

## PFC를 이용한 입자 파쇄 모델의 적용성 연구

### Applicability of Particle Crushing Model by Using PFC

정 선 아<sup>1</sup> Jeong, Sun-Ah  
김 은 경<sup>2</sup> Kim, Eun-Kyung  
이 석 원<sup>3\*</sup> Lee, Seok-Won

#### ABSTRACT

Granular soils having a large particle size have been used as a filling material in the construction of foundation, harbor, dam, and so on. Consequently, the shear behavior of this granular soil plays a key role in respect of stability of structures. For example, soil particle crushing occurring at the interface between structure and soil and/or within soil mass can cause a disturbance of ground characteristics and consequently induce issues in respect of stability of structures. In order to investigate the shear behavior according to an existence and nonexistence of particle crushing, numerical analyses were conducted by using the DEM (Discrete Element Method)-based software program PFC2D (Particle Flow Code). By dividing soil particle bonding model into crushing model and noncrushing model, total four particle bonding models were simulated and their results were compared. Noncrushing model included one ball model and clump model, and crushing model included cluster model and Lobo-crushing model. The combinations of soil particle followed the research results of Lobo-Guerrero and Vallejo (2005) which were composed of eight circles. The results showed that the friction angle was in order of clump model > cluster model > one ball model. The particle bonding model compared to one ball model and noncrushing model compared to crushing model showed higher shear strength. It was also concluded that the model suggested by Lobo-Guerrero and Vallejo (2005) is not appropriate to simulate the soil particle crushing.

#### 요 지

기초 지반이나 댐, 사면 등을 건설할 경우, 성토재로 입자 크기가 큰 조립 재료를 많이 사용하고 있다. 따라서 이러한 조립재료의 전단 거동은 구조물의 안정성에 영향을 미치게 된다. 예를 들어, 구조물과 입자의 접촉면 혹은 입자들간의 접촉면에서 발생하는 입자 파쇄는 전체 지반의 특성을 변화시키고 따라서 구조물의 안정성에 문제를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 입자의 파쇄 유무에 따른 전단 거동의 특성을 파악하기 위해 개별요소법(DEM, Distinct Element Model)을 기반으로 하는 수치해석 프로그램 PFC2D를 이용하여 직접전단실험을 재현하였다. 입자의 모델을 파쇄 모델과 비 파쇄 모델로 구분하여 총 4개의 모델을 모사하고 그 결과를 분석하였다. 비 파쇄 모델에는 one ball 모델과 clump 모델이, 파쇄 모델에는 cluster 모델과 Lobo-crushing 모델을 적용하였다. 입자의 구성은 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 제안한 8개 입자의 조합으로 구성하였다. 해석 결과, 내부마찰각 순서는 clump 모델 > cluster 모델 > one ball 모델 순이며, 전체를 비교해 봤을 때 원형 입자모델보다 입자 결합모델이, 파쇄 모델보다 비 파쇄 모델의 내부마찰각이 크게 나타났다. 또한 기존에 제시된 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)의 모델은 입자 파쇄 거동을 모사하기에는 부적합하다는 결론을 얻을 수 있었다.

**Keywords** : Direct shear test, PFC, DEM, Particle crushing, Friction angle, Shear behavior

- 1 비회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Non-Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University)
- 2 비회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Non-Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University)
- 3\* 정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, E-mail: swlee@konkuk.ac.kr)

## 1. 서론

기초 지반이나 댐, 사면 등을 형성하는 조립 재료는 다양한 토목 구조물의 안정성에 영향을 미친다. 예를 들어, 토목 구조물과 쇄석이나 모래와 같은 조립 재료들은 외부로부터 작용되는 응력에 의하여 입자 구조가 파쇄 될 수 있으며 이러한 입자의 파쇄는 전체 지반의 특성을 변화시키고 구조물의 불안정성을 유발한다(Bolton, 1986; Feda, 2002). 따라서 실내실험 및 불연속 요소를 도입한 개별요소법(DEM, Distinct Element Model)을 이용해 입자 파쇄에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 기존의 입자 재료를 기초로 한 연구들을 살펴보면 실험적 연구 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 입자 재료의 파쇄가 어떻게 전개되는지에 대하여 많은 연구를 수행하였다. 이러한 연구들로부터 입자 파쇄가 입자크기, 입도분포, 입자강도, 간극비, creep에 영향을 받는다는 것이 밝혀졌다. 입자 파쇄는 입자의 강도와 직접적인 관련이 있으며(Feda, 2002; Hardin, 1985; Lade et al., 1996; McDowell and Bolton, 1998), 모난 입자들이 둥근 입자보다 더 쉽게 파쇄되며(Lee and Farhoomand, 1967; Hagerty et al., 1993; Lade et al., 1996), 만약 입자 재료가 조밀한 상태가 아닌 느슨한 상태라면 일축압축에서 더 낮은 수직응력 값에서 파쇄는 시작된다(Hagerty et al., 1993; McDowell and Bolton, 1998; Nakata et al., 2001)라고 밝히고 있다. 특히 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)는 DEM을 활용한 2차원 직접전단모델을 통해 입자파쇄를 모사하였다. 이 연구에서 입자파쇄는 원형의 입자가 파괴기준을 만족하면 3가지 다른 크기를 갖는 8개의 원형입자로 전환 되면서 입자 파쇄를 모사하였다. 이 연구를 통해 연구자는 입자 파쇄가 전단대(shear zone)에 집중된다는 것을 밝혔다.

본 연구에서는 입자의 파쇄 유무에 따른 전단 강도의 특성을 정확히 비교하기 위해 개별요소법을 기반으로 하는 수치해석 프로그램 PFC<sup>2D</sup>를 이용하여 직접전단실험을 재현하였으며, 입자의 파쇄 모델과 비 파쇄 모델을 구분해 결과를 분석하였다. 본 연구에서 사용한 비 파쇄 모델로는 원형모양의 단일 입자모델인 one ball 모델과 8개의 원형 입자를 서로 결합시켜 접촉점에서의 파괴가 영구적으로 발생하지 않는 모델인 clump 모델을 사용하였다. 파쇄 모델로는 8개의 원형입자가 일정한 접촉강도로 결합되어 있으며 접촉강도 이상의 외력을 받으면 결합이 파괴되는 모델인 cluster 모델과 원형의 입자가 입자의 허용 인장강도

이상의 외력을 받으면 8개의 작은 입자로 대체되는 모델인 Lobo-crushing 모델(Lobo-Guerrero and Vallejo, 2005)을 사용하였다. 또한 상대밀도가 20%일 때와 90%일 때 두 가지 경우로 구분하여 각각 느슨한 사질토와 조밀한 사질토를 모사하여 결과를 비교하였다. 이러한 연구를 통하여 입자파쇄가 전단거동에 미치는 영향을 조사함과 동시에 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 그들의 연구에서 제시한 모델의 타당성을 검증하고자 한다.

단, 본 연구는 특정 실내 전단실험 결과를 토대로 보정과정(calibration procedure)을 통하여 미시변수(microparameter)를 결정함으로써 실내실험을 수치해석적으로 분석하고자 한 연구가 아님을 밝히고자 한다. 즉, 본 연구의 주된 목적은 수치해석 수행을 통하여 사용하고자 하는 수치해석 툴인 PFC 직접전단 모델에 대한 신뢰성을 확립하고, 이를 사용하여 본 연구에서 제안한 입자 구성 모델과 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 제시한 입자 구성 모델의 타당성을 상대적인 입자파쇄의 전개 및 전단거동의 변화를 통하여 고찰하고자 하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 모델링이 모든 조건의 직접전단실험 모델링에 적용될 수 없음을 밝히고자 한다.

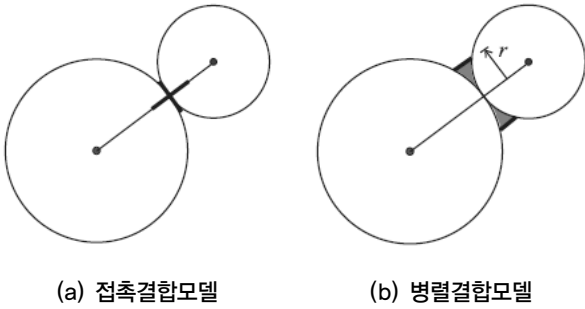
## 2. 수치해석 모델링

본 연구에서 사용한 PFC<sup>2D</sup>(Particle Flow Code)는 강성 원형 입자들로 구성된 집합체의 거동 및 상호 작용을 모델화한 상용 수치해석 프로그램으로 불연속적인 원형 입자 운동을 기본으로 하고 있기 때문에 토사 지반의 모사가 자유롭고 입자 파쇄의 시각화에 효과적이다.

### 2.1 접촉 모델

입자들은 접촉에서 전개되는 힘을 통하여 다른 입자요소나 경계요소와 상호작용을 한다. 접촉은 반드시 두 개의 요소(입자-입자 또는 입자-경계)와 관련되어 있으며, 하나의 점에서 발생한다. PFC<sup>2D</sup> 내에서 접촉모델은 임의의 접촉에서 일어나는 물리적인 거동을 의미하며, 요소들의 접촉 모델은 접촉강성 모델(contact-stiffness model), 미끄러짐 모델(slip-separation model), 결합 모델(bonding model)로 구성된다.

접촉강성 모델은 강성의 값을 결정하는 힘-변위 관계식을 이용해 수직 접촉력과 전단 접촉력을 구하기 위해 사



(a) 접촉결합모델 (b) 병렬결합모델

그림 1. 입자의 결합모델

용하고, 미끄러짐 모델은 접촉한 두 입자들 사이에 결합력이 작용하지 않고 서로 미끄러지도록 하여 전단 접촉력과 수직 접촉력의 관계를 나타내기 위해 사용한다.

또한 PFC<sup>2D</sup>에서는 입자 간 접촉에서의 결합을 허용하며 기본적으로 접촉결합 모델과 병렬결합 모델을 지원하는데, 그림 1(a)의 접촉결합은 인접 요소간의 접촉점에서 일정한 수직강성 및 전단강성을 갖는 한 쌍의 스프링으로 표현되며 이 스프링은 규정된 인장강도 및 전단강도를 가진다. 그림 1(b)의 병렬결합은 입자 요소가 구 또는 실린더 형태로 간주되며 원 또는 사각 단면에서의 접촉 거동을 나타낸다. 접촉결합은 수직 인장 및 전단 접촉력에 대하여 한계치를 부여하고자 할 경우 적합한 모델로 접촉결합이 파괴되거나 없는 경우에는 미끄러짐 모델이 활성화되며 이때의 전단 접촉력의 한계는 단지 접촉 마찰계수와 수직 압축 접촉력에 의해서 결정된다. 한편, 병렬결합은 각 접촉에서 미끄러짐이 없는 상태로 회전이 발생하는 것을 방지하고자 할 경우에 적합하며, 기존에 하중을 받고 있는 집합체에 새롭게 접합체가 첨가된 효과를 모델링 할 때에도 이용된다. 접촉 결합 모델에 있어서 접촉점에서 발생하는 인장력이 규정된 수직방향의 결합강도, 즉 인장강도에 도달하면 결합은 깨어지고 수직 및 전단 접촉력은 0이 된다. 전단 접촉력이 규정된 전단방향의 결합강도 즉, 전단강도에 도달하면 결합은 깨어나 접촉력은 그대로 존재하게 된다.

## 2.2 직접 전단모델

입자들의 전단 접촉면에서 입자 파쇄 유무에 따른 전단강도의 변화를 알아보기 위해 지름 6cm, 높이 2cm의 직접 전단실험 박스를 PFC<sup>2D</sup>를 이용하여 2차원의 직사각형 단면으로 모델링하였다. 해석에서 사용하는 전단박스는 마찰이 없는 경계요소(wall)로 모델링하였으며 총 8개의

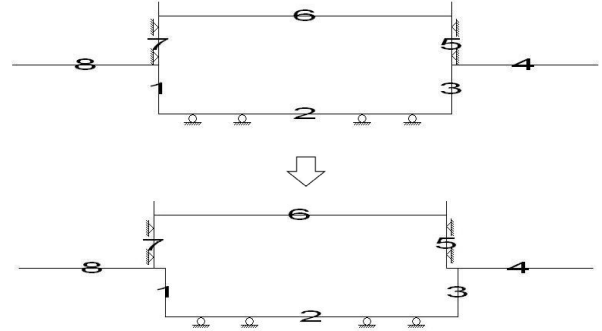


그림 2. 수평변위 발생 전·후의 직접전단박스 모델도

표 1. Blasting sand 기본 물성

Properties	Value
$R_{min}$ (mm)	0.075
$R_{max}$ (mm)	2
$D_{50}$ (mm)	0.73
$e_{min}$	0.7
$e_{max}$	0.95
$G_s$	2.65
Friction angle	37
Friction coefficient	0.754

wall로 구성되어 있다.

그림 2는 직접전단박스의 모델도로 여기서 상부박스는 4, 5, 6, 7번 wall로 구성되어 있으며 5, 7번 wall은 고정된 상태이다. 이 때, 6번 wall은 servo controlled system(Itasca Consulting Group, 2004)에 의해 y축 방향으로 움직이며 연직응력을 일정하게 유지시키는 역할을 한다. 하부박스는 1, 2, 3, 8번 wall로 구성되어 있으며 일정한 속도로 우측으로 이동하며 4번과 8번 wall은 전단이 진행되는 과정에서 상·하부 전단박스 사이에서 발생하는 입자요소의 유실을 막기 위한 용도로 사용되었다. 전단에 의해 발생하는 힘은 5번 wall과 입자 사이에 발생하는 접촉력으로 나타낼 수 있으며 이 값을 측정해 전단면으로 나누어 전단응력을 산출하였다.

수치해석에 사용된 입자는 blasting sand로 이에 대한 기본 물성은 표 1과 같으며 입자의 크기는 blasting sand의 입도분포곡선 상에서의  $D_{50}$ 값을 적용하였다. Blasting sand의 물성을 기본으로 수치해석에 사용된 입자의 물성은 표 2와 같으며 기본 물성을 제외한 입력변수들은 수치해석 보정과정(calibration procedure)을 통하여 적절한 값을 산정하였다. 여기서 초기 간극률은 Hainbuchner et al.(2003)이 제안한 공식을 이용하여 3차원 상의 간극률을 2차원으로 바꾸어 적용하였다.

표 2. 수치해석에 입자의 사용된 물성

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Normal and Shear Stiffness (N/m <sup>3</sup> )	Normal/Shear Stiffness Ratio	Friction Coefficient	Gravity (m/s <sup>2</sup> )	Initial Porosity		Parallel Bond (Pa)	
					Dense	Loose	Normal	Shear
2,650	1×10 <sup>8</sup>	1	0.75	9.81	0.1442	0.2204	2×10 <sup>5</sup> 8×10 <sup>5</sup>	2×10 <sup>5</sup> 8×10 <sup>5</sup>

표 3. 수치해석 수행 방법 및 조건

Ring Shear Model		상대밀도	수직응력(kPa)
Non-crushing Model	One ball	20%, 90%	100, 200, 300
	Clump		
Ring Shear Model		결합강도/인장강도(Pa)	수직응력(kPa)
Crushing Model	Cluster	2.5×10 <sup>5</sup> , 1×10 <sup>6</sup>	100, 200, 300
	Lobo-crushing		

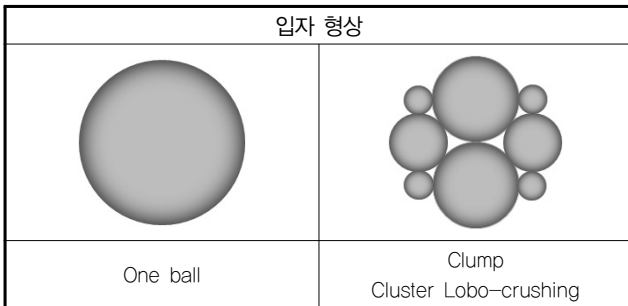
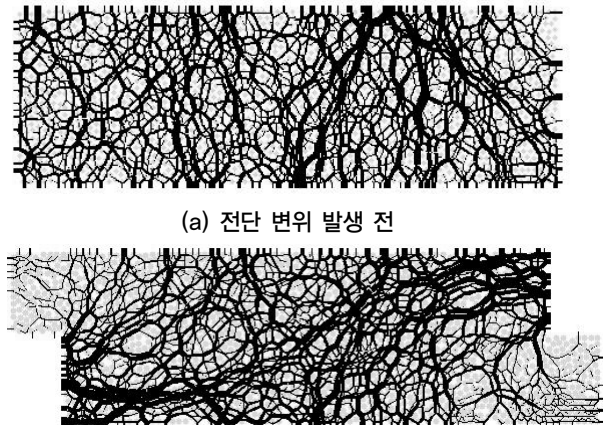


그림 3. 모델별 입자형상

### 2.3 모델별 수치해석

본 연구에서 수행한 모델별 수치해석 방법 및 조건은 표 3과 같다. 해석모델은 크게 파쇄 유무에 따라 비 파쇄 모델과 파쇄 모델로 나누었으며 one ball 모델, clump 모델이 비 파쇄 모델에 해당되고 cluster 모델, Lobo-crushing 모델이 파쇄 모델에 해당된다. 여기서 one ball 모델이란 원형모양의 단일입자 모델이고, clump 모델은 그림 3과 같은 8개의 원형입자를 서로 결합시켜 접촉점에서의 파괴가 영구적으로 발생하지 않는 형태를 말하며 이 두 가지 모델은 수치해석에서 비 파쇄 모델에 해당한다. Cluster 모델은 8개의 원형입자가 일정한 접촉강도로 결합되어 있으며 접촉강도 이상의 외력을 받으면 결합이 파괴되는 모델이고, Lobo-crushing 모델은 원형의 입자가 입자의 허용인장강도 이상의 외력을 받으면 8개의 작은 입자로 대체되는 모델로 이 두 가지는 수치해석에서 파쇄 모델에 해당한다.

각 모델을 구성하는 입자는 단위 두께를 갖는 원기둥으로 one ball 모델의 단일입자 면적과 clump 모델, cluster 모델의 8개 입자 면적의 합이 동일하도록 모델링 하였다. 반면, Lobo-crushing 모델의 경우 전단 과정 중 여러 개의 작은 입자로 대체되는 모델의 특성으로 인해 원래의 원형입자 크기의 테두리



(a) 전단 변위 발생 전

(b) 전단 완료 후

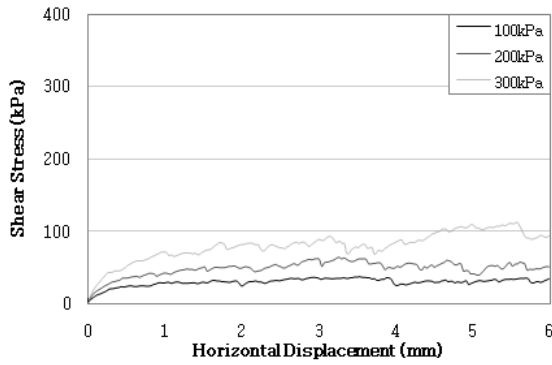
그림 4. 직접전단모델의 접촉력 분포 양상

에서 벗어나지 않도록 입자를 생성하였고, 따라서 원래의 면적에 비해 생성된 8개의 입자 면적이 작아지는 단점이 있다.

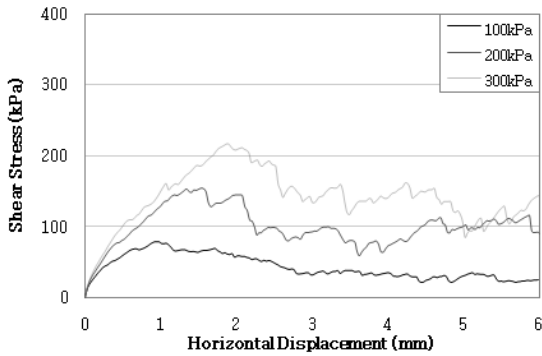
## 3. 전단강도 및 입자 파쇄 결과 분석

### 3.1 One ball 모델의 전단강도

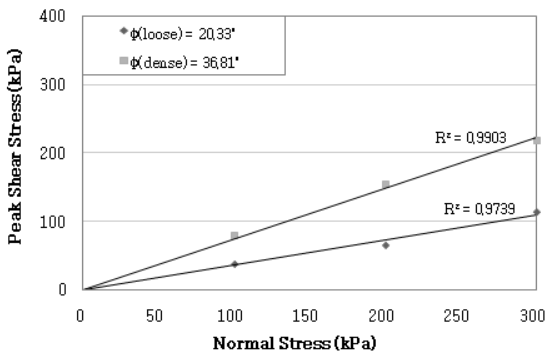
One ball 모델은 단위 폭을 갖는 원기둥으로 이루어진 시료에 대한 비 파쇄 모델로 상대밀도 조건과 수직응력 조건을 달리하여 실행하였다. 그림 4는 one ball 모델을 사용해 직접전단실험을 수행한 후 이를 시각적으로 나타낸 것이며 전단변위 발생 전과 전단이 완료된 후 시료 전체에 분포한 접촉력을 보여주고 있다. 전단변위가 발생하기 전에는 시료 전체에 접촉력이 고르게 분포하고 있는 양상을 볼 수 있으며 전단이 완료된 후에는 우측 상단과 좌측 하단에 접촉력이 집중하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 하부 전단박스가 우측 방향으로 이동하고 있기 때문이며 따라



(a) 상대밀도 20%



(b) 상대밀도 90%



(c) 파괴포락선

그림 5. One ball 모델의 응력-변위 곡선과 파괴포락선

서 전단이 진행되는 동안 우측 상단부와 좌측 하단부의 접촉력을 측정해 전단응력을 산출하게 된다. 수평변위는 컴퓨터 해석시간 및 전단면의 영향을 고려하여 최대 전단변위 6 mm로 제한하였으며 이는 입자 직경의 약 8배에 해당한다.

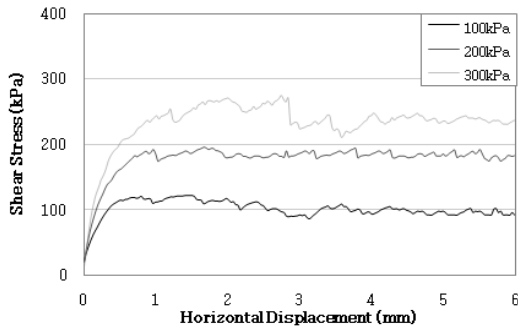
그림 5는 one ball 모델의 직접전단실험으로부터 얻어진 전단응력과 수평변위와의 관계를 나타낸 것으로 수직응력이 증가할수록 최대 전단응력도 단계적으로 증가하였다. 그림 5(a)에 보인 바와 같이 상대밀도가 20%인 경우 일반적인 느슨한 사질토의 거동을 보이고 그림 5(b)에서 나타낸 바와 같이 상대밀도가 90%인 경우 뚜렷한 파괴점이 나타나는 조밀한 사질토의 거동을 나타내고 있다. 이 결과로부터 구해진 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 그림

5(c)에 도시하였다. 상대밀도가 20%, 90%일 때의 내부마찰각은 각각 20.3°, 36.8°로 엄세종 등(2004)이 주문진 표준사를 이용해 직접전단실험으로 구한 상대밀도 25%와 75%에 대한 내부마찰각 31.9°, 38.0° 보다 작은 값을 보이고 있다. 상대밀도를 고려하더라도 상당한 차이가 나타나는데 이는 해석에 사용된 입자의 특성에 기인한 것으로 one ball 모델에서 사용한 입자는 실제 표준사의 형상과는 달리 표면이 매끄러운 원형의 입자이므로 실제 실험보다 작은 결과 값이 도출되었다. 이처럼 PFC<sup>2D</sup>에 의해 생성되는 단일입자를 그대로 해석에 적용할 경우 전단거동의 재현에 문제가 있으며, 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 clump, cluster 모델과 같은 입자 결합 모델을 도입하였다.

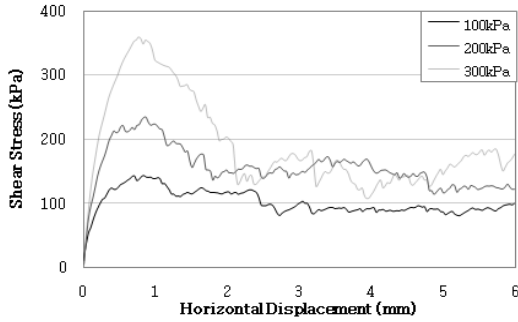
### 3.2 Clump 모델의 전단강도

Clump 모델이란 PFC2D에서 지원하는 하나의 입자 결합으로 기존의 원형입자로 인한 해석상의 한계를 보완하기 위해서 적용한 모델이다. Clump 모델의 원리는 원형으로 된 여러 입자들을 하나의 그룹으로 묶고 그룹 내 단일 입자들의 점점에 영구적인 접촉강도를 부여해 그 자체가 하나의 입자요소로 거동하도록 하는 모델로 본 연구에서는 이를 비 파쇄 결합모델로 정의하였다. Clump는 강체로 거동하며 clump 내부의 입자들은 어느 정도 중첩이 허용된다. 이 때, 이 중첩에 의한 접촉력은 발생하지 않지만 clump가 생성되거나 clump에 입자가 추가될 때 존재했던 접촉력은 해석하는 동안 변하지 않고 보존된다. 그림 3처럼 clump 모델을 구성하고 있는 8개 입자면적의 합은 one ball 모델에서 사용한 단일 입자면적과 동일하며 이는 두 모델에 동일한 간극률을 적용했음을 의미한다. 본 연구에서 clump, cluster 그리고 Lobo-crushing 모델에서 그림 3과 같이 8개 입자의 조합으로 한 개의 단위 입자를 구성한 이유는 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)의 결과를 참조하였기 때문이다. 즉 그들은 실제 조립토 입자를 파쇄시켜 입자의 파쇄모양을 관찰하였고, 그 결과를 이용하여 그림 3과 같은 8개 입자 형성 모델을 제안하였다.

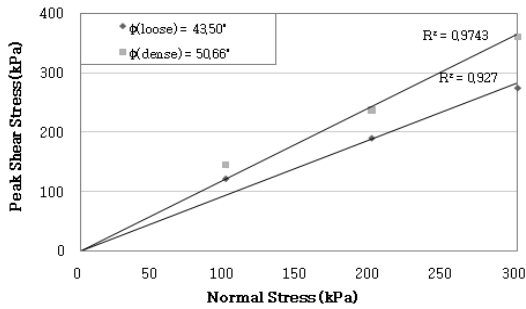
수치해석 결과 그림 6에서 보인 바와 같이 각각의 상대밀도에서 one ball 모델보다 최대 전단응력이 크게 나타났으며 이것은 입자 파쇄 유무가 아닌 입자의 형상 차이로 인해 내부마찰각의 차이가 크게 발생하는 것을 보여준다. 이러한 차이는 입자의 표면 굴곡의 증가로 인해 전단이 진행되는 동안 입자 사이의 맞물림(interlocking) 효과를 증



(a) 상대밀도 20%



(b) 상대밀도 90%



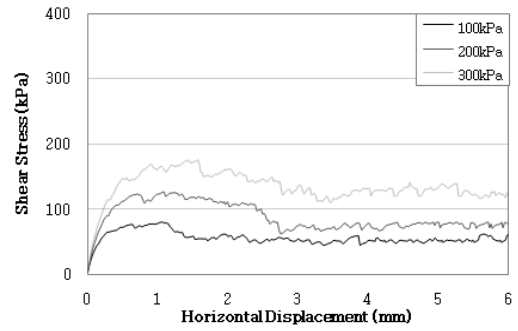
(c) 파괴포락선

그림 6. Clump 모델의 응력-변위 곡선과 파괴포락선

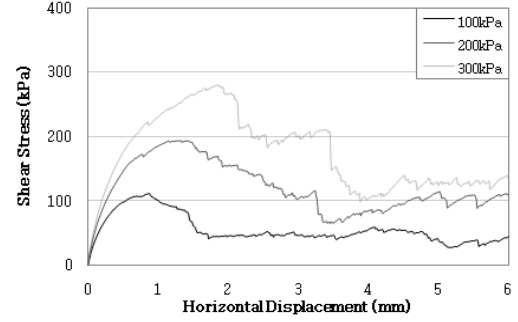
대시켜 나타나는 것으로 입자의 표면 굴곡이 증가하면 최대 전단응력 및 내부마찰각이 증가한다는 것을 보여주고 있다. 이 결과를 실제 조립토의 전단과 비교해보면 입자의 형상 관점에서는 단일원형입자 모델보다 비슷한 결과에 접근했다고 볼 수 있지만 입자의 파쇄에 대해 고려하지 않았기 때문에 실제 조립토의 전단거동보다 내부마찰각이 크다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 Cluster 모델의 전단강도

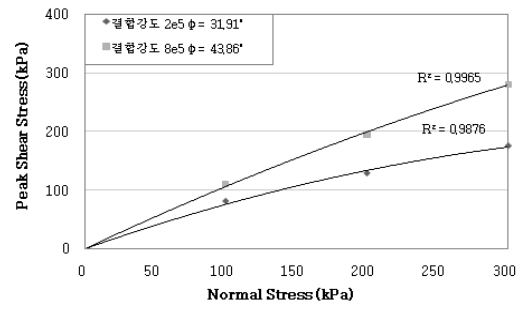
입자의 파쇄는 응력의 이방성, 입자의 물리적·화학적 특성, 기하학적 형상 등 많은 내적·외적 요인들로 인해 다양하게 나타나기 때문에 정확한 파괴 강도나 파괴 정도를 예측하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이런 요인들을 단순화시켜 PFC<sup>2D</sup>로 표현하고 이를 바탕으로 신뢰



(a) 결합강도 200kPa



(b) 결합강도 800kPa



(c) 파괴포락선

그림 7. Cluster 모델의 응력-변위 곡선과 파괴포락선

할 만한 결과를 얻기 위해 파쇄모델로 cluster 개념을 도입해 연구를 진행하였다.

Cluster 모델은 원형 입자 사이의 접촉이 유한한 강도의 결합을 가지고 있는 파쇄 결합 모델로 입자의 형상과 파쇄 양상을 실제 입자와 비슷하게 재현하는 것이 가능하다. 이러한 입자 사이의 접촉은 입자 간에 일정한 결합강도를 부여함으로써 형성되기 때문에 결합강도 이상의 외부 응력을 받으면 접촉이 분리되어 입자의 파쇄를 재현하게 된다. 하나의 단위입자 내부의 결합은 병렬결합이며, 입자사이의 적절한 결합강도를 적용하기 위해 결합강도의 변화와 최대 전단응력의 상관성을 분석해 가장 민감하게 변화하는 결합강도 구간의 20%와 80%에 해당하는 값인  $2 \times 10^5 \text{Pa}$ 와  $8 \times 10^5 \text{Pa}$ (조선아 등, 2009)을 해석에 적용했다.

수치해석 결과를 살펴보면 그림 7에서 보인 바와 같이 결합강도 800kPa의 경우 전단과정에서 입자 사이의 결합

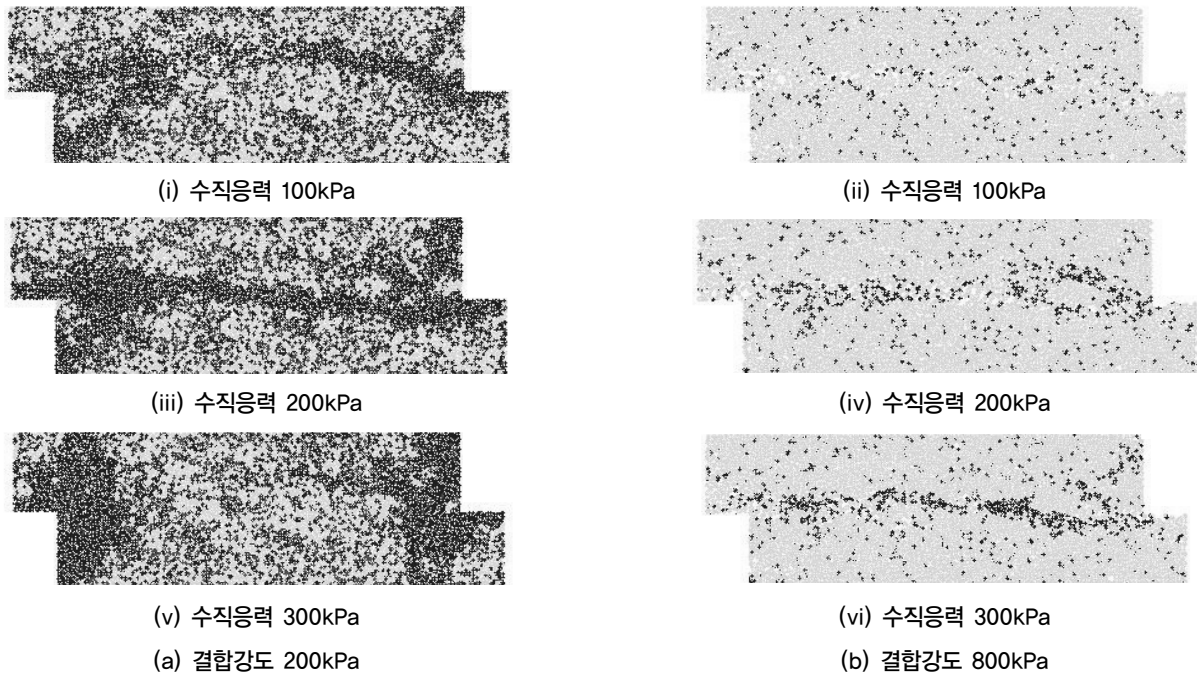


그림 8. Cluster 모델의 결합강도에 따른 입자 파쇄

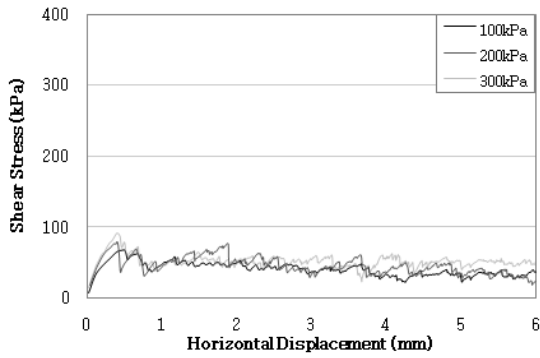
이 깨지기 때문에 clump 모델 보다 약 7°에서 10°정도 작은 값을 보이고 있다. 또한 상대밀도 90%의 조건에서 실제 전단실험과 같이 조밀한 거동(그림 7(b))을 하며 전단 완료 후 전단박스 내 결합 상태를 보면 그림 8(a)에서 보인 바와 같이 대부분의 결합 파괴는 전단면에서 발생했음을 알 수 있다. 그러나 결합강도가 200kPa인 경우 그림 7(a)와 같이 조밀한 거동이 나타나지 않는데 이는 결합의 파괴 정도에 의한 것으로 결합강도 800kPa일 때는 전단대를 제외한 나머지 부분에서는 거의 결합이 깨지지 않지만 결합강도 200kPa의 경우는 그림 8(a)에서 보인 바와 같이 전단대뿐만 아니라 그 외의 부분에서도 많은 결합이 파괴되므로 입자사이의 결합 파괴로 인한 입자 굴곡의 영향으로 인해 전단강도의 증가 효과가 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7(c)에서 알 수 있듯이 파괴포락선이 비선형적으로 나타나는데 이는 전단에 의한 입자 파쇄가 전단저항각의 저하를 유발하고 수직응력이 증가하면 그만큼 더 많은 입자 파쇄 및 재배열이 발생하게 되어 팽창(dilation) 현상이 감소하기 때문이라고 할 수 있다. 이러한 cluster 모델의 결과는 clump 모델보다 입자의 전단 거동 및 파쇄 현상을 실제와 더 유사하게 표현할 수 있음을 보여주는 결과이다. 입자의 파쇄 현상을 시각적으로 보이기 위해 그림 8에 결합강도와 수직응력에 대한 각각의 모델을 나타냈다. 결합강도가 200kPa인 경우 낮은 수직응력에서는 주로 전단대에서 결합파괴가 발생하지만 수직응력이 높아질수록 입

자와 경계요소가 접하는 부분에서의 결합 파괴 발생이 증가하는 경향을 보인다. 결합강도가 800kPa인 경우 수직응력이 높아질수록 전단대에서 뚜렷한 결합파괴가 관찰되며 전단대를 제외한 부분에서의 파괴는 거의 나타나지 않는다. 따라서 결합강도 800kPa인 경우가 결합강도 200kPa인 경우의 파괴포락선보다 비교적 선형에 가깝게 나타난다.

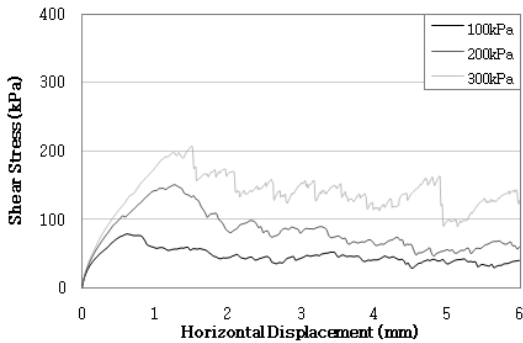
### 3.4 Lobo-crushing 모델의 전단강도

Lobo-crushing 모델은 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)의 연구결과처럼 원형입자가 미리 정의한 인장파괴 기준 이상의 접촉력을 받으면 그림 3과 같이 파괴되기 전의 입자와 동등한 8개의 작은 입자 집합으로 대체되는 모델로, 본 연구에서는 허용 인장강도를 cluster 모델에서 사용한 입자 결합강도  $2 \times 10^5 \text{Pa}$ ,  $8 \times 10^5 \text{Pa}$ 로 적용했다. Lobo-crushing 모델은 입자의 허용 인장강도 기준으로 파쇄를 결정하고 cluster 모델은 입자 간의 결합강도를 기준으로 파쇄를 결정하기 때문에 결과적으로 두 모델의 파괴 기준에 대한 비교가 가능할 것으로 판단된다.

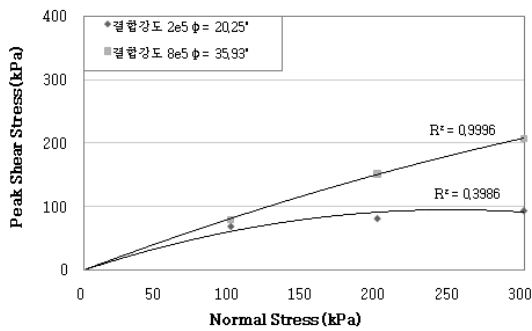
수치해석 결과 그림 9에서 보인 바와 같이 인장강도가 800kPa인 경우 입자의 파쇄가 거의 발생하지 않기 때문에 one ball과 비슷한 거동을 보이지만 인장강도가 200kPa인 경우 전단강도가 크게 저하되는 것을 볼 수 있다. 따라서 파괴포락선이 비선형적으로 나타나며 내부마찰각 역시 작



(a) 허용인장강도 200kPa



(b) 허용인장강도 800kPa

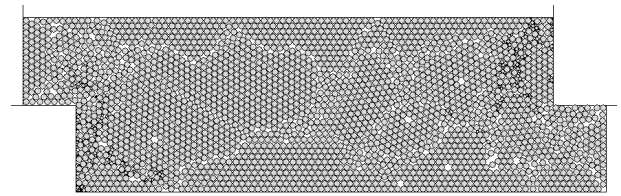


(c) 파괴포락선

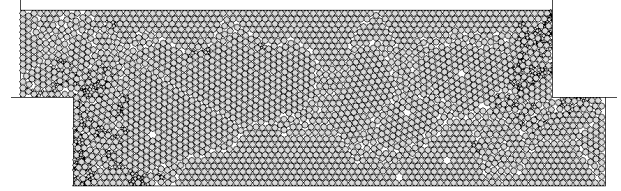
그림 9. Lobo-crushing 모델의 응력-변위 곡선과 파괴포락선

은 값이 측정된다. 이는 Lobo-crushing 모델의 경우 인장 파괴 기준 이상의 접촉력을 받을 때 입자가 파쇄되도록 정의했으며 전단응력을 측정하는 부분에서 접촉력이 집중되어 모든 수직하중에서 그 부분의 입자 파쇄가 크게 발생했기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

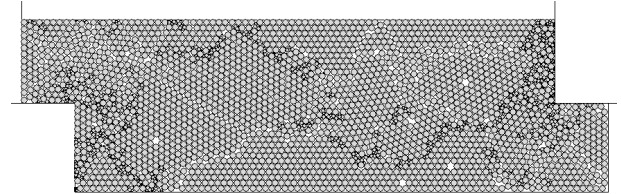
또한 cluster 모델의 경우 전단대에서 입자의 파쇄가 시각적으로 확인이 가능하나 Lobo-crushing 모델의 경우 입자의 파쇄를 전단대가 아닌 경계요소와 인접한 부근에서 발생한다는 것을 그림 10에서 발견할 수 있다. 이는 Lobo-crushing 모델의 특성에 따른 것으로, 입자의 파쇄를 모사하는 과정에서 기존의 입자를 지우고 새로운 8개의 입자를 생성할 때 기존 입자가 받고 있는 접촉력이 연계되지



(a) 수직응력 100kPa



(b) 수직응력 200kPa



(c) 수직응력 300kPa

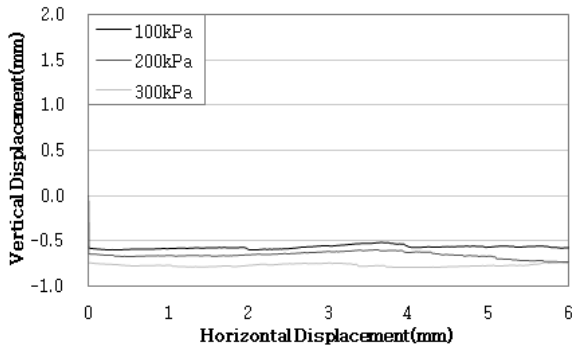
그림 10. Lobo-crushing 모델의 허용인장강도 200 kPa의 입자 파쇄 양상

않기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다. 또한 cluster 모델의 경우 결합이 파괴되지 않아도 입자 표면에 굴곡이 있는 상태이지만 Lobo-crushing 모델은 입자가 파괴되지 않으면 표면에 굴곡이 없는 매끈한 입자 형상이기 때문에 상대적으로 내부마찰각이 작게 나타난다. 그리고 cluster 모델의 경우 입자의 결합으로 이루어진 모델이기 때문에 8개의 입자 중 결합이 파괴된 입자만이 날개로 분리되고 나머지 입자들은 결합이 이루어져 있는 상태이기 때문에 입자의 표면 굴곡이 존재하지만 Lobo-crushing 모델의 경우 원래 입자가 지워지고 8개의 개별 입자가 생성되는 모델이기 때문에 8개의 입자가 모두 날개로 거동하게 되며 따라서 이로 인해 입자 파쇄에 대한 거동이 cluster 모델과는 다른 특징이 있다. 따라서 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 제안한 모델은 그 적용범위가 매우 제한적임을 알 수 있다.

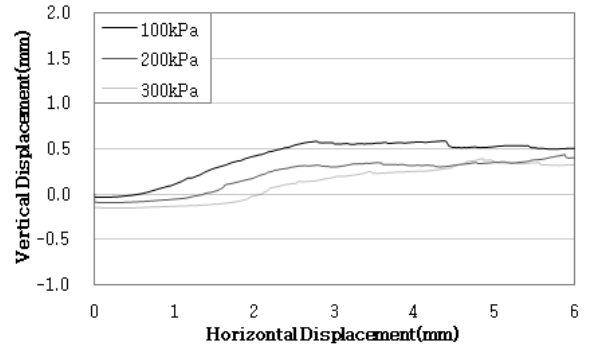
#### 4. 수직변위 결과 분석

조립토는 상대밀도와 구속압에 따라 거동을 달리하며 특히 상대밀도에 따라 예민하게 반응한다. 그림 11은 one ball 모델에 대한 수직변위와 수평변위와의 관계를 나타내고 있다. 일반적으로 느슨한 상태의 조립토는 직접전단실



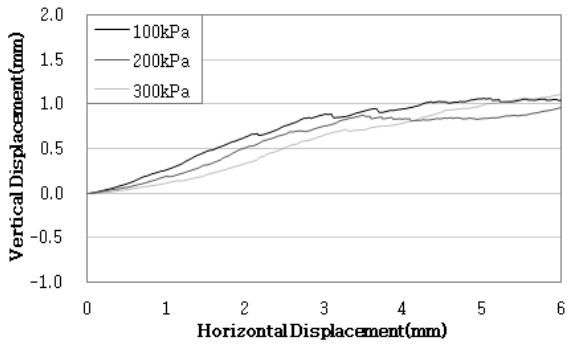


(a) 상대밀도 20%

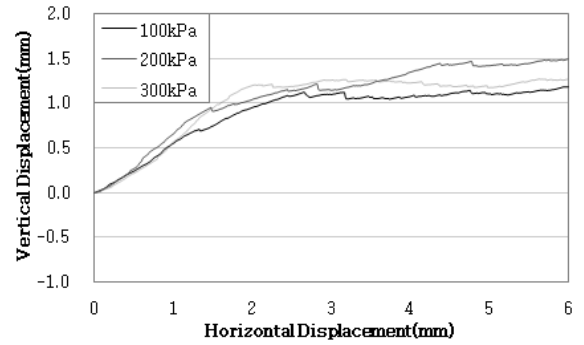


(b) 상대밀도 90%

그림 11. One ball 모델의 상대밀도에 따른 입자의 수직변위

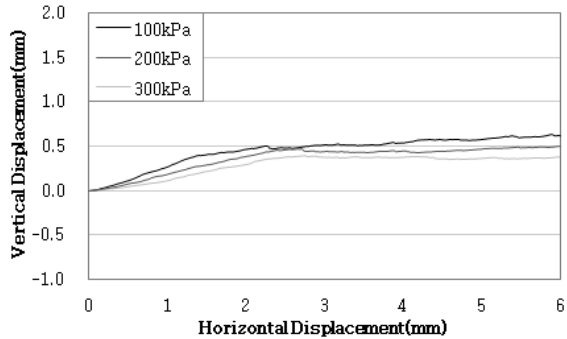


(a) 상대밀도 20%

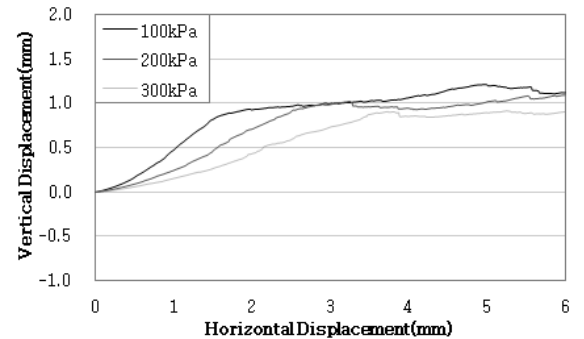


(b) 상대밀도 90%

그림 12. Clump 모델의 상대밀도에 따른 입자의 수직변위



(a) 결합강도 200kPa



(b) 결합강도 800kPa

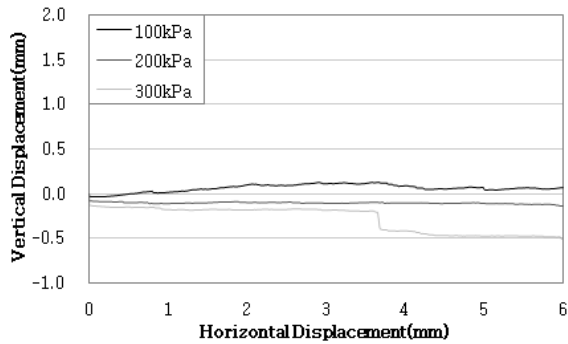
그림 13. Cluster 모델의 결합강도에 따른 입자의 수직변위

험 결과 주로 압축거동을 보이며 수치해석 결과 역시 압축 거동을 보이고 있으며 수직응력이 높아질수록 압축거동 양상이 커지는 것을 알 수 있다. 상대밀도가 90%인 조밀한 상태에서는 수직응력이 낮을 때는 체적의 팽창이 주로 발생하고 수직응력이 증가하면서 초기에 압축 거동을 보이다가 전단변위가 증가하면서 팽창거동으로 바뀌는 양상을 나타내며 수직응력이 증가할수록 체적의 압축거동이 증가하며 팽창량도 감소한다. 이는 기존의 연구 결과와 동일하며 조밀한 사질토의 일반적인 거동 양상을 보여주고

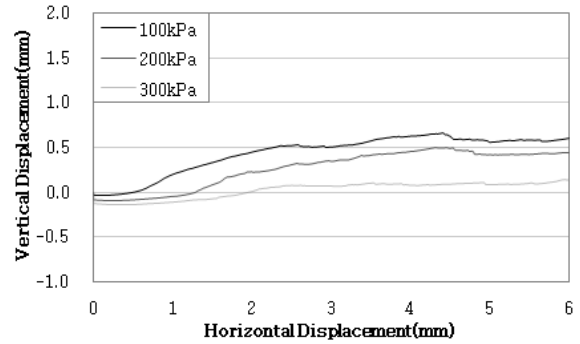
있다.

그림 12는 clump 모델에 대한 수직변위와 수평변위의 관계를 나타낸 것으로, 모든 clump 모델은 압축 거동이 거의 일어나지 않았으며 주로 팽창거동을 하고 있는데 이는 입자의 파쇄가 발생하지 않고 입자간의 맞물림(interlocking) 현상이 지배적인 거동을 하면서 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

그림 13은 상대밀도 90%일 때 cluster 모델에 대한 수직변위와 수평변위의 관계를 나타낸 것으로, cluster 모델과



(a) 허용인장강도 200kPa



(b) 허용인장강도 800kPa

그림 14. Lobo-crushing 모델의 허용인장강도에 따른 입자의 수직변위

clump 모델은 입자의 파쇄 유무에 대한 차이를 나타내며 입자의 파쇄 정도가 수직 팽창거동에 어떤 영향을 주는지 파악할 수 있다. Cluster 모델은 clump 모델보다 팽창량이 크고 수직응력이 증가할수록 그 값이 감소하였다. 또한 clump 모델과 cluster 모델의 수직변위 그래프 양상을 살펴보면 clump 모델의 경우 입자의 팽창거동이 계속해서 증가하는 양상이지만 cluster 모델의 경우 전단변위가 어느 정도 발생하면 그래프가 일정한 값에 수렴하는 양상을 보이고 있다. 이는 전단변위가 증가하면서 파쇄된 작은 입자들이 간극을 메우고 재배열을 이루기 때문에 수직변위의 발생을 억제하면서 더 이상 입자의 팽창거동이 나타나지 않기 때문으로 판단된다.

그림 14는 상대밀도 90%일 때 Lobo-crushing 모델에 대한 수직변위와 수평변위의 관계를 나타낸 것이다. 그림 14(a)는 허용인장강도가 200kPa인 경우로 입자의 파쇄로 인한 수직응력 거동 양상이 다른 모델에 비해 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 것처럼 입자 파쇄 발생 시 모든 입자가 날개로 거동해 간극을 채우게 되고 또한 입자의 파쇄로 인해 전체 입자의 면적이 달라지기 때문으로 판단된다. 따라서 수직응력이 증가해 입자의 파쇄가 비교적 많이 발생할수록 상대밀도가 조밀한 경우라도 전체적으로 압축거동을 보이고 있다. 그림 14(b)는 허용인장강도가 800kPa인 경우로 입자의 파쇄가 거의 발생하지 않아 one ball 모델의 상대밀도 90%와 동일한 거동을 하고 있으며 수직응력이 300kPa인 경우에만 입자의 파쇄 발생으로 인해 초기 압축 후 나타나는 팽창거동 양상이 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 입자의 파쇄 유무에 따른 전단거동의 영

향에 대하여 연구하기 위해 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비 파쇄 모델의 두 가지 모델 모두 수직응력이 증가하면 전단강도도 단계적으로 증가하며, 실제 실내 실험에서 나타나는 것과 유사한 상대밀도 별 전단거동을 보이고 있다. 또한 one ball 모델이 clump 모델보다 내부마찰각이 작게 나타났으며, 이는 입자의 형상에 기인하는 것으로 입자의 표면 굴곡이 많을수록 입자의 맞물림 현상으로 인해 내부마찰각이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.
- (2) Cluster 모델의 경우 상대밀도 90%에서 결합강도가 800kPa인 경우 실제 실험과 유사한 조밀한 전단 거동을 보이고 있으며, 결합강도 200kPa의 결과로 미루어 볼 때 입자의 결합이 파괴될수록 전단강도가 작아지며 뚜렷한 파괴점이 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 두 경우 모두 전단대에서 입자 결합의 파괴가 뚜렷이 나타나며 cluster 모델이 one ball 모델보다는 표면에 굴곡이 있고 clump 모델과 비교했을 때는 입자 사이의 결합 파괴가 발생하기 때문에 one ball 모델과 clump 모델 사이의 내부마찰각을 갖는 것을 알 수 있다.
- (3) Lobo-crushing 모델의 경우 입자가 허용인장강도 이상의 접촉력을 받을 경우 파쇄되도록 정의한 모델이기 때문에 전단대가 아닌 접촉력이 집중 분포되는 곳에서 입자의 파쇄가 일어난다. 또한 허용인장강도가 800kPa인 경우 입자 파쇄가 거의 발생하지 않아 One ball 모델과 유사한 거동을 하지만 허용인장강도가 200kPa인 경우 과도한 입자의 파쇄가 일어나지 않았음에도 전단강도가 크게 저하되는 것을 볼 때 입자파쇄의 원인이 인장응력에 의해서 발생하는 것은 아님

을 알 수 있다. 따라서 기존에 제시된 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)의 모델은 입자 파쇄 거동을 모사하기에는 부적합하다고 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-331-D00475).

## 참고문헌

1. 엄세종, 원명수, 김형주 (2004), “직접전단시험에 의한 모래의 전단강도 특성”, 2004 대한토목학회 정기학술발표회 논문집, pp.5327-5330.
2. 조선아, 조계춘, 이석원 (2009), “PFC를 이용한 입자 형상에 따른 입자 파쇄 및 전단거동 전개”, 한국지반공학회 논문집, 제25권, 제10호, pp.41-53.
3. Bolton, M. D. (1986), “The Strength and Dilatancy of Sands”, *Geotechnique*, Vol.36, No.1, pp.65-78.
4. Feda, J. (2002), “Notes on the Effect of Grain Crushing on the Granular Soil Behavior”, *Engng Geol*, Vol.63, No.1, pp. 93-98.
5. 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.
6. Hainbuchner, E., Pottoff, S., Konietzky, H., and Kamp, L. te (2003), “Particle based modeling of shear box tests and stability problems for shallow foundations in sand”, *Proceedings of the 1st International Pfc Symposium*, Gelsenkirchen, Germany.
7. Hardin, B. O. (1985), “Crushing of Soil Particles”, *J. Geotech. Eng.*, Vol.111, No.10, pp.1177-1192.
8. Itasca Consulting Group, Inc. (2004), *Particle Flow Code in 2 Dimensions*, Ver. 3.1 User’s manual.
9. 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.
10. 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.
11. Lobo-Guerrero, S. and Vallejo, L.E. (2005), "Analysis of Crushing of Granular Material under Isotropic and Biaxial Stress Conditions", *Soils and Foundations*, Vol.45, No.4, pp. 79-87.
12. McDowell, G. R. and Bolton, M. D. (1998), “On the Micro-mechanics of Crushable Aggregates”, *Geotechnique*, Vol.48, No.5, pp.667-679.
13. Nakata, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Kato, Y. and Murata, H. (2001), “Microscopic Particle Crushing of Sand Subjected to High Pressure One-Dimensional Compression”, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.1, pp.69-82.

(논문접수일 2010. 2. 25, 심사완료일 2010. 3. 22)