

이산요소법을 활용한 점성토 환경에서의 토양 입자 크기에 따른 몰드보드 플라우 견인력 예측 시뮬레이션

Simulation study on draft force prediction of moldboard plow according to cohesive soil particle size using the discrete element method

김민승¹ · 배보민¹ · 정대위¹ · 안장현¹ · 최세오¹ · 성시원¹ · 김연수^{1*} · 김용주^{2,3}

Min Seung Kim, Bo Min Bae, Dae Wi Jung, Jang Hyeon An, Se O Choi,
Sang Hyeon Lee, Si Won Sung, Yeon Soo Kim, Yong Joo Kim

Received: 12 Aug. 2024, Accepted: 26 Aug. 2024

Key Words : Particle Size(입자크기) Discrete Element Method(이산요소법), Draft force(견인력), Soil-Tool Interaction(토양-작업기 상호작용).

Abstract: In the agricultural machinery field, load analysis is mostly done through field tests. However, field tests are time-consuming and costly. There are also limitations in test conditions due to weather conditions. To overcome these environmental limitations, research on load analysis through simulation in a virtual environment is actively being conducted. This study aimed to select the most appropriate soil particle size for modeling by analyzing the effect of soil particle size on the prediction of draft force of the implement using simulation and soil particle modeling in a virtual environment with the discrete element method (DEM) software. The accuracy was verified by simulating the draft force for the same moving speed by soil particle size. For soil particle modeling, DEM soil modeling was performed by designing soil property measurement procedure. Soil particle correction was performed with a virtual vane shear test. Average DEM simulation results showed an error of 27.39% (19.43~40.66%) compared to actual measured data. The possibility of improvement was confirmed through additional research. Results of this study provide useful information for selecting soil particle size in soil modeling using DEM from the perspective of agricultural machinery research.

기호 설명

F_n : Normal force

f_{hys} : Hysteretic spring force

f_{td} : Tangential damping force

F_t : Contact tangential force

τ_i : Rolling friction torque

1. 서론

미국 농무부 경제연구소(USDA/ERS)의 “세계 식량 안보평가”(international Food Security Assessment, IFSA)에 따르면 2022년부터 2032년까지 10년 동안의 전 세계 곡물 수요는 2022년 10억 톤 수준에서 2032년까지 연평균 2.5%씩 증가하여 14억 톤을 넘어설 것으로 전망되었다. 그중 아시아 권역의 곡물 수요는 가장 빠르게 증가하고 있으며, 곡물 수요 증가율이 1.7%로 전망되는 가운데 곡물 생산량은 연평균 1.3%

* Corresponding author: yskim23@pusan.ac.kr

1 Department of Bio-Industrial Machinery Engineering, Pusan National University, Milyang 50463, Korea

2 Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

3 Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Copyright © 2024, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

씩 증가할 것으로 예상하였다. 이 관점에서 볼 때 늘어나는 곡물 수요를 맞추기 위해서는 곡물 생산을 증가시키는 것이 필요하다. 농업 생산량의 증가를 위해서는 농업기계화 증대 및 효율적인 작업을 위한 농작업 성능 최적화 기술이 요구된다.

농업기계는 주로 비정형 토양환경에서 운용되며, 포장된 도로와 달리 토양환경에서는 작업 부하에 영향을 미치는 많은 요소가 존재한다. 농작업시 농기계에서 발생하는 작업부하는 토양의 물성, 작업속도, 경운깊이 등 다양한 요소들에 영향을 받는다.¹⁾ 농기계 개발에 있어서 작업 부하의 분석은 중요한 요소이다. 농작업시 발생하는 작업부하는 트랙터에 부착된 작업기 및 주행 트랙터의 작업 성능과 내구수명, 연료소모에 큰 영향을 미친다²⁾. 또한 작업부하의 분석은 작업조건에 따른 기계의 반응 데이터를 통해 안전사고를 예방할 수 있는 설계 개선사항의 도출이 가능하다. 따라서 농기계의 성능을 확보하려면 제품의 설계 및 개선 과정에서 다양한 작업환경과 작업조건에 따른 작업부하에 대한 고려가 반드시 필요하다.³⁾ Min⁴⁾은 토양의 물리적 특성이 트랙터의 부하에 미치는 영향을 평가하였고, 그 결과 함수율(Water content), 토성(Soil texture), CI(Cone Index) 순으로 강한 상관관계가 나타났다고 보고하였다.

작물생산을 위한 다양한 농작업 중 몰드보드 플라우는 가장 소요 동력이 크고 토양저항이 큰 작업으로 농기계 부하 분석연구에 많이 활용된다.⁵⁾⁶⁾⁷⁾ Baek²⁾은 데이터 수집장치 (CRONOS compact CRC-400-11, IMC, Germany)를 이용하여 주요 농작업인 쟁기 경운, 로타리 경운, 베일러 작업 등을 선정하여 78 kW 급 농업용 트랙터의 엔진 부하율을 분석하였고, 또 다른 연구에서는 몰드보드 플라워의 경운 깊이가 11 cm에서 23 cm로 증가할 때 엔진의 요구 동력이 13% 증가하는 것으로 나타났다.⁸⁾ 이러한 기존의 부하계측 시스템을 구성하는데는 다양한 센서들이 필요하다.⁹⁾ 고가의 센서로 인해 구축하는데 많은 비용이 소요되며, 주기적인 관리가 필요하다. 또한 농작업에서의 작업 부하요인 중 하나인 토양의 물성은 외부요인인 기상 환경에 영향을 많이 받으며¹⁰⁾, 측정을 위한 실험에 있어서 실제 작업을 수행할 토양과 노동력 확보의 어려움과 동시에 시간적인 제약이 존재한다. 이러한 현장 계측 시험에 대한 대안으로 최근에는 수치해석 시뮬레이션을 기반으로 부하를 예측하는 연구들이 전 세계적으로 수행되고 있다¹¹⁾¹²⁾¹³⁾. Bae¹⁾는 이산요소법(Discrete Element Method, DEM)과 다물

체동역학(Multi Body Dynamics, MBD)의 연성해석 모델을 통한 로타리 경운작업시 토양입자의 표면 에너지에 따른 PTO(Power Take Off) 소요동력 예측 모델 개발을 위한 연구를 통해 토양입자의 표면에너지와 소요동력간의 상관관계에 대한 분석을 하였고, Li¹⁴⁾은 DEM-MBD의 연성해석 모델을 통해 감자 수확기의 벨트-로드형 분리 메커니즘의 최적화된 구조와 운영 매개변수를 도출하였다.

수치해석 방법 중 하나인 이산요소법(DEM)은 입자 상호작용을 모델링하고 시뮬레이션하는 수치적 방법으로, 다수의 개별 입자로 구성된 시스템의 거동을 분석하는데 사용된다. DEM을 이용한 가상환경 시뮬레이션은 실험조건에서 시뮬레이션을 통해 여러 프로토타입 제작, 테스트 및 평가에 소모되는 시간을 줄여 설계 및 제조 프로세스 속도를 높이는 기능으로 인해 중요하게 쓰이고 있으며, 유한요소법(FEM) 및 전산유체역학(CFD)과 같은 다른 수치해석 방법과 결합하여 더 복잡한 시스템에 대한 모델링이 가능하다.¹⁵⁾¹⁶⁾ DEM 시뮬레이션 연구에서 토양 입자 접촉 모델의 선결과 토양입자의 크기는 시뮬레이션의 정확도에 영향을 주는 요인이다.¹⁷⁾ Kim¹⁸⁾은 실제 농경지의 계측을 기반으로 농경지 토양의 압축성, 응집성을 반영하기 위해 탄성과 소성의 특성을 동시에 나타내는 토양입자 접촉모델인 EEPA(Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion)를 사용하여 토양을 모델링하고, 시뮬레이션하여 견인력 예측 연구를 가상환경에서 진행하였고, Wang¹⁹⁾은 토양 입자의 크기가 이산요소법 시뮬레이션의 토양 상호작용에 미치는 영향을 실측 데이터를 기반으로 토양 접촉 모델인 Hertz-Mindline with bonding(HMB)모델을 사용하여 토양 입자를 모델링 한 뒤 3 mm에서 19 mm 까지의 다양한 토양 입자크기에 대해서 토양 절단력과 토양 교란 데이터를 예측하였고, 그 결과 전체 시뮬레이션의 정확성과 시간 소모를 고려하였을 때 7 mm의 토양입자 크기가 가장 적합하다고 보고하였다.

본 연구는 계측한 토양 모델의 주요 물성 파라미터를 활용하여 시뮬레이션 상에서 토양입자의 사이즈별로 실제 토양을 재현하였고, 몰드보드 플라워의 실측 작업부하 데이터와 시뮬레이션 예상 데이터와의 비교 검증을 통해 압축성과 응집성을 재현하는 접촉 모델인 EEPA 모델에서의 입자 크기가 몰드보드 플라워의 시뮬레이션 부하 예측에 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 토양 모델링 시뮬레이션 시나리오 구성

DEM 시뮬레이션을 통한 견인력 예측 연구를 위해서는 시뮬레이션 상에서 토양의 입자를 재현하기 위한 실제 토양의 주요 물성들이 필요하다.

모델링을 위한 토양 물성 계측은 충남 당진 교토리 간척논에서 정형화된 샘플링 방법 중 하나인 균일 그리드 샘플링 방법²⁰⁾을 사용하여 각 지점을 10개로 나누어 진행되었다. 실제 토양은 깊이에 따라 물성이 달라진다²¹⁾, 경작 깊이에 따른 토양의 물성 차이를 시뮬레이션에 반영하기 위해서 각 계측 지점마다 2개의 층(Layer 1: 0~100 mm, Layer 2: 100~200 mm)으로 토양을 나누고 각 층별로 토양 채취 및 베인 전단 시험을 10회 실시하였다. (Fig. 1 참조) 토양의 채취 및 전단시험은 토양 채취 장치(DIK-1815, Daiki Rika Kogyo Co., Ltd., Akagidai, Japan)와 링 타입의 베인 전단 시험기(DIK-5503, Daiki Rika Kogyo Co., Ltd., Saitama, Japan)를 활용하여 측정하였다.

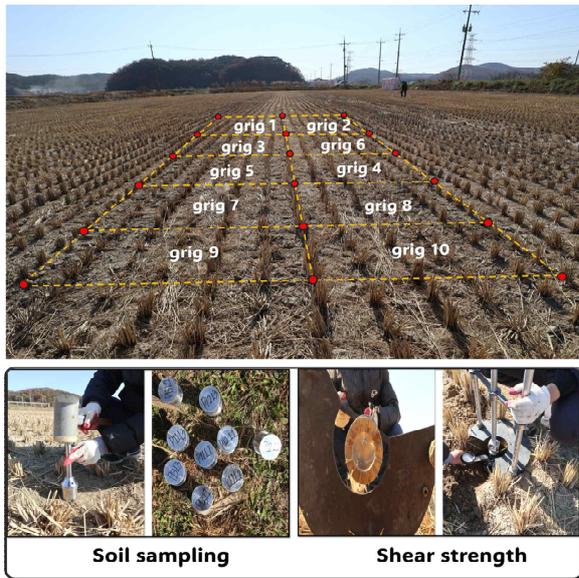


Fig. 1 Soil sampling method

실제 토양 입자를 가상환경에서 모델링하기 위해 채취한 토양 시료를 사용하여 토양의 체적 밀도 (Bulk density), 소성지수(Plastic Index), 함수율, 액성한계(Liquid Limit), 소성한계(Plastic Limit) 등을 다양한 방법을 통해 분석하였다. 토양의 함수율은 오븐 건조법²²⁾을 따라 110°C에서 24시간을 건조 후 측정하였으며, 소성지수를 결정하기 위해서 전동식 액성한계 시험기(HJ-4105, Heungjin, Gimpo, Korea)를 이용

하여 ASTM D4318의 규정으로 샘플링 된 토양의 액성한계와 소성한계를 각각 구하였다. 최종적으로 미국 농무부(USDA)의 토질 분류 기준에 따라서 비중계법을 이용한 분석으로 각 필드의 토성을 결정하였다.²³⁾²⁴⁾

2.2 이산요소법을 이용한 가상환경 점성토 모델링

이산요소법은 다수의 작은 입자들의 거동과 상호작용을 계산하는 수치해석 방법으로 주로 입상물질, 예를 들어 흙, 모래, 자갈 등과 같은 물질의 역학적 거동을 시뮬레이션하는데 사용된다. 이산요소법 시뮬레이션에서 입자의 크기는 전체 시뮬레이션의 시간과 분석데이터의 정확도에 영향을 주는 주요 인자이다. 기존의 입자의 크기가 시뮬레이션의 미치는 영향에 관한 연구 결과에 따르면, 정확한 시뮬레이션 데이터를 얻기 위한 입자의 크기는 반경 4~15 mm 사이로 제안한다.¹⁹⁾ 본 연구에서는 토양입자의 크기가 시뮬레이션 데이터에 미치는 영향을 알아보기 위해서 토양입자의 크기를 4 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm, 12 mm로 선정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 토양 모델링 과정은 Fig. 2 와 같다.

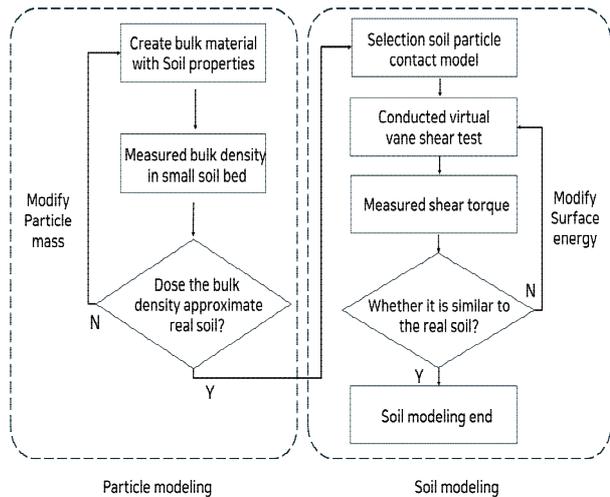


Fig. 2 Soil modeling method

Fig. 2의 토양입자 모델링 방법을 보면 시뮬레이션 상의 토양 입자의 질량은 계측된 체적밀도를 기반으로 계산하여 보정된다. 그 이유로는 가상의 환경에서 진행되는 토양 모델링의 경우 토양입자들의 생성시간과 입자들간의 거동을 계산하는 속도를 고려하여 실제 토양에 비해 큰 입자들로 시뮬레이션을 구성한다. 이러한 방법으로 만들어진 토양 입자는 실제 토양 입자들에 비해 더 많은 공극이 발생한다.

공극으로 인한 체적밀도의 감소를 실측된 토양의 체적밀도를 기반으로 보정하는 과정은 시뮬레이션의 정확성을 위해서 필요한 작업이다. 시뮬레이션을 위한 컴퓨터의 사양은 Table 1, 시뮬레이션을 위한 토양모델링에 사용된 주요 파라미터의 값은 Table 2와 같다.

Table 1 Computer specifications used for simulation

Item	Specification
GPU	RTX4090 @ 2580GHz
Processor	i9-13900k @ 5.8 GHz
Memory	128 GB
Operation System	Window 11

Table 2 Key particle model parameters of EDEM software

Parameters	Value	Resource	
Particle size (mm)	3,4,5,7,9,12	Selected	
Poisson's ratio of soil	0.32	Tekeste et al. ²⁵⁾	
Poisson's ratio of steel	0.3	Budynas ²⁶⁾	
Soil shear modulus	6×10^7	Wang et al. ¹⁹⁾	
Steel shear modulus	7.9×10^{10}	Archer et al. ²⁷⁾	
Coefficient of restitution	soil - soil	0.55	soil starter pack
	soil - steel	0.5	soil starter pack
Coefficient of static friction	soil - soil	0.48	Kim et al. ¹⁸⁾
	soil - steel	0.32	McKyes ²⁸⁾
Coefficient of rolling friction	soil - soil	0.25	Wang et al. ¹⁹⁾
	soil - steel	0.14	Wang et al. ¹⁹⁾

2.2.1 토양 접촉 모델의 선정

점토 함량이 높은 토양은 모래 토양과 비교할 때 수분 보유 함량이 더 높으며²⁹⁾, 무농작업용 토양 또는 수도작(논)의 경우는 대부분 점토가 풍부한 토양 환경을 갖고 있다. DEM에서 이러한 토양 환경을 정확하게 구현하기 위해서는 토양의 특성을 고려해야 한다. 점착성 토양은 응집력이 높아 입자 간의 상호작용이 복잡하게 일어나며, 일반적인 이산요소법 모델로는 정확히 재현하기 어렵다. JKR(Johnson-Kendall-I-Roberts) 모델과 DMT(Derjaguin-Muller-Toporov) 모델은 접촉 역학에서 중요한 두 가지 이론으로, 각각의 적용 조건과 계산 방법에 차이가 있다. Fig 3는 JKR 모델과 DMT 모델의 접촉 역학을 설명하는 단면도이다.

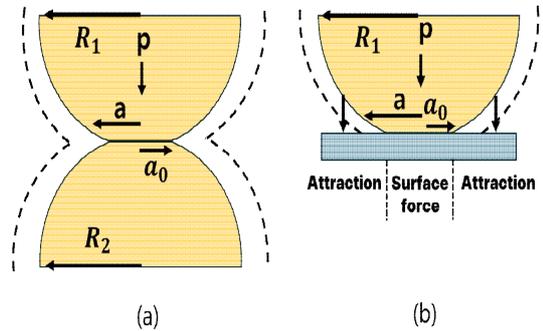


Fig. 3 Cross-sectional illustration of the contact between two elastic for (a) JKR, (b) DMT

JKR 모델의 경우 큰 접촉 반경과 강한 접착력 조건에 적합하며, DMT 모델은 작은 접촉 반경과 약한 접착력 조건에 적합하다. 하지만 앞선 두 모델의 경우 탄성-소성 접촉 변형과 접착력 또는 응집력의 구성요소에 대한 고려가 부족하다. 이 연구에서는 DEM을 통한 토양 입자 모델링에 점착성 토양 입자의 복잡한 상관관계를 처리할 수 있도록 설계된 EEPA 접촉 모델을 선정하였다.

EEPA 모델은 입자간의 접촉력을 보다 정교하게 모델링 할 수 있으며, 이는 토양과 입자간의 상호작용을 정확히 재현하는데 있어 효과적이다.³⁰⁾ EEPA 모델의 수직항력은 식 (1)을 통하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_n = (f_{hys} + f_{nd})u \tag{1}$$

식 (1)에서 F_n 은 전체 접촉 수직항력 (N), f_{hys} 는 히스테레틱 스프링 강성 힘 (N), f_{nd} 는 감쇠력 (N), u 는 접촉점에서 입자의 중심을 향하는 단위 법선 벡터이다. EEPA모델의 히스테레틱 스프링 힘 (Hysteretic Spring Force)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_{hys} = \begin{cases} f_0 + k_1 \delta^p & \text{If } k_2(\delta^v - \delta_p^v) \geq k_1 \delta^v \\ f_0 + k_2(\delta^v - \delta_p^v) & \text{If } k_1 \delta^v > k_2(\delta^v - \delta_p^v) - k_{adh} \delta^v \\ f_0 - k_{adh} \delta^v & \text{If } -k_{adh} \delta^v \geq k_2(\delta^v - \delta_p^v) \end{cases} \tag{2}$$

식 (2)에서 f_0 는 초기 접촉력, δ 는 중복도(입자간의 변형 정도), δ_p 는 소성 변형 후의 중복도, k_{adh} 는 점착 강성 계수, k_1 은 하중이 처음 가해질 때의 초기 하중 경로의 강성 계수, k_2 는 재적재 경로의 강성 계수이며, 하중 제거 후 다시 하중을 가할 때의 접촉 강성을 나타낸다. 이는 입자들이 소성변형 후 얼마나 회복되는지를 결정하고, 전체 시스템의 응집력

과 구조적 안정성에 영향을 미친다. EEPA 모델의 감쇠력(f_{td})은 (3)식을 통해서 구할 수 있다.

$$f_{td} = \beta_n \nu_n \tag{3}$$

$$\beta_n = \sqrt{\frac{4m^*k_1}{1 + (\frac{\pi}{\ln e})^2}} \tag{4}$$

여기서 ν_n 은 상대 접선 속도, β_n 은 대시팟 계수이며 다음과 같이 계산된다. EEPA 모델의 접촉 접선력(F_t)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_t = f_{ts} + f_{td} \tag{5}$$

여기서 f_{ts} 는 접선방향 스프링 힘 (N), f_{td} 는 접선방향 감쇠력 (N)이다. EEPA 모델의 구름 마찰토크 τ_i (Nm)는 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$\tau_i = -\mu_t f_{hys} R_i \omega_i \tag{6}$$

여기서 μ_t 는 구름마찰 계수, R_i 는 접촉점에서부터 입자의 중심까지의 거리 (mm), ω_i 는 접촉점에서 물체의 단위의 각속도 벡터이며 입자 간의 힘을 계산하는 식 (1)-(6)을 통해서 접선력과 수직항력으로 구성된 접촉력이 모델링 된 토양입자의 질량, 입자의 중첩 거리, 입자의 크기, 입자의 영률, 마찰계수, 전단계수, 복원계수의 영향력을 받는 함수임을 알 수 있다. 접촉 모델의 주요 파라미터(Table 3)는 소프트웨어에 기본적으로 포함되어있는 토양 물성별 기본 모델링 (soil starter pack) 중 압축성과 점착성을 모두 가진 토양의 파라미터를 참고하여 설정하였고, Surface energy는 Fig. 2의 토양 모델링 방법과 같이 실제 배인 전단 시험 결과인 전단 토크를 기준으로 보정하였다.

Table 3 Modeling parameters of contact model (in EDEM)

Parameters	Value
Constant pull-off force	0
Contact adhesion energy	Calibrated
Tensile exponent	5
Tangential stiff multiplier	0.28571
Slope exponent	1.5
Contact plasticity ratio	0.75

2.3 트랙터-작업기 토양 부하계측 시스템

이번 연구에서 부하계측을 위해 선정 된 작업기는 몰드보드 플라우(WJSP-6S, Woongjin, Gimje, Korea)이며 작업기의 상세 제원은 Table 4와 같다.

Table 4 Specifications of the mouldboard plow actually worked in this study

Item	Specification
Product name	WJSP-6S
Manufacturing company	WoongJin
Type	Moldboard plow
Length×width×height (mm)	1,930×1,800×1,235
Rake angle (deg)	30.76
Share length (mm)	360
Tillage width (mm)	270
Maximum tillage depth(mm)	Up to 200
Required power (kW)	40-52
Shear form	Pointed
Coulter type	plain coulter
Coulter diameters (mm)	340
Number of furrows	3

3. 실험결과 및 고찰

3.1 토양 물성 계측 분석 결과

현장에서 측정한 토양층에 따른 토양의 물리적, 기계적 물성의 분석 결과는 Table 5와 같이 분석되었으며, 각 분석 결과는 10개의 위치에서 측정된 값들의 평균으로 계산되었다.

Table 5 Measured on field soil properties according to soil layer

Properties	Layer 1	Layer 2
Water content (%)	33.20	26.47
Bulk density (g/cm^3)	1.546	1.809
Dry density (g/cm^3)	1.146	1.420
Shear torque (Nm)	5.75	8.15

3.2 이산요소법을 활용한 점탄성 토양 모델링 및 보정

이산요소법을 활용한 토양 모델링의 과정중 시작 단계는 벌크 단위의 토양입자를 생성하는 것이다. 체적밀도는 토양-작업기의 상호작용을 분석하는데 있

어 영향을 주는 주요 파라미터이다. 때문에 실측 데이터와 유사한 견인력 예측을 얻기 위해서 토양분석을 통해 계측된 체적밀도를 기준으로 사이즈 별로 토양입자의 질량을 보정 하였고, 보정을 통한 결과는 Table 6, 7을 통해 확인할 수 있다. 초기 시뮬레이션을 통해 얻은 체적밀도의 오차는 작게는 14.047% 크게는 39.842%로 측정되었으며 보정을 통해 오차를 0.01~0.94%까지 줄일 수 있었다.

Table 6 Calibration results of bulk density (layer 1)

Particle size (mm)	Procedure	Particle mass (kg)	Bulk density (kg/m ³)		Calibration error (%)
			Simulated	Measured	
3	Initial	0.0003	1329.52	1546.8	14.05
	Calibrated	0.0258	1545.54		0.081
4	Initial	0.0006	1270.75	1546.8	17.85
	Calibrated	0.0008	1540.85		0.39
5	Initial	0.0013	1253.09	1546.8	18.99
	Calibrated	0.0016	1543.16		0.24
7	Initial	0.0036	1181.22	1546.8	23.64
	Calibrated	0.0047	1549.21		0.16
9	Initial	0.0077	1142.53	1546.8	26.14
	Calibrated	0.0104	1536.63		0.66
12	Initial	0.0183	1090.31	1546.8	29.51
	Calibrated	0.0258	1546.95		0.01

Table 7 Calibration results of bulk density (layer 2)

Particle size (mm)	Procedure	Particle mass (kg)	Bulk density (kg/m ³)		Calibration error (%)
			Simulated	Measured	
3	Initial	0.0003	1367.97	1809.88	24.42
	Calibrated	0.0304	1807.76		0.12
4	Initial	0.0007	1336.38	1809.88	26.16
	Calibrated	0.0009	1811.72		0.10
5	Initial	0.0014	1272.9	1809.88	29.67
	Calibrated	0.0018	1807.09		0.15
7	Initial	0.0037	1220.66	1809.88	32.56
	Calibrated	0.0052	1803.37		0.36
9	Initial	0.0079	1293.01	1809.88	28.56
	Calibrated	0.0112	1815.8		0.33
12	Initial	0.0186	1088.79	1809.88	39.84
	Calibrated	0.0304	1792.81		0.94

체적밀도 보정 후에는 실제 토양에서의 링 베인 전단 시험을 통해 얻은 전단 토크를 기반으로 토양 입자 간 Surface energy를 입자 크기별로 보정하였다. 보정된 결과는 Table 8, 9과 같다.

Table 8, 9에서 Surface energy는 토양의 물리적, 화학적 특성을 결정하는 중요한 요소로 이는 토양 입자 간의 상호작용, 수분 함량, 토양 구조 등에 영향을 준다.

Table 8 Calibration results for shear torque of soil block using field measured actual values. (layer 1)

Particle size (mm)	Procedure	Surface Energy (j/m ²)	Shearing Torque (Nm)		Calibration error (%)
			Simulated	Measured	
3	Initial	100	5.72	5.75	0.52
	Calibrated	100	5.72		
4	Initial	100	7.63	5.75	24.64
	Calibrated	60	5.71		
5	Initial	100	5.64	5.75	1.95
	Calibrated	105	5.78		
7	Initial	100	5.64	5.75	1.95
	Calibrated	100	5.64		
9	Initial	100	4.71	5.75	22.08
	Calibrated	110	5.63		
12	Initial	100	6.47	5.75	11.13
	Calibrated	80	5.83		

Table 9 Calibration results for shear torque of soil block using field measured actual values. (layer 2)

Particle size (mm)	Procedure	Surface Energy (j/m ²)	Shearing Torque (Nm)		Calibration error (%)
			Simulated	Measured	
3	Initial	100	7.24	8.15	12.57
	Calibrated	132	8.15		
4	Initial	100	8.3	8.15	1.81
	Calibrated	80	8.22		
5	Initial	100	5.57	8.15	46.32
	Calibrated	175	8.13		
7	Initial	100	6.69	8.15	21.82
	Calibrated	180	8.19		
9	Initial	100	6.83	8.15	19.33
	Calibrated	106	8.04		
12	Initial	100	8.07	8.15	0.99
	Calibrated	120	8.12		

EDEM 소프트웨어를 통한 시뮬레이션에서 실제와 같은 크기와 재질의 전단 시험기를 모델링하여 실제 측정 방법과 똑같이 환경을 설정한 후(Fig. 4) 발생

하는 전단 토크를 측정하였다. Surface energy에 따른 전단 토크의 오차는 기존 0.52~46.32%에서 보정을 통해 0~2.13%까지 줄일 수 있었다.

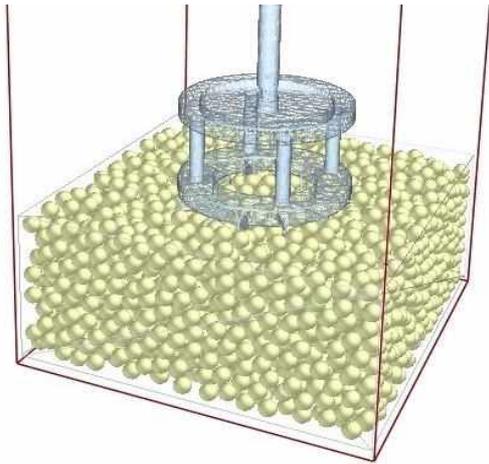


Fig. 4 Shear torque calibration using virtual vane shear testing

3.3 시뮬레이션 기반 가상 견인력 예측 정확도 분석

1:1 비율의 실제와 동일한 몰드보드 플라우의 형상 및 크기를 고려하여 시뮬레이션을 위한 토양 필드의 크기를 5000×2500×300 mm (length×width×depth)로 설정하였고 토양층을 실측했던 방법과 같이 layer 1, layer 2로 나누어 시뮬레이션을 위한 토양 필드를 생성하였다. 시뮬레이션을 위한 평균 경심 깊이는 15 cm, 작업 기어 단수는 가장 빠른 작업 단수인 M3로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 각 토양입자 사이즈별 시뮬레이션을 통한 견인력 예측 결과는 Table 10과 같다.

Table 10 Result of draft force predict simulation according to particle size (Case A)

Tillage depth (cm)	Gear selection	Travel speed (km/h)	particle size (mm)	Draft force (kN)		Calibration error (%)
				Simulated	Measured	
15	M3	5.66	4	14.62	11.61	25.93
			5	13.77		18.61
			7	12.16		4.74
			9	12.63		8.79
			12	12.18		4.91

시뮬레이션 결과 토양입자의 크기별 견인력 예측 오차는 4.74~25.93%로 낮은 오차를 보였으나 토양 입자 간의 높은 점착성으로 인하여 토양 필드가 분

리되는 현상(Fig. 5)이 발생하여 이 데이터 결과를 작업 부하 측정관점 (Case A)로 지정하고, 올바른 토양 경운 관점 (Case B)에서의 견인력 예측을 위해서 토양입자의 Surface energy를 재보정하였다.

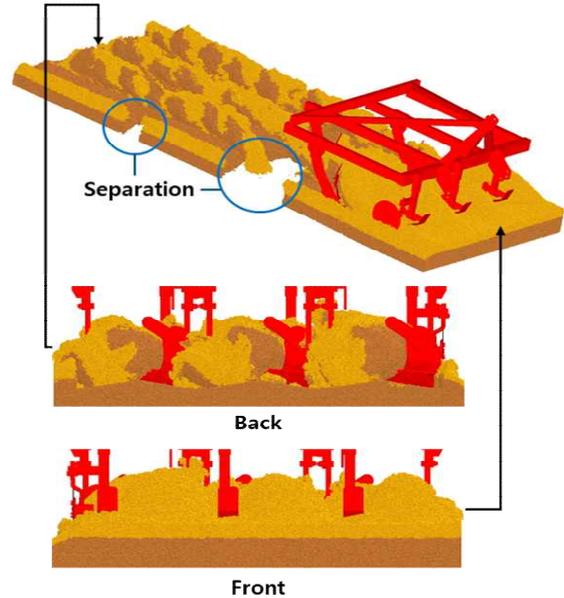


Fig. 5 Soil separation during simulation (Case A)

가상환경에서 전단 측정 시험기의 관입 깊이를 다르게 하여 토양입자 Surface energy의 재보정 결과(Table 8, 9)를 통한 토양 경운 작업 관점 견인력 예측 결과 (Case B)는 Table 11과 같다.

Table 11 Result of draft force predict simulation according to particle size (Case B)

Tillage depth (cm)	Gear selection	Travel speed (km/h)	particle size (mm)	Draft force (kN)		Calibration error (%)
				Simulated	Measured	
15	M3	5.66	4	5.18	11.61	55.38
			5	7.66		34.02
			7	7.12		38.67
			9	8.12		30.06
			12	5.48		52.80

시뮬레이션 결과 기존 토양입자의 뭉침 및 토양 필드의 파괴 현상이 일어나는 일 없이 경운작업이 정상적으로 진행되었으며 (Fig. 6) 예측 오차는 30.06~55.38%로 Case A에 비해서 높은 오차율을 보

였다. 이는 토양입자의 Surface energy를 보정 하는 과정에서 프로그램 환경에서 모델링 된 전단 시험기를 가상의 토양에 관입하는 과정이 필요하다. 이때 관입의 정도를 사람이 주관적으로 판단하기 때문에 관입 정도의 사소한 차이가 최종적으로 측정되는 전단토크에 크게 영향을 준 것으로 보인다.

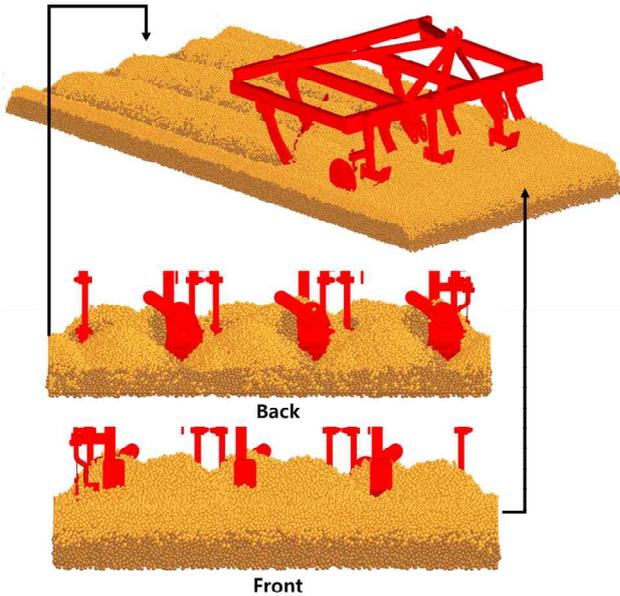


Fig. 6 DEM simulation for draft force prediction (Case B)

시뮬레이션에서 토양 경운 상태를 비교한 자료는 다음과 같다. (Fig. 7) 비교 결과 Case A에 비해 Case B가 토양의 뭉침이나 분리 없이 경운작업이 잘된 것을 확인할 수 있다.

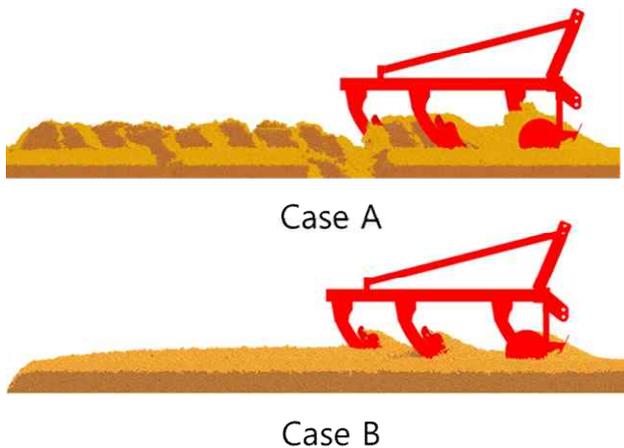


Fig. 7 Comparison of DEM simulation results

두 가지의 시뮬레이션 조건 Case A, Case B의 예측 정확성 평균이 70% 이상을 충족하는 입자 크기

를 선정하였고, 분석 결과 전체 시뮬레이션의 시간과 예측 정확도를 고려했을 때 점성토의 가상환경 구현 및 시뮬레이션의 효율성을 위해 추천하는 토양 입자 크기는 9 mm로 나타났다. (Fig. 8)

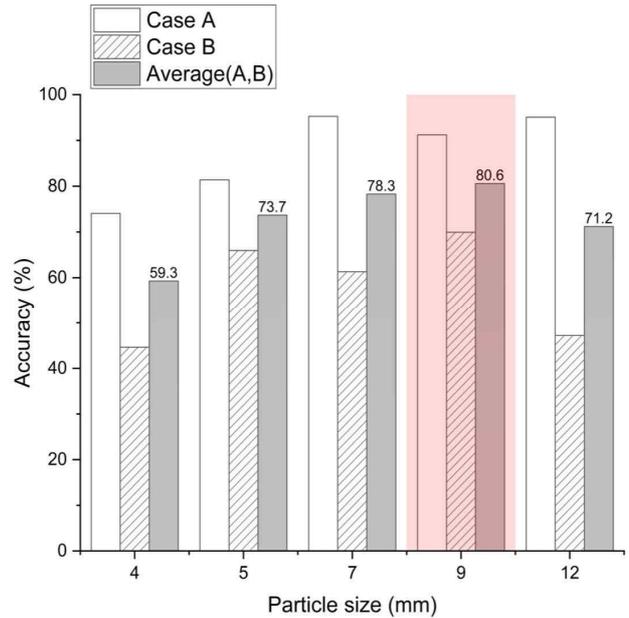


Fig. 8 Results of condition-dependent draft force prediction analysis

4. 결론

본 연구에서는 이산요소법을 활용한 점성토 환경에서의 몰드보드 플라우 견인력 예측 시뮬레이션에 있어서 가상 토양환경에서 토양입자의 크기가 견인력 예측에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 가상환경에서 점성토의 모델링은 사질토와 달리 압축성과 점착성을 고려하는 다양한 모델링 매개변수가 존재하기 때문에 보다 다양한 토양 물성 계측이 필요하다. 본 연구에서는 기존의 가상환경 기반 토양 모델링에서 최적의 토양입자 크기 선정 연구를 기반으로, 선행 연구와 다른 토양입자 접촉모델인 EEPA 모델을 선정하여 토양입자의 크기가 견인력 예측에 미치는 영향에 대해 가상필드 실험을 진행한 결과 예측된 견인력은 모델링 된 토양의 파괴를 고려하지 않았을 때 실제 계측된 견인력 대비 10.49%(4.74~25.93%) 이내의 오차를 나타냈다. 실제 경운작업을 한 땅의 경우 토양의 뭉침 및 파괴가 없었기에 토양 필드의 파괴를 방지하고자 가상 토양입자의 Surface energy를 재보정한 시험에서는 계측된 견인력 대비 42.19%(30.06~55.38%)의 오차를 보이며 기존의 실험 대

비 토양의 파괴는 없어졌으나 오차율이 높아진 결과를 보였다. 두 가지 실험의 경우를 모두 상정했을 때 가상환경에서의 토양입자 모델링에 가장 효율적인 토양입자의 크기는 전체 시뮬레이션 시간과 견인력 예측 정확도를 고려하면 토양입자의 모델링에 있어서 9 mm의 입자 크기가 가장 적합한 것으로 판단되며 다른 토양입자 접촉모델을 사용한 기존의 연구와 비슷한 경향을 보였다.

토양입자의 재보정 과정의 경우 가상환경에서의 전단 시험기의 관입 깊이를 다르게 하여 토양입자의 Surface energy를 보정 하였는데, 시험기의 관입 깊이가 조금만 달라져도 측정되는 전단토크의 값의 차이가 크게 나타나며 관입의 정도를 주관적으로 판단하기 때문에 시뮬레이션을 통한 부하 예측 및 가상 실험방법에 대한 기초연구가 필요한 것으로 판단된다. 향후 기초연구를 통한 시뮬레이션 방법의 정형화 및 정확도가 향상되면 EEPA 모델을 사용한 점탄성 토양의 모델링은 부하 예측 및 소요 동력 분석 등 다양한 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) Bae, Bo Min, et al. "Prediction of Draft Force of Moldboard Plow according to Travel Speed in Cohesive Soil using Discrete Element Method." *Journal of Drive and Control* 20.4 (2023): 71-79.
- 2) Baek, Seung Min, et al. "Analysis of engine load factor for a 78 kW class agricultural tractor according to agricultural operations." *Journal of Drive and Control* 19.1 (2022): 16-25.
- 3) Cho, S. J., et al. "Development of the 80-kW test tractor for load measurement of agricultural operations." *Journal of Drive and Control* 19.4 (2022): 46-53.
- 4) Min, Yi-Seo, et al. "The Influence of Soil Physical Properties on the Load Factor for Agricultural Tractors in Different Paddy Fields." *Agriculture* 13.11 (2023): 2073.
- 5) Naderloo, L., et al. "Tillage depth and forward speed effects on draft of three primary tillage implements in clay loam soil." *Journal of Food, Agriculture and Environment* 76.3 (2009): 382-385.
- 6) Azimi-Nejadian, Hadi, Seyed Hossein Karparvarfar, and Mojtaba Naderi-Boldaji. "Weed seed burial as affected by mouldboard design parameters, ploughing depth and speed: DEM simulations and experimental validation." *Biosystems Engineering* 216 (2022): 79-92.
- 7) Lee, Si-Eon, et al. "Analysis of engine load factor for agricultural cultivator during plow and rotary tillage operation." *Journal of Drive and Control* 20.2 (2023): 31-39.
- 8) Kim, Yeon-Soo, et al. "Power transmission efficiency analysis of 42 kW power agricultural tractor according to tillage depth during moldboard plowing." *Agronomy* 10.9 (2020): 1263.
- 9) Koo, Young Mo. "PTO torque and draft analyses of an integrated tractor-mounted implement for round ridge preparation." *Journal of Biosystems Engineering* 47.3 (2022): 330-343.
- 10) Bryk, Maja, et al. "Evaluation of soil structure and physical properties influenced by weather conditions during autumn-winter-spring season." *Soil and Tillage Research* 170 (2017): 66-76.
- 11) Kim, Jeong-Hun, Seok-Joon Hwang, and Ju-Seok Nam. "Simulation study on the safety of a fastening device of agricultural by-product collector." *Journal of Drive and Control* 20.3 (2023): 42-49.
- 12) Baghooee, Melika, et al. "DEM Simulation for Seeding Performance of a Slotted Roller Seed-Metering Device for Planting Maize in Laboratory Condition." *Journal of Biosystems Engineering* 48.4 (2023): 428-436.
- 13) Rahmanian-Koushkaki, Hossein, Mahmood Mahmoodi-Eshkaftaki, and Hadi Azimi-Nejadian. "Simulation of draught force during chisel ploughing using discrete element method." *Journal of Biosystems Engineering* 47.2 (2022): 152-166.

- 14) Li, Yuyao, et al. "DEM-MBD coupling simulation and analysis of the working process of soil and tuber separation of a potato combine harvester." *Agronomy* 12.8 (2022): 1734.
- 15) "Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review" *Agriculture* 2021, 11(5), 425
- 16) Liu, Hanru, et al. "Prediction of the non-uniform drying of wet grain in a fluidised-bed based on a modified CFD-DEM drying model." *Biosystems Engineering* 236 (2023): 103-119.
- 17) Wang, Xin, et al. "Numerical Simulation and Experimental Study of Corn Straw Grinding Process Based on Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method." *Agriculture* 14.2 (2024): 325.
- 18) Kim, Yeon-Soo, et al. "DEM simulation for draft force prediction of moldboard plow according to the tillage depth in cohesive soil." *Computers and Electronics in Agriculture* 189 (2021): 106368.
- 19) Wang, Xuezheng, et al. "Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations." *Biosystems Engineering* 182 (2019): 138-150.
- 20) Gill, William R., and Glen E. Vanden Berg. *Soil dynamics in tillage and traction*. No. 316. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1967.
- 21) Wu, Yan, et al. "Farmland Shelterbelt Changes in Soil Properties: Soil Depth-Location Dependency and General Pattern in Songnen Plain, Northeastern China." *Forests* 14.3 (2023): 584.
- 22) O'Kelly, Brendan C., and Vinayagamoothy Sivakumar. "Water content determinations for peat and other organic soils using the oven-drying method." *Drying Technology* 32.6 (2014): 631-643.
- 23) Ditzler, G. "USDA Handbook 18. Government Printing Office." Washington DC, USA (2017).
- 24) Kim, Lee-Yul, et al. "A Precision Test of Hydrometer Method for Determining Soil Texture." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 39.5 (2006): 315-320.
- 25) Tekeste, Mehari Z., et al. "Discrete element modeling of cultivator sweep-to-soil interaction: Worn and hardened edges effects on soil-tool forces and soil flow." *Journal of terramechanics* 82 (2019): 1-11.
- 26) Budynas, Richard Gordon, and J. Keith Nisbett. *Shigley's mechanical engineering design*. Vol. 9. New York: McGraw-Hill, 2011.
- 27) Archer, R.R. et al., "An introduction to Mechanics of Solids", Tata McGraw-Hill Education, New York, 2012.
- 28) McKyes, E. & Ali, O. S., "The cutting of soil by narrow blades", *Journal of Terramechanics* 14, pp. 43-58, 1977.
- 29) Bolotov, A. G., E. V. Shein, and S. V. Makarychev. "Water retention capacity of soils in the Altai Region." *Eurasian Soil Science* 52 (2019): 187-192.
- 30) EDEM. *EDEM 2020 Documentation; DEM Solutions*: Edinburgh, UK, 2020.