

열차하중 재하 시의 도상 자갈의 거동에 관한 연구 Research on the ballast behavior under the train loading

김대상 (한국철도기술연구원)

1. 서론

본 연구에서는 열차하중 재하 시에 도상자갈이 노반에 작용하는 수직응력을 파악하기 위하여 개별요소법(DEM)을 이용한 수치해석과 실험을 수행하였다. 개발한 수치해석 프로그램을 이용하여 침묵-도상자갈-노반으로 전달되는 수직응력에 대한 결과를 얻었다. 모사 열차하중 재하 시의 실험을 통하여 수직응력과 침하량을 구하여 수치해석 결과와 비교하였다. 또한 도상자갈의 거동을 관찰하기 위하여 자갈 입자의 이동량에 대한 평가를 수행하였다.

2. 본론

2.1 수치해석결과(개별요소법 이용)

개발한 2차원 개별요소법(DEM) 프로그램을 이용하여 도상자갈을 원형으로 모델링하고 입도를 랜덤하게 발생시켰다. 현 국유철도의 도상자갈의 입경을 고려하여 원형입자의 반지름이 1.1cm에서 3.2cm 범위에 있도록 조정하였다. 랜덤입도분포는 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 1은 200개의 입자를 발생시켰을 때, 도상자갈의 반경에 따른 입자수의 분포를 보여 주고 있다.

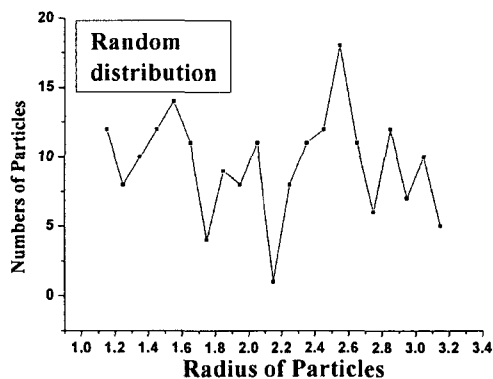


그림 1. 반지름에 따른 발생입자의 수(랜덤입도분포의 경우)

그림 2는 랜덤한 입도분포를 갖는 도상자갈에 침목을 모델링 한 예를 보여준다. 간극비를 0.24(느슨한 상태)로 수치해석 모델의 크기는 50cm(도상깊이)*100cm(도상폭)인 경우로 본 경계 범위 내의 총 입자수는 239개이다. 경계 조건은 주기경계를 이용하였다.

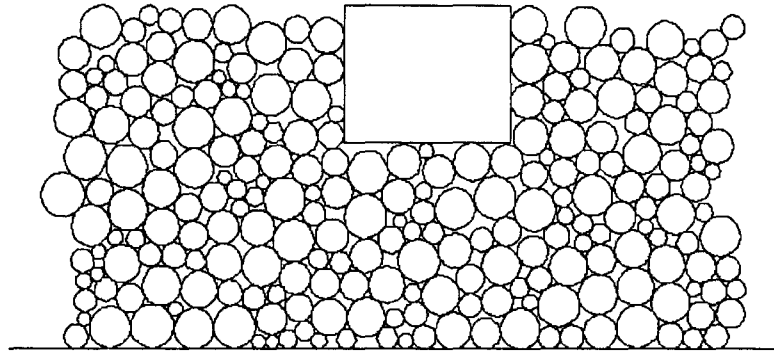


그림 2. 침목과 도상자갈 해석모델

계산에서 사용한 입자 접촉면에 대하여 법선방향 및 접선방향에 대한 스프링상수는 파동 방정식으로부터 해석대상 매질 중을 전파하는 탄성파속도 V_p 및 V_s 를 이용하여 식(1a),(1b)와 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, ρ : 입자의 밀도

표 1은 노반에 작용하는 수직 응력을 구하기 위한 입력변수들이다. 침목의 경우 연속체이므로 불연속체인 자갈과 노반보다 큰 스프링계수 값을 갖도록 입력변수를 결정하였다.

표 1. 계산에 사용된 입력 변수들

재료	밀도 (tonf/m ³)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	k_n (N/m)	k_s (N/m)	c_n (kg/sec)	c_s (kg/sec)	Φ (°)
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

본 프로그램에서는 입자 파쇄를 고려할 수 없어서 파쇄에 의한 에너지 발산이 가능하지 않다. 따라서 자연 현상에서는 발생할 수 없는 급격한 입자운동이 발생할 가능성이 있다. 이와 같은 점을 보완하기 위하여 점성계수의 경우 과감쇠가 발생하지 않는 범위 내에서 가능한 큰 점성계수 값을 사용하였다.

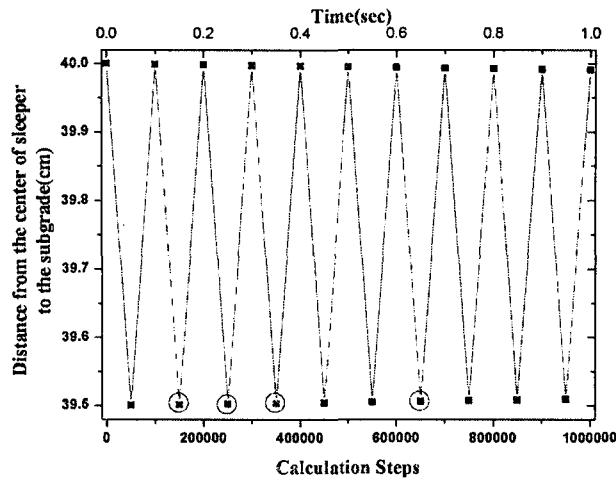


그림 3. 변위제어를 통한 하중재하

하중 재하는 변위 제어에 의한 하중재하방식으로 수치해석을 수행하였다. 변위 제어는 침목을 하 방향으로 5mm 이동한 후에 상 방향으로 5mm 이동하여 원래의 위치로 반복 재하하도록 하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 침목의 상하방향 이동 속도는 10cm/sec로 정하였다. 그림 3의 X축은 시간과 계산 횟수를 의미하고 Y축은 침목의 중심으로부터 도상·노반 경계면까지의 거리의 변화를 나타낸다. 노반면으로 부터 침목 중심까지의 거리가 초기에 40cm에서 39.5cm로 감소했다가 원래의 위치로 증가하는 운동을 반복하고 있음을 보여준다.

그림 4는 계산 과정 동안 노반에 가해지는 평균 수직응력으로 0.15초, 0.25초, 0.35초, 0.65초에서 노반에 작용하는 수직응력이 피크치를 가지고 0.15초에서 최대값(0.345kgf/cm²)을 보여 준다는 것을 알 수 있다. 0.05초의 경우 피크치를 보이지 않는데 이는 침목에서 도상에 가하는 작용력이 아직 노반면에 도달하지 않았기 때문이라고 판단된다.

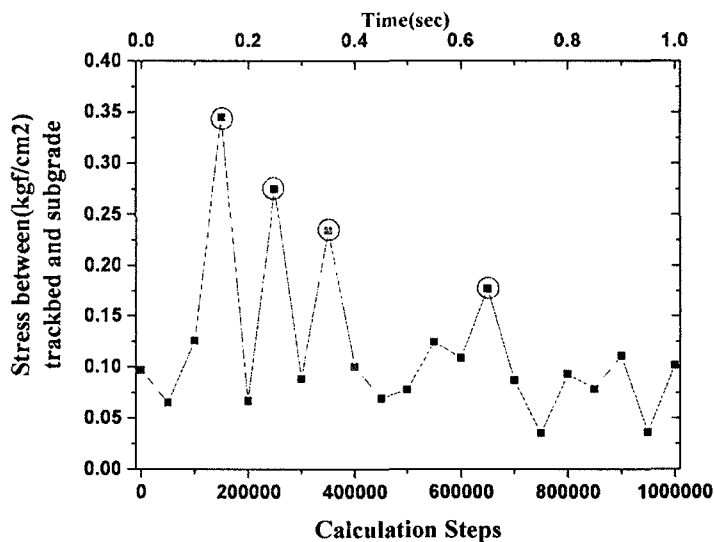


그림 4. 노반면에 작용하는 평균 수직응력값의 변화

2.2 실대형 시험

2.2.1 시험 조건

실제 현장과 같은 선로단면과 열차하중을 재하 할 수 있는 종합궤도노반장치를 이용한 반복재하시험을 통하여 노반에 작용하는 토압과 침하량을 검토해 보았다. 사진 1은 한국철도기술연구원이 보유하고 있는 종합궤도노반시험 장치를 이용하여 준비된 시험체를 보여 준다. 도상자갈과 노반흙은 실제 신설선에서 사용되고 있는 재료를 사용함으로써 신설선 상태와 같은 조건이 되도록 조성하였다.



사진 1. 종합궤도노반장치와 실대형 시험 시험체

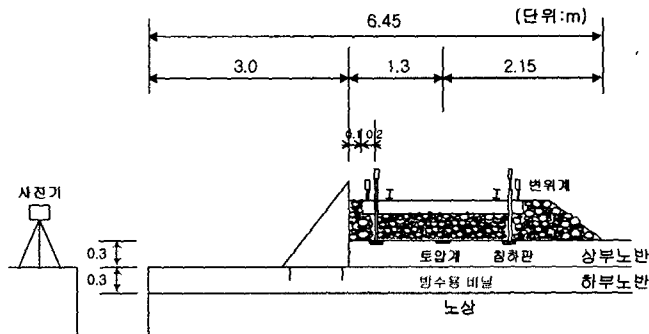


그림 5. 실대형 시험 횡단면도

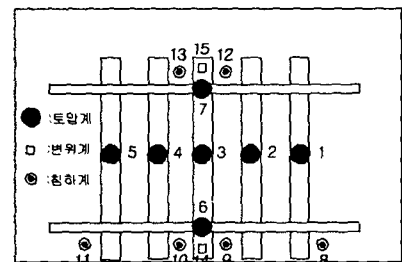


그림 6. 계측기 배치도 및 번호

그림 5는 실대형 시험 횡단면도로, 시험체 정면에 투명 아크릴판을 설치하여 시각적으로 도상자갈의 거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 그림 6은 시험에 사용된 계측기인 토압계, 변위계, 침하계의 배치도 및 일련 번호이다.

시험하중은 L-22 표준활하중을 적용하였으며 기존선 속도향상의 목표 최고속도인 200km/h에 대하여 장대레일에 적용하는 충격계수를 고려하였다. 따라서 충격계수는 1.6을, 설계윤중은 14.3ton을, 설계축중은 28.6ton으로 결정하여 반복재하 하였다. 그림 7은 시험에 사용한 하중을 정리한 그림이다. 반복하중 재하 전에 도상을 충분히 안정화시키기 위하여

도상부를 실제 현장 수준과 비슷한 조건이 되도록 다짐을 실시하였다. 이를 위하여 MTT(Multiple Tie Tamper) 작업 주파수에 해당하는 높은 주파수(35Hz)와 열차의 서행에 해당하는 낮은 주파수(0.5Hz)로 반복 하중을 가하였다. 안정화 작업 후에 정하중을 재하 하여 노반의 강성을 평가하였다.

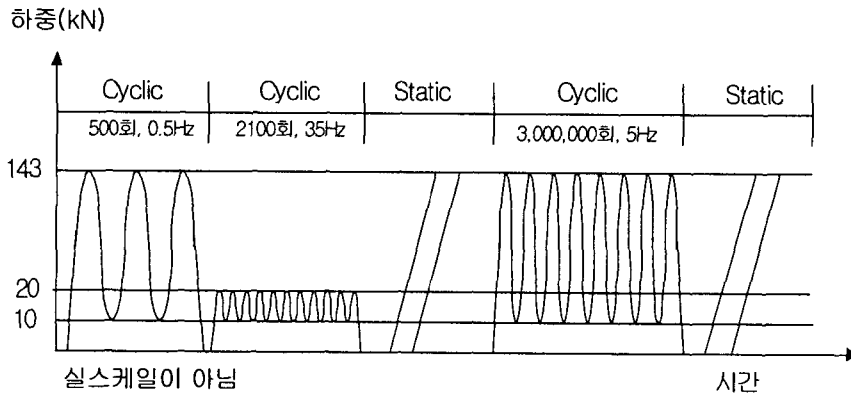


그림 7. 사용 하중

2.2.2 시험 결과 1 - 토압과 침하량

그림 8과 9는 반복재하 횟수에 따른 탄성 토압의 크기 변화(각 사이클 당 최대값과 최소값의 차이)를 토압계 3번과 7번에서 측정된 결과로, 하중재하 지점 근처에서의 탄성토압이 0.4~0.9kgf/cm²범위에서 증감하는 것을 알 수 있다. 변위계 9번(그림 10)과 10번(그림 11)에서 계측한 탄성변위는 비슷한 경향을 보였다. 초기의 탄성 침하는 1.5mm 정도로 큰 값을 보였으나, 반복재하 횟수의 증가와 함께 900,000회 정도까지 탄성 변위는 감소하였다. 반복재하 횟수가 1,000,000회를 초과한 이후는 탄성변위량이 0.6~0.8mm 범위에서 안정화 되었다.

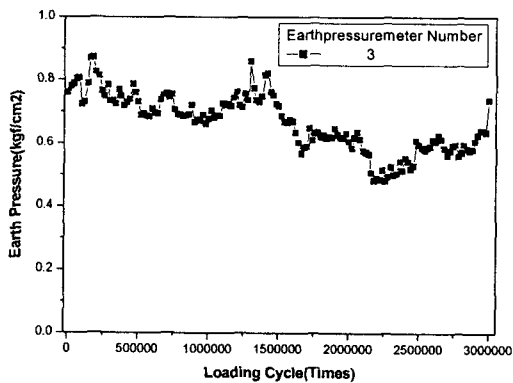


그림 8. 탄성 토압 변화(토압계 3번)

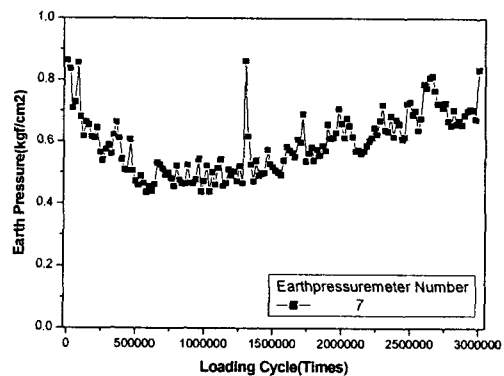


그림 9. 탄성 토압 변화(토압계 7번)

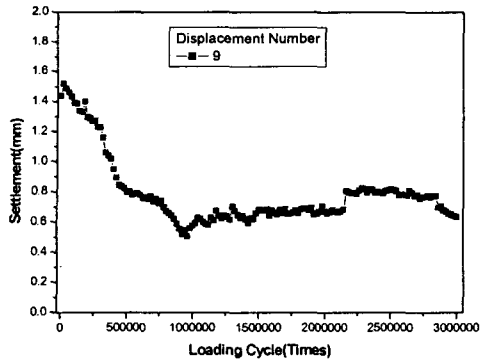


그림 10. 탄성 변위 변화(변위계 9번)

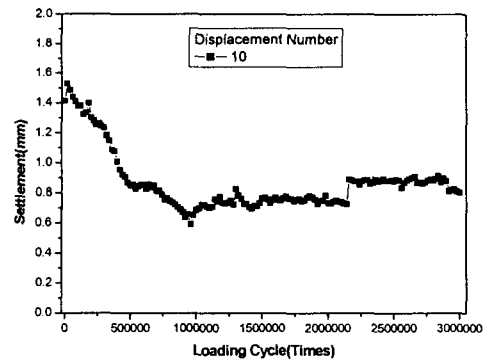


그림 11. 탄성 변위 변화(변위계 9번)

2.2.3 시험 결과 2 - 도상자갈 이동량 평가

20,000회 간격으로 촬영한 사진으로부터 반복하중 재하시 도상자갈의 이동을 평가하기 위하여 비주얼 베이직 프로그램을 개발하였다. 개발한 프로그램을 이용하여 도상자갈의 수직 및 수평 변위와 회전량을 구할 수가 있었다. 그림 12는 촬영한 사진을 불러 들여 해석 중에 있는 모습을 보여 주고 있다.

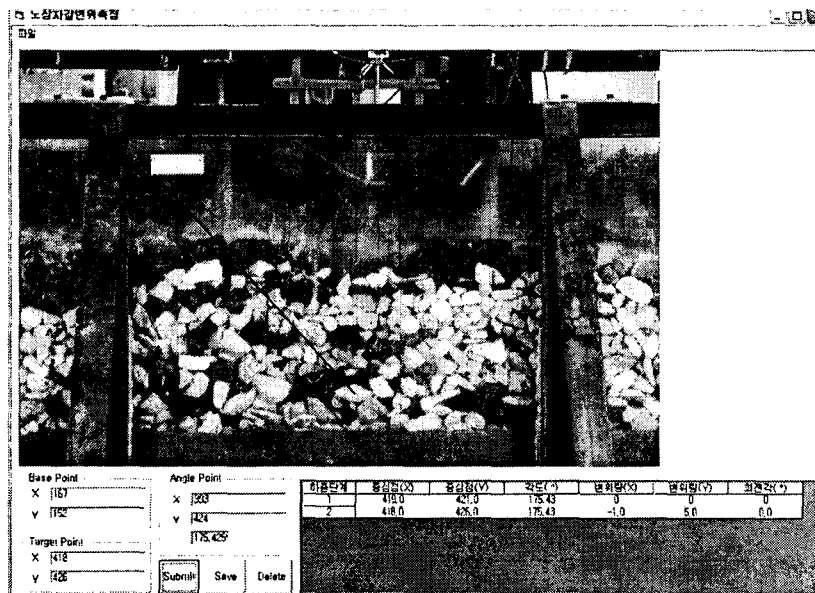


그림 12. 도상자갈 거동분석 프로그램

그림 13은 30개의 대표 자갈에 대한 수직 및 수평 변위로 작성한 자갈 이동에 대한 벡터도이다. 자갈의 수직변위는 중앙 상부(4번 자갈)에서 최대 36.8mm의 침하가, 중앙 중앙(15번 자갈)에서 14mm, 중앙 하부(28번 자갈)에서 3.5mm의 침하가 발생하였다. 도상 상부에서

자갈 이동이 크고 하부에서 점차 작아지는 경향을 나타내었다. 이는 화살표의 크기로 확인할 수 있다. 좌측부 및 우측부의 자갈에서는 0~15.8mm와 1.8~14mm 정도의 수직 침하량을 보였다.

자갈의 수평방향의 이동량을 살펴보면 중앙부는 우측으로 0~5.3mm정도가 이동하였다. 좌측부에서는 좌측과 우측으로의 이동이 혼재하였으나, 전체적으로는 좌측으로 이동함을 확인할 수 있었다. 우측부에서는 우측으로 0~5.3mm 정도가 이동하였다. 수평이동 량의 합을 계산한 결과 우측(28.4mm)이 좌측(3.7mm)보다 크다는 사실을 확인할 수 있었다.

자갈의 회전방향을 살펴보면 중앙부의 경우 4번 자갈을 제외 하면 시계방향과 반시계방향의 회전이 혼재하였다. 좌측부의 자갈들은 약하나마 시계방향으로 회전하였고, 우측부의 자갈은 반시계방향의 회전 특성을 강하게 보였다. 좌·우측 자갈의 수평방향 이동량의 합과 회전량을 분석해 볼 때, 하중이 약간 편심을 가지고 작용하였을 것으로 추측되었다.

전체적으로 하중 재하점 직하부에서는 자갈이 직하 방향으로 침하하는 다짐 압축현상을 보였고, 좌측은 다짐 압축과 반시계 방향의 회전이 합성된 전단변형을, 우측은 다짐 압축과 시계방향의 회전이 합성된 전단변형 거동을 보여 주었다.

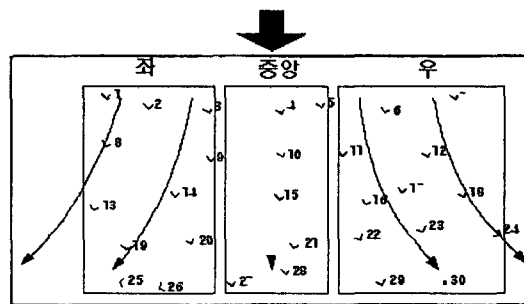


그림 13. 자갈 이동 벡터도

3. 결론

노반에 작용하는 토압과 침하량은 도상의 두께, 노반의 강성, 열차하중의 크기, 레일과 침목의 종류에 따라 어느 정도의 범위를 가질 것으로 판단된다.

수치해석 결과로 계산한 토압(0.345kgf/cm^2)은 실험 결과 측정된 토압($0.4\sim 0.9\text{kgf/cm}^2$)보다 약간 작은 값이었다. 이는 도상부에 사용하는 자갈을 2차원 원형 입자로 모델링하여 입자 사이의 접점에서 발생할 수 있는 수직력에 기인한 모멘트를 충분하게 묘사하지 못했기 때문이라고 판단된다.

도상자갈의 거동을 평가하기 위한 자갈의 이동량 평가로부터 도상하부자갈의 변형이 균질하지 않고 순수 다짐압축 혹은 다짐압축과 전단변형이 혼재하는 것을 확인할 수 있었다.