

DFIT 자료 해석을 통한 저류층의 투과도 및 초기압력 추정

김태홍*, 이성준, 이근상

Estimation of Permeability and Initial Pressure in Reservoir by DFIT Data Analysis

Tae Hong Kim*, Sung Jun Lee, Kun Sang Lee

Abstract Well testing in unconventional reservoirs, such as tight or shale gas formations, presents considerable challenges. It is difficult to estimate the reservoir properties in ultra-low permeability formation because of poor inflow prior to stimulation and excessive test duration. Moreover, radial flow may not develop in hydraulically fractured horizontal wells. For these reasons, the cost of test is high and the accuracy is relatively low. Accordingly, industry is turning to an alternate testing method, diagnostic fracture injection test (DFIT), which is conducted prior to the main hydraulic fracture treatments. Nowadays, DFIT are regarded as the most practical way to obtain good estimates of reservoir properties in unconventional reservoirs. Various methods may be used for interpreting DFIT data. This paper gives an explanation of those methods in detail and examines three actual field data. These show how various analysis methods can be applied to consistently interpret fracture closure pressure and time, as well as before and after closure flow regimes and reservoir properties from field data.

Key words DFIT(diagnostic fracture injection test), Mini frac test, Shale gas, Permeability, Initial pressure

초 록 치밀 또는 셰일가스층과 같은 비전통 저류층에서 물성을 구할 때 기존의 전통 가스정 시험법을 적용하면 올바른 결과값을 얻을 수 없다. 일반적으로 셰일가스 저류층에서는 지층의 저투과성으로 인해 유동 속도가 느려 방사형 유동 구간이 나타나기까지의 시간이 매우 오래 걸리며 수압파쇄 후에는 방사형 유동 구간이 전혀 나타나지 않을 수도 있다. 이로 인해 시험 비용이 많이 들 뿐만 아니라 결과값의 정확도 또한 매우 낮다. 이러한 이유로 셰일가스 저류층 물성 분석법으로 DFIT(diagnostic fracture injection test)이 새롭게 주목받고 있다. 수압파쇄 전에 수행되는 DFIT은 셰일가스의 중요성이 커져감에 따라 저류층의 물성을 얻기 위한 가장 실용적인 방법 중의 하나로 알려져 있다. DFIT 데이터를 분석하는 방법에는 여러 가지가 있으며 한 가지 방법으로는 데이터를 잘못 분석할 수 있기 때문에 다양한 방법을 통해서 종합적으로 물성을 분석하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 이러한 다양한 DFIT 분석법들에 대해 설명하고 이를 통해 3개 저류층의 DFIT 데이터에서 여러 가지 분석법들이 어떻게 적용되는지 비교, 분석하여 정확한 저류층 물성을 얻고자 하였다.

핵심어 DFIT, mini frac test, 셰일가스, 투과도, 초기압력

Received: Apr. 29, 2013

Revised: Jun. 13, 2013

Accepted: Jun. 13, 2013

*Corresponding Author: Tae Hong Kim

Tel) +82222204428, Fax) +82222204427

E-Mail) kth1014@hanyang.ac.kr

Department of Natural Resources & Environmental Engineering
Hanyang University, 222 wangsimni-ro, seongdong-gu, seoul
133-791, korea

1. 서 론

고유가 시대의 도래와 시추기술의 급격한 발전에 힘입어 셰일가스전의 개발 및 생산기술이 중요한 이슈로 부각되고 있다. 셰일가스란 유기물을 다량 함유하고 있는 셰일층 근원암에서 형성된 가스가 저류암으로 이동하지 못해 셰일층에 갇힌 가스이다. 일반적으로 셰일가스 저류층은 5% 내외의 저공극률, $10^{-2} \sim 10^{-6}$ md의 저

투과성을 나타내기 때문에 일반적인 상태에서는 가스가 유동할 수 없어 10% 이하의 회수율을 보인다. 또한 세일가스 저류층에서는 탄화수소가 유리가스로 존재하거나 유기물 입자에 흡착되어 그 자체가 저류층으로 부존하기 때문에 공극 내에서 유체가 유동하기 위해서는 수압파쇄 기술을 통해 인위적인 유동 통로를 형성시켜주는 과정이 필요하다. 이러한 세일가스 저류층의 특성을 파악하고 향후 개발 및 생산 계획을 수립하기 위해서는 저류층 물성 추정과 유동 해석을 통한 생산성 평가기술의 확보가 필수적이다. 하지만 세일가스 저류층은 일반적으로 자연균열에 의한 불균질성과 저투과성 매질 특성으로 인하여 통상적인 가스정 시험법을 적용할 때 시간이 오래 걸리고, 비용이 많이 들며 시험의 정확도 또한 떨어지기 때문에 저류층 특성화 작업과 향후 생산성 예측에 많은 어려움이 있다.

이러한 문제점들로 인하여 전통 가스정 시험법 대신 수압파쇄 설계를 위해 고안된 DFIT (diagnostic fracture injection test)이 실질적인 가스정 시험법으로 인정되면서 다양한 세일가스 저류층에 적용되고 있다(Ewens 외, 2012). 국내에서는 신중호 외(1994)가 비슷한 방법으로 수압파쇄시험을 수행하여 암반의 응력상태를 조사한 바 있다.

본 연구에서는 실제 다양한 유동기의 가스정 시험 데이터를 이용하여 저류층의 투과도(permeability) 및 초기압력(initial pressure) 등의 물성을 분석하였으며 특히 선형 유동 구간의 데이터로부터 균열 반길이(fracture half length)를 추정하여 계산된 투과도의 타당성을 검토하였다.

2. DFIT 기술 개요

DFIT은 수압파쇄 전 짧은 시간 동안 저류층에 액체를 주입하여 작은 균열을 만든 후 균열지지체(proppant)를 넣지 않은 상태에서 주입을 멈추면서 유정을 폐쇄하여 시간에 따른 압력 변화를 분석하는 방법으로 mini frac test라고도 한다. 이를 통해 주입에 의해 발생한 균열이 닫힐 때의 압력인 균열복원압(fracture closure pressure), 저류층의 투과도, 초기압력 등의 인자들을 측정할 수 있다. DFIT은 소량의 액체를 주입하기 때문에 기존의 가스정 시험보다 시험 시간이 짧아 저투과성을 띠는 세일가스 저류층에도 적용할 수 있다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 DFIT 중 압력거동은 크게 세 구간으로 나눌 수 있다. 첫 번째 구간은 주입 구간으로 저류층에 액체를 주입하여 균열을 발생시키는 구간이다. 압력이 최고점에 도달했을 때 균열이 만들어지

기 시작하며 이때의 압력을 초기파쇄압력(breakdown pressure)이라 한다. 균열이 발생되면 유정을 폐쇄하는데 이후 균열이 닫힐 때까지 두 번째 구간인 균열 복원 전 구간(before closure period)의 데이터로부터 균열 복원 전 분석(before closure analysis)을 수행한다. 일반적으로 유정폐쇄 직후에 압력이 급격히 떨어지는 현상이 있는데 이는 수압파쇄 중 발생한 마찰 압력 효과가 사라지는 것으로 이 압력이 모두 사라진 순간의 압력을 ISIP(instantaneous shut in pressure)라 한다. 그러므로 균열 복원 전 분석은 정확하게 ISIP와 균열복원압 사이의 구간에서 수행한다. Nolte(1979)는 균열 내의 압력 변화를 새로운 시간 함수인 G -함수(G -function)를 이용하여 균열의 특성을 포함한 관계식으로 유도하였고, Castillo(1987)가 G -함수와 압력의 선형 관계를 제시하였다. 이후 Mukherjee 외(1991), Barree and Mukherjee (1996), Barree(1998)는 G -함수에 대한 압력의 미분값인 dp/dG 와 이 값에 다시 G -함수를 곱한 Gdp/dG 그래프를 통하여 균열복원압을 구하는 방법을 제시한 바 있다. G -함수 분석법 이외에도 시간 제곱근 분석법(square root time analysis), log-log 분석법을 통하여 균열복원압을 확인할 수 있다.

Fig. 1의 세 번째 구간에서 보는 바와 같이 균열이 닫힌 후에 균열 복원 후 구간(after closure period)의 선형 및 방사형 유동 구간에서 저류층의 투과도와 초기압력 등을 추정할 수 있다. Gu 외(1993)는 충격 시험(impulse test)을 DFIT에 적용한 충격 균열 시험(impulse fracture test) 해석법을 제시하여 최초로 균열 복원 후 압력 거동 식을 유도하였다. Nolte 외(1997)와 Nolte(1997)는 새로운 시간 함수를 정의하여 비교적 정확하게 투과도와 초기압력을 추정하는 방법을 고안하였다. Benekadi and Tiab(2004)은 Gu 외(1993)의 충격 균열 시험에 Nolte의 시간 함수를 적용시킨 수정된 분석법을 제안하

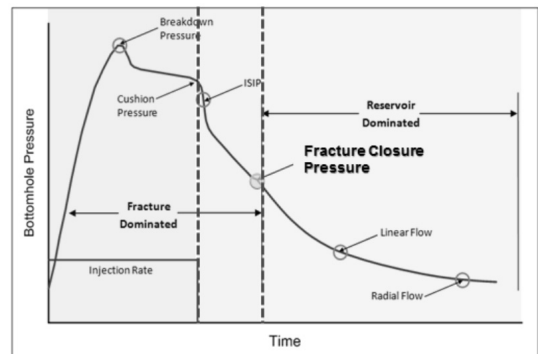


Fig. 1. DFIT pressure history (Nolte et al., 1997).

여 저류층의 물성을 보다 간단하게 구하였다. Soliman 외(2005)는 자신이 고안했던 단기 시험(short term test)을 DFIT에 적용하여 선형 및 방사형 유동식을 유도해 저류층 물성 및 균열 특성을 분석하였다.

3. 이론적 배경

3.1 균열 복원 전 분석

Nolte(1979)는 유정 폐쇄 이후부터 균열이 닫히기 전까지 G -함수에 대한 압력 p 의 선형 관계를 제시하였다. G -함수에 대한 p 의 그래프에서 기울기가 일정한 구간이 끝나는 점을 통해서 균열복원압을 구할 수 있으며 이는 dp/dG 그래프에서 기울기가 0인 구간이 끝나는 지점으로 표현된다. 또한 원점을 지나는 직선이 항상 Gdp/dG 곡선에 접하게 되는데, 이때 직선이 Gdp/dG 곡선에서 벗어나는 지점을 균열복원압으로 결정할 수 있다.

G -함수 분석법과 함께 수행되어 결과의 정확도를 높이기 위해 사용되는 시간 제곱근 분석법은 $\sqrt{\Delta t}$ 에 대한 압력 그래프를 이용하는 방법이다. $\sqrt{\Delta t}$ 에 대한 압력 p 의 그래프에서는 기울기의 부호가 바뀌는 점으로부터 균열복원압을 구할 수 있다. 이는 $dp/d\sqrt{\Delta t}$ 그래프의 최대값으로 나타나며 G -함수 분석법과 마찬가지로 방법으로 원점으로부터 나온 직선에서 $\sqrt{\Delta t} dp/d\sqrt{\Delta t}$ 그래프가 벗어나는 지점으로부터 또한 균열복원압을 구할 수 있다.

Δt 에 대한 ISIP으로부터의 압력 변화 Δp 와 $\Delta t d(\Delta p)/d(\Delta t)$ 의 log-log 그래프를 통해 균열 복원 전, 후의 유동 구간을 판단할 수 있다. 일반적으로 균열복원 직전에 Δp 와 $\Delta t d(\Delta p)/d(\Delta t)$ 그래프가 평행하며 1/2의 기울기를 보이는데, 이 구간에서 선형 유동이 관찰된다. 이 평행한 구간이 끝나는 점으로 다시 한 번 균열복원압을 확인할 수 있다. log-log 분석법에서 도함수 그래프의 기울기를 통하여 균열 복원 후 구간에서의 유동 구간 또한 판단할 수 있다. 균열복원점 이후의 데이터에서 기울기가 -1/2일 경우 선형 유동 구간, -1일 경우 방사형 유동 구간으로 판단한다.

Barree 외(2009)의 경험식에 따르면 투과도 k 는 균열 복원점에서의 G -함수 균열복원시간에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$k = \frac{0.0086\mu_f \sqrt{0.01p_2}}{\phi_{ct} \left(\frac{G_c E r_p}{0.038} \right)^{1.96}} \quad (1)$$

여기서, μ_f 는 주입 유체의 점성도, p_2 는 균열이 복원 될

때까지의 순 압력 변화, 즉 ISIP와 균열복원압의 차이이며, ϕ 는 공극률, c_t 는 총 압축률(total compressibility), G_c 는 G -함수 균열복원시간, E 는 탄성계수(Young's modulus), r_p 는 저장계수(storage ratio)이다. G -함수 투과도식을 사용하기 위해서는 암석의 고유 물성인 탄성계수 E 가 필요하기 때문에 정확한 분석에 어려움이 있다. 본 연구에서는 일반적으로 알려진 셰일가스전의 탄성계수의 범위를 적용하여 투과도의 범위를 추정하였다.

3.2 균열 복원 후 분석

균열 복원 후 분석법(after closure analysis)은 Cooper 외(1967)가 제시한 대수층 시험(aquifer test) 식으로부터 충격 균열 시험 식을 유도한 Gu 외(1993)에 의해서 최초로 제안되었다. 이후 Nolte 외(1997)와 Nolte(1997)는 균열 복원 후 분석을 위하여 새로운 시간 함수 F_L 를 제시하였으며 이를 이용하여 균열 복원 후 선형 유동 구간에서의 압력 거동을 다음과 같이 나타내었다.

$$\Delta p = C_L \sqrt{\frac{\pi\mu}{k\phi c_t}} F_L = m_L F_L \quad (2)$$

여기서, C_L 은 누설계수(leakoff coefficient), μ 는 저류층 유체의 점성도이다. 선형 유동 구간에서는 압력 변화 Δp 가 시간 함수 F_L 에 대하여 기울기 m_L 을 갖는 선형관계를 보인다. 이를 이용하여 균열 복원 후 선형 유동 구간에서 누설 계수와 초기압력을 추정할 수 있다. 균열 복원 후 방사형 유동 구간은 전통 가스정 시험법의 균열 저류층 압력 거동으로부터 유도되며 그 식은 아래와 같다.

$$\Delta p = \frac{V\mu}{4\pi k h t_c} \left(\frac{\pi}{2} F_L \right)^2 = \frac{\pi V\mu}{16 k h t_c} F_L^2 = m_R F_R \quad (3)$$

여기서, V 는 주입 유체의 체적, t_c 는 균열복원시간이다. 방사형 유동 구간에서 시간 함수 F_R 에 대한 압력 변화의 그래프는 선형관계를 보이며 이때 기울기 m_R 을 통해서 투과도를 추정할 수 있고, 외삽을 통한 절편 값을 이용하여 저류층의 초기압력을 추정할 수 있다.

Nolte 방사형 시간 함수 F_R 에 대한 압력 p 의 반로그 도함수에 대한 log-log 그래프 상에서 선형 유동 구간과 방사형 유동 구간은 각각 기울기 -1/2과 -1을 나타낸다. 기울기 -1이 관찰된 방사형 유동 구간을 F_R 에 대한 p 의 그래프에 도시한 후 그 구간의 기울기와 절편을 식 (3)에 적용하여 저류층의 투과도와 초기압력을 구할 수

있다. 선형 유동 구간에서도 같은 방법으로 누설 계수와 저류층 초기압력을 추정할 수 있다.

Soliman(1986)은 매우 짧은 생산 구간을 이용해서 압력상승시험(pressure buildup test)을 수행하는 단기 시험을 고안했으며, 후에 단기 시험을 DFIT에 적용하였다(Soliman, 2005). 선형 및 방사형 유동 구간에 대해 제시한 압력 거동식은 각각 다음과 같다.

$$\Delta p = 31.05 \frac{V}{h} \left(\frac{\mu}{\phi c_f k x_f^2} \right) \left(\frac{1}{t_{inj} + \Delta t} \right)^{0.5} \quad (4)$$

$$\Delta p = \frac{1694.4 V \mu}{kh} \frac{1}{t_{inj} + \Delta t} \quad (5)$$

여기에서, x_f 는 균열 반길이, t_{inj} 는 주입시간이다. Nolte 균열 복원 후 분석과 마찬가지로 방사형 유동 구간이 나타나면 저류층의 투과도와 초기압력을 추정할 수 있으며, 선형 유동 구간에서도 초기압력과 함께 균열 반길이를 추정할 수 있다. 추정된 균열 반길이를 통해서 DFIT이 유정 손상(skin damage) 범위 이상으로 균열이 전파되었는지 여부를 판단하여 시험의 타당성을 검토할 수 있다.

Soliman의 균열 복원 후 분석법은 방법적인 측면에서 Nolte의 분석법과 매우 흡사하다. log-log 그래프에서 식 (4)와 (5)의 $(t_{inj} + \Delta t)^2 dp/dt$ 의 기울기가 각각 1/2, 0인 점을 이용하여 유동 구간을 판별할 수 있다. 방사형 유동 구간을 확인하면 식 (5)를 이용하여 $1/(t_{inj} + \Delta t)$ 에 대한 p 그래프의 기울기와 절편을 구하여 저류층 투과도와 초기압력을 추정할 수 있다. 마찬가지로 방법으로 선형 유동 구간이 나타나면 식 (4)를 이용하여 균열 반길이와 초기압력을 추정할 수 있다.

Benekadi and Tiab(2004)은 Gu 외(1993)가 유도한 충격 균열 시험식과 Nolte 외(1997)와 Nolte(1997)가 제시한 시간 함수를 이용하여 수정된 분석법을 제시하였다. 전통 가스정 시험법과 마찬가지로 하나의 log-log 그래프 안에서 시간함수에 대한 압력과 압력의 도함수를 통해 분석할 수 있으며 이때 식은 아래와 같다.

$$\log(\Delta p) = \log(F_R) + \log\left(\frac{\pi V \mu}{16kht_c}\right) \quad (6)$$

$$\log\left[\frac{d(\Delta p)}{d(F_R)}\right] = \log\left(\frac{\pi V \mu}{16kht_c}\right) \quad (7)$$

log-log 그래프에서 F_R 에 대한 Δp 의 기울기는 1이

고, $d(\Delta p)/d(F_R)$ 의 기울기는 0이다. 즉 방사형 유동 구간에서 Δp 그래프의 기울기가 1인 직선의 절편 값과 $d(\Delta p)/d(F_R)$ 그래프의 기울기가 0인 지점의 값이 같으며 그 값을 이용하여 저류층의 투과도를 추정할 수 있다. 실제 데이터를 이용하여 분석을 수행할 때에는 저류층의 초기압력을 알 수 없기 때문에 Δp 그래프 없이 $d(\Delta p)/d(F_R)$ 그래프를 이용하여 기울기가 0인 값을 통해 투과도를 구한 뒤 그 점으로부터 기울기가 1인 직선과 데이터를 맞춤으로써 초기압력을 구할 수 있다.

4. 현장 데이터 분석

본 연구에서는 균열 복원 전과 균열 복원 후 구간에서 각각의 분석법을 이용하여 국의 3개의 저류층의 DFIT 현장 자료를 분석하였다. 균열 복원 전 구간에서는 G -함수 분석법, 시간 제곱근 분석법, log-log 분석법을 이용하여 균열복원압을 추정하였다. 균열 복원 후 구간에서는 방사형 유동 구간이 나타날 때 Nolte, Soliman, Benekadi의 균열 복원 후 분석법을 이용하여 각각 저류층의 투과도와 초기압력을 구하였으며 G -함수 투과도 추정식을 통해서 구한 투과도 범위와 비교하였다. G -함수 투과도 추정식을 사용하기 위해서는 정확한 탄성계수가 필요하지만 이에 대한 데이터가 부족하여 일반적으로 세일가스 저류층에서 많이 나타나는 탄성계수의 범위인 1~9 Mpsi를 대입하여 투과도의 범위를 추정하였다. 선형 유동 구간에서도 Nolte와 Soliman의 분석법에서 초기압력과 함께 각각 누출 계수와 균열 반길이를 추정하였다.

4.1 가스전 A

가스전 A 데이터는 치밀가스 저류층에서 DFIT을 수행한 자료이다. 우선 균열 복원 전 구간에서 균열복원압을 구하기 위해서 G -함수 분석법을 Fig. 2와 같이 수행한다. 분석 결과 균열복원압 p_c 는 4,148 psi, 균열복원 시간 t_c 는 153.63 min이고, G -함수 균열복원시간 G_c 는 7로 나타났다. 데이터 초기에 직선에 접하지 않는 부분은 G -함수식의 가정한 일정한 누출이 일어나지 않아 생긴 것이며 균열이 닫히기 직전에는 항상 일정한 누출이 일어나기 때문에 직선과 접하는 지점이 생겨 균열복원압 추정이 가능하다. G -함수 분석법을 통해 구한 균열복원압은 시간 제곱근 분석법을 통해서 확인할 수 있다. Fig. 3에서 가스전 A의 데이터를 $\sqrt{\Delta t}$ 에 대한 압력 p , $dp/d\sqrt{\Delta t}$, $\sqrt{\Delta t} dp/d\sqrt{\Delta t}$ 그래프로 각각 나타내었다. 압력 그래프는 해석을 할 때 많은 오차가 발생할 수 있기 때문에 $dp/d\sqrt{\Delta t}$, $\sqrt{\Delta t} dp/d\sqrt{\Delta t}$ 그래프를 통해 주

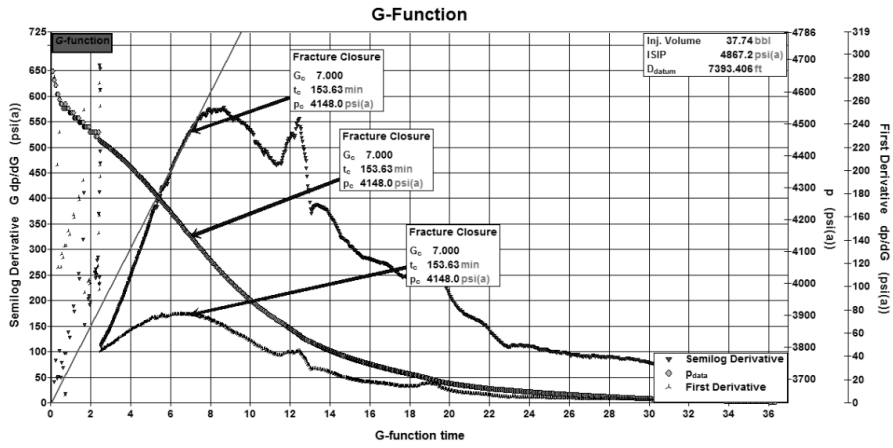


Fig. 2. G-function plot for gas field A.

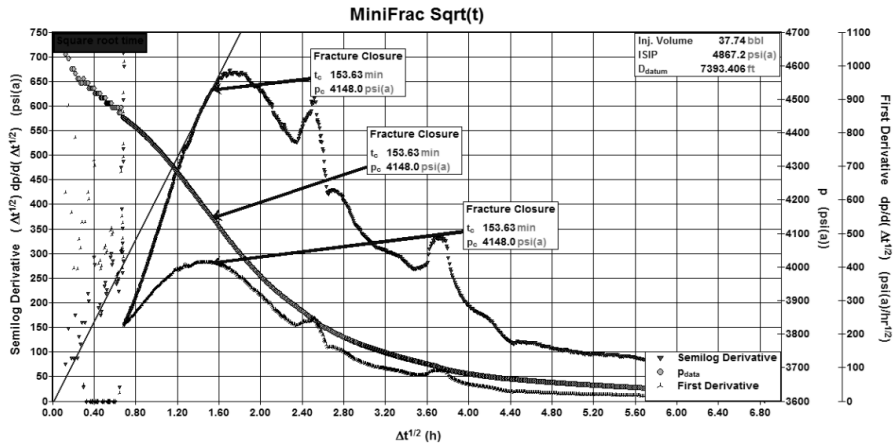


Fig. 3. Square root time plot for gas field A.

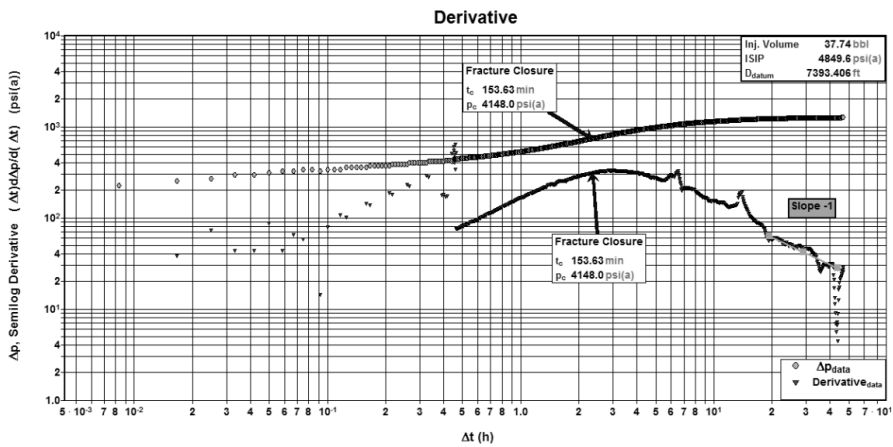


Fig. 4. Log-log derivative plot for gas field A.

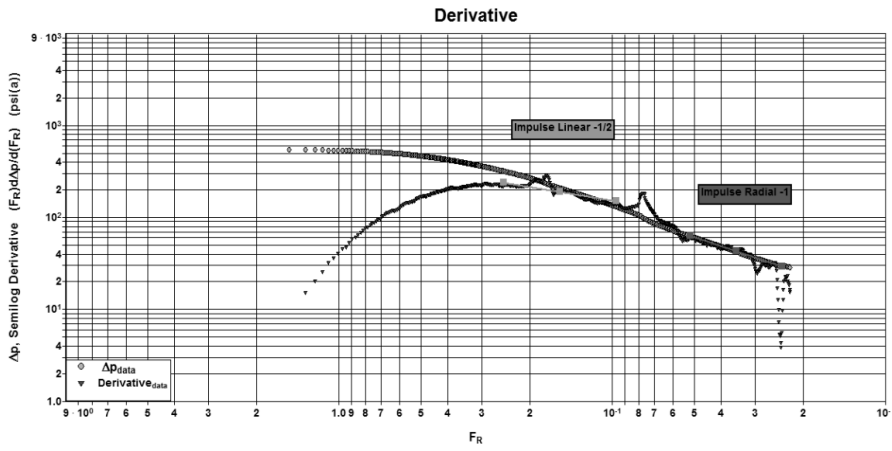


Fig. 5. Nolte derivative plot for gas field A.

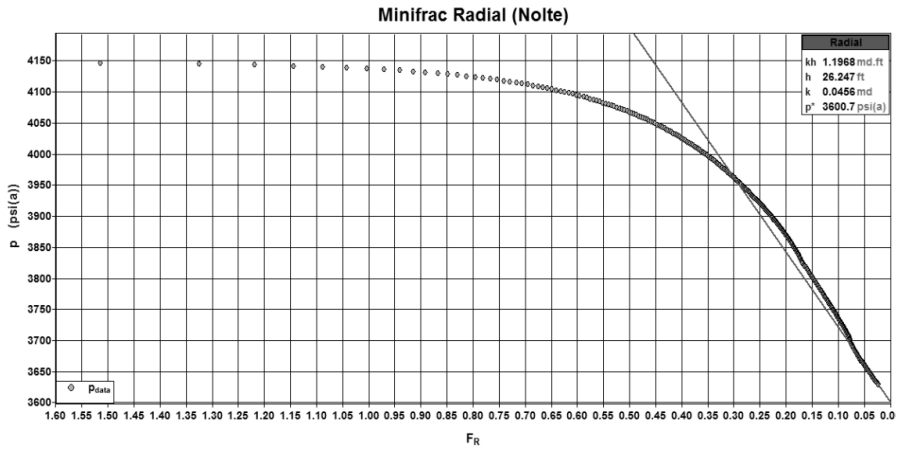


Fig. 6. Nolte radial flow plot for gas field A.

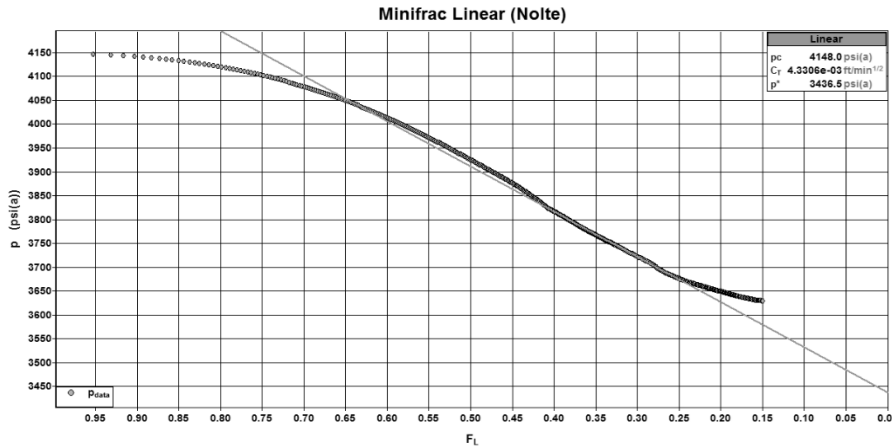


Fig. 7. Nolte linear flow plot for gas field A.

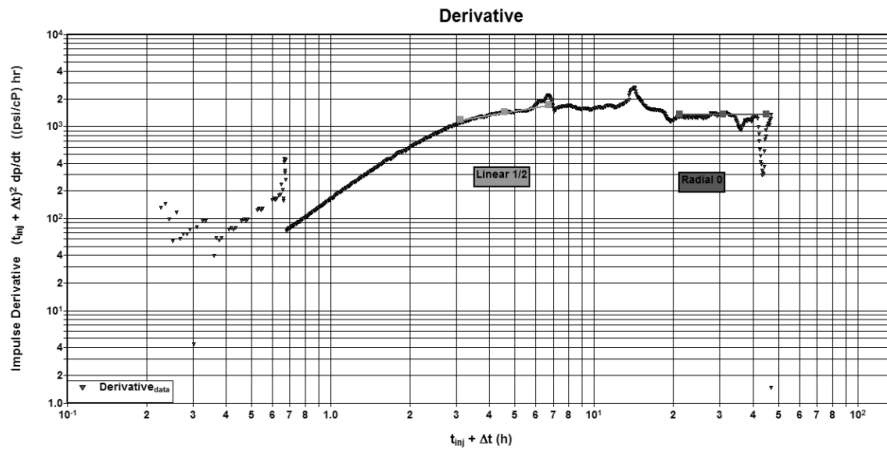


Fig. 8. Soliman derivative plot for gas field A.

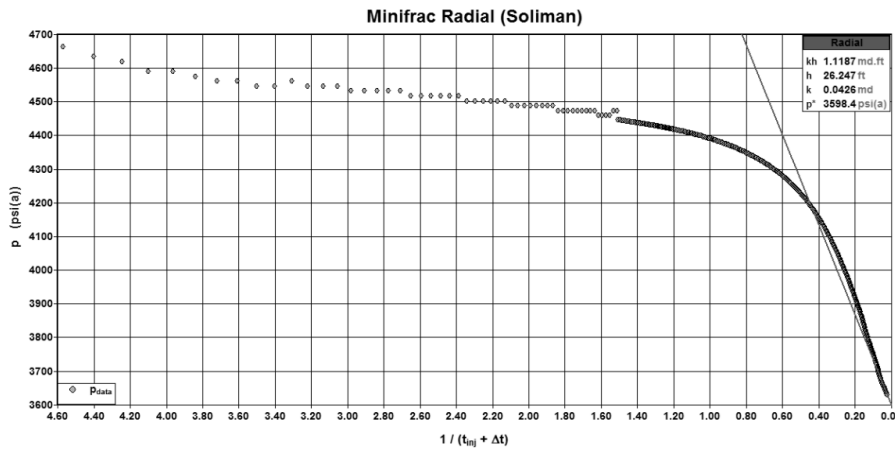


Fig. 9. Soliman radial flow plot for gas field A.

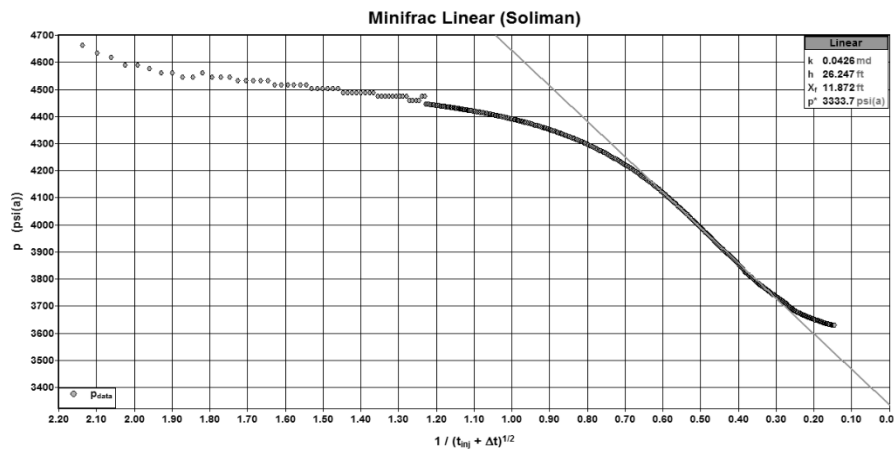


Fig. 10. Soliman linear flow plot for gas field A.

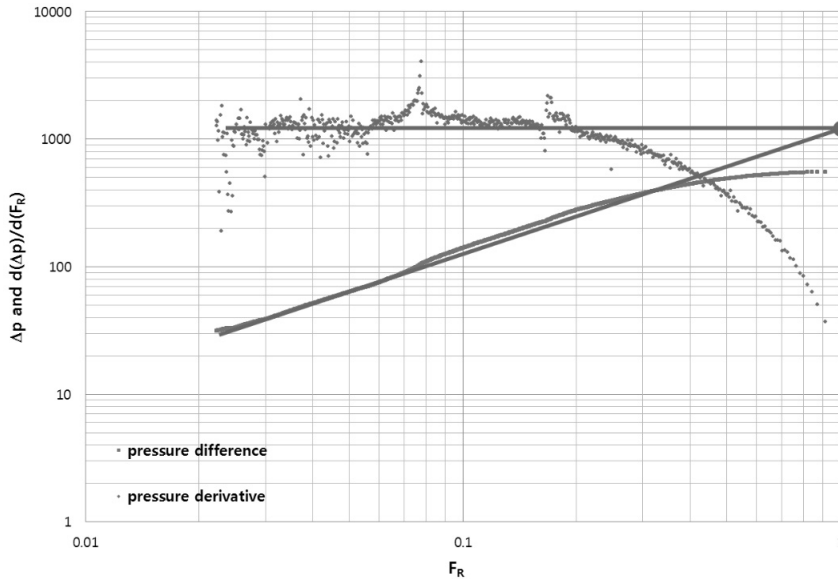


Fig. 11. Benelkadi radial flow plot for gas field A.

된 분석을 수행한다. $dp/d\sqrt{\Delta t}$ 그래프에서의 최대값과 $\sqrt{\Delta t} dp/d\sqrt{\Delta t}$ 그래프에 접하는 직선이 떨어지는 점을 통해서 G -함수 분석법으로 구한 균열복원압 4,148 psi를 확인할 수 있었다. Fig. 4는 유정폐쇄 후의 시간 Δt 에 대한 압력과 압력의 반로그 도함수를 log-log 그래프에 도시한 것이며 두 그래프가 1/2의 기울기로 평행을 이루는 구간이 끝나는 점을 통해서 균열복원압을 구하였다. 이 같은 방법의 경우 단독으로 사용하면 평행 구간을 정하는 것이 모호할 수 있지만 앞에서 수행한 G -함수 분석법과 시간 제곱근 분석법을 함께 사용한다면 균열복원압을 한 번 더 확인할 수 있는 방법이 된다. 또한 log-log 그래프의 후기 시간대의 기울기를 통하여 균열 복원 후 유동 구간을 판별할 수 있으며 Fig. 4에서는 기울기가 -1이 나타나므로 방사형 유동 구간이 나타날 것으로 예측된다.

G -함수 투과도 추정식 (1)을 이용하여 저류층 투과도를 추정하기 위해서 일반적인 셰일가스 저류층 탄성계수의 범위인 1~9 Mpsi를 넣어 투과도의 범위를 구하였다. 주입 유체의 점성도 1 cp, ISIP 4,850 psi, 공극률 0.07, 총 압축률 $1.59 \times 10^{-4} \text{ psi}^{-1}$, G -함수 균열복원시간은 7이며 저장계수를 1로 가정하면 투과도의 범위를 0.00010~0.07416 md로 추정할 수 있다.

Nolte의 균열 복원 후 분석을 수행하기 위해서는 유동 구간 판별이 우선 필요하다. Fig. 4의 log-log 그래프로부터 $\Delta t > 2 \text{ hr}$ 에서 방사형 유동 구간이 나타날 것으

로 예상되었으며 Fig. 5에서 기울기 -1인 구간을 통해서 방사형 유동 구간을 다시 한 번 확인할 수 있었다. 방사형 유동 구간이 확인되면 Fig. 6의 방사형 유동 그래프의 기울기와 절편으로부터 투과도 0.04560 md, 초기압력 3,601 psi를 결정할 수 있다. 이때 투과도 값은 식 (1)으로부터 구한 투과도 범위에 포함됨을 알 수 있다. 기울기가 -1/2인 선형 유동 구간에서도 마찬가지로 방법으로 초기압력 3,437 psi를 구하였으며 방사형 유동 구간에서 추정된 투과도를 이용하여 누출 계수 $4.33 \times 10^{-3} \text{ ft/min}^{1/2}$ 을 구하였다(Fig. 7). Soliman의 균열 복원 후 분석법에서도 마찬가지로 방법으로 Fig. 8의 기울기 0인 구간으로부터 방사형 유동을 확인하고 Fig. 9의 방사형 유동 그래프를 통해 분석을 수행하였다. 이때 투과도는 0.04262 md, 초기압력은 3,598 psi로 Nolte 분석법과 매우 흡사한 값을 보이며, 투과도 추정식으로부터 구한 투과도 범위에도 포함됨을 알 수 있다. 선형 유동 구간을 통해서 얻은 초기압력은 3,334 psi이며, 방사형 유동 구간에서 얻은 투과도 값을 이용해서 구한 균열 반길이는 11.9 ft로 추정되었다(Fig. 10). Fig. 11은 Benelkadi 균열 복원 후 분석 그래프이며 도함수의 기울기가 0인 구간의 값을 이용하여 투과도 0.04865 md를 얻었으며 이 값 또한 G -함수 투과도 추정식으로부터 구한 투과도 범위 안에 들어감을 알 수 있었다. 초기압력 또한 3,603 psi로 앞서 구한 값과 매우 유사했다.

4.2 가스전 B

가스전 B에서 G-함수 분석법을 통해서 균열복원압 1,1795 psi, 균열복원시간 269.76 min, G-함수 균열복원시간 11.953을 구하였다. 시간 제곱근 분석법을 통해서도 균열복원압을 확인할 수 있다. 가스전 B에서는 $dp/d\sqrt{\Delta t}$ 그래프의 최대값은 잘 나타나지 않았으며 $\sqrt{\Delta t} dp/d\sqrt{\Delta t}$ 그래프를 통해서 균열복원압을 확인하였다. log-log 분석법에서는 평행한 구간이 잘 나타나지 않아 균열복원압을 판단하기 어려웠으며 후기 시간대에서는 곡선의 변동(fluctuation)이 약간 있지만 기울기가 -1인 방사형 유동 구간이 잘 나타나 균열 복원 후 분석을 수행하였다.

G-함수 투과도 추정식을 이용하기 위해서 앞서와 마찬가지로 방법으로 탄성계수의 범위 1~9 Mpsi를 이용하여 투과도를 구하였다. 주입 유체의 점성도 1 cp, ISIP 12,796 psi, 공극률 0.1, 총 압축률 $2.64 \times 10^{-5} \text{ psi}^{-1}$, G-함수 균열복원시간은 11.953이며 저장계수를 1로 가정하여 투과도 범위 0.00177~0.13132 md를 추정하였다.

log-log 분석법과 마찬가지로 Nolte의 균열 복원 후 분석에서도 곡선의 변동과 함께 방사형 유동 구간이 나타나며 이 시점부터 균열 복원 후 방사형 유동 구간 분석을 수행하였다. 투과도 0.00191 md, 초기압력 10,970 psi를 구하였으며 이는 투과도 추정식에서 구한 투과도의 범위에 포함되었다. 선형 유동 구간에서도 같은 방법으로 누출 계수 $8.6798 \times 10^{-4} \text{ ft/min}^{1/2}$ 과 초기압력 10,818 psi를 추정하였다. Soliman의 분석법에서도 마찬가지로 방사형 유동 구간에서 분석을 수행하여 기울기와 절편을 통해 투과도 0.00204 md, 초기압력 10,979 psi를 구하였다. 이는 Nolte 분석법에서 구한 값과 매우 흡사하며 투과도 추정식에서 구한 투과도의 범위에도 포함되었다. 마찬가지로 선형 유동 구간에서는 균열 반경이 16.4 ft와 초기압력 10,812 psi를 추정하였다. Benelkadi의 분석법에서도 기울기가 0인 구간이 마지막 시간에 나타났으며 이 구간을 이용하여 투과도 0.00180 md, 초기압력 10,958 psi를 추정하였다.

4.3 유전 C

DFIT은 비전통 저류층 뿐만 아니라 전통 저류층에서

또한 적용 가능하다. 유전 C는 오일 저류층에서 DFIT을 수행한 자료이다. 전통 저류층에서는 일반적으로 압력상승시험을 통해서 저류층 물성을 구하지만 투과도가 낮아 수압파쇄가 필요할 경우 DFIT을 수행하여 저류층 물성을 구할 수도 있다. 유전 C는 확보한 데이터의 문제로 균열 복원 후 구간의 자료만을 분석하였다. 마찬가지로 방법으로 Nolte 도함수 그래프에서 기울기 -1인 구간을 통하여 방사형 유동 구간을 확인하였고 이를 통해 Nolte 방사형 유동 그래프에서 투과도 12.10 md, 초기압력 2,340 psi를 구하였다. 선형 유동 구간에서도 앞서와 같은 방법으로 누출 계수 $0.0235 \text{ ft/min}^{1/2}$ 과 초기압력 2,113 psi를 추정하였다. Soliman 도함수 그래프에서도 기울기 0인 구간으로부터 방사형 유동 구간을 확인하였고 이를 이용하여 투과도 11.41 md, 초기압력 2,338 psi를 구하였다. 선형 유동 구간에서는 균열 반경이 25.6 ft와 초기압력 2,054 psi를 추정할 수 있었다. 또한 Benelkadi 분석법을 이용하여 투과도 12.44 md, 초기압력 2,345 psi를 추정하였다.

3개의 데이터의 분석 결과를 비교하기 위해 Table 1, 2에 투과도와 초기압력을 각각 정리하였다. Table 1에서 Nolte, Soliman, Benelkadi의 분석법으로 구한 각 데이터의 투과도는 유사하게 나왔으며 이때 그 값들은 모두 G-함수 투과도 추정식으로 구한 투과도 범위에 포함되는 것을 확인할 수 있다. 균열 복원 후 분석법에서 구한 투과도를 역으로 이용하여 G-함수 투과도 추정식으로부터 탄성계수를 추정할 수도 있었으며, 이를 통해 가스전 A, B의 암체의 탄성계수는 각각 약 1.3 Mpsi, 약 8.4 Mpsi로 추정되었다. Table 2에서는 Nolte와 Soliman의 분석법에서 구한 초기압력을 비교하였다. 방사형 유동 구간에서 각 분석법으로 구한 초기압력은 매우 유사했으며 선형 유동 구간에서 구한 초기압력은 방사형 유동 구간에서 구한 초기압력과 약간의 오차가 있었지만 비슷한 값을 얻었다. 선형 유동 구간 보다 방사형 유동 구간에서 구한 초기압력이 더 정확하지만 만약 극저투과도 저류층에서 시험 시간의 문제로 방사형 유동 구간이 확인되지 않으면 선형 유동 구간의 자료를 이용하여 유사 초기압력을 추정할 수 있다.

Table 1. Results of permeability estimation using DFIT

Case	G-function permeability estimation (md)	Nolte (md)	Soliman (md)	Benelkadi (md)
A	0.00010~0.07416	0.04560	0.04262	0.04865
B	0.00177~0.13132	0.00191	0.00204	0.00180
C		12.10	11.41	12.44

Table 2. Results of initial pressure estimation using DFIT

Case	Analysis Flow regime	Nolte (psi)	Soliman (psi)	Benelkadi (psi)
A	Radial flow	3,601	3,598	3,603
	Linear flow	3,437	3,334	
B	Radial flow	10,970	10,979	10,958
	Linear flow	10,818	10,812	
C	Radial flow	2,340	2,338	2,345
	Linear flow	2,113	2,054	

5. 요약 및 결론

DFIT은 수압파쇄 설계와 파쇄 후 생산량 예측을 하기 위한 매우 중요한 시험이다. 본 연구에서는 DFIT의 여러 가지 분석법을 현장 데이터에 적용한 후 각각의 분석법으로 도출된 결과를 비교 분석하여 타당성을 검토하였다. DFIT은 각 분석법들을 단독적으로 사용할 경우 그 결과를 잘못 해석할 수 있으므로 여러 가지 분석법을 동시에 적용하여 결과를 대조 검토하는 것이 중요하다. 균열 복원 전 구간에서는 G -함수 분석법, 시간 제곱근 분석법, log-log 분석법을 통해서 하나의 균열복원압을 구할 수 있다. Nolte, Soliman, Benelkadi 균열복원 후 분석법으로 방사형 유동 구간에서 일관된 저류층 투과도와 초기압력을 얻을 수 있다. 만약 일관된 분석 값을 얻지 못했다면 방사형 유동 구간의 설정상의 문제일 가능성이 크므로 분석 구간 재설정 필요하다. 이렇게 얻은 각각의 투과도 값들을 G -함수 투과도 추정식을 통해 얻은 투과도의 범위에 포함됨을 통해 타당성을 검증하였다. 정확한 암석 물성 값을 알 수 있다면 더욱 타당한 값을 추정할 수 있을 것이다. 또한 역으로 투과도를 이용하여 탄성계수와 같은 암석 역학적 물성을 추정하였으며 이 값 역시 일반적인 셰일가스의 탄성계수 범위 내에 있음을 확인하였다. 선형 유동 구간에서는 누출 계수, 균열 반길이, 저류층 초기압력을 추정할 수 있었다. 선형 유동 구간의 자료는 방사형 유동 구간의 자료에 비해 부정확할 수 있지만 보완적 측면에서 자료를 활용할 수 있다. 선형 유동 구간 자료를 통해 얻은 균열 반길이를 통하여 시험의 영향 범위가 일반적인 지층 손상 영역을 초과하고 있음을 확인함으로써 방사형 유동 구간 분석 결과의 신뢰도를 검증하였다. 선형 유동 구간에서의 초기압력은 방사형 유동 구간에서 얻은 결과와 약간의 오차는 있었지만 방사형 유동 구간이 나타나지 않았을 경우 비교적 정확하게 초기압력을 추정할 수 있다. DFIT을 이용하여 저류층의 물성을 구하기

위해서는 하나의 데이터에 여러 가지 방법을 적용하여 교차 검증을 함으로써 정확도를 높이는 것이 중요하다.

감사의 말

본 연구는, 지식경제부 에너지, 자원융합 원천기술개발 사업의 “셰일 및 치밀가스전 생산평가기술 개발” 과제(2011201030001B)로 지원받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

Reference

1. Barree, R.D., Mukherjee, H., 1996, Determination of Pressure Dependent Leakoff and Its Effect on Fracture Geometry, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, October 6-9.
2. Barree, R.D., 1998, Applications of Pre-Frac Injection/Falloff Tests in Fissured Reservoirs - Field Examples, SPE Rocky Mountain Regional/Low-Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, USA, April 5-8.
3. Barree, R.D., Barree, V.L and Craig, D.P., 2009, Holistic Fracture Diagnostics: Consistent Interpretation of Prefrac Injection Tests Using Multiple Analysis Methods, SPE Production & Operations, 24.3, 396-406.
4. Benelkadi, S. and Tiab, D., 2004, Reservoir Permeability Determination Using After-Closure Period Analysis of Calibration Tests, SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 7.3, 230-237.
5. Castillo, J.L., 1987, Modified Fracture Pressure Decline Analysis Including Pressure-Dependent Leakoff, Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, USA, May 18-19.
6. Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D. and Papadopoulos, I.S., 1967, Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water, Water Resources Research, 3.1, 263-269.
7. Ewens, S., Idorenyin, E., O'Donnell, P., Brunner, F. and Santo M., 2012 Executing Minifrac Tests and Interpreting After-Closure Data for Determining Reservoir Characteristics in Unconventional Reservoirs, SPE Canadian

- Unconventional Resources Conference, Calgary, Alberta, Canada, October 30 - November 1.
8. Gu, H., Elbel, J.L., Nolte, K.G., Cheng, A.H-G. and Abousleiman, T., 1993, Formation Permeability Determination Using Impulse-Fracture Injection, Production Operations Symposium, Oklahoma City, OK, USA, March 21-23.
 9. Joong Ho Synn, Hee Soon Shin, Sung Oong Choi and Hi Keun Lee, 1994, Estimation of in-situ stresses and the effect of a pre-existing inclined fracture by hydraulic fracturing, Tunnel & Underground Space, 4.1, 55-62.
 10. Mukherjee, H., Larkin, S. and Kordziel, W., 1991, Extension of Fractured Decline Curve Analysis to Fissured Formations, Low-Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, USA, April 15-17.
 11. Nolte, K.G., 1979, Determination of Fracture Parameters from Fracturing Pressure Decline, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, NV, USA, September 23-26.
 12. Nolte, K.G., Maniere, J.L., Owens, K.A., 1997 After-Closure Analysis of Fracture Calibration Tests, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, USA, October 5-8.
 13. Nolte, K.G., 1997, Background for After-Closure Analysis of Fracture Calibration Tests, Unsolicited companion paper to SPE 38676.
 14. Soliman, M.Y., 1986, Analysis of Buildup Tests with Short Producing Time, SPE formation Evaluation, 1.4, 363-371.
 15. Soliman, M.Y., Craig, D., Barko, K., Rahim, Z., Ansah, J. and Adams, D., 2005, After-Closure Analysis to Determine Formation Permeability, Reservoir Pressure, and Residual Fracture Properties, SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Bahrain, March 12-15.

김 태 흥

2012년 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학사



Tel: 02-2220-4428
E-mail: kth1014@hanyang.ac.kr
현재 한양대학교 자원환경공학과 석사과정

이 성 준

2011년 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학사



Tel: 02-2220-4428
E-mail: drafix@hanyang.ac.kr
현재 한양대학교 자원환경공학과 석사과정

이 근 상

1988년 서울대학교 자원공학과 공학사
1990년 서울대학교 자원공학과 공학석사
1995년 The University of Texas at Austin 공학박사



Tel: 02-2220-2240
E-mail: kunslee@hanyang.ac.kr
현재 한양대학교 자원환경공학과 교수
