

# DEM을 이용한 자갈도상의 응력분포에 관한 연구

## Study on the stresses distribution of ballast bed using DEM (Discrete Element Method) Analysis

김대상\*, 이수형\*\*, 이성혁\*\*\*, 이상배\*\*\*\*

Kim, Dae-Sang, Lee, Su-Hyung, Lee, Sung-Hyuk, Lee, Sang-Bae

---

### ABSTRACT

Sleeper, the ballast, and ballast mat in the high-speed railroad line are modelled using a two-dimensional discrete element method to generate circle and line elements. Stress transfer mechanism from the sleeper to the subgrade via the ballast is analyzed. The behavior of ballast bed of the high-speed railroad line is also accessed with the model.

---

### 1. 서론

레도시스템에 대한 기존의 수치해석과 관련한 대부분의 연구에서는 도상자갈층을 연속체로 모델링하는 기법을 사용해 왔다. 집중질량모델이나 유한요소해석을 이용한 모델의 경우 입력변수를 적절하게 조절함으로써 도상자갈부의 침하량과 응력분포를 파악할 수 있었다. 그러나 위와 같은 모델들은 입자간의 미끄러짐이나 입자간의 연결 상태에 대해서는 언급할 수가 없다. 도상부는 반복된 열차하중에 의해 침하가 발생하는데 이는 도상내 자갈 사이의 간극량의 변화에 기인한다. 따라서 도상자갈의 다짐 정도에 따른 도상부의 거동을 분석하고 정량화하기 위해서는 개개의 입자를 모델링할 필요가 있다. 불연속체 해석에서는 연속체 해석기법에서 표현할 수 없는 도상자갈 입자의 크기 및 형상이 전체 거동에 미치는 영향을 파악할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 원과 선분을 묘사할 수 있는 2차원 개별요소법을 이용하여 침목, 도상자갈, 도상매트를 표현하여 침목으로부터 도상자갈을 통하여 노반에 전달되는 응력 전달 메커니즘을 파악하고자 한다. 개별요소법(Discrete Element Method, DEM)은 불연속체의 시간영역 해석법으로, 개개의 입자가 운동방정식에 따라 각각 독립적으로 운동하여 서로 접촉하게 되었을 때 접촉점에서 가정한 접촉(수직, 전단) 스프링을 통하여 발생한 힘을 구한다. 알고리즘은 단순하지만, 다수의 입자를 해석하는 경우에는 계산량이 커지게 되어 취급할 수 있는 입자수가 크게 제한된다. 최근 컴퓨터 성능의 향상과 함께 취급가능한 입자수가 증가하여 현재는 불연속체의 해석기법으로 많은 연구자가 사용하고 있다.

---

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원  
\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원  
\*\*\*\* 한국철도기술공사, 정회원

## 2. 입력변수 결정

개별요소법은 개별 입자에 대한 운동방정식과 입자들의 접촉 시 힘-변위관계로부터 각 입자에 작용하는 힘을 구하고 이로부터 개별 입자의 새로운 위치를 구하는 방법이다<그림 1>. 개별요소법의 경우 입자의 강성은 접촉점에서의 법선 및 접선방향 강성계수에 의하여 표현된다<그림 2>. 수치계산의 안정성은 계에 가해진 외부일과 내부에서 소모된 일의 평형을 이용하여 확인한다.

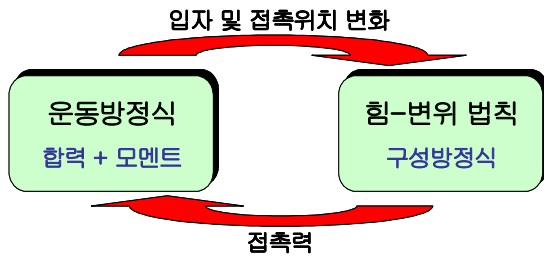


그림 1. 계산 과정

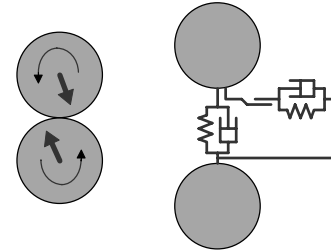


그림 2. DEM 계산시의 접촉 모델

표 1은 계산에서 사용한 입력변수 값들이다. 입자 접촉면의 법선방향 및 접선방향에 대한 스프링계수는 파동방정식으로부터 구한 식(1)과 식(2)로부터 구하였다.

표 1. 입력변수 값

입력 변수	단위	입력변수 값		
		침목	도상자갈	도상매트
밀도	g/cm <sup>3</sup>	2.4	2.64	0.96
법선방향 스프링계수( $k_n$ )	g/sec <sup>2</sup>	1.74*10 <sup>11</sup>	1.2*10 <sup>10</sup>	2.47*10 <sup>7</sup>
전단방향 스프링계수( $k_s$ )	g/sec <sup>2</sup>	6.54*10 <sup>10</sup>	9.4*10 <sup>8</sup>	8.24*10 <sup>6</sup>
연직방향 감쇠계수( $c_n$ )	g/sec	2.29*10 <sup>5</sup>	6.32*10 <sup>4</sup>	9.05*10 <sup>5</sup>
전단방향 감쇠계수( $c_s$ )	g/sec	1.40*10 <sup>5</sup>	1.76*10 <sup>4</sup>	3.02*10 <sup>5</sup>
마찰계수( $\phi$ )	°	27	27	20
계산시간 간격	sec	2.0*10 <sup>-6</sup>		

$$k_n = \frac{\pi\rho V_p^2}{4}, \quad k_s = \frac{\pi\rho V_s^2}{4} \quad (1),(2)$$

여기서  $\rho$ : 입자의 밀도,

$V_p$ : 종탄성과 속도,  $V_s$ : 횡탄성과 속도

계산에 사용한 점성계수는 과감쇠가 발생하지 않는 범위 내에서 에너지 평형을 고려하여 댐핑

에너지가 증가함으로써 발생할 수 있는 에러 요소가 수렴하는 값을 사용하였다. 식(3)과 식(4)는 점성계수 결정 시 점성계수의 상한 값을 구하는 식이다.

$$c_n < 2\sqrt{m_{\min} \cdot k_n} = 2r_{\min}\sqrt{\rho\pi \cdot k_n}, \quad c_s < 2\sqrt{m_{\min} \cdot k_s} = 2r_{\min}\sqrt{\rho\pi \cdot k_s} \quad (3), (4)$$

여기서,  $r_{\min}$  은 가장 작은 입자의 반경이다.

### 3. 고속철도 자갈궤도 모델링

자갈궤도는 그림 3과 같이 침목, 도상자갈, 및 도상매트로 구성하였다. 해석 영역은 가로, 세로 100cm×56.5cm의 직사각형으로 하였다. 해석 경계는 주기경계를 사용하여 고정경계를 사용할 경우 발생할 수 있는 경계면에서의 미끄러짐 현상 등을 제거하고, 경계에서의 입자 마찰을 고려할 수 있도록 하였다. 침목은 윗면 폭 20cm, 아랫면 폭 30cm, 높이 21.5cm의 고속철도용 침목을 모델링하였다.

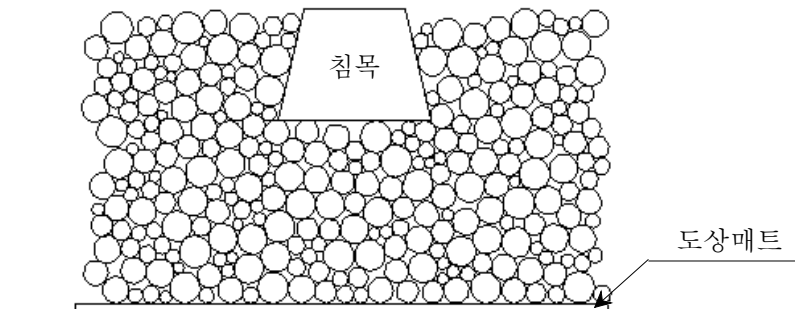


그림 3. 고속철도용 침목, 도상자갈, 도상매트 모델

도상자갈은 고속철도용 도상자갈의 입도분포를 고려하여 모델링하였다. 도상자갈 모델링 시 다양한 입도분포를 고려할 수 있으나 본 연구에서는 난수발생 프로그램을 이용하여 고속철도용 자갈의 최대 입자크기 63mm와 최소 입자크기 20mm사이의 입자를 랜덤하게 모델링하였다. 도상자갈의 간극비는 0.24로 본 해석 모델이 2차원임을 고려할 때 중간 정도 다짐 상태를 구현하였다. 도상매트는 도상자갈 하면에 1.5cm 두께로 모델링하고 향후 매트의 강성 변화에 의한 영향을 평가하고자 하였다.

도상자갈하부에 전달되는 하중은 침목의 변위 제어를 통하여 구현하였다. 고속열차 주행 시에 침목이 연직방향으로 진폭 5mm(47.033mm에서 46.533mm까지), 5Hz의 속도로 거동한다고 가정하였다<그림 4>. 총 계산 시간은 2초로 10회의 침목 연직방향 운동을 구현하였다. 본 해석모델에서는 도상자갈이 침목 하면에 밀착된 잘 다져진 경우로 침목이 떠 있지 않도록 하였다.

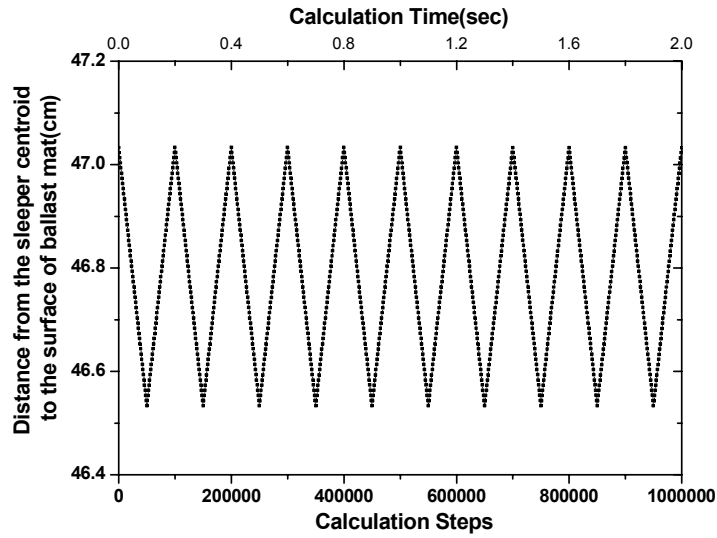


그림 4. 침목 중심으로부터 도상매트 상면까지의 거리

#### 4. 해석 결과

<그림 5>는 침목이 연직 상하 운동을 하는 동안 침목이 도상에 가하는 연직응력 변화량이다. 침목이 도상에 하중을 가하는 계산 단계인 50,000회, 150,000회, 250,000회, 350,000회에서 210~300kPa의 응력이 발생하고 있다. 계산단계 450,000회부터는 120~140kPa 범위로 연직응력이 감소하고 있다. <그림 6>은 도상매트가 도상으로부터 받는 연직응력 변화량이다. 최대 발생 연직응력은 계산단계 350,000회에서 112.3kPa이 발생하였다. 계산단계 450,000회부터는 50~70kPa 범위로 연직응력이 감소하였다.

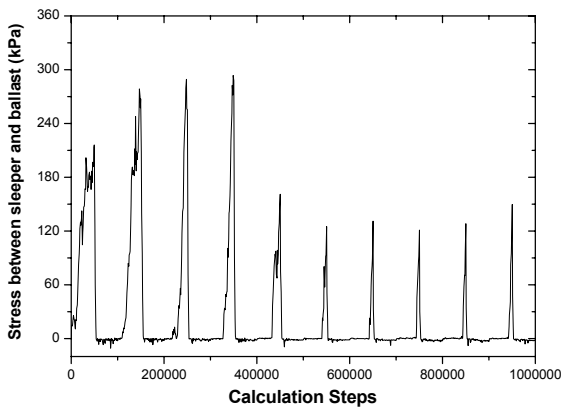


그림 5. 침목이 받는 응력

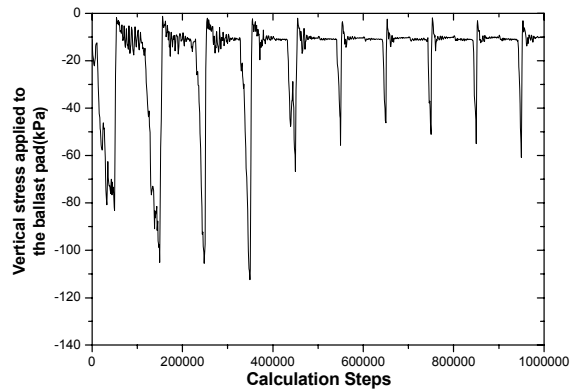


그림 6. 도상매트에 발생하는 응력

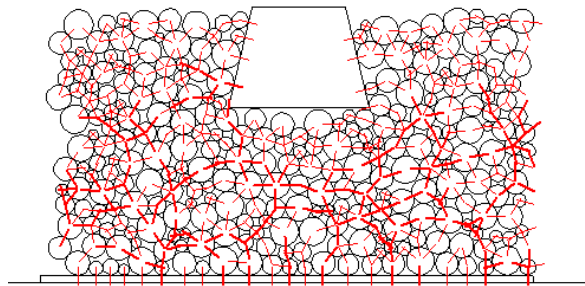


그림 7. 하중 재하 전 초기응력 상태(0 step)

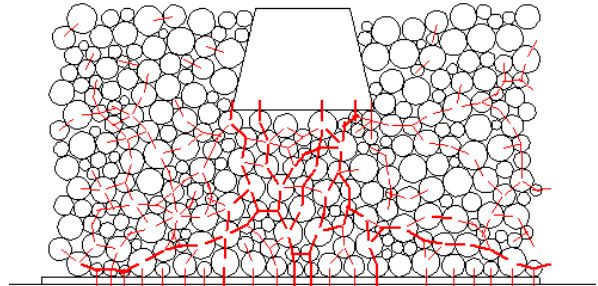


그림 8. 재하 시 응력 상태(50000 step)

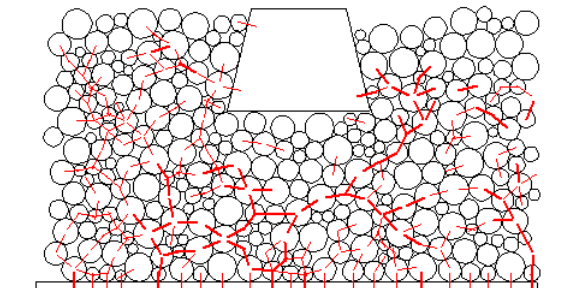


그림 9. 재하 시 응력 상태(100000 step)

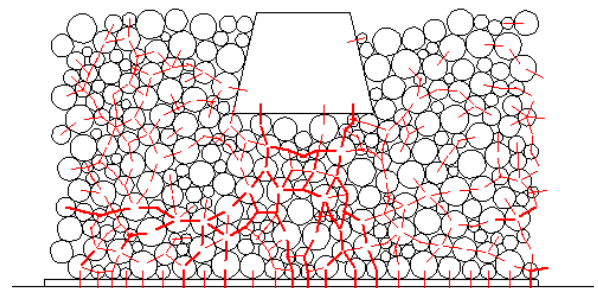


그림 10. 재하 시 응력상태(450000 step)

<그림 7>에서<그림 10>은 하중 단계 별 도상자갈 사이의 법선응력 변화를 보여 준다. 그림에서 굵은 선은 평균법선응력 보다 큰 응력전달경로이고, 가는 선은 평균 법선응력 보다 작은 응력 전달경로이다. <그림 7>은 하중 재하 전 초기 응력 상태로 초기 중력 다짐으로 응력 분포가 골고루 분포되어 있음을 알 수 있다. <그림 8>은 첫 번째 재하단계인 50,000회에서의 응력 분포를 보여준다. 침목에서 도상자갈에 작용하는 하중이 침목 하 19.3cm 아래까지는 연직 하 방향으로 전달되고, 19.3cm 아래 부분에서는 도상 매트 전면으로 20°의 각도로 확대되는 것을 볼 수 있다.

<그림 9>는 하중 재하 시의 응력 분포로 특이한 응력 전달 양상을 찾아보기 어렵다. <그림 10>은 5번째 하중 재하 단계인 450,000회에서의 응력 분포이다. 이 단계부터 도상매트에 발생하는 응력이 첫 번째 재하단계인 50,000회 보다 크게 작아지는데 이는 도상자갈의 다짐 현상으로 도상 압축이 발생하여 침목으로부터 도상자갈에 전달되는 하중이 작아지기 때문으로 판단된다.

<그림 11>은 계산 전 과정 동안의 에너지 평형을 보여 준다. 전체적으로 보면 침목의 변위제어를 통하여 도상자갈에 가한 에너지가 도상자갈 입자간의 마찰에너지와 댐핑 에너지로 소비되는 것을 알 수 있다. 또한 외부 일과 내부 일의 차이를 의미하는 에너지 수지의 차인 에러는 계산 전 과정동안 일정한 범위에 있음을 알 수 있다. 계산 과정 동안 자갈입자간의 마찰에너지가 운동에너지보다 크게 발생함을 알 수 있다. 이는 대부분의 에너지 소비가 도상자갈의 회전 및 미끄러짐에 집중되고 있음을 의미한다.

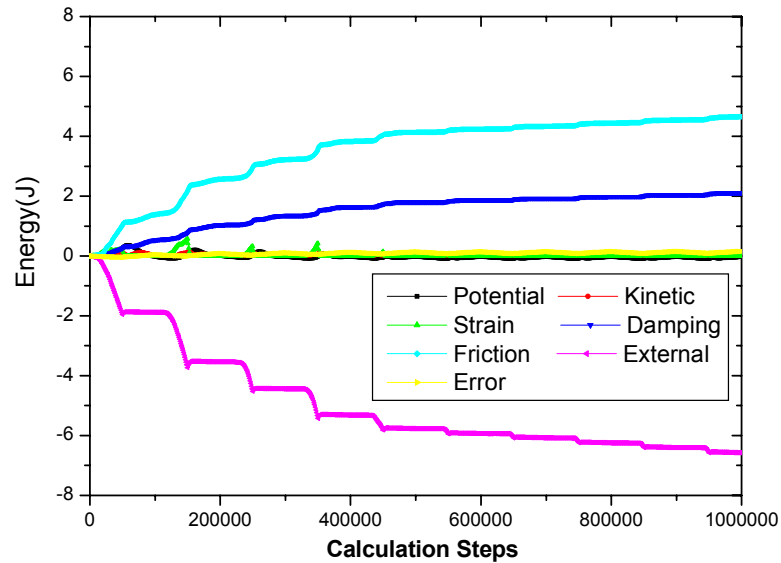


그림 11. 에너지 평형

## 5. 결론

본 연구에서는 원과 선분을 구현할 수 있는 2차원 개별요소법(DEM)을 이용하여 고속철도용 침목, 도상자갈, 도상매트를 모델링하였다. 도상 자갈부에 전달되는 하중은 침목의 변위 제어를 통하여 구현 하였다. 고속열차 주행 시 침목이 연직방향으로 진폭 5mm, 5Hz의 속도로 거동한다고 가정하였다.

본 해석 결과 침목이 도상에 가하는 응력은 210~300kPa 범위에 있었고, 도상매트가 도상으로부터 받는 최대 발생 연직응력은 112.3kPa이 발생하였다. 또한 응력 전달 영향 범위 및 분포로부터 침목에서 도상자갈에 작용하는 하중이 침목 하 19.3cm 아래까지는 연직 하 방향으로 전달 되고, 19.3cm 아래 부분에서는 도상매트 전면으로 20°의 각도로 확대되는 것을 알 수 있었다. 이는 도상 두께 결정 시 가정하는 하중 분산각 45°보다 작은 값으로 도상매트의 마찰계수 등 입력 변수에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Cundall, P. A., (1971), "A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems", ISRM Symposium, Nancy, France, Proc.,Vol.2, pp.129~136
2. Cundall, P. A., (1998), "2DEC User's Manual", Itasca consulting group.
3. Matsushima, T.(1997), "Grain-to Grain Interaction Affecting Dynamic Deformation of Granular Slope", Doctoral dissertation, University of Tokyo(in Japanese)