

DEM을 이용한 조립재료의 전단거동 특성에 관한 연구

Study on Shear Behavior Characteristics of Granular Material using DEM

조선아¹⁾, Seon-Ah Jo, 정선아²⁾, Sun-Ah Jeong, 이석원³⁾, Seok-Won Lee, 조계춘⁴⁾, Gye-chun Cho, 친윤철⁵⁾, Youn-Chul Chun

- 1) 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사, Master, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, Konkuk University
- 2) 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University
- 3) 건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University
- 4) 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST
- 5) 삼성물산 국내토목사업부 전무, Executive Vice President, Domestic Civil Engineering Business Department, Samsung C&T Corporation

SYNOPSIS : Factors influencing shear behavior of granular material include particle size, shape, distribution, relative density, particle crushing, etc. In this study, these factors are characterized by viewpoint of shear behavior using numerical analysis based on DEM. Geometrical particle shape is represented by a combination of small circular particles and influence of particle shape on crushing is studied through relative comparisons between clump (uncrushable) and cluster (crushable) models which are modeled using DEM. Also, particle shape is quantified by the dimensionless parameters such as circularity and convexity. The results indicate that particle shape indexes have a negative association with internal friction angle. Also, internal friction angle becomes reduced and failure envelop curve becomes nonlinear due to the particle crushing. It is also found that numerical results are quite good agreement with the experimental test conducted in this study.

Keywords : particle crushing, particle shape, shear behavior, DEM, direct shear, ring shear

1. 서론

기초 지반이나 댐, 사면 등을 형성하는 조립재료는 다양한 토목 구조물의 안정성에 영향을 미친다. 특히, 토목구조물과 쇄석이나 모래와 같은 조립재료들의 접촉면에서 외부로부터 작용되는 응력에 의해 입자구조가 파괴될 수 있으며 이러한 입자의 파괴는 전체 지반의 특성을 변화시키고 구조물의 불안정성을 유발한다. 따라서 이러한 접촉면에서의 안정성을 확보하기 위해 예비시험이 수행되어야 한다. 일반적으로 전단 특성을 파악하기 위해 수행되는 시험 방법들은 비교적 취급이 간단하고 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있기 때문에 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 실내 실험 및 현장 실험 장비들은 실험이 진행되는 동안 입자 및 재료의 거동을 시각적으로 확인할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 한계를 극복하고자 최근 들어 수치해석을 이용한 암반 및 조립재료의 역학적 특성과 거동 예측을 위한 연구가 증가하는 추세

이다. 따라서 본 연구에서는 재료의 강도특성을 좀 더 간편하게 확인하고자 해석기법 중 DEM을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 특히, 조립재료의 전단강도 특성을 파악하고자 직접전단모델 및 링전단모델을 모델링하였으며 입자 형상 및 입자 파쇄가 재료의 전단 거동을 어떻게 변화시키는지에 대해 수치해석모델인 clump 모델과 cluster 모델의 상대적인 비교를 통하여 밝히고 시각적으로 나타내고자 하였다. 또한, 실내실험에서는 확인이 어려운 전단과정 중 발생하는 입자 파쇄의 진행을 시각적으로 나타내고자 하였다. 한편, 입자 형상이 전단강도 특성에 미치는 영향을 정량적으로 나타내고자 매개변수들을 도입하였고 이를 통해 입자형상과 내부마찰각의 관계를 규명하고자 하였다. 실내 실험을 수행하여 이를 수치해석결과와 비교하였으며 이를 통해 수치해석의 신뢰성을 입증하고자 하였다.

2. 수치해석모델

2.1 PFC2D의 개요

PFC는 일반적으로 임의의 형태를 가지는 입자의 집합체로 구성되는 대상 모델의 역학적 거동을 모사하는데 이용되며 모델을 구성하는 입자들은 유한한 강성(Stiffness)을 갖는 강성체로 가정되어 두 입자 사이의 접촉점(Contact)을 통해서만 상호작용이 이루어진다. 기본적으로 각 입자는 운동방정식에 의해서 외력, 속도, 모멘트와 위치가 계산되고, 그로 인해 발생하는 입자들의 접촉에서 힘-변위 관계식을 적용하여 접촉력으로 교환되는데 매 시간 단계(Time-step)에 따라 이 과정을 반복하게 된다. 강성 입자들은 접촉점에서 어느 정도의 중첩을 허용하며, 이 중첩량은 접촉력과 힘-변위 관계식에 의해 계산되는데 그 정도는 입자의 크기에 비해서 상대적으로 미소한 양이다.

입자들은 상호간 접촉에서 전개되는 힘을 통하여 다른 입자나 벽과 상호작용한다. 접촉은 반드시 두 개의 요소들(볼-볼 또는 볼-벽)과 관계되어 있으며, 하나의 점에서 발생한다. PFC2D 내에서 접촉모델은 임의의 접촉에서 일어나는 물리적인 거동을 의미하며, 요소들의 접촉 모델은 (i) 접촉-강성 모델(Contact-stiffness model), (ii) 미끄러짐-분리 모델(Slip-separation model), (iii) 결합 모델(Bonding model)로 구성된다.

입자 간 접촉에서의 결합을 허용하며 기본적으로 접촉결합 모델과 병렬결합 모델을 지원한다. 접촉결합은 무한히 작은 점에 가까운 면상에 일정한 수직 및 전단 강성을 갖는 한 쌍의 탄성 스프링으로 표현된다. 이 두 스프링에는 수직 및 전단 강도조건이 적용된다. 병렬결합은 두 볼 사이에서 시멘트와 같은 역할을 수행한다. 병렬결합은 결합된 입자에서 미끄러짐의 발생을 허용하며, 힘과 모멘트 모두를 전달한다. 즉, 힘과 모멘트 모두에 저항할 수 있도록 두 개의 입자 사이에 적용되는 원통형 혹은 직사각형의 탄성아교라고 할 수 있다.

2.2 직접전단모델

입자와 입자의 접촉면에서 전단에 따른 입자 파쇄에 대해 알아보기 위하여 직접전단시험을 수치해석적으로 모델링하였다. 이 때, 직접전단박스는 지름 6m, 높이 약 2cm로 3차원상의 박스를 2차원의 직사각형 단면으로 모델링하였으며 이에 대한 개략도는 그림 1과 같다. 그림에서와 같이 상부박스는 EF, FG, GH, HI의 4개의 벽으로 구성되며 GH벽은 상하로 이동이 자유로워 servo-controlled system에 의하여 수직응력을 일정하게 유지시키는 역할을 한다. 반면, AB, BC, CD, JK의 4개의 벽으로 구성된 하부 박스를 일정한 속도로 좌측에서 우측으로 이동시키면서 전단변위를 이행하게 된다. 이 때, EF 벽과 JK 벽은 전단이 진행되면서 발생하는 공간 즉, HJ 벽과 AB 벽 사이로 볼이 빠지는 것을 방지하기 위해 적용하였다. 경계면에서 마찰에 의한 영향을 최소화하기 위해 전단박스를 이루는 벽의 마찰계수는 0으로 설정하였고 벽의 강성(Stiffness)은 볼의 강성보다 높게 적용하였다.

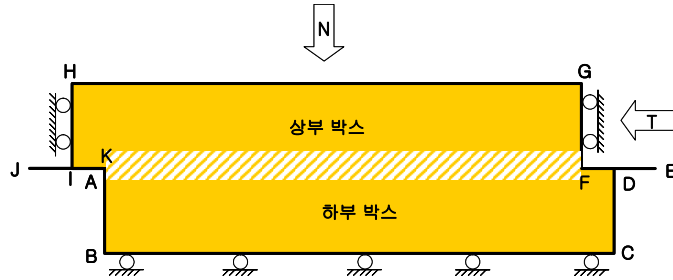


그림 1. 직접 전단 모델의 개략도

2.3 시료 생성 및 해석 수행 방법

PFC 내에서 지원하는 입자는 기본적으로 원형으로써 2차원일 경우, 단위 두께를 갖는 원기둥으로 3차원에서는 구로써 모델링 된다. 이 때, 생성된 입자들은 각각 물성이 부여된다. PFC2D의 입자에 관한 입력변수로는 입자의 크기, 강성, 마찰계수, 입자간의 결합력 등이 있다. 모델에 적용되는 재료는 조립토로서 입자크기는 모두 균일한 값을 적용하였다. 이로부터 생성된 입자는 총 2,474개로 본 연구에서 수행되는 수치해석 모델에 모두 동일하게 적용된다. 입자는 무작위 생성원리를 이용하여 생성되며 Fish function을 이용하여 입자의 간극률을 조정하였고 입자간 중첩량을 최소화하기 위하여 충분히 큰 강성을 부여하였다. 또한 입자생성단계에서 발생하는 입자의 마찰이나 미끄러짐에 의해 유발되는 내부응력을 줄이기 위해 이 단계에서는 입자의 마찰계수와 전단강성을 0으로 설정하였고 완전히 평형상태를 이룬 후에 마찰계수 0.75와 전단강성을 적용하였다. 그 밖에 입력변수들은 보정과정(Calibration)을 통하여 적절한 값을 산정하였고 최종적으로 얻은 물성치는 표 1과 같다. 이 때, 간극률은 상대밀도를 기준으로 결정하였으며 느슨한 상태와 조밀한 상태를 비교하기 위해 상대밀도를 각각 20%와 90%로 설정하여 해석을 수행하였다.

3. 실내실험과 수치해석의 비교

3.1 직접전단시험

본 연구에서 사용된 직접전단시험 장비는 일반적으로 사용하는 6cm의 직경을 갖는 전단박스로 구성되어 있으며 초기 시료의 높이는 2cm로 수치해석과 동일하게 실험 조건을 적용하였다. 이때의 전단속도는 1mm/분으로 전체 실험단계에서 일정하게 유지하였으며 수직하중을 일정하게 유지하였다.

시험에 사용된 시료는 유리로 만들어진 글래스비즈(glass beads)로써 직경이 1mm로 모두 동일한

표 1. 수치해석모델의 입력 물성치

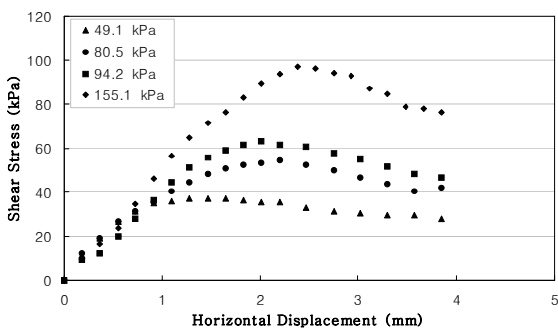
Micro properties		Value
Density (kg/m ³)		2,650
Normal stiffness (N/m)		1×10 ⁸
Shear stiffness (N/m)		1×10 ⁸
Normal/shear stiffness ratio		1
Friction coefficient		0.75
Gravity (m/s ²)		9.81
R _{min} (mm)		0.075
R _{max} (mm)		2
Initial porosity		0.160, 0.196
Ball number		2,474
Parallel bond	Normal (Pa)	2×10 ⁵ , 8×10 ⁵
	Shear (Pa)	2×10 ⁵ , 8×10 ⁵

크기를 갖는 구형 입자로 이루어졌다. 물리적 시험 및 이론적 계산을 통해 얻어진 글래스비즈의 비중은 2.52이고, 최대 및 최소 건조단위중량은 각각 1,710, 1,290 kg/m³ 인 것으로 나타났다.

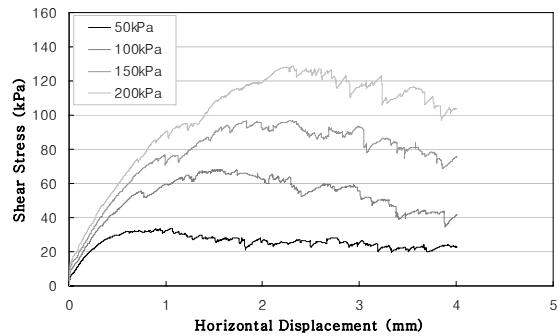
직접전단모델은 앞서 언급하였던 모델과 동일한 방법으로 모델링하였으며 입력 물성도 동일하게 적용하였다. 입자의 직경은 글래스비즈와 동일한 1mm로 하였으며, 이로 인해 입자개수는 1,291개가 생성되었다. 실내실험 및 수치해석 모델에 적용된 상대밀도는 75%로 두 방법 모두 동일하게 하였다.

3.2 응력-변위 곡선의 비교

그림 2는 글래스비즈를 이용한 실내 직접전단시험과 수치해석모델로부터 얻어진 응력-변위 곡선이다. 그림 2(a)와 같이 실내 직접전단시험의 경우, 수직응력은 49.1kPa, 80.5kPa, 94.2kPa, 155.1kPa로 증가시키면서 실험을 실시하였으며 모든 경우에 대해 상대밀도는 75%로 동일하게 적용하였다. 한편, 그림2(b)와 같이 수치해석을 이용한 직접전단모델에서 수직응력은 50, 100, 150, 200kPa로 실내 실험과 유사한 수준으로 응력을 증가시켰다. 두 그림에서 볼 수 있듯이 수치해석결과는 비교적 실내 실험 결과와 비슷한 경향을 보였으며 각 수직응력단계에서 유발되는 최대전단응력도 거의 유사한 것으로 나타났다.



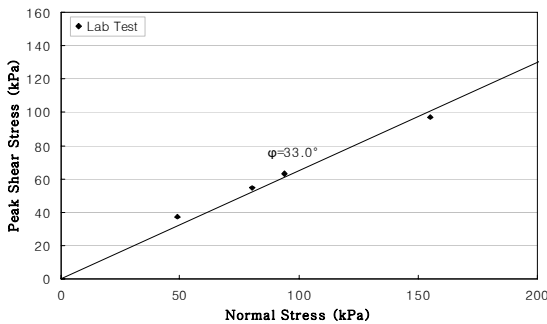
(a) 실내 직접전단시험



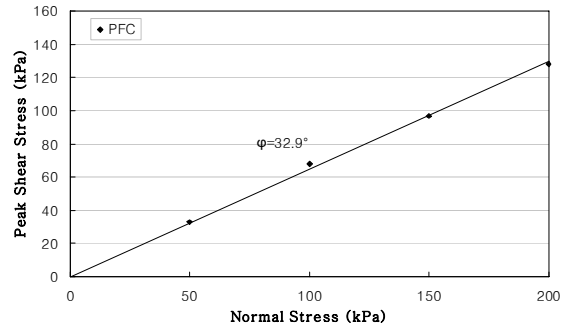
(b) 수치해석

그림 2. 응력-변위 곡선

그림 3과 같이 파괴포락선에서 볼 수 있듯이 실내 실험에 의해 구해진 내부마찰각은 33.0°이고, 수치해석에 의한 내부마찰각은 32.9°로 나타났다. 즉, 0.1°의 차이를 보이면 매우 유사한 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 수치해석이 2차원 해석임에도 불구하고 실내 실험과 매우 일치함으로써 본 연구에서 모델링되고 이용된 직접전단모델과 이로부터 도출된 해석 결과들의 타당성 및 향후 이용 가능성이 검증되었다고 판단된다.



(a) 실내 직접전단시험



(b) 수치해석

그림 3. 파괴포락선

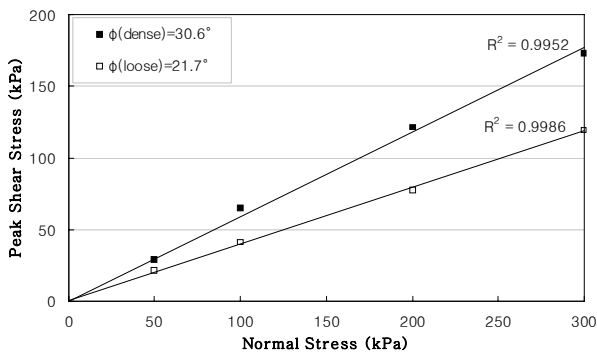
한편, 글래스비즈의 직접전단시험과 엄세종 등(2004)이 실시한 표준사에 대한 직접전단시험 결과를 비교하였다. 엄세종 등(2004)이 실시한 실험에서 얻어진 표준사의 내부마찰각은 37.9°로 글래스비즈의 내부마찰각보다 5°정도 크게 나타났다. 표준사는 12.80kPa의 점착력이 있는 것으로 나타났지만 이것을 감안 하더라도 글래스비즈의 내부마찰각보다 큰 값을 보이는데 이러한 결과는 앞서서도 언급했듯이 입자 형상에 대한 영향으로 판단되며 특히, 입자가 구형일 경우 내부마찰각이 더 작게 산정되는 결과는 앞서 수행되었던 수치해석 결과들과 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 표준사의 경우 글래스비즈에 비해 입자 크기가 작고 입도분포 및 입자 형상이 규칙적이지 않기 때문에 직접적인 비교에 무리가 있을 수도 있다. 따라서 입자 형상만의 영향을 관찰하기위해서 형상 및 크기를 단일화시켜 추가적인 실험이 더 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 직접전단모델과 링전단모델의 비교

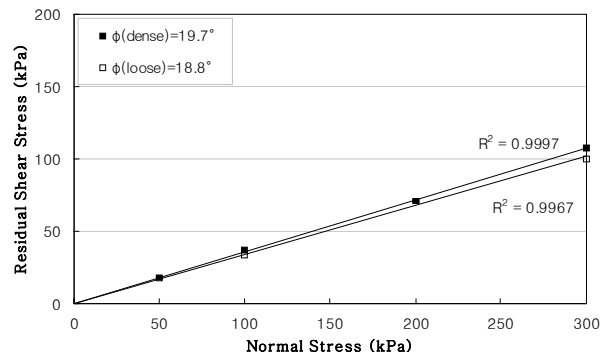
4.1 링전단모델

링전단모델은 링 전단장비 원리를 기본으로 하여 2차원의 단면으로 모델링하였다. 이때, 시료는 가로 3cm, 세로 2 cm의 직사각형 단면으로 모델링 하였으며 상부 수평 벽과 하부 수평 벽은 톱니모양으로 만들고 벽의 마찰계수는 입자의 마찰계수보다 큰 0.9를 적용하여 경계부분에서 전단 파괴가 일어나는 것을 방지하고자 하였다. 또한, 좌우 수직 벽은 대 변위 적용을 가능하게 하는 periodic boundary를 이용하였다. Periodic boundary는 공간상 해석 문제가 순환적으로 반복될 경우 입자수를 줄임으로서 컴퓨터 해석 시간을 단축시키는데 유용하게 이용되는 원리로써 PFC내에서 지원하는 fish function 중 하나이다.

그림 4에서 보인 바와 같이 링전단실험 모델링에서 얻은 최대전단응력에 대한 내부마찰각은 상대밀도 20%에서 21.7°, 상대밀도 90%에서 30.6°로 직접전단모델로 얻어진 내부마찰각에 비해 약 3°정도 크게 나타났다. 반면, 잔류전단응력 상태에서 얻어진 잔류내부마찰각은 상대밀도가 20%, 90%일 때 각각 19.7°와 18.8°로 나타났다. 이러한 결과에서 알 수 있듯이 잔류 상태에서 내부마찰각은 상대밀도에 큰 영향을 받지 않으며 상대밀도 90%와 상대밀도 20%에 대해 같은 수직응력 조건에서 거의 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났다. 다시 말해, 상대밀도에 따라 최대전단응력 상태에서 내부마찰각의 차는 약 9°정도로 큰 차이를 보였지만 잔류전단응력 상태에서 내부마찰각은 약 1°의 차를 보이면 상대밀도 20%, 90%에서 거의 근사한 값을 나타내었다. 이는 이론적으로도 밝혀진 사실로써 동일한 재료에 대해 잔류전단 강도는 하나의 값에 수렴한다는 기존 연구결과와 일치하였다.



(a) 최대전단응력 상태



(b) 잔류전단응력 상태

그림 4. 링전단모델의 파괴포락선

4.2 직접전단모델과 링전단모델의 비교

현재까지 진행된 연구 결과에 의하면 링전단시험으로부터 얻어진 내부마찰각은 직접전단시험으로부터 얻어진 내부마찰각보다 작은 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 링전단모델로부터 얻어진 내부마찰각이 직접전단모델보다 약 3°정도 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과에 대한 원인으로서는 전단응력의 산정 방법의 차이 및 벽면마찰에 의한 영향으로 판단된다. 즉, 직접전단모델의 경우 상부 오른쪽 측벽에서 얻어지는 수평분력의 합으로부터 전단응력이 산정되지만 링전단모델은 전단박스 중앙에 배치된 measurement circle에서 계산되어지는 수평 방향 응력으로 구해진다. 또한 직접전단모델의 전단박스를 이루는 벽들의 마찰계수는 0을 적용한 반면, 링전단모델을 이루는 벽의 마찰계수는 입자자체의 마찰계수인 0.75보다 높은 0.9를 적용하였고 벽 모양을 톱니모양으로 형성하였기 때문에 이러한 요인들이 복합적으로 작용하면서 전단거동에 영향을 미친것으로 판단된다. 현재 국내에서 보유하고 있는 링전단시험 장비는 매우 적은 상황이며 때문에 이에 대한 실험결과들도 매우 미흡한 실정이다. 따라서 더 정확한 결과를 얻고자 한다면 선행적으로 링전단시험을 통한 연구를 진행한 후에 이를 직접전단시험 결과 및 링전단모델과 비교하는 것이 바람직할 것이라 판단된다.

결론적으로 본 연구에서 링전단모델과 직접전단모델의 직접적인 비교를 통한 결론 및 분석은 하지 않았으며 링전단모델을 통해 도출된 결과들의 상대적인 비교를 통해 링전단모델의 전단 거동 및 잔류 전단 거동에 대한 경향만을 파악하였다. 따라서 추후에 링전단모델에 대한 검증이 이루어져야 할 것이며 직접전단시험 결과와의 정확한 비교가 필요할 것으로 판단된다. 이를 위해 현재 링전단시험장비를 개발 중에 있으며 링전단모델에 대한 보완작업이 진행 중에 있다.

5. 입자 형상 및 입자 파쇄가 전단거동에 미치는 영향

5.1 입자 형상의 구성

조립재료의 전단거동은 입자 형상이나 입자 파쇄에 영향을 받는다는 것은 기존 연구결과에서 밝혀진 내용들이다. 특히, 입자형상은 입자파쇄와도 밀접한 관련이 있으며 입자 파쇄는 전체 지반의 특성을 변화시킬 뿐만 아니라 그 지반위에 건설된 구조물의 안정성에도 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 입자 형상과 입자 파쇄와의 관계 및 이들이 전단거동에 미치는 영향에 대해 수치해석을 통해 시각적으로 규명하였다. 본 연구에서 사용된 입자 형상은 그림 5와 같이 6개의 모양으로 구분되어 수행되었다.

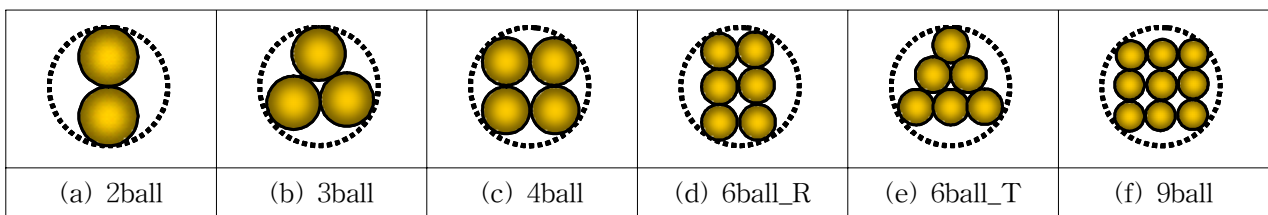


그림 5. 입자의 형상

그림 6에서 표현된 clump 모델과 cluster 모델은 입자파쇄 유무에 따라 구분된다. 앞서 말했듯이 PFC에서 생성되는 입자는 원형으로써 기본적으로 다양한 기하학적 형상을 갖는 입자를 표현하는데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 여러 개의 입자를 묶어 임의의 형상을 만드는 방법이 제시되었다. 그러나 복잡한 형상을 만들기 위해서는 그만큼 많은 원형의 입자가 필요하며 입자수의 증가는 컴퓨터 시간 및 효율성을 저하시키는 문제점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 여러 개의 입자로 형성된 하나의 그룹 내에 접촉은 해석단계에서 건너뛴으로써 해석시간을 단축시키는 원리가 clump 원리이다. 반면, cluster는 하나의 그룹을 이루는 여러 개의 입자간 접촉에 일정한 접촉강도를 부여하여 입자들을 구속시

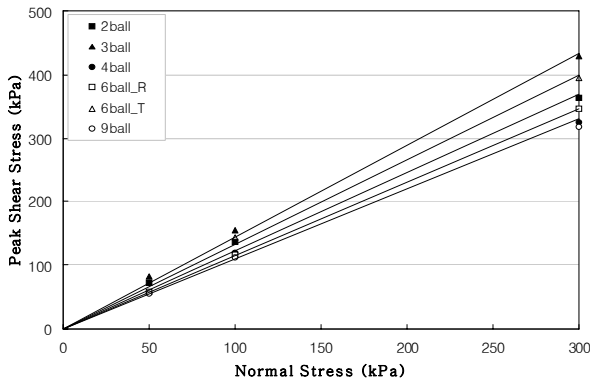
킨다. 따라서 접촉강도 이상의 응력이 작용할 경우 이들 접촉은 분리되어진다.

5.2 입자 형상 및 입자 파쇄에 따른 내부마찰각 변화

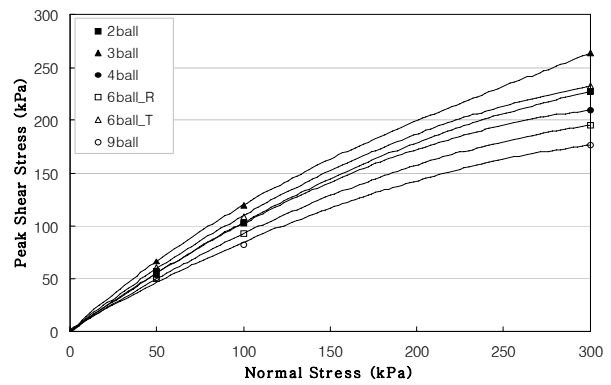
이러한 원리들을 이용하여 얻어진 그림 6의 파괴포락선에서 clump 모델 및 cluster 모델 두 경우 모두 입자형상이 삼각형(3ball, 6ball_T), 직사각형(2ball, 6ball_R), 정사각형(4ball, 9ball) 순으로 내부마찰각이 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 그림 6(b)와 같이 입자간 접촉이 분리되는 cluster 모델의 경우 파괴포락선의 형상이 clump 모델에 비해 비선형성을 띄었으며, 표 2에 나타난 내부마찰각을 비교했을 때 cluster 모델의 내부마찰각이 clump 모델에 비해 다소 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 이미 Feda (2002) 등이 밝힌바 있다.

표 2. 입자파쇄와 내부마찰각의 관계

모델	2ball	3ball	4ball	6ball_R	6ball_T	9ball
Clump	50	54.7	46.9	49.1	52.6	46.5
Cluster	38.3	42.6	36.5	34.4	39.2	31.9



(a) clump 모델



(b) Cluster 모델

그림 6. 입자 파쇄 유무에 따른 파괴포락선

5.3 입자형상과 내부마찰각과의 관계

입자 형상을 정량적으로 표현하기 위해 circularity와 convexity라는 매개변수를 도입하였다. 이때 circularity는 식 (1)과 같고 convexity는 식 (2)와 같이 표현된다. 또한, circularity와 convexity의 값이 작을수록 입자가 뾰족하고 불규칙적인 형상을 갖게 된다.

$$Circularity = \frac{\pi D}{Perimeter} \quad (1)$$

$$Convexity = \frac{\text{실제 입자의 넓이}}{\text{입자의 모서리를 연결하여 만들어진 면의 넓이}} \quad (2)$$

표 3은 입자형상에 대한 circularity와 convexity 값을 보여주고 있다. Circularity는 삼각형 모양이 0.777로 가장 작은 값을 나타냈고 직사각형, 정사각형이 각각 0.836과 0.886으로 산정되었다. 또한, convexity의 경우 입자 표면의 거칠기에 대한 지표로서 삼각형의 경우 입자구성수가 더 적은 3ball이 6ball_T보다 작은 convexity를 나타냈고, 직사각형과 정사각형 역시 입자구성수가 적은 2ball과 4ball이 6ball_R과

9ball보다 작은 convexity를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 입자형상 면에서 삼각형이 가장 불규칙적이고 모난 형상을 가졌다고 할 수 있으며 정사각형이 가장 원형에 가까운 모양임을 알 수 있다.

표 3. 입자 형상의 정량화

	삼각형		직사각형		정사각형	
	3ball	6ball_R	3ball	6ball_T	4ball	9ball
Circularity	0.777		0.836		0.886	
Convexity	0.881	0.883	0.880	0.889	0.887	0.902

그림 7은 삼각형, 직사각형, 정사각형을 대표하는 3ball, 2ball, 4ball에 대한 내부마찰각과 circularity의 관계를 나타낸 것이다. 입자 파쇄에 관계없이 circularity가 작을수록 내부마찰각은 크게 나타났으며 circularity 커질수록 내부마찰각 작아지는 것을 확인하였다. 즉, 삼각형 모양의 모델이 가장 큰 내부마찰각을 나타냈고 직사각형, 정사각형 순으로 작은 값을 보였다. 그림 8은 입자 형상별 convexity와 내부마찰각의 관계를 나타낸 것이다. Convexity는 같은 입자 형상에 대해 입자 구성수가 많을수록 큰 값을 나타냈으며 내부마찰각은 작게 나타났다.

결과적으로 circularity와 convexity가 가장 작은 삼각형이 가장 모나고 표면이 매끄럽지 않다는 것을 확인하였고 직사각형, 정사각형 순으로 나타났다. 또한, circularity와 convexity는 내부마찰각과 반비례적인 관계를 보였으며 이것은 기존의 연구결과와 일치함을 확인하였다. (Lee and Farhoomand, 1967; Hagerty et al., 1993; Lade et al., 1996)

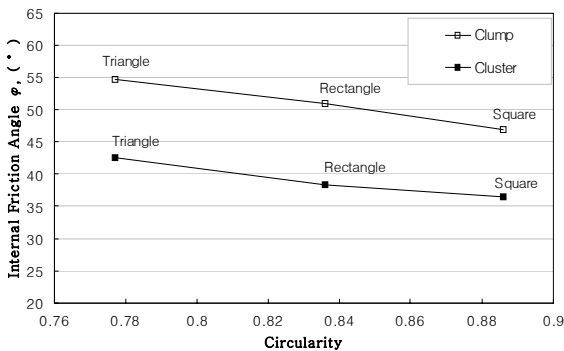


그림 7. Circularity와 내부마찰각의 관계

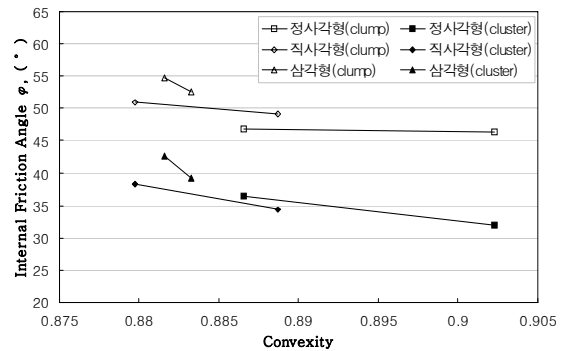


그림 8. Convexity와 내부마찰각의 관계

5.4 수직응력 변화에 따른 입자 파쇄 전개

그림 9는 전단 완료 후 입자 파쇄 정도를 수직응력 조건에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 수직응력이 낮은 조건에서는 뚜렷한 전단면을 형성하기보다는 시료 전체영역에 걸쳐 입자 파쇄가 발생한다. 그러나 수직응력이 증가할수록 입자 파쇄는 전단면 근처에서 집중적으로 발생하고 이로 인해 전단대가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

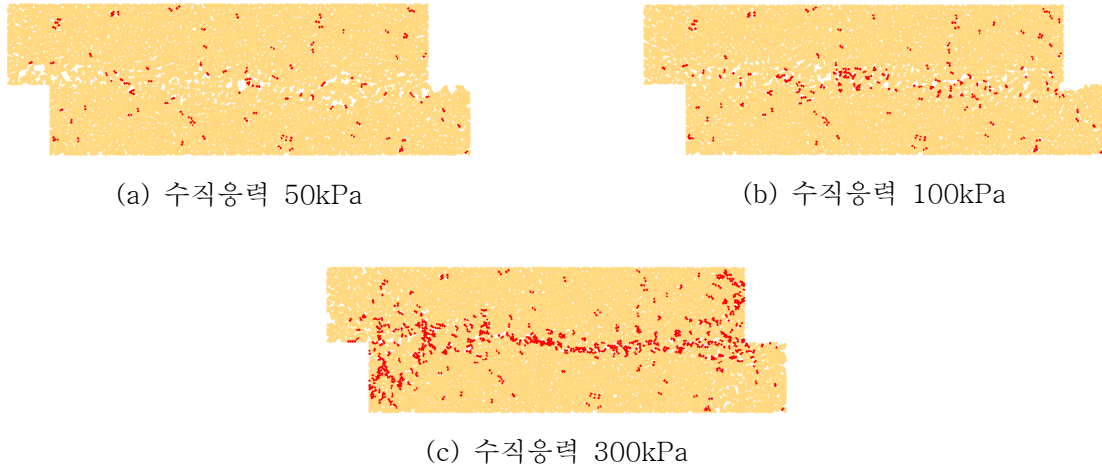


그림 9. 수직응력 변화에 따른 입자파쇄 전개

6. 결론

본 연구에서는 DEM을 이용하여 조립재료의 전단거동 특성에 대해 연구하였다. 특히, 직접전단실험과 링전단실험을 모델링하여 각각에 대한 분석 및 상대적인 비교를 통해 기존에 밝혀졌던 지반공학적 연구 결과들을 재확인하였으며 새로운 연구에 대한 기반을 마련하였다. 본 연구에서 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 수치해석모델의 적용성을 검토하기 위해 글래스비즈를 이용한 실내 직접전단실험과 수치해석적 직접전단모델을 비교하였다. 그 결과, 실내 실험으로부터 얻어진 잔류 내부마찰각은 33.0° 이고 수치해석의 경우 32.9° 로 실험결과와 수치해석 결과가 매우 유사함을 확인하였다. 이는 수치해석이 2차원적으로 이루어졌음에도 불구하고 본 연구에서 수행된 직접전단모델을 더 다양한 현실 조건의 전단 거동 분석에 적용함으로써 간편하고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 직접전단모델과 더불어 링전단실험을 수치해석적으로 모델링하였다. 내부마찰각 관점에서 봤을 때 링전단모델이 조금 더 큰 값을 나타냈으며 이는 기존의 연구 결과들과 반대의 경향을 보이는 것이다. 따라서 링전단모델은 추후 좀 더 보완이 필요할 것이며 실내 링전단실험과의 보정(calibration) 과정도 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 입자 형상 및 입자 파쇄에 대한 전단거동 변화를 관찰하기 위해 6가지 입자형상을 각각 clump와 cluster 모델로 모델링하여 해석을 수행하였다. 그 결과 cluster 모델은 입자 파쇄로 인해 내부마찰각의 감소를 보였으며 파괴포락선이 비선형성을 띄는 것으로 나타났다. 입자 형상을 정량화하는 매개변수인 circularity와 convexity는 내부마찰각과 반비례적인 관계를 나타냈다. 즉, 입자 형상이 삼각형일 때 circularity와 convexity가 가장 작은 모나고 거친 입자인 것으로 나타났으며 내부마찰각은 가장 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 엄세종, 원명수, 김형주 (2004), “직접전단시험에 의한 모래의 전단강도 특성”, 2004 대한토목학회 정기학술대회.

2. Fedá, J. (2002), Notes on the effect of grain crushing on the granular soil behavior, *Engineering Geology*, Vol.63, pp. 93-98.
3. Hagerty, M. M., Hite, D. R., Ulrich, C. R. and Hagerty, D. J. (1993), One dimensional high pressure compression of granular media, *J. Geotech. Eng.*, Vol.119, No.1, pp.1-18.
4. Lade, P. V., Yamamuro, J. A. and Bopp, P. A. (1996), Significance of particle crushing in granular materials, *J. Geotech. Eng.*, Vol.122, No.4, pp.309-316.
5. Lee, K. L. and Farhoomand, I. (1967), Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression, *Can. Geotech. J.*, Vol.4, No.1, pp.68-86.