수압파쇄 및 자연 균열의 수리역학적 동역학

신중호^{1)*} · 박 찬¹⁾

Hydromechanical dynamics of hydraulic and natural fractures

Joong-Ho Synn* and Chan Park

(Received 16 August 2018; Final version Received 24 August 2018; Accepted 29 August 2018)

Abstract : This study analyzed the hydromechanical behaviors of hydraulic and natural fractures caused by fluid injection, such as fracture closing-reopening and the related pressure parameters, stress mechanism changes, slippage-dilation criterion of natural fracture, and complex fracture intersections. When hydraulic and natural fractures intersect, the conditions for crossing, slippage, and dilation depend on intersection angles between fracture and stress direction, differential stress, and mechanical properties such as cohesion and friction coefficient of the fractures. Micro-mechanical and quantitative assessment technologies should be further developed for the analyses of fluid-fracture dynamics and the induced seismicity-like phenomenon.

Key words : hydraulic fracture, hydromechanical behavior, slippage-dilation criterion, complex fracture intersection

요 약 : 지하 암반 내 유체 주입에 의한 수압파쇄 균열과 자연 균열의 수리역학적 거동과 관련하여 균열 개폐와 압력 변수 관계, 응력 메카니즘 변화, 자연 균열의 미끄러짐-팽창 기준, 복합 균열 교차 전파 등의 관계를 분석하였다. 자연 균열면의 열림 상태에 따라 균열 거동과 관련한 압력 변수 및 응력해석해 적용의 유효성에 차이가 있었다. 수압파쇄 균열과 자연 균열의 교차시에 수압파쇄 균열의 자연 균열 관통, 자연 균열의 미끄러짐 또는 팽창 열림 등의 기준은 두 균열의 교차각, 주응력 방향과의 교차각, 주응력의 차, 균열면의 역학적 특성인 점착력과 마찰계수 등에 의해 좌우된다. 이러한 유체-불연속면 동역학적 거동 및 때로 수반되는 지진동 같은 현상의 관계 규명에는 미시역학적이고 정량적인 연구와 평가기법 개발이 있어야 한다.

주요어 : 수압파쇄 균열, 수리역학적 거동, 미끄러짐-팽창 기준, 복합 균열 교차

서 론

에너지·자원 개발뿐만 아니라 최근에는 다양한 분야로 지하 개발과 이용이 확대되고 있으며 그 활용 목적과 개발 형태에 적절한 효율성, 생산성, 안전성을 추구하고 있다. 이러한 공학적 평가와 관련하여 파악해야 하는 지하암반의 특성 중에서 핵심적인 요소는 균열, 절리, 단층 등의 불연속 구조이다. 기존 불연속면의 존재에 더하여 새로운 균열의 생성 메카니즘과 함께 이들 상호간의 연계 거동을 파악하는 것은 매우 중요하면서도 어려운 일인데, 불균질 지하암반의 수리역학적 복잡계(complex system)에서 일어나는

현상은 더욱 그러하다.

암반 균열의 생성과 제어에 관련한 공학적 기술의 하나가 수압파쇄이다. 수압파쇄기술의 개념은 1940년대 중반 미국의 Stanoline 석유가스회사에서 처음 고안되어 1947년 미국 Kansas주의 가스전에서 첫 현장 시험에 적용된 이후 1950년대에 석유·가스전의 회수율 증대를 위한 기술로서 본격적으로 상용화되었다(Montgomery and Smith, 2010; King, 2016; Veatch *et al.*, 2017). 최근에는 셰일가스 개발에서 수평시추기술과 수압파쇄기술의 발전을 토대로 석유·가스를 대체하는 셰일가스 혁명을 가져왔다. 셰일가스 혁명의 핵심은 기술혁신을 통한 비용 저감과 함께 생산성과 효율성의 증대를 가져온 것으로, 다단계 수압파쇄를 통한 복합 균열 네트워크 생성과 제어 기술에 의해 가능해진 것이다.

또한 수압파쇄기술은 1950년대에 Hubbert와 Willis에 의해 초기응력 측정이론으로 정립된 이래 세계적으로 현지 암반 초기응력 측정기법으로 가장 널리 이용되어오고 있

1) 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 심지층연구단
*Corresponding Author(신중호)

E-mail; jhsynn@kigam.re.kr

Address; Center for Deep Subsurface Research, Korea
Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon, Korea

다. 현재까지 전 세계적으로 측정된 초기응력 분포는 World Stress Map으로 작성되어 삼차원 응력 관계와 연계된 단층의 발생 패턴과 함께 제시되어 있으며(Heidbach *et al.*, 2016), 전 세계적인 초기응력 범위 및 대륙별 초기응력 분포도 비교되고 있다(Haghi *et al.*, 2018). 국내에서 현재까지 주된 수압파쇄기술의 응용은 터널과 지하공간 등의 안전설계를 위한 초기지압 측정 분야이다. 초기지압 측정으로서의 수압파쇄기술에 대한 국내 자체 연구는 1980년대 후반부터 처음으로 이루어졌으며(Synn, 1990), 1992년에 수압파쇄 현장시험장비를 처음 도입하여 1993년에 국내 자체 기술력으로는 처음으로 수압파쇄기술에 의한 현지응력측정이 이루어진 이후 지하공간 및 지하자원 개발 등에서 현지압반 초기응력 측정의 대표적 기술로 정착되었다. 1990년대부터 현재까지의 초기응력 측정 자료를 종합하여 최근에 국내 초기응력 분포도가 만들어졌다(Synn *et al.*, 2013). 이러한 삼차원 초기응력의 크기 및 방향 관계는 수압파쇄 균열이나 자연 절리 등 불연속면의 미끄러짐 파괴를 유발하는 역학적 메카니즘과 관계되는데, 특히 불연속면에 유체 주입 효과가 더해지면 불연속면의 마찰 저항력이 작아지고 미끄러짐 및 팽창 열림을 용이하게 만든다(Chan *et al.*, 2014; Rutter and Hackston, 2017).

최근에 지구환경문제 해결과 관련하여 이산화탄소의 지중저장 연구가 많이 이루어지고 있는데, 초임계상태 이산화탄소의 지층 내 주입-저장-확산 및 불연속 절리를 통한 누출 등의 역학적 메카니즘 규명에 있어서 유체 주입과 균열 생성 전파 현상에 대한 이해가 필요하며 수압파쇄 이론과 기술이 중요한 연구 도구가 되고 있다. 신재생에너지로서 지열 개발 분야에서도 수압파쇄가 핵심 기술로 적용되고 있는데, 특히 EGS(enhanced geothermal system) 심부 지열 개발에서 인공저류층 형성과 지열수 유동 채널 증진을 위한 수리자극(hydraulic stimulation)과 같은 지열생산 시스템 설계의 핵심기술로 적용되고 있다. 국내에서도 최근 4 km 이상 심도의 심부 지열개발 R&D가 처음으로 시작된 바가 있는데, 핵심기술로서 수압파쇄를 이용한 수리자극은 아직은 국내 기술력 부재로 외국의 기술진과 장비에 의존하는 수준이다. 이러한 다양한 지하 에너지 개발 및 폐기물 저장처분 분야에서 유체 주입-회수 시스템 및 균열 네트워크 제어 기술과 함께 유발지진(induced seismicity)에 대한 연구가 최근에 증가하고 있다(Amann *et al.*, 2018; Doglioni, 2017; Zang *et al.*, 2018). 그리고 유발(induced), 촉발(triggered) 및 자연(natural) 지진에 대한 특성 분석과 구분에 대한 연구도 이루어지고 있다(Dahm *et al.*, 2015; Scuderi and Collettini, 2016).

이상과 같이 수압파쇄와 연계되는 암반 균열의 동적 거동 특성, 특히 수리역학적 조건에 따른 균열의 생성, 열림,

단합, 전파 등은 매우 복잡한 양상을 가지고 있다. 그러므로 생성 균열과 자연 절리 및 암반저류층간의 상호작용을 야기하는 관련 영향 요소들의 독립적 특성 이해 및 중첩적 영향 파악이 매우 중요하다.

수압파쇄 균열 거동과 지압해석

수압파쇄 압력-균열 거동 패턴

석유·가스 개발의 LOT(leak-off test) 또는 XLOT(extended leak-off test), 그리고 현지압반 초기응력 측정을 위한 수압파쇄시험에서 전형적인 압력-시간 및 균열 거동 패턴은 Fig.1과 같다(Cheon and Lee, 2013; Fang and Khaksar, 2013; Feng and Gray, 2017; Lavrov *et al.*, 2016). 1차 가압 사이클에서 수압파쇄 시추공에 유체 주입으로 가압을 하면 초기에 미세 균열의 발생이나 열림이 없는 선형적 압력-시간 패턴을 보이는 FIT(formation integrity test) 구간을 지나, 미세 균열 발생으로 비선형 구간이 시작되는 압력인 LOP(leak-off pressure)가 나타나게 되고 주입 압력이 시추공벽의 파괴저항력(초기응력+암반강도)에 상응하는 FBP(formation breakdown pressure)에 도달하면 시추공벽에서 최대주응력방향으로 뚜렷한 파쇄균열이 발생하게 된다.

Fig. 1. Typical pressure-flowrate vs. time record from hydraulic fracturing.

Fig. 2. Schematic view of pressure inside a propagating fracture (Smith and Montgomery, 2015).

이후 계속적으로 가압을 하면 파쇄균열이 계속 전파 확장하면서 압력은 FPP(fracture propagation pressure) 수준을 유지하다가, 유체 주입을 중지하면 압력은 순간적으로 급격히 저하하면서 열린 균열이 닫히기 시작하는 ISIP(instantaneous shut-in pressure)를 거쳐 파쇄균열 전체가 닫히는 수준인 FCP(fracture closure pressure)를 지나서 서서히 일정한 압력 수준을 유지하게 된다. 2차 가압을 하면 닫혀 있는 파쇄균열이 시추공벽 입구에서부터 열리기 시작하는 FRP(fracture reopening pressure)를 지나서 다시 1차 가압 사이클과 같은 거동을 보이게 된다.

이러한 균열의 생성-확장-담힘-재개 과정에 상응하는 압력은 통상 측정이 가능한 시추공 내의 압력으로 나타내는 데, 주입 유체 유동과 균열 생성 전파는 짧은 시간의 동적 거동 상태에서 시추공 내 압력과 균열 내 압력에는 압력 강하의 영향으로 차이가 있다. Fig. 2는 시추공 내 압력과 균열 내 압력의 차이를 모식적으로 나타낸 것이다(Smith and Montgomery, 2015). 시추공 내 가압으로 파쇄균열이 새로이 전파하려면 이에 필요한 어느 정도의 균열 선단 압력이 가해져야 한다. 시추공에서 균열 선단까지 압력이 전달되는 과정에서 유체의 점성 압력 강하가 발생하므로 균열 선단 압력에 점성 압력 강하만큼 보상된 시추공 내 압력이 되어야 하며 이를 균열 전파에 필요한 순압력(net pressure)이라 한다. 그리고 시추공 인접 주변에서도 마찰 저항으로 인한 압력 강하가 발생할 수가 있으므로 실제 시추공 내 압력은 순압력보다 더 높게 유지되어야 한다.

파쇄균열 개폐와 압력 변수 해석

수압파쇄시험에 의한 초기응력 해석에서 균열의 생성 및 개폐와 압력 변수간의 관계를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 압력-유량-시간 기록(Fig. 1)에서 유체 주입 중지 이후 균열이 닫히는 과정에서 나타나는 압력 강하 구간의 균열폐쇄압력(fracture shut-in pressure, P_s) 및 2차 이후의 가압 사이클에서 균열이 열리기 시작하는 시점의 균열개구압력(fracture reopening pressure, P_r)은 수압파쇄시험을 통한 현지암반 초기응력 해석에서 필요불가결한 요소이다. 일반적으로 수직 시추공을 이용한 수압파쇄시험에서 초기 파쇄압력(Fig. 1의 FBP), P_b 은 암반의 투수특성에 따라 세 가지로 구분할 수 있다. 완전 비다공질 암반인 경우에는 식 (1), 다공질 암반이지만 수압파쇄시 유체가 침투하지 않는 비투수성을 보이는 경우는 식 (2), 다공질 암반으로서 균열 발생 이전에 시추공벽 내로 유체가 침투하는 투수성을 보이는 경우는 식 (3)으로 표현된다(Schmitt and Zoback, 1989; Fjaer *et al*, 2008). 여기서, σ_h 과 σ_H 는 최소 및 최대 수평응력, α 는 Biot 상수, ν 는 Poisson 비, P_o 는 공극수압이다.

$$P_b = 3\sigma_h - \sigma_H + T \quad (1)$$

$$P_b = 3\sigma_h - \sigma_H + T - P_o \quad (2)$$

$$P_b = (3\sigma_h - \sigma_H + T - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} P_o) / (2 - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu}) \quad (3)$$

식 (2)는 초기파쇄압력 상한 또는 빠른 가압속도 경우의 상한이고, 식 (3)은 초기파쇄압력 하한 또는 느린 가압속도 경우의 하한으로 규정할 수 있다. 이 두 식의 상한 및 하한 경계와 함께 수압파쇄 유체의 동적 점성 특성에 따른 파쇄 압력의 변화 범위를 수치해석으로 분석하여 비교한 연구 보고가 있다(Wang *et al.*, 2018). 일반적으로 다공질 투수성 암반에서 수압파쇄 균열 발생 이전에 시추공벽 내로의 유체 침투를 고려하지 않으면, 초기응력은 식 (4~5)와 같이 계산된다.

$$\sigma_h = P_s \quad (4)$$

$$\sigma_H = 3\sigma_h - P_r - P_o \quad (5)$$

이상과 같이 최소수평응력은 전적으로 균열폐쇄압력에 관계되며, 최대수평응력은 균열폐쇄압력 및 균열개구압력에 관계되기 때문에 이들 압력 변수 값의 정확한 결정은 암반의 초기응력해석에 있어서 절대적이다. Fig. 1에서 보듯이, 균열개구압력뿐만 아니라 특히 균열이 닫히는 과정에서 정교한 균열폐쇄압력은 압력-시간 그래프에서 명확하게 나타나지 않는다. 이로 인해 균열개구압력과 균열폐쇄압력의 결정을 위한 도식적, 통계적 또는 수치해석적 방법론뿐만 아니라, 측정 데이터의 선형적 또는 비선형적 관계 변환 활용 기법들이 제안되어 이용되고 있다(Aggson and Kim, 1987; Haimson *et al.*, 1989; Hardy and Asgian, 1989; Hayashi and Sakurai, 1989; Lee and Haimson, 1989; Rutqvist *et al.*, 2000). 전 세계적으로 이루어진 많은 지압측정 자료로부터 균열개구압력과 균열폐쇄압력의 관계를 분석하고, 유체 침투와 균열 내 압력의 영향 및 압력-시간 그래프상의 비선형 시작점(Fig. 1에서의 FRP)을 균열개구압력으로 결정하는 것에 대한 문제점을 제시한 연구 보고도 있다(Yokoyama *et al.*, 2014).

자연 균열의 수리역학적 거동

자연 균열 열림 형태와 압력 변수

자연 균열은 신선한 암반에서 수압파쇄에 의해 생성된 균열과 달리 균열면이 거칠고 열려있어 자연 상태에서 유

Fig. 3. Typical types of natural fractures.

체 흐름의 통로가 되는 경우가 많다. 자연 균열의 형태 즉, 균열면의 열림 상태에 따라 Fig. 3의 세 가지로 분류할 수 있다. 자연 상태에서 균열면이 닫혀있는 경우(closed fracture)에는 탄성이론에 의거한 시추공벽상의 응력해로부터 계산되는 식 (5)의 적용이 가능하다. 균열면이 전체적으로 닫혀 있고 시추공벽 부분에만 열려 있는 경우(tip-open fracture)에는 식 (5)의 탄성이론적 응력해는 적용되면서 공극수압 대신에 시추공 내 가압 압력이 작용하는 것으로 대체된다. 균열면이 완전히 열려있는 경우(wide-open fracture)에는 유

체 가압과 균열 개폐간의 상관관계가 나타나지 않으므로 탄성이론적 응력해를 적용할 수 없다. 이 경우에 압력-시간 기록에 나타나는 외형적인 균열개구압력(P_r) 값은 닫힌 균열이나 균열 입구만 열려있는 경우에 적용되는 균열개구압력과 다른 의미의 압력을 나타내게 되는데 물리적인 의미로 균열면에 수직으로 작용하는 압력에 해당된다(Rutqvist, 2000).

균열폐쇄압력(P_s) 또한 균열면 상태에 따라 Fig. 1의 압력-시간 기록에서 결정되는 값이 초기응력 계산에 필요로 하는 균열폐쇄압력을 의미하지 않는 경우도 있다. 시추공의 밀폐된 가압 시험구간 외부까지 균열이 연결되어 있고 주입 압력이 이 균열을 통해 유출되는 경우에는 정확한 균열폐쇄압력이 압력-시간 기록에 나타나지 않게 된다. 이러한 균열의 외부 연결 여부는 shut-in 사이클의 압력-시간 기록에서 압력 강하 점근치와 자연공극수압(지하수위에 대응)간의 비교, 유체 주입 밸브의 개폐 순간에 나타나는 rebound 압력 체크, 파쇄균열조사 등으로 확인할 수가 있다.

수직 시추공의 수평 단면에서 최대수평응력 방향으로 사 추공벽 선단 부분이 약간 열려있는 수압파쇄 균열 또는 자연 균열이 있다고 할 때, 초기응력 및 시추공 내 주입 유체 압력에 의해 발생하는 접선응력, σ_θ 는 식 (6~9)와 같다. 여기서, σ_H 는 최대수평응력, σ_h 는 최소수평응력, P_w 는 시추공 내 압력, P_f 는 균열 내 압력, a 는 시추공 반경, r 은 균열을 따라 시추공 중심으로부터의 거리이다.

Fig. 4. Criteria of fracture reopening pressure with stress ratios.

$$\sigma_{\theta}(\sigma_H, \sigma_h) = 0.5[3(\sigma_h - \sigma_H)\frac{a^4}{r^4} + (\sigma_h + \sigma_H)\frac{a^2}{r^2} + 2\sigma_h] \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta}(P_w) = -P_w \frac{a^2}{r^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta}(P_f) = -P_w \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta}(\sigma_H, \sigma_h, P_w, P_f) = 0.5[3(\sigma_h - \sigma_H)\frac{a^4}{r^4} + (\sigma_h + \sigma_H)\frac{a^2}{r^2} + 2\sigma_h] - P_w \frac{a^2}{r^2} - P_w \quad (9)$$

재가압을 통해 균열이 다시 열리는 때의 응력조건은 $\sigma_{\theta}(\sigma_H, \sigma_h, P_w, P_f) = 0$ 이고 이때의 수압(P_w)이 균열개구압력(P_r)이므로 식 (9)는 다시 식 (10)으로 표현된다.

$$P_r = 0.5[3(\sigma_h - \sigma_H)\frac{a^4}{r^4} + (\sigma_h + \sigma_H)\frac{a^2}{r^2} + 2\sigma_h]/(1 + \frac{a^2}{r^2}) \quad (10)$$

그리고 균열의 열림 정도 즉, 시추공 중심에서 균열이 열린 길이 선단까지의 거리(r)에 따라 균열개구압력(P_r)의 크기는 어느 정도 범위 내에서 변화한다. 균열개구압력과 최소수평응력의 비를 F 라고 하면, 균열의 열린 길이에 따른 균열개구압력 변화비는 식 (11)과 같다(Synn *et al.*, 2015).

여기서 K 는 최대수평응력대 최소수평응력의 비이다.

$$F = \frac{P_r}{\sigma_h} = 0.5[3(1-K)\frac{a^4}{r^4} + (1+K)\frac{a^2}{r^2} + 2]/(\frac{a^2}{r^2} + 1) \quad (11)$$

식 (11)에서 $F=1$ 이 되는 지점 즉, 균열개구압력이 균열면에 법선방향으로 작용하는 최소수평응력과 같은 지점은 K 값에 관계없이 $r = \sqrt{3}a$ 로 일정함을 알 수가 있다. 이는 시험시추공이 NX(직경 76 mm) 시추공이면 시추공벽에서 약 28 mm 깊이에 해당한다. 측압계수(K) 변화에 따른 균열의 열림과 닫힘의 기준 및 균열개구압력 비(F)의 변화는 Fig. 4와 같다. 그림에서 점선 및 열은 음영 부분은 완전 닫힌 균열(closed fracture)에 대한 균열 개구 기준이고 실선 및 짙은 음영 부분은 균열 선단이 열린 균열(tip-open fracture)에 대한 균열 개구 기준이다. 그리고 $r=a$ 즉, 시추공벽상의 균열 선단이 열리는 조건에서의 균열개구압력 및 최대수평응력은 식 (12~13)과 같다.

$$P_r = 0.5(3\sigma_h - \sigma_H) \text{ or } F = 0.5(3-K) \quad (12)$$

$$\sigma_H = 3\sigma_h - 2P_r \quad (13)$$

식 (13)은 균열이 완전히 닫혀있는 경우의 해석식인 식 (5)에서 공극수압 대신에 균열개구압력이 대체된 형태이다. 식 (12~13)의 균열개구압력 산정 및 최대수평응력 산정과 관련하여 수치해석 시뮬레이션 분석을 통해서 균열 입구의 열림 정도와 연계한 균열개구압력에 대한 연구 보고도 있다(Hardy and Asgian, 1989; Ito *et al.*, 1999). 그리고 균열개구압력과 균열폐쇄압력이 비슷하거나 같은 수준에 있음을 분석하거나(Ito and Hayashi, 1993; Pine *et al.*, 1983), 실제 세계 지압측정 자료 분석을 통해 두 값을 비교한 연구도 있다(Yokoyama *et al.*, 2014). 또한 높은 인장강도와 약한 지질 조직을 갖는 경암의 경우에는 기 존재하는 약한 조직구조에 대한 법선응력이 초래되는 가능성 등의 영향으로 균열폐쇄압력이 최소수평응력을 대표하지 않을 수도 있다는 연구 보고도 있다(Nelson *et al.*, 2007).

자연 균열의 수압재킹 거동

도수 터널이나 하저·해저 터널과 같이 수압과 관련한 수리역학적 거동 특성을 파악하기 위해 수압재킹시험(hydraulic jacking test)이 이루어진다. 이것은 터널 주변에 존재하는 자연 균열에 대하여 가압시험을 통해 균열면의 열림 및 닫힘과 연계되는 수리역학적 거동과 함께 이를 유발하는 압력 및 유량 특성을 파악하는 시험이다. 수압재킹시험에서 얻어지는 압력-유량 곡선 및 수압재킹압력 해석의 전형적인 형태는 Fig. 5와 같다. 이 압력-유량 곡선은 균열면의 열림 거동과 압력-유량 변화에 따라 세 구간으로 구분된다(Hartmaier *et al.*, 1998). 최소재킹압력(P_{min} , minimum

Fig. 5. Typical pattern of pressure-flow record from hydraulic jacking test (modified from Hartmaier *et al.*, 1998).

jacking pressure)은 압력-유량 곡선의 하부 선형구간에서 비선형으로 바뀌기 시작되는 지점의 압력으로서 균열면의 팽창 열림(dilation)이 시작하는 시점이다. 선형구간에서 비선형으로 바뀌는 지점을 정확히 찾을 수 있을 정도로 충분한 자료가 있다고 가정하는 경우에 이 지점을 가장 보수적인 면에서 수압재킹압력 지점으로 평가한다. 교차재킹압력(P_{int} , intersection jacking pressure)은 압력-유량 곡선의 하부(unjacked state) 및 상부(hydrojacked state)의 두 선형구간에 대한 선형 접선이 교차하는 지점으로서, P_{min} 을 결정할 수 있을 정도의 충분한 자료가 없을 때 이 값을 수압재킹압력으로 추정한다. 재킹사인(P_{ult} , jacking signature)은 압력-유량 곡선의 상부 선형구간에서 비선형으로 바뀌기 시작되는 지점의 압력으로서, 모든 물리적인 측면에서 균열면의 수압재킹이 명백한 지점이다. 여기서는 일정한 압력을 유지하는데 유량은 증가하며 일정한 유량에서는 압력이 저하하는 상태이다. 이는 높은 압력으로 인해 균열의 확장이나 개구가 제어되지 않는 상태로써 비라이닝 압력 터널에서는 허용되어서는 안되는 거동 양상이다.

한편, 수압시험에서 얻어진 압력-시간 곡선에서 순간균열폐쇄압력(ISIP, instantaneous shut-in pressure)값(Fig.1 참조)과 압력-유량 곡선에서의 재킹압력과 비교한 경우도 있다(Quirion and Tournier, 2010). 자연 균열이 최대주응력 방향으로 존재하는 경우에는 수압재킹압력을 최소주응력으로 평가할 수가 있다. 균열 방향이 최대주응력 방향과 교차하는 각이 10° 이내에 있다면 완전한 재킹압력이 최소주응력으로 평가할 수 있지만 교차각이 이보다 크면 과대

평가된다는 연구보고가 있다(Evans *et al.*, 1995). Doe 등(1987)은 상대적으로 높은 유량(0.8 l/min) 및 낮은 유량(0.4 l/min)의 수압파쇄시험을 통해 압력-시간 곡선상의 shut-in 곡선 양상과 ISIP 결정 방법을 검토하고 이를 수압재킹시험에 의한 재킹압력과 비교하였다. 이에 의하면 수압파쇄에서 ISIP는 수압재킹압력보다 크게 결정되는 것으로 나타났다. Cornet 등(1984)은 낮은 유량시험(slow pump cycle)에서의 최대압력이 균열폐쇄압력(shut-in pressure)에 근접한다고 보고하기도 하였다.

현장 수압재킹시험 결과 분석

국내 댐 지역의 도수터널 현장에서 수직 시추공을 이용하여 시추공을 관통하는 자연 균열에 대하여 수압재킹시험을 실시하였다. 균열 형태에 따른 비교를 위하여, 시추 코어 및 시추공 텔레뷰어 자료로부터 서로 다른 형태 즉, 시추공 벽상의 균열 선단의 열림 정도 차이가 뚜렷한 두 개의 균열을 선택하였다. 균열 방향 및 균열 형태, 수압재킹시험에서 얻어진 압력-유량-시간 기록, 이로부터 결정된 재킹압력 해석 결과는 Fig. 6과 같다. (a) 및 (b)는 각각 시추공벽상의 균열면이 닫혀있는 균열 및 시추공벽상의 균열면이 열려있는 균열로 구분하였다.

두 균열의 압력-유량 곡선 형태를 비교하면, 닫힌 균열(a)의 경우는 하부의 unjacked 구간과 상부의 hydrojacked 구간 사이의 전이 구간이 별로 없는 반면에, 열린 균열(b)의 경우는 하부와 상부의 두 선형 구간 사이에 완만한 곡선의 전이 구간이 많이 나타났다. 전이 구간의 차이는 곧 자연 상태의 균열 열림 여부와 관계가 있는 것으로 판단된다. 열린

Fig. 6. Result of hydraulic jacking test on natural fractures at a water pressure tunnel site. (a) closed fracture (left). (b) open fracture (right).

균열일수록 가압을 하면 상대적으로 낮은 압력부터 균열 선단이 열리고 계속 가압 증가에 따라 균열 내부로 열린 구간이 늘어나기 때문에 비선형 곡선 구간이 나타나게 된다. 이로부터 수압재킹에서 얻어진 압력-유량 곡선의 비선형 전이구간 형태 분석을 통해 균열의 열린 형태를 간접적으로 판단할 수가 있을 것이다.

한편, 앞의 식 (11)의 이론적 해석에 의하면 균열면이 열리고 계속적으로 확장되기 위한 균열개구압력 또는 균열확장압력(완전한 재킹압력에 상응)은 균열법선응력(균열폐쇄압력에 상응)을 10-20 % 정도 상회하는 수준으로 평가된다(Synn *et al.*, 2015). 그리고 노르웨이 압력 터널 설계 기준(Norwegian cover design criterion)에 의하면 압력 터널 운영에 있어서 최소주응력과 운영설계 정수압의 비인 안전율(FOS, factor of safety)은 1.1-1.3 범위가 적정하다고 되어있다(Hartmaier *et al.*, 1998).

균열 내 압력 분포 패턴

앞의 수압파쇄 압력-균열 거동 패턴에서 언급한 바와 같이 시추공 내의 주입 압력과 균열 내부의 압력에는 차이가 있다(Fig. 2 참조). 이러한 압력 차이의 원인에는 시추공의 마찰 저항, 유체 점성 저항, 짧은 시간에 작은 균열 간극 내 동적 유동 격차 등이 있다. 일반적으로 수리역학적 균열 거동 해석이나 지압 해석에서는 균열 내 유체가 전혀 침투하지 않아 균열 내 유체압이 없거나 또는 시추공 내 압력과 균열 내 압력이 동일한 것으로 가정하게 된다. 그렇지만 실제로는 저항과 시간 차이에 의한 압력 강하로 인해 균열 내 압력은 시추공 내 압력보다 낮은데 그 비교의 예가 Fig. 7이다(Smith and Montgomery, 2015). 균열이 전파할 때 실제 균열 선단 압력(P_{tip})과 그 때의 시추공 내 순압력(P_{net})을 비교한 것으로, 균열 선단 압력에 점성 압력 강하(P_{vis})를 합

Fig. 7. Pressure drop between borehole and fracture (Smith and Montgomery, 2015).

한 것이 균열 전파에 요구되는 시추공 내 순압력이 된다. 여기서 점성 압력 강하는 유체의 점성적 특성과 관계가 있다. Wang 등(2018)은 균열 전파에 있어서 물, 점성 오일, 초임계 CO₂ 등 세 종류 유체의 영향을 실험 및 수치해석을 통해 비교하였다. 이에 의하면, 실험적으로 점성이 가장 낮은 초임계 CO₂ 경우가 상대적으로 낮은 파쇄 압력을 보였고 더욱 복잡한 균열 형태를 형성하였으며, 수치모델링 해석에서도 동적 점성이 클수록 파쇄압력이 증가하는 것으로 나타났다.

열린 균열의 길이 및 균열 내 유체의 충전 여부에 따라라도 균열 내 압력 분포가 달라진다. Warpinski와 Teufel(1987)에 의하면, 균열면 내부에 물이 없이 비어있는 경우가 물이 있는 경우에 비해 거리에 따른 압력 강하가 급격히 일어나서 주입 유체 압력이 균열 내부로 전달되지 않는 것으로 나타났다. 그리고 물이 차있는 경우에도, 균열 길이가 무한한 경우가 유한한 경우보다 압력 강하가 많아서 거리에 따른 균열 내 압력이 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다(Fig. 8). 또한 시추공 내 주입 압력이 높을수록 균열 거리 증가에 따른 압력 강하는 상대적으로 작게 발생하였다(Rutqvist *et al.*, 1990).

한편, 수압파쇄는 균열 선단의 전파와 관련이 되는 현상이어서 파괴역학적 수압파쇄 해석 기법을 많이 적용하기도 한다(Rummel, 1987). 수압파쇄 균열이 침투한 선단의 형태일 때, 균열 선단 인접 영역에서의 총 응력장의 세기는 작용하는 각 응력 요소들에 의한 응력확대계수(stress intensity factor)의 중첩에 의해 얻을 수 있다. $K_I(\sigma_H)$, $K_I(\sigma_h)$, $K_I(P_w)$, $K_I(P_f)$ 는 각각 최대수평응력, 최소수평응력, 시추공 내 유체 압력, 균열 내 유체 압력에 의한 응력확대계수이다. 이로부터 총 응력확대계수, K_I 및 균열 내 유체 압력에 의한 응력확대계수, $K_I(P_f)$ 는 식 (14-15)와 같이 표현된다. 여기

Fig. 8. Pressure distribution in fracture with various fracture conditions (Warpinski and Teufel, 1987).

서 a 는 시추공 반경이고 $f(r)$ 은 시추공 중심으로부터 균열 선단 거리, r 에서의 무차원 응력확대 함수이다.

$$K_I = K_I(\sigma_H) + K_I(\sigma_h) + K_I(P_w) + K_I(P_f) \quad (14)$$

$$K_I(P_f) = P_w \sqrt{a} f(r) \quad (15)$$

균열 내의 압력분포 패턴을 Fig. 9와 같이 네 가지로 구분할 때, 각각의 $f(r)$ 은 Fig. 10과 같이 얻어진다(Rummel, 1987). 여기서 일정(constant)은 균열 내 압력이 거리와 관계없이 시추공 내 압력과 동일한 경우, 역수강하(reciprocal drop)는 거리에 따라 역수로 저하하는 경우, 선형강하(linear drop)는 거리에 따라 선형적으로 저하되는 경우, 이차강하(quadratic drop)는 거리에 따라 이차함수 형태로 저하하는 경우이다. 이와 같이 균열 내 유체 압력 분포는 파괴 역학적 수압파쇄 해석에서 특히 균열 선단의 응력확대계수에 큰 영향을 미치며 따라서 전체 수압파쇄 압력 및 균열 전파 패턴이 달라지게 된다. 즉, 균열 내 압력 구배 분포는 때

우 중요한 요소이며 이에 대한 규명이 정확히 이루어져야 할 것이다.

수압파쇄 균열과 자연 균열의 교차 거동

균열 전파 형태

수압파쇄 균열 생성 이후 계속적인 유체 가압이 이루어지면 균열 선단이 확장해 나가고 주변의 기존 자연 균열들과 만나게 된다. 수압파쇄 균열과 자연 균열의 교차 형태와 교차 이후의 상호 작용 양상에는 다양한 패턴이 나타난다. Fig. 11에서 (b)는 수압파쇄 균열이 자연 균열을 관통하지 못하고 (d)와 같이 자연 균열에서 미끄러짐(slippage)이나 팽창(dilation)이 발생하는 경우이고, (c)는 수압파쇄 균열이 자연 균열을 관통하여 계속 전파하면서 (e) 또는 (f)와 같이 자연 균열에도 유체 주입으로 팽창이 일어나는 경우이다. 자연 균열과 교차 이후에 계속적인 유체 가압이 진행되

Fig. 9. Four types of pressure gradients in fracture.

Fig. 10. Dimensionless stress intensity functions with various pressure gradients in fracture.

Fig. 11. Intersecting patterns between a hydraulic fracture and a natural fracture.

Fig. 12. Coordinate system of a hydraulic fracture intersecting a natural fracture.

면(g) 또는(h)와 같이 자연 균열 선단이나 자연 균열 내 취약 부분에서 새로운 수압파쇄 균열이 생성 전파하게 된다(Chuprakov *et al.*, 2013; Gu *et al.*, 2012; Yoon *et al.*, 2017).

주응력, 수압파쇄 균열과 자연 균열의 교차 관계가 Fig. 12와 같을 때, 수압파쇄 균열이 자연 균열과 교차하면 수압파쇄균열 선단 형태가 침예하지 않으므로 응력확대계수로 표현되는 균열 선단의 응력집중을 고려하지 않으면 수압파쇄 균열면 및 자연 균열면에 작용하는 법선응력과 전단응력은 식 (16~19)와 같이 표현된다.

$$\sigma_{\alpha} = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\alpha \quad (16)$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\sin 2\alpha \quad (17)$$

$$\sigma_{\beta} = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\beta \quad (18)$$

$$\tau_{\beta} = \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\sin 2\beta \quad (19)$$

수압파쇄균열과 자연 균열이 교차하여 유체가 자연 균열 내로 유입이 되면, 자연 균열면에 가해지는 공극압(P)은 식 (20)과 같이 표현된다. P_e 는 균열면의 법선응력(통상적으로 균열폐쇄압력)을 초과하여 균열의 열림과 유체 흐름을 유지하는데 필요한 순압력(net pressure)으로서 앞의 Fig. 2 및 Fig. 7에서 자세히 설명하였는데, 여기서는 앞에서 설명한 시추공 주변 마찰 저항이나 유체 점성 저항에 의한 압력 강하에 대한 보상치를 고려하지 않고 균열면에 작용하는 응력 관계만으로 표현한 것이다. 즉, 균열면에 가해지는 공극압, P 는 외부 응력조건에 의한 균열면 법선응력과 균열이 열려서 유체 흐름을 유지하는 데 필요한 순압력을 합한 것이 된다.

$$P = \sigma_{\alpha} + P_e \quad (20)$$

균열의 미끄러짐 및 팽창 열림 기준

수압파쇄 균열을 통해 가해진 유체 주입에 의해 자연 균열에서 미끄러짐이 발생할 때의 Mohr-Coulomb 전단파괴 기준(Jaeger *et al.*, 1976), 주응력차 및 순압력은 식 (21~23)과 같이 계산된다(Li *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2014; Warpinski and Teufel, 1987; Zhou *et al.*, 2008). τ_o 는 자연 균열면의 점착력, μ 는 자연 균열면의 마찰계수이다.

$$\tau_{\beta} \geq \tau_o + \mu(\sigma_{\beta} - P) \quad (21)$$

$$(\sigma_H - \sigma_h) > \frac{2\tau_o - 2\mu P_e}{\sin 2\beta + \mu \cos 2\beta - \mu \cos 2\alpha} \quad (22)$$

$$P_e > \frac{\tau_o}{\mu} - \frac{1}{2\mu}(\sigma_H - \sigma_h)\sin 2\beta - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)(\cos 2\beta - \cos 2\alpha) \quad (23)$$

그리고 자연 균열 내에 가해지는 유체 압력이 균열면에 작용하는 외부 법선응력보다 커지면 균열이 팽창하여 열리게 된다(Liu *et al.*, 2014, Warpinski and Teufel, 1987). 이때의 균열 팽창 조건, 주응력차 및 순압력은 식 (24~26)과 같다. C_o 는 자연 균열면의 점착 강도이다.

$$P > \sigma_{\alpha} + C_o \quad (24)$$

$$(\sigma_H - \sigma_h) < \frac{2P_e - 2C_o}{\cos 2\alpha - \cos 2\beta} \quad (25)$$

$$P_e > \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)(\cos 2\alpha - \cos 2\beta) + C_o \quad (26)$$

균열 형태와 미끄러짐-팽창 관계 해석

균열의 미끄러짐과 팽창 열림 조건에 영향을 미치는 요소들은 초기응력조건, 초기응력과 균열의 교차 각도, 균열면의 점착력과 마찰계수, 주입 유체 압력 등이다. 세 가지 균열 특성에 대하여 각 영향 요소 변화에 따른 균열의 미끄러짐과 열림 조건을 해석하였다.

Fig. 13은 일반적인 자연 절리 수준의 균열 조건($\tau_o = 1.0$ MPa, $\mu = 0.6$) 및 주응력 조건($\sigma_H = 2$ MPa, $\sigma_h = 1$ MPa)에서 순압력의 변화($P_e = 0, 1.0, 1.5$ MPa)에 따른 미끄러짐과 팽창 조건을 해석한 결과이다. 순압력이 커질수록 미끄러짐에 필요한 주응력차의 하한은 작아지고 팽창에 필요한 주응력차의 상한은 증가하였다. 미끄러짐이 발생할 수 있는 최대주응력 방향(여기서는 수압파쇄 균열 방향과 동일)과 자연 균열의 교차각 범위는 마찰계수와 관계가 있는데, 본 해석의 마찰계수 0.6(내부마찰각 약 31°에 해당) 경우에는 미끄러짐 발생 범위가 59° 이내이다. 그리고 미끄러짐이 발생하는 주응력차의 크기는 최대주응력 방향과 자연 균열 방향간의 교차각에 따라 변하며 본 해석 결과에서는 10-50° 범위에서 비교적 작은 주응력차에서도 미끄러짐이 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 세 가지 균열 형태로서 균열면이 매끄럽고 점착력이 약한 조건($\tau_o = 0.2$ MPa, $\mu = 0.4$), 일반적인 자연 균

열 수준의 조건($\tau_o = 1.0$ MPa, $\mu = 0.6$), 균열면이 거칠고 점착력이 강한 조건($\tau_o = 1.5$ MPa, $\mu = 0.8$)에 대한 해석 결과를 비교한 것이다. 마찰계수는 미끄러짐이 발생하는 교차각 범위와 관계가 있으며, 점착력은 미끄러짐이 발생하는 주응력차의 크기와 관계가 있다. 마찰계수 0.4, 0.6, 0.8은 각각 내부마찰각 약 22°, 31°, 39°에 해당되며 따라서 미끄러짐이 발생하는 교차각 범위는 각각 68°, 59°, 51° 이내가 된다. 점착력 0.2 MPa, 1.0 MPa, 1.5 MPa 경우에 미끄러짐이 발생하는 주응력차의 최소 크기는 각각 교차각 34°에서 0.59 MPa, 교차각 30°에서 3.53 MPa, 교차각 26°에서 6.24 MPa 정도로 나타났다.

한편, 이러한 다양한 균열 교차 관계 및 균열 특성에 따른 균열의 미끄러짐과 팽창 열림 관계를 암반블록 모델의 수압파쇄실험을 통하여 많이 연구되고 있는데 삼차원 균열 전파 양상을 시각적으로 파악하는 데 도움이 된다(Dehghan *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2018).

Fig. 13. Analysis result for criteria of slippage and dilation with net pressure.

Fig. 14. Analysis result for criteria of slippage with cohesion and friction coefficient.

균열 교차 이후의 새 균열 생성 전파

수압파쇄 균열과의 교차에 의해 자연 균열에 미끄러짐이나 팽창이 발생한 이후에 수압파쇄 유체 주입으로 계속 가압이 되면 새로운 균열이 생성된다. 즉, Fig. 11의 균열 교차 패턴에서 자연 균열의 미끄러짐이나 팽창 거동 이후에 (e), (g), (h)과 같은 새로운 수압파쇄 균열이 생성 전파하게 된다. 이러한 세 가지 패턴의 새로운 균열 생성 전파는 응력조건, 주입 유체 압력, 균열과 주응력간의 교차 관계, 균열면의 물리역학적 특성 등의 조합에 의한 수리역학적 조건에 따라 발생한다(Dehghan *et al.*, 2016).

새로운 균열의 생성 전파에 있어서는 첨예한 균열 선단에서의 응력집중효과인 응력확대계수(stress intensity factor, K_I)를 고려하는데, Fig. 12의 좌표계에서 수압파쇄 균열 선단에서의 응력분포는 식 (27~29)와 같이 표현되며 자연 균열 선단에서의 응력분포는 좌표변환을 통해 동일한 형태로 표현할 수 있다. r 과 θ 는 균열 선단에서의 축좌표계이다.

$$\sigma_{x'} = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\alpha + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \quad (27)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\alpha + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \quad (28)$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\sin 2\alpha + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (29)$$

수압파쇄 균열의 자연 균열 관통

수압파쇄 균열과 자연 균열이 교차하는 순간에 교차 지점의 압력이 수압파쇄 균열의 진행 방향으로 새 균열을 생성하는데 필요한 압력보다 크면, 자연 균열을 관통하여 수압파쇄 균열이 계속 확장되며(Fig. 11(e) 참조) 이 때의 조건은 식 (30)과 같다. P_i 는 교차 순간의 교차 지점(i)에서의 유체 주입 압력, σ_α 는 수압파쇄 균열면의 법선응력(Fig. 12 참조), $K_{IC,i}$ 는 교차 지점의 자연 균열면 암석의 파괴인성이다.

$$P_i > \sigma_\alpha + K_{IC,i} \quad (30)$$

자연 균열 선단에서 수압파쇄 균열 확장

수압파쇄 균열을 통한 가압 유체에 의해 자연 균열이 팽창된 이후에 자연 균열의 양쪽 어느 끝에서 주입 압력이 균열 선단의 균열 확장에 필요한 압력보다 크면, 균열 선단에서 균열이 자연 균열 방향으로 생성되어서 점차 주응력 방향으로 확장되며(Fig. 11(g) 참조) 이 때의 조건은 식 (31)과 같다. σ_β 는 자연 균열면의 법선응력(Fig. 12 참조), $K_{IC,tip}$ 는 자연 균열 선단의 파괴인성(fracture toughness), ΔP_{nf} 는 교차 지점과 균열 선단간의 압력차이다. 선단 균열이 계속 전파해 나가기 위해서는 균열 선단의 파괴인성이 교차 지점에서의 파괴인성보다 충분히 작아야 하는데, 그 이유는 교차 지점과 균열 선단간의 압력 강하를 극복해야 하기 때문이다.

$$P_i > \sigma_\beta + K_{IC,tip} + \Delta P_{nf} \quad (31)$$

자연 균열 내에서 새 수압파쇄 균열 생성

자연 균열의 팽창 이후에 자연 균열의 어느 지점에서 압력이 그 지점의 국부적인 파괴인성을 능가하면 새로운 수압파쇄 균열이 발생하며(Fig. 11(h) 참조) 이 때의 조건은 식 (32)와 같다. $K_{IC,a}$ 는 자연 균열 내 a 지점의 국부적 파괴인성, ΔP_a 는 교차 지점과 자연 균열 내 a 지점간의 압력 강하이다. 이 a 지점에서의 국부적 생성 균열이 계속 전파해 나가려면 자연 균열 양쪽 선단에서의 압력 강하가 더 낮게 유지되어야 한다.

$$K_{IC,a} < K_{IC,i} - \Delta P_a \quad (32)$$

결 론

지하 암반에 새로운 균열이 생성되거나 기존 불연속면이 전단파괴나 팽창으로 동적 움직임을 보이는 것은 역학적 평형상태를 바꾸는 다양한 자연적 또는 인위적 활동에 의한 것이다. 석유·가스 추출에 따른 빈 암반공극의 압축으로 상반의 붕괴나 침하, 물이나 이산화탄소 등의 유체 주입으로 암반의 공극수압 증가와 마찰저항 감소로 인한 불연속면의 움직임, 수압파쇄와 같이 초기지압조건을 초과하는 유체 가압으로 새로운 균열 생성이나 기존 불연속면의 파괴, 지하의 유체 추출·주입 또는 호수의 충전·배수로 지하 하중의 증감에 의한 응력 조건의 변화로 단층 운동 유도 등이 있다(Doglioni, 2017). 이러한 지하 암반 내 유체 주입에 의해 발생하는 초기응력조건과 역학적 메카니즘 변화, 불연속면의 역학적 특성 변화, 복합 균열 네트워크 생성과 전파 등은 상호 영향 관계를 가진다. 특히 유체와 균열의 수리

동역학적 거동은 매우 복잡한 양상을 가지고 있으므로 관련 영향 요소들의 독립적 특성 이해 및 중첩적인 영향 파악이 매우 중요하다.

자연 균열의 형태 즉, 균열면의 열림 상태에 따라 균열의 개폐와 관련 압력 변수의 해석에 차이가 있다. 신선한 암반 또는 완전히 닫힌 균열의 경우에 적용하는 탄성이론에 의거한 응력해는 균열 선단이 열려 있는 경우에 부분적 압력 변수 변경 즉, 공극수압 대신에 시추공 내 가압 압력으로 대체함으로써 적용의 유효성을 가진다. 한편, 자연 균열 형태에 따른 수압재킹시험의 압력-유량 곡선에서 비선형 전이 구간 형태 분석을 통해 균열의 열린 형태를 간접적으로 판단할 수가 있을 것이다.

석유·가스, 물, 이산화탄소와 같이 유체의 점성 특성에 따라 균열 내 압력 강하 차이로 압력 구배가 달라지고 균열 생성·전파의 파괴역학적 해석에 있어서 균열 선단의 응력 확대계수에 영향을 미쳐서 파쇄 압력 및 균열 전파 패턴이 달라진다. 즉, 균열 내 압력 구배는 중요한 요소로서 이에 대한 규명이 정확히 이루어져야 할 것이다.

수압파쇄 균열과 자연 균열의 교차시에 수압파쇄 균열의 자연 균열 관통, 자연 균열의 미끄러짐 파괴, 자연 균열의 팽창 열림 등의 기준은 두 균열의 교차각, 주응력 방향과의 교차각, 주응력의 차, 균열면의 역학적 특성(점착력과 마찰 계수) 등에 의해 좌우된다. 수압파쇄 균열이 자연 균열을 직진 관통하는 경우는 주응력차가 크고 균열간의 교차각이 큰 일부 조건에서 발생한다. 비교적 낮은 주응력차이거나 교차각이 크지 않은 대부분의 범위에서는 응력조건과 자연 균열의 마찰계수에 따라 미끄러짐이나 팽창 열림이 발생한다. 특히 마찰계수는 미끄러짐이 발생하는 두 균열의 교차각(또는 주응력과 자연 균열의 교차각) 범위와 관계가 있다. 일반적으로 단층 불연속면의 마찰계수로 적용하는 0.6의 경우에 미끄러짐 발생 교차각 범위는 약 60° 이내이다. 그리고 자연 균열의 미끄러짐이나 팽창 발생 이후에 계속적인 유체 주입으로 인해 자연 균열이 확장되거나 새로운 균열이 생성되는 경우에는 두 균열의 교차시와는 달리 균열 선단이 첨예한 형태로서, 이러한 균열 생성 전파 해석에 있어서는 추가적으로 균열 선단에서의 응력집중효과인 응력확대계수를 고려한 응력해석이 필요하다.

지하 에너지개발이나 유체 주입 등의 활동에 따른 불연속면의 동적 거동에 수반하여 때로 지진동 현상이 발생하기도 하는데, 이러한 영향 규명에 있어서는 현상학적으로 지구조적·물리적 조사 분석에 더하여 정량학적으로 역학적·공학적 영향 평가가 있어야 하며 미시역학(micro-mechanics) 방법론적 연구와 정밀 평가기법 개발이 필요할 것이다.

사 사

본 연구는 2018년도 한국지질자원연구원(KIGAM) 주
요사업 재원으로 지원받은 연구과제인 ‘시추공 기반 심지
층 특성 규명 InDEPTH 요소기술 개발(GP2017-016 :
18-3423)’의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Aggson, J.R. and Kim, K., 1987. Analysis of hydraulic fracturing pressure histories : A comparison of five methods used to identify shut-in pressure. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts*, 24(1), 75-80.
- Amann, F., Gischig, V., Evans, K., Doetsch, J., Jalali, R., Valley, B., Krietsch, H., Dutler, N., Villiger, L., Brixel, B., Klepikova, M., Kittila, A., Madonna, C., Wiemer, S., Saar, M.O., Loew, S., Driesner, T., Maurer, H., and Giardini, D., 2018. The seismo-hydromechanical behavior during deep geothermal reservoir stimulations: open questions tackled in a decameter-scale in situ stimulation experiment. *Solid Earth*, 9, 115-137.
- Chan, A.W., Hauser, M., Couzens-Schultz, B.A., and Gray, G., 2014. The role of shear failure on stress characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 1641-1646.
- Cheon, D.S. and Lee, T.J., 2013. Theoretical background and design of hydraulic fracturing in oil and gas production, *Tunnel & Underground Space*, 23(6), 538-546.
- Chuprakov, D., Melchaeva, O., and Prioul, R., 2013. Hydraulic fracture propagation across a weak discontinuity controlled by fluid injection, *Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*, InTech, Croatia, p.157-182.
- Cornet, F.H. and Valette, B., 1984. In situ stress determination from hydraulic injection test data. *J. Geophysical Research*, 89(B13), 11527-11537.
- Dahm, T., Cesca, S., Hainzl, S., Braun, T., and Kruger, F., 2015. Discrimination between induced, triggered, and natural earthquakes close to hydrocarbon reservoirs: A probabilistic approach based on the modeling of depletion-induced stress change and seismological source parameters. *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 2491-2509.
- Dehghan, A.N., Goshtasbi, K., Ahangari, K., and Jin, Y., 2015. The effect of natural fracture dip and strike on hydraulic fracture propagation. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75, 210-215.
- Dehghan, A.N., Goshtasbi, K., Ahangari, K., and Jin, Y., 2016. Mechanism of fracture initiation and propagation using a tri-axial hydraulic fracturing test system in naturally fractured reservoirs. *European J. Environmental and Civil Engineering*, 20(5), 560-585.
- Doe, T.W. and Korbin, G.E., 1987. A comparison of hydraulic fracturing and hydraulic jacking stress measurements, *Proc. 28th US Symposium on Rock Mechanics*, Tucson, United States, p.283-290.
- Doglioni, C., 2017. A classification of induced seismicity. *Geoscience Frontiers On the Web.*, <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.11.015>.
- Evans, K. and Meier, P., 1995. Hydrojacking and hydrofracturing tests in a fissible schist in south-west Switzerland: In-situ stress characterization in difficult rock, *Proc. 2nd International Conference on the Mechanics of Jointed and faulted Rock*, April 1995, Vienna, Austria, p.415-422.
- Fang, Z. and Khaksar, A., 2013. Role of geomechanics in assessing the feasibility of CO₂ sequestration in depleted hydrocarbon sandstone reservoirs. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 479-497.
- Feng, Y. and Gray, K.E., 2017. Discussion on field injectivity tests during drilling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 493-498.
- Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M., and Risnes, R., 2008. *Petroleum Related Rock Mechanics* (2nd Ed.), Elsevier, Amsterdam, Netherlands, p.369-390.
- Gu, H., Weng, X., Lund, J., Mack, M., Ganguly, U., and Suarez-Rivera, R., 2012. Hydraulic fracture crossing natural fracture at nonorthogonal angles: A criterion and its validation. *SPE Production & Operations*, 20-26.
- Haghi, A.H., Chalaturnyk, R., and Ghobadi, H., 2018. The state of stress in SW Iran and implications for hydraulic fracturing of a naturally fractured carbonate reservoir. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 105, 28-43.
- Haimson, B.C., Tunbridge, L.W., Lee, M.Y., and Cooling, C.M., 1989. Measurement of rock stress using the hydraulic fracturing method in Cornwall, U.K.-Part.II. Data reduction and stress calculation. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts*, 26(5), 361-372.
- Hardy, M.P. and Asgian, M.I., 1989. Fracture reopening during hydraulic fracturing stress determinations. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts*, 26, 489-497.
- Hartmaier, H.H., Doe, T.W., and Dixon, G., 1998. Evaluation of hydrojacking tests for an unlined pressure tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(4), 393-401.
- Hayashi, K. and Sakurai, I., 1989. Interpretation of hydraulic fracturing shut-in curves for tectonic stress measurements. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts*, 26(6), 477-482.
- Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K., and Ziegler, M., 2016.

- World Stress Map 2016, *GFZ Data Services On the Web.*, <http://doi.org/10.5880/WSM.2016.002>.
- Ito, T. and Hayashi, K., 1993. Analysis of crack reopening behavior for hydrofrac stress measurement. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts*, 30, 4235-4240.
- Ito, T., Evans, K., Kawai, K., and Hayashi, K., 1999. Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts*, 36, 811-826.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W., 1976. *Fundamentals of Rock Mechanics* (2nd Ed.), Chapman and Hall, London, p.65-68, p.106-108, p.223-227.
- King, G.E., 2016. Overview of hydraulic fracturing operations and technologies, *Hydraulic Fracturing Impacts and Technologies*, Uddameri et al.(ed.), CRC Press, p.1-19.
- Lavrov, A., Larsen, I., and Bauer, A., 2016. Numerical modelling of extended leak-off test with a pre-existing fracture. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 1359-1368.
- Lee, M.Y. and Haimson, B.C., 1989. Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameters. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts*, 26(6), 447-456.
- Li, Y., Sun W., and Zhang, C., 2016. The influence between natural fracture and hydraulic fracture in shale reservoir. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, 11(1), 61-65.
- Liu, Z., Chen, M., and Zhang, G., 2014. Analysis of the influence of a natural fracture network on hydraulic fracture propagation in carbonate formations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 575-587.
- Liu, Z., Wang, S., Zhao, H., Wang, L., Li, W., Geng, Y., Tao, S., Zhang, G. and Chen, M., 2018. Effect of random natural fractures on hydraulic fracture propagation geometry in fractured carbonate rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 491-511.
- Montgomery, C.T. and Smith, M., 2010. Hydraulic fracturing: History of an enduring technology. *J. Petroleum Technology*, 63, 26-32.
- Nelson, E.J., Chipperfield, S.T., Hillis, R.R., Gilbert, J., McGowen, J., and Mildren, S.D., 2007. The relationship between closure pressures from fluid injection tests and the minimum principal stress in strong rocks. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 787-801.
- Pine, R.J., Ledingham, P., and Merryfield, C.M., 1983. In situ stress at Rosemanowes Quarry to depth 2000m. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts*, 20, 63-72.
- Quirion, M. and Tournier, J.-P., 2010. Hydraulic jacking tests in crystalline rocks for hydroelectric projects in Quebec, Canada, *Rock Stress and Earthquake*, Xie(ed.), Talyor and Francis Group, p.513-518.
- Rummel, F., 1987. Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing stress measurements, *Fracture Mechanics of Rock*, Atkinson, B.K.(ed.), Academic Press Inc, London, p.217-239.
- Rutqvist, J., Ljunggren, C., and Stephansson, O., 1990. Theoretical and field investigations of fracture hydro-mechanical response under fluid injection, *Rock Joints*, Barton & Stephansson(eds.), Balkema, Rotterdam, p.557-564.
- Rutqvist, J., Tsang, C.-F., and Stephansson, O., 2000. Uncertainty in the maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the induced fracture. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, 107-120.
- Rutter, E. and Hackston, A., 2017. On the effective stress law for rock-on-rock frictional sliding, and fault slip triggered by means of fluid injection, *Philosophical Transactions Royal Society A*, 375:20160001, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0001>.
- Schmitt, D.R. and Zoback, M.D., 1989. Poroelastic effects in the determination of the maximum horizontal principal stress in hydraulic fracturing tests-A proposed breakdown equation employing a modified effective stress relation for tensile failure. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts*, 26(6), 499-506.
- Scuderi, M.M., and Colletini, C., 2016. The role of fluid pressure in induced vs. triggered seismicity: insights from rock deformation experiments on carbonates, *Scientific Reports*, 6:24852, doi:10.1038/srep24582.
- Smith, M.B. and Montgomery, C.T., 2015. *Hydraulic Fracturing*, CRC Press, London, 777p.
- Synn, J.H., 1990. *Model testing and numerical analysis for the evaluation of 3-dimensional stress state and fracture propagation characteristics by hydraulic fracturing*, Doctoral thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 154p.
- Synn, J.H., Park, C., and Lee, B.J., 2013. Regional distribution pattern and geo-historical transition of in situ stress fields in the Korean peninsula. *Tunnel & Underground Space*, 23, 457-469.
- Synn, J.H., Park, C., Jung, Y.B., Sunwoo, C., Kim, K.S., Choi, S.Y., Song, M.K., Shin, I.J., and Rutqvist, J., 2015. Integrated 3-D stress determination by hydraulic fracturing in multiple inclined boreholes beneath an underground cavern. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75, 44-55.
- Veatch, R.W., King, G.E., and Holditch, S.A., 2017. *Essentials of Hydraulic Fracturing: Vertical and Horizontal Wellbores*,

- PennWell Corp., Oklahoma, United States, 812p.
- Wang, J., Elsworth, D., Wu, Y., Liu, J., Zhu, W., and Liu, Y., 2018. The influence of fracturing fluids on fracturing processes: A comparison between water, oil and SC-CO₂. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 299-313.
- Warpinski, N.R. and Teufel, L.W., 1987. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation. *J. Petroleum Technology*, 209-220.
- Yokoyama, T., Sano, O., Hirata, A., Ogawa, K., Nakayama, Y., Ishida, T., and Mizuta, Y., 2014. Development of borehole-jack fracturing technique for in situ stress measurement. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 69, 9-19.
- Yoon, J.S., Zang, A., Stephansson, O., Hofmann, H., and Zimmermann, G., 2017. Discrete element modelling of hydraulic fracture propagation and dynamic interaction with natural fractures in hard rock. *J. Procedia Engineering*, 191, 1023-1031.
- Zang, A., Zimmermann, G., Hofmann, H., Stephansson, O., Min, K.B., and Kim, K.Y., 2018. How to reduce fluid-injection-induced seismicity. *Rock Mechanics and Rock Engineering On the Web.*, <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1467-4>.
- Zhou, J., Chen, M., Jin, Y. and Zhang, G., 2008. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45, 1143-1152.

신 중 호

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 심지층연구단 책임연구원
(E-mail; jhsynn@kigam.re.kr)

박 찬

1988년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2000년 수원대학교 대학원 토목공학과 공학석사
2006년 충남대학교 대학원 토목공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 심지층연구단 책임연구원
(E-mail; chan@kigam.re.kr)