

PFC 2D를 이용한 하중조합에 따른 도상자갈 침하거동의 영향

Effects Of Ballast Settlement Behavior Under Load Combination Using The PFC 2D

김기재*, 이성진**, 이일화**, 황수범***, 최항석*

Ki-Jae Kim*, Sung-Jin Lee**, Il-Hwa Lee**, Soo-Beom Hwang***, Hangseok Choi*

Abstract An understanding of material properties and behavior of the main component is a requisite for the prediction of the track behavior. In this study, PFC 2D which DEM(Discrete Element Method) program was used in order to analyze the impact on the settlement behavior by load combinations such as the amplitude and frequency of load about ballast material which major component of track. The Ballast was analyzed using the particle size distribution with round shape and elongated shape. And micro-parameters between particles are applied using the Box test result. The settlement behavior of ballast was evaluated using the load combination of which control time of load magnitude and number of repeated load.

Keywords : Ballast, PFC 2D, Box test, Load Combination, Settlement Behavior

초 록 궤도의 거동을 보다 합리적으로 예측하기 위해서는 주요 구성품의 재료 특성과 거동에 대한 이해가 요구된다. 본 연구에서는 자갈도상 궤도의 주요한 구성요소인 자갈도상 재료에 대하여 하중크기 및 빈도 등의 하중조합이 침하거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 개별요소 프로그램인 PFC 2D를 활용하였다. 도상자갈의 입도는 상대적으로 긴 입자형상과 둥근 입자형상을 혼합하여 해석하였으며, 입자간의 micro parameter는 Box test 결과를 활용하여 산정하였다. 하중조합은 하중크기의 작용 시간 제어와 반복하중 횟수 제어를 통한 하중조합을 이용하여 도상자갈의 침하거동을 평가하였다.

주요어 : 도상자갈, PFC 2D, 박스시험, 하중조합, 침하거동

1. 서 론

궤도에서 도상자갈은 기본적으로 하중을 지지하고 노반으로 균등한 하중을 전달하는 기능을 수행한다. 한편, 열차속도, 하중 증가 등에 따라 궤도와 도상자갈에 부과되는 반복하중도 더불어 증가하여 궤도침하 및 치밀화에 따른 잦은 유지보수가 불가피한 상황이다. 따라서, 보다 효과적인 도상층의 관리와 유지보수를 위해서는 합리적인 도상자갈의 재료특성과 침하거동의 이해와 예측이 요구된다. 이에 본 논문에서는 실내 Box test와 개별요소프로그램인 PFC 2D[1]를 이용하여 하중크기, 하중 재하 주기, 반복하중 횟수 등을 고려한 반복하중 작용시 도상자갈의 침하거동을 평가하고자 하였다.

* 고려대학교 건축사회환경공학부

** 한국철도기술연구원 첨단인프라연구단TFT

*** 한국철도기술연구원 기술마케팅실

2. Box test

2.1 Box test 장비

Box test 장비는 직사각형 Box와 침목으로 구성되어 있으며, Box의 내부 공간의 길이, 폭, 높이는 각각 625mm, 302mm, 600mm이고 박스 전면은 투명 강화플라스틱으로 입자 거동을 볼 수 있도록 하였다. 또한 침목 부분은 회전방지 가이드를 만들어 하중 작용시 침목이 회전하는 것을 방지하였으며 길이, 폭, 높이는 각각 270mm, 300mm, 200mm이다.

2.2 Box test 절차

Box test를 수행하기 위한 도상자갈은 도상자갈 철도용품 공사규격서[2]에 제시된 상한입도에서 먼지나 오물의 영향을 배제하기 위해 10mm이하의 입자를 제거 후, 세척한 도상자갈을 사용하였다(Fig. 1). 또한, 도상자갈의 입자크기 10~50mm인 100kg 중량의 도상자갈 시험입도를 이등분하여 Box내에 2층으로 다짐작업을 수행하였다.

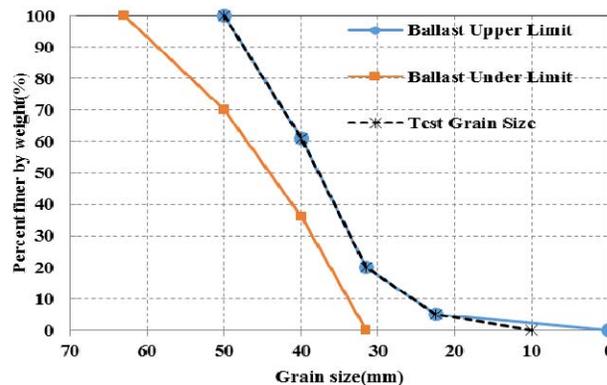


Fig. 1 Particle size distribution

다짐된 도상자갈에 침목을 올린 후 20kN과 40kN인 두 종류의 반복하중을 10Hz로 1000회 작용시켰으며, 그 결과는 Fig. 3에 PFC로 해석한 결과와 같이 나타내었다.

3. PFC 2D

3.1 해석 절차

PFC 해석시 Lim W. L.[3]은 Box test에서 입자 파쇄는 아주 적게 발생하기 때문에, 파쇄되지 않는 Ball과 Clump로 도상자갈 입자를 대체하여 사용하였다. 따라서, 본 논문에서도 실제 도상자갈의 구간별 실제 입자의 형상을 고려한 파쇄되지 않는 Clump 입자를 사용하였으며 모델 생성 절차는 다음과 같다. 실내 Box test와 동일한 크기의 직사각형 Wall과 같은 입도 분포를 가지는 원형 Ball을 생성하여 원형 Ball의 크기에 따라 구간별(10~22.4mm, 22.4~31.5mm, 31.5~40mm, 40~50mm) 범위를 설정한 후, Table 1에 나타난 원형형상과 장방형형상의

Clump입자를 혼합하여 변환시켜주었다. Fig. 2는 실내 Box test와 PFC 2D로 생성한 Box test 모델을 나타냈으며, Box test모델의 공극률은 25.42%이다.

Table 1 Particle shape of ballast

Particle size (mm)	Round shape	Elongated shape	Particle size (mm)	Round shape	Elongated shape
10 ~ 22.4			22.4 ~ 31.5		
31.5 ~ 40			40 ~ 50		

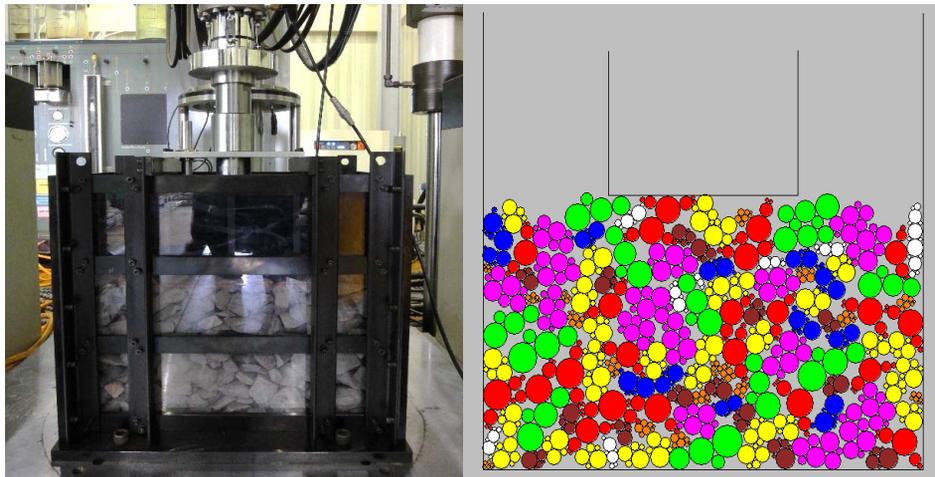


Fig. 2 The overview of Box test and PFC 2D

PFC의 Wall은 하중제어가 아닌 속도제어로 Box test의 반복하중을 재현하기 위해 침목의 밑 부분을 나타내는 Wall에 작용하는 하중을 매 Step마다 측정하고 목표로 하는 반복하중을 구성하여 측정하중과 목표하중을 맞춰가는 수치적 Servo-Mechanism 제어를 통해 벽의 속도를 하중으로 제어하였다.

Table 2에 나타낸 PFC 2D의 Micro parameter 중 입자와 벽의 강성 값은 Box test를 수행한 시험결과와 유사한 결과가 나타나는 물성이며, Box test와 PFC 해석결과는 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2 Micromechanical Parameters used in the Box test

Micromechanical Parameters	Values
Particle density (kg/m ³)	2600
Radius of particles (m)	1*10 ⁻² ~5*10 ⁻²
Inter-particle and wall coefficient of friction	0.46
Particle normal and shear contact stiffness (N/m)	2e10 ⁸
Wall stiffness(N/m)	2e10 ⁸

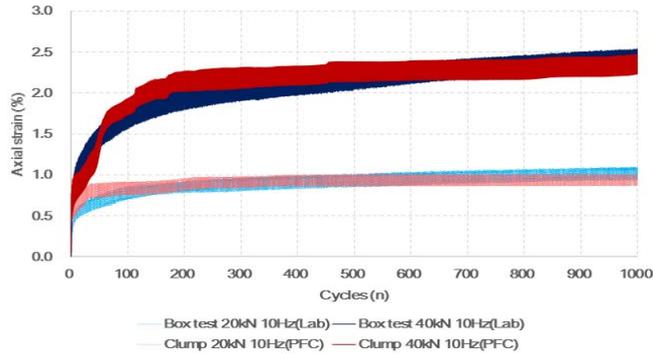


Fig. 3 The axial strain curve of Box test and PFC 2D

3.2 하중조합

하중조합은 하중크기의 시간 제어와 반복하중 횟수 제어로 생성하였으며 Fig. 4에 나타내었다. 하중크기의 시간제어를 통해 10Hz의 반복하중 10kN, 20kN, 30kN, 40kN을 각각 25초씩 작용한 하중조합, 하중 20kN을 50초동안 가하고 30kN, 40kN을 각각 25초씩 작용한 하중조합과 하중 30kN을 75초동안 가하고 40kN을 25초씩 작용한 하중조합과 같이 총 3종류의 하중조합을 생성하였다. 또한, 반복하중 횟수 제어를 통해 20kN의 반복하중이 10, 40, 90, 190, 490, 890회 마다 40kN의 반복하중이 10회 작용하는 총 6종류의 하중을 생성하였으며, PFC Box모델에 적용하여 하중조합에 따른 도상자갈의 침하거동을 평가하였다.

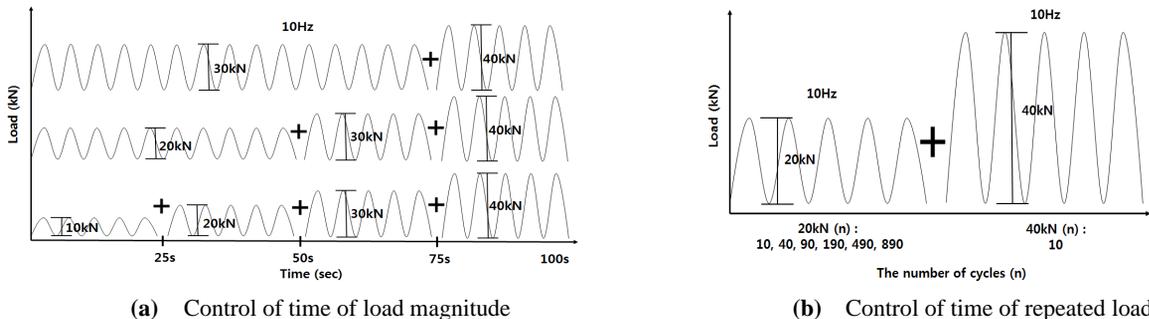


Fig. 4 Load Combination

3.3 해석결과

하중크기의 작용시간 제어를 통한 PFC 2D 해석결과는 Fig. 5와 같다. 변형률은 작용한 하중크기가 증가함에 따라 단계적으로 증가하여 최종 변형률은 모든 하중조합에서 유사한 결과가 나타났다. 결국 다양한 하중조합이 반복적으로 작용하는 경우, 변형률은 최대 하중의 크기에 영향 받는 것을 수치해석을 통해 확인할 수 있었다. 또한, 이 결과는 Selig와 Waters[4]가 수행한 반복 축차응력을 일정 cycle마다 증가시켜 적용한 삼축시험과 유사한 결과가 나타났다.

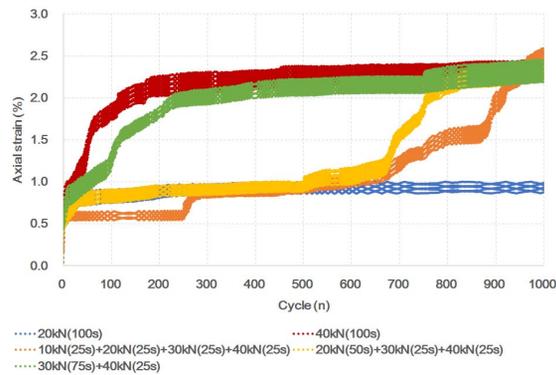


Fig. 5 Result of control of time of load magnitude

한편, 40kN의 반복하중이 다양한 주기로 반복작용할 경우에 대한 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과는 40kN의 반복하중 빈도가 증가함에 따라 변형률은 단계적으로 증가하였으며, 하중 20kN을 10회 또는 40회 작용시키고 40kN을 10회 작용시킨 하중조합은 40kN만을 작용시킨 경우와 유사한 최종 변형률이 나타났다. 따라서, 최대하중 반복주기가 짧아질수록 최대하중만을 작용한 최종 변형률에 근접해지고 도달하는 시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 시험결과를 통해 실제 철도노선에서 하중 종류별 주행 빈도에 따라 발생 가능한 침하예측에 필요한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

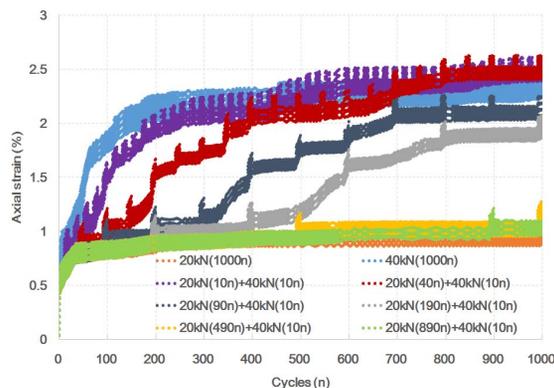


Fig. 6 Result of control of time of repeated load

4. 결 론

열차의 속도와 현장조건에 따라 실제 침묵에 가해지는 하중크기와 하중주기가 다르기 때문에 PFC 2D를 이용한 다양한 하중조합을 적용하여 Box test에서의 도상자갈의 침하거동을 평가하였다. 하중크기의 작용시간 제어와 반복하중 횟수 제어를 통해 도상자갈 재료의 침하거동이 최대 하중의 크기와 반복주기에 의해 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 향후 도상자갈의 거동을 보다 합리적이고 효과적으로 예측하기 위해서는 실제 열차하중과 유사한 하중조건을 적용한 해석을 수행하여 실내시험 및 현장계측을 통한 연구 수행이 어려운 다양한 조건에서의 도상궤도의 침하거동에 대한 기초연구 자료의 제공이 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Itasca (2008) Particle Flow Code in Two Dimensions version 4.0. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- [2] Korea Railroad Corporation (2011) KRCS A015 04.
- [3] Lim W. L. (2004) Mechanics of Railway Ballast Behavior, Doctoral degree, University of Nottingham.
- [4] Selig, E. T. and Waters, J. M. (1994) *Track geotechnology and substructure management*. Thomas Telford, London, pp.7.36.