

# PFC를 이용한 침투그라우팅시 미세입자의 이동 및 전단강도증가 해석

## Analysis of Fine Particle Transfer and Shear Strength Increase Using PFC in Permeation Grouting

이 완 호<sup>1</sup> Lee, Wan-Ho

임 희 대<sup>2</sup> Lim, Heui-Dae

### Abstract

Numerical experiments using a distinct element code (PFC3D) were carried out for the analysis of grout-material transfer in soil layers and also for the analysis of increase in mechanical strength after permeation grouting. For rapid analysis, up-scaling analysis in length scale was adopted, and the following observations were made from the numerical experiments. Firstly, the relative size of grout material with respect to the *in situ* soil particles controlled the transfer distance of the grout particles. When the size of grout particle was 0.2 to 0.25 times of the *in situ* soil particles, clogging of pore spaces among the *in situ* soil particles occurred, resulting in restricted propagation of grout particles. It was also found that there was a threshold value in the size of grout particle. Below the threshold value, the transfer distance of the grout particle did not increase with the decrease of particle size of the grout material. Secondly, the increase in cohesion and internal friction angle was observed in the numerical specimen with grouting treatment, but not with the untreated specimen.

### 요 지

침투그라우팅시 미세입자의 이동 메카니즘과 미세입자들의 간극 충전 후 강도증가 상태를 파악하기 위해 PFC3D를 이용한 수치해석을 수행하였다. 해석을 위하여 업스케일링 기법을 이용하였으며 연구를 통해 다음과 같은 사실들이 관찰되었다. 첫째, 토층 입자에 대한 그라우팅 미세 입자의 상대적 크기가 0.05배에서 0.25배로 증가하면서 입자의 이동이 제한을 받게 된다. 특히, 0.20배 또는 0.25배의 그라우팅 미세입자의 경우, 토층 입자들 간의 공극이 하나 또는 다수의 미세입자들에 의해 막히기 때문에 미세입자의 이동이 거의 없다. 또한 0.05배와 0.10배의 경우, 입자의 이동량이 거의 유사하므로 입자 크기가 감소되어도 그라우팅 효과의 증진은 한계가 있다. 둘째, 침투그라우팅 전과 후의 수치시료에 대한 물성 실험을 한 결과 점착력과 마찰계수가 증가함이 확인되었다.

**Keywords :** Distinct Element Method, Motion of Fine Grout Particles, Permeation Grouting, Up-scaling

### 1. 서 론

광범위한 의미로 “그라우팅”이란 용어는 어떤 물질을 지반에 주입하는 일련의 과정을 설명하는데 사용된다. 입상토에 대한 그라우트 공법은 컴팩션 그라우팅,

침투 그라우팅, 할렐 그라우팅 및 제트 그라우팅 등으로 대별되며 입도분포 및 투수계수 등의 지반특성에 따라 적합한 방법을 선정한다. 댐 제체에 이상 변위나 누수가 발생한 경우 그라우팅으로 인한 추가 변위를 억제하면서 보수·보강 공사를 수행하려면 침투그라우팅 공법을

1 정회원, 충남대학교 공과대학 토목환경공학부 토목공학과 박사과정(Member, Ph.D. Candidate, Dept. Civil Engineering, Chungnam National Univ., 교신저자, whlee@kowaco.or.kr)

2 정회원, 충남대학교 공과대학 토목환경공학부 토목공학과 교수(Member, Prof., Dept. Civil Engineering, Chungnam National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

대안으로 선정하는 것이 바람직하다.

댐 제체의 침투그라우팅 설계와 시공은 매우 작은 크기의 간극 및 미세한 균열에 의해 좌우되며 시공과정에서도 간극 및 균열의 상태를 완전히 파악할 수 없으므로 설계사나 지침에 따라 시공하는 것만이 능사가 아니라 상황변화에 따라 끊임없이 조정하고 분석해야 하는 어려운 기술 분야이다. 따라서 그라우팅의 성공과 효과에 대한 예측도 대단히 어렵다(농업기반공사, 2001). 암반 그라우팅이 절리면을 충전하는 것이라면, 제체의 침투 그라우팅의 궁극적인 목표는 지반의 추가 변형을 억제하고 간극들을 그라우팅재로 채워 서로 연결되고 폐합된 그라우팅재의 망을 형성하는 것이다. 이러한 결과를 얻기 위해서는 그라우팅 입자들이 모든 간극들 사이로 완전하고 균일하게 주입되어야 한다(Ewert, 1985).

침투 그라우팅은 주입재가 토립자의 골격을 교란시키는 일 없이 토립자 간극에 침투·주입되며 주입재는 소정의 시간에 고결한다. 이 공법에 의한 지반개량의 메카니즘은 주입재가 토립자 사이에 차지하고 있는 물이나 공기를 밀어내어 치환하는 것이다. 이는 고압의 펌프를 이용하여 지반을 할렬시키거나 상대밀도를 증가시키는 비배출 그라우팅과 기계적으로 흙과 고화재를 혼합교반하거나 증기를 사용하여 흙을 다지는 다른 지반개량과는 크게 다르며, 원 지반이 가지고 있는 토립자 사이에 맞물림을 그대로 이용하는 특징을 가지고 있다. 침투 그라우트는 흙의 간극을 침투할 수 있을 정도로 상당히 낮은 점성력을 가지고 있으며 매트릭스의 수압 할렬과 지표면의 용기를 방지하려면 상대적으로 낮은 주입압이 요구된다. 침투 그라우팅은 주로 강도 증가 및 차수를 목적으로 사용되어 왔다.

그라우팅 공법은 응급대책 또는 보조공법으로 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 지반진동을 경감하기 위한 대책 등의 항구적인 지반개량공법으로 정착되어 가고

있는 실정이다(한국지반공학회, 2005). 이러한 그라우팅 공법의 필요성이 급증하는 것은 세계적 추세이나 아직 약액의 정확한 주입범위, 주입고결토의 강도증대 효과, 주입효과의 판정법 및 주입재의 내구성 등 미해결의 중대한 문제점 들을 안고 있다. 이와 같은 문제점 때문에 초창기 그라우팅은 이론에서부터 시작한 것이 아니라 현장 경험으로부터 시작하였다. 시간이 지남에 따라 간극이나 균열을 좀 더 효과적이고 완벽하게 채울 수 있는 방법들을 연구하게 되었다(Kutzner, 1996).

따라서 본 연구에서는 개별요소 수치해석 프로그램인 PFC3D를 통하여 침투그라우팅시 그라우팅 입자의 거동 양상과 그라우팅 이후 개선된 지반의 강도를 파악하고자 하였다.

## 2. 입자 유동 해석 프로그램 (PFC)

본 연구에서는 그라우팅 과정을 수치적으로 모사하기 위해 PFC3D(Particle Flow Code in 3 Dimension, Itasca Consulting Group, 1995)를 이용하였다. PFC3D는 개별요소기법에 근간을 둔 해석 프로그램으로서 각각의 개별요소들이 구(ball)의 모양을 갖는다. 각각의 개별요소들은 탄성계수 및 마찰특성 등의 개별요소물성(micro-properties)을 가지며 평면 또는 곡면의 벽요소(wall element)에 의해 주어지는 경계조건하에서 벽-입자, 입자-입자간의 상호작용에 따른 변위를 갖게 된다. 구체적으로 설명하면 개별요소의 움직임을 지배하는 구성방정식은 기본적으로 개별요소 또는 개별요소와 벽요소 간의 접촉 현상이 있을 때 탄성체의 거동(Hookean behavior)을 따른다(Figure 1).

PFC3D에서는 구형 이외의 개별요소 모양을 구현하기 위해 개별요소간의 인력이 무한히 큰 집합체(clump logic)가 사용될 수 있으며, 개별 요소 간에 특정 크기의 인력

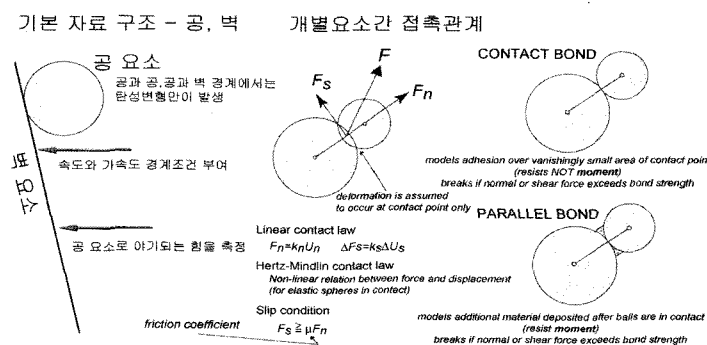


Fig. 1. Data structure, contact relation and constitutive law in PFC3D

을 부여하여 개별요소들을 결합할 수도 있다. 개별요소 결합의 종류는 접촉결합(contact bonding)과 병렬결합(parallel bonding)이 있으며 댐의 코어재(core material for dams)의 물성 모사를 위해 병렬결합이 사용되었다.

일반적으로 PFC3D에서는 모사하고자하는 물성을 얻기 위해 개별요소 간의 결합력 및 종류, 개별요소들의 탄성특성(normal and shear stiffness)과 개별요소 간의 마찰특성을 시행착오적으로 변화시키는 작업이 필요하다. 이는 구성방정식에 의해 정해진 개별요소간의 힘-변위관계가 전체 시스템(개별요소 집합체, ball aggregates)의 거동과는 직접적인 연관이 없기 때문이다.

PFC3D 외에도 2차원 변형(plane strain) 해석을 위해 PFC2D가 사용되는데, 3D 및 2D PFC의 활용분야는, 지반공학, 암석역학, 자원공학, 지질학, 약제학 및 농업 등으로서 그 활용범위가 매우 다양하다(Shimizu et al, 2004). 이와 같이 PFC의 다양한 활용은 다음과 같은 이유로 설명될 수 있다.

첫째, PFC에서 나타나는 개별요소집합체의 거동은 분자동력학에서의 형상화(pattern formation and emergence)를 모사할 수 있기 때문에 복잡한 계에서의 현상을 연구하기에 적합하다. 둘째, 붙어 있던 개별요소들의 이격이 가능하기 때문에 균열, 전단대의 모사가 가능하다. 이러한 이유로 국내 암반공학 관련분야에서는 절리 발달 상태에 따른 암반의 강도변화(Park et al, 2004)가 연구된 바 있으며, 역압과 핵석의 물성을 해석을 통해 구한 후 이를 설계에 반영한 사례도 있다.

PFC에서 개별요소집합체의 물성은 PFC와 같이 제공되는 일련의 피시코드(Fish code) 프로그램을 통해서 구할 수 있다(Figure 2). 모사하고자 하는 개별요소집합체를 벽요소로 둘러 쌓인 공간에 넣으면, 피시코드는 다음

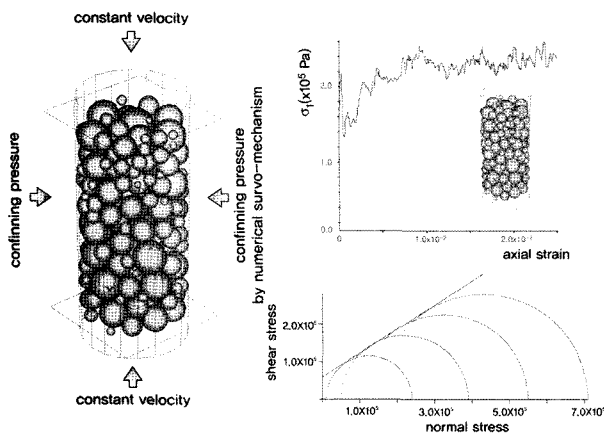


Fig. 2. Triaxial compression test in PFC3D (see text for details)

의 작업을 수행한다. ① 모든 개별요소들을 검색하여 각각의 개별요소들이 일정 개수 이상의 접촉면을 갖게 한다. ② 주어진 봉압( $\sigma_3$ , confining pressure)을 모사하기 위하여 벽요소와 접하는 모든 개별요소들이 벽에 가하는 힘을 재어 이 힘을 벽의 면적으로 나누어 응력을 계산한 후, 봉압과 비교하여 봉압보다 높을 경우 벽을 후퇴시키고 봉압보다 낮을 경우에는 시료방향으로 벽을 전진시켜 주어진 봉압에 이르게 한다. ③ 원통형 시료의 원통상하부에 해당되는 벽요소를 일정 속도로 움직여, ②의 방법대로 최대주응력( $\sigma_1$ )을 구한 후 응력-변형률 곡선을 얻는다. ④ 봉압을 바꾸어 가며 위의 세 단계를 반복하면 봉압의 변화에 대한 강도(축차응력)를 얻을 수 있으므로 이를 이용하여 점착력과 내부마찰각을 구할 수 있다.

### 3. 미세입자의 이동 해석

침투그라우팅시 그라우트재인 미세입자들의 이동을 해석하기 위하여 Figure 3에 나타난 것과 같은 시편을 구성하였다. Figure 3의 옅은 색 입자들은 보강 될 토층의 일부를 나타하며 짙은 색 입자들은 그라우팅 시 주입되는 미세 입자들을 나타낸다. 토층을 이루는 입자들에 대한 그라우팅 미세입자들의 상대적 크기(그라우팅 미세입자의 평균반경/토층입자의 평균반경)가 0.05에서 0.25로 변화할 때 그라우팅 미세입자의 이동거리가 어떠한 양상으로 변화하는지를 고찰하기 위해 일련의 수치실험이 시도되었다. 수치실험에서의 토층 입자의 크기에 대한 그라우팅 미세 입자의 상대적 크기는 수자원 공사발간 “댐설계지침”(2004)에 기재된 필댐의 코어 입자의 크기와 일반적으로 알려진 그라우팅 입자의 크기를 고려하여 결정하였다.

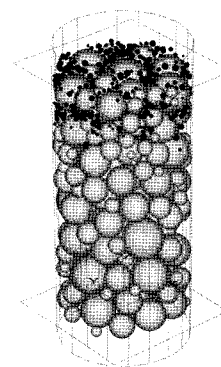


Fig. 3. Numerical specimen for observation of transfer of grout material (balls in light color: in situ soil particles, balls in dark color: grout material)

수치실험의 조건으로 빠른 해석을 위하여 스케일이 확대된(up-scaling) 높이가 0.6m인 원통형의 경계조건이 만들어졌으며(Figure 3), 평균 입자크기가 2.46cm이며 가우스 입자 분포의 특성(평균: 2.46cm, 표준편차: 1.2cm)을 갖는 229개로 구성된 토층이 만들어졌다(Figure 4). 그라우팅 미세입자의 경우에도 토층의 가우스 입자 분포의 특성(평균: 0.246cm, 표준편차: 0.12cm)을 가지며 평균 크기가 토층의 평균 입자크기의 0.05배, 0.10배, 0.15배, 0.20배, 0.25배인 1.2mm, 2.5mm, 3.7mm, 4.9mm, 6.1mm인 입자들이 만들어졌다.

그라우팅 미세입자들이 함께 주입된 일정속도를 갖는 유체에 의해 이동하고 유체는 Figure 3에서 위에서 아래의 방향으로 주입된다는 가정하에 수치실험이 진행되었다. 실제적으로 유체와 함께 이동하는 그라우팅 입자의 속도는 유체의 속도, 입자의 크기(질량) 및 유체와 입자간의 드래그(drag force)에 의해 결정된다(Bortal-Naffa and Gouvenot, 2003). 그러나 이미 업스케일링이 가정되어 입자의 크기가 달라졌으며 입자이동의 경향성을 파악할 목적으로 수치실험이 진행되었으므로 정확하지만 복잡한 식에 의해 입자의 속도를 계산하는 대신 모든 그라우팅 미세입자들에 대하여 일정 속도를 부여하는 방법이 사용되었다.

유체의 이동에 의해 따라 움직이는 그라우팅 미세입자들의 거동을 해석하기 위해서 입자의 거동이 두 단계라는 가정을 하였다. 첫단계로는 미세 입자의 움직임이 일정 시간 동안 유체의 움직임 방향(Figure 3의 아래로 향하는 방향)과 일치하도록 하였으며, 두 번째 단계에서는 미세입자들이 원래 존재하고 있었던 토층의 입자들과 충돌을 하여 이동 방향이 바뀌거나 또는 공극사이로 이동을 하게 된다. 이와 같은 각각의 두 단계를 짧은 시간동안에 일어나는 현상으로 여기고 이를 반복 수행함으로써 미세입자들의 이동을 해석에서 구현하였다. 전

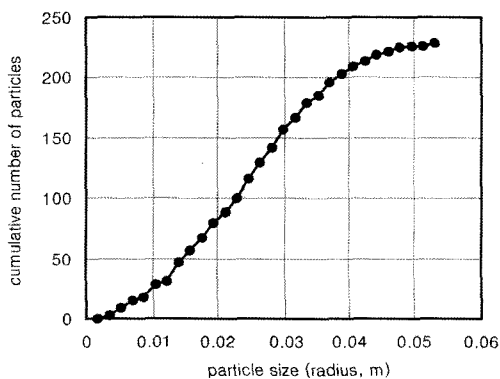


Fig. 4. Particle-size distribution (in radius) of *in situ* soil particles of the numerical specimen in Fig. 3.

체 유체의 평균 유속인  $V_{fluid}$ 의 벡터성분 중  $z$  방향(Figure 3의 아래 방향)의  $V_{fluid,z}$ 만이 0이 아니라고 가정하면 미세입자의 이동방향 또한 짧은 시간동안에는 유체의 방향과 평행하게 된다. 이러한 운동방향을 갖는 미세입자가 기존 토층입자와 충돌하거나 미세입자간의 충돌로 인하여 운동 방향을 바꾸게 되면, 그 방향은 분해된 벡터로  $V_{particle,x} + V_{particle,y} + V_{particle,z}$ 로 표현된다. 일정 시간 동안 전술한 대로 운동하던 미세입자는 다시 유체에 의해 해석상 새로운 속도(updated velocity in modelling)를 가지게 되는데, 그 속도는 기존 입자의 속도와 유체의 속도의 합인  $V_{particle,x} + V_{particle,y} + (V_{particle,z} + V_{fluid,z})$ 로 나타낼 수 있다. 이 연구에서는 짧은 시간 동안에 이와 같은 방법을 계속 반복하여 그라우팅 미세입자의 이동을 모사하였다.

Figure 5에는 그라우팅 미세입자의 평균크기가 토층 입자의 0.15배인 경우에 대한 해석 결과를 나타낸다. 시간이 지남에 따라 그라우팅 미세입자들이 아래로 이동함을 볼 수 있으며(Figure 5의 비트맵 그림들), 이를 정량적으로 알아보기 위하여 원통형의 시료를 수평방향의 등 간격으로 잘라 토막(slice)을 만든 후 각 슬라이스에서 그라우팅 미세입자의 개수를 측정하면 Figure 5의 막대그래프와 같은 결과를 얻을 수 있다(슬라이스 번호의 증가는 수치실험 시료의 윗부분을 의미). Figure 5의 막대그래프를 통하여 처음에 윗부분에 집중되어 분포하던 그라우팅 미세입자들이 해석계에서의 시간이 경과함에 따라 아래쪽으로 점진적으로 이동함을 알 수 있다. 아울러, 그라우트재 입자의 크기가 작을 경우에는 미세입자들이 아래로 이동하여 아래의 벽요소에 밀집되는데 이는 벽요소를 개별요소가 뚫고 지나가지 못하기 때문이다. 이러한 점은 실제와는 확연히 다른 현상으로서 수치해석상의 제약으로 여길 수 있다.

Figure 6은 평균입자 크기가 다른 그라우팅 미세입자들이 동일한 토층을 통과할 때의 입자거동을 나타낸다. 상대적 입자크기가 0.05배에서 0.25배로 증가하면서 입자의 이동이 제한적이 됨을 알 수 있다. 0.20배 또는 0.25배의 그라우팅 미세입자의 경우 입자의 움직임이 거의 없음을 알 수 있다. 이와 같은 그라우팅 미세입자의 제한된 거동은 원래 토층 입자들 간의 간극이 하나 또는 다수의 미세입자들에 의해 막히면서 일어나는 현상으로 해석 할 수 있다. 또한 0.05배와 0.10배의 실험결과가 거의 유사하므로 입자 크기의 감소에 의한 그라우팅 효과의 증진은 한계가 있다고 여길 수 있다.

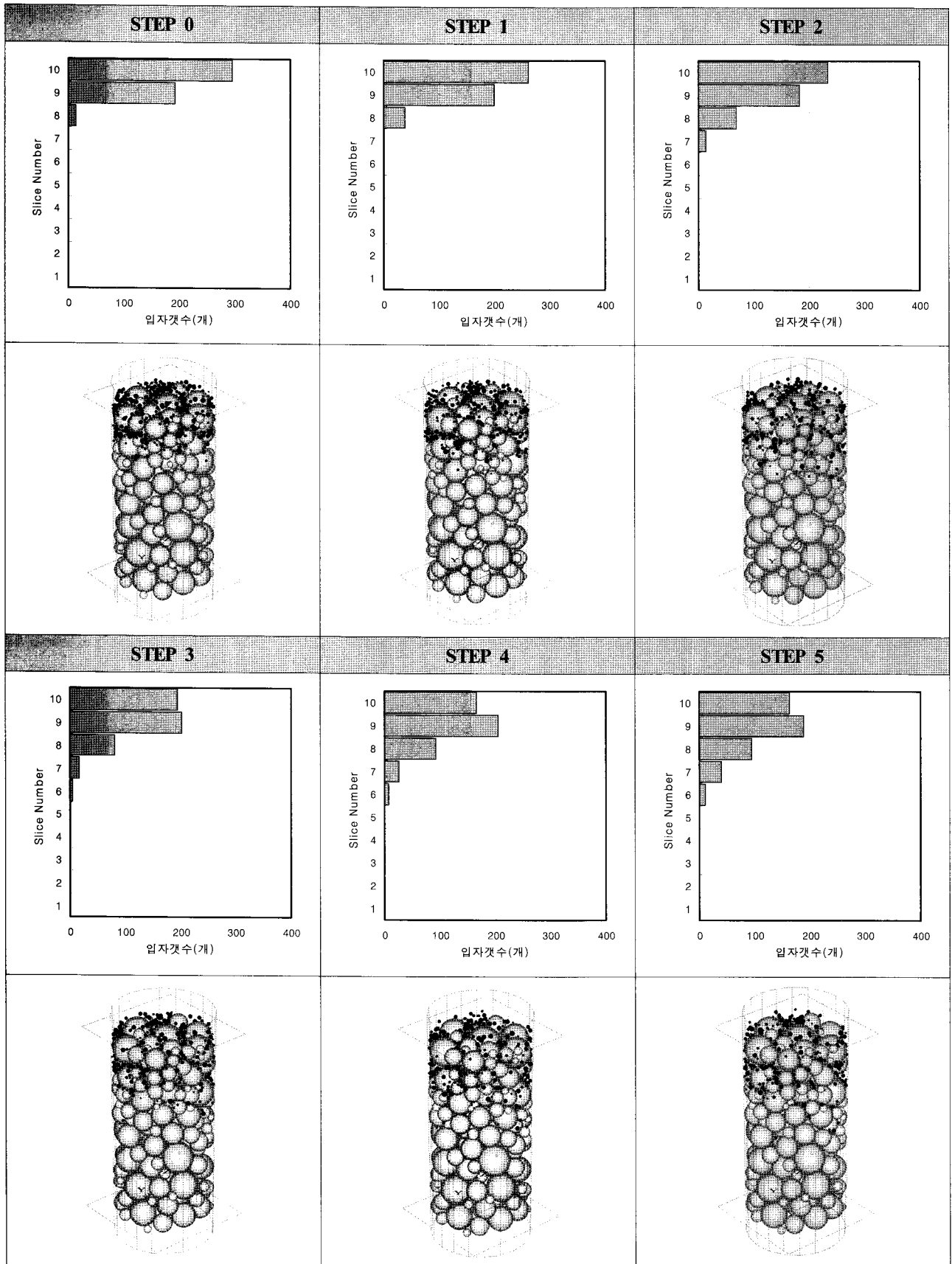


Fig. 5. Time-lapse snapshots of particle distribution in the numerical specimen. The average particle size of grout material is 0.15 times of the *in situ* soil particle. Slice number (vertical axis) in the diagram of particle-size distribution indicates the position of the slices of a cylinder (10: top, 1: bottom of the cylinder)

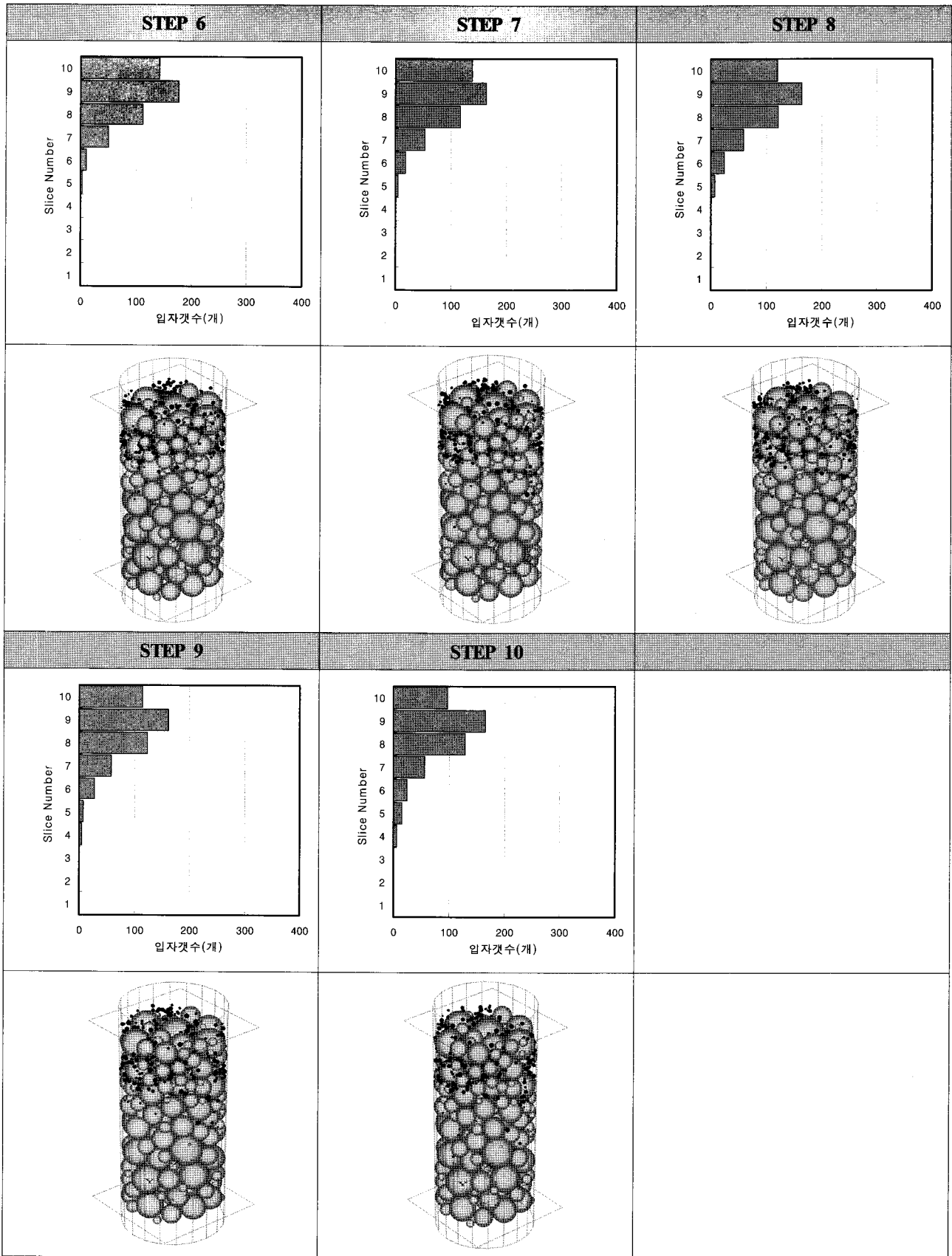


Fig. 5. continue

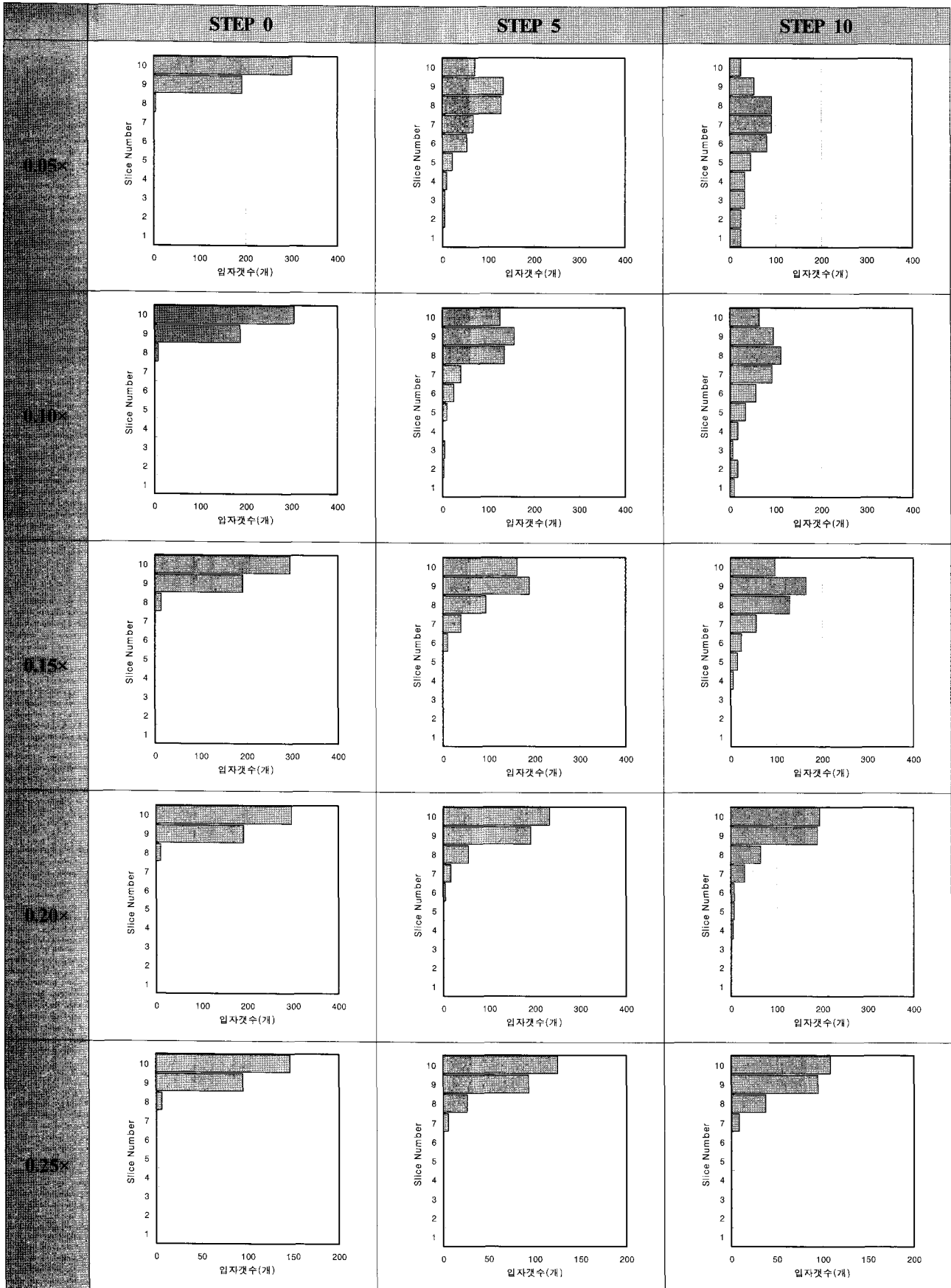


Fig. 6. Particle distribution diagrams for varying particle size of grout materials. The numbers in leftmost column represent the relative size of grout material with respect to the *in situ* soil particles (i.e., average radius of grout particles divided by average radius of the *in situ* soil particles)

#### 4. 그라우팅에 의한 강도증가 효과 해석

그라우팅 미세입자가 토층의 간극을 채우며 고화되면 토층 지반의 강도의 증가가 예상되는데 본 연구에서는 이를 수치실험으로 검증하는 작업을 시도하였다. Figure 7의 수치실험용 시료들은 각각 그라우팅 전후를 나타낸다. 수치실험의 조건으로 빠른 해석을 위하여 스케일이

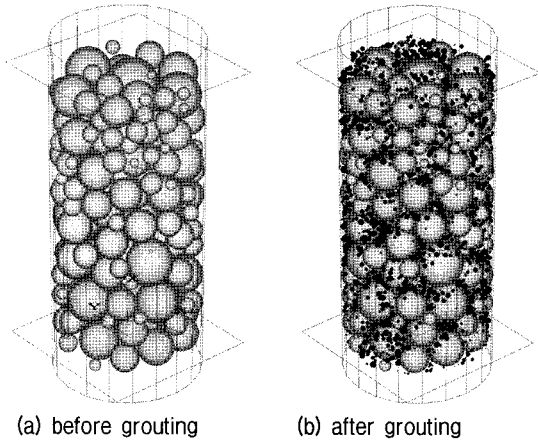


Fig. 7. Numerical specimen used for triaxial compression tests. (a) and (b) represent specimen before and after grouting, respectively. Darker colored particles in (b) represent grout material

확대된(up-scaling) 높이가 0.6m인 원통형의 벽 요소안에 평균 입자크기가 2.46cm이며 가우스 입자 분포의 특성(평균: 2.46cm, 표준편차: 1.2cm)을 갖는 229개로 구성된 토층이 만들어졌다. 그라우팅 미세입자의 경우에도 토층의 가우스 입자 분포의 특성을 가지며 평균 크기가 토층의 평균입자크기의 0.10배, 즉, 평균직경이 2.5mm, 입자들이 3장의 그라우트재의 이동 방법이 아닌 개별요소를 간극에 채우는 방법에 의해 만들어졌으며(표준편차: 1.2mm), 고화 작용을 모사하기 위해 그라우트 및 토층 입자들 간에 병렬결합이 적용되었으며, 개별요소들의 물성은 Table 1에 기재되어 있다.

Table 1. Micro-mechanical properties of numerical experiments designed for the verification of grouting effect

Micro properties	Values and Units
Density	2630 Kg/m <sup>3</sup>
Normal stiffness	1.2x10 <sup>9</sup> N/m
Shear stiffness	0.4 of normal stiffness value
Ball friction	0.5
Parallel-bond normal stiffness	1.6x10 <sup>10</sup> N/m
Parallel-bond shear stiffness	1.6x10 <sup>10</sup> N/m
Parallel-bond normal strength	1.0x10 <sup>8</sup> Pa
Pparallel-bond shear strength	1.0x10 <sup>8</sup> Pa

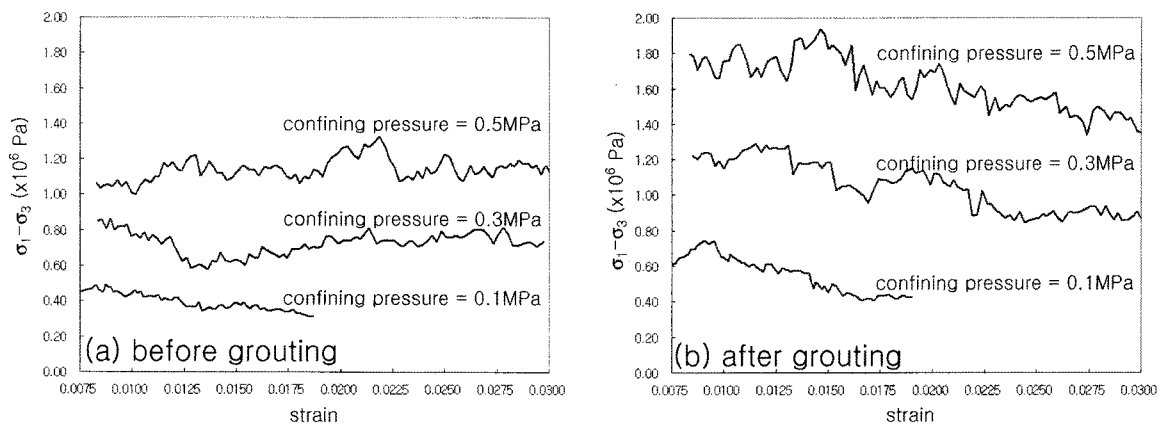


Fig. 8. Stress-strain curves from triaxial compression tests of numerical specimen. The elastic part in stress-strain curves is not shown

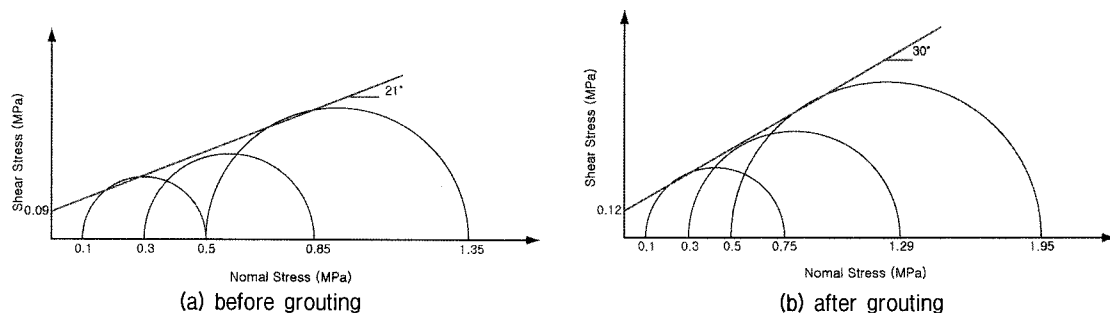


Fig. 9. Changes in mechanical properties before and after grouting



침투그라우팅 전과 후의 수치 시료에 대한 물성 실험을 봉압이 0.1MPa, 0.3MPa, 0.5MPa인 경우에 대하여 (Figure 8) 점착력과 내부마찰각의 증가를 확인하였다. Figure 9의 Mohr 원에서 도시된 바와 같이 그라우팅 전 수치 시료의 점착력과 내부마찰각은 각각 0.09MPa과 21°였는데, 그라우팅 이후 0.12MPa과 30°로 증가함이 관찰되었다.

## 5. 토의 및 고찰

본 연구에서는 PFC 수치실험을 통해 토층입자의 크기에 대한 그라우팅 입자의 상대적 크기가 변화할 때의 미세입자들의 이동 효율성과 그라우트재가 공극을 채울 때의 강도증가 효과에 대해 규명하였다. 각각의 수치 실험을 통해 정량적인 결과가 도출 되었지만 입자의 크기를 크게 만들어 놓은 업스케일링 조건에서 실험을 수행하였으므로 실험결과를 그대로 입자크기가 작은 계(system)에서 직접 적용하는 것은 불가능하기 때문에 본 연구의 의의는 경향성 파악에서 찾을 수 있다.

PFC는 힘과 변위를 계산하여 제안의 입자들의 정보를 계속 업데이트하기 때문에 해석 시간이 오래 걸리는 한계가 있다. 특히, PFC에서는 해석 한 스텝이 의미하는 물리적 시간(time in real physical sense per one calculation step)이 여러 요소 중 입자들의 크기에 비례하는 질량과 깊은 관계가 있으므로, 입자가 작아지면 작아질수록 한 스텝당의 물리적 시간이 같이 작아지게 되어 실제 그라우팅 상황만큼의 시간을 모델링하려면 현재의 가장 속도가 빠른 PC급 컴퓨터로는 불가능하다. 이와 같은 문제의 해결책으로 입자크기는 실제 입자크기를 사용하되 입자의 질량을 높이는 방법을 사용할 수도 있으나, 유체에 의해 그라우팅 미세입자가 이동할 때의 주된 근원인 드래그(drag force) 또한 영향을 받게 되어 여러 과정에 대한 시간 스케일링을 동시에 해야만 하는 어려움이 있다. 이와 같은 기술적, 이론적 어려움으로 인하여 본 연구에서는 PFC를 이용한 경향성 파악차원에서 업스케일링을 통해 연구가 진행되었기 때문에 연구결과를 현장에 적용할 때 많은 주의가 필요하다. 그러나, 현재의 PC 처리속도가 처음에 대중화된 PC의 속도에 비해 200배 정도 빨라졌고 앞으로도 이러한 추세가 계속되고, 아울러 다중 CPU들의 보급이 널리 이루어지게 되면, 병렬처리도 가능해져 실제 스케일의 해석도 조만간 가능할 것으로 예측된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 침투그라우팅시 미세입자의 이동 메카니즘과 미세입자들의 간극 충전 후 강도증가 효과를 알아보기 위하여 업스케일링 기법을 이용한 PFC3D 해석 및 수치실험을 수행하였다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 토립자에 대한 그라우팅 미세 입자의 상대적 입자크기가 0.05배에서 0.25배로 증가하면서 입자의 이동에 제한이 있음을 알 수 있었다. 0.20배 또는 0.25배의 그라우팅 미세입자의 경우 입자의 움직임이 거의 없었으며 이러한 현상은 원래 토립자들 간의 간극이 하나 또는 다수의 미세입자들에 의해 막히면서 일어났다. 또한 0.05배와 0.10배의 실험결과가 거의 유사하게 나타나 입자 크기의 감소에 의한 그라우팅 효과의 증진은 한계가 있는 것으로 판단된다.
- (2) 그라우팅 전과 후의 수치 시료에 대한 물성 실험을 수행한 결과 점착력과 내부마찰각이 증가하는 것으로 나타났다. 그라우팅 전 수치실험 시료에서 0.09MPa과 21°이던 점착력과 내부마찰각이 그라우팅 이후 각각 0.12MPa과 30°로 크게 증가하였다.
- (3) 현재 PFC3D 해석시간에 많은 한계가 있어 해석결과를 제체의 코어재에 직접 적용하는데 어려움이 있으나, 업스케일링 기법을 통한 연구결과는 침투그라우팅시 그라우팅 재료의 이동 및 보강효과의 경향성 파악에 유용하게 활용될 수 있으며 해석시간에 관련된 문제는 빠른 CPU가 만들어지면 곧 해결될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문 내용의 명확성을 높이기 위해 유익한 지적을 많이 해 주신 익명의 두 심사위원님께 감사드리며, 아울러 편집과 출간에 도움을 주신 학회사무국 강현욱 부장께도 감사드립니다. 논문작성시 토론을 통해 많은 도움을 준 학과 토질연구실의 동료들에게도 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 농업기반공사 (2001), 댐 그라우팅 설계 및 시공 실무 지침서, 농업기반공사.
2. 수자원공사 (2004), 댐설계지침, 수자원공사.

3. 한국지반공학회 (2005), 지반공학 시리즈 6 연약지반, 구미서관
  4. Bortal-Nafaa, S. and Gouvenot, D. (2003), Fine cement grout injection: discrete numerical modeling, *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods* (edited by Konietzky, H.), A.A. Balkema Publishers, Leiden, pp.165-172.
  5. Ewert, F.K. (1985), *Rock grouting with emphasis on dam sites*, Springer-Verlag.
  6. Kutzner, C. (1996), *Grouting of rock and soil*, A.A.Balkema Publishers, Rotterdam.
  7. Itasca Consultant Group (1995), *PFC 3D Manual, Version 1.1.*, Minneapolis.
  8. Park, E.S., Marin, C.D. and Christiansson, R. (2004), Numerical simulation of the discontinuous behavior of rock masses, *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods* (edited by Shimizu, Y., Hart, R. and Cundall, P.), A.A. Balkema Publishers, Leiden, pp.85-91.
  9. Shimizu, Y., Hart, R. and Cundall, P. (2004), *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, A.A. Balkema Publishers, Leiden, pp.435.
- (접수일자 2007. 9. 10, 심사완료일 2007. 11. 19)