

## 석유가스생산을 위한 수압파쇄기술 설계 이론과 실제

천대성\*, 이태종

## Theoretical Background and Design of Hydraulic Fracturing in Oil and Gas Production

Dae-Sung Cheon\*, Tae Jong Lee

**Abstract** This paper deals with a hydraulic fracturing technique, which is one of the methods to maximize the recovery rate and productivity of oil and gas in the petroleum industry. In the hydraulic fracturing, typically water mixed with sand and chemicals is injected into a wellbore in order to create artificial fractures along which formation fluids migrate to the well. In recent years, it is widely used in non-conventional oil and gas such as oil shale and shale gas. Three main stages of the hydraulic fracturing process, the proposed design models for the effective hydraulic fracturing and diagnostics after fracturing treatment are introduced. In addition, this paper introduces reservoir geomechanics to solve various problems in the process of hydraulic fracturing.

**Key words** Hydraulic fracturing, Reservoir geomechanics, Design of hydraulic fracturing, Oil and gas production

**초 록** 본 보고에서는 석유산업에서 석유 및 가스의 생산성과 회수율을 극대화시키기 위한 방안의 하나인 수압파쇄기술에 대하여 다루고 있다. 수압파쇄기술은 인위적으로 저류층에 균열을 발생시켜 발생된 균열을 통해 저류층 유체의 유정 내 유입을 용이하게 하는 방법으로, 최근 셰일가스나 오일셰일과 같은 비전통석유가스 개발에서 널리 사용되고 있다. 수압파쇄는 크게 세 가지 단계의 과정을 통해 이루어지며, 효율적인 수압파쇄 설계를 위해 제안된 모델과 수압파쇄 후 결과를 분석, 평가하는 방법에 대해 소개하고 있다. 또한 수압파쇄과정에서 발생하는 다양한 문제점과 이를 해결하는 데 필요한 저류층 암반역학에 대해서도 간략하게 다루고 있다.

**핵심어** 수압파쇄기술, 저류층 암반역학, 수압파쇄 설계, 석유가스

## 1. 서 론

석유가스생산에 있어 수압파쇄기술(hydraulic fracturing)은 저류층(reservoir)에 인위적인 균열을 발생시켜, 발생된 균열을 통해 저류층 유체의 유정 내 유입을 용이하게 하여 석유가스의 생산을 증대시키는 방법이다. 수압파쇄를 수행하는 이유는 유정인근지역에 수압파쇄로 생성된 균열을 통해 효율적인 유체유입경로를 확보하

기 위한 것이다. 또한 시추과정에서 이수에 의한 유정인근 저류층의 손상을 복구함으로써 저류층의 생산지수를 극대화 할 목적도 있다. 최근에는 셰일가스나 오일셰일과 같은 비전통 유전에서 수압파쇄가 널리 사용되고 있다(Jung, 2011).

균열을 생성시키는 방법은 대상지층의 내부마찰각을 낮게 하거나 대상지층에 작용하는 유효수직응력을 낮추면 된다. 그러나 전자는 현실적으로 힘들기 때문에 공극압력을 높여 유효수직응력을 낮춤으로써 균열을 생성시킬 수 있다. 수압파쇄 과정에서 균열은 가장 저항이 작은 경로를 따라서 발생하고, 일반적으로 최소수직응력방향과 수직하게 발생하게 된다.

수압파쇄와 관련된 많은 파쇄균열은 저류층에 높은 유체투과도의 유동경로를 제공하지만, 생성된 균열의 방향성, 크기 등에 따라서는 비효율성을 유발하기도 한

**Received:** Nov. 11, 2013

**Revised:** Dec. 20, 2013

**Accepted:** Dec. 20, 2013

**\*Corresponding Author:** Dae-Sung Cheon

(Tel) +82428683248, (Fax) +82428683416

(E-Mail) cds@kigam.re.kr

KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

다. 파쇄균열의 수직적인 발전을 제한하기 위해서는 최소주응력에 대해 이해할 필요가 있으며, 일반적으로 최소주응력은 직접 측정하거나 또는 경사공에서의 유정 파괴 등으로부터 간접적으로 평가될 수 있다. 시추 및 생산과정에서 야기된 저류층의 응력변화는 저류층에 새로운 균열을 생성(re-fracturing)시킬 수 있다. 수압파쇄과정에서 발생하는 다양한 문제점의 인지와 해결을 위해 최근 저류층 암반역학(reservoir geomechanics)이 각광받고 있다(Zoback, 2007, Fjær 외, 2004)

## 2. 수압파쇄기술

### 2.1 석유산업에서 수압파쇄의 역사

생산성 향상을 위한 파쇄작업(fracturing treatment)은 1890년대에 시작되었다(Economides and Martin, 2007). 당시에는 생산층에 폭약을 터트려 생산정 하부의 직경을 확장시키고 주변 지층을 파쇄하였는데, 작업 자체가 위험하고 폭발에 의해 케이싱을 손상시키는 문제점이 발생하였다. 1940년대에는 고압의 수압을 사용하여 생산층에 균열을 발생시키고 균열을 멀리까지 전파 할 수 있게 되었다. 균열을 발생시킨 후에 시간이 경과하면 지압으로 인해 발생된 균열이 닫히게 되므로 이를 방지하기 위해 파쇄유체(fracturing fluid)에 균열지지제(proppant)와 같은 고체물질을 첨가하여 사용하였다(KIGAM, 2010).

유정자극(well stimulation)을 위한 최초의 수압파쇄의 시도는 1947년 미국 캔자스 주 서부의 Hugoton 가스전에서 수행되었다. 약 720 m(2,400 ft)의 심도에서 약 11,355 리터(3,000 갤런)의 네이팜 함유휘발유(napalm-thickened gasoline)가 주입되었고, 균열지지제(proppant)는 사용되지 않았다. 그러나 수압파쇄작업 후에도 유체 유동성은 크게 변화하지 않았다(Jones and Britt, 2009). 석유산업분야에서는 초창기에 이미 적은 양의 균열지지제 사용으로도 탄화수소의 회수에 결정적인 역할을 한다는 것을 발견하였고, 1949년에 최초로 상업적인 적용이 이루어졌다. 이후 1990년대 후반과 2000년대 초 수평시추의 발전과 수압파쇄의 발전으로 인해 작업효율과 유정완결 작업이 발전하였다. 특히 1998년 적은 균열지지제의 사용과 많은 양의 물을 사용하는 수압파쇄방법, 2001년의 미소진동 계측기술(microseismic monitoring), 그리고 2002년의 수평시추기술 등의 발전을 통해 비전통 유전에서의 수압파쇄작업이 비약적으로 증가하고 있다(Choe, J., 2011, Jahn 외, 2008)

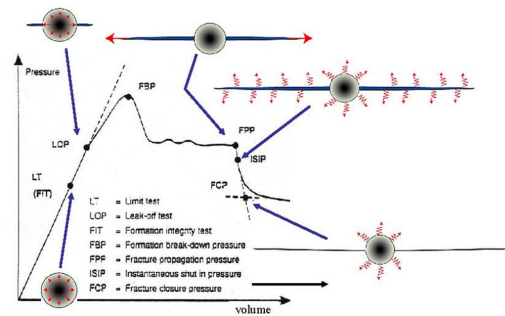


Fig. 1. A schematic extended leakoff test showing pressure as a function of volume (Gaarenstroom et al., 1993)

### 2.2 수압파쇄 과정

수압파쇄는 파쇄유체의 압력으로 지층에 균열을 발생시키고, 이 유체를 이용하여 균열을 확장하고, 균열지지제를 통해 생성된 균열을 유지하는 단계로 구성된다. 인공적으로 생성된 균열은 지층과 유정사이에서 탄화수소 생산 경로를 제공한다. 이러한 경로를 유지하기 위해서 파쇄과정은 세 단계, 즉 pad stage, slurry stage, flush stage로 구성된다.

첫 번째 단계인 pad stage는 균열지지제를 사용하지 않고 균열을 생성하고 전파시키며, 균열의 폭을 확장시킨다. 그리고 지층에 유입되는 유체를 제공한다. 두 번째 단계인 slurry stage에서는 유체와 균열지지제를 모두 사용하여 균열 내에 균열지지제를 위치시키며, 균열의 전 구간에서 일정한 균열지지제 밀도를 유지시킨다. 마지막으로 flush stage에서는 많은 양의 유체를 유정으로 펌핑하여 유정에 남아있는 균열지지제를 지층의 먼 곳까지 보내는 작업이 수행된다. 비록 수압파쇄 작업이 최적의 성과를 낼 수 있도록 설계된다고 하더라도, 수압파쇄의 성공은 종종 설계자나 작업하는 공학자의 한계 밖의 영역이다. 이는 균열전파방향이 현시응력에 의해 좌우되고, 균열의 기하학적 형상 역시 암반역학요소와 지층내의 유체유출(leakoff)에 의해 좌우되기 때문이다.

수압파쇄를 하는 동안 압력의 계측과 해석을 통해 실시간으로 균열의 생성, 성장 등을 파악할 수 있다. 수압파쇄의 설계와 적용에 있어 균열 생성, 초기 균열의 성장, 균열의 확장, 균열의 닫힘 등의 과정에 대한 이해가 필요하다. Fig. 1은 수압파쇄과정에서 볼 수 있는 전형적인 균열 압력곡선으로 XLOT(Extended Leakoff test)에서 구할 수 있다. FIT(Formation integrity test)는 주어진 압력까지 균열발생여부를 파악하는 시험으로 압력곡선에서 선형지점에 위치하며, LOP(Leakoff pressure)

는 기존 균열의 개구나 새 균열의 생성에 의한 지점으로 선형성에서 벗어난 지점을 나타내고 일반적으로 LOP는 최소주입력을 평가하는 합리적인 지점으로 이용된다. FBP(Formation Breakdown Pressure)는 예측가능하지 않은 지점으로 압석의 인장강도, 유정 주변의 응력집중, 생성된 균열의 복잡성, 그리고 유정에서 균열로 이동된 유체의 마찰 손실에 좌우된다. FPP (Fracture propagation pressure)는 파괴인성, 균열 침단으로의 유체유출, 유체의 마찰 손실 등을 고려하여 결정된다.

에너지의 공급원이나 소비처를 이해하면 수압파쇄 과정을 이해하는 데 도움이 된다. 수압파쇄 과정에서 에너지의 공급원으로는 펌프를 통해 압력과 속도로 변환되는 기계적 에너지와 지층의 정수압이 해당하며, 소비처에는 유정의 마찰, 천공마찰(perforation friction), 굴곡(tortuosity)으로 인한 손실, 균열내의 유체 마찰, 현지 응력을 초과하는 데 필요한 압력, 유체 유출, 균열 생성, 균열 침단에서의 압석의 파괴 등이 해당한다. 수압파쇄의 수행과 분석과정에서 다양하고 많은 압력이 언급되며, 이들 압력에 대해 아래에 간략하게 서술하였다 (Economides and Martin, 2007).

- 1) 지상주입압력(Injection pressure,  $P_{inj}$ , WHP, STP): 지상작업압력 또는 작업압력 등으로도 표현된다. 이는 파쇄펌프(frac pump)가 작동하는 데 필요한 정두(wellhead)에서의 압력을 말한다.
- 2) 정수압(hydrostatic head,  $P_{head}$  또는  $P_h$ ): 정지상태의 유체에 의해 생성된 유체하단부의 압력으로서, 유체의 밀도와 수직심도로 인해 가해지는 압력이다.
- 3) 배관마찰압력(pipe friction pressure,  $P_{pipe\ friction}$ ): 유정마찰압력이라고도 하며, 유체 이동시 유정의 마찰효과로 인한 손실압력을 말한다.
- 4) 공저주입압력(bottomhole injection pressure,  $P_{iw}$ , BHTP, BHP): 공저에서 지층에 가하는 시추공 내 압력으로, 작업이 수행되는 구간중앙 다운홀 압력이다. 이는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{iw} = P_{inj} + P_{head} - P_{pipe\ friction} \quad (1)$$

- 5) 천공마찰압력(perforation friction pressure,  $\Delta P_{pf}$ ): 균열 유체가 천공된 구멍에 의한 제한된 유체면적을 통과할 때 발생하는 손실압력으로서, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta P_{pf} = 0.2369 \frac{q^2 \rho_s}{N_{perf}^2 D_p^2 C_d^2} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_s$ 는 주입유체의 밀도(ppg),  $q$ 는 유체속도(bpm),  $N_{perf}$ 는 천공 개수,  $D_p$ 는 천공 직경(inch) 그리고  $C_d$ 는 방출계수(discharge coefficient)이다.

- 6) 굴곡압력(tortuosity pressure,  $\Delta P_{tort}$ ): 간단하게 굴곡으로도 표현되며, 파쇄유체가 천공된 구멍과 주요 균열 사이의 제한된 유동의 영역을 통과하면서 발생하는 손실압력이다.
- 7) 유정주변마찰(near-wellbore friction,  $\Delta P_{near\ wellbore}$ ): 유정주변의 영향으로 발생한 전체 손실압력로서 천공마찰압력과 굴곡압력의 합과 같다.
- 8) 순간폐쇄압력(Instantaneous shut-in pressure,  $P_{ISI}$ , ISIP, ISDP): 펌프를 멈춘 후 순간적으로 발생하는 공저주입압력으로, 모든 유체의 마찰에 기반한 손실압력의 효과( $P_{pipe\ friction}$ ,  $\Delta P_{pf}$ ,  $\Delta P_{tort}$ )가 0이 된다.
- 9) 닫힘압력(closure pressure,  $P_c$ ): 지층에 의해 작용하는 압력으로, 균열이 개구된 상태를 유지하는 데 필요한 균열 내부의 최소압력을 말한다. 단일 지층의 경우, 닫힘압력은 공극압의 영향을 고려할 경우 최소수평응력과 일반적으로 같다. 다른 경우에는 닫힘압력은 모든 지층 평균값에 해당한다. 다층 구조에서는 하나 이상의 닫힘압력을 관찰할 수 있다.
- 10) 확장압력(extension pressure,  $P_{ext}$ ): 균열성장에 필요한 균열 내의 압력으로서, 균열이 길이, 높이와 폭을 형성하기 전에 균열이 개구하기 위해서는  $P_{ext} > P_c$ 이어야 한다. 확장압력은 일정하지 않고 균열의 형상에 따라 변한다.
- 11) 파쇄유체압력(fracturing fluid pressure,  $P_f$ ): 다양한 조건에서 사용되지만 엄밀하게 표현하여 파쇄유체압력은 균열유체가 천공된 구멍과 굴곡을 통과한 후, 균열 본체 내부의 유체 압력이다. 파쇄유체압력은 마찰효과로 인해 전체 균열에 대해 일정하지 않을 수 있다.
- 12) 순압력(net pressure,  $P_{net}$ ): 균열이 개구된 상태로 유지되기 위해, 균열 내의 파쇄유체에서의 초과 압력을 말한다. 다른 표현으로는 균열을 확장시키고, 폭을 형성하는 데 필요한 파쇄유체의 에너지에 해당한다. 순압력은 균열형상을 분석하는 데 사용되며, 다음과 같이 계산될 수 있다.

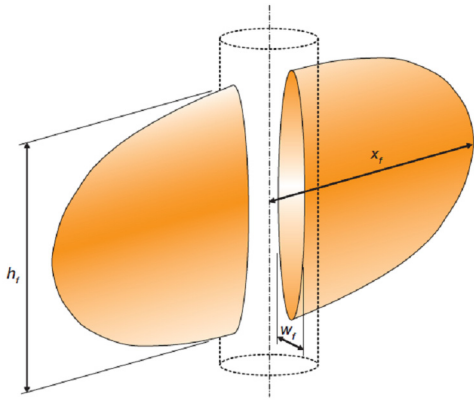


Fig. 2. Idealized elliptical fracture (Economides and Martin, 2007)

$$P_{net} = P_f - P_c \quad (3)$$

$$P_{net} = P_{iw} - \Delta P_{pf} - \Delta P_{tort} - P_c \quad (4)$$

순압력은 또한 다음과 같이 균열너비로 표현될 수 있다.

$$w_{max} = \frac{2P_{net}d(1-\nu^2)}{E} \quad (5)$$

따라서 순압력의 조건에 따라 균열이 닫히거나 생성됨을 쉽게 알 수 있다. 즉,  $P \leq 0$ 인 조건에서 균열은 닫혀서 균열의 전파가 가능하지 않는다.  $0 < P_{net} \leq P_{ext}$ 인 경우 균열은  $w_f \propto P_{net}$ 의 관계를 갖으며 개구되어 있으나, 균열의 전파는 가능하지 않다.  $P_{net} > P_{ext}$ 에는 균열은  $w_f \propto P_{net}$ 의 관계를 갖으며 개구되어있으며, 균열이 전파될 수 있는 충분한 응력이 작용하게 된다.

### 2.3 수압파쇄 설계 및 모델

수압파쇄 설계의 가장 큰 목적은 생산성과 회수율을 극대화할 수 있는 양호한 유체투과도를 가지면서도 기하학적 변화가 적은 안정적 균열을 생성하고 유지하는 것이다. 효율적인 수압파쇄 설계를 위해서는 저류층과 투과도의 균열변수, 균열의 반길이(fracture half-length), 균열전도도에 대한 관계를 이해해야 한다. 이 변수들 사이의 상호의존성은 무차원 균열전도도인  $F_{CD}$ 를 이용해 표현될 수 있다(식 (6)). Fig. 2는 이상적인 균열의 모습을 나타낸 것이다.

$$F_{CD} = k_f w_f / (k x_f) \quad (6)$$

여기서,  $k$ 는 저류층의 유체투과도(darcy),  $k_f$ 는 균열의 유체투과도(darcy),  $w_f$ 는 균열 폭(또는 균열 간극)(ft 또는 cm),  $x_f$ 는 균열방향 절반길이(ft 또는 cm)를 의미한다.

무차원 균열전도도와 함께 수압파쇄를 설계하는 데 있어 가장 기본적인 수식으로 식 (7)을 생각할 수 있다.

$$V_{inj} = V_{frac} + V_{leakoff} \quad (7)$$

주입된 유량( $V_{inj}$ )은 균열을 생성하는 데 사용된 유량( $V_{frac}$ )과 지층 내 유입유체 유량( $V_{leakoff}$ )으로 나눌 수 있다. 이들은 각각 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

$$V_{inj} = Q t_i \quad (8)$$

$$V_{leakoff} = H_p L [3C \sqrt{t_p} + 2S_p] \quad (9)$$

$$V_{frac} = \bar{w}HL \quad (10)$$

$$L = \frac{Q t_p}{3CH_p \sqrt{t_p} + 2S_p H_p + \bar{w}H} \quad (11)$$

여기서  $Q$ 는 펌핑속도( $ft^3/min$ ),  $t_p$ 는 펌핑시간(min.),  $C$ 는 유체손실계수( $ft/min$ ),  $H_p$ 는 열려진 길이(ft),  $H$ 는 전체 균열높이(ft),  $S_p$ 는 spurt 손실( $ft^3/ft^2$ ),  $w$ 는 평균 균열너비(ft),  $L$ 은 첨단과 첨단사이의 길이(ft)이다. spurt 손실은 시추하는 동안 유정주변에 이수막(mud cake)이 생성되기 전에 이수가 저류층으로 흘러가서 손실된 것을 말한다.

수압파쇄 설계에서 중요하게 고려되는 요소는 기하형상과 유체손실이고, 설계인자는 크게 현장인자(in situ parameter)와 설계인자(design parameter)로 구분된다. 현장인자에는 현지응력과 응력차이와 관련 있는 균열의 기하형상과 높이, 압중과 공극률과 관련 있는 계수들, 지층과 파쇄유체 등과 관련 있는 유체손실, 균열 첨단에서의 효과 등이 있다. 설계인자로는 점성도와 유체손실 등과 관련 있는 유체의 선택, 균열지지제의 선택, 펌핑속도와 처리 일정 등이 있다.

수압파쇄의 설계에 있어 우리가 제어 가능한 것은 유체 주입속도, 유체의 점성도, 천공, 유체유출 등이 있다. 주입속도의 경우 대략 2 - 3 bpm에서 60 bpm로 조절 가능하며, 유체 점성도는 물에 해당하는 1 cp에서 10,000 cp 또는 이보다 더 큰 고점성유체(Xlinked gel)와 같은 것은 사용될 수 있다. 천공의 경우 천공지점 또는 천공지점 상하부에서 수압파쇄를 실시하는 지 여부

등 파쇄유체의 주입지점과 연관된다. 제어가능여부가 불확실 한 것으로는 균열 반길이, 균열 투과도, 균열 폭 이 있다. 때때로 주입량과 균열 길이사이엔 관련성이 있는 경우가 있어 균열 반길이를 제어할 수도 있다. 우리가 제어할 수 없는 것은 응력프로파일, 지층 강성, 유체유출속도, 온도 등이 있다. 응력프로파일은 시간에 따라 변할 수 있지만 심도에 따른 응력프로파일을 파악해야만 한다. 지층 강성은 층서에 따라 변화하며, 지층온도는 수압파쇄에 의해 온도를 낮추는 효과가 있다.

위와 같이 수압파쇄의 설계인자는 우리가 제어할 수 있거나, 제어할 수도 있는 것, 그리고 제어할 수 없는 것으로 나누어질 수 있다. 제어할 수 있는 것은 일반적으로 인공적인 부분에 주로 해당하고, 제어할 수 없는 경우는 대부분 자연적인 것에 해당한다. 그리고 제어할 수도 있는 것은 자연적인 상황에 인공적인 부분을 결합된 중간적인 부분에 해당한다.

전술한 바와 같이 수압파쇄에 있어서 중요한 요소는 균열 길이를 포함한 기하형상이며 이들은 현지응력에 의해 좌우된다. 또한 균열의 기하형상은 현지응력과 순압력( $P_{net}$ )사이의 관계에 의해서 일반적으로 조절된다. 순압력은 식 (12)과 같이 균열 높이, 탄성계수, 파괴인성, 펌프속도, 유체점성도 등에 의해 조절된다. 일반적으로 낮은 속도의 주입속도는 높은 유체유출을 발생시키고, 높은 점성도는 인장균열의 발생을 유발한다. 유체 점성도는 유체손실, 균열지지제 이동, 순압력과 기하형상에 대해 우호적이거나, 균열 전도나 켈 손상, 비용 등에는 반대로 작용할 수 있다. 펌프속도는 유체손실이나

균열지지제 이동, 순압력과 기하형상에 좋게 작용하지만 비용, 압력 한계 등에 대해서는 반대로 작용할 수 있다.

$$P_{net} \propto \left[ \frac{E'^4}{H^4} \left( \frac{Q\mu x_f}{E'} \right) + \left( \frac{K_{IC}^4}{H^2} \right) \right]^{1/4} \quad (12)$$

여기에서 H는 균열 높이(ft), E'는 평면변형률 조건에서의 탄성계수(GPa),  $K_{IC}$ 는 파괴인성 ( $MPa \sqrt{ft}$ ) 또는 균열첨단에서의 효과, Q와  $\mu$ 는 각각 펌프속도( $ft^3/min$ )와 파쇄유체의 점성도(cp)로서 유일하게 제어할 수 있는 요소이나 영향력은 매우 작다.

실제 균열 기하형상은 공저주입압력과 대상 지층의 물성과 응력의 상호작용에 의해 결정되며, 일반적으로 원하는 형태의 기하형상이 발생하지 않는다. 따라서 좋은 설계와 작업과정을 통해, 원하는 기하형상과 실제 기하형상을 유사하게 하는 노력을 기울여야 한다.

균열 기하형상은 현지응력에 의해 좌우된다고 하였으며, 여기에서 말하는 현지응력은 지층에서 암반에 작용하고 있는 힘을 말하고, 응력의 크기와 방향, 이들 간의 관계를 반드시 알아야 좋은 설계가 가능하다. 현지응력은 크게 세 성분(최대, 중간, 최소주응력 또는 수직, 최대수평응력, 최소수평응력)으로 구분할 수 있다. 이들 세 응력사이의 관계에 따라 정단층(normal stress regime), 주향경사단층(strike-slip stress regime), 역단층(reverse stress regime)으로 응력장을 구분하며, 이들 응력장에서 발생하는 균열의 방향은 각기 다르게 나타난다. Table 1은 각각의 응력장에서의 응력관계를 나타낸 것이다. 한 예로 정단층에 해당하는 응력조건에서 발생하는 균열은 수직으로 단층면에 평행한 방향으로 발생하게 된다(Fig. 3). 이와 같이 균열방향은 저항이 가장 작은 경로로 발생하게 된다. 균열방향에 영향을 주는 요

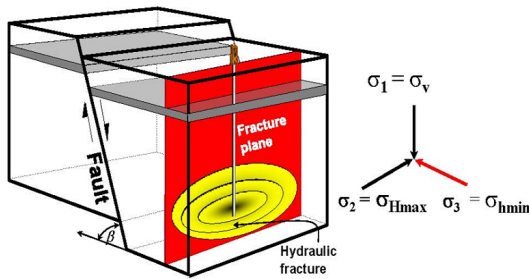


Fig. 3. Fracture pattern in normal fault regime (GMI, 2010)

Table 1. Principal stresses relationship in stress regimes

stress regime	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
normal	$\sigma_v$	$\sigma_{Hmax}$	$\sigma_{hmin}$
strike slip	$\sigma_{Hmax}$	$\sigma_v$	$\sigma_{hmin}$
reverse	$\sigma_{Hmax}$	$\sigma_{hmin}$	$\sigma_v$

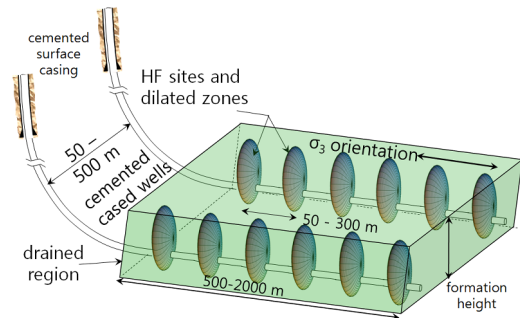


Fig. 4. A schematic hydraulic fracturing with minimum in-situ stress (Dusseault, 1998)

소로는 응력장의 방향, 파괴인성, 유체유출, 탄성계수의 상호관계, 절리, 소성, 암석의 강도 등이 있다. Fig. 4는 셰일가스 등에서 수행되는 전형적인 수압파쇄의 모식도와 균열방향을 보여준다.

균열 기하형상이 생성되는 것을 해석하기 위하여, Nolte와 Smith(1981)가 지층의 압력반응을 분석하는 방법을 제시하였다(Fig. 5). 이 방법은 균열이 전파하는 동안 지층으로부터 초과되는 압력반응을 분석하여, 임의 형

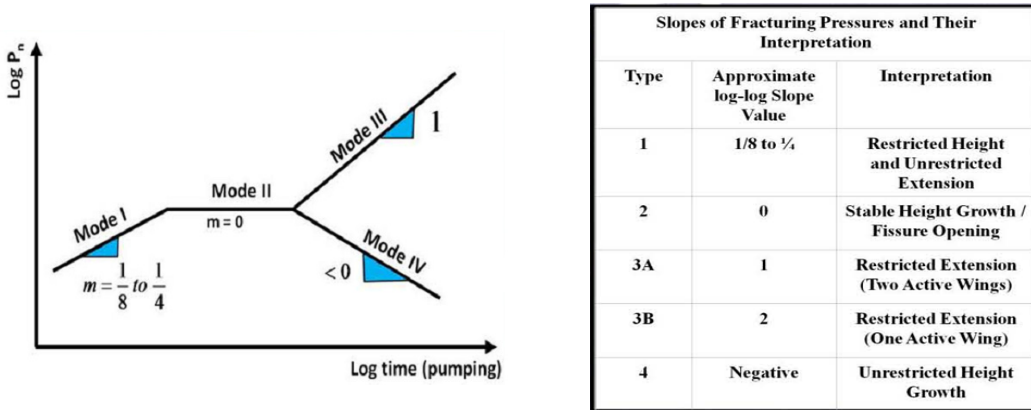


Fig. 5. A interpretation of hydraulic fracturing pressure (Nolte and smith, 1981)

Table 2. Comparison of hydraulic fracturing models

Model	concept	d	w	P-σ <sub>c</sub>	section view
PKN	 Elliptical Cross Section	L	$[\frac{\mu QL}{E'}]^{1/4}$	$\frac{E'}{H} [\frac{\mu QL}{E'}]^{1/4}$	
KGD	 Elliptical Cross Section Area of Largest Flow Resistance	H	$[\frac{\mu QL^2}{E'H}]^{1/4}$	$\frac{E'}{L} [\frac{\mu QL^2}{E'H}]^{1/4}$	
Radial	 Area of Largest Flow Resistance	R	$[\frac{\mu QR}{E'}]^{1/4}$	$\frac{E'}{R} [\frac{\mu QR}{E'}]^{1/4}$	

태의 거동이 발생할 때 압력의 반응을 예측할 수 있다. 거동은 Fig. 5의 순압력과 펌핑시간에 대한 로그-로그 그래프의 기울기에 따라 분류된다. 한 예로서 모드 I 구간에서 기울기는 대략 1/8에서 1/4사이의 값을 갖으며, 이 경우 제한된 균열 높이와 상당히 긴 균열 너비를 갖는 PKN 모델과 같은 기하형상의 균열이 생성되는 것을 의미한다(Economides and Martin, 2007).

수압파쇄는 일반적으로 2차원 모델을 이용하여 모델링하며, 대표적인 모델로서 PKN 모델과 KGD 모델이 있다. PKN 모델은 Perkins and Kern(1961)이 제안한 모델로서 균열의 개구에 있어 수직방향으로 평면변형률을 가정하고 있으며, KGD 모델은 Geertsma and de Klerk(1969)가 제안한 모델로서 수평방향으로 평면변형률을 가정하고 있다. PKN 모델에서는 균열의 길이가 높이보다 매우 큰 경우, 즉 제한된 균열의 높이를 갖는 경우이며, KGD 모델은 높이가 큰 균열에 짧은 길이를 갖는 경우이다. 원형균열모델(circular fracture model)은 PKN 모델과 KGD 모델의 중간에 해당하는 모델로서, Table 2와 같이 균열이 반원 기하형상을 갖는다. 이 모델은 단일 지층 또는 여러 지층이지만 단합압력이 같은 지층에서 사용된다. 이들 모델에 대한 차이를 Table 2에 간략하게 정리하였다.

최대 균열 폭은 식 (13)과 같이 표현되며, 여기에서  $d$ 는 각 모델에서의 특징적인 차원을,  $P$ 는 균열 내에서 작용하는 압력을,  $\sigma_c$ 는 단합압력을,  $E$ '는 평면변형률 조건에서의 탄성계수를 나타낸다.

$$w_{max} = \frac{2d(P - \sigma_c)}{E} \tag{13}$$

PKN 모델의 경우 균열첨단에서 파괴역학적인 몇몇 주요관점을 고려하지 않고 있으나, 균열이 상당히 긴 경우에 적합하다. GKD 모델의 경우 균열의 정상과 하단에서 균열이 자연적으로 미끄러진다는 비현실적인 가정이 존재하지만, 균열의 높이가 큰 경우에 적합하다. 원형모델의 경우 균열이 동전모양을 갖는, 즉 높이와 길이가 같은 경우에 적합하다.

**2.4 수압파쇄 평가**

수압파쇄 후 그 결과를 분석, 평가하는 것은 수행된 수압파쇄 자체의 성공여부뿐 아니라 인접유정들에 대해 수압파쇄 적용여부를 결정하고 수압파쇄의 최적화의 기준이 되기 때문에 중요하다. 평가방법으로는 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나눌 수 있으며, 그 한계는 Table 3에 요약하였다. 수압파쇄 평가의 직접적 방법은 주로 물리탐사 기법을 이용한 것으로서 미소진동 계측(microseismic monitoring), 경사계(tiltmeter), 트래이서 검층, 온도검층 등을 이용하며, 간접적 방법에는 균열모델링, 유정시험, 생산량 분석법 등이 있다(정승필, 2011). 이 중에서 미소진동 계측과 경사계측정법이 주로 사용되고 있다. 미소진동 계측은 고감도의 지오폰이나 하이드로폰 등의 사용하여, 근접한 시추공에 설치하여 수압파쇄시 발생한 미소진동을 계측하는 것으로 계측되는 균열모드는 에너지가 큰 전단모드가 우세하다. 경사계 측정법은 경사계를 공저나 지상에 설치하여 수압파쇄 작업이 수행되는 동안 생성된 균열로 인해 변화된 지층의 경사를 측정하여 균열의 길이 및 방향성을 파악하는 방법이다. 경사계의 한계로는 지상에 설치하는 경우 심도가 1,500 m로 제한된다는 점이 있다.

**Table 3.** Diagnostics of hydraulic fracturing (Cipolla and Wright, 2000)

	Techniques	Azimuth	Height	Length	Asymmetry	Width	Dip	Range
Direct diagnostics	Microseismic	●	●	●	○		○	Far field
	Tiltmeter (downhole)	○	●	●	○	○		Far field
	Tiltmeter (surface)	●	○	○	○		●	Far field
	RA tracer	○	○			○		Near well
	Temp logs		○					Near well
Indirect diagnostics	Frac Models		○	○		○		Far field
	Well testing			○		○		Far field
	Production analysis			○		○		Far field

● : can determine, ○ : may determine

### 3. 셰일가스 및 Enhanced Geothermal System 지열저류층을 위한 수리자극

석유산업에서의 수압파쇄는 일반적으로 지열에 비해 낮은 현지응력, 높은 주입속도와 압력이 사용된다. 균열 지지제가 없어도 수압파쇄에 의해 새로운 균열을 생성시키고, 균열사이를 고결시키는 광물을 파쇄하여 수리자극이 가능하다. 또한 약간의 전단변위를 가해 잔류 개구(residual opening)를 만들고 이들을 서로 어긋나게 하여 균열을 생성시킨다. 이는 자연균열암반(naturally fractured rockmass)에서 주로 가능하다(Jeffrey et al., 2010). Barnett 셰일과 같이 자연적인 균열이 많은 저류층에서 새롭게 모든 균열을 생성시키는 것보다 기존 균열을 연결시키는 것이 보다 합리적이다. 자연 균열이 많은 저류층에서의 유동능력은 순응력과 유체압력에 의해 변하며, 자연 균열내부의 유체압력이 자연균열을 닫힌 상태로 유지시킨 압력보다 큰 경우 이들은 열리게 된다. 균열이 열린 경우, 전체 지층 내 유체유출은 증가하게 되고 최종적으로 더 짧은 균열이 생성된다. 국부적으로 높은 유체유출현상은 균열지지제의 이동에 영향을 주고 흐름이 느려진 균열지지제는 유정주변이나 균열침단을 막아 스크린아웃(screenout)을 야기한다. 균열암반에서 수행된 수압파쇄로 인한 미소진동 계측은 보다 복잡한 양상을 보이며, 단층이나 균열망을 제대로 파악하지 못하는 경우 해석이 난해하다.

지열에서 수리자극은 일반적으로 높은 현지응력과 상대적으로 낮은 주입속도가 사용되며, 주입압력은 일반적인 경우 제한적이어서, 최소수평주응력을 초과하지 않는다. 그래서 이 경우 발생하는 주요 파괴모드는 전단파괴모드이다. 수리자극이 주응력방향에 비스듬한 자연균열에 우호적으로 작용하여 상당한 전단응력이 비스듬한 방향으로 작용하기 때문이다. 지열에서의 수리자극 역시 고결된 부분을 파쇄하여 전단파괴가 발생한다. 전단파괴는 인장파괴모드(opening mode)와 동반하여 발생한다. 따라서 유체는 인장균열에서 상호연결된 자연균열로 흘러 자연균열을 전단형태로 변화하게 한다.

### 4. 결론

본 기술보고에서는 석유산업에서 사용되고 있는 수압파쇄기술에 대하여 상업적으로 시작되었던 역사적 사례, 수압파쇄의 과정과 설계 그리고 평가방법 등에 대하여 문헌조사를 토대로 기술하였다. 또한 셰일가스 및 EGS 지열발전에서의 차이점 등에 대해서도 일부 다루었다.

최근에는 위에서 소개한 기술 이외에도 여러 발전된 기술이 사용되거나 시도되고 있으며, 그 중 하나로 자연적으로 균열이 발달한 석유가스 저류층에 대한 수치모델링과 미소진동 계측을 결합한 연구를 예로 들 수 있다. 수압파쇄 과정에서 생성된 균열과 이들의 전파는 고감도의 미소진동으로부터 계측할 수 있으며, 미소진동의 분포를 통해 균열방향과 균열간격, 연속성 등에 대한 정보를 추출하는 데 사용될 수 있다. 파괴형상, 파괴 특성과 성장 등은 합성체 암반(Synthetic Rock Mass, SRM)에서 관찰된 균열망과 상호연관 시킬 수 있으며, 이는 보정과 검증에 위한 자료로써 사용될 수 있다. 검증된 모델은 현장조건, 암반 특성, 작업조건 등에 바탕을 둔 공학적 균열망에 대한 기준을 개발하고 자연적인 균열암반에 대한 수압파쇄를 예측하는 데 사용될 수 있는 것이다.

### 사 사

이 연구는 2012년도 한국에너지기술연구원 지식경제 기술혁신사업 (과제번호: 2012T100201733)의 일환으로 수행되었다.

### References

1. Jung, S., 2011, Post-fracturing evaluation of a hydraulic-fractured well using well testing interpretation, *Journal of the Korean society of for geosystem engineering* 48.4, 493-498.
2. Choe, J., 2011, offshore drilling engineering, CIR, Seoul, 368p.
3. KIGAM, 2010, Technical report - Hydraulic fracturing.
4. Cipolla, C.L. and Wright, C.A., 2000, State-of-the-Art in hydraulic fracture diagnostics, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, SPE 64434.
5. Dusseault, M.B., 1998, Course note of shale gas fracturing.
6. Economides, M. J. and Martin, T., 2007, Modern fracturing. Houston, Energy Tribune Publishing, 507p.
7. Fjær, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M. and Risnes, R., 2008, Petroleum related rock mechanics, 2nd edition, Elsevier, Amsterdam, 491p.
8. Gaarenstroom, L., Tromp, R.A.J., de Jong, M.C. and Brandenburg, A.M., 1993, Overpressures in the Central North Sea: implication for trap integrity and drilling safety, Proc. of the 4<sup>th</sup> Conference, London, UK, 397-406.
9. GMI, 2010, Short course of oilfield geomechanics.
10. Geerstma, J. and de Klerk, F.A., 1969, Rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures, JPT, 1571-1581.
11. Jahn, F., Cook, M. and Graham, M., 2008, Hydrocarbon



- exploration and production, 2nd edition, Elsevier, Amsterdam, 444p.
12. Jeffrey, R.G., Zhang, X., and Bunger, A.P., 2010, Hydraulic fracturing of naturally fractured reservoirs, Proc. 35<sup>th</sup> workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, USA, SGP-TR-188.
  13. Jones, J. and Britt, L.K., 2009, Design and appraisal of hydraulic fractures, Richardson, Society of Petroleum Engineers.
  14. Nolte, K.G. and Smith, M.B., 1981, Interpretation of fracturing pressures, SEP 8297.
  15. Perkins, T.K. and Kern, L.R., 1961, Widths of hydraulic fractures, JPT, 937-949.
  16. Zoback, M.D., Reservoir geomechanics, Cambridge, New York, 449p.



### 천 대 성

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3248  
 E-mail: cds@kigam.re.kr  
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원



### 이 태 중

1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1992년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 1998년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3051  
 E-mail: megi@kigam.re.kr  
 현재 한국지질자원연구원 지열자원연구팀 책임연구원