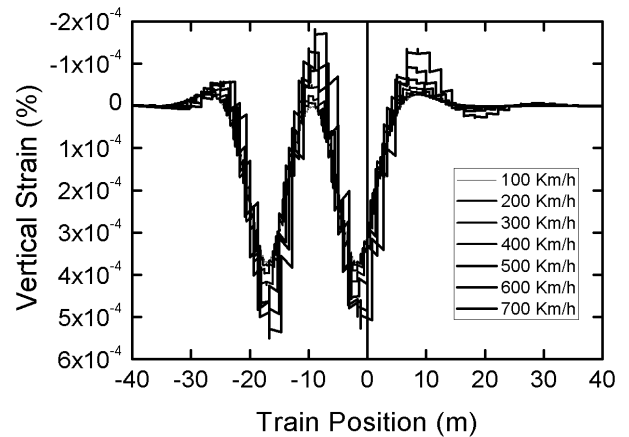


Fig. 8. Strain changes in subsoil

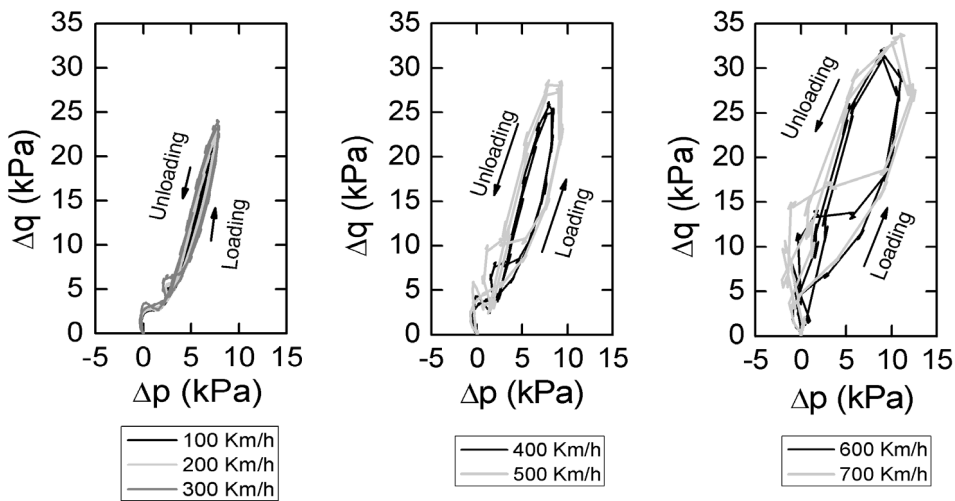


Fig. 9. Δp - Δq relationships for different train speeds

는 3.01~3.43의 범위를 가지며 열차 속도에 따른 차이는 크지 않다. 하지만 응력 경로의 루프 크기는 열차 속도 대역에 따라 큰 차이를 보이는데, 100~300km/h 속도 대역에서는 재하(load) 경로와 제하(unload) 경로가 큰 차이를 보이지 않아 루프의 크기가 작은 반면 600~700km/h 속도 대역에서는 재하와 제하 경로가 Δp - Δq 응력 공간 상에서 뚜렷한 차이를 보였다. 응력 경로의 초기 부분을 살펴보면 응력비가 음수인 방향으로 시작하는데 이는 앞서 Fig. 5~7에서 보였던 Δp 의 초기 음의 감소량과 연관되어 있다.

응력 경로 루프에서 재하 응력 경로와 제하 응력 경로의 뚜렷한 차이는 비가역적인(unrecoverable) 변형률의 증가와 연관되는데, 이는 토질 재료의 응력-변형률 관계는 경로 의존적인 특성(path-dependent characteristics)을 보이기 때문이다. 본 연구에서는 응력 수준 변화의 관찰을 위해 노반 토질 재료를 선형 탄성 모델로 모사하였지만, 향후 해석에서 토질 재료를 비선형성을 구현할 수 있는 탄소성 재료로 대체한다면 600~700km/h 속도 대역에서의 응력 경로루프는 무시하기 어려운 크기의 소성 변형률이 계산될 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 궤도 구조물에서 열차 속도 변화에 따른 노반 변위의 변화 양상을 추적하고 비선형적인 노반 응력의 변화를 살펴보기 위하여 유한요소해석을 실시하였다. 궤도-차량 상호작용을 간단한 형태로 고려하기 위해 1차 현가 장치 스프링과 차륜-레일 접촉 조건을 포함한 이동 하중의 질점 시스템을 개발하였다. 총 150m 연장의 콘크리트 궤도 구조물에서 열차 하중의 이동 속도를 100km/h에서 700km/h까지 변화시키며 노반 변위와 응력의 변화를 관찰하였다. 증속에 따른 해석 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 열차 속도 증가에 따라 레일과 노반 변위는 비선형적으로 증가한다. 하부 구조를 왕클러 스프링으로 가정할 경우 이론적 임계 속도 대역은 1812~3223km/h이고, 하부 구조를 흙노반의 반무한체로 가정할 경우 이론적 임계 속도는 358km/h이다. 하지만 증속에 따른 동적 변위 변화에서 358km/h 근처에서 임계 속도 조건의 특징인 뚜렷한 동적 변위 증폭은 발생하지 않았다. 700km/h의 열차 속도에서 동적 증폭 계

수는 1.39로 예측되었다. 콘크리트 궤도 구조물에서 적절한 임계 속도를 평가하기 위해서는 콘크리트 층과 흙노반의 강성을 모두 고려한 등가의 강성을 계산할 수 있는 방법이 필요하다.

- (2) 노반 내 관측점에서 평균 주응력의 변화는 100~300km/h의 열차 속도 대역에서는 -0.5~8kPa의 범위로 나타나며 700km/h의 속도에서는 -2~13kPa의 범위로 나타났다. 축차 응력은 100~300km/h의 속도 대역에서 24kPa까지 증가하며 700km/h의 속도에서 33kPa까지 증가한다. 모든 속도 대역에서 평균 주응력은 초기에 음의 값이 나타나며 축차 응력은 열차 하중이 통과한 후 작은 크기의 극치가 추가로 발생하였다.
- (3) 평균 주응력과 축차 응력 변화의 파형을 분석한 결과, 100~300km/h의 열차 속도 대역에서는 열차 속도보다 노반에서 에너지를 전달하는 탄성파의 속도가 빠르다. 하지만 400km/h 이상의 열차 속도 대역에서는 열차 속도와 에너지 전달 속도 또는 탄성파 속도가 거의 일치한다.
- (4) Δp - Δq 의 응력 경로 곡선에서 재하 경로와 제하 경로에 의해 열차 하중 통과 중 두 개의 응력 경로 루프가 형성되었다. 루프 상단의 응력점에 대한 응력비는 3.0 근처로 속도 대역에 관계없이 거의 일정한 값을 보였다. 하지만 응력 경로 루프의 크기는 열차 속도가 증가할수록 뚜렷이 증가하였다. 속도 변화에 따라 달라지는 루프 크기의 변화는 열차 속도에 따른 노반 응력 이력이 달라짐을 의미하며, 토질 재료의 경로 의존적인 특성을 고려한다면 600~700km/h 속도 대역에서 상당한 크기의 소성 변형률이 예상된다.
- (5) 본 연구에서는 열차 하중을 받는 성토 노반 지반을 선형 탄성 모델로 가정하고 2차원 유한요소해석을 실시하여 해석하였다. 기하학적 궤도 구조의 특성상 동일한 하중 크기에서 2차원 해석이 3차원 해석보다 큰 변위를 발생시키며, 이를 고려하기 위한 2차원 해석을 위한 하중보정계수와 감쇠비 보정 절차가 제시될 필요가 있다. 성토 노반 지반을 비선형 모델로 표현할 경우 본 연구의 해석 결과보다 큰 비선형성이 응력-변형률 변화에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 단일 객차를 가정하였으나 다수의 객차가 연결되어 열차 하중 조건이 발생할 경우 노반의 비선형적인 동적 특성 변화에 대해서는 추가의 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부에서 지원한 “400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. ABAQUS (2005), Simulia, Inc.
2. Connolly, D., Forde, M. C., Giannopoulos and Woodward, P. K. (2012), “The effect of high speed rail embankments on vibration levels in the near and far field”, Proc. of the 1st Annual Conference of Rail Research UK Association, London, UK.
3. Esveld, C. (2001), Modern Railway Track, MRT-Production, The Netherlands.
4. Frohling, R. D., Scheffel, H. and Ebersöhn, W. (1996), “The vertical dynamic response of a rail vehicle caused by track stiffness variations along the track”, Int. J. of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 25(Supplement), pp.175-187.
5. Fryba, L. (1972), Vibration of solids and structures under moving loads, Noordhoff Pub.
6. Heelis, M., Collop, A., Dawson, A., Chapman, D., and Krylov, V. (2000), “The ‘Bow-wave’ effect in soft subgrade beneath high speed rail lines”, Performance confirmation of constructed geotechnical facilities, ASCE, pp.338-349.
7. Jung, Y.-H., Hong, J.-H., and Cho, C.-Y. (2011), “Dynamic Responses in Roadbed of Concrete Track System subjected to Increasing Train Speed”, Proc. of 2011 Autumn Conference of the Korean Society for Railway, Jeju, pp.853-860 (in Korean).
8. Karoumi, R. (1998), Response of cable-stayed and suspension bridges to moving vehicles: Analysis methods and practical modeling techniques, Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology.
9. Krylov, V. (1995), “Generation of ground vibrations by superfast trains”, Applied Acoustics, Vol.44, pp.149-164.
10. Lee, I.-W. (2013), “Dynamic Response for Critical Velocity Effect Depending on Supporting Stiffness of High-Speed Railway Trackbed”, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.29, No.1, pp.5-12 (in Korean).
11. Lee, J.-G. (2011), Study on Design Standards of Track Systems for the High-speed Railway at 400 km/h, Land Transport and Maritime R&D report, 10PRTD-B056522-01 (in Korean).
12. Lysmer, J. M. and Kuhlemeyer, R. L. (1969), “Finite dynamic model for infinite media”, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.95, No.EM4, pp.859-877.
13. Madshus, C. and Kaynia, A. M. (2000), “High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed”, Journal of Sound and Vibration, Vol.231, No.3, pp.689-701.
14. Nguyen, K., Goicolea, J. M., and Galbadón, F. (2011), “Dynamic effect of high speed railway traffic loads on the ballast track settlement”, Proc. of the Congress on Numerical Methods in Engineering 2011, Coimbra, Portugal.
15. Prakash, S. (1981), Soil Dynamics, McGraw-Hill, New York.
16. Saleeb, A. F. and Kumar, A. (2011), “Automated finite element analysis of complex dynamics of primary system traversed by oscillatory subsystem”, Int. J. for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, Vol.12, No.4, pp.184-202.
17. Timoshenko, S. P. (1927), “Methods of analysis of statical and dynamical stresses in rails”, Proc. of the 2nd Int. Congress of App. Mech., Zurich, Switzerland, pp. 407-420.
18. Wiberg, J. (2009), Railway bridge response to passing trains: Measurements and FE model updating, Phd. Thesis, Royal Institute of Technology.

(접수일자 2013. 8. 21, 수정일 2013. 9. 24, 심사완료일 2013. 10. 4)