

지반내 입자거동 및 흐름을 고려한 수압작용 모델링

Fluid Injection Simulation Considering Distinct Elements Behavior and Fluid Flow into the Ground

전 제 성¹ Jeon, Je-Sung

김 기 영² Kim, Ki-Young

Abstract

It is interesting to note that distinct element method has been used extensively to model the response of micro and discontinuous behavior in geomechanics. Impressive advances related to response of distinct particles have been conducted and there were difficulties in considering fluid effect simultaneously. Current distinct element methods are progressively developed to solve particle-fluid coupling focused on fluid flow through soil, rock or porous medium. In this research, numerical simulations of fluid injection into particulate materials were conducted to observe cavity initiation and propagation using distinct element method. After generation of initial particles and wall elements, confining stress was applied by servo-control method. The fluid scheme solves the continuity and Navier-Stokes equations numerically, then derives pressure and velocity vectors for fixed grid by considering the existence of particles within the fluid cell. Fluid was injected as 7-step into the assembly in the x-direction from the inlet located at the center of the left boundary under confining stress condition, $0.1MPa$ and $0.5MPa$, respectively. For each simulation, movement of particles, flow rate, fluid velocity, pressure history, wall stress including cavity initiation and propagation by interaction of fluid-particles were analyzed.

요 지

개별요소방법은 재료의 미시적 거동 및 불연속적 거동과 관련하여 지반공학 분야에서 그 활용이 증가하고 있으나, 기존 개별요소 방법들은 입자형태의 재료들간 상호작용을 위주로 연구 되었으며, 이는 지반공학 분야에 개별요소 방법을 제한적으로 적용하는 주요 원인이 되었다. 최근 기존 개별요소 방법에 흙, 암반 및 투수성 매질에서의 물 흐름을 고려한 수리연동 기법의 적용연구(Kawaguchi et al., 2003; Shimizu, 2004)가 진행되고 있다. 본 연구에서는 기존 개별요소방법에 수리연동 기법을 적용하여 수압조건별 지반의 공동생성 및 확장에 대한 수치해석을 실시하였다. 직사각형 해석요소 입자크기와 초기 간극률 조건에 대한 개별요소 및 경계면 생성 후, 서보 제어방법을 통한 경계면 응력조건을 구현하였다. 수리거동의 고려는 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 압력과 속도를 구한 후, 입자와 유수간의 상호작용을 풀어가는 방식(Tsuji, 1993)으로 수행하였다. 구속압 조건($0.1MPa$, $0.5MPa$)에 대하여 해석모델 중앙지점에 7단계로 증가되는 수평방향 유속을 재하하고, 재하지점 인근의 개별요소 이동 및 지점별 유량, 유속, 압력, 경계면 응력변화 등을 분석하였으며, 해석조건에 따라 개별요소와 수리영향의 상호거동을 통한 공동생성 및 확장, 한계압력 발생 등을 확인하였다.

Keywords : Cavity initiation, Distinct element method, Fluid coupling, Fluid injection, Fluid scheme, Numerical method

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

2 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KIWE, Korea Water Resources Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반공학분야에 있어 개별요소방법은 기존 연속체 개념의 수치해석 방법에서 구현하기 어려웠던 재료의 미시적 거동 및 불연속적 거동을 모델링할 수 있는 효과적인 방법으로서, 실제 지반공학적 문제에 이 방법을 적용하기 위한 많은 응용연구(Skinner, 1969; Staffield et al., 1988; Ting et al., 1989; Cundall et al., 1979, 2001)가 진행되어 왔다.

개별요소방법이 가장 활발하게 적용된 암반공학 분야에 있어서는 암반의 미시적 거동분석을 통한 파괴 메카니즘 연구(Owen et al., 2002) 및 암석과 절리암반의 강도, 변형특성 연구(Cho et al., 2004; 신중호 등, 2000; 박의섭 등, 2005), 수치실험실로서의 활용연구(Li et al., 2002) 등 다양한 분야의 연구가 진행되어 왔다.

또한 개별요소방법은 조립재료 및 락필재료를 대상으로한 지반공학분야에 그 활용성이 증가되고 있는데, 지반공학분야에의 응용방안 제시(Cundall, 1979, 2001)를 시작으로 조립재료의 미시적 강도특성(Ting et al., 1988, 1989), 조립재료의 형상 모델링 기법(Thomas et al., 1999), 실내시험 모델링을 통한 기초 지지력 연구(Hainbüchner et al., 2002), 대규모 락필재료에 대한 입도분포 생성 및 실내시험 모델링(전제성 등, 2006) 등 많은 분야에 그 적용이 증가되고 있다.

그러나, 기존의 개별요소방법은 입자형태의 재료들 간 상호작용을 위주로 개발되었으며, 이는 물의 영향이 미시적 혹은 전체적 거동에 큰 영향을 미치는 지반공학 분야에 있어 개별요소방법을 제한적으로 적용할 수밖에 없었던 근본 이유가 되었다.

최근들어 기존 개별요소방법과의 수리 연동해석 기법이 개발(Kawaguchi et al., 1992, 2003; Shimizu, 2004)되었으며, 이를 통해 개별요소해석에 수리문제를 접목시키는 연구가 시도되고 있다. 본 연구에서는 기존 개별요소방법에 수리연동 기법을 적용하여 수압조건별 지반의 공동생성 및 확장에 대한 모델링을 실시하였으며, 구속압 및 재하유속 조건에 대하여 재하지점 인근의 개별요소 이동 및 지점별 유량, 유속, 압력, 경계면 응력변화 등을 분석하였다.

2. 개별요소해석

2.1 해석모델

개별요소방법에 대한 수리연동 해석을 위해서는 기

본적으로 일정 해석영역을 설정하고 그 영역안에 임의의 직경범위에 대한 개별요소를 생성하여야 하며, 이들에 대한 미시 물성치를 부여하는 과정이 선행되어야 한다.

본 연구에 이용된 개별요소해석 프로그램은 PFC^{2D} (Itasca, 2004)로서, 본 프로그램은 각각의 독립적인 입자들로 전체 모델을 생성하게 되며, 각 입자간 접촉면에서의 하중-변위관계로 표현되는 접촉면 구성모델에 의해 입자 개개의 미시적 거동 및 전체적인 거동에 대한 해석을 수행하게 된다.

본 연구에서 적용한 해석모델은 길이 100mm, 높이 80mm의 직사각형 해석영역에 최소반경 0.5mm, 최대반경 0.8mm의 개별요소를 초기간극률 0.15 조건으로 생성하였다. 최종 개별요소 생성결과 및 전체적 해석모델은 그림 1과 같으며, 해석결과의 분석을 용이하게 하기 위하여 각 위치별 개별요소의 색을 다르게 선정하였다.

간극률 및 개별요소 크기를 고려한 적정 요소수는 식 (1)에 의해 결정되고, 최종 간극률 조건을 만족시키기 위해 식 (2)와 같은 요소확장계수(m)를 산정, 기존 생성된 개별요소들의 크기를 변경시키는 과정을 통해 초기 해석모델을 생성하였으며, 최종 생성된 개별요소는 5,123 개 이다.

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

여기서, N_p : 개별요소수(number of particles)

A : 전체 시료면적

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

n : 간극률

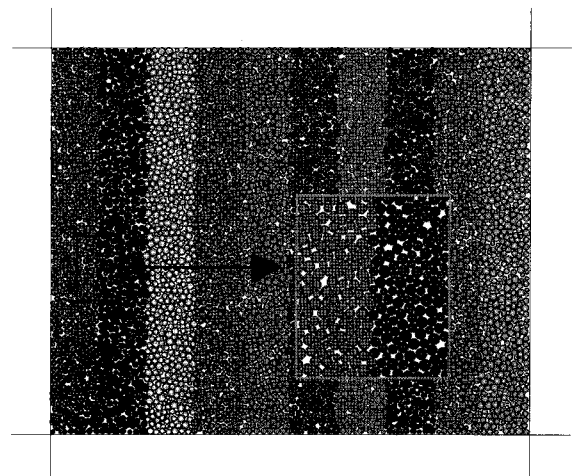


Fig. 1. Initial model for DEM

$$m = \sqrt{\frac{1-n}{1-n_0}} \quad (2)$$

여기서, n : 목표 간극률

n_0 : 현 요소생성 상태에 대한 간극률

해석영역 외곽에는 경계조건 구현을 위한 4개의 경계면(wall)을 생성하였으며, 그 길이는 구속응력 재현시의 서보 제어를 위해 약간의 여유를 두었다.

한편, 개별요소법에서는 일반적인 연속체 해석에서와 같이 미리 정해진 해석재료의 대표 물성치를 이용하는 것이 아닌, 각 입자요소들의 상호거동을 표현하는 미시 물성치를 이용하여 세부적인 역학거동을 해석하게 된다. 즉, 개별요소방법은 일반적인 연속체 해석과 달리 해석대상의 전체적 거동을 적절하게 표현할 수 있는 미시 물성치의 산정과정이 매우 중요하다.

Huang(1999)은 암반에 대한 미시물성치 산정을 포함하는 관련 연구를 수행하였으며, 본 연구에서는 기존의 연구결과를 이용하여 개별요소를 생성하였다.

본 연구에 적용된 개별요소와 경계면에 대한 구체적 미시물성치 값은 표 1 및 그림 2와 같으며, 이를 연속체 해석시의 특성치로 나타내면 $\phi = 40^\circ$, $E = 14.2 \text{ MPa}$, $\nu = 0.494$ 에 해당된다(Huang, 1999).

Table 1. Micro-parameters used for simulations

Microparameter	Value
Density of ball, $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	2,650
Normal stiffness, $k_n(\text{N}/\text{m})$	5.0×10^7
Shear stiffness, $k_s(\text{N}/\text{m})$	5.0×10^7
Friction coefficient, μ	0.84
Wall Stiffness reduction factor	1.0

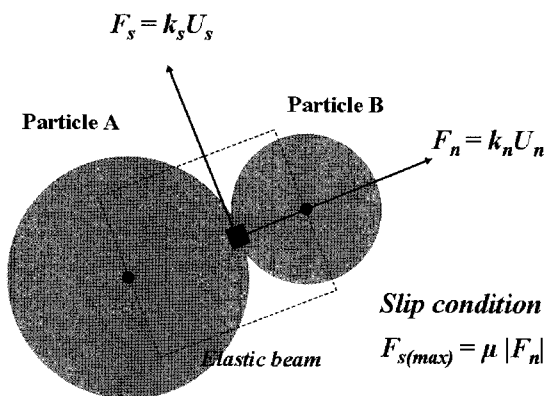


Fig. 2. Contact model

2.2 경계면 응력조건 구현

초기조건에 대한 개별요소 생성 및 그에 대한 평형조건이 만족된 후에는 수리연동 해석과정에서의 구속압 조건을 만족시키기 위한 경계면 응력조건 구현이 필요하다.

구속압 재하 모델링은 4개 외측경계면 개별요소에 특정 응력을 재하하는 응력 제어방법과 4개 경계면(wall)을 이동시켜가며 특정 응력조건에 대한 만족여부를 확인하는 변위 제어방법의 두 가지로 이루어 질 수 있다.

Cundall 등(1982)의 연구결과에 의하면, 응력 제어방법은 해석상 구현에 있어 손쉬운 것이 사실이지만, 해석과정중 일관된 구속압 재하가 불가능하고 해석중의 개별요소 이동 및 초기모델 영역 밖으로의 이탈현상 등으로 인하여 그 결과의 신뢰성 확보가 어려운 것이 사실이다.

본 연구에서는 변위 제어방법을 통해 소정의 구속압 조건을 구현하였다. 일단 4개 경계면중 수평방향 경계면 2개와 수직방향 경계면 2개를 특정 속도로 이동시킨 후 그 시점에서 각 경계면에 작용하는 수직 및 수평방향 응력을 산정하였다. 본 연구에 사용된 프로그램에서는 경계면에 작용하는 응력을 직접적으로 산정할 수 없으므로, 경계면에 작용하는 총 하중과 시점별 경계면 길이를 고려하여 경계면 응력을 산정하였다. 이렇게 산정된 방향별 경계면 응력과 재하하고자 하는 방향별 구속압의 크기를 비교하여 그 차이가 소정의 허용범위(α)를 만족하지 않으면 다시 경계면의 속도를 식 (3) 및 식 (4)에 의해 산정하고 동일한 계산과정을 반복하였다.

이러한 일련의 과정은 수리연동 해석시의 전 해석단계별에 있어 서보-제어 방식으로 수행되었다.

$$G = \frac{\alpha A}{k_n^{(w)} N_c \Delta t} \quad (3)$$

여기서, α : 측정응력 및 구현응력에 대한 허용범위
 A : 경계면 면적
 N_c : 경계면과 개별요소의 접촉점 수
 $k_n^{(w)}$: 접촉면에서 경계면과 개별요소의 평균 강성
 Δt : 한단계 해석단계 시간

$$\dot{u}_w = G(\sigma_m - \sigma_r) = G \Delta \sigma \quad (4)$$

여기서, \dot{u}_w : 경계면의 이동속도
 σ_m : 경계면 이동후 경계면에 작용하는 측정 응력
 σ_r : 재하하고자 하는 구속응력

그림 3과 그림 4는 $\sigma_{xx} = 0.1 MPa$, $\sigma_{yy} = 0.1 MPa$ 의 구속압 조건을 구현하기 위한 반복 서보-제어 과정에서의 경계면 변형률 및 응력값을 나타낸 것이다.

그림 3에서의 변형률은 식 (5)에 의해 산정되었으며, 결과에서 알 수 있듯이, 초기 해석단계에서는 별도의 경계면 응력상태가 발현되지 않았으므로 초기 경계면의 이동이 큰 폭으로 진행되었으며, 방향별 경계면 이동은 증가와 감소를 반복하고 이러한 반복과정을 통해 경계면 응력은 일정한 값에 수렴하고 있다.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{0.5(l_0 + l)} \quad (5)$$

여기서, l_0 : 각 방향별 초기 모델의 길이

l : 서보-제어과정에 따른 현재의 각 방향별 모델 길이

그림 4는 이러한 서보-제어 과정에서 측정된 경계면 응력값을 나타낸다. 초기의 경계면 응력값은 큰 폭으로 증가와 감소를 반복하고 있으나, 위에서의 서보-제어 과정을 통해 그 폭은 점차 감소하게 되며, 최종적으로는

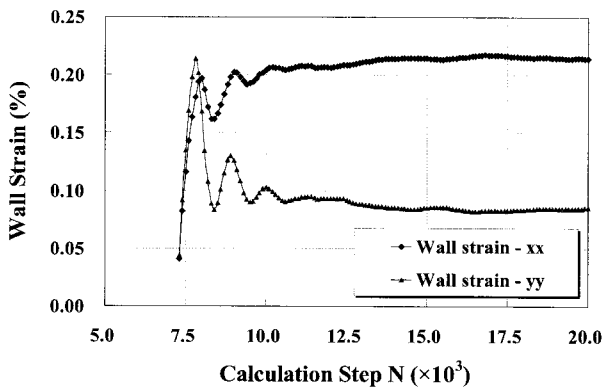


Fig. 3. Wall strain with step during servo-control procedure

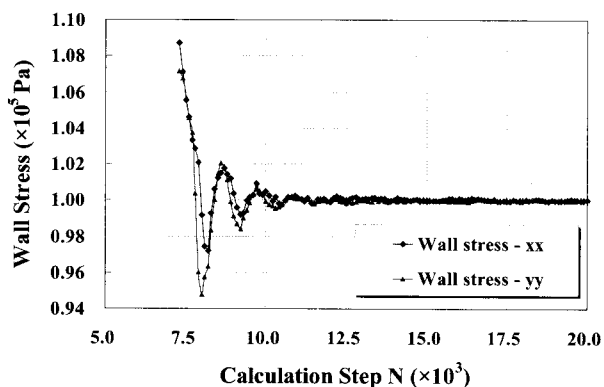


Fig. 4. Wall stress with step during servo-control procedure

구현하고자 하는 방향별 구속압 $0.1 MPa$ 을 만족하게 된다. 이러한 경계면 응력조건의 구현과정은 수리연동 해석시의 모든 과정에서도 동일하게 수행되어 항상 일정한 구속압 조건을 유지시키게 된다.

3. 개별요소방법에 대한 수리연동 해석

3.1 수리거동 및 입자유동의 상호작용

개별요소해석에 수리거동을 접목시키는 가장 일반적인 방법은 오일러인 좌표계에서 압력과 속도를 계산하기 위한 연속방정식을 풀어가는 것이며, 이때 Darcy 방정식은 유량과 속도의 선형적 관계를 표현하는데 사용되어진다. 한편 개별요소방법에서의 입자유동은 라그랑지안 방법을 통해 유도되며, 입자유동으로 인한 입자 재배열은 압력의 변화를 초래하여 결과적으로는 입자에 작용하는 체적력을 변화시키게 된다.

Tsuji 등(1993)은 라그랑지언 및 오일러언 방법을 혼합한 적용기법으로서, 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 풀고 이를 통해 수리거동에 의한 압력과 속도를 구한 후, 수리거동시의 입자와 유수간의 상호작용을 고려하는 방법을 제안하였으며, 본 연구에서도 이러한 방법으로 입자유동 및 수리거동에 대한 연동해석을 실시하였다.

입의 흐름조건에 대해 3차원 미소요소내 개별요소에 작용하는 하중은 식 (6)과 같이 표현되며, 3차원 조건에서의 간극률 정의를 도입한 입의방향에 대한 하중은 식 (7)로 나타내어진다.

$$f_{dsum} = \sum_{i=1}^{n_p} f_{dx} = -f_{intx} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{dp}{dx} \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{n_p} d_{pi}^3 \quad (6)$$

여기서, $f_{d\Sigma}$: 작용력 합계

f_{intx} : 단위체적내 유체와 입자들간의 상호작용력

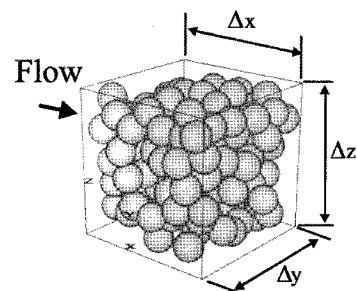


Fig. 5. Fluid flow through particle assembly

d_{P_i} : 개별요소들의 직경
 n_p : 단위체적내의 개별요소수
 $\frac{dp}{dx}$: x방향에 대한 압력경사

$$f_{d_i} = -\left(\frac{f_{int_j}}{1-n} + \nabla P_j\right) \frac{\pi}{6} d_{P_i}^3 \quad (7)$$

여기서, i : 각각의 개별요소(1~np)
 j : 각 방향(x, y, z)
 n : 간극률

한편, 다공체 통과시의 압력경사를 표현하는 경험식으로서 Darcy 및 Ergun의 방정식을 들 수 있다. Darcy의 방정식은 레이놀즈 수가 1에서 10범위인 층류(laminar flow)에 적용이 가능하다고 알려져 있으며, 보다 큰 레이놀즈 수를 나타내는 흐름에서의 압력경사를 평가하기 위한 경험식으로서 Ergun의 방정식이 이용되고 있다.

본 연구에 이용된 해석프로그램(PFC^{2D})에서는 기본적으로 Ergun의 방정식을 이용하되, 투수계수와 간극률의 상관식인 Kozeny-Carman 방정식을 적용하고 있으며, 이에 대한 최종 압력경사 방정식은 식 (8)과 같다.

또한 압력경사는 개별요소와 유체의 상호작용을 통해서만 발생한다고 가정하면 식 (6)에서의 유체와 입자들간의 상호작용력은 식 (9)와 같이 표현되며, 식 (8)과 식 (9)를 통해 최종적인 해를 얻을 수 있다.

$$\nabla P_j = \left[150 \frac{(1-n)^2}{n^2 (d_p)^2} \nu_f + 1.75 \frac{(1-n)\rho_f}{n d_p} |\bar{v}_j - u_j| \right] (\bar{v}_j - u_j) \quad (8)$$

여기서, ν_f : 유체점성
 ρ_f : 유체밀도
 \bar{v}_j : 해석요소의 평균속도
 u_j : 간극을 통한 침투유속

$$f_{int_j} = n \nabla P_j \quad (9)$$

3.2 해석모델

수리연동해석에 이용된 모델은 초기조건 및 특정 구속압조건을 만족시키는 개별요소모델을 이용하되, 특정 위치에서의 임의 유속 재하조건에 대한 수리연동 모델을 적용하였으며, 기본 모델에 수리연동해석을 위한 수리연산 요소망을 그림 6과 같이 x-방향 17개($i=1\sim 17$), y-방향 15($j=1\sim 15$)개로 구성하였다. 또한 모델 외곽에는

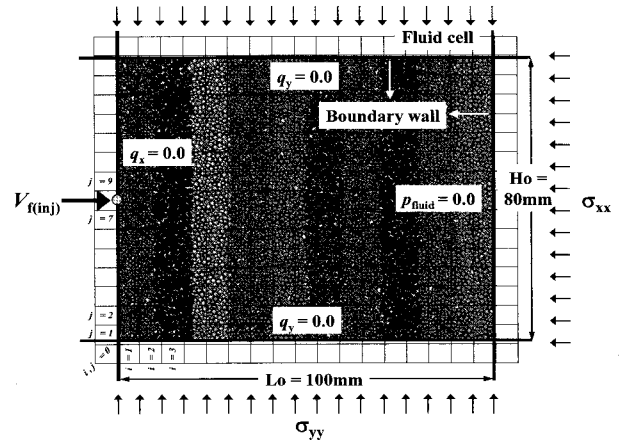


Fig. 6. Fluid cells with an assembly of particles and boundary condition

수리연동 해석시의 경계조건 부여를 위한 별도의 요소망($i=0, i=18, j=0, j=16$)이 배치되어 있다.

유속 재하는 기본적으로 전체 모델의 좌측 경계면의 중앙부 1개 지점에 적용되었으며, 유속의 크기($v_{f_{inj}}$)를 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210m/s로 증가시켜며 해석을 실시하였다. 유속의 크기는 일반적인 수로터널 내부유량 및 라이닝 손상면적 등을 고려하여 선정하였다. 각 재하 유속 단계별로 0.001초의 흐름시간 까지 해석을 실시하였는데, 이는 입자유동에 대한 해석은 제외된 순수 흐름해석에 대한 시간을 나타낸다. 본 연구에서는 흐름 해석을 위한 시간증분을 5.0e-6초로 고려하여 해석을 실시하였다. 또한 유속 재하 위치를 중앙부 근처 3개 부위에 분산시키되 유속크기를 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70m/s 조정하여 해석을 실시하였는데, 이 두 경우에 있어 각 유속크기별 작용 유량이 동일하도록 유속을 조정하여 적용하였다.

해석모델의 구속압($\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$)은 0.1 MPa, 0.5 MPa의 두가지 경우에 대해 해석을 실시하였다. 수리거동 해석에 대한 경계조건을 살펴보면, 우측 경계면에서의 간극수압은 항상 0.0으로 유지하고 그 이외의 경계면은 불투수층으로 고려하여 수평방향으로의 흐름현상을 유도하였다. 본 해석시 유체의 밀도는 1,000(kg/m³), 점성은 1.0×10⁻³(Pa.s)로 고려하였다.

3.3 해석결과

본 연구에서는 각 경우별 수리연동해석을 통해 해석영역내 위치별 침투유량 및 수압, 침투유속, 흐름벡터 변화 등을 살펴보았으며 유속재하 부근에서의 공동생

성과 확장, 이로 인한 각 결과의 변화를 분석하였다.

그림 7~그림 10은 구속압 0.5 MPa 조건에서, 중앙부 1개 지점($i=0, j=8$)에 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210m/s 크기의 유속($v_{f\ inj}$)을 재하했을 경우에 대한 수리거동 결과를 나타낸다.

그림 7은 각 재하 유속의 크기와 시간별에 대한 특정 지점에서의 유량 변화를 나타낸 것으로서, 유량은 $i=2, 10, 17$ 지점에 대하여 수직방향 전단면($j=1 \sim 15$)에서의 평균 값을 산정하였다. 결과에서 알 수 있듯이, 유속 재하지점에서 가까운 $i=2$ 지점에서의 유량이 상대적으로 먼 거리에 위치하는 $i=10, 17$ 지점의 유량보다 다소 크게 나타나고 있으며, $i=10, 17$ 두 지점의 값은 거의 동일한 결과를 보이고 있다. 또한 각 지점별 유량은 재하되는 유속 크기의 증가형태에 비례하여 증가하고 있으며, 그 증가폭도 일정함을 알 수 있다.

그림 8~그림 10은 $i=1, 2, j=8$ 지점에 해당하는 4개의 수리연산 요소망에 대한 유속 및 압력, 경계면 응력의 평균값 변화를 나타낸다.

그림 8에서는 흐름방향(수평방향)에 대한 유속 v_x 및 각 방향별 유속의 벡터크기 합 v_{xy} 를 나타내었다. 각 재하 유속단계별로 측정유속이 증가하고 있으며, 동일 유속단계에 있어서는 일정한 값의 유지형태를 보이고 있다. 그러나, $v_{f\ inj}$ 가 150m/s 이상인 경우부터는 초기 재하유속의 급증으로 인한 입자유동 및 유수와 입자들간의 상호작용 영향으로 인해 약간의 초기 증감현상이 나타난 후 점차 안정상태로 수렴하는 것을 알 수 있다.

그림 9는 각 재하유속 단계별 압력변화를 나타낸 것으로서, 재하 유속의 크기가 증가한 바로 그 시점에서는 순간적 유속증가로 인해 과도한 압력이 생성되지만, 이로 인한 입자유동이 발생한 후부터는 원상태의 안정적 값에 수렴하는 것을 알 수 있다.

그림 10은 모든 해석과정에서의 경계면 응력을 나타낸 것으로서, 각 단계별로 재하 유속이 증가함에 따라 일정한 구속압 조건을 유지하기 위한 서보 제어방식의 경계면 변위속도가 발생하게 된다. 유속 재하 시점에서는 순간적 최대 경계면 응력이 발생하고 이로 인한 큰

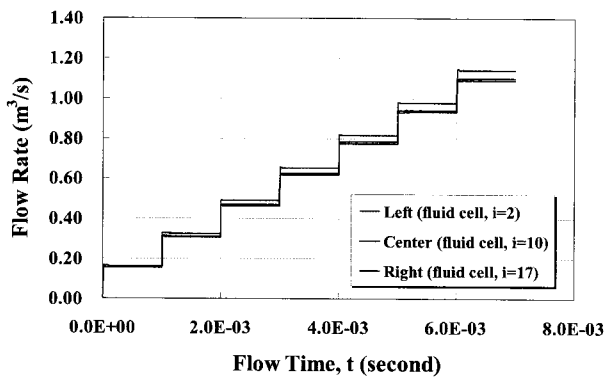


Fig. 7. Flow rate history for confining stress 0.5 MPa and the injection velocities, $v_{f\ (inj)}$ =30, 60, 90, 120, 150, 180, and 210 m/s

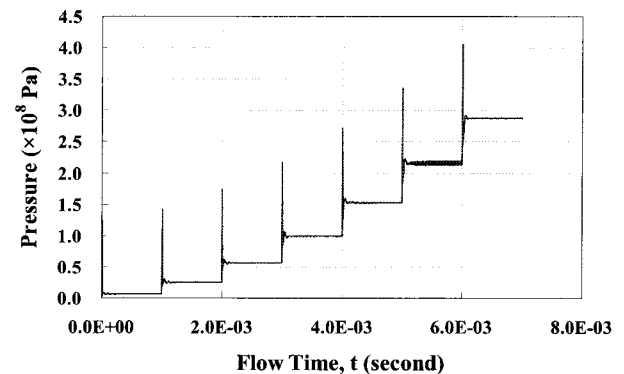


Fig. 9. Pressure history for confining stress 0.5 MPa and the injection velocities, $v_{f\ (inj)}$ =30, 60, 90, 120, 150, 180, and 210 m/s

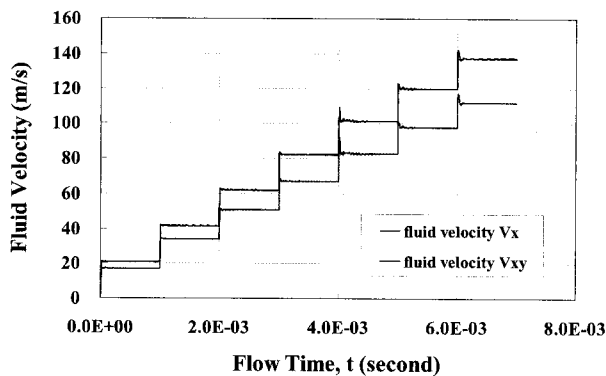


Fig. 8. Flow velocity history for confining stress 0.5 MPa and the injection velocities, $v_{f\ (inj)}$ =30, 60, 90, 120, 150, 180, and 210 m/s

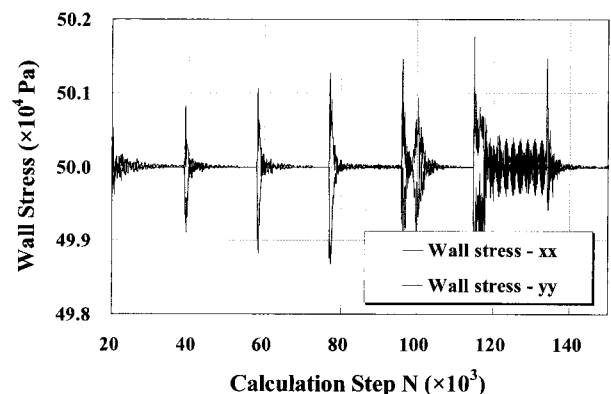


Fig. 10. Confining stress history by servo-control for confining stress 0.5 MPa and the injection velocities

경계면 변위속도가 가해지므로 경계면 응력은 큰 폭으로 증감을 반복하게 된다. 그 증감폭은 해석과정을 통해 급격히 감소하게 되며, 최종적으로는 $0.5 MPa$ 의 일정한 구속압 조건을 만족시키고 있음을 알 수 있다.

모든 해석결과에서 알 수 있듯이, 모든 재하 유속단계에 있어 안정된 흐름상태를 유지하고 있으며, 이는 그림 11에서 보듯이, 유속 재하가 발생하더라도 $0.5 MPa$ 의 구속압 효과로 인해 별다른 개별요소 유동이 발생하지 않음을 나타낸다.

그림 12~그림 15는 초기 개별요소 및 수리거동에 대한 모든 해석조건은 동일하게 하되, 구속압을 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0.1 MPa$ 로 적용시킨 해석결과를 나타낸다.

그림 12는 재하 유속의 크기가 $60m/s$, $120m/s$, $180m/s$ 인 경우에 대하여, 유속 재하지점 인근의 개별요소 유동상태를 나타낸 것으로서, 재하 유속의 크기가 $60m/s$ 의 경우는 별다른 개별요소 유동이 나타나지 않지만 그 크기가 $120m/s$ 로 증가하면서 유속 재하지점을 중심으로 공동이 발생하기 시작함을 알 수 있다. 재하 유속의 크기가 더욱 증가함에 따라 공동은 더욱 확장되며, 이러한

공동발생 및 확장으로 인해 유량, 유속, 압력 등은 그림 7~그림 9와 다른 양상을 나타내게 된다.

재하 유속이 작은 단계에서의 유량은 일정한 양상을 보이며, 그림 13에서 보듯이, 작은 규모의 초기 공동이 생성되기 시작하는 재하 유속 $120m/s$ 단계에서도 유량의 증가는 크지 않게 나타나고 있다. 그러나 이 시점에서의 재하 초기 유량변화를 살펴보면 소폭의 증감이 나타나고 있으며, 이는 개별요소의 부분적 유동이 발생함을 의미한다. 반면 재하 유속이 $180m/s$ 를 넘어서부터 유량은 급격히 증가함을 알 수 있는데, 이때는 기존의 초기 공동이 상당한 규모로 확장되는 단계이다.

재하 유속 $210m/s$ 단계에서는 재하 직후 일시적 유량의 급상승이 보이지만, 확장된 공동의 추가 공동확장으로 인한 추가 유량상승 없이 최종 유량은 기존 $180m/s$ 단계와 비슷한 값으로 수렴하게 된다.

유속의 경우도 유량과 마찬가지로 공동이 생성되면서 그 크기가 증가하기 시작함을 알 수 있는데, 그 크기는 공동확장이 최고조에 달하면서 추가적으로 증가함을 알 수 있다. 반면 압력의 경우는, 공동이 없거나 초기

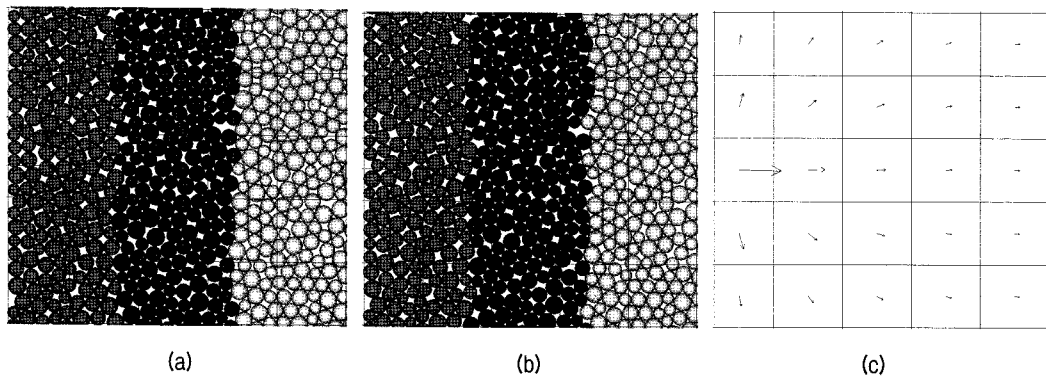


Fig. 11. Cavity propagation for confining stress $0.5 MPa$ at the fluid injection velocities: (a) $v_{f(inj)} = 60m/s$, (b) $v_{f(inj)} = 180m/s$, and (c) fluid vector

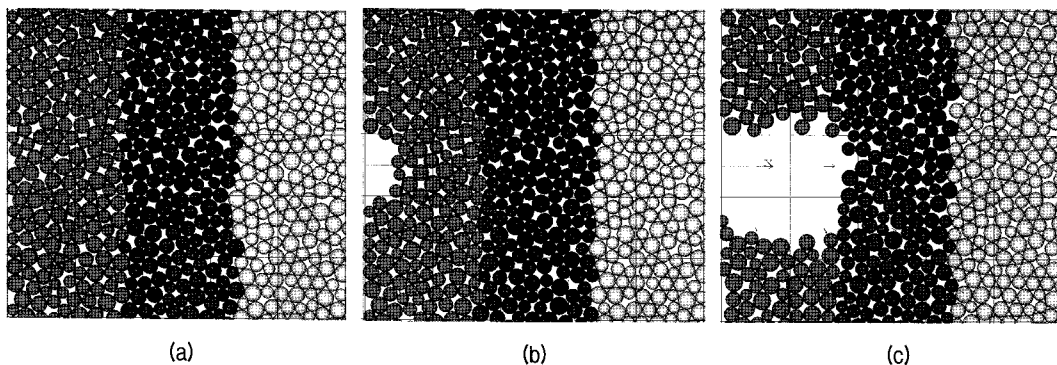


Fig. 12. Cavity propagation for confining stress $0.1 MPa$ at the fluid injection velocities: (a) $v_{f(inj)} = 60m/s$, (b) $v_{f(inj)} = 120m/s$, and (c) $v_{f(inj)} = 180m/s$

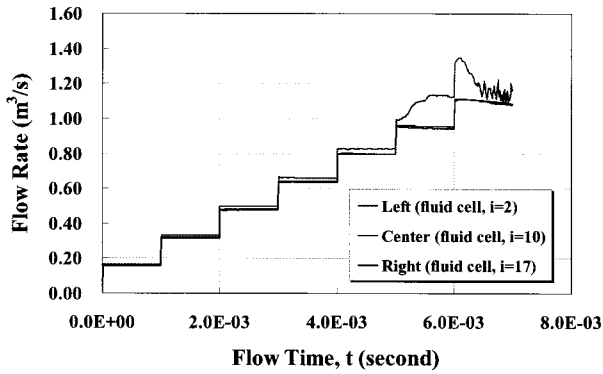


Fig. 13. Flow rate history for confining stress 0.1 MPa and the injection velocities, $v_{f(inj)}$ = 30, 60, 90, 120, 150, 180, and 210 m/s

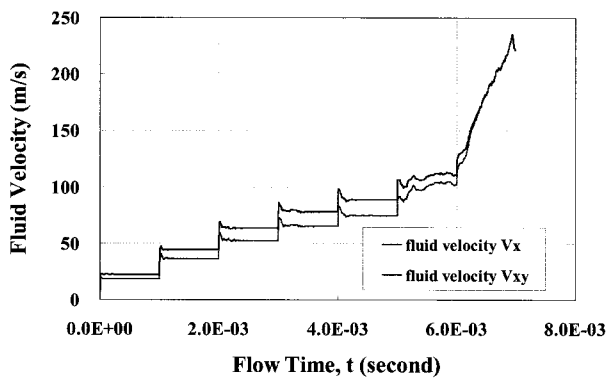


Fig. 14. Flow velocity history for confining stress 0.1 MPa and the injection velocities, $v_{f(inj)}$ = 30, 60, 90, 120, 150, 180, and 210 m/s

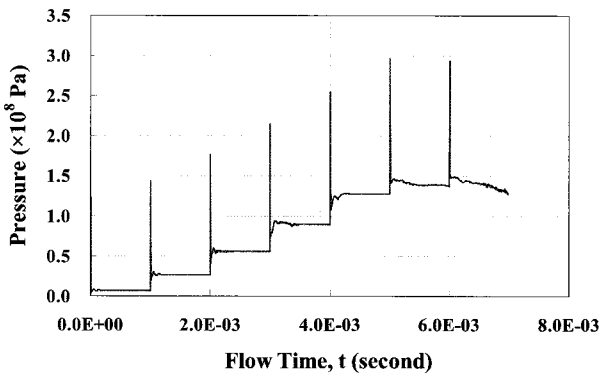


Fig. 15. Pressure history for confining stress 0.1 MPa and the injection velocities, $v_{f(inj)}$ = 30, 60, 90, 120, 150, 180, and 210 m/s

공동생성 단계에서는 일정한 압력발생을 나타내지만, 공동이 확장됨에 따라 압력이 감소함을 알 수 있다.

즉, 초기 공동이 없었던 상태에서부터 재하 유속이 증가함에 따라 국부적 공동이 생성되기 시작되는데, 이때는 유량 및 유속, 압력에 있어 커다란 변화를 수반하지 않는다. 이때의 공동을 역학적으로 안정한 상태의 공동발

생 단계라고 한다면, 재하 유속의 지속적 증가에 따른 추가 공동확장은 유량, 유속, 압력 등의 급격한 변화를 초래하며 이 단계를 역학적으로 불안정한 상태의 공동 발생 단계라고 표현할 수 있다.

4. 결론

입자요소간 상호작용을 모델링하는 개별요소기법에 수리거동을 접목시키는 연동해석 기법은 지반공학 분야에 개별요소 방법의 적용을 확장시킬 수 있는 주요 내용이라 할 수 있다. 본 연구에서는 직사각형 해석 요소망을 대상으로 구속압 및 유수 재하속도 조건별 개별 요소에 대한 수리연동 모델링을 수행하였다.

특정 속도로 경계면을 이동시켜가는 변위제어 방식을 통해 전체 해석과정에서의 일정 구속압 유지가 가능하였으며, 수리연동 해석에서도 구속압 효과로 인한 압력변화 및 유속변화, 유량변동 등을 확인할 수 있었다.

구속압을 0.1MPa, 0.5MPa로 달리한 조건에 대해, 해석모델 좌측 중앙지점에서 7단계로 수평유속을 증가시켜가며 유수 재하를 실시한 결과, 0.5MPa 구속압 조건에서는 재하유속($v_{f(inj)}$) 150m/s 부터 유수작용으로 인한 초기 입자유동이 발생되지만, 공동의 초기생성으로는 발전되지 못했으며, 지점별 유량 및 유속, 압력 등도 일정한 값에 안정적으로 수렴하였다. 반면, 동일한 조건에 대하여 구속압을 0.1MPa로 적용시킨 경우는 재하유속($v_{f(inj)}$)이 120m/s를 넘어서면서 소폭의 유량증가를 동반하며 초기 공동이 발생하기 시작하였다. 재하유속 180m/s 이상에서는 기존 초기공동의 확장으로 인한 일시적 유량 급상승 및 유속증가가 발생하였으며, 개별요소와 수리작용의 상호거동에 대한 압력은 감소하는 형태를 나타내었다. 추가적인 유속증가 단계에서는 더이상의 유량증가 없이 전단계에서의 유량에 수렴하는 결과를 보이는 것으로 나타났으며, 공동확장 효과로 인해 유속은 큰 폭으로 증가하였고, 압력은 재하유속 180m/s 단계에 비해 큰 폭으로 감소하였다.

본 연구에서는 기존 개별요소 방법에 수리연동 기법이 적용된 모델링을 수행함으로써, 구속압 및 수압조건에 따른 지반내 입자유동과 공동생성 및 확장, 유량 및 유속 변화 결과 등을 통해 공동생성이 발생하는 한계 압력 등을 예측할 수 있었으며, 이는 수리연동 해석기법이 지반 재료에 대한 미시 물성치 산정과정을 통해 다양한 지반 공학적 분야에 적용 가능성을 의미한다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 박의섭, 류창하 (2005), "PFC2D를 이용한 질리암반의역학적 물성 평가연구", *한국암반공학회지*, Vol.15, No.2, pp.119-128.
2. 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.
3. 전제성, 김기영, 신동훈 (2006), "개별요소법에 의한 락필재료의 대형삼축압축시험 모델링", *한국지반공학회논문집*, 제22권, 10호, pp.111-120.
4. 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.
5. 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 6th NARMS Conference, Houston, June 2004)*. D. P. Yale, S. M. Willson and A. S. Abou-Sayed, Eds. Paper no. ARMA/NARMS 04-483.
6. Cundall, P.A., A. Drescher and O.D.L. Strack (1982), "Numerical experiments on granular assemblies; Measurements and observations", in *Deformation and failure of granular materials*, Rotterdam: A.A. Balkema, pp.355-370.
7. 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
8. Cundall, P.A., and Strack, O.D.L. (1979), "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", *Geotechnique*, 29, pp.47-65.
9. 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.
10. Huang, H. (1999), "Discrete element modeling of tool-rock interaction", Ph.D. thesis, University of Minnesota.
11. Itasca Consulting Group, Inc. (2004), *PFC2D User's Guide & Fish in PFC2D*, Minneapolis, Minnesota
12. Kawaguchi, T., Tanata, T. and Tsuji, Y. (1992), "Numerical simulation of fluidized bed using the discrete element method", *JSME*, Vol.58, No.551, pp.79-85.
13. Kawaguchi, T. (2003), "Discrete particle simulations of gas-fluidized bed", Ph.D. Thesis, Osaka University.
14. 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.
15. 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.
16. Shimizu, Y. (2004), "Fluid coupling in PFC^{2D} and PFC^{3D}", in *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods-2004: Proceeding of the 2nd international PFC symposium, Kyoto, Japan*, Y. Shimizu, R.D. Hart and P.A. Cundall, Eds. A. A. Balkema, Lisse, pp.3-12.
17. Skinner, A.E. (1969), "A note on the influence of interparticle friction on the shearing strength of a random assembly of spherical particle", *Geotechnique*, Vol.19, No. , pp.150-157.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Tsuji, Y., T. Kawaguchi and T. Tanata (1993), "Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed", *Power Tech.*, Vol.77, pp.79-87.

(접수일자 2007. 11. 23, 심사완료일 2008. 1. 28)