

# 개별요소법에 의한 락필재료의 대형삼축압축시험 모델링

## Modelling of Large Triaxial Test with Rockfill Materials by Distinct Element Method

전 제 성<sup>1</sup> Jeon, Je-Sung  
김 기 영<sup>2</sup> Kim, Ki-Young  
신 동 훈<sup>3</sup> Shin, Dong-Hoon

### Abstract

In this research, numerical simulations by PFC considering discrete element method are conducted to predict experimental results of large triaxial compression test with rockfill material for dam construction. For generation of compacted assembly with specific grain size distribution and initial material porosity, the clump logic method and expansion of generated particles are adapted. To predict stress-strain behavior of large triaxial test, discrete particle modelling is applied with micro parameters which are chosen by calibration process. It is expected that distinct particle modelling method could be used as a useful tool to investigate micro and macro behavior associated with geotechnical problems and develop a numerical laboratory.

### 요 지

본 연구에서는 개별요소해석 프로그램 PFC를 이용하여 실내 대형삼축압축시험에 대한 거동예측 및 실내시험 결과와의 분석을 수행하였다. 댐 축조용 락필재료(rockfill material)에 대한 실내 대형삼축압축시험을 수행하였으며, PFC 해석에 있어서는 초기 간극률을 고려한 개별요소 생성과 팽창, clump logic을 이용한 대상재료의 입도분포 모델링을 수행하였다. 특정 구속압 조건에 대한 실내시험 결과를 이용하여 개별요소해석시 필요한 미시 물성치(micro parameter)를 산정하였으며, 이를 이용하여 다양한 응력조건에 대한 개별요소해석을 수행하였다. 본 연구결과, 개별요소법은 지반공학적 측면에서, 조립재료에 대한 미시적 거동(micro behavior) 및 전체적 거동(macro behavior)의 예측뿐 아니라, 수치시험실(numerical laboratory)로서 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

**Keywords** : Clump logic, Distinct element method, Micro parameters, Numerical laboratory, PFC, Rockfill material

### 1. 서 론

조립재료에 대한 강도 및 변형특성 파악은 전체적인 거동예측과 함께 매우 중요한 지반공학적 관심사라 할

수 있다. 그러나, 일반적인 토사가 아닌 암성토용 조립 재료 등은 현장시험 및 실내시험에 의한 그 특성파악에 많은 어려움이 있는 것도 사실이다. 이러한 이유로, 기존의 경험적 방법에 의한 개략적 유추 및 단순화된 실

1 정희원, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 (Member, Principal researcher, KIWE, Korea Water Resources Corporation, jsjeon@kwater.or.kr, 교신저자)

2 정희원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 (Member, Senior researcher, KIWE, Korea Water Resources Corporation)

3 정희원, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 (Member, Principal researcher, KIWE, Korea Water Resources Corporation)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

내시험 결과를 통해 조립재료의 역학적 특성치를 산정한 후, 이를 연속체 개념의 수치해석등에 적용하여 전반적인 거동예측을 수행하고 있다.

특히, 조립재료의 현장입도 규모 및 조건을 고려할 때, 역학특성 파악을 위해서는 대형시험장치의 이용이 필수적이지만, 시료조성 및 각 시험경우별 동일 초기조건 구현이 어려운 사항들로 인해 매우 제한적으로 이용되고 있다. 또한 조립재료로 구성된 대상지반 및 구조체의 실제 입도형태와 입자형상 등을 실내시험상에 그대로 반영하는것은 현실적으로 불가능하다.

이러한 이유에서 최근들어 조립재료 및 절리암반등의 역학적 특성치 산정과 전체적인 거동예측에 개별요소법에 의한 수치해석적 접근이 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 개별요소해석 프로그램인 PFC를 이용하여 실내 대형삼축압축시험에 대한 모델링을 수행하였으며, 실내시험 결과와의 비교, 분석을 통해 개별요소해석의 적용기법 및 응용에 관한 연구를 수행하였다.

실내시험에 이용된 재료는 최대입경이 38mm인 댐축조용 락필재료(rockfill material)이며, 직경 300mm, 높이 600mm 규격의 대형삼축압축시험기를 이용, 압밀배수조건에 대한 시험을 수행하였다.

PFC 해석에 있어서는, 초기 간극률을 고려한 개별요소 생성 및 Clump logic을 이용한 대상재료의 입도분포 모델링을 수행 하였으며, 특정 구속압 조건에 대한 실내 시험 결과를 이용하여 개별요소해석시 필요한 미시 물성치(micro parameter)를 산정하였다.

## 2. PFC2D에 의한 개별요소해석

### 2.1 Particle Flow Code(PFC)

지반공학에서 다루고 있는 많은 현상들은 각각의 입자 혹은 입자들로 구성된 복합체의 상호작용 및 거동등으로 표현된다. 이러한 관점에서 많은 물리적 현상들이 연속체 거동이 아닌 불연속체 거동의 개념으로 설명되고 있으며(Owen 등, 2003), 조립재료 및 암반의 역학적 거동을 모델링하는데 있어 개별요소법(discrete element method)의 적용이 증가하고 있다(Cundall and Strack, 1979; Cundall, 2001; Achmus 등 2002; Hainbüchner 등, 2002; Cho and Martin, 2004).

본 연구에 이용된 개별요소해석 프로그램은 PFC<sup>2D</sup>(Itasca, 2004)로서, 본 프로그램은 각각의 독립적인 입자(particle)

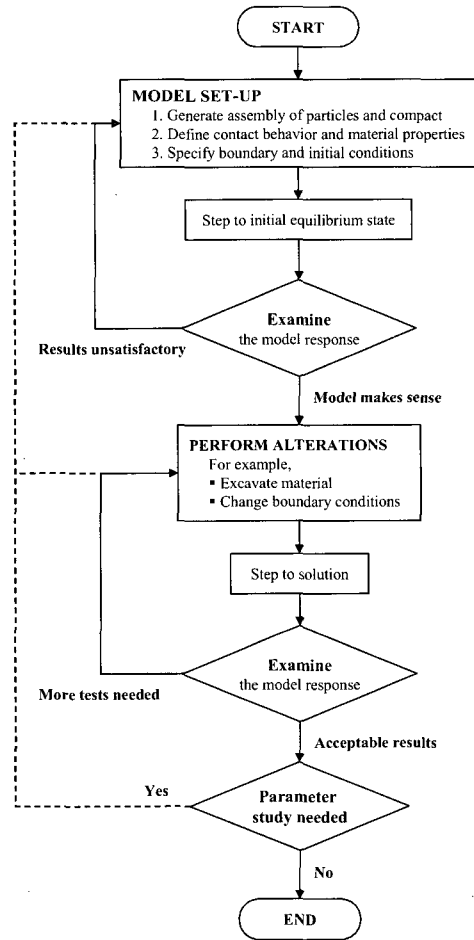


Fig. 1. PFC procedure (Itasca, 2004)

들로 전체 모델을 생성하게 되며, 각 입자간 접촉면에서의 하중(contact force)-변위(displacement)관계로 표현되는 접촉면 구성모델에 의해 입자 개개의 미시적 거동(micro behavior) 및 전체적인 거동(macro behavior) 해석을 수행하게 된다.

국내에서도 암반 및 발파진동 분야의 연구를 중심으로 PFC<sup>2D</sup>가 적용되고 있는데, 박의섭 등(2005)은 기존 연속체 해석 및 시험으로 평가하기 어려운 절리암반에서의 역학적 물성치 산정에 PFC<sup>2D</sup>를 이용하였으며, 신중호 등(2000)은 Brazilian 파괴인성 시험에 대한 불연속체 수치해석을 실시하고, 이를 통해 시험에 대한 영향변수 분석 및 적정 기준설정에 관한 연구를 수행하였다.

### 2.2 개별요소 생성

지반공학에서 다루고 있는 조립재료는 세부 입자들의 형상, 거칠기, 배열상태 등과 관련된 입자간의 역물림 및 회전현상 등에 의해 그 강도와 변형특성이 크게

좌우된다.

이는 개별요소해석에서도 동일한 현상으로서, 해석시의 개별요소들은 특정두께를 갖는 디스크(disk) 혹은 구(sphere) 형태로 생성될 수 있으며, 더욱 복잡한 형태의 요소는 클러스터(cluster) 혹은 클럼프(clump) 로직을 통해 생성이 가능하다.

해석대상의 초기 간극률 및 소요 입도분포 모델링을 위하여, 개별요소들은 특정 반경범위에 대한 균등분포(uniform distribution) 또는 정규분포(gaussian distribution) 형태로 생성될 수 있으며, 그 요소개수 및 입경의 조정 등이 필요하게 된다.

그림 2는 실제 조립재료에 대한 개별요소 생성개념을 표현한 것으로서, 조립재료의 입도분포, 간극률 등을 고려한 개별요소의 크기와 개수 등을 결정한 후, 접촉면 응력상태 확인을 통하여 초기응력조건 및 요소배열상태 등을 만족시켜야 한다.

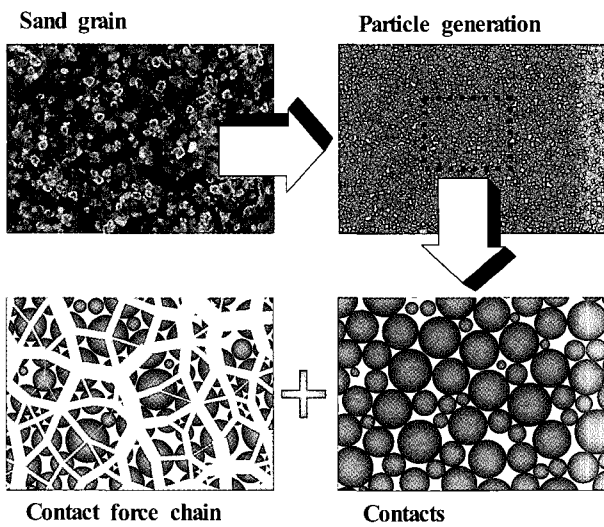


Fig. 2. Construction of particle model

### 2.3 접촉면 거동 및 물성치 선정

개별요소들의 접촉면 거동은 크게 본딩(bonding) 거동의 고려 유·무로 구분될수 있는데, 본딩 거동의 고려는 접촉면에서의 본딩강성을 고려(parallel-bond)하는 경우와 고려하지 않는 경우(contact bond)로 세분화 될 수 있다. 즉, 본딩강성을 고려하지 않는 경우는 접촉면에서의 방향별 접촉강성(contact stiffness)만을 고려하여, 접촉면 응력상태에 따른 본딩의 파괴 유·무만을 해석에 반영할 뿐, 접촉면에서의 휨모멘트 저항 및 회전저항 효과는 고려하지 못한다.

본 연구대상인 조립재료와 같이 별도의 본딩효과가 없는 재료들은 인접한 두 개별요소간의 접선 및 법선방향에 대한 접촉하중-상대변위를 선형적 혹은 비선형적 관계식을 통해 표현할 수 있다(Cundall, 1979). 한편, 두 개별요소 접촉면에서의 미끄러짐을 표현하는 방법으로, 인장력에 대한 법선방향 강도를 부여하지 않은 상태에서 한계 전단하중을 설정, 그 이상의 전단하중 작용시 미끄러짐이 발생하도록 할 수 있다.

연속체개념의 수치해석에 필요한 입력값은 실내 또는 현장시험 결과를 통해 산정되거나 기존의 경험값이 이용되기도 한다. 즉, 특정 연속체 모델을 위한 입력값들은 해석결과 또는 현장거동 등으로 표현되는 전체적 물리적 현상과 어느 범위에서 상관관계를 갖는다고 할 수 있다.

그러나 PFC 모델의 경우, 개별 입자들의 상호거동을 규정하기 위한 미시 물성치(micro parameters)들은 전체적인 물리적 현상과 직접적인 상관관계를 갖지 못한다. 즉, 동일 미시 입력값을 적용한다 해도 전체적인 거동양상은 큰 차이를 보일수 있는데, 이는 PFC 모델 거동이 초기 입자의 크기 및 분포, 그 배열형태 등에 따라 큰

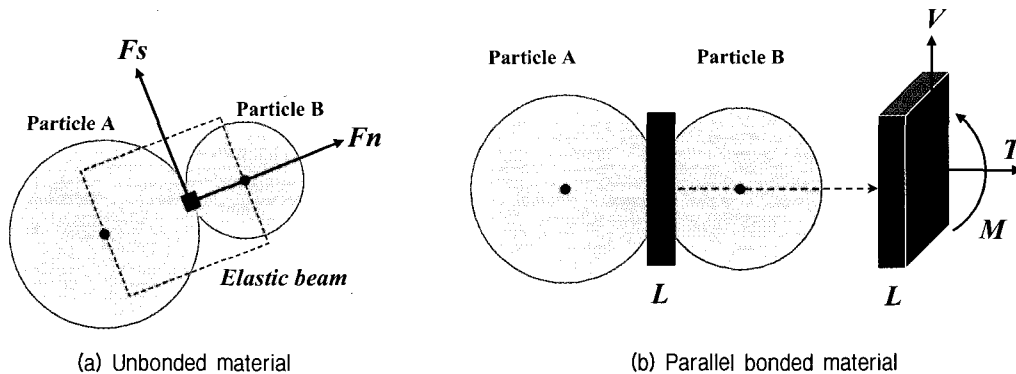


Fig. 3. Contact behavior idealization for bonding condition

영향을 받기 때문이다. 그러므로, PFC 모델에서는 실내 혹은 현장시험 등의 거동현상과 임의 미시 입력값에 대한 해석결과를 비교하고 다른 미시 입력값에 대한 동일 과정을 반복하여, 물리적 거동현상을 가장 잘 표현할수 있는 적정 미시 입력값을 산정해가는 과정(calibration process)이 필요하다.

### 3. 대형삼축압축시험

#### 3.1 시험재료

대형삼축압축시험에 이용된 재료는 댐 축조용 락필 재료(rockfill material)이며, 표 1은 시험재료의 특성값을 나타낸다. 상사입도 조정법에 의한 락필재료의 입도분포는 그림 4와 같으며, 이는 개별요소해석시 매우 중요한 해석조건으로 고려된다.

#### 3.2 시험방법 및 결과

공시체는 1개당 대략 100kg의 시료를 준비하여, 그림 5와 같은 대형 다짐장치와 직경 30cm, 높이 60cm의 특

Table 1. Rockfill properties

항 목	재료 특성값
비 중, $G_s$	2.68
단위중량( $tf/m^3$ )	2.15
흡수율(%)	0.66
마모율(%)	16.3
균등계수, $C_u$	32.2
곡률계수, $C_g$	0.96

※ 암종 : 화강편마암

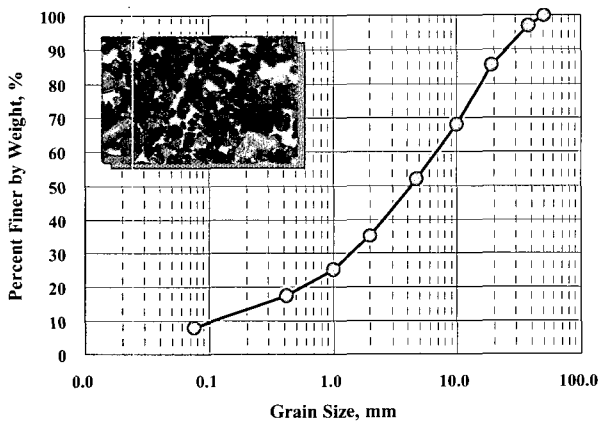


Fig. 4. Grain shape and size distribution

수제작 몰드를 이용, 공기건조된 시료에 대한 충격다짐 방식으로 제작하였다. 시료의 하부에서 상부로 약 1.6m의 수두차를 이용하여 탈기수를 최소 48시간 이상 통수시켜 시료를 포화시켰다. 전단시험은 그림 6과 같은 대형 삼축압축시험기에 의해 수행되었으며, 전단속도는 3mm/min이고 0.196MPa, 0.392, 0.588MPa의 구속압 및 압밀배수 조건으로 수행하였다.

그림 7과 그림 8은 구속압 조건별 응력-변형 관계와 모어원 및 전단강도값을 나타내고 있다. 고밀도 조건의

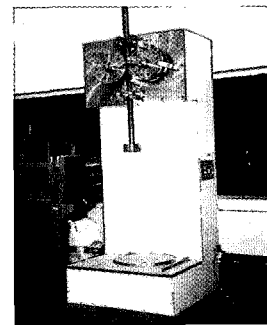


Fig. 5. Large compaction equipment

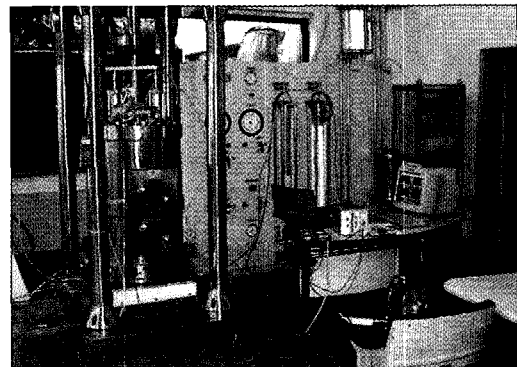


Fig. 6. Large triaxial test equipment

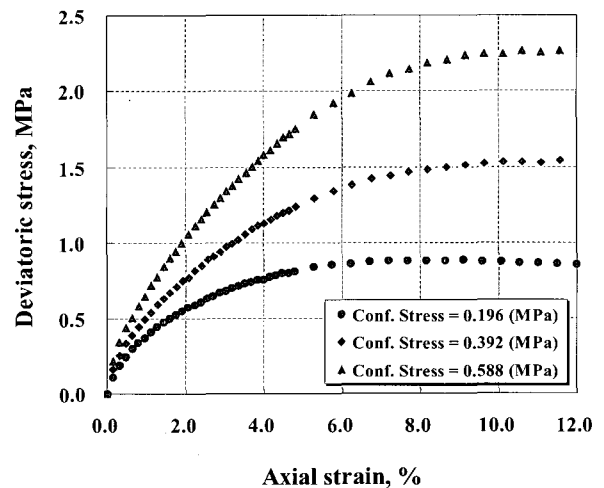


Fig. 7. Deviatoric stress with axial strain

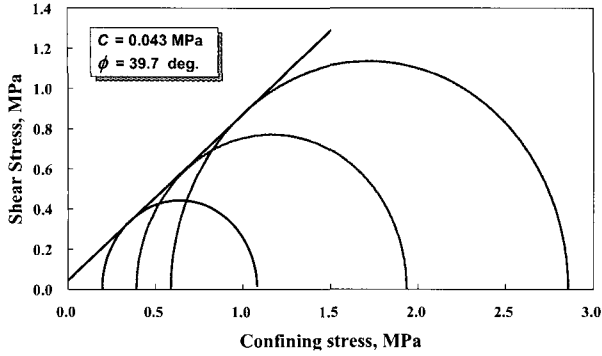


Fig. 8. Mohr circle and shear strength parameters

시료조건에도 불구하고 재성형 시료에서 일반적으로 나타나는 응력경화현상만 보일뿐, 최대강도 이후의 응력연화현상은 보이지 않음을 알 수 있다.

## 4. PFC 모델링

### 4.1 개별요소 생성

대형삼축압축시험을 모델링하기 위하여, 직경 30cm, 높이 60cm의 직사각형 공간에 원형 디스크 형태의 개별요소들을 생성하였으며, 그들은 상하 및 좌우측면에 총 4개 경계면에 의해 구속되도록 하였다.

본 연구에서는 최소반경( $R_{min}$ )을 0.3mm, 최대반경( $R_{max}$ )을 1.5mm로 하여, 일단 간극률 0.15정도의 고밀도 조건으로 초기 요소를 생성한 후, clump 기법 및 입자 제거를 통해 실제의 입도분포와 간극률 조건을 모델링하였다. 임의의 간극률 및 개별요소 반경에 대한 적정 요소수는 식 (1)에 의해 결정되고, 최종적인 간극률 조건을 만족시키기 위해 식 (2)와 같은 요소확장계수( $m$ )를 산정, 기존 생성된 개별요소들의 크기를 변경시키게 된다.

$$N_p = \frac{A}{\pi(\bar{R})^2} [1-n] \quad (1)$$

여기서,  $N_p$  : 개별요소수(number of particles)

A : 전체 시료면적

$\bar{R}$  : 평균 입자반경,  $\bar{R} = (R_{min} + R_{max})/2$

n : 간극률

$$m = \sqrt{\frac{1-n}{1-n_o}} \quad (2)$$

여기서, n : 목표 간극률

$n_o$  : 현 요소생성 상태에 대한 간극률

### 4.2 Clump 기법에 의한 입도분포 모델링

본 연구에 이용된 Rockfill 재료는 그림 4에서 보는 바와 같이, 입경의 범위가 대략 0.1mm~50mm 까지 매우 넓게 존재하며, 입자형상도 개별요소 해석시의 요소형상과 같은 원형이 아님을 알 수 있다. 대형삼축압축시험에 이용된 시료의 크기를 고려할 때, 실제 입도분포곡선에 해당하는 모든 입경의 입자들을 개별요소로 생성하는 것은 수치연산시간 및 계산시의 오차누적 등에 있어 바람직하지 않다.

Ting and Corkum(1988), Thomas and Bray(1999) 등의 연구결과에 의하면, 입자형상은 입자간의 역물림 효과(interlocking effect) 및 회전저항(rolling resistance) 등과 관련하여 최종적인 강도와 체적팽창에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러므로, 작은 입경범위에 대해 생성된 원형의 개별요소들을 바탕으로, 실제 입도분포 및 입자형상을 표현하는 과정이 필요하다. Li 등(2003), Thomas and Bray 등(1999)은 원형입자들의 과도한 회전현상 방지 및 연산시간 단축을 위하여, 임의의 영역안의 개별요소들을 하나의 강체처럼 고려해주는 방법으로 불규칙한 입자형상을 표현하였다.

PFC에서 이러한 불규칙한 입자형상의 표현은 clump 혹은 cluster logic을 통해 가능하다. 두 방법 모두 임의의 입자형상을 갖도록 원형 개별요소들을 하나의 단위로 packing시키는 것은 동일하지만, 그림 9에서 보듯이, clump logic에 있어서는 영역안의 개별요소들이 작용하중에 관계없이 일체로 거동하는데 반해, cluster logic에서는 영역안의 개별요소들도 서로간에 상호작용을 하며 때론 서로간의 bonding이 파괴되면서 다른 입자로 거동하기도 한다(Itasca, 2004). 본 연구에서와 같이, 불규칙한 입자형상은 고려하되 입자간의 파쇄효과를 고려하지 않는 경우는 clump logic을 이용하는 것이 연산시간의 단축면에서 매우 유용하다.

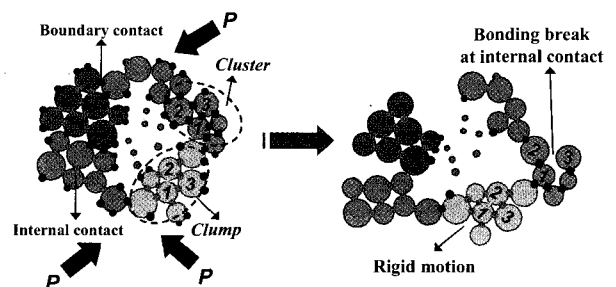


Fig. 9. Distinct elements behavior for Clump and Cluster

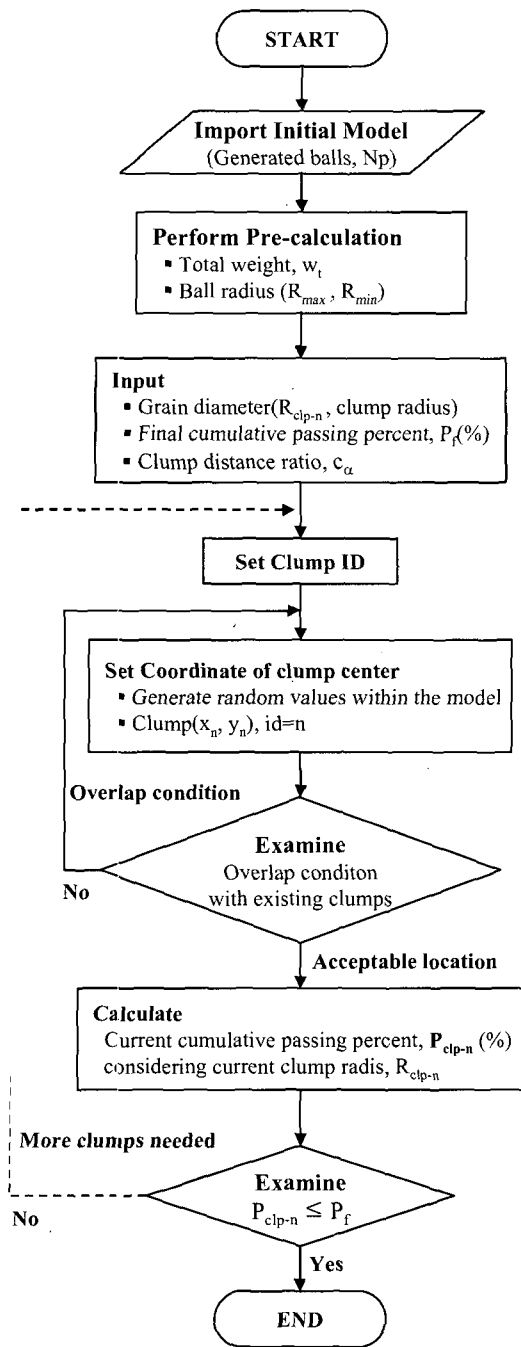


Fig. 10. Clump logic for generating grain size distribution

$$d(clp_n, clp_o) \geq c_\alpha [R_{clp-n} + R_{clp-o}] \quad (3)$$

여기서,  $d(clp_n, clp_o)$  : 신규생성된 clump와 기존 clump의 중심간 거리

$c_\alpha$  : clump간 거리 할증계수

$R_{clp-n}, R_{clp-o}$  : 신규 및 기존 clump 반경

본 연구에서도 초기 생성요소를 바탕으로, 그림 4와 같은 입도분포 및 불규칙한 입자형상을 모델링하는데 있어 clump logic을 사용하였다. 단, 불규칙한 입자형상을 표현하는데 있어, 입의 형태의 입자형상이 아닌 기본적으로는 원형의 입자형상을 가정하되, 입자표면의 굴곡을 통해 거칠기를 표현하는 방식으로 개별요소를 생성하였다.

일단 난수발생기법에 의해 시료내 입의 위치를 선정한다 후, 식 (3)과 같은 방식으로 기존 clump와의 중복을 피하도록 특정입경의 원형 clump를 생성하였다. 신규 생성된 clump 조건을 포함한 입경별 통과중량 백분율( $p_{clp-n}$ )을 계산한 후, 원하는 통과중량 백분율( $p_f$ )조건을 만족할때 까지 특정입경에 대한 clump 생성을 반복하였다.

전체적인 clump 생성절차는 그림 10과 같으며, 특정 통과중량 백분율 단계별 clump 생성현황은 그림 11과 같다. 본 연구시 수행한 개별요소 해석에서의 최종 생성 요소수 및 최소반경( $R_{min}$ ), 최대반경( $R_{max}$ ), clump 개수( $clp_n$ ), clump 생성시의 거리할증 계수( $c_\alpha$ ) 등은 표 2와 같다.

한편, 해석대상의 실제 조립재료는 3차원 배열형태인데 반해, 본 연구에서의 개별요소 모델링은 2차원 조건이다. 일반적으로 2차원에 비해 3차원 조건에서 간극(void space)은 더욱 크게 나타난다. 동일 크기의 원형요소를 이용하여 가장 밀실한 상태로 배열한 경우, 3차원에서의 간극률은 25.95% 인데 반해, 2차원 조건에서의 간극률은 9.31%로 나타난다(Deresiewicz, 1958).

Hainbüchner 등(2002)은 식 (4)와 같이 상대다짐도를

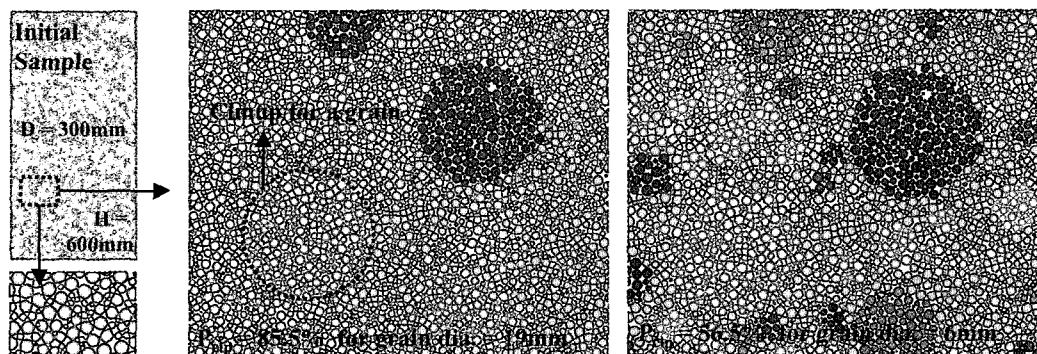


Fig. 11. Adjustment for grain size distribution using clump logic

Table 2. Number of particles and clumps used in calculation

Number of particles used in calculation		Number of clumps	Clump distance ratio	Ball radius after adjustment	
Initial sample	After adjustment	$dp_n$	$c_\alpha$	$R_{min} (mm)$	$R_{max} (mm)$
60,125	30,856	4,927	1.0~1.3	0.56	2.08

이용하여 3차원 조건에 대한 2차원 조건에서의 간극률 ( $n_{2D}$ )을 산정하였으며, 본 연구에서도 이러한 방법에 의한 간극률 산정 및 개별요소 해석을 실시하였다.

$$n_{2D} = n_{2D,max} - D(n_{2D,max} - n_{2D,min}) \quad (4)$$

여기서,  $D$  : 상대다짐도

$n_{2D,max}$  : 2차원조건에서 이론적으로 가능한 최대 간극률(=21.46%)

$n_{2D,min}$  : 2차원조건에서 이론적으로 가능한 최소 간극률(=9.31%)

### 4.3 삼축압축시험 모델링

간극률 조건 및 입도분포곡선을 고려한 개별요소들의 생성결과를 이용, 조립재료에 대한 대형삼축압축시험 과정을 모델링하였다.

그림 12에서 보듯이, 초기 시료는 4개의 경계면(wall) 안에 위치하게 되며, 각각의 경계면은 임의의 응력조건 모델링에 이용되는데, 상부 및 하부 경계면은 축하중을 재하하는 가압판으로 사용되었다. PFC에서는 경계면을 통한 직접적인 응력재하가 불가능하기 때문에 경계면을 특정 속도로 이동시키며 그 과정에서 경계면에 작용하는 반력을 측정하는 방식으로 축하중 재하를 실시하였다. 또한 해석과정중 일정한 구속압 조건을 유지시키

기 위하여, 측부 경계면은 반력과 경계면 속도(wall velocity)의 자동조절을 반복해가는 servo-mechanism을 적용하였다.

구속압 조건은 실내시험시와 동일하게 0.196MPa, 0.392MPa, 0.588MPa를 적용하였으며, 축변형률이 10%에 도달할 때까지 해석을 수행하였다.

한편, 개별요소법에서는 일반적인 연속체 해석에서와 같이 미리 정해진 해석대상의 대표 물성치(macro parameters)를 이용하는 것이 아닌, 각 입자요소들의 상호거동을 표현하는 미시 물성치(micro parameters)를 이용하여 전체적인 역학거동을 해석한다. 즉, 개별요소법 (DEM)은 일반적인 연속체 해석과 달리 해석대상의 전체적 거동(macro behavior)을 적절하게 표현할 수 있는 미시 물성치(micro parameters)의 산정과정(calibration process)이 매우 중요하다.

본 연구에서는, 특정 구속압 조건에 대하여, 임의의 미시 물성치들에 대한 개별요소해석을 수행하되, 그 결과가 실내 대형삼축압축시험 결과와 유사한 경향을 나타낼때까지 미시 물성치를 변화시켜가며 해석을 반복하였다. 이러한 일련의 과정을 통해 최종 산정된 unbonded model의 미시 물성치는 표 3과 같다. 여기서  $E_c$ 는 각 개별요소 접촉면에서의 탄성계수를 의미하는 것으로서, 일반적인 연속체 해석에 이용되는 전체적 거동개념의 탄성계수와는 다른 특성치이다.  $\mu$ 는 개별요소간 혹은 개별요소와 경계면 사이의 미끄러짐저항을 나타내는 미시 물성치로서, 전체 거동(macro behavior)에서의 재료강도에 영향을 미친다.

이러한 미시 물성치를 이용하여 본 연구에서는 모든

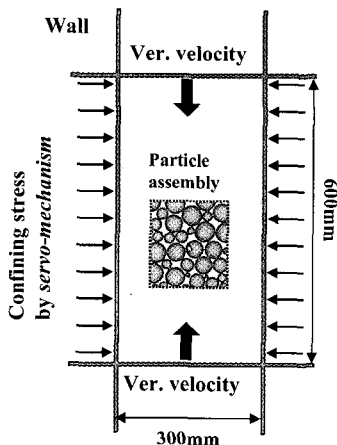


Fig. 12. Modelling of biaxial test

Table 3. Microparameters for unbonded model

Microparameter	Value	Remarks
Density, $\rho(kg/m^3)$	2,150	Ball property
Contact modulus, $E_c(Pa)$	$9.0 \times 10^7$	
Normal stiffness, $k_n(N/m)$	$1.8 \times 10^8$	
Shear stiffness, $k_s(N/m)$	$1.8 \times 10^8$	
Friction coefficient, $\mu$	10.0	
Stiffness reduction factor	1.0	Wall property

Sample width=300mm, height=600mm

조건은 동일하게 적용하되, 다른 구속압 조건에 대한 해석을 실시하고 그 결과를 실내시험 결과와 비교, 분석하였다. 또한 반복재하과정에 대한 해석을 통해 특정 조건에 대한 미시 물성치가 다양한 응력조건에 대한 해석과정에 이용될 수 있음을 살펴보았다. 한편, 삼축압축시험 중 4개 경계면에서의 마찰은 없는 것으로 고려했으며, 벽체의 수직방향 강성은 개별요소의 평균 수직강성에 강성감소계수(Stiffness reduction factor)를 곱하여 적용하였다.

#### 4.4 PFC 해석결과

초기 개별요소 생성과 clump logic에 의한 입도분포 모델링, 미시 물성치(micro parameters)의 산정과정(calibration process) 등을 기초로 수행한, PFC의 대형삼축압축시험 모델링 결과 및 실내 대형삼축압축시험 결과는 그림 13과 같다.

미시 물성치의 산정은, 3가지 구속압 조건 중 0.392MPa 구속압 조건에 대한 실내시험결과를 대상으로, 미시 물성치를 변화시켜가며 해석을 수행한 후 그 중 실내시험결과와 가장 일치하는 값을 선택하는 방식으로 수행하였다. 이러한 미시 물성치 산정과정(calibration process)에 의해 최종 산정된 결과를 이용하여, 모든 해석조건은 동일하게 하되 구속압을 0.196MPa, 0.588MPa로 달리한 상태에서의 개별요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 다시 해당 구속압 조건에 대한 실내시험 결과와 비교하였다.

결과에서 알 수 있듯이, 전체적인 응력-변형 거동에 있어 PFC를 이용한 개별요소해석상의 예측결과와 실내 시험 결과는 비교적 잘 일치하고 있으며, 특히 초기 탄성영역에서의 탄성계수에 있어서는 PFC가 실제 거동과 매우 유사한 예측결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 13(d)는 반복재하 과정을 해석한 결과로서, 그림 12에서의 수직 재하속도 방향 및 축변형율을 원하는 시점

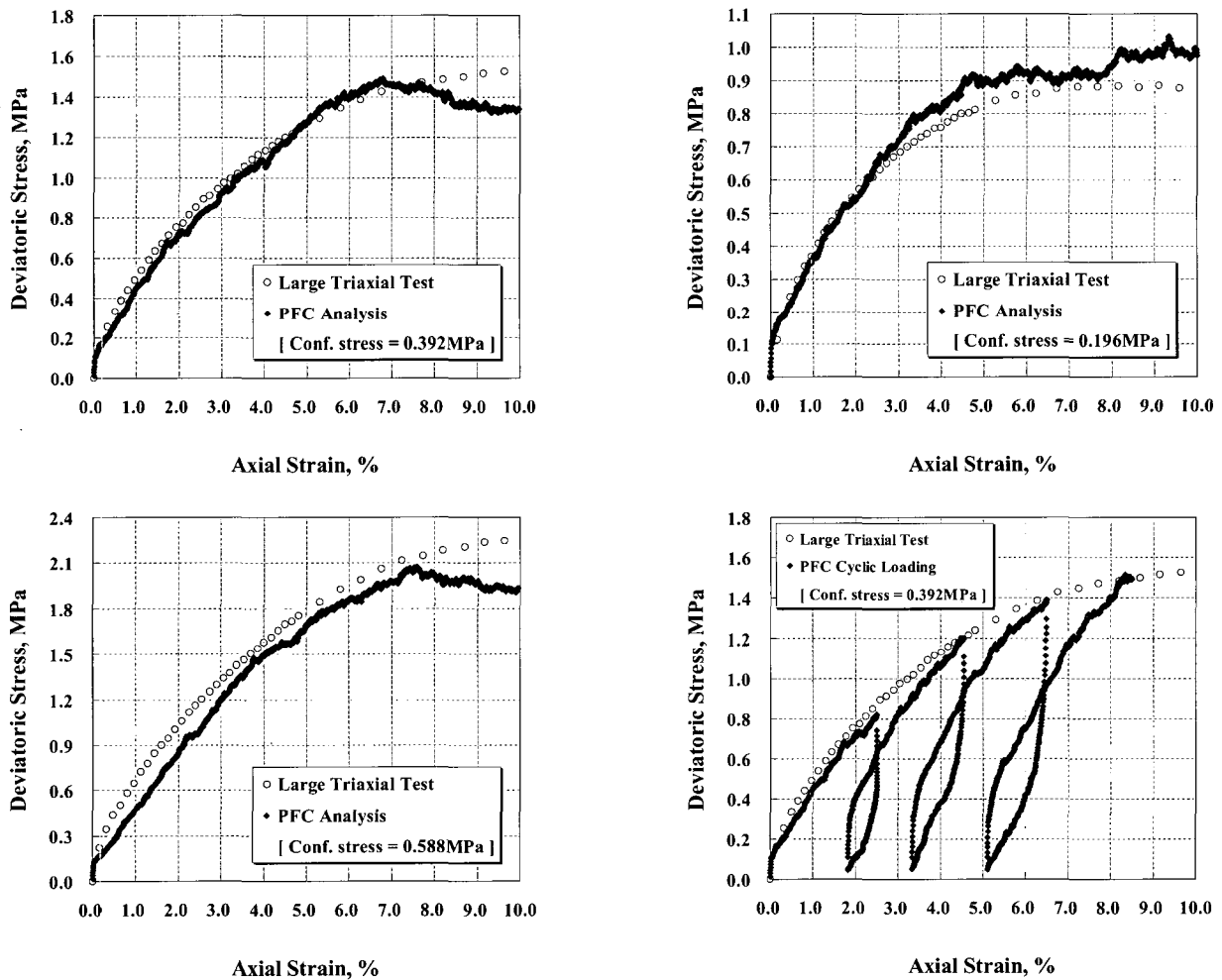


Fig. 13. PFC analysis results at each confining stress and cyclic loading condition



까지 변화시켜가며 해석을 수행하였으며, 결과에서 알 수 있듯이, PFC를 통한 실제 현상과 부합하는 거동 (macro behavior) 예측이 가능함을 알 수 있다.

즉, 실내시험 결과와의 비료를 통해 산정된 미시 물성치는 구성재료와 간극률, 입도 등의 초기조건만 동일하다면 다양한 응력조건 및 경계조건에 대한 개별요소해석에 적용될 수 있으며, 이는 유한요소 및 유한차분방법과 같은 기존 연속체 해석으로 표현하기 힘든 지반공학 적 예측이 개별요소해석을 통해 가능하다는 것을 의미한다.

한편, 대형삼축압축시험 결과에서는 최대축차응력에 도달한 후 확인한 응력연화 현상을 보이는 거동이 나타나지 않고 있다. 그러나, 개별요소해석 결과에서는 최대 축차응력 도달 후 응력연화 거동이 발생하는 것을 알 수 있으며, 그 정도는 구속압이 증가할수록 커지는 것으로 나타났다.

개별요소해석에 있어, 최대축차응력 도달 후의 응력 거동에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 초기 간극률 및 입자형상 등이라 할 수 있다. 본 연구에서는 실내시험시의 입도분포를 모델링하는데 있어, 입의 영역내 단일 디스크들을 하나로 일체화 시켜주는 clump logic을 사용했는데, 이때 clump 영역내의 미소 간극면적을 계산하는데 있어 실제 간극률과 차이를 발생시킬 수 있으며, 이러한 오차로 인해 최대 축차응력 도달 후 응력거동에 차이가 발생한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

최근, 조립재료, 절리암반 등의 역학특성치 산정 및 거동해석시 개별요소 수치모델(discrete numerical model)의 도입이 증가하고 있으며, 미시적 거동분석 및 기존 연속체 개념의 해석방법으로는 표현이 어려운 현상을 대상으로 개별요소법(particle based method)의 활용이 더욱 증가할 것으로 예상되고 있다(Cundall, 2001).

본 연구에서는 개별요소해석 프로그램 PFC(Itasca, 2004)를 이용하여 실내 대형삼축압축시험에 대한 거동 예측 및 실내시험 결과와의 분석을 수행하였으며, 그에 대한 결론은 다음과 같다.

조립재료의 입도분포, 초기 간극률, 입자형상 등이 변형 및 강도특성에 미치는 영향을 고려할 때, 체적팽창을 고려한 개별요소 생성 및 clump logic의 응용을 통한 입의 입도분포 모델링은 개별요소해석에 있어 매우 효과

적임을 확인할 수 있었다.

미시 물성치(micro parameter) 산정과정(calibration process)을 통해 특정 구속압 조건의 실내시험 결과에 대한 미시 물성치의 산정이 가능했으며, 동일 미시 물성치를 적용하되 구속압 조건을 달리한 개별요소해석을 실시한 결과, 실제 실내시험 결과와 유사한 예측결과를 보였다. 즉, 실내시험 결과와의 비료를 통해 산정된 미시 물성치는 구성재료와 간극률, 입도 등의 초기조건만 동일하다면 다양한 응력조건 및 경계조건에 대한 개별요소해석에 적용될 수 있으며, 이는 유한요소 및 유한차분방법과 같은 기존 연속체 해석으로 표현하기 힘든 지반공학 적 예측이 개별요소해석을 통해 가능하다는 것을 의미한다.

이는 개별요소해석의 다양한 확장성 및 응용성을 의미하는 것으로서, 개별요소해석이 지반공학 적 측면에서 조립재료의 미시적 거동(micro behavior) 및 전체적 거동(macro behavior)의 예측뿐 아니라, Li and Holt(2002)의 연구와 같이 하중조건 및 스케일 측면에서 실내 및 현장시험이 어려운 경우에 대한 수치시험실(numerical laboratory)로서 활용될 수 있음을 나타낸다. 단, 지반공학분야에서 가장 중요한 요소로 작용하는 간극수압을 적절히 표현하는데 있어서는 유체와의 연동해석에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 신중호, 박 찬, 신희순, 정용복, 이희근 (2000), "Brazilian 시험의 수치해석 시뮬레이션을 통한 파괴인성 산정 및 영향변수 분석", *한국암반공학회지*, Vol.10, No.3, pp.320-328.
2. 박의섭, 류창하 (2005), "PFC2D를 이용한 절리암반의역학적 물성 평가연구", *한국암반공학회지*, Vol.15, No.2, pp.119-128.
3. Achmus, M., and K. Abdel-Rahman. (2002), "The influence of "Up-Scaling" on the results of particle method calculations of non-cohesive soils", *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, A. A. Balkema, Lisse, pp.183-187.
4. Cho, N., Martin, C.D., Sego, D.C. and Christiansson, R. (2004), "Modelling Dilation in Brittle Rocks" in *Gulf Rocks 2004: Rock Mechanics across Borders & Disciplines (Proceedings of the 6<sup>th</sup> NARMS Conference, Houston, June 2004)*. D. P. Yale, S. M. Willson and A. S. Abou-Sayed, Eds. Paper no. ARMA/NARMS 04-483.
5. Cundall, P.A. (2001), "A discontinuous future for numerical modelling in geomechanics?", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical engineering*, Vol.149, No.1, pp.41-48
6. Cundall, P.A., and Strack, O.D.L. (1979), "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", *Geotechnique*, 29, pp.47-65.
7. Deresiewicz, H. (1958), "Mechanics of Granular Matter," in *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 5, H.L. Dryden, et al., Eds. New York: Academic Press, Inc., pp.233-306.

8. Hainbüchner, E., Potthoff, S., Konietzky, H., and Kamp, L. (2002), "Particle based modeling of shear box tests and stability problems for shallow foundations in sand", *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, A. A. Balkema, Lisse, pp.151-156.
9. Itasca Consulting Group, Inc. (2004), *PFC2D User's Guide & Fish in PFC2D*, Minneapolis, Minnesota.
10. Li, L., and Holt, R.M. (2002), "Development of discrete particle modeling towards numerical laboratory", *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, A. A. Balkema, Lisse, pp.19-27.
11. Owen, D.R.J., Feng, Y.T., and Cottrell, M.G. (2002), "Numerical modeling of industrial application with multi-fracturing and particulate phenomena", *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, A. A. Balkema, Lisse, pp.3-12.
12. Thomas, P.A. and Bray, J.D. (1999), "Capturing nonspherical shape of granular media with disk clusters", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp.169-178.
13. Ting, J.M. and Corkum, B.T. (1988), "Strength behavior of granular materials using discrete numerical modelling", *Numerical method in geomechanics*, Innsbruck, pp.305-310.
14. Ting, J.M., Corkum, B.T., Kauffman, C.R., and Greco, C. (1989), "Discrete numerical model for soil mechanics", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 115, No. 3, pp.379-398.

(접수일자 2006. 6. 7, 심사완료일 2006. 10. 16)