

# 비포장 노면의 디지털 트윈 구현을 위한 토양 정보 획득 및 입자 이산요소 모델링

손 권 중\*

## Soil Information Acquisition and Particle Discrete Element Modeling for Digital Twin Implementation of Unpaved Grounds

Kwon Joong Son\*

---

이 논문은 2019학년도 홍익대학교 학술연구진흥비(4차산업혁명캠퍼스 활용)의 지원 및 과학기술정보통신부와 연구개발특구진흥재단이 지원하는 2021년 과학벨트지원사업(No. 2021-DD-SB-0288)으로 수행된 연구결과임

---

### 요 약

우주 탐사, 농업, 건설, 군사 분야 등에서 비포장도로 위를 운행하는 각종 수송기계의 설계 및 운용 단계에서 컴퓨터 시뮬레이션에 기반한 디지털 트윈 기술의 활용도가 점점 높아지고 있다. 비포장도로에 대한 보다 사실적인 디지털 트윈 환경을 구현하기 위해서는 지형 정보뿐만 아니라 토양의 마찰과 응집력과 같은 지면의 분체학적 특성 정보를 획득하여 반영해야 한다. 이 논문은 비포장 주행 시험장에서 채취한 두 종류의 토양을 대상으로 입도, 수분함유량, 안식각 등 토질 정보를 수집하고 이를 바탕으로 입자의 크기와 입자 간 접촉 인자를 보정한 이산요 모델을 제시한다. 보정된 입자 모델은 안식각 예측 시뮬레이션 검증 결과에서 실험 결과를 정확히 예측하는 것으로 확인되어 향후 융합 정보 분야 연구에 활용성이 높을 것으로 기대한다.

### Abstract

The use of digital twin technology using computer simulation is increasing in the design and operation stage of various off-road vehicles in space exploration, agriculture, defense, and construction applications. To achieve a more realistic digital twin for off-reads, not only topographical information but also rheological properties of soils such as friction and cohesion should be precisely acquired and modeled. This paper presents the discrete element models calibrated based on the measured soil properties such as particle size, compressibility, moisture content, and angle of repose for two types of soils collected from off-road driving test sites. Discrete element simulation results obtained with the proposed soil models can accurately predict the experimentally measured angle of repose values and are expected to be highly useful in future convergence information research.

### Keywords

digital twin, virtual simulation environment, soil rheology, information acquisition, discrete element method

---

\* 홍익대학교 기계정보공학과 부교수  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4407-3706>

• Received: Nov. 21, 2022, Revised: Dec. 06, 2022, Accepted: Dec. 09, 2022  
• Corresponding Author: Kwon Joong Son  
Dept. of Mechanical and Design Engineering, Hongik University, 2693,  
Sejong-ro, Jochiwon-eup, Sejong 30016, Korea  
Tel.: +82-44-860-2083, Email: [kjson@hongik.ac.kr](mailto:kjson@hongik.ac.kr)

## 1. 서론

군용 차량, 필드 로봇, 농기계, 골프카, 탐사 로봇과 같이 비포장도로 환경에서 주행하는 수송기기의 설계와 성능 평가 시 컴퓨터 시뮬레이션에 기반 디지털 트윈 기술의 활용도는 매우 높다. 오프로드 차량의 타이어 설계, 조향장치 및 제동장치 설계, 구동력 제어 및 주행 모니터링과 같이 차량 동역학 융합 연구 분야에서 가상 시제작과 주행 성능 예측이 가능하기 때문이다[1]-[3]. 비포장도로 환경을 사실적으로 구현한 디지털 트윈의 구축을 위해서는 노면의 물리적 특성 데이터의 수집 및 정보화 작업이 요구된다. 비포장 노면의 특성은 크게 요철과 같은 형상적인 특성과 토양의 분체역학적 특성으로 구분할 수 있다. 여기서 분체역학적 특성이란 토양 입자의 입도 분포, 형상, 입자 사이의 마찰계수, 입자 충돌 시 반발계수, 수분함유량에 따른 응집력과 같이 분체(System of particles) 상태에서 토양이 갖는 역학적 성질을 일컫는다. 토양의 분체역학적 특성을 모델링하기 위한 방법으로는 안식각과 침투저항과 같은 토질 정보를 실험적으로 수집하고 입자 간 접촉 거동 모델을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 보정하는 방식이 주를 이룬다[4][5]. 컴퓨터 시뮬레이션 방법으로는 분체의 운동학적 상태와 접촉력을 개별 입자 수준에서 기술하고 해석할 수 있는 이산요소법(DEM, Discrete Element Method)이 가장 널리 사용된다[6]-[8].

이 논문에서는 비포장 노면의 디지털 트윈 구축을 위해 압축성이 낮은 건사와 압축성이 높은 점성사로 분류할 수 있는 두 종류의 토양에 대한 이산요소 입자 모델을 제시한다. 또한 모델의 보정과 검증을 위해 수행한 입도 분석, 습도 측정, 안식각 실험 및 시뮬레이션 방법과 결과를 소개한다.

## II. 토양 채취 및 토질 정보 측정

그림 1에 도시한 바와 같이 비포장 환경 수송기기가 자율주행 시험장을 보유한 경기도 화성시 소재 홍익대학교 4차산업혁명캠퍼스의 필드로봇시험장과 농업용로봇시험장에서 토질 측정을 위한 압축성이 낮은 건사와 압축성이 높은 점성사를 각각 채취하였다.



그림 1. 토양 채취 장소: 홍익대학교 화성 4차산업혁명캠퍼스

Fig. 1. Soil collection site: Hongik university Hwaseong 4th industrial revolution campus

채취한 토양에 대해 입자의 크기와 형상을 현미경으로 관측하였고 토양의 압축성 및 안식각과 수분함유량을 측정하였다.

그림 2는 두 곳에서 채취한 토양의 50배율 현미경 사진으로써 평균 입도는 두 경우 모두 1mm 이내로 관측되었다. 토양 입자의 지름이 0.02mm 이상인 경우를 모래로 그 이하를 미사로 분류하는 국제토양학회의 기준에 따라 두 종류의 토양은 모두 모래로 분류할 수 있다.

토양의 압축률은 토양 시편의 탭밀도(Tap density)의 최대 변화율로 정의되며 측정된 압축률이 15%이하일 경우를 압축성이 낮은 토양(Slightly compressible soil)으로 그 이상일 경우는 압축성이 높은 토양(Highly compressible soil)으로 나눌 수 있다[9]. 압축시험 결과 필드로봇시험장과 농업용로봇시험장에서 채취한 토양의 압축률은 각각 10.0%와 46.7%로 측정되어 각각 압축성이 낮은 토양과 압축성이 높은 토양으로 분류하였다.

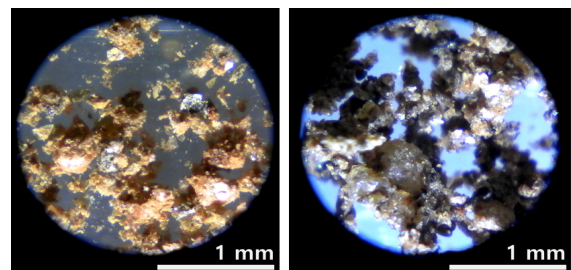


그림 2. 필드로봇시험장(좌)와 농업용로봇시험장(우)에서 채취한 토양의 현미경 사진

Fig. 2. Microscopic images of soil samples collected from field robot test site(left) and agricultural robot test site(right)

토양 채취 현장에서 그림 3과 같이 습도 센서, 마이크로 컨트롤러 유닛, 데이터 획득 및 코딩용 랩톱 컴퓨터로 구성된 수분 측정 시스템을 구축하여 수분함유량을 측정하였다. 습도 센서는 토양의 수분함유량에 따라 유전층의 유전율(Permittivity)이 선형적으로 변하는 기능성 고분자 재료를 사용한다. 따라서 습도 센서가 수분에 닿지 않았을 때의 출력 전압과 물속에 완전히 담갔을 경우의 출력 전압을 각각 습도 0%와 100%로 설정하여 전압과 습도 사이의 선형 관계식을 얻을 수 있었다. 필드로봇시험장과 농업용로봇시험장에서 채취한 토양의 수분함유량은 각각 12.79%와 22.87%로 측정되었다. 수분함량이 17.6% 이상이며 28% 미만인 토양을 점토로 정의[10]하므로 농업용로봇시험장 토양은 점성사로 필드로봇시험장 토양은 건사로 분류할 수 있다.

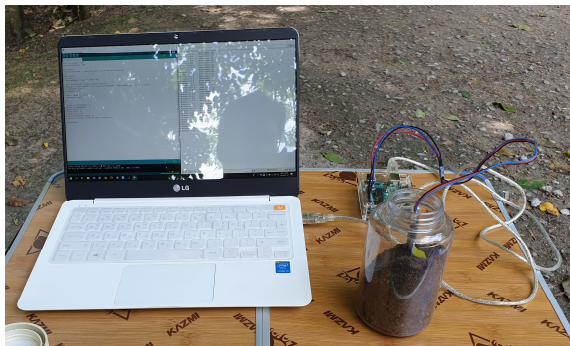


그림 3. 토양 수분함유량 측정 시스템  
Fig. 3. Soil moisture content measurement system

토양과 같은 분체의 유동성은 미끄럼 마찰과 구름 마찰에 큰 영향을 받는다. 토양의 마찰 특성은 미시적 입자 단위에서 실험적으로 측정하기 어려우므로 거시적 분체 단위에서 측정한 안식각으로 마찰계수를 역으로 추정하는 방법이 널리 활용되고 있다[4][5]. 안식각은 자연적으로 붕괴한 토사면이 갖는 경사각으로 정의되며 입자 간 마찰이 커질수록 안식각이 증가하는 경향성을 보인다.

그림 4는 채취한 토양을 깔때기를 통해 유동시켰을 때 형성된 흩더미를 보여준다. 흩더미 사면 5곳에서 측정한 경사 각도의 평균값으로 안식각을 산출한 결과 필드로봇시험장과 농업용로봇시험장에서 채취한 토양의 안식각은 각각 29°와 54°로 측정되었다.



그림 4. 필드로봇시험장(좌)과 농업용로봇시험장(우)로부터 채취한 토양의 흩더미 형상

Fig. 4. Heap images of soil samples collected from field robot test site(left) and agricultural robot test site(right)

토질 특성 측정 결과를 표 1에 정리하였다. 토양의 압축성과 수분함유량 측정 결과를 종합해 볼 때 필드로봇시험장과 농업용로봇시험장에서 채취한 토양은 각각 압축성이 낮은 건사와 압축성이 높은 점성사로 분류할 수 있다.

표 1. 토질 측정 결과

Table 1. Soil characterization results

| Collection site | Autonomous vehicle test site   | Agricultural robot test site    |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Compressibility | 10.0%                          | 46.7%                           |
| Humidity        | 12.79%                         | 22.87%                          |
| Angle of repose | 29°                            | 54°                             |
| Type            | Slightly compressible dry soil | Highly compressible sticky soil |

### III. 이산요소 입자 모델링 및 시뮬레이션

디지털 트윈과 같은 가상 시뮬레이션 환경에서 실제와 유사한 물리적 거동을 보이는 비포장 노면을 생성하기 위하여 앞서 수집한 토질 정보를 기초로 토양 입자를 모델링하고 검증 시뮬레이션을 수행하였다. 입자 모델링과 검증 시뮬레이션을 위해 상용 DEM 소프트웨어인 Altair EDEM과 내장된 토양 모델 데이터베이스인 Soils Starter Pack을 활용하였다. 토양 입자의 모델링과 검증 시뮬레이션은 다음과 같은 순서로 진행하였다.

첫째, 시뮬레이션을 수행을 위해 필요한 CAD 형상 및 치수를 결정하고 구성 요소의 재료 물성 정보를 수집한다.

둘째, 토양의 압축 및 응집 특성에 기초하여 토양 모델 데이터베이스로부터 토질별 접촉 모델, 입자 형상 및 모델 인자 기준값을 불러온다.

셋째, 기본 모델 인자 중에서 입자 크기와 형태는 검증 시뮬레이션의 계산 비용을 고려하여 수정하고 표면 에너지는 측정된 수분 함유량을 반영하여 설정한다. 마지막으로 안식각 측정 시뮬레이션을 수행하고 해석 결과가 실험 결과를 정확히 예측할 수 있도록 필요 시 입자 간 응집력을 추가로 보정한다.

### 3.1 토양 입자 이산요소 모델링

그림 5는 그림 4의 흙더미 형성에 실제 사용된 깔때기와 플레이트의 CAD 모델과 치수 및 형상 정보를 나타낸다. 토양 입자가 상단부에서 45° 기울어진 상태로 0.63m/s의 출구 속도로 생성되어 중력에 의해 낙하하고 깔때기의 출구를 통해 하단 플레이트로 유동하여 쌓이게 된다.

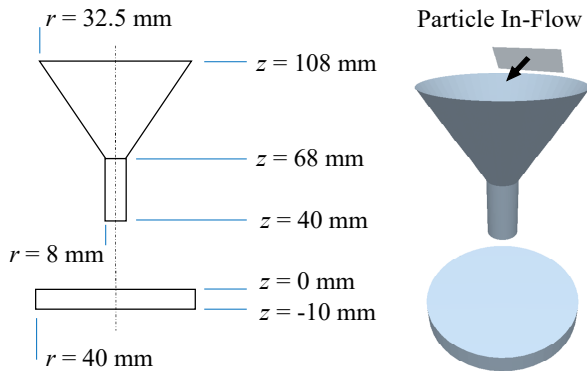


그림 5. CAD 모델과 치수 및 형상 정보  
Fig. 5. CAD model and dimensions for angle of repose analysis

표 2의 토양 접촉 모델 분류 기준에 따라 필드로봇시험장에서 채취한 압축성이 낮은 건사는 Case 1에 해당하는 Hertz-Mindlin(HM) 모델[6]을 채택하였고 농업용로봇시험장에서 채취한 압축성이 높은 점성사는 Case 4에 해당하는 Endiburgh Elasto-Plastic Adhseion (EEPA)모델[11]을 선택하였다. HM 모델은 압축에 따른 반발력만을 계산할 수 있지만 EEPA 모델은 압축에 따른 영구변형까지 예측할 수 있는 것이 특징이다.

표 2. EDEM soils pack 데이터베이스에 따른 모델 분류  
Table 2. Contact model classification in EDEM soils Starter Pack database

| Case | Compressible | Sticky | Contact model           |
|------|--------------|--------|-------------------------|
| 1    | No           | No     | Hertz-Mindlin           |
| 2    | No           | Yes    | Hertz-Mindlin with JKR  |
| 3    | Yes          | No     | Hysteretic spring       |
| 4    | Yes          | Yes    | Elasto-Plastic adhesion |

필드로봇시험장에서 채취한 토양(Soil A), 농업용로봇시험장에서 채취한 토양(Soil B), 깔때기, 그리고 하단 플레이트에 대해서 DEM 해석 수행에 필요한 재료 상수를 표 3에 나타냈다. Soils Starter Pack에서 두 가지 토질에 대해 제공하는 기본 인자 중에서 밀도, 탄성 계수, 푸아송 비는 수정 없이 사용하였고 깔때기와 하단 플레이트의 물성은 폴리카보네이트의 재료 상수를 채용하였다.

표 3. DEM 해석을 위한 재료 상수  
Table 3. Material properties for DEM analysis

| Property            | Soil A & Soil B | Funnel & plate |
|---------------------|-----------------|----------------|
| Density (kg/m3)     | 2,600           | 4,000          |
| Shear modulus (MPa) | 10              | 1,000          |
| Poisson's ratio     | 0.25            | 0.25           |

표 4는 DEM 시뮬레이션을 위한 접촉 모델 인자를 나타낸다. 반발계수, 미끄럼 마찰계수, 구름 마찰계수는 토양 데이터베이스 정보와 같은 값을 사용하였으나 응집력을 고려하기 위한 표면 에너지는 점성사에 대해서 1.0 J/m<sup>2</sup>로 재설정하였다.

평균 입도가 매우 작은 경우 계산 자원의 한계를 고려하여 입자의 크기를 적정 수준까지 크게 하여 입자 총개수는 낮추되 마찰계수 등 인자를 보정하여 실제 입자 거동과 유사하도록 이산요소 모델을 도출하는 것이 일반적이다[1]-[8]. Soils Starter Pack에서 제공하는 토양 입자의 기본 형상은 3개의 동일한 구로 이루어진 클러스터 형태이며 입자의 크기는 약 60mm이다. 이와 같은 클러스터 구조는 단일 구형 구조와 비교해 볼 때 입자의 비구형성에 따른 구름마찰 저항을 보다 사실적으로 구현할 수 있다.

표 4. DEM 시뮬레이션을 위한 접촉 모델 인자

Table 4. Contact model constants for DEM simulations

| Parameter                          | Soil A-<br>Soil A | Soil A-<br>Funnel | Soil B-<br>Soil B | Soil B-<br>Funnel |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Contact model                      | HM                | HM                | EEPA              | HM                |
| Coefficient of static friction     | 0.2               | 0.5               | 0.2               | 0.5               |
| Coefficient of rolling friction    | 0.1               | 0.05              | 0.1               | 0.05              |
| Coefficient of restitution         | 0.55              | 0.5               | 0.55              | 0.5               |
| Surface energy [J/m <sup>2</sup> ] | 0.0               | 0.0               | 1.0               | 0.0               |
| Contact plasticity ratio           | -                 | -                 | 0.7               | -                 |
| Slope exponent                     | -                 | -                 | 1.5               | -                 |
| Tensile exponent                   | -                 | -                 | 5.0               | -                 |
| Tangential stiff multiplier        | -                 | -                 | 0.0286            | -                 |

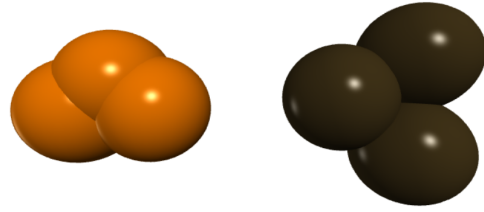


그림 6. 3개의 구로 구성된 건사(좌) 및 점성사(우) 형상  
Fig. 6. 3-Sphere models for non-compressible dry soil (left) and compressible sticky soil(right)

비구형 입자와 같은 부피를 갖는 구형 입자의 반지름으로 정의되는 평균 유효 반지름(Mean effective radius)은 Soil A와 Soil B가 각각 0.641mm와 0.708mm이다. 토양 입자의 비균일성 입도를 고려하기 위해 DEM 해석 시 생성되는 토양 입자는 평균 유효 반지름 대비 반지름의 표준 편차가 0.052인 정규 분포를 따르도록 설정하였다.

본 연구에서는 60mm의 입자 크기를 채택하는 대신 1mm 이내로 실측된 측정된 토양 입자의 크기를 약 2배 정도 확대하여 2mm 이내로 재설정하였다. 입자의 크기를 크게 하여 계산 효율성은 높여 그림 5와 같은 분체 유동 및 안식각 측정 시뮬레이션 환경에서 발생할 수 있는 유동 막힘 현상을 회피하기 위함이다.

표 5는 두 종류의 토양 입자에 대한 비구형 클러스터 생성 시 사용한 형상 인자를 나타내며 그림 6은 토양 입자의 형상 모델링 결과를 보여준다.

표 5. 토양 입자 3차원 형상 모델링을 위한 인자  
Table 5. Parameters for 3-sphere modeling of soils

| Soil type | Element  | Position |        |        | Radius    |           |
|-----------|----------|----------|--------|--------|-----------|-----------|
|           |          | X (mm)   | Y (mm) | Z (mm) | Mean (mm) | Std. dev. |
| Soil A    | Sphere 1 | -0.310   | -0.069 | 0.0    | 0.5       | 0.052     |
|           | Sphere 2 | 0.316    | -0.062 | 0.0    | 0.5       | 0.052     |
|           | Sphere 3 | -0.016   | 0.171  | 0.0    | 0.5       | 0.052     |
| Soil B    | Sphere 1 | 0.000    | 0.000  | 0.0    | 0.5       | 0.052     |
|           | Sphere 2 | -0.432   | 0.042  | 0.0    | 0.5       | 0.052     |
|           | Sphere 3 | 0.241    | 0.416  | 0.0    | 0.5       | 0.052     |

### 3.2 안식각 측정 시뮬레이션

안식각 측정을 위한 DEM 수치 해석 시 입력한 시뮬레이션 설정값을 표 6에 정리하였다. Soil A와 Soil B에 대해 그림 6과 같은 형상의 비구형 클러스터 입자를 각각 40,000개와 20,000개 생성하였다. 3초간의 입자 유동 및 더미 형성 시뮬레이션을 위해 5 $\mu$ s의 시간 간격으로 총 60만 회의 수치 적분을 수행하였고 결과 후처리 및 분석을 위해 초당 100 프레임의 빈도로 데이터를 파일로 저장하였다.

표 6. DEM 수치 연산을 위한 설정값  
Table 6. Parameters for DEM numerical computation

| Parameter                      | Soil A    | Soil B    |
|--------------------------------|-----------|-----------|
| Number of particles            | 40,000    | 20,000    |
| Total particle mass (g)        | 114.4     | 77.4      |
| Domain size (mm <sup>3</sup> ) | 81×81×132 | 81×81×132 |
| Cell size (mm)                 | 2.0       | 1.055     |
| Number of cells                | 110,946   | 766,584   |
| Integration method             | Euler     | Euler     |
| Time step ( $\mu$ s)           | 5.0       | 5.0       |
| Simulation time (s)            | 3.0       | 3.0       |
| Number of iterations           | 600,000   | 600,000   |

그림 7은 두 종류에 토양에 대한 깔때기 유동 및 더미 형성 시뮬레이션 데이터의 후처리 결과를 1초 간격으로 보여준다. 건사인 Soil A는 응집력이 작아서 하단 플레이트에서 전단 방향으로 유동이 잘 일어나지만, 점성사인 Soil B는 전단 방향으로의 유동성이 상대적으로 낮은 대신 입자 간 응집 현상이 뚜렷이 나타나 Soil A보다 더 높은 더미를 형성하였다.

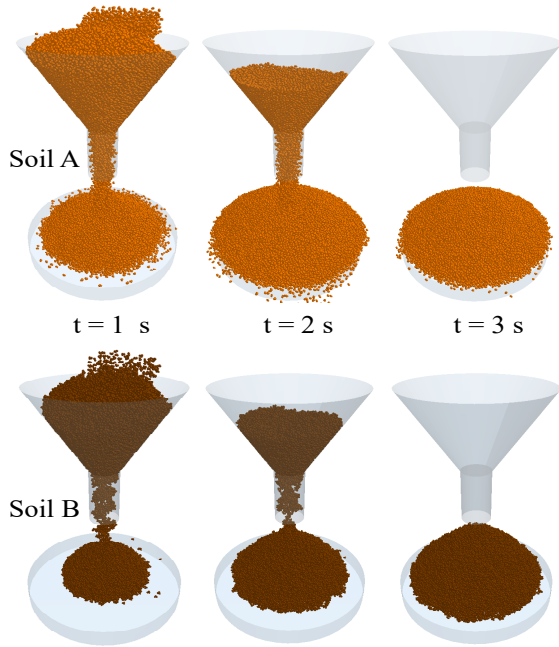


그림 7. 두 종류의 토양에 대한 DEM 시뮬레이션 결과  
Fig. 7. DEM simulation results for two types of soils

그림 8은 사태가 더 이상 발생하지 않는 안정된 토양 더미의 하단 측면에서부터 경사면을 따라 접선을 그려 안식각을 측정된 결과를 보여준다. 필드 로봇시험장에서 채취한 토양(Soil A)의 안식각 예측값은 30°로 실측값 29°와 3.4% 차이를 보이고 농업용로봇시험장에서 채취한 토양(Soil B)의 안식각 계산 결과는 52°로 실험값 54°와 3.7%의 작은 오차를 보였다. 이로써 본 연구를 통해 제시한 토양의 이산요소 모델의 신뢰성을 확보하였다.

그림 9는 안식각 시뮬레이션을 통해 보정된 토양 입자 모델을 적용하여 비압축성 건사 노면 위의 탐사 로버와 압축성 점성사로 구성된 비포장도로용 타이어의 디지털 트윈의 환경을 구축한 예시로서 향후 각종 수송기계 및 부품의 설계와 주행 성능 평가를 위한 연구개발에 활용할 수 있다.

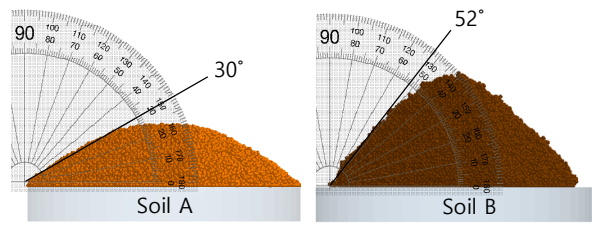


그림 8. 안식각 계산 결과  
Fig. 8. Computed angle of repose values

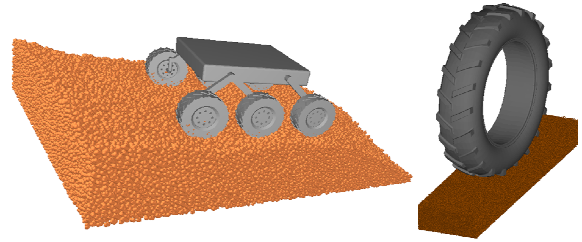


그림 9. 디지털 트윈 예시: 비압축성 건사 환경에서의 로버(좌), 압축성 점성사 환경에서의 타이어(우)  
Fig. 9. Digital twin examples: rover on the dry soil(left) and tire on the compressible(right)

#### IV. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 비포장 노면을 디지털 트윈 환경으로 구현하기 위한 선행 연구로써 수집된 토질 특성 정보를 바탕으로 토양 입자의 분체역학적 모델을 제시하고 이산요소법 안식각 측정 시뮬레이션을 통해 모델의 신뢰성을 검증하였다. 응집력과 압축을 에서 뚜렷한 차이를 보이는 비압축성 건사와 압축성 점성사를 대상으로 토양 샘플 채취, 안식각 측정, 토양 습도 데이터 획득, 현미경 관찰을 통한 입도 관찰 등 토질 정보를 수집하였다. 이산요소법 상용 소프트웨어에서 제공하는 토양 데이터베이스 정보로부터 입자의 크기와 응집력을 보정하고 이산요소 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 깔때기 유동 및 토양 더미 생성을 통한 안식각 측정 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통한 안식각 계산 결과가 건사와 점성사 모두 오차 범위가 3.7%로 매우 정확히 예측되었다. 최종 보정된 토양 모델을 적용하여 예시용 디지털 트윈 환경을 구축할 수 있었다. 디지털 트윈 환경에서 비포장도로 주행용 수송기계 또는 부품의 가상 설계와 주행 성능 테스트를 수행하는 연구가 향후 과제의 주제가 될 수 있다.

## References

- [1] W. Smith, D. Melanz, C. Senatore, K. Iagnemma, and H. Peng, "Comparison of discrete element method and traditional modeling methods for steady-state wheel-terrain interaction of small vehicles", *Journal of Terramechanics*, Vol. 56, pp. 61-75, Dec. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2014.08.004>.
- [2] Y. Du, J. Gao, L. Jiang, and Y. Zhang, "Development and numerical validation of an improved prediction model for wheel-soil interaction under multiple operating conditions", *Journal of Terramechanics*, Vol. 79, pp. 1-21, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.04.005>.
- [3] M. Jiang, Y. Dai, L. Cui, and B. Xi, "Experimental and DEM analyses on wheel-soil interaction", *Journal of Terramechanics*, Vol. 76, pp. 15-28, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2017.12.001>.
- [4] M. Ucgul, J. M. Fielke, and C. Saunders, "Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil", *Biosystems Engineering*, Vol. 121, pp. 105-117, May 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.02.005>.
- [5] T. Roessler and A. Katterfeld, "DEM parameter calibration of cohesive bulk materials using a simple angle of repose test", *Particuology*, Vol. 45, pp. 105-115, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.08.005>.
- [6] K. J. Son, "A discrete element model for the influence of surfactants on sedimentation characteristics of magnetorheological fluids", *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 30, No. 1, pp. 29-39, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1007/s13367-018-0004-z>.
- [7] K. J. Son, "A numerical study of the influence of rheology of cohesive particles on blade free planetary mixing", *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 199-209, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1007/s13367-018-0020-z>.
- [8] K. J. Son, "A numerical study of the influence of operating conditions of a blade free planetary mixer on blending of cohesive powders", *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 31, No. 1, pp. 15-23, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1007/s13367-019-0002-9>.
- [9] A. Soleimanbeigi, T. Edil, and C. Benson, "Evaluation of fly ash stabilization of recycled asphalt shingles for use in structural fills", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 95-104, Jan. 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000558](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000558).
- [10] H. Kim, D. Son, S. Hur, M. Rho, K. Jung, J. Park, J. Rhee, and D. Lee, "Comparison of wetting and drying characteristics in differently textured soils under drip irrigation", *Journal of Bio-Environment Control*, Vol. 18, No. 4, pp. 309-315, Oct. 2009.
- [11] S. C. Thakur, J. P. Morrissey, J. Sun, J. F. Chen, and J. Y. Ooi, "Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model", *Granular Matter*, Vol. 16, pp. 383-400, May 2014. <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0506-4>.

## 저자소개

### 손 권 중 (Kwon Joong Son)



2003년 3월 : 포항공과대학교

기계공학과(공학사)

2005년 5월 : 카네기멜런대학교

기계공학과(공학석사)

2009년 5월 : 텍사스대학교오스틴

기계공학과(공학박사)

2010년 8월 ~ 2015년 4월 : 두바이

아메리칸대학교 기계공학과 부교수

2015년 9월 ~ 현재 : 홍익대학교 기계정보공학과 부교수

관심분야 : 컴퓨터 시뮬레이션, 스마트 제조, 디지털

트윈, 머신비전, 전산역학