

# 도상자갈 입도분포에 따른 도상응력분포에 관한 수치해석적 연구

## Numerical Analysis of ballastbed stress distribution depending on the grain size distribution

김대상<sup>1)</sup>

Dae-Sang Kim

### Abstract

본 연구에서는 원과 선분을 이용하여 복잡한 형상의 입자를 표현할 수 있는 2차원 개별요소법(DEM) 알고리즘에 3종류(균등분포, 정규분포, 대수정규분포)의 입도분포를 구현할 수 있도록 하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 다양한 반지름을 갖는 원형요소를 구현하고 도상자갈을 원하는 입도분포로 모델링할 수 있었다. 그리고 우선적으로 균등분포에 대하여 변위제어 하중 재하 방식에 의하여 도상으로부터 노반으로 전달되는 응력을 파악하였다.

### 1. 서론

개별요소법(Discrete Element Method, DEM)은 개개의 입자들에 운동방정식과 입자들의 접촉 시 힘-변위관계로부터 각각의 입자에 작용하는 힘을 구하고 이로부터 개개 입자의 새로운 위치를 구하는 양적 유한차분법(explicit finite difference method)이다. 개별요소법의 경우 입자의 강성은 접촉점에서의 법선 및 접선방향 스프링계수에 의하여 표현된다(그림 1). 입자 간에 작용하는 힘은 접촉점에서 가정한 스프링으로부터 구할 수 있다.

개별요소법(Discrete Element Method, DEM)은 Cundall(1971)에 의하여 개발된 불연속체의 시간영역 해석법으로, 알고리즘은 단순하나 다수의 입자를 해석하는 경우에는 계산량이 커지게 되어 개발 당시에는 취급할 수 있는 입자수가 크게 제한되었었다. 그러나,

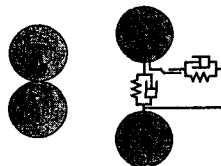


그림 1 DEM 에서의 접촉 모델

1) 한국철도기술연구원 선임연구원

최근 컴퓨터 성능의 향상과 함께 취급가능한 입자수가 증가하여 현재는 불연속체의 해석기법으로 많은 연구자에 의하여 이용되고 있다.

본 연구에서는 개발한 2차원 개별요소법(DEM) 프로그램을 이용하여 다양한 입도분포를 갖는 도상자갈을 모델링하고 도상으로부터 노반으로 전달되는 응력을 수치적으로 분석하여 노반에 가해지는 응력을 구하였다.

## 2. 3종류의 입도분포 생성

도상자갈의 반경분포가 1)균등한 경우, 2)정규분포인 경우, 3)대수정규분포인 경우의 3종류로 도상자갈부를 모델링하였다. 균등입도분포의 경우 Mixed congruential method를 사용한 난수발생 프로그램을 이용하여 0과 1사이의 랜덤수(random number)를 발생시키고 이 값과 평균입자크기, 최대 및 최소 입자크기로부터 원하는 입도분포를 구하였다. 그림 2는 200개의 입자를 발생시켰을 때, 구성된 도상자갈의 반경에 따른 입자수의 분포를 보여 주고 있다. 정규분포의 경우에는 Box-Muller method를 사용한 난수발생 프로그램을 이용하여 평균과 입도크기 조정 변수로부터 원하는 입도분포를 구하였다(그림 3). 대수정규분포의 경우에도 정규분포와 같은 방법을 취하여 입도분포를 구하였다(그림 4). 그림 5는 각각의 경우에 대한 입경통과 곡선을 보여 주고 있다. 도상자갈의 크기는 현 국유철도의 도상자갈의 입도분포를 고려하여 원형입자의 반지름의 크기가 1.1cm 에서 3.2cm 범위에 있도록 조정하였다. 정규분포의 경우가 자연상태에서 발생하는 자갈 입도 분포에 근접한 분포를 보이는 것을 알 수 있다.

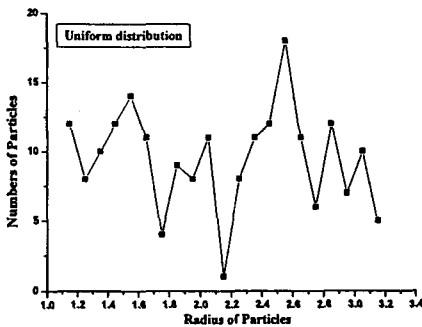


그림 2 반지름에 따른 발생입자의 수  
(균등입도분포의 경우)

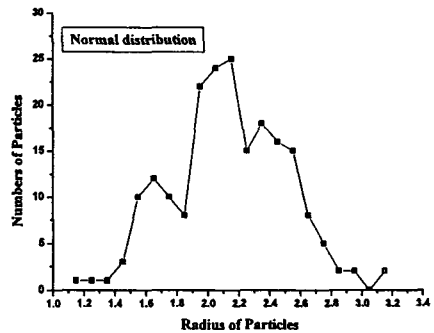


그림 3 반지름에 따른 발생입자의 수  
(정규입도분포의 경우)

그림 6은 균등하게 발생시킨 입도분포의 한 예를 보여준다. 간극비를 0.24(느슨한 상태)로  
 경계조건은 50cm(도상깊이)\*100cm(도상폭)인 경우로 본 경계범위내에서 발생한 입자수는  
 총 239개로 원하는 자갈입도를 생성할 수 있었다.

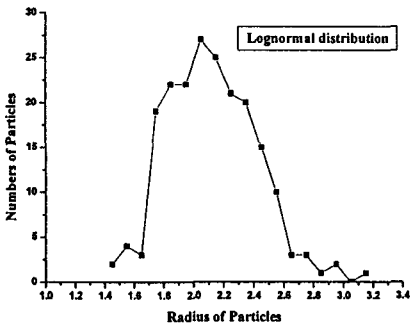


그림 4 반지름에 따른 발생입자의 수  
 (대수정규입도분포의 경우)

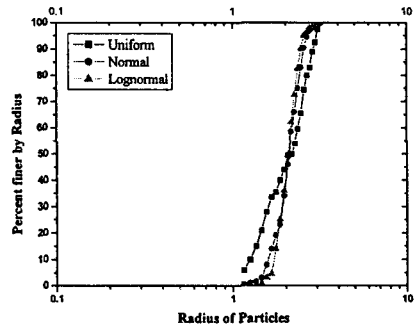


그림 5 각 입도분포에 대한 입경통과 곡선

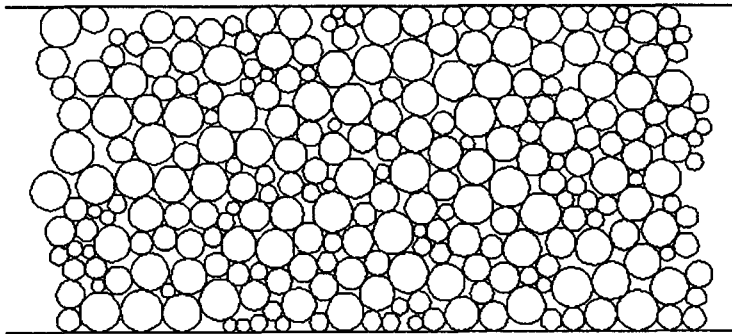


그림 6 균등한 입도분포를 갖는 도상자갈 예

### 3. 균등한 입도분포에 대한 응력전달 특성

노반면에 가해지는 노반응력을 구하기 위하여 먼저 균등한 입도분포를 가지는 원형입자를  
 이용하여 도상자갈부를 모델링하였다. 그림 7은 해석에 사용한 침목과 도상자갈의 모델을 보

여 주고 있다. 계산에 사용한 입력자료는 표 1에 정리되어 있다. 침목의 경우 연속체이므로 불연속체인 자갈과 노반보다 큰 스프링계수 값을 갖도록 입력변수를 결정하였다.

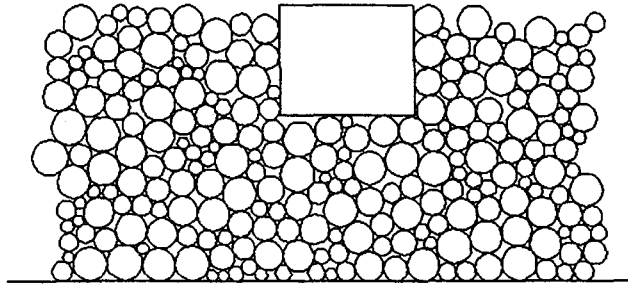


그림 7 침목과 도상자갈 해석모델

계산에서 사용한 입자 접촉면에 대하여 법선방향 및 접선방향에 대한 스프링상수  $k_n$ ,  $k_s$ 는 파동방정식으로부터<sup>1)</sup> 해석대상 매질 중을 전파하는 탄성파속도  $v_p$ ,  $v_s$ 를 이용하여 식(1)과 같이 구하였다.

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

여기서  $\rho$ : 입자의 밀도

본 프로그램에서는 입자 파쇄를 고려 하지 않으므로 파쇄에 의한 에너지 발산이 가능하지 않으므로 실제로는 발생할 수 없는 급격한 입자운동이 발생할 가능성이 있다. 따라서 점성계수의 경우 과감쇠가 발생하지 않는 범위내에서 가능한 큰 점성계수 값을 사용하였다. 식(2)는 계산에 사용한 점성계수를 구하는 식이다.

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

여기서,  $r_{\min}$ 은 가장 작은 입자의 반경이다.

하중 재하는 먼저 변위제어에 의한 하중재하방식으로 수치해석을 수행하였다. 침목이 먼저 아래방향으로 5mm 움직인 후에 윗방향으로 5mm 이동하여 원래의 위치로 돌아가는 방식을 취하였다. 침목의 상하방향 이동속도는 10cm/sec로 진동하도록 하였다(그림 8). 그림 8의 x 축은 계산 스템을 나타내고 y 축은 침목의 중심으로부터 도상/노반 경계면까지의 거리를 의미한다. 침목의 중심 높이가 노반면으로부터 40cm 높이에서 39.5cm 까지 반복운동하고 있음을 보여준다.

표 1 계산에 사용된 입력 변수들

재료	밀도 (tonf/m <sup>3</sup> )	$V_p$ (m/sec)	$V_s$ (m/sec)	$k_n$ (N/m)	$k_s$ (N/m)	$c_n$ (kg/sec)	$c_s$ (kg/sec)	$\phi$ (°)
자갈	2.64	762	213	1.203E+07	9.402E+05	631.668	176.569	37
침목(목)	0.64	3800	890	7.255E+07	3.980E+06	9441.674	2211.339	30
노반 (조립토)	2.64	457	229	4.328E+06	3.085E+05	378.835	189.832	30

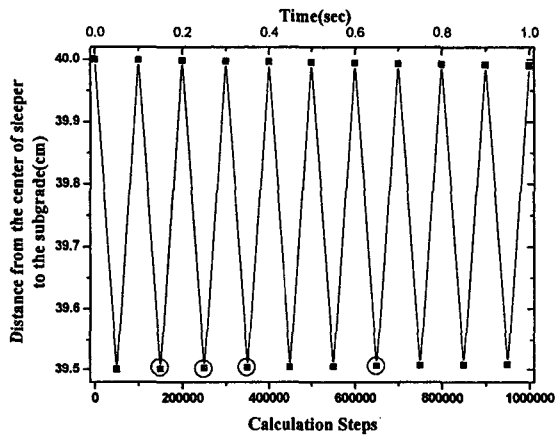


그림 8 계산동안의 침목거동

그림 9는 해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 계산과정 동안의 에너지 평형에 관한 정보를 보여주고 있다. 계산이 진행됨에 따라 감쇠와 마찰로 인한 에너지 소모가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 전 에너지 평형을 고려했을 때 에러는 계산 과정동안 충분히 작은 값의 범위 내에 있음을 확인할 수 있었다.

그림 10은 계산 과정동안 노반에 가해지는 응력으로 0.15초, 0.25초, 0.35초, 0.65초에서 노반에 발생하는 응력이 최대값을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 0.05초의 경우 침목 작용력이 아직 노반면에 도달하지 못했다고 판단된다. 계산동안 노반에 발생한 응력의 최대값은 0.15초에서 0.345 kgf/cm<sup>2</sup> 로 실제 노반에 발생하는 노반응력(0.1~3kgf/cm<sup>2</sup>)보다 작은 값을 보여주고 있는 데 이는 수치해석 모델이 2차원이고 도상자갈을 원형입자로 모델링 하였으므로 접점에서 발생하는 접점력의 수직성분에 기인한 모멘트를 충분히 전달하지 못하기 때문으로 판단된다. 원형입자로 구성된 도상구조의 경우 접점에서의 수직응력이 입자의 회전을 구속하는 힘으로 작용하지 않는 구조로 회전이 발생하기 쉬운 구조이다.

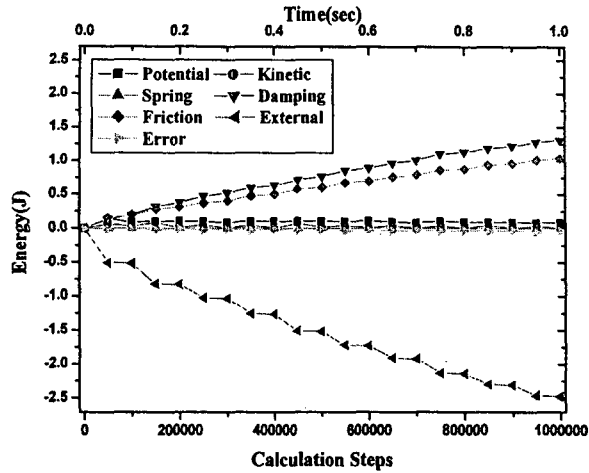


그림 9 계산과정 동안의 에너지 평형

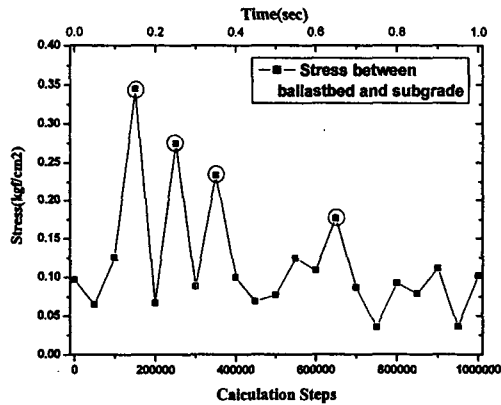


그림 10 노반면에 작용하는 평균응력값의 변화

#### 4. 결론

본 연구에서는 원과 선분을 이용하여 복잡한 형상의 입자를 표현할 수 있는 2차원 개별요소법 (DEM) 알고리즘에 3종류의 입도분포를 구현할 수 있도록 하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 다양한 반지름을 갖는 원형요소를 구현하고 도상자갈을 3종류의 입도분포로 모델링할 수 있었다. 2차원 원형입자를 이용하여 도상자갈을 모델링 하였을 경우,

노반에 발생한 응력의 최대값은  $0.345 \text{ kgf/cm}^2$  로 실제 노반에 발생하는 노반응력 ( $0.1 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ )보다 작은 값을 보여 주었는데 이는 수치해석 모델이 2차원이고 도상자갈을 원형입자로 모델링 하였으므로 접점에서 발생하는 접점력의 수직성분에 기인한 모멘트를 충분히 전달하지 못했기 때문으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Meguro, K. (1991), "Study on Dynamic Fracture Analyses by Distinct Element Method", " Doctoral dissertation, University of Tokyo(in Japanese)
2. Matsushima, T.(1997), "Grain-to Grain Interaction Affecting Dynamic Deformation of Granular Slope", Doctoral dissertation, University of Tokyo(in Japanese)
3. 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
4. Cundall, P. A., (1998), "2DEC User's Manual", Itasca consulting group.
5. Hahn, J. K. (1988) "Realistic Animation of Rigid Bodies", *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.299~308
6. Muhlhaus, H.-B., Sakaguchi, H. and Moresi, L.(2001), "Particle in Cell and Discrete Element Models for Granular Materials", *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Desai et al. eds., Balkema, Vol.1, pp.511~518
7. Shi, G.-H.(1988), "Discontinuous Deformation Analysis: a New Numerical Model for the Static and Dynamics of Block Systems", Ph.D thesis, Civil Eng., University of California, Berkeley
8. Williams, J. R., and Mustoe, G. G. W.(1987), "Modal Methods for the Analysis of Discrete Systems", *Computers & Geomechanics*, Vol.4, pp.1~19