수압작용에 따른 지반내 공동생성 및 수리거동에 대한 개별요소해석

Distinct element simulation of cavity development and fluid behavior caused by fluid injection

전제성[1], Je-Sung Jeon, 김기영[2], Ki-Young Kim, 김재홍[2], Jae-Hong Kim, 이종욱[2], Jong-Wook Lee

[1] 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, Korea Water Resources Corporation, KIWE, Principal Researcher
[2] 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Korea Water Resources Corporation, KIWE, Senior Researcher

SYNOPSIS : 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 Navior-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 flulid-paricles were analyzed.

Keywords : distinct element method, fluid coupling, numerical method, cavity initiation, fluid injection

1. 서 론

기존의 개별요소방법은 입자형태의 재료들간 상호작용을 위주로 개발되었으며, 이는 물의 영향이 미시적 혹은 전체적 거동에 큰 영향을 미치는 지반공학적 분야에 있어 개별요소방법을 제한적으로 적용할 수 밖에 없었던 근본 이유가 되었다. 최근들어 기존 개별요소방법과의 수리 연동해석 기법이 개발되었으며, 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. 개별요소 수치모델

2.1 초기 수치모델 생성

본 연구에 이용된 개별요소해석 프로그램은 PFC[2D](Itasca, 2004)로서, 본 연구에서는 길이 100mm, 높이 80mm의 직사각형 해석영역에 최소반경 0.5mm, 최대반경 0.8mm의 개별요소를 초기간극률 0.15 조건으로 생성하여 초기 수치모델을 구성하였다. 최종 개별요소 생성결과 및 전체적 해석모델은 그림 1과 같으며, 해석결과의 분석을 용이하게 하기 위하여 각 위치별 개별요소의 색을 다르게 선정하였다. 간극률 및 개별요소 크기를 고려하여 적정 요소수를 산정하였으며, 최종 간극률 조건을 만족시키기 위해 요소확장계수를 산정하고 기존 생성된 개별요소들의 크기를 변경시키는 과정을 통해 초기 해석모델을

생성하였는데, 최종 생성된 개별요소는 5,123개 이다. 해석영역 외곽에는 경계조건 구현을 위한 4개의 경계면(wall)을 생성하였으며, 그 길이는 구속응력 재현시의 서보 제어를 위해 약간의 여유를 두었다. 본 연구에 적용된 개별요소와 경계면에 대한 구체적 미시물성치 값은 표 1과 같다.

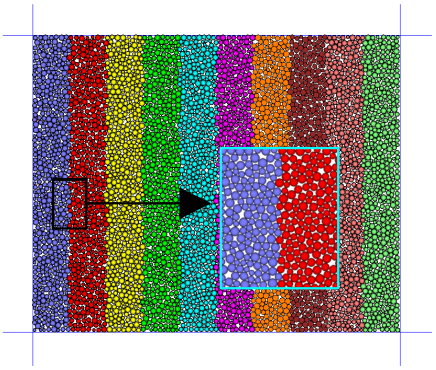

그림 1. 초기 개별요소 수치모델

표 1. 개별요소해석시의 미시 물성치

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

개별요소해석에 수리거동을 접목시키는 가장 일반적 방법은 오일리언 좌표계에서 압력과 속도를 계산하기 위한 연속방정식을 풀어가는 것이며, 이때 Darcy 방정식은 유량과 속도의 선형적 관계를 표현하는데 사용되어 진다. 한편 개별요소해석에서의 입자유동은 라그랑지안 방법을 통해 유도되며, 입자유동으로 인한 입자 재배열은 압력의 변화를 초래하여 결과적으로는 입자에 작용하는 체적력을 변화시키게 된다. Tsuji 등(1993)은 라그랑지언 및 오일리언 방법을 혼합한 적용기법으로서, 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 풀고 이를 통해 수리거동에 의한 압력과 속도를 구한 후, 수리거동시의 입자와 유수간의 상호작용을 고려하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 기존의 개별요소해석 프로그램인 PFC^{2D}에 적용되었다. 본 연구에서는 개별요소법의 수리거동 해석을 위해 PFC^{2D}를 이용하였다.

2.2 경계면 응력조건 구현

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. 해석중 산정된 방향별 경계면 응력과 재하하고자 하는 방향별 구속압의 크기를 비교하여 그 차이가 소정의 허용범위(α)를 만족하지 않으면 다시 경계면의 속도를 산정하고 동일한 계산과정을 반복하였다. 이러한 일련의 과정은 수리연동 해석시의 전 해석단계별에 있어 서보-제어 방식으로 수행되었다. 그림 2와 그림 3은 $\sigma_{xx} = 0.1\,MPa$, $\sigma_{yy} = 0.1\,MPa$의 구속압 조건을 구현하기 위한 반복 서보-제어 과정에서의 경계면 변형률 및 응력값을 나타낸 것이다.

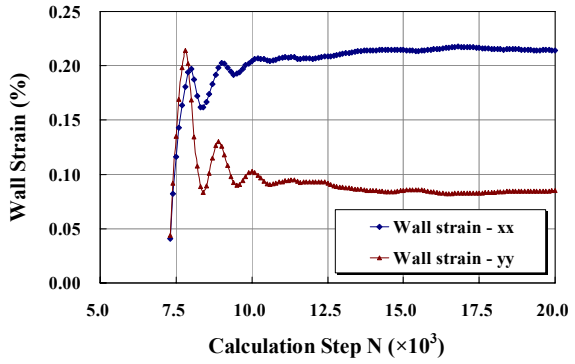

그림 2. 서보-제어 과정을 통한 경계면 변형률

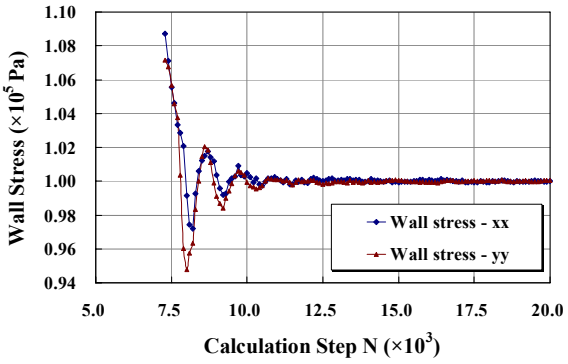

그림 3. 서보-제어 과정을 통한 경계면 응력

3. 개별요소방법에 대한 수리연동 해석

3.1 수리거동 및 입자유동의 상호작용

임의 흐름조건에 대해 3차원 미소요소내 개별요소에 작용하는 하중은 식 (1)과 같이 표현되며, 3차원 조건에서의 간극률 정의를 도입한 임의방향에 대한 하중은 식 (2)로 나타내어진다.

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

$$f_{d_j} = -\left(\frac{f_{int\ j}}{1-n} + \nabla P_j\right)\frac{\pi}{6} d_{Pi}^3 \quad (2)$$

여기서, $f_{d\,sum}$: 작용력 합계

f_{intx} : 단위체적내 유체-입자간 상호작용력

d_{Pi} : 개별요소들의 직경

n_p : 단위체적내의 개별요소수

$\frac{dp}{dx}$: x방향에 대한 압력경사

여기서, i : 개별요소(1~n_p)

j : 각 방향(x, y, z)

n : 간극률

$$\nabla P_j = \left(150\frac{(1-n)^2}{n^2(\overline{d_P})^2}\nu_f + 1.75\frac{(1-n)\rho_f}{n\,\overline{d_P}}\left|\overline{v_j} - u_j\right|\right)(\overline{v_j} - u_j) \quad (3)$$

여기서, ν_f : 유체점성

ρ_f : 유체밀도

v_f : 해석요소의 평균속도

u_f : 간극을 통한 침투유속

$$f_{int_j} = n\nabla P_j \quad (4)$$

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. PFC[2D]에서는 기본적으로 Ergun의 방정식을 이용하되, 투수계수와 간극률의 상관식인 Kozeny-Carman 방정식을 적용하고 있으며, 이에 대한 최종 압력경사 방정식은 식 (3)과 같다.

또한 압력경사는 개별요소와 유체의 상호작용을 통해서만 발생하다고 가정하면 식 (1)에서의 유체와 입자들간의 상호작용력은 식 (4)와 같이 표현되며, 식 (3)과 식 (4)를 통해 최종적인 해를 얻을 수 있다.

3.2 수압작용에 대한 수리연동 해석모델

수리연동해석에 이용된 모델은 초기조건 및 특정 구속압조건을 만족시키는 개별요소모델을 이용하되, 특정위치에서의 임의 유속 재하조건에 대한 수리연동 모델을 적용하였으며, 기본 모델에 수리연동해석을 위한 수리연산 요소망을 그림 4과 같이 x-방향 17개(i=1~17), y-방향 15(j=1~15)개로 구성하였다. 또한 모델 외곽에는 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/s 로 증가시켜며 해석을 실시하였다. 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/m^3), 점성은 1.0×10^{-3}(Pa.s)로 고려하였다.

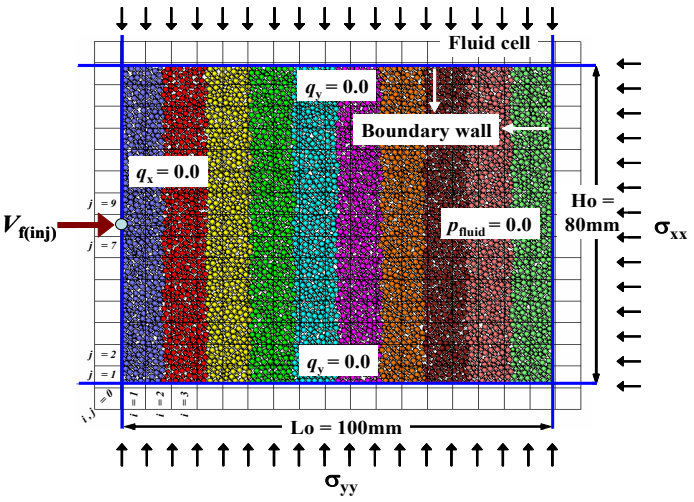

그림 4. 수리연동 해석망 구성 및 경계조건

3.3 해석결과

본 연구에서는 각 경우별 수리연동해석을 통해 해석영역내 위치별 침투유량 및 수압, 침투유속, 흐름벡터 변화 등을 살펴보았으며 유속재하 부근에서의 공동생성과 확장, 이로 인한 각 결과의 변화를 분석하였다. 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 살펴보면, 모든 재하 유속단계에 있어 안정된 흐름상태를 유지하고 있었다. 이는 유속 재하가 발생하더라도 $0.5\,MPa$의 구속압 효과로 인해 별다른 개별요소 유동이 발생하지 않음을 나타낸다. 반면, 구속압을 $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=0.1MPa$로 적용시킨 결과, 재하 유속의 크기가 60m/s의 경우는 별다른 개별요소 유동이 나타나지 않지만 그 크기가 120m/s로 증가하면서 유속 재하지점을 중심으로 공동이 발생하기 시작함을 알 수 있다. 재하 유속이 180m/s를 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.

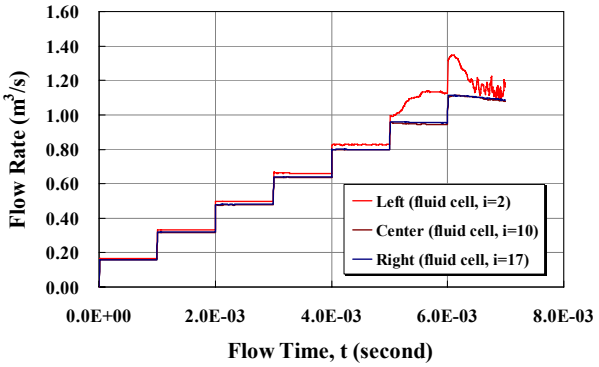

그림 5. 구속압 0.1MPa에서의 재하유속 단계별 유량 변화, $v_{f(inj)}$=30, 60, 90, 120, 150, 180, and 210m/s

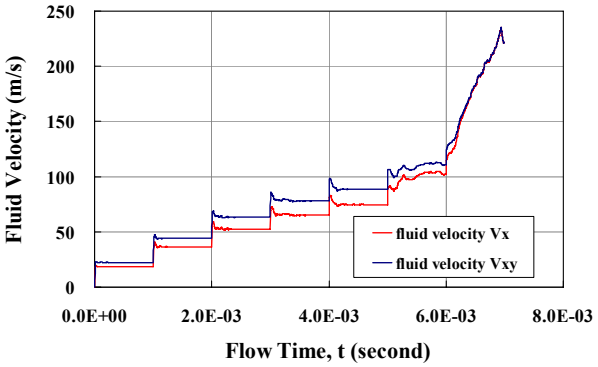

그림 6. 구속압 0.1MPa에서의 재하유속 단계별 입자내 유속 변화, $v_{f(inj)}$=30, 60, 90, 120, 150, 180, and 210m/s

4. 결 론

본 연구에서는 기존 개별요소 방법에 수리연동 기법이 적용된 모델링을 수행함으로서, 구속압 및 수압조건에 따른 지반내 입자유동과 공동생성 및 확장, 유량 및 유속변화 결과 등을 통해 공동생성이 발생하는 한계 압력 등을 예측할 수 있었다. 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 $0.1MPa$로 적용시킨 경우는 재하유속($v_{f\,inj}$)이 120m/s 를 넘어서면서 소폭의 유량증감을 동반하며 초기 공동이 발생하기 시작하였다. 재하유속 180m/s 이상에서는 기존 초기공동의 확장으로 인한 일시적 유량 급상승 및 유속 증가가 발생하였으며, 개별요소와 수리작용의 상호거동에 대한 압력은 감소하는 형태를 나타내었다.

참고문헌

1. 전제성, 김기영, 신동훈 (2006), “개별요소법에 의한 락필재료의 대형삼축압축시험 모델링”, 한국지반공학회논문집 제22권 10호, pp.111-120.
2. Itasca Consulting Group, Inc. (2004), *PFC2D User's Guide & Optional Features*, Minneapolis, Minnesota
3. Tsuji, Y., Kawaguchi and T. Tannta (1993), “Discrete Particle Simulation of Two-Dimensional Fluidized Bed", Power Tech., 77, pp.79-87.