

수리역학적 상호작용을 고려한 균열암반매질에서의 수리학적 거동에 대한 수치적 연구

A Numerical Study on Hydraulic Behavior in a Fractured Rock Medium with Hydromechanical Interaction

정우창[†] · 박영진¹⁾

Jeong, Woochang · Park, Youngjin

ABSTRACT : This paper presents the numerical investigation for the hydraulic behavior of a fractured rock mass with a hydromechanical interaction which may be considered during the in-situ hydraulic injection test. These experiments consist in a series of flow meter injection tests for fractures existing along an open hole section installed in a borehole, and experimental results are applied for testing a numerical model developed to the analysis and prediction of such hydromechanical interactions. Field experimental results show that conductive fractures form a dynamic and interdependent network, that individual fractures cannot be adequately modeled as independent systems, that new fluid intaking zones generate when pore pressure exceeds the minimum principal stress magnitude in that borehole, and that pore pressures much larger than this minimum stress can be further supported by the circulated fractures. In this study, these characteristics are investigated numerically how to influence the morphology of the natural fracture network in a rock mass by using a discrete fracture network model.

Keywords : Hydromechanical interactions, Discrete fracture network model, Hydraulic injection test, Pore pressure, Minimum Principal stress

요 지 : 본 논문은 수리학적 현장 주입시험 기간 동안 고려될 필요가 있는 수리역학적 상호작용에 따른 균열암반매질의 수리학적 거동에 대한 수치적 연구이다. 이러한 주입시험은 굴착정 내에 설치된 개구간(open hole section)을 따라 높은 압력을 가진 유량을 주입하며, 이를 통해 굴착정을 가로지르는 균열로부터 유량을 측정하는 것이다. 시간에 따라 변화되는 유량측정결과는 수리역학적 상호작용에 대한 분석 및 예측을 위해 개발된 수치모형의 현장 적용성을 평가하기 위해 사용되었다. 유량측정결과 전도성이 있는 균열들은 상호의존적인 균열망을 형성하며, 이로 인해 균열망을 구성하는 개별적인 균열요소들은 독립적인 시스템으로서 적절하게 모형화 될 수 없음을 보여주었다. 또한 간극수압이 굴착정 주위에 작용하는 최소주응력을 초과할 때 새로운 유체유입영역이 발생되며, 이러한 최소주응력보다 훨씬 큰 간극수압은 굴착정 주위의 균열들에 의해 유지될 수 있다는 것을 보여주었다. 본 연구에서 이러한 특성들이 자연 상태의 균열망의 구성형태에 따라 어떻게 영향을 미치게 되는지 이산 균열망 모형을 통해 수치적으로 분석되었다.

주요어 : 수리역학적 상호작용, 이산 균열망 모형, 수리학적 현장 주입시험, 간극수압, 최소주응력

1. 서 론

자연 상태의 균열 압반에 대한 수리역학적 거동을 특성화하고 모델링하는 것은 토목공학, 석유공학 및 지질 공학 등 다양한 공학 분야에서 다루어지는 중요한 연구 분야 중 하나이다. 변화하는 간극분포를 포함하는 균열 내 흐름은 일반적으로 간극분포에 대한 통계학적 매개변수(즉, 간극 분포의 평균 및 표준편차)와 접촉 면적의 함수를 통해 분석될 수 있다(Zimmerman and Bodvarsson, 1996). 일반적으로 균열 내의 흐름은 두 균열 벽이 평행하고 간극이 일정하다고 가정하면서 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도된 삼승법칙(Cubic law)를 통해 계산될 수 있다(Snow, 1969;

Witherspoon 등 1980). 그러나 균열표본을 이용한 실내 실험 또는 수리학적 현장시험을 통해 수직응력 하에 있는 균열 내에서의 흐름에 대한 측정 결과와 삼승법칙을 이용하여 계산된 흐름결과와 편차가 발생되며, 작용된 수직응력이 증가할수록 이에 대한 편차는 증가 된다(Raven and Gale, 1985). 이는 수직응력이 증가할수록 균열 내의 접촉 면적이 증가하며 이에 따라 흐름이 원활하지 못하기 때문이다(정우창, 2007). 이러한 균열의 수직 닫힘(normal closure) 거동에 대해 수많은 경험식들이 제안되었다(Bandis 등, 1983; Brown and Scholz, 1985). Pyrak-Nolte(1992)는 단일 균열에 대한 수리학적 그리고 역학적 특성 사이의 관계에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Unger and Mase(1993)는 임의의

† 정회원, 경남대학교 토목공학과 전임강사(E-mail : jeongwc@kyungnam.ac.kr)

1) 비회원, 서울대학 토목과 부교수

거친 두 균열 벽이 서로 접촉될 때 간극분포를 결정하는 이론적 모형을 제안하였으며, Capasso 등(1999)은 접촉영역에 대해 탄소성(elasto-plastic) 거동을 이용하여 유사한 연구를 수행하였다. 이들 두 연구 모두에서 수직응력, 접촉 면적의 비율 및 수직 단힘 간에 비선형 관계를 제시하였으며, 적용되는 각각의 수직응력에 대해 Zimmerman and Bodvarsson(1996)이 제안한 변화하는 간극분포를 가진 단일 균열에 대한 등가 투수계수 계산을 위한 경험식에 적용되는 통계학적 매개변수들을 제공한다.

Rutqvist(1995)는 이러한 비선형 응력-단힘 관계를 사용하여 수직 굴착정에 설치된 두 개의 불투과성 패커(packer)로 분리된 단일 균열들에 대해 수리역학적 결합모형의 현장 규모에의 적용에 대해 연구하였다. 이 연구의 목적은 펄스 시험 및 수리학적 주입 시험(hydraulic injection test) 등의 굴착정 시험들로부터 균열의 수직강성계수를 결정하는 것이다. 그러나 균열의 크기, 균열에 작용하는 유체 압력 또는 굴착정 주위 암반 블록에 대한 Young의 계수 등과 같은 부가적인 매개변수를 보정하지 않을 경우 수치모의실험에서 균열의 장력상태를 적절하게 재현할 수 없다는 결론을 내렸다. 그러므로 현장조건하에서 해당 균열에서의 유체 흐름과 균열에 작용되는 응력의 결합은 기반암의 전역적인 역학적 거동과, 균열의 경계부분 또는 주위 타 균열과의 교차점에서의 수리학적 조건에 만족시킬 필요가 있으며, 이를 통해 현장 적용 시 전반적인 유체 압력이 보정될 수 있다.

이러한 현장 문제를 해결하기 위한 방안으로서 UDEC 패키지(Cundall and Hart, 1985)에서와 같은 개별요소법(distinct element method)을 적용하여 균열에 의해 분리된 별개의 블록들을 조립한 형태의 암반에 대한 모델링이 매우 적합하다고 볼 수 있다. 블록들은 서로 상호 작용하여 균열 사

이에 하중을 전달한다. 현장의 다양한 물리적 상황을 다루기 위해 유체 흐름, 열적 유발 응력 및 변위에 관한 모듈 개발이 이루어져 왔다(Abdallah 등, 1995). 유한요소법 또한 균열 암반 및 균열을 포함하고 있는 다공성 암반매질에서 나타나는 수리역학적 효과에 의한 균열의 수리학적 거동을 분석하는데 활용될 수 있다(Stephansson 등, 1996).

이와 같은 균열암반 내에서의 동수역적 효과에 따른 수리학적 거동을 분석할 수 있는 수치방법들이 제안되어 있음에도 불구하고 아직까지 현장 규모에서 균열암반을 블록과 균열로 이루어진 시스템을 정확하게 수치적으로 묘사하기는 매우 어려운 실정이다.

본 연구에서는 균열암반 내에 작용하는 수리역학적 효과를 고려할 수 있는 3차원 이산 균열망 모형(Discrete Fracture Network Model, DFNM)을 개발하였으며(Jeong, 2000), 개발된 모형은 1997년 프랑스 Le Mayet de Montane 지역에서 수행된 수리학적 주입실험을 통해 구축된 자료를 이용하여 적용성을 검증하였다.

2. 이산 균열망 수치모형

2.1 기하학적 모형

본 연구에서 적용된 이산 균열망 모형에 이용되는 균열을 구성하는 균열요소의 기하학적 형태는 그림 1에서 (a)와 같은 원판 형태(disc shape)이다. 균열요소로 이루어진 절리와 같은 균열의 형상은 평면적이며 유한한 길이의 타원형 또는 직사각형이다. 그림 1에서 (b)는 원판의 균열요소들로 이루어진 균열의 한 예를 나타낸 것이다.

주어진 공간 내에 발생되는 균열망을 구성하는 균열요소는 현장에서 채취된 코어샘플을 이용한 통계학적 분석

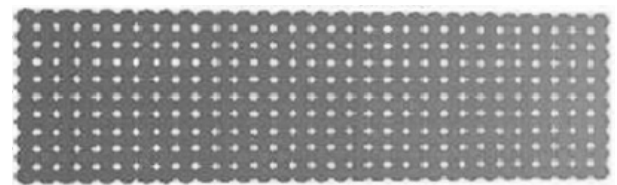
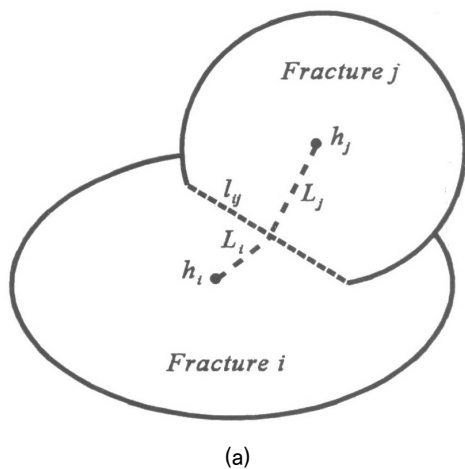


그림 1. (a) 균열요소 i 와 j 가 서로 연결된 시스템. l_{ij} 는 교차선분이며, L_i 는 균열 i 의 중심과 교차선분의 중심까지의 거리이며, h_i 는 균열 i 에서의 수두이다. (b) 균열요소들로 구성된 균열의 한 예

을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 균열요소의 중심은 Poisson 함수, 균열요소의 방위는 Fisher von Mises 분포함수 그리고 균열요소의 반경은 대수분포함수를 통해 공간적으로 분포된다(Jeong, 2000).

2.2 균열요소 규모에서의 수리역학적 모형

본 연구에서 균열망을 구성하는 균열요소에서의 유체흐름은 그림 1에서처럼 서로 연결된 1차원 유로를 따라 발생된다고 가정한다. 이는 어떤 균열면에서의 유체흐름이 서로 다른 크기의 간극분포와 접촉면의 정도에 따라 특정한 유로를 통해 발생된다는 유로화 현상(channeling phenomenon, Abelin 등, 1988)을 반영한 것으로 그림 2에서 (a)는 균열면을 따라 발생하는 유로화 현상에 따른 유체흐름을 나타낸 것이며, (b)는 본 연구에서 모형에 채택된 1차원 유로 시스템을 나타낸 것이다.

균열 내에서의 유체 흐름을 계산하기 위해 필요한 매개변수인 투수계수는 균열망을 구성하는 각각의 균열요소에 부여된다. 투수계수는 식 (1)에서와 같이 수리역학적 효과가 반영된 수정된 삼승법칙으로부터 계산된다.

$$k = f \times k_0 \quad (1)$$

여기서, k_0 는 유효수직응력이 0인 상태에서 계산되는 참조 투수계수(reference hydraulic conductivity)이며, 식 (2)를 통해 계산된다.

$$k_0 = \frac{e_0^3 \rho g}{12\mu} \quad (2)$$

여기서, ρ [kgm⁻³], μ [kgm⁻¹s⁻¹] 그리고 g [ms⁻²]는 각각 유체 밀도, 점성계수 그리고 중력가속도이다. 초기간극에 해당되는 e_0 [m]는 모형의 매개변수이며, 통계학적 분포함수(본 연구에서는 대수정규분포를 적용)에 따라 균열망을 구성하는 각각의 균열요소에 부여된다.

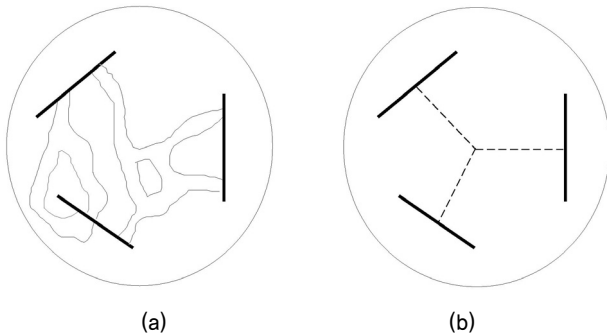


그림 2. 균열면에서의 유체흐름 모식도: (a) 유로화 현상에 따른 유체흐름현상, (b) 본 연구에서 적용된 1차원 유로 시스템

식 (1)의 f 는 수리역학적 효과를 묘사하기 위해 적용되는 무차원 계수이며, 1 보다 크거나 작은값을 가진다. 계수 f 의 산정방법은 다음과 같다.

2.2.1 닫힌 영역(Closed area)

본 연구에서 적용된 역학적으로 닫힌 영역은 유효수직응력의 작용 하에 있는 서로 마주보는 균열요소의 두 벽면 사이에 접촉되는 영역이 존재하는 것이다. 이로 인해 유체흐름에 허용되는 공극 및 유체의 흐름경로가 굴곡될 수 있다. 이러한 균열요소 내에서의 공극 사이의 연결 형태는 균열의 투수성을 좌우한다. 유효수직응력에 따른 단일 균열 내에서의 공극비는 비선형적으로 변화된다는 것이 실내실험을 통해 알려져 있다(Gentier, 1986).

현장규모에서 균열 내의 간극분포에 대한 신뢰성 있는 자료를 취득하기는 현재 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서 적용되는 모형에서는 균열벽에 작용하는 유효수직응력(σ_n)과 접촉영역이 포함되어 있는 균열 내 유체흐름이 허용되는 공극비(τ) 그리고 유효수직응력에 따라 변화되는 공극비와 균열의 투수계수에 영향을 미치는 수리역학적 계수 사이의 관계는 다음과 같은 지수함수가 사용된다(Bruel, 1999; Jeong, 2000).

$$\tau = \tau_0 + (1 - \tau_0) \exp[-\sigma_n/p] \quad (3)$$

$$f = f_0 + (1 - f_0) \exp[-\alpha(1 - \tau)] \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에 적용되는 τ_0 와 f_0 는 초기 공극비와 초기 수리역학적 계수이며, 수치모의시 보정된다. 또한 p , f_0 그리고 α 는 지수함수 내에 적용되는 계수들로 마찬가지로 수치모의 수행시 보정된다.

그림 3은 식 (3)과 (4)에 대한 의미를 묘사한 것으로 두

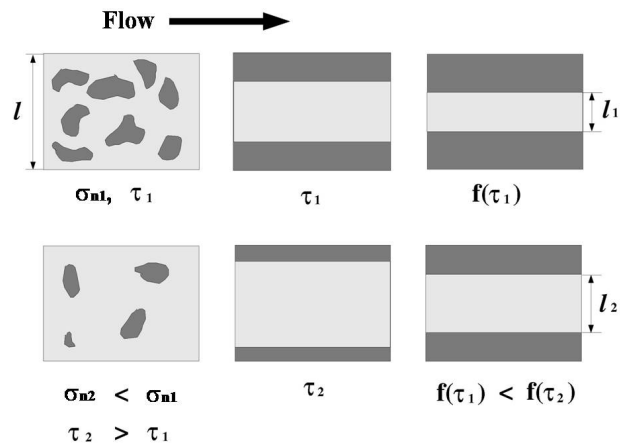


그림 3. 유효수직응력에 따른 1차원 유로의 폭과 이에 따른 수리역학적 계수(f)의 차이를 나타낸 모식도

개의 서로 다른 크기의 유효수직응력(σ_{n1}, σ_{n2})이 폭 l 을 가지는 균열면에 작용하였을 때 유체흐름에 허용되는 공극과 접촉영역의 분포와 본 연구에서 적용되는 유효수직응력에 따른 1차원 유로의 폭과 이에 따른 수리역학적 계수의 차이를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 것처럼 유효수직응력이 클수록 균열면에 분포하는 접촉영역은 증가하며, 본 연구에서 적용되는 균열의 1차원 유로의 폭과 수리역학적 계수가 감소하여 균열의 투수성이 감소됨을 알 수 있다.

2.2.2 열린 영역(Open area)

열린 영역은 균열을 가로 질러 굴착된 굴착정 내에 고압의 유체가 주입될 경우 굴착정 내의 개구간을 통해 균열 내로 유입되는 유체에 의해 간극수압이 발생되며, 이로 인해 균열이 파괴되어 유체 흐름에 허용되는 간극분포가 증가되는 경우이다. 이 경우 본 연구에서 취해진 가정은 균열 내의 흐름에 대해 삼승법칙이 적용될 수 있으며, 균열의 파괴에 의해 발생하는 간극변화 Δe 는 $(1 + \Delta e/e_0)^3$ 에 의해 투수계수의 변화를 이끈다. 수리학적 주입시험에 의해 열린 균열요소 i 에 대해 수직방향으로의 불연속 변위 ϕ_z^i 는 유체 흐름에 기여하는 간극의 증가로 변하게 된다. 균열요소 i 에 대한 f 를 결정하는 식은 다음과 같다(Bruel, 1999).

$$f = (1 + \phi_z^i/e_0)^3 \quad (5)$$

2.2.3 전단영역(Sheared area)

전단의 영향을 받는 균열요소 i 에서 x 와 y 방향으로의 활동에 의해 변위 φ_x^i 와 φ_y^i 가 발생되며, 이를 간극에 대한 비가역적 효과로 변환하기 위해 다이레이션(dilation) δ 가 적용된다. 균열요소에 축적된 변위를 $\xi = \xi_0 + d\xi$ 로 정의하며, 여기서 $d\xi = (\varphi_x^i + \varphi_y^i)^{1/2}$ 이며, ξ_0 는 이전 시간 단계에서 얻은 변위이다. 전단효과에 의한 등가 수직 변위는 다음 식에 의해 결정된다.

$$\Delta e = u \tan(\delta) \tanh(\xi/u) \quad (6)$$

여기서 u 는 무차원 계수이며, 일반적으로 e_0^i 의 약 10~50 배로 알려져 있다(Bruel, 1999).

유효수직응력에 대한 효과와 마찬가지로 전단이 진행될 때에도 거친 균열 벽 사이에 접촉영역이 발생될 수 있으므로 이에 대한 효과를 포함한 계수 f 는 다음 식에 의해 결정될 수 있다.

$$f = \{f_0 + (1 - f_0)\exp[-\alpha(1 - \tau)]\}(1 + \Delta e/e_0)^3 \quad (7)$$

2.3 비정상상태 흐름 모형

본 연구에서 적용되는 모형에서 비정상상태 흐름의 경우 질량보존은 각각의 균열요소에서 이루어진다. 유체 흐름은 항상 층류상태로 진행되며, 삼승법칙이 각각의 균열요소 규모에서 국부적으로 적용될 수 있다고 가정한다. k_i 와 k_j 는 균열요소 i 와 j 에서 서로 연결된 유로(그림 1(a))에 대한 투수계수로 정의하고 h_i 와 h_j 를 수리수두(hydraulic head)라고 정의할 때 유량 $Q_{ij}[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q_{ij} = k_{ij} \frac{h_i - h_j}{L_i + L_j} \quad (8)$$

여기서 k_{ij} 는 다음과 같이 정의된다.

$$k_{ij} = \frac{k_i k_j (L_i + L_j)}{k_j L_i + k_i L_j} = l_{ij} \left[\frac{1}{L_i + L_j} \left\{ \frac{12\mu L_i}{\rho g f(\tau_i) e_i^3} + \frac{12\mu L_j}{\rho g f(\tau_j) e_j^3} \right\} \right]^{-1} \quad (9)$$

비정상상태 흐름은 균열 내의 유체 흐름에 대한 공극의 지형학적 분포의 변화로부터 정의되는 유체 저류 특성을 반영한다. 이러한 변화는 유효수직응력의 변화에 기인되며, 균열요소 i 에 대해 국부적인 저류계수인 C_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$C_i = \frac{d\tau_i}{d\sigma} \quad (10)$$

균열요소 i 는 팽창하거나 수축하는 단일 용기(single reservoir)로 작용한다고 가정될 수 있다. 만약 n 개의 서로 다른 균열요소 j 가 균열요소 i 에 연결되어 있다면, 균열요소 i 에서의 비정상상태에서의 질량보존은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\sum_j Q_{ij} = C_i V_i \frac{dh_i}{dt} + s \quad (11)$$

여기서 $V_i (= \pi r_i^2 e_i)$ 는 반경 r_i 를 가진 균열요소 i 의 체적이며, s 는 내부 source 또는 sink 항이다.

식 (11)은 주어진 공간 내에 균열망을 구성하는 균열요소 각각에 대해 시간에 따른 수위변화를 계산하기 위해 적용된다. 유체주입과 같은 source 항이 추가될 경우 각각의 균열요소에 적용되는 식 (11)은 비선형 선형방정식을 구성하게 되며, 이를 수치적으로 풀기위해 본 연구에서는 preconditioning conjugate gradient 기법을 적용하였다(Ciarlet, 1983).

3. 수리학적 현장주입시험에 대한 모형의 적용성 검토

3.1 Le Mayet de Montagne(프랑스)의 수리학적 현장주입시험

Comet and Morin(1997)이 프랑스 중부에 위치한 Le Mayet de Montagne 지역에서 수행한 수리학적 현장주입시험의 목적은 간극수압의 증가로 인한 균열 암반매질의 수리학적 거동에 대한 점진적 변화를 관찰하기 위한 것이었다.

현장에 설치된 INAG III. 9 굴착정은 화강암으로 이루어진 기반암 내에 거의 수직으로 굴착되어 있으며, 깊이는 840m이다. 굴착정 내부에 패커를 275m에 설치했고 개구부(open hole section)를 따라 고압의 유체가 주입되었다. 주입된 유체압력이 굴착정 주위의 최소주응력에 접근하거나 초과될 때 유체가 유입되는 새로운 균열영역이 발생되었다(Yin and Comet, 1994). 표 1은 수리학적 현장주입시험에서 수행된 주입된 유량별 심도에 따른 유량 변화의 관측 기록을 나타낸 것이다. 관측결과 주입유량이 증가할수록 유량이 측정되는 구간이 증가되며, 분당 780l를 주입할 시 모든 구간에서 유량이 관측됨을 알 수 있다.

3.2 이산 균열망 구축

표 1에 나타난 바와 같이 INAG III. 9 굴착정을 따라 다섯 개의 주입영역이 존재한다. 이 영역 중 두 개, 즉 표 2와 같이 균열 F3과 F4는 본 연구에서 적용된 수리학적 주입시험 이전의 주입시험 기간 동안에 발생된 균열영역에 해당되며,

표 1. 주입유량에 따른 유체압력 측정결과(Cornet and Morin, 1997)

유량 (l/분)	20	100	190	780
유체압력 (MPa)	0.31	1.80	3.40	6.25
깊이 (m)				
> 400	(-)	(-)	(-)	680
~ 450	(-)	(-)	75	130
~ 550	(-)	(-)	(-)	35
~ 640	8	32	45	45
< 750	12	68	70	70

(-) 주입에 대한 영향이 관측되지 않음.

표 2. INAG III. 9 굴착정을 따라 존재하는 균열영역

균열영역	깊이[m]	방위[°]	크기[m]
F1	-328.0	N110 dip45E	300.0
F2	-440.0	N150 dip80W	200.0
F3	-502.0	N184 dip61E	425.0
F4	-632.0	N174 dip36E	300.0
F5	-770.0	N110 dip60W	275.0

이는 Comet and Scotti(1993)에 의해 제시된 바 있다. 본 연구에서 균열 F3과 F4에 대한 주향, 경사 및 크기는 이전에 관측된 자료를 이용하였다. 최심영역에 존재하는 균열 F5는 1987년에 수행된 순환 시험(circulation test)을 통해 수리학적 전도성이 양호한 것으로 알려져 있으나(Bruel and Comet, 1995), 방위(orientation)에 대한 정보는 잘 알려져 있지 않다. 천부영역에 존재하는 균열 F1과 F2는 주입된 유량 조건에 대해 수리학적으로 양호하여야 하나 낮은 주입조건에서는 압력이 관측되지 않았다. Comet and Morin(1997)의 시험 결과에서 주입된 유체 압력이 3.4MPa이 될 때 균열 F2에서 유체 압력이 측정되는 반면, 균열 F1에 대해서는 주입된 유체 압력이 약 6MPa가 초과될 때부터 유체 압력이 측정되었다. 기존의 균열에 대한 수리학적 주입시험으로부터 결정된 굴착정 주위에 영향을 미치는 응력장에 대해 균열 F2는 최대주응력과 거의 평행인 방향을 따라 위치하고 있다. 균열 F1은 유체 압력이 3.4MPa가 될 때부터 유체 압력이 측정되었으므로 균열 F2와 평행하게 위치하고 있지 않음을 알 수 있다.

현장 조건에 부합되는 균열시스템을 구성하기 위해서는 또 다른 두 개의 균열영역이 필요하며, INAG III.9 굴착정

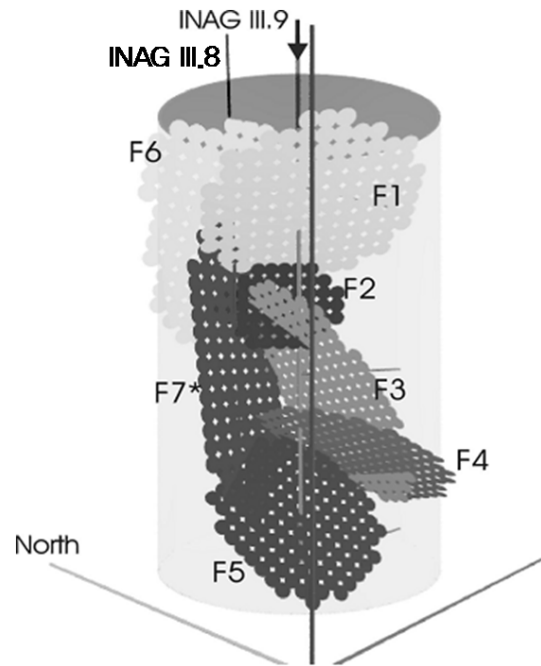


그림 4. 주어진 공간에 발생된 균열영역. F7*를 사용한 두 번째 안(본문 참조). 원통형 표면이 모형의 외부 경계를 표시, INAG III. 9 굴착정은 원통형의 축에 근접한 수직에 가까운 선. 화살표 아래의 진한 회색 원형은 수리학적 상부 경계를 표시하며 지하 175m에 위치하고 있음.

표 3. INAG III. 8 굴착정을 따라 존재하는 균열영역

균열영역	깊이[m]	방위[°]	크기[m]
F6	-281.0	N110 dip70E	300.0
F7	-484.0	N 83 dip83W	500.0

으로부터 북서쪽으로 약 100m 떨어진 지점에 위치한 INAG III. 8 굴착정에서 관찰되었다. 두 개의 균열영역 중 첫 번째 균열영역인 균열 F7은 깊이 472m에서 INAG III. 8 굴착정과 교차하고 있다. 두 번째로 균열 F6은 INAG III. 8 굴착정과 깊이 약 317m에서 교차하며 방위는 N120E, 경사는 70E이다.

그림 4는 수리학적 현장주입시험으로부터 분석된 자료를 이용하여 발생시킨 F1부터 F7까지의 균열영역을 나타낸 것이다.

수리학적 주입시험에서 균열 F6은 지표면부의 얇은 대수층과 균열망을 연결하고 있으며, 균열 F7은 균열 시스템의 전반에 걸쳐 연결되어 있는 것으로 조사되었다. 본 연구에서 균열 F1과 F6는 거의 평행이라고 가정하였으며, 균열 F7은 공간 내에 있는 여섯 개의 다른 균열들을 연결하도록 균열의 크기를 결정하였다(표 3).

3.3 수치모의

본 연구에서 수리학적 모의주입시험은 5단계로 수행되었다. 1과 2단계에서는 유체(즉, 상온의 물)를 각각 20l/분

그리고 100l/분의 일정한 속도로 주입하였으며, 각 단계별로 6시간 동안 수행되었다. 3단계에서는 INAG III.9 굴착정을 폐쇄한 상태로 12시간 동안 유지하였다. 4단계 및 5단계는 각각 190l/분으로 7시간 그리고 780l/분으로 5시간 동안 일정한 속도로 유체를 주입하였다. 모의된 공간은 그림 4에 나타나 있는 것처럼 반지름이 200m인 원통형 표면으로 구성되어 있으며, 지하 175m부터 900m까지 확장되어 있다. 경계조건으로 지표면과 지하 900m에 0m의 수두가 부여되었다. 표 4는 굴착정을 통과하는 균열영역에 미치는 응력 수직응력, 전단응력 그리고 유효수직응력을 나타낸 것이며, 그림 5는 굴착정 주위에 영향을 미치는 수평 주응력의 깊이와 방위에 따른 변화를 나타낸 것이다.

본 연구에서 수치모의실험은 관측된 각각의 균열영역에서의 유체 압력의 시간적 변화에 대한 관측 자료에 부합하도록 균열 내의 간극분포만을 보정하면서 수행되었다. 표 5는 모의실험에 적용된 암반, 유체 그리고 균열에 대한 물리적인 특성을 나타내는 매개변수를 나타낸 것이며, 모의 실험을 수행하는 동안 고정된 값을 적용하였다. 또한 표 6은 균열영역별 식 (1)에 적용되는 초기평균간극을 나타낸

표 4. 굴착정을 가로지르는 균열영역에 미치는 주요 응력 조건

균열 영역	깊이 [m]	수직응력 (MPa)	전단응력 (MPa)	유효수직응력* (MPa)
F1	-328.0	8.69	1.34	5.47
F2	-440.0	7.75	0.95	3.42
F3	-502.0	10.55	2.50	5.63
F4	-632.0	14.90	2.95	8.71
F6	-281.0	7.97	1.60	5.21
F7	-484.0	12.85	1.47	8.12

(*) 유효수직응력은 유체 정역학 조건(hydrostatic condition)으로부터 계산된 것이다.

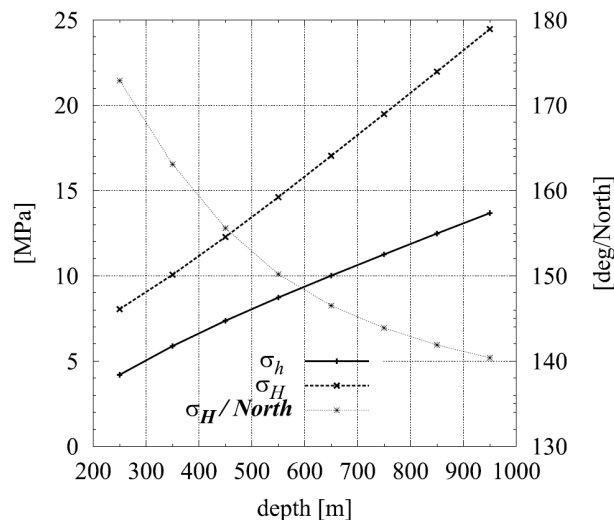


그림 5. 수평 주응력 요소의 최대 및 최소값(Yin and Cornet, 1994)

표 5. 수치모의실험에 적용된 암반, 유체 그리고 균열의 물리적 특성을 나타내는 매개변수

암 반		
Young의 계수 E	60000	MPa
포와송 비 ν	0.22	
밀도	2.65	Kgm^{-3}
유 체		
동점성계수	1×10^{-3}	$\text{Kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
밀도	1×10^3	Kgm^{-3}
균 열		
식 (3)의 매개변수	$\tau_0 = 0.50, p = 7.5$	
식 (4)의 매개변수	$f_0 = 0.008, \sigma = 5.25$	
마찰계수	0.80	
점성계수	0.0 (0.5)	MPa
다이레이션 각	2.0	Deg.

표 6. 균열영역별 평균 간극

균열영역	e_0 [m]	초기간극 [m]*
F1	0.000225	0.000128
F2	0.000150	0.000097
F3	0.000175	0.000098
F4	0.000460	0.000224
F5	0.000600	0.000295
F6	0.000225	0.000123
F7	0.000400	0.000198

(*) 초기간극은 유체 정역학 조건 하에서 깊이에 따른 증가값이며, $e = e_0 \times f^{1/3}$ 을 통해 계산됨.

것이다. 또한 식 (3)와 (4)에 적용되는 매개변수들의 추정 값은 수리학적 주입시험 1과 2단계에서 유효수직응력에 따른 수행된 모의분석결과를 토대로 결정된다

3.4 결과분석

1과 2단계에서는 상대적으로 낮은 주입압력 하에서의 균열의 수리학적 특성을 분석하기 위해 수행되었다. 유체의 대부분은 굴착정 내 깊은 지역에서 주입되었기 때문에 균열 시스템의 상부에서의 초기 유체 전도성은 빈약하다.

4단계가 진행되는 동안 굴착정 내의 깊은 지역이 상당히 높은 유효수직응력을 지지하고 있기 때문에 주입압력이 증가되기 시작하며, 굴착정에서의 유량변화에 대한 모의결과 균열 시스템으로부터 빠져나가는 유체에 대한 자연 상태의 경로에 해당되는 균열 F7과 F1의 간극분포에 더욱 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 각각의 균열에 대한 평균 간극값은 주입시험이 시작된 후 5시간 내에 약 3.5MPa의 유체 압력에 도달될 때를 기준으로 결정되었으며, 결정된 간극값은 표 6에 나타나 있다. 현장시험에서 관측된 바와 같이 균열 F2는 인장상태가 되며, 상당량의 유체가 주입되기 시작한다. 이 단계의 끝에 유체압력은 3.63MPa에 도달하며, 균열 F2로 유입되는 유량은 총 주입 유량의 15.1%까지 증가된다.

본 연구에서 적용된 모형의 적용성에 대한 평가는 5단계에 대한 관측결과와의 비교를 통해 수행되었다. 표 6은 4단계 끝에서 계산된 균열영역별 평균 간극을 나타낸 것이며, 5단계에서 초기 간극값으로 주어진다. 그림 6은 4와 5단계에서의 모의된 주입수두와 관측된 주입수두와의 비교 그리고 균열영역별 유량의 변화를 나타낸 것으로 비교

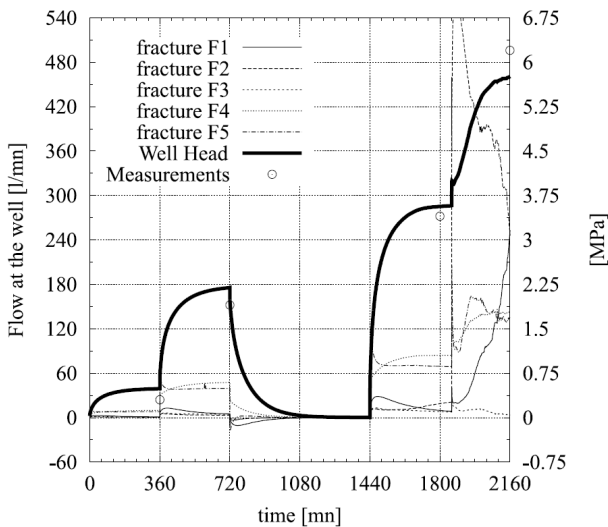


그림 6. 모의된 그리고 관측된 주입 수두와의 비교와 균열영역별 유량 분포의 변화

적 잘 모의된 것을 알 수 있으며, 그림 7은 주입에 따른 굴착정 주위 균열영역의 상태를 나타낸 것이다. 전단영역은 굴착정 내 주입 지점 바로 근처에 위치하고 있는 균열 F2와 교차하고 있는 균열 F3과 균열 F1의 일부분에서 가장 크게 발달되며, 주입 지점으로부터 떨어진 균열영역에서는 전단 효과가 미미함을 알 수 있다.

균열영역에서의 유량변화에 대한 결과로서 균열 F2의 경우 1단계에서의 평균 간극이 $1.5 \times 10^{-4}m$ 에서 4단계에서는 $3.2 \times 10^{-4}m$ 그리고 5단계에서는 $4.1 \times 10^{-4}m$ 로 증가하며, 이로 인해 비교적 큰 유량이 유입된다. 5단계가 절반정도 진행될 때 균열 시스템 상부에 위치한 균열 F1으로 유량이 점차적으로 유입됨에도 불구하고 유체 압력은 안정 상태에 진입하고 있는 것을 알 수 있다. 균열 F1의 경우 1단계에서 $1.5 \times 10^{-4}m$ 의 평균 간극이 5단계에서는 $4.7 \times 10^{-4}m$ 로 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 그림 6의 균열영역별 유량 변화에서도 알 수 있다. 따라서 굴착정 내에 수행되는 수리학적 주입시험은 굴착정 주위의 유체 전도성을 크게 증가시키는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 프랑스 Le Mayet de Montane 지역에서 수행된 수리학적 현장주입실험을 통해 굴착정을 가로지르는 균열영역에서의 유량측정 자료를 이용하여 수리역학적 상호작용에 따른 균열암반매질의 수리학적 거동에 대한 수치적 분석을 수리역학적으로 결합된 이산 균열망 모형

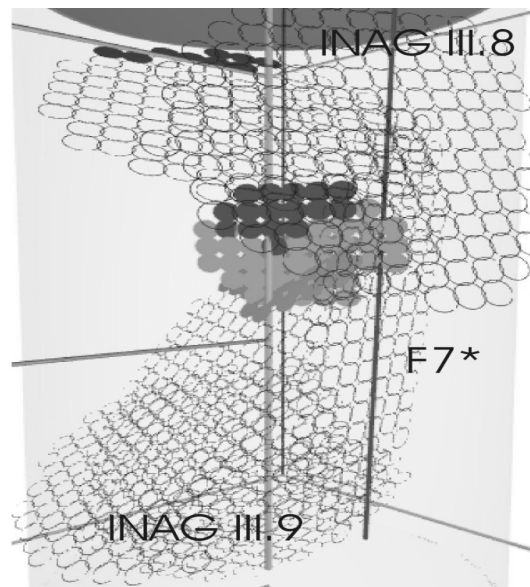


그림 7. 모의실험에 의해 도출된 균열망 내에서의 전단영역(밝은 회색)과 주입영역(어두운 회색)의 분포

(discrete fracture network model)을 통해 수행하였으며, 이에 대한 적용성을 검토하였다. 검토결과 적용된 모형은 단계별로 진행된 수리학적 주입시험을 통해 관측된 굴착정에서의 유체 압력의 시간적 변화와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 또한 굴착정을 통과하는 다수의 균열영역에서 발생하는 유량의 변화를 분석할 수 있었다.

본 연구에서 적용된 수리역학적으로 결합된 이산 균열망 모형은 화강암과 같은 균열을 포함한 결정질 암반(crystalline rock mass)의 수리역학적 상호작용에 기인한 수리학적 거동 특성에 대한 모의 및 분석에 활용될 수 있을 것이며, 또한 지하 심부의 지열 개발 등에서 주로 수행되는 인공파쇄(artificial fracturing)에 의한 수리학적 전도성의 예측에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2007년도 서울대학 학술연구비에 의해 연구되었음.

참고 문헌

1. 정우창 (2007), 공간적 상관길이와 역학적 효과에 따른 거친 단일 균열 내의 유체 흐름에 관한 수치적 연구, *한국지반환경 공학회 논문집*, 제8권, 제4호, pp. 1~13.
2. Abdallah, G., Thoraval, A., Sfeir, A. and Pigué, J.P. (1995), Thermal convection of fluid in fractured media. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, Vol. 32, No. 5, pp. 481~490.
3. Abelin, H., Birgersson, L., Agren, T. and Nerentnieks, I. (1988), A channeling experiment to study flow and transport in natural fractures. Lutze, W. and Ewing, R. C. (eds.) *Material Research Society Symposium Proceeding, on Scientific Basis for Nuclear Waste Management XI*, Berlin, Germany, Vol. 127, pp. 661~668.
4. Bandis, S.C., Lumsden, A.C. and Barton, N.R. (1983), Fundamentals of rock joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, Vol. 20, No. 6, pp. 249~268.
5. Brown, S.R. and Scholz, C.H. (1985), Closure of random elastic surfaces in contact. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. B7, pp. 5531~5545.
6. Bruehl, D. (1999), Modelling hydraulic jacking tests on a preexisting fracture system. In *Ninth International Congress on Rock Mechanics*, Vouille & Berest, eds., Rotterdam, Balkema, pp. 857~862.
7. Capasso, G., Scavia, C., Gentier, S. and Pellegrino, A. (1999), The influence of normal load on the hydraulic behaviour of rock fractures. In *Ninth International Congress on Rock Mechanics*, Vouille & Berest, eds., Rotterdam, Balkema, pp. 863~868.
8. Ciarlet, P. (1983), *Introduction a l'analyse numerique matricielle et a l'optimisation*, Masson, pp. 1~852.
9. Cornet, F.H. and Scotti, O. (1993), Analysis of induced seismicity for fault zone identification. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, Vol. 30, No. 7, pp. 789~795.
10. Cornet, F.H. and Morin, R.H. (1997), Evaluation of hydromechanical coupling in a granite rock mass from a high-pressure injection experiment: le Mayet de Montagne, France, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, Vol. 34, No. 3-4, paper No. 207, pp. 1~14.
11. Cundall, P.A. and Hart, R.D. (1985), Development of generalized 2D and 3D Distinct Element Programs for modelling jointed rocks. Misc. Paper SL-85-1, U.S. Army Corps of Engineers, pp. 1~85.
12. Gentier, S. (1986), *Morphologie et comportement hydromecanique d'une fracture naturelle dans un granite sous contrainte normale : etude experimentale et theorique*, Ph.D dissertation, Univerisite d'Orleans, Orleans, France, pp. 1~350.
13. Jeong, W.C. (2000), *Modelisation de l'influence d'une zone de faille sur l'hydrogeologie d'un milieu fracture: Application au domaine du stockage des dechets nucleaires*, Ph.D dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, France, pp. 1~222.
14. Pyrak-Nolte, L. (1992), Interrelationships between the hydraulic and seismic properties of fractures. Proc. of ISRM Intern. Conf. on fractured and jointed rock masses, 3-5 june, Lake Tahoe, California, USA, pp. 1232~1240.
15. Raven, K.G. and Gale, J.E. (1985), Water flow in natural rock fracture as a function of stress and sample size. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, Vol. 22, No. 3, pp. 251~261.
16. Rutqvist, J. (1995), Determination of hydraulic normal stiffness of fractures in hard rock from well testing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, Vol. 32, No. 5, pp. 513~523.
17. Snow, D.T. (1969), Anisotropic permeability of fractured media, *Water Resources Research*, Vol. 5, No. 6, pp. 1273~1289.
18. Stephansson, O., Jing, L. and Tsang, C.F. (1996), Coupled Thermo-Hydro-Mechanical processes of fractured media. *Developments in geotechnical engineering (79)*, Elsevier, The Netherlands, pp. 1~565.
19. Unger, A.J.A. and Mase, C.W. (1993), Numerical study of the hydromechanical behaviour of two rough fracture surfaces in contact, *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 7, pp. 2101~2114.
20. Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K and Gale, J.E. (1980), Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 1016~1024.
21. Yin, J.M. and Cornet, F.H. (1994), Integrated stress determination by joint inversion of hydraulic tests and focal mechanism. *Geophysical Research Letters*, Vol. 21, No. 24, pp. 2645~2648.
22. Zimmerman, R.W. and Bodvarsson, G.S. (1996), Hydraulic conductivity of rock fractures, *Transport in porous media*, No. 23, pp. 1~30.

(접수일: 2008. 11. 19 심사일: 2008. 12. 22 심사완료일: 2009. 1. 22)