한국지반공학회논문집 제24권 1호 2008년 1월 pp. 15 ~ 23

개별요소법을 이용한 쇄석재료의 직접전단시험 모델링

Modeling Direct Shear Test of Crushed Stone Using DEM

조 남 각[1] Cho, Nam-Kak
유 충 식[2] Yoo, Chung-Sik
이 대 영[3] Lee, Dae-Young

Abstract

In this study, modeling shear characteristics of a coarse material mainly containing crushed stones were implemented using PFC2D, a commercially available code based on DEM(Discrete Element Method). Using the DEM code, this study provides the methodology considering the shear characteristics due to a irregular grain shape, GSD(Grain Size Distribution) and porosity of coarse material which are not effectively incorporated in conventional continuum numerical codes. Direct shear test was simulated for the GSD and porosity generated sample using the code and the simulated results showed very good agreement with the laboratory test results. The current modeling approach can be applied to other coarse materials having various GSD and porosities. Using such application, prediction of the strength characteristics of coarse material in field scale would be possible, which is limited in laboratory scale so far.

요 지

본 연구에서는 개별요소법에 근거한 상용 수치해석 프로그램인 PFC2D를 이용하여 조립재인 쇄석의 전단특성 모델링을 수행하였다. 본 연구를 통하여 기존의 연속체 해석에서 고려하기 힘든 조립질 재료의 입도분포 및 공극, 불규칙한 형상을 모델링 할 수 있었다. 또한, 대형직접전단시험을 수행한 실험결과와 비교를 통해 입자특성과 관련한 조립질 재료의 고유 특성을 본 연구에서 모델링한 불연속체 모델링으로 모사할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 모델링 기법은 향후 다양한 입도 및 공극특성을 갖는 조립질 재료의 현장 강도 특성을 예측하는데 도움이 될 수 있다.

Keywords : Crushed stone, DEM, Derect shear test, Modeling, PFC2D, Porosity

1. 서 론

쇄석, 자갈, 사질토 등으로 이루어진 조립질 재료는 구조물 기초지반, 흙댐(earth dam) 및 록필댐(rockfill dam), 연약지반 치환재, 연약지반 보강말뚝 등 다양한 분야에 건설재료로 사용되고 있다. 최근 들어 모래 등 천연골재의 감소로 인해 모래대체재로서 쇄석 등을 사용한 지반개량공법에 대한 관심이 날로 증가하고 있으며, 건설재료로서의 활용을 위해서는 재료의 지반공학적 강도 및 거동특성에 대한 검토가 필요하다. 쇄석 등 조립토의 강도 및 거동특성은 최대입자의 크기, 간극비, 입도분포 등에 따라 영향을 받으며 이러한 재료의 물리적 특성은 주로 실내 실험을 통하여 얻는다. 그러나 실내실험을 통한 재료의 강도특성을 설계에 반영할 시 실내 실험에서 구한 재료의 입도 및 간극율 등 조립토의 강도특성에 영향을 주는 제반 요소들이 여러 가지 현장

1 알버타대학교 연구원 (Ph. D, Dept of Civil & Environmental Engrg, University of Alberta.)
2 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept of Civil & Environmental Engrg., Sungkyunkwan Univ.)
3 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Dept., KICT., dylee@kict.re.kr, 교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

변수와 크기효과(scale effect)의 영향을 받게 됨에 따라 실제 재료의 강도특성을 측정하기도 어려운 실정이다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 대형직접전단시험이나 대형삼축시험 등 실내실험이나 현장시험을 실시하고 있으나 시료조성, 시험조건 및 비용적인 면에 있어 많은 어려움이 있다.

최근 들어 불연속 요소를 도입한 개별요소법(Distinct Element Method, DEM)을 이용하여 암반 및 조립재료의 역학적 특성과 거동예측을 위한 모델링 연구가 증가하고 있다(Jensen et al., 1999 ; Cho et al, 2007; Liu, 2006). 개별요소법을 적용할 경우 재료의 고유특성인 입자의 맞물림(interlocking) 효과, 입도분포 및 간극률의 영향 등을 고려할 수 있는 장점이 있으며 실내시험에서 다루기 힘든 조립재료의 입도 및 크기효과를 고려할 수 있는 장점이 있다. 그러나 기존의 연구는 주로 절리 암반 등의 역학적 특성치 산정 및 거동예측에 대한 접근방안에 관한 연구들이 수행되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 쇄석기둥 및 조립토 말뚝 등에 사용되는 쇄석의 입도분포 및 강도특성을 모델링하고자 개별요소법에 근거하여 개발된 범용 상용프로그램인 PFC2D(Particle Flow Code 2D)를 이용하였다. 쇄석의 입도분포 및 간극율을 고려한 알고리즘을 개발하여 대형직접전단시험에 대한 모델링을 수행하였으며, 모델링 기법의 검증을 위해 대형직접전단 시험을 수행하여 비교 평가를 수행하였다. PFC2D(Itasca, 2004)를 이용한 쇄석의 전단시험 모델링 평가를 통해 본 연구에서 사용한 모델링 기법이 현장에서 필요로 하는 쇄석의 입도분포 및 전단강도 등 재료의 강도 및 거동특성을 평가하는데 효율적인 방법임을 알 수 있다.

2. PFC 이론적 배경

PFC는 개별요소법(Distinct Element method, DEM)에 근거한 수치해석 프로그램으로서 연속체 역학에 근거한 유한요소법과같은 수치해석 기법과 달리 특별한 요소망의 생성없이 일정한 크기의 경계(wall)요소로 구속된 경계내에 생성되는 개개의 구형(sphere element) 또는 원통형(disk element) 입자요소들을 사용하여 모델링하는 기법이다.

PFC에서 사용한 개별요소기법은 입자요소들에서 외부 힘에 의해 발생하는 불균형력(unbalanced forces)을 수렴시키는 방법으로서 근본적으로 입자들의 움직임은 운동방정식에 근거한 동적해석에 가깝다. 이러한 동적 거동은 각 단계에서 일정한 속도 및 가속도를 규정하는 타임스텝핑 알고리즘(timestepping algorithm)을 이용하여 수치해석적으로 이루어지며, 이러한 해석법은 ITASCA에서 개발된 UDEC에서 채용된 방법과 유사하다.

PFC의 일반적인 계산 cycle은 각 입자에 대한 운동방정식(Newton's second law)과 각 접점에 대한 접점방정식을 이용하여 입자, 접점 및 wall요소의 위치, 이에 따른 접점력의 변화를 지속적으로 재설정 해주는 작업을 반복하는 알고리즘이다. 입자나 wall 요소사이에 존재하는 접점들은 시뮬레이션 과정 중 자동적으로 생성 및 소멸되며 이러한 일련의 계산과정들은 그림 1과 같다.

접점에 작용하는 기본 구성방정식은 기본적으로 강성모델(Stiffness model), 마찰모델(Slip model), 접착모델(Bonding model)의 세 가지 모델로 구성되어 있다

강성모델은 접점력과 그 상대적인 변위간의 탄성적인 상관관계를 제공하며 마찰모델은 접점에서의 연직 및 전단 접점력간의 관계에 영향을 줌으로써 인접한 두 입자는 서로 미끄러짐이 가능하도록 하는 역할을 제공한다. 한편 접착모델은 입자의 접점에 작용하는 인장, 압축 전단응력 및 모멘트에 대한 저항강도를 제공한다. 접착모델은 재료의 강도가 재료내부의 국부응력 집중에 의한 입자(grain)주변의 점성강도에 지배되는 암석과 같은 취성재료(brittle material)의 모델링에 적합한 반면, 조립토나 쇄석 등의 비점성 재료는 일반적으로 응력변형 거동이 대부분 응력경화 현상을 보이므로, 이러한 재료의 거동모델은 단순히 접점에서의 강성 및 마찰에 좌

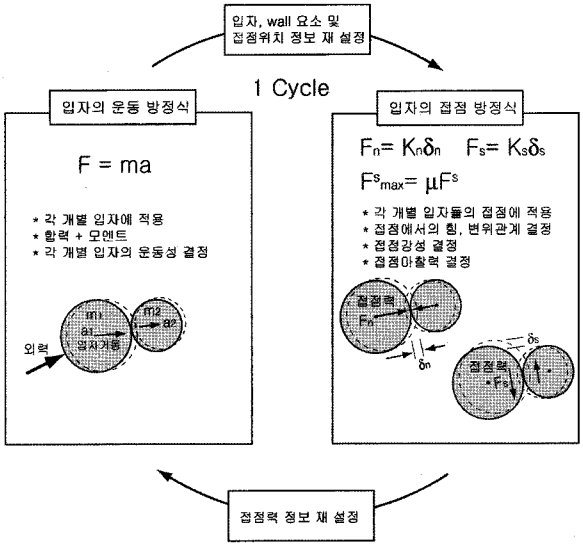


그림 1. PFC의 입자 및 접점거동 계산 Cycle

우되는 강성모델과 마찰모델이 주로 쓰인다. 일반적으로 PFC에서 입자 모델링은 샘플을 구성하는 입자의 밀도, 형상, 입경분포, 입자강성 및 입자의 점성특성 등에 따라 달라진다.

입자의 형상은 미세 및 거세거동에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 기본적으로 PFC 2차원해석의 경우, 입자는 유한한 크기의 원통형 입자요소나 단일 층의 구형(sphere)요소로 모델링 되도록 되어있다. 원형 입자형상은 계산시간의 단축면에서 상당히 큰 효과가 있을 수는 있으나, 입자의 형상이 해석에 영향을 미치는 특별한 경우의 모델에는 적용성이 떨어질 수 있으므로 PFC에서는 클러스터(cluster) 와 클럼프(clump) 개념을 도입하여 불규칙형상의 입자를 모델링 할 수 있다. 이러한 개념은 원형이나 구형형상의 입자들을 그룹으로 나눠서 내부적으로 강한 접착력을 줌으로서 실제 암석이나 조립토 등에서 보이는 불규칙한 형상에 대한 효과를 대체시켜 주는 역할을 한다. 클러스터(cluster) 모델의 경우 유한 접착력을 줄 수 있으므로 응력수준에 따른 입자의 파쇄효과를 모델링 할 수 있다는 장점이 있지만, 클러스터내 원통입자들의 회전이 구속되지 않음으로 인하여 interlocking 효과가 떨어지는 단점이 있다. 반면 클럼프 모델의 경우 무한 접착력으로 인하여 파쇄효과의 모델링은 어려우나 클럼프내 원통입자들의 회전은 완전히 구속되어 클럼프 자체가 하나의 입자로서 움직이므로 interlocking 측면에서 보다 효과적이라고 볼 수 있다(Cho et al., 2007).

본 연구에서는 특정 입도분포를 갖는 사질토 및 기타 비점성 조립재료를 모델링 할 수 있도록 클럼프 로직(clump logic)을 이용하여 새로운 알고리즘을 개발하였으며 개발된 알고리즘을 이용하여 불규칙 형상과 입도분포에 대한 효과를 보다 효율적으로 모델링 할 수 있었다.

3. 대형직접전단시험

3.1 시험재료

시험에 사용된 쇄석재료는 석산에서 모암을 파쇄하여 생산한 골재로 국내에서 건설용으로 사용되는 골재 중 상대적으로 입도가 작은 최대입경 10mm의 쇄석을 대상으로 사용하였다. 쇄석의 기본 특성을 평가하기 위해 체분석, 비중, 흡수율 시험을 수행하였으며 표 1은 본 실험에 사용된 쇄석의 물성을 나타내고 있다.

3.2 시험방법

연구에 사용된 대형직접전단시험기는 전단상자의 크기가 0.5m(L)×0.25m(H)×0.5m(W)로 최대입경 50mm이내의 다양한 쇄석 및 조립재료의 실험이 가능하며, 수직하중은 에어백을 이용하여 가할 수 있도록 제작되었다. 수직 및 수평변위는 LVDT를 이용하여 측정하며 데이터로거를 통해 자동 계측이 가능하도록 구성되었다. 시험방법은 건조 시료를 소요밀도(1.5t/m^3)에 따라 무게비로 체분석을 실시한 후 전단상자에 시료를 1/3씩 단계별로 채운후 램머를 이용하여 쇄석이 파쇄되지 않도록 다짐하면서 채운다. 시료를 채운 후 고무튜브 파열방지 나무판을 덮고, 에어백으로 50kpa, 75kpa, 100kpa의 수직하중을 가해준 후 시료의 재배열이 완료되도록 약 10분이 경과한 후에 전단을 실시하였다. 전단 시험 후 응력-변형률 곡선을 통해 전단강도를 산출하였다. 그림 3은 실험에 사용된 대형직접전단시험장비를 보여주고 있다.

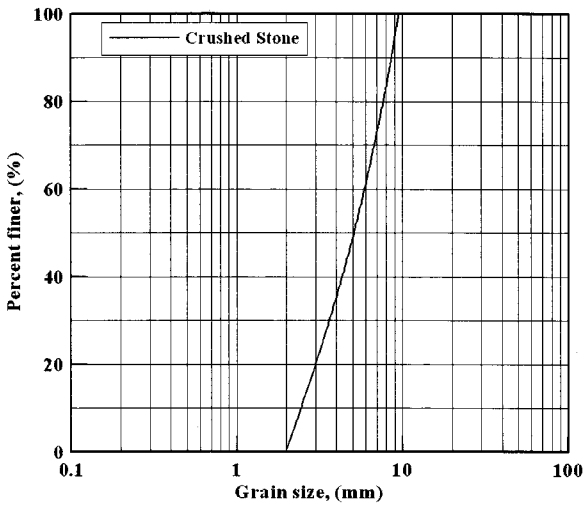
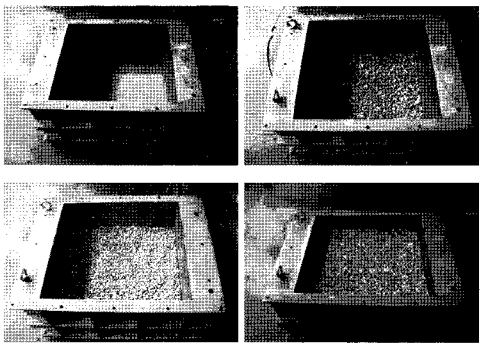


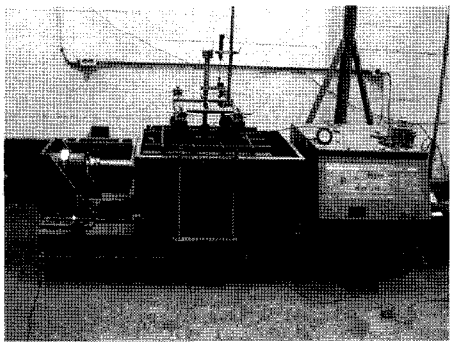
그림 2. 쇄석의 입도분포 곡선

표 1. 쇄석재료의 기본 물성

구분	비중 (Gs)	흡수율 (%)	내부마찰각, ϕ(°)	건조단위중량 (t/m^3)	통일분류법
쇄석 10mm	2.29	1.0	54	-	GP



(a) 시료성형 모습



(b) 대형직접전단시험기

그림 3. 대형직접전단시험장비

표 2. 시료생성을 위한 초기 micro parameters

Micro parameter	γ_c, (kg/cm^3)	E_c, (kPa)	k_n/k_s	μ	R_{min}, (mm)	R_{max}/R_{min}	Porosity
Value	2,639	5.0GPa	5.0	1.0	0.5	2.0	0.16

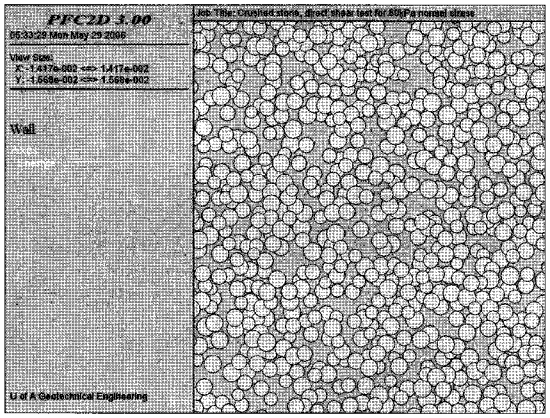


그림 4. 원통형 입자 요소의 생성

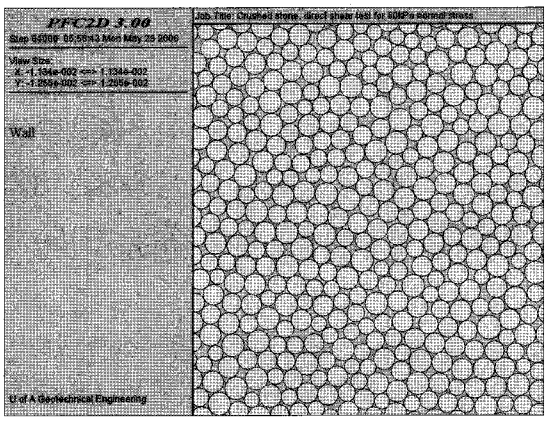


그림 5. 원통형 입자의 재배열 및 다짐

4. PFC 모델링

4.1 시료생성

본 연구에서는 쇄석의 직접전단시험 모델링을 위해 탄소봉 모델과 유사한 단위길이의 원통형 입자들로 이루어진 시험시료를 이용하였다. 적용된 시료의 크기는 전단상자의크기 0.5m(L)×0.25m(H)×0.50m(W)와 같은 크기로 모델링 하는 것이 바람직하나, 모델링시 사용되는 원통입자의 개수 증가로 인해 많은 계산시간이 소요 된다. 따라서 본 연구에서는 해석대상 시료의 크기를 실제 크기의 절반 이하인 0.2m(L)×0.1m(H)×1m(W)로 줄여서 해석하였다. 시료의 생성을 위한 초기 미세물성치(micro parameter)는 표 2와 같으며, 입력치들을 이용하여 생성된 시료는 초기 공극율을 기본 값인 0.16을 적용했을 때 총 13700개의 원통형 요소가 생성된다. 적용된 입력치들은 단순히 입자 생성용으로 선택된 것들이며, 입도 분포모델 적용 및 실험결과분석을 통해 최적의 입력치를 선정하게 된다. 초기 원통형 요소들이 생성될 시 입자들은 그림 4에 보인바와 같이 불규칙하게 겹쳐서 배열되어 있는 상태이며 이러한 배열상태로 인하여 각 입자요소 및 wall 요소들 사이에서는 접점강성과 접점력들이 발생한다. 이러한 접점력으로 인하여 각각의 요소들은 재배열을 하게 되는데, 일련의 다짐(packing)과정을 통하여 각 입자와 입자요소 간에 접점력망(contact force chain)을 생성하게 된다. 그림 5는 이러한 과정을 통해서 생성된 시료상태를 보여준다.

4.2 쇄석재료 입자의 불규칙 형상 모델링

일반적으로 DEM 해석을 통한 조립재료의 모델링에서는 원형 입자가 주로 사용되고 있다. 원형입자요소는

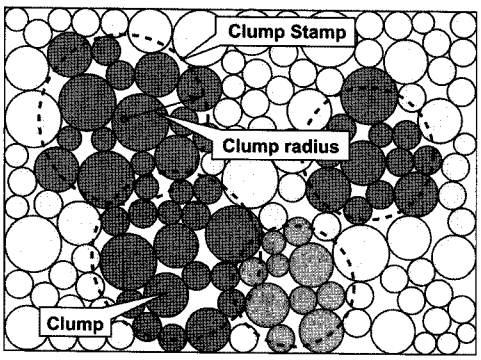


그림 6. 클럼프(clump)를 이용한 불규칙 형상의 입자생성

불규칙 형상의 입자요소를 채택했을 때에 비해서 계산시간을 단축한다는 장점이 있으나, 실제 입자형상이 재료거동에 미치는 영향을 고려하는데 한계가 있다(Jensen et al, 1999; Thomas and Bray; 1999). 원형입자들은 실제 입자랑 비교해서 맞물림(interlocking) 효과나 회전에 대한 저항성을 고려하기에 적합하지 않으므로, 궁극적으로 재료의 응력변형 거동모델에 있어서 낮은 강도를 보이며, 또한 체적팽창도 실제보다 낮게 나타나게 된다.

이러한 한계를 극복하기 위해서는 PFC에서는 클럼프(clump)개념을 사용한다. 클럼프는 기존의 원형입자로 인한 해석상의 한계를 보완하기 위해서 원형으로 된 입자들을 하나의 그룹으로 묶고 그룹 내 입자들의 접점에 무한한 접착강도를 부여하므로써 그룹자체가 하나의 입자요소로 거동하도록 모델링하는 개념이다. 클럼프 적용시 개개의 기존 원형입자들의 접점강성은 변하지 않으며, 클럼프로 그룹화 된 입자집합체는 그 자체로서 하나의 강체 입자요소처럼 작용을 하게 된다. 그림 6은 본 연구에서 클럼프를 사용하여 불규칙한 입자를 생성하는 모습을 보여주고 있다.

4.3 쇄석재료의 입도분포 및 공극 모델링

자갈이나 쇄석, 록필(rockfill) 재료같은 조립재료에 대한 실험시료의 입도분포는 일반적으로 체분석을 통해서 각 체에 잔류한 입자들의 중량을 측정 한 후 전체 입자중량에 대한 누적 백분율을 구하여 누적백분율과 입경과의 관계로 나타낼 수 있다. 이러한 누적 백분율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Percent\ \ Finer(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\sum W_g}{W_t}\right) \qquad (1)$$

여기서 W_t는 전체 입자들의 무게이며, W_g는 각 체에 남아있는 입자들의 누적중량이다.

조립재료의 경우 입자들간의 맞물림(interlocking)에 의하여 응력거동이 지배되므로 입자들의 입경분포 및 입자의 형상 등은 실제거동에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 입도분포나 입자형상의 모델링을 무시한 가정에 근거한 해석으로는 제대로 된 재료의 실제거동을 모사하는데 한계가 있다. 개별요소법을 채용한 PFC의 경우 입자요소들간의 미세거동(micro behavior)에 초점을 맞추어 전체 시료의 거동을 모사하도록 되어 있으므로 실제 입자들간의 상호작용을 모사하는데 적합한 기법이다.

본 연구에서는 식 (3.1)에 보여진 체분석 로직을 근거로 클럼프 개념을 도입하여 다음과 같이 불규칙 형상의 입자와 특정 입도분포를 동시에 모델링 할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

알고리즘은 실제 체분석 시 사용되는 체를 사용하는 대신 각 체의 그리드(grid)에 상응하는 클럼프의 반경을 이용하여 클럼프의 범위내에 포함되어있는 원통형 입자요소들의 중량을 측정하여 누적 백분율을 구하는 방법이다. 클럼프 영역내 존재하는 입자요소들의 전체중량은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$w_g = \sum_N (\pi R_g^2) t \gamma_g \qquad (2)$$

여기서, R_g는 원통형 입자요소의 반경, N은 클럼프 영역내 원통형 입자요소의 갯수, γ_g는 입자요소들의 단위중량, t는 입자요소의 두께를 나타낸다.

누적 백분율은 이러한 클럼프내 입자들의 누적중량을 얻음으로서 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$Percent\ \ Finer(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{N_g} w_g}{A_s(1-n)t\gamma_s}\right) \qquad (3)$$

여기서, N_g는 현재 체의 grid에 해당하는 반경이상의 크기를 가진 클럼프 갯수이며, A_s는 시료의 단면적, n은 공극률, γ_s는 시료의 단위중량이다.

식 (3.3)을 이용하여 각 클럼프 반경별 누적 백분율을 적용하면 불규칙 형상의 입자를 갖는 입도 분포를 모델링 할 수 있다. 표 3은 실제 입도분포와 동일한 클럼프 크기와 누적 백분율을 보여주고 있으며, 그림 7과 그림 8은 누적 백분율이 적용된 시료의 모습을 보여주고 있다.

표 3. 입도분포모델 적용을 위한 입력치

입 경 (mm)	누적 백분율 적용 (%)	겹침계수 (overlap factor)
9.52 + λ(1.0)	100	0.9
7.0 + λ(0.2)	76	0.9
6.0 + λ(0.2)	64	0.9
5.0 + λ(0.2)	50	0.9
4.75 + λ(0.2)	45.6	0.7
4.3 + λ(0.2)	40	0.6

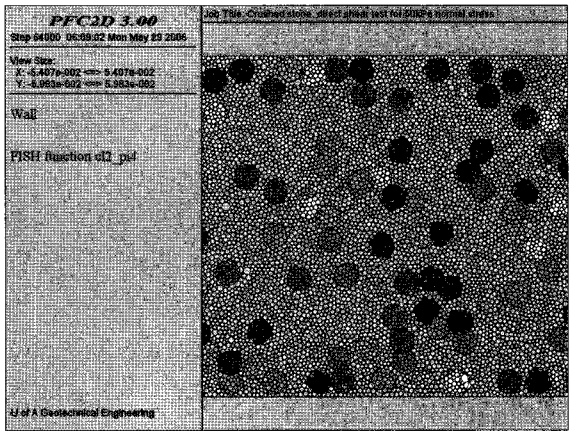


그림 7. 입경 7.0mm, 누적백분율 76% 적용

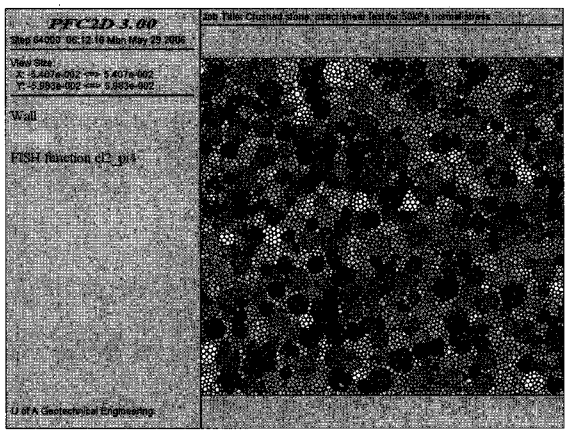


그림 8. 입경 4.0mm, 누적백분율 40.0% 적용

본 연구에서는 초기 공극율은 기본 값으로 적용된 공극율 0.16을 적용하여 시료를 생성하였으며 모든 요소들의 접촉이 형성된 후, 실제 적용하려는 공극율에 도달할때까지 입자요소들을 하나하나씩 제거해나가는 알고리즘을 적용하였다. 그림 9는 초기 기본 값으로 적용된 공극율을 적용했을때의 시료모습을 보여주며 그림 10은 실제 공극율을 적용하여 입자요소를 지운 후의 시료모델을 보여준다. 그림 11은 공극율을 적용 후 계산된 입도분포를 실험실 입도분포랑 비교 결과를 보여주고 있다.

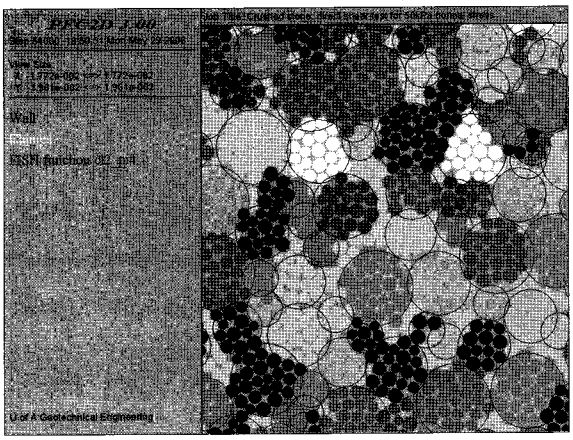


그림 9. 공극율 로직 적용 전 고밀도 시료모델(초기 공극율 0.16)

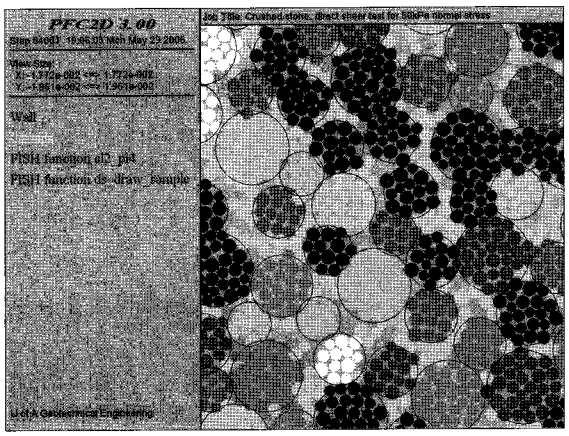


그림 10. 공극율 로직 적용 후 저밀도 시료모델(적용 공극율 0.23)

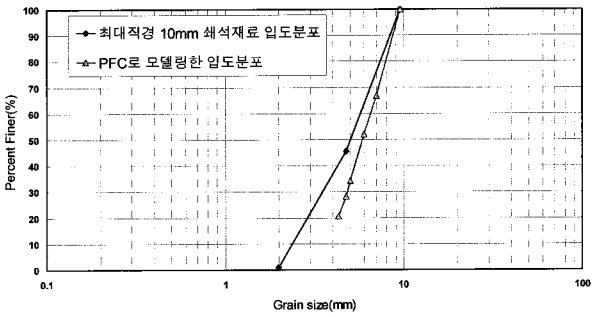


그림 11. 실험실 입도분포와 PFC 입도 모델의 비교

4.4 쇄석의 전단시험 모델링

쇄석의 직접전단시험 과정을 모델링하기 위해 쇄석의 간극률, 입도분포를 고려하여 개별요소 생성결과를 이용하였다. 그림 12에서 볼 수 있듯이, 직접전단시험기의 경계(wall) 요소는 마찰이 없는 경계(wall)요소로 모델링하였으며, wall의 강성은 입자요소의 강성과 비교하여 크게 모델링하였다. 직접전단시험의 연직응력은 wall servo logic (Itasca Consulting Group, 1995)을 이용

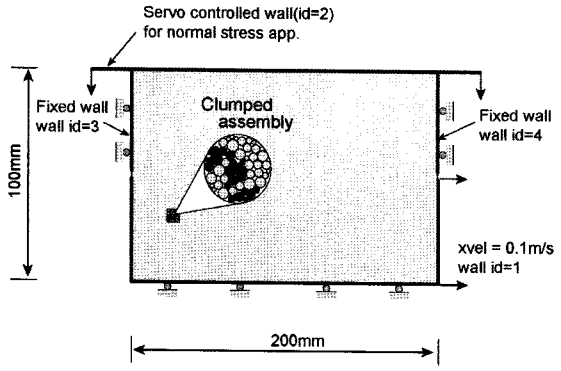


그림 12. 직접전단시험 모델링

해서 가해주었으며, 시료의 전단은 상부측벽 wall 요소의 x축 방향 velocity를 고정시킨 채 하부 wall 요소에 x축 방향 velocity를 가하여 적용하였다.

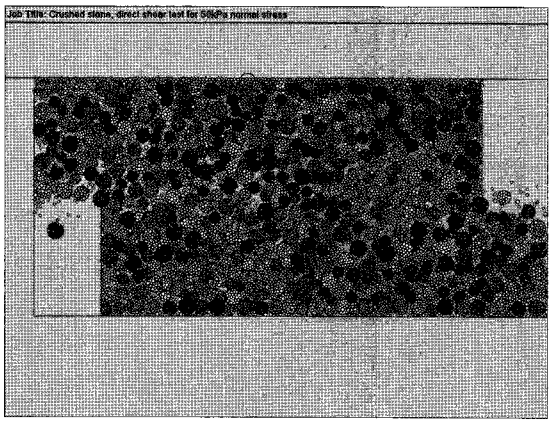
이러한 전단하중에 대한 velocity는 한번에 적용할 시 상당한 가속에 의한 관성을 생성시킬 우려가 있음에 따라 이를 피하기 위해서 목표로 하는 최종 velocity를 단계별로 가해주었다.

모델링에 사용된 미세물성치(micro parameter)는 PFC로 재료를 모델링하고 매개변수연구(parametric study)를 통하여 직접전단시험거동과 가장 유사한 거동을 보이는 E_c= 5.0 MPa, *kn/ks*= 5.0, m_c= 1.0를 사용하였다.

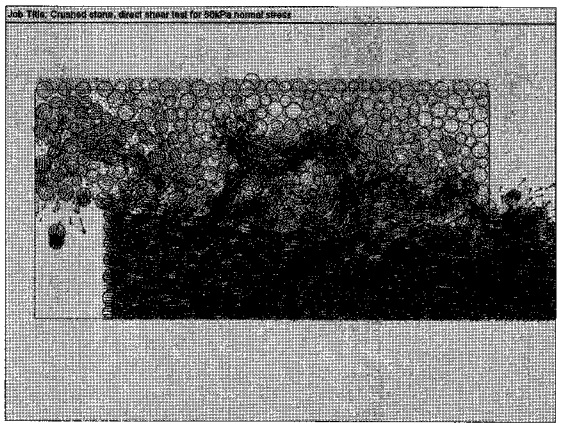
5. 직접전단시험 모델링 결과 및 고찰

5.1 PFC 모델링을 통한 직접전단 시료의 파괴양상

그림 13은 선택된 입력치를 적용하여 시뮬레이션 한 각 연직압력별 PFC시료의 파괴양상과 입자들이 움직이는 경향을 나타내는 속도(velocity) 벡터를 보여준다. 그림 13(a)에서 검정색으로 표시된 원형은 각 클럼프의 경계를 나타내며, 각각의 클럼프는 각기 다른 색깔로 구분되어져 있다. 그림 13(b)에서 볼 수 있듯이 속도벡터 경향은 직접전단시험 시 하단의 전단박스가 움직이는 경향과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 전단에 의한 수평변위가 증가함에 따라 상부 박스와 하부 박스 사이에 발생하는 틈(gap)에 의하여 일부 입자시료들이 누실되는 현상을 볼 수 있다. 이러한 원인으로는 직접전단시험의 경우 전단상자가 충분한 두께를 갖고 있기 때문에 입자 유실현상은 없으나, 본 해석의 경우 전단박스에 대한 두께는 고려하지 않았기 때문에 이러한 현상이 생기는 것으로 판단된다. 시료 내 입자들의 누실은 연직하중에 의한 구속 효과를 국부적으로 감소시킬 수 있으며



(a) 전단시 시료의 파괴양상



(b) 전단시 속도벡터 형상

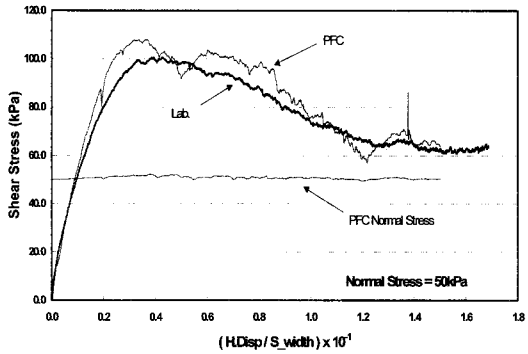
그림 13. 시료의 파괴 형상 및 입자들의 velocity vector 경향

궁극적으로 재료의 강도 및 내부 마찰각을 저평가 하게 되는 원인이 될 수 있으므로 전단박스내의 입자 유실에 대한 고려가 필요하다.

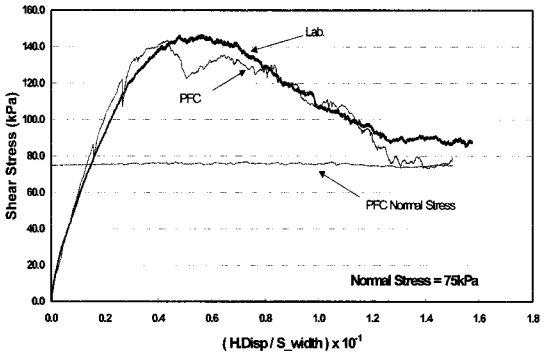
5.2 PFC 모델과 실험을 통한 쇄석시료의 전단 거동

그림 14는 최대 입경 10mm의 쇄석재료에 대한 직접전단 실험결과와 모델링을 통한 결과를 보여주고 있다. 본 해석에서 전단시료의 크기는 실제 시료보다 절반 이하로 줄여 해석을 수행함에 따라, 전단응력 및 변위의 직접적인 비교는 적합하지 않다. 따라서 보다 정확한 비교를 위해서 수평변위는 시료의 폭으로, 수직변위는 시료의 높이로 정규화하여 비교하였다. 그림 13에서 PFC에서 모델링한 연직응력은 비교적 첨부터 끝까지 일정하게 유지되어 있음을 볼 수 있으며 경계(wall)요소의 서보(servo) 알고리즘(Itasca Consulting Group, 1995)이 아주 잘 적용되고 있음을 알 수 있다.

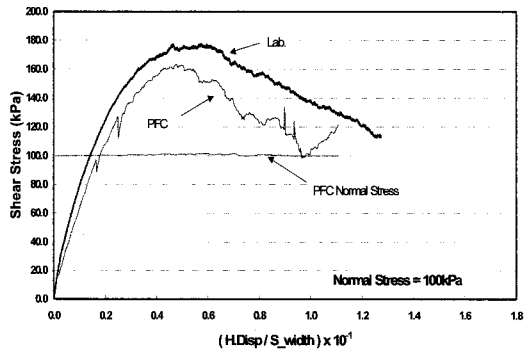
그림 14에서 전반적으로 낮은 연직 구속응력(50kPa, 75kPa)에서는 전단응력과 수평변위는 실험결과와 잘 일



(a) Normal stress 50kPa

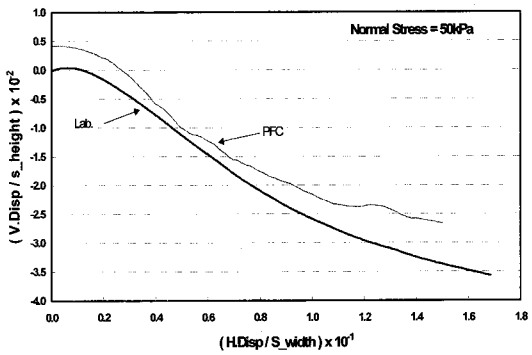


(b) Normal stress 75kPa

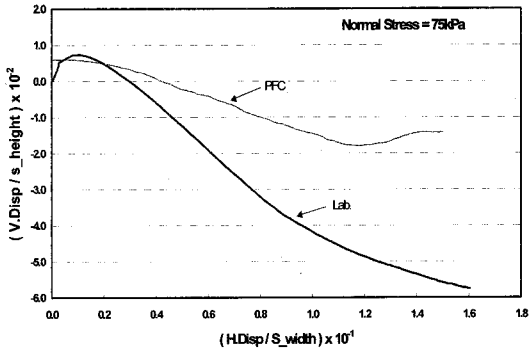


(c) Normal stress 100kPa

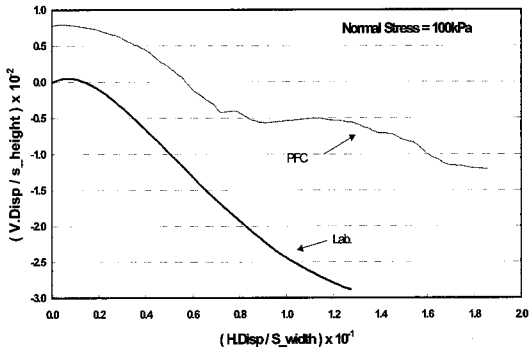
그림 14. 실험치와 PFC 모델의 전단응력 vs. 수평변위 비교



(a) Normal stress 50kPa



(b) Normal stress 75kPa



(c) Normal stress 100kPa

그림 15. 실험치와 PFC 모델의 수직변위 vs. 수평변위 비교

치하고 있는 것을 알 수 있다. 높은 구속응력(100kPa)에서는 실험결과와 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 15는 실험결과와 PFC 모델의 수직변위와 수평변위의 비교를 보여주고 있는데, 입자간의 맞물림(intelocking)에 의한 입자들의 거동으로부터 반영되는 체적팽창변화의 경우 낮은 구속응력하(50kPa)에서 체적변형은 비록 실험치보다 약간 작게 나오는 경향을 보이긴 하나 비교적 잘 일치되는 반면 구속응력이 증가함에 따라 실험결과와 차이를 보이고 있다.

그림 16에서는 PFC 모델링을 통해 파괴 포락선에서 산정된 내부 마찰각과 실험을 통해 구한 내부마찰각을 보여주고 있는데 모델링으로 구한 내부마찰각이 약 10

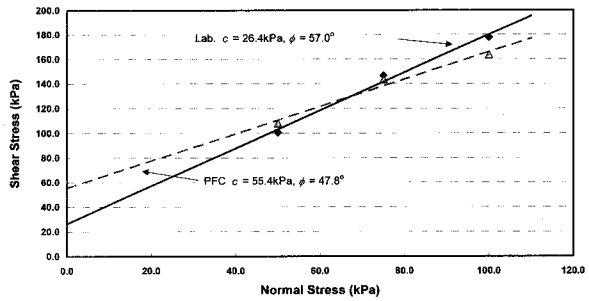


그림 16. 실험치와 PFC 모델의 파괴 포락선 비교

도정도 낮게 나오는 결과를 나타내고 있다. 이러한 원인으로는 PFC에서 시료생성시 계산시간의 증가를 피하기 위해 모델링시 실제시료의 입경보다 최소입경을 제한

함에 따라 입자들끼리의 맞물림(interlocking)을 저하시킴으로 인하여 재료의 내부 마찰각을 낮게 나오게 하는 결과로 판단된다.

또한 수평변위 증가에 따른 상단 입자의 누출현상으로 인하여 국부적인 구속응력의 감소 및 전단강도의 감소에 영향을 미치는 이유가 될 수 있다. 그림 14(b)에서 전단응력이 항복점에 도달하기 전에 일시적으로 급격히 떨어지는 경향을 보이는데 이러한 이유도 입자의 누출로 인한 국부적인 강도 저하로 판단된다. PFC 2D의 직접전단시험 모델링시 입자의 누출을 방지하기 위해서 는 전단박스 두께의 효과를 감안하기 위해 단순 수직 wall요소로 모델링을 하는 방법 보다는 수직 wall요소 옆에 날개 벽(wing wall)을 기존의 수직 wall요소에서 확장시켜 상부 입자요소들의 누출을 막는 방법을 사용하는 것이 효율적이라 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 개별요소법에 근거한 수치해석 프로그램인 PFC2D를 이용하여 조립재료인 최대입경 10mm 쇄석의 직접전단시험 모델링을 수행하였다. 쇄석의 불규칙 입자형상을 고려하기 위해 클럼프 로직을 도입하였으며 실험시료의 제작을 위해서 수행했던 입도분포와 공극율을 고려할 수 있는 알고리즘을 적용하였다.

본 연구에서 개발한 알고리즘을 적용하여 재료의 직접전단시험 모델링을 수행하였으며, 직접전단시험결과의 캘리브레이션을 통해 본 연구에서 적용한 모델링 결과가 실험치와 잘 일치하는것을 확인할 수 있었다. 직접전단시험 결과와 PFC모델과의 비교를 통해 전반적으로 낮은 연직 구속응력(50kPa, 75kPa)에서는 전단응력과 수평변위는 실험결과와 잘 일치하고 있으나 높은 구속응력(100kPa)에서는 실험결과와 다소 차이를 보임을 알 수 있었다. 또한 수직변위와 수평변위의 모델링비교시 입자간의 맞물림(intelocking)에 의한 입자들의 거동으로부터 반영되는 체적팽창변화의 경우 낮은 구속응력하(50kPa)에서 체적변형은 실험치보다 약간 작게 나오는 경향을 보이고 구속응력이 증가함에 따라 실험결과와 차이를 남을 알 수 있었다.

PFC 모델링을 통해 파괴 포락선에서 산정된 점착력의 경우는 실험치보다 크게 나타나며, 내부 마찰각의 경우 모델링으로 구한 내부마찰각이 낮게 나오는 결과를 나타내고 있다. 이러한 원인으로는 PFC에서 시료생성시 계산시간의 증가를 피하기 위해 모델링시 실제시료의 입경보다 최소입경을 제한함에 따라 입자들끼리의 맞물림(interlocking)을 저하시킴으로 인하여 재료의 내부 마찰각을 낮게 나오게 하는 결과로 판단된다.

이러한 결과로부터 본 연구를 통해 개발된 알고리즘을 적용한 PFC 직접전단시험 모델링이 실제 직접전단시험을 통한 재료의 강도특성 및 거동을 모사할 수 있음을 알 수 있었으며, 향후 본 연구를 토대로 조립토 재료의 거동에 대한 모델링뿐만 아니라, 토목섬유 등 건설재료의 거동 및 강도특성을 평가를 위한 모델링이 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2005년 건설핵심기술연구개발사업(C105A1000017-05A0300-01720) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Cho, N., Martin, C.D., Sego, D.C and Christiansson, R. (2007), " A Clumped Particle Model for Rock", International Journal of Rock Mechanics & Mining Science. Vol.44, No.7, pp.997-1010.
2. Itasca Consulting Group, (1995), PFC2D(Particle Flow Code in 2 Dimensions), Version 1.1. Minneapolis, Minnesota: Itasca Cons. Group.
3. Itasca Consulting Group, Inc. (2004), PFC2D User's Guide & Fish in PFC2D, Minneapolis, Minnesota: Itasca Cons. Group.
4. Jensen, R.P., P.J. Bosscher, M.E. Plesha, and T.B. Edil. (1999), "DEM Simulation of Granular Media - Structure Interface : Effects of Surface Roughness and Particle Shape", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 23: pp.531-547.
5. Liu, S. H. (2006), "Simulating a direct shear box test by DEM", Canadian Geotechnical Journal, Vol.43, pp.155-168.
6. Thomas, P.A. and J.D. Bray. (1999), "Capturing Nonspherical Shape of Granular Media with Disk Clusters". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125: pp.169-178.

(접수일자 2007. 4. 2, 심사완료일 2008. 1. 28)