

DEM을 이용한 자갈도상의 응력분포에 관한 연구

Stress transfer mechanism of ballast bed using DEM (Discrete Element Method)

김대상†

Dae-Sang Kim

Abstract

Ballast is an important component of railway track structures. The granular ballast can be modelled using finite or discrete element methods. The DE method has advantages to enable us to analyze the microstructure of granular materials and to exhibit information which cannot be assessed using FE methods. In this paper, sleeper, the ballast, and ballast mat in the high-speed railroad line are modelled using two-dimensional discrete circle and line elements. The stress transferred from the sleeper via the ballast to the subgrade is analyzed. In addition, the shape and angle of stress distribution of ballast bed is evaluated with different boundary conditions for the high-speed railroad line.

Keywords : DEM(Discrete Element Method)(개별요소법), Ballast(도상자갈), Sleeper(침목), Ballast Mat(도상매트)

1. 서론

열차 하중을 감소시켜 노반에 전달하는 기능 이외에도 배수 및 소음 저감 기능을 갖는 도상 층은 자갈 궤도시스템에서 중요한 역할을 한다. 도상 층은 불연속성이 큰 입도 조정된 자갈재료로 구성되어 있다.

도상 층의 거동을 파악하기 위하여 사용하는 방법은 크게 연속체 해석기법과 불연속체 해석기법으로 나눌 수 있다. 대부분의 연구에서는 도상 층을 유한요소법을 이용하여 모델링하고 있으며, 궤도시스템 전체를 단순화하게 표현하기 위하여 집중질량 모델을 사용하기도 한다. 불연속체 해석 기법중의 하나인 개별요소법은 유한요소해석에서 파악할 수 없었던 입자간 응력 전달 양상이나 입자 크기의 영향 등을 파악할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 불연속성이 강한 도상 층을 개별요소법을 사용하여 모델링하여 입상체로 구성된 도상 층 내부 거동을 파악하고자 한다. 또한 전체 궤도시스템을 집중질량으로 모델링하면 궤도시스템을 단순하게 표현할 수 있으나, 궤도 전체의 동적거동에 영향을 미치는 도상 층의 질량을 가급적 정확하게 평가할 필요가 있다. 이를 위해서는

침목으로부터 노반에 전달되는 하중 전달 경로를 포함하는 유효 질량을 평가할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 원과 선분을 묘사할 수 있는 2차원 개별요소법을 이용하여 침목, 도상자갈, 도상매트를 표현하여 침목으로부터 도상자갈을 통하여 노반에 전달되는 하중 전달 메카니즘을 파악하여 유효질량 평가에 이용하고자 한다.

개별요소법(Discrete Element Method, DEM)은 불연속체의 시간영역 해석법으로[1], 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 제한된다. 최근 컴퓨터 성능의 향상과 함께 계산 가능한 입자수가 증가하여 현재는 불연속체의 해석기법으로 많은 연구자가 사용하고 있다[2].

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 (Fig. 1). 개별요소법의 경우 입자의 강성은 접촉점에서의

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부, 선임연구원
E-mail : kds@krri.re.kr
TEL : (031)460-5305 FAX : (031)460-5319

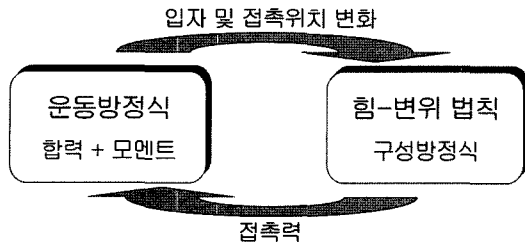


Fig. 1. 계산 과정

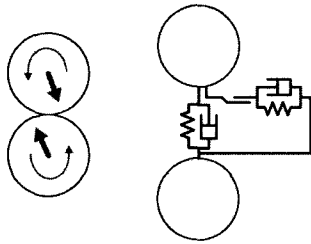


Fig. 2. DEM 계산시의 접촉 모델

법선 및 접선방향 강성계수에 의하여 표현된다(Fig. 2). 수치계산의 안정성은 계에 가해진 외부일과 내부에서 소모된 일의 평형을 이용하여 확인한다.

Table 1은 계산에서 사용한 입력변수값들이다. 침목과 도상자갈의 입자 접촉면의 법선방향 및 접선방향에 대한 스프링 계수는 파동방정식으로 부터 구한 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 구하였다. 도상매트의 스프링계수는 실내 시험을 실시하여 얻은 결과를 사용하였다.

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

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

여기서 ρ : 입자의 밀도,

V_p : 종탄성파 속도, V_s : 횡탄성파속도

계산에 사용한 점성계수는 과 감쇠가 발생하지 않는 범위 내의 값을 사용하였다[2]. 식 (3)과 식 (4)는 계산에 사용한 점성계수를 구하는 식이다.

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

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

여기서, r_{\min} 은 가장 작은 입자의 반경이다.

Table. 1. 입력변수 값

입력 변수	단위	입력변수 값		
		침목	도상 자갈	도상 매트
밀도	g/cm ³	2.4	2.64	0.96
종탄성파 속도(V_p)	m/sec	304	762	-
횡탄성파 속도(V_s)	m/sec	186	213	-
법선방향 스프링계수 (k_n)	g/sec ²	1.74* 10 ¹¹	1.2* 10 ¹⁰	2.47* 10 ⁷
전단방향 스프링계수 (k_s)	g/sec ²	6.54* 10 ¹⁰	9.4* 10 ⁸	8.24* 10 ⁶
연직방향 감쇠계수 (c_n)	g/sec	2.29* 10 ⁵	6.32* 10 ⁴	9.05* 10 ⁵
전단방향 감쇠계수 (c_s)	g/sec	1.40* 10 ⁵	1.76* 10 ⁴	3.02* 10 ⁵
마찰계수 (ϕ)	°	27	27	20 37
계산시간 간격	sec	2.0*10 ⁻⁶		

3. 고속철도 자갈도상 모델링

고속철도 1단계 구간의 자갈레도 단면은 Fig. 3과 같이 침목, 자갈 및 도상매트로 표현 할 수 있다. 해석 영역은 침목 한 개의 하중 전달 영역을 표현 할 수 있는 가로, 세로 100cm × 56.5cm의 직사각형으로 하였다. 종 방향 해석 경계는 주기경계를 사용하여 고정경계를 사용할 경우 발생할 수 있는 경계면에서의 미끄러짐 현상 등을 제거하고, 경계에서의 입자 마찰 및 맞물림 효과를 고려할 수 있도록 하였다. 침목은 윗면 폭 20cm, 아랫면 폭 30cm, 높이 21.5cm의 고속철도용 침목으로 모델링하였다.

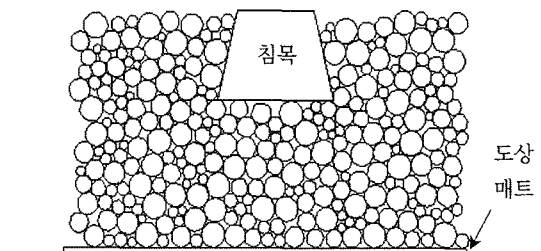


Fig. 3. 고속철도용 도상 모델

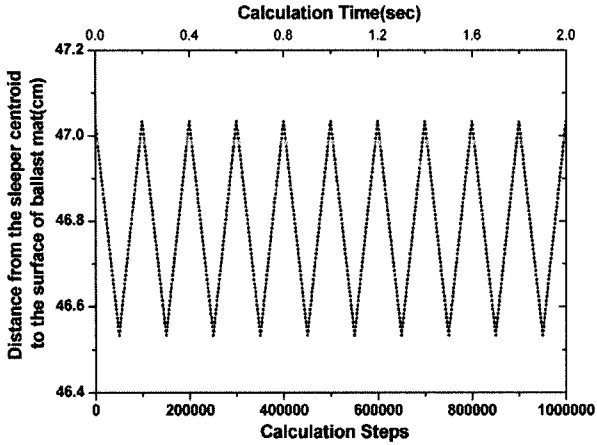


Fig. 4. 침목 중심으로부터 도상매트 상면까지의 거리

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. 도상 자갈의 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.

도상 층 자갈에 작용하는 하중은 침목의 변위 제어를 통하여 구현하였다. 고속열차 주행 시에 침목이 연직방향으로 진폭 5mm(47.033mm에서 46.533mm까지), 5Hz의 속도로 거동한다고 가정하였다(Fig. 4). 총 계산 시간은 2초로 10회의 침목 연직방향 운동으로 표현하였다. 이는 20량 1편성의 고속열차에서 10량이 통과하는 것에 해당된다. 본 해석모델에서는 도상자갈이 침목 하면에 밀착된 잘 다져진 경우로 침목이 떠 있는 뜬 침목은 고려하지 않았다.

4. 해석 결과

Fig. 5는 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[3]. 계산단계 450,000회부터는 120~140kPa 범위로 연직응력이 감소하고 있다. 이는 도상이 점차 다져지고 있기 때문으로 판단된다. Fig. 6은 도상매트가 도상으로부터 받는 연직응력 변화량이다. 최대 발생 연직응력은 계산단계 350,000회에서 112.3 kPa이 발생

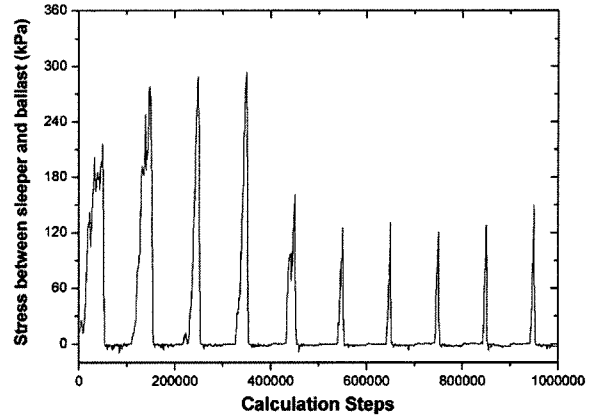


Fig. 5. 침목이 받는 응력

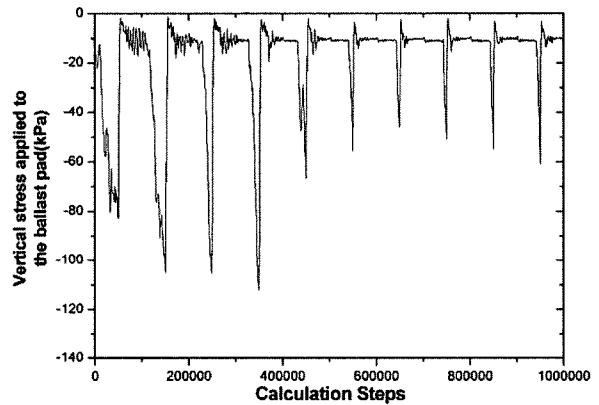


Fig. 6. 도상매트에 발생하는 응력

하였다. 계산단계 450,000회부터는 50~70kPa 범위로 연직 응력이 감소하였다. 따라서 침목에서 도상으로 전달된 응력의 1/2 정도가 도상 매트에 전달되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7에서 Fig. 11은 도상 매트의 마찰계수가 20°와 37°인 경우에 대한 하중 단계 별 도상자갈 입자사이의 법선응력 변화이다. 그림에서 굵은 선은 평균법선응력 보다 큰 응력 전달경로이고, 가는 선은 평균 법선응력 보다 작은 응력전달 경로이다. Fig. 7은 하중 재하 전 초기 응력 상태로 초기 중력 다짐으로 응력 분포가 골고루 분포되어 있다 Fig. 8은 도상 매트의 마찰계수가 20°인 경우의 첫 번째 재하단계인 계산 단계 50,000회에서 응력 분포이다. 침목에서 도상자갈에 작용하는 하중이 침목 하 19.3cm까지는 분산되지 않으면서 연직 하 방향으로 전달되고, 19.3cm 아래 부분에서는 도상 매트 전면으로 20°의 각으로 분산되는 것을 알 수 있다. 20°의 하중분산각은 도상 두께 결정 시 가정하는 하중분산 각 45°보다 작은 값으로, 이는 도상 매트를 강체로 모델링하여

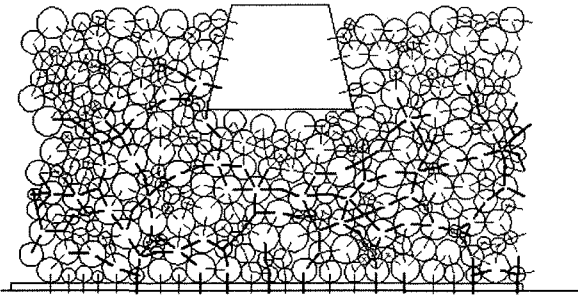


Fig. 7. 하중 재하 전 초기응력 상태(0 step), 20°

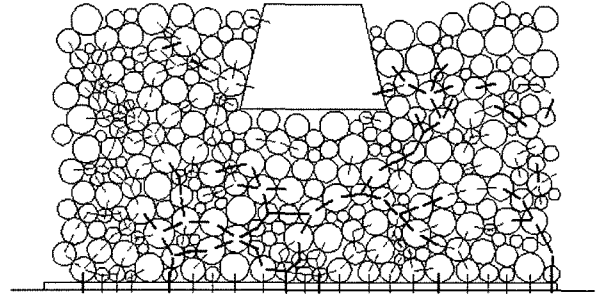


Fig. 10. 제하 시 응력 상태(100000 step), 20°

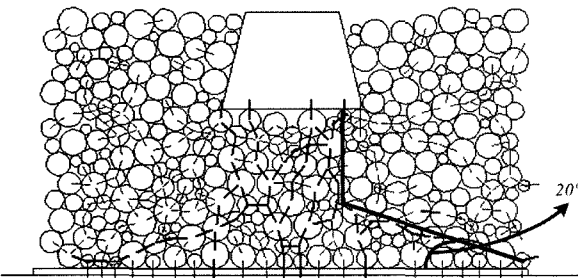


Fig. 8. 재하 시 응력 상태(50000 step), 20°

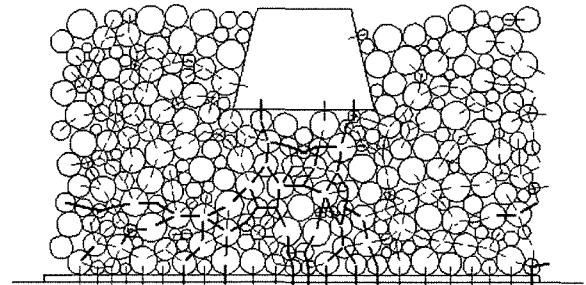


Fig. 11. 재하 시 응력상태(450000 step), 20°

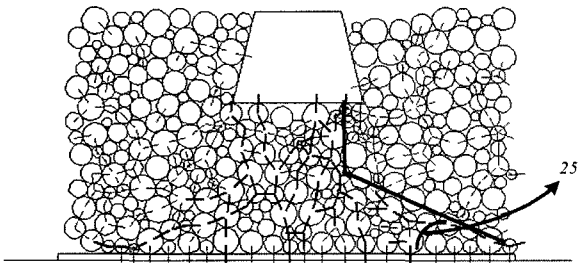


Fig. 9. 재하 시 응력 상태(50000 step), 37°

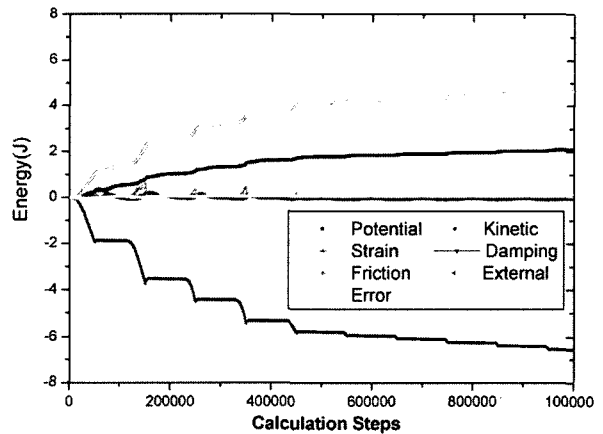


Fig. 12. 에너지 평형

자갈의 매트 상으로의 놀림 현상을 제대로 묘사할 수 없었기 때문에 판단된다. Fig. 9는 도상 매트의 마찰계수가 37°인 경우의 첫 번째 재하단계인 50,000회에서의 응력 분포를 보여준다. 침목에서 도상자갈에 작용하는 하중이 침목 하 16cm 아래까지는 연직 하 방향으로 분산되지 않으면서 전달되고, 16cm 아래 부분에서는 도상 매트 전면으로 25°의 각으로 분산되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 하중 제하 시의 응력 분포로 특이한 응력 전달 양상을 찾아보기 어렵다. Fig. 11은 5번째 하중 재하 단계인 계산단계 450,000회에서의 응력 분포이다. 이 단계부터 도

상매트에 발생하는 응력이 첫 번째 재하단계인 50,000회 보다 크게 작아지는데 이는 도상자갈의 다짐 현상으로 도상 압축이 발생하여 침목으로부터 도상자갈에 전달되는 하중이 작아지기 때문으로 판단된다.

계산 과정의 신뢰성을 확인하기 위하여 Fig. 12와 같이 수치 계산 전체의 에너지 평형을 계산하였다. 전체적으로 보

면 침목에서 도상자갈에 가한 외부에너지가 도상자갈 입자간의 미끄러짐에 의한 마찰에너지와 댐핑에너지로 소비되는 것을 알 수 있다. 소비에너지 중 자갈 입자간의 마찰에너지가 댐핑에너지 보다 크게 발생하였는데 이는 내부에너지의 대부분이 도상자갈 사이의 접선 변위에 의한 미끄러짐으로 소비되고 있음을 의미한다. 도상자갈의 마모와 관련하여 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 외부 일과 내부 일의 차를 의미하는 에러는 계산 전 과정동안 수렴하여 수치 계산이 안정적이었음을 알 수 있었다.

5. 결 론

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 거동할 때의 가정하여 수치 해석 결과는 다음과 같다.

- (1) 본 해석 결과 침목이 도상에 가하는 응력은 210~300kPa 범위에 있었고, 도상매트가 도상으로부터 받는 최대 발생 연직응력은 112.3kPa이 발생하였다. 따라서 침목에서 도상으로 전달된 응력의 1/2 정도가 도상 매트에 전

달됨을 확인할 수 있었다.

- (2) 침목에서 도상자갈에 작용하는 하중이 침목 하 일정 깊이까지는 분산되지 않고 연직 하 방향으로 전달되고, 그 깊이 아래 부분에서는 도상 매트 전면으로 분산되었다.
- (3) 도상매트의 마찰계수를 변화시키면서 침목으로부터 도상매트에 전달되는 하중 전달 범위 및 분포를 파악한 결과, 도상매트의 마찰계수가 증가함에 따라 도상에서의 하중 분산각이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 전체계의 에너지 평형을 검토한 결과 대부분의 에너지 소비가 도상자갈의 미끄러짐(입자간 접촉점에서의 접선 변위)에 집중되고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 도상자갈의 마모와 관련된 중요 사항으로 이에 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. Matsushima, T. (1997), "Grain-to Grain Interaction Affecting Dynamic Deformation of Granular Slope", Doctoral dissertation, University of Tokyo(in Japanese).
3. Coenraad Esveld (2001), "Modern Railway Track" 2nd Edition.