

# 3차원 개별요소해석 시의 초기 모델 및 재료 스케일 영향

## Scale Effects of Initial Model and Material on 3-Dimensional Distinct Element Simulation

전 제 성<sup>†</sup> · 신 동 훈<sup>1)</sup> · 하 익 수<sup>2)</sup>

Jeon, Jesung · Shin, Donghoon · Ha, Iksoo

**ABSTRACT** : Numerical simulations by three-dimensional Particle Flow Code(PFC<sup>3D</sup>, Itasca) considering distinct element method (DEM) were carried out for prediction of triaxial compression test with sand material. The effect of scale conditions for numerical model and distinct material on final prediction results was analyzed by numerical models under various scale conditions, and following observations were made from the numerical experiments. It is very useful to model the initial material condition without any porosity conversion from 2-D to 3-D DEM. Numerical experiments have shown that in all cases considered, 3D distinct element modeling could provide good agreement on stress-strain behavior, volume change and strength properties with laboratory testing results. It was important thing to assess reasonable scale ratio of numerical model and distinct elements for saving calculation time and securing calculation efficiency under condition with accuracy and appropriateness as numerical laboratory. As results of DEM simulations under various scale conditions, most of results show that shear strength properties as cohesion and internal friction angle are similar in condition of  $D_{mod}/D_{gmax} < 10$ . It shows that 3-D distinct element method could be used as efficient tool to assess strength properties by numerical laboratory technique.

**Keywords** : 3-D distinct element method, Numerical modeling, Scale effect, Numerical laboratory

**요 지** : 본 연구에서는 3차원 개별요소해석 코드인 Particle Flow Code, PFC<sup>3D</sup>(Itasca)를 이용, 조립재료의 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링을 수행하였으며, 해석 모델과 개별요소를 대상으로 다양한 상사 조건에 대한 개별요소 수치 모델링을 수행, 그 결과를 통해 각각의 스케일 조건이 최종 수치 모델링 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 3차원 개별요소 수치 모델링은 기존 2차원 모델링 대비 별도의 간극률 환산 없이 정확한 초기 조건 구현이 가능했으며, 응력-변형 및 체적변화 거동, 강도정수 등에 있어 실내시험 결과와 유사한 수치 해석적 예측이 가능하였다. 해석 모델과 개별요소에 대한 다양한 상사비 조건별 수치 모델링 결과, 3차원 해석 시의 안정적 예측결과 도출 및 수치 시험실 활용에 대한 적정성을 확보하되, 해석시간 단축 및 해석 효율성 확보를 위해서는 해석 모델과 개별요소에 대한 적정 상사비 결정이 필요함을 알 수 있었다. 해석 모델의 크기와 개별요소의 입경크기를 변화시켜 개별요소 수치모델링을 수행한 결과, 대부분의 경우 전체적인 응력-변형 거동에 차이가 발생하였지만, 점착력과 내부 마찰각의 강도정수는  $D_{mod}/D_{gmax} < 10$  조건에 유사한 결과를 보였으며, 개별요소 방법이 수치 시험실 기법을 이용한 강도정수 산정에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

**주요어** : 3차원 개별요소해석, 수치 모델링, 스케일 효과, 수치시험실

## 1. 서 론

개별요소방법은 입상재료의 미시적 거동분석 및 조립재료, 절리암반 등의 역학적 특성치 산정과 전체적 거동예측 등의 관련 국내외 연구에 활발히 적용(Staffield 등, 1988; Cundall 등, 1979; Cundall, 2001; Li 등, 2002; Cho 등, 2004; 박의섭 등, 2005)되고 있다.

특히, 조립재료 및 락필재료를 대상으로한 지반공학 분야에 개별요소방법의 적용이 증가하고 있는데, 지반공학 분야에의 응용방안 제시(Cundall, 2001)를 시작으로 조립재료

의 미시적 강도특성(Ting 등, 1988; Ting 등, 1989), 조립재료의 형상 모델링 기법(Thomas 등, 1999), 실내시험 모델링을 통한 기초 지지력 연구(Hainbüchner 등, 2002), 대규모 락필재료에 대한 입도분포 생성 및 실내시험 모델링(전제성 등, 2006; 조남각 등, 2008), 초기 간극률 및 미시물성치 영향 분석(구차갑 등, 2007) 등 많은 분야에 그 적용이 증가하고 있다. 기존 개별요소방법에 대한 수리연동 해석기법이 개발(전제성 등, 2008; Kawaguchi 등, 1992; Shimizu, 2004)되어, 이를 이용한 지반내 공동생성 및 침투 그리우팅에 대한 미세 입자 이동 해석(이완호 등, 2007) 등의 연구가 수행되었다.

† 정회원, 인덕대학교 건설정보공학과 전임강사(E-mail : jsjeon@induk.ac.kr)

1) 정회원, 한국수자원공사 K-water연구원 기반시설연구소, 소장

2) 정회원, 한국수자원공사 K-water연구원 기반시설연구소, 책임연구원

개별요소방법은 해석대상 재료를 개별 입자형태로 모델링하게 되는데, 기존 국내에서 수행된 대부분의 관련 연구는 일정 두께를 갖는 디스크 형태의 2차원 개별요소를 생성하여 수치 모델링에 이용하였다. 그러나, 지반공학분야에서 다루는 입상재료는 모두 3차원적 분포 및 상호거동을 하는 것이 사실이다. 개별요소해석 시, 간극률 등으로 표현되는 개별요소들의 초기 생성조건 및 공간적 분포형태 등은 미시물성치(전제성 등, 2006) 및 최종 해석결과에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 즉, 지반공학분야에 개별요소방법을 적용하는데 있어, 구(sphere) 형태의 3차원 개별요소 생성 및 이를 이용한 3차원 수치 모델링이 필수적임을 알 수 있다. 그러나, 3차원 수치 모델링 시는 2차원 모델링에 비해 방대한 양의 추가 개별요소 생성이 필요하며, 이는 미시물성치 산정 등에 요구되는 반복 해석량 등을 고려할 때, 해석시간 및 효율성면에서 큰 기술적 한계로 작용하게 된다. 본 연구에서는 실내 삼축압축시험에 대한 3차원 개별요소 수치 모델링을 수행하였으며, 3차원 개별요소에 대한 효율적 수치 모델링을 위하여, 해석모델과 개별요소를 대상으로 다양한 상사조건에 대한 개별요소 수치 모델링을 수행, 그 결과를 통해 각각의 스케일 조건이 최종 해석결과에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 3차원 개별요소 수치 모델링

### 2.1 실내시험

수치 모델링에 이용된 삼축압축시험은 조립재료 중 통일분류상 SP로 분류되는 OO지역 모래를 이용하여 수행하였다. 입도분포를 살펴보면, 대부분 0.2~0.35mm 근방의 균일 입경을 보이고 있다. 상대다짐도 72~75% 조건에서 시험을 수행하였으며, 초기 상태에서의 간극률( $n$ )은 0.38 이었다.

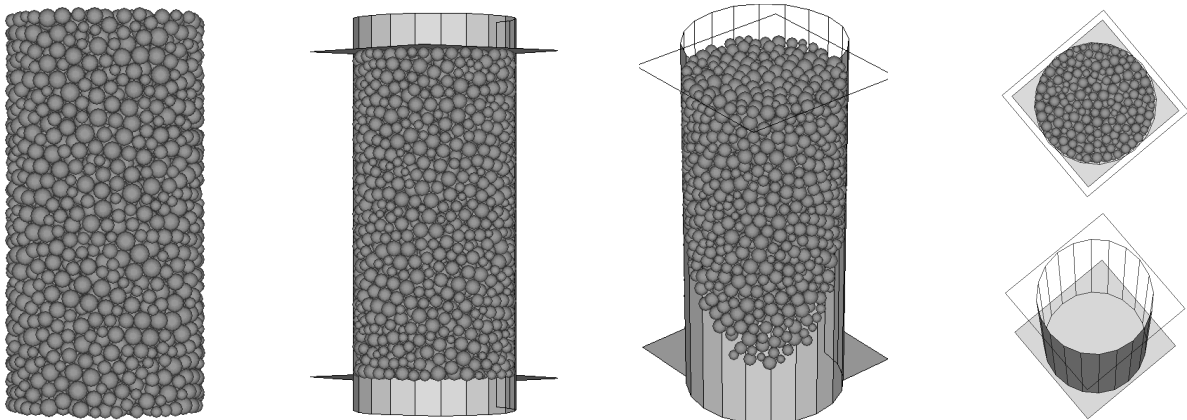


그림 1. 3차원 개별요소 및 경계면

삼축압축시험을 위한 시료 크기는 폭 70mm, 높이 140mm이며, 전단시험은 0.05MPa, 0.1MPa, 0.2MPa 구속압 조건에 대한 압밀배수 조건하에서 수행되었다. 각 구속압별 응력-변형 곡선은 그림 2와 같으며, 이를 이용한 강도 특성치는  $c = 12.0 kPa$ ,  $\phi = 36.8^\circ$ 로 나타났다. 구속압 조건별 응력-변형에 관한 시험결과를 살펴보면, 전단 시의 최대강도는 축변형률 3% 미만에서 발생했으며, 최대 축차응력 도달 후 약간의 응력연화 현상을 보이고 있다.

### 2.2 초기 개별요소 생성

본 연구에서의 3차원 개별요소 수치 모델링에 이용된 프로그램은 Particle Flow Code, PFC<sup>3D</sup>(Itasca, 2008)로서, 기존 2차원 프로그램과 그 기본개념 및 모델링 방법은 유사하나, 2차원 개별요소가 디스크 형태인데 반해 3차원 개별요소는 구(sphere)의 형태를 띠고 있다.

해석대상 시료는 0.2~0.35mm 크기범위의 균일입경 형태를 보이므로, 본 해석에서는  $D_{min} = 0.2mm$ ,  $D_{max} = 0.35mm$ 의 입경 분포구간에 대하여 균일분포 형태로 개별요소를 생성하였다. 개별요소해석에 있어 초기 개별요소의 입도분포 및 공간적 배치형태, 간극률 조건 등은 최종 해석결과에 큰 영향을 미치게 된다.

기존 2차원 개별요소 해석에서는 상대 다짐도를 이용하여 3차원 조건에 대한 2차원 조건에서의 등가 간극률( $n_{2D}$ )을 경험적으로 환산하였으나(Hainbüchner 등, 2002), 실제 3차원 및 2차원 조건에 대한 정량적 간극률 관계는 정확히 규정될 수 없는 한계가 있다. 이는 기존 2차원 개별요소 해석상의 큰 문제점으로 인식되고 있으나, 이번 연구의 3차원 개별요소 해석에서는 이러한 환산과정 없이 실제의 시료 간극률 조건에 맞는 개별요소 생성이 가능하였다.

구 형태의 3차원 개별요소들이 생성되는 공간은 그림 1에서와 같이 해석 모델의 외곽 경계면 형태에 따라 바뀌게

되는데, 본 연구에서는 실제 삼축압축 시험상의 시료 형태와 동일하게 2개의 상하부 사각형 판 경계면 및 1개의 원통 실린더형 경계면을 이용하여 전체 해석 영역을 설정하였다. 단, 하중재하에 따른 경계면 변위를 고려하여 실제 해석시료 보다 약간 큰 경계면을 생성하여 해석을 수행하였다.

### 2.3 수치 모델링 및 결과

간극률 조건 및 입도분포를 고려한 개별요소 생성결과를 이용, 조립재료에 대한 삼축압축시험 과정을 모델링하였다. 삼축압축시험 과정에 대한 기본적 모델링 방법은 기존의 2차원 모델링 방법과 동일하다.

실내 삼축압축 시험시의 시료크기는 70mm×140mm 이지만, 3차원 개별요소 입경별 생성되는 개별 요소수를 고려할 때, 실제 시료크기를 일정비율로 축소한 상사 해석 모델의 적용이 필요하다. 개별 요소의 입경이 실제 입경과 동일하고 해석 모델의 크기가 실제 시료크기의 1/5인 경우, 시험시의 초기 간극률 조건을 만족시키기 위해 필요한 개별요소 수는 245,413개로서, 이러한 조건에서는 방대한 연산시간과 컴퓨터 메모리 문제로 인해 현실적 수치 모델링이 불가능하게 된다. 본 해석에서는 3.5mm×7.0mm 크기의 최종 해석모

델을 적용하였으며, 실제 시료크기 대비 본 축소조건에 대한 적정성은 별도의 수치모델 스케일 영향검토를 통해 분석하였다. 개별요소들은 2개의 상하부 경계면 및 1개의 원통 실린더형 경계면 내에 놓이게 되며, 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 해석과정 중 일정한 구속압 조건을 유지시키기 위하여, 측부 경계면은 반력과 경계면 속도(wall velocity)의 자동조절을 반복해가는 servo-mechanism을 적용하였으며, 구속압 조건은 실내시험 시와 동일하게 적용하였다.

구속압 0.1MPa에 대한 실내시험 상의 응력-변형 곡선을 모사하는 개별요소 해석을 수행하였으며, 반복 시행착오 과정을 통해 최종 미시 물성치를 산정하였다. 미시 물성치를 포함한 모든 해석조건을 동일하게 하되, 구속압 조건을 0.05MPa, 0.2MPa로 달리한 개별요소 해석을 추가적으로 수행하였으며, 이 결과를 각 구속압 조건에 대한 실내시험 상의 응력-변형 곡선과 다시 비교하였다.

그림 2는 각 구속압 조건별 실내시험 및 개별요소해석 결

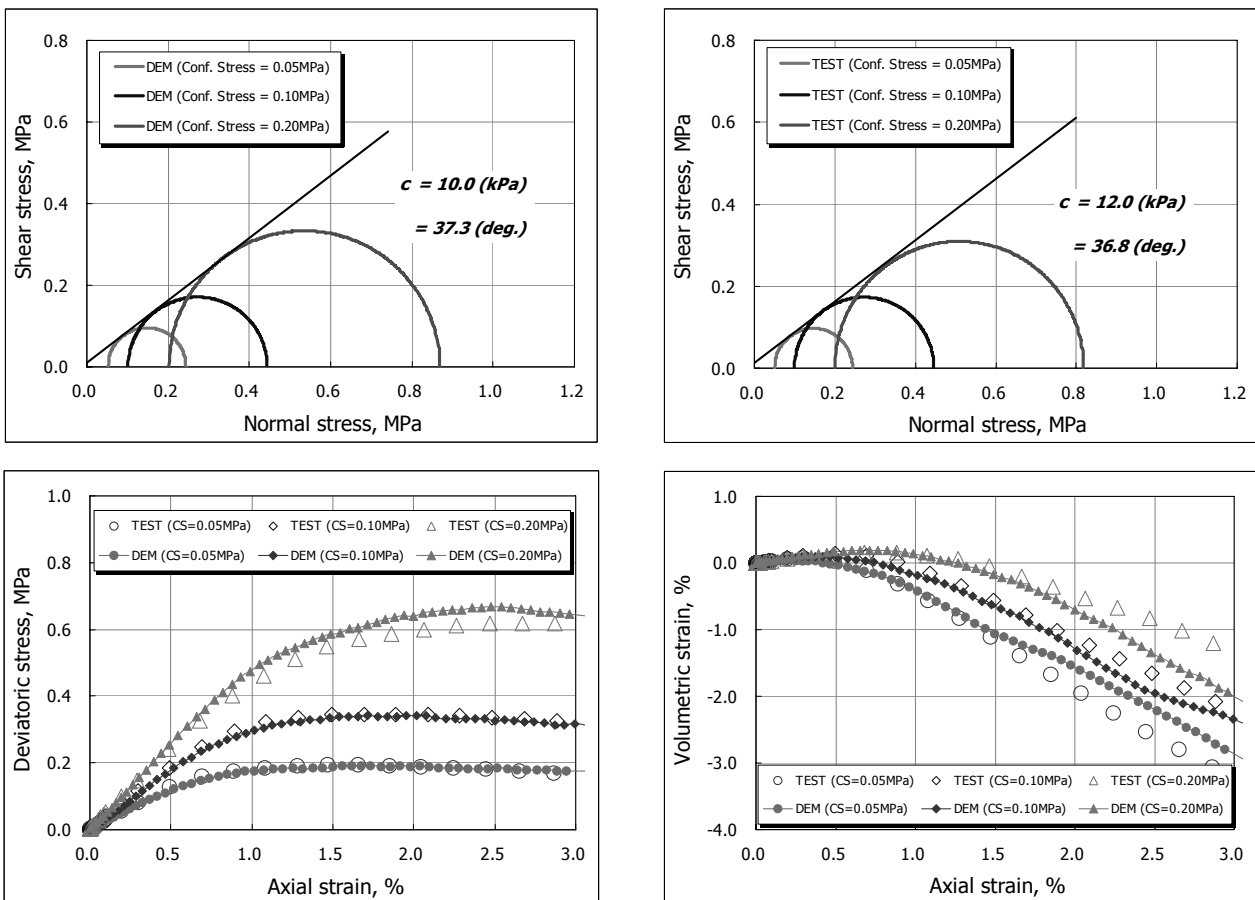


그림 2. 실내시험과 개별요소 해석을 통한 응력-변형 거동 및 강도 특성치 비교

과를 나타낸 것으로서, 특정 구속압조건에 미시 물성치를 이용한 타 응력조건에 개별요소해석 결과는 응력-변형 곡선 및 체적 변화량에 있어 실내시험과 매우 유사함을 알 수 있다. 기존 2차원 개별요소 수치 모델링의 경우, 체적 변화량을 적절하게 예측하는 것은 2차원 개별요소 모델링의 기하 조건으로 인해 매우 어려운 과정이었으나, 본 연구에서 보듯이 3차원 수치 모델링에서는 실제 시험결과와 매우 유사한 예측이 가능함을 알 수 있다.

구속압이 커지는 경우에 있어서는 초기 탄성계수가 실제보다 다소 크게 예측되었으며, 이로 인해 최대 축차응력과 체적감소량이 소폭 증가하는 결과를 확인할 수 있었으나, 실내시험에 대한 오차 등을 고려할 때, 전체적인 예측 정확도는 매우 높은 것을 알 수 있다.

각 구속압별 응력-변형 결과를 이용한 강도 특성치 산정결과를 비교할 때, 실제 시험 시의  $c = 12.0 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 36.8^\circ$ 에 대해, 개별요소 수치 모델링을 통한 강도 특성치는  $c = 10.0 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 37.3^\circ$ 로서 실내시험 결과와 매우 유사함을 알 수 있다.

### 3. 수치모델 스케일 영향

3차원 개별요소 해석의 경우, 해석요소 입경 대비 해석모델의 크기가 커짐에 따라 생성되는 개별요소수가 급격히 증가하게 되며 이는 해석 소요시간의 급격한 증가를 수반하게 된다. 그러므로 수치모델 크기 및 개별요소 입경 등을 실제에 비해 적정 비율로 축소 또는 확대시키는 것이 수치모델링의 효율성 확보차원에서 필요하게 되며, 대부분의 모델링 시 이러한 방법이 사용된다. Hainbüchner 등(2002)은 직접 전단시험에 대한 2차원 개별요소 수치 모델링을 수행하는데 있어, 개별요소 직경을 실제 흡입자 직경 대비 20~40배 확대시킨 후 적용하였다. 이완호 등(2007)은 댐 코어재료의 침투그라우팅 효과를 분석하는데 있어, 흡입자와 그라우팅 입자의 직경비를 0.05~0.25로 모델링하기 위하여, 흡입자의 평균 직경을 2.46cm로 확대하였으며, 직경 30cm, 높이 60cm의 원통형 해석 경계면 내에 총 229개의 개별요소를 생성하여 수치 모델링을 수행하였다. 조남각 등(2008)은 0.5m(L)×0.25m(H)×0.5m(W) 크기의 대형 직접전단시험을 모델링하는데 있어, 해석 효율성을 위해 모델 크기를 절반으로 줄인 상태에서 2차원 해석을 수행하였다. 이렇듯 기존의 2차원 개별요소 수치 모델링에 있어서도 컴퓨터 메모리 한계 및 해석 효율성 측면에서 개별요소와 해석영역에 대한 스케일을 변화시켜가며 수치 모델링을 수행하고 있으며, 본 연구에서와 같은 3차원 개별요소 수치 모델링에서는 동일 해석영역에 생성되는 개별요소의 수가 2차원에 비해 월등히 많은 관계로 이

러한 스케일 변화방법은 반드시 필요하게 된다. 본 연구에서는 가장 일반적인 수치모델 스케일 변화방법에 대하여, 각 조건별 수치 모델링을 수행하여 각 경우에 대한 응력-변형 거동 및 강도/변형 특성치 산정결과를 분석하였으며, 최종적으로 이러한 스케일 변화가 최종 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 스케일 변화는 실제 시료와 해석모델의 비율 변화, 실제 시료와 해석모델간 동일 비율 조건에서의 개별요소 입경 변화, 이 두 가지의 동시 변화 조건 등을 적용하였다.

#### 3.1 해석모델 스케일 변화

실제 실내시험 시의 시료크기(70mm×140mm)에 대하여 개별요소 수치모델의 크기를 변화시켜가며 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링을 각 구속압 조건별로 수행하였다. 실제 시료와 수치모델의 직경비( $RD_{spe/mod}$ )를 5.0~40.0까지 변화시키되, 개별요소는 모든 경우에 있어 최대입경  $D_{gmax} = 0.35 \text{ mm}$ , 최소입경  $D_{gmin} = 0.2 \text{ mm}$ 의 동일 크기로 생성하였으며, 수치모델의 높이는 직경의 2배로 하였다. 즉, 동일한 입경조건에 대해 해석모델의 크기를 축소시켜가며 수치 모델링을 수행하였으며, 구체적 해석조건은 표 1과 같다.

$RD_{spe/mod} = 5.0$  일 때, 개별요소의 최대 입경은 해석모델 직경의 1/40( $D_{mod}/D_{gmax} = 40$ )이었으나, 해석모델의 크기를  $RD_{spe/mod} = 40.0$ 로 감소시킴에 따라 그 직경비는 1/5( $D_{mod}/D_{gmax} = 5$ )로 변화하게 된다. 미국재료시험학회 기준 (ASTM D 2850)에서는 실내 삼축압축시험 시 시료의 최대 입경을 공시체의 1/6 이하로 규정하고 있으며, 일본 지반공학회 기준(JGS 0542)에서는 1/10 이하를 표준으로 하고 있다.

해석모델의 크기가 증가함에 따라 동일 초기 간극률 조

표 1. 수치모델 스케일 변화에 대한 해석조건

Run Name	RD	Numerical model (mm)		Particle generation		$D_{mod} / D_{gmax}$
	$spe/mod$	(D)	(H)	$D_{gmin}$ (mm)	$D_{gmax}$ (mm)	
cn-sc-1	5.0	14.0	28.00	0.20	0.35	40.000
cn-sc-2	7.5	9.33	18.67	0.20	0.35	26.667
cn-sc-3	10.0	7.00	14.00	0.20	0.35	20.000
cn-sc-4	12.5	5.60	11.20	0.20	0.35	16.000
cn-sc-5	15.0	4.67	9.33	0.20	0.35	13.333
cn-sc-6	17.5	4.00	8.00	0.20	0.35	11.429
cn-sc-7	20.0	3.50	7.00	0.20	0.35	10.000
cn-sc-8	22.5	3.11	6.22	0.20	0.35	8.889
cn-sc-9	25.0	2.80	5.60	0.20	0.35	8.000
cn-sc-10	27.5	2.55	5.09	0.20	0.35	7.273
cn-sc-11	30.0	2.33	4.67	0.20	0.35	6.667
cn-sc-12	40.0	1.75	3.50	0.20	0.35	5.000

건  $n=0.38$ 을 만족시키기 위한 개별요소수는 급격하게 증가하게 된다. 그림 3은 해석모델의 크기에 따른 소요 개별요소수를 나타낸 것으로서,  $RD_{spe/mod} = 40$  조건에서 요구되는 개별요소수는 400개이며  $RD_{spe/mod} = 15$  부근에서 9,108개까지 증가한다.  $RD_{spe/mod} = 5.0$ 에서는 245,413개의 개별요소수가 필요하게 되는데 이러한 경우는 현실적으로 수치 모델링이 불가능하게 되며,  $RD_{spe/mod} < 10$ 에서는 급격한 개별요소수의 증가를 확인할 수 있는 바, 적정 해석모델의 크기 설정은 해석 효율성 확보차원에서 매우 중요함을 알 수 있다.

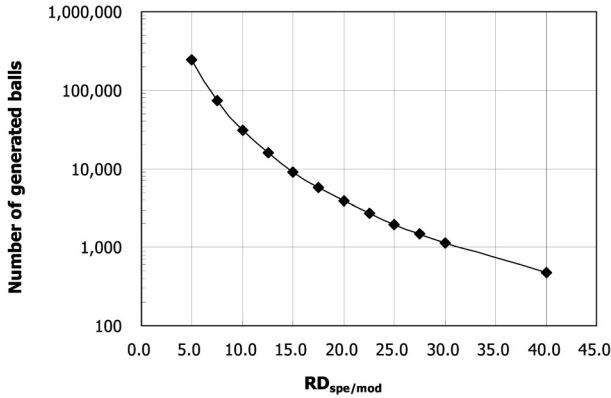


그림 3. 해석모델의 크기에 따른 소요 개별요소 수

해석모델의 크기를 변화시켜감에 따라  $D_{mod}/D_{gmax}$  값이 변화하게 된다.  $D_{mod}/D_{gmax}$  값이 커지면, 제한된 해석모델 크기 대비 개별요소의 크기가 커짐에 따라 해석요소수는 감소하고, 해석시간도 크게 단축되는 장점이 있으나, 개별요소의 크기가 어느 이상 커지게 되면 경계조건의 영향으로 인해 각 개별요소간 접촉면 거동이 전체적 거동을 표현하지 못하는 문제점이 발생할 수 있다. 그림 4는 각 해석모델의 스케일 조건에 대하여, 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링 결과를 나타낸 것으로서, 해석모델 직경과 개별요소의 최대 입경 비율( $D_{mod}/D_{gmax}$ )을 기준으로 응력-변형 곡선 및 탄성계수, 최대 축차응력, 최종 강도정수 등을 비교하였다.  $D_{mod}/D_{gmax}$  값에 따른 응력-변형 곡선을 살펴보면,  $D_{mod}/D_{gmax}$  이 증가할수록 탄성계수가 증가하는 것을 알 수 있으나,  $D_{mod}/D_{gmax} > 15$  에서는 일정한 탄성계수 결과를 보이고 있으며, 각 구속압 조건에서의 최대 축차응력 값도  $D_{mod}/D_{gmax} > 10$  에서는 모두 일정한 경향을 나타내고 있다. 수치 시험실로서의 개별요소 방법을 활용하는데 있어 가장 중요한 최종 강도정수 결과를 살펴보면,  $D_{mod}/D_{gmax} > 10$  조건에서는 내부마찰각과 점착력 등이 모두 일정한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 결론적으로, 개별요소 입경의 크기를

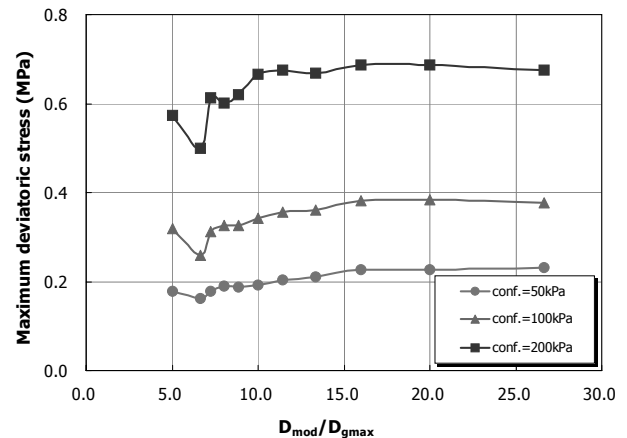
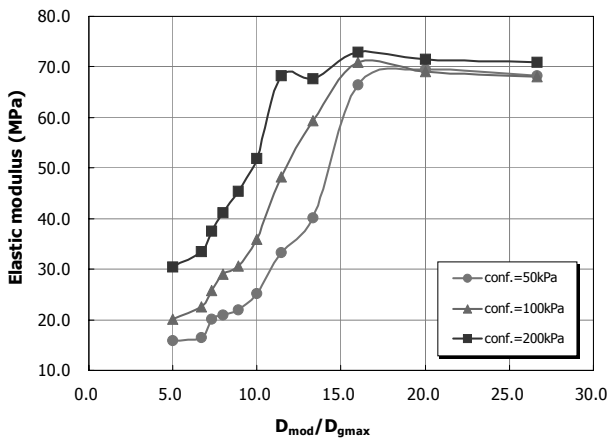
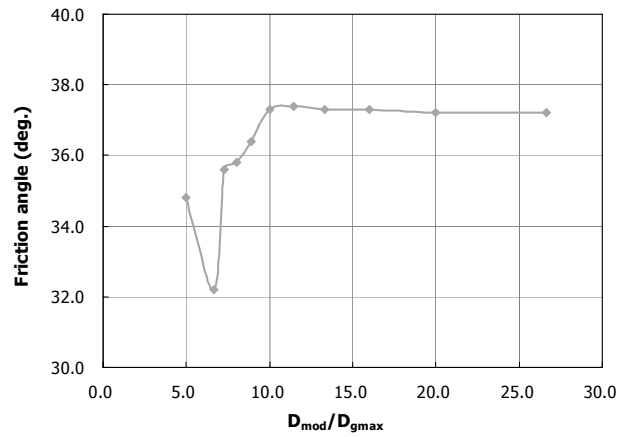
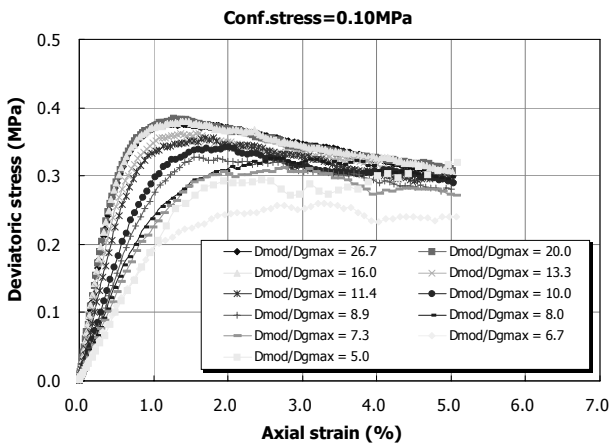


그림 4. 해석모델 스케일 조건별 개별요소 수치 모델링 결과

표 2. 개별요소 스케일 변화에 대한 수치모델 조건

Case	RD	Particle generation in PFC				$D_{mod} / D_{gmax}$
	$spe/mod$	$D_{gmin}$ (mm)	$D_{gmax}$ (mm)	$D_{avg}$ (mm)	$D_{gmax} / D_{gmin}$	
cn-gd-1	20.0	0.275	0.275	0.2750	1.000	12.727
cn-gd-2	20.0	0.250	0.300	0.2750	1.200	11.667
cn-gd-3	20.0	0.225	0.325	0.2750	1.444	10.769
cn-gd-4	20.0	0.200	0.350	0.2750	1.750	10.000
cn-gd-5	20.0	0.175	0.375	0.2750	2.143	9.333
cn-gd-6	20.0	0.150	0.400	0.2750	2.667	8.750
cn-gd-7	20.0	0.125	0.425	0.2750	3.400	8.235
cn-gd-8	20.0	0.100	0.450	0.2750	4.500	7.778
cn-gd-9	20.0	0.085	0.465	0.2750	5.471	7.527
cn-gd-10	20.0	0.075	0.475	0.2750	6.333	7.368

동일하게 유지한 채, 해석모델의 크기를 줄여가게 되면 소요 개별요소수가 급격히 감소하므로 수치 모델링상의 연산량은 크게 감소하게 된다. 그러나, 이런 경우 해석모델 직경과 개별 요소의 최대 입경에 대한 크기비가 점차 감소하게 되며,  $D_{mod}/D_{gmax} < 15$  조건에서는 탄성계수에 대한 예측오차가 발생할 수 있고,  $D_{mod}/D_{gmax} < 10$  조건에서는 점착력 및 내부마찰각의 강도정수 예측오차가 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

### 3.2 개별요소 스케일 변화

직경 3.5mm, 높이 7.0mm 크기의 수치모델을 대상으로 실제 시료와 수치모델의 직경비  $RD_{spe/mod} = 20$ 을 동일하게 적

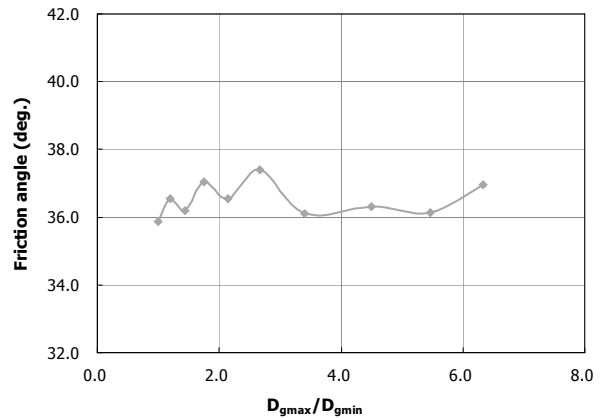
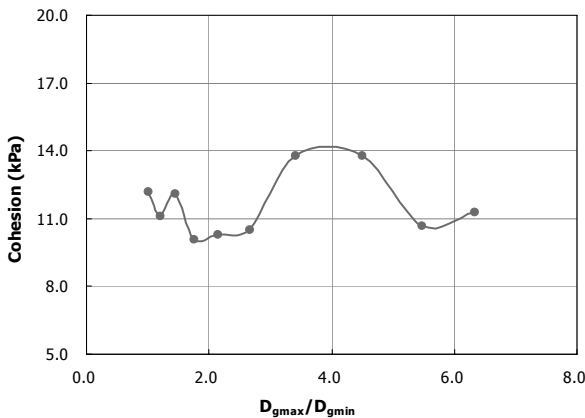
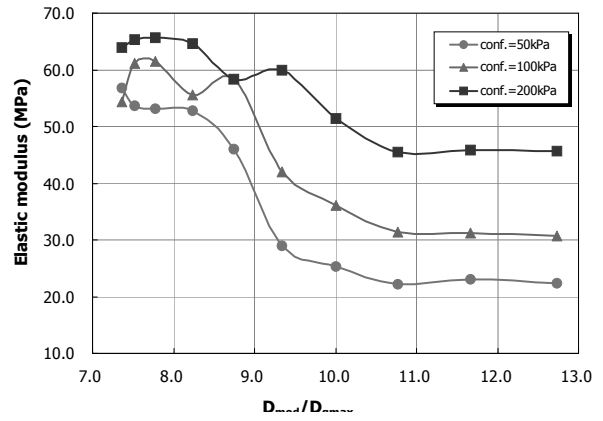
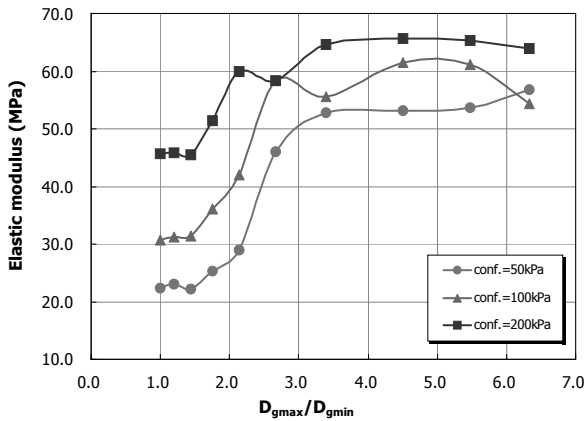
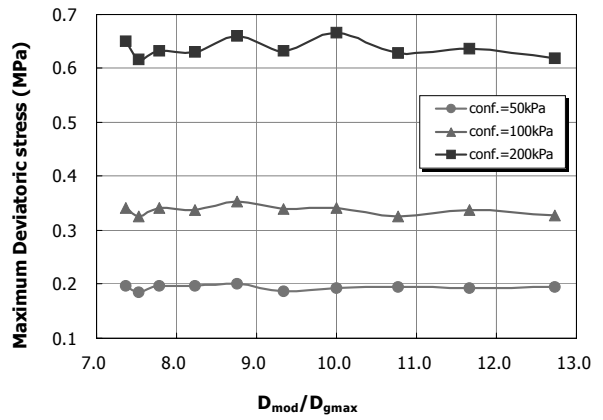
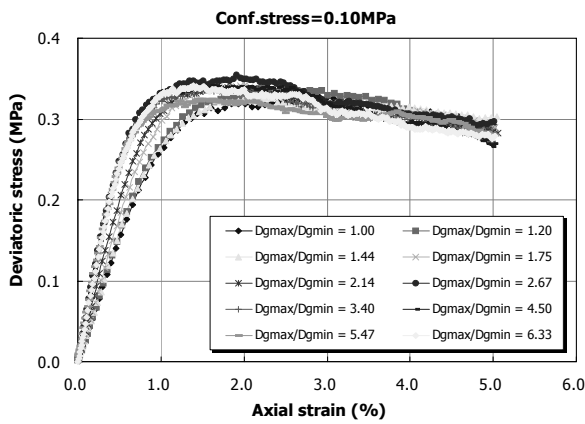


그림 5. 개별요소 스케일 조건별 수치 모델링 결과

용하되, 개별요소의 최대입경( $D_{gmax}$ ) 및 최소입경( $D_{gmin}$ )의 범위를 변화시켜가며 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링을 각 구속압별로 수행하였다. 모든 경우에 있어, 개별요소의 평균입경은  $D_{avg} = 0.275mm$ 로 동일하지만, 표 2에서 보는 바와 같이 최대 및 최소 입경의 비는 1.0~6.33으로 변화시켜가며 수치 모델링을 수행하였으며, 이때 수치 모델 직경과 개별요소 최대 입경의 비는 12.73에서 7.37까지 변화하였다.

그림 5는 각 해석모델의 스케일 조건에 대하여, 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링 결과를 나타낸 것으로서, 수치모델 스케일 변화 분석 시와 동일하게 해석모델 직경과 개별요소의 최대 입경 비율( $D_{mod}/D_{gmax}$ )을 기준으로 응력-변형 곡선 및 탄성계수, 최대 축차응력, 최종 강도정수 등을 비교하였다.  $D_{gmax}/D_{gmin}$  값에 따른 응력-변형 곡선을 살펴보면, 개별요소의 최대 및 최소 입경비가 커질수록 탄성계수는 증가하는 경향을 나타내고 있으나,  $D_{gmax}/D_{gmin} = 1.5 \sim 2.5$  범위를 중심으로 소폭 감소 또는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 그 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 또한  $D_{mod}/D_{gmax}$ 의 변화에 따른 탄성계수 값을 살펴보면,  $D_{mod}/D_{gmax} > 10$  조건에서는 탄성계수가 거의 유사한 경향을 나타내고 있으며, 이는 수치모델 스케일 변화조건에서의 분석 결과와 일치함을 알 수 있다.

각 조건별 응력-변형 곡선 상의 최대 축차응력 및 점착력, 내부마찰각 등의 강도정수 값은  $D_{mod}/D_{gmax}$  및  $D_{gmax}/D_{gmin}$ 의 변화에 관계없이 거의 일정한 경향을 보이고 있다.

결론적으로, 실제 시료와 수치모델의 직경비( $RD_{spe/mod}$ )가 일정 값 이상을 만족하는 조건 하에서, 개별요소의 최대/최소 입경비가 1.5 이상이 된다면, 전체적인 응력-변형 거동 예측결과는 유사하게 나타나며, 최대 축차응력 및 점착력, 내부마찰각 등의 강도정수 값은 개별요소의 최대/최소 입경비에 관계없이 유사하게 나타남을 알 수 있다.

### 3.3 해석모델 및 개별요소 동시 스케일 변화

해석모델 스케일 변화에 대한 수치 모델링에서는 실제 시료와 수치모델의 직경비( $RD_{spe/mod}$ )를 변화시키되, 개별요소는 모든 경우에 있어 최대입경  $D_{gmax} = 0.35mm$ , 최소입경  $D_{gmin} = 0.2mm$ 의 동일 크기로 생성하였다. 즉, 개별요소의 입경 조건은 동일한 반면, 수치 모델의 크기를 변화시킨 모델링 조건이었다.

이와 유사하게 실제 시료와 수치모델의 직경비( $RD_{spe/mod}$ )를 20부터 3까지 감소시켜 가되, 수치 모델의 크기가 커지는 비율만큼 개별요소의 입경을 확대한 조건에서 수치 모델

링을 수행하였다. 즉,  $RD_{spe/mod} = 20$ 에서  $RD_{spe/mod} = 3$ 까지 수치 모델의 크기를 증가시키되,  $RD_{spe/mod} = 20$  조건 대비 수치 모델의 크기가 증가된 비율만큼 개별요소의 최소 및 최대 입경 크기를 증가시켰다. 그러므로, 모든 수치 모델링 조건에서  $D_{mod}/D_{gmax} = 10.0$ ,  $D_{gmax}/D_{gmin} = 1.75$ 은 동일하게 적용되었으며, 생성된 개별요소수도 3,822~3,859개로 모든 조건에서 유사하다. 이는 개별요소법 적용방법 중, 실제 해석대상과 재료조건을 동일 비율로 축소시켜 수치 모델링을 수행하는 기법에 해당한다.

그림 6은 각 조건별 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링 결과를 나타낸 것으로서, 실제 시료 및 해석모델의 직경비( $RD_{spe/mod}$ )를 기준으로 응력-변형 곡선 및 탄성계수, 최대 축차응력, 최종 강도정수 등을 비교하였다.  $RD_{spe/mod} = 20$ 에서 10까지 작아지는 경우, 즉 수치모델의 크기가 제일 작은 경우에서  $RD_{spe/mod} = 10$  정도 크기까지 커짐에 따른 응력-변형 곡선을 살펴보면,  $RD_{spe/mod}$  값에 관계없이 유사한 모두 응력-변형 곡선을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 유사한 탄성계수와 최대 축차응력 및 응력연화 구간의 거동도 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나, 수치모델과 개별요소의 크기가 그 이상 커짐에 따른 응력-변형 곡선을 살펴보면,  $RD_{spe/mod}$  값이 감소함에 따라 탄성계수는 소폭 감소하였지만, 최대 축차응력은 유사한 경향을 나타내었고 최대 축차응력이 발생하는 변형률은 증가하였다. 즉, 수치모델과 개별요소를 동시에 동일 비율로 확대 혹은 축소시킴에 따라 최종적으로는 약간 상이한 응력-변형 거동 결과가 나타났다. PFC에서는 개별요소 각각에 원하는 응력을 직접 재하할 수 없으며, 구속압 및 축응력 등은 각 측면의 경계면을 일정 속도로 이동시킨 후, 그 과정에서 각 개별요소가 경계면에 가하는 응력을 구하고 이들을 전부 합하여 산정한 총 하중값을 다시 경계면 면적으로 나누어 주는 과정을 통해 최종적인 재하단계별 응력을 구하게 된다.

수치 모델과 개별요소의 크기가 동일 비율로 증가된 경우, 경계면을 통해 산정한 응력값이 유사하더라도 경계면과 특정 개별요소간의 접촉응력은 증가하게 되며, 각 개별요소간 접촉응력도 증가하게 된다. 이로 인해 동일 경계면 응력 조건하에서도  $RD_{spe/mod}$  값이 감소함에 따라 실제 개별요소간 접촉응력은 증가하게 되고, 이로 인해 더 큰 변형을 수반하게 되며, 최대 축차응력이 발생하는 변형률도 증가하는 것으로 판단된다.

그러나, 각 조건별 수치 모델링 결과를 통해 산정된 점착력, 내부마찰각 등의 강도정수 값은  $RD_{spe/mod}$  값에 관계없이 유사한 결과를 보이고 있으며, 이는 해석모델과 개별요소의 크기를 동일 비율로 변화시키는 개별요소방법이 수치

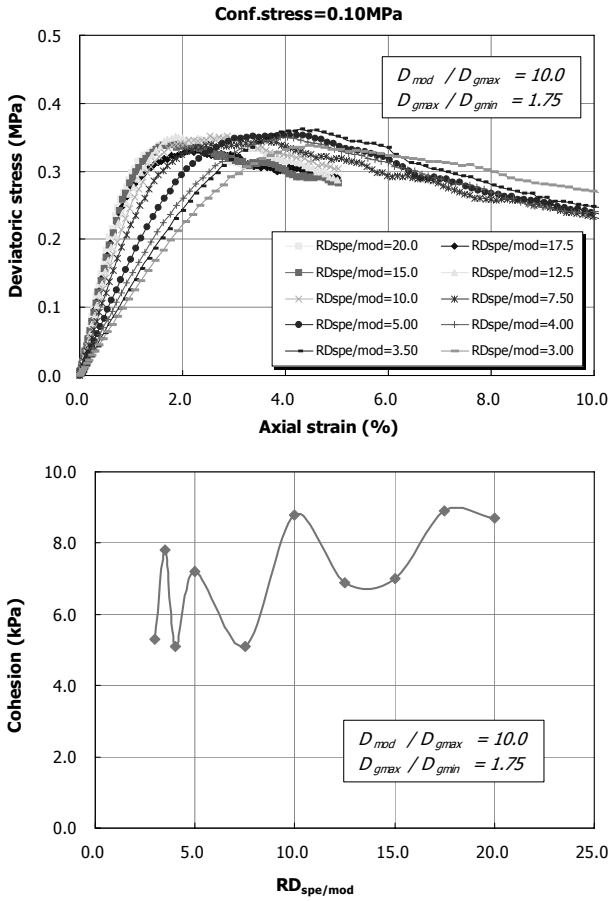


그림 6. 해석모델 및 개별요소의 동일 스케일 조건별 수치 모델링 결과

시험실 기법을 이용한 강도정수 산정에 효과적으로 적용될 수 있음을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3차원 개별요소해석 코드인 PFC<sup>3D</sup>(Itasca)를 이용, 조립재료의 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링을 수행하였으며, 해석모델과 개별요소를 대상으로 다양한 상사조건에 대한 개별요소 수치 모델링을 수행, 그 결과를 통해 각각의 스케일 조건이 최종 수치 모델링 결과에 미치는 영향을 분석하였다.

3차원 개별요소 수치 모델링에서는, 기존 2차원의 경우와 달리, 별도의 간극을 환산없이 실제 시료상태를 반영한 초기조건 구현이 가능했으며, 응력-변형 거동 및 점착력, 내부 마찰각 등의 강도정수에 있어 실내시험 결과와 유사한 수치해석적 예측이 가능하였다. 특히 체적 변화량에 대한 예측결과가 실제 시험결과와 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 단, 3차원 수치 모델링 시 요구되는 많은 수의 개별요소를 고려할 때, 해석효율 및 정확성을 확보할 수 있는 별도의

수치모델 스케일 영향 검토가 필요함을 알 수 있었다.

개별요소 입경의 크기를 동일하게 유지한 채, 해석모델의 크기를 줄여가게 되면 소요 개별요소 수가 급격히 감소하므로 수치 모델링상의 연산량은 크게 감소하게 된다. 그러나, 이런 경우 해석모델 직경과 개별요소의 최대 입경에 대한 크기비( $D_{mod}/D_{gmax}$ )가 점차 감소하게 되며,  $D_{mod}/D_{gmax} < 15$  조건에서는 탄성계수에 대한 예측오차가 발생할 수 있고,  $D_{mod}/D_{gmax} < 10$  조건에서는 점착력 및 내부마찰각의 강도정수 예측오차가 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

실제 시료와 수치모델의 직경비( $RD_{spe/mod}$ )를 동일하게 적용하되, 개별요소의 최대입경( $D_{gmax}$ ) 및 최소입경( $D_{gmin}$ )의 범위를 변화시켜가며 실내 삼축압축시험에 대한 수치 모델링을 수행한 결과, 개별요소의 최대/최소 입경비가 1.5 이상이 된다면, 전체적인 응력-변형 거동 예측결과는 유사하게 나타나며, 최대 축자응력 및 점착력, 내부마찰각 등의 강도정수 값은 개별요소의 최대/최소 입경비에 관계없이 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

수치 모델과 개별요소의 크기를 동일 비율로 변화시킨 경우,  $RD_{spe/mod}$  값이 감소함에 따라 각 조건별 응력-변형 거동에는 차이가 발생하였으나, 점착력, 내부마찰각 등의



강도정수 값은  $RD_{spe/mod}$  값에 관계없이 유사한 결과를 보이고 있으며, 이를 통해 해석모델과 개별요소의 크기를 동일 비율로 변화시키는 개별요소방법이 수치시험실 기법을 이용한 강도정수 산정에 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F05)의 지원을 받아 수행되고 있으며, 관계자 분들께 감사 드립니다.

## 참고 문헌

1. 구자갑, 전제성(2007), 지반공학적 특성파악을 위한 개별요소법의 적용성, *대한토목학회논문집*, Vol. 27, No. 1C, pp. 61~68.
2. 박의섭, 류창하(2005), PFC2D를 이용한 절리암반의역학적 물성 평가연구, *터널과 지하공간*, Vol. 15, No. 2, pp. 119~128.
3. 이완호, 임희대(2007), PFC를 이용한 침투그라우팅 시 미세입자의 이동 및 전단강도증가 해석, *한국지반공학학회논문집*, Vol. 23, No. 11, pp. 49~58.
4. 전제성, 김기영(2008), 지반내 입자거동 및 흐름을 고려한 수압작용 모델링, *한국지반공학학회논문집*, Vol. 24, No. 2, pp. 67~75.
5. 전제성, 김기영, 신동훈(2006), 개별요소법에 의한 락필재료의 대형삼축압축시험 모델링, *한국지반공학학회논문집*, Vol. 22, No. 10, pp. 111~120.
6. 조남각, 유충식, 이대영(2008), 개별요소법을 이용한 쇄석재료의 직접전단시험 모델링, *한국지반공학학회논문집*, Vol. 24, No. 1, pp. 15~23.
7. 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.
8. Cundall, P.A.(2001), A Discontinuous Future for Numerical Modelling in Geomechanics, *Proc. of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, Vol. 149, No. 1, pp. 41~48.
9. Cundall, P.A., and Strack, O.D.L.(1979), A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47~65.
10. 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.
11. Itasca Consulting Group, Inc.(2008), *Fish in PFC3D*, Minneapolis, Minnesota, pp. 3-1~3-88.
12. Kawaguchi, T., Tanata, T. and Tsuji, Y.(1992), Numerical Simulation of Fluidized Bed Using the Discrete Element Method, *Jpn. Soc. Mech. Eng*, Vol. 58, No. 551, pp. 79~85.
13. 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.
14. Shimizu, Y.(2004), Fluid coupling in PFC<sup>2D</sup> and PFC<sup>3D</sup>, *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods - 2004*, Y. Shimizu, R.D. Hart and P.A. Cundall, eds. A. Balkema, Lisse, pp. 3~12.
15. Staffield, A.E, and P.A., Cundall(1988), Towards a Methodology for Rock Mechanics Modeling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abst.*, Vol. 25, No. 3, pp. 99~106.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

(접수일: 2011. 4. 11 심사일: 2011. 5. 12 심사완료일: 2011. 6. 13)