

## 탄성계수 및 말뚝근입깊이 변화에 따른 철도교 근접지반 진동발생 특성 분석

### Analysis of Vibration Level on Ground Surface around Bridge Pier with Soil Moduli and Pile Embedment

정영도\*, 정영남\*\*, 조호진\*\*\*†, 박재범\*\*\*, 임유진\*\*\*

Yeung Do Jeong \*, Yeung Nam Jeong \*\*, Hojin Cho \*\*\*†, Jeabeom Park \*\*\*, Yujin Lim \*\*\*

**Abstract** Recently, there are many complaints to vibration in the city produced from running railway vehicles. Therefore, it is required to predict and evaluate vibration levels in near area from the vibration source by adapting a prediction model of wave propagation. In this study, a finite element program ABAQUS is used to predict vibration levels at the ground surface generated and propagated from a running railway vehicle on the bridge. Main parameters analyzed in the FEA are focused on embedded depth of pile, pier height and elastic modulus of the soil. With different distances from the bridge pier, PPVs are computed with time and compared to vibration level(VL) prediction model. A prediction model to evaluate vibration levels in the near ground surface of the bridge is proposed based FEA with different parameters.

**Keywords :** Vibration , PPV , FEA, Propagation, Soil, Bridge Pier

**초 록** 철도교량 상에 열차가 운행할 경우 다양한 원인에 의해 진동(Vibration)이 발생하며 이러한 진동은 궤도, 교량 슬래브 및 교각 등을 통하여 주변지반으로 전달된다. 진동발생 과정에서 교각 근접지 구조물의 손상, 사용자의 불쾌감 등 다양한 문제점이 발생한다. 따라서 교각 근접지반에서 진동의 크기를 예측, 진단, 평가할 수 있는 진동전파 분석기술의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 ABAQUS 유한요소 프로그램을 이용하여 철도교량 및 주변지반을 모사한 후 지반조건( $E$ ,  $\rho$ ), 교각높이( $H$ ) 및 말뚝 근입깊이( $Z$ ) 변화에 따른 일정 거리에서의 지표면 상 진동의 크기를 분석하였다. 교각으로부터의 거리에 따른 진동발생 특성을 PPV로 산출하였으며 이를 진동예측모델과 비교하였다.

**주요어 :** 진동수준, 최대진동가속도, 진동전파, 지반, 교량교각

## 1. 서 론

최근 철도는 수송량의 증가와 고속화에 따른 교각 근접지역에서의 민원이 증가하고 있다. 진동 전파에 영향을 주는 요소는 열차속도, 궤도 구조, 지반 물성 등 매우 다양하다. 이와 같은 모든 영향 요소를 고려하기에는 한계가 있으므로 지반 진동전파에 민감하게 반응하는

† 교신저자: 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과(hojiny81@naver.com)

\* (주)포스코건설 R&D Center

\*\* KRTC 궤도부

\*\*\* 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과

주요 요소만 해석에 고려할 필요가 있다. 따라서 주어진 동적하중 하에서 교각 높이( $H$ ) 및

말뚝 근입깊이(Z)와 같은 교량의 구조적 형식, 하부지반 강성(Es)을 주요 영향인자로 고려하여 지반에 전달되는 진동 전파 특성을 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 진동해석 대상으로 철도교와 이에 인접한 균질한 근접지반 및 지반 내 타설된 말뚝기초로 국한하였다. 철도교 교각 근접지반 지표면에서의 진동크기를 분석하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 동적구조해석을 실시하였다.

## 2. 탄성계수 변화에 따른 교각 근접지반 진동 발생특성 분석

### 2.1 해석 조건 및 방법

철도교 근접지반 지표면에서의 진동크기를 분석하기 위하여 문헌 조사를 통해 대표적인 물성치를 적용하였다[1]. 해석에 사용한 하중은 KRL-2012 표준열차하중의 정적 운중 110KN을 열차속도 300 km/h에 해당하는 동적 효과를 고려하여 하나의 대차 내 차륜간격에 따른 주파수를 식(1)을 이용해 구하였으며 이를 단순 정현파 하중으로 교각 거더상 부설된 궤도에 직접 가하였다[2].

$$f_b = \frac{v}{l_b} \quad (1)$$

본 해석에 사용된 재료 물성값은 기존 관련문헌으로부터 차용하였다[1]. 유한요소해석에 사용된 모든 감쇠비(Damping) 값을 2%로 적용하였다. 교각근접지반의 경우 탄성계수를 각각 50MPa, 80MPa, 120MPa로 달리하여 해석을 실시하였으며, 하중은 복선궤도 교량 중심으로부터 횡단면 방향으로 2m 떨어진 궤도상에 운중 175KN을 주파수 27.8Hz로 재하 하였다. 또한 모든 지반요소에 자중을 가하여 지중응력을 재현하였으며, 해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Material input values used in numerical analysis

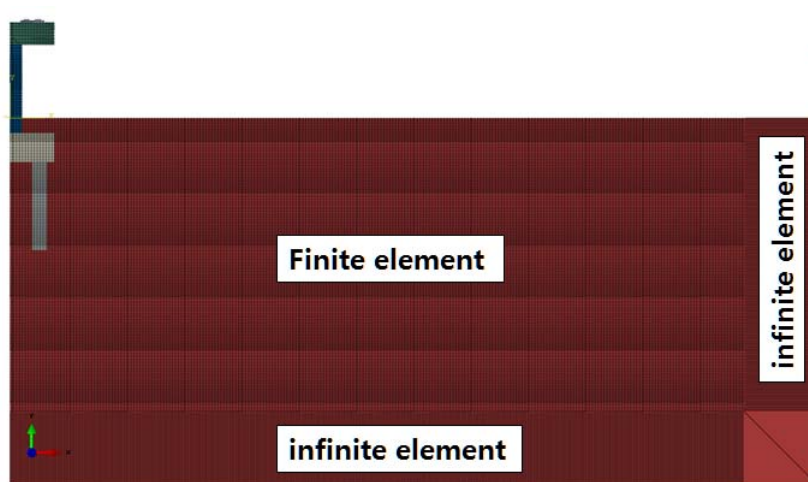
	Elastic Modulus	Poisson's ratio	Density	Damping	
	E(MPa)	v	$\rho$ (ton/m <sup>3</sup> )	$\alpha$	$\beta$
Bridge	30200	0.15	2.4	0.4	0.00073
Pier	27000	0.15	2.4	0.4	0.00073
Cap	20000	0.15	2.4	0.4	0.00073
Pile	20000	0.15	2.4	0.4	0.00073
Ground	50	0.48	2	0.4	0.00073
	80				
	120				

지반진동의 경우 반사파 영향을 고려하여 지반의 경계면을 무한경계 요소로 모델링 하였으며, 단순해석을 위하여 교량은 교량 종축방향을 대칭으로 가정하였다. 진동 전파특성을

분석하기 위하여 지표면상 교각으로부터 각 0m, 5m, 10m, 20m, 40m 거리에서 진동발생시 거리에 따른 진동전파 또는 감쇠특성을 분석하였다. 진동 전파에 영향을 미치는 주요인으로서 지반 조건( $E, \rho$ ), 교각높이( $H$ ) 및 말뚝 근입깊이( $Z$ )를 설정하였다. 설정된 입력 파라미터 변화는 Table 2와 같으며, 해석에 사용한 요소망은 Fig. 1과 같다.

**Table 2** Input parameter variation for parametric studies

	Ground Modulus (kPa)	Train speed (km/h)
CASE 1	50000	300
CASE 2	80000	
CASE 3	120000	



**Fig. 1** Infinite element mesh used in numerical analysis including ground and bridge

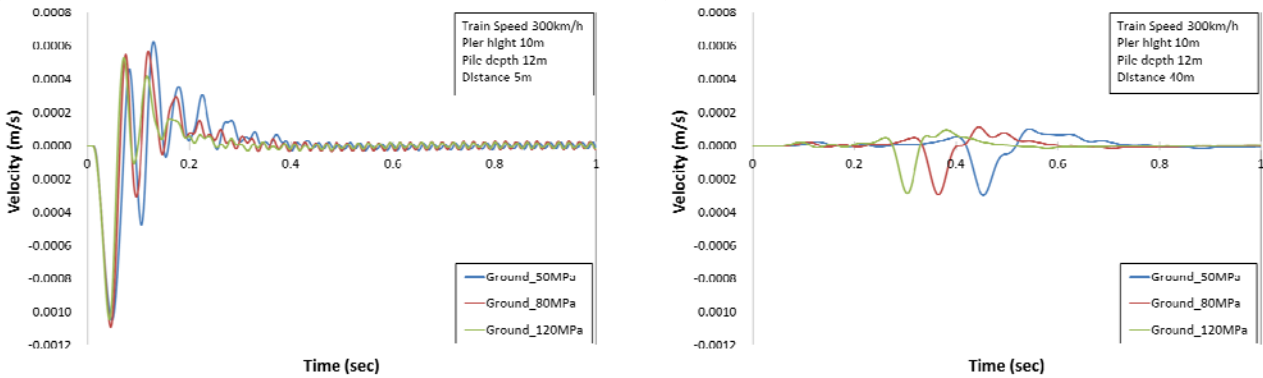
## 2.2 수치해석을 통한 지반 진동전파 분석 결과

Table 2의 입력물성값과 파라미터 분석 대상을 달리하면서 ABAQUS 유한요소해석 프로그램을 이용한 교각 근접지반 상 진동전파 특성을 분석하였다. Fig 2는 열차속도 300 km/h에서 교각으로부터 이격된 거리에 따른 지표면상 계산된 진동속도 변화를 경과시간에 따라 표현한 것이다. 교각 근접 지반의 탄성계수가 작을수록 입자속도가 크고, 잔존이 길게 이루어지는 경향을 보였다. 반면 탄성계수가 증가할수록 최대입자속도(PPV) 및 진동의 크기가 감소하였다. 교각으로부터 이격거리가 멀어 질수록 진동의 크기가 감쇠하는 특성을 나타냈으며, 40m거리 까지 잔류 진동이 여전히 남아 있는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구에서는 유한요소해석으로 산정한 교각 근접지반의 최대입자속도(PPV)를 이용하여 선형 및 비선형회귀분석을 통해 예측 모델식을 제시하였다.

Fig. 3은 제시된 교각 근접지반의 최대입자속도(PPV) 예측모델식에 대한 적용성을 평가하기 위하여 유한요소해석 결과와 예측모델을 이용하여 비교 도시한 것이며, 동일한 지반 탄성계수에서 교각높이/말뚝 근입깊이 비를 달리하여서 비교한 결과 전체적으로 발생패턴은 유사한

것을 알 수 있다.



(a) Velocity for different soil modulus: horizontal distance = 5m (b) Velocity for different soil modulus: horizontal distance = 40m

Fig. 2 Velocity variation with time at a distance from bridge pier

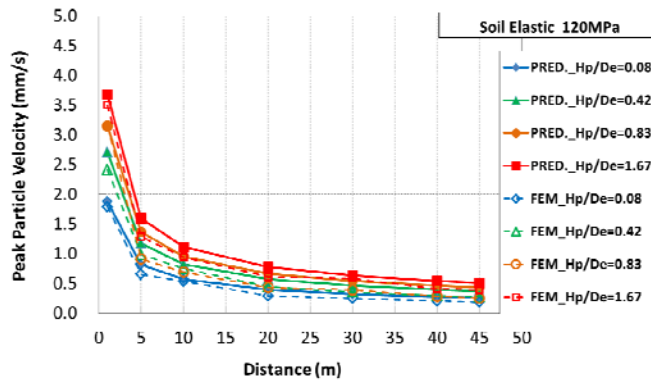


Fig. 3 Comparison of PPV predicted and FEM results with distance

### 3. 결론

본 연구에서는 교각 근접지반에서 교량상 철도 차량주행에 의해 유발되는 진동의 크기를 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 분석하였다. 해석 대상인 교각 근접 지반을 단순히 모델링 하고 지반의 탄성계수, 이격거리, 교각높이(H) 및 말뚝 근입깊이(Z) 차이에 의해 발생하는 지반진동속도를 분석하였다. 특히, 경계면에 무한경계요소를 적용하여 분석을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 입력물성값과 파라미터 분석 대상을 달리하면서 ABAQUS 유한요소해석 프로그램을 이용한 교각 근접지반 상 진동전파 특성을 분석한 결과 교각 근접 지반의 탄성계수가 작을수록 진동의 크기가 크고 잔존이 길게 이루어짐을 알 수 있었다.

(2) 다양한 유한요소해석 입력 파라미터와 이에 따른 해석결과를 이용하여 회귀분석으로 교각 근접지반의 최대입자속도(PPV) 예측모델식을 제시하였다. 예측모델식의 적용성을 평가하기 위하여 동일한 지반 탄성계수에 교각높이/말뚝 근입깊이 비를 달리하여서 비교한 결과 전

체적으로 발생패턴은 유사한 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 철도소음/진동 저감기술 개발사업의 연구비지원(14RTRP-B072484-02)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] G. Kouroussis, D.P. Connolly (2014) Railway-induced ground vibrations – a review of vehicle effects, *IEEE International Journal of Rail Transportation*, 2:2, 69-110
- [2] S. H. Ju (2004) Tree-Dimensional Analyses of Wave Barriers for Reduction of Train-Induced Vibrations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No7 pp. 740-748.