

DEM 모델을 이용한 평판재하시험의 토양 수직응력 해석

장기찬 · 이수진 · 이규진[†]

명지대학교 기계공학과

Soil Stress Analysis Using Discrete Element Method for Plate-Sinkage Tests

Gichan Jang, Soojin Lee, and Kyu-Jin Lee[†]

Dept. of Mechanical Engineering, Myongji Univ.

Received 30 March 2015; received in revised form 17 April 2015; accepted 5 May 2015

ABSTRACT

Soil deformation on the off-load ground is significantly affected by soil conditions, such as soil type, water content, and etc. Thus, the soil characteristics should be estimated for predicting vehicle movements on the off-load conditions. The plate-sinkage test, a widely-used experimental test for predicting the wheel-soil interaction, provides the soil characteristic parameters from the relationship between soil stress and plate sinkage. In this study, soil stress under the plate-sinkage situation is calculated by the DEM (Discrete Element Method) model. We developed a virtual soil bin with DEM to obtain the vertical reaction forces under the plate pressing the soil surface. Also parametric studies to investigate effects of DEM model parameters, such as , particle density, Young's modulus, dynamic friction, rolling friction, and adhesion, on the characteristic soil parameters were performed.

Key Words: Characteristic soil parameters, Discrete element method, Plate-sinkage test, Soil deformation

1. 서 론

토양 강도가 약한 야외환경에서 차량이 주행하면 토양의 변형에 의해 바퀴의 슬립, 침하가 발생한다. 야지차량 기동성을 저하시키는 주요한 원인인 바퀴의 슬립, 침하는 토양의 종류와 상태에 의해 지배적으로 영향을 받는다. 때문에 토양의 특성을 고려한 바퀴와 토양의 상호작용에 관한 연구는 국방, 농업, 토목, 우주개발 등의 분야에서 차

량의 야지주행성능과 관련하여 중요한 의미를 갖고 있다.

야지주행차량과 토양 사이의 관계를 설명하는 목적으로 가장 널리 이용되는 모델은 Bekker 모델이다^[1]. Bekker 모델은 바퀴의 침하 깊이를 토양의 특성 계수들을 사용하여 수식으로 표현한다. 차량의 무게와 바퀴/토양의 접촉면적으로부터 토양에 가해지는 수직하중이 도출되고, 토양의 강도 등의 특성이 점착계수나 마찰계수 등의 토양 정수의 형태로 고려되어 침하량이 계산된다^[2]. 토양 정수는 실험에 의해서 측정된 침하깊이-수직반력 관계에서 도출되는데, 측정시험으로는 평판재하시험이

[†]Corresponding Author, kjlee@mju.ac.kr
©2015 Society of CAD/CAM Engineers

가장 널리 사용된다^[6,7]. 평판재하시험은 일정 크기 이상의 평판을 토양의 표면에서부터 일정한 속도로 침하시키면서 평판의 저면에서 발생하는 수직 응력을 측정하는 실험이다. 이 외에도 콘관입시험^[8,9], 삼축압축시험^[10], 직접전단시험^[11] 등의 다양한 시험법을 통해 토양정수를 도출할 수 있다. Bekker 모델은 토양의 상태를 고려하여 바퀴의 침하율과 슬립을 계산할 수 있어 토양-바퀴 관계를 해석하는 기본 이론으로 사용되고 있으나 바퀴의 형상이나 상태에 따라 달라지는 슬립조건을 계산하는 것이 불가능하다거나 암석, 초목 등이 다수 포함되고 지형의 변화가 잦은 야지의 토양상태를 고려하지 못하는 등 한계가 존재한다. 최근에는 바퀴의 형상에 따른 토양의 변형을 해석하기 위하여 유한요소법(Finite element method, FEM)을 이용하기도 한다^[12]. FEM을 이용하면 그라우저(Grouser)와 같은 바퀴의 특이형상을 포함시키면서 토양과 바퀴 사이에 발생하는 마찰힘과 수직하중을 계산하여 토양 소성변형을 해석하는 것이 가능하다. 그러나 FEM 방법에서는 토양과 바퀴 사이에 발생하는 마찰힘을 해석하기 위하여 바퀴와 토양 접촉면에서의 슬립률을 임의로 결정해 주어야 한다는 단점이 있다.

비균질 상태인 토양의 특성을 모사할 수 있으면서도 토양의 변형과 바퀴-토양간의 상호작용을 계산할 수 있는 새로운 수치해석방법으로 개별요소법(Discrete element method, DEM)을 적용시키는 연구도 근래에 시도되고 있다^[13,14]. DEM은 입자형태의 구성물질의 집합으로 시스템을 모사하고, 입자들의 충돌과 마찰 등의 상호작용에 의해 시스템의 반응을 계산하는 방법으로, 분자동역학(Molecular dynamics, MD)과 유사한 수치해석법이다. 그러나 이 DEM으로 재현된 토양의 변형을 통해 바퀴의 운동을 재현하는 것을 목적으로 하는 연구 위주로 진행이 되어 실제 토양의 상태를 물리적으로 모사할 수 있는 DEM 파라미터에 대한 연구는 미흡한 상황이다.

2. 이론 및 모델

2.1 기본 이론

2.1.1 개별요소법(Discrete element method)

개별요소법(DEM)은 다수의 작은 입자들의 운동 및 상호영향을 계산하여 시스템의 거동을 해석

하는 수치해석법이다. DEM은 분자동역학과 매우 밀접한 관련이 있지만, 회전 자유도 뿐만 아니라 해석입자 사이의 접촉면 상태를 추가로 고려하는 점에서 구분된다. 최근 컴퓨터의 발전과 동시에 최근접 입자를 찾는 알고리즘의 발전으로 수백만 개의 입자를 하나의 프로세서에서 계산하는 것이 가능하게 되고 또한 GPU를 이용한 병렬 계산 기법의 범용화가 이루어져서 DEM은 불연속 재료 공학 문제를 해결하는데 효과적인 방법으로 인정되고 있다. 또한 CFD나 FEM 등의 수치해석법과 결합하여 적용분야를 확장하기도 한다.

DEM은 입자-입자간의 충돌 및 마찰의 계산을 바탕으로 시스템의 역학적 거동을 예측하기 때문에 입자 간의 접촉을 정의하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 DEM에서 가장 안정적이고 널리 사용되는 Hertzian-Mindlin 접촉모델을 사용하였다^[16,17]. Hertzian-Mindlin 접촉모델은 Fig. 1(a)와 같이 입자와 입자 사이의 접촉면에서 발생하는 힘을 탄성력과 감쇠로 표현한다. 접촉면의 면적 A 와 두 입자가 중첩된 길이 $\delta = r_i + r_j - L_{ij}$ 는 Fig. 1(b)에 표시된 것과 같이 정의하며, 탄성력과 감쇠는 δ 에 선형적으로 비례하는 것으로 계산된다. 탄성계수 K 는 아래 식들과 같이 접촉면에 대한 수직방향과 접선방향에 따라 각각 결정된다.

$$K_n = \frac{4}{3}\sqrt{r_{eq}}E_{eq}, K_t = 8\sqrt{r_{eq}}G_{eq} \quad (2)$$

위 식에서 r_{eq} 와 Fig. 1(b)에 표시된 것과 같이 접촉한 두 입자의 지름과 질량의 조화평균이다. 등가탄성 계수 E_{eq} 와 등가전단탄성계수 G_{eq} 는 다음과 같이 계산한다.

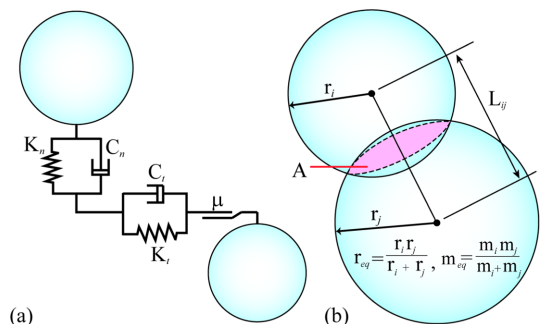


Fig. 1 (a) DEM contact model, (b) interacting spherical discrete elements

$$E_{eq} = \left(\frac{1-v_i^2}{E_i} + \frac{1-v_j^2}{E_j} \right)^{-1}$$

$$G_{eq} = \left(\frac{2-v_i}{G_i} + \frac{2-v_j}{G_j} \right)^{-1} \quad (2)$$

위 식에서 E_i, E_j 는 두 입자의 탄성계수, G_i, G_j 는 전단탄성계수 그리고 v_i, v_j 는 포와송비이다. 각 입자의 전단탄성계수 G 는 입자의 등방성을 가정하고 후크 법칙으로부터 탄성계수 E 를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

수직방향과 접선방향의 감쇠율은 다음과 같이 결정된다.

$$C_n = c\sqrt{m_{eq}K_n}, \quad C_t = c\sqrt{m_{eq}K_t} \quad (4)$$

위 식에서 m_{eq} 는 Fig. 1(b)에 표시된 것과 같이 접촉한 두 입자의 질량의 조화평균이며, 무차원 감쇠계수 c 를 통해 계산이 된다.

DEM은 많은 수의 입자를 계산해야 하기 때문에 입자의 형상을 구로 가정하여 계산의 효율성을 확보하는 것이 일반적이다. 그러나 토양을 모델링하는 경우에는 입자를 각형으로 해석하여 입자 간에 발생하는 추가적인 힘을 고려할 수 있어야 토양 내부에 발생하는 전단 응력이나 안식각 등을 모사하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 입자를 구로 가정하여 계산 효율성을 유지하되 각형의 입자가 구름 운동을 할 때 추가로 필요한 힘을 구름마찰력이라는 형태로 변환하여 해석에 포함하였다. Fig. 2에 표현된 것처럼 각이 있는 입자가 구름운동을 할 때는 입자의 무게중심이 형태 때문에 수직방향으로 운동을 하게 된다. 이 입자가 중력을

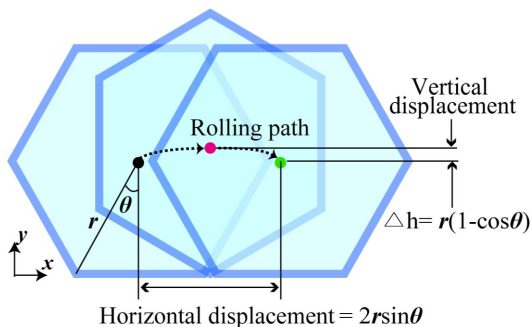


Fig. 2 Rolling movement of a non-spherical element

거슬러 수직 운동을 가능하게 하기 위해서는 추가 일이 필요하며 이 일은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 수직변위 Δh , 입자의 질량 m , 중력가속도 g 로 부터 다음 식으로 계산된다.

$$W = mg\Delta h = mgr(1 - \cos\theta) \quad (5)$$

수직운동에 필요한 일을 수평방향의 구름 운동에 추가로 필요한 힘으로 변환하기 위하여 입자의 수평변위로 나누면 다음과 같다.

$$F = \frac{W}{2r\sin\theta} = mg\frac{1}{2}\tan\frac{\theta}{2} = mg\mu_r \quad (6)$$

위 식에서 수평방향의 힘은 구름마찰계수 μ_r 를 포함한 형태로 다시 표현되었다. 입자의 모서리각 θ 가 90도인 정사각형 입자인 경우는 구름마찰계수가 0.5인 것으로 적용할 수 있으며, 판형입자인 경우는 구름마찰계수를 1에 근접한 값을 적용할 수 있다. 이를 이용해서 입자의 운동에 필요한 토크를 계산할 수 있다.

$$\vec{T}_F = -r\mu_r \vec{F}_n \frac{\vec{\omega}}{|\vec{\omega}|} \quad (7)$$

위 식에서 수직방향의 힘 \vec{F}_n , 입자의 각속도 $\vec{\omega}$ 를 이용하여 계산되며, 각형의 입자가 구름운동을 하기 위해 필요한 토크가 된다.

본 연구에는 토양의 점착특성(cohesion)을 모사하기 위해서 입자간 당기는 힘인 점착력(adhesion force)을 포함해서 고려한다. 두 입자 간에 발생하는 점착력 $\vec{F}_{a,ij}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{F}_{a,ij} = A_i A_j m_{eq} \frac{\vec{r}_{ij}}{|\vec{r}_{ij}|} \quad (8)$$

위에서 점착력 $\vec{F}_{a,ij}$ 은 접촉하는 두 입자의 접촉면적 A_i, A_j , 두 입자 질량의 조화평균 m_{eq} , 각 입자의 중심을 연결하는 방향의 단위 벡터 \vec{r}_{ij} 로 정의되며, 이를 입자에 작용하는 중력의 크기로 나누어주게 되면 무차원수인 점착계수 α 를 정의할 수 있다.

$$\alpha = \frac{|\vec{F}_{a,ij}|}{|\vec{F}_g|} = \frac{A_i A_j}{m_g} m_{eq} \quad (9)$$

2.1.2 Bekker 압력-침하 모델

Bekker 압력-침하 모델은 차량의 바퀴와 토양 사이의 관계를 해석하는데 전통적으로 널리 적용되

는 이론이다^[5]. Bekker 압력-침하 모델은 토양의 강도를 고려하여 바퀴의 수직하중에 따른 침하깊이를 계산하며, 이는 다음과 같은 식으로 표현이 된다.

$$\sigma(z) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n$$

위의 식에서 토양의 수직응력 σ 은 침하깊이 z 에 대한 멱함수로 표현되며, n 은 침하지수, k_c, k_ϕ 는 토양의 강도를 나타내는 특성정수이다. 이 때 b 는 바퀴의 폭을 나타낸다. 이 식에서 사용되는 토양정수와, 침하지수 등은 토양의 종류, 균질도, 함유수분량 등에 의해 결정되며, 주로 실험에 의해 도출된 값을 사용한다.

토양정수와 침하지수를 결정하는 실험 중에서도 일반적으로 사용되는 평판재하시험은 일정 크기 이상의 평판을 평평하게 고른 토양 샘플 위에 일정 속도로 재하시키고 평판에 발생하는 수직하중을 측정한다. 이 시험을 통해서 침하깊이에 따른 수직하중을 측정하고, 이 결과로부터 멱함수 형태의 회귀함수를 구하여 토양정수와 침하지수를 도출한다.

본 연구에서는 DEM 해석 상용소프트웨어인 SAMADII (Metariver Inc.)를 이용하여 해석을 수행 하였으며, 컴퓨터는 Dell 워크스테이션 PowerEdge R720에 장착된 4개의 NVIDIA Tesla K20 그래픽 카드를 이용하여 GPU 병렬 계산 하였다. 계산 시간은 각 케이스 별로 차이가 있으나 평균적으로 약 8시간 소요되었다.

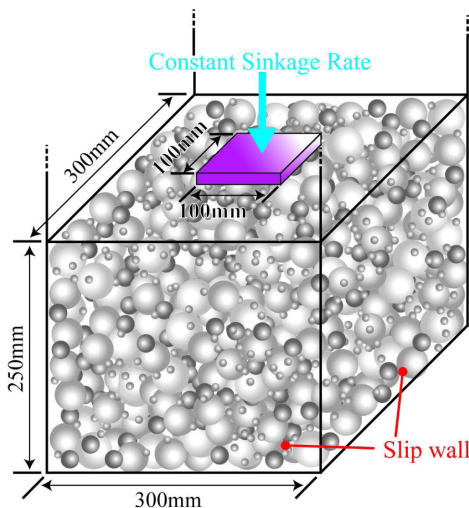


Fig. 3 Geometry of the plate-sinkage model

Table 1 Geometrical dimensions and DEM parameters

Geometries	Value
Soil bin size [mm]	300 × 300
Soil sample height [mm]	250
Plate size [mm]	100 × 100 × 20
Sinkage rate [mm/s]	10
DEM Parameters	Value
Density [kg/m ³]	3274
Poisson's ratio	0.3
Young's modulus [MPa]	70
Damping factor	0.3
Dynamic friction	0.86
Rolling friction	0.4
Adhesion	0

DEM으로 가상토양을 생성하기 위하여 먼저 수분함유량이 7% 이하인 건조주문진 표준사와 유사한 상태의 토양을 모사할 수 있는 DEM 입자의 물성 파라미터와 평판과 토양입자 간의 상호작용에 관한 파라미터를 사용하였다. DEM 입자의 크기는 대상 토양의 입자크기와 상관없이 건조표준사의 거시적인 거동을 모사할 수 있는 수준이면서 효율적인 계산을 가능하게 하는 크기로 결정되었다. 안정적인 해석을 위하여 균일한 크기의 입자의 사용을 배제하고 다양한 크기의 입자를 혼합하여 사용하였다. 입자는 2.5 mm~9.5 mm까지 1 mm 간격으로 8개의 지름과 10 mm의 지름을 가지는 9종을 각각 동일한 개수로 사용하여 혼합하였다. 입자의 밀도는 토양샘플의 벌크밀도를 건조주문진 표준사의 밀도인 1570 kg/m³과 일치하도록 조정하여 3274 kg/m³로 정하였다. 토양 샘플의 공극률을 약 48%이다. 그 외 입자의 탄성계수, 포아송비율, 감쇠계수, 마찰계수, 구름마찰계수 및 점착계수는 기존의 DEM 토양 해석 문헌들^[8-10]을 참고하여 Table 1와 같이 사용하였다.

3. 결 과

3.1 평판재하시험 모델의 수직응력 결과

DEM 평판재하모델의 침하깊이에 따른 수직응력은 Fig. 4에 표시하였다. 입자가 평판에 충돌하면서 발생하는 힘의 합으로 수직반력을 계산하는 DEM모델의 특성상 순간적인 진동이 크게 나타나

기 때문에 침하깊이 0.1 mm 구간별로 나타나는 수직응력의 이동평균값을 그래프에 표시하였다. Fig. 4를 보면 침하하는 평판에 가해지는 토양의 수직 반력은 토양의 표면 근처에서 깊이에 따라 급격하

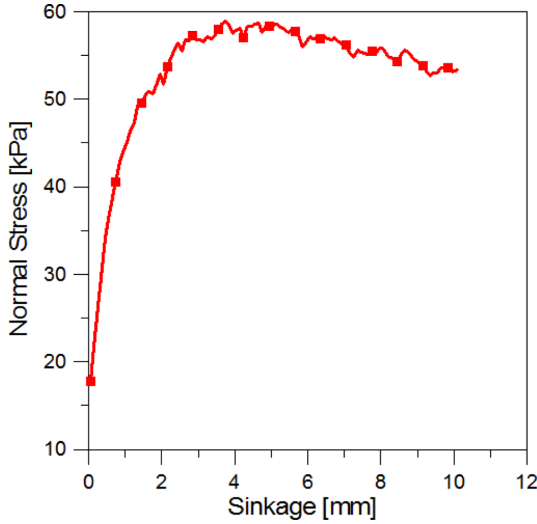


Fig. 4 Soil normal stresses vs. sinkage

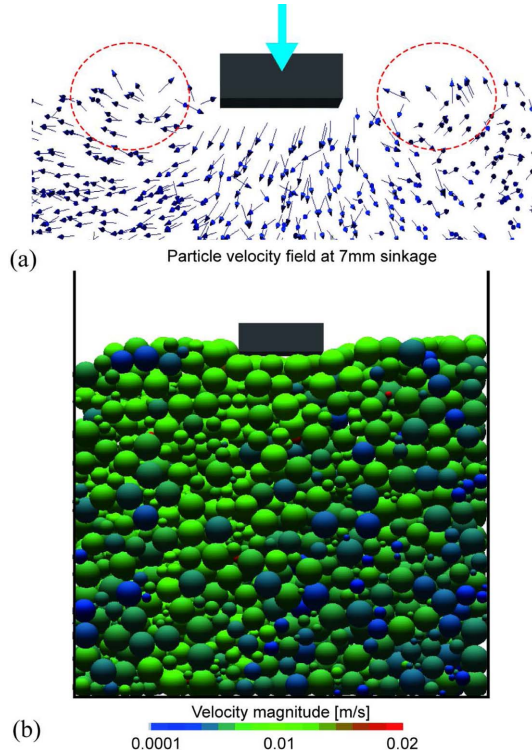


Fig. 5 Velocities of soil particles around the plate at 7 mm sinkage; (a) velocity-vector field and (b) particle positions and velocity magnitudes

게 증가한다. 그러나 약 4 mm 깊이에서 약 60 kPa 으로 최고응력이 나타난 이후로는 근소하게 감소 하는 경향을 보인다.

이렇게 토양이 변형될 때 최대수직응력이 관찰 되는 현상은 실제 토양의 전단변형에서 많이 관찰 되며 평판의 움직임에 따라 토양 입자간의 공극률이 증가와 동시에 나타난다^[15]. DEM 모델에서도 재하 평판의 침하깊이가 4 mm 이상이 되면서 평판에 의해 움직이는 토양이 평판의 가장자리 위쪽 방향으로 이동하면서 토양이 부풀어 오르는 것과 같은 현상이 관찰되는 것을 Fig. 5(a)에 붉은 원으로 표시한 부분에서 확인 할 수 있다. Fig. 5(b)에서는 평판에 의해서 밀려난 토양입자의 속도 분포가 평판 아래 부분에서 평판 가장자리로 걸쳐있는 것을 볼 수 있다.

3.2 입자 밀도 영향

입자 밀도의 변화에 따른 평판 수직응력의 변화는 Fig. 6에 그려졌다. 동일한 입자 혼합 상태의 DEM 토양 입자 모델에서 입자밀도를 2000 kg/m³, 3274 kg/m³, 4000 kg/m³으로 변화시켜 가며 해석한 결과에서 최대수직응력은 순서대로 약 37 kPa, 60 kPa, 73 kPa로 나타났다. Fig. 6(a)를 보면 최대 수직응력이 나타나는 평판 침하깊이는 입자 밀도의 변화와는 무관하게 약 4 mm로 일정하였으며 최대수직응력이 나타난 이후에는 변화가 거의 없는 수직반력을 나타냈다. 이것은 세 경우 모두 공극률이 같고 입자가 쌓여있는 형상이 동일하기 때

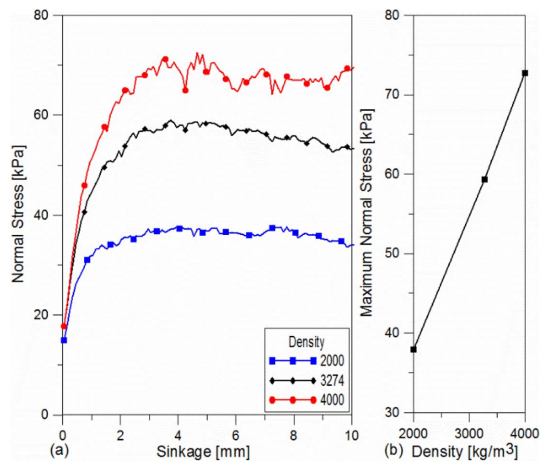


Fig. 6 Effects of particle density; (a) Soil normal stresses vs. sinkage and (b) maximum normal stresses with different particle densities

문에 평판의 침하에 따라 발생하는 입자의 거동 형태가 유사할 수 밖에 없고, 때문에 평판의 가장자리 바깥으로 입자가 밀려나가면서 공극률이 증가하기 시작하는 평판 침하깊이가 동일한 것으로 볼 수 있다.

입자밀도가 증가할수록 수직반력의 크기는 증가하는 경향을 보였다. 입자의 밀도 변화에 대한 최대 수직응력 변화는 Fig. 6(b)에 나타난 것과 같이 선형적이 관계인 것으로 보인다. 이러한 선형적 관계는 입자 간의 접촉면에서 발생하는 입자의 운동량이 입자밀도에 선형으로 계산되는 것에 원인이 있다.

3.3 입자 탄성계수 영향

입자의 Young's modulus 즉 탄성계수의 변화에 따라 변화하는 평판수직응력의 변화는 Fig. 7에 나타났다. 앞의 연구와 마찬가지로 동일한 형상으로 생성된 DEM 토양에 입자 탄성계수를 변화시켜서 해석한 결과를 비교하였다. Fig. 7(a)를 보면 탄성계수가 낮은 5 MPa인 경우에는 최대수직응력이 나타나지 않고 침하깊이에 따라서 지속적으로 수직응력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 70 MPa 보다 탄성계수가 큰 100 MP, 1 GPa, 70 GPa인 케이스들은 최대값 이후에 수직응력이 일정하게 나타나는 경향이 유지되었다. 70 GPa인 경우는 입자의 탄성계수가 높기 때문에 이동평균으로 데이터를 평탄화하였음에도 수직응력의 진동이 크게 나타났다으며, 이 진동 때문에 부정확하지만 최대값이

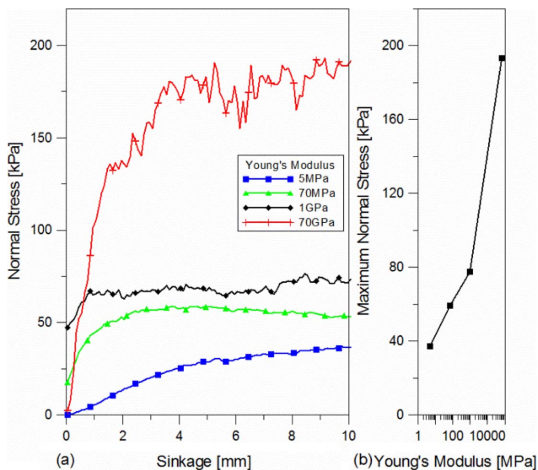


Fig. 7 Effects of particle Young's modulus; (a) Soil normal stresses vs. sinkage and (b) maximum normal stresses with different Young's moduli

나타나는 침하깊이를 5 mm에서 10 mm 사이로 볼 수 있다. 입자 탄성계수에 따라 최대수직응력을 표시한 그래프가 Fig. 7(b)에 있으며, 데이터가 탄성계수의 로그 스케일에서 완전한 선형은 아니지만 선형에 근사한 관계인 것을 볼 수 있다.

3.4 입자 동마찰계수 영향

입자간의 동마찰계수의 영향은 Fig. 8에서 볼 수 있다. 입자 간의 동마찰계수는 0.2, 0.6인 경우를 0.86인 경우와 비교하였으며, 마찰계수가 작을수록 최대수직응력이 나타나는 침하깊이가 커지고 최대수직응력이 작아지는 것을 Fig. 8(a)에서 알 수 있다. 0.2의 경우는 최대수직응력 발생 이후 평평한 구간의 유무가 불분명하지만 약 9 mm 깊이에서 약 5 kPa의 최대수직응력이 나타났고, 0.4의 경우 약 8 mm의 깊이에서 약 43 kPa, 0.86의 경우는 약 4 mm에서 최대수직응력이 약 60 kPa이었다. 이것은 마찰계수가 작을수록 토양입자의 재배열에 필요한 힘이 작고 토양의 거동 중에 공극률이 증가하는 정도가 작아서 나타나는 결과라고 설명할 수 있다. 마찰계수의 변화에 따라서 최대수직응력을 표시하면 Fig. 8(b)와 같이 마찰계수가 클수록 최대마찰계수의 변화량이 감소하는 경향을 보인다.

3.4 그 외 DEM 파라미터 영향

앞서 살펴본 DEM 입자밀도, 탄성계수, 동마찰

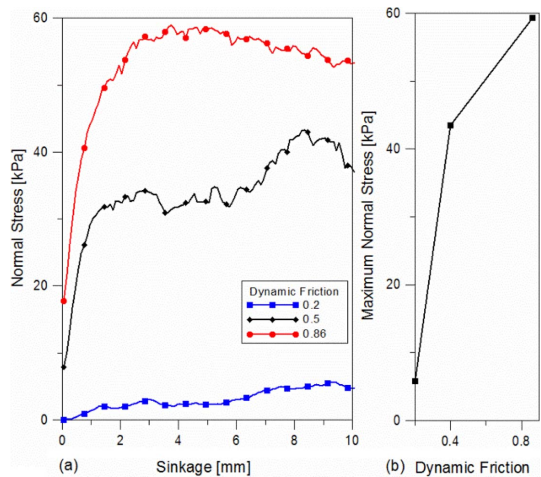


Fig. 8 Effects of dynamic friction coefficient; (a) Soil normal stresses vs. sinkage and (b) maximum normal stresses with different dynamic friction coefficients

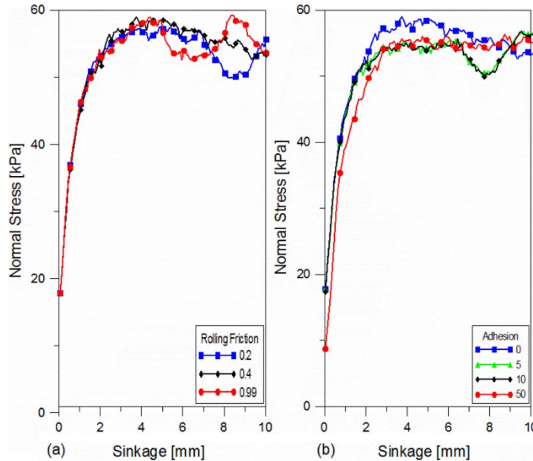


Fig. 9 Soil normal stresses vs. sinkage with (a) different rolling friction coefficients and (b) different adhesion factors

계수 이외에도 입자 포이송비, 구름마찰계수, 점착계수 등의 DEM 파라미터들이 존재한다. 그 중에서 구름마찰계수와 점착계수의 수직반력에 미치는 영향을 연구하였고 해석결과는 Fig. 9에 표시하였다.

구름마찰계수는 Fig. 9(a)와 같이 0.2, 0.4, 0.99로 변화시켜가며 해석한 결과 최대수직반력을 비롯하여 침하깊이에 따른 수직반력의 증가 경향이 모두 비슷하였다. 점착계수로 고려된 입자 사이의 점착력이 수직반력에 미치는 영향도 해석하여 Fig. 9(b)에 나타내었다. 점착계수를 0, 5, 10, 50으로 변화시켜가며 해석한 결과도 수직반력의 증가형태의 변화가 무시할 만큼 작았다. 따라서 구름마찰력과 점착계수는 수직반력에 미치는 영향이 작다는 것을 확인하였다.

4. 결론 및 요약

야지차량의 주행에 지배적인 영향을 미치는 토양의 변형은 토양의 종류, 함수량 등 토양 상태에 따라 결정된다. 본 논문에서는 토양의 상태에 따라 수직하중에 따른 변형을 해석하기 위하여 DEM을 이용하여 평판재하모델을 개발하였다. 평판재하모델의 해석결과는 토양의 표면근처에서 침하깊이에 따라 수직반력이 증가하다가 일정 깊이 이상에서는 최대수직반력을 유지하는 현상을 보였으며, 이러한 현상은 토양의 전단변형시험에서 토

양의 공극률이 증가하면서 나타나는 경향과 동일하다. 또한 DEM 파라미터에 대한 수직응력 영향 연구에서는 입자밀도의 증가에 따라 수직반력이 선형적으로 증가하였으며, 입자탄성계수의 로그스케일 증가는 수직반력의 증가로 나타났다. 또한 입자의 동마찰계수가 작을수록 수직반력의 급격한 감소가 나타났다. 이 외에도 입자의 구름마찰계수와 점착계수의 영향은 미미하였다. 본 연구에서 개발된 해석모델을 이용하면 바퀴-토양 모델에 사용되는 가상토양 구성에 필요한 DEM 파라미터를 도출할 수 있어, 토양의 변형을 고려한 야지주행 차량 해석을 가능하게 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 국방과학연구소의 국방기초연구사업인 미래지상체계특화분석연구실의 지원으로 작성되었습니다.

References

1. Sean Laughery, G.G. and Richard, G., 1990, Bekker's Terramechanics Model for Off-road Vehicle Research, *US Army TARDEC Warren, MI 48397-5000*.
2. Ding, L., et al., 2010, Wheel Slip-sinkage and its Prediction Model of Lunar Rover, *J. Cent. South Univ. Technol* 17, pp.129-135.
3. Ding, L., et al., 2011, Experimental Study and Analysis on Driving Wheels' Performance for Planetary Exploration Rovers Moving in Deformable Soil, *Journal of Terramechanics*, 48(1), pp.27-45.
4. Cross, M., et al., 2013, Estimating Terrain Parameters for a Rigid Wheeled Rover Using Neural Networks, *Journal of Terramechanics*, 50(3), pp.165-174.
5. Wong, Y., 2008, *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley & Sons Inc, Ottawa, Canada, pp.141-198.
6. Maximilian Apfelbeck, S.K., et al., 2009, A Novel Terramechanics Testbed Setup for Planetary Rover Wheel-soil Interaction, *11th European Regional Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems Bremen*.
7. Ding, L., et al., 2014, New Perspective on Characterizing Pressure-sinkage Relationship of Terrains for Estimating Interaction Mechanics, *Journal of Terramechanics*, 52, pp.57-76.

8. Hiroaki, T., *et al.*, 2000, Simulation of Soil Deformation and Resistance at Bar Penetration by the Distinct Element Method, *Journal of Terramechanics* 37, pp.41-56.
9. Asaf, Z., *et al.*, 2007, Determination of Discrete Element Model Parameters Required for Soil Tillage, *Soil and Tillage Research* 92(1-2), pp.227-242.
10. Yang, R., *et al.*, 2011, Experimental Study and DEM Analysis on Rigid Driving Wheel's Performance for Off-road Vehicles Moving on Loose Soil, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*.
11. L.D. Akin, 2009, Wheel-Soil Interactions, University of MARYLAND.
12. Junya, Y. and M.G., 2014, Observation of Interaction between a Rolling Wheel and Sand, *Proceedings of the 18th International Conference of the ISTVS 2014*.
13. Khot, L.R., *et al.*, 2007, Experimental Validation of Distinct Element Simulation for Dynamic Wheel-soil Interaction, *Journal of Terramechanics*, 44(6), pp.429-437.
14. Hiroshi, N., *et al.*, 2006, Concept of Virtual Soil Bin by DEM for Lunar Locomotion Studies, *Copyright ASCE*.
15. Belheine, N., *et al.*, 2009, Numerical Simulation of Drained Triaxial Test Using 3D Discrete Element Modeling, *Computers and Geotechnics*, 36, pp.320-331.
16. Hertz, H., 1882, Über die Berührung fester elastischer Körper, *Journal Fur Die Reine Und Angewandte Mathematik*
17. Mindlin, R., 2014, Compliance of Elastic Bodies in Contact, *Journal of Applied Mechanics*, 16.



이 규 진

1996년~2001년 B.S. in Mechanical Engineering, Seoul National University
 2001년~2003년 M.S. in Mechanical Engineering, Seoul National University
 2003년~2008년 Ph.D. in Mechanical Engineering, Seoul National University
 2008년~2010년 PostDoc Researcher, Seoul National University
 2010년~2012년 PostDoc Researcher, National Renewable Energy Laboratory US
 2012년 Research Engineer, National Renewable Energy Laboratory US
 2012년~현재 명지대학교 기계공학과 조교수



이 수 진

2001년~2008년 현대모비스 기술연구소 연구원
 2011년 KAIST 기계공학과 박사
 2008년~현재 명지대학교 기계공학과 조교수/부교수
 관심분야: 차량 동역학 모델링 및 제어, 비선형 강인제어



장 기 찬

2008년~2014년 B.S. in Mechanical Engineering, Myongji University
 2014년~현재 M.S. in Mechanical Engineering, Myongji University