

직접전단시험과 이산요소법에 기반한 전단 시뮬레이션과의 비교

정성현*, 손정현**,#

*부경대학교 대학원 기계설계공학과, **부경대학교 기계설계공학과

A Comparison of the Direct Shear Test and Shear Simulation Based on the Discrete Element Method

Sung-Heon Jung*, Jeong-Hyun Sohn**,#

*Graduate School of Mechanical Design Engineering, PKNU,

**Department of Mechanical Design Engineering, PKNU

(Received 26 November 2019; received in revised form 23 January 2020; accepted 24 January 2020)

ABSTRACT

An important factor of rough road modeling is analyzing the shear behavior properties of the rough road. These properties influence the drawbar pull of the tool when interacting with the soil used in agriculture. Furthermore, shear behavior properties are important because sinkage and shear stress are generated when wheels drive on rough roads. In this study, we performed a direct shear test to investigate the shear behavior properties of soils and compare with the direct shear simulation; shear force derived by the coupled analysis of discrete element method; and multi-body dynamics. Soil contact parameters were measured in a wheel and soil contact simulation followed by comparison of the simulated and experimentally measured shear force.

Key Words : Direct Shear Test(직접 전단 시험), Discrete Element Method(이산요소법), Computer Simulation(컴퓨터 시뮬레이션), Contact(접촉)

1. 서 론

이산요소법을 이용하여 야지노면을 모델링하기 위해서는 토양의 전단 거동 특성을 파악해야 한다. 토양의 전단 거동특성은 주로 농업에서 경작 또는 파종을 위한 도구를 설계할 때 사용된다^[1]. 토양내부 마찰 및 응집력을 포함한 토양의 전단 특성은 토양과 농업에 사용되는 공구의 상호작용에 있어

서 공구의 견인력에 큰 영향을 준다. 휠이 토양에서 주행함에 있어 침하와 전단응력이 발생하기 때문에 토양의 전단특성이 중요하다. 토양의 전단 특성은 시험 또는 컴퓨터 시뮬레이션으로 진행될 수 있다. 토양의 특성은 날씨 혹은 주변 환경에 많은 영향을 받으며, 물성의 변화가 쉽게 일어나기 때문에 시험보다는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 전단 거동 특성 파악에 유리하다. 이산요소법은 이러한 토양이 비선형적인 특성을 쉽게 표현 가능한 수치해석법으로 이를 통한 연구가 최근에 많이 수행되고 있다^[2].

Corresponding Author : jhsohn@pknu.ac.kr

Tel: +82-051-629-6166, Fax: +82-051-629-6150

이산요소법은 1979년 Cundall에 의해 처음 제안되어졌다^[3]. 이후 정형화된 수치방법을 이용하여 상호 입자간의 접촉 판별 법 및 충돌 시 상호 침투량에 따른 접촉력 계산에 관심을 둔 연구가 이루어졌다^[4]. 최근에 이산요소법은 토양의 특성 연구에 많이 사용되고 있으며, 전단 시물레이션을 통해 토양의 전단 특성을 도출하고 있다. Colin Thornton과 Ling Zhang은 직접 전단 시험과 2차원에서 이산요소법을 이용하여 직접 전단 시물레이션을 비교하였다^[5]. Catherine O' Sullivan과 Liang Cui는 3차원에서 이산요소법을 이용한 직접 전단 시물레이션을 수행하였으며 3차원에서의 직접 전단 시물레이션을 통해 토양의 내부 응력에 대한 3차원 특성을 보여주었다^[6]. Dirk Kadau는 Itasca Consultin Group Inc.에서 개발한 상용 소프트웨어인 PFC^{2D}(Particle Flow Code)를 이용하여 전단 시물레이션을 수행하였으며 시물레이션을 통해 입자 탄성이 응력과 체적 변형에 미치는 영향을 제시하였다^[7]. 이후 Mohammad A. Sadek은 PFC^{3D}(Particle Flow Code)를 이용하여 직접전단 시물레이션과 시험을 비교하여 접촉 계수를 결정하는 연구를 수행하였다^[8].

본 연구에서는 흙과 토양의 접촉 시물레이션에서 흙과 토양입자간 접촉 파라미터를 결정하기 위해 시험 대상 토양 샘플을 이용하여 직접 전단 시험을 실시하였다. 직접 전단 시물레이션을 위해 이산요소법을 기반으로 한 자체 프로그램을 사용하였다^[9]. 전단 시 발생하는 전단력을 이산요소법과 다물체동역학의 연성해석을 통해 도출 하였다. 시물레이션에서 도출된 전단력과 시험에서 측정된 전단력을 비교하여 해석의 타당성을 검증 하였다.

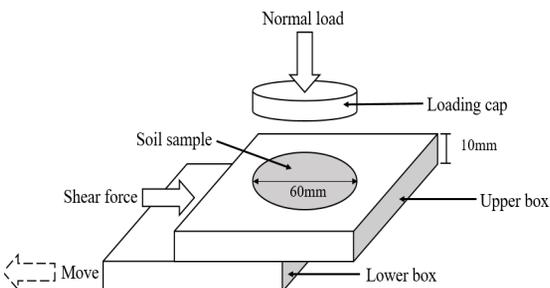


Fig. 1 Direct shear test of schematic

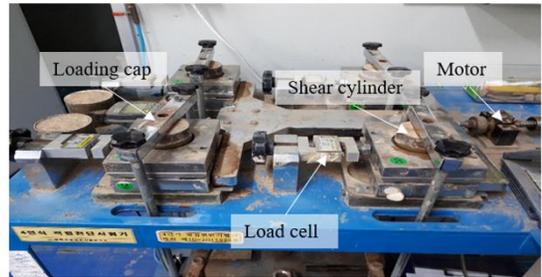


Fig. 2 Direct shear test apparatus

2. 직접 전단 시험

2.1 직접 전단 시험 구성

직접 전단 시험은 상하로 분리된 전단 상자 속에 시료를 넣고 수직하중을 가한 상태로 수평력을 가하여 전단 상자 상하단부의 분리면을 따라강제로 파괴를 일으켜서 전단력을 측정하는 시험이다. 전단 시험의 개념도는 Fig.1에 나타내었으며 토양시료를 담아서 전단을 할 수 있는 전단 실린더, 토양에 수직응력을 발생 시킬 수 있는 가압 판(loadig cap), 전단을 일으키는 모터로 구성되어 있다. 토양샘플의 지름은 60mm이며 실린더의 상단부와 하단부로 나뉘어져 있으며 높이는 10mm이다. 실제 시험에 사용된 직접 전단 시험의 장비는 Fig 2와 같다. 직접 전단 시험에서는 5.86kg의 수직하중에 대해서 시험을 수행 하였다.

2.2 직접 전단 시험 방법

직접 전단 시험은 시료 설치, 가압판 설치, 하중 재하, 직접 전단 시험 총 4가지 단계로 구성되어있다. 시료 설치의 시험에 사용 될 토양 샘플을 전단 실린더에 설치한다. 시험에 사용될 토양은 벌크 밀도(bulk density)를 계산하여 설치되어야 한다. 벌크 밀도는 모래와 같은 분체의 밀도를 나타내는 밀도이며 입자 개개의 밀도가 아닌 입자가 모여 있을 때의 밀도를 나타내는 밀도 이다. 벌크 밀도는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\rho_b = \frac{M_p}{V_t} \quad (1)$$

시험에서 사용된 토양의 벌크 밀도는 1426이다.

시료 설치 후 가압판을 설치하고 수직 하중을 가할 하중을 재하 한 뒤, 모터를 이용하여 직접전단 시험을 수행 하였다. 직접 전단 시험에 사용된 모터의 전단 속도는 1mm/min의 속도로 전단을 수행 하게 되며 시험소요 시간은 10분으로 전단된 길이는 10mm이다. 전단 시 발생하는 토양의 전단력 측정은 전단 방향으로 작용하는 상부 실린더의 힘이 토양에 발생하는 전단력이므로 상단 실린더에 부착 되어있는 로드 셀(load cell)을 통해 전단력을 측정 하였다.

3. 이산요소법을 이용한 직접 전단 시뮬레이션

3.1 이산요소법

이산요소법을 이용한 토양 입자들의 거동은 상호간의 법선, 접선 접촉력, 점성력(cohesion)이 작용하여 결정된다. 본 연구에서는 1882년에 헤르츠(Hertz)에 의해 처음으로 제안된 헤르츠 접촉 모델을 이용하였다.^[10] 법선 접촉력은 헤르츠 스프링력, 감쇠력, 점성력으로 이루어지며 식 (2)과 같이 표현된다. Fig. 3 (a)에서 법선 스프링력과 감쇠력을 나타내었다. 스프링력은 식 (3)와 같으며 수직 스프링 계수는 식 (4)와 같이 영률, 입자의 반경, 침투량으로 표현된다.

$$F_{ni} = (f_{sn} + f_{sd} + f_{c/a}) \cdot n \quad (2)$$

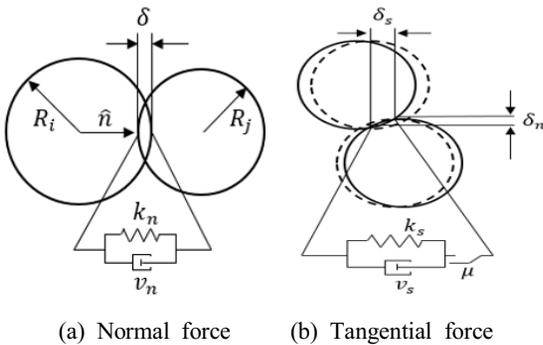


Fig. 3 Contact force of particles

$$f_{sn} = -k_n \delta_{ij}^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

$$k_n = -\frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \quad (4)$$

$$R^* = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \quad (5)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \lambda_i^2}{E_i} + \frac{1 - \lambda_j^2}{E_j} \quad (6)$$

$$f_{sd} = (c_n \Delta v_n) \cdot n \quad (7)$$

$$c_n = \sqrt{\frac{4k_n m}{1 + (\pi / \ln e)^2}} \quad (8)$$

입자의 반경으로 구해지는 R^* 과 영률과 포아송 비로 구해지는 E^* 는 식 (5)와 식 (6)으로 표현된다. 침투량은 $\delta_{ij} = R_i + R_j - |r_{ij}|$ 로 표현되며 $r_{ij} = r_i - r_j$ 는 두 입자 사이의 거리를 나타낸다. $n = r_{ij} / |r_{ij}|$ 은 법선단위 벡터를 나타낸다. 법선 방향의 감쇠력은 식 (7)로 나타내어지며 감쇠 계수와 상대속도로 표현되며 감쇠계수는 식 (8)과 같다. 식 (9)는 입자 사이의 상대속도를 나타내는 식이다. 점착력 모델은 가상의 점착 면적에 대해 힘을 계산하는 방식이며 식 (10)과 같다. 가상의 점착면적은 접촉 반경에 의해 결정이 되며 식 (10)으로 표현된다. 접촉반경은 식 (11)과 같이 수직력과 입자 반경, 영률에 의해 결정된다. 접선 접촉력은 Fig. 3 (b)로 표현 하였으며 식 (13)으로 계산된다^[10].

$$\Delta v_e = (v_j + \omega_j \times (-R_j \cdot n)) - (v_i + \omega_i \times (R_i \cdot n)) \quad (9)$$

$$f_{c/a i} = \xi \cdot A_{c/a i} \quad (10)$$

$$A_{c/a i} = \pi \cdot r_{c/a i}^2 \quad (11)$$

$$r_{c/a} = \left((3R^* |F_n|) / (4E^*) \right)^{1/3} \quad (12)$$

접선방향 스프링-댐핑력과 마찰력을 비교하여 최대 정지마찰력을 초과하지 않도록 작은 값으로 결정한다. 접선방향 스프링계수와 댐핑 계수는 $k_t = n \times k_n$ 와 $c_t = n \times c_n$ 같이 수직방향의 스프링, 댐핑 계수의 일정 비로 정해진다. 접선 속도는 상대속도로 계산되며 식 (14)와 같다. 접선 방향의 단위 벡터는 식 (15)와 같이 나타낸다. 접선 방향의 침투량은 입자의 접촉 시간인 t_0 부터 접촉이 끝난 시점인 t 까지의 거리를 계산하며 식 (16)과 같다.

$$F_{t,i} = \min \{ k_t \delta_t + c_t \Delta v_t \cdot s ; \mu_s |F_{n,i}| \} \cdot s \quad (13)$$

$$\Delta v_t = \Delta v_c - (\Delta v_c \cdot n) \cdot n \quad (14)$$

$$s = \frac{\Delta v_t}{|\Delta v_t|} \quad (15)$$

$$\delta_s = \int_{t=t_0}^{t=t} v_t dt \quad (16)$$

3.2 직접 전단 시뮬레이션

직접 전단 시뮬레이션은 가압판, 상단 실린더와 하단 실린더로 총 3개의 바디를 다물체 동역학을 기반으로 모델링 하였다. 가압판, 실린더의 물성치는 Table 1과 같다.

실린더의 상부와 하부는 시험과 동일하게 내부 지름 60mm, 높이는 10mm로 모델링 하였다. 전단 시뮬레이션에서 사용된 입자는 이산요소법을 기반으로 하였다. 입자의 반지름은 1mm이며 모델링 한 입자 수는 8천개이다. 사용된 입자의 물성치는

Table 1 Material properties of boundary

	Loading cap	Cylinder
Young's modulus (kPa)	2e+11	
Density (kg/m ³)	7850	
Poisson ratio	0.3	

Table 2 Particle properties

Radius (m)	0.001
Density(kg/m ³)	2861
Young's modulus	4.0E+7
Poisson's ratio	0.3
Particle number	8000

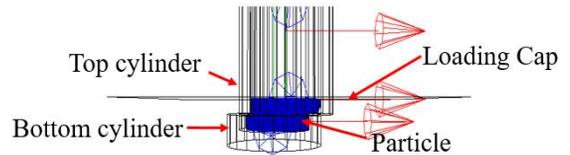


Fig. 4 Shear direct simulation

Table 2와 같다. 하부 실린더는 전단시키기 위해 병진 조인트로 구속 후 구동 구속을 하였다. 구동 구속은 전단방향으로 1mm/s의 속도로 구동 구속 하였다. 시뮬레이션에서 전단속도가 1mm/s보다 느린 속도로 전단을 하게 되어도 계산되는 전단력에는 큰 변화가 없으며 해석 시간은 증가하기 때문에 1mm/s로 모델링 하였다^[11]. 모델링된 직접 전단 시뮬레이션은 Fig. 4와 같다.

시뮬레이션 순서는 가압판의 수직 하중이 가해지고 난 뒤, 0.2초 동안 입자와 가압판, 입자와 실린더의 접촉을 통해 정상상태를 가지게 된다. 안정화를 시킨 뒤 하단부의 병진 조인트의 구동구속을 통해 1mm/s의 속도로 10초 동안 전단 시뮬레이션을 수행하였다.

4. 시험과 시뮬레이션 비교

토양을 전단 시켰을 때 발생하는 전단력에 대해서 시험과 시뮬레이션을 비교하였다. 시험에서 측정된 전단력과 실린더의 반력으로 계산된 힘의 그래프는 Fig. 5와 같다. 전단 길이가 5mm까지는 시뮬레이션에서 계산된 전단력과 시험에서 측정된 전단력이 유사한 것을 확인 할 수 있다. 이후 전단이 계속 발생 하면서 시뮬레이션에서는 전단력이 계속 상승한다. 시험에서는 약 4mm에서 최고 전단력이 발생하며 4mm전단 이후 토양 시료의

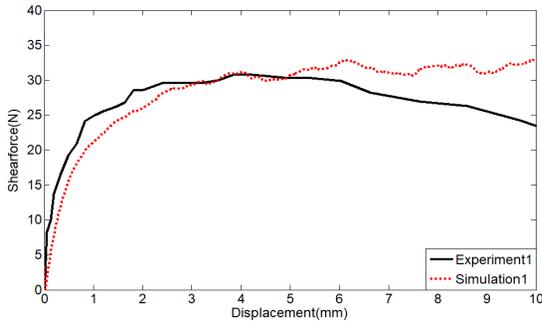


Fig. 5 Comparison of shear force

Table 3 Comparison of simulation vs experiment

	Experiment	Simulation	error(%)
Fracture force(N)	30.9	31.0	0.32
Gradient	19.2	15.3	-20
Average	24	27.9	16.2

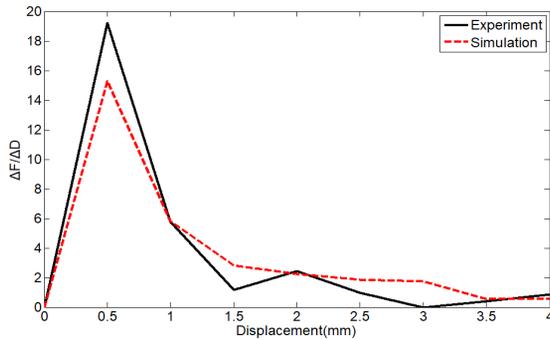


Fig. 6 Comparison of shear force gradient

파괴가 발생되어 전단력이 계속 감소하는 것을 확인할 수 있다. Table 3에 파괴 시 전단력, 평균 전단력, 초기 전단력 구배를 나타내었다. 시료 파괴 전 최대 전단력은 Fracture force에 나타내었으며 파괴 시 최대 전단력은 상대 오차(Relative error)는 0.32%이다. 상대오차는 식 (17)과 같이 계산하였다. 전단력의 구배는 시험에서 시료가 파괴된 시점인 4mm 까지 비교하였으며 Fig. 6에서 시험과 시뮬레이션에서 발생한 전단력구배를 나타내었다. 전단 증가량은 0.5mm에서 약 4(N/mm)의 차이를 보여주며, 이후 4mm까지 시험과 유사한 값을 보여준다. 전단 시작 후 시험의 전단력 구배

Table 4 Contact parameter of particles

Restitution (e)	0.8
Friction coefficient (μ)	0.2
Stiffness ratio (n)	1
Rolling resistance (μ_r)	1
Adhesion energy (Jm^2)	20

는 19.2이고 시뮬레이션의 전단력구배는 15.3으로 약 20(%)의 오차를 가진다. 시험에서 발생한 평균 전단력은 24N이고 시뮬레이션에서 발생한 평균 전단력은 27.9N이다. 상대오차는 약 16.2% 발생하여 시뮬레이션에서 계산된 전단력은 시험과 유사하다고 판단되며 시뮬레이션에 사용된 접촉 파라미터는 Table 4에 나타내었다. 시험과 시뮬레이션에서 발생하는 오차는 입자의 기하학적인 형상에 의한 힘의 차이로 판단된다.

$$\varepsilon = \frac{M-T}{T} \times 100 \quad (17)$$

이산요소법은 구형상의 입자를 가지고 실제 토양 입자는 다각형 형태로 이루어져있기 때문에 실제와 같은 기하학적인 형상에 의한 힘이 발생하지 못하여 시험과 시뮬레이션에서 전단력의 오차를 발생시키는 것으로 판단된다.

5. 결론

토양의 전단 거동특성은 견인력에 있어서 큰 영향을 주기 때문에 매우 중요한 요소이다. 전단 거동 특성을 파악하는 시험에서는 주로 직접 전단 시험이 일반적으로 사용된다. 본 연구에서는 직접 전단 시험과 시뮬레이션을 수행하고 예측된 전단력과 계산된 전단력을 비교하였으며 유사한 전단력을 발생시킬 수 있는 입자의 접촉계수를 결정하였다. 시험과 시뮬레이션에서 전단 길이가 4mm 전까지 발생한 전단력은 유사하게 발생하지만 4mm 이후에는 시험에서 시료가 파괴가 되어 전단력이 감소하여 차이가 점점 발생하였다. 실제 토양의 입자는 다각형 형태를 가지고 있어 기하학

적인 형상에 의한 힘이 발생한다. 이산요소법을 기반으로 한 수치해석법은 입자가 구 형상을 가지기 때문에 파괴이후 전단력과 초기 전단력의 증가량에서 차이가 발생하였다. 시험에서 발생한 평균 전단력은 24N이며 시뮬레이션에서 계산된 평균 전단력은 27.9N으로 상대오차가 약 16.2% 발생하였다. 평균 전단력에는 차이가 크게 발생하지 않기 때문에 휠과 토양의 접촉 파라미터 결정과 전단 거동 특성을 파악하는 기초 연구로 활용이 가능하다고 판단된다.

후기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. McKyes, E., Soil cutting and tillage, Elsevier Scientific Pub. Co., pp. 192~221, 1985.
2. Jerome, B. J., Anton, V. K., Paul, D., Karl, I., Carmine, S., Raymond, E. A., Jeffery, M., "Discrete element method simulations of Mars Exploration Rover wheel performance", Journal of Terramechanics, Vol. 62, pp. 31~40, 2015.
3. Cundall, P. A., Strack, O. D. L., "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", Geotechnique, Vol. 29, pp. 47~65, 1979.
4. Amlan Datta, B. K., Mishra, S. P., Das & A., "A DEM Analysis of Flow Characteristics of Noncohesive Particles in Hopper", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 23, No. 2, 195-202, 2008.
5. Thornton, C., Zhang, L., "Numerical Simulation of the Direct Shear Test", Chemical Engineering Technology, Vol. 26, Issue 2, pp. 153~156, 2003.
6. Catherine, O. S., Liang, C., "Three-dimensional discrete element simulations of direct shear tests", Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods, Proceedings of the 2nd International PFC Symposium, Japan, pp. 379~382, 2004.
7. Dirk, K., Dominik, S., Jorg, T., Dietrich, E. W., "Influence of particle elasticity in shear testers," Granular Matter, Vol. 8, Issue. 1, pp. 35~40, 2006.
8. Mohammad, A. S., Ying C., Jude, L., "Simulating shear behavior of a sandy soil under different soil conditions", Journal of Terramechanics, Vol. 48, pp. 451~458, 2011.
9. Park, S. W., Jun, C. W., Sohn, J. H., Lee, J. W., "Comparison of GPU-Based Numerical Particles Simulation and Experiment", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 38, No. 7, pp. 751~756, 2014.
10. Nguyen H. D., "Modeling the dynamics of toothbrush using discrete element method", Ph. D. Dissertation, Kumoh National Institute of Technology, Korea, 2011.
11. Kotrocz, K., Kerény, G., "Numerical Discrete Element Simulation of Soil Direct Shear Test," ECMS-European Conference on Modeling and Simulation, pp. 510~515, 2017.