

이차원 개별요소 수치해석을 통한 화강풍화토의 평균입자크기와 전단강도의 관계 규명

Examination of the Relationship between Average Particle Size and Shear Strength of Granite-derived Weathered Soils through 2-D Distinct-element Method

김 선 옥¹ Kim, Seon-Uk

임 희 대² Lim, Heui-Dae

Abstract

We have carried out a series of numerical experiments to study the effect of average particle size on the mechanical properties of granite-derived weathered soils. A distinct-element method was adopted to study the changes in macro-scale mechanical properties with particle size and maximum-to-minimum particle size ratio. The numerical soil specimen with cohesion values of 0.25 MPa and internal friction angle of 29 degrees was prepared for reference. While keeping the porosity values constant, we varied particle size and size distribution to study how cohesion and internal friction angle changes. The experimental results show that the values of cohesion apparently decrease with increasing particle size. Changes in the values of internal friction angles are small, but there is a trend of increase in internal friction angle as the average particle size increases. This study demonstrates a possibility that the results of numerical experiments of this type may be used for rapid estimation of mechanical properties of granite-derived weathered soils. For example, when mechanical properties obtained through in situ tests and particle size data obtained through lab analysis are available for a site, it is expected that the mechanical properties of weathered granite soils with varying degrees of weathering (thus, varying particle size) may be estimated rapidly only with particle size data for that site.

요 지

본 연구에서는 개별요소법을 적용하여 화강암 기원의 풍화토에서 입자 크기와 입자크기 분포 특성 중 최대입경/최소입경의 비가 강도정수에 미치는 영향을 살펴보았다. 입자크기와 입도분포가 변화할 때의 전단강도 특성 변화를 규명하기 위하여 개별요소법 수치해석을 실시하였다. 점착력이 0.25MPa, 내부마찰각이 29°인 강도특성을 갖는 기준시료를 수치해석적으로 구현한 후, 간극률을 기준시료와 동일하게 유지하면서 입자의 크기와 입도분포를 바꾸어 가며 점착력과 내부마찰각의 변화를 살펴보았다. 수치해석결과 평균입자의 크기가 커질수록 점착력의 현저한 감소가 관찰되었으며, 내부마찰각의 변화는 미미하지만 증가하는 경향을 보였다. 이러한 연구결과는 입도만을 이용하여 간편하게 화강풍화토의 강도정수 산정 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 특히 풍화상태가 점이적으로 변화하는 화강풍화토의 경우, 현장시험과 실내시험을 통하여 일부 구간에서 측정된 입도-강도 자료가 있을 때, 이러한 시험들이 수행되지 않은 구간에 대해서도 입도분포를 통해 간편하게 강도특성을 규명할 수 있을 것으로 여겨진다.

Keywords : Numerical analysis, Distinct-element method, Particle size, Size distribution, Mechanical properties of weathered soil

1 정희원, 한국수자원공사 기술관리실 기술심사팀장 (Head Manager, Dept. of Construction Technical Knowledge Management, Korea Water Resources Corporation, Tel: +82-42-629-3361, Fax: +82-42-629-3399, kimsy@kwater.or.kr, 교신저자)

2 정희원, 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil Engineering, Chungnam National Univ., hdlm@cnu.ac.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

우리나라에는 대보조선운동시기에 관입한 유라기 대보화강암과 불국사화강암으로 알려진 백악기 화강암이 흔히 나타난다(Geological Society of Korea, 1999). 이러한 이유로 일반 토목 시공현장에서도 기반암이 화강암인 경우와 화강암기원의 풍화암 및 풍화토를 흔히 접하게 된다. 이 중 화강암 기원의 풍화암 및 풍화토의 공학적 특징은 화강암의 풍화작용과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Kim, 2002). 화강암 풍화 시 일어나는 조암광물의 변화는 흑운모나 장석류의 경우 점토광물로, 석영의 경우에는 주로 기계적 풍화작용에 의해 입도가 작은 석영으로 변화한다(Kim, 2002). 즉, 화강암이 풍화될 때 광물학적 변화(mineralogical changes)와 입도가 작아지는 조직적 변화(textural changes)가 동시에 일어나며, 풍화산물인 화강풍화토나 풍화암의 경우, 상대적으로 조립인 석영과 세립의 점토광물로 재구성되게 된다.

우리나라에 널리 분포되어 있는 화강풍화토는 통일분류법상 SM, SC, SW-SC 및 SP-SC 등으로 사질토와 점성토의 양쪽 성질을 모두 가지고 있다. 일반적으로 사질토 특성이 더 많게 나타나고 입도 분포와 풍화의 정도에 따라서 모래, 실트 및 점토 등 폭넓게 존재하나 지표면 부근의 풍화대에서는 점토질 토사인 CL 및 ML 등으로 존재한다. 이러한 화강풍화토의 입도분포는 토질의 구분뿐만 아니라 역학적 특성에 영향을 주게 된다. 예를 들어 세립분 함유량이 낮은 사질토의 경우 점착력은 낮게, 내부마찰각은 높게 나타나며 세립분 함유량이 높은 점성토의 경우 점착력은 높게, 내부마찰각은 낮게 나타난다(Kim, 1983; Lambe, 2001). 이와 같이 잘 알려진 사실을 수치해석적으로 검증할 수 있다면 간단한 토성시험만으로도 화강풍화토의 전단강도 예측이 가능하게 되며, 이를 현장에 적용할 경우 실무에 상당한 도움이 될 수 있을 것으로 판단되어 그 가능성을 살펴보기 위해 본 연구를 수행하게 되었다. 흙의 강도에 영향을 주는 인자들의 종류는 여러 가지가 있지만(예, 간극수압), 미시역학적 거동에 영향을 주는 입자와 직접 관련이 있는 요소들은 입자의 크기, 입자크기의 분포 특성 외에 입자의 형상(shape), 입자 표면의 거칠기(roughness) 등이 있다(예, Santamarina and Cho, 2004). 이러한 이유로 흙 강도의 변화 요소를 설명하고자 할 때, 단순히 입자크기와 크기 분포만을 고려함은 바람직하지 않으나, 화강풍

화토의 경우 모암인 화강암들간의 조암광물과 결정크기가 많은 차이가 없기 때문에 입자크기외의 모양, 표면 거칠기등의 요소들이 많은 차이를 보이지 않을 것으로 판단하고, 본 연구에서는 입자크기에 의한 강도변화에 초점을 맞추었다. 이 연구에서 규명하고자 한 미시역학적 물성의 변화에 따른 거시물성의 변화양상 파악과 유사한 연구들이 다양한 분야에서 수행되어 왔다. Evans 등(2009)은 분급이 양호하고 평균입자 크기가 다른 두 수치시료에 대하여 2차원 해석을 수행하여 전단강도를 비교한 바 있으며, Morgan(1999)은 입자간의 마찰계수와 입도분포를 변화시키면서 입상체에서의 전단대 발달을 연구한 바 있다. 이외에 개별요소법을 이용, 지구물질(geomaterial)의 강도 특성 파악에 대한 선행 연구 예를 들면, 절리면의 밀집과 방향성의 암반강도에 대한 효과 연구(Park et al., 2004), 해석을 포함하는 지반에서의 해석함량에 따른 강도 변화 연구(Yoo and Park, 2008), 마그마에서의 결정화 정도 및 정향배열에 의한 강도 변화 연구(Park et al., 2008), 토사 입자의 밀도, 강성, 시멘트 물질 강성의 토사 강도에 미치는 영향에 대한 연구(Narayanasamy, 2004) 등이 있다.

현장에서의 불교란 시료 채취가 곤란한 화강풍화토의 경우, 공내전단시험을 수행하여 원지반의 전단강도를 측정하게 되는데, 공내전단시험은 실내시험에 비하여 현장 여건에 따른 오차 등으로 정밀한 데이터의 획득이 어려운 경우가 있다. 이 연구의 의도대로 입도분포와 전단강도의 상관성이 수치해석적으로 규명이 된다면, 간편한 실내시험인 입도분포시험만으로도 신뢰성있는 전단강도의 추정이 가능하게 된다. 이 연구에서는 수치해석적으로 화강풍화토 시료를 구현한 후 입자크기와 입도분포를 변화시키면서 전단강도를 측정하여 앞서 설명한 입도와 전단강도간의 상관성을 살펴보았다.

2. 수치해석 실험 장치 및 조건

수치 해석을 수행하기 위하여 Itasca CG사가 개발한 PFC 2D(Itasca CG, 1994)를 사용하였다. PFC 2D의 자료구조로는 벽요소(wall elements)와 공요소(ball elements)가 있으며, 벽요소는 일정한 속도가 가해져서 공요소들의 변형을 일으키거나 공요소 집합체(ball aggregates)가 가지고 있는 척력을 측정하는 경계조건으로 사용된다. 공요소들은 여럿이 모여 집합체를 구성하게 되는데 공요소간의 결합력에 따라 암반 또는 토사의 물성이 구현

되기도 한다. 이 연구에서는 공요소간의 힘-변위 관계를 선형관계로 설정하였으며, 화강암 기원의 풍화토 물성을 구현하기 위하여, 주로 마찰계수와 강성에 대한 입력값을 변화시키며 여러 번의 시행착오를 거쳐 적절한 입력력 패러미터 값을 찾았다. 본 연구에서 기준으로 사용된 공요소 집합체인 “기준시료(reference numerical specimen)”의 공요소 물성(micromechanical properties)은 Table 1에 기재되어 있으며 수치해석 2축압축 시험장치와 공집합체는 Fig. 1에 나타나 있다. 이 연구에서 사용된 입자간의 마찰계수는 0.12로 다소 낮은 점이 있으나 마찰계수를 높일 경우 내부마찰각이 증가하며 점착력이 음수값을 갖게 되어 낮은 값의 입자간 마찰력을 적용하였다.

Fig. 1의 세로 방향의 두 벽요소는 일정한 응력 경계조건이 구현되어 시험 시 구속압(σ_2)을 모사한다. PFC에서 제공된 수치해석적 서보 메카니즘(numerical servo-mechanism)을 적용하여 일정한 구속압을 유지하였다(Fig. 2의 σ_2 그래프).

가로 방향의 두 벽요소는 일정한 속도로 공집합체에 접근하여 공요소 집합체의 변형을 유발시킨다. 이 때 위와 아래의 벽에서 응력이 동시에 측정되는데 이 벽이 공요소 집합체를 밀고 있는 벽이기 때문에 이 벽의 수직 방향이 최대 주응력(σ_1) 방향이 된다(Fig. 2의 σ_1 그래프). 이와 같은 2축압축 시험은 구속압이 5, 7, 10, 12 MPa에서 반복되어 각각 시험에서 구한 파괴조건을 모어공간(Mohr space)에 도시하면 공요소 집합체의 역학 특성 중 중요한자인 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)을 구할 수 있게 된다.

본 연구에서는 입도의 강도특성에 대한 영향을 규명하고자 일단 화강풍화토와 유사한 물성을 갖는 “기준시료(reference numerical specimen)”를 만들었다(Table 1, Table 2의 시험 1). 본 연구 기준시료의 대상모델은 화강

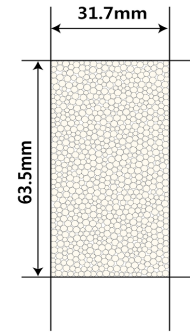


Fig. 1. Numerical rig and specimen

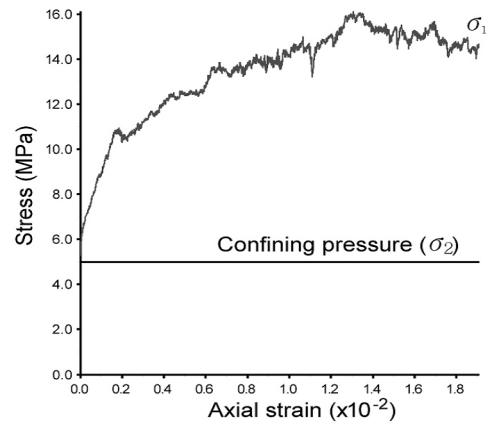


Fig. 2. Stress-strain curve from a biaxial test

암 풍화토로서 역학적 특성은 점착력 0.02~0.036MPa, 내부마찰각 27~37° 정도이다(Lee, 2004). 그러나 본 연구 토의 부분에 상세설명이 되겠지만, 실제로 구현된 기준시료의 점착력과 내부마찰각은 이와 어느 정도의 차이를 보인다.

기준시료를 준비하기 위해서 입경범위를 최소 1.50mm, 최대 2.49mm 즉 최대 입경과 최소 입경의 비(d_{max}/d_{min})가 1.66이 되도록 입자들을 준비하였다. 이러한 입자들을 31.7mm, 세로 63.5mm내의 4개의 벽요소로 구성된

Table 1. Micro-mechanical properties of individual elements in PFC 2D

Micro-mechanical properties		Values
Ball elements	Range of particle size (diameter, mm)	1.50~2.49
	Particle size ratio ($=d_{max}/d_{min}$)	1.66
	Density (kg/m^3)	2,630
	Friction coefficient	0.12
	Normal stiffness (Kn, N/m)	12×10^8
	Shear stiffness (N/m)	4.8×10^8 ($=Kn/2.5$)
Parallel bond	Normal strength (Pa)	500
	Shear strength (Pa)	300
	Normal stiffness (pb_Kn, N/m)	1,200
	Shear stiffness (N/m)	480 ($=pb_Kn/2.5$)

Table 2. Particle size and size distribution for the ten experiments in this study

Experiment No.		Average particle size (mm)	Particle size ratio ($=d_{max}/d_{min}$)	Number of ball elements
Group 1	#1	1.97	1.66	540
	#2	1.31	1.66	843
	#3	0.65	1.66	4,860
	#4	0.52	1.66	7,594
	#5	0.39	1.66	13,501
Group 2	#6	1.83	2	615
	#7	1.40	5	963
	#8	1.24	10	1,136
	#9	1.11	50	1,327
	#10	1.10	100	1,348

* d_{max} : maximum particle size, d_{min} : minimum particle size

2축압축 시험장치안에 놓으면 540개의 공요소가 놓이게 된다. 입자들의 크기 분포는 균등(uniform)하게 설정되었다. PFC 2D의 기본 물성시험 코드인 Afp 코드(fine-resolution, parallel-bonded material test code)가 이용되었는데, 이 코드는 입자들을 준비한 다음 사용자가 제공하는 접촉면의 수(이 연구의 경우 3) 이상의 입자요소가 주변에 있을 때 까지 입자요소의 크기를 키워 강제적으로 접촉면의 수를 확보하는 코드이다. 모든 공요소의 접촉면의 수가 3 이상이 되도록 공집합체를 준비한 후 Table 1에 기재된 평행결합(parallel bond) 물질의 물성을 적용하여 접촉하고 있는 공요소간에 평행결합을 적

용시켰다. 평행결합은 PFC에서 공요소의 결합을 위한 방법으로서 회전모멘트에 대한 저항이 없는, 즉 회전모멘트가 적용될 때 모멘트의 힘과 평행결합강도를 비교하여 힘이 더 클 경우 결합이 파괴되는 결합방식이다. 입자들간의 결합이 파괴된 이후에는 입자들의 회전 및 병진 운동이 가능하다.

실제 화강풍화토의 입자크기와 해석상의 입자크기를 비교하면, #200체 통과량인 직경 0.075mm 이하의 세립분이 실트질 모래에도 12%이상 존재하기 때문에(Kim and Lee, 1996) 수치시험상의 입경(평균 1.97mm, #200체 통과량 0%)은 실제 화강풍화토의 입경보다 훨씬 더

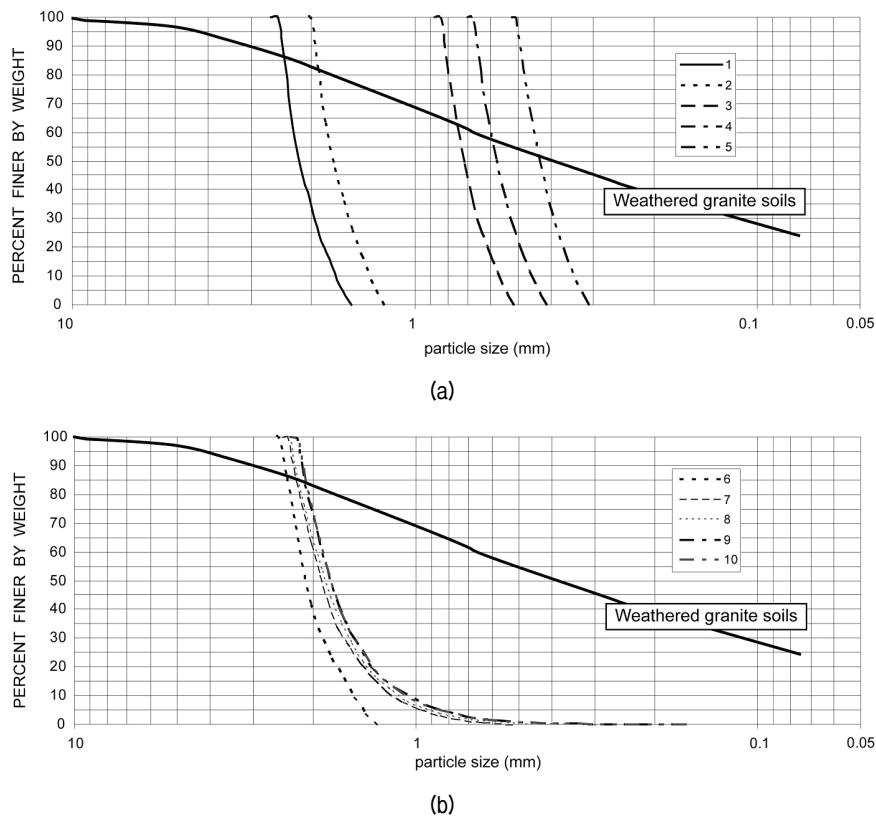


Fig. 3. Particle size distribution, (a) for experiments #1 to #5, (b) for experiments #6 to #10

큰 수치이나, 해석시간의 편의를 위해 이와 같은 입경을 선택하였다. 2축압축 시험장치의 면적과 공요소 면적합의 차를 시험장치의 면적으로 나누면 시험장치안 공요소 집합체의 간극률을 구할 수 있으며, 계산 결과 기준 시료의 간극률은 16%정도로 확인되었다.

입도의 강도특성에 대한 영향을 파악하기 위하여, 두 종류의 시험이 실시되었다. 첫 번째 시험군에서는(Table 2의 시험 #1~#5) 평균입경을 변화시켰으며, 두 번째 시험군에서는 최대입경/최소입경 비를 변화시켰다(Table 2의 시험 #6~#10). 두 시험군 모두 마찰계수 및 강성 등의 공요소 물성은 Table 1의 기준시료의 물성과 동일하게 주어졌다.

평균입경이 변화하는 첫 번째 시험군에서는 입자들의 최대입경/최소입경 비를 1.66으로 고정시키고, 기준 시료 평균 입경(1.97mm)의 약 67%, 33%, 26%, 20%의 평균입경을 갖는 총 5개의 시료를 준비하여 2축압축시

험을 실시하였다(Table 2, 시험 #1~#5). 토질시료의 경우 역학적 특성이 간극률의 영향을 많이 받기 때문에 시험에 사용된 시료의 간극률은 16.0%의 일정한 값을 갖도록 하였다. 아울러 각 시료들의 입도 분포는 Fig. 3a에 나타나 있다.

또한, 입도분포의 강도특성에 대한 영향을 파악하기 위한 두 번째 시험군의 경우, 입자들의 최대입경/최소입경 비를 2에서 100까지 변화시킨 총 5개의 시료에 대하여 2축압축시험을 실시하였다(Table 2의 시험 #6~#10). 이 경우에도 간극률의 값은 16.0%로 일정한 값을 유지하였으며, 각 시료들의 입도 분포는 Fig. 3b에 나타나 있다.

3. 시험결과

기준시료의 역학적 물성인 점착력과 내부마찰각을 구하기 위하여 구속압 조건을 5, 7, 10, 12MPa로 변화시

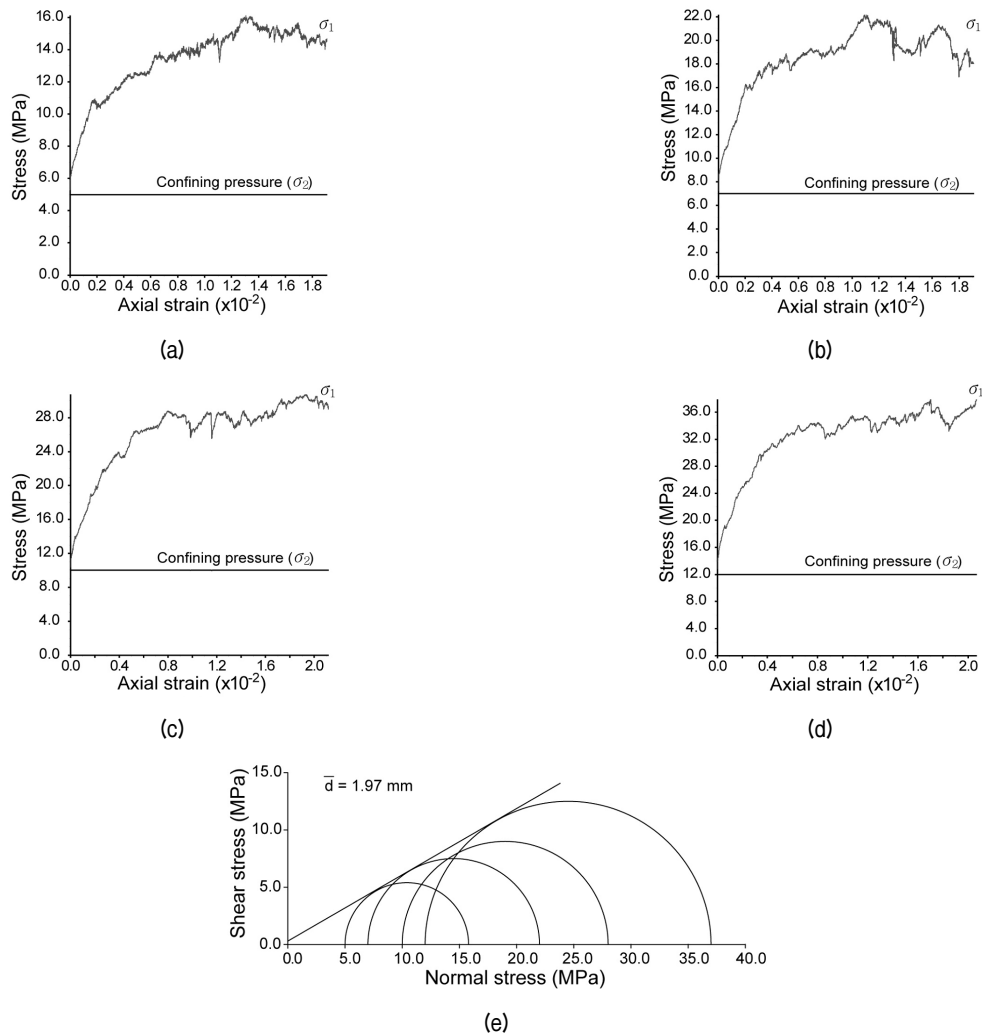


Fig. 4. Results from experiment #1. (a) Stress-strain curve at confining pressure of 5MPa, (b) at 7MPa, (c) at 10MPa, (d) at 12MPa, (e) Strength (stress) representation in Mohr space (\bar{d} : average particle size in diameter)

키면서 수치해석 시험을 수행하였다. Fig. 4. (a)~(d)에
 는 기준시료에 대한 상기 구속압 조건에서의 응력-변형
 률 곡선(stress-strain curve)이 나타나 있다. 이와 같은 응

력-변형률 곡선에서 읽은 값을 이용하여 모어원을 작성
 하면 Fig. 4. (e)와 같은 모어 포락선의 작도가 가능하며,
 이로부터 내부 마찰각과 점착력을 구할 수 있다.

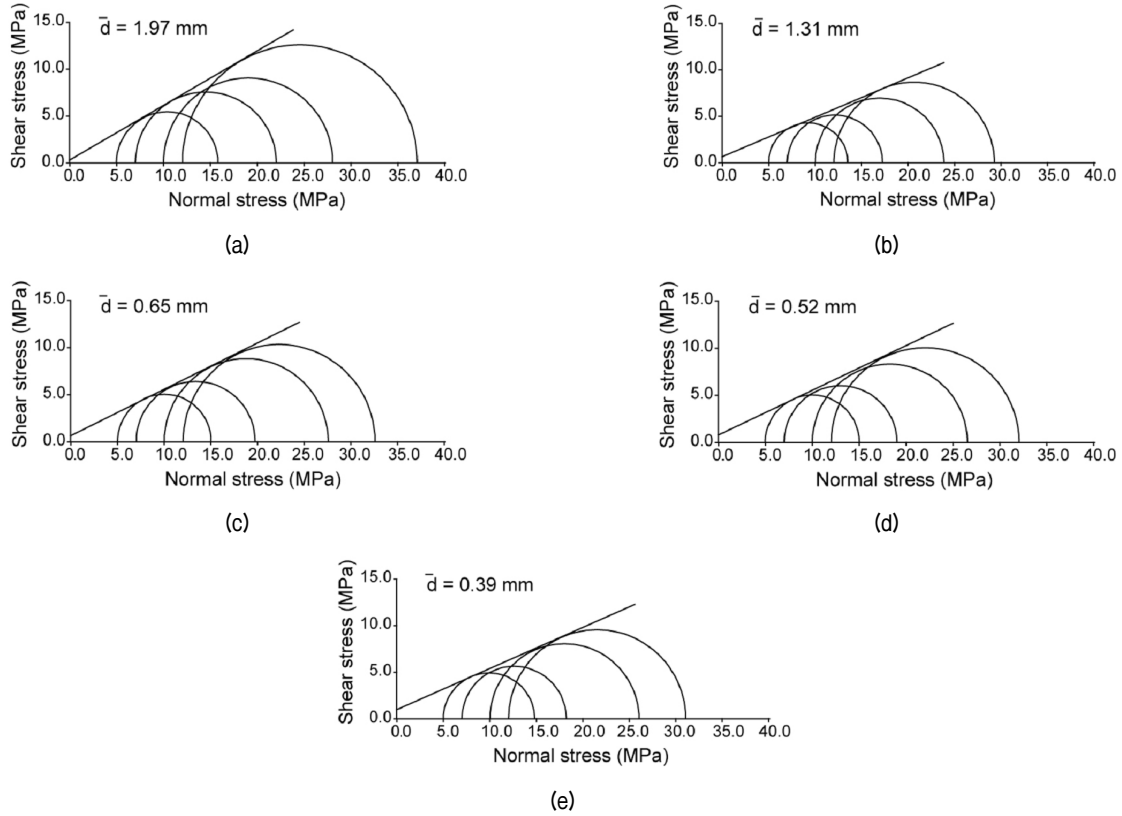


Fig. 5. Results from experimental group 1. (a) Mohr circle representation of strength for (a) experiment #1 ($\bar{d}=1.97\text{mm}$), (b) experiment #2 ($\bar{d}=1.31\text{mm}$), (c) experiment #3 ($\bar{d}=0.65\text{mm}$), (d) experiment #4 ($\bar{d}=0.52\text{mm}$), (e) experiment #5 ($\bar{d}=0.39\text{mm}$)

Table 3. Summary of results for experiment group 1 (c: cohesion, ϕ : internal friction angle).

Experiment No.	Average particle size (mm)	c (MPa)	ϕ (°)
#1	1.97	0.25	29
#2	1.31	0.67	22
#3	0.65	0.72	25
#4	0.52	0.74	24
#5	0.39	0.76	24

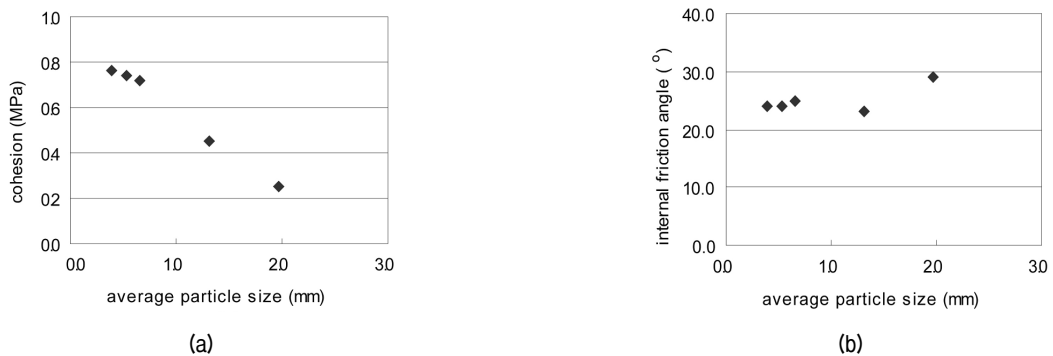


Fig. 6. Effect of particle size on strength parameters of cohesion and internal friction angle. (a) Plots of average particle size and cohesion, (b) Plots of average particle size and internal friction angle

이상과 같은 방법으로 평균입경을 기준시료 평균 입경(1.97mm)의 약 67%, 33%, 26%, 20%로 감소시키며 시험한 결과는 Fig. 5에 나타나 있으며, 수치해석 결과는 Table 3과 Fig. 6에 요약하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 입경이 커질수록 점착력은 0.76MPa에서 0.25MPa로 감소하며, 내부마찰각의 경우, 입경이 커질수록 변화 정도는 미미하나 증가하는 경향이 있다.

또한, 입자들의 최대입경/최소입경 비를 2에서 100까지 변화시키면서 준비한 5개의 시료에 대하여 2축압축 시험을 실시한 결과는 Fig. 7에 나타나 있으며, Table 4와 Fig. 8에 그 결과를 요약하였다. Fig. 8에서와 같이

입경이 커질수록 점착력은 0.69MPa에서 0.18MPa로 감소하였으나, 내부마찰각의 경우 입경변화시의 뚜렷한 증감은 관찰되지 않았다.

4. 토 의

본 연구를 수행함에 있어 수치해석적 측면에서 일부 한계점을 포함하고 있다. 이를 살펴보면, 수치해석적으로 구현된 기준시료는 입자의 평균직경이 1.97mm, 입도분포가 1.50~2.49mm로서 통일 분류법으로 분류하였을 때 빈입도의 모래(SP)로 분류되거나 #200체 통과량인

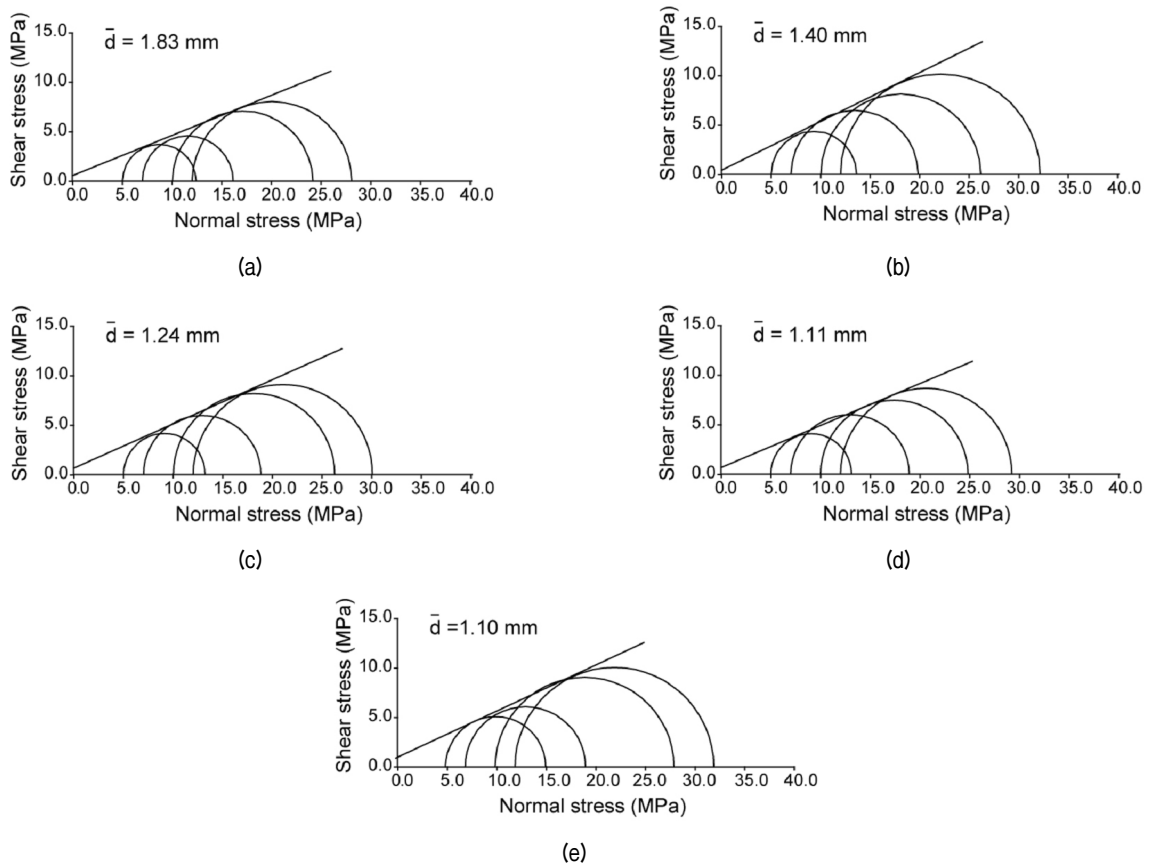


Fig. 7. Results from experiment group 2. (a) Mohr circle representation of strength for (a) experiment #6 ($\bar{d}=1.83\text{mm}$, $d_{\text{max}}/d_{\text{min}}=2$), (b) experiment #7 ($\bar{d}=1.40\text{mm}$, $d_{\text{max}}/d_{\text{min}}=5$), (c) experiment #8 ($\bar{d}=1.24\text{mm}$, $d_{\text{max}}/d_{\text{min}}=10$), (d) experiment #9 ($\bar{d}=1.11\text{mm}$, $d_{\text{max}}/d_{\text{min}}=50$), (e) experiment #10 ($\bar{d}=1.10\text{mm}$, $d_{\text{max}}/d_{\text{min}}=100$)

Table 4. Summary of results for experiment group 2 (c: cohesion, ϕ : internal friction angle)

Experiment No.	Average particle size (mm)	Particle size ratio ($=d_{\text{max}}/d_{\text{min}}$)	c (MPa)	ϕ ($^{\circ}$)
#6	1.83	2	0.18	24
#7	1.40	5	0.35	26
#8	1.24	10	0.47	24
#9	1.11	50	0.67	23
#10	1.10	100	0.69	25

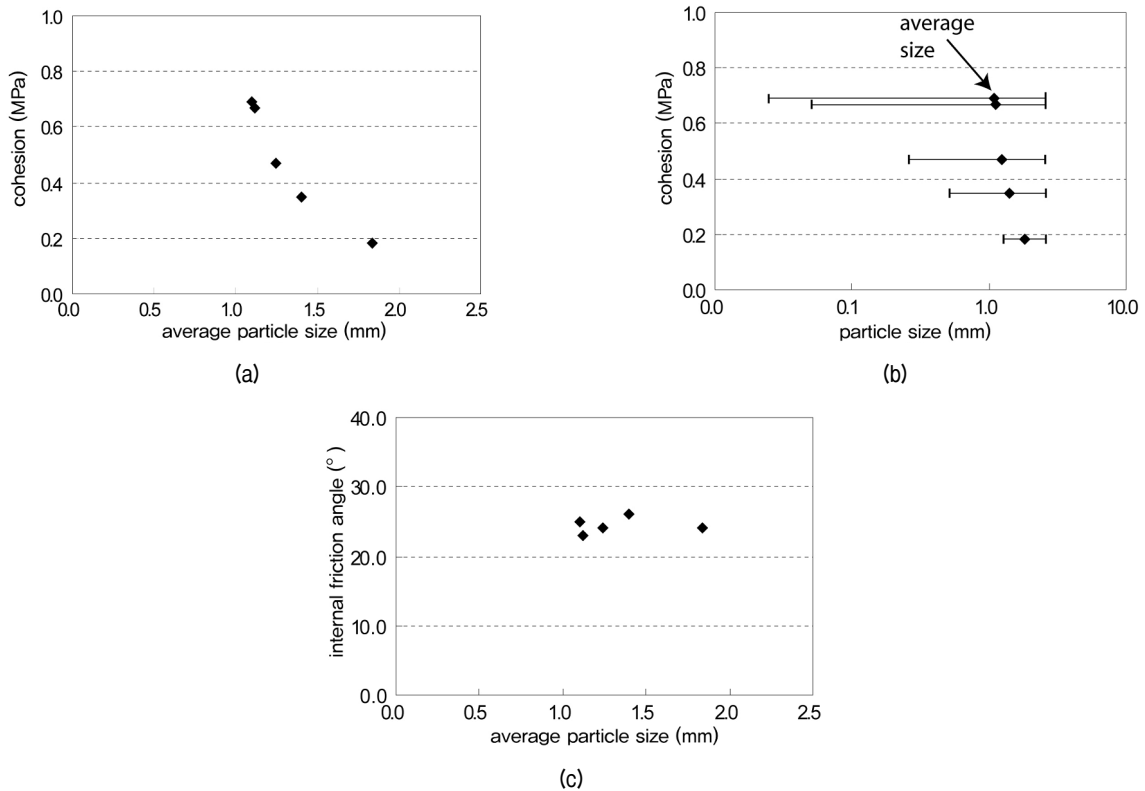


Fig. 8. Effect of particle size distribution on strength parameters of cohesion and internal friction angle. (a) Plots of average particle size vs. cohesion, (b) Plots of particle size distribution vs. cohesion, (c) Plots of average particle size distribution vs. internal friction angle

직경 0.075mm 이하의 세립분은 존재하지 않게 설정되었다. 그러나 실제 화강풍화토의 경우, 대부분 직경 0.075mm 이하의 세립분이 포함된 실트질 모래(SM)로 분류되며 그 외에도 심한 풍화의 영향으로 인하여 점성토 중 점토(CL) 및 실트(ML)로 분류되는 등 세립분이 전혀 존재하지 않을 가능성은 희박하다. 아울러, 이 연구에서 모사하고자 하였던 화강풍화토의 점착력(0.02~0.036MPa)과 내부마찰각(27~37°)의 완벽한 모사는 기준시료에서 얻어내지 못했다. 본 연구에서는 입자요소의 마찰각을 높여서 내부마찰각을 모사 대상의 시료와 일치시키려 했으나 이 때 같이 점착력도 높아지는 경향성을 보여서, 적절한 범위의 입자요소 물성(내부마찰각, 점착력)을 갖는 기준시료를 만들었다.

또 다른 한계는 함수비가 고려되지 않았다는 점이다. 간극 내에 존재하게 되는 물은 유효응력을 낮추는 효과가 있으므로 원위치 풍화토의 수치해석적 구현에 필수적이지만 함수비를 고려하지 않은 현실적 이유는 본 연구에서는 2차원적 해석이 이루어졌기 때문이다. PFC 프로그램상에서는 간극수의 유동 구현이 가능하나 2차원 해석의 경우 각 입자들간의 접촉점이 형성되면 유체의 이동이 불가능해진다. 반면 3차원에서는 접촉점이 형성

되어도 3차원적으로 연결된 간극이 형성되어 유체의 이동이 가능해진다. 즉, 2차원 해석 시 PFC 프로그램상에서는 간극수 유동이 가능하나 큰 의미가 없기 때문에 함수비를 고려한 시험은 수행되지 않았다. 그러나, 3차원 역학 해석과 간극수 유동 해석이 함께 수행된다면 함수비의 강도에 대한 효과를 연구함에 유용할 것으로 판단된다.

앞에서 설명한 대로 본 연구에서 시도된 이차원적 접근은 간극수 유동해석의 한계 이외에도 미시역학적인 (micro-mechanical) 한계가 있다. 예를 들면, 2차원 해석의 경우 공요소의 접촉점들이 모두 동일한 평면상에 놓이지만 3차원 해석의 경우 접촉점들의 배열이 평면적이 아닌 입체적인 위상학적(topological) 특징을 갖게 되고, 접촉점의 개수 또한 달라지게 된다. 따라서 화강풍화토의 미시역학적 특징은 3차원에서 더 잘 구현된다고 여겨질 수 있다.

수치해석상의 기준시료에는 입자요소의 수가 540개로 사용되어 강성벽요소의 영향을 받을 가능성이 있다. 이를 테스트하기 위하여 Table 1과 동일한 물성과 동일한 크기를 갖는 입자요소들을 길이비율로 두배(면적 4배)인 시험장치에 넣고 수치시험을 실시하였다. 시험결

과 점착력은 0.09MPa, 내부마찰각은 16.3°로 나타나, 표준시료의 0.25MPa과 29°와는 상이한 값이 나왔기 때문에 미시물성이 같더라도 더 많은 입자요소가 사용되면 거시 물성이 다르게 나오는 것으로 판명되었다. 따라서, 이 연구의 표준시료에서 사용된 540개의 입자요소 숫자는 문제가 있을 가능성이 높다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 더 많은 입자요소를 사용할 수도 있겠지만, Table 2에 나타난 것과 같이 실험 #5의 경우 실험 #1에 비해 25배의 입자요소가 사용되어 오랜시간이 소요되었으며 표준시료 입자요소의 숫자를 10배 늘릴 경우 입자수가 많은 시험은 해석시간이 매우 길어질 가능성이 있다. 아울러, 앞에서 설명한대로 이 연구의 목적중 하나가 입자크기 변화에 대한 물성변화의 경향성 파악이므로 540개의 입자요소 시험은 문제가 있지만 경향성 파악에는 유용하다고 판단된다.

입자들의 평균 크기를 변화시키며 수행한 수치시험 (Fig. 6)과 입자들의 크기 범위를 변화시키며 수행한 수치시험(Fig. 8)을 비교하면 두 시험군의 점착력과 내부마찰각의 변화는 다음과 같다. (1) 점착력: 최대/최소입경의 비가 1.66인 시험군의 점착력은 0.25MPa에서 0.76MPa이며(Fig. 6), 최대/최소입경의 비가 2에서 100에 달하는 시험군의 점착력은 0.18MPa에서 0.69MPa(Fig. 8)로 나타나므로 두 시험군 간의 점착력 차이는 크지 않다. (2) 내부마찰각: 최대/최소입경의 비가 1.66인 시험군의 내부마찰각은 22°에서 29°로 나타나며(Fig. 6), 최대/최소입경의 비가 2에서 100에 달하는 시험군의 내부마찰각은 23°에서 26°로 나타난다. 따라서, 점착력과 마찬가지로 내부마찰각 또한 입도분포특성이 다른 두 시험군 간의 차이는 거의 없다. 이는 힘을 받는 큰 입자들(load-bearing or stress-supporting particles)의 간극에 작은 입자들이 존재해도 역학적 특성은 차이를 보이지 않음을 의미한다. 이는 힘을 받는 입자들 사이에 위치한 작은 입자들이 힘을 받지 않고 있기 때문이다. 입상체 역학에서는 이러한 입자들을 방관자입자(on-looker grains)들로 통칭한다. 이와 같은 관찰은 함수비가 고려되지 않은 해석에서는 유효하나 함수비가 고려될 경우 작은 입자들이 간극수의 거동을 방해하므로 역학적 특성이 다르게 나타날 것으로 예상된다.

앞에서 설명한 바와 같이 수치해석 연구결과의 한계는 2차원적 해석에 기인하는 것으로 여겨진다. 이러한 한계가 있음에도 불구하고 본 연구에서 2차원 해석을 수행한 이유는 잘 정의되지 않은 문제에 시간을 허비할

가능성을 배제하기 위함이었다. 2차원 해석에서 관찰된 경향성을 토대로 추후에는 3차원 해석을 할 필요가 있을 것으로 판단된다. 이 경우, 흙의 거동에 있어서 중요한 인자인 함수 조건 또한 포함되어야 할 필요가 있다.

5. 결론

화강풍화토의 입자 크기가 토질의 전단강도정수에 미치는 영향을 파악하기 위해 개별 요소 2축압축 수치 해석을 두가지 목적으로 (i)평균입경 변화 시 거시역학적 물성의 변화 양상 파악, ii)입도분포의 최대/최소입경 비 변화 시 거시역학적 물성의 변화 양상 파악) 실시하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 시행착오를 거쳐 화강풍화토를 모사한 수치해석상 “기준시료”의 미시역학적 물성은, 밀도 2,630kg/m³, 평균입경 1.97mm, 최대입경/최소입경의 비 1.66, 공요소간의 마찰계수, 연직강성과 수직강성이 각각 0.12, 12×10⁸N/m, 4.8×10⁸N/m, 평행결합의 연직강도와 전단강도는 각각 500Pa과 300Pa이다.
- (2) 기준시료의 최대입경/최소입경 비를 1.66으로 고정시켰을 때 평균입경이 커짐에 따라 점착력이 0.76MPa에서 0.25MPa로의 감소가 관찰되었으며, 내부마찰각의 경우 변화가 작지만 미세하게 22°에서 29°로 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 최대입경/최소입경의 비를 2에서 100까지 변화시킨 시료에 대해 2축압축 시험을 실시한 결과 입경이 커질수록 점착력은 0.69MPa에서 0.18MPa로 감소하며, 내부마찰각의 경우 뚜렷한 증감 경향은 관찰되지 않았다.
- (4) 본 연구에서 수행한 개별요소해석은 2차원적 해석으로 함수조건을 구현하지 못하는, 즉 유효응력이 구현되지 않은 한계성이 있으므로 2차원 해석에서 관찰된 경향성을 3차원 해석에서도 확인할 필요가 있으며, 3차원적 해석을 통하여 입자의 크기가 강도에 미치는 영향을 함수조건에서 규명할 수 있다면 입자 크기의 분석을 통하여 쉽게 화강암질풍화토의 강도특성을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Evans, T. M., Mojarrad, H., Cunningham, C., and Tayebali, A. A. (2009), “Grain Size Distribution Effects in 2D Discrete Numerical

- Experiments”, Contemporary Topics in In Situ Testing, Analysis, and Reliability of Foundations, Part 186, pp.58-65.
2. Geological Society of Korea (1999), “Geology of Korea”, Sigma Press, p.802.
 3. Itasca, C. G. (1994), “Particle flow code 2D”, www.itascacg.com.
 4. Kim, M. M. (1983), “Effect of Size Distribution of Soils on the Engineering Properties”, Engineering Research Institute (Seoul National University), Vol.15, Np.2, pp.53-58.
 5. Kim, S. G. and Lee, E. S. (1996), “Application of Weathered Granite Soils as Backfill Material of Reinforced Earth Structure”, Journal of Korean Geotechnical Society (KGS), Vol.12, No.1, pp.60-68.
 6. Kim, Y. S. (2002), “Development of the Method to Determine the Weathering Degree of Decomposed Granite Soils for the Evaluation of Engineering Properties”, Unpublished Ph.D. Thesis, Chung-Ang University, pp.13-70.
 7. Lambe, T.W. (2001), *Soil Mechanics*, Engineers, pp.101-137.
 8. Lee, E. S. (2004), “An Assessment of the Shear Strength Parameters for Weathered Granitic Soils using the Artificial Neural Network Method”, Unpublished M.S. Thesis, University of Seoul, pp.44-46.
 9. Morgan, J. K. (1999), “Numerical simulations of granular shear zones using the distinct element method: 2. Effects of particle size distribution and interparticle friction on mechanical behavior”, Journal of Geophysical Research, Vol.104, No.B2, pp.2721-2732.
 10. Narayanasamy, R. (2004), “Numerical modelling of weak sand behavior”, *Numerical Modelling in Micromechanics via Particle Methods - 2004*, Shimizu, Y., Hart, R., and Cundal, P. eds., Minneapolis, pp.397-406.
 11. Park, E.-S., Derek Martin, C., and Christiansson, R., (2004), “Numerical simulation of the mechanical behavior of discontinuous rock mass”, *Numerical Modelling in Micromechanics via Particle Methods - 2004*, Shimizu, Y., Hart, R., and Cundal, P. eds., Minneapolis, pp.85-91.
 12. Park, Y., Kim, K.-S., Lee, C. Y., and Park, Y. J. (2008), “Evolution of shape fabrics in deforming rigid-object bearing systems: a distinct element method approach”, *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geo-Engineering - 2008*, Hart, R., Detournay, C., and Cundal, P. eds., Minneapolis, paper 08-10.
 13. Santamariana, J. C., and Cho, G. C. (2004), “Soil Behavior: The role of Particle Shape”, Proc. Skempton Conf., London.
 14. Yoo, S.-H., and Park, Y. (2008), “Role of interfacial strength properties in determining bulk mechanical properties in block-in-matrix rocks”, *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geo-Engineering - 2008*, Hart, R., Detournay, C., and Cundal, P. eds., Minneapolis, paper 08-07.

(접수일자 2012. 9. 5, 심사완료일 2012. 12. 3)