



이산요소법을 이용한 성긴 달토양 수치해석모델 개발

정현재¹, 임재혁², 김진원³

Development of a Coarse Lunar Soil Model Using Discrete Element Method

Hyun-Jae Jeong¹, Jae Hyuk Lim² and Jin-Won Kim³

Chonbuk National University^{1,2}, Korea Aerospace Research Institute³

ABSTRACT

In this paper, a coarse lunar soil model is developed using discrete element method and its computed physical properties are compared with those of the actual lunar soil for its validation. The surface of the actual moon consists of numerous craters and rocks of various sizes, and it is covered with fine dry soil which seriously affects the landing stability of the lunar lander. Therefore, in consideration of the environment of the lunar regolith, the lunar soil is realized using discrete element method. To validate the coarse model of lunar soil, the simulations of the indentation test and the direct shear test are performed to check the physical properties(indentation depth, cohesion stress, internal friction angle). To examine the performance of the proposed model, the drop simulation of finite element model of single-leg landing gear is performed on proposed soil models with different particle diameters. The impact load delivered to the strut of the lander is compared to test results.

초 록

본 논문에서는 이산요소법을 이용하여 성긴 달토양 수치해석모델을 생성하고 그 정확도를 실제 달토양의 물리적 특성과 비교 및 검증한다. 실제 달의 표면은 다수의 분화구와 바위로 구성되어 있고 매우 미세한 건조토양으로 덮여있으므로 달토양 특성은 달착륙선의 착륙안정성을 결정짓는 중요한 인자이다. 따라서 달토양특성을 고려하기 위해 이산요소법을 이용하여 달토양의 수치해석모델을 생성하고 검증한다. 달토양 압입시험 및 직접전단시험을 해석적으로 구현하여 해석용 달토양이 실제 달토양과 유사한 물리적 특성(압입깊이, 점착력, 내부마찰각 등)을 갖는 것을 확인한다. 이렇게 생성한 달토양 모델 위에 single-leg 착륙장치 유한요소모델을 낙하시키는 해석을 통해 착륙장치 스트럿에 가해지는 충격하중을 예측하고 시험결과와 비교하여 제안된 방법의 적절성을 검토한다.

Key Words : Lunar Lander(달착륙선), Lunar Soil(달토양), Discrete Element Method(이산요소법), Direct Shear Test(직접전단시험)

† Received : August 6, 2018 Revised : November 27, 2018 Accepted : December 3, 2018

¹ Graduate Student, ² Professor, ³ Researcher

² Corresponding author, E-mail : jaehyuklim@jbnu.ac.kr, ORCID 0000-0001-7268-1691

I. 서 론

달표면은 매우 미세한 건조토양 및 크고 작은 분화구로 구성되어 있다. 이러한 달표면형상과 토양특성은 달착륙선 착륙 시 본체에 전달되는 하중 및 착륙안정성을 결정짓는 중요한 인자이다. 착륙하는 지점의 경사각도 및 착륙지점의 토양특성에 따라 달착륙선의 전복(Tip-over) 혹은 미끄러짐(Sliding)이 발생할 수 있기 때문에 달착륙선 착륙안정성 평가를 할 때 달표면형상과 토양특성을 고려하는 것은 중요하다[1]. 이러한 착륙안정성 평가를 시험에만 의존할 경우, 다양한 착륙조건 변수(착륙자세, 수직속도, 횡방향속도, 지면의 각도, 마찰계수 등)로 인해 발생하는 많은 경우의 수 때문에 모든 착륙환경을 고려한 시험을 수행하기 매우 어렵다. 따라서 이를 보완할 수 있는 고정밀 해석모델을 이용하여 착륙안정성 평가를 구조해석을 통해 수행하는 것이 필요하다. 그러므로 달토양특성을 적절히 고려할 수 있는 해석모델을 개발하는 것이 필요하다.

매우 미세하고 건조한 달토양은 작은 점착력을 갖기 때문에 외력에 의해 잘 흩어지며 큰 마찰각도($30 \sim 50^\circ$)를 갖기 때문에 이를 수치적으로 모사하기 매우 어렵다. 또한 달토양은 달착륙선이 착륙할 때 발생하는 충격하중의 약 50%를 흡수한다고 문헌에 보고된 바 있기 때문에 이러한 성질을 구현할 수 있는 적절한 달토양의 모델링이 필요하다[2]. 최근 들어 국내외 연구기관에서 달토양특성 모델링, 달착륙선 착륙안정성 평가에 대한 연구는 다양하게 수행되어 왔다[3-5]. 이들은 실제 달표면과 달토양의 물리적 특성을 Mohr-Coulomb 이론의 변수들을 사용하여 달토양을 모델링하고 이를 고려한 착륙하중 특성변화에 대한 연구를 수행하였다[3,4]. 또한 월면차의 바퀴형상과 토양간의 상호작용을 검토하기 위해 달토양을 이산요소법을 이용하여 모델링을 한 연구가 수행되었다[5]. 이러한 논문에서는 달토양 입자의 크기를 실제보다 크게 하였지만, 어떻게 이것을 검증한 지에 대한 내용은 기술되지 않았다. 실제 달토양의 입자는 평균 크기 $100\mu\text{m}$ 로 매우 미세하기 때문에 이러한 크기를 고려하여 달착륙선의 착륙해석을 수행한다면 천문학적 시간과 노력이 예상된다. 따라서 이러한 달토양 입자를 적절히 크게 하여 거시적인 달토양의 기계적 특성이 달토양과 등가성질을 갖도록 보정하고 검증하는 기술이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 달토양특성을 모사하기 위해 입자모델링 방법인 이산요소법을 채택하고, ABAQUS를 이용하여 해석모델을 생성하였다[6]. ABAQUS의 이산요소법을 사용하기 위해서는 입자의 밀도, 입자간의 마찰계수, 유효 포아송비, 반지름, 유효 탄성계수가 필요하다. 이는 여러 참고문헌과 미국의 Apollo호가 달에 착륙했을 때 얻어진 달토양의

지반계수를 이용한 압입해석을 통해 얻었다. 또한, 생성한 해석용 달토양이 실제 달토양과 유사한 기계적 물성을 갖는지를 검증하기 위해 직접전단시험 모사해석을 구현하여 확인하였다. 본 논문에서 제안한 달토양모델의 적절성을 검토하기 위해 single-leg 착륙장치 낙하시험을 수행하였다. 이산요소법기반 달토양모델, 유한요소법기반 달토양모델 위에 single-leg 착륙장치 유한요소모델을 낙하시키는 해석을 통해 착륙장치 스트럿에 가해지는 충격하중을 예측하고 낙하시험결과를 비교하였다. 달토양모델에 따라 달라지는 충격하중의 변화를 확인하고 제안된 달토양모델의 적절성을 검토하였다.

II. 달토양 수치해석모델

2.1 달토양특성을 고려한 입자 모델링

달토양특성은 크게 입자크기, 내부마찰각, 점착력 등으로 구분할 수 있으며 달표면 위치 및 깊이에 따라 달라진다[7]. 이러한 토양의 복잡한 물리적 특성을 나타내기 위하여 이산요소법을 이용한 모사가 널리 사용되어왔다[4,8]. 본 논문에서도 실제 달토양특성을 고려하기 위해 이산요소법을 채택하였고, ABAQUS의 PD3D요소를 사용하여 달토양 입자의 수치해석모델을 생성하였다.

이산요소법(Discrete element method, DEM)이란 다수의 고체입자 거동을 표현하는데 사용되는 대표적인 방법으로써 각각의 입자에 대해 3개의 병진자유도와 3개의 회전자유도를 부여하고 뉴턴 제2법칙을 적용함으로써 개별 입자의 거동을 파악한다. Fig. 1과 같이 입자와 입자의 접촉을 표현하기 위하여 이산요소법에서 가장 많이 사용되는 접촉 관계식인 헤르츠 접촉(Hertz contact) 기반의 spring-dashpot 모델을 사용한다[9].

이는 접촉을 표현하기 위해 접선방향의 스프링상수(k_t)와 감쇠계수(c_t)와 마찰계수(μ) 및 법선방향의 스

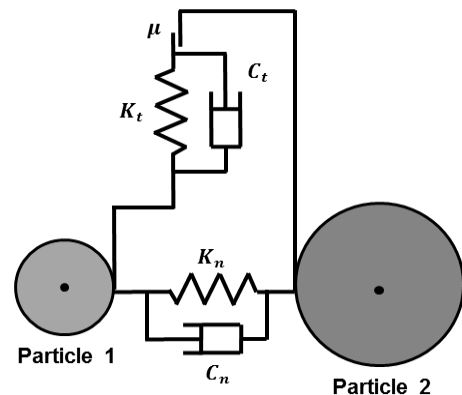


Fig. 1. Spring-dashpot model of particles

Table 1. Comparison of properties between actual soil and coarse DEM soil

Property	Actual soil value	Coarse DEM soil value
Particle density	1450~2900kg/m ³	2000kg/m ³
Friction coefficient	0.6~0.8	0.7
Poisson's ratio	0.16~0.3	0.25
Particle radius	20~400μm	25000μm
Elastic modulus	18~110MPa	15MPa
Coefficient of restitution	0.80~0.91	0.86

프링상수(k_n)와 감쇠계수(c_n)를 사용한다. ABAQUS에서 이산요소법을 이용하기 위해서는 입자에 대한 물성인 입자의 밀도, 입자간의 마찰계수, 입자의 유효 포아송비, 입자의 반지름, 입자의 유효 탄성계수가 필요하다[6]. 본 연구에서는 이를 참고문헌, 압입해석을 통해 선정하였다. Table 1은 본 논문에서 선정한 해석용 달토양 입자의 물성과 실제 달토양의 물성을 비교한 결과이다. 해석용 달토양 입자의 밀도, 마찰계수, 포아송비는 실제 달토양의 물성과 유사하며, 입자의 반지름은 해석시간을 줄일 수 있게 실제 달토양의 약 500배로 가정하였다. 이러한 가정을 보완하기 위해 압입해석을 통해 실제 달토양과 유사한 압입깊이를 갖는 탄성계수를 선정하였다. 이와 관련 상세한 분석내용은 2.1.1~2.1.5에 나타내었다. 또한 참고문헌[10]에 따르면, 매우 미세한 모래의 반발계수를 0.80~0.91로 적용하고 있다. 본 연구에서는 달토양 수치해석모델의 반발계수를 0.86으로 선정하였으며, Hertz Contact을 고려한 DEM 해석결과로 환산하면 Critical damping fraction은 0.03이다. ABAQUS Explicit에서 이산요소법의 시간 증분을 식 (1), (2)를 이용하여 계산하여, 5×10^{-4} 초를 사용하였다[11].

$$\Delta t = 2 \sqrt{\frac{m}{K_n}} \quad (1)$$

$$K_n = 2E^* \sqrt{R} \sqrt{\delta} \quad (2)$$

- Δt : 시간 증분
 m : 입자의 질량 (0.131kg)
 K_n : 수직 접촉 강성
 E^* : 유효 탄성계수 (15MPa)
 R : 입자의 반지름 (0.025m)
 δ : 입자간의 거리 (0.05m)

2.1.1 입자의 밀도

참고문헌에 따르면 달토양의 밀도는 1450~2900 kg/m³ 범위의 값을 갖는다[7,12-14]. 따라서 본 논문

에서는 문헌자료들을 참고하여 해석용 달토양 입자의 밀도를 평균치인 2000kg/m³로 선정하였다.

2.1.2 입자간의 마찰계수

달토양 입자들 간의 마찰계수는 달표면의 위치, 깊이에 따라 변화한다. 참고문헌에 있는 달토양의 마찰계수는 0.6~0.8값을 가진다[15]. 따라서 해석용 달토양 입자들간의 마찰계수는 0.7로 선정하였다. 또한 입자의 동마찰계수(구름마찰계수)는 전단거동과 전체적인 유동에 큰 영향을 주지만, 본 논문에서는 달착륙선 착륙 시 토양의 압축 및 전단거동이 0.1초 동안 매우 짧은 시간에 일어나며, 관심대상이 토양 압축에 의한 충격하중이기 때문에 구름마찰계수와 같은 동적마찰의 영향은 무시하였다. 아울러 ABAQUS의 DEM 해석에서는 현재 정지마찰계수만 지원한다고 알려져 있다[6].

2.1.3 입자의 유효 포아송비

달토양의 포아송비는 0.16~0.3 수준이며, 0.25 값을 해석용 달토양의 유효 포아송비로 선정하였다 [12,16,17].

2.1.4 입자의 반지름

달토양 입자의 형상은 일정하지 않기 때문에 달토양을 수치해석모델로 생성하기에는 어려운 점이 있다. 본 논문에서는 이를 단순화시키기 위해 달토양 입자의 모양은 구로 가정하였으며, 모두 동일한 크기를 갖도록 가정하였다. 또한 달토양 입자의 지름은 40~800μm 수준이며, 평균 지름은 대략 100μm이다 [7]. 달토양 입자의 크기를 실제 달토양의 크기로 모델링을 할 경우, 매우 작은 다수의 입자를 사용해야 하기 때문에 해석시간이 증가한다. 따라서 해석용 달토양의 입자 지름을 0.01~0.1m로 후보군으로 선정하고 압입해석을 실시하였으며, 그 결과 해석시간은 줄이면서 달토양과 유사한 압입깊이를 갖는 지름인 0.05m인 입자 지름을 선정하였다. 이 크기는 Fig. 2와 같이 달착륙선 풋패드에 입자가 약 20개가 접촉할 수 있으며, 착륙해석에 적절한 것으로 판단하였다. 이와 관련된 적절성은 2.1.5에 상세히 기술하였고, 3장에 시험결과와 비교분석을 통해 검증하였다.

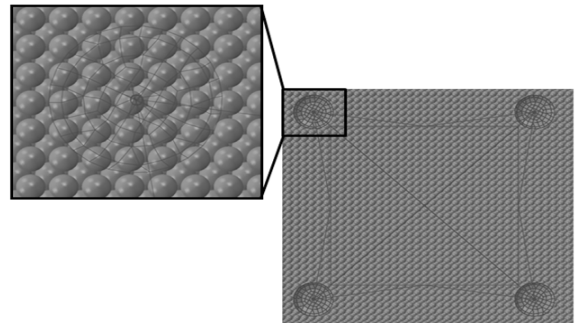


Fig. 2. Top view of lunar lander on lunar soil

2.1.5 입자의 유효탄성계수

2.1.4에서 해석용 달토양 입자의 크기를 실제 달토양 입자의 크기보다 큰 입자로 선정하였으므로, 이는 달토양의 지반계수(Modulus of subgrade reaction)에 영향을 줄 수 있다. 이를 보완하기 위해 유효탄성계수 값을 조절하여 지반계수가 동일하도록 조정하였다. 토양의 지반계수(k)는 식 (3)과 같이 토양에 가해진 압력(q)을 침투된 거리(d)로 나눈 값으로 결정된다.

$$k = \frac{q}{d} \tag{3}$$

예를 들어, Fig. 3과 같은 달토양 압입조건으로 발자국의 크기 12.5cm x 33cm로 7kPa 압력으로 토양을 압입했을 때 달토양의 지반계수는 Fig. 4의 히스토그램과 같이 나타난다고 보고되어 있다[7]. 지반계수의 평균적인 값은 약 10kPa/cm이다. 토양에 가해진 압력이 7kPa일 때 압력에 의해 침투되는 거리는 0.7cm이다.

본 연구에서 지반계수를 해석적으로 도출하기 위해 달토양의 압입해석을 Fig. 5와 같이 수행하였다. 압입해석은 달의 중력(1.62m/s²)에서 수행하였으며, 토양두께는 참고문헌을 통해 0.2m로 선정하였다[18]. 해석은 두 가지의 단계로 나눠 수행하였다. 우선 Fig. 5(b)와 같이 달토양의 입자에만 중력을 가하여 달토양이 평형상태가 되도록 배치한 후 Fig. 5(c)와 같이 발자국과 유사한 형상을 갖는 직사각형 프레스를 이용하여 토양에 압력을 가하였다. Fig. 6은 해석용 달토양의 유효탄성계수가 10MPa, 15MPa, 20MPa

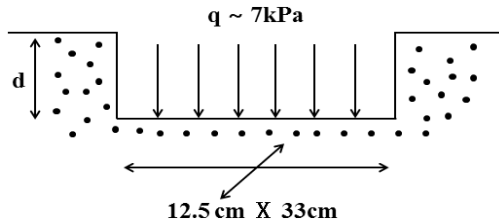


Fig. 3. Condition of measuring indentation depth [7]

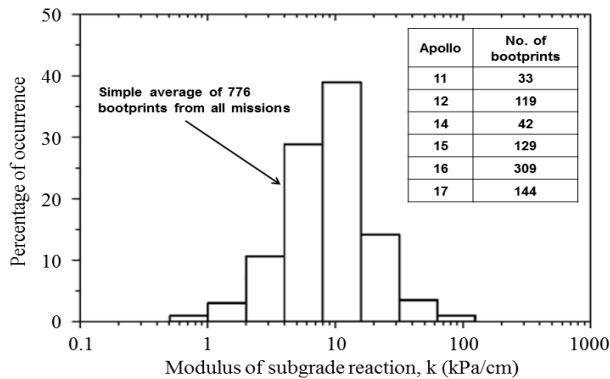


Fig. 4. Modulus of subgrade reaction determined by astronaut footprint [7]

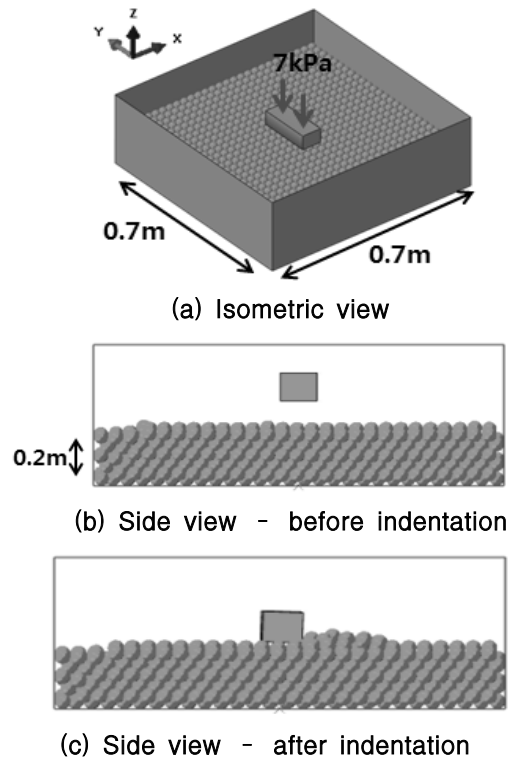


Fig. 5. Indentation analysis of DEM soil

일 때 압입해석을 통해 시간에 따라 압력이 가해지는 달토양 입자의 z축 방향 절점변위 결과이다. 유효탄성계수가 10MPa, 15MPa, 20MPa일 때 압입되는 토양의 변위가 각각 0.86cm, 0.75cm, 0.64cm인 것을 확인할 수 있다. 해석용 달토양의 유효탄성계수가 커질수록 압입 변위는 작아지며, 유효탄성계수 값이 15MPa일 때 달의 지반계수는 9.33kPa/cm로 평균값과 가장 유사하므로 이 값을 선정하였다.

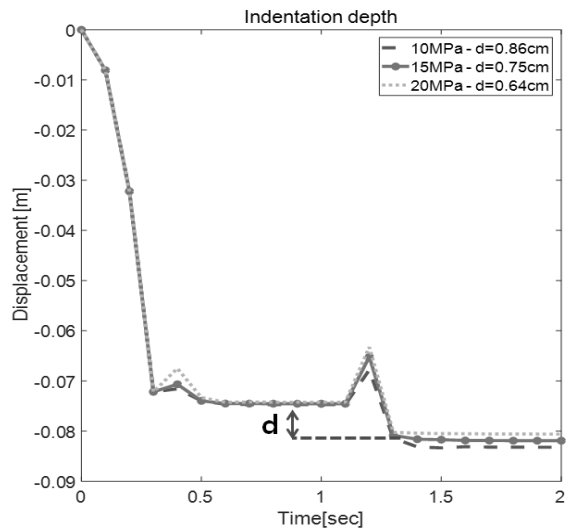


Fig. 6. Indentation depth result according to the effective elastic modulus

2.2 직접전단시험을 통한 물성 검증

내부마찰각(Internal friction angle, ϕ)과 점착력(Cohesion stress, c)은 달토양의 기계적 물성 중 가장 중요하게 고려된다[18]. 토양의 내부마찰각은 토양의 전단강도를 지배하는 성분이다. 즉, 토양에 전단응력이 존재하면 입자와 입자사이의 마찰저항이 발생한다. 이 마찰저항은 식 (4)와 같이 전단면에 작용하는 수직응력에 비례하지만, 그 비례상수는 $\tan\phi$ 로 표시되며 그 각도 ϕ 를 내부마찰각이라 한다. 점착력은 토양이 다른 물체에 부착되는 힘이다.

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \quad (4)$$

직접전단시험(ASTM D3080)은 토양의 내부마찰각과 점착력을 구하기 위한 대표적인 시험으로, Fig. 7(a)와 같이 토양 시료를 둘로 나뉘어져 있는 상자에 넣고 상하를 투수판에 끼운 다음, 금속판에 수직하중을 전달하여 일정한 수직 하중 아래에서 상판과 하판을 수평방향으로 움직여 토양의 전단저항을 측정한다[19]. 총 3번의 다른 수직응력에 따른 전단응력을 직접전단시험을 통해 얻어 Fig. 7(b)와 같이 Mohr-Coulomb이론에 적용하면 3점을 이은 직선의 기울기가 내부마찰각이며, y절편이 점착력이 된다.

해석용 달토양 입자의 물성을 검증하기 위해 Fig. 8과 같이 직접전단시험 모사해석 모델을 생성하여 수치해석을 실시하였다. 피스톤은 토양에 수직응력을 가해주는 부품이며, 토양을 감싸고 있는 상판과 하판은 간섭에 의한 마찰이 발생하지 않도록 하였다. 직

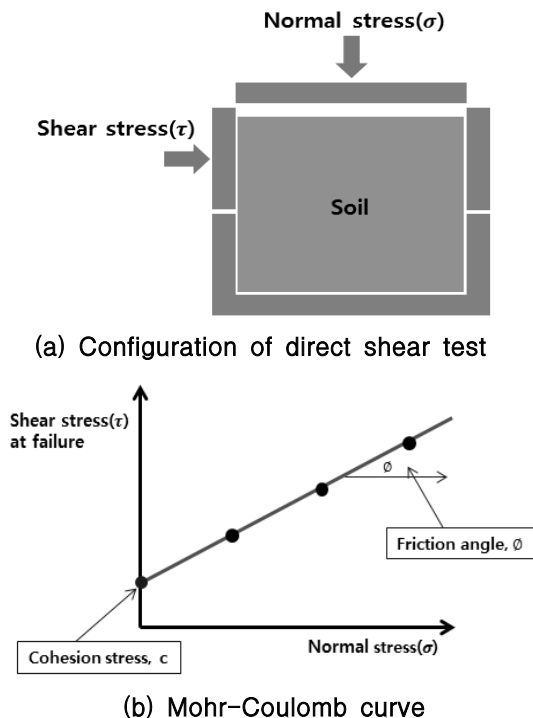


Fig. 7. Direct shear test (ASTM D3080)

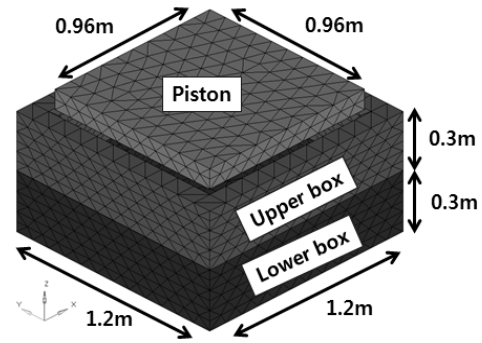
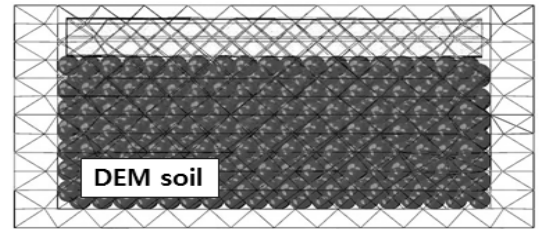
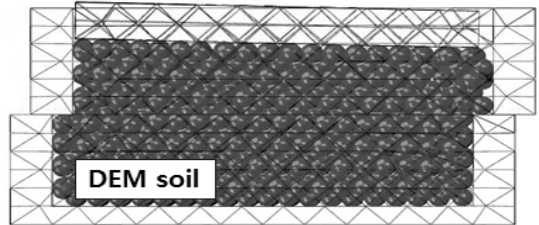


Fig. 8. Direct shear test simulation model



(a) Step 1 : Normal force

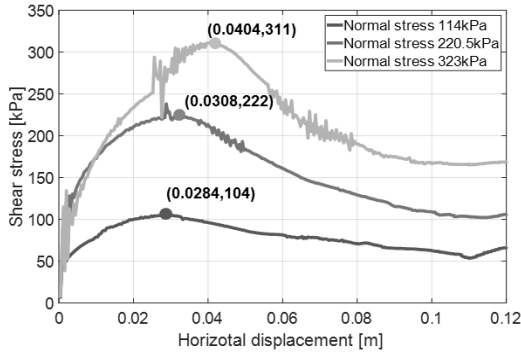


(b) Step 2 : Normal force + shear force

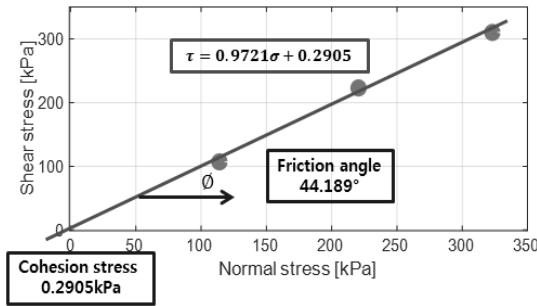
Fig. 9. Direct shear test simulation

접전단시험 모사해석은 실제 시험과 마찬가지로 두 가지 단계로 나누어 수행하였다. 우선 Fig. 9(a)와 같이 피스톤에 집중질량 10,000kg, 20,000kg, 30,000kg를 적용하여 토양에 수직응력 114kPa, 220.5kPa, 323kPa를 가하였다. Fig. 9(b)와 같이 수직응력을 가한 상태로 상판에 수평방향으로 변위 경계조건을 부가하여 전단반력 값을 계산하여 피스톤 면적으로 나누어 평균전단응력을 얻었다.

Figure 10(a)는 계산된 상판의 전단방향 변위에 따른 토양의 전단응력 그래프이다. 전단응력의 최고점은 수직응력이 증가할수록 크게 나타났으며, 최고점이 나타나는 수평변위는 더 늦어지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10(b)는 토양에 가해지는 계산된 수직응력과 전단응력을 나타내는 그래프이다. 수직응력과 전단응력의 관계를 최소자승법을 통해 도출한 식은 $\tau = 0.9721\sigma + 0.2905$ 이다. 직선의 기울기인 내부마찰각은 44.189° , y절편인 점착력은 0.2905kPa 의 결과를 얻을 수 있었다. 실제 달토양의 내부마찰각과 점착력은 아폴로 문헌을 참고하면 내부마찰각은 $30\sim 50^\circ$, 점착력은 $0.1\sim 1\text{kPa}$ 이므로 해석을 통해 얻은 결과는 실



(a) Computed shear stress-displacement curve



(b) Computed Mohr-Coulomb curve

Fig. 10. Direct shear test simulation results (r=0.025m)

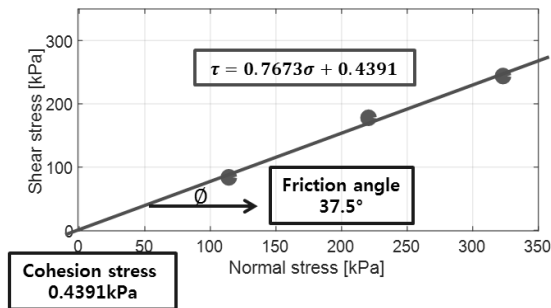


Fig. 11. Direct shear test simulation results (r=0.02m)

제 달토양 물성 범위 내에 있으므로 본 연구에서 사용한 Table 1의 달토양 물성이 적절한 것으로 판단하였다[7].

또한 달토양 입자의 반지름에 따라 압입해석 및 직접전단시험 모사해석 결과를 확인하였다. 반지름이 0.02m인 경우, 압입해석을 통해 유효탄성계수가 37MPa임을 확인하였으며, 직접전단시험 모사해석을 통해 Fig. 11과 같이 내부마찰각이 37.5°, 점착력이 0.4391kPa로 달토양과 유사한 기계적 물성을 갖는 것을 확인하였다.

III. 착륙장치에 전달되는 충격하중 비교를 통한 달토양모델 적절성 검토

3.1 Single-leg 착륙장치 유한요소모델

본 논문에서 제안한 이산요소법기반 달토양모델의 적절성을 검토하기 위해 착륙장치 낙하시험 및 낙하해석을 수행하였다. 시험과 해석은 기존 달착륙선의 4개의 스트럿 중 1개의 스트럿을 고려한 single-leg 착륙장치를 Fig. 12와 같이 제작하여 수행하였다. 우선 낙하해석을 수행하기 위해 single-leg 착륙장치 유한요소모델을 Fig. 13과 같이 생성하였다. 지면과 직접 접촉하는 풋패드는 셸요소(S3, S4R 요소), 착륙장치의 다리인 주 스트럿(Primary strut), 부 스트럿(Secondary strut)은 봉요소(T3D2 요소)를 사용하여 유한요소모델을 생성하였다[20]. 시험치구와 single-leg 착륙장치를 연결해주는 조인트를 구현하기 위해 해석모델에서 연결되는 절점을 x, y방향만 구속하였다. 시험치구는 Fig. 13에 표시된 부분에 집중질량을 부여하여 단순하게 구현하였다.

달착륙선의 충격흡수재료인 알루미늄 허니콤은 원래 길이의 75%까지 줄어들면서 충격을 흡수하고, 에너지를 흡수하는 동안 힘이 일정히 유지되지만 일회성이라는 특징이 있다. 본 모델에서는 주 스트럿에만 알루미늄 허니콤을 고려하였다. 또한 충격하중을 측정하기 위해 Fig. 13에 표시된 부분에 로드셀(Dytran 1061V4)을 장착하였으며, 유한요소모델에도 이와 동일한 위치에 요소를 생성하여 충격하중을 측정하였다. Single-leg 착륙장치 유한요소모델의 정보는 Table 2와 같다.

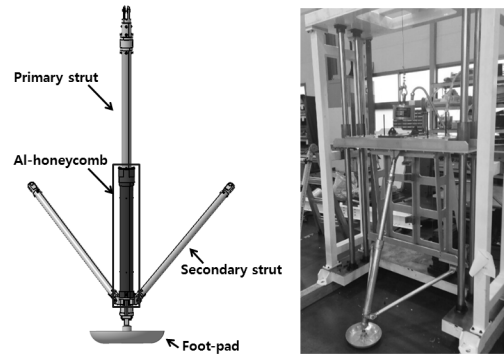


Fig. 12. Single-leg landing gear

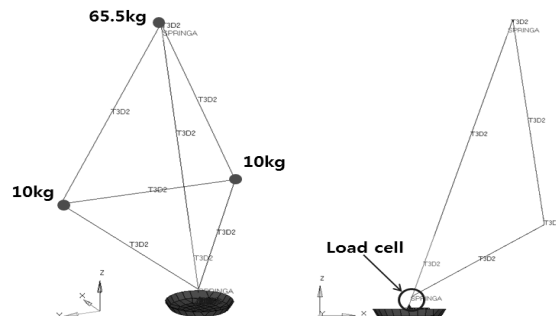


Fig. 13. FE model of single-leg landing gear

Table 2. Specification of single-leg landing gear

Mass [kg]	Strut (Primary+Secondary+Footpad)	8.5
	Dummy mass	85.5
	Total	94
Size [mm]	Primary strut	1210
	Secondary strut	650
	Al-honeycomb	260
	Outer diameter of al-honeycomb	45
	Inner diameter of al-honeycomb	10
	Diameter of footpad	250

실제 달토양특성을 고려하기 위해 달토양과 기계적 물성이 유사한 주문진 표준사를 선정하고 그 위에 single-leg 착륙장치 낙하시험을 수행하였다. 주문진 표준사의 기계적 물성인 내부마찰각은 34°로 달토양의 내부마찰각 30~50° 범위를 만족하며, 점착력은 0.5kPa로 달토양의 점착력 0.1~1.0kPa 범위를 만족한다[21].

3.2 달토양모델에 따른 충격하중 비교

본 연구에서 제안한 달토양모델이 충격하중 예측에 끼치는 영향을 검토하기 위해 네 가지 달토양모델에 따른 낙하충격하중을 검토하였다. 이산요소법기반 달토양모델의 반지름이 0.025m, 0.02m인 경우와 유한요소법기반 달토양모델의 기계적 물성이 주문진 표준사인 경우(FEM soil 1)와 달토양인 경우(FEM soil 2)를 고려하였다. 달토양모델의 기계적 물성은 Table 3과 같다.

Single-leg 착륙장치 낙하시험은 Fig. 14와 같이 수행하였다. 착륙장치가 착륙하는 순간의 속도는 3m/s로 결정하였으며, 이는 미국의 Apollo 프로젝트의 문헌에서 참고하여 결정하였다[23]. 착륙속도 3m/s를

Table 3. Properties of soil models

Type of soil	Internal friction angle[°]	Cohesion stress [kPa]	Elastic modulus [MPa]
Jumoonjin sand	34 [21]	0.5 [21]	5~20 [22]
DEM soil (r=0.025m)	44.2*	0.2905*	15*
DEM soil (r=0.02m)	37.5*	0.4391*	37*
FEM soil 1	34	0.5	15
FEM soil 2	44.2	0.2905	15

* Properties derived from indentation and direct shear test analysis

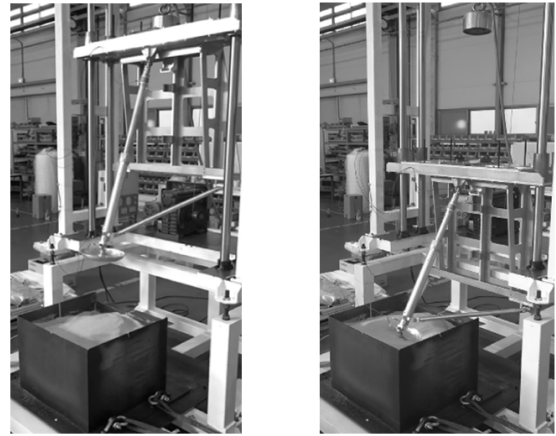


Fig. 14. Single-leg landing gear drop test

만족하기 위해 풋패드와 토양간의 거리가 0.4579m 지점에서 착륙장치를 자유 낙하시켰다.

Figure 15는 착륙장치 유한요소모델을 이산요소법기반 달토양모델 위에 낙하시키는 유한요소법과 이산요소법의 연동해석이다. 압입해석과 마찬가지로 우선 달토양을 낙하시켜 평형상태로 배치한 후 달착륙선을 낙하시키는 해석을 수행하였다. 유한요소법기반 달토양모델 위에 착륙장치 유한요소모델을 낙하시킨 해석을 Fig. 16과 같이 수행하였다. Table 3의 네 가지 토양모델에 따라 달착륙선 착륙해석을 수행하여 시간에 따른 충격하중이력을 Fig. 17과 같이 비교하였다. 풋패드가 토양에 착륙하고 알루미늄 허니콤이 압축되면서 충격하중을 일정하게 유지된다. 알루미늄 허니콤이 압축된 후 낙하시험결과의 주 스트럿에서 측정되는 최대충격하중은 4694N, 반지름이 0.025m인 이산요소법기반 달토양모델에서의 충격하중은 4911N, 반지름이 0.02m인 이산요소법기반 달토양모델인 경우 충격하중은 4959N으로 시험결과와 약 5% 수준의 오차범위 내에서 일치함을 확인하였다. 그러나 유한요소법기반 달토양모델에서의 충격하중은 6177N, 5892N으로 시험결과와 25~30% 수준 정도의 오차를 확인하였다.

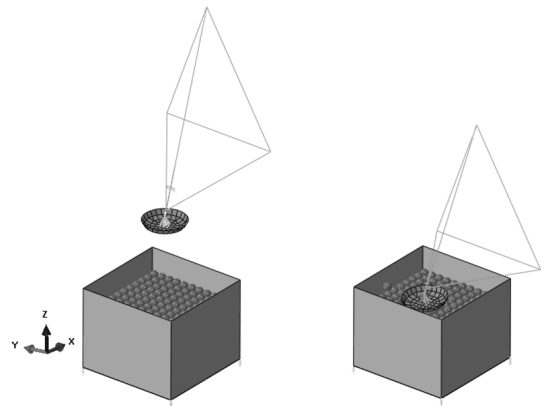


Fig. 15. Single-leg landing gear drop analysis on DEM soil

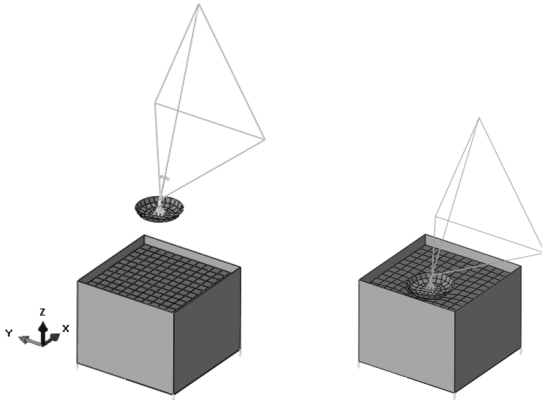


Fig. 16. Single-leg landing gear drop analysis on FEM soil

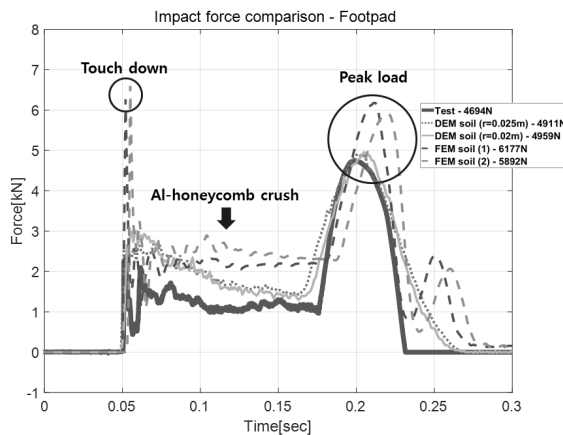


Fig. 17. Comparison of impact load history on various soil models

이는 유한요소법기반 달토양모델은 요소가 절점을 공유하며 연결되어 있는 형태를 계속 유지하기 때문에 낮은 점착력을 갖는 토양의 특성을 모사하지 못하기 때문으로 판단된다. 따라서 실제 달토양과 유사한 특성을 갖기 위해서는 이산요소법기반 달토양모델이 유한요소법 기반토양모델보다는 더 적절할 것으로 추정된다. 또한 토양입자의 크기가 다르더라도 달토양의 지반계수와 유사하게 만족해줄 수 있는 달토양모델의 유효탄성계수 값을 잘 선정한다면 착륙선의 충격하중을 잘 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이산요소법을 이용하여 성긴 달토양 수치해석모델을 생성하였으며 해석모델의 성능을 검증하는 연구를 수행하였다. 실제 달토양과 같은 물리적 특성을 가지는 해석용 달토양을 구현하기 위해 ABAQUS에서 필요한 입력 변수를 참고문헌 및 압입해석을 통해 선정하였다. 해석용 달토양의 직접 전단시험 모사해석을 통해 실제 달토양과 유사한 내

부마찰각과 점착력을 갖는 것을 확인하여 물성에 대한 최종검증을 하였다. 이렇게 모사된 달토양특성이 충격하중에 끼치는 효과를 확인하기 위해 이산요소법기반 달토양모델, 유한요소법기반 달토양모델에 single-leg 착륙장치 유한요소모델을 낙하시켜 충격하중이력을 예측하고 시험결과와 비교하였다. 결론적으로 이산요소법기반 달토양모델이 낮은 점착력을 갖는 토양특성을 잘 모사하여 실제 낙하시험결과와 유사한 양상을 보이는 것을 확인하였다. 이러한 해석결과로부터 달착륙선의 충격흡수장치인 알루미늄 허니콤을 선정할 때에도 달토양에 관한 영향을 고려할 필요가 있다고 판단된다. 향후 달착륙선 전체 모델과 달표면형상 및 달토양특성을 모두 고려한 달착륙선 착륙안정성 평가를 수행하여 달착륙선의 임무성공률을 판단할 예정이다.

후 기

이 성과는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2017M1A3A9042626)

References

- 1) Jeong, H. J., Lim, J. H., and Kim, J. W., "Evaluation of Landing Stability of Lunar Lander Considering Various Landing Conditions," *Journal of The Korean Society of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 46, No. 2, 2018, pp.124~132.
- 2) Sahinoz, A., "Landing Gear Design and Stability Evaluation of a Lunar Lander for Soft Landing," *Proceedings of the Bennett Conference on Mechanical Engineering*, April 2012, pp.1~17.
- 3) Pham, V. L., Zhao, J., Goo, N. S., Lim, J. H., Hwang, D. S., and Park, J. S., "Landing Stability Simulation of a 1/6 Lunar Module with Aluminum Honeycomb Dampers," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 14, No. 4, 2013, pp.356~368.
- 4) Huang, B., Jiang, Z., Lin, P., and Ling, D., "Research on Impact Process of Lander Footpad against Simulant Lunar Soils," *Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration*, Vol. 2015, pp.1~24.
- 5) Nakashima, H., Fujii, H., Oida A., Momozu, M., Kanamori, H., Aoki, S., Yokoyama, T., Shimizu, H., Miyasaka, J., and Ohdoi, K., "Discrete element method analysis of single wheel performance for a small lunar rover on sloped terrain," *Journal of Terramechanics*, Vol. 47, No. 5,

2010, pp.307~321.

6) Abaqus Analysis User's Manual (6.14), Dassault Systèmes, 2014.

7) Heiken, G. H., Vaniman, D. T., and French, B. M., "Lunar Source Book, a User's Guide to the Moon," CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1991.

8) Yang, M. S., Jun, C. W., and Sohn, J. H., "Comparisons of Free Flowing Simulation of the Sand by Using DEM with the Experiment," *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers*, December 2016, pp.2674~2676.

9) Park, S. H., Choi, D. K., and Sohn, D. W., "A study on fluid flow characteristic depending on the size distribution and volume fraction of particulate solid materials using discrete element modeling of packed beds," *Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 2016, pp.1269~1272.

10) Imre, B., Rabsamen, S., and Springman, S. M., "A coefficient of restitution of rock materials," *Computers & Geosciences*, Vol. 34, 2008, pp.339~350.

11) O'Sullivan, C., and Bray, J. D., "Selecting a suitable time step for discrete element simulations that use the central difference time integration scheme," *Engineering Computations*, Vol. 21, 2013, pp.278~303.

12) Mitchell, J. K., Houston, W. N. Scott, R. F., Costes, N. C., Carrier, W. D., and Bromwell, L. G., "Mechanical Properties of Lunar Soil," *Proceedings of the Third Lunar Science Conference*, Vol. 3, 1978, pp.3235~3253.

13) Liu, T., Wei, C., Liang, L., Zhang, and J., Zhao, Y., "Simulation and Analysis of the Lunar Regolith Sampling Process Based on the Discrete Element Method," *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 57, No. 6, 2014, pp.309~316.

14) Man, L., Hailong, W., Dongbo, T., Jingyu, T., Zhen, L., and Yu, L., "Discrete Element Simulation of Lunar Dust Suspension Caused by Lunar Rover Wheel," *International Conference on Transportation,*

Mechanical, and Electrical Engineering, December 2011, pp.316~319.

15) Sperl, F. B., "Basic and Mechanical Properties of the Lunar Soil Estimated From Surveyor Touchdown Data," JPL Technical Memorandum 33-443, March 1970.

16) Bui, H., Kobayashi, T., Fukagawa, R., and Wells, J. C., "Numerical and experimental studies of gravity effect on the mechanism of lunar excavations," *Journal of Terramechanics*, Vol. 46, 2009, pp.115~124.

17) Modenese, C., Utili, S., and Houlsby, G. T., "DEM Modelling of Elastic Adhesive Particles with Application to Lunar Soil," *Earth and space*, 2012, pp.45~54.

18) Koh, S. W., Chang, B. C., Koo, J. K., and Lee, T. S., "Study for Korean Lunar Simulant Prototype Development," *Korea Society of Civil Engineers Convention*, 2009, pp.3598~3601.

19) <https://www.astm.org/>

20) Yang, S. S., Kang, Y. C., Son, J. Y., Oh, M. H., Kim, J. H., and Cho, J. Y., "Optimization of shock absorption system for lunar lander considering the effect of lunar regolith," *Journal of The Korean Society of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 42, No. 4, 2012, pp.284~290.

21) Witthoef, A. F., and Kim, H., "Numerical investigation of earth pressure reduction on buried pipes using EPS geofoam compressible inclusions," *Geosynthetics International*, February 2016.

22) http://structx.com/Soil_Properties_003.html

23) Rogers, W. F., "Apollo Experience Report - Lunar Module Landing Gear Subsystem," NASA TN D-6850, Manned Spacecraft Center, June 1972.

23) Oh, M. H., Cho, Y. M., Lee, H. J., Cho, J. Y., Kim, S. W., and Hwang, D. S., "Sequential Approximate Optimization of Shock Absorption System for Lunar Lander by using Quadratic Polynomial Regression Meta-model," *Proceeding of The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences Fall Conference*, Nov. 2010, pp.355~358.